

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

υπό

ΜΑΡΙΑ ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΥ
ΑΡΓΕΤΤΑ ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΔΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2017

© Γιαννακοπούλου Μαρία, Κουτσουράδη Αργέττα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ.202 παρ.2).

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα ευχαριστούμε ιδιαίτερωσ την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας, Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Επίκουρο Καθηγητή κ. Εφραιμίδη και Καθηγητή κ. Ντακούλα για τις υποδείξεις τους. Επιπλέον, ευχαριστούμε τις οικογένειες και τους φίλους μας για τη στήριξή τους.

Γιαννακοπούλου Μαρία

Κουτσοιράδη Αργέττα

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Γιαννακοπούλου Μαρία, Κουτσουράδη Αργέττα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2017

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των τσιμεντοποιημένων εδαφών, μέσω μιας βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Τα τσιμεντοποιημένα εδάφη είναι αποτέλεσμα είτε φυσικών διεργασιών είτε τεχνικών βελτίωσης στο έδαφος. Τα φυσικά τσιμεντοποιημένα εδάφη συναντώνται σε πολλές περιοχές με κύριο χαρακτηριστικό στην περίπτωση των αμμωδών αποθέσεων την ύπαρξη πρηνών με σημαντική κλίση ή την αυξημένη αντίσταση σε ρευστοποίηση. Οι τεχνικές βελτίωσης των εδαφών, εφαρμόζονται τα τελευταία 30 χρόνια, με σκοπό την αλλαγή της δομής του προβληματικού εδάφους και την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αρχικά, γίνεται εκτενής περιγραφή και μελέτη μιας νέας μεθόδου βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των κοκκωδών εδαφών με τη χρήση βακτηρίων. Η μέθοδος στοχεύει στη δημιουργία δεσμών τσιμεντοποίησης μεταξύ των κόκκων, μέσω χημικών αντιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν και τις οποίες προκαλούν τα βακτήρια. Στη συνέχεια, μελετώνται οι μηχανικές ιδιότητες των φυσικά τσιμεντοποιημένων κοκκωδών και λεπτόκοκκων (αργιλικών) εδαφών, δηλαδή των εδαφών των οποίων οι κόκκοι συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλητικούς δεσμούς, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί φυσικά από τις γεωλογικές διαδικασίες που έλαβαν χώρα στον εδαφικό σκελετό (π.χ διαγένεση). Καθώς η εξαγωγή αδιατάρακτων φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφικών δοκιμίων από το πεδίο αποτελεί εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, μελετάται επιπλέον, η προσθήκη χημικών ουσιών (ενέματα) στα δείγματα, οι οποίες δρουν ως συγκολλητικοί δεσμοί ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους. Η συνηθέστερη των ουσιών αυτών είναι το τσιμέντο Portland. Συμπερασματικά, η βιβλιογραφική αυτή εργασία αποτελεί έναυσμα για την εύρεση νέων πεδίων πειραματικής διερεύνησης της ενίσχυσης του εδάφους με βακτήρια και της αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων με στόχο την βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του.

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTED SOILS

Giannakopoulou Maria, Koutsouradi Argetta

Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 2017

Supervisor: Polyxeni Kallioglou. Lecturer

ABSTRACT

The objective of the diploma thesis is the study of the mechanical behavior of cemented soils, through a bibliographic survey. Cemented soils are the result of either natural processes or soil improvement techniques. Natural cemented soils are encountered in many areas with the main feature in the case of sandy deposits, the existence of slopes with significant incline or increased liquefaction resistance. Soil improvement techniques have been applied over the last 30 years, in order to improve the structure of soils and their mechanical properties. In the framework of this thesis, initially, an extensive description and the analysis of a new method for improving the mechanical behavior of granular soils with the use of bacteria, are provide. The aim of this method is the formation of cementitious bonds between the granules through chemical reactions, in which bacteria are involved. Subsequently, the mechanical properties of naturally cemented granular and fine-grained soils are studied. The naturally cemented soils, are the soils whose granules are bonded together by adhesive bonds, which are naturally created by geological processes that occurred in soil skeleton (e.g diagenesis). As the extraction of undisturbed naturally cemented soil samples from the field is an extremely difficult process, the addition of chemical grouts to the samples, is also being considered. This chemical supplement acts as a cementation bond, between the soil grains and the most common is the Portland cement. The most common chemical grout is Portland cement. In conclusion, this bibliographic could be considered further for finding new fields of experimental work of soil strengthening with the use of bacteria and evaluating experimental results, in order to improve their mechanical behavior.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	18
Εισαγωγή	18
1.1 Γενικά	18
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο.....	19
Κεφάλαιο 2	20
Γενικά στοιχεία για την ενίσχυση εδαφών	20
Κεφάλαιο 3	25
Περιγραφή της μεθόδου βελτίωσης στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφών με βακτήρια	25
3.1 Ιστορικά στοιχεία της μεθόδου βελτίωσης εδαφών με μικρόβια	25
3.2 Ορισμοί για την μέθοδο ενίσχυσης με βακτήρια.....	26
3.3 Γενικά στοιχεία για τα βακτήρια	33
3.3.1 Κατηγορίες βακτηρίων	34
3.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη δράση των βακτηρίων	35
3.4 Εφαρμογές της δράσης των βακτηρίων στη Γεωτεχνική Μηχανική.....	35
3.5 Εκτενής περιγραφή της μεθόδου MICP	45
3.5.1 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο πεδίο	45
3.5.2 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο εργαστήριο.....	48
3.5.3 Σχηματισμός των κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου	49
3.5.4 Πλεονεκτήματα της μεθόδου.....	52
3.5.5 Πεδία εφαρμογής μεθόδου	54
Κεφάλαιο 4	56
Πειραματικές μελέτες βελτίωσης εδαφών με τη χρήση βακτηρίων.....	56
4.1 Γενικά	56
4.2 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης κοκκωδών εδαφών με τη χρήση βιο-υλικών	57
4.2.1 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης της άμμου Toyoura με τη χρήση βακτηρίων.....	57
4.2.2 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης σε χαλαζιακές άμμους με τη χρήση βακτηρίων	64

4.2.3 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης της άμμου Ottawa με τη χρήση βακτηρίων.....	114
4.2.4 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης των άμμων Ottawa, Cameco και Aquarium Rock με τη χρήση βακτηρίων	129
4.2.5 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης των άμμων Itterbeck και ποταμού με τη χρήση βακτηρίων	131
4.2.6 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης των άμμων Ottawa, Nevada και άμμων ασβεστίτη, άστριου και οξειδίου του σιδήρου με τη χρήση βακτηρίων.....	144
4.2.7 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης διαφόρων φυσικών άμμων με τη χρήση βακτηρίων	157
4.3 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης άλλων τύπων εδαφών με τη χρήση βιο-υλικών	177
4.3.1 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης υπολειμματικών εδαφών με τη χρήση βακτηρίων	177
4.3.2 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης οργανικής ιλύος με τη χρήση βακτηρίων.....	179
Κεφάλαιο 5	187
Μελέτη των φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών	187
5.1 Γενικά στοιχεία.....	187
5.1.1 Ανθρακικά εδάφη	187
5.2 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των αμμωδών φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών.....	189
5.3 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των λεπτόκοκκων φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών.....	194
Κεφάλαιο 6	212
Ενίσχυση των εδαφών με τη χρήση τσιμέντου.....	212
6.1 Γενικά στοιχεία.....	212
6.2 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών με τη χρήση τσιμέντου.....	213
6.2.1 Αμμώδη εδάφη	213
6.2.2 Λεπτόκοκκα εδάφη.....	239
6.3 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών με τη χρήση τσιμέντου	246

6.3.1 Αμμώδη εδάφη	246
6.3.2 Λεπτόκοκκα εδάφη	251
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	254
Συμπεράσματα	254
7.1 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα αμμώδη εδάφη με τη χρήση βακτηρίων	254
7.2 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη με τη χρήση βακτηρίων	257
7.3 Φυσικά τσιμεντοποιημένα αμμώδη εδάφη	257
7.4 Φυσικά τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη	257
7.5 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα αμμώδη εδάφη με τη χρήση τσιμέντου Portland	258
7.6 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη με τη χρήση τσιμέντου Portland	259
7.7 Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των τσιμεντοποιημένων με τη χρήση τσιμέντου Portland και των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών (MICP)	260
Βιβλιογραφία	261

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 3.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας της ουρεολυτικής επαγόμενης καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου (Muynck et al., 2010) : (A) Προσέλκυση ιόντων ασβεστίου από τα βακτηριακά κύτταρα. Λαμβάνεται ουρία από βακτήρια και απελευθερώνει αμμώνιο (AMM) και διαλυμένο ανόργανο άνθρακα (DIC), (B) Εμφανίζεται ένας τοπικός υπερκορεσμός παρουσία ιόντων ασβεστίου, με αποτέλεσμα την καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου στο βακτηριακό κυτταρικό τοίχωμα, (C) Ολόκληρο το κύτταρο είναι καλυμμένο με ανθρακικό ασβέστιο (Cheng, 2012).	28
Σχήμα 3.2 Οι 4 φάσεις ανάπτυξης των βακτηρίων συναρτήσει του χρόνου (http://ecourse.uoi.gr/).	30
Σχήμα 3.3 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Alvarado).	32
Σχήμα 3.4 Περιγραφή λειτουργίας του SEM (http://emicroscope.blogspot.gr).	32
Σχήμα 3.5 Σύγκριση μεταξύ των μεγεθών των μικροοργανισμών και των σωματιδίων του εδάφους (Mitchell & Santamarina, 2005).	33
Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών βιο-τσιμεντοποίησης και βιο-απόφραξης (https://www.researchgate.net).	36
Σχήμα 3.7 Απεικόνιση του βακτηρίου <i>Sporosarcina Pasteurii</i> (https://shareahack.com/).	38
Σχήμα 3.8 Επισκόπηση της βιο-διαμεσολαβούμενης καθίζησης CaCO_3 με τη χρήση της υδρόλυσης της ουρίας (Montoya 2012).	39
Σχήμα 3.9 Οι χημικές αντιδράσεις της υδρόλυσης της ουρίας, της ισορροπίας όξινου-βάσης και τελικά της καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου. Με έντονα γράμματα παρατίθενται τα αρχικά υποστρώματα και τα τελικά προϊόντα των αντιδράσεων της υδρόλυσης και της κατακρήμνισης (Van Paassen, 2009).	40
Σχήμα 3.10 a) Η Διαδικασία σχηματισμού βιοφίλμ, b) Ο σχηματισμός βιοφίλμ μέσω 5 διαφορετικών φάσεων (http://www.seraclean.gr , https://mossleingreece.wordpress.com).	44
Σχήμα 3.11 Ταυτόχρονη εφαρμογή των μεθόδων επιφανειακής διήθησης και υποβρύχιας ροής (Cheng, 2012).	47
Σχήμα 3.12 a) Εγκατάσταση επαναλαμβανόμενων χώρων αποθήκευσης, b) Δείγμα του σταθεροποιημένου χαλικώδους εδάφους έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου MICP, c) Εγκατάσταση σωληνώσεων έπειτα από οριζόντια διάτρηση (Dejong, 2013).	48
Σχήμα 3.13 Φωτογραφία Ασβεστίτη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (http://nemertes.lis.upatras.gr).	50
Σχήμα 3.14 Φωτογραφία αραγωνίτη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (http://nemertes.lis.upatras.gr).	51
Σχήμα 3.15 Φωτογραφία βατερίτη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (http://nemertes.lis.upatras.gr).	51

Σχήμα 3.16 Σχηματική απεικόνιση των τριών ειδών κατανομής του ασβεστίου στα κενά των πόρων (Alvarado).....	52
Σχήμα 4.1 Αύξηση της καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου με τη μείωση της σχετικής πυκνότητας (Tsukamoto, 2013).....	59
Σχήμα 4.2 Σχέση διαφοράς κυρίων τάσεων- καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου (Tsukamoto, 2013).....	59
Σχήμα 4.3 Σχέση τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας- καθίζησης CaCO ₃ (Tsukamoto, 2013).	60
Σχήμα 4.4 Σχηματική απεικόνιση του περιστρεφόμενου τραπεζιού και των δοκιμαστικών σωλήνων (Yasuhara, 2015).	61
Σχήμα 4.5 Σχέση μεταξύ του ανθρακικού ασβεστίου που δημιουργείται και της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (Yasuhara, 2015).	62
Σχήμα 4.6 Σχέση της υδραυλικής αγωγιμότητας και του ασβεστίτη που καθιζάνει. Οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν το 2,5,10% του αρχικού όγκου των πόρων (Yasuhara, 2015).....	63
Σχήμα 4.7 a) Με 'α' συμβολίζονται οι σφαιρικοί κρύσταλλοι και με 'β' οι ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι, b) Ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής των σφαιρικών κρυστάλλων σε ρομβοεδρικούς (Al Thawadi, 2008).....	67
Σχήμα 4.8 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στην βιο-τσιμεντοποίηση των στηλών άμμου με την συγκέντρωση των βακτηρίων επί τόπου. Με P, στην εικόνα συμβολίζεται η περισταλτική αντλία (Al Thawadi, 2008).....	68
Σχήμα 4.9 Δεδομένα διατμητικών κυμάτων, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ταχύτητας, για: a) μη τσιμεντοποιημένο δείγμα (έπειτα από την εισαγωγή των βακτηρίων στις στήλες άμμου), b) τσιμεντοποιημένα δείγματα, έπειτα από 20 ώρες αφέτου ξεκίνησε η τσιμεντοποίηση. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τη χρονική στιγμή άφιξης του κύματος στον αντίθετο μετατροπέα (Al Thawadi, 2008).	70
Σχήμα 4.10 Ανάπτυξη της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και ρυθμός ανάπτυξης της ταχύτητας κατά τη διάρκεια της τσιμεντοποίησης, έπειτα από 20 ώρες θεραπείας (μπλε καμπύλη). Με A συμβολίζεται η περίοδος, έπειτα από την πλύση με νερό, με B η περίοδος, έπειτα από την πλύση με τη βακτηριακή καλλιέργεια (πάνω από το σημείο αυτό ξεκινάει η αντίδραση τσιμεντοποίησης) και με C, το χρονικόδιάστημα, πειτα από την πλύση με διάλυμα τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).	70
Σχήμα 4.11 Ανάπτυξη της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων κατά τη διάρκεια 75 ωρών από την έναρξη της διαδικασίας της τσιμεντοποίησης. A: Έπειτα από την πλύση με νερό, B: Έπειτα από την πλύση με τη βακτηριακή καλλιέργεια, C: Πρώτη έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης, D: Δεύτερη έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης, E: Έπειτα από την δεύτερη πλύση με τη βακτηριακή καλλιέργεια, F: Τρίτη έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).....	71

Σχήμα 4.12 Σχέση της αποκλίνουσας τάσης με την αζονική παραμόρφωση, μέσω της δοκιμής ανεμπόδιστης μονοαζονικής θλίψης, για την τσιμεντοποιημένη άμμο (Al Thawadi, 2008).	72
Σχήμα 4.13 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στις βιο-τσιμεντοποιημένες στήλες άμμου, μήκους 1m. P: περισταλτική αντλία (Al Thawadi, 2008).	73
Σχήμα 4.14 Μηχανική αντοχή (πάνω καμπύλη), παραγωγή NH_4^+ (μεσαία καμπύλη), καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου (κάτω καμπύλη). Οι μετρήσεις των ανωτέρω μεγεθών, αφορούν την τσιμεντοποιημένη στήλη άμμου 1m (Al Thawadi, 2008).	74
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα της αντοχής σε σχέση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης, μετά το τέλος της τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).	76
Σχήμα 4.16 Το παραγόμενο ανθρακικό ασβέστιο (πάνω καμπύλη) και η ανεμπόδιστη μονοαζονική αντοχή (κάτω καμπύλη) των 5 στηλών άμμου στις οποίες εισήχθησαν διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).	78
Σχήμα 4.17 Πειραματική εγκατάσταση,(a)Έγχυση έγινε με την προσθήκη υγρών μέσων στο ανώτερο όριο του εδάφους υπό την επίδραση της βαρύτητας, (b) Κατά τη διάρκεια του σταδίου συγκράτησης, η άμμος διατηρούνταν κορεσμένη ανά πάσα στιγμή (Al Qabany, 2012).	82
Σχήμα 4.18 Αποδοτικότητα αντιδρώντων σε διαφορετικούς ρυθμούς εισαγωγής διαλύματος ουρίας-χλωριούχου ασβεστίου (Al Qabany, 2012).	84
Σχήμα 4.19 Σύγκριση των μεθόδων της Α) υποβρύχιας ροής (κορεσμένο έδαφος) και Β) επιφανειακής διήθησης (ακόρεστο έδαφος) (Cheng, 2012).	86
Σχήμα 4.20 Σχέση τοπικής αντοχής- απόσταση από το σημείο έγχυσης, για τις τσιμεντοποιημένες στήλες που προέκυψαν από τη μέθοδο: βυθιζόμενης ροής (■) και επιφανειακής διήθησης (◇), (Cheng, 2012).	88
Σχήμα 4.21 Η επίδραση του αριθμού των στρωμάτων των διαλυμάτων βακτηρίων τσιμεντοποίησης στην αντοχή κατά μήκος των στηλών (Cheng, 2012).	89
Σχήμα 4.22 Η τοπική αντοχή συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έγχυσης, στις στήλες άμμου 1m, με τη χρήση της μεθόδου επιφανειακής διήθησης (Cheng, 2012).	89
Σχήμα 4.23 Σχέση UCS- περιεκτικότητας CaCO_3 σε διαφορετικούς βαθμούς κορεσμού, για τη χονδρόκοκη άμμο (Cheng, 2012).	93
Σχήμα 4.24 Σχέση δυσκαμψίας-περιεκτικότητας CaCO_3 σε διαφορετικές συνθήκες κορεσμού, για τη χονδρόκοκη άμμο (Cheng, 2012).	93
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα διαπερατότητας-περιεχόμενου CaCO_3 για (a) χονδρόκοκες και (b) λεπτόκοκες άμμους (Cheng 2012).	94
Σχήμα 4.26 Τριπλό διάγραμμα της UCS και της διαπερατότητας των βιο-επεξεργασμένων δειγμάτων άμμου και των δειγμάτων με τσιμέντο Portland (κορεσμός 100%) συναρτήσει του περιεχομένου σε CaCO_3 και τσιμέντο αντίστοιχα (Cheng, 2012).	95
Σχήμα 4.27 Τοποθέτηση της σφύρας Schmidt για την εύρεση της τοπικής αντοχής της μεσαίας διατομής από την τσιμεντοποιημένη άμμο (Cheng, 2012).	97

Σχήμα 4.28 Μηχανικές ιδιότητες της τσιμεντοποιημένης χονδρόκοκκης στήλης άμμου 2 m, μετά από 22 κύκλους θεραπείας (Cheng, 2012).	98
Σχήμα 4.29 Η μετρούμενη τοπική αντοχή κατά μήκος του μεσαίου κατακόρυφου επιπέδου του τσιμεντοποιημένου σώματος άμμου (Cheng, 2012).	99
Σχήμα 4.30 Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου (Cheng, 2012).	101
Σχήμα 4.31 Σχηματικό διάγραμμα της φραγής των πόρων ως αποτέλεσμα της χρήσης της μεθόδου MICP, α) με χαμηλή συγκέντρωση και β) με υψηλή χημική συγκέντρωση (Al Qabany, 2013).	103
Σχήμα 4.32 Σχέση διατμητικής τάσης - ορθής τάσης για: α) 3 και β) 7 ημέρες θεραπείας (Suprato, 2014).	105
Σχήμα 4.33 Διάγραμμα UCS-συνολικής περιεκτικότητας σε ιζήματα ανθρακικού, για συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης 60 gr/L ουρίας και 111 gr/L άνυδρου χλωριούχου ασβεστίου (Cheng, 2014).	107
Σχήμα 4.34 Διάγραμμα διαπερατότητας-συνολικής περιεκτικότητας σε ιζήματα ανθρακικού, για συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης 60 gr / L ουρίας και 111 gr / L άνυδρου χλωριούχου ασβεστίου (Cheng, 2014).	108
Σχήμα 4.35 Φωτογραφία του βιο-πολτού α) κατά την περίοδο αντίδρασης β) κατά την περίοδο καθίζησης (Cheng, 2016).	111
Σχήμα 4.36 Επίδραση των εκπλύσεων του διαλύματος τσιμεντοποίησης στην ανεμπόδιστη μονοαξονική θλιπτική αντοχή της επεξεργασμένης άμμου (Cheng, 2016).	113
Σχήμα 4.37 Επίδραση των εκπλύσεων του διαλύματος τσιμεντοποίησης στη σχέση τάσης- παραμόρφωσης και στη δυσκαμψία της επεξεργασμένης άμμου (Cheng, 2016).	114
Σχήμα 4.38 Διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης- αξονικής παραμόρφωσης από την τριαξονική δοκιμή για τη μέθοδο της υγρής συμπύκνωσης (moist tamplng) (Ozdogan, 2010).	117
Σχήμα 4.39 Σχέση μεταξύ της ταχύτητας κυμάτων P, του βαθμού κορεσμού και της επιβαλλόμενης τάσης (Kavazanjian 2015).	122
Σχήμα 4.40 Απεικόνιση του βαθμού κορεσμού στη στήλη SS-1 για έναν κύκλο θεραπείας (Kavazanjian, 2015).	123
Σχήμα 4.41 Κυκλική αντοχή της επεξεργασμένης και μη επεξεργασμένης, κορεσμένης άμμου (Kavazanjian, 2015).	123
Σχήμα 4.42 Εξοπλισμός εργαστηριακών δοκιμών: (a) τριαξονικό κελί (b) κάτοψη της συσκευής μονοδιάστατης συμπίεσης. (c) πλάγια όψη της συσκευής μονοδιάστατης συμπίεσης (Kavazanjian, 2016).	126
Σχήμα 4.43 Εικόνες SEM και EDS για τις άμμους Ottawa 50/70 και 20/30, για τις διάφορες συγκεντρώσεις CaCl ₂ (Kavazanjian, 2016).	127

Σχήμα 4.44 Εικόνες SEM με τις κατανομές του ανθρακικού ασβεστίου στους κόκκους άμμου (Kavazanjian, 2016).....	127
Σχήμα 4.45 Μέτρηση της ταχύτητα κύματος S σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για την άμμο Ottawa 20/30, επεξεργασμένη με τη μέθοδο MICP και με συγκέντρωση χλωριούχου ασβεστίου 0.1 M (Kavazanjian, 2016).....	128
Σχήμα 4.46 a) Διάταξη για τη δεύτερη δοκιμή διήθησης b) Τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στην κυψέλη (Alvarado,2009).....	129
Σχήμα 4.47 Η διατμητική ταχύτητα κύματος συναρτήσει του χρόνου για όλα τα εδαφικά δείγματα της δοκιμής 2 (Alvarado, 2009).....	131
Σχήμα 4.48 Σχηματική διάταξη της στήλης άμμου των 5m (Van Paassen, 2009).....	132
Σχήμα 4.49 Η θλιπτική αντοχή (■), η δυσκαμψία E50 (○), η παραμένουσα αντοχή του υλικού μετά την αστοχία (□) συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο. Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην αντοχή της στερεοποιημένης, μη επεξεργασμένης άμμου, στην ίδια πυκνότητα (Van Paassen, 2009).....	134
Σχήμα 4.50 Το προφίλ της διαπερατότητας μετά τη θεραπεία συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έγχυσης. Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην αρχική διαπερατότητα της στήλης, πριν τη θεραπεία (Van Paassen, 2009).....	135
Σχήμα 4.51 Πειραματική διάταξη βιοενεμάτωσης μεγάλης κλίμακας (100m ³). Στο δεξί τμήμα του κιβωτίου άμμου βρίσκονται τα 3 φρεάτια έγχυσης ενώ στο αριστερό τα 3 φρεάτια εκχέυσης (Van Paassen, 2009).....	136
Σχήμα 4.52 Το σφαιρικό σχήμα του τσιμεντοποιημένου σώματος άμμου 1m ³ (Van Paassen, 2009).....	138
Σχήμα 4.53 Το τσιμεντοποιημένο σώμα άμμου των 100m ³ (Van Paassen, 2009).....	139
Σχήμα 4.54 Συσχέτιση μεταξύ της αντοχής UCS και του περιεχόμενου CaCO ₃ . Τα σημεία a, b, c και d αντιστοιχούν σε διαφορετικούς πυρήνες δειγματοληψίας (Van Paassen, 2009).....	141
Σχήμα 4.55 Σχέση UCS-ξηρής πυκνότητας πριν (◇) και μετά (▪) τη βιοενεμάτωση. Τα σημεία a, b, c και d αντιστοιχούν σε διαφορετικούς πυρήνες δειγματοληψίας (Van Paassen, 2009).....	142
Σχήμα 4.56 Σχέση τάσης-καταπόνησης (αξονική, ακτινική, ογκομετρική παραμόρφωση) για πυρήνες με συγκρίσιμες πυκνότητες, στους οποίους ασκήθηκαν τάσεις 0 kPa (μαύρες καμπύλες), 100 kPa (διακεκομμένες γραμμές) και 500 kPa (γκρι γραμμές), (Van Paassen, 2009).....	142
Σχήμα 4.57 Η μέγιστη αντοχή για UCS (●), τριαξονική σε πίεση 100 kPa (■ / □) και πίεση 500 kPa (▲ / Δ) και δοκιμές BTS (x) σε συνάρτηση με την ξηρή πυκνότητα. Οι τριαξονικές δοκιμές διεξήχθησαν υπό στραγγιζόμενες (■/▲) και αστράγγιστες (□/Δ) συνθήκες (Van Paassen, 2009).....	143
Σχήμα 4.58 Διάγραμμα λόγου q/p' – αξονικής καταπόνησης στις αστράγγιστες δοκιμές (Montoya, 2012).....	149

Σχήμα 4.59 Διάγραμμα q-αξονικής καταπόνησης για ελαφρώς τσιμεντοποιημένη λεπτή άμμο στις στραγγιζόμενες δοκιμές (Montoya, 2012).	150
Σχήμα 4.60 Σχέση μέγιστης γωνίας τριβής- ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, για το μη επεξεργασμένο: 1. πυκνό δείγμα (κόκκινη διακεκομμένη), 2. χαλαρό δείγμα (μπλε διακεκομμένη). Το δείγμα με μέτριο και υψηλό επίπεδο τσιμεντοποίησης παρουσιάζει γραμμική σχέση της μέγιστης γωνίας τριβής και της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων (μαύρες κουκκίδες), ενώ το χαλαρά τσιμεντοποιημένο δείγμα βρίσκεται εκτός της γραμμικής σχέσης (Montoya, 2012).	151
Σχήμα 4.61 Στρωματογραφία του εδάφους (Montoya, 2012).	152
Σχήμα 4.62 Εξοπλισμός φυγοκέντρωσης Schaevitz, ακτίνας 1 m, στο κέντρο NEES (Montoya, 2012).	154
Σχήμα 4.63 Προφίλ του μοντέλου φυγοκέντρωσης με ενσωματωμένους αισθητήρες, σε διάφορα βάθη (Montoya, 2012).	154
Σχήμα 4.64 Το μέτρο διάτμησης συναρτήσει της ενεργής κατακόρυφης τάσης για διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Montoya, 2012).	155
Σχήμα 4.65 Ακεραιότητα της τσιμεντοποίησης μιας ελαφρώς τσιμεντοποιημένης άμμου (Montoya, 2012).	156
Σχήμα 4.66 Σχέση του λόγου πίεσης του νερού των πόρων και της κανονικοποιημένης επιτάχυνσης (0.7g) σε συνάρτηση με το χρόνο, υπό δυναμική φόρτιση α) ελαφρά τσιμεντοποιημένη άμμος, β) πολύ τσιμεντοποιημένη άμμος. Με διακεκομμένη γραμμή συμβολίζεται η συμπεριφορά του μη επεξεργασμένου εδάφους (Montoya, 2012).	157
Σχήμα 4.67 Η αύξηση του αριθμού των βακτηρίων σε σχέση με τη χρονική διάρκεια σε χαλαρό αμμώδες έδαφος (Gurbuz, 2011).	159
Σχήμα 4.68 Σχέση σχηματιζόμενου ανθρακικού ασβεστίου και pH συναρτήσει του χρόνου, σε μήτρα χαλαρού αμμώδους εδάφους (Gurbuz, 2011).	160
Σχήμα 4.69 Περιεκτικότητα ασβεστίου κατά βάρος, για την άμμο σε διάφορες σχετικές πυκνότητες και για τα αποσαθρωμένα εδάφη (Kim, 2014).	162
Σχήμα 4.70 Εξοπλισμός σταδιακής έγχυσης με τη μέθοδο MICP: α) Έγχυση του βακτηριακού διαλύματος β) Έγχυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης (Shahrokhi-Shahraki, 2015)	166
Σχήμα 4.71 Εξοπλισμός για τη βαθιά εδαφική ανάμιξη (Duraisamy, 2016).	170
Σχήμα 4.72 Αφαίρεση του σωλήνα PVC από τη δεξαμενή (Duraisamy, 2016).	171
Σχήμα 4.73 Μέθοδος επισκευής της στήλης με α) ένεση και β) χοάνη (Duraisamy, 2016).	172
Σχήμα 4.74 Επίδραση του τσιμέντου και των τάσεων στην μέγιστη αποκλίνουσα τάση (Duraisamy, 2016).	174
Σχήμα 4.75 Διάγραμμα τάσης-μετακίνησης των θεμελίων που επισκευάστηκαν (Duraisamy, 2016).	174
Σχήμα 4.76 Η διαδικασία της ασβεστιτικής καθίζησης (Kim, 2016).	176

Σχήμα 4.77 Ο θάλαμος που περιέχει το ανθρακικό ασβέστιο και μετράει την ποσότητα του καταβυθισμένου ανθρακικού ασβεστίου (Kim, 2016).	176
Σχήμα 4.78 α) Αποτελέσματα διατμητικής αντοχής και β) αποτελέσματα διαπερατότητας των υπολειμματικών εδαφών (Ng, 2012).	179
Σχήμα 4.79 Σχέση δείκτη πόρων- τάσης για τσιμεντοποιημένα και μη τσιμεντοποιημένα εδαφικά δείγματα (Canacki, 2015).	183
Σχήμα 4.80 Συντελεστής συμπιεστότητας συναρτήσει της τάσης για τα τσιμεντοποιημένα και μη τσιμεντοποιημένα, οργανικά δείγματα (Canacki, 2015).	184
Σχήμα 4.81 Σχέση διατμητικής τάσης- οριζόντιας μετατόπισης για επεξεργασμένα και μη, δείγματα εδάφους (Canacki, 2015).	185
Σχήμα 4.82 Ανάλυση EDX πριν και μετά τη θεραπεία. Μετά τη θεραπεία, αυξήθηκε η ποσότητα του Ca (Canacki, 2015).	186
Σχήμα 5.1 Αποτέλεσμα φυσικής τσιμεντοποίησης στο εθνικό πάρκο Nambung, Δυτική Αυστραλία (Van Paassen, 2009).	187
Σχήμα 5.2 Αντίσταση στη διείσδυση των φυσικά και τεχνητά αποτιθέμενων άμμων (Durante, 1955).	189
Σχήμα 5.3 Σχέση λόγου κενών-τάσης, για τα δείγματα πριν και μετά την έκλυση, (α) για την μέτρια ως ισχυρά τσιμεντοποιημένη άμμο και (β) για την ασθενώς τσιμεντοποιημένη άμμο (Ismael, 1998).	191
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα διαδρομής ενεργών τάσεων για τα εδάφη πριν και μετά την έκλυση, α) για την ασθενώς τσιμεντοποιημένη και την β) μέτρια έως ισχυρά τσιμεντοποιημένη άμμο (Ismael, 1998).	192
Σχήμα 5.5 Σχέση $G_{max}/f(e)$ με την κατακόρυφη ενεργή τάση για την τσιμεντοποιημένη και τη μη τσιμεντοποιημένη άμμο (Καλλιόγλου)	194
Σχήμα 5.6 Πιθανές επιπτώσεις της διαγένεσης στην καμπύλη συμπιεστότητας των φυσικών υλικών (SCL) (Chandler, 2000).	202
Σχήμα 5.7 Συσχετισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (k) με το ποσοστό αργλικού κλάσματος (CF) (Χριστοδουλοπούλου, 2004).	203
Σχήμα 5.8 Σχέση μέτρου ελαστικότητας- επιβαλλόμενης τάσης για 6 αδιατάρακτα και 5 συμπυκνωμένα δείγματα (Sfriso, 2008).	206
Σχήμα 5.9 Σχέση του μέτρου διάτμησης με την ενεργή τάση σ'_o , για μικρές παραμορφώσεις (Τίκα, 2011).	207
Σχήμα 5.10 Το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, για $\gamma > 10^{-6}$ (Τίκα, 2011).	208
Σχήμα 5.11 Το κακονικοποιημένο G_{max} , σε μικρές παραμορφώσεις, σε σχέση με την επιτόπου ενεργή τάση, για τις μάρκες (Καλλιόγλου, 2011).	208

Σχήμα 5.12 Ο λόγος απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, για μικρές και μεγάλες παραμορφώσεις και για διάφορες πλαστικότητες (Τίκα, 2011).	209
Σχήμα 5.13 Σχέση της κρίσιμης γωνίας ή της παραμένουσας γωνίας τριβής με τον δείκτη πλαστικότητας, για μεγάλες παραμορφώσεις (Τίκα, 2011).	210
Σχήμα 5.14 Μεταβολή της κανονικοποιημένης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, με το λόγο υπερστερεοποίησης (Καλλιόγλου).	211
Σχήμα 6.1 Το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης συναρτήσει του βαθμού τσιμεντοποίησης, για τους διάφορους τύπους τσιμέντου (Chang, 1992).	218
Σχήμα 6.2 Σχέση G_{max} -επιβαλλόμενης τάσης των τσιμεντοποιημένων και μη καθαρών άμμων, για μικρές παραμορφώσεις (Purpala, 1996).	220
Σχήμα 6.3 a) Η επίδραση της περιεκτικότητας του τσιμέντου στη συνοχή και τη γωνία τριβής, της καθαρής άμμου, b) η μη γραμμική αύξηση της συνοχής με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο (Kioussis, 1997).	221
Σχήμα 6.4 Σχέση UCS-περιεκτικότητας σε τσιμέντο (Ismail, 2002).	224
Σχήμα 6.5 Εικόνες ESEM των εδαφικών κόκκων, πριν και μετά την τσιμεντοποίηση (Ismail, 2002).	225
Σχήμα 6.6 Σχέση διατμητικής ταχύτητας V_s - τάσης σ' . Στο σχήμα, το C δείχνει την κατάρρευση. Τα πυκνά τσιμεντοποιημένα δείγματα δεν καταρρέουν (τελείες γραμμές). Για υψηλές τάσεις η V_s των τσιμεντοποιημένων εδαφών προσεγγίζει ασυμπτωτικά την ταχύτητα των μη επεξεργασμένων δειγμάτων (διακεκομμένες γραμμές) (Santamarina, 2005).	226
Σχήμα 6.7 a) Σχέση UCS- περιεκτικότητας σε τσιμέντο, b) σχέση μέτρου ελαστικότητας-περιεκτικότητας σε τσιμέντο, για $D_r=50$ & 70% (Haeri, 2005).	228
Σχήμα 6.8 Σχέση μέτρου διάτμησης-παραμόρφωσης για τις διάφορες επιβαλλόμενες τάσεις, για αναλογίες a) $W/C=1$ και b) $W/C=3$ (Pantazopoulos, 2012).	232
Σχήμα 6.9 Σχέση λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης a) για τις διάφορες επιβαλλόμενες τάσεις b) για του διάφορους λόγους W/C (Pantazopoulos, 2012).	233
Σχήμα 6.10 Το μέτρο διάτμησης κατά την ισότροπη αποφόρτιση (Alvarado, 2012).	236
Σχήμα 6.11 Το μέτρο διάτμησης κατά την ισότροπη επαναφόρτιση (Alvarado, 2012).	237
Σχήμα 6.12 Σύγκριση του μέτρου διάτμησης του τσιμεντοποιημένου ψαμμίτη και των μη επεξεργασμένων άμμων (Alvarado, 2012).	237
Σχήμα 6.13 Εικόνες SEM που απεικονίζουν τις επιπτώσεις της αποφόρτισης στο τσιμέντο. a) Ρωγμές στο δείγμα κατά την αποφόρτιση, b) δεν εμφανίστηκαν ρωγμές στο δείγμα που είχε δημιουργηθεί σε μηδενική τάση (Alvarado, 2012).	238
Σχήμα 6.14 Σχέση ειδικού όγκου-επιβαλλόμενης τάσης για την τσιμεντοποιημένη και την καθαρή άργιλο (Trhlikova, 2012).	242
Σχήμα 6.15 Σχέση G_{max} -μέσης ενεργής τάσης, για την τσιμεντοποιημένη και τη φυσική άργιλο (Trhlikova, 2012).	242

Σχήμα 6.16 Σχέση G_{max} -επιβαλλόμενης τάσης για διάφορες περιεκτικότητες σε τσιμέντο, για τη συμπίκνωση του δείγματος σε ξηρή πυκνότητα που αντιστοιχεί στη βέλτιστη υγρασία, α) για 7 και β) για 28 ημέρες σκλήρυνσης (Bahador, 2012).....	244
Σχήμα 6.17 Σχέση τάσης παραμόρφωσης για την τσιμεντοποιημένη (περιεκτικότητα σε τσιμέντο 5%) και τη φυσική άργιλο, μετά από 7 ημέρες σκλήρυνσης (Subramaniam, 2014).....	245
Σχήμα 6.18 Σχέση πίεσης νερού των πόρων-παραμόρφωσης για την τσιμεντοποιημένη (περιεκτικότητα σε τσιμέντο 5%) και τη φυσική άργιλο, μετά από 7 ημέρες σκλήρυνσης (Subramaniam, 2014).....	245
Σχήμα 6.19 Σχέση τάσης παραμόρφωσης για την τσιμεντοποιημένη άργιλο για τον 1°, 10° και 100° κύκλο φόρτισης (Subramaniam, 2014).....	246
Σχήμα 6.20 Κύκλοι του Mohr α) για τα συμπτωκνωμένα και β) για τα τσιμεντοποιημένα δείγματα (Overton, 1989).....	247
Σχήμα 6.21 Σχέση του μέτρου διάτμησης με την επιβαλλόμενη τάση για τα διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Chang, 2001).....	252
Σχήμα 6.22 Σχέση του λόγου απόσβεσης με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, για τα διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης τάσης (Chang, 2001).....	253
Σχήμα 6.23 Σχέση μέτρου διάτμησης- παραμόρφωσης για διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Chang, 2001).....	253

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1 Ποσοστά των διαφόρων τύπων βακτηρίων τα οποία εντοπίστηκαν στο έδαφος (Alexander, 1977).....	34
Πίνακας 3.2 Το κόστος των πρώτων υλών για τη χημική ενεμάτωση (Ivanov & Chu, 2008).....	53
Πίνακας 3.3 Κατά προσέγγιση κόστος των πρώτων υλών για την μικροβιακή επικάλυψη (Ivanov & Chu, 2008).....	54
Πίνακας 4.1 Αναμιγμένες αναλογίες των δειγμάτων τσιμέντου Portland (Cheng, 2012).....	92
Πίνακας 4.2 Χημικές συνταγές για τα μέσα τσιμεντοποίησης (Montoya, 2012).....	144
Πίνακας 4.3 Οι άμμοι που χρησιμοποιήθηκαν και τα χαρακτηριστικά τους (Montoya,2012) . .	145
Πίνακας 4.4 Τα χαρακτηριστικά της άμμου Ottawa 50-70 (Montoya, 2012).....	147
Πίνακας 4.5 Οι μηχανικές ιδιότητες του προς μελέτη οργανικού εδάφους (Canacki, 2015).....	180
Πίνακας 4.6 Λεπτομέρειες των στερεών και υγρών περιεχόμενων ουσιών (Canacki 2015).	181
Πίνακας 4.7 Παράμετροι διατμητικής αντοχής πριν και μετά την επεξεργασία, σε διαφορετικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Canacki, 2015).	185
Πίνακας 5.1 Κατηγορίες μάργας ανάλογα με το περιεχόμενο σε CaCO ₃ και άργιλο (Καλλιόγλου).....	188
Πίνακας 5.2 Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των μαργών (Sestanovic, 1998).	201

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τσιμεντοποιημένα εδάφη συναντώνται σε πολλές περιοχές και σε όλες τις ηπείρους του πλανήτη. Η δημιουργία των φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών, είναι αποτέλεσμα διαφόρων φυσικών διεργασιών, όπως είναι η φυσική λιθοποίηση των ιζημάτων, οι περιβαλλοντικές αλλαγές, η διαγένεση, η γήρανση των εδαφών κ.α. Έχουν ως χαρακτηριστικό, όπως και όλα τα φυσικά εδάφη, την ύπαρξη δομής, μόνο που στην περίπτωση τους η δομή αυτή δεν περιγράφεται μόνο από τη διάταξη των εδαφικών κόκκων, αλλά και από την ανάπτυξη συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των κόκκων. Οι συγκολλητικοί δεσμοί οφείλονται κυρίως στην παρουσία ανθρακικών ορυκτών, π.χ. ασβεστίτη, στις διεπιφάνειες των κόκκων και πιθανά στους εδαφικούς πόρους (cementation). Έχει παρατηρηθεί πως ακόμα και πολύ μικρά ποσοστά ανθρακικών συστατικών στο έδαφος μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των κόκκων με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τσιμεντοποίησης στην περίπτωση αμμωδών αποθέσεων αποτελούν τα αμμώδη πρανή, με ποσοστό ανθρακικών 4%, στην περιοχή της παραλίας του San Francisco που παρουσιάζουν κλίση μεγαλύτερη των 60° και ύψος 100m (Clough et al., 1981), οι αμμώδεις αποθέσεις μεγάλης γεωλογικής ηλικίας στην περιοχή του Kanto στην Ιαπωνία που εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε ρευστοποίηση, ικανή να μην επιτρέψει την εκδήλωση αντίστοιχων φαινομένων στην περίπτωση του σεισμού μεγέθους 9.0 του 2011 (Tohoku Pacific ocean earthquake) (Kokusho et al., 2011) και άλλα. Κατά το σχεδιασμό των τεχνικών έργων αρκετές φορές απαιτείται η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών. Επίσης, καθώς η διαθεσιμότητα κατάλληλων θέσεων κατασκευής μειώνεται, αυξάνεται η ανάγκη βελτίωσης των συνθηκών του εδάφους. Οι τεχνικές βελτίωσης των εδαφών, που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τεχνητά τσιμεντοποιημένα εδάφη, εφαρμόζονται τα τελευταία 30 χρόνια, με σκοπό την αλλαγή του προβληματικού εδάφους και τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των φυσικά και τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών μέσω μιας βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Για το σκοπό αυτό, συγκεντρώθηκε και μελετήθηκε, πλήθος πειραματικών ερευνών,

χρονολογικά από το 1950 έως σήμερα, που αφορούν στα τσιμεντοποιημένα εδάφη. Αρχικά, μελετώνται οι ιδιότητες των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών, με ιδιαίτερη έμφαση σε μια καινοτόμο τεχνική βελτίωσης, η οποία προβλέπει την εισαγωγή βακτηρίων σε κοκκώδες έδαφος. Η δράση των μικροβίων, επιταχύνεται με τη βοήθεια ενζύμων, με αποτέλεσμα την ταχύτερη καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου και τη δημιουργία συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Αναλύεται επίσης, η τεχνική βελτίωσης του εδάφους, με τη χρήση τσιμέντου, που λειτουργεί ως χημικό ένεμα μεταξύ των κόκκων. Επίσης μελετάται η συμπεριφορά των φυσικά τσιμεντοποιημένων λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων εδαφών.

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια καθώς επίσης και το περιεχόμενο των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθενται γενικά στοιχεία για τους τρόπους ενίσχυσης εδαφών και για τους τύπους των εδαφών στους οποίους εφαρμόζονται.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται ιστορικά στοιχεία και ορισμοί της μεθόδου βελτίωσης του εδάφους με τη χρήση βακτηρίων και γίνεται αναλυτική περιγραφή της. Επίσης, παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογής και τα πλεονεκτήματά της.

Στο Κεφάλαιο 4 μελετάται η μηχανική συμπεριφορά κυρίως κοκκωδών εδαφών, τα οποία βελτιώθηκαν με τη χρήση βακτηρίων. Για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων, συγκεντρώνεται μεγάλο πλήθος εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών, χρονολογικά από το 2003 έως το 2016, από πλήθος ερευνητών, οι οποίες αφορούν τη χρήση μικροοργανισμών.

Στο Κεφάλαιο 5 συγκεντρώνονται και μελετώνται τα πειράματα, τα οποία πραγματοποιήθηκαν χρονολογικά από το 1955 έως το 2014 από διάφορους ερευνητές, τα οποία αφορούν σε φυσικά τσιμεντοποιημένα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθεται και μελετάται πλήθος πειραμάτων, τα οποία εκτελέστηκαν χρονολογικά από το 1972 έως το 2015 και αναφέρονται στην τεχνική βελτίωσης χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων εδαφών με τη χρήση τσιμέντου.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές έρευνες, οι οποίες μελετήθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια.

Κεφάλαιο 2

Γενικά στοιχεία για την ενίσχυση εδαφών

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη και οι επακόλουθες μεταβαλλόμενες ανάγκες στη χρήση γης έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διάφορων μεθόδων ενίσχυσης του εδάφους. Χάρη στις μεθόδους αυτές πλέον, πολλά ‘προβληματικά εδάφη’, σε ό,τι αφορά τις γεωτεχνικές τους ιδιότητες, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τεχνικών έργων είτε λόγω της μείωσης της διαθεσιμότητας κατάλληλων θέσεων κατασκευής, είτε λόγω της αύξησης των απαιτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μεγάλων έργων υποδομής. Σε πολλές περιπτώσεις, απαιτείται η βελτίωση του εδάφους σε υφιστάμενες κατασκευές. Η ενίσχυση του εδάφους στην περίπτωση αυτή, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν οι συνήθεις μέθοδοι βελτίωσης χωρίς να έχουν αντίκτυπο στη λειτουργικότητα των κατασκευών.

Όλες οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους αποτελούν επεμβάσεις με σκοπό την αλλαγή της δομής του προβληματικού εδάφους, ώστε να βελτιωθούν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά και να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητά του (Βράννα Α, 2016). Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται σε έργα γεωτεχνικής μηχανικής εδώ και 30 χρόνια σε διάφορες κατηγορίες εδαφών, όπως τα ρευστοποιήσιμα αμμώδη εδάφη (κορεσμένες χαλαρές άμμοι), μαλακές και πολύ συμπιεστές αργίλους και οργανικά εδάφη.

Οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους εφαρμόζονται σε πληθώρα τεχνικών έργων:

- θεμελιώσεις κτιρίων για τη μείωση των καθιζήσεων, τον έλεγχο της διαπερατότητας, την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους
- εργασίες εκσκαφής (π.χ. τάφροι, σήραγγες) για την αύξηση της αντοχής των τοιχωμάτων και για τη μείωση της διαπερατότητας
- έργα οδοποιΐα, σε υποβάσεις οδοστρωμάτων για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, τη μείωση της διάβρωσης και τη μείωση των ογκομετρικών μεταβολών
- έργα σταθεροποίησης πρανών

- φράγματα, κανάλια, δεξαμενές, χωματερές (X.Y.T.A.) για τη δημιουργία υδατοστεγανών κατασκευών
- έργα προστασίας του περιβάλλοντος, για την αύξηση της αντίστασης του εδάφους στην φυσική αποσάθρωση από αέρα ή το νερό, τον περιορισμό της ρύπανσης του εδάφους με μείωση της μεταφορικής ικανότητας των ρύπων
- αντισεισμική προστασία υφιστάμενων κατασκευών έναντι του φαινομένου της ρευστοποίησης των χαλαρών εδαφών

Σύμφωνα με τον Van Impe (1989) οι μέθοδοι βελτίωσης εδαφών διακρίνονται στις παρακάτω γενικές κατηγορίες:

- Προσωρινές τεχνικές βελτίωσης εδάφους με περιορισμένο χρόνο εφαρμογής, κατά την περίοδο της κατασκευής
- Μόνιμες τεχνικές βελτίωσης εδάφους, που εφαρμόζονται χωρίς την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων
- Μόνιμες τεχνικές βελτίωσης εδάφους, που εφαρμόζονται με την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων

Στις προσωρινές τεχνικές βελτίωσης εδάφους ανήκουν:

- η ηλεκτρική όσμωση
- η θερμική δράση (θέρμανση, ψύξη)

Η τεχνική της ηλεκτρικής όσμωσης στοχεύει στη στερεοποίηση του εδάφους και συνίσταται στη δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη ροή του υπόγειου νερού προς την κάθοδο. Η θέρμανση του εδάφους συνίσταται στη δημιουργία οπών με καρφίδες και στην εισβολή θερμού μείγματος αέρα και καυσίμου εντός του εδάφους. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε χαλαρά εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα. Η ψύξη του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φραγμών από παγωμένο νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του εδάφους.

Στις μόνιμες τεχνικές βελτίωσης εδάφους που εφαρμόζονται χωρίς την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων εντάσσονται:

- η δυναμική συμπίκνωση
- η δονητική συμπίκνωση

Η δυναμική συμπίκνωση συνίσταται στη ρίψη όγκων με βάρος τόνων στο έδαφος προκαλώντας τη συμπίκνωσή του, υπό την επίδραση των κρουστικών δυνάμεων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε κοκκώδη εδάφη αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε μικτά εδάφη που αποτελούνται από κοκκώδη και λεπτόκοκκα υλικά. Η δυναμική συμπίκνωση αποφεύγεται σε περιπτώσεις ύπαρξης υφιστάμενων κατασκευών σε απόσταση μικρότερη των 30m. Η δονητική συμπίκνωση συνίσταται στην εισαγωγή δονητή σε μη συνεκτικά εδάφη, στα οποία προκαλεί ακτινωτή συμπίκνωση. Η μέθοδος είναι αρκετά αποτελεσματική για (καθαρές) άμμους (ποσοστό ιλύος < 10%-15% και αργίλου ≤ 5%).

Στις μόνιμες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους που εφαρμόζονται με την επιβολή ξένων στοιχείων στο έδαφος ανήκουν:

- το οπλισμένο έδαφος
- η ενίσχυση με ενέσεις

Η ενίσχυση με οπλισμό αφορά την εισαγωγή γεω-υφασμάτων, γεω-πλεγμάτων, χαλύβδινων ράβδων, ηλώσεων και ριζοπασσάλων. Όσον αφορά την ενίσχυση με ενέσεις, η βαθιά εδαφική ανάμιξη περιλαμβάνει τη διοχέτευση ρευστών υπό πίεση, η πήξη των οποίων συμβάλει στην ενίσχυση του εδάφους. Η επέμβαση πραγματοποιείται με κατασκευή εδαφοπασσάλων και με διοχέτευση ενέματος υψηλής πίεσης. Οι κυριότεροι τύποι ενεμάτων είναι το τσιμέντο Portland, τα μίγματα εδάφους (μπετονίτη-άμμου), τα αιωρήματα τσιμέντου και τα χημικά διαλύματα. Η ενίσχυση με ενέσεις εφαρμόζεται σε μη συνεκτικά εδάφη και σε μαλακούς ρηγματωμένους βράχους, αλλά όχι σε αργίλους. Η αποδοτικότητα της τεχνικής αυτής είναι ανάλογη με την ομοιομορφία της διασποράς του ενέματος στο εσωτερικό του εδάφους.

Σύμφωνα με τους Mitchell & Jardín (2002) στις τεχνικές βελτίωσης εδαφών ανήκουν και οι ακόλουθες:

- η αντικατάσταση του εδάφους
- η προφόρτιση
- η δονητική αντικατάσταση με τη χρήση χαλικοπασσάλων
- η βλάστηση
- η παθητική σταθεροποίηση
- η σταθεροποίηση με βιο-υλικά.

Η αντικατάσταση του εδάφους με κατάλληλο υλικό (π.χ. αμμοχάλικο, θραυστό λατομείου) εφαρμόζεται σε χαλαρές κοκκώδεις αποθέσεις ή μαλακά αργιλικά / ιλυώδη εδάφη. Η μέθοδος πραγματοποιείται με εκσκαφή και επιχωμάτωση ή εκτόπιση με τη βοήθεια εκρηκτικών. Η αντικατάσταση εδάφους είναι συμφέρουσα μόνο όταν το προβληματικό έδαφος έχει περιορισμένο βάθος στρώσης. Στη μέθοδο της προφόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίχωμα ή δεξαμενή γεμάτη με νερό, ή να τοποθετηθούν προκατασκευασμένα στοιχεία, να υποβιβαστεί η στάθμη του υπόγειου νερού ή να γίνει επιφανειακή διαβροχή των ξηρών χαλαρών αποθέσεων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη και στοχεύει στη στερεοποίησή τους. Η δονητική αντικατάσταση με την κατασκευή χαλικοπασσάλων συνίσταται στη διάνοιξη κυκλικών οπών στο προβληματικό έδαφος και στην πλήρωσή τους με χάλικες ή με θραυστό λατομείου. Η μέθοδος χρησιμοποιείται στα ιλυώδη και αργιλικά εδάφη στα οποία η δονητική συμπύκνωση δεν έχει αποτελέσματα. Η βελτίωση του εδάφους με την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών συμβάλλει στην ενίσχυση και όπλιση του εδάφους καθώς και στη μείωση της διαβρωσιμότητάς του. Η παθητική σταθεροποίηση εφαρμόζεται κυρίως στη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εισαγωγή ενός σταθεροποιητή στο έδαφος μέσω διήθησης με χαμηλή υδραυλική κλίση. Ο σταθεροποιητής έχει αρχικά χαμηλό ιξώδες το οποίο όμως αυξάνεται και σταθεροποιείται με την ολοκλήρωση της διήθησης. Τέλος, στη μέθοδο σταθεροποίησης του εδάφους με χρήση βιο-υλικών, δημιουργούνται συγκολλητικοί δεσμοί τσιμεντοποίησης μεταξύ των κόκκων του εδάφους ως αποτέλεσμα της χρήσης σταθεροποιητών όπως είναι τα μη παθογόνα μικρόβια (Dejong 2010). Η εφαρμογή των βιο-υλικών είναι αποτελεσματική κυρίως σε άμμους και λιγότερο σε ιλεις (Kim 2014).

Βέβαια πρέπει να αναφερθεί πως οι συνήθεις τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες και περιορισμούς ως προς την εφαρμογή τους. Τεχνικές όπως η δονητική και δυναμική συμπύκνωση, απαιτούν βαριά μηχανήματα τα οποία προκαλούν ρηγματώσεις στο έδαφος μέσω των δονήσεων ή / και σοβαρές βλάβες στο αστικό περιβάλλον. Οι τεχνικές ψύξης και θέρμανσης του εδάφους αποτελούν προσωρινές λύσεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής και μειονεκτούν ως προς το υψηλό κόστος εφαρμογής τους. Όσον αφορά στην ενίσχυση με ενέσεις, η ακτίνα δράσης τους στο έδαφος περιορίζεται στην εγγύτητα του εξοπλισμού ανάμιξης και συχνά απαιτούνται υψηλές πιέσεις για την έγχυση τους λόγω του υψηλού ιξώδους τους ή του χρόνου ταχείας σκλήρυνσης. Ακόμη, σε αρκετές περιπτώσεις οι χημικές ουσίες που περιλαμβάνονται στα ενέματα, είναι

ιδιαίτερα δαπανηρές, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα και προβλήματα στην υγεία και να συντελέσουν στη διατάραξη του οικοσυστήματος. Το 1974, μια μελέτη που πραγματοποίησε ο Karol (2003) στην Ιαπωνία παρουσίαζε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όταν το κονίαμα ακρυλαμιδίου διέρρευσε σε υδάτινες οδούς, προκαλώντας πέντε τεκμηριωμένες περιπτώσεις δηλητηρίασης από νερό. Ως αποτέλεσμα, απαγορεύτηκαν όλα σχεδόν τα χημικά ενέματα, αναστέλλοντας και σε άλλες χώρες την εφαρμογή παρόμοιας απαγόρευσης. Σε πολλές χώρες όπως οι ΗΠΑ, λόγω των αρνητικών επιπτώσεων των περισσότερων συστατικών ενεμάτωσης έχει προταθεί η απαγόρευση τους τόσο λόγω της τοξικότητάς τους όσο και λόγω της επιθυμίας για τη μείωση της χρήσης του τσιμέντου.

Δεδομένου ότι υπάρχουν περισσότερα από 40.000 έργα το χρόνο, που εκτελούνται σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιώντας χημικά σταθεροποιητικά εδαφών, με συνολικό κόστος που υπερβαίνει τα 6 δισεκατομμύρια δολάρια, υπάρχει τεράστια ανάγκη για εναλλακτικές φιλικές προς το περιβάλλον και βιώσιμες τεχνολογίες που μπορούν να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση της εδαφικής βελτίωσης (Dejong, 2010, Ng, 2012, Achal & Mukherjee, 2015).

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή της μεθόδου βελτίωσης στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφών με βακτήρια

3.1 Ιστορικά στοιχεία της μεθόδου βελτίωσης εδαφών με μικρόβια

Η μέθοδος της βελτίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με βακτήρια, γνωστή ως MICP (Microbiologically Induced Calcite Precipitation), αποτελεί τεχνική φιλική προς το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η τεχνική αυτή είναι καινοτόμος και σχετικά νέα στη γεωτεχνική μηχανική, αλλά παράλληλα θεωρείται ελπιδοφόρα όσον αφορά στην ικανότητά της για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, όπως η αύξηση της διατμητικής αντοχής και της δυσκαμψίας διατηρώντας ταυτόχρονα επαρκή τη διαπερατότητα (Burbank et al., 2011) και εξασφαλίζοντας παράλληλα την περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Whiffin et al. 2007). Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους μέσω της μεθόδου MICP, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και είναι αποδεκτή από διάφορους ερευνητές (DeJong et al., 2006, Whiffin et al., 2007, van Paassen et al., 2010).

Παρά το γεγονός ότι τα βακτήρια αποτελούν τους κυρίαρχους μικροοργανισμούς στο υπέδαφος και παρά την ύπαρξη πλήθους βιβλιογραφικών στην επιστήμη της βιολογίας για τη σύνδεση των βιολογικών παραγόντων με τη συμπεριφορά του εδάφους, μικρή προσπάθεια έχει γίνει από τους γεωτεχνικούς μηχανικούς για την αξιολόγηση της σύνδεσης αυτής. Μέχρι πρόσφατα, όπου αναγνώρισαν την παρουσία βιολογικής δραστηριότητας στην υπόγεια επιφάνεια και τις πιθανές επιπτώσεις που έχει στις ιδιότητες του εδάφους.

Ένας από τους πρώτους γεω-μικροβιολόγους, ο Winogradsky, κατά το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα, ανακάλυψε ότι το μικρόβιο *Beggiatoa* θα μπορούσε να οξειδώσει στοιχεία του θείου και ότι ο μικροοργανισμός *Leptothrix ochracea* προωθεί την οξείδωση του ανθρακικού σιδήρου σε οξείδιο του σιδήρου. Μεταγενέστεροι ερευνητές, επίσης, διαπίστωσαν ότι οι μικροοργανισμοί δε συμμετέχουν μόνο σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, αλλά μπορούν και να καθιζάνουν και να συμβάλλουν άμεσα ή έμμεσα στη διάλυση ανόργανων συστατικών. Λίγα χρόνια μετά από τη μελέτη του Winogradsky, το 1903 ο Nadson, ανακάλυψε ότι τα μικρόβια συμβάλλουν στην καθίζηση του ανθρακικού

ασβεστίου. Η ιδέα της χρήσης των μικροβίων στη γεωτεχνική μηχανική εισήχθη για πρώτη φορά το 1992, από τους Ferris και Stehmeier.

Το 2005 οι καθηγητές Mitchell και Santamarina περιέγραψαν τις πιθανές βιολογικές επιδράσεις στην υπόγεια επιφάνεια που θα μπορούσαν να αλλάξουν τις ιδιότητες του εδάφους και να χρησιμοποιηθούν από τους μηχανικούς. Όπως αναφέρθηκε το 2006 από τους Kucharski et al, η τεχνική έγινε ευρέως αποδεκτή από τους πολιτικούς μηχανικούς μετά την μετατροπή μιας τσάντας άμμου σε στήλες ασβεστολιθικού ψαμμίτη όταν υποβλήθηκε σε επεξεργασία από ομάδα έρευνας στην Αυστραλία.

Η συνειδητοποίηση της άμεσης σύνδεσης των παραπάνω επιστημών, συνέβαλε στη δημιουργία ενός νέου κλάδου της γεωτεχνικής μηχανικής, που ασχολείται με τις εφαρμογές των μικροβίων στα γεωλογικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη μηχανική. Ο κλάδος αυτός ονομάζεται Μικροβιακή Γεωτεχνολογία. Οι εφαρμογές της Μικροβιακής Γεωτεχνολογίας, απαιτούν την ενοποίηση της μικροβιολογίας, της οικολογίας, της γεωχημείας και της γεωτεχνικής μηχανικής (Ivanov and Chu, 2008).

3.2 Ορισμοί για την μέθοδο ενίσχυσης με βακτήρια

Η *Μικροβιακή Γεωτεχνολογία* είναι ένας νέος κλάδος της Γεωτεχνικής Μηχανικής που ασχολείται με τις εφαρμογές των μικροβιολογικών μεθόδων στα γεωλογικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού (Ivanov & Chu, 2008).

Φυσικά τσιμεντοποιημένα εδάφη ονομάζονται τα εδάφη των οποίων οι κόκκοι συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλητικούς δεσμούς, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί φυσικά από τις γεωλογικές διαδικασίες που έλαβαν χώρα στον εδαφικό σκελετό.

Τα *τεχνητά τσιμεντοποιημένα εδάφη* είναι αυτά στα οποία οι συγκολλητικοί δεσμοί, που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων είναι αποτέλεσμα της σταθεροποίησης με ανόργανα υλικά, βιο-υλικά και μικρόβια (Dejong, 2010).

Η μέθοδος της σταθεροποίησης με βιο-υλικά (βακτήρια) πραγματοποιείται είτε με τη *βιο-ανάπτυξη* είτε με τη *βιο-διέγερση*. Η βιο-ανάπτυξη αναφέρεται στην καλλιέργεια των βακτηρίων εργαστηριακά και στη συνέχεια στην τοποθέτησή τους στο υπό βελτίωση

έδαφος. Η βιο-διέγερση πραγματοποιείται με την πρόκληση ανάπτυξης των βακτηρίων που ενυπάρχουν στο υπό βελτίωση έδαφος, με σκοπό τη δημιουργία δεσμών τσιμεντοποίησης ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους (Mitchell & Santamarina 2005, Van Paassen 2009, Kim & Park 2013).

Η μέθοδος της *βιο-τσιμεντοποίησης* (biocementation) είναι μια βιολογική διαδικασία που παράγει τσιμέντο ή κάποιο άλλο συνδετικό υλικό (Duraisamy, 2016).

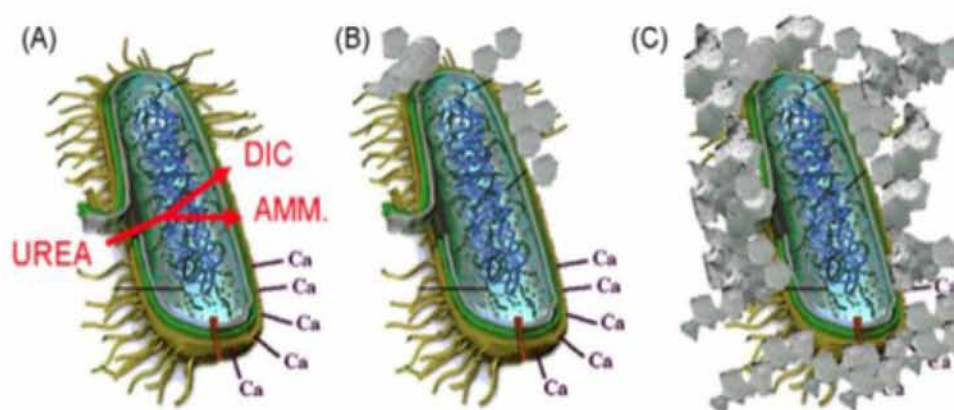
Σύμφωνα με τους Ivanov & Chu (2008), η Μικροβιακή Γεωτεχνολογία έχει δυο βασικές εφαρμογές:

1. Η *βιο-τσιμεντοποίηση* (biocementation) αφορά στη δημιουργία υλικών συνδεδεμένων στα σωματίδιά τους μέσω μικροβιακών διαδικασιών επί τόπου, έτσι ώστε να αυξάνεται η διατμητική αντοχή του εδάφους.
2. Η *βιο-απόφραξη* (bioclogging) αναφέρεται στη δημιουργία υλικών με γεμάτους κόκκους μέσω μικροβιακών μέσων, έτσι ώστε να μειώνονται το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα.

Σε πολλές περιπτώσεις η βιο-τσιμεντοποίηση βασίζεται στη *μέθοδο MICP (Microbial Induced Calcite Precipitation)*, δηλαδή σε μια βιο-γεωχημική διαδικασία, η οποία βασίζεται στην καθίζηση ορυκτών. Στη μέθοδο αυτή, η δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου στο εσωτερικό της εδαφικής μάζας πραγματοποιείται σαν αποτέλεσμα της μεταβολικής δραστηριότητας των μικροβίων (Stocks-Fischer, 1999; Ramakrishnan, 2001; Veluri, 2015). Η MICP μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλα πεδία που κυμαίνονται από τη Βιοτεχνολογία, τη Γεωτεχνική Μηχανική, την Παλαιοβιολογία έως και την επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού (Dhami, 2014). Στόχος της μεθόδου είναι η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου στα κενά των κόκκων και η δημιουργία συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των σωματιδίων. Η καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου είναι μια απλή και αυθόρμητη χημική διαδικασία που ελέγχεται κυρίως από τέσσερις παραμέτρους (Hammes and Verstraete, 2002):

1. Συγκέντρωση ασβεστίου
2. Συγκέντρωση διαλυμένου ανόργανου άνθρακα (DIC)

3. Το pH του περιβάλλοντος (το οποίο επηρεάζει τη διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου)
4. Την παρουσία σημείων πυρήνωσης (δηλαδή θέσεων δημιουργίας κρυστάλλων) (Dhami 2014, Cheng 2012, Van Paassen 2009).



Σχήμα 3.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας της ουρεολυτικής επαγόμενης καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου (Muynek et al., 2010) : (A) Προσέλκυση ιόντων ασβεστίου από τα βακτηριακά κύτταρα. Λαμβάνεται ουρία από βακτήρια και απελευθερώνει αμμώνιο (AMM) και διαλυμένο ανόργανο άνθρακα (DIC), (B) Εμφανίζεται ένας τοπικός υπερκορεσμός παρουσία ιόντων ασβεστίου, με αποτέλεσμα την καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου στο βακτηριακό κυτταρικό τοίχωμα, (C) Ολόκληρο το κύτταρο είναι καλυμμένο με ανθρακικό ασβέστιο (Cheng, 2012).

Η ουρία είναι μια οργανική ένωση με χημικό τύπο $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Το μόριό της έχει δύο αμινομάδες ($-\text{NH}_2$) οι οποίες συνδέονται με μία καρβονυλική ($\text{C}=\text{O}$) λειτουργική ομάδα. Η ουρία διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στον μεταβολισμό των αζωτούχων ενώσεων των οργανισμών και είναι η κύρια αζωτούχος ουσία στα ούρα των θηλαστικών. Είναι στερεή, άχρωμη και άοσμη. Διαλύεται εύκολα στο νερό σε όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον και είναι πρακτικά μη τοξική. Η ουρία χρησιμοποιείται σε λιπάσματα, στη χημική βιομηχανία, σε εργαστηριακές μεθόδους, σε ιατρικές μεθόδους, σε εκρηκτικά και για εμπορικές χρήσεις. Η ουρία συντίθεται στο σώμα πολλών οργανισμών ως μέρος του κύκλου της ουρίας, είτε από την οξείδωση των αμινοξέων είτε από την αμμωνία (<https://el.wikipedia.org/wiki/>).

Η Υδρόλυση της Ουρίας είναι μια μη αναστρέψιμη αντίδραση, στην οποία η ουρία αντιδρά με το νερό για να σχηματίσει αμμώνιο και ανθρακικό άλας (Van Paassen, 2009).

Η χημική (μη καταλυόμενη) υδρόλυση της ουρίας είναι μια πολύ αργή διαδικασία. Η *ουρεάση* (αμιδιωδρολάση ουρίας, EC 3.5.1.5) είναι ένα ένζυμο που καταλύει την υδρόλυση της ουρίας για να ληφθεί αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα. Η ουρεάση από το φασόλι ήταν το πρώτο κρυσταλλωμένο ένζυμο και έχει βρεθεί επίσης σε βακτήρια, μαγιά και αρκετά υψηλότερα φυτά. Η ουρεάση καταλύει την αντίδραση υδρόλυσης της ουρίας για την παραγωγή αμμωνίας και καρβαμιδικού άλατος. Το καρβαμιδικό άλας αποσυντίθεται αυθόρμητα για να δώσει ένα άλλο μόριο αμμωνίας και ανθρακικού οξέος (Mobley and Hausinger 1989, Cheng 2012).

Τα *θρεπτικά συστατικά* είναι η πηγή ενέργειας για τα βακτήρια. Η προσθήκη των θρεπτικών συστατικών συμβάλλει στην διατήρηση της ανάπτυξης και της βιωσιμότητας των βακτηρίων με αποτέλεσμα την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου βελτίωσης του εδάφους (Velpuri, 2015).

Η *δραστικότητα-δραστηριότητα ουρεάσης*, ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο υδρολύεται η ουρία σε υδατικό διάλυμα ανά γραμμάριο ξηρής βιομάζας και διαφέρει από είδος σε είδος (Hammes et al., 2003, Whiffin 2004).

Η *πυρήνωση*, δηλαδή η γέννηση νέων κρυστάλλων, πραγματοποιείται όταν το διάλυμα γίνεται αρκετά υπερκορεσμένο, ώστε ομάδες μορίων να συσσωματώνονται και να αποκτούν ένα κρίσιμο μέγεθος, πράγμα που τους επιτρέπει να αντιστέκονται στην τάση να διαλύονται και να αρχίζουν να αναπτύσσονται ως στερεά (Van Paassen, 2009).

Η πορεία ανάπτυξης των βακτηρίων σε θρεπτικά διαλύματα μπορεί να παρασταθεί με καμπύλη η οποία διαχωρίζεται σε τέσσερις φάσεις (Σχήμα 3.2):

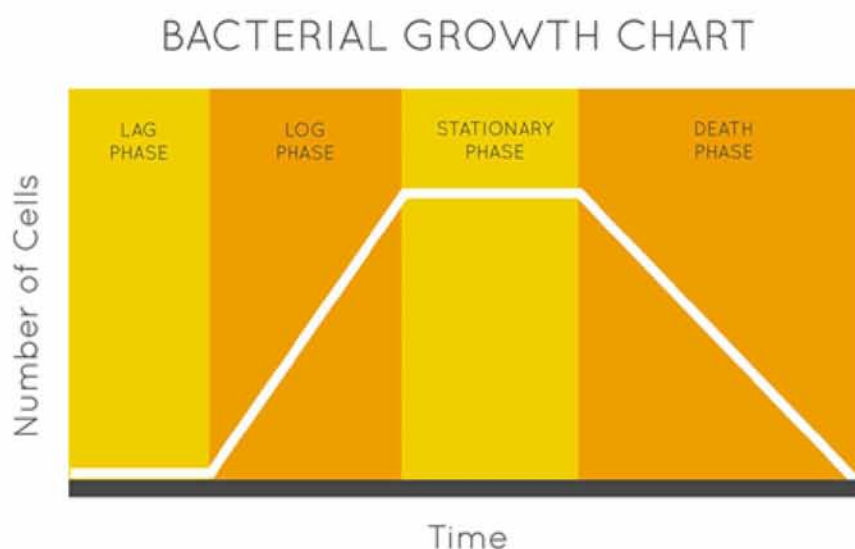
1. *Στατική φάση (lag phase)*: Στη φάση αυτή τα κύτταρα των βακτηρίων συνθέτουν τα απαραίτητα ένζυμα, και τις πρωτεΐνες για την επόμενη φάση. Πρόκειται για φάση προσαρμογής των βακτηρίων στις συνθήκες που βρίσκονται, και η διάρκεια αυτής της φάσης εξαρτάται από τον αρχικό αριθμό των βακτηρίων, από την ηλικία της καλλιέργειας και από τη σύσταση του θρεπτικού υλικού.

2. *Λογαριθμική φάση (log phase)*: Η φάση αυτή χαρακτηρίζεται από έντονο πολλαπλασιασμό των βακτηρίων. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης τα κύτταρα μπορούν να υποστούν αλλαγές ως προς το μέγεθος. Στο τέλος παρατηρείται αναστολή στην ανάπτυξη λόγω της εξάντλησης των θρεπτικών συστατικών και λόγω

συγκέντρωσης βλαπτικών προϊόντων για τον περαιτέρω πολλαπλασιασμό των βακτηρίων. Για τους αερόβιους μικροοργανισμούς η έλλειψη οξυγόνου αποτελεί κύριο αίτιο αναστολής της ανάπτυξης.

3. *Φάση στασιμότητας (stationary phase)*: Κατά τη φάση αυτή αναστέλλεται ο πολλαπλασιασμός των βακτηρίων λόγω έλλειψης θρεπτικών υλικών, ελάττωσης του οξυγόνου και συσσώρευση τοξικών προϊόντων από το μεταβολισμό των κυττάρων. Παρατηρείται, ωστόσο, κάποιος ελάχιστος πολλαπλασιασμός, ικανός να αντικαθιστά τον αριθμό των νεκρών κυττάρων.

4. *Φάση θανάτου (death phase)*: Σε αυτό το στάδιο, ο αριθμός των νεκρών κυττάρων υπερβαίνει κατά πολύ τον αριθμό των παραγόμενων. Η διάρκεια της φάσης θανάτου εξαρτάται από το βακτήριο (<http://ecourse.uoi.gr/>).



Σχήμα 3.2 Οι 4 φάσεις ανάπτυξης των βακτηρίων συναρτήσει του χρόνου (<http://ecourse.uoi.gr/>).

Η *βιο-ορυκτοποίηση* (biomineralization) είναι η διαδικασία σύνθεσης ανόργανων ορυκτών υλικών από τους ζωντανούς οργανισμούς. Η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εξωκυτταρικής βακτηριακής βιο-ορυκτοποίησης και ένας μεγάλος αριθμός γενεών βακτηρίων έχουν παρατηρηθεί σε μια σειρά από φυσικά περιβάλλοντα (Dhami, 2014).

Η *βιο-αποικοδόμηση* (bioremediation) είναι μια τεχνική διαχείρισης των αποβλήτων που περιλαμβάνει την χρήση μικροοργανισμών για την εξουδετέρωση των ρύπων από κάποιον μολυσμένο χώρο. Είναι μια θεραπεία που χρησιμοποιεί φυσικούς οργανισμούς για τη

μετατροπή επικίνδυνων ουσιών σε λιγότερο τοξικές ή μη τοξικές ουσίες. Η εφαρμογές της μεθόδου είναι είτε εργαστηριακές είτε συμβαίνουν επιτόπου (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bioremediation>).

Οι μικροοργανισμοί εκκρίνουν τα *EPS (Extracellular Polymeric Substances)* ή σε ελληνικούς όρους, *Εξωκυτταρικές Πολυμερείς Ουσίες*, σαν μέρος του μεταβολισμού τους. Οι μικροβιακές EPS διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία ορυκτών, είτε μέσω της παγίδευσης και της συγκέντρωσης ιόντων ασβεστίου, είτε ως αποτέλεσμα συγκεκριμένων πρωτεϊνών που επηρεάζουν την καθίζηση (Dhami, Dejong 2013).

Η *οπτική πυκνότητα (OD)* είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στον τομέα της οπτικής φασματοσκοπίας για να περιγράψει τη διάδοση ενός κύματος μέσω ενός υλικού. Η οπτική πυκνότητα αναφέρεται επίσης ως η απορρόφηση του μέσου (<https://www.azooptics.com>). Η πυκνότητα *OD₆₀₀* είναι μια συντομογραφία η οποία δείχνει την απορρόφηση ή την οπτική πυκνότητα ενός δείγματος που μετρήθηκε σε μήκος κύματος 600 nm. Είναι μια κοινή μέθοδος για την εκτίμηση της συγκέντρωσης βακτηριακών ή άλλων κυττάρων σε ένα υγρό.

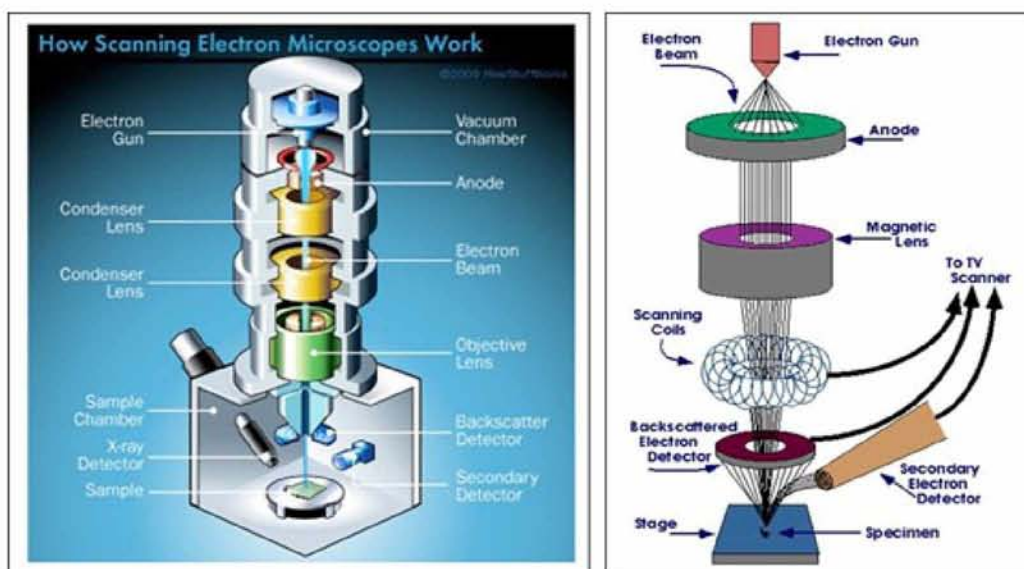
In vitro είναι επιστημονικός όρος της Βιολογίας που αναφέρεται κυρίως στην τεχνική της πραγματοποίησης ενός δεδομένου πειράματος σε δοκιμαστικό σωλήνα ή γενικότερα για πειράματα που πραγματοποιούνται σε αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες έξω από τους ζωντανούς οργανισμούς (https://el.wikipedia.org/wiki/In_vitro).

Το *SEM (Scanning Electron Microscope)*, δηλαδή το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελεί σημαντικό εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες επιστήμες υλικών όταν είναι απαραίτητη η μεγέθυνση για περαιτέρω σύγκριση και ανάλυση (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Alvarado).

Το μικροσκόπιο αυτό απεικονίζει την επιφάνεια του δείγματος, σαρώνοντάς τη με μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Η σάρωση δίνει σαφείς εικόνες για της τοπογραφία του αντικειμένου και στη συγκεκριμένη περίπτωση εικόνες των σωματιδίων της άμμου και των δομών ασβεστίου. Ο εξοπλισμός SEM δίνει επίσης μια σαφή εικόνα για τα σημεία όπου τα βακτήρια προκάλεσαν τη δημιουργία του ασβεστίτη και για το πόσο πυκνά και διασκορπισμένα είναι τα βακτήρια σε όλο το δείγμα (Σχήμα 3.4).

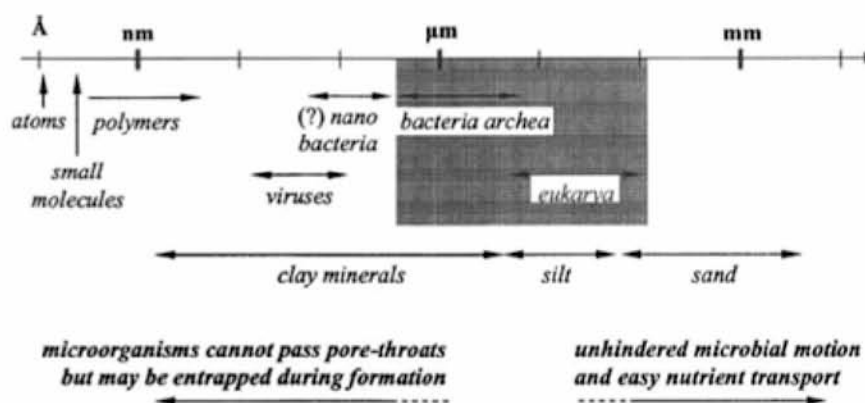


Σχήμα 3.4 Περιγραφή λειτουργίας του SEM (<http://emicroscope.blogspot.gr>).

3.3 Γενικά στοιχεία για τα βακτήρια

Η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου βελτίωσης των εδαφών με τη χρήση βακτηρίων, απαιτεί τον συνδυασμό των γνώσεων των γεωτεχνικών ιδιοτήτων του υπό βελτίωση εδάφους και την πρόβλεψη των χημικών διαδικασιών που δύναται να λάβουν χώρα σε αυτό μέσω των βακτηρίων. Σημαντικό κομμάτι της επιτυχίας της μεθόδου αποτελεί και η κατανόηση των ιδιοτήτων των βακτηρίων και των μηχανισμών δράσης τους.

Υπάρχουν από 10^9 έως 10^{12} οργανισμοί ανά κίλο εδαφικής μάζας στο πεδίο. Οι μονοκύτταροι μικροοργανισμοί συμπεριλαμβάνουν όλους τους τύπους βακτηρίων, τα Archaea και τα Eukarya. Συγκεκριμένα, τα βακτήρια είναι οι κυρίαρχοι μικροοργανισμοί στα εδάφη. Έχουν απλή κατασκευή κυττάρου χωρίς πυρήνα που να περικλείεται από μεμβράνη και οι γενετικές τους πληροφορίες περιλαμβάνονται στο μόριο του DNA. Βρίσκονται ακόμα και σε μεγάλα βάθη της λιθόσφαιρας. Κάποια βακτήρια σχηματίζουν σπόρια έτσι ώστε να αντέχουν στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Τα βακτήρια μπορεί να είναι περίπου στρογγυλά, σπειροειδή ή ραβδωτά. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από 0.5 - 3 μm , και παρ' ότι το αποδεκτό όριο στο μέγεθος τους για τη ζωή είναι 0.2 μm , υπάρχουν αποικίες μεγέθους 0.05 - 0.2 μm που έχουν αναγνωριστεί στο αίμα, στους βράχους και στα ορυκτά και ονομάζονται νανο-βακτήρια (Folk & Lynch, 1997). Μπορούν να κινηθούν ελεύθερα μεταξύ των πόρων των χονδρόκοκκων υλικών ενώ δεν μπορούν να διαπεράσουν τα μικρότερα κενά μεταξύ των πόρων στα λεπτόκοκκα υλικά (κυρίως στην άργιλο). Τα βακτήρια δεν μπορούν να κινηθούν στο άνοιγμα μεταξύ των πόρων, όταν αυτό είναι μικρότερο από 0.4 μm . Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.5) δίνονται πληροφορίες για το μέγεθος των διαφόρων μικροοργανισμών σε σχέση με την ικανότητά τους να κινούνται μέσω των κενών των πόρων του εδάφους.



Σχήμα 3.5 Σύγκριση μεταξύ των μεγεθών των μικροοργανισμών και των σωματιδίων του εδάφους (Mitchell & Santamarina, 2005).

Τα βακτήρια μπορούν να επιβιώσουν σε pH μικρότερο του 2 αλλά και μεγαλύτερο του 10. Επίσης, μπορούν να ζήσουν αντίστοιχα σε πολύ χαμηλές αλλά και υψηλές θερμοκρασίες και σε πιέσεις πολλών εκατοντάδων bars. Ο χρόνος αναπαραγωγής τους μπορεί να είναι μικρότερος από δέκα λεπτά αλλά τυπικά χρειάζεται μια ώρα. Υπολογίζεται πως έπειτα από χρόνο αναπαραγωγής μιας ώρας και μετά το πέρασμα 24 ωρών, τα αναπαραγόμενα βακτήρια είναι 2^{24} .

Τα ποσοστά των βακτηρίων τα οποία συναντώνται στο έδαφος σε βάθος 30 cm παρατίθενται στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Ποσοστά των διαφόρων τύπων βακτηρίων τα οποία εντοπίστηκαν στο έδαφος (Alexander, 1977).

Genus	Percentage (%)
Arthrobacter	5 to 60
Bacillus	7 to 67
Pseudomonas	3 to 15
Agrobacterium	>20
Alcaligenes	2 to 12
Flavobacterium	2 to 10
Others	<5

3.3.1 Κατηγορίες βακτηρίων

Τα βακτήρια ανάλογα με τις τιμές του pH και την παρουσία ή απουσία του οξυγόνου, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες.

Ανάλογα με το pH

Τα περισσότερα βακτηριακά κύτταρα έχουν αρνητικό επιφανειακό φορτίο για pH μεταξύ των τιμών 5 και 7. Τα βακτηριακά κύτταρα με τιμές για το pH 2-3, χαρακτηρίζονται ως gram-positive (θετικά κατά Gram), ενώ για τιμές του pH 4-5 ονομάζονται gram-negative (αρνητικά κατά Gram).

Ανάλογα με την παρουσία ή μη Οξυγόνου

Τα αερόβια και αναερόβια βακτήρια είναι ετερότροφα. Τα αερόβια βακτήρια ζουν υπό την παρουσία ελεύθερου ή δεσμευμένου οξυγόνου και το χρησιμοποιούν ως δέκτη ηλεκτρονίων. Τα αναερόβια βακτήρια μπορούν να επιζήσουν με την απουσία οξυγόνου και

είναι πιο ανθεκτικά όσον αφορά την επιβίωσή τους σε υπόγεια περιβάλλοντα. Η τρίτη κατηγορία βακτηρίων με βάση την ύπαρξη ή μη του οξυγόνου, είναι τα προαιρετικά βακτήρια τα οποία μπορούν να επιβιώσουν με ή χωρίς την παρουσία του.

3.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη δράση των βακτηρίων

Η δραστηριότητα των μικροβίων και ο ρυθμός αναπαραγωγής τους επηρεάζονται από κάποιους παράγοντες, όπως είναι η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, η διαθεσιμότητα νερού και κάποιοι επιπλέον περιβαλλοντικοί παράγοντες.

Τα θρεπτικά αυτά συστατικά είναι απαραίτητα από τους μικροοργανισμούς σαν πηγή ενέργειας και για το κυτταρικό υλικό. Η ανάπτυξη και αναπαραγωγή των βακτηρίων είναι ελάχιστη υπό την απουσία θρεπτικών συστατικών. Τα θρεπτικά συστατικά μπορεί να είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το άζωτο, το ασβέστιο, ο σίδηρος, το θείο και κάποιοι συνδυασμοί οργανικών και ανόργανων ενώσεων κλπ.

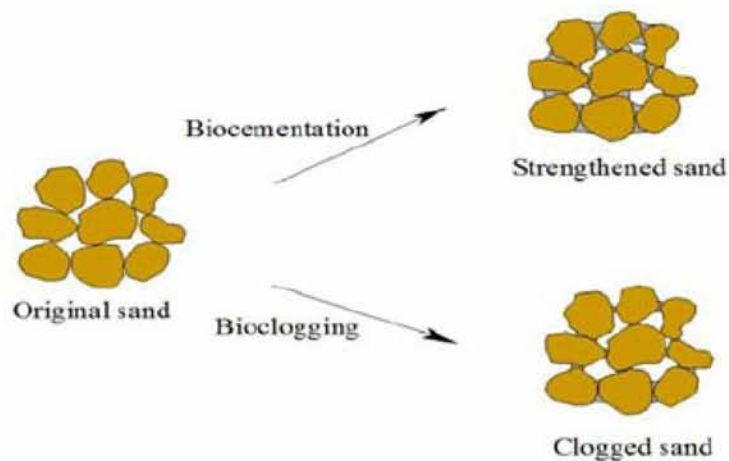
Η έλλειψη του νερού στο περιβάλλον διαταράσσει τους μικροοργανισμούς και δημιουργεί προβλήματα κατά τη βιολογική τους δραστηριότητα καθώς αυτό γεμίζει ποσοστό των κυττάρων το οποίο είναι ίσο με 70 %. Το νερό βοηθά στη μεταφορά των θρεπτικών ουσιών, συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις, επηρεάζει την τιμή του pH του περιβάλλοντος και τη διαλυτότητα των υλικών (Hatter, 1973).

3.4 Εφαρμογές της δράσης των βακτηρίων στη Γεωτεχνική Μηχανική

Οι μικροοργανισμοί και συγκεκριμένα τα βακτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλές διαδικασίες μέσω των μηχανισμών δράσης τους. Συμβάλλουν στον σχηματισμό των λεπτόκοκκων εδαφών, μπορούν να αλλάξουν τη συμπεριφορά στα χονδρόκοκκα εδάφη, να επιταχύνουν τις γεωχημικές αντιδράσεις και να προκαλέσουν αλλαγές στις χημικές και μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων έπειτα από τη δειγματοληψία.

Σύμφωνα με τους Ivanov & Chu (2008), η Μικροβιακή Γεωτεχνολογία έχει δυο βασικές εφαρμογές (Σχήμα 3.6):

- Η βιο-τσιμεντοποίηση (biocementation) αφορά τη δημιουργία υλικών συνδεδεμένων στα σωματίδιά τους μέσω μικροβιακών διαδικασιών επί τόπου, έτσι ώστε να αυξάνεται η διατμητική αντοχή του εδάφους.
- Η βιο-απόφραξη (bioclogging) αναφέρεται στη δημιουργία υλικών με γεμάτους κόκκους μέσω μικροβιακών μέσων έτσι ώστε να μειώνονται το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα.



Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών βιο-τσιμεντοποίησης και βιο-απόφραξης (<https://www.researchgate.net>).

Οι μηχανισμοί για τις εφαρμογές των μικροβίων στη Γεωτεχνική Μηχανική μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- (α) Καθίζηση ορυκτών
- (β) Μετασχηματισμός ορυκτών
- (γ) Συσσώρευση βιοπολυμερών και βιοφίλμ
- (δ) Παραγωγή βιοαερίου

Αναλυτικά οι μηχανισμοί για τις εφαρμογές των βακτηρίων στη Γεωτεχνική μηχανική είναι:

- (α) Καθίζηση ορυκτών

Μια βιο-γεωχημική διαδικασία η οποία βασίζεται στην καθίζηση ορυκτών είναι η μέθοδος MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation). Στην μέθοδο MICP, η δημιουργία του

ανθρακικού ασβεστίου στο εσωτερικό της εδαφικής μήτρας πραγματοποιείται ως αποτέλεσμα της μεταβολικής δραστηριότητας των μικροβίων (Stocks-Fischer, 1999; Ramakrishnan, 2001; Velpuri, 2015). Η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να επιτευχθεί μέσω πολλών διαφορετικών διαδικασιών, στόχος των οποίων είναι η σύνδεση των σωματιδίων του εδάφους στην επαφή σωματίδιο με σωματίδιο.

Σύμφωνα με τον Baskar (2006), ορισμένα βακτήρια και μύκητες μπορούν να προκαλέσουν καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου εξωκυτταρικά μέσω διαφόρων διεργασιών που περιλαμβάνουν τη φωτοσύνθεση, την αμμωνιοποίηση, την απονιτροποίηση, τη μείωση του θεικού άλατος και την αναερόβια οξείδωση θειούχων. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι μέθοδοι της υδρόλυσης της ουρίας, της απονιτροποίησης, της μείωσης του θείου καθώς και η καθίζηση του ασβεστίου μέσω των φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών.

Υδρόλυση της ουρίας

Η υδρόλυση της ουρίας είναι μία από τις πρώτες διεργασίες που συνδέθηκε με την μικροβιακά προκαλούμενη δημιουργία και καθίζηση ανθρακικών συστατικών στα τέλη του 19^{ου} αιώνα (Ehrlich, 1996). Η διαδικασία αυτή έχει αποκτήσει αυξημένη προσοχή από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα για αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές. Αποτελεί τον πιο απλό και αποδοτικό μηχανισμό, όσον αφορά στην ενέργεια, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου. Η υδρόλυση της ουρίας ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$) αποτελεί μια μη αναστρέψιμη αντίδραση, στην οποία η ουρία αντιδρά με το νερό, με αποτέλεσμα την παραγωγή ανθρακικού άλατος υπό την παρουσία αμμωνίου. Η υδρόλυση της ουρίας καταλύεται από το ένζυμο ουρεάση και η δραστηριότητα του ενζύμου αυτού εντοπίστηκε σε μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών και φυτών.

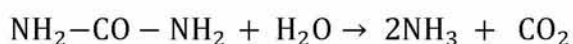
Οι μικροοργανισμοί που παράγουν ουρεάση είναι γένη *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Sporolactobacillus*, *Clostridium* και *Desulfotomaculum*. Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες σχετικά με την μέθοδο MICP χρησιμοποιούν τα βακτήρια *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859), καθώς ο μικροοργανισμός αυτός, παλαιότερα γνωστός ως *Bacillus pasteurii*, είναι γνωστός για την υψηλή ουρεολυτική του δραστηριότητα. Το *S. pasteurii* έχει σχήμα ράβδου και περίπου 1 μm σε διάμετρο και μήκος 3 έως 5 μm περίπου (Dejong, 2011). Το βακτήριο *Sporosarcina Pasteurii* (Σχήμα 3.7) είναι ένας από τους πιο άφθονους αλκαλοφιλικούς μικροοργανισμούς του εδάφους και περιέχει το ένζυμο ουρεάση με υψηλή δραστηριότητα. Ο πρωταρχικός ρόλος των βακτηρίων στη διαδικασία κατακρήμνισης έχει αποδοθεί στην ικανότητά τους να δημιουργούν ένα αλκαλικό περιβάλλον μέσα από διάφορες φυσιολογικές

δράσεις (Baskar 2006). Ο μικροοργανισμός αυτός καλλιεργείται στο εργαστήριο, εισάγεται στο έδαφος, υπό την παρουσία διαλύματος ουρίας και χλωριούχου ασβεστίου. Η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να προκληθεί από την αλληλεπίδραση του μικροοργανισμού *Sporosarcina Pasteurii*, ο οποίος παράγει το ένζυμο ουρεάση, και της αμμωνίας, μέσω μιας σειράς σύνθετων βιοχημικών αντιδράσεων.

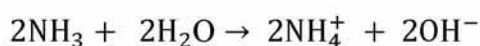


Σχήμα 3.7 Απεικόνιση του βακτηρίου *Sporosarcina Pasteurii* (<https://shareahack.com/>).

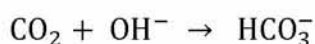
Η δημιουργία και καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου, περιλαμβάνει συνολικά τέσσερις αντιδράσεις, οι οποίες φαίνονται στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 3.8). Αρχικά, μέσω της υδρόλυσης της ουρίας παράγεται η αμμωνία και το διοξείδιο του άνθρακα.



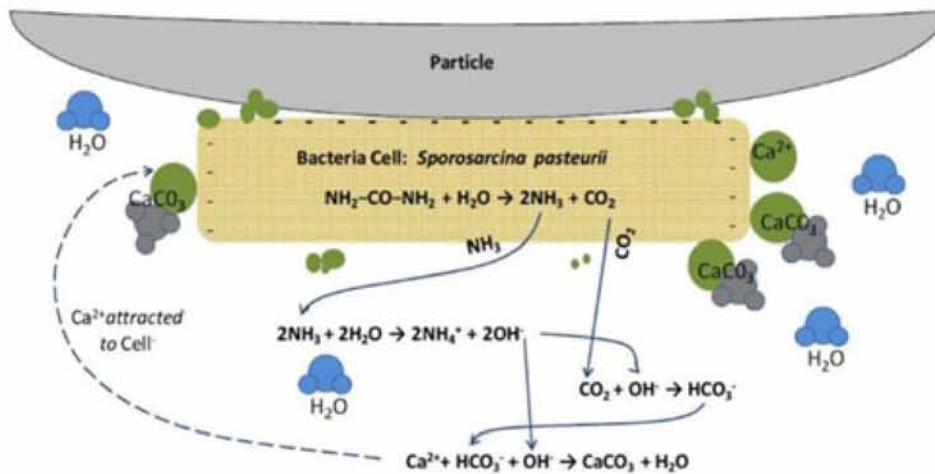
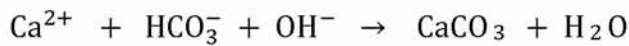
Στη συνέχεια, η αμμωνία αντιδρά με το νερό προς την παραγωγή ιόντων αμμωνίου και ανιόντων υδροξειδίου.



Το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τα ανιόντα του υδροξειδίου και παράγεται το όξινο ανθρακικό ιόν (HCO_3^-).

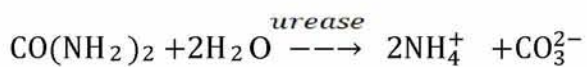


Το όξινο ανθρακικό ιόν υπό την παρουσία κατιόντων ασβεστίου και ανιόντων υδροξειδίου παράγει ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3).

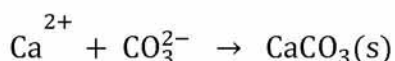


Σχήμα 3.8 Επισκόπηση της βιο-διαμεσολαβούμενης καθίζησης CaCO₃ με τη χρήση της υδρόλυσης της ουρίας (Montoya 2012).

Ο Van Paassen (2009) στη διατριβή του με τίτλο «Biogrout: Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation», περιγράφει τις αντιδράσεις της διαδικασίας υδρόλυσης της ουρίας με διαφορετικό τρόπο. Σύμφωνα με τον Van Paassen λοιπόν, η μικροβιακή ουρεάση καταλύει την υδρόλυση της ουρίας με αποτέλεσμα την παραγωγή αμμωνίου και ανθρακικών ιόντων.



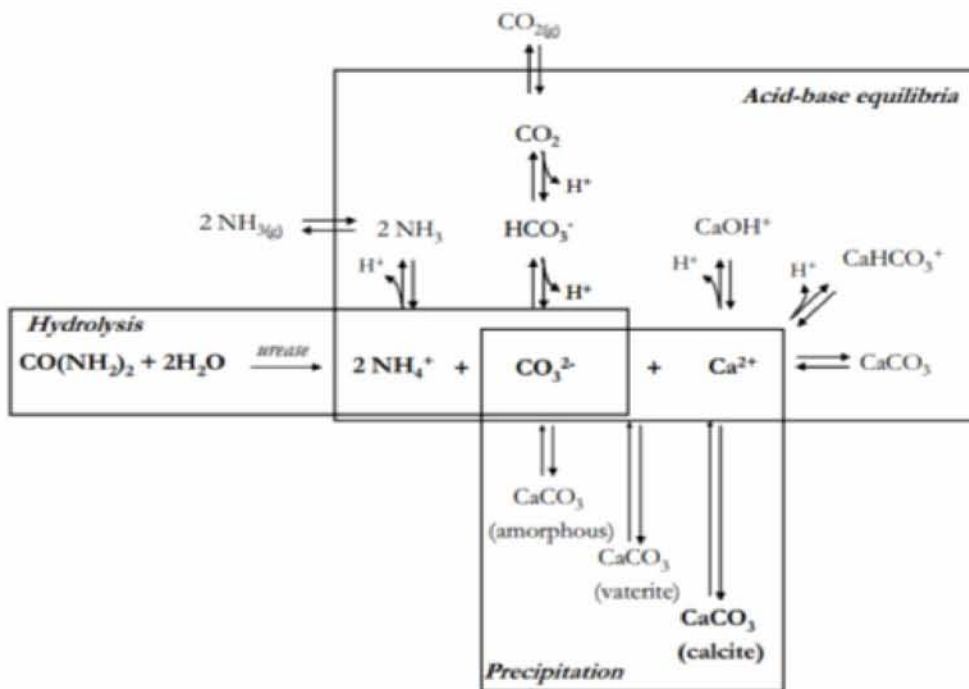
Τα παραγόμενα ανθρακικά ιόντα καθιζάνουν παρουσία ιόντων ασβεστίου ως κρύσταλλοι ασβεστίου, οι οποίοι σχηματίζουν γέφυρες μεταξύ των υφιστάμενων κόκκων άμμου.



Οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται από την αντίδραση καλύπτουν εν μέρει τα κενά των πόρων και έτσι μειώνουν το πορώδες και τη διαπερατότητα της άμμου. Επιπλέον, σχηματίζουν επίστρωση στους κόκκους ή γέφυρες μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη βελτίωση

της αντοχής και της δυσκαμψίας του υλικού. Οι Whiffin et al., 2007, υπέδειξαν ότι τουλάχιστον 60 kg καταβυθισμένου ανθρακικού ασβεστίου ανά κυβικό μέτρο εδάφους χρειάζονται για να επιτευχθεί μια μετρήσιμη αύξηση της αντοχής του εδάφους. Το υπόλοιπο διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου αφαιρείται με έκπλυση με νερό. Μόλις καταβυθισθεί, το ανθρακικό ασβέστιο θα διαλύεται αργά, είτε με συνεχή έκπλυση με ρυθμισμένα όξινα υπόγεια ύδατα είτε ως αποτέλεσμα διεργασιών στους πόρους, όπως για παράδειγμα η αποικοδόμηση της βιομάζας ή η νιτροποίηση. Όταν κατακρημνιστεί επαρκές ανθρακικό ασβέστιο, μπορεί να επιτευχθεί ανθεκτική σταθεροποίηση του εδάφους.

Στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 3.9) παρατίθενται σχηματικά οι χημικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου. Οι αντιδράσεις αυτές χωρίζονται σε τρεις ομάδες, οι οποίες είναι η υδρόλυση της ουρίας προκαλούμενη από μικρόβια, αντιδράσεις για την ισορροπία οξέος-βάσης και η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου.



Σχήμα 3.9 Οι χημικές αντιδράσεις της υδρόλυσης της ουρίας, της ισορροπίας οξίνου-βάσης και τελικά της καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου. Με έντονα γράμματα παρατίθενται τα αρχικά υποστρώματα και τα τελικά προϊόντα των αντιδράσεων της υδρόλυσης και της κατακρήμνισης (Van Paassen, 2009).

Η αμμωνία αυξάνει το pH του περιβάλλοντος εδάφους, βοηθώντας με αυτό τον τρόπο στην δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου. Οι Stocks-Fischer et al. ανέφεραν ότι το βέλτιστο

pH για τη δραστηριότητα του ενζύμου της ουρεάσης είναι μεταξύ των τιμών 7.5 και 8.0 (Evans et al., Arunachalam et al., Ng 2012).

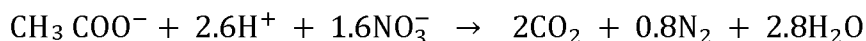
Η δημιουργία των ανθρακικών αλάτων μέσω υδρόλυσης ουρίας, από βακτήρια, είναι ο πιο απλός και πιο εύκολα ελεγχόμενος μηχανισμός της μεθόδου MICP, με ευρύ πεδίο εφαρμογής και δυνατότητα παραγωγής υψηλών ποσοτήτων ανθρακικών αλάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα (Dhami et al., 2014).

Εκτός από τον παραπάνω μηχανισμό, υπάρχουν και επιπλέον βιολογικές διεργασίες μέσω των οποίων αυξάνεται το pH και δημιουργούνται υπερκορεσμένες συνθήκες, που απαιτούνται για την δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου. Οι εναλλακτικές αυτές διεργασίες αναλύονται παρακάτω και είναι η απονιτροποίηση, η μείωση του θείου και η καθίζηση του ασβεστίου μέσω των φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των εναλλακτικών διεργασιών είναι ο βραδύτερος ρυθμός με τον οποίο μπορούν να δημιουργηθούν και να διατηρηθούν οι υπερκορεσμένες συνθήκες (Montoya 2012).

Απονιτροποίηση

Η απονιτροποίηση είναι μια αναερόβια διαδικασία, η οποία έχει ισχύ και σε μεγάλα βάθη, όπου δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο. Η απονιτροποίηση είναι κυρίαρχη διαδικασία στην περίπτωση όπου υπάρχει νιτρικό άλας και κάποια οξειδώσιμη μορφή άνθρακα. Κάτω από αναερόβιες συνθήκες, το νιτρικό (NO_3^-) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δέκτης ηλεκτρονίων από πολλά βακτήρια, παράγοντας άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα. Η μείωση των κατιόντων υδρογόνου αυξάνει το pH και δημιουργεί τις επιθυμητές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου, παραγωγή αερίου αζώτου και κάποια περίσσεια διοξειδίου του άνθρακα (Van Paassen 2009).

Η απονιτροποίηση περιγράφεται μέσω της επόμενης αντίδρασης:



Η μέθοδος της απονιτροποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να ξεπεραστούν ορισμένα προβλήματα που προκύπτουν από τη διαδικασία υδρόλυσης της ουρίας, όπως η παραγωγή και η απαιτούμενη αφαίρεση του χλωριούχου αμμωνίου μετά το τέλος των αντιδράσεων και της παραγωγής των κρυστάλλων, καθώς επίσης και στην περίπτωση όπου απαιτείται η χρήση αερόβιων οργανισμών με συνακόλουθη δραστηριότητα αποσύνθεσης

ουρέασης στο χρόνο λόγω έλλειψης οξυγόνου στην υπόγεια επιφάνεια (Whiffin et al., 2007, Van Paassen 2009). Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος της απονιτροποίησης έχει έναν αρκετά αργό ρυθμό συγκριτικά με εκείνον της υδρόλυσης της ουρίας. Η εφαρμογή της νιτροποίησης και των ολιγοτροφικών βακτηρίων είναι αργής ανάπτυξης οργανισμοί με χαμηλή ταχύτητα παραγωγής εξωπολυσακχαρίτη και γι' αυτό το λόγο οι εφαρμογές τους απαιτούν μακροχρόνια εδαφική θεραπεία (Ivanov and Chu 2008).

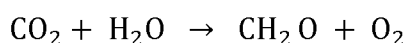
Μείωση του Θείου

Το θειικό ιόν (SO_4^{2-}) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως δέκτης ηλεκτρονίων κάτω από αναερόβιες συνθήκες από μικροοργανισμούς. Βακτήρια όπως τα *Desulfonibrio* spp και *Desulfotomaculum* spp, οξειδώνουν οργανικές ενώσεις, μειώνοντας παράλληλα το θειικό για την παραγωγή υδρόθειου (H_2S), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και παράγοντας ανιόντα υδροξειδίου αυξάνουν την αλκαλικότητα. Η αντίδραση αναγωγής του θείου είναι η εξής:

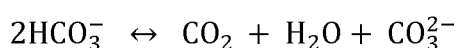


Καθίζηση ασβεστίου μέσω των φωτοσυνθετικών οργανισμών

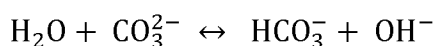
Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί σε υδρόβια περιβάλλοντα προκαλούν την πιο κοινή μορφή μικροβιακής προκαλούμενης καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου (MICP), καθώς κατά την πραγματοποίηση της αντίδρασης υπό την παρουσία ασβεστίου παράγεται το ανθρακικό ασβέστιο. Αρχικά, το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας αντιδρά με το νερό και παράγεται οξυγόνο και φορμαλδεΰδη, μέσω της παρακάτω αντίδρασης.



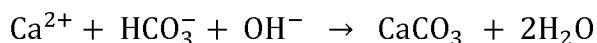
Στη συνέχεια, το όξινο ανθρακικό ιόν λειτουργεί σταθεροποιητικά στο pH του νερού μέχρι ενός σημείου κατά την προσθήκη οξέων, αφού δεσμεύει το υδρογόνο που απελευθερώνεται κατά την διάλυση των οξέων, δημιουργώντας νερό, διοξείδιο του άνθρακα και ανθρακικό άλας, μέσω της παρακάτω αναστρέψιμης αντίδρασης.



Μέσω της αναστρέψιμης αντίδρασης της υδρόλυσης του ανθρακικού άλατος, παράγονται όξινο ανθρακικό ιόν και ανιόντα υδροξειδίου.



Τα προϊόντα της προηγούμενης αντίδρασης, υπό την παρουσία κατιόντων ασβεστίου, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου.



Οι ετερότροφοι οργανισμοί μπορούν επίσης να κατακρημνίσουν τον ασβεστίτη με την παραγωγή ανθρακικών ιόντων και την τροποποίηση του περιβάλλοντος για να ευνοηθεί η κατακρήμνιση.

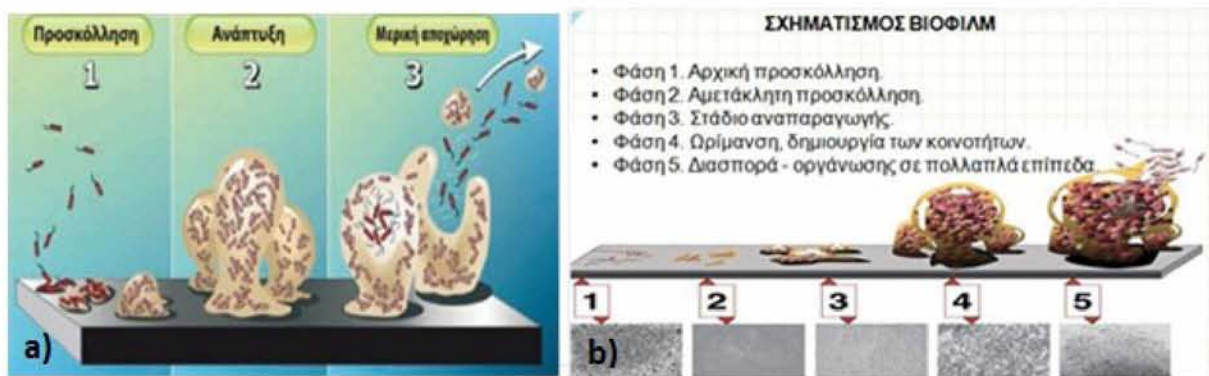
(β) Μετασηματισμός ορυκτών

Η απονιτροποίηση θα κυριαρχεί έως ότου εξαντληθεί το νιτρικό άλας, δηλαδή σε μεγαλύτερα βάθη των περιβαλλοντικών συστημάτων. Όταν λοιπόν εξαντληθεί το νιτρικό άλας, ο σίδηρος μπορεί να είναι ο κυρίαρχος δέκτης ηλεκτρονίων για μικροβιακή αναερόβια αναπνοή. Πολλοί μικροοργανισμοί μεσολαβούν στον κύκλο του σιδήρου (Thiobacillus). Ο σίδηρος υπάρχει στο υπόγειο έδαφος κυρίως με τις μορφές ιόντων Fe^{2+} και Fe^{3+} και ο κύκλος του σιδήρου περιλαμβάνει την αναγωγή του Fe^{2+} και την οξείδωση του Fe^{3+} . Επειδή τα στερεά οξυ-υδροξείδια του σιδήρου αναμένεται να είναι η κυρίαρχη μορφή του οξειδωμένου σιδήρου στα εδάφη, η αξιοσημείωτη ικανότητα αυτής της βακτηριακής ομάδας να χρησιμοποιεί ένα στερεό σαν ένα βιολογικό οξειδωτικό, απαιτεί επαφή μεταξύ βακτηριδίων και σωματιδίων, γεγονός που είναι ελκυστικό για την έναρξη της δημιουργίας συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των κόκκων. Επίσης, η μικροβιακή αναγωγή του Fe (III) προς Fe (II), δηλαδή η μετατροπή του σμηκτίτη σε ιλλίτη, μπορεί να μειώσει την διαστολή σε μία πλούσια σε σίδηρο διογκούμενη άργιλο (Kostka et al., 1996). Ο σμηκτίτης ανήκει στα αργιλικά ορυκτά και αποτελείται από πυριτικό νάτριο-ασβέστιο-αλουμίνιο. Τα μέταλλα του σμηκτίτη είναι τα κυρίαρχα μέταλλα που διαστέλλουν το έδαφος. Ο ιλλίτης είναι πλούσιος σε κάλιο, που διαστέλλεται λιγότερο. Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι οι μικροβιακές μέθοδοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό της διαστολής σε ορισμένα διογκούμενα εδάφη.

(γ) Συσσώρευση βιοπολυμερών και βιοφίλμ

Η χρήση μικροβακτηρίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία βιοφίλμ στα κενά των πόρων του εδάφους. Τα βιοφίλμ σχηματίζονται όταν οι μικροοργανισμοί προσκολλώνται σε μια επιφάνεια και εκκρίνουν EPS σαν μέρος του μεταβολισμού τους. Τα EPS ενισχύουν την προσκόλληση περισσότερων μικροοργανισμών και σωματιδίων, σχηματίζοντας έτσι τα βιοφίλμ, τα οποία δύναται να προκαλέσουν αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

Στο υπέδαφος η ανάπτυξη βιοφίλμ μπορεί να μειώσει την υδραυλική αγωγιμότητα, διαδικασία που ονομάζεται biocllogging (βιο-απόφραξη). Η εφαρμογή της βιο-απόφραξης συνίσταται στην αφαίρεση του υλικού που προκαλεί φραγή προκειμένου να αντικατασταθεί ή να διατηρήσει τη λειτουργικότητα των φρεατίων ή των αποχετεύσεων. Η ανάπτυξη των βιοφίλμ δύναται να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα καθώς σε κάποιες περιπτώσεις είναι διαλυτά σε ισχυρά οξειδωτικά, με αποτέλεσμα να προκύπτουν περιβαλλοντικά προβλήματα και προβλήματα στη διάρκεια ζωής (Dejong,2013). Στις δύο επόμενες εικόνες παρατίθενται τα στάδια και οι φάσεις για τον σχηματισμό των βιοφίλμ (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 a) Η Διαδικασία σχηματισμού βιοφίλμ, b) Ο σχηματισμός βιοφίλμ μέσω 5 διαφορετικών φάσεων (<http://www.seraclean.gr>, <https://mossleingreece.wordpress.com>).

Οι εφαρμογές από την χρήση των βιοπολυμερών έχουν μελετηθεί τόσο εργαστηριακά όσο και στο πεδίο. Η ανάμιξη των βιοπολυμερών με τα εδάφη έδειξε μείωση στην υδραυλική αγωγιμότητα και αύξηση στη διατμητική αντοχή. Μέσω της μείωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας σχηματίζονται επί της ουσίας υδραυλικά εμπόδια. Επίσης, με την αποικοδόμηση βιοπολυμερών επιταχυνόμενα με ένζυμα, αυτά λειτουργούν προσωρινά ως υγρά υποστήριξης εκσκαφών για τη δημιουργία διαπερατών εμποδίων για την αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων.

(δ) Παραγωγή βιοαερίου

Η βιολογική δραστηριότητα στο υπέδαφος συνοδεύεται συχνά από την ανάπτυξη διακριτών φυσαλίδων αερίου σε κορεσμένα περιβάλλοντα. Μια ποικιλία αερίων μπορούν να παραχθούν από μικροβιακές διαδικασίες (διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, μεθάνιο, άζωτο), ενώ παράλληλα ο οργανισμός και το οξειδωτικό/αναγωγικό περιβάλλον του νερού

των πόρων να επηρεάζουν τα προϊόντα της αντίδρασης. Παράδειγμα αποτελεί η χρήση του οξυγόνου από αερόβια μικρόβια σαν υποδοχέα ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια της μικροβιακής αναπνοής. Η απονιτροποίηση συμβαίνει κατά την μείωση του νιτρικού, παράγει άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα σαν προϊόντα της αντίδρασης σε περιβάλλοντα με υψηλό λόγο άζωτου προς άνθρακα. Ακόμη, μικρή μείωση στο επίπεδο του κορεσμού του εδάφους μειώνει την ευαισθησία του εδάφους στη ρευστοποίηση.

3.5 Εκτενής περιγραφή της μεθόδου MICP

3.5.1 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο πεδίο

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των τσιμεντοποιημένων εδαφών. Όσον αφορά τα τεχνητά τσιμεντοποιημένα εδάφη, δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην καθίζηση ορυκτών, ως τρόπος σύνθεσής τους. Συγκεκριμένα, αναλύεται η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους με την χρήση της τεχνικής MICP. Η μέθοδος MICP, επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων διαδικασιών, ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζεται ο μηχανισμός υδρόλυσης της ουρίας.

Η μέθοδος MICP, όπως ορίστηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρεται στη δημιουργία τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών με την χρήση βιο-υλικών (βακτήρια) και πραγματοποιείται είτε με τη βιο-ανάπτυξη είτε με τη βιο-διέγερση. Η βιο-ανάπτυξη αναφέρεται στην καλλιέργεια των βακτηρίων εργαστηριακά και στη συνέχεια στην τοποθέτησή τους στο υπό βελτίωση έδαφος. Η βιο-διέγερση πραγματοποιείται με την πρόκληση ανάπτυξης των βακτηρίων που ενυπάρχουν στο υπό βελτίωση έδαφος, με σκοπό τη δημιουργία δεσμών τσιμεντοποίησης ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους.

Η εφαρμογή της μεθόδου MICP με τη βιο-διέγερση προτιμάται καθώς σε αυτή προκαλείται διέγερση των μικροβίων που υπάρχουν ήδη στο έδαφος, αποφεύγοντας έτσι μολύνσεις στο κοντινό περιβάλλον ή διατάραξη των επί τόπου περιβαλλοντικών συνθηκών. Ωστόσο, η βιο-διέγερση οδηγεί αρκετές φορές σε ανομοιόμορφη βελτίωση του εδάφους και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για την ανάπτυξη των βακτηρίων. Συνεπώς οι δυο παραπάνω παράγοντες καθιστούν τελικά τη μέθοδο της βιο-ανάπτυξης πιο κατάλληλη και γι' αυτό το λόγο θα αναλυθεί ως επί το πλείστον στη συγκεκριμένη εργασία. Η επιτυχής εφαρμογή της βιο-

ανάπτυξης προϋποθέτει αρχικά την εισαγωγή μικρής συγκέντρωσης βακτηρίων στο υπό βελτίωση έδαφος και στην συνέχεια την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή τους (Dejong et al., 2013).

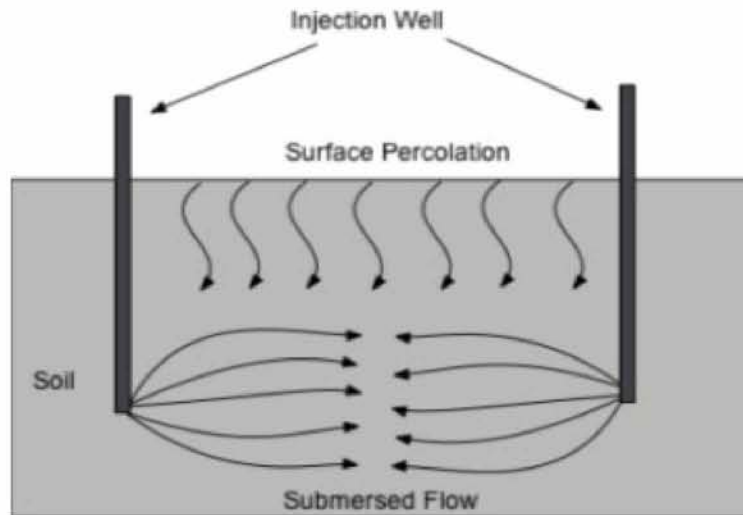
Σύμφωνα με την διατριβή του Liang Cheng (2012), τα στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP μέσω της βιο-ανάπτυξης είναι τα εξής:

1. Καλλιέργεια βακτηρίων που συμμετέχουν στην υδρόλυση της ουρίας στο εργαστήριο υπό ελεγχόμενες (στείρες) συνθήκες.
2. Εισαγωγή του βακτηριακού εναιωρήματος και των χημικών αντιδραστηρίων στο έδαφος και μεταφορά τους στις επιθυμητές θέσεις για την παραγωγή και καθίζηση.
3. Παροχή των βακτηρίων που σχετίζονται με τα χημικά αντιδραστήρια για την πρόκληση παραγωγής ανθρακικού ασβεστίου.
4. Επανεπιλημμένη παροχή των κατάλληλων βακτηρίων, καθώς η δραστηριότητα ουρεάσης μειώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας MICP (Van Paassen, 2009).
5. Αφαίρεση των υπόλοιπων προϊόντων.

Στο πρώτο βήμα, το οποίο αφορά την καλλιέργεια των βακτηρίων στο εργαστήριο, οι μικροοργανισμοί εισάγονται στο δείγμα του εδάφους με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, η εισαγωγή του βακτηριακού διαλύματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με απλή έγχυση με την χρήση περισταλτικής αντλίας, η οποία συνδέεται με σύριγγα (Velpurí, 2015), με τεχνικές ανάμιξης των βακτηρίων και του εδάφους και μέσω της επιφανειακής διήθησης (Cheng, 2012).

Στο τρίτο στάδιο, το οποίο αφορά την εισαγωγή της βακτηριακής καλλιέργειας και των χημικών αντιδραστηρίων στο έδαφος, είναι αρκετά σημαντική η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την είσοδό τους στο έδαφος, προκειμένου να μεταφερθεί το διάλυμα σε όλες τις θέσεις που είναι απαραίτητες για την ομοιόμορφη καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου. Για παράδειγμα η μέθοδος της βυθιζόμενης ροής (submersed flow), εφαρμόζεται με υψηλή πίεση του διαλύματος στο έδαφος προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα ροής και το επιθυμητό βάθος έγχυσης. Επίσης, η απλή έγχυση του διαλύματος με την τεχνική της επιφανειακής διήθησης (surface percolation), πραγματοποιείται με ψέκασμα, άρδευση ή με αργή ροή και είναι κατάλληλη για την επιτόπια σταθεροποίηση κορεσμένων εδαφών. Η μέθοδος της επιφανειακής διήθησης καθιστά δυνατή τη σταθεροποίηση ξηρού εδάφους,

αναχωμάτων και επιχωμάτων (Cheng, 2012). Ωστόσο, ο Cheng μελέτησε και την περίπτωση του συνδυασμού των δύο μεθόδων (Σχήμα 3.11). Σκοπός του συνδυασμού αυτού ήταν η επίτευξη βαθύτερης τσιμεντοποίησης του εδάφους στην βέλτιστη τιμή.



Σχήμα 3.11 Ταυτόχρονη εφαρμογή των μεθόδων επιφανειακής διήθησης και υποβρύχιας ροής (Cheng, 2012).

Σύμφωνα με τον Dejong, έως το 2013 είχαν πραγματοποιηθεί λίγες εφαρμογές στο πεδίο στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν βακτήρια για την ενίσχυση του εδάφους, είτε μέσω της βιο-ανάπτυξης είτε της βιο-διέγερσης. Το 2010 όπως περιγράφηκε από τον Van Paassen, η μέθοδος MICP εφαρμόστηκε στην επί τόπου σταθεροποίηση του χαλαρού εδάφους προκειμένου να πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις οριζόντιας διεύθυνσης για την εγκατάσταση ενός αγωγού αερίου. Η θεραπεία εφαρμόστηκε σε όγκο 1000 m^3 και σε βάθη που κυμαίνονται από 3 έως 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και περιλάμβανε την έγχυση 200 m^3 βακτηριακού διαλύματος, το οποίο καλλιεργήθηκε στο εργαστήριο και δύο ενέσεις από $300 - 600 \text{ m}^3$ διαλύματος ουρίας και χλωριούχου ασβεστίου. Τα αποτελέσματα της τεχνικής MICP καταγράφηκαν και η μέθοδος κρίθηκε επιτυχής για την εγκατάσταση του αγωγού αερίου. Στις επόμενες εικόνες (Σχήμα 3.12) παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου αυτής σε χαλικώδες έδαφος.



Σχήμα 3.12 α) Εγκατάσταση επαναλαμβανόμενων χώρων αποθήκευσης, β) Δείγμα του σταθεροποιημένου χαλικώδους εδάφους έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου MICP, γ) Εγκατάσταση σωληνώσεων έπειτα από οριζόντια διάτρηση (Dejong, 2013).

Επιπλέον, η βιο-διέγερση αξιολογήθηκε μέσω μιας εφαρμογής που αφορούσε την συν-καθίζηση των βαρέων μετάλλων με το ανθρακικό ασβέστιο, με στόχο την ακινητοποίηση των επικίνδυνων βαρέων μετάλλων και ξεκίνησε στο Vadose Zone Research Park. Στις δοκιμές αυτές εγχύθηκαν ποσότητες διαλυμένης μελάσσας και ουρίας στο υπό βελτίωση έδαφος με ταυτόχρονη απόσυρση υπόγειων υδάτων από πηγάδι κάποια μέτρα μακριά από το σημείο της έγχυσης. Μέχρι το 2013, τα μικρόβια είχαν διεγερθεί με επιτυχία και η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου είχε ξεκινήσει και βρισκόταν σε εξέλιξη.

3.5.2 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο εργαστήριο

Οι περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου MICP, αποτελούν εφαρμογές μικρής κλίμακας, σε εργαστηριακό επίπεδο. Τα κύρια στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP, σε δείγματα εργαστηρίου είναι τα εξής:

(α) Καλλιέργεια των βακτηρίων που συμμετέχουν στην υδρόλυση της ουρίας και προετοιμασία του διαλύματος τσιμεντοποίησης

Η καλλιέργεια των βακτηρίων πραγματοποιείται σε θρεπτικό μέσο, του οποίου τα συστατικά αποτελούν πηγή ενέργειας για τα βακτήρια και συμβάλλουν στη διατήρηση, την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελείται από ουρία και CaCl_2 , σε διάφορες συγκεντρώσεις, για την έναρξη της κατακρήμνισης του CaCO_3 . Προτιμάται σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις για την επιτυχής πραγματοποίηση της αντίδρασης.

(β) Εισαγωγή της βακτηριακής καλλιέργειας και του διαλύματος τσιμεντοποίησης στο δείγμα εδάφους

Η διοχέτευση των διαλυμάτων βακτηρίων και τσιμεντοποίησης στο δείγμα του εδάφους, πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους, όπως με τη χρήση αντλίας, μέσω της ανάμιξης του εδάφους με τα διαλύματα και με την επιφανειακή διήθηση. Όσον αφορά την αλληλουχία έγχυσης των διαλυμάτων στο δείγμα, τα διαλύματα είτε εγχύονται σταδιακά, είτε ταυτόχρονα είτε αναμειγνύονται πριν την έγχυση.

(γ) Εισαγωγή νέου διαλύματος τσιμεντοποίησης (προαιρετικό στάδιο)

Η αύξηση των κύκλων του διαλύματος τσιμεντοποίησης, οδηγεί σε καλύτερη τσιμεντοποίηση, όμως αυτό εξαρτάται και από τη χρονική αλληλουχία των εγχύσεων και της συγκέντρωσής του.

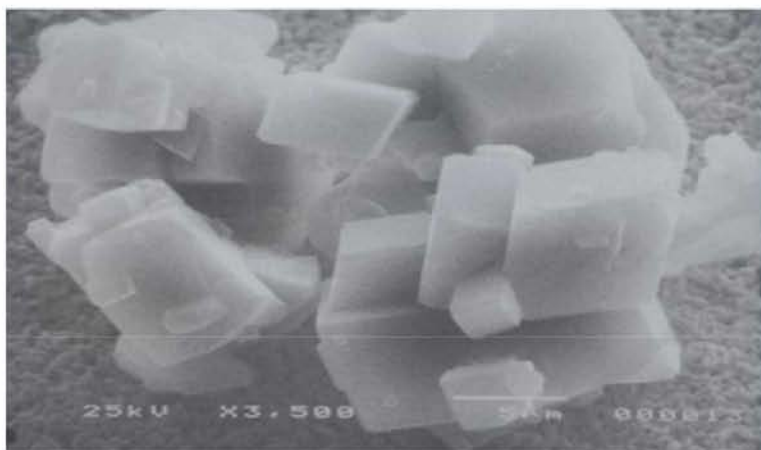
3.5.3 Σχηματισμός των κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου

Αποτέλεσμα της υδρόλυσης της ουρίας αποτελεί η καθίζηση και η δημιουργία κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου. Τα ορυκτά δημιουργούνται από την πυρήνωσή τους και στην συνέχεια από την ανάπτυξη των κρυστάλλων. Με το σχηματισμό του κρίσιμου πυρήνα, αναπτύσσονται και οι κρύσταλλοι, με επιπλέον επαφή των ορυκτών ιόντων στο διάλυμα (Ferris, 1991).

Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) είναι μια χημική ένωση, η οποία συναντάται στη φύση και στους ζωντανούς της οργανισμούς σε μεγάλη συχνότητα. Υπάρχουν έξι διαφορετικές μορφές εμφάνισης του ανθρακικού ασβεστίου στη φύση: άμορφη, δύο ένυδρες και τρεις άνυδρες. Η άμορφη και οι δύο ένυδρες μορφές συναντώνται πιο σπάνια στη φύση καθώς είναι περισσότερο χημικά ασταθείς από τις υπόλοιπες τρεις. Οι υπόλοιπες τρεις μορφές είναι άνυδρες κρυσταλλικές και συναντώνται συχνά στο φυσικό περιβάλλον και στους ζωντανούς οργανισμούς που βρίσκονται σε αυτό. Οι τρεις άνυδρες κρυσταλλικές μορφές του ανθρακικού ασβεστίου είναι ο ασβεστίτης, ο αραγωνίτης και ο βατερίτης.

Ασβεστίτης

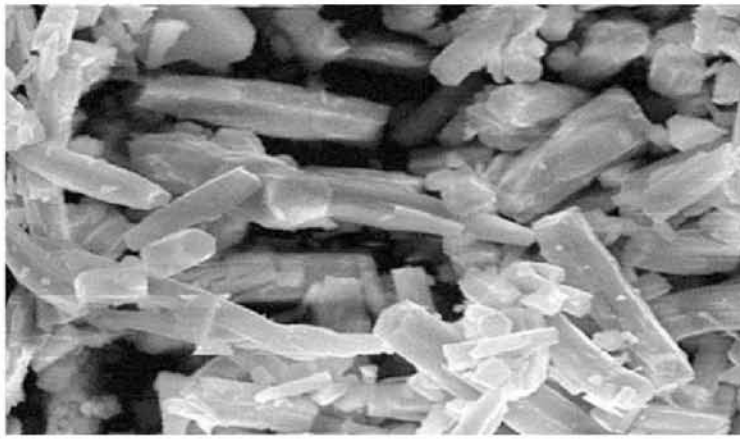
Ο ασβεστίτης (Σχήμα 3.13) αποτελεί την πιο σταθερή θερμοδυναμική μορφή σχηματισμού του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3). Ο ασβεστίτης συναντάται στους πυθμένες θαλασσών και λιμνών, αποτελεί το 7% του ποσοστού του φλοιού της γης είτε με τη μορφή του μαρμάρου είτε με τη μορφή ορυκτών ασβεστολιθικών πετρωμάτων. Επίσης, σχηματίζεται ως αποτέλεσμα μακροχρόνιων διεργασιών στα σπήλαια με τη μορφή σταλαγμιτών–σταλακτιτών. Είναι ελάχιστα διαλυτός σε κανονικές τιμές θερμοκρασίας και κρυσταλλώνεται στο ρομβοεδρικό σύστημα. Ο in-vitro σχηματισμός κρυστάλλων ασβεστίτη πραγματοποιείται από την ανάμιξη διαλυμάτων ασβεστίου και ανθρακικών σε κανονικές τιμές θερμοκρασίας. Σημειώνεται ότι για τιμές θερμοκρασίας μικρότερες των 35°C παράγεται καθαρό προϊόν ασβεστίτη.



Σχήμα 3.13 Φωτογραφία Ασβεστίτη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (<http://nemertes.lis.upatras.gr>).

Αραγωνίτης

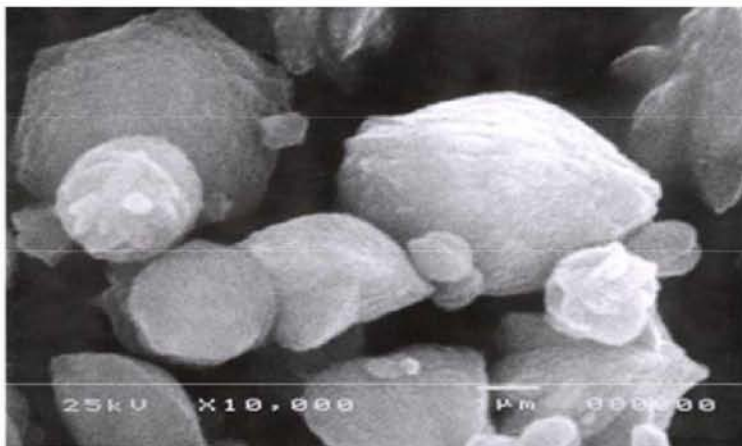
Ο αραγωνίτης (Σχήμα 3.14) αποτελεί τη δεύτερη πιο σταθερή θερμοδυναμική μορφή του ανθρακικού ασβεστίου μετά τον ασβεστίτη. Ο σχηματισμός καθαρού αραγωνίτη πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μεταξύ $60-90^\circ\text{C}$.



Σχήμα 3.14 Φωτογραφία αραγονίτη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (<http://nemertes.lis.upatras.gr>).

Βατερίτης

Ο βατερίτης (Σχήμα 3.15) κατατάσσεται στο εξαγωνικό σύστημα από κρυσταλλογραφική άποψη και είναι η πιο ασταθής μορφή του ανθρακικού ασβεστίου.

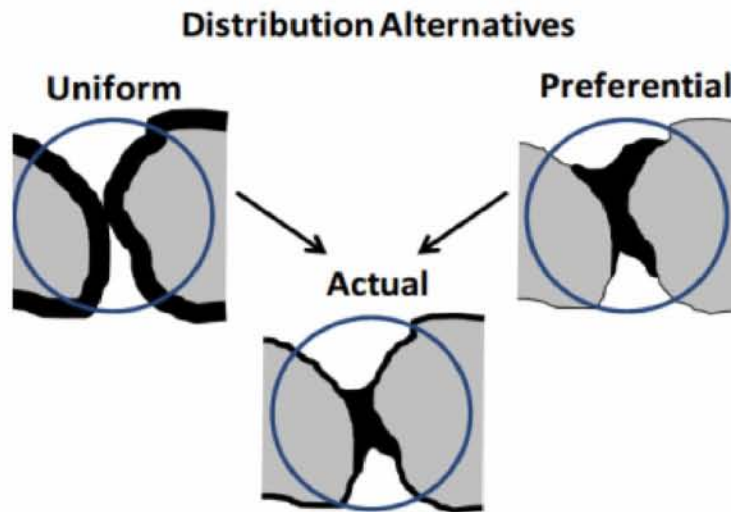


Σχήμα 3.15 Φωτογραφία βατερίτη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (<http://nemertes.lis.upatras.gr>).

Κατανομή του ασβεστίτη στα κενά των πόρων

Η κατανομή του ανθρακικού ασβεστίου στα κενά μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων μπορεί να είναι uniform (ομοιόμορφη), preferential (ιδανική) ή actual (πραγματική). Η ομοιόμορφη κατανομή δείχνει ότι ο ασβεστίτης εναποτέθηκε με ίσο πάχος γύρω από τα σωματίδια του εδάφους. Συνεπώς, η συγκόλληση των δύο σωματιδίων από τον ασβεστίτη είναι σχετικά μικρή. Ως εκ τούτου μπορεί να αναμένονται ασήμαντες μεταβολές στις ιδιότητες του εδάφους. Η ιδανική κατανομή δείχνει ότι ο ασβεστίτης εναποτίθεται μόνο στις επαφές σωματιδίων-σωματιδίων. Αυτή είναι η επιθυμητή μηχανική χωρική κατανομή καθώς όλος ο

ασβεστίτης συμβάλλει στην άμεση βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους. Οι βιογεωχημικές διεργασίες δεν βελτιστοποιούν με φυσικό τρόπο τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους. Κατά συνέπεια, η ιδανική και η ομοιόμορφη κατανομή είναι μη ρεαλιστικές περιπτώσεις δημιουργίας του ασβεστίτη. Το Σχήμα 3.16 παρέχει σχηματικές απεικονίσεις των δυο ακραίων κατανομών (uniform, preferential), καθώς και της πραγματικής κατανομής.



Σχήμα 3.16 Σχηματική απεικόνιση των τριών ειδών κατανομής του ασβεστίου στα κενά των πόρων (Alvarado).

Η ανάλυση SEM και ακτινών X αποκαλύπτει ότι η πραγματική κατανομή του ασβεστίτη, αποτελεί ισορροπία μεταξύ των δύο ακραίων συνθηκών (actual).

3.5.4 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Η ανάπτυξη βιοδιαμεσολαβούμενων διεργασιών για τη βελτίωση του εδάφους έχει αρκετά χαρακτηριστικά που μπορεί να αποδειχθούν πλεονεκτικά σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους (Montoya, 2012), όπως:

- Ομοιομορφία της θεραπείας, οι βιολογικές διεργασίες έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν τη χωρική ομοιομορφία.
- Βέλτιστη συγκέντρωση της θεραπείας, ο βαθμός θεραπείας μπορεί να ελεγχθεί και να παρακολουθηθεί.

- Προσαρμοσμένη διάρκεια, οι θεραπείες μπορούν να απομακρυνθούν εάν απαιτείται μόνο προσωρινή υποστήριξη.
- Ευέλικτη εφαρμογή, οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε νέες όσο και σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές.
- Διείσδυση σε εδάφη με λεπτά σωματίδια, διότι τα κύτταρα είναι συνήθως μεγέθους 1-3 μm .
- Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μικροβιακής ενεμάτωσης έναντι της χημικής είναι ότι τα μικροβιακά ενέματα μπορούν να είναι μη-τοξικά, ενώ πολλές χημικές ενεματώσεις, ειδικά αυτές που βασίζονται σε ακρυλαμίδιο, λιγνοσουλφονικά, και πολυουρεθάνη, είναι τοξικές και επιβλαβείς για το περιβάλλον.
- Τέλος, η μικροβιακή συγκόλληση υπερτερεί έναντι της χημικής λόγω του χαμηλότερου κόστους των αντιδραστηρίων. Οι Ivanov and Chou (2008) ανέφεραν ότι τα αξιολογούμενα κόστη των πρώτων υλών για τη χημική εδαφική έγχυση είναι από 2 έως 72 \$ ανά κυβικό μέτρο εδάφους. Όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.2), τα χημικά ενέματα, ειδικά εκείνα που βασίζονται σε ακρυλικά, ακρυλαμίδια, και πολυουρεθάνες είναι πιο ακριβά.

Πίνακας 3.2 Το κόστος των πρώτων υλών για τη χημική ενεμάτωση (Ivanov & Chu, 2008).

Material	Price (\$/kg)	Amount of additives required (kg/m ³)	Cost of additives (\$/m ³)
Lignosulphites-Lignosulphonates	0.1–0.3	20–60	2–18
Sodium silicate formulations	0.6–1.8	10–40	6–72
Phenoplasts	0.5–1.5	5–10	2.5–15
Acrylates	1.0–3.0	5–10	5–30
Acrylamides	1.0–3.0	5–10	5–30
Polyurethanes	5.0–10.0	1–5	5–50

Το κόστος των πρώτων υλών για τη μικροβιακή ενεμάτωση θα μπορούσε να είναι από 0,5 έως 9,0 \$ ανά κυβικό μέτρο εδάφους σε περιπτώσεις που τα υλικά των αποβλήτων χρησιμοποιούνται ως πηγή άνθρακα για την μικροβιακή ανάπτυξη (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3 Κατά προσέγγιση κόστος των πρώτων υλών για την μικροβιακή επικάλυψη (Ivanov & Chu, 2008).

Materials	Price (\$/kg)	Amount of additives required (kg/m ³)	Cost of additives (m ³ of soil)
Molasses + microorganisms	0.1-0.2	5-20	0.5-4.0
Homogenized food-processing wastes + microorganisms	0.05-0.1	10-20	0.5-2.0
Iron ore + organic wastes + microorganisms	0.1-0.2	10-20	1.0-4.0
Organic wastes (agricultural, horticultural, food-processing wastes)	0.05-0.1	10-20	0.5-2.0
Calcium chloride + urea + microorganisms	0.2-0.3	20-30	4.0-9.0

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα εκτιμώμενα κόστη που δίνονται στους παραπάνω πίνακες, για τη χημική και μικροβιακή ενεμάτωση, δε συμπεριλαμβάνεται το κόστος τοποθέτησής τους.

3.5.5 Πεδία εφαρμογής μεθόδου

Σύμφωνα με τους Hammes (2003), Ivanov και Chou (2008) και Montoya (2012) η μέθοδος της μικροβιακής συγκόλλησης (MICP) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση προβλημάτων σε διάφορα έργα πολιτικού μηχανικού, γεωτεχνικής μηχανικής και περιβαλλοντικής μηχανικής, όπως :

- Στην ενίσχυση της σταθερότητας τοίχων αντιστήριξης, αναχωμάτων και φραγμάτων.
- Στη βελτίωση και στη σταθεροποίηση της κλίσης. Η επεξεργασία θα προσφέρει πρόσθετη σταθερότητα η οποία απαιτείται για την πρόληψη αστοχιών.
- Στην ενίσχυση ή στη σταθεροποίηση του εδάφους προκειμένου να εξασφαλισθεί η σταθερότητα σηράγγων ή άλλων υπόγειων κατασκευών.
- Στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας των θεμελίων με πασσάλους ή χωρίς πασσάλους.
- Στη μείωση του κινδύνου ρευστοποίησης του εδάφους.
- Στη βελτίωση της επιφάνειας του οδοστρώματος.
- Στην ενίσχυση φραγμάτων για την αποτροπή της διάβρωσης και της αστοχίας της κλίσης.

- Στην κατασκευή ενός διαπερατού εμποδίου στον τομέα της εξόρυξης μετάλλων και της περιβαλλοντικής μηχανικής.
- Στη δέσμευση των σωματιδίων σκόνης σε εκτεθειμένες επιφάνειες για να μειωθούν τα επίπεδα σκόνης.
- Στην αποθήκευση ενέργειας και καυσίμων. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου.
- Στην πρόληψη της διάβρωσης / ρύπανσης. Η επεξεργασία θα αυξήσει την αντίσταση στις διαβρωτικές δυνάμεις της ροής του νερού.
- Στη σταθεροποίηση των ρύπων του εδάφους. Η μέθοδος δημιουργεί αδιαπέρατα εμπόδια για τη διακοπή / εκτροπή της υπόγειας μεταφοράς ρύπων.
- Στον έλεγχο της διάβρωσης στην παράκτια ζώνη και στα ποτάμια.
- Στη δημιουργία φίλτρων νερού και φίλτρων διάτρησης. Δημιουργούνται εμπόδια τα οποία καθαρίζουν τη μόλυνση των υπόγειων υδάτων.
- Σταθεροποίηση και συντήρηση σιδηρόδρομων

Ο Van Paassen (2009) αναφέρθηκε στη συμβολή της MICP στη σταθεροποίηση και στη συντήρηση των σιδηροδρόμων. Στο δυτικό τμήμα της Ολλανδίας, πολλά παλιά σιδηροδρομικά έργα κατασκευάζονταν σε αναχώματα που αποτελούνταν από ένα στρώμα πίσσας στην κορυφή της άμμου, τα οποία τοποθετούνταν στις προϋπάρχουσες μαλακές στρώσεις αργίλου και τύρφης. Λόγω της υψηλής συμπιεστότητας των μαλακών εδαφών, αυτές οι διαδρομές χρειάζονται συνεχή συντήρηση για να αντιμετωπίζουν τις παραμορφώσεις των τροχιών. Με την τρέχουσα ανάγκη για ταχύτερα τρένα, η συντήρηση του σιδηροδρόμου αντιμετωπίζει ακόμα ένα πρόβλημα. Η διέλευση της αμαξοστοιχίας προκαλεί κύματα στην τροχιά του σιδηροδρόμου και στα υποκείμενα εδάφη. Η ταχύτητα μετάδοσης αυτών των κυμάτων εξαρτάται από την δυσκαμψία του αναχώματος και των υποκείμενων εδαφών. Όταν η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας προσεγγίζει την ταχύτητα κύματος Rayleigh, ο συντονισμός οδηγεί σε ενίσχυση των φορτίων με αποτέλεσμα να εγκυμονείται κίνδυνος πρόκλησης βλάβης. Η ταχύτητα Rayleigh ορίζεται ως η κρίσιμη ταχύτητα.

Κεφάλαιο 4

Πειραματικές μελέτες βελτίωσης εδαφών με τη χρήση βακτηρίων

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο 4 μελετάται η μηχανική συμπεριφορά των τσιμεντοποιημένων εδαφών, τα οποία είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής βακτηρίων στο υπό βελτίωση έδαφος. Συγκεντρώθηκε ένα μεγάλο μέρος εργαστηριακών δοκιμών σε μικρή και μεγάλη κλίμακα, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν χρονολογικά από το 2003 έως το 2016 από πλήθος ερευνητών. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν πληροφορίες όπως ο τύπος του εδάφους, το είδος και το μέγεθος του δείγματος, το περιεχόμενο της ουρίας, το είδος των βακτηρίων, η μέθοδος προετοιμασίας και το είδος της δοκιμής, ο εξοπλισμός κάθε δοκιμής, οι μελετηθείσες ιδιότητες του εδάφους και τα σημαντικότερα συμπεράσματα. Η καταγραφή των πληροφοριών αυτών συνέβαλε στην ομαδοποίηση πειραμάτων, τα οποία διεξήχθησαν στον ίδιο τύπο εδάφους και στην εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων για τα εδάφη αυτά.

Η εφαρμογή των βιο-υλικών είναι αποτελεσματική κυρίως σε άμμους και λιγότερο σε ιλεις, (Kim 2014). Με βάση βιβλιογραφία που μελετήθηκε στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως άμμοι πυριτίας με και χωρίς λεπτόκοκκα. Σε αρκετά άρθρα και διατριβές χρησιμοποιήθηκαν άμμοι όπως Toyoura, η Ottawa 20-30, η Ottawa 50-70, η Sydney, η Jumunjin, η Itterbeck καθώς και καθαρές χαλαζιακές άμμοι με διάφορες κοκκομετρίες. Επίσης, σε μικρότερο ποσοστό χρησιμοποιήθηκαν ανθρακικά εδάφη, οργανικά εδάφη, εδάφη με μεγάλο ποσοστό ιλύος και μικρότερο άμμου (silt loams) καθώς και υπολειμματικά εδάφη (εδάφη στα οποία τα προϊόντα της διάβρωσης παραμένουν στον τόπο προέλευσής τους και δεν μεταφέρονται).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μικροοργανισμοί και συγκεκριμένα τα βακτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλές διαδικασίες μέσω των μηχανισμών δράσης τους. Σύμφωνα με τον Baskar (2006), ορισμένα βακτήρια και μύκητες μπορούν να προκαλέσουν καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου εξωκυτταρικά μέσω διαφόρων διεργασιών, όπως είναι η υδρόλυση της ουρίας. Έτσι λοιπόν, συγκεντρώθηκαν στοιχεία για τις ποσότητες της ουρίας που εισήχθησαν στα δείγματα, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το είδος του εδάφους, το μέγεθος του δοκιμίου, τις απαιτήσεις του βακτηρίου κλπ.

Η υδρόλυση της ουρίας καταλύεται από το ένζυμο ουρεάση, το οποίο εντοπίστηκε σε μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών και φυτών. Οι μικροοργανισμοί που παράγουν ουρεάση είναι γένη *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Sporolactobacillus*, *Clostridium* και *Desulfotomaculum*. Ωστόσο, στα περισσότερα πειράματα, στα οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος MICP, χρησιμοποιήθηκαν τα βακτήρια *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859), καθώς ο μικροοργανισμός αυτός είναι γνωστός για την υψηλή δραστικότητα ουρεάσης. Σε ορισμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν και βακτήρια όπως το *Bacillus Megaterium*, *Bacillus Lentus*, *Staphylococcus Saprophyticus*, *Brevundimonas Sp.*, *Sporosarcina globispora*.

Ιδιαίτερη σημασία δίδεται στη μέθοδο προετοιμασίας και διαμόρφωσης των τεχνητά τσιμεντοποιημένων δοκιμίων και στις προκαταρκτικές εργασίες και βαθμονομήσεις του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε από τους διάφορους ερευνητές.

Η εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών, σε τεχνητά τσιμεντοποιημένα εδάφη, συμβάλλει στην γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, σε μεγάλο αριθμό πειραμάτων που εφαρμόστηκαν από διάφορους ερευνητές, μελετήθηκαν ιδιότητες όπως η διαπερατότητα, η αντοχή, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης, το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης κλπ.

Στα επόμενα υποκεφάλαια αναλύονται όλα τα πειράματα της μεθόδου σταθεροποίησης με τη χρήση βακτηρίων, για τους διάφορους τύπους εδαφών που μελετήθηκαν.

4.2 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης κοκκωδών εδαφών με τη χρήση βιο-υλικών

4.2.1 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης της άμμου Toyoura με τη χρήση βακτηρίων

Οι Tsukamoto (2013) και Yasuhara (2015) μελέτησαν πειραματικά την μικροβιακά επαγόμενη καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου χρησιμοποιώντας την άμμο Toyoura. Η άμμος Toyoura αποτελεί μια λεπτή έως μέση χαλαζιακή άμμο.

(α) Το 2013 οι Tsukamoto, Inagaki, Sasaki και Oda ασχολήθηκαν με την επίδραση της σχετικής πυκνότητας στην μικροβιακά επαγόμενη δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου

και στις μηχανικές ιδιότητες της άμμου Toyoura. Για τον σκοπό αυτό διαμορφώθηκαν 15 δοκίμια άμμου σε τρεις διαφορετικές σχετικές πυκνότητες ($D_r = 30\%, 60\%, 85\%$).

Μέθοδος Προετοιμασίας

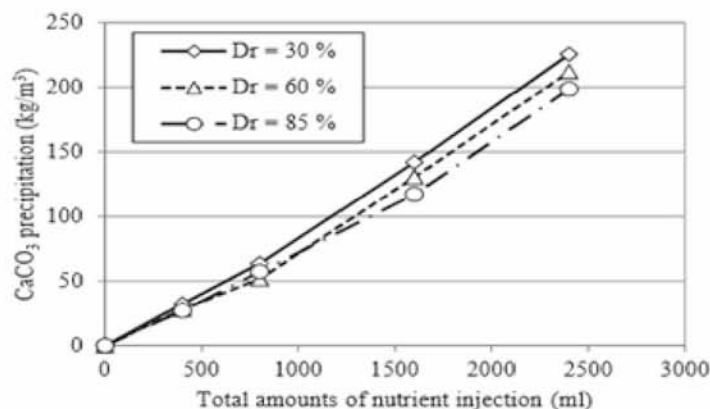
Η διαμόρφωση των 15 δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση καλουπιού ύψους 15 cm και διαμέτρου 5 cm, το οποίο γεμίστηκε με τη συγκεκριμένη άμμο. Στα δείγματα εισήχθη απεσταγμένο νερό, ώστε να καταστούν κορεσμένα. Μετά τον κορεσμό, εγχύθηκαν 250 mL μικροβιακού ζωμού σε κάθε δείγμα. Αφού επιβεβαιώθηκε ότι ο ζωμός είχε διαπεράσει πλήρως το δοκίμιο, εγχύθηκαν 200 mL θρεπτικού μίγματος, σε διαστήματα 12 ωρών. Το θρεπτικό μίγμα αποτελούνταν από 3 gr θρεπτικού ζωμού, 10 gr χλωριούχου αμμωνίου, 30.03 gr ουρίας, 55.49 gr χλωριούχου ασβεστίου, 1 L απεσταγμένου νερού και 2.12 gr NaHCO_3 . Το καλούπι παρέμεινε σε σταθερή θερμοκρασία 22 °C. Στη συνέχεια, το θρεπτικό μίγμα αποστραγγίστηκε, για να διατηρηθεί η κορεσμένη κατάσταση του δείγματος στο καλούπι. Δώδεκα ώρες μετά την ολοκλήρωση των κύκλων έγχυσης του θρεπτικού μίγματος, εγχύθηκαν 300 mL απεσταγμένου νερού για την απομάκρυνσή του από τους εδαφικούς πόρους. Δημιουργήθηκαν έτσι 15 δείγματα.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Έπειτα από τη διαμόρφωση των δοκιμίων διεξήχθησαν τριαξονικές δοκιμές CD. Για να μειωθεί η διατάραξη που προκλήθηκε από τη διαμόρφωση των δειγμάτων, τα δείγματα καταψύχθηκαν μετά την αποστράγγισή τους. Στη συνέχεια, αφαιρέθηκαν τα καλούπια από τα δείγματα και τοποθετήθηκαν σε τριαξονική κυψέλη για την απόψυξή τους, υπό εφελκυστική τάση 30 kPa, για 1,5 ώρες. Τα δείγματα κορέσθηκαν, με την προσθήκη απεσταγμένου νερού. Η πίεση του νερού των πόρων αυξήθηκε στα 200 kPa και εφαρμόστηκαν ενεργές τάσεις στερεοποίησης $\sigma_3' = 100$ kPa για ισότροπη στερεοποίηση. Πραγματοποιήθηκε αξονική συμπίεση με ρυθμό παραμόρφωσης 0,5% min. Αφού ολοκληρώθηκαν οι τριαξονικές δοκιμές, τα δείγματα ξηράνθηκαν σε φούρνο και ζυγίστηκαν. Στη συνέχεια, μετρώντας τη μείωση της μάζας, εκτιμήθηκε η ποσότητα του ανθρακικού ασβεστίου σε κάθε δείγμα.

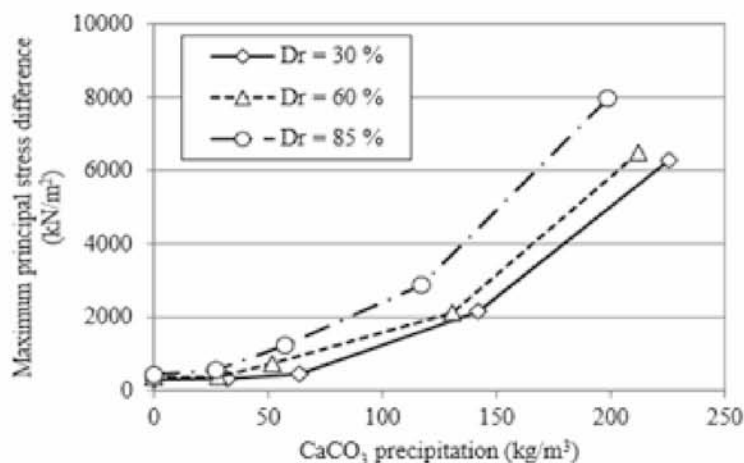
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Παρατηρήθηκε πως η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου αυξάνεται με τη μείωση της σχετικής πυκνότητας των δειγμάτων άμμου (Σχήμα 4.1).



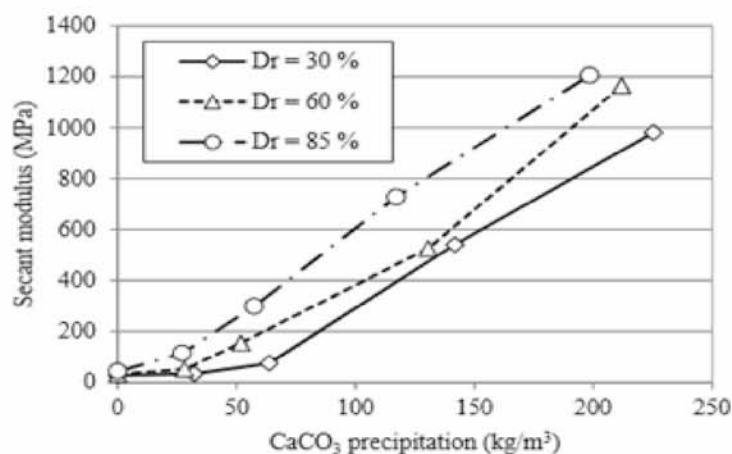
Σχήμα 4.1 Αύξηση της καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου με τη μείωση της σχετικής πυκνότητας (Tsukamoto, 2013).

- Δεν παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στη μέγιστη αποκλίνουσα τάση, όταν η δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου ήταν μέχρι 30 kg /m³. Σε μεγαλύτερες ποσότητες, η διαφορά αυξήθηκε ανάλογα με την ποσότητα του προκύπτοντος ανθρακικού ασβεστίου. Η μέγιστη αποκλίνουσα τάση, ήταν ακόμη μεγαλύτερη όταν η σχετική πυκνότητα ήταν μεγάλη (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Σχέση διαφοράς κυρίων τάσεων- καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου (Tsukamoto, 2013).

- Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκε γραμμικά με την αύξηση της ποσότητας δημιουργίας του CaCO_3 , όταν αυτό ήταν σε ποσότητα μεγαλύτερη των 30 kg/m^3 (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Σχέση τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας- καθίζησης CaCO_3 (Tsukamoto, 2013).

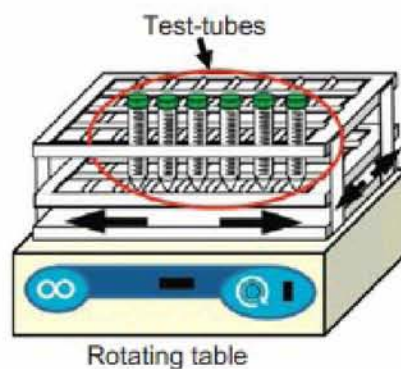
(β) Οι Yasuhara, Neupane, Hayashi και Okamura (2015), ασχολήθηκαν με πειράματα και προβλέψεις των φυσικών ιδιοτήτων των τσιμεντοποιημένων άμμων που δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια μικροβίων. Ως έδαφος για τα πειράματα των συγκεκριμένων ερευνητών χρησιμοποιήθηκε η ξηρή άμμος Toyoura.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν για τις εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, τις δοκιμές διαπερατότητας και τα πειράματα δοκιμαστικού σωλήνα είχαν διάμετρο 50 mm και ύψος 100 mm. Για τα πειράματα ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, αναμίχθηκαν 300 gr ξηρής άμμου με μια ορισμένη ποσότητα σκόνης ουρεάσης ($\text{Dr}=50\%$). Έπειτα εφαρμόστηκε στα δείγματα τάση 50 kPa. Στη συνέχεια, εγχύθηκε στα δείγματα ισομοριακό διάλυμα CaCl_2 -ουρίας. Τα δείγματα αφέθηκαν για 24 ώρες σε κυψέλη πίεσης. Εγχύθηκαν 150 mL απεσταγμένου νερού για την απομάκρυνση των υποπροϊόντων της υδρόλυσης της ουρίας. Τέλος, τα δείγματα άμμου αφαιρέθηκαν από την κυψέλη και ξηράθηκαν. Στα πειράματα αυτά, προστέθηκαν στα δείγματα 0.5-1 mol/L CaCl_2 -ουρίας και 0.5-1 gr ουρεάσης.

Όσον αφορά στην προετοιμασία των δειγμάτων για τις δοκιμές διαπερατότητας, η διαδικασία ήταν παρόμοια με εκείνη των δοκιμών ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης (ίδια ποσότητα άμμου Toyoura, ουρεάσης, ουρίας, χλωριούχου ασβεστίου). Η διαφορά στις δοκιμές διαπερατότητας έγκειται στο ότι η άμμος τοποθετήθηκε σε έναν ακρυλικό κύλινδρο ($Df=50\%$) και ότι οι δοκιμές διαπερατότητας διεξήχθησαν σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα μετά την έγχυση των διαλυμάτων. Στα πειράματα αυτά, προστέθηκαν στα δείγματα $0.5-1 \text{ mol/L CaCl}_2$ -ουρίας και $1-2 \text{ gr}$ ουρεάσης.

Στα δύο πειράματα δοκιμαστικού σωλήνα, τα διαλύματα εντός των σωλήνων αναδευόταν τακτικά από περιστρεφόμενο τραπέζι (Σχήμα 4.4). Στόχος του πρώτου πειράματος ήταν η εξέταση του ρυθμού υδρόλυσης της ουρίας που καταλύεται από την ουρεάση και η μέτρηση της εξέλιξης του pH. Για το πρώτο πείραμα δοκιμαστικού σωλήνα χρησιμοποιήθηκαν 0.5 mol ουρίας/L ενώ η ποσότητα της ουρεάσης διέφερε. Το δεύτερο πείραμα δοκιμαστικού σωλήνα είχε ως στόχο να εξετάσει κατά πόσο τα χαρακτηριστικά του προκύπτοντος ανθρακικού ασβεστίου εξαρτώνται από τις συγκεντρώσεις των υλικών ενεμάτωσης. Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν 1 gr ουρεάσης/100 mL νερού ενώ ποίκιλαν η συγκέντρωση του διαλύματος ανθρακικού ασβεστίου και ουρίας.



Σχήμα 4.4 Σχηματική απεικόνιση του περιστρεφόμενου τραπεζιού και των δοκιμαστικών σωλήνων (Yasuhara, 2015).

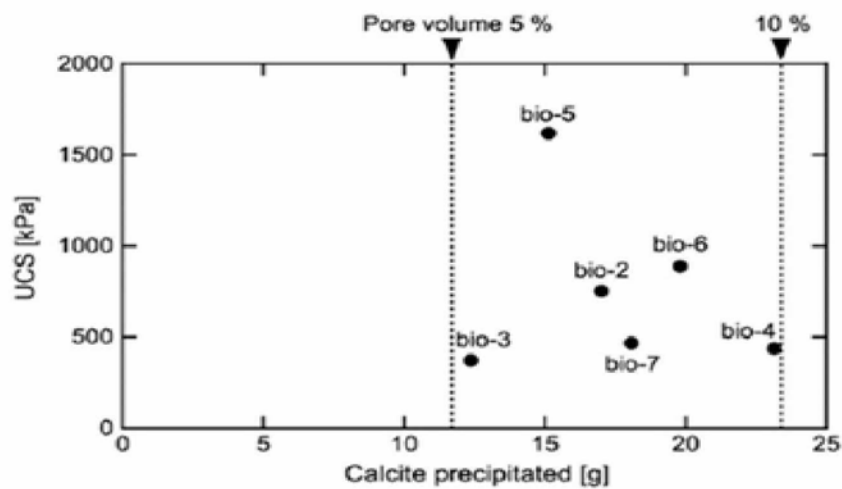
Εργαστηριακές Δοκιμές

Πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών η οποία περιελάμβανε δυο πειράματα δοκιμαστικού σωλήνα, πειράματα ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, δοκιμές διαπερατότητας σταθερού

υδραυλικού φορτίου, αναλύσεις XRD και αναλύσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

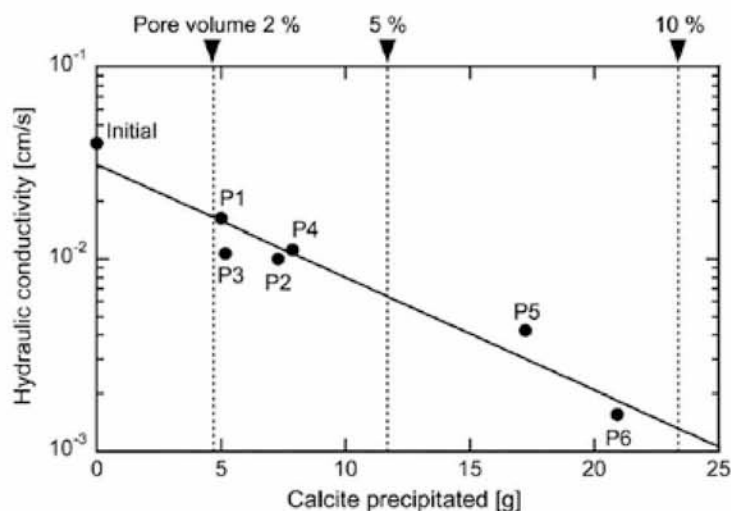
- Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών έδειξαν ότι ακόμη και ένα μικρό ποσοστό CaCO_3 , επέφερε μια δραστική βελτίωση της αντοχής των δειγμάτων. Η UCS των δειγμάτων, που έχουν υποστεί επεξεργασία, κυμαινόταν από 400 kPa έως 1,6 MPa, όταν 5% με 10% του όγκου των πόρων είχε καλυφθεί από CaCO_3 (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Σχέση μεταξύ του ανθρακικού ασβεστίου που δημιουργείται και της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (Yasuhara, 2015).

- Από τα πειράματα δοκιμαστικών σωλήνων, προέκυψε ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις διαλύματος CaCl_2 -ουρίας σε σχέση με την ποσότητα ουρεάσης, περιόρισαν τη δραστικότητα της ουρεάσης, η οποία με τη σειρά της οδήγησε σε μείωση της δημιουργίας του ανθρακικού ασβεστίου.
- Από την ανάλυση XRD, αποδείχθηκε ότι ο ασβεστίτης ήταν το υλικό που καθιζάνει μέσα στα κενά των πόρων.
- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης SEM έδειξαν ότι τα κατακρημνισμένα υλικά είναι μεγέθους μερικών δεκάδων μικρών και βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια και στα όρια των κόκκων.

- Τα αποτελέσματα των δοκιμών UCS έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος δημιουργίας ανθρακικού ασβεστίου στερεοποιεί επαρκώς τη χαλαρή άμμο.
- Οι δοκιμές διαπερατότητας έδειξαν ότι η διαπερατότητα των βελτιωμένων δειγμάτων μειώθηκε περισσότερες από μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τη διαπερατότητα των μη τσιμεντοποιημένων δειγμάτων (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6 Σχέση της υδραυλικής αγωγιμότητας και του ασβεστίτη που καθιζάνει. Οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν το 2,5,10% του αρχικού όγκου των πόρων (Yasuhara, 2015).

- Από τις δοκιμές διαπερατότητας, αποδείχθηκε ότι οι συγκεντρώσεις του διαλύματος έγχυσης και της ποσότητας ουρεάσης δεν επηρέασαν σημαντικά τη διαπερατότητα, όταν ο αριθμός των ενέσεων ήταν μόνο μία. Ωστόσο, με την αύξηση του αριθμού των ενέσεων υπήρξε σημαντική επιρροή στη διαπερατότητα.
- Η τεχνική τοποθέτησης που χρησιμοποιεί το ίδιο το ένζυμο είναι πιο απλή από αυτή που χρησιμοποιεί το βακτήριο που παράγει το ένζυμο, επειδή παραλείπεται η διαδικασία καλλιέργειας των βακτηρίων. Ωστόσο η ανάμιξη των δειγμάτων εδάφους με τη σκόνη ουρεάσης, πριν από την έγχυση των θρεπτικών διαλυμάτων, κρίθηκε μη ικανοποιητική.

4.2.2 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης σε χαλαζιακές άμμους με τη χρήση βακτηρίων

(α) Το 2008, ερευνήθηκε η υψηλής αντοχής επιτόπου βιο-τσιμεντοποίηση του εδάφους, η οποία προκλήθηκε από την καθίζηση ασβεστίτη, μέσω της απομόνωσης βακτηρίων που υδρολύουν την ουρία (Al-Thawadi).

Εμπλουτισμός και απομόνωση βακτηρίων

Όσον αφορά τον εμπλουτισμό, μικρή ποσότητα εδάφους τοποθετήθηκε σε φιάλη ανάδευσης των 250 mL, η οποία περιείχε 50 mL μέσου ανάπτυξης, για 36 ώρες στους 28 °C. Το μέσο εμπλουτισμού περιείχε 10g/L εκχύλισμα ζύμης, ουρία σε συγκέντρωση 1-5 M, θειικό αμμώνιο σε συγκέντρωση 152 mM και οξικό νάτριο σε συγκέντρωση 100 mM.

Ακολούθησε η απομόνωση των βακτηρίων από τις καλλιέργειες εμπλουτισμού. Για την εξέταση καθαρών αποικιών, οι καλλιέργειες εμπλουτισμού αραιώθηκαν και εγχύθηκαν σε πλάκες με θρεπτικό άγαρ. Οι πλάκες επώαστηκαν στους 28 °C για 48 ώρες και τοποθετήθηκαν σταγόνες φαινολοφθαλείνης στην επιφάνεια των αποικιών. Έπειτα καταγράφηκε η αλλαγή στο χρώμα και οι αποικίες με ροζ χρώμα, μεταφέρθηκαν σε μέσο εμπλουτισμού και υποβλήθηκαν σε επεξεργασία.

Από το πείραμα αυτό προέκυψε ότι ακόμα και πριν πραγματοποιηθούν προσπάθειες απομόνωσης, οι παραγόμενοι εμπλουτισμοί είχαν υψηλά επίπεδα δραστηριότητας ουρεάσης. Έτσι μπορεί να μην είναι απαραίτητο να απομονωθούν στελέχη αλλά απλώς να χρησιμοποιηθούν επιλεκτικές συνθήκες εμπλουτισμού.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη δραστηριότητα ουρεάσης

Η δραστηριότητα ουρεάσης προσδιορίζεται από μετρήσεις στην αγωγιμότητα. Συγκεκριμένα, τα ιοντικά προϊόντα από την υδρόλυση της ουρίας, παράγουν αύξηση στην αγωγιμότητα και ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η αγωγιμότητα είναι ανάλογος προς τη συγκέντρωση της ενεργής ουρεάσης που υπάρχει.

Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών συγκεντρώσεων του εκχυλίσματος ζύμης. Το βακτηριακό μέσο ανάπτυξης και οι συνθήκες ήταν παρόμοιες με το πείραμα

εμπλουτισμού εκτός από το ότι η συγκέντρωση της ουρίας ήταν 1M και το εκχύλισμα ζύμης είχε συγκεντρώσεις οι οποίες κυμαινόταν από 10-40 gr/L. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών συγκεντρώσεων Ni^{2+} στη βακτηριακή καλλιέργεια για 24 ώρες. Λήφθηκαν δείγματα 1 mL για μετρήσεις της δραστηριότητας ουρεάσης. Ακόμη, εξετάστηκε η δραστηριότητα του ενζύμου υπό την παρουσία διαλύματος τσιμεντοποίησης. Σε 1 L βακτηριακού προϊόντος απομόνωσης, προστέθηκε σταδιακά με αναδεύσεις, διάλυμα τσιμεντοποίησης σε συγκέντρωση 30 mM. Τέλος, η βακτηριακή καλλιέργεια (MCP11), αναπτύχθηκε παρουσία διαφόρων συγκεντρώσεων ιόντων ασβεστίου (0-2000 mM) για 24 ώρες. Το πείραμα διεξήχθη σε δοκιμαστικό σωλήνα των 50 mL, από τον οποίο συλλέχθηκαν δείγματα 1 mL για μετρήσεις της δραστηριότητας ουρεάσης.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η δραστηριότητα ουρεάσης, αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος εκχυλίσματος ζύμης και της συγκέντρωσης των ιόντων Ni^{2+} στο μέσο ανάπτυξης.
- Δεν παρατηρήθηκε αύξηση της δραστηριότητας ουρεάσης από την παρουσία ουρίας στις βακτηριακές καλλιέργειες, ενώ η δραστηριότητα φάνηκε να μειώνεται σε συγκεντρώσεις ιόντων ασβεστίου μεγαλύτερες από 1 M και να αυξάνεται για συγκεντρώσεις μικρότερες του 1M.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων ασβεστίου, συνέβαλε στην αύξηση των συσσωματωμάτων των κυττάρων (καθίζηση κυττάρων), μέχρι τη σταθεροποίηση της ποσότητας καθίζησης. Αυτή η καθίζηση που προκλήθηκε από τα ιόντα ασβεστίου, δεν μείωσε τη δραστηριότητα ουρεάσης. Η προσθήκη ουρίας και ιόντων ασβεστίου, οδήγησε στην καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνεια των κυττάρων, προκαλώντας έτσι και την καθίζηση των βακτηριακών κυττάρων (συν-καθίζηση). Η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος τσιμεντοποίησης οδήγησε στην αύξηση της ποσότητας καθίζησης των βακτηριακών κυττάρων. Επίσης, μπορεί να συμβεί και η χημική δημιουργία των κρυστάλλων CaCO_3 , εξαιτίας της παρουσίας ιόντων ασβεστίου και CO_3^{2-} , σε συνθήκες υψηλού pH και υπερκορεσμού. Έτσι, η εισαγωγή μη κατάλληλης

ποσότητας διαλύματος τσιμεντοποίησης, πριν από την ένεση, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα όσον αφορά το βάθος διείσδυσης.

Παραγωγή κρυστάλλων από τα βακτήρια μέσω υδρόλυσης της ουρίας

Αναμίχθηκαν 20μL βακτηριακής καλλιέργειας MCP11, με διάλυμα τσιμεντοποίησης συγκέντρωσης 1 M, σε σωλήνα φυγοκέντρωσης. Το μίγμα αυτό, τοποθετήθηκε σε αντικειμενοφόρες πλάκες και καλύφθηκε. Στην περίπτωση δοκιμής για την μελέτη της καθίζησης των κρυστάλλων του ασβεστίτη, αναμίχθηκαν 200 mg κόκκων χαλαζιακής άμμου με δυο σταγόνες του παραπάνω διαλύματος τσιμεντοποίησης και τοποθετήθηκαν σε αντικειμενοφόρες πλάκες.

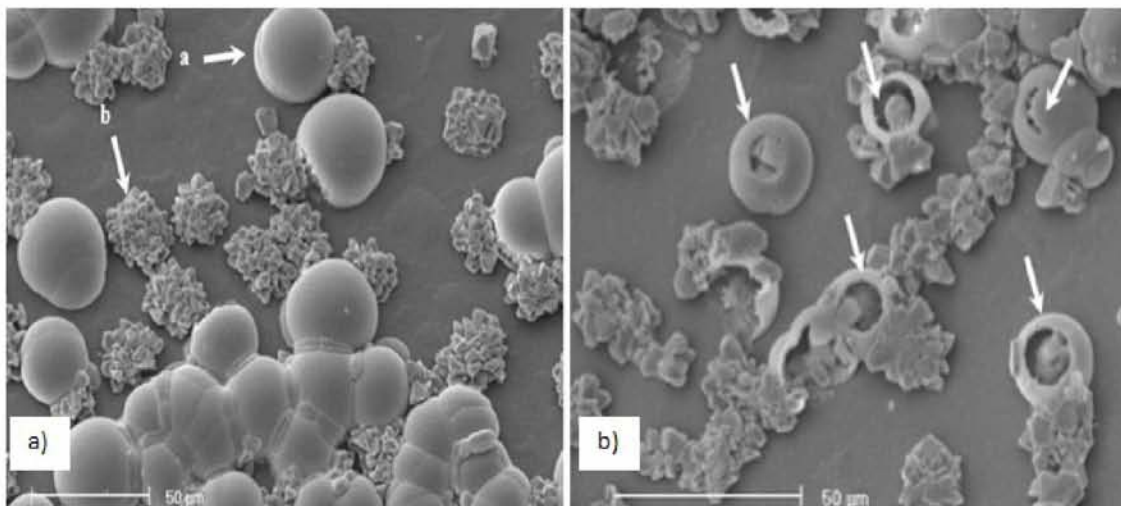
Ο σχηματισμός κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου εξετάστηκε μετά από 24 ώρες από μικροσκόπιο (Olympus compound microscope BX51), εφοδιασμένο με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Μια εβδομάδα αργότερα, τα δείγματα υποβλήθηκαν σε εξέταση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση XRD.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν εκ νέου, με την προσθήκη καθαρής ουρεάσης. Στην περίπτωση αυτή, ακολουθήθηκε η ίδια προετοιμασία των δειγμάτων για τις δοκιμές, με μόνη διαφορά την αντικατάσταση της βακτηριακής καλλιέργειας με φυτικό ένζυμο ουρεάσης.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Από το μικροσκόπιο φωτός, έγινε φανερός ο σχηματισμός σφαιρικών κρυστάλλων, οι οποίοι είναι αποτέλεσμα της δράσης των βακτηρίων που υδρολύουν την ουρία, παρουσία ουρίας και ιόντων ασβεστίου. Παράλληλα, το μικροπεριβάλλον γύρω από τα κύτταρα δεν διαταράχθηκε.

Δημιουργήθηκαν ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι από τις καθιζήσεις των σφαιρικών κρυστάλλων ασβεστίτη. Οι ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι εμφανίστηκαν σε μεταγενέστερο στάδιο της αντίδρασης της βιο-τσιμεντοποίησης. Παρ' όλα αυτά, δεν μετατράπηκαν όλοι οι σφαιρικοί κρύσταλλοι σε ρομβοεδρικούς.



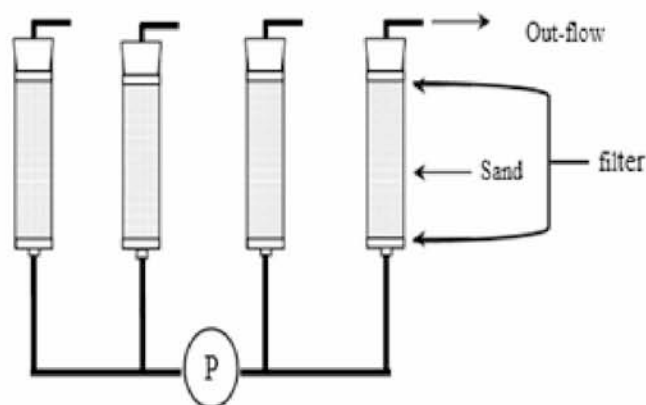
Σχήμα 4.7 a) Με 'a' συμβολίζονται οι σφαιρικοί κρύσταλλοι και με 'b' οι ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι, b) Ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής των σφαιρικών κρυστάλλων σε ρομβοεδρικούς (Al Thawadi, 2008).

- Μέσω της ανάλυσης ακτίνων X, επιβεβαιώθηκε ότι οι σφαιρικοί και οι ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι αποτελούνταν από ανθρακικό ασβέστιο (Σχήμα 4.7).

Παραγωγή αντοχής μέσω της επιτόπου συγκέντρωσης των κυττάρων

Στόχος των πειραμάτων αποτελεί η συγκέντρωση των κυττάρων επιτόπου στις στήλες άμμου, μέσω τριών εφαρμογών κυττάρων, η οποία ακολουθείται από τρεις εφαρμογές του διαλύματος τσιμεντοποίησης. Η παρακολούθηση ανάπτυξης της αντοχής, πραγματοποιήθηκε με επιτόπου μετρήσεις της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων μέσω δύο προσπαθειών. Πρώτον, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή κυττάρων στη στήλη άμμου, την οποία ακολούθησε εισαγωγή διαλύματος τσιμεντοποίησης. Δεύτερον, ένα δεύτερο διάλυμα τσιμεντοποίησης, ακολούθησε μια δεύτερη εφαρμογή βακτηριακών κυττάρων και μια τρίτη εφαρμογή διαλύματος τσιμεντοποίησης.

Εισαγωγή των κυττάρων στις στήλες άμμου: Αρχικά, η χαλαζιακή άμμος συσκευάστηκε σε ξηρές συνθήκες, σε μια πλαστική σύριγγα ύψους 10 cm και στη συνέχεια συμπιέστηκε. Τέσσερις όγκοι κυττάρων εκπλύθηκαν στη στήλη, με ρυθμό ροής 833 mL/h. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης (συγκέντρωσης 1M), εκπλύθηκε στις στήλες αμέσως μετά την εισαγωγή των βακτηριακών κυττάρων. Συνολικά, διαμορφώθηκαν τέσσερις στήλες άμμου (Σχήμα 4.8) για τέσσερις διαφορετικές δοκιμές (1-4 εκπλύσεις). Έπειτα, οι στήλες διατηρήθηκαν για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου για να ολοκληρωθεί η αντίδραση.



Σχήμα 4.8 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στην βιο-τσιμεντοποίηση των στηλών άμμου με την συγκέντρωση των βακτηρίων επί τόπου. Με P, στην εικόνα συμβολίζεται η περισταλτική αντλία (Al Thawadi, 2008).

Μετά τη τσιμεντοποίηση της στήλης (4 εκπλύσεις), η στήλη εξετάστηκε στο μικροσκόπιο ESEM.

Προετοιμασία για τις μετρήσεις διατμητικών κυμάτων: Προκειμένου να μετρηθεί η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική προετοιμασίας δείγματος σύμφωνα με τον Ismail (2000), η οποία αφορά την εγκατάσταση συναρμολογούμενου καλουπιού. Η βακτηριακή καλλιέργεια αναπτύχθηκε σε φιάλη ανάδευσης στους 28 °C, με δραστηκότητα ουρεάσης 4.3mM υδρολυόμενης ουρίας/λεπτό. Μετά τη διαμόρφωση του καλουπιού, το καλούπι εκπλύθηκε με όγκο απιονισμένου νερού, έτσι ώστε καμία ουσία να μην μπορεί να αναστείλει την διαδικασία της βιοσυσσωμάτωσης και ακολούθησε η εισαγωγή της βακτηριακής καλλιέργειας. Στη συνέχεια, η άμμος συμπυκνώθηκε και εισήχθη σε αυτή διάλυμα τσιμεντοποίησης συγκέντρωσης 1M. Ο ρυθμός ροής όλων των διαλυμάτων ήταν 850 mL/h.

Μετρήθηκε η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων σε διάστημα 20 ωρών, για την παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής. Η ταχύτητα προσδιορίστηκε από την παραγωγή κύματος 10 khz.

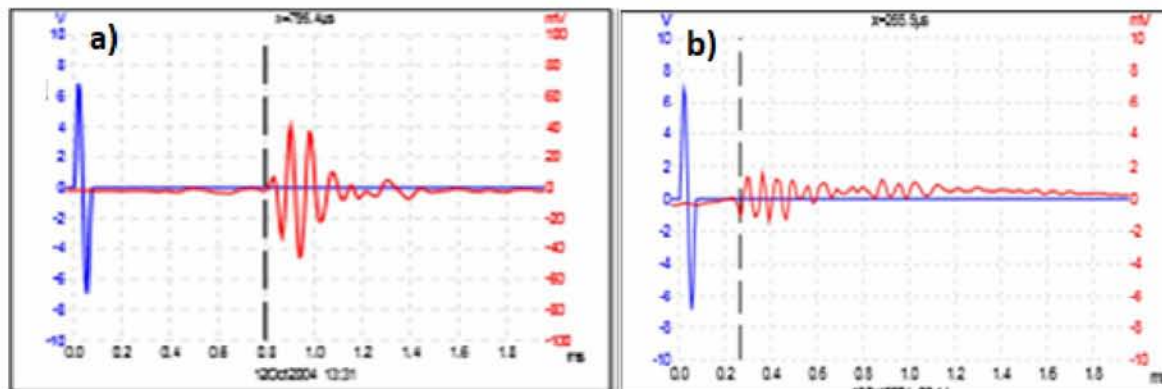
Επίσης, παρασκευάστηκε στήλη άμμου σε σύριγγα των 60mL, υποθέτοντας ότι διατηρήθηκαν όμοιες συνθήκες με αυτές του καλουπιού και έπειτα εισήχθησαν τα βακτηριακά κύτταρα και το διάλυμα τσιμεντοποίησης. Η στήλη αυτή χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα για την παρακολούθηση της δημιουργίας του ανθρακικού ασβεστίου κατά τη διάρκεια της βιο-τσιμεντοποίησης μέσω του μικροσκοπίου. Τα δείγματα συλλέχθηκαν κατά

τη διάρκεια των πρώτων 6 ωρών από την αρχή της βιο-τσιμεντοποίησης, από τη στήλη άμμου, για να συνεχιστεί η ανάπτυξη του ανθρακικού ασβεστίου με παράλληλες μετρήσεις της ταχύτητας.

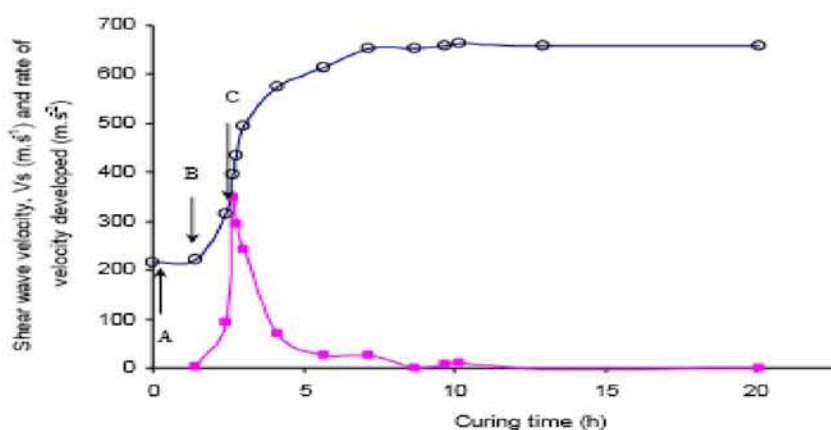
Πραγματοποιήθηκε παρακολούθηση της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων σε περίοδο 75 ωρών, όπου εφαρμόστηκαν διαφορετικές εκπλύσεις κυττάρων και διαλύματος τσιμεντοποίησης. Πρώτον, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή κυττάρων στη στήλη άμμου, την οποία ακολούθησε εισαγωγή διαλύματος τσιμεντοποίησης. Έπειτα από 4 ώρες, ένα δεύτερο διάλυμα τσιμεντοποίησης εισήχθη με ρυθμό 850 mL/h και ακολούθησε μια δεύτερη εφαρμογή βακτηριακών κυττάρων και μια τρίτη, διαλύματος τσιμεντοποίησης. Η τσιμεντοποιημένη στήλη αφαιρέθηκε από το καλούπι πριν από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η μέτρηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, ήταν χρήσιμη για την παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής, η οποία παράγεται από τη δράση των βακτηρίων, ωστόσο, δεν προέβλεπε την πραγματική αντοχή της βιο-τσιμεντοποιημένης στήλης.
- Μέσω της παρακολούθησης της ανάπτυξης της αντοχής, αποδείχθηκε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής, αναπτύσσεται μέσα στις 3-4 πρώτες ώρες της διαδικασίας της βιο-τσιμεντοποίησης.
- Κατά τη διάρκεια μέτρησης της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, έπειτα από μια εφαρμογή βακτηριακής καλλιέργειας και διαλύματος τσιμεντοποίησης, παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων στο διάστημα παρακολούθησης 20 ωρών (Σχήμα 4.9). Έπειτα από 20 ώρες, με την αύξηση της αντοχής, το σήμα του τσιμεντοποιημένου δείγματος φθάνει πιο γρήγορα στον μετατροπέα σε σχέση με το μη τσιμεντοποιημένο. Έτσι ο χρόνος άφιξης μειώνεται, αυξάνοντας κατά συνέπεια την ταχύτητα διατμητικών κυμάτων (Σχήμα 4.10).



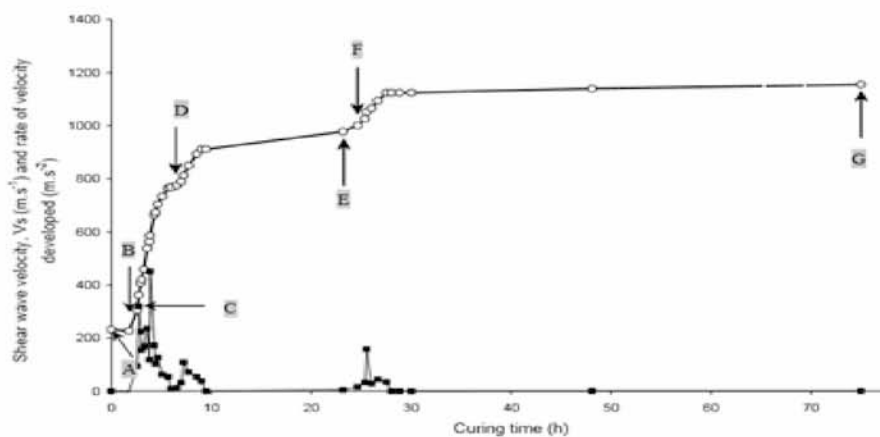
Σχήμα 4.9 Δεδομένα διατμητικών κυμάτων, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ταχύτητας, για: a) μη τσιμεντοποιημένο δείγμα (έπειτα από την εισαγωγή των βακτηρίων στις στήλες άμμου), b) τσιμεντοποιημένα δείγματα, έπειτα από 20 ώρες αφότου ξεκίνησε η τσιμεντοποίηση. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τη χρονική στιγμή άφιξης του κύματος στον αντίθετο μετατροπέα (Al Thawadi, 2008).



Σχήμα 4.10 Ανάπτυξη της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και ρυθμός ανάπτυξης της ταχύτητας κατά τη διάρκεια της τσιμεντοποίησης, έπειτα από 20 ώρες θεραπείας (μπλε καμπύλη). Με A συμβολίζεται η περίοδος, έπειτα από την πλύση με νερό, με B η περίοδος, έπειτα από την πλύση με τη βακτηριακή καλλιέργεια (πάνω από το σημείο αυτό ξεκινάει η αντίδραση τσιμεντοποίησης) και με C, το χρονικόδιάστημα, πειτα από την πλύση με διάλυμα τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).

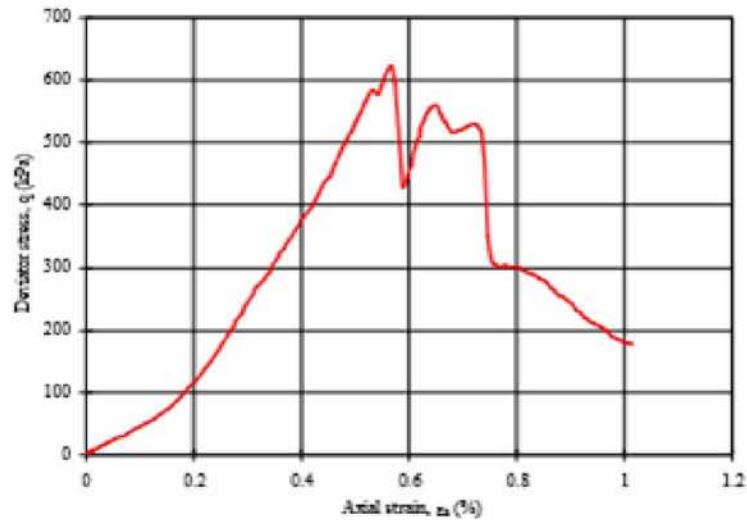
- Μέσω της ανάλυσης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, μετά την εισαγωγή του διαλύματος τσιμεντοποίησης στο καλούπι, παρατηρήθηκε η έναρξη της τσιμεντοποίησης στα πρώτα 2-3 λεπτά (σφαιρικοί κρύσταλλοι). Μετά από 2-3 ώρες, οι σφαιρικοί κρύσταλλοι είχαν μετατραπεί σε ρομβοεδρικούς.

- Η τελική αντοχή της στήλης, αποδίδεται κυρίως στους ρομβοεδρικούς κρυστάλλους.
- Κατά τη διάρκεια μέτρησης της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, έπειτα από πολλαπλές εφαρμογές της βακτηριακής καλλιέργειας και του διαλύματος τσιμεντοποίησης, παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων στο διάστημα των 75 ωρών μεγαλύτερη από αυτή των 20 ωρών. Όμως, η προσθήκη επιπλέον βακτηρίων δεν έδωσε κάποια μεγάλη ώθηση στην αύξηση της αντοχής, καθώς το πρότυπο αύξησης της αντοχής τους ανέστρεψε την αντοχή με την εισαγωγή ενός δεύτερου διαλύματος τσιμεντοποίησης (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11 Ανάπτυξη της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων κατά τη διάρκεια 75 ωρών από την έναρξη της διαδικασίας της τσιμεντοποίησης. A: Έπειτα από την πλύση με νερό, B: Έπειτα από την πλύση με τη βακτηριακή καλλιέργεια, C: Πρώτη έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης, D: Δεύτερη έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης, E: Έπειτα από την δεύτερη πλύση με τη βακτηριακή καλλιέργεια, F: Τρίτη έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).

- Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, για την τσιμεντοποιημένη άμμο, προέκυψε αντοχή των 600 kPa. Η αντοχή αυτή αντιστοιχεί σε πολύ μαλακό βράχο.

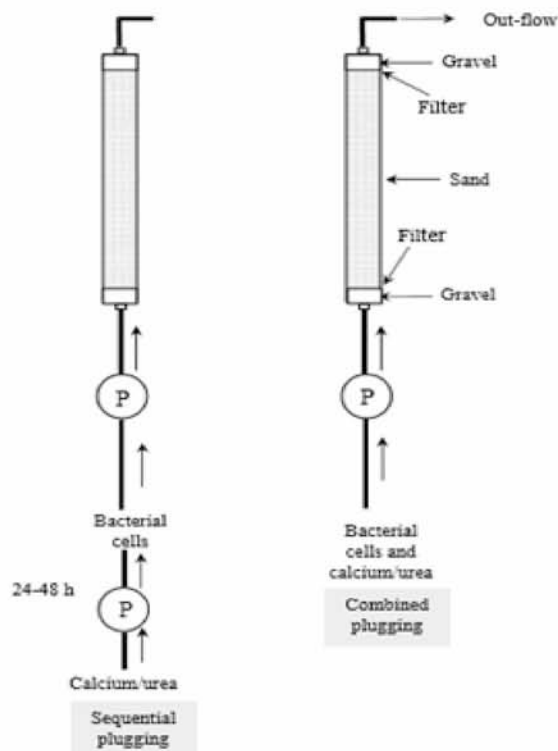


Σχήμα 4.12 Σχέση της αποκλίνουσας τάσης με την αξονική παραμόρφωση, μέσω της δοκιμής ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, για την τσιμεντοποιημένη άμμο (Al Thawadi, 2008).

- Παρατηρήθηκε ότι η χαμηλή δραστηκότητα ουρεάσης ($0.02 \text{ mmol/cm}^3/\text{min}$), μπορούσε να αυξήσει τη δυσκαμψία της στήλης άμμου 11-16 φορές.

Εφαρμογή της μεθόδου MICP σε στήλες άμμου 1m

Αρχικά, η χαλαζιακή άμμος ($100\text{-}400\mu\text{m}$), συσκευάστηκε σε σωλήνα PVC, μήκους 1 m και εσωτερικής διαμέτρου 4,5cm. Κάθε άκρο της στήλης στερεώθηκε με φίλτρο για να περιοριστεί η άμμος και πάνω από τα φίλτρα τοποθετήθηκε χαλίκι 2,5 cm. Στην επόμενη εικόνα, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη βιο-τσιμεντοποίηση της στήλης, είτε μέσω παράλληλης έγχυσης των κυττάρων με το διάλυμα τσιμεντοποίησης είτε μέσω της διαδοχικής εισαγωγής πρώτα των κυττάρων και στη συνέχεια του διαλύματος τσιμεντοποίησης (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στις βιο-τσιμεντοποιημένες στήλες άμμου, μήκους 1m. P: περιστάλτικη αντλία (Al Thawadi, 2008).

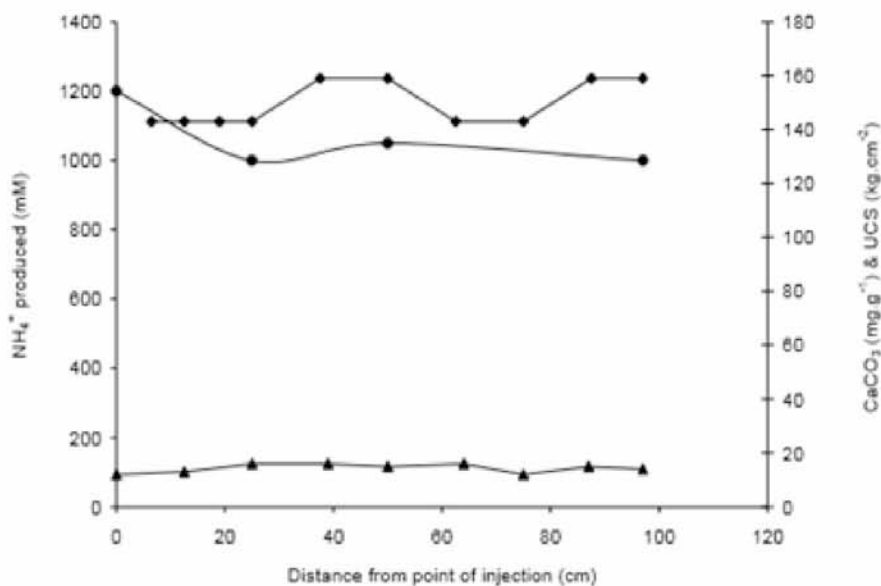
Για την παράλληλη έγχυση του βακτηριακού διαλύματος με το διάλυμα τσιμεντοποίησης, 360 mL της βακτηριακής καλλιέργειας αναμίχθηκαν με 640 mL διαλύματος τσιμεντοποίησης (1.25M CaCl₂, 1.7 M ουρία). Το μίγμα αυτό εισήχθη αμέσως στη στήλη άμμου υπό πίεση 5 psi για 10 λεπτά και έπειτα υπό 7.5 psi για 3 λεπτά.

Για τη δημιουργία του δεύτερου είδους τσιμεντοποιημένων στηλών, 600 mL της βακτηριακής καλλιέργειας εισήχθησαν στην άμμο και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για 72 ώρες. Έπειτα, τοποθετήθηκε το διάλυμα τσιμεντοποίησης. Πριν από τη συλλογή του δείγματος, 50 mL της βακτηριακής καλλιέργειας συλλέχθηκαν, προκειμένου να γίνουν μετρήσεις οπτικής πυκνότητας και δραστηριότητας ουρεάσης. Πραγματοποιήθηκε η μέτρηση του περιεχομένου του ανθρακικού ασβεστίου στην τσιμεντοποιημένη στήλη άμμου, με τη χρήση μανόμετρου.

Με τη χρήση πενετρομέτρου μετρήθηκαν το παραγόμενο αμμώνιο, η ποσότητα του ανθρακικού ασβεστίου που δημιουργήθηκε και η UCS σε σχέση με την απόσταση από το σημείο της έγχυσης, για τη στήλη άμμου στην οποία τα διαλύματα προστέθηκαν διαδοχικά.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Από τις παραπάνω μετρήσεις, διαπιστώθηκε ότι στην εφαρμογή διαδοχικών εκπλύσεων, η μετατροπή της ουρίας ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος της στήλης και συνεπώς, το ίδιο συνέβη για το παραγόμενο ανθρακικό ασβέστιο και την αντοχή (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14 Μηχανική αντοχή (πάνω καμπύλη), παραγωγή NH_4^+ (μεσαία καμπύλη), καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου (κάτω καμπύλη). Οι μετρήσεις των ανωτέρω μεγεθών, αφορούν την τσιμεντοποιημένη στήλη άμμου 1m (Al Thawadi, 2008).

Για την περίπτωση της παράλληλης έγχυσης, οι τρεις παραπάνω ποσότητες μειώθηκαν, με την αύξηση της απόστασης από το σημείο έγχυσης. Επίσης, αποδείχθηκε ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί αποτελεσματική τσιμεντοποίηση σε στήλη μεγαλύτερη από 37-50cm σε μήκος.

- Από τις εικόνες SEM, παρατηρήθηκε για την παράλληλη έγχυση των βακτηρίων και του διαλύματος τσιμεντοποίησης, ότι οι κόκκοι άμμου στο τέλος της έγχυσης ήταν πλήρως καλυμμένοι από κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου σε σχέση με την άλλη κατηγορία στήλης, στην οποία υπήρχαν λιγότεροι και διαχωρισμένοι κρύσταλλοι.

Η επίδραση των ιόντων ασβεστίου στην ανάπτυξη των βακτηρίων

Για μια επιτυχημένη παραγωγή αντοχής, στη στήλη άμμου του 1m, πρέπει να συγκρατείται σε αυτή, ένας επαρκής αριθμός κυττάρων, έτσι ώστε ο ασβεστίτης που προκύπτει να σχηματίζει γέφυρες που να ενώνουν τους κόκκους άμμου. Γι' αυτό, πρέπει τα κύτταρα να προσκολλώνται στην επιφάνεια των κόκκων άμμου. Στα επόμενα πειράματα οι στήλες γεμίστηκαν με λεπτή χαλαζιακή άμμο (100-250 μm).

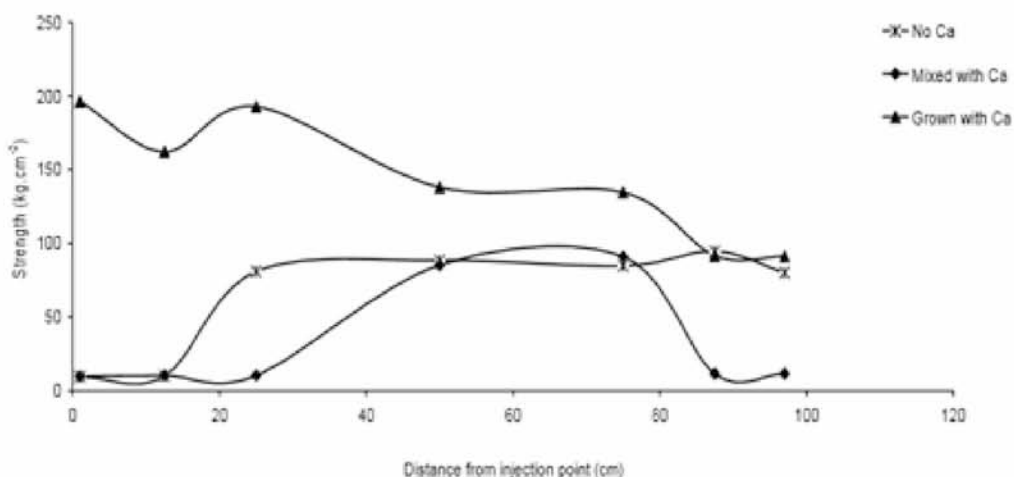
Η βακτηριακή καλλιέργεια αναπτύχθηκε χωρίς ουρία στους 28 °C για 24 ώρες με δραστικότητα ουρεάσης 11.11 mM υδρολυόμενης ουρίας/λεπτό. Μια δεύτερη καλλιέργεια, αναπτύχθηκε παρουσία 6 mM $\text{CaCl}_2\text{H}_2\text{O}$, με δραστικότητα ουρεάσης 9.3 mM υδρολυόμενης ουρίας/λεπτό.

Διαμορφώθηκαν 3 στήλες άμμου, με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως, για τη στήλη 1m. Για τη μία από τις τρεις στήλες, 650 mL βακτηριακής καλλιέργειας αναπτύχθηκαν υπό την παρουσία ιόντων ασβεστίου σε πίεση 7.5 psi για περίπου 12 λεπτά. Η καλλιέργεια διατηρήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 48 ώρες και στη συνέχεια εκπλύθηκε με το διάλυμα τσιμεντοποίησης. Στις υπόλοιπες στήλες, η διαδικασία ήταν η ίδια με εξαίρεση την καλλιέργεια των κυττάρων στην οποία είτε τα κύτταρα αναμίχθηκαν με συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου 6 mM, αμέσως πριν την εισαγωγή τους στη στήλη άμμου, είτε αναπτύχθηκαν χωρίς την παρουσία ιόντων ασβεστίου.

Προκειμένου να βρεθεί η πόσότητα συγκράτησης των κυττάρων επί τόπου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της οπτικής πυκνότητας και της δραστικότητας ουρεάσης. Επίσης, έγινε ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η ανάπτυξη των κυττάρων παρουσία των ιόντων ασβεστίου, ενίσχυσε την συγκράτησή τους στην στήλη της άμμου και κατά συνέπεια συνέβαλε στην αύξηση της αντοχής (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα της αντοχής σε σχέση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης, μετά το τέλος της τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).

- Η απόκτηση ομογενούς τσιμεντοποίησης, αποδείχθηκε πιο δύσκολη στη λεπτή άμμο και συνεπώς ήταν και πιο δύσκολο να επιτευχθεί πλήρης διείδυση στο 1 m της στήλης.

Προσδιορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την επιτόπου βιο-τσιμεντοποίηση

Επίδραση των αντιδρώντων στη βιο-τσιμεντοποίηση: Για τη συγκεκριμένη μελέτη, διαμορφώθηκαν 4 στήλες άμμου 1 m. Στις δύο από τις 4 στήλες, προκλήθηκε συνεχής αντίδραση τσιμεντοποίησης με την συνεχή παροχή διαλύματος ουρίας/ασβεστίου, έπειτα από την ανάπτυξη των κυττάρων για 72 ώρες ενώ στις υπόλοιπες δύο δεν ήταν συνεχής. Επίσης, για κάθε μια από τις δυο παραπάνω κατηγορίες αξιολογήθηκε η υψηλή συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης σε συνδυασμό με τη χαμηλή συγκέντρωση αμμωνίου και η χαμηλή συγκέντρωση ουρίας/ασβεστίου σε συνδυασμό με την υψηλή συγκέντρωση αμμωνίου. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πενετρομέτρου και δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η παραγωγή αντοχής σε υψηλή συγκέντρωση αμμωνίου και χαμηλή συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης, έδειξε ότι ακόμη και στο τέλος της βιο-τσιμεντοποίησης μπορεί να παραχθεί αντοχή.

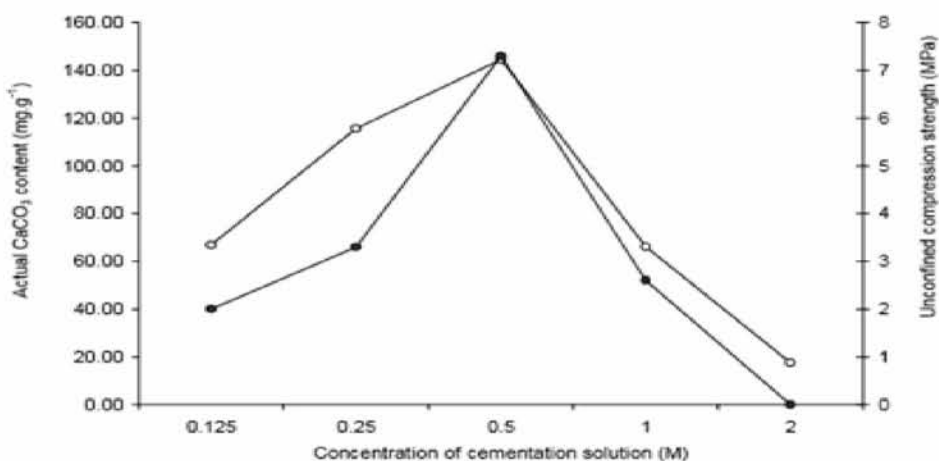
- Από τις δοκιμές πεντρομέτρου και UCS, παρατηρήθηκε υψηλότερη ανάπτυξη αντοχής και παραγωγή κρυστάλλων για τις στήλες συνεχούς τσιμεντοποίησης. Η στήλη συνεχούς παροχής διαλύματος τσιμεντοποίησης έδειξε αντοχή, έξι φορές υψηλότερη από την άλλη στήλη άμμου.

Επίδραση των διαφορετικών συγκεντρώσεων του διαλύματος τσιμεντοποίησης:

Διαμορφώθηκαν 5 στήλες άμμου στις οποίες εξετάστηκε η επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων του διαλύματος τσιμεντοποίησης στη δραστηριότητα ουρεάσης, στο σχηματισμό ασβεστίτη και στην παραγωγή αντοχής. Οι στήλες εφοδιάστηκαν με κύτταρα και 60 ώρες έπειτα από την ανάπτυξή τους, πραγματοποιήθηκε συνεχής τσιμεντοποίηση με την εισαγωγή διαφορετικών συγκεντρώσεων διαλύματος τσιμεντοποίησης (0.125-2 M). Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές μέτρησης του σχηματιζόμενου ανθρακικού ασβεστίου.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Αποδείχθηκε ότι συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης, μεγαλύτερες από 0.5M, συμβάλλουν στη μείωση της δραστηριότητας ουρεάσης, λόγω της μείωσης της καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου και της αντοχής.
- Σε συγκεντρώσεις μικρότερες του 0.5M, επιτεύχθηκε παραγωγή και αύξηση της αντοχής, όμως λόγω του περιορισμού του διαλύματος τσιμεντοποίησης, προέκυψε λιγότερη τσιμεντοποίηση.



Σχήμα 4.16 Το παραγόμενο ανθρακικό ασβέστιο (πάνω καμπύλη) και η ανεμπόδιστη μονοαξονική αντοχή (κάτω καμπύλη) των 5 στηλών άμμου στις οποίες εισήχθησαν διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης (Al Thawadi, 2008).

Επίδραση των διαφορετικών συγκεντρώσεων βακτηριακών κυττάρων: Διαμορφώθηκαν 7 στήλες άμμου ύψους 11cm, στις οποίες εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών συγκεντρώσεων των βακτηριακών κυττάρων, στην παραγωγή αντοχής. Οι στήλες αυτές τσιμεντοποιήθηκαν παράλληλα με τη χρήση διαφορετικών συγκεντρώσεων βακτηριακών κυττάρων (5.4-432 gr/L) και συγκέντρωσης διαλύματος τσιμεντοποίησης 1M. Τα βακτηριακά κύτταρα αναμίχθηκαν με το διάλυμα τσιμεντοποίησης και εισήχθησαν απευθείας στις στήλες άμμου με υψηλό ρυθμό ροής 11 L/h, έτσι ώστε να μην προλάβει να κατακρημνισθεί ασβεστίτης πριν από την ένεση. Ελήφθησαν 3 δείγματα από τις στήλες για την μέτρηση της δραστηκότητας ουρεάσης και της αντοχής, μέσω ενός πενετρομέτρου.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Με τη χρήση μικρότερης συγκέντρωσης βακτηριακών κυττάρων, η ουρία αποικοδομούνταν στο χρόνο, περίπου με τον ίδιο βαθμό, με τη χρήση μεγαλύτερης συγκέντρωσης βακτηριακών κυττάρων. Ωστόσο, στις δυο παραπάνω συγκεντρώσεις δεν προέκυψε η ίδια αντοχή, λόγω του μεγέθους, του τύπου των κρυστάλλων και της επαφής από σημείο σε σημείο.
- Στη μη συνεχή παροχή διαλύματος τσιμεντοποίησης, η καλύτερη δραστηκότητα ουρεάσης, για την παραγωγή υψηλής αντοχής, ήταν για τις τιμές 23.3-93.2 mM υδρολυμένης ουρίας/λεπτό.

- Αποδείχθηκε ότι πολύ χαμηλές (2.9-12.22 mM υδρολυμένης ουρίας/λεπτό) και πολύ υψηλές (186.4 mM υδρολυμένης ουρίας/λεπτό) δραστηριότητες ουρεάσης, δεν ήταν κατάλληλες για την παραγωγή υψηλής αντοχής.

Η επίδραση της τροφοδοσίας των βακτηριακών κυττάρων κατά τη διαδικασία της βιο-τσιμεντοποίησης (batch conditions).

Σε κάποιες εφαρμογές, χρειάζεται η αύξηση της αντοχής των βιο-συγκολλημένων δειγμάτων, η οποία επιτυγχάνεται επί τόπου, με την τροφοδοσία των βακτηριακών κυττάρων κατά τη διάρκεια της τσιμεντοποίησης. Η τροφοδοσία επιτυγχάνεται με την προσθήκη μέσου εκχυλίσματος ζύμης στο διάλυμα τσιμεντοποίησης, υποθέτοντας ότι θα ενισχυθεί η ικανότητα του βακτηρίου, έτσι ώστε να υδρολύει γρηγορότερα την ουρία.

Διαμορφώθηκαν 2 στήλες άμμου, στις οποίες εισήχθησαν βακτήρια με ρυθμό 1313 mL/min. Μετά τη συγκράτηση των βακτηρίων στα σωματίδια της άμμου, εγχύθηκε το διάλυμα τσιμεντοποίησης (ισοδύναμη συγκέντρωση ουρίας/ασβεστίου 1M). Το διάλυμα τσιμεντοποίησης για μια από τις δύο στήλες, εκτός από ουρία και ασβέστιο, περιείχε και 4g/L μέσο εκχύλισης ζύμης. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης (pocket penetrometer), δοκιμές μέτρησης του σχηματιζόμενου ανθρακικού ασβεστίου και ανάλυση αμμωνίου.

Από τα παραπάνω πειράματα, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η παρουσία του εκχυλίσματος ζύμης στο διάλυμα τσιμεντοποίησης, αύξησε τη δραστηριότητα ουρεάσης, έπειτα την περιεκτικότητα σε ανθρακικά άλατα και τη μηχανική αντοχή της τσιμεντοποιημένης στήλης.
- Διεξήχθη το συμπέρασμα, ότι τα τροφοδοτημένα κύτταρα θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν για περαιτέρω δημιουργία του ανθρακικού ασβεστίου εξαιτίας της διατηρούμενης δραστηριότητας, η οποία παρατηρήθηκε στην τσιμεντοποιημένη στήλη, μετά την ολοκλήρωση της βιο-τσιμεντοποίησης.

Γενικά συμπεράσματα της διατριβής

- Η επιτυχία της βιο-τσιμεντοποίησης, στη συγκεκριμένη έρευνα, οφείλεται στην επιτόπου σταθεροποίηση των κυττάρων, η οποία ακολουθείται από ξεχωριστή ροή του διαλύματος τσιμεντοποίησης.
- Αποδείχθηκε ότι η καλλιέργεια εμπλουτισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τσιμεντοποίηση υπό υψηλή συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης, χωρίς την ανάγκη καθαρισμού των κυττάρων.
- Από την παρακολούθηση του σχηματισμού και της εξέλιξης των κρυστάλλων, αρχικά σχηματίστηκαν σφαιρικοί κρύσταλλοι, οι οποίοι ήταν ασταθείς και στη συνέχεια μετατράπηκαν σε ρομβοεδρικούς. Έπειτα, όταν μειωθεί ο βαθμός υπερκορεσμού, πολλοί από τους ρομβοεδρικούς κρυστάλλους μετατρέπονται σε κρυστάλλους ασβεστίτη.
- Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, προέκυψε αντοχή μεγαλύτερη από 30 MPa. Αυτή η μεγάλη τιμή στην αντοχή, είναι αποτέλεσμα της συνεχούς αντίδρασης τσιμεντοποίησης, που επιτυγχάνεται με συνεχή παροχή ασβεστίου και ουρίας στα κύτταρα, τα οποία συγκρατούνται στην επιφάνεια των κόκκων της άμμου. Η συνεχής τσιμεντοποίηση, επέτρεψε την επαναχρησιμοποίηση των κυττάρων (οικονομία της μεθόδου).
- Μια επιτυχής βακτηριακή τσιμεντοποίηση, σε βάθος 1m, επιτεύχθηκε με διαδοχική έκπλυση βακτηρίων και στη συνέχεια διαλύματος τσιμεντοποίησης.
- Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε, είχε ως στόχο την ακινητοποίηση της ουρέας και τη ροή του διαλύματος ουρίας, με ταχύτερο ρυθμό από τη δράση του ενζύμου, έτσι ώστε να μπορέσει η ουρία να φθάσει σε βαθύτερα επίπεδα, πριν να μετατραπεί από τα βακτήρια και προκληθεί η καθίζηση. Έτσι στη συγκεκριμένη μέθοδο, μικρότερος αριθμός βακτηρίων είναι επωφελής.
- Η ποσότητα του σχηματιζόμενου ανθρακικού ασβεστίου δεν σχετίζεται σε όλες τις περιπτώσεις με την αντοχή της τσιμεντοποιημένης στήλης. Σημαντικό ρόλο στην παραγωγή αντοχής, παίζουν και το μέγεθος και ο τύπος των κρυστάλλων. Προτάθηκε

λοιπόν, η επαφή σημείο με σημείο μεταξύ των κόκκων, ενωμένων με ρομβοεδρικούς κρυστάλλους, οι οποίοι συμβάλλουν στην παραγωγή αντοχής.

- Αν και η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων είναι μια χρήσιμη μέθοδος για την παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής που παράγεται από τα κύτταρα, στη συγκεκριμένη έρευνα, δεν εκτιμήθηκε η πραγματική αντοχή της βιο-τσιμεντοποιημένης στήλης άμμου. Αυτό συνέβη διότι τα πειράματα διεξήχθησαν χωρίς την ακινητοποίηση των βακτηρίων στους κόκκους άμμου.

- Ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη δημιουργία μιας τσιμεντοποιημένης στήλης υψηλής αντοχής, είναι σύμφωνα με την έρευνα, η επί τόπου δραστηριότητα ουρεάσης.

- Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της βιο-τσιμεντοποίησης, σύμφωνα με την έρευνα είναι οι εξής:

1. Η συγκέντρωση του διαλύματος τσιμεντοποίησης, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.5M, διότι μπορεί να καθυστερήσει την επιτόπου αντίδραση.

2. Η επιλογή του κατάλληλου στελέχους (MCP11, στη συγκεκριμένη έρευνα).

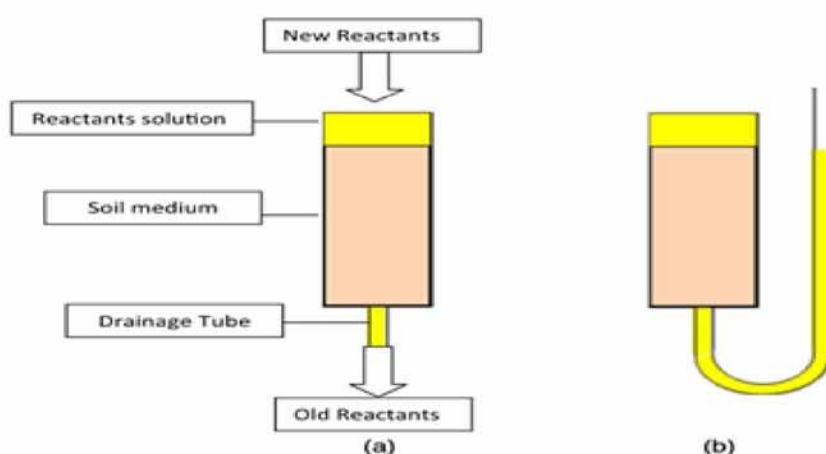
3. Η μείωση της δραστηριότητας ουρεάσης κοντά στο άκρο της έγχυσης, η οποία συμβάλλει στην αύξηση του βάθους διείσδυσης της ουρίας και του ασβεστίου εντός της στήλης.

(β) Οι Al Qabany, Soga και Santamarina (2012) μελέτησαν τους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μικροβιακά επαγόμενης δημιουργίας του ανθρακικού ασβεστίου. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε χαλαζιακή άμμος με δυο διαφορετικά μεγέθη κόκκων σύμφωνα με το Βρετανικό Σύστημα Κατάταξης (Grade D,E).

Μέθοδος Προετοιμασίας

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το βακτήριο *Sporosarcina pausterrii*. Τα κύτταρα λήφθηκαν από τα βιο-υλικά ATCC, αναπτύχθηκαν σε πλάκες και επώαστηκαν στους 30 °C. Όλα τα συστατικά ήταν χημικά εργαστηριακά προϊόντα και αποστειρώθηκαν ξεχωριστά στους 121°C για 25 λεπτά πριν την ανάμιξη. Μετά από την ανάπτυξη στις πλάκες, τα βακτηρίδια συλλέχθηκαν και εμβολιάστηκαν σε υγρό μέσο εκχυλίσματος ζύμης όπου αναπτύχθηκαν για 24-28 ώρες, σε οπτική πυκνότητα $OD_{600nm} = 0.8-1.2$. Τα κύτταρα, που αναπτύχθηκαν στο μέσο εκχυλίσματος ζύμης, πλύθηκαν με αλατούχο διάλυμα, συλλέχθηκαν και επαναιωρήθηκαν σε μέσο ουρίας-CaCl₂. Το διάλυμα που περιέχει βακτήρια, στη συνέχεια, αναμίχθηκε με το διάλυμα τσιμεντοποίησης και εγχύθηκε στα δείγματα εδάφους. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης για να εξετασθεί η επίδραση της χημικής συγκέντρωσης στην καθίζηση.

Χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές σύριγγες με όγκο 100 mL ως στήλες δοκιμαστικού εδάφους. Οι σύριγγες γεμίστηκαν με άμμο, παρουσία υγρού βακτηριακού μέσου και συνδέθηκαν στον πυθμένα με πλαστικές σωληνώσεις, για την αποστράγγιση θρεπτικών συστατικών. Η έγχυση έγινε με την προσθήκη νέων υγρών μέσων στο ανώτερο όριο του εδάφους υπό βαρύτητα (Σχήμα 4.17a). Κατά τη διάρκεια του σταδίου συγκράτησης, η άμμος διατηρούνταν κορεσμένη ανά πάσα στιγμή (Σχήμα 4.17b). Μετά από προκαθορισμένο χρόνο συγκράτησης, το παλιό υγρό μέσο στο δείγμα αντικαταστάθηκε με ένα νέο.



Σχήμα 4.17 Πειραματική εγκατάσταση. (a) Έγχυση έγινε με την προσθήκη υγρών μέσων στο ανώτερο όριο του εδάφους υπό την επίδραση της βαρύτητας, (b) Κατά τη διάρκεια του σταδίου συγκράτησης, η άμμος διατηρούνταν κορεσμένη ανά πάσα στιγμή (Al Qabany, 2012).

Εργαστηριακές Δοκιμές

Εφαρμόστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί της συχνότητας έγχυσης (χρόνος κατακράτησης) και των χημικών συγκεντρώσεων των υγρών μέσων στα πειράματα. Στις πρώτες δοκιμές, εφαρμόστηκε διάλυμα ουρίας-CaCl₂, συγκέντρωσης 0,25 M, σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους κατακράτησης (6, 12, 24 ωρών και 2 ημερών). Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε θερμοκρασία 20 °C.

Στη δεύτερη σειρά δοκιμών, η χημική συγκέντρωση εισόδου αυξήθηκε σε 0,5 M για να εξεταστεί η επίδραση της χημικής συγκέντρωσης στη χημική απόδοση. Ελέγχθηκαν δύο διαφορετικοί χρόνοι κατακράτησης (6 και 24 ώρες) θρεπτικού διαλύματος, για να διαπιστωθεί η επίδραση του ρυθμού εισαγωγής των αντιδρώντων στην χημική απόδοση.

Μία τρίτη σειρά δοκιμών διεξήχθη με χρήση διαλύματος ουρίας-CaCl₂ συγκέντρωσης 0.1 M, με χρόνο συγκράτησης 3 ωρών. Συνολικά, δοκιμάστηκαν περισσότερα από 80 δείγματα για κάθε συνδυασμό για να εξασφαλιστεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

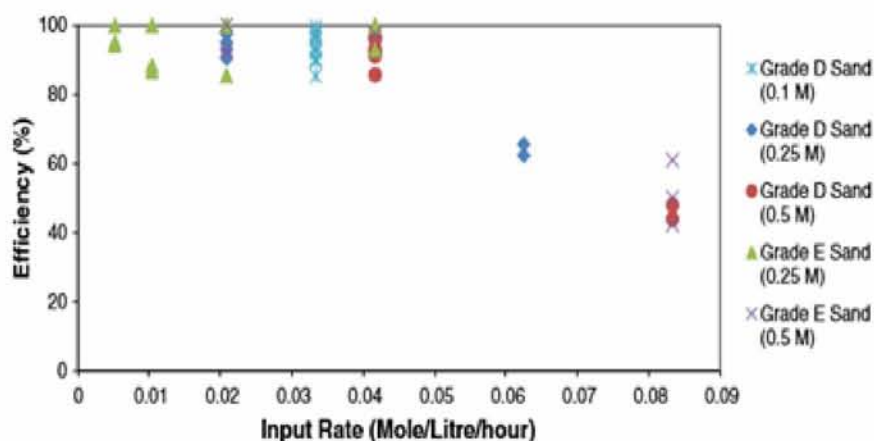
Για την ολοκλήρωση των πειραμάτων, αρχικά, το υγρό μέσο αποστραγγίστηκε και το έδαφος πλύθηκε με απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια, το έδαφος ξεπλύθηκε με απιονισμένο νερό, αποστραγγίστηκε, ξηράνθηκε σε φούρνο και καταγράφηκε το βάρος των ξηρών δειγμάτων.

Χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης SEM, για τη λήψη εικόνων των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων. Η ποσοτική ανάλυση της χημικής σύνθεσης των δειγμάτων διεξήχθη χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή ακτίνων-X (EDX) σε μια πίεση επιτάχυνσης των 15 kV.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Η μεταβολή του τύπου άμμου μεταξύ του κλάσματος D και του E, δεν είχε σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα.

- Κάτω από έναν ορισμένο ρυθμό εισαγωγής διαλύματος τσιμεντοποίησης (0.042 mol/L/h) και για οπτική πυκνότητα (OD_{600}) μεταξύ 0.8 και 1.2, η απόδοση της αντίδρασης παρέμεινε υψηλή και η ποσότητα της καθίζησης δεν επηρεάστηκε από τη συγκέντρωση υγρού μέσου (για συγκεντρώσεις εισόδου έως 1 M). Εντούτοις, το πρότυπο καθίζησης στην κλίμακα των πόρων διαπιστώθηκε ότι επηρεάστηκε από την συγκέντρωση της ένεσης.



Σχήμα 4.18 Απόδοτικότητα αντιδρώντων σε διαφορετικούς ρυθμούς εισαγωγής διαλύματος ουρίας-χλωριούχου ασβεστίου (Al Qabany, 2012).

- Η βακτηριακή δραστηριότητα άρχισε να πέφτει μετά από 16 ημέρες όταν ο ρυθμός εισόδου του διαλύματος ουρίας- $CaCl_2$ ήταν 0.042 mol / L/ h.
- Οι εικόνες SEM που ελήφθησαν από διαφορετικά δείγματα σε διαφορετικά επίπεδα τσιμεντοποίησης έδειξαν ότι για την ίδια ποσότητα $CaCO_3$, η χρήση χαμηλότερων χημικών συγκεντρώσεων διαλύματος ουρίας- $CaCl_2$, είχε ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή του σχηματιζόμενου ασβεστίου, ειδικά σε χαμηλά επίπεδα τσιμεντοποίησης.

(γ) Ο Liang Cheng (2012), σε συνεργασία με τους Cord-Ruwisch και Shahin, ασχολήθηκε με τη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους, με τη χρήση της μεθόδου MICP. Η μελέτη τους περιγράφει μια νέα παραλλαγή της τεχνολογίας ενίσχυσης του εδάφους, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της επιφανειακή διήθησης (surface percolation), για την τοποθέτηση των βακτηρίων και του διαλύματος τσιμεντοποίησης στο ακόρεστο έδαφος.

Αρχικά μελετήθηκε η εφαρμογή μιας βακτηριακής διαδικασίας για την επιτόπου τσιμεντοποίηση της ακόρεστης άμμου. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η μέθοδος της επιφανειακής διήθησης. Για όλα τα πειράματα που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκε καθαρή χαλαζιακή άμμος, με περιεκτικότητες: >0,3mm: 1,13%, 0,212-0,3mm: 63,39%, 0,15-0,212mm: 29,59% και <0,15mm: 5,89%).

Μέθοδος Προετοιμασίας

Αρχικά, απομονώθηκαν τα ενεργά βακτήρια ουρεάσης MCP-11 (*Bacillus sphaericus*, από την DSMZ, Γερμανία) και στη συνέχεια καλλιεργήθηκαν, υπό στείρες κλειστές αερόβιες συνθήκες, σε μέσο εκχυλίσματος ζύμης (20 g / L, 0,17 M θειική αμμωνία και 0,1 mM NiCl₂, σε pH 9,25). Μετά από 24 ώρες επώασης στους 28 °C, η καλλιέργεια συλλέχθηκε και φυλάχθηκε στους 4 °C, πριν από τη χρήση. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούνταν από ισομοριακές συγκεντρώσεις CaCl₂ και ουρίας (1M).

Χρησιμοποιήθηκαν στήλες PVC (εσωτερική διάμετρος 4,5 cm, μήκους 30 cm και 1 m), οι οποίες γεμίστηκαν με ξηρή χαλαζιακή άμμο και συμπιέστηκαν για να αποκτήσουν ομοιόμορφη πυκνότητα 1,61-1,63 g/cm³. Η κορυφή και ο πυθμένας της στήλης καλύφθηκαν με φίλτρα. Οι στήλες άμμου υποβλήθηκαν σε επεξεργασία σε δύο διαφορετικές συνθήκες κορεσμού: (1) Οι πλήρως κορεσμένες στήλες άμμου επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο της βυθιζόμενης ροής (submersed flow), (2) ενώ οι ακόρεστες, με τη μέθοδο της επιφανειακής διήθησης.

Εργαστηριακές Δοκιμές

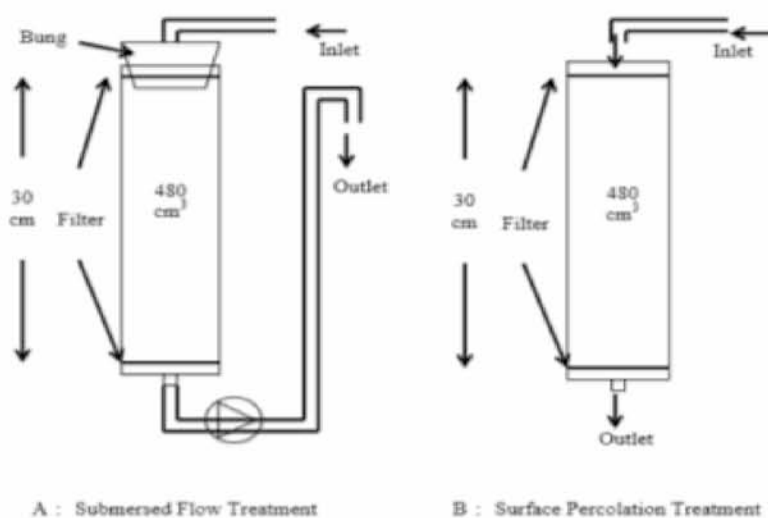
Οι ακόρεστες στήλες άμμου τοποθετήθηκαν κατακόρυφα με την κορυφή και τη βάση πλήρως ανοικτές, για την εισαγωγή των αντιδραστηρίων από την κορυφή τους και τη διήθησή τους μέσω βαρυτικών και τριχοειδών δυνάμεων. Γενικά, η μέθοδος διήθησης αποτελείται από τα ακόλουθα 4 στάδια (Σχήμα 4.19B):

- 1) Διήθηση του βακτηριακού εναιωρήματος (50% της ικανότητας κατακράτησης του νερού των στηλών άμμου): 90 mL για στήλες 30 cm, 180 mL για στήλες 1 m).
- 2) Διήθηση του διαλύματος σταθεροποίησης (ίδιες ποσότητες με αυτές του βακτηριακού εναιωρήματος), το οποίο στο συγκεκριμένο πείραμα είναι το διάλυμα τσιμεντοποίησης.
- 3) Επώαση για 12 ώρες στους 25 ± 1 °C.

4) Διήθηση του διαλύματος τσιμεντοποίησης (100% της ικανότητας κατακράτησης του νερού των στηλών άμμου) και πραγματοποίηση της αντίδρασης σε διάστημα 12 ωρών.

Σημειώνεται ότι η προσθήκη βακτηριακού εναιωρήματος (BS) και διαλύματος σταθεροποίησης (FS) θα μπορούσε να είναι σε περισσότερα από δύο στρώματα, με εναλλασσόμενη έγχυση μικρότερων όγκων.

Η μέθοδος της βυθιζόμενης ροής (Σχήμα 4.19 Α) αναπτύχθηκε από τους Whiffin et al., (2007). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την επαγωγή της μεθόδου MICP στην υπόγεια κορεσμένη εδαφική επιφάνεια με την εφαρμογή ένεσης δύο φάσεων, βακτηριακού εναιωρήματος και διαλύματος τσιμεντοποίησης για τη σταθεροποίηση των βακτηρίων. Με την αύξηση της ιοντικής αντοχής, σε συγκεκριμένη συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου, προωθήθηκε η απορρόφηση των βακτηρίων από τα σωματίδια του εδάφους. Αρχικά, εγχύθηκε στη στήλη άμμου ένα διάλυμα αιωρούμενων βακτηρίων, ακολουθούμενο από την προσθήκη ενός διαλύματος σταθεροποίησης που αποτελούνταν από 50 mM CaCl₂.



Σχήμα 4.19 Σύγκριση των μεθόδων της Α) υποβρύχιας ροής (κορεσμένο έδαφος) και Β) επιφανειακής διήθησης (ακόρεστο έδαφος) (Cheng, 2012).

Για τη μέθοδο της βυθιζόμενης ροής διαμορφώθηκε στήλη άμμου 30 cm, στην οποία εγχύθηκε διάλυμα σταθεροποίησης συγκέντρωσης 50 mM CaCl₂, με ελεγχόμενο ρυθμό ροής 220 mL/h.

Για τη μέθοδο επιφανειακής διήθησης διαμορφώθηκε στήλη άμμου 30 cm, στην οποία δημιουργήθηκαν 4 στρώματα από την εισαγωγή 45 mL BS + 45 mL FS + 45 mL BS + 45

mL FS. Το διάλυμα σταθεροποίησης είχε συγκέντρωση 50 mM CaCl₂. Ο ρυθμός ροής των διαλυμάτων ήταν 220 mL/h. Στη συνέχεια, για τη βελτίωση της συγκράτησης των βακτηρίων στις στήλες άμμου, δημιουργήθηκαν στήλες με πολλαπλά στρώματα βακτηριακού αιωρήματος και διαλύματος τσιμεντοποίησης. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν στήλες με 2, 4, 6 και 12 στρώματα εναλλασσόμενου βακτηριακού αιωρήματος/διαλύματος τσιμεντοποίησης.

Για την αξιολόγηση της μεθόδου διήθησης σε μεγαλύτερη κλίμακα, χρησιμοποιήθηκαν 2 στήλες άμμου 1m, 2 και 6 στρωμάτων. Σε κάθε στήλη εισήχθησαν 2 ενέσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης, έπειτα από 12 ώρες επώασης.

Η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων προσδιορίστηκε προσθέτοντας 2 mL διαλύματος 2 M HCl σε 1-2 g ξηρού δείγματος και στη συνέχεια μετρώντας τον όγκο του αέριου CO₂ με μανόμετρο.

Προκειμένου να μετρηθεί η τοπική αντοχή (Al-Thawadi, 2008), οι στήλες άμμου κόπηκαν σε τμήματα των 3 cm και προσδιορίστηκε η αντοχή τους με τη χρήση ενός πενετρομέτρου (rocket). Η τοπική αντοχή προσδιορίστηκε από τον ακόλουθο τύπο:

$$P = W * g / S$$

Όπου 'P' η τοπική αντοχή (N/cm²), 'W' η ένδειξη του πενετρομέτρου (kg), 'g' η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²) και 'S' το εμβαδόν (cm²).

Για τον προσδιορισμό ολόκληρης της αντοχής της στήλης, η στήλη κόπηκε σε τμήματα των 9 cm και η θλιπτική αντοχή (q) προσδιορίστηκε με δοκιμές UCS ενός σταδίου (Australian Standard 1012.9-1999).

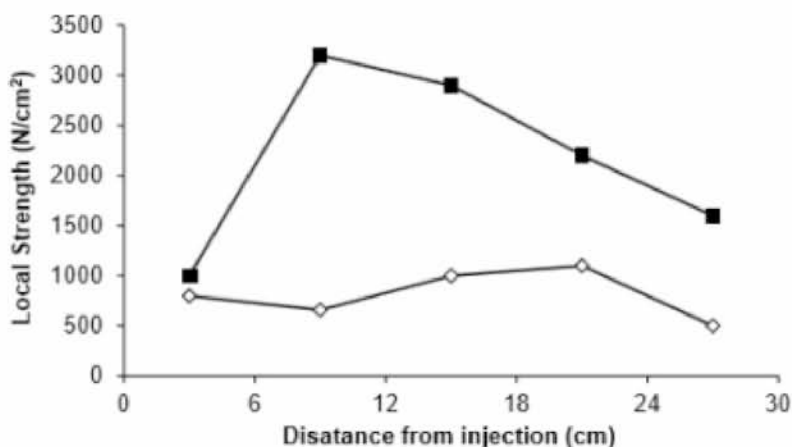
Τα τσιμεντοποιημένα δείγματα, που ελήφθησαν από διάφορα τμήματα της στήλης άμμου του 1m, εξετάστηκαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (PHILIPS XL20).

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

Για τις στήλες των 30cm:

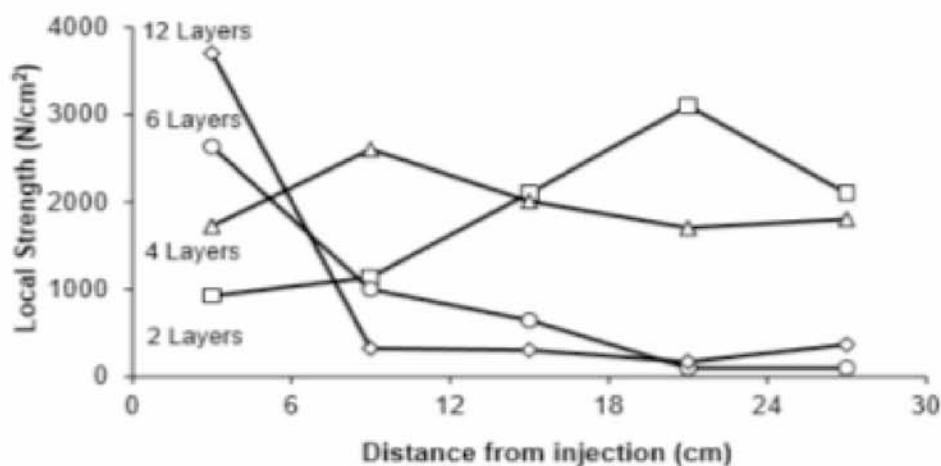
- Από την ανάλυση της τοπικής αντοχής, προέκυψε ότι η αντοχή της στήλης στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της επιφανειακής διήθησης, ήταν σημαντικά

κατώτερη από την αντοχή που προέκυψε από την μέθοδο της βυθιζόμενης ροής (Σχήμα 4.20). Το γεγονός ότι προέκυψε μικρότερη αντοχή στη μέθοδο διήθησης έδειξε ότι η αντίδραση σχηματισμού CaCO_3 δεν ολοκληρώθηκε. Αυτό ήταν εμφανές στη μέθοδο διήθησης, από το μικρότερο ποσοστό μετατροπής της ουρίας (λιγότερο ακινητοποιημένα βακτήρια).



Σχήμα 4.20 Σχέση τοπικής αντοχής- απόσταση από το σημείο έγχυσης, για τις τσιμεντοποιημένες στήλες που προέκυψαν από τη μέθοδο: βυθιζόμενης ροής (■) και επιφανειακής διήθησης (◇), (Cheng, 2012).

- Η βελτίωση της βακτηριακής συγκράτησης, στη μέθοδο της επιφανειακής διήθησης, επιτεύχθηκε με χρήση πολλαπλών στρωμάτων βακτηριακού αιωρήματος/διαλύματος τσιμεντοποίησης. Ωστόσο, η ολική μετατροπή της ουρίας δε βελτιώθηκε στα λεπτότερα στρώματα (6, 12 στρώματα), λόγω του σχηματισμού κρούστας στην κορυφή της στήλης, η οποία οφειλόταν σε συσσώρευση βακτηριακών κυττάρων κοντά στο σημείο έγχυσης.
- Οι στήλες με τα περισσότερα στρώματα (6, 12 στρώματα) ανέπτυξαν μεγαλύτερη τοπική αντοχή κοντά στο σημείο έγχυσης, σε αντίθεση με τις στήλες λιγότερων στρωμάτων (2, 4 στρώματα), στις οποίες η αντοχή ήταν ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της στήλης. Η χρήση λιγότερων από 4 στρώσεων οδήγησε σε περισσότερη αντοχή στο κάτω στρώμα (Σχήμα 4.21).

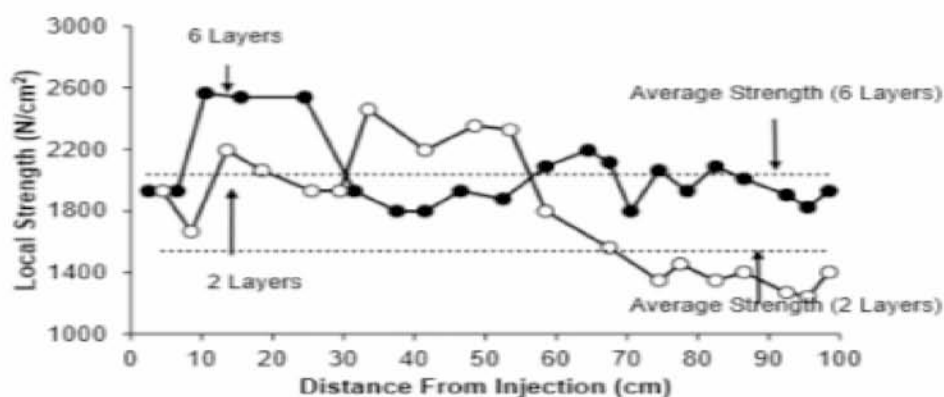


Σχήμα 4.21 Η επίδραση του αριθμού των στρωμάτων των διαλυμάτων βακτηρίων τσιμεντοποίησης στην αντοχή κατά μήκος των στηλών (Cheng, 2012).

- Οι δοκιμές UCS έδειξαν ότι η αντοχή των στηλών άμμου, που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με τη μέθοδο της επιφανειακής διήθησης, ήταν παρόμοια με αυτή των στηλών που επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο της βυθιζόμενης ροής. Εφόσον και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιες ποσότητες διαλυμάτων βακτηρίων και τσιμεντοποίησης, συνιστάται η χρήση της μεθόδου επιφανειακής διήθησης, για την ενίσχυση της αντοχής του εδάφους, λόγω της απλότητάς της.

Για τις στήλες 1m:

- Η στήλη 6 στρωμάτων είχε υψηλότερη μέση και πιο ομοιόμορφα κατανομημένη αντοχή σε όλο το μήκος της, συγκριτικά με τη στήλη 2 στρωμάτων (Σχήμα 4.22). Αυτό οφειλόταν στην υψηλότερη συγκράτηση των βακτηρίων και στη μεγαλύτερη ποσότητα υδρολύμενης ουρίας της στήλης των 6 στρωμάτων.



Σχήμα 4.22 Η τοπική αντοχή συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έγχυσης, στις στήλες άμμου 1m, με τη χρήση της μεθόδου επιφανειακής διήθησης (Cheng, 2012).

- Σε αντίθεση με τη μέθοδο της βυθιζόμενης ροής, η επιφανειακή διήθηση (στήλεις 1m) είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλότερης τοπικής αντοχής και δεν έδειξε καμία συσχέτιση μεταξύ της αντοχής και της ποσότητας του παραγόμενου CaCO_3 .
- Οι εικόνες SEM των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, που ελήφθησαν από την κορυφή και τον πυθμένα της διηθημένης στήλης, έδειξαν ότι οι κρύσταλλοι που σχηματίστηκαν στα κενά των κόκκων άμμου κυριαρχούσαν στο πάνω μέρος της στήλης. Περισσότερο από το 80% των συνολικών κρυστάλλων δημιουργήθηκαν στα κενά και λειτούργησαν ως γέφυρες για να δεσμεύσουν τους κόκκους άμμου. Αντίθετα, στον πυθμένα της στήλης δημιουργήθηκαν λιγότερο από το 10% των κρυστάλλων στις επαφές, αλλά υπήρχε μεγαλύτερος αριθμός συνολικών κρυστάλλων.

Γενικά συμπεράσματα:

- Στα δείγματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό, παρατηρήθηκε περίπου 3 φορές υψηλότερη τοπική αντοχή ανά μάζα σχηματιζόμενου ασβεστίου, σε σχέση με τα δείγματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό. Αυτό δείχνει ότι το κόστος ανά δύναμη μπορεί να μειωθεί έως και 3 φορές με τη χρήση της μεθόδου επιφανειακής διήθησης, σε σύγκριση με τη μέθοδο βυθιζόμενης ροής.
- Η μέθοδος επιφανειακής διήθησης εφαρμόστηκε με επιτυχία στη τσιμεντοποίηση ακόρεστων στηλών άμμου μήκους 1 m. Τα βακτήρια ακινητοποιήθηκαν κατά μήκος της στήλης (1m) σε υψηλό ρυθμό διήθησης και με την εφαρμογή πολλαπλών εναλλασσόμενων στρωμάτων βακτηριακού αιωρήματος και διαλύματος σταθεροποίησης, ακολουθούμενα από επώαση. Η βελτίωση της αντοχής της στήλης άμμου έφτασε σε ένα λογικό βαθμό ομοιογένειας χωρίς σχηματισμό κρούστας στην επιφάνεια.

Στο επόμενο κεφάλαιο της διατριβής πραγματοποιήθηκε μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων για την αξιολόγηση της μεθόδου MICP, για διάφορους βαθμούς κορεσμού. Για την τρέχουσα μελέτη, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι καθαρής χαλαζιακής άμμου, μια λεπτόκοκκη και μια χονδρόκοκκη. Και οι δύο άμμοι χαρακτηρίστηκαν ως κακώς διαβαθμισμένες, σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης USCS (ASTM 2006).

Μέθοδος Προετοιμασίας

Στα τρέχοντα πειράματα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία ανάπτυξης της βακτηριακής καλλιέργεια με εκείνη του προηγούμενου πειράματος. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούνταν από 1 mol / L ουρίας και 1 mol / L CaCl₂. Οι 2 άμμοι πυριτίας, συσκευάστηκαν σε στήλες PVC. Στη συνέχεια, εγχύθηκαν διάφορες ποσότητες ύδατος, από την κορυφή, προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός κορεσμού. Εκτός εάν δηλώνεται διαφορετικά, η προετοιμασία του δείγματος αποτελείται από τα ακόλουθα τρία στάδια:

1. Εναλλασσόμενη έγχυση ίσων όγκων βακτηριακού αιωρήματος και διαλύματος τσιμεντοποίησης με ρυθμό εισροής περίπου 1 L / h. Μια αντλία συνδέθηκε στον πυθμένα της στήλης PVC για την απομάκρυνση της περίσσειας του διαλύματος.
2. Ωρίμανση για 12 ώρες στους 25±1°C, για να επιτραπεί η ολοκλήρωση της διαδικασίας της βακτηριακής σταθεροποίησης.
3. Διήθηση του διαλύματος τσιμεντοποίησης με τον ίδιο ρυθμό ροής, που ακολουθείται από άλλη περίοδο σκλήρυνσης 12 ωρών στους 25±1°C. Αυτό το βήμα πραγματοποιήθηκε δύο φορές.

Πριν από τη διεξαγωγή της μικροσκοπικής έρευνας (SEM), όλα τα δείγματα πλύθηκαν με νερό βρύσης και ξηράθηκαν στους 60 °C για 24 ώρες. Για τις δοκιμές UCS διαμορφώθηκαν δοκίμια διαμέτρου 55 mm (αναλογία διαμέτρου: ύψους 1: 1,5 - 1: 2). Πριν από τη διεξαγωγή των δοκιμών, τα δείγματα άμμου υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με τη μέθοδο MICP, κάτω από 20%, 40%, 80% και 100% βαθμούς κορεσμού. Πριν από τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών και των δοκιμών διαπερατότητας, τα τσιμεντοποιημένα δείγματα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία σε διαφορετικούς βαθμούς κορεσμού 30%, 65% και 100%. Επίσης, για κάθε δοκιμή, διαμορφώθηκαν εκτός από τα επεξεργασμένα, και από ένα μη επεξεργασμένο δείγμα, ενώ για τη δοκιμή διαπερατότητας δημιουργήθηκαν και δείγματα με τσιμέντο Portland.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών διαπερατότητας, UCS, της τριαξονικής δοκιμής CU καθώς και ανάλυση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (PHILIPS XL20). Για τη μέθοδο UCS, το αξονικό

φορτίο εφαρμόστηκε με σταθερό ρυθμό 1 mm/min. Πραγματοποιήθηκε τριαξονική δοκιμή CU, με μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βιο-συγκολλημένης άμμου. Κάθε τριαξονική δοκιμή ξεκίνησε με κορεσμό των δειγμάτων μέχρι να επιτευχθεί τιμή της πίεσης του νερού των πόρων κατά Skempton τουλάχιστον 95%. Τα δείγματα στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε πιέσεις 50, 100 και 200 kPa και εφαρμόστηκε αξονική τάση με ρυθμό 1 mm/min. Ο προσδιορισμός της διαπερατότητας των επεξεργασμένων και μη, δειγμάτων άμμου διεξήχθη χρησιμοποιώντας δοκιμή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου. Για να συγκριθεί η διαπερατότητα του τσιμεντοποιημένου εδάφους με τη συμβατική βελτίωση εδάφους, παρασκευάστηκε μια σειρά μιγμάτων λεπτής άμμου με διάφορες αναλογίες τσιμέντου Portland. Οι λεπτομέρειες των δειγμάτων τσιμέντου Portland παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

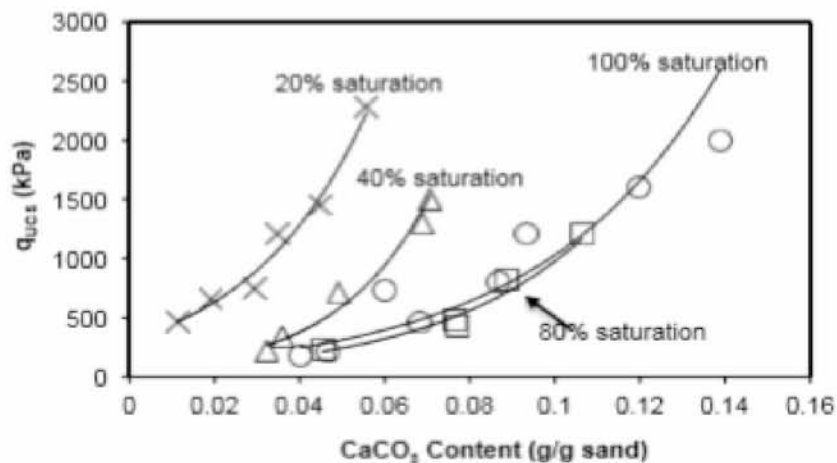
Πίνακας 4.1 Αναμιγμένες αναλογίες των δειγμάτων τσιμέντου Portland (Cheng, 2012).

Mix ID	Cement (g)	Sand (g)	Water (mL)	Density (g/cm ³)
1	40	580	124	1.93±0.01
2	56	580	124	1.93±0.01
3	72	580	124	1.93±0.01
4	84	580	124	1.93±0.01

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

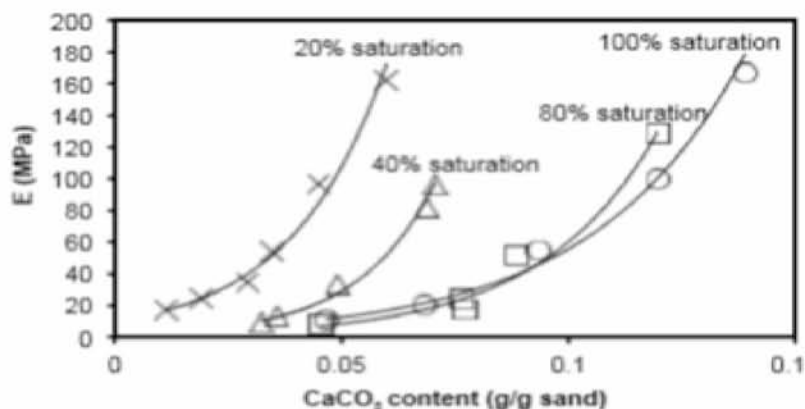
Για τις χονδρόκοκκες άμμους:

- Από τις δοκιμές UCS, προέκυψε από τα τσιμεντοποιημένα δείγματα, με διαφορετικούς βαθμούς κορεσμού και παρόμοιες περιεκτικότητες CaCO₃, ότι εκείνα με το χαμηλότερο βαθμό κορεσμού, παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή (Σχήμα 4.23). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους της διαδικασίας.



Σχήμα 4.23 Σχέση UCS- περιεκτικότητας CaCO₃ σε διαφορετικούς βαθμούς κορεσμού, για τη χονδρόκοκκη άμμο (Cheng, 2012).

- Η δυσκαμψία αυξήθηκε εκθετικά, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO₃, αλλά ήταν ανεξάρτητη από το βαθμό κορεσμού (Σχήμα 4.24). Για παρόμοια ποσότητα CaCO₃, η δυσκαμψία των συγκολλημένων δειγμάτων, σε χαμηλότερο βαθμό κορεσμού, ήταν υψηλότερη από εκείνη των δειγμάτων που είχαν υποστεί επεξεργασία, με υψηλότερο βαθμό κορεσμού.



Σχήμα 4.24 Σχέση δυσκαμψίας-περιεκτικότητας CaCO₃ σε διαφορετικές συνθήκες κορεσμού, για τη χονδρόκοκκη άμμο (Cheng, 2012).

- Οι αναλύσεις SEM έδειξαν ότι οι κρύσταλλοι ασβεστίου που διαμορφώθηκαν κάτω από χαμηλότερο βαθμό κορεσμού, σχηματίστηκαν περισσότερο στα σημεία επαφής, ενώ σχηματίστηκε περίσσεια κρυστάλλων κάτω από υψηλότερες συνθήκες κορεσμού. Αποδείχθηκε ότι η ανάπτυξη της αντοχής οφείλεται κυρίως στο σχηματισμό κρυστάλλων στα σημεία επαφής μεταξύ των σωματιδίων και όχι στη συνολική ποσότητα των σχηματιζόμενων κρυστάλλων CaCO₃.
- Η αντοχή βελτιώθηκε με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων (λεπτόκοκκη άμμος).

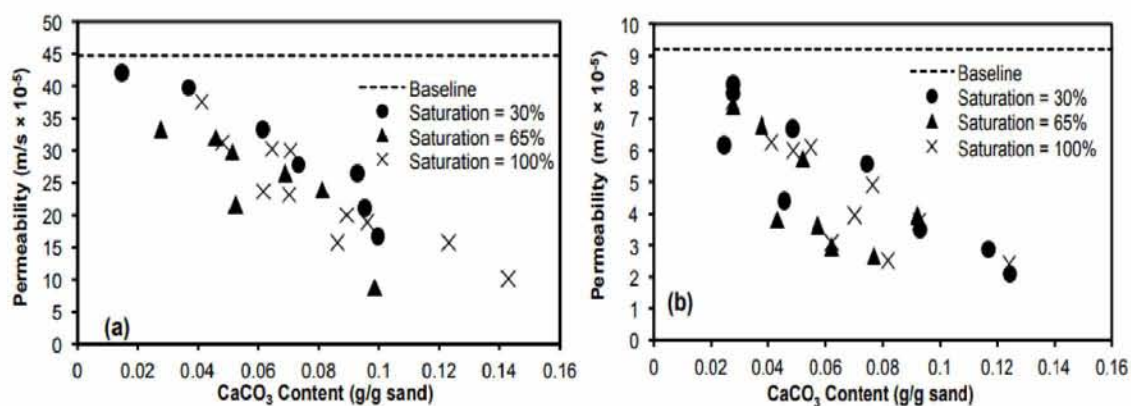
- Οι τριαξονικές δοκιμές έδειξαν ότι, για τη χονδρόκοκκη άμμο, τόσο η συνοχή, όσο και η γωνία τριβής, αυξήθηκαν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO_3 , σε όλους τους βαθμούς κορεσμού. Σε μια σταθερή ποσότητα CaCO_3 και σε χαμηλό βαθμό κορεσμού, αυξήθηκαν οι τιμές συνοχής και γωνίας τριβής, σε σύγκριση με τους υψηλότερους βαθμούς κορεσμού. Η βέλτιστη συνθήκη συνοχής και γωνίας τριβής παρατηρήθηκε για βαθμό κορεσμού 30%.

Για τις λεπτόκοκκες άμμους:

- Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών στη λεπτόκοκκη άμμο ήταν παρόμοια με εκείνα της χονδρόκοκκης. Ωστόσο, τα λεπτόκοκκα δείγματα άμμου εμφάνιζαν υψηλότερη συνοχή, αλλά χαμηλότερη γωνία τριβής από τα δείγματα χονδρόκοκκης άμμου, κάτω από την ίδια κατάσταση κορεσμού και με παρόμοια περιεκτικότητα σε CaCO_3 .

Γενικά συμπεράσματα:

- Η διαπερατότητα μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO_3 τόσο για τις λεπτόκοκκες όσο και για τις χονδρόκοκκες άμμους, ανεξαρτήτως του βαθμού κορεσμού (Σχήμα 4.25).

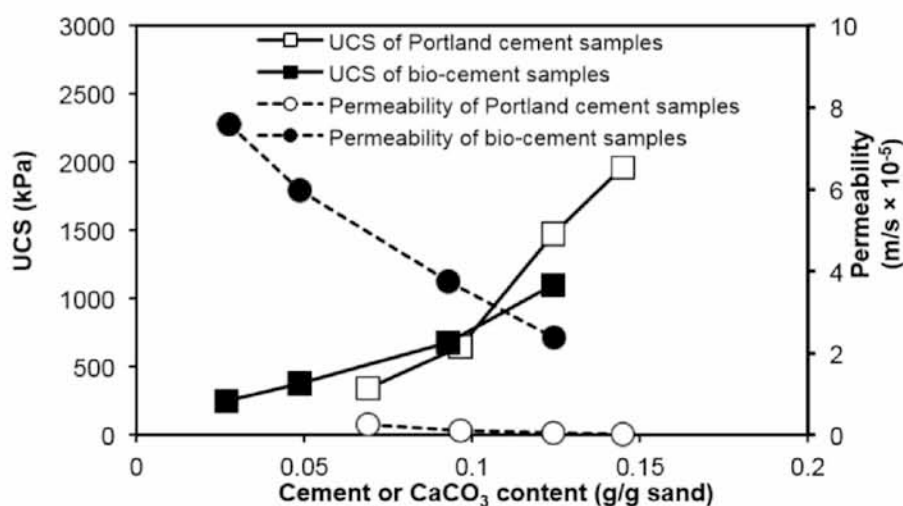


Σχήμα 4.25 Διάγραμμα διαπερατότητας-περιεχόμενου CaCO_3 για (a) χονδρόκοκκες και (b) λεπτόκοκκες άμμους (Cheng 2012).

- Τα αποτελέσματα (Σχήμα 4.26) της σύγκρισης μεταξύ των βιο-επεξεργασμένων δειγμάτων άμμου και των επεξεργασμένων με τσιμέντο Portland δειγμάτων, έδειξαν ότι τα βιο-επεξεργασμένα δείγματα έχουν υψηλότερη αντοχή σε σύγκριση με τα δείγματα

τσιμέντου Portland, για χαμηλή περιεκτικότητα τσιμέντου (<0.1 g/g άμμου), μετά από 7 ημέρες θεραπείας. Ωστόσο, αυτή η σύγκριση διέφερε ανάλογα με το χρόνο ωρίμανσης των δειγμάτων τσιμέντου Portland.

Η διαπερατότητα των βιο-επεξεργασμένων δειγμάτων ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των δειγμάτων, τα οποία περιείχαν τσιμέντο Portland. Ωστόσο, η διαπερατότητα των βιο-επεξεργασμένων δειγμάτων μειωνόταν με ταχύτερο ρυθμό με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO_3 .



Σχήμα 4.26 Τριπλό διάγραμμα της UCS και της διαπερατότητας των βιο-επεξεργασμένων δειγμάτων άμμου και των δειγμάτων με τσιμέντο Portland (κορεσμός 100%) συναρτήσει του περιεχομένου σε CaCO_3 και τσιμέντο αντίστοιχα (Cheng, 2012).

Γενικά, η μεγάλη μείωση της διαπερατότητας διαταράσσει τις φυσικές διαδρομές ροής των υπόγειων υδάτων, επιτρέπει την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων στο έδαφος, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο αστοχίας τόσο στο έδαφος όσο και στις θεμελιώσεις. Η ικανότητα της μεθόδου MICP να διατηρεί συνθήκες υψηλής διαπερατότητας είναι ένα σαφές πλεονέκτημα σε σύγκριση με την εναλλακτική λύση της χρήσης τσιμέντου Portland.

Στο επόμενο κεφάλαιο της διατριβής, ο Cheng πραγματοποίησε σε χονδρόκοκκη και λεπτόκοκκη ξηρή χαλαζιακή άμμο, δοκιμές επιφανειακής διήθησης και ανέπτυξε ένα απλό μαθηματικό μοντέλο. Επίσης, εκτέλεσε δοκιμές με στόχο τη 3D τσιμεντοποίηση σε ακατέργαστο αμμώδες έδαφος.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία καλλιέργειας των βακτηρίων με τα προηγούμενα πειράματα. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούνταν, όπως και προηγουμένως, από ισομοριακή ποσότητα ουρίας και CaCl_2 (1M). Οι λεπτόκοκκες και χονδρόκοκκες χαλαζιακές άμμοι, συσκευάστηκαν σε 4 στήλες PVC και τοποθετήθηκαν φίλτρα στο άνω και κάτω μέρος. Υπό την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων, η περίσσεια του υγρού αποστραγγίστηκε από τον πυθμένα. Ένα κυλινδρικό δοχείο γεμίστηκε με δύο στρώματα εδάφους. Το κάτω στρώμα (πάχους 300 mm) αποτελούνταν από ακατέργαστο αμμώδες έδαφος και το άνω στρώμα (πάχους 200 mm) από καθαρή λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμο. Η πυκνότητα του λεπτού στρώματος άμμου ήταν $1,60 \text{ g/cm}^3$, με πορώδες περίπου 40,8%.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Για τις στήλες PVC:

Στις λεπτόκοκκες στήλες άμμου εισήχθησαν 6 ή 12 εναλλασσόμενες στρώσεις βακτηριακού εναιωρήματος και διαλύματος τσιμεντοποίησης, ακολουθούμενες από 24 ώρες επώασης σε θερμοκρασία δωματίου ($25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Στη συνέχεια, οι στήλες άμμου εκπλύθηκαν με διάλυμα τσιμεντοποίησης, ακολουθούμενο από περίοδο αντίδρασης 24 ωρών σε θερμοκρασία δωματίου. Χρησιμοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες εφαρμογές του διαλύματος τσιμεντοποίησης, για να επιτευχθεί βελτίωση στην αντοχή. Για τη χονδρόκοκκη στήλη άμμου, εισήχθησαν 6 στρώσεις εναλλασσόμενου βακτηριακού εναιωρήματος και διαλύματος τσιμεντοποίησης. Μετά την αποσυναρμολόγηση των στηλών, οι τσιμεντοποιημένες στήλες άμμου κόπηκαν σε μικρότερα τμήματα με στόχο τη διεξαγωγή δοκιμών UCS με σταθερό ρυθμό φόρτισης $1,0 \text{ mm/min}$.

Για το κυλινδρικό δοχείο:

Σε μια προσπάθεια να διοχετευθούν τα διαλύματα που παρασκευάστηκαν μέσω της διαδικασίας MICP, σε όλο το ύψος του κυλινδρικού δοχείου, ανοίχθηκε ένας ρηχός

νερόλακκος (διαμέτρου 35 cm και βάθους 2,5 cm) πάνω από το στρώμα της λεπτόκοκκης χαλαζιακής άμμου. Εγχύθηκαν αρχικά, 3L βακτηριακού αιωρήματος και στη συνέχεια 6L διαλύματος τσιμεντοποίησης στο έδαφος, τα οποία επώασθηκαν για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης εγχυόταν κάθε 24 ώρες. Προκειμένου να διατηρηθεί επαρκής δραστηριότητα ουρεάσης, προστέθηκε επιπλέον βακτηριακό εναιώρημα (3L) την 3η, 5η, 8η, 11η και 14η ημέρα. Το συνολικό εγχυμένο βακτηριακό εναιώρημα και το διάλυμα τσιμεντοποίησης ήταν 18 και 96 L, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το δοχείο καλύφθηκε με πλαστικό κάλυμμα για τη μείωση της εξάτμισης. Μετά την αποσυναρμολόγηση του κυλινδρικού δοχείου, το τσιμεντοποιημένο δείγμα άμμου κόπηκε κατά μήκος του μεσαίου κατακόρυφου επιπέδου. Μετρήθηκε η τοπική αντοχή της μεσαίας διατομής του δείγματος με τη χρήση της σφύρας Schmidt (Σχήμα 4.27).



Σχήμα 4.27 Τοποθέτηση της σφύρας Schmidt για την εύρεση της τοπικής αντοχής της μεσαίας διατομής από την τσιμεντοποιημένη άμμο (Cheng, 2012).

Η κατακόρυφη επιφάνεια της διατομής διαιρέθηκε σε πλέγματα μήκους 25 mm και πλάτους 20 mm. Σε κάθε επιφάνεια πλέγματος οι μετρήσεις διεξήχθησαν τουλάχιστον 4 φορές σε διαφορετικά σημεία για να αποκτήσουν μια μέση τιμή.

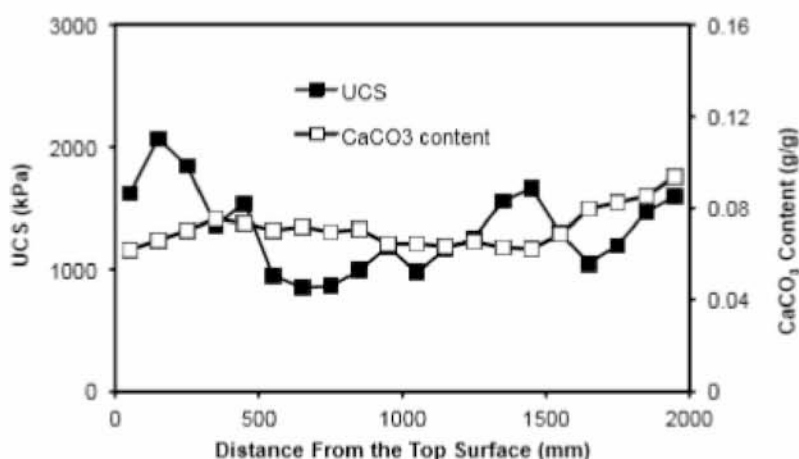
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

Για τις στήλες PVC:

- Για τους διάφορους κύκλους θεραπείας, η λεπτόκοκκη στήλη άμμου που αποτελούνταν από 6 εναλλασσόμενες στρώσεις βακτηριακού αιωρήματος και διαλύματος τσιμεντοποίησης, οδήγησε σε μεγαλύτερο βάθος τσιμεντοποίησης, συγκριτικά με τη στήλη των 12 στρωμάτων.

- Στις λεπτόκοκκες στήλες άμμου αυξήθηκε ο κίνδυνος τοπικής τσιμεντοποίησης με τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων θεραπειών.
- Από τις δοκιμές UCS στη χονδρόκοκκη άμμο, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της αντοχής (Σχήμα 4.28), μεγαλύτερη από 1000 kPa, στο κάτω μέρος της στήλης. Αυτό έδειξε ότι η ποσότητα των αντιδραστηρίων (ουρία/CaCl₂) μεταφέρθηκε σε μεγάλος βάθιά (2 m).

Η περιεκτικότητα σε CaCO₃ στη στήλη χονδρόκοκκης άμμου ήταν σχετικά σταθερή στην κορυφή (έως 1500 mm) και στη συνέχεια αυξήθηκε βαθμιαία με το βάθος. Αυτό υποδεικνύει ότι η τοπική απόφραξη αποφεύχθηκε στην περίπτωση της χονδρόκοκκης άμμου.

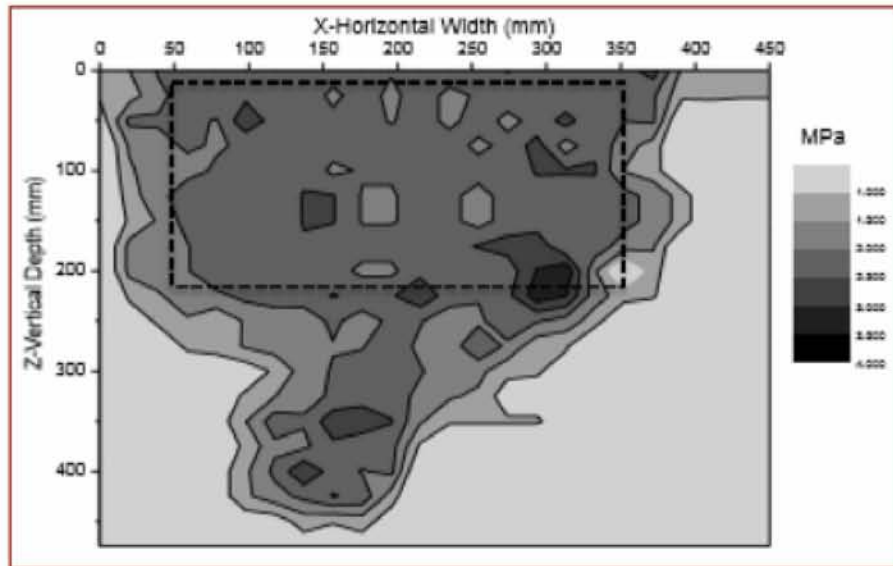


Σχήμα 4.28 Μηχανικές ιδιότητες της τσιμεντοποιημένης χονδρόκοκκης στήλης άμμου 2 m, μετά από 22 κύκλους θεραπείας (Cheng, 2012).

Για το κυλινδρικό δοχείο:

- Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας, το δοχείο, όγκου 80 dm³, ανοίχθηκε και παρατηρήθηκε ότι το ανώτερο στρώμα (της λεπτόκοκκης άμμου πυριτίας) τσιμεντοποιήθηκε επιτυχώς. Περαιτέρω ανασκαφή έδειξε ότι το τσιμεντοποιημένο σώμα άμμου, περίπου 70 dm³, έγινε σαφώς ορατό και έφτασε σε βάθος περίπου 40 cm.
- Οι δοκιμές σφύρας Schmidt έδειξαν ότι το τσιμεντοποιημένο σώμα άμμου είχε σημαντική διακύμανση αντοχής από 0 MPa έως 4 MPa. Κάτω από την επιφάνεια του νερόλακκου, επιτεύχθηκε μια σχετικά ομοιογενής τσιμεντοποίηση του στρώματος της

πυριτικής άμμου. Περίπου το 80% της τσιμεντοποιημένης άμμου είχε αντοχή 2- 2,5 MPa (Σχήμα 4.29). Κάτω από το στρώμα της χαλαζιακής άμμου, το αμμώδες έδαφος ήταν επίσης τσιμεντοποιημένο.



Σχήμα 4.29 Η μετρούμενη τοπική αντοχή κατά μήκος του μεσαίου κατακόρυφου επιπέδου του τσιμεντοποιημένου σώματος άμμου (Cheng, 2012).

Μετά την πραγματοποίηση των πειραμάτων, ο Cheng ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο υποθέτοντας ότι: 1) η δραστικότητα ουρεάσης κατανέμεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη τη στήλη άμμου, 2) το διάλυμα τσιμεντοποίησης εγχύθηκε από την κορυφή της στήλης άμμου και 3) η προς τα κάτω διήθηση του διαλύματος τσιμεντοποίησης έχει μικρή διασπορά μέσω της στήλης. Το μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε μπορούσε να υπολογίσει, από το ρυθμό διήθησης της ουρίας και τον ρυθμό υδρόλυσής της, την ποσότητα / συγκέντρωση της ουρίας που δεν αντέδρασε. Η στήλη άμμου θεωρήθηκε πλήρως κορεσμένη.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ήταν:

$L = 200$ cm: το μήκος της στήλης άμμου

$N = 100$: ο αριθμός των στρωμάτων της στήλης

$L/N = 2$ cm: το πάχος των στηλών

Η διάμετρος της στήλης ήταν 5,5 cm και η περιεκτικότητα των κενών των πόρων ήταν 39%.

Ο όγκος κάθε στρώματος ήταν $47,52 \text{ cm}^3$ και ο όγκος των κενών των πόρων κάθε

στρώματος ήταν $18,53 \text{ cm}^3$. Το αρχικό διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούνταν από ισομοριακή ποσότητα 1000mM ουρίας-CaCl₂.

Η περιεκτικότητα σε CaCO₃, κάθε στρώματος, υπολογίστηκε από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_N = \frac{W_{N-total}}{W_{N-sand}} = \frac{W_{N-total}}{\rho * V_{N-sand}}$$

Όπου ο αριθμητής είναι το βάρος των κρυστάλλων κάθε στρώσης και ο παρονομαστής το βάρος κάθε στρώσης.

Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου

- Η προβλεπόμενη κατανομή CaCO₃ ήταν πιο ομοιογενής σε μικρότερη δραστικότητα ουρέασης στο έδαφος. Η παρατηρούμενη έλλειψη τσιμεντοποίησης στα βαθύτερα στρώματα των λεπτόκοκκων άμμων θα μπορούσε να μετριαστεί με την τοποθέτηση λιγότερων ενεργών βακτηρίων ουρέασης στο έδαφος.
- Για την ίδια δραστικότητα ουρέασης, παρατηρήθηκε πιο ομοιόμορφη κατανομή του CaCO₃, σε υψηλότερους ρυθμούς διήθησης.
- Η αύξηση του αριθμού των θεραπειών είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του περιεχομένου CaCO₃ κοντά στην επιφάνεια της στήλης. Ωστόσο, το CaCO₃ μειωνόταν με μεγάλο ρυθμό με την αύξηση του βάθους.

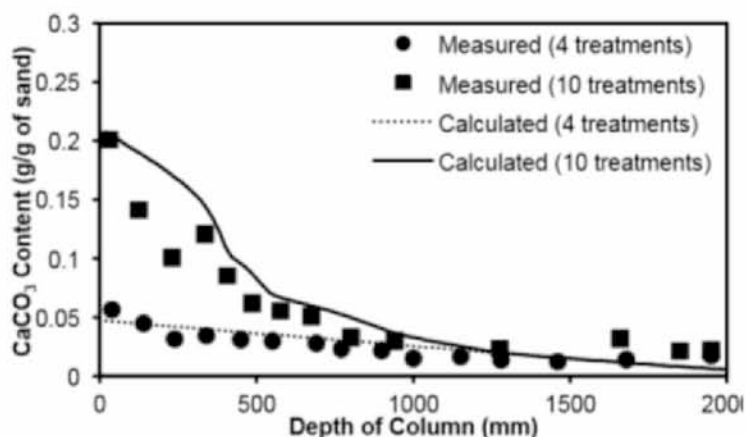
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και του μαθηματικού μοντέλου, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μείωση του ποσοστού διήθησης (προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα) είναι συνάρτηση του αριθμού των θεραπειών. Για τη στήλη λεπτόκοκκης άμμου, με 12 στρώματα, η συσχέτιση περιγράφεται με την ακόλουθη εξίσωση :

$$y = 50.367 \times e^{-0.284x}, \quad R^2 = 0.99691$$

Στην εξίσωση αυτή, το y είναι ο ρυθμός διήθησης και το x είναι ο αριθμός της θεραπείας. Από το μαθηματικό μοντέλο και τα πειράματα προέκυψε ίσος συνολικός όγκος έγχυσης.

- Σε μεγάλο βαθμό, τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης είναι σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 4.30). Συνεπώς, το μαθηματικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την πρόβλεψη της ποσότητας του σχηματιζόμενου CaCO_3 , για δεδομένες τιμές του ρυθμού διήθησης και της δραστηκότητας ουρεάσης.



Σχήμα 4.30 Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου (Cheng, 2012).

- Το μαθηματικό μοντέλο διέφερε από τις πειραματικές δοκιμές ως προς την υπολογισθείσα περιεκτικότητα σε CaCO_3 στο κάτω στρώμα, η οποία ήταν περίπου τριπλάσια στο μαθηματικό μοντέλο. Η διαφορά αυτή οφειλόταν στην υπόθεση που έγινε ότι το διάλυμα τσιμεντοποίησης κατανεμήθηκε ομοιογενώς σε ολόκληρη τη στήλη, το οποίο είναι αντίθετο με την πραγματικότητα.
- Τόσο το μαθηματικό μοντέλο όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η τεχνολογία της επιφανειακής διήθησης είναι πιο εφαρμόσιμη στα χονδρόκοκκα εδάφη.

(δ) Οι Al Qabany και Soga (2013), δημοσίευσαν στο περιοδικό *Geotechnique* άρθρο με τίτλο: ‘Session 2. Bio-chemo-mechanical aspects in geomechanics’, το οποίο αναφέρεται στην επίδραση του χημικού διαλύματος της μεθόδου MICP, στις μηχανικές ιδιότητες των τσιμεντοποιημένων εδαφών. Για τα πειράματά τους, χρησιμοποίησαν χαλαζιακή άμμο, η οποία σύμφωνα με τον Βρετανικό Κανονισμό κατάταξης εδαφών, κατατάσσεται στην κατηγορία D.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Συνολικά, διαμορφώθηκαν 90 δείγματα τεχνητά τσιμεντοποιημένης άμμου, με διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης. Το βακτήριο *Sporosarcina pasteurii* χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές. Τα βακτήρια συλλέχθηκαν και αναπτύχθηκαν σε υγρό μέσο εκχυλίσματος ζυμομυκήτων αμμωνίου και στη συνέχεια εισήχθησαν στα δείγματα, είτε κατά την διάρκεια της διαμόρφωσής τους, είτε κατά την αρχική ένεση. Οι χημικές ενέσεις που χρησιμοποιήθηκαν, περιείχαν ισομοριακή ποσότητα χλωριούχου ασβεστίου και ουρίας, 3 gr θρεπτικού ζωμού, 10 gr χλωριούχο αμμώνιο και 2,12 gr όξινο ανθρακικό νάτριο ανά λίτρο απιονισμένου νερού. Χρησιμοποιήθηκαν συγκεντρώσεις 0.25, 0.5, 1 M διαλύματος τσιμεντοποίησης σε δοκιμές διαπερατότητας και συγκέντρωση 0,1 M για τις δοκιμές αντοχής.

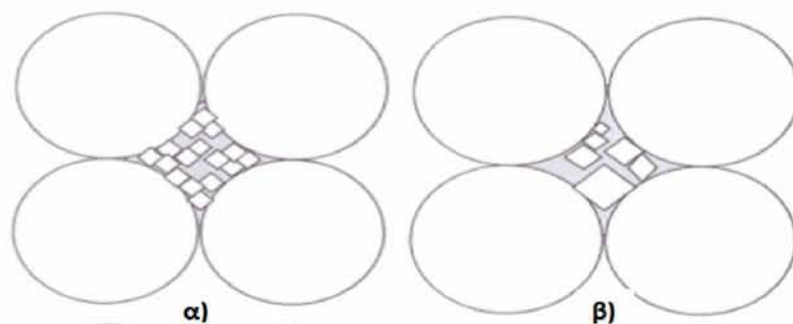
Εργαστηριακές Δοκιμές

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, δοκιμές διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου και αναλύσεις XRD. Τα δείγματα στις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, φορτίστηκαν με ρυθμό 1.14 mm/min. Στις δοκιμές διαπερατότητας εφαρμόστηκε πίεση 20 kPa.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης προέκυψε ότι αν και η αντοχή των δειγμάτων αυξήθηκε, το μέγεθος αυτής της αύξησης ήταν ανάλογο με τη συγκέντρωση του διαλύματος ουρίας-CaCl₂. Σε διάλυμα χαμηλής συγκέντρωσης απαιτούνταν περισσότερος όγκος έγχυσης σε σύγκριση με το διάλυμα υψηλότερης χημικής συγκέντρωσης, η οποία μπορούσε να αυξήσει το κόστος λειτουργίας.
- Τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας, έδειξαν ότι η χρήση διαλύματος υψηλής συγκέντρωσης CaCl₂-ουρίας είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία πτώση της διαπερατότητας από το αρχικό στάδιο της καθίζησης του ασβεστίου, ενώ η χρήση ενός διαλύματος χαμηλής συγκέντρωσης είχε ως αποτέλεσμα πιο σταδιακή και ομοιόμορφη μείωση της διαπερατότητας.

- Η χημική αποτελεσματικότητα (ορίζεται ως το ποσοστό της ουρίας και του CaCl_2 που καθιζάνει ως ανθρακικό ασβέστιο), κυμαινόταν από 70% έως 100% για όλα τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με διαλύματα τσιμεντοποίησης σε συγκεντρώσεις 0.25 και 0.5 M. Αντίθετα, η χρήση χημικής συγκέντρωσης 1M είχε ως αποτέλεσμα την καθίζηση μίας λιγότερο σταθερής μορφής ανθρακικού ασβεστίου, του βατερίτη (Σχήμα 4.31).



Σχήμα 4.31 Σχηματικό διάγραμμα της φραγής των πόρων ως αποτέλεσμα της χρήσης της μεθόδου MICP, α) με χαμηλή συγκέντρωση και β) με υψηλή χημική συγκέντρωση (Al Qabany, 2013).

- Η μέθοδος MICP ως μέθοδος μείωσης της διαπερατότητας ήταν πιο αποτελεσματική σε χαλαρά δείγματα από ότι σε πυκνά.
- Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, προέκυψε ότι ο ρυθμός αύξησης της αντοχής ήταν μεγαλύτερος για πυκνότερα δείγματα συγκριτικά με τα πιο χαλαρά.

(ε) Οι Suprpto, Mroueh, Lacroix, Madec, Soerandji και Rahayu (2014), διερεύνησαν τη χρήση του βακτηρίου *Bacillus Subtilis* στη βελτίωση της διατμητικής αντοχής της άμμου Hostun. Πρόκειται για μια μέση άμμο, η οποία αποτελείται από πυρίτιο (SiO_2) με περιεκτικότητα 98%.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Το βακτήριο *B. Subtilis* αναπτύχθηκε στο μέσο M63, υποστηριζόμενο με γλουταμινικό οξύ για να παρατηρηθεί η παραγωγή ενζύμου ουρεάσης και να αυξηθεί η δραστηρότητά του. Το *B. Subtilis* επώαστηκε για μια νύχτα σε θερμοκρασία 37 °C. Η καλλιέργεια χωρίστηκε στη συνέχεια σε δύο μέρη. Η μέτρηση της ανάπτυξης των βακτηρίων πραγματοποιήθηκε με την καλλιέργεια τους σε διάρκεια μιας ημέρας. Η οπτική πυκνότητα του *B. Subtilis* για καλλιέργεια μιας νύχτας είναι 0,97 για το *B. Subtilis* που καλλιεργήθηκε σε μέσο M63 και 1,30 για *B. Subtilis* που αναπτύχθηκε σε μέσο M63, υποστηριζόμενο από γλουταμινικό οξύ. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούνταν από ουρία και χλωριούχο ασβέστιο σε ισομοριακές συγκεντρώσεις 1,1 M. Ο όγκος μεταξύ των απαιτούμενων βακτηρίων συγκριτικά με το διάλυμα τσιμεντοποίησης ήταν 1:3.

Για την προετοιμασία του εδάφους, τα ακρυλικά κουτιά πληρώθηκαν με άμμο Hostun RF, με πυκνότητα περίπου 1,5 gr/cm³. Η περιεκτικότητα σε νερό της άμμου ήταν 0%, (μη κορεσμένο) και ο όγκος κενών ήταν περίπου 30cm³. Ο όγκος κενών πληρώθηκε με 7,5 mL βακτηρίων και 22,5 mL διαλύματος τσιμεντοποίησης, με βάση την αναλογία 1:3. Χρησιμοποιήθηκαν 20 κουτιά που χωρίστηκαν σε 4 κουτιά ελέγχου, 4 κουτιά για 3 ημέρες θεραπείας υπό την παρουσία του μέσου M63, 4 κουτιά για 3 ημέρες επεξεργασίας υπό την παρουσία του μέσου M63 υποστηριζόμενα με γλουταμινικό οξύ, 4 κουτιά για 7 ημέρες επεξεργασίας υπό την παρουσία του μέσου M63 και 4 κουτιά για 7 ημέρες θεραπείας υπό την παρουσία του μέσου M63 υποστηριζόμενο με γλουταμινικό οξύ. Οι παραπάνω θεραπείες πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 37 °C. Η έγχυση των βακτηρίων και του διαλύματος τσιμεντοποίησης πραγματοποιήθηκε με σύριγγα (15 σημεία ενέσεων). Το διάλυμα βακτηρίων και το διάλυμα τσιμεντοποίησης αναμείχθηκαν πριν από την ένεση στην άμμο.

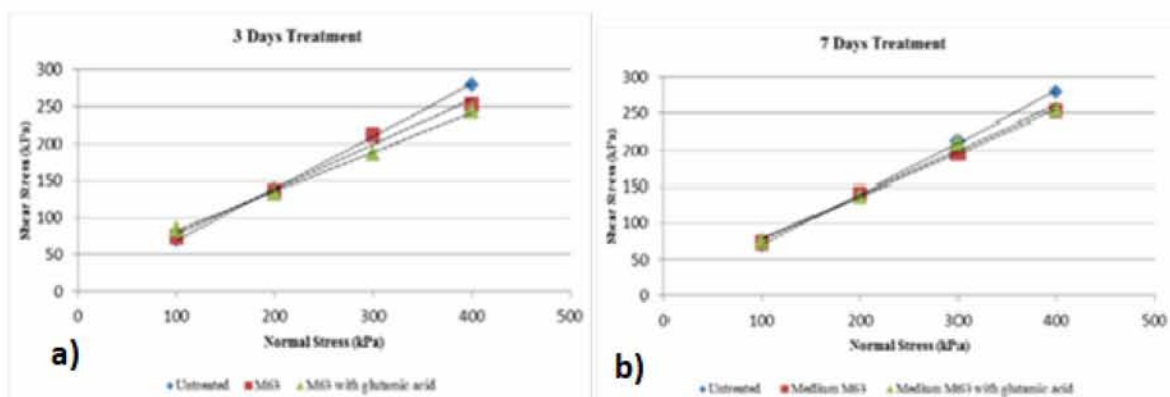
Εργαστηριακές Δοκιμές

Αρχικά, εκτελέστηκε δοκιμή άμεσης διάτμησης στη μη επεξεργασμένη άμμο, προκειμένου να προσδιοριστούν η διατμητική αντοχή, η γωνία τριβής και η συνοχή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η δραστηρότητα ουρεάσης, η οποία βασίζεται στη μέτρηση της οπτικής

πυκνότητας του ενζύμου. Η δοκιμή ουρεάσης διεξήχθη παράλληλα με την έγχυση άμμου. Η καλλιέργεια των βακτηρίων για τον προσδιορισμό της ουρεάσης ήταν ίδια με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στην τσιμεντοποίηση της άμμου. Έπειτα, η τσιμεντοποιημένη άμμος αφαιρέθηκε από τα κιβώτια και διεξήχθησαν δοκιμές άμεσης διάτμησης.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Το μέσο M63 υποστηριζόμενο με γλουταμινικό οξύ είχε 2 φορές υψηλότερη δραστικότητα ουρεάσης από το μέσο M63 χωρίς γλουταμινικό οξύ.
- Η τσιμεντοποίηση, στην περίπτωση εισαγωγής μέσου M63 υπό την παρουσία γλουταμινικού οξέος, ξεκίνησε από την 3^η ημέρα της θεραπείας, ενώ η τσιμεντοποίηση υπό την παρουσία M63 χρειάστηκε περίπου 1 μήνα.
- Το βάθος τσιμεντοποίησης ήταν περίπου 1 με 1,5 cm, όταν το συνολικό ύψος του δείγματος ήταν 2cm. Η τσιμεντοποίηση στα κουτιά της άμμου δεν ήταν ομοιογενής και αυτό οφειλόταν στην έλλειψη οξυγόνου στον πυθμένα των κιβωτίων.
- Γενικά, η δοκιμή άμεσης διάτμησης έδειξε ότι η βιολογική επεξεργασία είναι σε θέση να αλλάξει τη συμπεριφορά της άμμου για να είναι πιο συνεκτική (Σχήμα 4.32). Η συνοχή αυξήθηκε σημαντικά για 3 και 7 ημέρες θεραπείας. Ο ασβεστίτης που σχηματίστηκε λόγω της καθίζησης γέμισε τους εδαφικούς πόρους του εδάφους και αύξησε τη δέσμευση των σωματιδίων. Όμως, η γωνία τριβής στις επεξεργασμένες άμμους (M63, M63 και γλουταμινικό οξύ) μειώθηκε σε σχέση με τη μη τσιμεντοποιημένη άμμο.



Σχήμα 4.32 Σχέση διατμητικής τάσης - ορθής τάσης για: a) 3 και b) 7 ημέρες θεραπείας (Suprato, 2014).

(στ) Οι ερευνητές Cheng, Cord-Ruwish και Shahin (2014), μελέτησαν τη μέθοδο της βιο-συγκόλλησης καθαρής χαλαζιακής άμμου μέσω της καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου στα θαλάσσια περιβάλλοντα. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους MICP, καθώς στηρίζεται στα ιόντα ασβεστίου που διαλύονται στο θαλασσινό νερό. Αυτή η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει την εισαγωγή ανθεκτικών σε υψηλή αλατότητα, βακτηρίων, ενεργών σε ουρεάση, ακολουθούμενων από ένα μίγμα ουρίας και θαλασσινού νερού μέσω πορώδους αμμώδους εδάφους, που οδηγεί σε απελευθέρωση ανθρακικού από την αντίδραση ουρεάσης και στην καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου και τριένυδρου ανθρακικού μαγνησίου.

Μέθοδος Προετοιμασίας

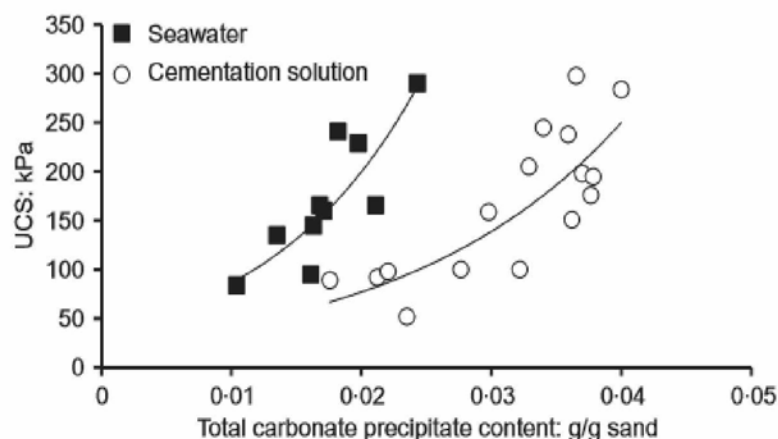
Το δραστικό στέλεχος ουρεάσης, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, ήταν το MCP-11. Το στέλεχος καλλιεργήθηκε υπό στείρες κλειστές αερόβιες συνθήκες σε μέσο εκχύλισης ζύμης. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης θαλασσινού νερού παρασκευάστηκε με προσθήκη 10 mM ουρίας (0,6 g / L) στο τεχνητό θαλασσινό νερό, το οποίο συνίσταται από διαφορετικές συγκεντρώσεις αλάτων. Συγκριτικά, η βιο-τσιμεντοποίηση διεξήχθη και χρησιμοποιώντας πολύ πυκνό διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούμενο από ίσα γραμμομόρια ουρίας (1 M, 60 g / L) και άνυδρου χλωριούχου ασβεστίου. Διεξήχθη βιο-συγκόλληση, με την εισαγωγή των διαλυμάτων με ρυθμό ροής 1 L / h. Αρχικά, η κορεσμένη στήλη άμμου εκπλύθηκε με βακτηριακή καλλιέργεια (85 mL), και στη συνέχεια με διάλυμα τσιμέντου (85 mL) ακολουθούμενη από 24 ώρες χρόνου αντίδρασης περίπου στους 25 °C. Ακολούθησαν επανειλημμένες εκπλύσεις με διάλυμα τσιμεντοποίησης (190 mL) για να ληφθεί διαφορετική αντοχή. Ο χρόνος αντίδρασης βιο-συγκόλλησης ήταν περίπου 6 ώρες για το διάλυμα τσιμεντοποίησης με βάση το θαλασσινό νερό και 24 ώρες για το πυκνό διάλυμα τσιμεντοποίησης.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, δοκιμές διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου, ανάλυση XRD και αναλύσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης SEM. Στη δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, το αξονικό φορτίο εφαρμόστηκε με σταθερό ρυθμό 1,0 mm/min. Οι σχηματιζόμενοι κρύσταλλοι ξηράθηκαν στους 508 °C για 24 ώρες πριν από την ανάλυση διάθλασης ακτίνων X (XRD).

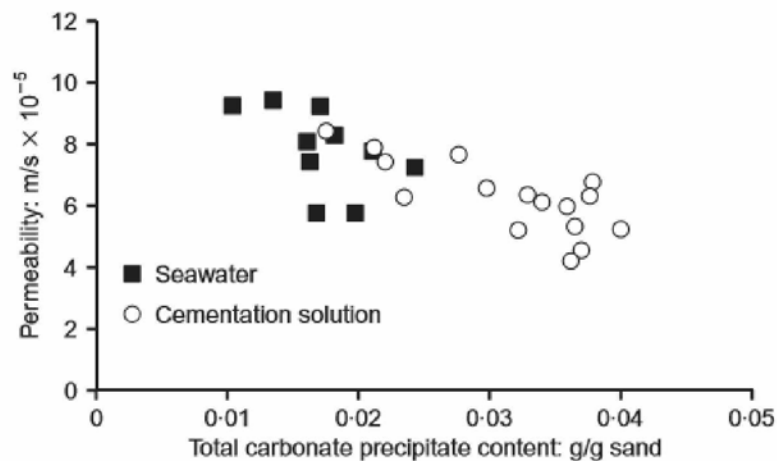
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Το παραγόμενο ένυδρο ανθρακικό μαγνήσιο μετατράπηκε με την πάροδο του χρόνου σε ανθρακικό ασβέστιο στο θαλασσίνο νερό.
- Η ποσότητα ουρίας περιορίστηκε στη στοιχειομετρική αντιστοιχία της χαμηλής συγκέντρωσης ασβεστίου στο θαλασσίνο νερό. Αυτός ο περιορισμός επιβράδυνε το συνολικό ρυθμό αντίδρασης και απαιτούσε 200 εκπλύσεις για να φτάσει μια αύξηση αντοχής περίπου 300 kPa.
- Η δοκιμή UCS έδειξε ότι για την ίδια ποσότητα ανθρακικού άλατος, η αντοχή σε θλίψη των δειγμάτων που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με θαλασσίνο νερό ήταν υψηλότερη (περίπου διπλάσια) από εκείνη των δειγμάτων, που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία, με την υψηλή συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης (Σχήμα 4.33).



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα UCS-συνολικής περιεκτικότητας σε ιζήματα ανθρακικού, για συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης 60 gr/L ουρίας και 111 gr/L άνυδρου χλωριούχου ασβεστίου (Cheng, 2014).

- Η χρήση θαλάσσιου ύδατος συμπληρωμένου με ουρία, αντί για συμπυκνωμένο διάλυμα τσιμεντοποίησης, δεν επηρέασε σημαντικά τη διαπερατότητα με βάση το παραγόμενο ανθρακικό άλας. Η διαπερατότητα διατηρήθηκε σε περίπου 30% για όλα τα δείγματα που υποβλήθηκαν στην θεραπεία MICP, υποδηλώνοντας καλή ικανότητα αποστράγγισης.



Σχήμα 4.34 Διάγραμμα διαπερατότητας-συνολικής περιεκτικότητας σε ιζήματα ανθρακικού, για συγκέντρωση διαλύματος τσιμεντοποίησης 60 gr / L ουρίας και 111 gr / L άνυδρου χλωριούχου ασβεστίου (Cheng, 2014).

(ζ) Οι Jaward και Zheng (2016), δημοσίευσαν ερευνητικό άρθρο με θέμα τη βελτίωση της κακώς διαβαθμισμένης λεπτής άμμου με την μέθοδο MICP. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε καθαρή χαλαζιακή άμμος, η οποία δε διαπερνούσε το κόσκινο διαμέτρου 0.1 mm.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Το βακτήριο *Sporosarcina pasteurii* καλλιεργήθηκε υπό στείρες αερόβιες συνθήκες σε μέσο εκχύλισης ζύμης. Η οπτική πυκνότητα (OD_{600}) της βακτηριακής καλλιέργειας κυμαινόταν μεταξύ 1,8 και 1,9. Η βιο-τσιμεντοποίηση διεξήχθη χρησιμοποιώντας πολύ συμπυκνωμένο διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούμενο από ίσα γραμμομόρια (1M) άνυδρου χλωριούχου ασβεστίου και ουρίας.

Οι κακώς διαβαθμισμένες στήλες άμμου παρασκευάστηκαν με τη συσκευασία της ξηρής άμμου σε στήλες PVC και χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελούνταν από στήλες ξηρής άμμου, ενώ η δεύτερη ομάδα από κορεσμένες στήλες άμμου.

Η μέθοδος MICP διεξήχθη χρησιμοποιώντας τη βαρύτητα που προκαλεί καθοδική καθίζηση με ρυθμό ροής 0.150 L /h. Οι δύο ομάδες εκπλύθηκαν με 33 mL βακτηριακής καλλιέργειας, ακολουθούμενη από 3 ώρες χρόνο συγκράτησης και στη συνέχεια από επανειλημμένες εκπλύσεις με διάλυμα τσιμεντοποίησης 33 mL. Ο χρόνος αντίδρασης της μεθόδου MICP ήταν 24 ώρες με πολύ συμπυκνωμένο διάλυμα τσιμεντοποίησης. Η έκπλυση με διάλυμα τσιμέντου 33 mL επαναλαμβανόταν κάθε 24 ώρες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 28-32°C. Μετά από 7 ημέρες αντίδρασης, τα δείγματα εδάφους

τοποθετήθηκαν στο φούρνο σε θερμοκρασία 60 °C. Μετά από 7 ημέρες από το πέρας της σκλήρυνσης, τα μισά από τα δείγματα εδάφους πλύθηκαν με 1 L νερού βρύσης και έπειτα βυθίστηκαν σε μια λεκάνη που περιείχε νερό βρύσης για 24 ώρες.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Για τη μέτρηση του βάρους του ανθρακικού ασβεστίου, τα δείγματα θρυμματίστηκαν, ξηράνθηκαν σε φούρνο και καταγράφηκαν τα βάρη ($M_{\xi\eta\rho\eta}$). Το ξηρό έδαφος εμποτίστηκε με διάλυμα υδροχλωρίου, συγκέντρωσης 1M, για να διαλυθεί το ανθρακικό ασβέστιο που είχε καταβυθιστεί, στη συνέχεια πλύθηκε με νερό, αποστραγγίστηκε και τελικά ξηράνθηκε σε κλίβανο ($M_{\text{υπολειμμάτων}}$). Τα βάρη καταγράφηκαν και πάλι. Η διαφορά μεταξύ των βαρών πριν και μετά από αυτή τη διαδικασία θεωρείται ότι είναι το βάρος του ανθρακικού ασβεστίου που καθιζάνει στο δείγμα.

Οι δοκιμές διαπερατότητας μεταβλητού υδραυλικού φορτίου, διεξήχθησαν πριν και μετά τη θεραπεία MICP. Επίσης, η δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, διεξήχθη με ρυθμό σταθερής φόρτισης 1,5%/min. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM, στην οποία τα δείγματα επικαλύφθηκαν με χρυσό και άνθρακα χρησιμοποιώντας συσκευή επικάλυψης BAL-TEC / SCD 050.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η τεχνική MICP βελτίωσε αποτελεσματικά τις μηχανικές ιδιότητες των κακώς διαβαθμισμένων λεπτών άμμων.
- Τα δείγματα ξηρής άμμου (αρχικά ξηρή άμμος, πριν την προσθήκη του διαλύματος βακτηρίων) αποδείχθηκε ότι είχαν μεγαλύτερη UCS, σε σχέση με τα κορεσμένα δείγματα άμμου (αρχικά κορεσμένη άμμος, πριν από την προσθήκη του διαλύματος βακτηρίων). Επίσης, τα δείγματα ξηρής άμμου έδωσαν μεγαλύτερη τάση αστοχίας σε σχέση με τα κορεσμένα.
- Η μείωση της διαπερατότητας της ξηρής άμμου ήταν σχετικά μικρότερη από αυτή της κορεσμένης άμμου.

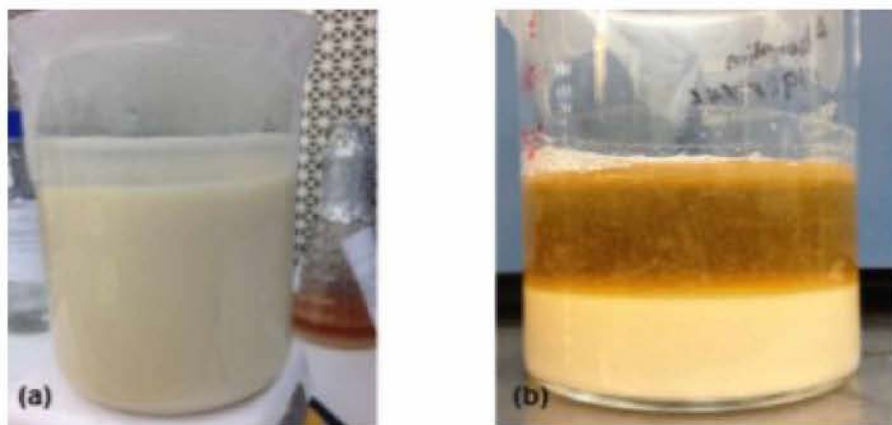
- Οι μετρήσεις ανθρακικού ασβεστίου και οι εικόνες SEM έδειξαν ότι η ποσότητα του ανθρακικού ασβεστίου που σχηματίστηκε σε κορεσμένα δείγματα ήταν ελαφρώς υψηλότερη από αυτή των ξηρών δειγμάτων. Οι κρύσταλλοι στα κορεσμένα δείγματα, ήταν σχετικά μικρού μεγέθους και κάλυπταν σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια των κόκκων. Από την άλλη πλευρά, τα ξηρά τσιμεντοποιημένα δείγματα παρήγαγαν μικρότερη ποσότητα κρυστάλλων, οι οποίοι είχαν μεγαλύτερο μέγεθος, με αποτέλεσμα το κλείσιμο των κενών μεταξύ των γειτονικών κόκκων. Το κλείσιμο των κενών συνέβαλλε στην ανάπτυξη της αντοχής.

(η) Οι Cheng και Shahin (2016) παρουσίασαν μια νέα προσέγγιση για την σταθεροποίηση του εδάφους με τη μέθοδο MICP γνωστή ως «βιο-πολτός». Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν καθαρή χαλαζιακή άμμος με περιεκτικότητες: >0.425 mm: 0.53%, 0.3–0.425 mm: (50.78%), 0.15–0.3 mm: 45.96% και < 0.15 mm: 2.73%.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Τα βακτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν γένους *Bacillus* sp. (DSM 23526) και καλλιεργήθηκαν σε αποστειρωμένο αερόβιο μέσο ανάπτυξης που αποτελούνταν από 20 gr/L εκχυλίσματος ζύμης και συγκεντρώσεις 0.17 M θειικού αμμωνίου και 0.1 mM NiCl_2 , σε pH 9,25. Η βακτηριακή καλλιέργεια συλλέχθηκε μετά από 24 ώρες καλλιέργειας στους 28 °C. Η οπτική πυκνότητα (OD_{600}) της συλλεγόμενης βακτηριακής καλλιέργειας κυμαινόταν μεταξύ 2-2,5 και η δραστηριότητα της ουρεάσης ήταν περίπου 10 U/mL. Η καλλιέργεια φυλάχθηκε στο ψυγείο στους 4 °C δύο ημέρες πριν από τη χρήση. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης, που χρησιμοποιήθηκε, αποτελούνταν από συγκεντρώσεις 1 M χλωριούχου ασβεστίου (111 gr / L) και 1 M ουρία (60 gr / L).

Ο βιο-πολτός παρασκευάστηκε με προσθήκη ίσης ποσότητας ουρίας και χλωριούχου ασβεστίου στη βακτηριακή καλλιέργεια (100 mL) για να φτάσει συγκεντρώσεις 50, 100, 200, 400, 600, και 800 mM, ακολουθούμενες από ανάδευση με ταχύτητα 600 r.p.m για περίπου 12 ώρες. Η παρουσία ουρίας και Ca^{2+} , οδήγησε στο σχηματισμό κρυστάλλων CaCO_3 (Σχήμα 4.35). Όταν η προστιθέμενη ουρία και το CaCl_2 καταναλώθηκαν πλήρως, το μίγμα αφέθηκε να καθιζάνει για 6 ώρες.



Σχήμα 4.35 Φωτογραφία του βιο-πολτού a) κατά την περίοδο αντίδρασης b) κατά την περίοδο καθίζησης (Cheng, 2016).

Μετά την καθίζηση, αφαιρέθηκε το υπερκείμενο υγρό και συλλέχθηκαν οι καταβυθισμένοι κρύσταλλοι (βιο-πολτός). Ο παραγόμενος βιο-πολτός διέθετε περιεκτικότητα σε στερεά $15 \pm 1\%$ (w / w). Ο βιο-πολτός δημιουργήθηκε από διάλυμα ουρίας και CaCl_2 , σε συγκέντρωση 400 mM και χρησιμοποιήθηκε για ευστάθεια, ανάλυση της μικροδομής και πειράματα σταθεροποίησης του εδάφους. Η δραστηριότητα ουρεάσης του βιο-πολτού προσδιορίστηκε με μέτρηση του ρυθμού υδρόλυσης της ουρίας.

Η άμμος αναμίχθηκε με το βιο-πολτό σε αναλογία βάρους 10:1 (w/w). Διεξήχθη μια πρότυπη δοκιμή συμπίεσης Proctor επί του μίγματος, από την οποία λήφθηκε μία μέγιστη ξηρή πυκνότητα $16.54 \text{ kN} / \text{m}^3$.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Η άμμος και ο βιο-πολτός συμπίεστηκαν σε στήλες PVC, με εσωτερική διάμετρο 45 mm, έως ότου να επιτευχθεί η μέγιστη ξηρή πυκνότητα. Χρησιμοποιήθηκαν στήλες PVC ύψους 300 mm για τη διερεύνηση της κατανομής της δραστηριότητας ουρεάσης και της καθίζηση του CaCO_3 , καθώς και στήλες PVC ύψους 120 mm για την αξιολόγηση της αντοχής κατά την διάρκεια της θεραπείας. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης εγχύθηκε πολλαπλές φορές μέσα στις στήλες άμμου για να επιτευχθούν διαφορετικά επίπεδα τσιμεντοποίησης. Το τσιμεντοποιημένο διάλυμα εισήχθη στη στήλη άμμου από τον πυθμένα με σταθερό ρυθμό ροής 30 mL/min για να δημιουργηθεί μια σταθερή, πλήρως κορεσμένη κατάσταση. Μετά την ολοκλήρωση της έγχυσης, οι στήλες άμμου διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) για 48 ώρες, προκειμένου να επιτευχθεί μια πλήρης αντίδραση τσιμεντοποίησης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης (UCS Πριν τη διεξαγωγή των δοκιμών UCS, τα δείγματα άμμου ξηράθηκαν στους 105 °C για τουλάχιστον 24 ώρες. Σύμφωνα με το ASTM D2166, οι δοκιμές UCS διεξήχθησαν σε βιοτσιμεντοποιημένα δείγματα αναλογίας διαμέτρου προς ύψος μεταξύ 1:1,5 και 1:2. Το αξονικό φορτίο εφαρμόστηκε με σταθερό ρυθμό 1.0 mm / min.

Προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο των βιο-επεξεργασμένων δειγμάτων εδάφους με την προσθήκη 20 mL από 2 M διαλύματος υδροχλωρικού οξέος (HCl) σε 15-20 gr ξηρού τσιμεντοποιημένου δείγματος και ο όγκος του αερίου CO₂ μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μανόμετρο. Η ποσότητα του CaCO₃ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μια σχέση μεταξύ του όγκου του αερίου CO₂ και της ποσότητας του καθαρού CaCO₃.

Τέλος, προκειμένου να χαρακτηριστεί το σχήμα και το μέγεθος των κρυστάλλων του βιο-πολτού και να διερευνηθεί η συμπεριφορά της συγκόλλησης μεταξύ του πλήθους των κόκκων και του βιο-πολτού, διεξήχθη ανάλυση μικροσκοπίας. Πριν τη διεξαγωγή της μικροσκοπικής έρευνας, όλα τα βιο-τσιμεντοποιημένα δείγματα εδάφους ξεπλύθηκαν με νερό και ξηράθηκαν στους 105°C για 24 ώρες. Η μικροσκοπική έρευνα διεξήχθη χρησιμοποιώντας το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) (Tescan Mira3 XMU).

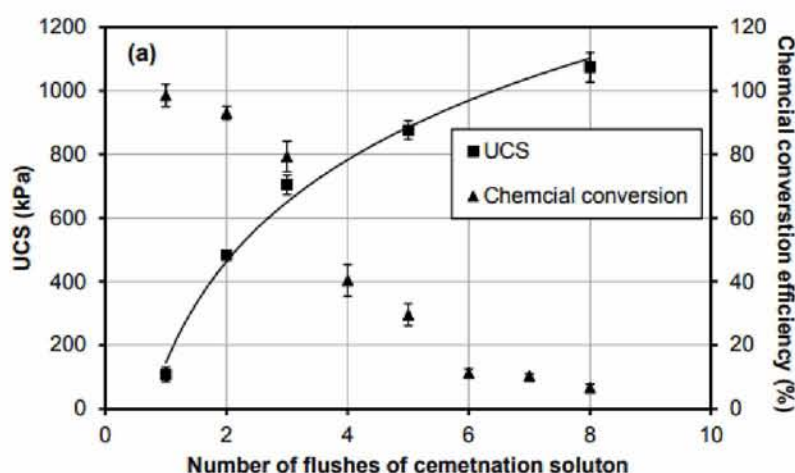
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Παρατηρήθηκε γραμμική σχέση μεταξύ του συνολικού ποσού του βιο-πολτού και της συγκέντρωσης ουρίας και CaCl₂. Παρατηρήθηκε ότι η δραστηριότητα ουρεάσης αυξανόταν με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος τσιμεντοποίησης, μέχρι τα 400 mM και μειωνόταν για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.
- Ο ίδιος ο βιο-πολτός δεν θα μπορούσε να παράσχει μια δύναμη συγκόλλησης μεταξύ των κόκκων άμμου, γι' αυτό το λόγο προστέθηκε επιπλέον διάλυμα τσιμεντοποίησης. Οι εικόνες SEM έδειξαν σχηματισμό σφαιρικών κρυστάλλων λόγω του βιο-πολτού και ρομβοειδών έπειτα από της προσθήκη του διαλύματος τσιμεντοποίησης. Η απουσία ενδείξεων ύπαρξης βακτηριακών κυττάρων στην επιφάνεια των ρομβοειδών κρυστάλλων έδειξε την πραγματοποίηση μιας καθαρής χημικής αντίδρασης. Παρατηρήθηκε ότι οι μεγάλοι ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι ασβεστίτη, οι οποίοι σχηματίστηκαν μετά από διαδοχικές εκπλύσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης, κάλυπταν

τους σφαιρικούς κρυστάλλους του βιο-πολτού και κυριαρχούσαν επίσης στα σημεία σύνδεσης των κόκκων άμμου.

- Η ανάμιξη του βιο-πολτού με άμμο δημιούργησε μια ιδιαίτερα ομοιόμορφη κατανομή της δραστηριότητας ουρεάσης κατά μήκος των στηλών των 300mm. Με ανάμιξη του βιο-πολτού με άμμο, περισσότερο από το 95% της περιεκτικότητας σε βιο-πολτό διατηρήθηκε και κατανεμήθηκε ομοιόμορφα κατά μήκος της στήλης, οδηγώντας σε ομοιόμορφη καθίζηση CaCO_3 .

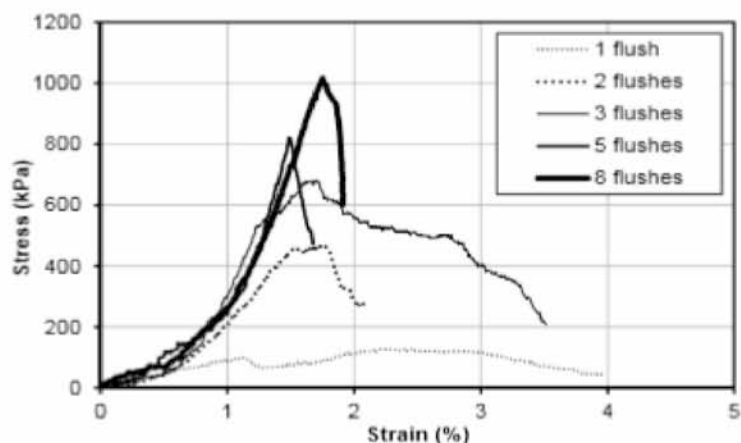
- Διαπιστώθηκε ότι η ανεμπόδιση μονοαξονική θλίψη (UCS) αυξήθηκε με την αύξηση του αριθμού των εκπλύσεων. Ωστόσο, διαπιστώθηκε επίσης ότι ο ρυθμός βελτίωσης της αντοχής μειώθηκε με την αύξηση του αριθμού των εκπλύσεων (Σχήμα 4.36). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη βαθμιαία μείωση της αποδοτικότητας της χημικής μετατροπής σε κάθε έκπλυση. Η μειωμένη απόδοση της χημικής μετατροπής πιθανόν να οφείλεται στη μείωση της δραστηριότητας ουρεάσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας των παραγόμενων κρυστάλλων.



Σχήμα 4.36 Επίδραση των εκπλύσεων του διαλύματος τσιμεντοποίησης στην ανεμπόδιση μονοαξονική θλιπτική αντοχή της επεξεργασμένης άμμου (Cheng, 2016).

- Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των εδαφικών δειγμάτων που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με λιγότερο αριθμό εκπλύσεων διαλύματος τσιμεντοποίησης έδειξαν μια πλαστική περιοχή, η οποία δεν παρατηρήθηκε στα δείγματα που επεξεργάστηκαν με υψηλότερο αριθμό εκπλύσεων, τα οποία αστόχησαν αμέσως μετά την επίτευξη της

μέγιστης τάσης. Έπειτα από 8 εκπλύσεις, με διάλυμα τσιμεντοποίησης, η UCS των επεξεργασμένων δειγμάτων βελτιώθηκε σημαντικά, στο 1 MPa (Σχήμα 4.37). Διαπιστώθηκε επίσης ότι η δυσκαμψία (κλίση του διαγράμματος) των δειγμάτων αυξήθηκε με τον αριθμό των εκπλύσεων και βελτιώθηκε από τα 7 MPa (1^η εκπλυση) στα 190 MPa (8^η εκπλυση).



Σχήμα 4.37 Επίδραση των εκπλύσεων του διαλύματος τσιμεντοποίησης στη σχέση τάσης-παραμόρφωσης και στη δυσκαμψία της επεξεργασμένης άμμου (Cheng, 2016).

Σε αντίθεση με τις συνήθειες μεθόδους θεραπείας με μικρόβια (MICP), η νέα προσέγγιση εφαρμογής του βιο-πολτού στη σταθεροποίηση του εδάφους, περιλαμβάνει την ανάμιξη του βιο-πολτού με το έδαφος, παρόμοια με την παραδοσιακή μέθοδο ανάμιξης τσιμέντου, που ακολουθείται από έκπλυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης. Αποτελεί μια αποτελεσματική εναλλακτική μέθοδο, η οποία αποδείχτηκε ότι βελτιώνει σημαντικά την ομοιομορφία της δραστηκότητας ουρεάσης και την κατανομή της καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου καθώς επίσης και τη συγκράτηση έναντι στην έκπλυση από το νερό.

4.2.3 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης της άμμου Ottawa με τη χρήση βακτηρίων

(α) Η Ozdogan (2010) μελέτησε την τριαξονική συμπεριφορά και τη μικροδομή των βιολογικά επεξεργασμένων δειγμάτων αμμωδών εδαφών. Σε όλα τα πειράματα της συγκεκριμένης έρευνας χρησιμοποιήθηκε η άμμος Ottawa, η οποία σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης εδαφών ASTM D 2487 είναι μια κακώς διαβαθμισμένη, λεπτή έως μέση άμμος, της οποίας το ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο No.20 είναι 100%.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Τα δείγματα παρασκευάστηκαν είτε με τη μέθοδο ξηρής συμπύκνωσης (air pluviation) είτε με τη μέθοδο υγρής συμπύκνωσης (moist tampling). Συγκεκριμένα για την πρώτη μέθοδο διαμορφώθηκαν 4 δείγματα άμμου χωρίς την εισαγωγή βακτηρίων (Bio-control 1, 2, 3, 4) και 8 δείγματα άμμου στα οποία εισήχθησαν βακτήρια μέσω αντλίας (Bio 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 12). Στη δεύτερη μέθοδο, διαμορφώθηκε 1 δείγμα χωρίς την εισαγωγή μικροοργανισμών σε αυτό (Bio-control 5) και 4 με την εισαγωγή βακτηρίων με ανάμιξη (Bio 9, 10, 11, 12). Παρασκευάστηκαν επίσης, κάποια επιπλέον δείγματα για τις αναλύσεις μικροσκοπίου (Bio-control 6, Bio 9, 11 με ανάμιξη και Bio 12,13 με αντλία). Τα δείγματα είχαν διάμετρο 35 mm και ύψος 76mm. Τα βακτήρια εισήχθησαν στο δείγμα σε υγρό μέσο ουρίας - χλωριούχου ασβεστίου το οποίο περιείχε 25,2 mM CaCl_2 .

Το μέσο ουρίας (3 gr θρεπτικό Bacto, 20 gr ουρία, 10gr NH_4Cl , 2,12 gr NaHCO_3 , 500 mL απεσταγμένου νερού) αναμίχθηκε με 500 mL απεσταγμένου νερού μέχρι να φτάσει τον απαιτούμενο όγκο του 1L. Στη συνέχεια, το διάλυμα χωρίστηκε σε παρτίδες των 100 mL. Αυτά τα 100 mL αεριούχου διαλύματος υποδιαιρέθηκαν σε δύο μέρη, ένα των 20 mL και ένα των 80 mL. Το τμήμα των 20 mL του αεριζόμενου μέσου ουρίας προστέθηκε στον σωλήνα που περιείχε τα κύτταρα *Sporasarcina Pasteurii*. Ένας όγκος 2 mL διαλύματος χλωριούχου ασβεστίου (18,5 gr CaCl_2 /100 mL αποσταγμένου νερού) προστέθηκε στην ουρία (80 mL). Το βακτηριακό διάλυμα (λίγο περισσότερο από 20 mL) προστέθηκε στο διάλυμα CaCl_2 – ουρίας (τόρα 82 mL). Το διάλυμα που αποτελείται από ουρία, χλωριούχο ασβέστιο και κύτταρα *S.pasteurii*, τοποθετήθηκε στη βάση του δείγματος για μια περίοδο 10 λεπτών, με ταχύτητα άντλησης περίπου 10 mL/min. Αυτό το διάλυμα αφέθηκε για τουλάχιστον 4 ώρες έως ότου τα μικρόβια να προσκολληθούν στους κόκκους άμμου του δείγματος. Στη συνέχεια, αντλήθηκαν 100 mL διαλύματος τσιμεντοποίησης (25,2 mM) μέσω του δείγματος με ρυθμό ροής 2 mL/min, για περίοδο 50 λεπτών. Αυτή η διαδικασία επεξεργασίας θρεπτικών ουσιών επαναλαμβανόταν περιοδικά (κάθε 2 ώρες περίπου, για 8 ώρες την ημέρα) κατά τη διάρκεια 3-4 ημερών. Τελικά, τα βελτιωμένα δείγματα εγκαταστάθηκαν στην τριαξονική συσκευή.

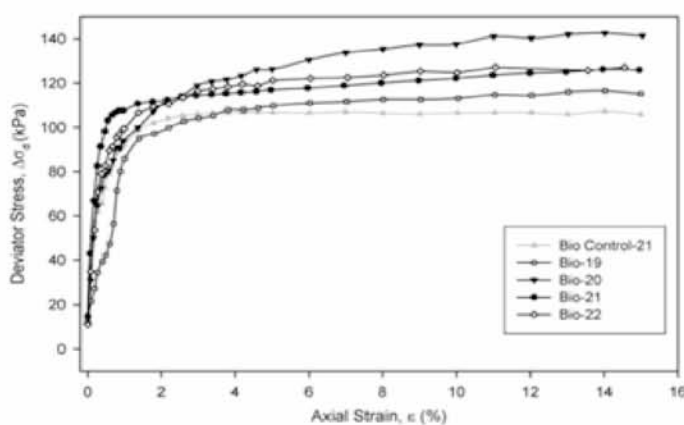
Εργαστηριακές Δοκιμές

Σε αυτή τη μελέτη, πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές ICU (Isotropically Consolidated Undrained). Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε ημι-αυτοματοποιημένο σύστημα τριαξονικών δοκιμών που σχεδιάστηκε από την Geotac Geotechnical Test Acquisition και Control σε συνδυασμό με μια πλακέτα ελέγχου πίεσης. Οι τριαξονικές δοκιμές που διεξήχθησαν περιελάμβαναν τρία στάδια, τον κορεσμό, με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, τη στερεοποίηση και τη διάτμηση. Κατά τη διάρκεια του κορεσμού, η ενεργή θλιπτική τάση διατηρήθηκε στη σταθερή τιμή των 14 kPa και πραγματοποιήθηκαν περιοδικά, μετρήσεις του δείκτη κορεσμού B . Μετά την ολοκλήρωση του κορεσμού υπό πίεση, ακολούθησε η ισότροπη στερεοποίηση κάθε δείγματος με εφαρμογή ενεργής θλιπτικής τάσης 69 kPa (10 psi). Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η τάση αυξανόταν αργά (π.χ. 3,5 kPa) στη διάρκεια μιας ώρας, έτσι ώστε να μην υπάρξουν τυχόν βλάβες στους δεσμούς τσιμεντοποίησης που δημιουργήθηκαν στα δείγματα κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Έπειτα από την ολοκλήρωση της στερεοποίησης, κάθε δείγμα υποβλήθηκε σε αξονική συμπίεση με ελεγχόμενη τη μετατόπιση που εφαρμόστηκε με ρυθμό παραμόρφωσης 5% ανά ώρα. Κάθε δείγμα τέθηκε σε διάτμηση μέχρι να επιτευχθεί αξονική καταπόνηση 15%. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Η μέθοδος της ξηρής συμπύκνωσης ήταν πιο δύσκολο να εφαρμοστεί από τη μέθοδο υγρής συμπύκνωσης, εξαιτίας τόσο του διαχωρισμού των σωματιδίων όσο και των σχετικά ασυνεπών πυκνοτήτων των δειγμάτων και των λόγων κενών. Τα τριαξονικά δείγματα που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο αυτή παρουσίασαν σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της διάτμησης, ιδιαίτερα σε υψηλές καταπονήσεις, παρόλο που κάθε δείγμα παρασκευάστηκε και δοκιμάστηκε με παρόμοιο τρόπο. Από την άλλη, οι αποκρίσεις των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο υγρής συμπύκνωσης εμφάνισαν πιο συνεπή συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης.

- Τα βιολογικά επεξεργασμένα δείγματα δεν παρουσίασαν σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά τάσης-καταπόνησης από τα δείγματα ελέγχου. Από την ανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης προέκυψε ότι, η συμπεριφορά αυτή οφειλόταν, στη θραύση δεσμών τσιμεντοποίησης, οι οποίοι μπορεί να σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του κορεσμού και της στερεοποίησης.
- Οι εικόνες SEM έδειξαν ότι παρατηρήθηκε σημαντική ποσότητα μικροβιακής τσιμεντοποίησης ασβεστίτη στα σημεία επαφής μεταξύ των σωματιδίων άμμου.
- Τα δείγματα τα οποία βελτιώθηκαν με τη μέθοδο MICP, παρουσίασαν όλκιμη συμπεριφορά κατά το στάδιο της διάτμησης (Σχήμα 4.38). Η όλκιμη αυτή συμπεριφορά αφορούσε τα δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο υγρής συμπύκνωσης αλλά παραδόξως και αυτά που παρασκευάστηκαν μέσω της μεθόδου ξηρής συμπύκνωσης. Τα υποβληθέντα σε βιολογική θεραπεία δείγματα έδειξαν ελαφρώς υψηλότερη αποκλίνουσα τάση σε σχέση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα άμμου κυρίως για τις μεγάλες αξονικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.38 Διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης- αξονικής παραμόρφωσης από την τριαξονική δοκιμή για τη μέθοδο της υγρής συμπύκνωσης (moist tamplng) (Ozdogan, 2010).

- Με βάση την οπτική παρατήρηση των δειγμάτων, φάνηκε ότι τα δείγματα των οποίων τα βακτήρια εισήχθησαν μέσω αντλίας είχαν στην πραγματικότητα υψηλότερες συγκεντρώσεις βακτηρίων από εκείνα στα οποία τα βακτηρίδια είχαν αναμιχθεί με το έδαφος.

(β) Ο Velpuri, το 2015, ασχολήθηκε με τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροβιακά επαγόμενη καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου. Ένα από τα εδάφη, τα οποία χρησιμοποίησε στα πειράματά του, ήταν η άμμος Ottawa 20-30 η οποία, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης ASTM D422, χαρακτηρίζεται ως μια κακώς διαβαθμισμένη άμμος, μέση έως χονδρόκοκκη, της οποίας διέρχεται από το κόσκινο No.16 ποσοστό 100% και από το κόσκινο No.30 ποσοστό 2%.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Διαμορφώθηκαν 6 δοκίμια από άμμο Ottawa 20-30, με διαφορετικές ποσότητες άμμου, όγκους θρεπτικού διαλύματος, βακτηριακής θεραπείας, συγκέντρωση χλωριούχου ασβεστίου και αριθμό κύκλων θρεπτικών ουσιών. Χρησιμοποιήθηκε το βακτήριο *Sporosarcina pasteurii* (ATCC -6453). Η βακτηριακή θεραπεία πραγματοποιήθηκε με την ανάμιξη του βακτηριακού σφαιριδίου με μέσο ουρίας (3 gr nutrient Bacto, 20gr ουρίας, 10 gr NH_4Cl , 2.12 gr NaHCO_3 , 500 mL απεσταγμένο νερό) και ακριβώς πριν την εισαγωγή του διαλύματος αυτού στο εδαφικό δείγμα, έγινε η προσθήκη του χλωριούχου ασβεστίου. Η υδρόλυση της ουρίας δεν χρησιμοποιήθηκε για να επάγει την κατακρήμνιση του ασβεστίου αλλά η κατακρήμνιση πραγματοποιήθηκε από την υδρολύομενη ουρία η οποία παρήγαγε ιόντα αμμωνίου και διτανθρακικά ιόντα αλάτων με την αύξηση του pH.

Για την προετοιμασία των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ξηρής συμπύκνωσης (air-pluviation), η οποία αντιπροσωπεύει τη φυσική κατακρήμνιση και μέσω αυτής τα δείγματα μπορούν να παρασκευαστούν στις επιθυμητές σχετικές πυκνότητες. Για την προετοιμασία των δειγμάτων, για τα πειράματα, που αφορούν την επίδραση της πηγής της ουρίας, τα βακτηριακά σφαιρίδια πλύθηκαν από διάλυμα PBS πριν από την εισαγωγή τους στο δείγμα. Για τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, που αφορούν την επίδραση του αριθμού των ενέσεων θρεπτικών ουσιών, χρησιμοποιήθηκε περισταλτική αντλία για την άντληση των διαλυμάτων. Μετά την πρώτη έγχυση του βακτηριακού διαλύματος, το δείγμα αφέθηκε για 4 ώρες και έπειτα άρχισαν οι κύκλοι των θρεπτικών ουσιών σε διαστήματα 3 ωρών. Όσον αφορά τα πειράματα στα οποία εφαρμόστηκε μεμονωμένη ένεση, η άμμος πλύθηκε με νερό έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας από τα κενά και συμπιέστηκε ελαφρώς για τη δημιουργία πυκνότερων δειγμάτων και τελικά, την απαίτηση λιγότερου χρόνου για τα βακτήρια να οδηγήσουν στη συγκόλληση. Ο πλαστικός σωλήνας συνδέθηκε στον πυθμένα για την αποστράγγιση των θρεπτικών ουσιών και η άμμος συσκευάστηκε στις στήλες υπό την παρουσία υγρού βακτηριακού μέσου (1 PV,

OD=0.8). Τέλος, στα δείγματα στα οποία έγιναν πολλαπλές βακτηριακές ενέσεις, η άμμος πλύθηκε αρκετές φορές. Η ταχύτητα της περισταλτικής αντλίας, που συνδεόταν με την σύριγγα, ρυθμίστηκε έτσι ώστε το βακτηριακό υγρό να εγχέεται με ρυθμό 5 mL/min.

Εργαστηριακές Δοκιμές

1. Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα για τον προσδιορισμό της επίδρασης του μεγέθους των σωματιδίων. Τα πειράματα διεξήχθησαν με τη χρήση καλουπιού.
2. Διεξήχθησαν ακόμη δυο πειράματα, προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση της οπτικής πυκνότητας και του διαλύματος PBS. Χρησιμοποιήθηκαν σύριγγα και ακρυλικός σωλήνας.
3. Επίσης, διεξήχθησαν πειράματα για τον έλεγχο της επίδρασης του αριθμού των ενέσεων θρεπτικών ουσιών. Χρησιμοποιήθηκαν σύριγγα, ακρυλικός σωλήνας και περισταλτική αντλία.
4. Πειράματα διεξήχθησαν για την επίδραση της μεμονωμένης ένεσης, έναντι των πολλαπλών βακτηριακών ενέσεων στη βιο-συγκόλληση. Στο πείραμα με τη μεμονωμένη βακτηριακή ένεση, εφαρμόστηκαν 13 κύκλοι θρεπτικών ουσιών, ενώ σε αυτό με τις πολλαπλές ενέσεις, 4 βακτηριακές ενέσεις και 10 κύκλοι θρεπτικών ουσιών.
5. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM Hitachi S3000N FE).

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Στην περίπτωση όπου δεν υπήρχε ουρία στο βακτηριακό διάλυμα, τα περισσότερα βακτηριακά κύτταρα ήταν νεκρά ή ανενεργά. Έτσι, δεν υπήρξε παραγωγή ιόντων αμμωνίου ή ανθρακικού άλατος με αποτέλεσμα να μην καθιζάνει το ασβέστιο.

- Μέσω των πειραμάτων για τον καθορισμό της επίδρασης του αριθμού των κύκλων των θρεπτικών ουσιών, αποδείχθηκε πως η καλύτερη τσιμεντοποίηση επιτεύχθηκε όταν ο αριθμός των κύκλων κυμαινόταν από 12-15. Όσο αυξανόταν ο αριθμός των κύκλων θρεπτικών ουσιών, τόσο καλύτερη ήταν η τσιμεντοποίηση. Αυτό όμως εξαρτιόταν και από τις συγκεντρώσεις των διαλυμάτων ουρίας και CaCl_2 .
- Από πειράματα που έγιναν σε δείγματα, εφαρμόζοντας μια βακτηριακή ένεση και πολλαπλές, προτάθηκε η εφαρμογή πολλαπλών βακτηριακών ενέσεων στο μέσο των κύκλων των θρεπτικών ουσιών ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (συστήνεται η εφαρμογή τουλάχιστον 4 βακτηριακών ενέσεων για κάθε 2 θρεπτικούς κύκλους).
- Προσδιορίστηκε μέσω των πειραμάτων πως η κατάλληλη οπτική πυκνότητα για καλύτερη συγκόλληση ήταν $\text{OD}_{600}=0.8-12$.

(γ) Οι Kavazanjian, O'Donnell και Hamdan (2015), μελέτησαν τη μείωση του κινδύνου ρευστοποίησης από το σεισμό, μέσω της διαδικασίας της απονιτροποίησης. Ασχολήθηκαν με μια σειρά βιοτικών και αβιοτικών πειραμάτων, στα οποία προσδιορίστηκαν ιδιότητες όπως η σχετική πυκνότητα, ο βαθμός κορεσμού, η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων και η αντοχή σε διάτμηση.

Μέθοδος Προετοιμασίας

➤ Αβιοτικά Πειράματα

Αρχικά, εκτελέστηκαν πειράματα, απλής κυκλικής διάτμησης και απλής διάτμησης, χωρίς την προσθήκη μικροοργανισμών στα δείγματα. Για τις δοκιμές απλής κυκλικής διάτμησης, προκειμένου να αποδειχθεί η επίδραση του αποκορεσμού στο δυναμικό ρευστοποίησης, η άμμος πυριτίας Ottawa 20-30, δοκιμάστηκε σε κυκλική απλή διάτμηση σε σχετικές πυκνότητες (D_r) 45% και 75% και βαθμούς κορεσμού (S) 100%, 99% και 97%. Για τις δοκιμές απλής διάτμησης, το πλήρως κορεσμένο δείγμα ($S=100\%$) δημιουργήθηκε με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων. Το δείγμα με βαθμό κορεσμού $S = 97,5\%$ δημιουργήθηκε με διείσδυση του εδάφους από τον πυθμένα, χωρίς την εφαρμογή πίεσης του

νερού των πόρων. Το δείγμα $S = 90\%$ έγινε με προανάμιξη των κατάλληλων ποσοτήτων εδάφους και νερού και τη συμπίεσή τους μέσα στο καλούπι σε σχετική πυκνότητα 45% . Το δείγμα $S = 60\%$ παρασκευάστηκε από την αποστράγγιση κορεσμένου δείγματος υπό την επίδραση βαρύτητας για 15 λεπτά.

➤ Βιοτικά πειράματα

Παρασκευάστηκαν 4 στήλες εδάφους από ξηρή άμμο Ottawa 20-30 με σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$. Τρεις από τις στήλες (TRX-1, TRX-2, TRX-3) παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τριγωνική βάση (διάμετρος 70 mm) με ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, για μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων S. Η τέταρτη στήλη (SS-1) παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας απλή βάση διάτμησης (διάμετρος 100 mm) με ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, για τη μέτρηση των ταχυτήτων κυμάτων P και S. Οι στήλες εκπλύθηκαν, από την κορυφή, με αέριο άζωτο για την ελαχιστοποίηση του οξυγόνου στους πόρους του εδάφους, προκειμένου να διευκολυνθεί η απονιτροποίηση. Στη συνέχεια, οι στήλες εμποτίστηκαν με 30 mL βακτηριακής καλλιέργειας και το θρεπτικό διάλυμα (≈ 230 mL για στήλες TRX, 120 mL για τη στήλη SS) προστέθηκε αργά σε κάθε στήλη από τον πυθμένα. Μετά την πλήρωση των στηλών, το θρεπτικό διάλυμα, κάθε στήλης, αποστραγγίστηκε σε διάστημα 2 εβδομάδων και επαναπληρώθηκε. Κατά την αποστράγγιση, το θρεπτικό διάλυμα αντικαταστάθηκε με αέριο άζωτο, έτσι ώστε οι στήλες να παραμείνουν αναερόβιες. Σε κάθε χρονικό διάστημα επαναπλήρωσης, η συγκέντρωση NO_3^- και οξικού άλατος στα υγρά των πόρων αυξήθηκε βραδέως διατηρώντας παράλληλα σταθερές την ιοντική ισχύ και τη συγκέντρωση ασβεστίου (Ca_2^+) του προστιθέμενου διαλύματος. Η στήλη TRX-1 υποβλήθηκε σε επεξεργασία για 10 εβδομάδες, η TRX-2 σε επεξεργασία για 20 εβδομάδες, η TRX-3 σε επεξεργασία για 30 εβδομάδες και η SS-1 σε επεξεργασία για 12 εβδομάδες πριν από τη δοκιμή.

Εργαστηριακές Δοκιμές

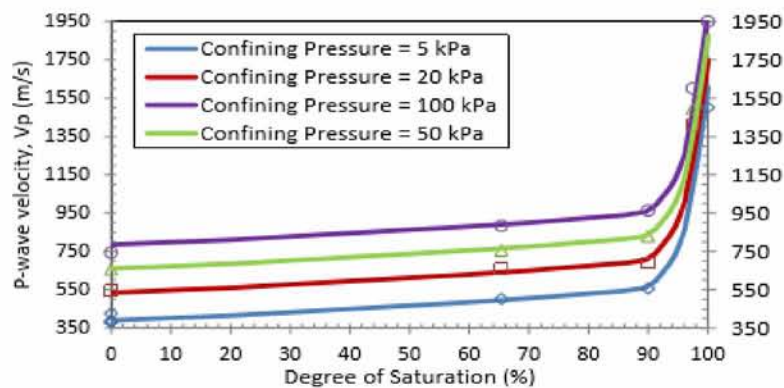
Οι ερευνητές πραγματοποίησαν τριαξονικές δοκιμές διάτμησης (δοκιμές CU) και δοκιμές απλής κυκλικής διάτμησης. Για τα αβιοτικά πειράματα, και συγκεκριμένα για τις δοκιμές απλής κυκλικής διάτμησης, εφαρμόστηκε ενεργή θλιπτική τάση 50 kPa και τα δείγματα κορέστηκαν με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων ($S = 100\%$, $B > 0,95$). Αφού κορέστηκαν, εφαρμόστηκε ενεργή κατακόρυφη τάση 100 kPa και τα δείγματα αφέθηκαν να

στερεοποιηθούν για 30 λεπτά. Στις δοκιμές απλής διάτμησης, εφαρμόστηκαν 4 διαφορετικές θλιπτικές τάσεις (5, 20, 50 και 100 kPa). Στα πειράματα που συμμετείχαν μικροοργανισμοί και συγκεκριμένα στις τριαξονικές δοκιμές CU, οι στήλες κορέστηκαν υπό πίεση ($B > 0.95$), με την εφαρμογή τάσης 100 kPa και η στήλη SS-1 κορέστηκε με αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων ($B > 0,95$) σε κατακόρυφη ενεργή τάση 50 kPa πριν από τις δοκιμές. Τέλος, στην κυκλική δοκιμή CU μετά τον κορεσμό, η στήλη SS-1 υποβλήθηκε σε κατακόρυφη ενεργή τάση 100 kPa για 30 λεπτά πριν την έναρξη της κυκλικής δοκιμής.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

Για τα αβιοτικά πειράματα:

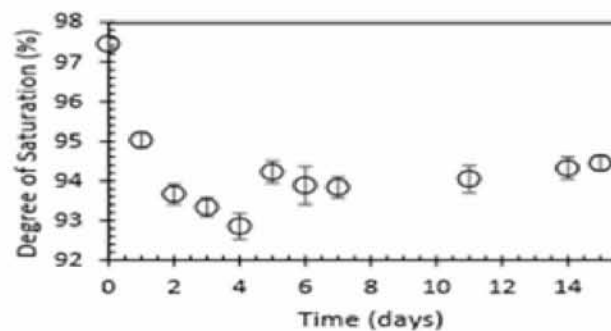
- Οι δοκιμές απλής κυκλικής διάτμησης έδειξαν σημαντικές αυξήσεις στην κυκλική αντίσταση (άνω του 40%) μέσω πολύ μικρών ποσοτήτων αποκορεσμού (1-3%).
- Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων P, μετρήθηκε σε 4 διαφορετικές τάσεις και παρέμεινε σταθερή για $S < 90\%$, ενώ αυξήθηκε ταχέως για $S > 90\%$ (Σχήμα 4.39).



Σχήμα 4.39 Σχέση μεταξύ της ταχύτητας κυμάτων P, του βαθμού κορεσμού και της επιβαλλόμενης τάσης (Kavazanjian 2015).

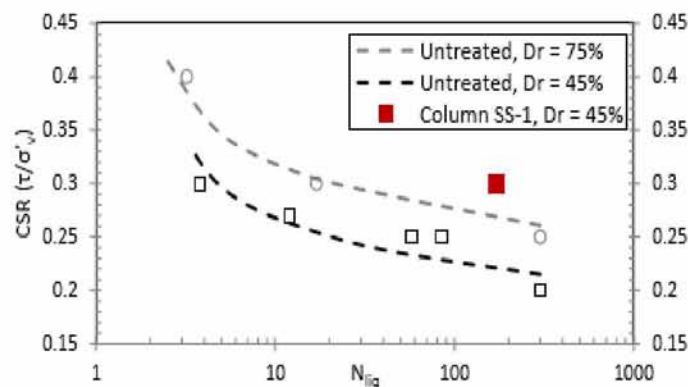
Για τα πειράματα στα οποία συμμετείχαν μικροοργανισμοί:

- Οι μετρήσεις των P-κυμάτων, της στήλης SS-1, έδειξαν ότι ο αποκορεσμός, που προκλήθηκε από το βιοαέριο, άρχισε αμέσως με την έναρξη της απονιτροποίησης (Σχήμα 4.40). Αυτή η ταχεία εκτόπιση αερίου και ρευστού ακολουθήθηκε από μια περίοδο κατά την οποία ο βαθμός κορεσμού παρέμεινε σχετικά σταθερός, καθώς το αέριο συνέχιζε να συσσωρεύεται στο σάκο χωρίς να αλλάζει το επίπεδο υγρού. Μετά από περίπου 9 έως 11 ημέρες, τα επίπεδα υγρών στους σάκους διάλυσης άρχισαν να μειώνονται αργά.



Σχήμα 1.40 Απεικόνιση του βαθμού κορεσμού στη στήλη SS-1 για έναν κύκλο θεραπείας (Kavazanjian, 2015).

- Οι τριαξονικές δοκιμές έδειξαν αυξήσεις της αντοχής σε διάτμηση και διαστολή λόγω της καθίζησης των ανθρακικών αλάτων.
- Οι δοκιμές απλής κυκλικής διάτμησης της στήλης SS-1 έδειξαν αύξηση κατά 40% της κυκλικής αντίστασης μετά από επεξεργασία σε σχετική πυκνότητα $D_r=45\%$, σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο κορεσμένο έδαφος σε σχετική πυκνότητα $D_r=45\%$ και $D_r = 75\%$ (Σχήμα 4.41).



Σχήμα 4.41 Κυκλική αντοχή της επεξεργασμένης και μη επεξεργασμένης, κορεσμένης άμμου (Kavazanjian, 2015).

- Για τη στήλη SS-1, οι μετρήσεις του υγρού που μεταφέρθηκε στους σάκους, έδειξαν ότι ο βαθμός κορεσμού κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου θεραπείας μειώθηκε μεταξύ 89% και 96%. Η μείωση του βαθμού κορεσμού, συνέβαλλε στη μείωση του φαινομένου της ρευστοποίησης.

(δ) Το 2016 οι Kavazanjian, Lin, Suleiman και Brown δημοσίευσαν άρθρο με θέμα τη μηχανική συμπεριφορά άμμων, βελτιωμένων από τη μέθοδο MICP. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν οι άμμοι Ottawa 50/70 και 20/30.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Διαμορφώθηκαν 4 δείγματα της άμμου Ottawa 50/70 και 3 δείγματα της άμμου Ottawa 20/30 με τη μέθοδο MICP. Επίσης, διαμορφώθηκαν 2 δείγματα από τη κάθε άμμο για τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης. Τα τριαξονικά δείγματα (διαμέτρου 72 mm, ύψους 145 mm) παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαβροχής. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε στα δείγματα πίεση και ο μέσος λόγος κενών μετά τη στερεοποίηση ήταν 0,74 και 0,65 για τα δείγματα άμμου 50/70 και 20/30, με σχετικές πυκνότητες 41% και 39%, αντίστοιχα. Στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, τα δείγματα (διαμέτρου 70mm και ύψους 60mm) παρασκευάστηκαν με την ίδια μέθοδο (μέθοδο διαβροχής) στην κυψελίδα περίπου στις ίδιες σχετικές πυκνότητες με τα τριαξονικά δείγματα (40%). Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ορθή τάση 10 kPa στο άνω πώμα.

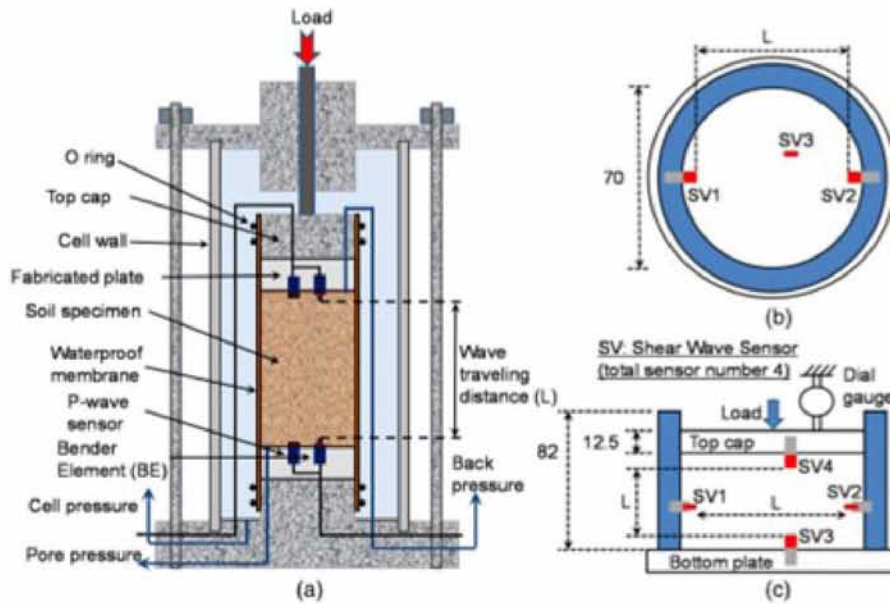
Για τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε το στέλεχος βακτηρίων *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859). Οι βακτηριακές καλλιέργειες αναπτύχθηκαν σε ένα ειδικό μέσο, συλλέχθηκαν στην εκθετική φάση ανάπτυξής τους και στη συνέχεια αποθηκεύτηκαν σε 15% γλυκερόλη στους -86 °C. Πριν από κάθε πείραμα, αναπτύσσονταν βακτηρίδια, από το κατεψυγμένο απόθεμα, στο μέσο ανάπτυξης μέσα σε έναν επωαστήρα με ανάδευση στις 170 r.p.m. και στους 33 °C. Τα βακτηρίδια συλλέχθηκαν σε οπτική πυκνότητα OD₆₀₀ 0,8-1,2, φυγοκεντρήθηκαν δύο φορές για 30 λεπτά σε πυκνότητα 1×10^8 κύτταρα /mL και αποθηκεύτηκαν στους 4 °C έως τη χρήση τους. Το ρυθμιστικό διάλυμα tris και το μέσο ανάπτυξης χρησιμοποιήθηκαν για να αναπτυχθούν τα βακτηριακά κύτταρα.

Τα αποθηκευμένα βακτηρίδια εισήχθησαν σε ουρία, αναδεύτηκαν και εγχύθηκαν μέσω μιας περισταλτικής αντλίας στα δείγματα, από τον πυθμένα, με ρυθμό ροής 10 mL/min. Το

διάλυμα βακτηρίων-ουρίας διατηρήθηκε μέσα στο δείγμα για 7 ώρες. Μετά από 7 ώρες, πραγματοποιήθηκαν πέντε επαναλήψεις έγχυσης του διαλύματος τσιμεντοποίησης, σε διαστήματα 3 ωρών. Το διάλυμα ουρίας περιείχε 20 gr ουρίας/L, 2.12gr NaHCO₃/L, 20gr NH₄Cl/L, 3 gr/ L Bacto θρεπτικού ζωμού. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης αποτελούνταν από μέσο ουρίας και συγκέντρωση χλωριούχου ασβεστίου είτε 0.1 M είτε 0.3 M.

Εργαστηριακές Δοκιμές

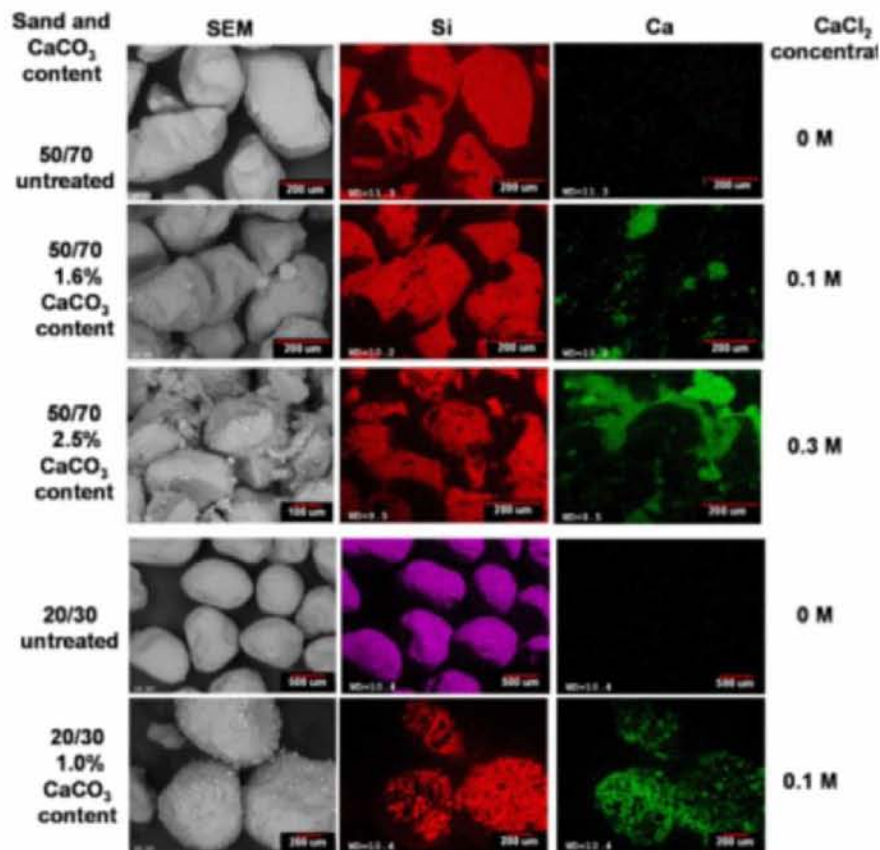
Μετά την εφαρμογή της μεθόδου MICP στα δείγματα, εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές CD (Σχήμα 4.42). Πραγματοποιήθηκε κορεσμός των τριαξονικών δειγμάτων με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων έως ότου ο δείκτης B να φθάσει την τιμή 0.95. Μετά τον κορεσμό, εφαρμόστηκε στα δείγματα ρυθμό φόρτισης 0,5 mm/min έως ότου η αξονική καταπόνηση να φτάσει το 10%. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης μετρήθηκε η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων S και P, με τη βοήθεια ενσωματωμένων αισθητήρων. Η δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης διεξήχθη σε τρεις διαφορετικές θλιπτικές πιέσεις (25, 50 και 100 kPa). Οι δοκιμές διεξήχθησαν επίσης σε συγκεντρώσεις χλωριούχου ασβεστίου 0,1 και 0,3 M, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν δείγματα με τη μέση περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο να κυμαίνεται από 1,5 έως 2,5% για την άμμο 50 /70 και από 1 έως 1,6% για την 20 /30. Στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, μετά την βελτίωση των δειγμάτων με τη μέθοδο MICP υπό κατακόρυφη τάση 10 kPa, η κατακόρυφη ορθή τάση αυξήθηκε σταδιακά στις τιμές 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1.000, 1.200, 1.400 και 1.600 kPa και έπειτα μειώθηκε με τον ίδιο ρυθμό. Κάθε προσαύξηση φόρτισης και αποφόρτισης διήρκεσε 15 λεπτά. Οι μετρήσεις ταχύτητας κύματος S και μετατόπισης καταγράφηκαν στο τέλος κάθε σταδίου φόρτισης. Επίσης, εκτελέστηκαν αναλύσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και φασματοσκοπία ακτινών X με διασπορά ενέργειας. Τέλος, λήφθηκαν μετρήσεις του περιεχομένου του ανθρακικού ασβεστίου.



Σχήμα 4.42 Εξοπλισμός εργαστηριακών δοκιμών: (α) τριαξονικό κελί (β) κάτοψη της συσκευής μονοδιάστατης συμπίεσης. (γ) πλάγια όψη της συσκευής μονοδιάστατης συμπίεσης (Kavazanjian, 2016).

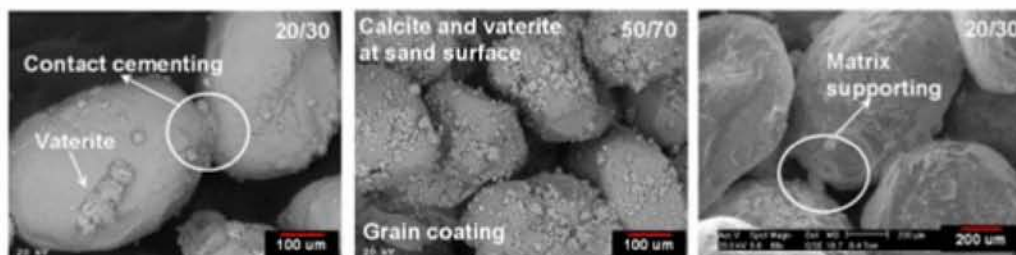
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Σε αντίθεση με τις προηγούμενες έρευνες, τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών έδειξαν ότι ακόμη και 1% περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο αύξησε την αντοχή του εδάφους.
- Οι εικόνες SEM και EDS των δειγμάτων των άμμων Ottawa 50/70 και 20/30 που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με συγκέντρωση χλωριούχου ασβεστίου 0.1M (περιεκτικότητα σε CaCO_3 1.6% για την 50/70 και 1% για την 20/30) έδειξαν ότι το ανθρακικό ασβέστιο καθιζάνει στις επαφές σωματιδίων και καλύπτει τις επιφάνειές τους. Καθώς η συγκέντρωση χλωριούχου ασβεστίου αυξήθηκε από 0,1 M σε 0,3 M, οι εικόνες των επεξεργασμένων δειγμάτων της Ottawa 50/70 έδειξαν αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο από 1,6 σε 2,5% (Σχήμα 4.43).



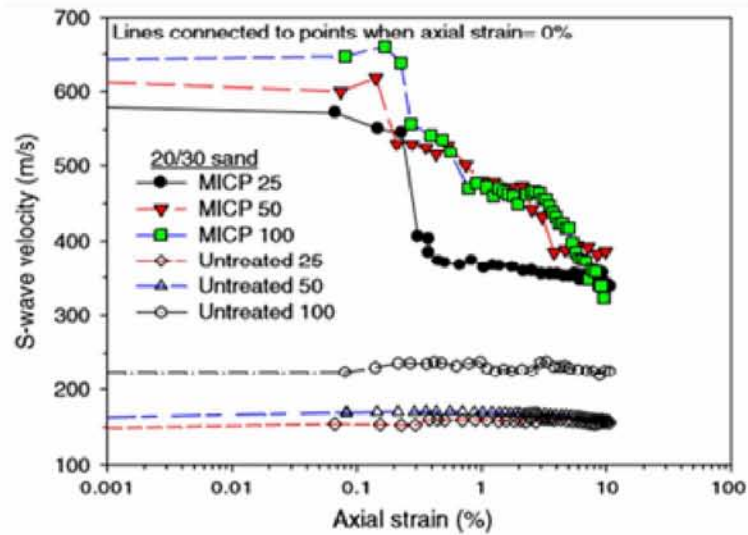
Σχήμα 4.43 Εικόνες SEM και EDS για τις άμμους Ottawa 50/70 και 20/30, για τις διάφορες συγκεντρώσεις CaCl₂ (Kavazanjian, 2016).

- Οι εικόνες SEM έδειξαν ότι το ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να εναποτεθεί στις επαφές σωματιδίων, να επικαλύψει τους κόκκους και να αναπτυχθεί μέσα στα κενά των πόρων των σωματιδίων (Σχήμα 4.44).



Σχήμα 4.44 Εικόνες SEM με τις κατανομές του ανθρακικού ασβεστίου στους κόκκους άμμου (Kavazanjian, 2016).

- Αν και δεν υπήρχε άμεση σχέση μεταξύ της ταχύτητας κύματος S και της περιεκτικότητας σε CaCO₃, η ταχύτητα αυξήθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO₃ (Σχήμα 4.45). Κατά τη διάρκεια της διάτμησης στις τριαξονικές δοκιμές, η ταχύτητα κύματος S παρουσίασε μείωση με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.45 Μέτρηση της ταχύτητα κύματος S σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για την άμμο Ottawa 20/30, επεξεργασμένη με τη μέθοδο MICP και με συγκέντρωση χλωριούχου ασβεστίου 0.1 M (Kavazanjian, 2016).

- Κατά τη διάρκεια των τριαξονικών δοκιμών, η μέγιστη αποκλίνουσα τάση της άμμου 20/30 (με περιεκτικότητα 1% σε CaCO_3) και της 50/70 (με περιεκτικότητα 1,6%) αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 93% και 171% αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δείγματα που δεν είχαν υποστεί επεξεργασία. Η βελτίωση με τη μέθοδο MICP, αύξησε σημαντικά τη διαστολή και των δύο άμμων. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο, προκλήθηκε υψηλότερη διαστολή σε μικρές παραμορφώσεις και χαμηλότερη διαστολή σε μεγάλες καταπονήσεις.
- Τα τριαξονικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας των επεξεργασμένων άμμων με τη μέθοδο MICP ελεγχόταν από την περιεκτικότητα σε CaCO_3 και οι άμμοι ήταν λιγότερο ευαίσθητες στην αύξηση της ενεργής θλιπτικής τάσης σε σχέση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, καθώς η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο αυξανόταν, η δυσκαμψία των δειγμάτων αυξανόταν και καθίσταται λιγότερο ευαίσθητη στην αύξηση της ορθής τάσης.
- Αν και η άμμος 20/30 είχε χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο σε σύγκριση με την άμμο 50/70, όταν υποβλήθηκε σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου συγκέντρωσης 0,1 M, η αύξηση της ταχύτητας κύματος S, η μέγιστη διατμητική αντοχή και η συνοχή ήταν υψηλότερες. Αυτό υποδεικνύει ότι η

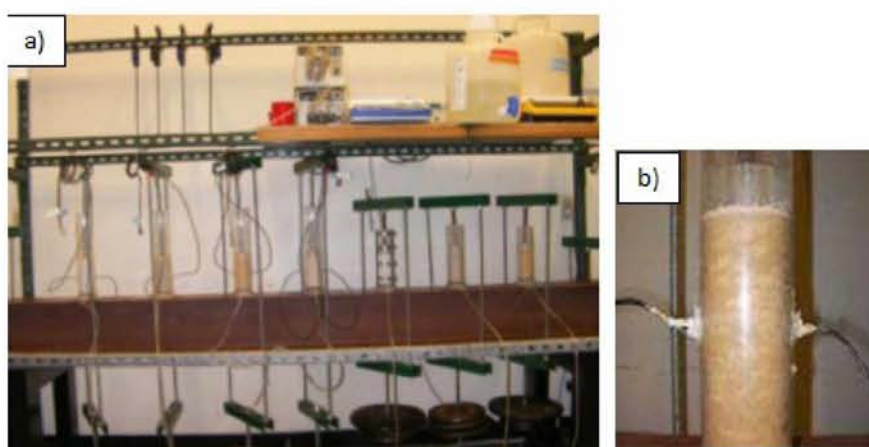
αντοχή και η δυσκαμψία των επεξεργασμένων άμμων ελέγχονται από άλλους παράγοντες εκτός από τη μέση περιεκτικότητα σε CaCO_3 .

4.2.4 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης των άμμων Ottawa, Cameco και Aquarium Rock με τη χρήση βακτηρίων

Ο Daniel Alvarado (2009) εξέτασε την εφαρμογή της μεθόδου MICP στη βελτίωση του εδάφους σε δείγματα ακόρεστης άμμου. Η μελέτη του επικεντρώθηκε στη προσπάθεια αύξησης της διατμητικής αντοχής του δείγματος και της συνολικής αντίστασης έναντι ρευστοποίησης. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν 2 δοκιμές διήθησης.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Το διάλυμα ζωμού (ubroth) αποτελούνταν από συγκεντρώσεις NaHCO_3 , NH_4Cl , CaCl_2 , ουρίας και Bacto (εμπορικό μίγμα διαφόρων θρεπτικών ουσιών) και χρησιμοποιήθηκε για την τροφή των βακτηρίων. Για την πρώτη δοκιμή διήθησης (test 1), η οποία διήρκησε 4 ημέρες, το εδαφικό δείγμα τοποθετήθηκε στην κυψέλη της συσκευής και στη συνέχεια, στο πλαίσιο φόρτισης. Τέλος, ένας σωλήνας εκροής συνδέθηκε και η δοκιμή ήταν έτοιμη να ξεκινήσει. Στη δεύτερη δοκιμή διήθησης (test 2), στην οποία τοποθετήθηκαν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, χρησιμοποιήθηκαν οι άμμοι Ottawa 20-30 και 50-70 καθώς και Aquarium Rock. Χρησιμοποιήθηκε επίσης η άμμος Cameco, η οποία είναι μια καλά διαβαθμισμένη άμμος. Εκτός από τις 4 κυψέλες με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, εγκαταστάθηκαν ακόμα 3 κυψέλες, προκειμένου να μετρηθούν οι ρυθμοί ροής και το pH.



Σχήμα 4.46 a) Διάταξη για τη δεύτερη δοκιμή διήθησης b) Τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στην κυψέλη (Alvarado,2009).

Εργαστηριακές Δοκιμές

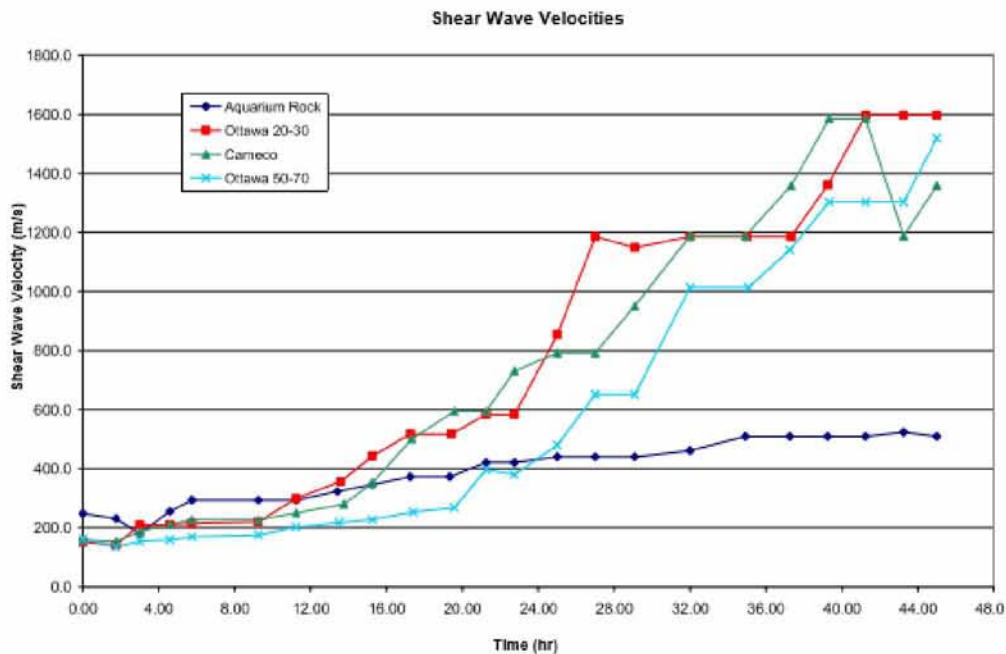
Η δοκιμή 1 διήρκεσε πάνω από 4 ημέρες. Την 1^η ημέρα διηθήθηκαν τα βακτήρια και το ubroth. Μετά από 3 ώρες διήθησης, διηθήθηκε ένα νέο διάλυμα ubroth 1 (χωρίς βακτήρια). Μιάμιση ώρα μετά την εισαγωγή του ubroth 1, η εκροή χύθηκε μέσω του δείγματος και αφέθηκε να διηθηθεί για άλλες 1,5 ώρες. Μετά από το διάστημα 3 ωρών, μια νέα παρτίδα ubroth 2 διηθήθηκε με τον ίδιο τρόπο. Αυτή η διαδικασία συνεχίστηκε μέχρι τις 12 π.μ. όπου ολοκληρώθηκε η 1^η ημέρα της δοκιμής. Η 2^η ημέρα ξεκίνησε στις 6 π.μ., και παρατηρήθηκε η ίδια διαδικασία με εξαίρεση τα βακτήρια και το ubroth. Αυτή η διαδικασία συνεχίστηκε και την 3^η και 4^η ημέρα με τον ίδιο τρόπο. Στο τέλος της 4^{ης} ημέρας, το δείγμα απομακρύνθηκε από τη συσκευή, καθαρίστηκε και παρατηρήθηκε η καθίζηση του ασβεστίτη. Το τελικό βήμα ήταν η συλλογή των δεδομένων των εκροών και ο προσδιορισμός του pH.

Η δοκιμή διήθησης 2, ήταν πανομοιότυπη με τη δοκιμή διάρκειας 4 ημερών (test 1), με την προσθήκη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στις κυψέλες και το χρόνο δοκιμής να μειώνεται στις 48 ώρες.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

Τα ακόλουθα αποτελέσματα προέκυψαν από τη δοκιμή 2:

- Το pH των τεσσάρων ειδών άμμων κυμαινόταν μεταξύ 8.5 και 9.3, μετά από περίπου 20 ώρες θεραπείας. Οι παραπάνω τιμές pH δημιουργούν το ιδανικό περιβάλλον για τα βακτήρια, έτσι ώστε να προκληθεί καθίζηση του ασβεστίτη.
- Ένα ρευστοποιήσιμο έδαφος είναι οποιοδήποτε έδαφος έχει ταχύτητα διατμητικών κυμάτων μικρότερη από 500 m/s. Η εφαρμογή της μεθόδου MICP, στα 4 είδη εδαφών, οδήγησε σε ταχύτερες διατμητικών κυμάτων μεγαλύτερες από 500 m/s, σε περίπου 25 ώρες θεραπείας και συνεπώς αυξήθηκε η αντίσταση έναντι ρευστοποίησης (Σχήμα 4.47). Η υψηλότερη ταχύτητα (1600 m/s), εμφανίστηκε στην Ottawa 20-30, η οποία χαρακτηρίζεται ως μια κακώς διαβαθμισμένη άμμος.



Σχήμα 4.47 Η διατημητική ταχύτητα κύματος συναρτήσει του χρόνου για όλα τα εδαφικά δείγματα της δοκιμής 2 (Alvarado, 2009).

- Από τις αναλύσεις SEM παρατηρήθηκε ομοιόμορφη κατανομή του ασβεστίτη σε όλο το δείγμα της άμμου Ottawa 50-70 και μεγαλύτερο ποσοστό ασβεστίτη στις επαφές των σωματιδίων.

4.2.5 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης των άμμων Itterbeck και ποταμού με τη χρήση βακτηρίων

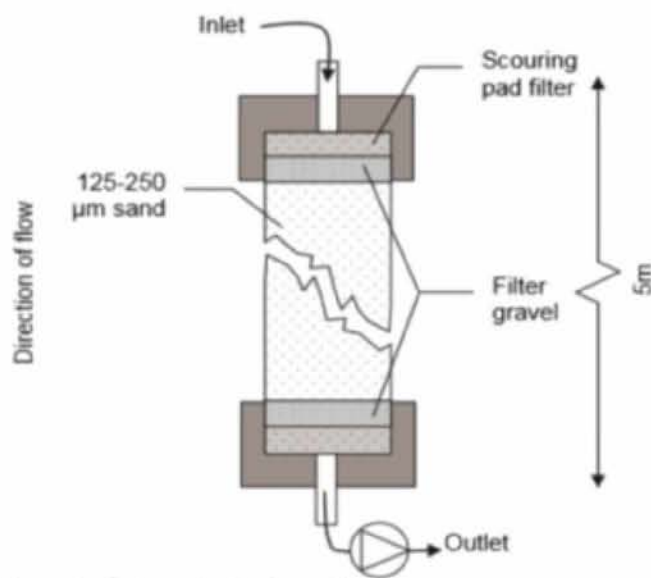
Ο Leo Van Paassen (2009), στη διατριβή του, ασχολήθηκε με το βιοένεμα και τη βελτίωση του εδάφους με τη μέθοδο MICP. Η έρευνα αυτή στοχεύει στην εδαφική βελτίωση και στην αύξηση της κλίμακας των πειραμάτων για πρακτικές εφαρμογές.

Αρχικά, εφαρμόστηκε η μέθοδος της βιοενεμάτωσης για τη μελέτη της αντοχής μιας στήλης άμμου ύψους 5m. Η άμμος υποβλήθηκε σε επεξεργασία με βακτήρια και αντιδραστήρια υπό συνθήκες που ήταν ρεαλιστικές για εφαρμογές πεδίου. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε λεπτόκοκκη άμμος Itterbeck (χαρακτηριστικά μεγέθους κόκκου: $d_{10} = 110 \mu\text{m}$, $d_{50} = 165 \mu\text{m}$, $d_{90} = 275 \mu\text{m}$).

Μέθοδος Προετοιμασίας

Ο μικροοργανισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν το *Sporosarcina pasteurii* DSM 33 (DSMZ, FRG). Η καλλιέργεια του μικροοργανισμού διεξήχθη υπό αερόβιες συνθήκες σε μέσο που περιέχει 20 g L^{-1} εκχύλισμα ζυμομύκητα και 10 g L^{-1} NH_4Cl , σε pH 9. Οι μικροοργανισμοί αναπτύχθηκαν σε πρώιμη στατική φάση (τα θρεπτικά συστατικά καταναλώθηκαν από το μέσο) και φυλάχθηκαν στους $4 \text{ }^\circ\text{C}$ για 48 ώρες πριν από τη χρήση.

Η άμμος Itterbeck συσκευάστηκε σε σωλήνα PVC μήκους 5m (εσωτερική διάμετρος: 66 mm). Στην κορυφή και τη βάση της στήλης, τοποθετήθηκαν φίλτρα ακολουθούμενα από στρώση χαλκιού, πάχους 8 cm (Σχήμα 4.48). Η συσκευασία πραγματοποιήθηκε υπό την παρουσία νερού, για την απομάκρυνση του αέρα.



Σχήμα 4.48 Σχηματική διάταξη της στήλης άμμου των 5m (Van Paassen, 2009).

Για την παρακολούθηση της πίεσης του νερού μέσα στη στήλη, τοποθετήθηκαν πέντε μετατροπείς πίεσης στα 0, 0.5, 1.2 και 3 m από την κορυφή της στήλης. Επιπλέον, έγινε δειγματοληψία του υγρού των πόρων από 10 σημεία της στήλης (0.25, 0.5 και στη συνέχεια σε διαστήματα 0.5 m έως 4.5 m). Στην κορυφή της στήλης συνδέθηκε μια δεξαμενή που περιείχε τα εγχυόμενα υγρά (νερό, βακτήρια, CaCl_2 , ουρία κ.λπ.) και στο κάτω μέρος της στήλης τοποθετήθηκε μία αντλία για τη ρύθμιση της ταχύτητα εκροής. Η αρχική υδραυλική αγωγιμότητα ήταν $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$. Τα επόμενα πειράματα διεξήχθησαν με σταθερό ρυθμό ροής έγχυσης περίπου $0,35 \text{ L h}^{-1}$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Εργαστηριακές Δοκιμές

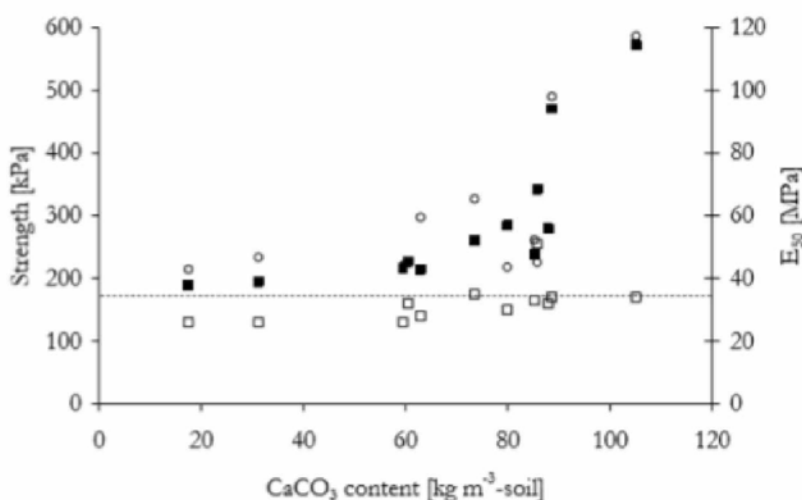
Στη συνέχεια ελήφθησαν δείγματα από τη στήλη άμμου, φυγοκεντρήθηκαν και το υπερκείμενο μεταφέρθηκε σε καθαρό σωλήνα, ο οποίος καταψύχθηκε στους $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ εν αναμονή της ανάλυσης. Στα δείγματα μετρήθηκαν η συγκέντρωση ουρεάσης και οι συγκεντρώσεις αμμωνίου (ανάλυση Nessler) και ασβεστίου. Η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων μετρήθηκε με ένα μανόμετρο σχήματος υ, υπό κανονικές συνθήκες (298 K, 1 atm). Ένα δείγμα άμμου αναμιχθηκε με 2 mL HCL συγκέντρωσης 2 M. Η ανάμιξη οδήγησε σε διάλυση οξέος του δείγματος και σε παραγωγή ποσότητας αερίου CO_2 . Μετά την αποσυναρμολόγηση της στήλης, η στήλη κόπηκε σε διατομές 25 cm. Η αποκλίνουσα τάση (q) και η δυσκαμψία των τμημάτων προσδιορίστηκαν με τριαξονικές δοκιμές CD υπό πίεση 50 kPa. Το πορώδες προσδιορίστηκε από την υγρή και ξηρή πυκνότητα των δειγμάτων μετά τη δοκιμή αντοχής. Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) μετρήθηκε με δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου. Η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων συγκρίθηκαν με εκείνες ενός μη επεξεργασμένου δείγματος το οποίο παρασκευάστηκε χωριστά σε παρόμοια ξηρή πυκνότητα.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Σύμφωνα με την ανάλυση Nessler, προέκυψε ότι στην κορυφή της στήλης χρησιμοποιήθηκε το 75-80% της ουρίας (μέχρι τα 2,85 m), αφήνοντας μόνο το 20-25% για το κάτω μέρος. Συνεπώς, η κατακρήμνιση του CaCO_3 στο κάτω μέρος της στήλης ήταν σημαντικά χαμηλότερη απ' ότι στο πάνω.
- Παρατηρήθηκε ότι η δραστικότητα ουρεάσης στη στήλη μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου.
- Στη μέγιστη περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο, το πορώδες της επεξεργασμένης στήλης μειώθηκε στο 90% του πορώδους της μη επεξεργασμένης. Παρατηρήθηκε γραμμική σχέση μεταξύ του πορώδους και του περιεχόμενου CaCO_3 κατά μήκος της στήλης των 5 m.

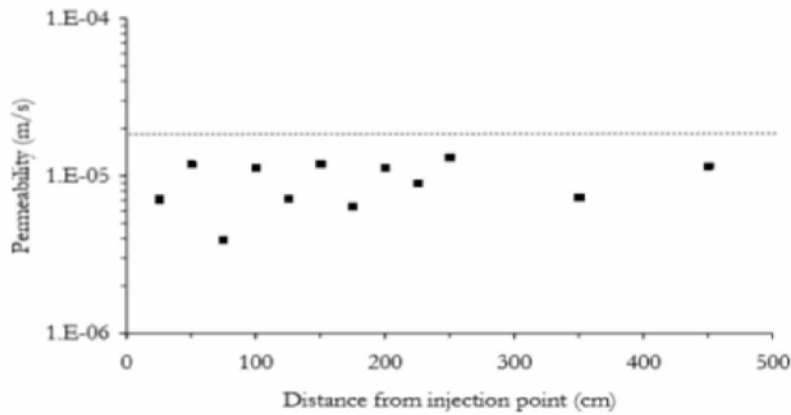
- Οι χαμηλές συγκεντρώσεις CaCO_3 δε βελτίωσαν σημαντικά την αντοχή των δειγμάτων. Σε υψηλότερα περιεχόμενα CaCO_3 υπήρξε σημαντική βελτίωση της αντοχής. Η υψηλότερη αντοχή στη στήλη μετρήθηκε στην ίδια θέση με τη μέγιστη ποσότητα CaCO_3 , σε απόσταση περίπου 1 m από το σημείο έγχυσης. Η δυσκαμψία εμφάνισε παρόμοια μορφή με την αντοχή.

- Η παραμένουσα αντοχή του επεξεργασμένου δείγματος, η οποία μετρήθηκε μετά την αστοχία, ήταν ανεξάρτητη από την αύξηση ή μη, της περιεκτικότητας σε CaCO_3 και συγκρίσιμη με την αντοχή του μη επεξεργασμένου δείγματος. Η παραμένουσα αντοχή του επεξεργασμένου δείγματος ήταν παρόμοια με εκείνη του μη επεξεργασμένου (Σχήμα 4.49).



Σχήμα 4.49 Η θλιπτική αντοχή (■), η δυσκαμψία E₅₀ (○), η παραμένουσα αντοχή του υλικού μετά την αστοχία (□) συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο. Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην αντοχή της στερεοποιημένης, μη επεξεργασμένης άμμου, στην ίδια πυκνότητα (Van Paassen, 2009).

- Η διαπερατότητα μειώθηκε ελαφρά σε ολόκληρη τη στήλη μετά τη θεραπεία, αλλά η επίδραση ήταν σταθερή και δεν φάνηκε να σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε CaCO_3 (Σχήμα 4.50).



Σχήμα 4.50 Το προφίλ της διαπερατότητας μετά τη θεραπεία συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έγχυσης. Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην αρχική διαπερατότητα της στήλης, πριν τη θεραπεία (Van Paassen, 2009).

Γενικό Συμπέρασμα:

- Σε όλο το μήκος της στήλης (των 5m), ανιχνεύτηκε κατακρημνισμένο ανθρακικό ασβέστιο, υποδεικνύοντας ότι τα βακτήρια και τα αντιδραστήρια ήταν παρόντα σε όλες τις θέσεις. Η μέγιστη εφικτή απόσταση έγχυσης δεν φαίνεται να περιορίζεται στα 5 m και μπορεί να είναι δυνατή η εφαρμογή της σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Η επόμενη πρόκληση ήταν η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας σε μεγαλύτερους όγκους εδαφών. Στο επόμενο κεφάλαιο τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κλίμακα 1m³ και 100m³.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Πειράματα σε κιβώτια με όγκο 1m³: Διεξήχθησαν δύο πειράματα σε κιβώτια, με φίλτρα αποστράγγισης στις πλευρές. Τα φίλτρα αποστράγγισης καλύπτονταν από γεώφασμα που εμπόδιζε τη μεταφορά άμμου. Για τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι άμμου. Στο πρώτο δοχείο χρησιμοποιήθηκε άμμος από τον ποταμό Meuse, η οποία ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη, μεσαίου κόκκου (d_{50} : 0,367 mm, d_{60}/d_{10} : 1,6) και αποτελούνταν κυρίως από χαλαζιακή άμμο (93%). Στο δεύτερο δοχείο, χρησιμοποιήθηκε άμμος από λατομείο, η άμμος Itterbeck. Η άμμος αυτή ήταν ομοιόμορφη, λεπτής έως μέσης κοκκομετρίας (d_{50} : 0.166 mm, d_{60}/d_{10} : 1.64) και κυρίως χαλαζιακή (97%).

Καλλιεργήθηκαν αερόβια υπό αποστειρωμένες συνθήκες, 100 L βακτηριακού εναιωρήματος σε θρεπτικό μέσο που περιείχε εκχύλισμα ζύμης (20 g L⁻¹), χλωριούχο

αμμώνιο (10 gL^{-1}) και χλωριούχο νικέλιο σε συγκέντρωση $10 \text{ }\mu\text{M}$. Παρασκευάστηκαν διαλύματα αντιδραστηρίων που περιείχαν ισομοριακές συγκεντρώσεις ουρίας και CaCl_2 (0.5M). Τα υγρά εγχύθηκαν διαδοχικά με σταθερό ρυθμό ροής στο κέντρο και αποστραγγίστηκαν κατά μήκος των πλευρών του κιβωτίου.

Πειράματα σε κιβώτια με όγκο 100 m^3 : Ένα κουτί από σκυρόδεμα (100m^3) πληρώθηκε (υπό κορεσμένες συνθήκες) με λεπτόκοκκη άμμο Itterbeck. Κατασκευάστηκε επιτόπου ένας βιοαντιδραστήρας, στον οποίο καλλιεργήθηκαν τα βακτηρίδια (*Sporosarcina pasteurii* DSM33) σε θρεπτικό ζωμό των 5 m^3 , υπό μη στείρες συνθήκες, αλλά χρησιμοποιώντας ένα αξονικά καλλιεργημένο ενοφθάλμισμα 100 L . Τα υγρά εγχύθηκαν διαδοχικά διαμέσου τριών φρεατίων έγχυσης και μεταφέρθηκαν σε απόσταση 5 m κατά μήκος του κουτιού άμμου προς τρία φρεάτια εκχύλισης (Σχήμα 4.51). Ο συνολικός ρυθμός ροής ήταν περίπου $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ με υδραυλική κλίση περίπου $0,3 \text{ m m}^{-1}$.



Σχήμα 4.51 Πειραματική διάταξη βιοενεμάτωσης μεγάλης κλίμακας (100m^3). Στο δεξί τμήμα του κιβωτίου άμμου βρίσκονται τα 3 φρεάτια έγχυσης ενώ στο αριστερό τα 3 φρεάτια εκχέλισης (Van Paassen, 2009).

Εργαστηριακές Δοκιμές

Πειράματα σε κιβώτια με όγκο 1m^3 : Η πρώτη δοκιμή (1m^3) έδειξε ότι η πλειονότητα των βακτηριδίων ξεπλένεται και η εναπομείνουσα δραστικότητα ουρεάσης μειώνεται εκθετικά με το χρόνο. Μετά από 50 ημέρες, στις οποίες $3,5 \text{ m}^3$ διαλύματος αντιδραστηρίου διοχετεύθηκαν με 8 κύκλους, περίπου 200 mol CaCO_3 δημιουργήθηκαν μέσα στην άμμο, με το 12% των αντιδραστηρίων να μετατρέπεται. Η εκσκαφή του σώματος της άμμου έδειξε ότι ελάχιστο CaCO_3 διατηρήθηκε στην άμμο, εκτός από ορισμένες περιοχές κατά μήκος των

πλευρών, κυρίως στις γωνίες και στον πυθμένα. Η μετατροπή πιθανότατα περιοριζόταν σε εκείνες τις περιοχές όπου τα βακτηρίδια δεν είχαν ξεπλυθεί. Τα βακτηρίδια είτε διατηρήθηκαν, λόγω σχετικά χαμηλής ταχύτητας ροής, είτε παγιδεύτηκαν στο γεώφασμα.

Στο δεύτερο πείραμα (1 m^3) η πίεση έγχυσης αυξήθηκε σταδιακά μέχρι 1 bar. Αρκετές φορές παρατηρήθηκε πτώση πίεσης κατά την έκπλυση, υποδεικνύοντας την πιθανότητα φραγής στους κόκκους της άμμου. Μετά από τρεις επανειλημμένες ενδείξεις φραγής, εμφανίστηκαν φρεάτια μεταφοράς άμμου στην επιφάνεια, υποδεικνύοντας τις επιθυμητές διαδρομές ροής. Η ροή σταμάτησε και τοποθετήθηκε ένα πώμα για την αποφυγή περαιτέρω διαρροής. Η δραστηριότητα ουρεάσης μειώθηκε σταδιακά στο χρόνο. Κατά τη διάρκεια της εικοστής ημέρας η συγκέντρωση αμμωνίου στο εκρέον, που παρήχθη σε 48 ώρες, έφθασε μόνο τα 0,4 M, υποδεικνύοντας ότι η μέση δραστηριότητα ουρεάσης είχε πέσει κάτω από $5 \text{ mM ουρίας h}^{-1}$. Την εικοστή πέμπτη ημέρα εγχύθηκαν 50 L επιπρόσθετου βακτηριακού εναιωρήματος, αυξάνοντας τη δραστηριότητα ουρεάσης, η οποία στη συνέχεια του πειράματος μειώθηκε σε μικρό βαθμό. Μετά από 40 ημέρες, στις οποίες εισήχθησαν 4000 L διαλύματος τσιμεντοποίησης, σχηματίστηκαν περίπου 1000 mol CaCO_3 έπειτα από ποσοστό υδρόλυσης της εγχυόμενης ουρίας, ίσο με 50%. Οι δοκιμές κώνου διείσδυσης έδειξαν αντοχές υψηλότερες από 5 MPa, σε μικρό βάθος. Η αφαίρεση της χαλαρής άμμου από την κορυφή του κιβωτίου εμφάνισε μια ισχυρά τσιμεντοποιημένη επιφάνεια. Παρατηρήθηκαν διαδρομές με υψηλά ποσοστά CaCO_3 , στη μία πλευρά του κιβωτίου, παράλληλες με την κατεύθυνση ροής, η οποία ήταν κάθετη προς τα φίλτρα αποστράγγισης. Το άνοιγμα του κιβωτίου έδειξε ότι το τσιμεντοποιημένο δείγμα είχε σφαιρικό σχήμα (Σχήμα 4.52). Περαιτέρω ανασκαφή έδειξε ότι οι περιοχές κοντά στο σημείο έγχυσης και κατά μήκος των κύριων αξόνων ροής, περιείχαν λιγότερο CaCO_3 , γεγονός που αποδόθηκε στη χαμηλότερη συγκράτηση βακτηρίων ή κρυστάλλων σε αυτές τις περιοχές, λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας και χαμηλότερου χρόνου υδραυλικής παραμονής. Στο κάτω μισό, προς τις γωνίες, του σώματος άμμου βρέθηκε η υψηλότερη ποσότητα CaCO_3 . Η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή κυμαινόταν μεταξύ 0 και 9 MPa, σε συσχέτιση με την περιεκτικότητα σε CaCO_3 .



Σχήμα 4.52 Το σφαιρικό σχήμα του τσιμεντοποιημένου σώματος άμμου 1m³ (Van Paassen, 2009).

Πειράματα σε κιβώτια με όγκο 100m³: Για το πείραμα στο κιβώτιο των 100 m³, οι γεωφυσικές μετρήσεις έδειξαν σημαντική αύξηση στη μέση δυσκαμψία (σχεδόν δεκαπλάσια) γύρω από τα σημεία έγχυσης, μετά από 1 ημέρα έκπλυσης. Οι δοκιμές κώνου διείσδυσης έδειξαν ότι μετά από αρκετές ημέρες έκπλυσης η αντίσταση του κώνου γύρω από τη φρεατική επιφάνεια ήταν μεγαλύτερη από 5 MPa. Εντός 12 ημερών, εισήχθησαν 100 m³ διαλύματος τσιμεντοποίησης σε συγκεντρώσεις ουρίας 1M και CaCl₂ 1M. Η μέτρηση της συγκέντρωσης αμμωνίου στην εκροή έδειξε ότι τουλάχιστον το 80% της ουρίας υδρολύθηκε. Μετά την επεξεργασία, εισήχθη νερό στην άμμο και λήφθηκε τμήμα από την τσιμεντοποιημένη άμμο. Στο τσιμεντοποιημένο σώμα άμμου, περίπου 40 m³, οι γραμμές ροής ήταν διακριτές, ιδιαίτερα κοντά στα φρεάτια εκχύλισης (Σχήμα 4.53). Η τσιμεντοποίηση κατά μήκος των γραμμών ροής ήταν ομοιογενής, ενώ κάθετα προς τις γραμμές ροής, το περιεχόμενο CaCO₃ διέφερε σημαντικά.



Σχήμα 4.53 Το τσιμεντοποιημένο σώμα άμμου των 100m³ (Van Paassen, 2009).

Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία πολλών τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, από τους οποίους διανοίχτηκαν πυρήνες για να ελεγχθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι. Η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή κυμάνθηκε από 0 έως 12 MPa και έδειξε συσχέτιση με την ξηρή πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε CaCO₃.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Τα πειράματα κλίμακας έδειξαν σημαντική τσιμεντοποίηση σε μεγάλη απόσταση από τα σημεία έγχυσης, αποδεικνύοντας την επιτυχή εφαρμογή της τεχνικής αυτή στην ενίσχυση του εδάφους. Ωστόσο, η περιεκτικότητα σε CaCO₃ και οι γεωτεχνικές ιδιότητες δεν ήταν τόσο ομοιογενώς κατανομημένες (τόσο στη μακρο-κλίμακα όσο και στη μικρο-κλίμακα).

Στο επόμενο κεφάλαιο μελετήθηκαν οι σχέσεις μεταξύ της ποσότητας CaCO₃ και των παραμέτρων μηχανικής, όπως η πυκνότητα, η αντοχή, η δυσκαμψία, το πορώδες και η διαπερατότητα. Για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων, λήφθηκαν δείγματα από το πείραμα κλίμακας πεδίου των 100m³, για τη βιο-τσιμεντοποιημένη άμμο.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Από το σώμα της άμμου, που προετοιμάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, συλλέχθηκαν πέντε δείγματα (όγκου 0,1-0,5 m³), για εργαστηριακές αναλύσεις. Από τα δείγματα αυτά

διατηρήθηκαν 64 πυρήνες οι οποίοι προετοιμάστηκαν για δοκιμές UCS και δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης και 17 πυρήνες για δοκιμές BTS (Brazilian Tensile Strength). Τα δείγματα δοκιμάστηκαν 2-12 εβδομάδες μετά τη συλλογή τους.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Διεξήχθησαν δοκιμές UCS σε 45 πυρήνες. Η πλευρική παραμόρφωση (ϵ_{rad}) μετρήθηκε στο μέσο ύψος των πυρήνων, ενώ η αξονική παραμόρφωση (ϵ_{ax}) σε όλο το μήκος του πυρήνα. Η ογκομετρική παραμόρφωση υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{ax} + 2\epsilon_{rad}$$

Διεξήχθησαν τριαξονικές δοκιμές σε 19 πυρήνες, εκ των οποίων στους 7 εφαρμόστηκε τάση 100 kPa (4 υπό στραγγιζόμενες και 3 υπό αστράγγιστες συνθήκες) και στους υπόλοιπους 12 εφαρμόστηκε τάση 500 kPa (7 υπό στραγγιζόμενες και 5 υπό αστράγγιστες συνθήκες). Αρχικά, τα δείγματα ήταν πλήρως κορεσμένα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε στερεοποίηση και μετά τη στερεοποίηση ξεκίνησε η δοκιμή συμπίεσης. Κατά τη διάρκεια των στραγγιζόμενων δοκιμών μετρήθηκαν η αξονική δύναμη και οι αξονικές και ογκομετρικές μετατοπίσεις, ενώ η πίεση του νερού των πόρων και η τάση διατηρήθηκαν σταθερές. Κατά τη διάρκεια των αστράγγιστων δοκιμών, μετρήθηκαν η αξονική δύναμη, η αξονική μετατόπιση και η πίεση πόρων, ενώ η ογκομετρική μετακίνηση και η τάση διατηρήθηκαν σταθερές. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές BTS σε 17 πυρήνες.

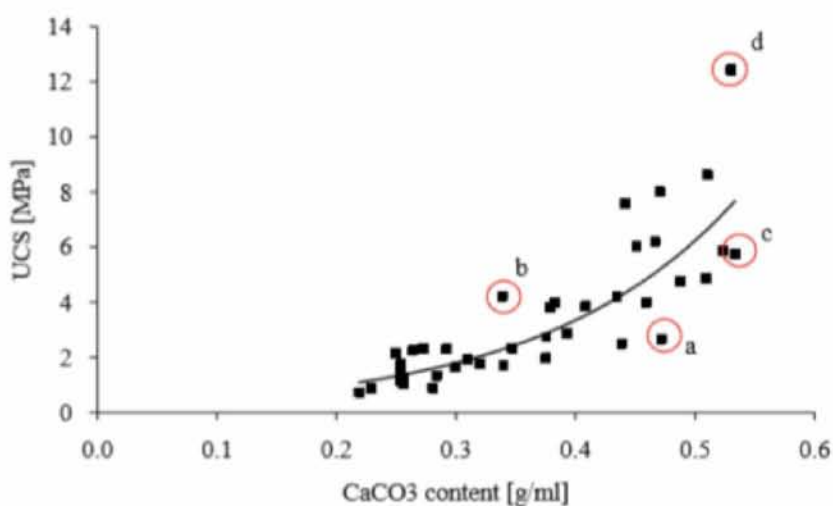
Μετά τη δοκιμή, οι πυρήνες, συμπεριλαμβανομένων των σπασμένων θραυσμάτων και των χαλαρών κόκκων, τοποθετήθηκαν στο φούρνο για τουλάχιστον 24 ώρες στους 105 °C. Έπειτα, οι ξηροί πυρήνες ζυγίστηκαν. Με τις μετρήσεις διαμέτρου και μήκους, που έγιναν πριν από τη δοκιμή αντοχής, υπολογίστηκε η ξηρή πυκνότητα. Από την μετρούμενη ξηρή πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε CaCO₃, υπολογίστηκε η αρχική ξηρή πυκνότητα, όπως δίνεται και από την επόμενη εξίσωση:

$$\rho_{ini} = \rho_{dry} - f_{CaCO_3}$$

Η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο μετρήθηκε με ένα μανόμετρο, υπό κανονικές συνθήκες (25 °C, 1 bar).

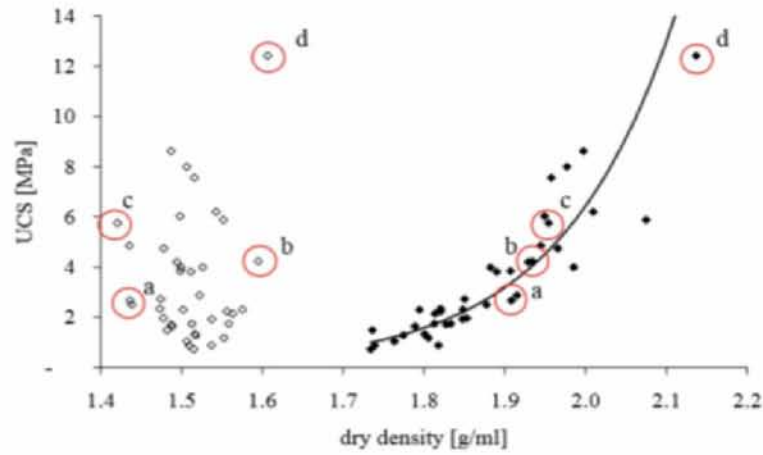
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Τα συλλεχθέντα δείγματα έδειξαν σημαντική μεταβλητότητα ως προς το μέγεθος των κόκκων, το μέγεθος των πόρων, το πορώδες ή την πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε CaCO_3 , παρόλο που οι πυρήνες ήταν σχετικά ομοιογενείς.
- Η συσχέτιση μεταξύ της UCS και της περιεκτικότητας σε CaCO_3 , έδειξε μεγάλη διακύμανση ($R^2 = 0,77$), η οποία προκάλεσε αρκετά αντιφατικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, αν και ο πυρήνας a είχε μεγαλύτερη ποσότητα CaCO_3 από τον πυρήνα b, είχε μικρότερη αντοχή ή ενώ οι πυρήνες c και d είχαν παρόμοια ποσότητα CaCO_3 , διέφεραν σημαντικά ως προς την αντοχή (Σχήμα 4.54).



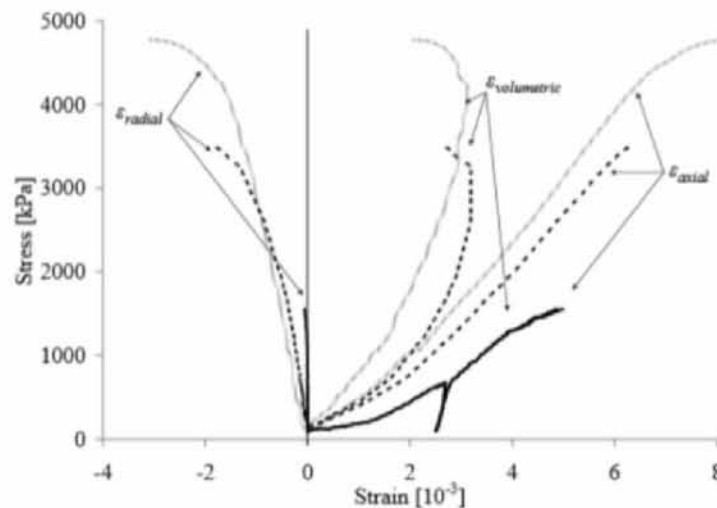
Σχήμα 4.54 Συσχέτιση μεταξύ της αντοχής UCS και του περιεχόμενου CaCO_3 . Τα σημεία a, b, c και d αντιστοιχούν σε διαφορετικούς πυρήνες δειγματοληψίας (Van Paassen, 2009).

- Η γραφική παράσταση της UCS συναρτήσει της ξηρής πυκνότητας έδειξε πολύ καλύτερη συσχέτιση, σε σχέση με την περιεκτικότητα σε ασβεστίτη. Οι υψηλότερες αντοχές για τους πυρήνες b και d σε σύγκριση με τους πυρήνες a και c ήταν αποτέλεσμα υψηλότερων αρχικών πυκνοτήτων (Σχήμα 4.55). Η τελική ξηρή πυκνότητα είναι σημαντικότερος δείκτης για την αντοχή από ότι είναι η περιεκτικότητα σε CaCO_3 . Κατά συνέπεια, μια πιο πυκνά συσκευασμένη άμμος, χρειάζεται λιγότερη τσιμεντοποίηση από μια λιγότερο πυκνή άμμο για να επιτύχει την ίδια αντοχή. Ωστόσο, η συσχέτιση μεταξύ UCS και ξηρής πυκνότητας δείχνει σημαντική διακύμανση ($R^2 = 0,84$).



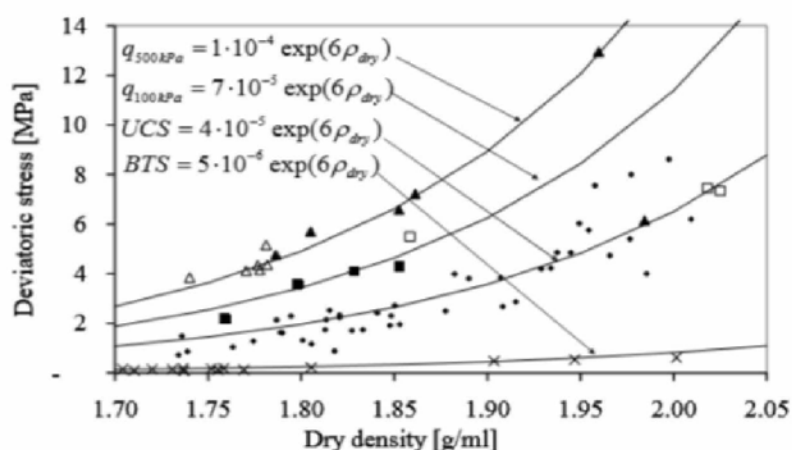
Σχήμα 4.55 Σχέση UCS-ξηρής πυκνότητας πριν (○) και μετά (•) τη βιοενεμάτωση. Τα σημεία a, b, c και d αντιστοιχούν σε διαφορετικούς πυρήνες δειγματοληψίας (Van Paassen, 2009).

- Από τις δοκιμές συμπίεσης προέκυψε ότι οι τσιμεντοποιημένοι πυρήνες άμμου εμφάνιζαν ψαθυρή και δύσκαμπτη συμπεριφορά ως προς τις παραμορφώσεις. Για όλες τις δοκιμές συμπίεσης, η μέγιστη αντοχή επιτεύχθηκε σε αξονική παραμόρφωση μικρότερη του 10 %. Ειδικά για τις δοκιμές UCS, η ακτινική παραμόρφωση ήταν αμελητέα για αξονική παραμόρφωση που κυμαινόταν από 2-4 ‰, με αποτέλεσμα οι λόγοι Poisson να τείνουν στο μηδέν (Ένα ιδεατό υλικό με $\nu = 0$ θα μπορούσε να επιμηκύνεται προς μία κατεύθυνση, χωρίς να συρρικνώνονται οι διαστάσεις του προς τις εγκάρσιες κατευθύνσεις) (Σχήμα 4.56).



Σχήμα 4.56 Σχέση τάσης-καταπόνησης (αξονική, ακτινική, ογκομετρική παραμόρφωση) για πυρήνες με συγκρίσιμες πυκνότητες, στους οποίους ασκήθηκαν τάσεις 0 kPa (μαύρες καμπύλες), 100 kPa (διακεκομμένες γραμμές) και 500 kPa (γκρι γραμμές), (Van Paassen, 2009).

- Παρόμοια με τις δοκιμές UCS, καταγράφηκαν οι μέγιστες αντοχές των τριαξονικών και δοκιμών BTS συναρτήσει της ξηρής πυκνότητας, δείχνοντας συσχέτιση μεταξύ πυκνοτήτων 1700 και 1900 kg/m³ (Σχήμα 4.57). Λόγω της υψηλής δυσκαμψίας της άμμου προκλήθηκε μικρή ογκομετρική παραμόρφωση και συνεπώς μικρή αύξηση του νερού των πόρων σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, αμελητέες διαφορές στις καμπύλες της μέγιστης αντοχής των στραγγιζόμενων και αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών και στην προσομοίωσή τους με μία νέα κοινή καμπύλη.



Σχήμα 4.57 Η μέγιστη αντοχή για UCS (●), τριαξονική σε πίεση 100 kPa (■ / □) και πίεση 500 kPa (▲ / Δ) και δοκιμές BTS (x) σε συνάρτηση με την ξηρή πυκνότητα. Οι τριαξονικές δοκιμές διεξήχθησαν υπό στραγγιζόμενες (■/▲) και αστράγγιστες (□/Δ) συνθήκες (Van Paassen, 2009).

- Η αντοχή που παρατηρήθηκε στην επεξεργασμένη άμμο ήταν σημαντικά αυξημένη σε σύγκριση με εκείνη της μη επεξεργασμένης άμμου. Στην επεξεργασμένη άμμο, για ξηρή πυκνότητα από 1700-1900 kg m⁻³, η συνοχή και η γωνία τριβής αυξήθηκαν από 270-540 kPa και από 40-58°, αντίστοιχα. Οι δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης στη μη επεξεργασμένη άμμο, με ξηρή πυκνότητα μεταξύ 1400 και 1670 kg m³, έδειξαν ότι δεν υπήρχε συνοχή και ότι η γωνία τριβής ήταν μεταξύ 32 και 39°. Ομοίως, παρατηρήθηκε αύξηση της δυσκαμψίας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO₃ (ή με την αύξηση της ξηρής πυκνότητας).

4.2.6 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης των άμμων Ottawa, Nevada και άμμων ασβεστίτη, άστριου και οξειδίου του σιδήρου με τη χρήση βακτηρίων

Η Brina Mortensen-Montoya, σε συνεργασία με τους Haber, Dejong, Caslake και Nelson (2012), μελέτησε την επίδραση της μικροβιακής βιο-τσιμεντοποίησης στη συμπεριφορά, τη βελτίωση και την απόδοση της άμμου.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Αναπτύχθηκε το βακτήριο *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859), στους 30 °C, σε διάλυμα αμμωνίου-ζυμομύκητα ($0,13 \text{ mol L}^{-1}$ ρυθμιστικό διάλυμα Tris, 10 g L^{-1} $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ και 20 g L^{-1} εκχύλισμα ζύμης). Το μέσο ανάπτυξης εμβολιάστηκε με την καλλιέργεια *S. pasteurii* και επώαστηκε αερόβια στους 30 °C, για περίπου 40 ώρες. Οι καλλιέργειες φυγοκεντρήθηκαν στα 4000 g για 20 λεπτά σε όγκους 15 mL, πλύθηκαν με μέσο ανάπτυξης και φυγοκεντρήθηκαν για δεύτερη φορά. Τα βακτηρίδια αποθηκεύτηκαν στα φιαλίδια φυγοκέντρησης στους 4 °C για 14 ημέρες. Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαλύματα που περιείχαν ουρία, NH_4Cl και CaCl_2 , σε διαφορετικές αναλογίες (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2 Χημικές συνταγές για τα μέσα τσιμεντοποίησης (Montoya, 2012).

Chemical	Sterilization	Chemical Concentration (mmol l^{-1}) ¹		
		7:4:1 [333 mM] ²	7:7:1 [333 mM]	1:1:1 [50 mM]
Urea	Filter	333	333	50
NH_4Cl	Autoclave	187	374	56.7
NaHCO_3	Autoclave, dry ³	25.2	25.2	3.8
Nutrient Broth	Autoclave	3 g l^{-1}	3 g l^{-1}	0
CaCl_2	Autoclave	50	50	50

1: Recipe name legend: [urea]:[NH_4Cl]:[CaCl_2] [urea]

2: Recipe from Stocks-Fischer et al 1999

3: The NaHCO_3 was autoclaved as dry powder (instead of as a liquid media) and then dissolved into autoclaved DI water. This process was done to avoid off-gassing CO_2 .

Το βασικό έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η άμμος πυριτίας Ottawa 50-70, η οποία χαρακτηρίζεται ως λεπτόκοκκη, κακώς διαβαθμισμένη άμμος. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της ορυκτολογίας, εκτός από την άμμο πυριτίας, μελετήθηκαν και οι εξής άμμοι: ασβεστίτη (offshore Australian coast, Le Gendre), άστριος (US Silica, quarry in Montpelier, VA), οξείδιο σιδήρου (beach at the Cliff House, San Francisco) και ακόμα μια πυριτική άμμος, η άμμος Νεβάδα επειδή είχε παρόμοιο μέγεθος κόκκου με την άμμο οξειδίου του σιδήρου. Οι άμμοι μαζί με τα χαρακτηριστικά τους μεγέθους κόκκων παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 Οι άμμοι που χρησιμοποιήθηκαν και τα χαρακτηριστικά τους (Montoya,2012).

Mineralogy	Sand	Average Soil Particle Diameter D_{50} (mm)	Coefficient of Uniformity, C_u^*	Coefficient of Curvature, C_c^*
Silica (Quartz)	Ottawa 50-70	0.22	1.4	0.9
Calcite	Le Gendre	1.0	2.2	0.9
Iron oxide	SF Beach	0.12	1.5	0.9
Feldspar	Aplite .250	0.27	2.0	0.9
Silica (Quartz)	Nevada	0.12	2.2	1.1

*: The coefficient of uniformity is a shape parameter for the grain size distribution curve. A smaller C_u value represents a more uniform distribution of soil particle diameters. (Holtz and Kovacs 1981)

+: The coefficient of curvature is another shape parameter for the grain size distribution curve. (Holtz and Kovacs 1981)

Εργαστηριακές Δοκιμές

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα υπό κλειστές συνθήκες (Batch tests), για να αξιολογηθεί η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στη μεταβολική δραστηριότητα του *S. pasteurii*. Η μεταβολή της αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση της ουρεολυτικής δραστηριότητας των βακτηρίων. Οι δοκιμές αυτές αποτελούνταν από το υγρό χημικό μέσο (200 mL) και τα βακτηρίδια, ενώ δε χρησιμοποιήθηκε έδαφος στα πειράματα αυτά. Για καθεμία από τις τρεις αναλογίες του υγρού μέσου, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές εις τριπλούν και τελικά υπολογίστηκε ένας μέσος όρος. Κάθε δοχείο περιείχε μια μαγνητική ράβδο ανάδευσης και τοποθετήθηκε σε μια πλάκα ανάδευσης για να διατηρηθεί το υγρό μέσο ομοιόμορφα αναμεμιγμένο. Λαμβάνοντας μετρήσεις αγωγιμότητας και pH κάθε 10 λεπτά για περίπου 1 ώρα. Χρησιμοποιήθηκαν δοκιμές στήλης εδάφους (Rigid cell soil column tests). Οι άκαμπτες κυψέλες κατασκευάστηκαν από ακρυλικό με αναλογίες (ύψους: διαμέτρου) 2: 1 και 1: 1 και πληρώθηκαν από την άμμο Ottawa 50-70, σε σχετικά χαλαρή κατάσταση. Η κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου μετρήθηκε με την ταχύτητα διατμητικών κυμάτων με τη χρήση 2 πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, τα οποία ήταν εγκατεστημένα αντιδιαμετρικά, στο μέσο ύψος της στήλης, για την παρακολούθηση της αλλαγής στη δυσκαμψία εξαιτίας της τσιμεντοποίησης του ανθρακικού ασβεστίου. Στη συνέχεια το δείγμα εδάφους φορτίστηκε από μια κατακόρυφη τάση 100 kPa. Στην άκαμπτη κυψέλη, το έδαφος κορέσθηκε με απιονισμένο νερό, το οποίο εισήχθη στην κυψέλη μέσω περισταλτικής αντλίας. Έπειτα, εγχύθηκε διάλυμα το οποίο περιείχε βακτήρια και μέσο τσιμεντοποίησης, χωρίς CaCl_2 . Μόλις εισήχθησαν τα βακτήρια στο δείγμα εδάφους, η περισταλτική αντλία απενεργοποιήθηκε για 4 έως 6 ώρες για να επιτρέψει τη διοχέτευσή τους στα κενά των πόρων και την συγκόλληση των σωματιδίων του εδάφους. Στη συνέχεια, κάθε 3 ώρες, εγχύονταν το μέσον τσιμεντοποίησης με CaCl_2 . Τα μέσα τσιμεντοποίησης

εγχύθηκαν στις στήλες εδάφους σε δύο διαφορετικές ταχύτητες: 2 mL/min και 10 mL/min. Οι συμπληρωματικές θεραπείες συνέχισαν να εγχέονται μέχρι την επίτευξη μίας επιθυμητής αύξησης στην ταχύτητα διατμητικών κυμάτων.

Οι μετρήσεις της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων έγιναν με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Καθώς αυξάνεται η δυσκαμψία ενός εδαφικού δείγματος, λόγω της κατακρήμνισης του ανθρακικού ασβεστίου, αυξάνεται και η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων. Το διεγερμένο στοιχείο προκάλεσε ένα ελαστικό κύμα διάτμησης στο έδαφος, το οποίο διαδόθηκε μέσω του εδάφους και μετέδωσε μηχανική τάση στο αντίθετο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Ο χρόνος διαδρομής του κύματος προσδιορίστηκε με σύγκριση της έναρξης του μεταδιδόμενου κύματος με την έναρξη του λαμβανόμενου κύματος. Η απόσταση μεταξύ των στοιχείων ήταν γνωστή, επομένως, η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων μπορούσε να υπολογιστεί (Lee και Santamarina 2005).

Η δραστηριότητα ουρεάσης προσδιορίστηκε από την αλλαγή της αγωγιμότητας των μέσων, λόγω της δημιουργίας αμμωνίας και ανθρακικών ιόντων (Whiffin 2004). Σε κάθε μέτρηση αγωγιμότητας, συλλέχθηκαν υδατικά δείγματα, διηθήθηκαν (για να απομακρυνθεί η βιομάζα) και αποθηκεύτηκαν στους 4 °C. Τα δείγματα αραιώθηκαν για να προσδιοριστεί η ποσότητα της ουρίας που παραμένει στο μέσο χρησιμοποιώντας μια μέθοδο χρωματομετρικής ανάλυσης ουρίας (Knorst et al., 1997). Η δραστηριότητα ουρεάσης παρακολούθηθηκε τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες συνθήκες.

Μετά τη δοκιμή, μετρήθηκε η μάζα του ανθρακικού ασβεστίου. Η ξηρανθείσα στο φούρνο μάζα του εδαφικού δείγματος, από την άκαμπτη κυψέλη, μετρήθηκε πριν και μετά από την έκπλυση με οξύ (5M HCL). Το διάλυμα οξέος ξεπλύθηκε πολλές φορές, μέσω του κόσκινου No.200, επιτρέποντας στα διαλυμένα άλατα να ξεπλυθούν από το έδαφος. Η διαφορά στις δύο μετρούμενες μάζες ελήφθη ως μάζα ανθρακικού ασβεστίου.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αναερόβιες συνθήκες ανάπτυξης των βακτηρίων δεν παρεμπόδιζαν τη δραστηριότητα της ουρεάσης. Επίσης, οι αναερόβιες καλλιέργειες έδειξαν περίπου 1,5 με 2 φορές μεγαλύτερη αύξηση της αγωγιμότητας σε σχέση με τις αερόβιες, κατά την ίδια χρονική περίοδο.

- Η αύξηση της συγκέντρωσης του χλωριούχου αμμωνίου είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του pH, για μια δεδομένη ποσότητα υδρολυμένης ουρίας.
- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο η συγκέντρωση του χλωριούχου αμμωνίου όσο και η ταχύτητα έγχυσης επηρέασαν την ταχύτητα τσιμεντοποίησης. Η στήλη εδάφους με τον ταχύτερο ρυθμό (10 mL/min), υπήρχε αυξημένος ρυθμός κατακρήμνισης, σε σύγκριση με το βραδύτερο ρυθμό έγχυσης (2 mL/min). Ο ρυθμός έγχυσης επηρέαζε επίσης την κατανομή της καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου κατά μήκος της διαδρομής έγχυσης. Επιπλέον, η στήλη εδάφους με την υψηλότερη συγκέντρωση χλωριούχου αμμωνίου παρουσίασε βραδύτερο ρυθμό τσιμεντοποίησης, για δεδομένο ρυθμό έγχυσης.
- Όλες οι τσιμεντοποιημένες στήλες άμμου παρουσίασαν αύξηση στην ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι οι άμμοι με παρόμοιο μέγεθος σωματιδίων (άστριος – ασβεστίτης - Ottawa 50-70 και άμμος σιδήρου – Nevada) έδειξαν παρόμοια αύξηση στην ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων.
- Αποδείχτηκε ότι όσο περισσότερες ήταν οι επαφές των σωματιδίων, εντός της εδαφικής μήτρας, τόσο μεγαλύτερη ήταν η επίδραση της κατακρήμνισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι χονδρόκοκκες και καλά διαβαθμισμένες άμμοι είχαν ταχύτερο ρυθμό κατακρήμνισης από τα λεπτότερα και κακώς διαβαθμισμένα εδάφη. Επιπλέον, τα πολύ χονδρόκοκκα και τα πολύ λεπτόκοκκα εδάφη, χρειάστηκαν πολύ μεγαλύτερο χρόνο για να αυξήσουν την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων.

Σε επόμενο κεφάλαιο της διατριβής, προσδιορίζεται η αντοχή των τσιμεντοποιημένων άμμων από την MICP διαδικασία. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στην τριαξονική δοκιμή ήταν Ottawa 50-70, τα χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.4):

Πίνακας 4.4 Τα χαρακτηριστικά της άμμου Ottawa 50-70 (Montoya, 2012).

Sand	D ₅₀ (mm)	C _u	C _c	G _s	e _{min}	e _{max}	Mineralogy	Shape
Ottawa 50-70	0.22	1.4	0.9	2.65	0.55	0.87	Quartz	Round

Μέθοδος Προετοιμασίας

Τα τριαξονικά δείγματα παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο ξηρής συμπύκνωσης (dry pluviation) σε σχετικές πυκνότητα 40% (χαλαρό) και 100% (πυκνό). Τα τριαξονικά δείγματα είχαν διάμετρο 72 mm και λόγο διαστάσεων 2: 1. Εφαρμόστηκε στα δείγματα πίεση 100 kPa (vacuum), έτσι ώστε το δείγμα να έχει το επίπεδο της ενεργής τάσης που απαιτείται για τη διάτμηση (στερεοποίηση). Μετά τη στερεοποίηση, μετρήθηκε η σχετική πυκνότητα. Έπειτα, η τριαξονική κυψέλη γεμίστηκε με νερό και εφαρμόστηκε με αργό ρυθμό ισότροπη τάση 100 kPa, ενώ το δείγμα εξαερώθηκε για να εξασφαλιστεί ότι η τάση δε θα γινόταν ποτέ μεγαλύτερη από 100 kPa.

Η διαδικασία ανάπτυξης των βακτηρίων (*S. Pasteurii*) καθώς και τα μέσα τσιμεντοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που ακολουθούν, ταυτίζονται με εκείνα του προηγούμενου κεφαλαίου.

Εργαστηριακές Δοκιμές

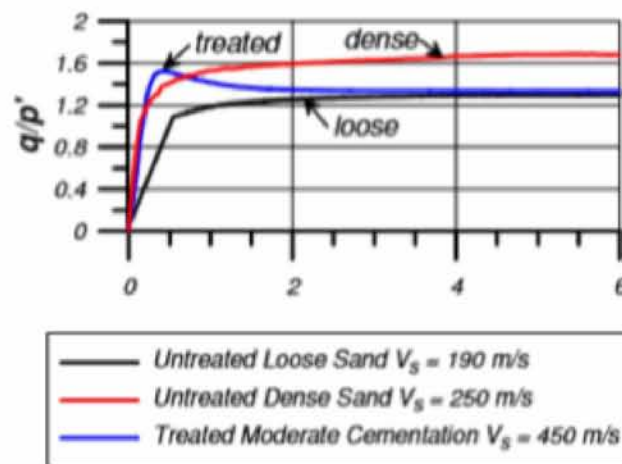
Πραγματοποιήθηκαν ενέσεις του μέσου τσιμεντοποίησης σε ρυθμό 10 mL/min, μέσω περισταλτικής αντλίας, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα διατμητικών κυμάτων. Τα δείγματα στη συνέχεια κορέσθηκαν, με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων (B-value 0,95). Η ισότροπη ενεργή τάση διατηρήθηκε σταθερή στα 100 kPa μέχρι να αρχίσει η διάτμηση. Στις στραγγιζόμενες δοκιμές διατηρήθηκε σταθερή η τάση 100 kPa, ενώ στις αστράγγιστες αναπτύχθηκε η πίεση του νερού των πόρων κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Στις τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες, ο ρυθμός διάτμησης ήταν 2,5% ανά ώρα έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση των 20%. Κατά τη διάρκεια της διάτμησης η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση του βαθμού τσιμεντοποίησης.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

Για τις αστράγγιστες δοκιμές:

- Μια μέτρια τσιμεντοποιημένη άμμος, με ταχύτητα διατμητικού κύματος 450 m/s, παρουσίασε αυξημένη διατμητική αντίσταση κατά περίπου 3 φορές, έναντι του χαλαρού μη επεξεργασμένου δείγματος, σε αξονικές καταπονήσεις από 10-15%. Το έδαφος που υπέστη επεξεργασία με MICP εμφάνισε επίσης μεγαλύτερο λόγο μέγιστης τάσης (q / p')

σε χαμηλές καταπονήσεις, μετά την οποία ο λόγος τάσης παρουσίασε έναν κλάδο χαλάρωσης (μια μείωση στην τιμή), μεγαλύτερο από τον λόγο του μη επεξεργασμένου χαλαρού δείγματος. Ο λόγος μέγιστης τάσης του μετρίως τσιμεντοποιημένου δείγματος ήταν συγκρίσιμος με αυτόν του πυκνού δείγματος άμμου. Ωστόσο, το επεξεργασμένο έδαφος μετά την επίτευξη της μέγιστης τάσης, εμφάνισε έναν κλάδο χαλάρωσης, ενώ ο λόγος του πυκνού εδάφους, μετά την επίτευξη της μέγιστης τάσης, συνέχισε να αυξάνεται (Σχήμα 4.58). Παρ' όλα αυτά η διατμητική αντίσταση και στα δυο δείγματα αυξήθηκε (strain hardening).



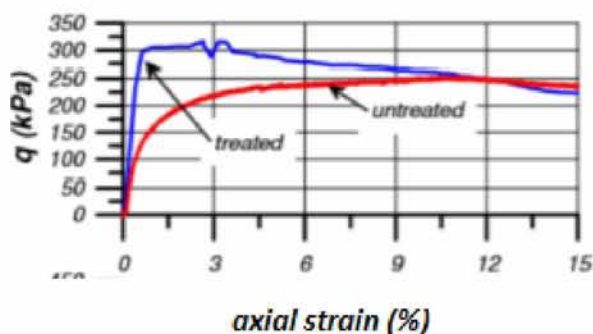
Σχήμα 4.58 Διάγραμμα λόγου q/p' – αξονικής καταπόνησης στις αστράγγιστες δοκιμές (Montoya, 2012).

- Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων της πυκνής άμμου αυξήθηκε με τη διάτμηση λόγω της αύξησης του p' . Ωστόσο, η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων της επεξεργασμένης άμμου παρέμεινε σχετικά σταθερή επειδή ο ρυθμός τσιμεντοποίησης μειώθηκε ταυτόχρονα με την αύξηση του p' .
- Οι δοκιμές έδειξαν ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή (q) σε μικρές καταπονήσεις (αξονική καταπόνηση μικρότερη από 3%) και ο μέγιστος λόγος τάσεως (q/p') αυξήθηκαν με την αύξηση της τσιμεντοποίησης, ενώ η μέγιστη τιμή του (λόγου) επιτεύχθηκε σε μικρότερες παραμορφώσεις. Σε μεγάλες καταπονήσεις υπήρχε μια μετάβαση από τον κλάδο σκλήρυνσης στον κλάδο χαλάρωσης, όσον αφορά τις παραμορφώσεις και καθώς αυξάνεται η τσιμεντοποίηση.

- Η συμπεριφορά τάσης-καταπόνησης έδειξε ότι τα δείγματα με υψηλά επίπεδα τσιμεντοποίησης ($V_s > 650$ m/s), έπειτα από την επίτευξη μέγιστου q , παρουσιάζουν κλάδο χαλάρωσης, σε αντίθεση με τα δείγματα με χαμηλότερα επίπεδα τσιμεντοποίησης ($V_s \leq 450$ m/s) και τα μη επεξεργασμένα δείγματα, τα οποία παρουσιάζουν αύξοντα κλάδο. Η επίπτωση αυτής της μετάβασης από τον αύξοντα κλάδο στον κλάδο χαλάρωσης ήταν ότι σε υψηλά επίπεδα καταπόνησης, το δείγμα ταχύτητας 450 m/s είχε υψηλότερη αντοχή σε διάτμηση (q) από το δείγμα των 650 m/s. Επομένως, η αντοχή σε ένα δεδομένο επίπεδο παραμόρφωσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό συστημάτων με MICP.
- Οι εξασθενημένοι δεσμοί τσιμεντοποίησης λόγω της φόρτισης μπορούν να αποκατασταθούν μέσω ενέσεων διαλυμάτων τσιμεντοποίησης. Η διατμητική αντοχή των αποκατεστημένων δειγμάτων ήταν ουσιαστικά ίδια με την αρχική διατμητική αντοχή.

Για τις στραγγιζόμενες δοκιμές:

- Από τις τριαξονικές δοκιμές διάτμησης της επεξεργασμένης χαλαρής άμμου, παρουσιάστηκε αύξηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής, σε σχέση με εκείνη της μη επεξεργασμένης. Μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, το επεξεργασμένο δείγμα παρουσίασε κλάδο χαλάρωσης με τη μείωση του ρυθμού τσιμεντοποίησης κατά τη διάτμηση (Σχήμα 4.59).

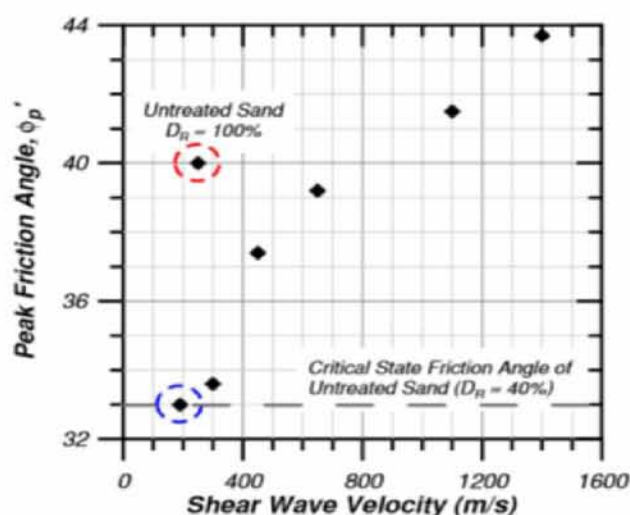


Σχήμα 4.59 Διάγραμμα q -αξονικής καταπόνησης για ελαφρώς τσιμεντοποιημένη λεπτή άμμο στις στραγγιζόμενες δοκιμές (Montoya, 2012).

- Για μεγάλες παραμορφώσεις, η διατμητική αντοχή και η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ήταν περίπου ίδιες τόσο για την τσιμεντοποιημένη όσο και για τη μη επεξεργασμένη χαλαρή άμμο.

Γενικό συμπέρασμα:

- Αποδείχθηκε μέσω των αστράγγιστων και στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών διάτμησης, ότι η αύξηση της αντοχής των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων οφειλόταν στην αύξηση της γωνίας τριβής και σε μικρή αύξηση της συνοχής. Οι τιμές της γωνίας τριβής των μη τσιμεντοποιημένων λεπτών άμμων κυμαινόταν από 33-40°, των μέτρια τσιμεντοποιημένων από 37,4-39,2° και των υψηλά τσιμεντοποιημένων από 41,5-43,7° (Σχήμα 4.60).



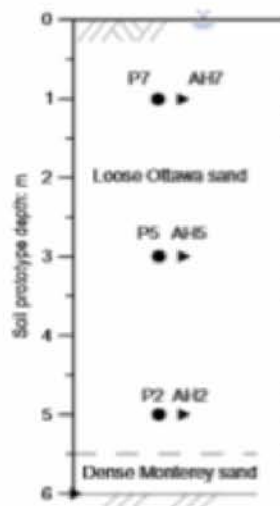
Σχήμα 4.60 Σχέση μέγιστης γωνίας τριβής- ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, για το μη επεξεργασμένο: 1. πυκνό δείγμα (κόκκινη διακεκομμένη), 2. χαλαρό δείγμα (μπλε διακεκομμένη). Το δείγμα με μέτριο και υψηλό επίπεδο τσιμεντοποίησης παρουσιάζει γραμμική σχέση της μέγιστης γωνίας τριβής και της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων (μαύρες κουκκίδες), ενώ το χαλαρά τσιμεντοποιημένο δείγμα βρίσκεται εκτός της γραμμικής σχέσης (Montoya, 2012).

Το τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής, παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμών φυγοκέντρωσης που διεξήχθησαν στη φυγόκεντρο Schaevitz με ακτίνα 1 m στο Κέντρο Γεωτεχνικής Μοντελοποίησης στο UC Davis, με σκοπό την αξιολόγηση της απόκρισης του εδάφους. Η απόκριση του εδάφους, που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με τη μέθοδο MICP, συγκρίνεται με εκείνη του μη επεξεργασμένου εδάφους (χαλαρού και πυκνού). Για τις

δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η άμμος Ottawa 50-70, η οποία αποτελεί μια χαλαρή, κακώς διαβαθμισμένη και ρευστοποιήσιμη άμμο.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Κάθε μοντέλο για τη δοκιμή φυγοκέντρωσης κατασκευάστηκε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, όμως με μεταβλητό επίπεδο τσιμεντοποίησης ή μεταβλητή πυκνότητα στην άμμο. Αυτός ο απλός σχεδιασμός χρησιμοποιήθηκε για να συγκρίνει τη συμπεριφορά του μοντέλου σε διαφορετικά επίπεδα θεραπείας. Το μοντέλο της φυγοκέντρωσης συνίσταται από μια επίπεδη εδαφική επιφάνεια με απλή δομή, η οποία τοποθετήθηκε στο κέντρο της συσκευής. Η πρωτογενής εναπόθεση εδάφους αποτελούνταν από ένα στρώμα άμμου (Ottawa 50-70, πάχος 5,5 m), που επικάλυπτε ένα λεπτό στρώμα πυκνής άμμου Monterey, πάχους 0,5 m. Το λεπτό στρώμα της χονδρόκοκκης άμμου Monterey, στη βάση του δοχείου φυγοκέντρωσης, λειτουργούσε ως στρώμα αποστράγγισης. Το μοντέλο φυγοκέντρωσης εξοπλίστηκε με επιταχυσίόμετρα (ACCs) και αισθητήρες πίεσης του νερού των πόρων (PPTs), για τη μέτρηση των επιταχύνσεων, των πιέσεων των πόρων και της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη σε δύο βάθη και σε τρεις οριζόντιες θέσεις σε κάθε βάθος για να παρακολουθήσουν την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (Σχήμα 4.61) κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, την περιστροφή και πριν / μετά την ανακίνηση. Επίσης, μετρήθηκαν οι γραμμικές μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

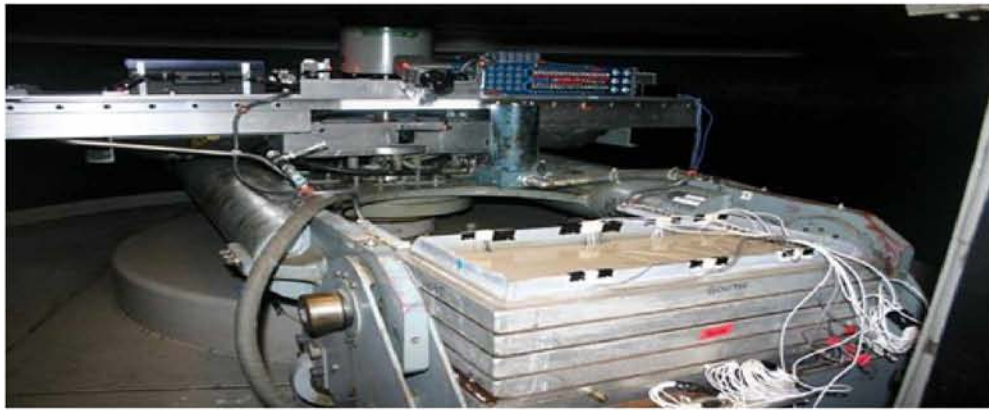


Σχήμα 4.61 Στροματογραφία του εδάφους (Montoya, 2012).

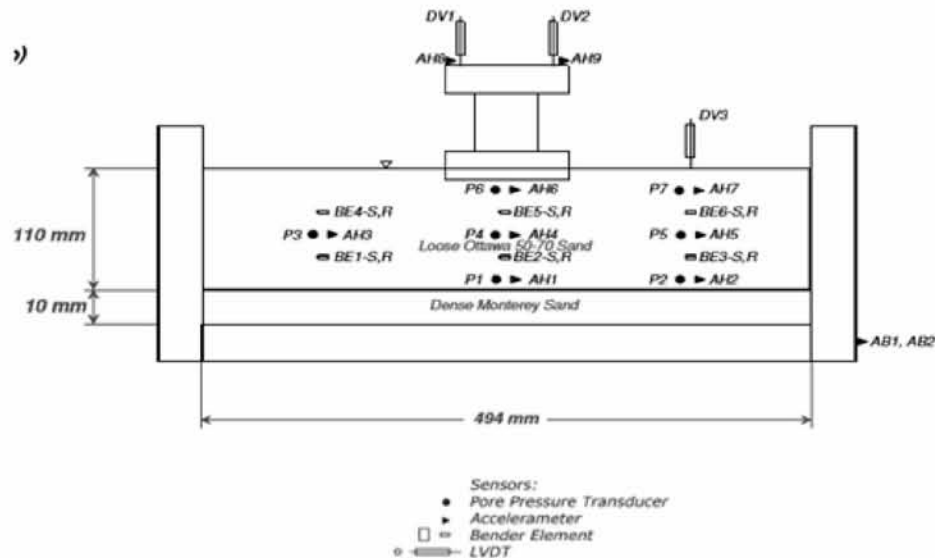
Το έδαφος τοποθετήθηκε στο κέντρο του μοντέλου υπό πίεση 80 kPa. Στη συνέχεια, τα μοντέλα των δοκιμών φυγοκέντρωσης υπέστησαν βιολογική επεξεργασία σε ποικίλα επίπεδα τσιμεντοποίησης. Τα βακτήρια, *S. pasteurii*, αναπτύχθηκαν για 40 ώρες πριν από τη συγκέντρωσή τους. Ένα λίτρο βακτηριακού εναιωρήματος αραιώθηκε με 7 λίτρα διαλύματος ουρίας συγκέντρωσης 0,5M. Εισήχθη στην άμμο το μέσο βακτηρίων-ουρίας και αφέθηκε στην επιφάνεια έτσι ώστε να προκληθεί διήθηση. Η διήθηση του βακτηριακού υγρού μέσω της ελεύθερης αποστράγγισης στο αμμώδες έδαφος συμβάλλει στην ομοιόμορφη τσιμεντοποίηση του εδάφους σε σχέση με άλλες τεχνικές έγχυσης. Η διαδικασία τσιμεντοποίησης ξεκίνησε αφού τα βακτήρια διατηρήθηκαν στο μοντέλο για τουλάχιστον 6 ώρες για να επιτραπεί η προσκόλληση βακτηρίων στους κόκκους άμμου. Χρησιμοποιήθηκε μέσο τσιμεντοποίησης ουρίας-ασβεστίου (1 M ουρία, 0.5 M χλωριούχο ασβέστιο) για τη δημιουργία και την καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου, μέσω της υδρόλυσης της ουρίας. Οι θεραπείες τσιμεντοποίησης επαναλαμβάνονταν κάθε 4-6 ώρες μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας διατμητικών κυμάτων. Ακολούθησε ο κορεσμός του μοντέλου μετά την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου τσιμεντοποίησης.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στη μέθοδο προετοιμασίας, οι θεραπείες τσιμεντοποίησης επαναλήφθηκαν μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας διατμητικών κυμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν δοκιμές φυγοκέντρωσης για την εκτίμηση της ακεραιότητας της τσιμεντοποίησης και της απόκρισης των βελτιωμένων εδαφών μέσω της μεθόδου MICP, σε δυναμική φόρτιση. Συνολικά, εκτελέστηκαν 5 δοκιμές φυγοκέντρωσης, εκ των οποίων οι 2 αφορούσαν μη επεξεργασμένα δείγματα και οι υπόλοιπες 3 επεξεργασμένα δείγματα χαμηλού, μέσου και υψηλού επιπέδου τσιμεντοποίησης. Οι δοκιμές του μοντέλου δυναμικού φυγόκεντρου διεξήχθησαν σε εξοπλισμό φυγοκέντρωσης Schaevitz ακτίνας 1 m στο κέντρο NEES για γεωτεχνική μοντελοποίηση στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας (Davis) (Σχήμα 4.62). Οι εσωτερικές διαστάσεις του μοντέλου, για τις δυναμικές δοκιμές φυγοκέντρωσης, ήταν: 494 mm μήκος, 235mm πλάτος και 120mm ύψος (Σχήμα 4.63). Οι δοκιμές διεξήχθησαν με φυγοκεντρική επιτάχυνση 50g. Σε κάθε δοκιμή φυγοκέντρωσης, τα μοντέλα υποβλήθηκαν σε μια σειρά κινήσεων του εδάφους. Οι κινήσεις εδάφους συνίστανται από ημιτονοειδή κύματα σε συχνότητα 2 Hz και αυξανόμενα πλάτη των μέγιστων επιταχύνσεων βάσης που κυμαίνονται από περίπου 0,1 g έως 0,7 g.



Σχήμα 4.62 Εξοπλισμός φυγοκέντρωσης Schaevitz, ακτίνας 1 m, στο κέντρο NEES (Montoya, 2012).

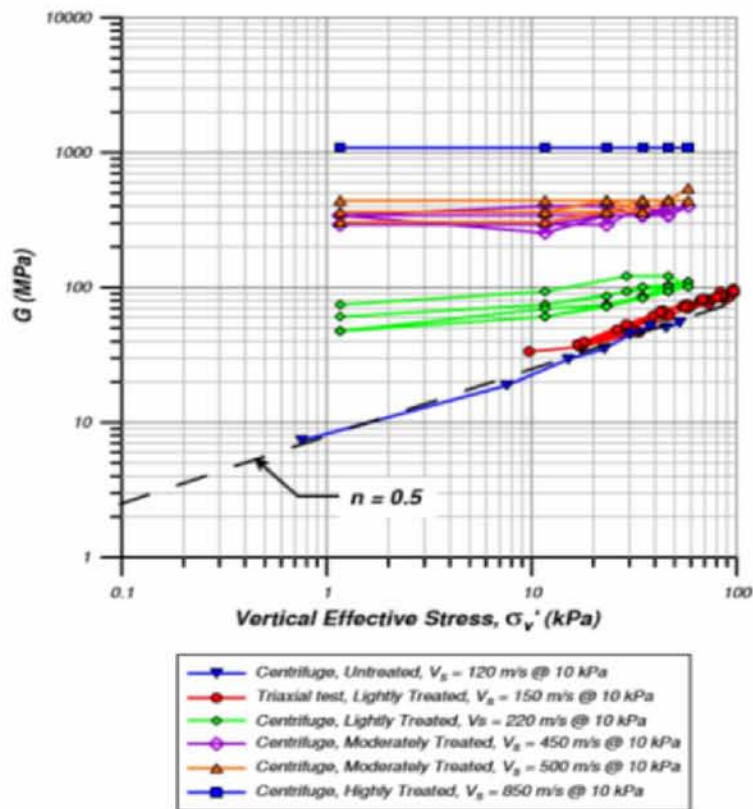


Σχήμα 4.63 Προφίλ του μοντέλου φυγοκέντρωσης με ενσωματωμένους αισθητήρες, σε διάφορα βάθη (Montoya, 2012).

Οι επιταχύνσεις, οι πιέσεις των πόρων και οι μετακινήσεις στο έδαφος μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της κίνησής του και συζητήθηκαν οι μεταβολές στη συμπεριφορά του, για τα διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

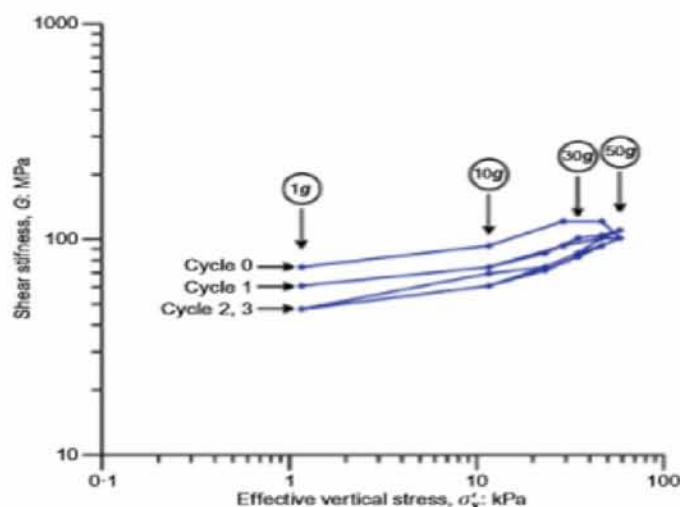
- Καθώς αυξήθηκε το επίπεδο της τσιμεντοποίησης, αυξήθηκε και η δυσκαμψία της άμμου. Η κλίση μειώθηκε μέχρις ότου η δυσκαμψία να μην εξαρτάται πλέον από την τάση συμπίεσης (π.χ. κλίση ίση με το μηδέν). Με τη μείωση του επιπέδου της τσιμεντοποίησης, η κλίση άρχισε να αυξάνει και να τείνει προς την κλίση της μη επεξεργασμένης άμμου (Σχήμα 4.64).



Σχήμα 4.64 Το μέτρο διάτμησης συναρτίζεται της ενεργής κατακόρυφης τάσης για διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Montiya, 2012).

- Ο έλεγχος της ακεραιότητας της τσιμεντοποίησης αποκάλυψε μια αλλαγή στη συμπεριφορά του εδάφους, καθώς αυτό έπαυε να συμπεριφέρεται έχοντας τις ιδιότητες του εδάφους και πλέον η συμπεριφορά του έτεινε περισσότερο σε αυτή ενός βράχου, με την αύξηση του επιπέδου της τσιμεντοποίησης.
- Η επίδραση της μεταβολής της συμπίεσης στην ακεραιότητα της τσιμεντοποίησης παρακολούθηθηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις ταχύτητας διατμητικών κυμάτων σε δείγματα που παρασκευάστηκαν σε διαφορετικούς βαθμούς τσιμεντοποίησης και κατόπιν υποβλήθηκαν σε αργούς κύκλους κατακόρυφης τάσης αυξάνοντας και μειώνοντας την φυγοκεντρική επιτάχυνση. Για μια μέτρια τσιμεντοποιημένη άμμο, η αύξηση της επιτάχυνσης με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης, οδήγησε αρχικά στην αύξηση της δυσκαμψίας. Περαιτέρω αύξηση της επιτάχυνσης οδήγησε σε μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Η μείωση της επιτάχυνσης που οδήγησε στην υποβάθμιση της τσιμεντοποίησης, αντιπροσωπεύεται με την μόνιμη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Σε επόμενους κύκλους φόρτισης, παρατηρήθηκε επιπλέον μείωση της δυσκαμψίας, έως ότου αυτή να παραμείνει σχεδόν σταθερή (συμπεριφορά σα βράχου). Παρ' όλη τη

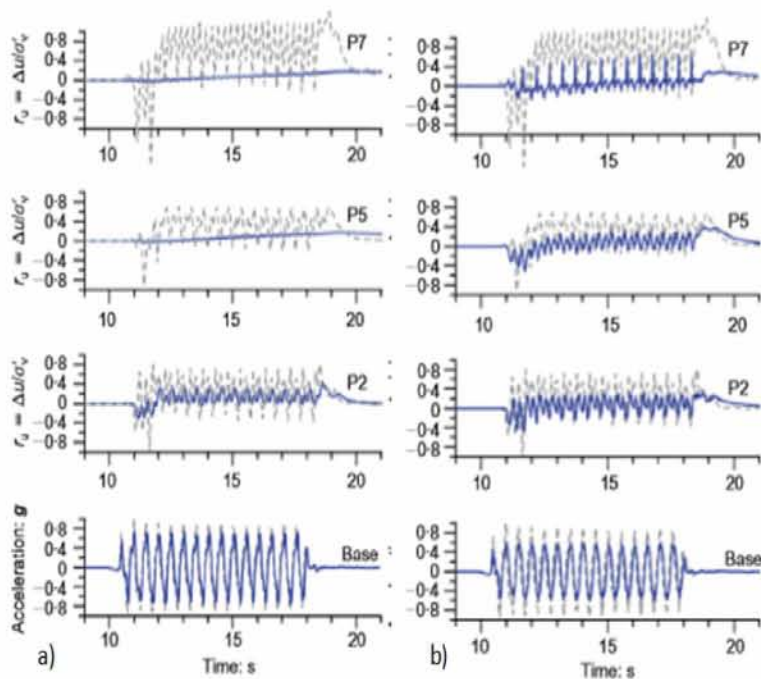
μείωση της δυσκαμψίας, αυτή παρέμεινε υψηλότερη από την αντίστοιχη κλίση για μια μη επεξεργασμένη άμμο με τη μέθοδο MICP (Σχήμα 4.65).



Σχήμα 4.65 Ακεραιότητα της τσιμεντοποίησης μιας ελαφρώς τσιμεντοποιημένης άμμου (Montoya, 2012).

- Αποδείχτηκε ότι η επεξεργασία με τη μέθοδο MICP, συνέβαλε στην ενίσχυση του εδάφους, με τη μείωση του κινδύνου της ρευστοποίησης, της ευαισθησίας και των ζημιών που οφειλόταν σε σεισμική φόρτιση.
- Οι μετακινήσεις, που προκλήθηκαν από το σεισμό, των επεξεργασμένων δειγμάτων ήταν χαμηλότερες από αυτές που παρατηρήθηκαν στο μη επεξεργασμένο, χαλαρό μοντέλο άμμου. Οι μετακινήσεις των επεξεργασμένων ήταν παρόμοιες ή μικρότερες από εκείνες της πυκνής μη επεξεργασμένης άμμου, έως ότου άρχισε να υποβαθμίζεται η τσιμεντοποίηση, οπότε οι μετακινήσεις τότε ήταν μεγαλύτερες από την πυκνή άμμο αλλά ακόμα χαμηλότερες από την χαλαρή.
- Η αυξημένη αντοχή, έναντι ρευστοποίησης, στα επεξεργασμένα μοντέλα, αποδείχθηκε με τη μείωση του λόγου της πίεσης του νερού των πόρων (r_u). Στην επόμενη εικόνα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα του λόγου της πίεσης του νερού των πόρων και της επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου, για διάφορα βάθη και για διαφορετικά επίπεδα τσιμεντοποίησης. Παρατηρήθηκε ότι τόσο τα εδάφη που έχουν υποστεί μικρή τσιμεντοποίηση όσο και εκείνα με υψηλότερα επίπεδα τσιμεντοποίησης, έχουν μικρότερο λόγο πίεσης του νερού των πόρων σε σχέση με το λόγο στα μη επεξεργασμένα

εδάφη. Ωστόσο, οι επιφανειακές επιταχύνσεις, ενισχύονταν για τα ψηλά επίπεδα τσιμεντοποίησης (Σχήμα 4.66).



Σχήμα 4.66 Σχέση του λόγου πίεσης του νερού των πόρων και της κανονικοποιημένης επιτάχυνσης (0.7g) σε συνάρτηση με το χρόνο, υπό δυναμική φόρτιση a) ελαφρά τσιμεντοποιημένη άμμος, b) πολύ τσιμεντοποιημένη άμμος. Με διακεκομμένη γραμμή συμβολίζεται η συμπεριφορά του μη επεξεργασμένου εδάφους (Montoya, 2012).

4.2.7 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης διαφόρων φυσικών άμμων με τη χρήση βακτηρίων

(α) Οι Gurbuz, Cinar, Sari, Yuksekdog (2011), ερεύνησαν τη διαδικασία της τσιμεντοποίησης στη μήτρα χαλαρού αμμάδους εδάφους με τη χρήση της μεθόδου MICP. Στη μελέτη τους, χρησιμοποίησαν φυσική άμμο η οποία λήφθηκε από έναν ποταμό.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Το βακτήριο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν το *Sporosarcina pasteurii* DSM 33. Τα βακτήρια αναπτύχθηκαν σε ποσοστό 2% στους 30 °C σε 5 mL ζωμού Trypton Soy Broth (TSB) και σε ουρία (2%) για 48 ώρες υπό αερόβιες συνθήκες. Οι καλλιέργειες ζωμού φυγοκεντρήθηκαν στις 4500 r.p.m. για 15 λεπτά. Το υπερκείμενο απομακρύνθηκε στο τέλος της φυγοκέντρησης. Τα κύτταρα πλύθηκαν με αλατούχο διάλυμα και στη συνέχεια

αιωρήθηκαν σε διάλυμα ουρίας-CaCl₂. Η άμμος τοποθετήθηκε σε καπάκια με διάμετρο 86 mm και ύψος 15 mm. Τα βακτήρια αναπτύχθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον, όπως περιγράφηκε παραπάνω, και έπειτα εγχύθηκαν στη μήτρα άμμου με βελόνα για την πρόκληση της συγκόλλησης μεταξύ των σωματιδίων. Μεταγενέστερα, εισήχθησαν θρεπτικά μέσα (2-3% ουρία, 25.2 mM χλωριούχο ασβέστιο) στα δείγματα σε αυθαίρετες χρονικές διάρκειες για να επιταχυνθεί η ανάπτυξη του επιπέδου τσιμεντοποίησης.

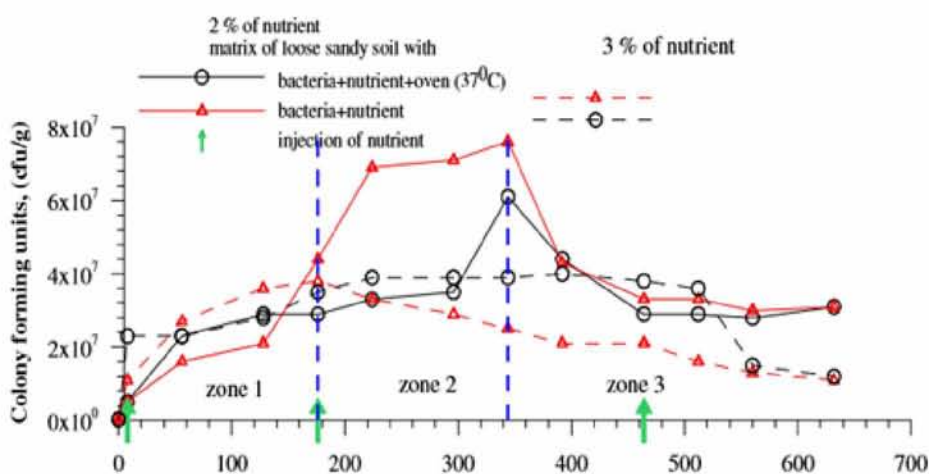
Εργαστηριακές Δοκιμές

Διεξήχθησαν 4 πειράματα ώστε να μελετηθεί η επίδραση των θρεπτικών ουσιών και της θερμοκρασίας στην τσιμεντοποίηση η οποία προκαλείται από τη δράση των μικροβίων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δομικές σε εδάφη με τα εξής χαρακτηριστικά: άμμος με βακτήρια, άμμος με βακτήρια στους 37 °C, άμμος με βακτήρια και θρεπτικά και άμμος με βακτήρια και θρεπτικά στους 37 °C. Η δημιουργία και η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου, ανιχνεύθηκε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και μετρήθηκε με τη μέθοδο EDTA Titration (Achal et al., 2009). Ο αριθμός των βιώσιμων κυττάρων προσδιορίστηκε ως μονάδες σχηματισμού αποικιών (CFU). Επίσης, το επίπεδο του pH, η θερμοκρασία και η ποσότητα του κατακρημνισμένου ανθρακικού ασβεστίου μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

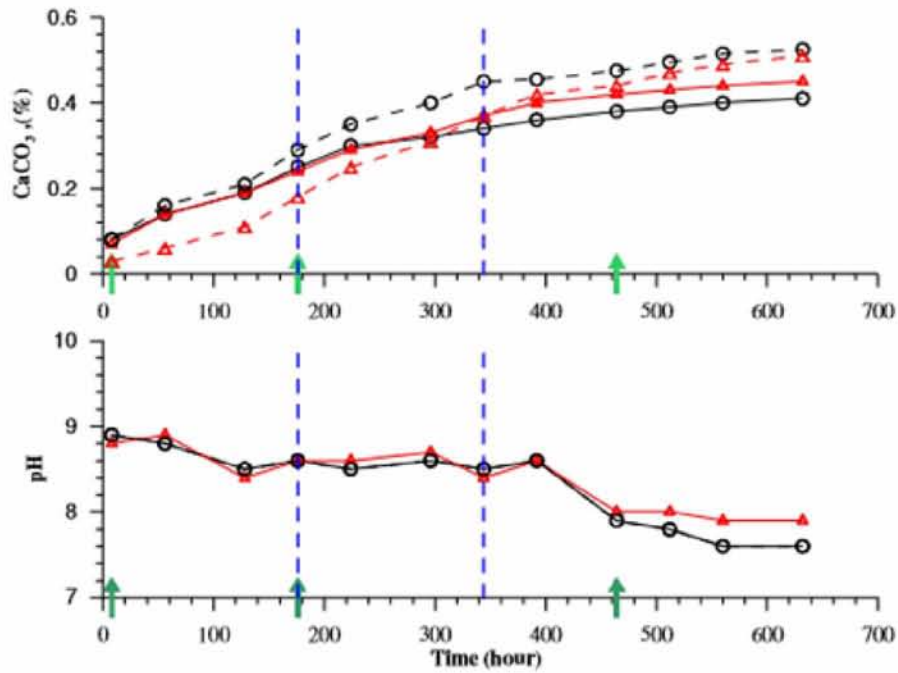
- Η επίδραση της θερμοκρασίας στον αριθμό των βακτηρίων και του ασβεστίου δεν ήταν σαφής.
- Οι εικόνες SEM έδειξαν ότι υπήρχαν δεσμοί τσιμεντοποίησης στην επιφάνεια των κόκκων άμμου καθώς και στους πόρους.
- Ο αριθμός των βακτηρίων, η ποσότητα του κατακρημνισμένου ανθρακικού ασβεστίου και το επίπεδο pH με το χρόνο μετρήθηκαν και παρουσιάστηκαν στο επόμενο διάγραμμα. Το γράφημα χωρίστηκε σε τρεις ζώνες με βάση την ανάπτυξη βακτηρίων κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η ζώνη 1 έχει διάρκεια από την εφαρμογή της πρώτης ένεσης θρεπτικών ουσιών, στη μήτρα άμμου, μέχρι τη δεύτερη ένεση. Η ζώνη 2 έχει

χρονική διάρκεια από την εφαρμογή της δεύτερης έως την τρίτη ένεση και η ζώνη 3 από την τρίτη ένεση θρεπτικών ουσιών έως το τέλος της δοκιμής. Η πρώτη έγχυση θρεπτικών συστατικών (2 και 3%) αύξησε τον αριθμό των βακτηριδίων και την ποσότητα του κατακρημνισμένου ανθρακικού ασβεστίου στη Ζώνη 1. Η έγχυση του δεύτερου θρεπτικού συστατικού (3%) δεν επηρέασε την ποσότητα των βακτηρίων στη Ζώνη 2, καθώς συγκρίθηκε με την έγχυση σε ποσοστό 2%. Η τρίτη ένεση θρεπτικής ουσίας δεν επιτάχυνε τον αριθμό των βακτηρίων στη Ζώνη 3, λόγω του ότι ο αριθμός των βακτηρίων είχε ήδη μειωθεί (Σχήμα 4.67).



Σχήμα 4.67 Η αύξηση του αριθμού των βακτηρίων σε σχέση με τη χρονική διάρκεια σε χαλαρό αμμώδες έδαφος (Gurbuz, 2011).

- Η μέση ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής και έφτασε σε ισορροπία έπειτα από τη μείωση του αριθμού των βακτηρίων και του επίπεδου του pH με το ένζυμο ουρεάσης (Σχήμα 4.68).



Σχήμα 4.68 Σχέση σχηματιζόμενου ανθρακικού ασβεστίου και pH συναρτήσει του χρόνου, σε μήτρα χαλαρού αμμώδους εδάφους (Gurbuz, 2011).

- Η αύξηση της ποσότητας θρεπτικών ουσιών από 2 σε 3% δεν άλλαξε τον αριθμό των βακτηρίων λόγω του γεγονότος ότι τα βακτήρια δεν μπορούσαν να καταναλώσουν θρεπτικά συστατικά που ήταν περισσότερα από την ανάγκη τους.
- Η ποσότητα της τσιμεντοποίησης σχετίζεται με την χρονική αλληλουχία της ένεσης θρεπτικών ουσιών και του επιπέδου του pH.

(β) Το 2014 οι Kim Da., Kim Do. και Park, ασχολήθηκαν με την επιρροή των συνθηκών του εδάφους στην εφαρμογή της μεθόδου της μικροβιακής τσιμεντοποίησης. Στα πειράματά τους χρησιμοποιήθηκε χαλαζακή άμμος Jumunjiin, της οποίας 2.4% της άμμου διέρχεται από το κόσκινο No. 200. Η άμμος είχε χαρακτηριστεί ως «κακώς διαβαθμισμένη και χαλικώδης άμμος» με βάση το σύστημα ταξινόμησης εδαφών (USCS). Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά είδη αποσαθρωμένων εδαφών, τα οποία ελήφθησαν από το πεδίο. Από την κοκκομετρική ανάλυση των δύο διαφορετικών διαβρωμένων εδαφών, το ένα ταξινομήθηκε ως «SW» (καλά διαβαθμισμένη και χαλικώδης άμμος, χωρίς λεπτόκοκκα) και το άλλο ως

«SP» (κακώς διαβαθμισμένη άμμος και χαλικώδης άμμος, λίγο ή καθόλου λεπτόκοκκα) με βάση το σύστημα ταξινόμησης εδαφών USCS.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Για την παρασκευή του διαλύματος βιο-τσιμεντοποίησης, τα μικρόβια *B. pasteurii* του KCTC 3558 καλλιεργήθηκαν για 24 ώρες εντός δονούμενου επωαστήρα των 180 r.p.m., στους 30 °C και το επίπεδο συγκέντρωσης των μικροβίων ήταν κατά προσέγγιση 10^7 CFU/mL. Στη συνέχεια, φυγοκεντρήθηκαν 1000 mL του διαλύματος μικροβίων, για τη λήψη 25 mL υψηλής συγκέντρωσης μικροβιακού υγρού, του οποίου το επίπεδο μικροβιακής συγκέντρωσης ήταν περίπου $4 \cdot 10^8$ CFU / mL. Ξεχωριστά, 1 L του υγρού καλλιέργειας δημιουργήθηκε με ανάμιξη 8 gr θρεπτικού ζωμού, με 20 gr ουρίας και με την προσθήκη καθαρού νερού έως ότου ο συνολικός όγκος διαλύματος έγινε 1 L.

Προετοιμάστηκαν τρεις διαφορετικές συνθήκες εδάφους όσον αφορά τη σχετική πυκνότητα ($D_r = 40\%$, 60% και 80%) για την άμμο, τη σχετική συμπύκνωση ($RC = 60\%$, 75% και 90%) για την κατανομή μεγέθους σωματιδίων (καλά και κακά διαβαθμισμένα) για τα αποσαθρωμένα εδάφη, για την αξιολόγηση των επιπτώσεων του λόγου των κενών και των μεγεθών των σωματιδίων του εδάφους, στην μικροβιακά επαγόμενη κατακρήμνιση του $CaCO_3$.

Για τη διεξαγωγή της εργαστηριακής δοκιμής, για τον προσδιορισμό της ποσότητας του κατακρημνισμένου ανθρακικού ασβεστίου, διαμορφώθηκαν τα δείγματα άμμου με σχετικές πυκνότητες 40% , 60% και 80% . Οι άμμοι αναμίχθηκαν με 24 mL διαλύματος $CaCl_2$ και 24 mL μικροβιακού διαλύματος.

Επιπλέον, ελήφθησαν δύο είδη αποσαθρωμένων εδαφών, τα οποία είχαν διαφορετικά ποσοστά υγρασίας και ίδιες σχετικές πυκνότητες ($D_r=65\%$). Προστέθηκαν και αναμίχθηκαν, οι ίδιες ποσότητες διαλύματος $CaCl_2$ (24 mL) και μικροβιακού διαλύματος (24 mL), και για τα δύο ξηρά εδάφη.

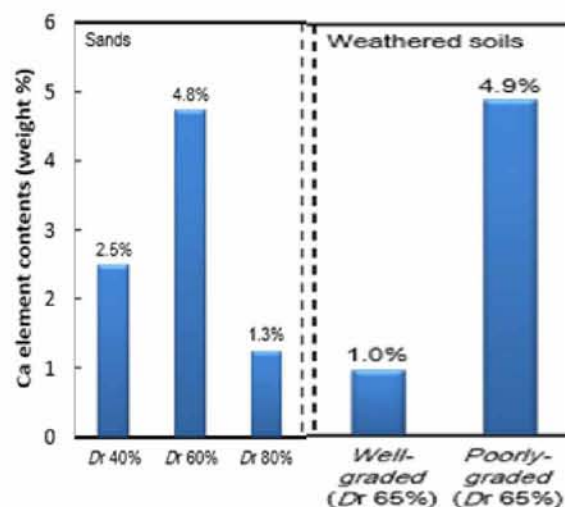
Εργαστηριακές Δοκιμές

Η σάρωση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM σε όλες τις επιφάνειες των δειγμάτων χρησιμοποιεί φακό ηλεκτρονίων και παρέχει διευρυμένες εικόνες αυτών. Ο αναλυτής EDX συνδέεται με τον εξοπλισμό SEM και τελικά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό. Το EDX επιτρέπει τη μη καταστροφική αναλυτική ταυτοποίηση της δομής και της χημικής σύνθεσης

των ορυκτών που περιέχονται σε ένα δείγμα. Για αυτές τις ταυτοποιήσεις, ο εξοπλισμός XRD εξετάζει τις κατευθύνσεις και τη διάχυτη ένταση μιας διάθλασης ακτίνων X με τον υπολογισμό της κινητικής ενέργειας από τη σύγκρουση των ακτίνων X υψηλής ταχύτητας. Ο αναλυτής EDX διεξάγει μια ανάλυση στοιχείων μιας επιφάνειας δείγματος με βάση τον χαρακτηρισμό των διαφορετικών δομών βάρους των στοιχείων. Επιπλέον, η ανάλυση χαρτογράφησης παρέχει μια εικόνα κατανομής συγκεκριμένων στοιχείων που υπάρχουν στην επιφάνεια του δείγματος. Για τις αναλύσεις SEM, EDX, XRD και χαρτογράφησης, όλα τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με τη χρήση μικροβίων, ξηράθηκαν στους 121 °C, για να έχουν μηδενική περιεκτικότητα σε νερό.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων XRD όλων των δειγμάτων άμμου και των αποσαθρωμένων εδαφών, εντοπίστηκαν ενώσεις χαλαζία, ασβεστίτη και ταυτοποιήθηκαν πρόσθετες ενώσεις λευκίτη.
- Με βάση την περιεκτικότητα σε ασβέστιο μεταξύ των άμμων με σχετική πυκνότητα 40%, 60% και 80%, το δείγμα άμμου με σχετική πυκνότητα 60% παρουσίασε την υψηλότερη απόθεση ανθρακικού ασβεστίου.
- Από την ανάλυση EDX των αποσαθρωμένων εδαφών, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ποσότητα σχηματιζόμενου CaCO_3 στο κακώς διαβαθμισμένο έδαφος (Σχήμα 4.69). Παρατηρήθηκε περισσότερη μικροβιακή τσιμεντοποίηση για υψηλότερο λόγο και μέγεθος κενών.



Σχήμα 4.69 Περιεκτικότητα ασβεστίου κατά βάρος, για την άμμο σε διάφορες σχετικές πυκνότητες και για τα αποσαθρωμένα εδάφη (Kim, 2014).

- Το ορυκτό που δημιουργήθηκε από τη μικροβιακή τσιμεντοποίηση αναγνωρίστηκε ως ανθρακικό ασβέστιο, με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης XRD και οι εικόνες SEM έδειξαν ότι το CaCO_3 παρατηρήθηκε στην επιφάνεια των σωματιδίων του εδάφους.

(γ) Οι Kalantary και Kahani (2015), ασχολήθηκαν με την ικανότητα ελέγχου, του χρόνου και των θέσεων, της μεθόδου MICP σε αμμώδη εδάφη.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν το βακτήριο *Sporosarcina Pasteurii* (PTCC = 1645) και δυο μέσα καλλιέργειας με διαφορετικές συνθέσεις. Το πρώτο μέσο (YE-1, δραστηριότητα 19mM) αποτελούνταν από 20 gr/L εκχύλισμα ζύμης, 10 gr/L NH_4Cl και ποσότητα NiCl_2 σε συγκέντρωση 10 mM. Το δεύτερο (Caso-1, δραστηριότητα 42,6mM) αποτελούνταν από 15 gr/L Peptone casein, 5 gr/L Pepton soumeal, 5 gr/L NaCl και 20 gr/L ουρίας. Για να μετρηθεί ο ρυθμός καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου, ισοδύναμη ποσότητα βακτηριακού διαλύματος συνδυάστηκε με συγκεκριμένη μοριακότητα των ουσιών αντίδρασης, στα προαναφερθέντα μέσα καλλιέργειας και αφέθηκαν μαζί να καθιζάνουν. Τα προϊόντα καθίζησης διαχωρίστηκαν χρησιμοποιώντας φυγοκεντρητή σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (10, 20 λεπτά, 1, 2, 4, 8 και 24 ώρες) έπειτα, ξηράθηκαν στο φούρνο και υπολογίστηκε το ποσοστό κατά βάρος των σχηματιζόμενων ιζημάτων.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης και οι αναλύσεις περίθλασης ακτίνων X χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά για να προσδιοριστεί η βακτηριακή δραστηριότητα της ουρεάσης, να μετρηθεί η ποσότητα της αυξημένης αντοχής του επεξεργασμένου εδάφους καθώς και ο τύπος κρυστάλλων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν, για YE-1 και Caso-1, σε συγκεντρώσεις 1M και 2M. Ο ρυθμός της δραστηριότητας του ενζύμου ουρεάσης θεωρήθηκε ως η βακτηριακή δραστηριότητα και μπορεί να μετρηθεί με τον ρυθμό υδρόλυσης της ουρίας. Η υδρόλυση της ουρίας συνίσταται

στην μετατροπή της ουρίας σε ιόντα αμμωνίου και ανθρακικού άλατος παρουσία ύδατος, δηλαδή στην πλήρη υδρόλυση ανιονικού υλικού ουρίας σε ιοντικό υλικό, που οδηγεί στην αύξηση του ρυθμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Συνεπώς, 1 mL βακτηριακού διαλύματος προστέθηκε σε 9 mL διαλύματος ουρίας συγκέντρωσης 1.11 M και μετρήθηκε η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μετά από 5 λεπτά σε mS / min. Τέλος, 1 mS/min είναι ανάλογο με την υδρόλυση 11 mM ουρίας ανά λεπτό.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Τα αποτελέσματα της ανεμπόδιστης μονοαξονικής δοκιμής έδειξαν ότι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή των εδαφών που λήφθηκαν από την ακτή της Κασπίας Θάλασσας αυξήθηκε έως 400 kPa.
- 1M: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας έδειξαν την ικανότητα να ελέγχεται η ταχύτητα καθίζησης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μέσα καλλιέργειας. Για παράδειγμα, λόγω της χαμηλής δραστηριότητας ουρεάσης των βακτηριδίων στο μέσο YE-1 παρατηρήθηκε καθυστέρηση στη δημιουργία του ιζήματος και παραγωγή μικρότερης ποσότητας μετά από 24 ώρες, συγκριτικά με το μέσο Caso-1.
- 2M: Η αύξηση της ποσότητας της συγκέντρωσης ουρίας στην αρχή της αντίδρασης οδήγησε σε αύξηση της τελικής διάρκειας της καθίζησης.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων περίθλασης ακτίνων X και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), τα σχηματισθέντα ιζήματα ανθρακικού ασβεστίου, σύμφωνα με το βάρος, ήταν ασβεστίτης και βατερίτης, αντίστοιχα.
- Για τις δύο συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης, το βάρος του σχηματισθέντος ιζήματος ήταν περίπου ίδιο.

(δ) Οι Shahrokhi-Shahraki, Niazi, O'Kelly και Zomorodian (2015) μελέτησαν τη βελτίωση της άμμου με τη μέθοδο MICP. Στην εργαστηριακή μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δυο χαλαρές, μεσαίου κόκκου άμμοι, οι οποίες αποτελούνται από γωνιακούς και σχεδόν γωνιακούς κόκκους χαλαζία (Υλικά δοκιμών A, B). Η άμμος B ήταν ελαφρώς πιο χονδρόκοκκη από την άμμο A, αν και η κατανομή του μεγέθους των κόκκων, για ποσοστό διερχόμενων πάνω από 40%, ήταν παρόμοια και για τις δύο άμμους.

Μέθοδος Προετοιμασίας

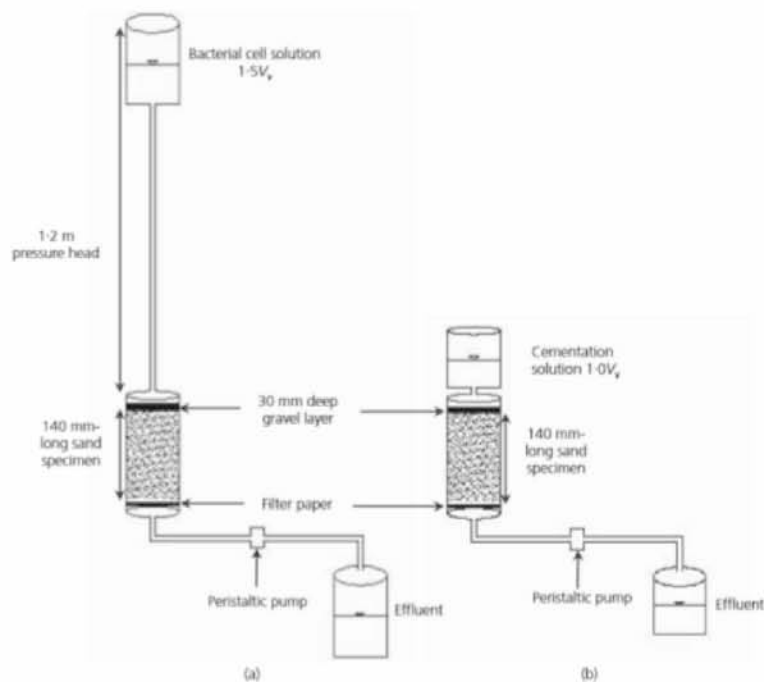
Αρχικά παρασκευάστηκε το βακτηριακό διάλυμα (100 mL μέσου καλλιέργειας και μικρής ποσότητας καλλιέργειας *S. Pasteurii*) στους 30 °C σε περίοδο 24 ωρών, το οποίο στη συνέχεια ψύχθηκε και φυλάχθηκε στους 4 °C πριν από τη χρήση του. Το τελικό μέσο καλλιέργειας εμβολιάστηκε με την καλλιέργεια βακτηρίων (10% όγκο/όγκο) και επώαστηκε αερόβια υπό ανάδευση στους 30 °C για περίοδο 48 ωρών, μετά την οποία τα κύτταρα είχαν φθάσει στο μέγιστο πληθυσμό. Τα βακτηριακά κύτταρα επαναιωρήθηκαν σε διάλυμα θρεπτικού ζωμού (NB) - ουρίας που περιείχε 3 gr θρεπτικού ζωμού, 20 gr ουρίας, 10 gr χλωριούχου αμμωνίου και 2,12 gr όξινου ανθρακικού νατρίου ανά λίτρο απιονισμένου νερού. Η τιμή του pH του βακτηριακού διαλύματος ρυθμίστηκε σε 6, πριν την αποστείρωση των αντιδραστηρίων (autoclaving). Έξι διαφορετικοί συνδυασμοί συγκεντρώσεων ουρίας και CaCl₂ ερευνήθηκαν ως διαλύματα τσιμεντοποίησης για την άμμο A. Οι μη ισομοριακοί συνδυασμοί ουρίας-CaCl₂ παρασκευάστηκαν διαλύοντας τις ίδιες μάζες ουρίας και CaCl₂ σε απεσταγμένο νερό. Τα δείγματα της δοκιμής σχηματίστηκαν χρησιμοποιώντας συναρμολογούμενα καλούπια από PVC. Μια ελαστική μεμβράνη τοποθετήθηκε σε επαφή με την επιφάνεια του εσωτερικού τοιχώματος και τοποθετήθηκε φίλτρο στον πυθμένα, κάθε συναρμολογημένου καλουπιού. Στη συνέχεια, 385 gr ξηρής άμμου τοποθετήθηκαν σε κάθε καλούπι, σε τρία στρώματα ίσου πάχους. Μετά την εναπόθεση, κάθε στρώση άμμου συμπίεσθη μεμονωμένα με ελαφρά κτύπημα γύρω από το εξωτερικό τοίχωμα του καλουπιού. Αυτή η μέθοδος παρασκευής δειγμάτων παράγαγε χαλαρές άμμους (τιμές δείκτη πυκνότητας 33% και 23% για τις άμμους A και B, αντίστοιχα) με ξηρό βάρος 14 kN / m³. Ο λόγος των διαστάσεων για τα δείγματα ήταν 2,8: 1 (μήκος: διάμετρος).

Για τις δοκιμές αντοχής, οι σφικτήρες απελευθερώθηκαν και τα δύο μέρη των καλουπιών διαχωρίστηκαν για να απελευθερώσουν τα επεξεργασμένα δείγματα, τα οποία παρέμειναν εγκαρσώς περικλεισμένα από τις ελαστικές μεμβράνες τους. Για τις δοκιμές

διαπερατότητας χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος παρασκευής δειγμάτων εκτός του ότι χρησιμοποιήθηκαν άθικτοι σωλήνες PVC των ίδιων διαστάσεων, αντί για συναρμολογούμενα καλούπια. Οι δοκιμές διαπερατότητας διεξήχθησαν επί των επεξεργασμένων δειγμάτων ενώ εξακολουθούσαν να περιέχονται σε αυτούς τους σωλήνες.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Εκτελέστηκαν προκαταρκτικές δοκιμές για να εξεταστούν οι τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές έγχυσης στα δείγματα μήκους 140mm. Η πρώτη αφορούσε την ταυτόχρονη μίξη των βακτηριακών κυττάρων και του διαλύματος τσιμεντοποίησης πριν από την έγχυσή τους στην άμμο. Ο δεύτερος τρόπος περιελάμβανε την ένεση σε δυο στάδια, με την έγχυση του βακτηριακού διαλύματος αρχικά, και του διαλύματος τσιμεντοποίησης στη συνέχεια. Ο τρίτος τρόπος αφορούσε τη σταδιακή έγχυση, που περιελάμβανε περιόδους συγκράτησης μεταξύ των φάσεων των ενέσεων. Τέταρτον, τα αντιδραστήρια, δηλαδή το βακτηριακό διάλυμα και το διάλυμα τσιμεντοποίησης εγχύθηκαν ταυτόχρονα στην άμμο (Σχήμα 4.70).



Σχήμα 4.70 Εξοπλισμός σταδιακής έγχυσης με τη μέθοδο MICP: a) Έγχυση του βακτηριακού διαλύματος b) Έγχυση του διαλύματος τσιμεντοποίησης (Shahrokhi-Shahraki, 2015)

Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης για να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων διαλύματος τσιμεντοποίησης και για να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων βακτηριακών κυττάρων σε

σχηματισμό ασβεστίου. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαπερατότητας μεταβλητού υδραυλικού φορτίου και ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης SEM.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Η σταδιακή έγχυση, που περιελάμβανε περιόδους συγκράτησης και με εφαρμογή ύψους πίεσης κατά τη διάρκεια της έγχυσης του βακτηριακού διαλύματος, αποδείχθηκε ο πιο αποτελεσματικός τρόπος έγχυσης.
- Οι συντελεστές της διαπερατότητας μειώθηκαν κατά περίπου μία τάξη μεγέθους με την σταδιακή έγχυση η οποία περιελάμβανε περιόδους συγκράτησης. Συνεπώς, ένας μόνο κύκλος έγχυσης δεν επηρέασε σημαντικά την ικανότητα αποστράγγισης των μέσων άμμου.
- Μεγαλύτερες βελτιώσεις στη δυσκαμψία και την αντοχή επιτεύχθηκαν, για λιγότερα βακτηριακά κύτταρα και υψηλότερες συγκεντρώσεις διαλύματος τσιμεντοποίησης, με υψηλότερη γραμμομοριακότητα στην ουρία (μη ισομοριακά διαλύματα). Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με παρατηρήσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.
- Οι τιμές μέτρησης της αντοχής και της δυσκαμψίας από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης κυμαίνονταν από 50 έως 240 kPa και από 6 έως 56 MPa, αντίστοιχα.
- Η άμμος Α (πιο λεπτή άμμος) είχε υψηλότερη δυσκαμψία και τιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής αντοχής, σε σχέση με την άμμο Β.
- Από την ανάλυση SEM παρατηρήθηκε ότι ο ασβεστίτης είχε καταβυθιστεί και στις τρεις θέσεις του δείγματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα αντιδραστήρια είχαν διαπεράσει όλο το μήκος των δειγμάτων των 140 mm. Ωστόσο, η κατανομή της εναπόθεσης ασβεστίου δεν ήταν εντελώς ομοιόμορφη σε σχέση με το μήκος δείγματος.

(ε) Το 2016, ο Duraisamy δημοσίευσε τη διατριβή του, με θέμα τη βελτίωση της αντοχής και της δυσκαμψίας της βιο-τσιμεντοποιημένης άμμου Sydney. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από ορυκτά χαλαζία, με γωνιακά σωματίδια, ομοιόμορφα διαβαθμισμένα. Επίσης, κατά το κοσκίνισμα δε βρέθηκαν λεπτόκοκκα.

Μέθοδος Προετοιμασίας

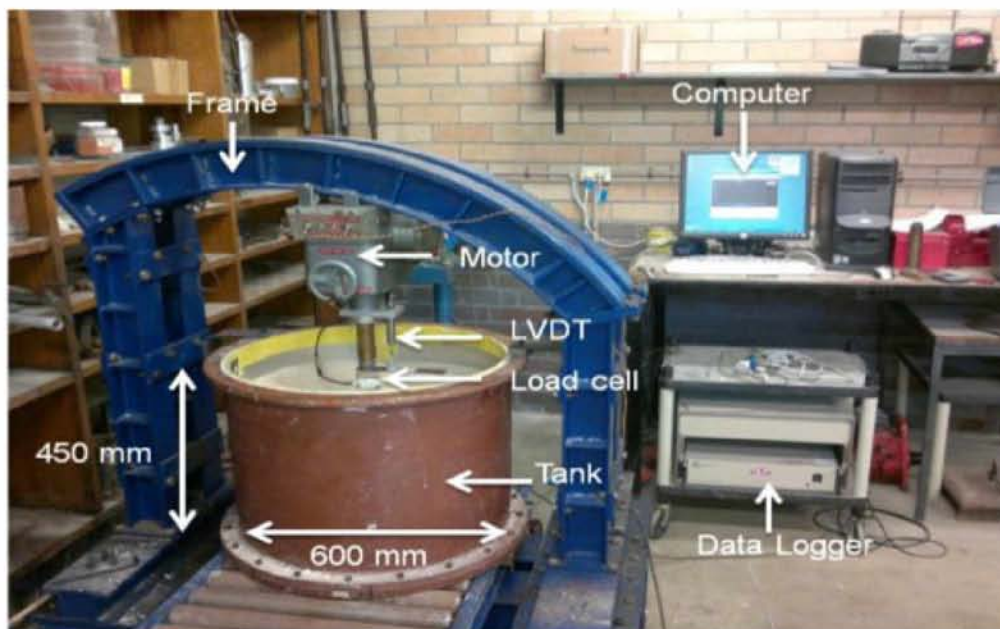
Κατά την προετοιμασία, χρησιμοποιήθηκε το βακτήριο *B.Megaterium*. Το βακτήριο αυτό έχει ραβδωτό σχήμα και είναι μη παθογόνο. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τεχνικές καλλιέργειας βακτηρίων. Στην πρώτη μέθοδο (standard agar plate), τα πιάτα Petri γεμίστηκαν με λεπτό στρώμα από μέσο άγαρ (Σύσταση: ουρία, θειικό αμμώνιο, εκχύλισμα ζύμης, άγαρ, χλωριούχο νάτριο και γλυκόζη) και κλείστηκαν αμέσως με ένα καπάκι. Στη δεύτερη μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε υγρό μέσο το οποίο αποτελείται από θρεπτικό ζωμό, ουρία, χλωριούχο αμμώνιο, χλωριούχο ασβέστιο και NaHCO_3 . Στη συνέχεια, προστέθηκε Christensen ως μέσο ουρίας για την παρακολούθηση της βακτηριακής ανάπτυξης και έγινε ο εμβολιασμός των βακτηρίων. Ακόμη, εφαρμόστηκε η τεχνική μέτρησης της αγωγιμότητας, η οποία αποτελεί μέθοδο για την παρακολούθηση της ποσότητας θρεπτικών ουσιών στο νερό. Στη διαδικασία αυτή εκτιμώνται η συγκέντρωση της ουρίας και του αμμωνίου με την πάροδο του χρόνου. Η υδρόλυση της ουρίας εκτιμήθηκε υποθέτοντας ότι κάθε γραμμομόριο υδρολύμενης ουρίας παράγει 2 γραμμομόρια αμμωνίου. Από τις μετρήσεις αγωγιμότητας, λήφθηκαν κινητικά δεδομένα για το *B.Megaterium*. Ένα υγρό μέσο πλούσιο σε ουρία και γλυκόζη, ως πηγές ενέργειας και άνθρακα, χύθηκε σε ποτήρι ζέσεως 50 mL, σε αερόβιο περιβάλλον. Στην συνέχεια εισήχθησαν βακτηριακές καλλιέργειες και έγινε η συλλογή των δειγμάτων κάθε μισή ώρα για να μετρηθεί η συγκέντρωση των βακτηρίων (Spectrophotometer). Επίσης, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αμμωνίου και ουρίας.

Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών, διαμορφώθηκαν βιο-τσιμεντοποιημένα δοκίμια, δοκίμια τσιμεντοποιημένα με γύψο και μη τσιμεντοποιημένα δοκίμια άμμου. Για τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, χρησιμοποιήθηκε συναρμολογούμενο καλούπι για τον σχηματισμό κυλινδρικών δειγμάτων διαμέτρου 55 mm και ύψους 110 mm. Για τις δοκιμές θεμελίωσης, χρησιμοποιήθηκαν PVC σωλήνες, εσωτερικής διαμέτρου 37.5 mm, εξωτερικής διαμέτρου 42 mm και μήκους 100 ή 200 mm.

Παρακάτω περιγράφονται οι μέθοδοι προετοιμασίας των δειγμάτων για τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης. Όσον αφορά τα τσιμεντοποιημένα δείγματα με γύψο, τα κυλινδρικά δείγματα παρασκευάστηκαν από την ανάμιξη γύψου, άμμου και νερού, σε ποσότητες γύψου 5-20% του ξηρού βάρους της άμμου. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε απεσταγμένο νερό και το μίγμα αναδεύτηκε για ένα λεπτό πριν τοποθετηθεί στο καλούπι. Προκειμένου να παρασκευασθούν δείγματα με ομοιόμορφη ξηρή πυκνότητα, τα μίγματα τσιμέντου και άμμου τοποθετήθηκαν σε 5 στρώσεις και το καθένα συμπίεστηκε μετά την τοποθέτηση στο καλούπι. Για τη διαμόρφωση των βιο-τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, αρχικά πραγματοποιήθηκε η καλλιέργεια των βακτηρίων με την τοποθέτηση ενός KWIK STIK στο υγρό μέσο, το οποίο στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε επωαστήρα στους 30 βαθμούς για μια ημέρα. Πριν από την ανάμιξη με την άμμο, 1 mL του βακτηριακού υγρού διοχετεύθηκε σε κυψελίδα, έτσι ώστε η απορρόφησή του να μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση φασματοφωτόμετρου. Έπειτα το έντονα εμπλουτισμένο βακτηριακό διάλυμα των 99 mL, αναμίχθηκε με ουρία, χλωριούχο ασβέστιο και σκόνη άμμου και τελικά το μίγμα αυτό τοποθετήθηκε στο καλούπι.

Παρακάτω περιγράφονται οι μέθοδοι προετοιμασίας των δειγμάτων για τις τριαξονικές δοκιμές. Τα μη τσιμεντοποιημένα δείγματα προετοιμάστηκαν με την προζύγισή τους, για να ληφθεί η επιθυμητή σχετική πυκνότητα και έπειτα η άμμος χύθηκε μέσω χοάνης από σταθερό ύψος. Μόλις η άμμος τοποθετήθηκε σωστά στο καλούπι, έτσι ώστε το δείγμα να διατηρείται ακέραιο, το καλούπι απομακρύνθηκε από το δείγμα και καταγράφηκαν οι διαστάσεις του δείγματος. Σε αυτό εφαρμόστηκε τάση 10 kPa και το δείγμα ήταν έτοιμο για τη δοκιμή. Η προετοιμασία των δειγμάτων τσιμεντοποιημένων με γύψο ήταν παρόμοια με τη διαδικασία προετοιμασίας των μη τσιμεντοποιημένων εδαφών εκτός από την ανάμιξη του γύψου με την άμμο και το νερό. Τοποθετήθηκε σε μολ άμμος, γύψος, 10 % νερό του συνολικού βάρους της άμμου και του τσιμέντου και το μίγμα αναδεύτηκε για ένα λεπτό μέχρι να τοποθετηθεί στο καλούπι. Το μίγμα τοποθετήθηκε σε 5 στρώματα για να παρασκευαστούν ομοιόμορφα δείγματα. Έπειτα από 12 ώρες σκλήρυνσης, το συναρμολογούμενο καλούπι απομακρύνθηκε από το δείγμα. Μετά την ωρίμανση, τα δείγματα δοκιμάστηκαν σε αστοχία σε δοκιμές ICD και CU. Για τα βιο-τσιμεντοποιημένα δείγματα, εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία με αυτή των δειγμάτων με γύψο εκτός από την ανάμιξη των θρεπτικών ουσιών και του βακτηριακού υγρού με την άμμο. Το βακτηριακό υγρό έπρεπε να προετοιμαστεί έτσι ώστε να φθάσει στη βέλτιστη βιομάζα πριν την ανάμιξη. Αναμίχθηκαν σε μολ άμμος, ποσότητες ουρίας και χλωριούχο ασβέστιο σε σκόνη. Οι

μάζες της ουρίας και του χλωριούχου ασβεστίου κυμαίνονταν από 5-20% του ξηρού βάρους της άμμου. Στη συνέχεια προστέθηκε νερό, έτσι ώστε η υγρασία να είναι μέχρι το 10% του βάρους των ξηρών συστατικών και συμπυκνώθηκε μέσα στο καλούπι. Το μίγμα αναδεύτηκε για 1 λεπτό και μετά τοποθετήθηκε μέσα στο καλούπι. Συμπιέστηκαν 5 στρώματα μίγματος, μέσα στο καλούπι και έπειτα ακολούθησε η ίδια διαδικασία με τα δείγματα γύψου. Ο χρόνος σκλήρυνσης για τα συγκεκριμένα δείγματα είναι μεγαλύτερος από αυτά με γύψο. Όσον αφορά την προετοιμασία των δειγμάτων για τις δοκιμές θεμελίωσης, δημιουργήθηκαν τσιμεντοποιημένες εδαφικές στήλες σύμφωνα με την τεχνολογία βαθιάς εδαφικής ανάμιξης. Αρχικά, η δεξαμενή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.71), διαμέτρου 600mm, γεμίστηκε με άμμο.



Σχήμα 4.71 Εξοπλισμός για τη βαθιά εδαφική ανάμιξη (Duraisamy, 2016).

Στη συνέχεια εισήχθησαν σε αυτή σωλήνες PVC (μήκους 100 και 200 mm). Επίσης εισήχθησαν στη συσκευή μέσω χοάνης το βακτηριακό υγρό, η ουρία και το χλωριούχο ασβέστιο και πραγματοποιήθηκε η μίξη του εδάφους με τα παραπάνω διαλύματα. Μετά τη μίξη, ο σωλήνας PVC αφαιρέθηκε και η τσιμεντοποιημένη στήλη αφέθηκε εντός της δεξαμενής έτσι ώστε να εξαπλωθεί σε όλο της το μήκος το βακτηριακό διάλυμα (Σχήμα 4.72). Επειδή ο βαθμός κορεσμού επηρεάζει την καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου, η άμμος στη δεξαμενή παρασκευάστηκε σε 3 συνθήκες: ξηρή, μερικώς και πλήρως κορεσμένη.



Σχήμα 4.72 Αφαίρεση του σωλήνα PVC από τη δεξαμενή (Duraisamy, 2016).

Εργαστηριακές Δοκιμές

Στη συγκεκριμένη διατριβή πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω δοκιμές:

1. Δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης
2. Τριαξονικές δοκιμές, οι οποίες αποτελούνταν από τον κορεσμό, την στερεοποίηση και τη διάτμηση. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, στις τριαξονικές συσκευές, για την παρακολούθηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Για τα μη τσιμεντοποιημένα και τα δείγματα τσιμεντοποιημένα με γύψο, εφαρμόστηκε τάση 5 kPa στη βάση αποστράγγισης για να κορεσθούν και έπειτα ακολούθησε η διήθηση. Για τα βιο-τσιμεντοποιημένα δείγματα, η διήθηση του νερού προκάλεσε έκπλυση του ασβεστίου που καθιζάνει από το δείγμα. Ενώ αυτό φάνηκε να μην επηρεάζει την τσιμεντοποίηση, καθώς η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων παρέμεινε σταθερή, η παρουσία του ιζήματος στις γραμμές αποστράγγισης ήταν ανεπιθύμητη. Έτσι, το στάδιο της διήθησης δεν πραγματοποιήθηκε στα περισσότερα βιο-τσιμεντοποιημένα δείγματα. Στην συνέχεια, αυξήθηκαν οι πιέσεις του νερού των πόρων και οι πιέσεις της κυψέλης με ρυθμό 10 kPa/min. Έπειτα, διατηρήθηκε σταθερή η ενεργός πίεση της κυψέλης μέχρι η πίεση του νερού των πόρων να φθάσει τα 300 kPa. Ο κορεσμός επήλθε όταν ο δείκτης B ήταν μεγαλύτερος ή ίσος του 0.96, δεν υπάρχει αλλαγή στο δείκτη πόρων και η ενεργός τάση διατηρήθηκε σταθερή. Εφαρμόστηκε ισότροπη συμπίεση, αυξάνοντας την πίεση της κυψέλης και μετρώντας τη μεταβολή του δείκτη πόρων. Το τρίτο στάδιο ήταν αυτό της διάτμησης, όπου εφαρμόστηκαν τάσεις οι οποίες κυμαίνονταν από 20-500 kPa.

3. Πραγματοποιήθηκαν 1-g model footing test προκειμένου να ελεγχθεί η ικανότητα παραγωγής βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφικών στηλών, σύμφωνα με την τεχνολογία βαθιάς εδαφικής ανάμιξης, και η δυνατότητα επισκευής τσιμεντοποιημένων στηλών οι οποίες έχουν αστοχήσει, με τη χρήση βιο-υλικών. Στις δοκιμές αυτές εφαρμόστηκαν ρυθμοί παραμόρφωσης οι οποίοι κυμαίνονταν περίπου στα 0.076 mm/min, έως ότου να υπάρξει σαφής πτώση τάσης στα δοκίμια. Εφαρμόστηκαν 3 στρατηγικές για την επισκευή των κατεστραμμένων στηλών. Ο πρώτος τρόπος αφορούσε ενέσεις βακτηριακού διαλύματος γύρω από την τσιμεντοποιημένη στήλη και κοντά στη ρωγμή (Repaired column 1). Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν σε πέντε σημεία γύρω από τη στήλη, ενέσεις των 2 mL. Στο δεύτερο τρόπο, πραγματοποιήθηκε η έκχυση 10 mL βακτηριακού διαλύματος, στο κέντρο της στήλης, με τη χρήση χοάνης (Repaired column 2). Στον τρίτο τρόπο, έγινε έγχυση 10mL διαλύματος στο κέντρο της στήλης με τη χρήση χοάνης, χωρίς όμως να περιλαμβάνονται βακτήρια στο διάλυμα (Repaired column 3) (Σχήμα 4.73).

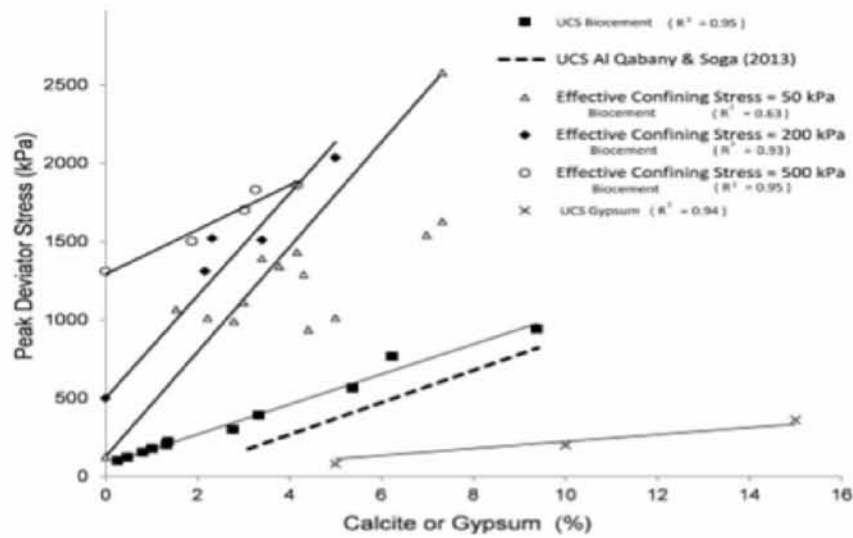


Σχήμα 4.73 Μέθοδος επισκευής της στήλης με a) ένεση και b) χοάνη (Duraismy, 2016).

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

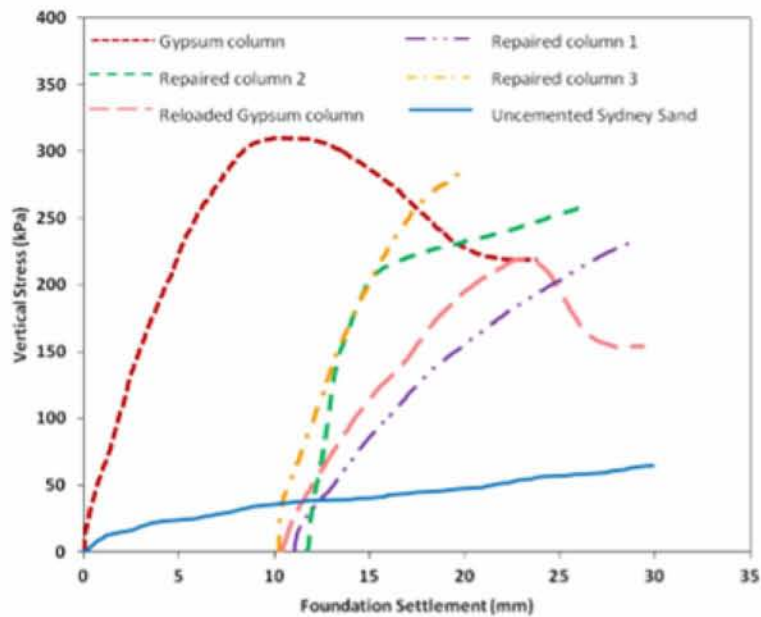
- Βρέθηκε ότι το υψηλότερο ποσοστό υδρόλυσης της ουρίας καταγράφηκε όταν οι συγκεντρώσεις ασβεστίου ήταν διπλάσιες από αυτές της ουρίας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε μια διαδικασία μίξης, μπορούν να κατακρημνισθούν σημαντικές ποσότητες ασβεστίτη.

- Αποδείχθηκε ότι το *B. Megaterium* μπορούσε να παράγει αρκετή ουρεάση για να ικανοποιήσει τη δραστηριότητα 10 mM ουρίας/min που απαιτείται για τη πραγματοποίηση της βιο-τσιμεντοποίησης (batch conditions).
- Το επίπεδο της δραστηριότητας ουρεάσης ήταν μεταβλητό σε σχέση με τη συγκέντρωση της βιομάζας, δηλώνοντας ότι η ποσότητα του ενζύμου ανά κύτταρο δεν ήταν σταθερή.
- Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης βρέθηκε ότι η αντοχή και η δυσκαμψία των δειγμάτων, δεν επηρεάζονταν σημαντικά από τη μέθοδο προετοιμασίας του δείγματος (ανάμιξη ή ένεση μέσω αντλίας). Συνιστάται, η προετοιμασία με ανάμιξη για την απόκριση ασθενών τσιμεντοποιημένων υλικών, λόγω του ότι είναι πιο οικονομική μέθοδος και δεν προκύπτουν προβλήματα ανομοιογένειας με αυτή. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί στην ανάμιξη σε περίπτωση που απαιτούνται υψηλά επίπεδα ασβεστίου, καθώς τα επίπεδα ασβεστίου μεγαλύτερα από 5 % σχετίζονται με μεταβλητή τσιμεντοποίηση.
- Οι δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης έδειξαν, μέσω των τιμών αντοχής στα δείγματα, ότι χαμηλές ποσότητες βιο-τσιμεντοποίησης μπορούν να είναι πολύ πιο αποτελεσματικές από υψηλότερες ποσότητες γύψου. Για παράδειγμα, η ποσότητα 1% ασβεστίτη οδηγεί σε ισοδύναμη αντοχή με ποσότητα 8% γύψου.
- Μέσω των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών, διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση του ποσοστού ασβεστίτη στην αντοχή σε χαμηλές ενεργές τάσεις. Παρατηρήθηκε ότι, για την επίτευξη ισοδύναμης αντοχής, απαιτήθηκε διπλάσιο ποσοστό γύψου από εκείνο του ασβεστίτη (Σχήμα 4.74).



Σχήμα 4.74 Επίδραση του τσιμέντου και των τάσεων στην μέγιστη αποκλίνουσα τάση (Duraisamy, 2016).

- Οι δοκιμές θεμελίωσης επιβεβαίωσαν τη σκοπιμότητα χρήσης μιας επιτόπου τεχνικής ανάμιξης με βιο-τσιμεντοποίηση. Παρατηρήθηκε βελτίωση της συμπεριφοράς των θεμελίων που είχαν ρηγματωθεί, μέσω της μεθόδου βιο-τσιμεντοποίησης, με παρόμοια αποτελέσματα στη βελτίωση με τη χρήση γύψου (Σχήμα 4.75).



Σχήμα 4.75 Διάγραμμα τάσης-μετακίνησης των θεμελίων που επισκευάστηκαν (Duraisamy, 2016).

- Βρέθηκε ότι η βιο-τσιμεντοποίηση με ανάμιξη, παρήγαγε ομοιογενή δείγματα με παρόμοιες αντοχές και δυσκαμψίες, με την κοινώς χρησιμοποιούμενη τεχνική έγχυσης.

Μέσω της μελέτης αυτής λοιπόν, συνίσταται η βελτιστοποίηση της παραγωγής ουρεάσης πριν από οποιαδήποτε δοκιμή πεδίου, με τον έλεγχο και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας και του pH.

(στ) Το 2016 οι Kim και Youn, μελέτησαν την εφαρμογή της μεθόδου MICP στα κοκκώδη εδάφη. Στα πειράματα που εκτέλεσαν χρησιμοποιήθηκε η άμμος Jumunjin, η οποία, σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης USCS, ορίστηκε ως κακώς διαβαθμισμένη άμμος.

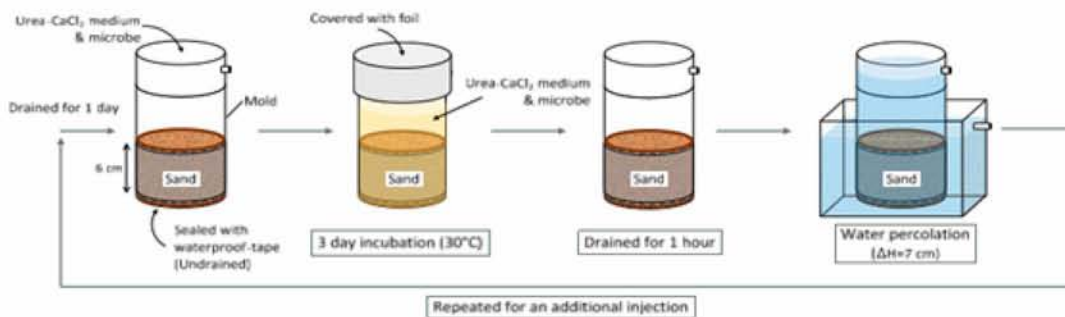
Μέθοδος Προετοιμασίας

Η σχετική πυκνότητα της άμμου Jumunjin ρυθμίστηκε στο 60% ή 80% σε ένα καλούπι προετοιμασίας δείγματος με ύψος 6 cm. Για τις μετρήσεις ανθρακικού ασβεστίου χρησιμοποιήθηκαν δείγματα άμμου 100 gr. Αρχικά, τα βακτήρια *S. pasteurii* διατηρήθηκαν στους -80 °C σε 20% γλυκερόλη και τα κύτταρα ενεργοποιήθηκαν με καλλιέργεια σε θρεπτικό ζωμό σόγιας που περιείχε ουρία (2%, βάρος / όγκο) για 2-3 ημέρες σε 28 °C πριν τη χρήση. Στη συνέχεια, λήφθηκαν δείγματα από ασβεστολιθικά εδάφη, από τα οποία απομονώθηκαν τα υπόλοιπα 4 βακτηριακά στελέχη, συντηρήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε διάλυμα ουρίας και CaCl₂. Επιλέχθηκαν μεμονωμένες αποικίες με προφανή σχηματισμό κρυστάλλων και ξεπλύθηκαν από μέσο ουρίας-CaCl₂. Αφού μετρήθηκαν οι δραστηριότητες ουρεάσης, επιλέχθηκαν και ταυτοποιήθηκαν, με προσδιορισμό αλληλουχίας 16S rRNA, τα βακτηριακά στελέχη με δραστηριότητες ουρεάσης που υπερέβαιναν εκείνα του στελέχους *S. Pasteurii*. Τα απομονωμένα βακτηρίδια εισήχθησαν σε μέσο ουρίας-CaCl₂ σε τελική συγκέντρωση 10⁸-10⁹ CFU / mL και διατηρήθηκαν στους -80 °C σε 20% γλυκερόλη. Τα βακτηριακά στελέχη εισήχθησαν σε 35 mL μέσου ουρίας-CaCl₂ και καλλιεργήθηκαν στους 28 °C για 2-3 ημέρες πριν από τον εμβολιασμό σε δείγματα άμμου. Χρησιμοποιήθηκαν καλλιέργειες (10⁸-10⁹ CFU / mL) εντός μέσου ουρίας-CaCl₂ 35 mL στον εμβολιασμό της άμμου για επεξεργασία με MICP με 500 mL μέσου ουρίας-CaCl₂.

Εργαστηριακές Δοκιμές

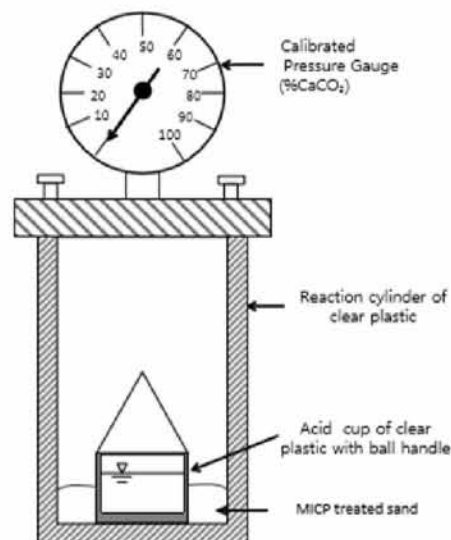
Χρησιμοποιήθηκε αδιάβροχη ταινία για τη σφράγιση του πυθμένα του καλουπιού και προστέθηκαν 500 mL ουρίας-CaCl₂ και διάλυμα μικροβίων 5 mL στην κορυφή της άμμου για επεξεργασία με MICP. Η επεξεργασμένη άμμος επώαστηκε για 3 ημέρες στους 30 °C, με το καλούπι καλυμμένο στο άνω μέρος με φύλλο αλουμινίου. Στη συνέχεια, το δείγμα

άμμου αποστραγγίστηκε για 1 ώρα σε θερμοκρασία δωματίου. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε διήθηση του νερού μέσω της άμμου με σταθερή διαφορά στην υδραυλική κεφαλή των 7 cm. Η επεξεργασμένη άμμος αποστραγγίστηκε για μία ημέρα και ήταν έτοιμη για τον δεύτερο κύκλο επεξεργασίας MICP. Στους διαδοχικούς κύκλους, εγχύθηκε ένα νέο μέσο ουρίας- CaCl_2 και διάλυμα μικροβίων και μετρήθηκε η καταβύθιση του ασβεστίου της επεξεργασμένης άμμου μετά από τις δύο ενέσεις (Σχήμα 4.76). Η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλήφθηκε για πέντε μικροβιακά στελέχη και δύο σχετικές πυκνότητες δείγματος άμμου.



Σχήμα 4.76 Η διαδικασία της ασβεστικής καθίζησης (Kim, 2016).

Η ποσότητα καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ASTM D4373 (Σχήμα 4.77). Αυτή η τυπική μέθοδος χρησιμοποιεί έναν κύλινδρο αντίδρασης, ένα δοχείο με υδροχλωρικό οξύ (HCl) και ένα μετρητή πίεσης.



Σχήμα 4.77 Ο θάλαμος που περιέχει το ανθρακικό ασβέστιο και μετράει την ποσότητα του καταβυθισμένου ανθρακικού ασβεστίου (Kim, 2016).

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Η ποσοτική ανάλυση της στοιχειακής σύνθεσης της μικροβιακά επεξεργασμένης άμμου πραγματοποιήθηκε με EDS.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Η δραστηριότητα ουρεάσης των τεσσάρων απομονώσεων (*S. saprophyticus*, *S. globispora*, *B. lentus*, & *Sporosarcina* sp.) που συλλέχθηκαν από 20 μικρόβια ήταν υψηλότερη από εκείνη του βακτηρίου *S. pasteurii*. Ωστόσο, η ποσότητα καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου ήταν μεγαλύτερη για το *Sporosarcina* sp., ακολουθούμενη από τα *S. saprophyticus*, *B. Lentus*, *S. pasteurii* και *S. globispora*. Έτσι, διαπιστώνεται ότι η δραστηριότητα της ουρεάσης συσχετίζεται σε μικρό βαθμό με την ποσότητα καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου.
- Αποδείχθηκε ότι η αύξηση της σχετικής πυκνότητας, των μη συνεκτικών εδαφών, συνέβαλε στην αύξηση της ποσότητας του κατακρημνισμένου CaCO_3 .
- Η ανάλυση SEM αναγνώρισε την ύπαρξη κρυσταλλικής ουσίας στην επιφάνεια των κόκκων άμμου, μετά από επεξεργασία με τη μέθοδο MICP. Η ίδια ουσία αναγνωρίστηκε ως ανθρακικό ασβέστιο με την ανάλυση EDS.

4.3 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης άλλων τύπων εδαφών με τη χρήση βιο-υλικών

4.3.1 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης υπολειμματικών εδαφών με τη χρήση βακτηρίων

Το 2012 οι Ng, Lee, Hii μελέτησαν τους παράγοντες που επηρεάζουν την μικροβιακά επαγόμενη καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου και το δυναμικό της μεθόδου στη βελτίωση του εδάφους. Προσδιορίστηκαν αρκετοί παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών ουσιών, του τύπου, της γεωμετρικής συμβατότητας, της συγκέντρωσης των κυττάρων, της σταθεροποίησης και της κατανομής των βακτηρίων στο έδαφος, της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης των αντιδραστηρίων, του pH και της μεθόδου ένεσης. Εκτελέστηκαν

πειράματά όπου χρησιμοποιήθηκαν υπολειμματικά εδάφη με περιεκτικότητες χαλκικού 0%, άμμου 29% , ιλύος 55% και αργίλου 16%.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Τα υπολειμματικά εδάφη παρασκευάστηκαν σε ποσοστά τα οποία αντιστοιχούν στο 85%, 90% και 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας. Διαμορφώθηκαν μη επεξεργασμένα δείγματα, δείγματα στα οποία προστέθηκε διάλυμα τσιμεντοποίησης και δείγματα στα οποία προστέθηκαν διάλυμα τσιμεντοποίησης και βακτηριακό υγρό.

Το *Bacillus Megaterium* αναπτύχθηκε σε θρεπτικό ζωμό σε θερμοκρασία 37°C υπό αερόβιες συνθήκες. Η καλλιέργεια (5×10^7 cfu / mL) συλλέχθηκε και αναμίχθηκε με δείγματα εδάφους που ξηράνθηκαν στον αέρα. Το διάλυμα τσιμεντοποίησης περιείχε αντιδραστήρια τσιμεντοποίησης, 3 gr θρεπτικού ζωμού, 10 gr NH_4Cl και 2,12 gr NaHCO_3 ανά λίτρο απιονισμένου νερού. Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη είναι η ουρία και το χλωριούχο ασβέστιο που παρασκευάστηκαν σε συγκέντρωση 0.25 M.

Το έδαφος συμπίεστηκε εντός καλουπιού (διάμετρος 50 mm, μήκος 150 mm) στην επιθυμητή πυκνότητα. Η ενίσχυση με τη μέθοδο MICP πραγματοποιήθηκε με έγχυση όγκου διαλύματος τσιμεντοποίησης στα δείγματα εδάφους σε διάστημα 6 ωρών για διάρκεια θεραπείας 48 ωρών. Η ταχύτητα ροής ρυθμίστηκε σε περίπου 1.7×10^{-5} m/s.

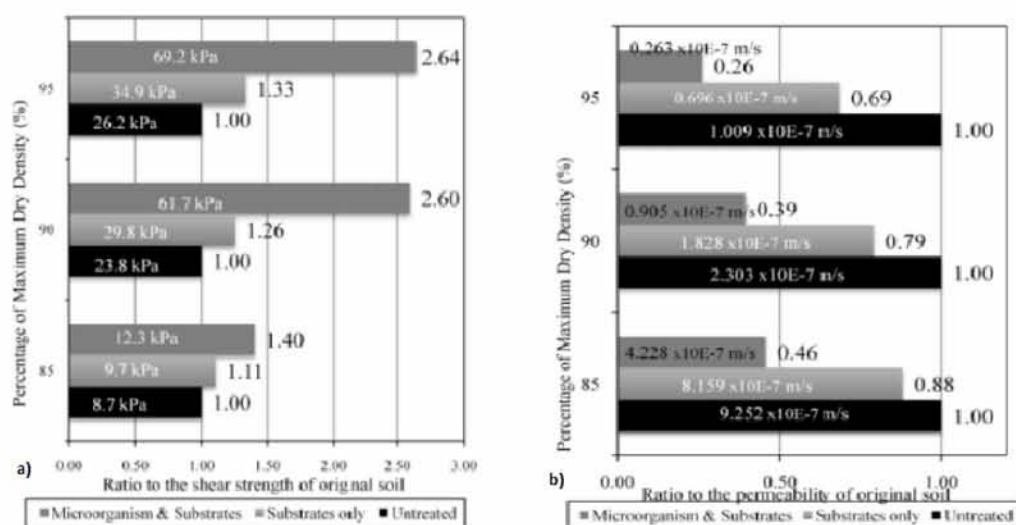
Εργαστηριακές Δοκιμές

Τα δείγματα εδάφους που υποβλήθηκαν σε διαφορετικές συνθήκες θεραπείας ελέγχθηκαν για την αντοχή σε διάτμηση και τη διαπερατότητα τους. Η αντοχή διατμήσεως λήφθηκε με την εκτέλεση της δοκιμής ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης σε κορεσμένο δείγμα. Η διαπερατότητα προσδιορίστηκε από τη δοκιμή διαπερατότητας μεταβλητού υδραυλικού φορτίου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο η διατμητική αντοχή όσο και η αδιαπερατότητα των υπολειμματικών εδαφών βελτιώθηκαν σημαντικά κατά τη θεραπεία

με τη χρήση της μεθόδου MICP. Η βελτίωση αυξήθηκε με την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους. Για τα δείγματα εδάφους που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μόνο με διάλυμα τσιμεντοποίησης, η διατμητική αντοχή και η αδιαπερατότητα βελτιώθηκαν ελαφρά (Σχήμα 4.78). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενεργοποιήθηκε η μικροβιακά επαγόμενη κατακρήμνιση του ασβεστίτη από βακτήρια τα οποία υπάρχουν φυσικά στο έδαφος. Όμως η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων ήταν μικρότερη από αυτή των δειγμάτων στα οποία πέραν του διαλύματος τσιμεντοποίησης εισήχθησαν και μικρόβια *Bacillus Megaterium*.



Σχήμα 4.78 a) Αποτελέσματα διατμητικής αντοχής και b) αποτελέσματα διαπερατότητας των υπολειμματικών εδαφών (Ng, 2012).

- Από την ανάλυση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, παρατηρήθηκε μια σχετικά ομαλή επιφάνεια σωματιδίων στο μη επεξεργασμένο δείγμα. Στο δείγμα με το διάλυμα τσιμεντοποίησης εντοπίστηκαν κάποιοι κρύσταλλοι ασβεστίου στην επιφάνεια των σωματιδίων ενώ στο δείγμα με διάλυμα τσιμεντοποίησης και βακτήρια, οι κρύσταλλοι ασβεστίου βρέθηκαν σε αφθονία.

4.3.2 Πειραματική διερεύνηση της μεθόδου σταθεροποίησης οργανικής ύλης με τη χρήση βακτηρίων

Οι Canacki, Sidik και Kilic (2015), ασχολήθηκαν με τη μελέτη της επίδρασης της βακτηριακής καθίζησης του ανθρακικού ασβεστίου στη συμπιεστότητα και τη διατμητική αντοχή του οργανικού (μίγμα από λεπτά σωματίδια οργανικής ύλης) εδάφους. Η ποσότητα

της οργανικής ύλης σε ένα έδαφος επηρεάζει σημαντικά τις γεωτεχνικές του ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου του ειδικού βάρους, της περιεκτικότητας σε νερό, του ορίου υδαρότητας, του ορίου πλαστιμότητας, της πυκνότητας, της υδραυλικής αγωγιμότητας, της συμπιεστότητας και της αντοχής.

Μέθοδος Προετοιμασίας

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, είχε ταξινομηθεί ως (OH) αμμώδης οργανική ιλύς, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδαφών USCS, και σαν τύρφη σύμφωνα με τους Wust et al.(2003). Τα αποτελέσματα της χημικής και φυσικής ανάλυσης του οργανικού εδάφους φαίνονται στον Πίνακα 4.5. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δείγματα οργανικού εδάφους που διέρχονται από το κόσκινο No.2 και συγκρατήθηκαν στο κόσκινο No. 100 (0.15 mm). Η επιλογή αυτού του εύρους έγινε προκειμένου να υπάρξει αρκετός χώρος για τα βακτήρια διαμέτρου από 0,5-3 μm (Madigan and Martinko, 2003). Η διαπερατότητα του οργανικού εδάφους μετρήθηκε και βρέθηκε ότι είναι $5.2 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

Πίνακας 4.5 Οι μηχανικές ιδιότητες του προς μελέτη οργανικού εδάφους (Canacki, 2015).

Properties of organic soil	Content (%)
Organic content (%)	60
pH	6.5
Natural water content (%)	256
Liquid limit (%)	125
Plasticity index (%)	NP
Specific gravity (g/cm^3)	1.97
CaCO_3	0
$\text{NO}_3\text{-N}$ (ppm)	50–150
$\text{NH}_4\text{-N}$ (ppm)	40–140
K (ppm)	0–20
P (ppm)	0.2–0.7

Αρχικά, το έδαφος τοποθετήθηκε σε φούρνο όπτησης στους 440°C για 4 ώρες, και το οργανικό περιεχόμενο εκτιμήθηκε, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 2974, απ' όπου προέκυψε ότι το έδαφος περιείχε 15% ιλύ και άργιλο, 25% άμμο και 60% οργανικά υλικά.

Στην τρέχουσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το βακτήριο *S. pasteurii* (NCIMB 8221), το οποίο καλλιεργήθηκε σε θρεπτικό άγαρ ουρίας. Ο Πίνακας 4.6 δείχνει όλες τις στερεές και υγρές περιεχόμενες ουσίες.

Πίνακας 4.6 Λεπτομέρειες των στερεών και υγρών περιεχομένων (Canacki 2015).

Composition	Quantity
Agar	15 g
Peptone	5 g
NaCl	5 g
Yeast extract	2 g
Beef extract	1 g
Urea solution*	50 mL

*Urea solution (add 20 g of urea to distilled water and bring the volume to 100 mL. Mix well. Filter and sterilize).

Για την παρασκευή αυτού του μέσου, τα στερεά συστατικά προστέθηκαν σε απεσταγμένο νερό για να φτάσουν όγκο 1 L. Το μίγμα θερμάνθηκε μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία βρασμού, τοποθετήθηκε σε κλίβανο για 15 λεπτά και ψύχθηκε στους 50-55 °C. Έπειτα, 50 ml διαλύματος ουρίας προστέθηκαν στο μίγμα και αναμίχθηκαν καλά. Το θρεπτικό άγαρ ουρίας χύθηκε σε 20 πλάκες καλλιέργειας. Μια ποσότητα καθαρής αποικίας λήφθηκε από τα αποθέματα των βακτηρίων και απλώθηκε πάνω σε κάθε πλάκα καλλιέργειας. Όλες οι πλάκες επώαστηκαν για 48-72 ώρες στους 30 °C. Μετά την επώαση, πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη αποικίας του *S. Pasteurii*, για καθεμία από τις απλές προκύπτουσες αποικίες που μεταφέρθηκαν από την πλάκα σε φιάλη καλλιέργειας των 250 mL που περιείχε 200 mL θρεπτικό ζυμό ουρίας. Αφού αφαιρέθηκαν οι βιο-ρύποι, η φιάλη καλλιέργειας επώαστηκε για 48 ώρες στους 30 °C. Μετά την επώαση, 40 mL του βακτηριακού διαλύματος μεταφέρθηκαν σε μια σειρά σωλήνων των 50 mL. Κάθε σωλήνας καλλιέργειας φυγοκεντρήθηκε για 20 λεπτά, προκειμένου να διαχωριστεί το εναιώρημα από το υπερκείμενο υγρό. Το υπερκείμενο απομακρύνθηκε με έκχυση του σε μία χωριστή φιάλη, και το υπόλοιπο βακτηριακό ίζημα στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της βακτηριακής.

Το διάλυμα ουρίας παρασκευάστηκε από την ανάμιξη 3 gr θρεπτικού μέσου, 20 gr ουρίας, 10gr NH_4Cl , 2,12gr NaHCO_3 και 500 mL απεσταγμένου ύδατος. Κάθε ένα από τα στερεά συστατικά αναμίχθηκε πλήρως σε 500 mL απεσταγμένου ύδατος μέχρι να διαλυθούν, πριν από την αποστείρωση τους σε κλίβανο. Στη συνέχεια, προστέθηκε αποσταγμένο νερό για να προκύψει ο τελικός απαιτούμενος όγκος (1 L). Μετά από τον κλίβανο, η τιμή pH του προκύπτοντος 1 L ρυθμίστηκε στην τιμή 8. Στο 1 L του αεριούχου διαλύματος προστέθηκαν *S.pasteurii* κύτταρα και 20 mL διαλύματος CaCl_2 . Τα 500 mL του τελικού προϊόντος εγχύθηκαν στη στήλη άμμου, μέσω της βαρύτητας, και αφέθηκαν να δράσουν για τουλάχιστον 12 ώρες, για να επιτραπεί στα μικρόβια να προσκολληθούν στα σωματίδια των εδαφικών κόκκων. Μετά από 6 ώρες, εγχύθηκαν τα υπόλοιπα 500 mL και η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν περιοδικά κάθε 6 ώρες για 4 ημέρες.

Παρασκευάστηκαν ένα ελεγχόμενο δείγμα (μη επεξεργασμένο 1) και τρία βιο-επεξεργασμένα δείγματα (βιο-1, βιο-2, και βιο-3) για τις δοκιμές στερεοποίησης σε κυλινδρικά καλούπια διαμέτρου 75 mm και ύψους 20 mm. Παρασκευάστηκαν ακόμα ένα ελεγχόμενο δείγμα (μη επεξεργασμένο 2) και τρία βιο-επεξεργασμένα δείγματα (βιο-4, βιο-5, και βιο-6) για δοκιμές άμεσης διάτμησης σε καλούπια διαστάσεων $60 \times 60 \times 20 \text{ mm}^3$. Το οργανικό έδαφος τοποθετήθηκε στα καλούπια σε μια χαλαρή κατάσταση με ξηρή πυκνότητα ίση με 0,6 και 0,69 gr/cm^3 για τις δοκιμές στερεοποίησης και άμεσης διάτμησης, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια των περιόδων θεραπείας, τα δείγματα επώαστηκαν στους 28 °C. Μετά από κάθε περίοδο θεραπείας, τα δείγματα αφήνονταν να σκληρυνθούν σε θερμοκρασία 25 °C για 5 ημέρες.

Εργαστηριακές Δοκιμές

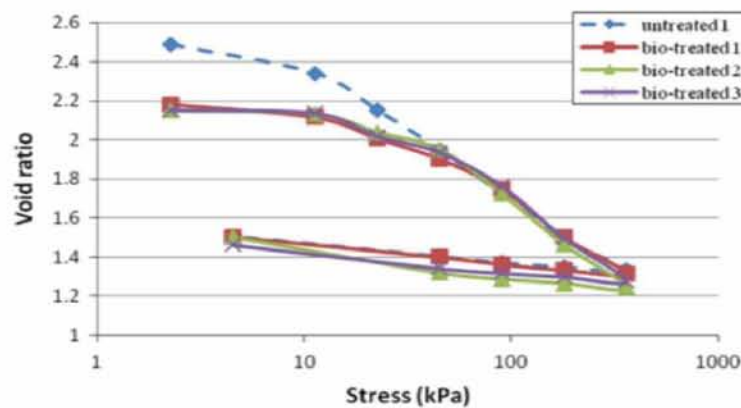
Σε όλες τις περιόδους θεραπείας, οι μεταβολές στις τιμές pH παρακολουθούνταν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Επίσης, στο τέλος όλων των δοκιμών, προσδιορίστηκε η ποσότητα του ανθρακικού ασβεστίου στα δείγματα. Στη συνέχεια, διεξήχθησαν οι δοκιμές στερεοποίησης και άμεσης διάτμησης επί των δειγμάτων. Οι δοκιμές στερεοποίησης εκτελέστηκαν για τον προσδιορισμό του μεγέθους και του ρυθμού στερεοποίησης του εδάφους με μηδενικές πλευρικές παραμορφώσεις, ενώ υποβαλλόταν σε αυξανόμενη τάση φόρτισης (11, 22, 45, 90, 180, και 360 kPa) και στη συνέχεια, αποφόρτισης (180, 90, 45, 5, και 0 kPa). Αφού ρυθμίστηκε το εδαφικό δείγμα στην κυψέλη στερεοποίησης και εφαρμόστηκε κάθε φορτίο ελεγχόμενης τάσης, ελήφθησαν οι ενδείξεις για μία περίοδο 24 ωρών σε χρόνους (0, 0.25, 0.5, 1.2, 4.8, 16, 30, 60, 120, 240, 480, 960, και 1440 λεπτά). Επιπλέον, διεξήχθησαν δοκιμές άμεσης διάτμησης CD. Το δείγμα παραμορφώθηκε με σταθερό ρυθμό μετατόπισης (0,02 mm/min) για να βεβαιωθεί ότι η υπερπίεση του νερού των πόρων διασκορπίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Οι δοκιμές άμεση διάτμησης διεξήχθησαν κάτω από διάφορες κύριες τάσεις (13.6, 20.4, και 27.2 kPa).

Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

- Οι τιμές pH έφθασαν περίπου στο 9,3 για τα οργανικά εδαφικά δείγματα, μετά από 12 ώρες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το ιδανικό εύρος τιμών pH, για την αποτελεσματική καθίζηση του ασβεστίτη είναι μεταξύ 8,3 και 9,3 (Stocks et al, 1999, DeJong et al 2010).

Οι δοκιμές στερεοποίησης έδειξαν ότι:

- Η μεταβολή του δείκτη πόρων για τα τσιμεντοποιημένα δείγματα ήταν χαμηλότερη απ' ό,τι για τα μη τσιμεντοποιημένα. Οι διακυμάνσεις στις αναλογίες κενών, ως προς το συνολικό επίπεδο τάσης, ήταν παρόμοιες μεταξύ των τριών επεξεργασμένων δειγμάτων. Αυτό υποδεικνύει ότι η μέθοδος επεξεργασίας, σε αυτή τη μελέτη, ήταν επαναλαμβανόμενη και συνεπής. Το μη επεξεργασμένο έδαφος έφθασε την τάση διαρροής σε σχεδόν 11 kPa. Από την άλλη πλευρά, παρατηρήθηκαν δυο τάσεις διαρροής για τα επεξεργασμένα δείγματα. Τα δείγματα αυτά έφτασαν στην πρώτη τάσης διαρροής (11 kPa), τη στιγμή που έσπασαν οι δεσμοί μεταξύ των κρυστάλλων και των κόκκων του εδάφους. Μετά από αυτήν την τάση, τα σωματίδια ασβεστίτη πλήρωσαν τα κενά του οργανικού εδάφους, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν περισσότερη τάση με μικρές παραμορφώσεις μέχρι τα 45 kPa (δεύτερη τάση διαρροής) (Σχήμα 4.79).

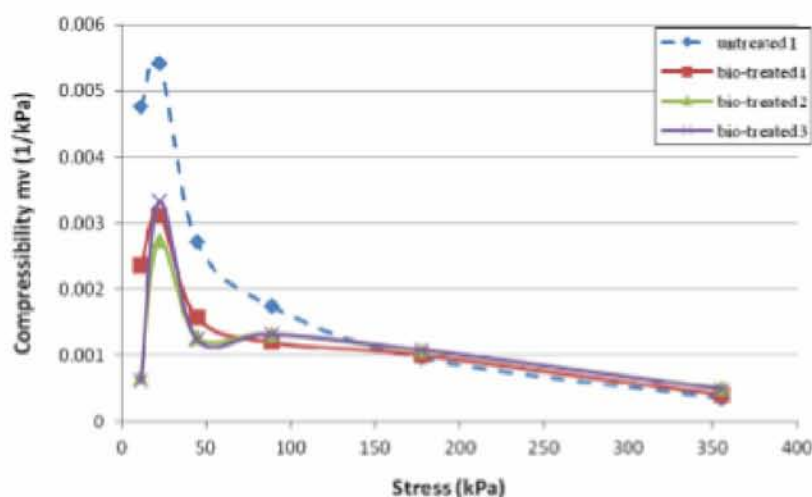


Σχήμα 4.79 Σχέση δείκτη πόρων- τάσης για τσιμεντοποιημένα και μη τσιμεντοποιημένα εδαφικά δείγματα (Canacki, 2015).

Υπολογίστηκαν ο δείκτης συμπίεστος (C_c) και ο λόγος συμπίεσης $C_c / (1 + e_0)$ των επεξεργασμένων και μη επεξεργασμένων δειγμάτων. Για εύρος πίεσης 11– 45 kPa, ο δείκτης συμπίεστος και ο λόγος συμπίεσης των επεξεργασμένων δειγμάτων είχαν μικρότερες τιμές από εκείνες του μη επεξεργασμένου δείγματος. Από την άλλη πλευρά, πέρα από αυτό το εύρος τάσης (45 – 180 kPa) ο δείκτης συμπίεστος και ο λόγος συμπίεσης ήταν παρόμοιοι για αμφότερα τα επεξεργασμένα και μη, δείγματα. Η μείωση του δείκτη συμπίεστος και του λόγου συμπίεσης υποδεικνύει ότι η επεξεργασία που ακολουθήθηκε οδήγησε σε βελτιωμένη συμπεριφορά της συμπίεστος του οργανικού εδάφους.

- Οι τιμές του συντελεστή συμπίεστος (m_v) ήταν υψηλότερες για τα μη τσιμεντοποιημένα δείγματα από ό,τι για τα τσιμεντοποιημένα. Αυτό υποδεικνύει ότι η

συμπιεστότητα των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων μειώθηκε όταν τα κενά του οργανικού εδάφους πληρώθηκαν με σωματίδια στερεού ασβεστίτη. Μετά από υψηλά επίπεδα τάσης, ο συντελεστής συμπιεστότητας για τα μη τσιμεντοποιημένα και τα τσιμεντοποιημένα δείγματα εδάφους έγινε ίδιος (Σχήμα 4.80).

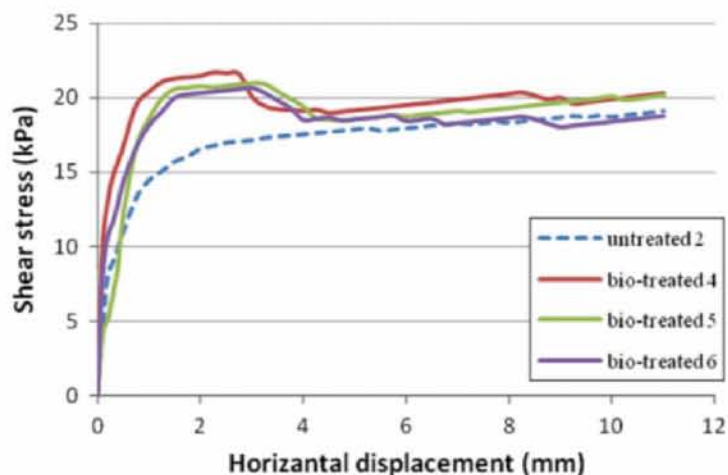


Σχήμα 4.80 Συντελεστής συμπιεστότητας συναρτήσει της τάσης για τα τσιμεντοποιημένα και μη τσιμεντοποιημένα, οργανικά δείγματα (Canacki, 2015).

- Ο συντελεστής στερεοποίησης (c_v), για τα ίδια επίπεδα τάσης, ήταν πάντοτε μικρότερος στα τσιμεντοποιημένα δείγματα απ' ότι στα τα μητσιμεντοποιημένα. Αυτό έδειξε ότι η θεραπεία που ακολουθήθηκε μείωσε την πρωτογενή στερεοποίηση, αλλά αύξησε το χρόνο για την ολοκλήρωσή της. Αυτή η αύξηση του χρόνου μπορεί να αποδοθεί στην απόφραξη των κόκκων του εδάφους.

Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης έδειξαν ότι:

- Τα τσιμεντοποιημένα δείγματα για την ίδια μετατόπιση παρουσίασαν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις από εκείνες των μη τσιμεντοποιημένων. Αν και τα δείγματα εδάφους παρασκευάστηκαν σε χαλαρή κατάσταση, παρατηρήθηκε ότι το επεξεργασμένο δείγμα εδάφους συμπεριφέρθηκε σαν πυκνό κοκκώδες έδαφος υπό χαμηλή τάση (Σχήμα 4.81).



Σχήμα 4.81 Σχέση διατμητικής τάσης- οριζόντιας μετατόπισης για επεξεργασμένα και μη, δείγματα εδάφους (Canacki, 2015).

- Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η θεραπεία που ακολουθήθηκε άλλαξε τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του οργανικού εδάφους. Η συνοχή του επεξεργασμένου εδάφους αυξήθηκε σε χαμηλή μετατόπιση, αλλά μειώθηκε σε υψηλή οριζόντια μετατόπιση. Η αύξηση της συνοχής σε μια χαμηλή μετατόπιση μπορεί να αποδοθεί στη τσιμεντοποίηση των οργανικών σωματιδίων εδάφους, ενώ οι χαμηλές τιμές συνοχής σε υψηλή οριζόντια μετατόπιση μπορούν να εξηγηθούν από τη θραύση των συγκολλητικών δεσμών. Η θεραπεία αύξησε την εσωτερική γωνία τριβής του οργανικού εδάφους τόσο για χαμηλές όσο και υψηλές οριζόντιες μετατοπίσεις. Αυτή η σχετική αύξηση μπορεί να εξηγηθεί με πρόσθετη τριβή μεταξύ των στερεών σωματιδίων ασβεστίτη που καθιζάνουν στο οργανικό έδαφος.

Πίνακας 4.7 Παράμετροι διατμητικής αντοχής πριν και μετά την επεξεργασία, σε διαφορετικές οριζόντιες μετατοπίσεις (Canacki, 2015).

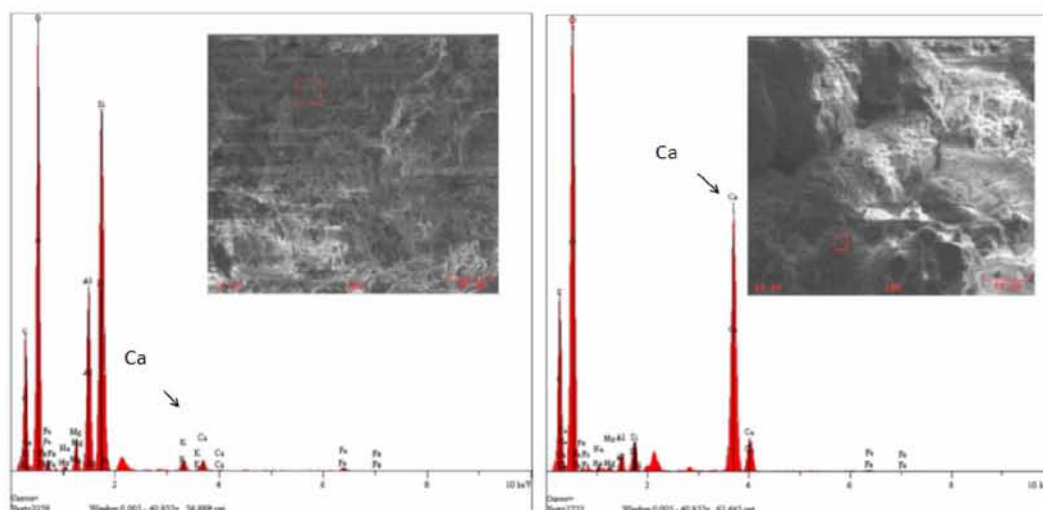
Horizontal displacement (mm)	Cohesion (kPa)		Angle of internal friction (degree)	
	Untreated	Treated	Untreated	Treated
2	8.4	11	30	38
6	5.8	2.7	43	50

Για τη μέτρηση της ποσότητας του καταβυθισμένου CaCO_3 :

- Η ποσότητα CaCO_3 αυξήθηκε κατά περίπου 20% στο οργανικό έδαφος. Αυτό αποδεικνύει ότι η καθίζηση του CaCO_3 μπορεί να πραγματοποιηθεί και στο οργανικό

έδαφος. Ωστόσο, η ποσότητα CaCO_3 ήταν συγκριτικά λιγότερη στο οργανικό έδαφος από ό,τι στο αμμώδες (Sidik et al., 2013). Αυτή η διαφορά στη δημιουργία ασβεστίτη σε οργανικό και αμμώδες έδαφος μπορεί να αποδοθεί σε οργανικούς διαλυτές και άλλες οργανικές ύλες που είναι γνωστοί αναστολείς της καταβύθισης CaCO_3 και της ανάπτυξης κρυστάλλων (Lebron και Suarez, 1998).

- Οι εικόνες SEM έδειξαν την ύπαρξη κρυστάλλων CaCO_3 στην επιφάνεια και στους πόρους των οργανικών σωματιδίων εδάφους. Το φάσμα EDX, πριν και μετά τη θεραπεία του οργανικού εδάφους, αποκάλυψε ότι το δείγμα εδάφους πριν από τη θεραπεία αποτελούνταν κυρίως από Si, K, Al, Fe και Mg, που είναι τα κύρια ορυκτά σε οποιοδήποτε έδαφος. Το φάσμα EDX, που ελήφθησε μετά την επεξεργασία, έδειξε ότι το κύριο συστατικό στο έδαφος ήταν το Ca, σε σύγκριση με τα άλλα μέταλλα (Σχήμα 4.82). Αυτό δείχνει το σχηματισμό των σωματιδίων CaCO_3 στο οργανικό έδαφος.



Σχήμα 4.82 Ανάλυση EDX πριν και μετά τη θεραπεία. Μετά τη θεραπεία, αυξήθηκε η ποσότητα του Ca (Canacki, 2015).

Κεφάλαιο 5

Μελέτη των φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών

5.1 Γενικά στοιχεία

Η δημιουργία των δεσμών στους κόκκους των φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών, είναι αποτέλεσμα διαφόρων διαδικασιών, όπως είναι η φυσική λιθοποίηση των ιζημάτων, οι περιβαλλοντικές αλλαγές, η διαγένεση, η γήρανση των εδαφών κ.α.

Στη φυσική λιθοποίηση των ιζημάτων, μετά τη διαδικασία της εναπόθεσης τα ιζήματα, τα οποία είναι προϊόντα της αποσάθρωσης, συμπιέζονται καθώς θάβονται κάτω από στρώματα ιζημάτων και τσιμεντοποιούνται από ορυκτά τα οποία καθιζάνουν από τα υπόγεια ύδατα. Οι βιολογικές διαδικασίες, μπορούν επίσης, να επιταχύνουν την τσιμεντοποίηση, καθώς μέσω της δράσης των ζωντανών οργανισμών, μπορούν να οδηγήσουν στην καταβύθιση των ανόργανων ορυκτών. Για παράδειγμα, σε αμμώδη εδάφη τα οποία αποτελούνται από ανθρακικό ασβέστιο, η βιοχημικά προκαλούμενη διάλυση και επανακαθίζηση του ασβεστίτη, συμβάλλει στη τσιμεντοποίηση της άμμου.



Σχήμα 5.1 Αποτέλεσμα φυσικής τσιμεντοποίησης στο εθνικό πάρκο Nambung, Δυτική Αυστραλία (Van Paassen, 2009).

5.1.1 Ανθρακικά εδάφη

Τα ανθρακικά εδάφη, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών, είναι πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Το ανθρακικό

ασβέστιο είναι μια χημική ένωση, η οποία συναντάται σε μεγάλη συχνότητα στα περιβάλλοντα και στους ζωντανούς οργανισμούς.

Τα ανθρακικά εδάφη, δημιουργούνται υπό την επίδραση ξηροθερμικών συνθηκών και χαρακτηρίζονται από τη συσσώρευση του ανθρακικού ασβεστίου. Συναντώνται κάτω από ημιξηρικά και ξηρικά κλίματα, ιδιαίτερα εκεί όπου υπάρχουν ασβεστόχυα μητρικά υλικά σε επίπεδες ή λοφώδεις περιοχές με αραιή βλάστηση ξηρο-φυτικών θάμνων και εφήμερων αγρωστωδών. Ο σχηματισμός του δευτερογενούς ανθρακικού ασβεστίου και η συσσώρευση του κάτω από την επίδραση των ξηρικών ή ημιξηρικών συνθηκών λαμβάνει χώρα, όταν η συγκέντρωση των ανθρακικών στο εδαφοδιάλυμα είναι σταθερά υψηλή.

Ο σχηματισμός εδαφών, των οποίων οι εδαφικοί κόκκοι συνδέονται με συγκολλητικούς δεσμούς, λόγω της παρουσίας CaCO_3 στον εδαφικό τους σκελετό, συμβάλλει στη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Το CaCO_3 , υπό τη μορφή κόκκων διαφόρου μεγέθους, συμμετέχει, ανάλογα με το μέγεθος τους, στα αντίστοιχα μηχανικά κλάσματα της άμμου, ιλύος και αργίλου. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των λεπτόκοκκων και αμμοδών φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών.

Τα λεπτόκοκκα εδάφη που μελετήθηκαν, στην παρούσα εργασία, ήταν κυρίως μάργες. Η μάργα είναι ένα αργίλοασβεστιτικό πέτρωμα, του οποίου η συμπεριφορά διαφέρει ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε ανθρακικό ασβέστιο και σε άργιλο. Ο ακόλουθος πίνακας (Πίνακας 5.1) παρουσιάζει τις διάφορες κατηγορίες μάργας για διάφορες περιεκτικότητες αργίλου και ανθρακικού ασβεστίου.

Πίνακας 5.1 Κατηγορίες μάργας ανάλογα με το περιεχόμενο σε CaCO_3 και άργιλο (Καλλιόγλου).

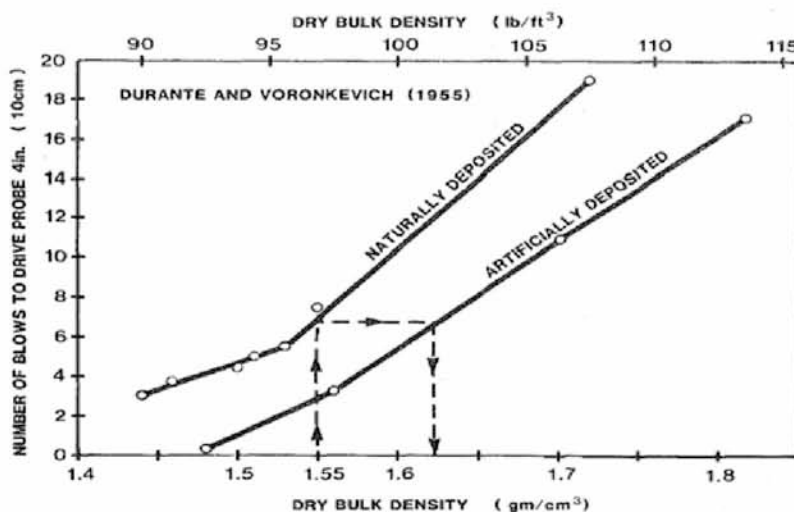
Περιεχόμενα ποσοστά (%)		Πέτρωμα
CaCO_3	Άργιλος	
100-95	0-5	Ασβεστόλιθος
95-85	5-15	Μαργαϊκός ασβεστόλιθος
85-75	15-25	Μαργασβεστόλιθος
75-65	25-35	Ασβεστόμαργα
65-35	35-65	Μάργα
35-25	65-75	Αργυλόμαργα
25-15	75-85	Μαργάργιλος
15-5	85-95	Μαργαϊκή άργιλος
5-0	95-100	Άργιλος

5.2 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των αμμώδων φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές (από το 1955), για αμμώδη φυσικά τσιμεντοποιημένα εδάφη και συγκεκριμένα για χαλαζιακές και ανθρακικές άμμους.

(α) Οι Durante και Voronkevich (1955), ασχολήθηκαν με την επίδραση της πυκνότητας της άμμου. Στη μελέτη τους χρησιμοποιήθηκε απόθεση καθαρής άμμου, η οποία υπέστη γήρανση και τεχνητή εναπόθεση άμμου. Εκτελέστηκαν επί τόπου δοκιμές SPT (Standard Penetration Test), και προσδιορίστηκαν ο αριθμός των κρούσεων και η πυκνότητα στερεών κόκκων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η αντοχή αυξήθηκε συναρτήσει του χρόνου, στη φυσική άμμο.
- Μια πρόσφατα επανακαθιζόμενη αλλουβιακή άμμος, συμπιεσμένη στην ίδια πυκνότητα με την φυσική απόθεση, είχε χαμηλότερη αντίσταση στη διείσδυση σχετικά με την αδιατάρακτη φυσική απόθεση (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Αντίσταση στη διείσδυση των φυσικά και τεχνητά αποτιθέμενων άμμων (Durante, 1955).

- Η άμμος στη φυσική της κατάσταση είχε συνοχή η οποία μειώθηκε σε μεγάλο βαθμό, ως αποτέλεσμα της διαταραχής της. Εξαιτίας αυτού, η τοποθέτηση άμμου στην ίδια πυκνότητα με μια αντίστοιχη εναπόθεση δεν εγγυάται την ίδια αντοχή.

(β) Ο Airey (1993), μελέτησε την τριαξονική συμπεριφορά των φυσικά τσιμεντοποιημένων ανθρακικών εδαφών. Το έδαφος το οποίο μελετήθηκε, ήταν λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη ανθρακική άμμος (90% ασβεστολιθικοί κόκκοι). Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία σε βάθος μεγαλύτερο των 120 m, κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Οι κόκκοι συγκρατούνταν φυσικά, μέσω στερεών τα οποία είχαν τσιμεντοποιηθεί. Τα δείγματα ταξινομήθηκαν σε μέτρια έως πολύ καλά τσιμεντοποιημένα. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, από τις οποίες μελετήθηκαν το μέτρο διάτμησης και η διαδρομή των τάσεων. Από τις δοκιμές, προέκυψε ότι η τσιμεντοποίηση αύξησε το μέτρο διάτμησης (G), ενώ δεν επηρέασε σημαντικά το μέτρο διόγκωσης. Στη συνέχεια, εντοπίστηκε ελαστική περιοχή εντός της περιοχής διαρροής, για τα τσιμεντοποιημένα εδάφη, στην οποία το έδαφος είχε σταθερές τιμές G και B, γραμμικά εξαρτώμενες από τη μέση ενεργή τάση. Κατά τη διάτμηση, παρατηρήθηκε ότι έσπασαν οι δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων και τα δείγματα έτειναν σε μια τελική κρίσιμη κατάσταση.

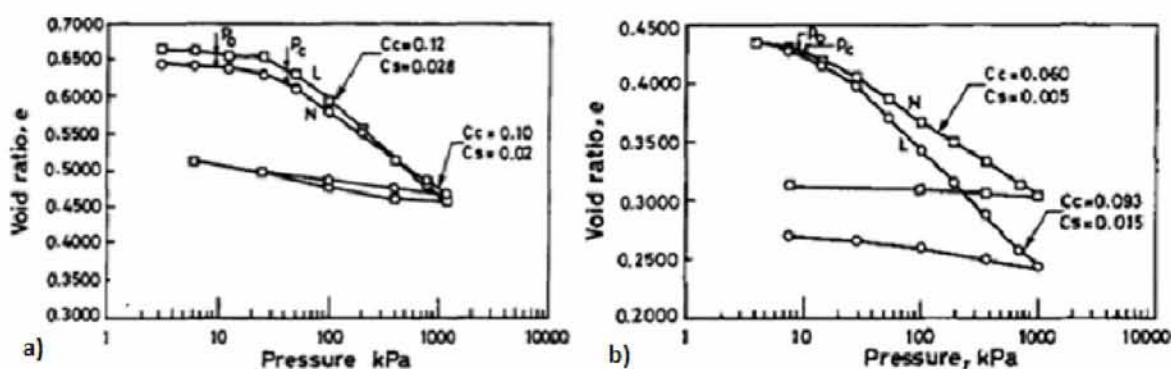
(γ) Οι Stokoe, Hwang, Lee και Andrus (1995), ασχολήθηκαν με τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δυσκαμψία και την απόσβεση σε μικρές και μέσες παραμορφώσεις. Στα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε χαλαρή έως μέτρια τσιμεντοποιημένη ιλυώδης άμμος, με περιεκτικότητα σε CaCO₃, η οποία κυμαινόταν από 13,5 έως 21,7 %. Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά αδιατάρακτα τσιμεντοποιημένα, αναδιαμορφωμένα τσιμεντοποιημένα και αναδιαμορφωμένα μη τσιμεντοποιημένα δείγματα. Τα αδιατάρακτα δείγματα, προετοιμάστηκαν με κοπή ενώ τα αναζυμωμένα, από τη συμπύκνωση του εδάφους. Εκτελέστηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού και εφαρμόστηκε ισότροπη τάση σε τιμές 10-1000 kPa. Όλα τα δείγματα παρουσίασαν αυξανόμενη δυσκαμψία με τον χρόνο υπό μια σταθερή τάση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η δυσκαμψία των αδιατάρακτων δειγμάτων αυξήθηκε περίπου κατά 1,4%, ενώ των αναδιαμορφωμένων αυξήθηκε κατά 5-7% ανά λογαριθμικό κύκλο χρόνου.

- Το G_{max} των αναδιαμορφωμένων δειγμάτων αποδείχθηκε ότι εξαρτιόταν σε μεγαλύτερο βαθμό από την τάση σ'_o , σε σχέση με τα αδιατάρακτα δείγματα.

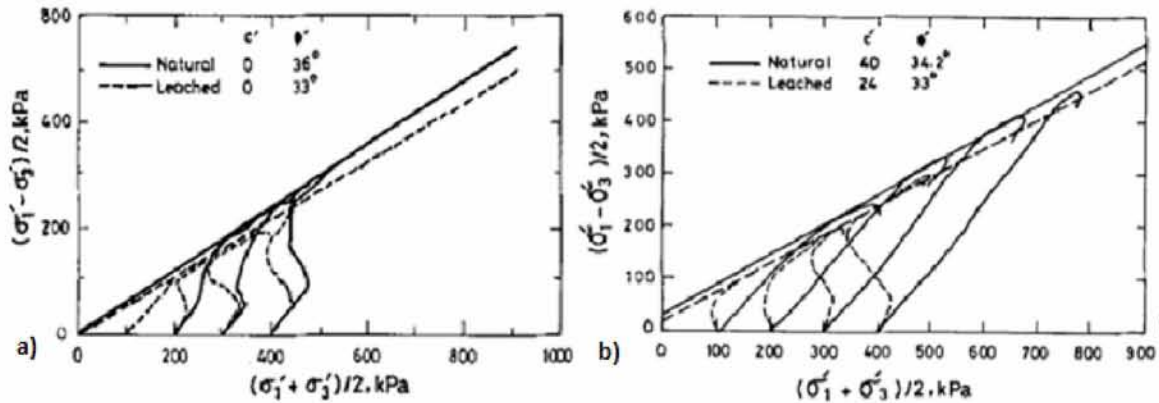
(δ) Οι Ismael και Mollah (1998), ασχολήθηκαν με τις επιπτώσεις της έκπλυσης, στις ιδιότητες των τσιμεντοποιημένων άμμων. Μελετήθηκαν οι ιλυώδεις άμμοι Kiefan και Reggae. Η πρώτη άμμος, χαρακτηρίστηκε ως πολύ πυκνή, μέση έως λεπτή, με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 21,8%, ασβεστολιθική, μέτρια έως ισχυρά τσιμεντοποιημένη, με μικρούς κρυστάλλους από γύψο. Η δεύτερη άμμος, με περιεκτικότητες σε λεπτόκοκκα 4-17,4%, ήταν ασθενώς τσιμεντοποιημένη. Λήφθηκαν αδιατάρακτα δείγματα, μέσω κοπής, τα οποία περιείχαν φυσικά, ανθρακικό ασβέστιο, χλωριούχο και θειικό ασβέστιο. Εκτελέστηκαν δοκιμές οιδιμέτρου, τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές έκπλυσης. Στις τριαξονικές δοκιμές, πραγματοποιήθηκε ισότροπη στερεοποίηση σε τάσεις 100, 200, 300 και 400 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Οι παράγοντες τσιμεντοποίησης στην περιοχή από την οποία λήφθηκαν οι άμμοι, αποτελούνταν κυρίως από ανθρακικό ασβέστιο, θειικά και χλωριούχο ασβέστιο που δεν ήταν εύκολα διαλυτά σε φρέσκο ή ενέσιμο νερό.
- Η έκπλυση οδήγησε σε αύξηση της συμπιεστότητας κατά 20-50%, καθώς αυξήθηκαν οι τιμές των συντελεστών συμπιεστότητας. Η αύξηση της συμπιεστότητας ήταν μεγαλύτερη στα ασθενώς τσιμεντοποιημένα δείγματα σε σχέση με τα μέτρια έως ισχυρά τσιμεντοποιημένα (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 Σχέση λόγου κενών-τάσης, για τα δείγματα πριν και μετά την έκπλυση, (a) για την μέτρια ως ισχυρά τσιμεντοποιημένη άμμο και (b) για την ασθενώς τσιμεντοποιημένη άμμο (Ismael, 1998).

- Οι ενεργές τιμές συνοχής και γωνίας τριβής μειώθηκαν λόγω της έκπλυσης, για όλα τα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα διαδρομής ενεργών τάσεων για τα εδάφη πριν και μετά την έκπλυση, α) για την ασθενώς τσιμεντοποιημένη και την β) μέτρια έως ισχυρά τσιμεντοποιημένη άμμο (Ismael, 1998).

- Τελικά, αποδείχθηκε ότι η επίδραση της έκπλυσης εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την ποσότητα και το βαθμό τσιμεντοποίησης, τα χαρακτηριστικά ταξινόμησης, τη σχετική πυκνότητα και το διαλυτό άλας.

(ε) Το 2002, μελετήθηκε η επίδραση της αναδιαμόρφωσης των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, στη δυναμική τους συμπεριφορά (Ghodss). Χρησιμοποιήθηκε μερικώς φυσικά τσιμεντοποιημένη (CaCO_3) ιλυώδης άμμος, με ποσοστό ιλύος 20%. Αρχικά, διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα και αναδιαμορφωμένα δείγματα. Τα αναδιαμορφωμένα δείγματα, κατασκευάστηκαν από τα διαταραγμένα δείγματα με τη μέθοδο της υγρής συμπίκνωσης, με τέτοιο τρόπο ώστε να φθάσουν στην ίδια πυκνότητα. Η αρχική υγρασία ήταν 7% και τα δείγματα συμπίεστηκαν σε 5 στρώσεις. Εκτελέστηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού και κυκλικές τριαξονικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Προέκυψε μεγαλύτερος λόγος αντίστασης τριβής για τα αδιατάρακτα δείγματα, απ' ότι για τα αναδιαμορφωμένα.
- Παρατηρήθηκαν διαφορές στις καμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης και απόσβεσης, μεταξύ των αδιατάρακτων και των αναδιαμορφωμένων δειγμάτων, δείχνοντας για τα τελευταία μικρότερους λόγους απόσβεσης.

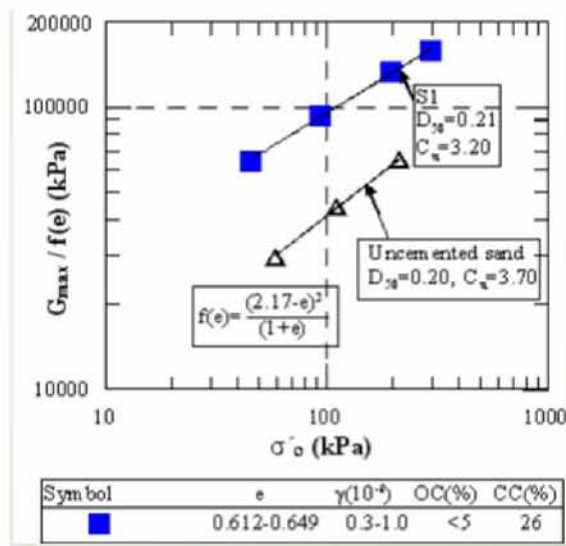
(στ) Οι Brotons, Tomas, Ivorra και Gradiaga (2014) ασχολήθηκαν με τη μελέτη της σχέσης του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε ασβεστόλιθο, ο οποίος θερμάνθηκε υπό διαφορετικές θερμοκρασίες. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε San Julian's Stone, ένας βιο-ασβεστολιθικός ψαμμίτης (Serra Grossa hill, Spain) ο οποίος περιείχε 5% χαλαζία και ίχνη αργιλικών ορυκτών. Σχηματίστηκαν 24 αδιατάρακτα μπλοκ που αποτελούνταν από 70% ασβεστίτη και 25% δολομίτη ο οποίος ήταν πλούσιος σε σίδηρο. Η προετοιμασία τους ξεκίνησε με την τοποθέτησή τους σε φούρνο, για 60 λεπτά, προκειμένου να φτάσουν την επιθυμητή θερμοκρασία. Μετά την επίτευξη θερμοκρασιών 105, 200, 300, 400, 500 και 600 °C για τα διαφορετικά δείγματα, οι θερμοκρασίες διατηρήθηκαν για 1 ώρα και στη συνέχεια τα δείγματα ψύχθηκαν. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες των δειγμάτων εφαρμόστηκαν για την παραγωγή διαφορετικών επιπέδων αντοχής. Για κάθε δείγμα μετρήθηκε ο στατικός και δυναμικός συντελεστής, μέσω των δοκιμών ISRM και των υπερηχητικών δοκιμών (ultrasonic tests), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η υψηλή θερμοκρασία είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση των ταχυτήτων δυναμικών (V_p) και στατικών (V_s) κυμάτων και συνεπώς τη μείωση της δυσκαμψίας. Για τον συγκεκριμένο ψαμμίτη, προτάθηκαν από τους ερευνητές οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_p(\text{km/s}) = 4,291 - 0,004 * T (\text{°C})$$

$$V_s(\text{km/s}) = 2,519 - 0,002 * T (\text{°C})$$

(ζ) Οι Καλλιόγλου και Τίκα μελέτησαν το μέτρο διάτμησης και το λόγο απόσβεσης των φυσικά τσιμεντοποιημένων άμμων σε αδιατάρακτα δοκίμια. Οι άμμοι που χρησιμοποίησαν στη μελέτη τους, ήταν μη πλαστικές, κανονικά στερεοποιημένες έως στερεοποιημένες με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 8-45%, περιεκτικότητα σε CaCO_3 = 22-55% και οργανικό ποσοστό 4-25%. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού από τις οποίες προέκυψε ότι:

- Για τις ιλυώδεις τσιμεντοποιημένες άμμους προέκυψε ότι, το G_{\max} είχε υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις μη τσιμεντοποιημένες άμμους (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 Σχέση $G_{max}/f(e)$ με την κατακόρυφη ενεργή τάση για την τσιμεντοποιημένη και τη μη τσιμεντοποιημένη άμμο (Καλλιόγλου).

- Βρέθηκε ότι το G_{max} εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, των χαρακτηριστικών κατανομής, το λόγο κενών, τη μέση ενεργή τάση, την περιεκτικότητα σε $CaCO_3$ και το ποσοστό οργανικού. Οι δύο τελευταίες παράμετροι είχαν αντίθετη επιρροή. Το G_{max} αυξήθηκε με την αύξηση της μέσης ενεργής τάσης και τη μείωση του λόγου κενών.
- Τέλος, βρέθηκε ότι ο ελάχιστος λόγος απόσβεσης, δεν επηρεαζόταν από την τσιμεντοποίηση.

5.3 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των λεπτόκοκκων φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών

Από το 1989 έως σήμερα, μελετήθηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφών και κυρίως των ανθρακικών εδαφών. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές με την πάροδο των ετών, για τα λεπτόκοκκα φυσικά τσιμεντοποιημένα εδάφη.

(α) Ο Quahwash (1989), μελέτησε τις γεωτεχνικές ιδιότητες των λεπτόκοκκων ασβεστολιθικών ιζημάτων σε δείγματα που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα, ως έδαφος χρησιμοποιήθηκε λευκή μάργα (31.5% $CaCO_3$, 21.8% $MgCO_3$ και $PI=21.7\%$), η οποία αναμίχθηκε με 10-90% λεπτής, μέσης ή χονδρόκοκκης άμμου.

Διαμορφώθηκαν δείγματα με δύο διαφορετικές μεθόδους, είτε με τη συμπύκνωση στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, σε 3 στρώματα και με την εφαρμογή 56 κτύπων, είτε με τον εμποτισμό των δειγμάτων σε νερό για διάστημα 96 ωρών και με πρόσθετο βάρος 1,25 kg. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν δοκιμές CBR (California Bearing Ratio) από τις οποίες προέκυψε ότι, το έδαφος μάργας πριν από την ανάμιξή του με την άμμο, είχε χαμηλή φέρουσα ικανότητα. Η φέρουσα ικανότητα επηρεάστηκε σημαντικά από την περιεκτικότητα σε άμμο. Τα μίγματα με περιεκτικότητα σε άμμο μικρότερη του 70% παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές CBR από αυτά, με περιεχόμενο άμμου μεγαλύτερο από 70%.

(β) Οι Rampell και Silvestri (1993), μελέτησαν τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης, των φυσικών και αναζυμωμένων δειγμάτων, δύο υπερστερεοποιημένων μαργών. Ως εδάφη χρησιμοποιήθηκαν η άργιλος Vallericca (PI=32%, IL=0,03, CF=42%), της οποίας τα συσσωματώματα, δημιουργήθηκαν από συνδέσεις επιφάνειας με άκρο (bookhouse fabric) και η άργιλος Pietrafitta (PI=53%, IL=0,14, CF=44% με οργανικά), της οποίας τα συσσωματώματα δημιουργήθηκαν από συνδέσεις επιφάνειας με επιφάνεια (turbostatic fabric). Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δείγματα. Τα τελευταία δείγματα, δημιουργήθηκαν από την μίξη ξηρού εδάφους με απεσταγμένο νερό, το οποίο οδήγησε στο σχηματισμό πολτού με υγρασία $w=1,5WL$. Ο πολτός στη συνέχεια, στερεοποιήθηκε σε ενεργή τάση των 800 kPa, με την αύξηση της φόρτισης, σε μεγάλο οιδήμετρο. Τα δύο είδη μαργών, περιείχαν 30% ανθρακικό ασβέστιο. Εκτελέστηκαν αστράγγιστες δοκιμές RC-TS (Resonant Column - Torsional Shear), στα δύο είδη δοκιμών και μελετήθηκαν ιδιότητες, όπως είναι το μέτρο διάτμησης, η ελαστική διατμητική παραμόρφωση (γ_t) και η σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Οι τιμές του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) ήταν υψηλότερες για τα αδιατάρακτα δείγματα από ότι για τα αναζυμωμένα, για την Vallericca, ενώ υπήρξε μικρή διαφορά για στην Pietrafitta.
- Το G_{max} , εξαρτιόταν από την τάση στερεοποίησης, το λόγο κενών και από παράγοντες όπως η διάταξη των αργικλικών σωματιδίων και οι δεσμοί μεταξύ τους (fabric) (Mitchell, 1976).

- Από τη σύγκριση μεταξύ στατικών και δυναμικών δοκιμών, επιβεβαιώθηκε ότι υπήρξαν επιπτώσεις στο μέτρο διάτμησης με την αύξηση της παραμόρφωσης.

(γ) Οι Aversa, Evangelista, Leroueil και Picarelli (1993), μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά των μαλακών βράχων και των εδαφών με δομή. Ως έδαφος χρησιμοποιήθηκε αργιλικός σχιστόλιθος, με περιεκτικότητα σε άργιλο 24% (PI= 24%) και σε ανθρακικά συστατικά 10-30%. Δημιουργήθηκαν αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δείγματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές οιδιμέτρου και στις τριαξονικές δοκιμές CD. Οι δοκιμές έδειξαν ότι, από την καμπύλη του λόγου των κενών σε σχέση με την ενεργή τάση, για τα αδιατάρακτα δείγματα, η πρώτη διαρροή συνέβη σε κατακόρυφη τάση μικρότερη από αυτή των αναζυμωμένων δειγμάτων. Το φαινόμενο ακολουθούσε η προοδευτική καταστροφή της δομής, που αποδείχθηκε από την αύξηση του δείκτη διόγκωσης.

(δ) Οι Ng, Bolton και Dasari (1994), διερεύνησαν τη δυσκαμψία ανθρακικής δύσκαμπτης αργίλου, σε μικρές παραμορφώσεις. Χρησιμοποιήθηκε η άργιλος Gault, η οποία είναι μια υπερστερεοποιημένη ιλυώδης άργιλος με υψηλή πλαστικότητα ($w_n=WP$, PI=50%) και περιεκτικότητα σε $CaCO_3$, μικρότερη από 30%. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης, σε υδραυλική τριαξονική συσκευή με 8 μετρητές πίεσης. Η συγκεκριμένη άργιλος, παρά τον υψηλό δείκτη πλαστικότητας (PI=50%), αποδείχθηκε ότι συμπεριφέρεται σαν άργιλος χαμηλής πλαστικότητας σε μικρές παραμορφώσεις αλλά υψηλής, σε μεσαίες έως μεγάλες παραμορφώσεις. Αυτή η συμπεριφορά πιθανώς να οφειλόταν στην καταστροφή των ασθενών δεσμών τσιμεντοποίησης, οι οποίοι δημιουργήθηκαν από την περιεκτικότητά της σε $CaCO_3$. Η πρώτη διαρροή παρουσιάστηκε σε διατμητική παραμόρφωση περίπου 10^{-5} , πέρα από την οποία η δυσκαμψία μειωνόταν δραστικά από την αρχικά υψηλή της τιμή.

(ε) Οι Jamiolkowski, Lancellotta και Lo Presti (1995), μελέτησαν τη δυσκαμψία σε 6 είδη αργίλων από την Ιταλία, σε μικρές παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι άργιλοι Fucino, Avezzano, Garigliano, Montalto di Castro, Pisa και Lacusterine. Οι άργιλοι ήταν μέτριας έως υψηλής πλαστικότητας (PI= 10-75%, WL= 25-100%) με περιεκτικότητα σε άργιλο από 8-70%, λόγω υπερστερεοποίησης μεταξύ 1 - 8,2 και περιεκτικότητα σε

CaCO₃ από 5-100% (από μαργαϊκή άργιλο έως μαργαϊκό ασβεστόλιθο). Διαμορφώθηκαν δείγματα, με διάμετρο 50 mm και ύψος 100 mm. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν δοκιμές οιδιμέτρου (με ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία) με αυξανόμενη φόρτιση και δοκιμές στήλης συντονισμού. Στο οιδιμέτρο, εφαρμόστηκε κατακόρυφη τάση μέχρι τα 5 MPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Το G_{max} εξαρτιόταν από τις δύο κύριες ενεργές τάσεις, το λόγο κενών, τη διάταξη των σωματιδίων του εδάφους και ήταν ανεξάρτητο από το λόγο υπερστερεοποίησης. Η σχέση που προτάθηκε, από τους ερευνητές για την εξάρτηση του G_{max} ήταν:

$$G_{max} = S_{ij} F(e)(OCR^k) p_a^{(1-n_i-n_j)} (\sigma'_i)^{n_i} (\sigma'_j)^{n_j}$$

Όπου, $n_i=n_j=0,2-0,29$, $S=500-810$, $k=0$, $F(e)=e^{-x}$ και $x=1,11-1,52$

Ο λόγος G_{max}/F(e), παρέμενε σταθερός κατά τη συμπίεση, την αποφόρτιση και την επανασυμπίεση.

- Το μέτρο διάτμησης, το οποίο μετρήθηκε από τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία στο οιδιμέτρο, ήταν 20-25% υψηλότερο από αυτό που προέκυψε από τις δοκιμές στήλης συντονισμού.

(στ) Το 1995, μελετήθηκε η αντοχή και η συμπιεστότητα της μάργας Abqaiq, στη Σαουδική Αραβία (Aiban). Η μάργα είναι πέτρωμα πλούσιο σε ανθρακικό ασβέστιο ή σε ασβέστη. Το κυρίαρχο ανθρακικό ορυκτό σε τέτοια εδάφη είναι ο ασβεστίτης, αλλά μπορεί να υπάρχουν και άλλα ανθρακικά άλατα όπως αραγωνίτης, δολομίτης και ο σιδηρίτης. Στη συγκεκριμένη έρευνα, το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν μη πλαστικό (WL=47%, PI=2%), με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 14% και σε χαλίκια 33% (ιλυώδη χαλίκια με άμμο GM). Ο συντελεστής ομοιομορφίας ήταν C_u=635 (καλά διαβαθμισμένο έδαφος) και ο συντελεστής καμπυλότητας ήταν C_c=1,42. Αποτελούνταν από 43% χαλαζία, 40% δολομίτη και 14% ανθρακικό ασβέστιο. Το περιεχόμενό του εδάφους σε ανθρακικό άλας είναι 54%. Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δείγματα τα οποία συμπυκνώθηκαν, για υγρασία είτε λίγο μικρότερη είτε λίγο μεγαλύτερη από τη βέλτιστη (dry&wet sides). Επίσης, διαμορφώθηκαν συμπυκνωμένα δοκίμια (Proctor) στη βέλτιστη υγρασία. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης, ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές οιδιμέτρου. Από την εκτέλεση των παραπάνω δοκιμών, αποδείχθηκε ότι:

- Τα δείγματα τα οποία συμπυκνώθηκαν σε ξηρή πυκνότητα που αντιστοιχούσε στο 95% της βέλτιστης υγρασίας του εδάφους και σε υγρασία λίγο μικρότερη (dry side) ή λίγο μεγαλύτερη (wet side) από τη βέλτιστη, παρουσίασαν μικρότερη αντοχή και μεγαλύτερη συμπιεστότητα από αυτά που συμπυκνώθηκαν στη βέλτιστη.
- Τα δείγματα που συμπυκνώθηκαν σε ελαφρώς μικρότερη υγρασία από τη βέλτιστη είχαν υψηλότερο δυναμικό διόγκωσης (swelling) σε σύγκριση με αυτά που συμπυκνώθηκαν στη βέλτιστη ή σε ελαφρώς μεγαλύτερη υγρασία από τη βέλτιστη.
- Η γωνία τριβής δεν επηρεάστηκε σημαντικά από το επίπεδο υγρασίας στο οποίο συμπυκνώθηκαν τα δείγματα, ενώ η συνοχή επηρεάστηκε σημαντικά και ήταν υψηλότερη στη συμπύκνωση στη βέλτιστη υγρασία.

(ζ) Οι Amrani Paaza, Lamas, Irigaray και Chacon (1998), ασχολήθηκαν με τα Νεογενή ιζήματα μαργών της Ισπανίας. Μελετήθηκαν μάργες, από μεγάλα βάθη, οι οποίες αποτελούνταν από 96% λεπτόκοκκα, είχαν υψηλή πλαστικότητα και περιείχαν 0-15 % CaCO_3 . Επίσης, μελετήθηκαν μάργες, από πιο επιφανειακά στρώματα, οι οποίες αποτελούνταν από 78% λεπτόκοκκα, είχαν υψηλή πλαστικότητα και περιείχαν 2-86 % CaCO_3 . Δημιουργήθηκαν συμπυκνωμένα δείγματα, μέσω δοκιμών Proctor, από τους δύο διαφορετικούς τύπους μάργας, στη βέλτιστη υγρασία. Εκτελέστηκαν δοκιμές οιδημέτρου, άμεσης διάτμησης και ανεμπόδιστης μονοαξονικής αντοχής. Με την πραγματοποίηση των δοκιμών, αποδείχθηκε ότι η περιεκτικότητα σε ανθρακικό και σε άργιλο, είχαν σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά συμπύκνωσης των εδαφών. Ακόμη, οι μάργες θεωρήθηκαν ακατάλληλες, ως προς τη χρήση τους σαν υποστρώματα σε επιχώματα.

(η) Οι D' Onofrio, Santucci de Magistris και Olivares (1998), μελέτησαν την επιρροή της δομής του εδάφους, στη συμπεριφορά δύο φυσικών, σκληρών αργίλων πριν από την αστοχία τους. Χρησιμοποιήθηκε η άργιλος Vallericca (μάργα), η οποία ήταν πλαστική ($\text{PI}=26\%$, $\text{WL}=54\%$) με περιεκτικότητα σε άργιλο 42%, με τα σωματίδια της άργιλου να σχηματίζουν ακανόνιστα συσσωματώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, επιφάνεια με επιφάνεια και άκρο με άκρο (bookhouse fabric). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η σχιστή άργιλος Bisaccia. Η περιεκτικότητα σε CaCO_3 , για τις άργιλους, ήταν μεγαλύτερη από 40%.

Διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα και δείγματα με κατεστραμμένη δομή, για το πρώτο είδος αργίλου. Τα τελευταία λήφθηκαν από τα αδιατάρακτα δείγματα, τα οποία είχαν στερεοποιηθεί σε πολύ υψηλή πίεση (15,3MPa) και έπειτα διογκώθηκαν σε τάση 800 kPa. Επιπλέον, διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δείγματα, για το δεύτερο είδος αργίλου, που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν δοκιμές RC-TS (Resonant Column - Torsional Shear), υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ισότροπη στερεοποίηση μέχρι τα 800 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, έδειξαν την εξάρτηση του G_{max} από την τάση, τη συγκόλληση μεταξύ των σωματιδίων και από τον τρόπο με τον οποίο τα σωματίδια συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν συσσωματώματα (fabric).

Ο λόγος G_{max}/p'_r εξαρτάται από:

$$\frac{G_{max}}{p'_r} = S \left(\frac{p'_r}{p'_r} \right)^n \left(\frac{p'_e}{p'_r} \right)^c$$

Για τα αδιατάρακτα δοκίμια $S=1842$, $n=0,7$ και $c=0,36$

Για τα δοκίμια με κατεστραμμένη δομή $S=835$, $n=0,7$, $c=0,53$ $p'_r=1\text{kPa}$ και $p'_e = e^{\frac{(N-v)}{\lambda}}$

(θ) Οι Μ. Καββάδας και Α. Αναγνωστόπουλος (1998) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά της Κορινθιακής μάργας. Οι μάργες που χρησιμοποιήθηκαν (ιλύ 75-87%, άργιλο 13-24%, $Sr=90\%$) είχαν χαμηλή έως μέτρια πλαστικότητα ($PI=5-13\%$), όριο υδαρότητας $WL=25-35\%$ και περιεκτικότητα σε $CaCO_3$ που κυμαίνεται από 65-80%. Επίσης, ήταν κανονικά στερεοποιημένες, με ανεμπόδιση διατμητική αντοχή 0,5-0,7 MPa και $E=300-500$ MPa, για παραμορφώσεις 10^{-3} . Διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δοκίμια. Τα δοκίμια διέφεραν ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε $CaCO_3$ (αργιλομάργες: 31.3-35%, μάργες: $CaCO_3 = 53.2-64.4\%$, ασβεστολιθικές μάργες: $CaCO_3 = 68.3-73.3\%$). Εκτελέστηκαν δοκιμές οιδιμέτρου και αποδείχθηκε για τα αδιατάρακτα δοκίμια, με διαφορετικές ποσότητες ασβεστίτη, ότι η φαινόμενη τάση στερεοποίησης, δηλαδή η μέγιστη τάση που αντιπροσωπεύει το μέσο βαθμό τσιμεντοποίησης, ήταν ανεξάρτητη από τον επί τόπου λόγο κενών. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος των δεσμών μεταξύ των κόκκων ήταν σχετικά ομοιόμορφο και ανεξάρτητο της ποσότητας του ασβεστίτη.

(ι) Οι Cotecchia και Chandler (1998), μελέτησαν τις αλλαγές στη δομή και στις μηχανικές ιδιότητες μιας φυσικής αργίλου, κατά την μονοδιάστατη συμπίεσή της. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η άργιλος Pappadaí, μια πλαστική άργιλος (PI=35%), με περιεκτικότητα σε ανθρακικό άλας 28% και βαθμό υπερστερεοποίησης OCR=3. Η άργιλος, αποτελούνταν από πυκνές στοίβες σωματιδίων (face to face contacts), συσσωματώματα (face to face contacts) και μεμονωμένα σωματίδια, τα οποία συνδεόταν μεταξύ τους με επαφές του άκρου του ενός με την επιφάνεια του άλλου σωματιδίου. Διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δοκίμια, τα οποία περιείχαν 22% CaCO₃ και 6% δολομίτη. Τα αναζυμωμένα δείγματα, δημιουργήθηκαν σε υγρασία 1.6 φορές μεγαλύτερη από το όριο υδαρότητας και στερεοποιήθηκαν υπό κατακόρυφη τάση 200 kPa. Εκτελέστηκαν δοκιμές οιδιμέτρου από τις οποίες προέκυψε ότι:

- Η δομή της φυσικής αργίλου αποδείχθηκε πολύ πιο πολύπλοκη από εκείνη των αναζυμωμένων δειγμάτων, με τις μεγάλες διαφορές να σχετίζονται με τη διαγένεση της φυσικής αργίλου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη σύνδεση των ανθρακικών σωματιδίων της αργίλου.
- Οι διαφορές στη δομή έδειξαν διαφορετικές θέσεις διαρροής των δύο υλικών κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση.
- Ο λόγος τάσης διαρροής YSR (λόγος της τάσης διαρροής προς την επί τόπου κατακόρυφη τάση) της φυσικής αργίλου, ήταν 6, δηλαδή ήταν διπλάσιος του λόγου υπερστερεοποίησης της αργίλου.

(κ) Μελετήθηκαν τα γεωλογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της μάργας, η οποία λήφθηκε από Eocene flysch, από την Κροατία (Sestanovic, 1998). Ιδιαίτερα, βρέθηκαν τρία διαφορετικά είδη μάργας, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε CaCO₃, αργιλόμαργες (Clayey marls) με CaCO₃=31.3-35%, μάργες με CaCO₃=53.2-64.4% και ασβεστόμαργες (Calcareous marls) με CaCO₃= 68.3-73.3%. Από διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στις μάργες αποδείχθηκε ότι:

- Υπήρξε σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε CaCO₃ και της θλιπτικής αντοχής.

- Από τη σύγκριση των μηχανικών παραμέτρων των τριών διαφορετικών μαργών, βρέθηκε ότι η ασβεστολιθική μάργα, είχε υψηλότερες τιμές ενεργής συνοχής, γωνίας τριβής, μέτρου ελαστικότητας καθώς και αυξημένο μέτρο διάτμησης σε σχέση με της μάργας και την αργιλόμαργας (Πίνακας 5.2).

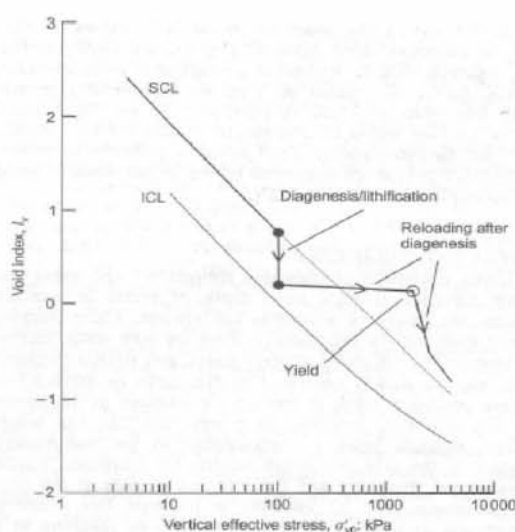
Πίνακας 5.2 Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των μαργών (Sestanovic, 1998).

	c' (kPa)	φ' (°)	E (MPa)	G (MPa)
Clayey marls	1100-1900	26	2600-8400	250-700
Marls	3400-7000	28	9300-14000	620-3500
Calcareous marls	9200-14400	44	17600-41000	1500-5200

(λ) Μελετήθηκαν, οι μηχανικές και γεωλογικές ιδιότητες των σκληρών ιζηματογενών αργίλων (Chandler, 2000). Οι ιζηματογενείς άργιλοι, λήφθηκαν από βάθη μεγαλύτερα των 200m και είχαν τιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής αντοχής, μεγαλύτερες από 100 kPa. Διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δείγματα, τα οποία στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση δοκιμών οιδιμέτρου και τριαξονικών δοκιμών. Από τα πειράματα της συγκεκριμένης έρευνας, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η μηχανική συμπεριφορά των ιζηματογενών αργίλων, αποτελούσε συνέπεια της γεωλογικής ιστορίας και των δεσμών μεταξύ των κόκκων που αναπτύχθηκαν ως αποτέλεσμα αυτής της ιστορίας. Η αντοχή δεν ήταν αποκλειστικά ελεγχόμενη από τη μέγιστη κατακόρυφη τάση που επιβλήθηκε, λόγω της υπερκείμενη στήλης εδάφους, διότι η τάση διαρροής στο οιδιόμετρο, ήταν συνάρτηση τόσο της δομής του εδάφους όσο και της γεωλογικής τάσης προστεροποίησης. Ως αποτέλεσμα, τα δείγματα αργίλου από όλα τα βάθη, κανονικά στερεοποιημένα ή υπερστεροποιημένα, έχουν συνήθως τάση διαρροής οιδιμέτρου, μεγαλύτερη από την γεωλογική τάση προστεροποίησης.
- Υπό συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και τάσης, η φύση των ιζημάτων μπορεί να αλλάξει. Αυτές οι μεταβολές προκύπτουν από τη διαγένεση ή τη λιθοποίηση. Αυτές οι διαδικασίες μπορούν να προκαλέσουν μη αντιστρέψιμες αλλαγές στη δομή του ιζήματος με αποτέλεσμα μια δομή που έχει δεσμούς των οποίων η αντοχή δεν έχει καμία σχέση με το ιζηματογενές ιστορικό της αργίλου. Με την αυξανόμενη τάση το έδαφος που είχε υποστεί διαγένεση πιθανόν να ήταν πολύ άκαμπτο κατά την επαναφόρτιση και να απέδιδε σε πολύ υψηλότερη τάση από την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση. Επίσης,

είναι πιθανό η συμπεριφορά μετά τη διαρροή να ήταν πολύ διαφορετική από εκείνη που αναμενόταν στην περίπτωση απουσίας της διαγένεσης (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6 Πιθανές επιπτώσεις της διαγένεσης στην καμπύλη συμπίεστος των φυσικών υλικών (SCL) (Chandler, 2000).

- Αποδείχθηκε, ότι ο τύπος της αργίλου και η γεωλογική της προέλευση, αποτελούσαν σημαντικές παράμετροι για τον καθορισμό της μηχανικής της συμπεριφοράς.

(μ) Οι Lamas, Irigaray και Chacon (2002) ασχολήθηκαν με το γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των ανθρακικών μαργών, για την κατασκευή αδιαπέρατων πυρήνων φράγματος. Χρησιμοποιήθηκε ανόργανη ανθρακική άργιλος (μάργα), πλαστική (PI=25%), με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα και άργιλο 89,9% και 39,5%, αντίστοιχα και με περιεκτικότητα σε CaCO_3 53,5%. Η άργιλος περιείχε σμηκτίτη 45%, ιλλίτη 45% και καολινίτη 10%. Η μάργα χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό για τον πυρήνα φράγματος. Η προετοιμασία του δείγματος για το πρόγραμμα δοκιμής έγινε με τη μέθοδο συμπύκνωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο συμπιεστής του Χάρβαρντ για τις δοκιμές οιδημέτρου (μέγιστη τάση στερεοποίησης 100 kPa) και η σφύρα (Army sledge hammer) για τις αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

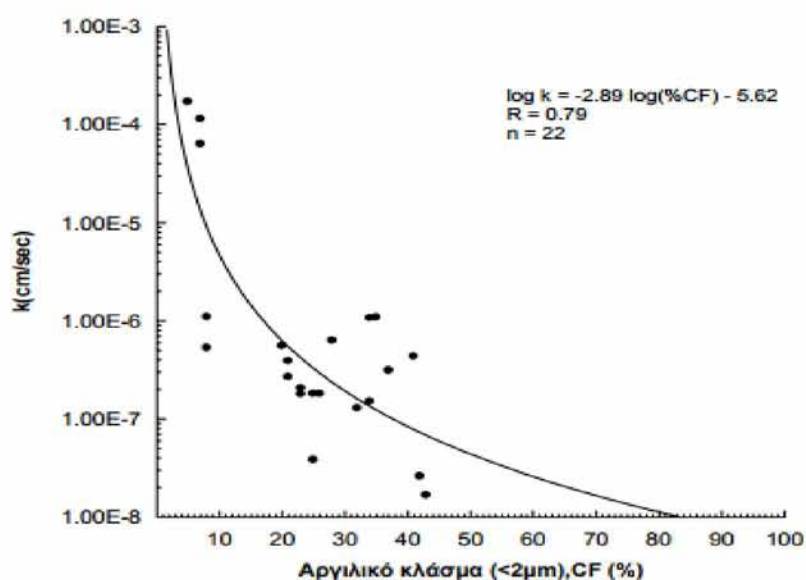
- Οι γεωτεχνικές ιδιότητες άλλαξαν κυρίως με τη μεταβολή της περιεκτικότητας σε ανθρακικό.

- Η αύξηση του CC (περιεχόμενου ανθρακικού) σε σταθερή πυκνότητα και υγρασία μείωσε την ενεργή συνοχή όπως φαίνεται στον ακόλουθο τύπο:

$$c' = 1807,4 * CC - 1,749$$

(ν) Οι Χριστοδουλοπούλου και Τσώλη-Καταγά (2004) μελέτησαν την επίδραση της μικροδομής και της ορυκτολογικής σύστασης των μαργών της Β. Πελοποννήσου στην εργαστηριακή υδραυλική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιήθηκαν άργιλοι, μη πλαστικές έως μέτριας πλαστικότητας ($PI < 20\%$), οι οποίες είχαν περιεκτικότητες σε άμμο 0-62%, σε ιλύ 4-76% και σε άργιλο 0-44%, ενώ οι περιεκτικότητά τους σε $CaCO_3$ κυμαίνονταν από 7,2-67,54%. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν δοκιμές υδραυλικής αγωγιμότητας με τη μέθοδο του μεταβλητού υδραυλικού φορτίου, σε κορεσμένα αδιατάρακτα δείγματα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα ιζήματα στα οποία ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (k) συσχετίζεται πολύ καλά με την κοκκομετρική διαβάθμιση, στα λεπτόκοκκα αργιλικά ιζήματα οι συσχετίσεις δεν ήταν το ίδιο επιτυχείς. Στην παρούσα μελέτη, η συσχέτιση του k με το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος ήταν φθίνουσα εκθετική, με συντελεστή συσχέτισης $R=0,79$ (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7 Συσχετισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (k) με το ποσοστό αργιλικού κλάσματος (CF) (Χριστοδουλοπούλου, 2004).

Από το διάγραμμα συσχέτισης παρατηρήθηκε επίσης ότι στα μελετηθέντα ιζήματα με ποσοστό αργιλικού κλάσματος $\geq 20\%$ οι εργαστηριακές τιμές του k ήταν μικρότερες από 10^{-6} cm/sec.

- Η τιμή του συντελεστή k επηρεαζόταν κατά κύριο λόγο από τη διόγκωση των αργιλικών ορυκτών και το βαθμό συσσωμάτωσης, το σχήμα και την κατανομή των πόρων (ανοιχτή ή κλειστή μικροδομή), καθώς επίσης και από το βαθμό συγκόλλησης της μικροδομής.
- Στην πλειοψηφία των ιζημάτων αυτής της έρευνας η τιμή του συντελεστή k κυμαίνονταν μεταξύ $1,66 \times 10^{-8}$ και $1,06 \times 10^{-6}$ cm/s, με ελάχιστες εξαιρέσεις, στα δείγματα που είχαν αρκετή περιεκτικότητα σε άμμο.

(ξ) Οι Jovicic, Coop και Simpson (2006) ερμήνευσαν και μοντελοποίησαν τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης μιας άκαμπτης αργίλου από τη Βόρεια Θάλασσα. Η άργιλος που χρησιμοποιήθηκε ήταν πλαστική (WP=15-25%, PI=16-25%), περιείχε χαλαζία (31-48%), ιλλίτη (21-43%), каоλινίτη (7-9%), ασβεστίτη και δολομίτη (20%). Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές ήταν αδιατάρακτα και αναδιαμορφωμένα. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν δοκιμές οιδημέτρου και τριαξονικές δοκιμές CD. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

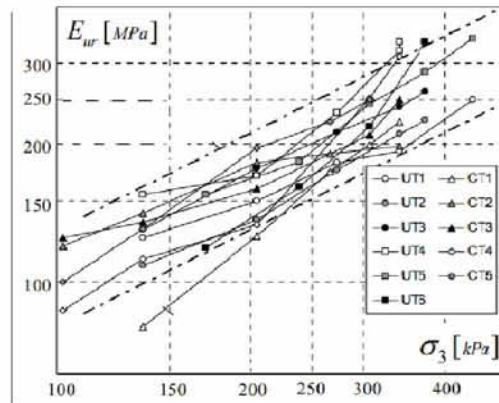
- Η απόκριση των αδιατάρακτων και αναζυμωμένων δειγμάτων, κατά την ισότροπη διόγκωση δε διέφερε σημαντικά, ωστόσο, οι ιδιότητες τάσης-παραμόρφωσης του αδιατάρακτου υλικού κατά τη διάτμηση έδειξαν ότι σε χαμηλή τάση (10 kPa), η επιρροή της δομής ήταν σημαντική. Η επίδραση της δομής ήταν λιγότερο έντονη σε υψηλότερες τάσεις, καθώς η δυσκαμψία του εδάφους, που αποκτήθηκε από την ισότροπη αύξηση της αντοχής, ήταν σημαντικότερη έναντι της δομής.
- Παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση της δυσκαμψίας του αδιατάρακτου δείγματος, σε μικρές παραμορφώσεις, σε σύγκριση με το αναδιαμορφωμένο.

(ο) Οι Amorosi και Rampello (2007) διεξήγαγαν πειραματική έρευνα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά μιας άκαμπτης αργίλου. Χρησιμοποιήθηκε πλαστική

υπερστερεοποιημένη άργιλος (WL=53,9-59,2 %, PI=29,2-31,6%, wn=26,4-28,6 %) Vallericca με περιεκτικότητα σε άργιλο 42-47% και με υψηλή περιεκτικότητα σε CaCO₃. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δείγματα. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές ισότροπης και ανισότροπης συμπίεσης και δοκιμές οιδημέτρου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Οι καμπύλες συμπίεσης των αδιατάρακτων δειγμάτων που λήφθηκαν από τις δοκιμές βρίσκονται πάντα στα δεξιά της γραμμής εγγενούς συμπίεσης (ICL), μέχρι την ενεργή τάση που ήταν υψηλότερη από την τάση διαρροής. Η διάσπαση των διασωματιδιακών δεσμών, η οποία προκλήθηκε από πλαστικές παραμορφώσεις, πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της συμπίεσης σε υψηλή ενεργή τάση.
- Σε υψηλές τάσεις, για τον ίδιο λόγο κενών, τα αδιατάρακτα δείγματα μπορούσαν να αναλάβουν μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση από τα αναζυμωμένα.

(π) Οι Sfriso, Sagues, Quaglia, Quintela και Ledesma (2008) μελέτησαν τη δυσκαμψία του σχηματισμού Pampeano σε μικρές παραμορφώσεις. Ο σχηματισμός Pampeano (Buenos Aires, Argentina) είναι ουσιαστικά μια απόθεση από ιλύ και άργιλο η οποία έχει υπερστερεοποιηθεί από την αποξήρανση και την τσιμεντοποίηση που προκάλεσε το ανθρακικό ασβέστιο (0,2-2,5% CaCO₃). Η περιεκτικότητα του σχηματισμού σε λεπτόκοκκα είναι 84-96% και σε άργιλο 12-23% και αποτελεί έναν πλαστικό σχηματισμό (WL=44-56% PI=15-23%). Τα συμπίεσιμα δείγματα παρασκευάστηκαν από δείγματα χαμηλής πλαστικότητας με PI = 9% και περιεκτικότητες 90,2% και 17% σε λεπτόκοκκα και άργιλο, αντίστοιχα. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν συμπίεσιμα και αδιατάρακτα δείγματα τα οποία προήλθαν από λεπτό σωλήνα 101 mm. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης από τις οποίες προέκυψε ότι το μέτρο του Young εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από την επιβαλλόμενη τάση, για τα αδιατάρακτα δείγματα, σε μικρές παραμορφώσεις. Η εξάρτηση του μέτρου του Young από την επιβαλλόμενη τάση ήταν παρόμοια για τα αδιατάρακτα και τα συμπίεσιμα δείγματα (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8 Σχέση μέτρου ελαστικότητας-επιβαλλόμενης τάσης για 6 αδιατάρακτα και 5 συμπυκνωμένα δείγματα (Sfriso, 2008).

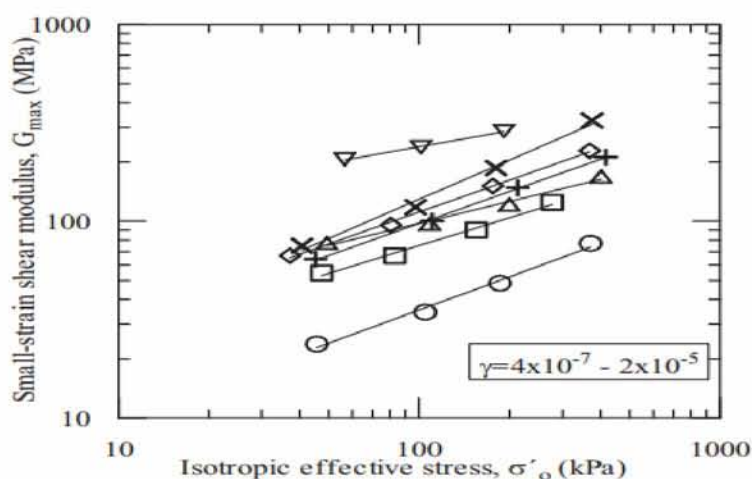
(ρ) Οι Mansour, Chik και Taħa (2008) μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες της μάργας Lisan. Η μάργα Lisan είναι μια μάργα χαμηλής πλαστικότητας ($WL=27-35\%$ και $PI=6.5-11\%$), με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 95-100% και σε άργιλο 13-19% ($G_s=2.2-2.7$). Η μάργα αυτή περιέχει γύψο, ορυκτά αργίλου (κυρίως καολίνη), χαλαζία, άστριο. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές οιδημέτρου, σε αδιατάρακτα δείγματα αργίλου. Στις τριαξονικές δοκιμές η διάμετρος των δειγμάτων ήταν 38mm ενώ για τις δοκιμές οιδημέτρου τα δείγματα είχαν διάμετρο 50 mm και ύψος 20 mm. Η τάση που εφαρμόστηκε στην κυψέλη των τριαξονικών δοκιμών ήταν 20, 30 και 60 kPa ενώ στις δοκιμές οιδημέτρου η κατακόρυφη τάση ήταν 400 kPa. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές έδειξαν ότι:

- Η χαμηλή ειδική βαρύτητα κόκκων (G_s) της μάργας Lisan αποδόθηκε στην παρουσία γύψου.
- Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ήταν 14 kPa.
- Ο λόγος υπερστερεοποίησης (OCR) ήταν στην περιοχή από 2,2 έως 2,4 και η τάση προστερεοποίησης ήταν 60 kPa. Αυτές οι τιμές αποδόθηκαν στην παρουσία τσιμεντοποίησης που προήλθε από την παρουσία γύψου και χλωριούχου νατρίου.

(σ) Οι Τίκα, Καλλιόγλου και Ελπέκος (2011), ασχολήθηκαν με τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων μαργών για μικρές έως μεγάλες παραμορφώσεις. Για τα πειράματά τους χρησιμοποιήθηκαν μάργες οι οποίες προήλθαν από διάφορες περιοχές της Ελλάδας και της Κύπρου. Ο δείκτης πλαστικότητας PI , των μαργών, κυμαινόταν μεταξύ 7% και 66% και ο λόγος υπερστερεοποίησης (OCR) μεταξύ 1 και 11. Η περιεκτικότητα σε $CaCO_3$ κυμαινόταν

από 26% έως 100%. Οι μάργες είχαν είτε ομοιόμορφη είτε πολυστρωματική δομή. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού, για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης, τριαξονικές (UU & CU) και μονοαξονικές δοκιμές συμπίεσης, για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, τριαξονικές δοκιμές (CU και CD) και δοκιμές διάτμησης, για τον προσδιορισμό της στραγγιζόμενης διατμητικής αντοχής, δοκιμές οιδιμέτρου για τη συσχέτιση της τάσης στερεοποίησης και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και δοκιμές περιστροφικής διάτμησης για τη συσχέτιση της στραγγιζόμενης παραμένουσας αντοχής των αναδιαμορφωμένων δειγμάτων και της κρίσιμης αντοχής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

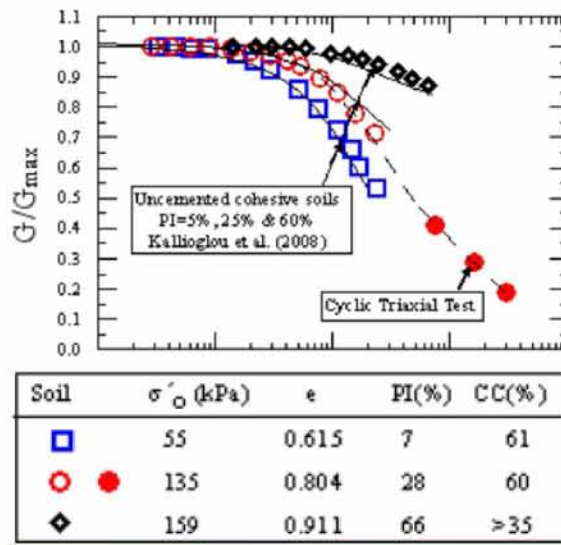
- Για μικρές έως μέσες διατμητικές παραμορφώσεις ($\gamma \leq 10^{-5}$), το μέγιστο μέτρο διάτμησης είχε γραμμική σχέση με την ισότροπη ενεργή τάση, για μάργες χαμηλής έως υψηλής πλαστικότητας και περιεκτικότητας σε ανθρακικό από 28-86% (Σχήμα 5.9).



Soil	e_o	LL(%)	PI(%)	%<2 μ m	CC(%)
□	0.785	34	10	18	42
◇	0.965	39	12	24	86
△	0.872	63	34	35	40
×	0.780	44	18	4	31
+	0.719	52	27	31	31
○	1.118	59	28	50	28
▽	1.024	58	32	51	52

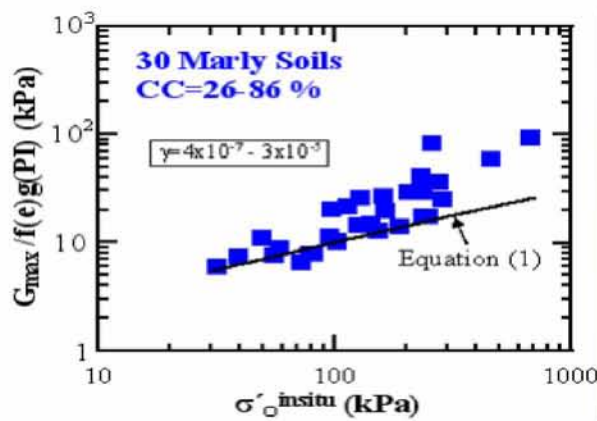
Σχήμα 5.9 Σχέση του μέτρου διάτμησης με την ενεργή τάση σ'_o , για μικρές παραμορφώσεις (Τίκα, 2011).

Για μεγαλύτερες παραμορφώσεις ($\gamma \geq 10^{-5}$), ο δείκτης πλαστικότητας επηρέαζε τη μείωση του μέτρου διάτμησης, με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης και δεν επηρεαζόταν από την περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 Το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, για $\gamma > 10^{-6}$ (Τίκα, 2011).

- Οι μάργες παρουσίασαν μεγαλύτερο ή ίσο G_{max} από τα εδάφη που δεν περιείχαν ασβεστίτη (Σχήμα 5.11).

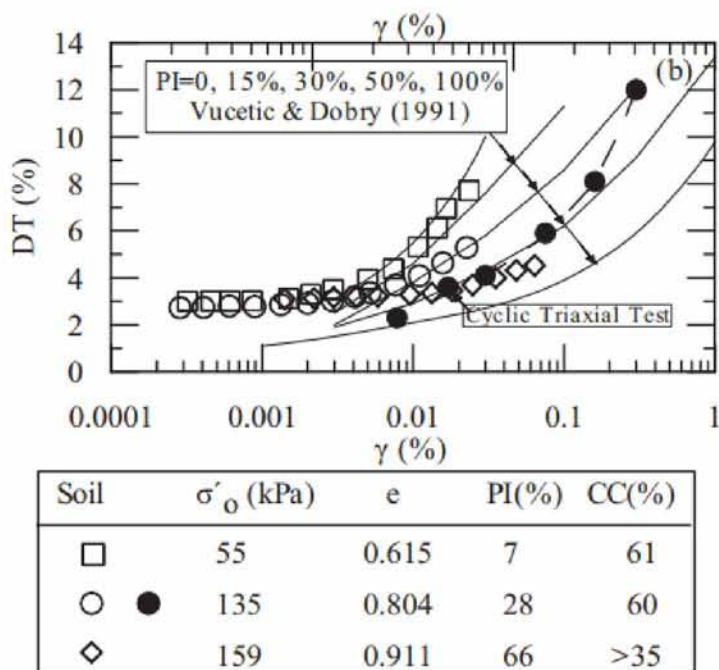


Σχήμα 5.11 Το κανονικοποιημένο G_{max} , σε μικρές παραμορφώσεις, σε σχέση με την επιτόπου ενεργή τάση, για τις μάργες (Καλλιόγλου, 2011).

Όπου, για τον προσδιορισμό του G_{max} των μη τσιμεντοποιημένων φυσικών συνεκτικών εδαφών ($CC < 5\%$) προτάθηκε η ακόλουθη εξίσωση:

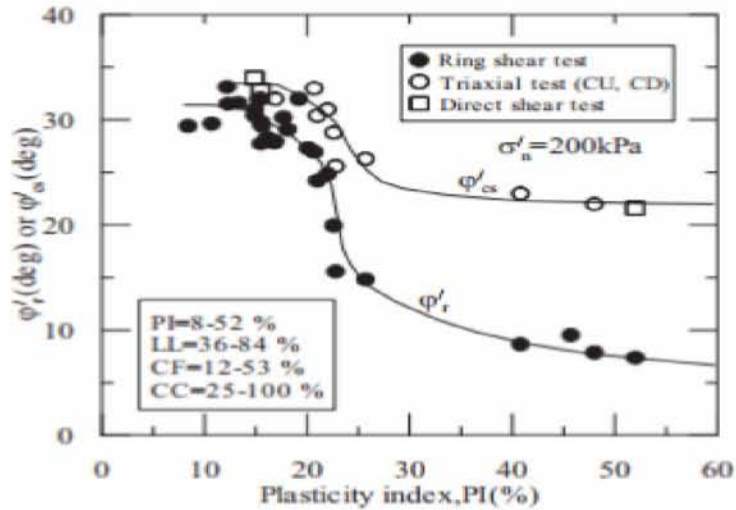
$$G_{max} = (6290 - 80 * PI) * \sigma'_o{}^{0.5} * e^{-0.6}$$

- Η αύξηση της τσιμεντοποίησης οδήγησε σε αύξηση του G_{max} .
- Δεν υπήρχε μεγάλη επίδραση της τσιμεντοποίησης στον ελάχιστο λόγο απόσβεσης, για μικρές έως μέσες παραμορφώσεις. Με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης, ο λόγος απόσβεσης αυξήθηκε. Η πλαστικότητα ήταν ο κυριότερος παράγοντας για τον έλεγχο της απόσβεσης (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12 Ο λόγος απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, για μικρές και μεγάλες παραμορφώσεις και για διάφορες πλαστικότητες (Τίκα, 2011).

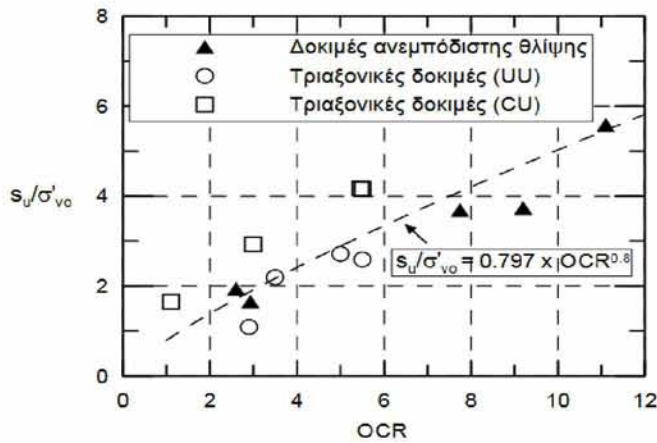
- Σε μεγάλες παραμορφώσεις, η γωνία κρίσιμης κατάστασης παρουσίασε καλή συσχέτιση με την παραμένουσα γωνία τριβής για $PI \leq 20\%$, ενώ για $PI > 20\%$ αυξήθηκε η διαφορά μεταξύ των δύο γωνιών και επομένως η ψαθυρότητα (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13 Σχέση της κρίσιμης γωνίας ή της παραμένουσας γωνίας τριβής με τον δείκτη πλαστικότητας, για μεγάλες παραμορφώσεις (Τίκα, 2011).

(τ) Μελετήθηκε η συσχέτιση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και της τάσης στερεοποίησης των μαργαϊκών εδαφών (Καλλιόγλου, Κοκκίνης, Τίκα). Στις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν μαργαϊκά εδάφη, τα οποία ήταν υπερστερεοποιημένες άργιλοι και ιλεις, με δείκτη πλαστικότητας $PI=17.8-34.3\%$ και περιεκτικότητα σε $CaCO_3 \geq 30\%$. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν 12 διαφορετικά μαργαϊκά εδάφη, στα οποία εκτελέστηκαν δοκιμές οιδημέτρου, τριαξονικές δοκιμές (CU και UU) και δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης. Από τις δοκιμές οιδημέτρου, προσδιορίστηκε ο λόγος υπερστερεοποίησης (OCR) και από τις τριαξονικές και τις δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (s_u). Τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών για τις 12 μάρκες, συσχετίστηκαν και παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 5.14). Από τη συσχέτιση των τριών ειδών δοκιμών προέκυψε (για τα μαργαϊκά εδάφη), η εξίσωση:

$$s_u / \sigma'_{vo} = 0.797 * OCR^{0.8}$$



Σχήμα 5.14 Μεταβολή της κανονικοποιημένης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, με το λόγο υπερστερεοποίησης (Καλλιόγλου).

Η εξίσωση που προτάθηκε από τους Jamiolkowski για τα υπερστερεοποιημένα μη τσιμεντοποιημένα εδάφη ήταν η εξής :

$$su/\sigma'_{vo} = (0.23 \pm 0.04) * OCR^{0.8}$$

Η εξίσωση για τα μαργαϊκά εδάφη, έδωσε μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με αυτές που υπολογίστηκαν για υπερστερεοποιημένα μη μαργαϊκά εδάφη. Η διαφορά των συντελεστών στις δύο παραπάνω εξισώσεις, έδειξε ότι, εκτός από την ιστορία φόρτισης, η δομή των μαργαϊκών εδαφών είχε επίσης σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά τους.

(v) Οι Cardoso, Maranhã des Neves και Alonso (2012) μελέτησαν, πειραματικά, τη συμπεριφορά των συμπυκνωμένων μαργών. Οι μάργες που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη (Arruda dos Vinhos, Abadia, Portugal) ήταν πλαστικές (WL=49%, PI=25%) και αποτελούνταν από 43-78% λεπτόκοκκα ($S_r = 70-100\%$) και από ορυκτά χλωρίτη, καολινίτη, μπεντονίτη, ιλλίτη, γύψο, χαλαζία, άστριο και ανθρακικό ασβέστιο. Εφαρμόστηκαν δοκιμές οιδημέτρου με κατακόρυφη τάση 1000 kPa. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συμπυκνωμένες μάργες εμφάνισαν σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υποβάθμισης των δεσμών σε διαδρομές φόρτισης που περιελάμβαναν διαβροχή. Επιπλέον, η συμπεριφορά των μαργών εξαρτιόταν από την ιστορία της τάσης και της προσρόφησης.

Κεφάλαιο 6

Ενίσχυση των εδαφών με τη χρήση τσιμέντου

6.1 Γενικά στοιχεία

Η εξαγωγή αδιατάρακτων φυσικά τσιμεντοποιημένων εδαφικών δειγμάτων από το πεδίο και η προσεκτική μεταφορά τους για την εργαστηριακή τους μελέτη στη συνέχεια, αποτελούν δύσκολη διαδικασία, καθώς ενδέχεται να προκληθεί διατάραξη του δείγματος και μερική ή ολική καταστροφή των ασθενών συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των κόκκων. Συνεπώς, οι ερευνητές προκειμένου να αποφύγουν τους παραπάνω κινδύνους οδηγήθηκαν στην προσομοίωση της διαδικασίας της φυσικής τσιμεντοποίησης εργαστηριακά. Η επιτυχία της μεθόδου, βασίζεται στην εισαγωγή στα δείγματα, ουσιών οι οποίες δρουν ως συγκολλητικοί δεσμοί ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους, με συνηθέστερη των ουσιών αυτών το τσιμέντο.

Το τσιμέντο είναι ένα βιομηχανικά κοκκώδες υλικό σε μορφή σκόνης που όταν αναμιγνύεται με νερό, σε κατάλληλη αναλογία, σχηματίζει πολτό που πήζει, σκληραίνει και κατόπιν διατηρεί το σχήμα και την αντοχή του ακόμα και μέσα στο νερό.

Το πιο κοινώς χρησιμοποιούμενο τσιμέντο είναι το τσιμέντο τύπου Portland. Ανακαλύφθηκε από τον Άγγλο J. Aspdin το 1824, που του έδωσε την ονομασία τσιμέντο Portland, γιατί το νέο υλικό είχε το χρώμα των εδαφών της περιοχής Portland, της Αγγλίας. Το τσιμέντο Portland αποτελείται από κλίνκερ (προϊόν σύγχρονου ψησίματος ασβεστόλιθου και αργίλου) και γύψο (ή γύψο και ανυδρίτη), τα οποία συναλέθονται σε πολύ λεπτή σκόνη με ειδική επιφάνεια 2200-6000 cm²/g Blaine. Η ποσότητα γύψου που συναλέθεται με το Klinker, εξαρτάται από τη λεπτότητα και το είδος του τσιμέντου και είναι απαραίτητη για τη ρύθμιση της πήξης. Το τσιμέντο Portland συντίθεται από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου (άσβεστου) αναμειγμένες με οξείδια του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου. Πρόσθετες πρώτες ύλες όπως άμμος, οξείδιο σιδήρου και βωξίτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρότερες ποσότητες για να επιτευχθεί η επιθυμητή σύνθεση. Οι κοινότερες ασβεστούχες πρώτες ύλες είναι ο ασβεστόλιθος και η κρητίδα (κιμωλία). Μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν και άλλα πετρώματα, όπως κοραλλιογενείς ή οστρακογενείς αποθέσεις.

Πηλός, σχιστόλιθοι και λάσπη εκβολών αποτελούν τις κοινότερες αργιλούχες πρώτες ύλες. Η μάργα, συμπαγής ασβεστούχος άργιλος και η τσιμεντόπετρα περιέχουν τόσο τα ασβεστούχα όσο και τα αργιλούχα συστατικά σε αναλογίες που μερικές φορές προσεγγίζουν τις αναλογίες του τσιμέντου. Άλλη πρώτη ύλη είναι η σκωρία των υψικαμίνων, που συνίσταται κυρίως από οξείδιο του ασβεστίου, οξείδιο του πυριτίου και οξείδιο του αργιλίου και αναμιγνύεται με ασβεστούχο υλικό υψηλής περιεκτικότητας σε οξείδιο του ασβεστίου. Ο καολίνης, που περιέχει μικρή ποσότητα οξειδίου του σιδήρου, χρησιμοποιείται ως αργιλούχο συστατικό για το λευκό τσιμέντο Portland.

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές, εξέτασαν την επίδραση της προσθήκης ποσότητας τσιμέντου Portland σε εδάφη, για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Γι' αυτό το σκοπό, εκτελέστηκαν πλήθος εργαστηριακών δοκιμών, σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα εδάφη και μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες, πριν και μετά την ενίσχυσή τους.

Η διαμόρφωση των δοκιμίων και η προσθήκη του τσιμέντου Portland μπορεί να πραγματοποιηθεί, εργαστηριακά, με δυο μεθόδους. Στην πρώτη μέθοδο, γίνεται, αρχικά, ανάμιξη του εδάφους με το τσιμέντο και στη συνέχεια διάστρωση και συμπίκνωση των στρωμάτων σε καλούπι. Μετά τη συμπίκνωση, πραγματοποιείται κορεσμός και τα δείγματα αφήνονται να ωριμάσουν-σκληρυνθούν. Στη δεύτερη μέθοδο, αρχικά πραγματοποιείται η διαμόρφωση του δοκιμίου άμμου σε καλούπι και ακολουθεί η έγχυση του μίγματος νερού-τσιμέντου σε αυτό και ο χρόνος ωρίμανσης.

6.2 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών με τη χρήση τσιμέντου Portland

6.2.1 Αμμώδη εδάφη

Παρουσιάζονται οι πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές, από το 1972, για αμμώδη τσιμεντοποιημένα εδάφη με Portland. Πιο συγκεκριμένα, τα εδάφη που μελετήθηκαν ήταν κυρίως καθαρές άμμοι, ανθρακικές άμμοι, χαλκώδεις άμμοι και άμμοι με λεπτόκοκκα.

(α) Οι Chiang και Chae (1972), μελέτησαν τη δυναμική συμπεριφορά των αμμωδών εδαφών, με τη χρήση τσιμέντου. Τα τσιμεντοποιημένα δείγματα σχηματίστηκαν με ανάμιξη της άμμου, του τσιμέντου και του νερού σε μια λεκάνη και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν μέσα σε ένα καλούπι. Έπειτα, όλοι οι κόκκοι άμμου καλύφθηκαν με μια στρώση τσιμέντου και ακολούθησε συμπύκνωση, έτσι ώστε το τσιμέντο να σχηματιστεί στις επαφές των κόκκων. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συντονισμού στρέψης, στις οποίες μελετήθηκαν ιδιότητες όπως το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση.

- Το μέτρο διάτμησης αυξήθηκε συναρτήσει της τάσης, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$G_0 = [G_{\text{sand}} - 0,343 * CC * (\sigma' / \sigma)^{0,5}] * (\sigma' / \sigma)^{0,06CC}$$

$$\text{Όπου: } G_{\text{sand}} = 2630 * \frac{(2,17 - e)^2}{(1 + e)} * (\sigma' / \sigma)^{0,5}$$

- Η απόσβεση αυξήθηκε με την αύξηση του περιεχομένου σε τσιμέντο.

(β) Ο Sital (1979), μελέτησε τη συμπεριφορά ασθενώς τσιμεντοποιημένων εδαφών, κάτω από στατική και δυναμική φόρτιση. Στην έρευνά του χρησιμοποιήθηκε φυσικά τσιμεντοποιημένη άμμος Καλιφόρνιας, με άργιλο, οξείδια του σιδήρου και πυριτία. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η άμμος Γουατεμάλας με ηφαιστειακή τέφρα μεγέθους ιλύος, η συγκόλληση της οποίας, οφείλεται στην αλληλοσύνδεση των εξαιρετικά γωνιακών θραυσμάτων ηφαιστειακής υάλου. Διαμορφώθηκαν τεχνητά τσιμεντοποιημένα δείγματα, με την προσθήκη ποσοστών τσιμέντου Portland, 2 και 4% κατά βάρος. Η περίοδος σκλήρυνσης κυμαινόταν από 3-28 ημέρες. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, στατικής και δυναμικής φόρτισης, δοκιμές άμεσης διάτμησης και Brazilian tests (εφελκυσμού). Από τις δοκιμές αποδείχθηκε ότι:

- Οι τσιμεντοποιημένες άμμοι είχαν ψαθυρή συμπεριφορά σε χαμηλές τάσεις. Η ολκιμότητα αυξήθηκε ουσιαστικά καθώς αυξανόταν η τάση.
- Η δυναμική θλιπτική αντοχή ήταν 16% υψηλότερη από τη στατική.

- Η δυναμική αντοχή σε εφέλκυσμό μειωνόταν με την αύξηση του αριθμού των φορτίσεων.

(γ) Οι Acar και EI-Tahir (1986), ερεύνησαν τις δυναμικές ιδιότητες μιας τεχνητά τσιμεντοποιημένης άμμου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η καθαρή άμμος Monterey No.0/30, η οποία αναμίχθηκε με τσιμέντο Portland. Διαμορφώθηκαν τεχνητά τσιμεντοποιημένα και μη τσιμεντοποιημένα κυλινδρικά δείγματα άμμου, έπειτα από συμπίεση με τη χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων. Ο βαθμός τσιμεντοποίησης, από την προσθήκη τσιμέντου, κυμαινόταν από 1-4%. Τα μη τσιμεντοποιημένα δείγματα, παρασκευάστηκαν με τη χρήση της μεθόδου ξηρού αέρα και της μεθόδου συμπύκνωσης, δοκιμάστηκαν σε συσκευή στήλης συντονισμού και ξηράνθηκαν. Μετά από μια περίοδο σκλήρυνσης 14 ημερών τα δείγματα κόπηκαν και ελέγχθηκαν. Τα τσιμεντοποιημένα δείγματα κορέσθηκαν χρησιμοποιώντας αυξήσεις στην πίεση του νερού των πόρων, μεταξύ 500-600 kPa. Εκτελέστηκαν δοκιμές στηλών συντονισμού και δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης. Πραγματοποιήθηκε ισότροπη στερεοποίηση σε τάσεις των 35, 103, 345 kPa. Μελετήθηκαν ιδιότητες όπως είναι το μέτρο διάτμησης και η συνοχή. Από τις δοκιμές προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Η αύξηση του μέτρου δυναμικής διάτμησης των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών, σε χαμηλά επίπεδα τσιμεντοποίησης (1-4% κατά βάρος), αποδείχθηκε ότι οφειλόταν σε αύξηση του συντελεστή δυσκαμψίας, S .

$$G_{max} = S * (pa)^{(n-1)} * (\sigma'_{o}) * n$$

- Η σχετική αύξηση του συντελεστή δυσκαμψίας S , με την τσιμεντοποίηση, θα μπορούσε να εκφραστεί με το λόγο δυσκαμψίας, R . Το R , συνδέεται μη γραμμικά τόσο με τον βαθμό τσιμεντοποίησης όσο και με το λόγο κενών. Το R , ήταν υψηλότερο για τα πυκνά δείγματα.
- Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του βαθμού της τσιμεντοποίησης, οδήγησε σε ταχεία μείωση του μέτρου διάτμησης, με την αύξηση των παραμορφώσεων.

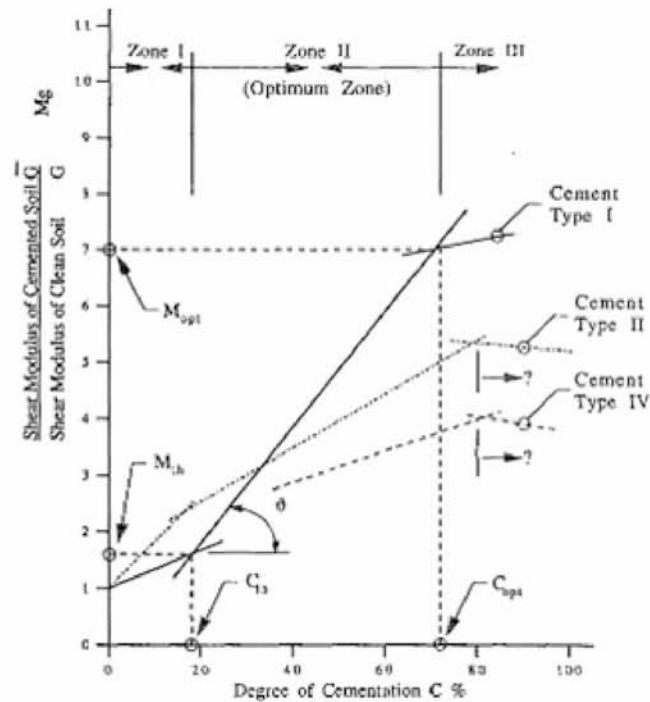
- Η τσιμεντοποίηση οδήγησε σε μείωση του λόγου απόσβεσης σε όλα τα επίπεδα παραμόρφωσης.
- Τα ελαφρώς τσιμεντοποιημένα δείγματα με UCS 10-80 kPa, έδωσαν $R=1.4-2.6$. Αυτό σημαίνει ότι τέτοιοι χαμηλοί βαθμοί τσιμεντοποίησης μπορεί να οδηγήσουν σε 18-60% υψηλότερες ταχύτητες διατμητικών κυμάτων. Συνεπώς, η ανάλυση σεισμικής απόκρισης, που αγνοεί την επίδραση μιας υπάρχουσας τσιμεντοποίησης θα οδηγούσε σε αντίστοιχες υπερεκτιμήσεις των κυρίαρχων περιόδων. Μια τέτοια ανάλυση μπορεί επίσης να δώσει συντηρητικές εκτιμήσεις των επιπέδων επιτάχυνσης, των τάσεων και του δυναμικού ρευστοποίησης.

(δ) Οι Saxena, Avramidis και Reddy (1987), μελέτησαν το δυναμικό συντελεστή και το λόγο απόσβεσης τσιμεντοποιημένων άμμων, σε χαμηλές παραμορφώσεις. Στα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε καθαρή άμμος Monterey No. 0/30 η οποία χαρακτηρίστηκε ως μια κακώς διαβαθμισμένη άμμος, με μέγιστη ξηρή πυκνότητα $16,65\text{kN/m}^3$ και ελάχιστη $14,04\text{kN/m}^3$. Διαμορφώθηκαν τεχνητά τσιμεντοποιημένα και μη τσιμεντοποιημένα δείγματα άμμου. Για τα τεχνητά δείγματα, η άμμος αναμίχθηκε με τσιμέντο Portland σε περιεκτικότητες 1, 2, 5, και 8 %. Για την προετοιμασία των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της συμπύκνωσης. Το υγρό ομοιογενές μίγμα τοποθετήθηκε εντός του καλουπιού και συμπίεστηκε. Τα δείγματα σκληρύνθηκαν κάτω από το νερό και παρέμειναν σε πλαστικά καλούπια για τον απαιτούμενο αριθμό ημερών. Εκτελέστηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού και ισότροπη στερεοποίηση σε πιέσεις 50-600 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, έδειξαν ότι:

- Οι μικρές ποσότητες τσιμεντοποίησης αύξησαν τα G_0 και D_0 , ενώ σε υψηλότερη τσιμεντοποίηση το G_0 αυξήθηκε, αλλά το D_0 μειώθηκε.
- Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μηχανική απόκριση των τσιμεντοποιημένων άμμων αποδείχθηκε ότι είναι η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, η ενεργή τάση και η πυκνότητα. Ο λόγος απόσβεσης, δεν επηρεάστηκε τόσο.

(ε) Οι Chang, Woods (1992), ερεύνησαν τις επιδράσεις της σύνδεσης στις επαφές των σωματιδίων στο μέτρο διάτμησης. Στη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικοί τύποι άμμων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι άμμοι Ottawa ($D_{10}=0,66\text{mm}$, $C_u=1,06$), Muskegon ($D_{10}=0,28\text{mm}$, $C_u=1,50$), κονιάματος ($D_{10}=0,24\text{mm}$, $C_u=4,42$) και μέση άμμος ($D_{10}=1,45\text{mm}$, $C_u=1,06$). Εφαρμόστηκαν δυο διαφορετικοί τρόποι προετοιμασίας των δειγμάτων, όπου τα διαλύματα είτε εγχύθηκαν μέσω ένεσης, είτε αναμίχθηκαν. Το ενέσιμο διάλυμα, εγχύθηκε σταδιακά στο δείγμα υπό πίεση 35 kPa. Τα δείγματα σκληρύνθηκαν για μία ημέρα πριν από τη δοκιμή. Στη δεύτερη μέθοδο, τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε τρία στρώματα στην επιθυμητή πυκνότητα στο θάλαμο RC. Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά, τεχνητά τσιμεντοποιημένα δείγματα, σε επίπεδα τσιμεντοποίησης: 0, 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90 %. Έξι μίγματα τσιμέντου χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή ισχυρών, μέτριων και ασθενών δεσμών στα δείγματα. Τα συστατικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του συνδετικού παράγοντα, ήταν πυριτικό νάτριο, τσιμέντο Portland, τέφρα και ασβέστης. Εκτελέστηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού και μελετήθηκαν οι αλλαγές στο μέτρο διάτμησης. Από τις δοκιμές, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Αποδείχθηκε ότι το μέτρο διάτμησης, εξαρτάται από το χρόνο, ενώ η τελική τιμή του διαμορφώθηκε στο τέλος της διαδικασίας σκλήρυνσης. Το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης ($M=G_{\text{τσιμ. άμμου}}/G_{\text{καθ. άμμου}}$), προέκυψε ότι εξαρτάται από την επιβαλλόμενη τάση, τις ιδιότητες D_{10} , C_u και τις ιδιότητες του τσιμέντου.
- Το G_{max} αυξήθηκε με την τσιμεντοποίηση.
- Ο βαθμός τσιμεντοποίησης, εκφράστηκε μέσω του ποσοστού των γεμάτων κενών του εδάφους και τα φαινόμενα τσιμεντοποίησης, χωρίστηκαν σε τρία διαφορετικά στάδια: α) Όταν $C < C_{\text{th}}$, το τσιμέντο κάλυπτε την επιφάνεια των σωματιδίων του εδάφους και αναπτύχθηκαν κάποιοι αρχικοί δεσμοί, β) όταν $C_{\text{th}} < C < C_{\text{opt}}$, αναπτύχθηκαν χημικοί δεσμοί, γρήγορα, με σημαντική αύξηση του G , γ) όταν $C_{\text{opt}} < C$, δεν δημιουργήθηκε νέος χημικός δεσμός και το πρόσθετο τσιμέντο γέμισε τα κενά (Σχήμα 6.1). Σε αυτή τη μελέτη, βρέθηκαν $C_{\text{th}}=20-25\%$ και $C_{\text{opt}}=60-80\%$.



Σχήμα 6.1 Το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης συναρτήσει του βαθμού τσιμεντοποίησης, για τους διάφορους τύπους τσιμέντου (Chang, 1992).

- Η καλά διαβαθμισμένη άμμος, με μικρό ενεργό μέγεθος κόκκων, βρέθηκε ότι μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη δυσκαμψία, μέσω της τσιμεντοποίησης, λόγω του αριθμού των σημείων επαφής μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους (υψηλό C_u και χαμηλό D_{10}).

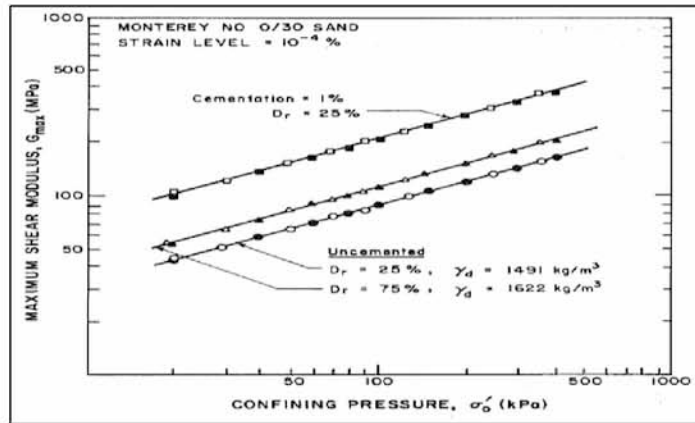
(στ) Οι Puppala, Acar και Tumay (1995), εκτέλεσαν δοκιμές κώνου διείδυσης σε ασθενώς τσιμεντοποιημένες άμμους. Το έδαφος το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν η άμμος Monterey No.0/30, η οποία είναι μια καθαρή κακώς διαβαθμισμένη άμμος, με συντελεστές ομοιομορφίας και καμπυλότητας $C_u=1,5$ και $C_c=0,95$, αντίστοιχα και ξηρές πυκνότητες $\rho_{dry-min}=14,04kN/m^3$ και $\rho_{dry-max}=16,65kN/m^3$. Διαμορφώθηκαν μη τσιμεντοποιημένα και τεχνητά τσιμεντοποιημένα δείγματα άμμου, με ανεμπόδιστη μονοαξονική αντοχή μικρότερη από 60 kPa. Τα τσιμεντοποιημένα δείγματα άμμου, δημιουργήθηκαν από την ανάμιξη της παραπάνω άμμου με τσιμέντο Portland, σε περιεκτικότητες 1 και 2%. Όσον αφορά την προετοιμασία για τις δοκιμές κώνου διείδυσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ξηρής συμπίεσης (air-pluviation), την οποία ακολούθησε η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, για τα μη τσιμεντοποιημένα δείγματα. Για τα τσιμεντοποιημένα δείγματα, το μίγμα άμμου, νερού και τσιμέντου αναμίχθηκε για 2 λεπτά και στη συνέχεια τοποθετήθηκε και συμπυκνώθηκε σε καλούπι. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κώνου διείδυσης στις οποίες

εφαρμόστηκαν κατακόρυφες τάσεις 50, 100, 200 και 300 kPa, στο θάλαμο βαθμονόμησης. Από τις δοκιμές κώνου διεΐσδυσης αποδείχθηκε ότι:

- Ο λόγος τριβής ($R_f = (\text{αντίσταση πλευρικής τριβής}) / (\text{αντίσταση αιχμής})$) ήταν ανεξάρτητος από την αύξηση της τσιμεντοποίησης σε τάσεις των 50-300 kPa, ενώ σε χαμηλότερες τάσεις μειώθηκε ελαφρά με την αύξηση της τσιμεντοποίησης.
- Οι τιμές αντίστασης αιχμής σε τάσεις μικρότερες από 100 kPa, αυξήθηκαν κατά 2 φορές και πάνω από 4 φορές από τις τιμές των μη τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, σε τιμές συνοχής 10 και 30 kPa, αντίστοιχα.
- Η αύξηση της κατακόρυφης ενεργής τάσης και του βάθους διεΐσδυσης, επισκίασε την επίδραση της χαλαρής τσιμεντοποίησης. Από τριαξονικές δοκιμές παρατηρήθηκε αύξηση της συνοχής με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας και την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου.

(ζ) Το 1996, οι παραπάνω ερευνητές, μελέτησαν το δυναμικό μέτρο διάτμησης σε χαμηλές παραμορφώσεις, σε τσιμεντοποιημένα εδάφη, μέσω αποτελεσμάτων από τις δοκιμές κώνου διεΐσδυσης. Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος άμμου με τα παραπάνω πειράματα και οι ίδιες ποσότητες τσιμέντου, με εξαίρεση τη στήλη συντονισμού, όπου χρησιμοποιήθηκε 4% τσιμέντο. Για την προετοιμασία των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της συμπύκνωσης. Εκτελέστηκαν δοκιμές κώνου διεΐσδυσης, τριαξονικές δοκιμές, δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές στήλης συντονισμού. Στις δοκιμές στήλης συντονισμού, η ισότροπη στερεοποίηση πραγματοποιήθηκε σε τάσεις 100-345 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Μέσω των πειραμάτων κώνου διεΐσδυσης, αποδείχθηκε ότι τόσο η τσιμεντοποίηση, όσο και η σχετική πυκνότητα (D_r) επηρεάζουν την αντίσταση αιχμής (q_c). Η αύξηση της D_r , μείωσε τον λόγο G_{max}/q_c , ενώ η τσιμεντοποίηση σε μια σταθερή D_r , αύξησε το παραπάνω πηλίκιο.
- Το G_{max} αυξήθηκε με την αύξηση της τάσης στερεοποίησης (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Σχέση G_{max} -επιβαλλόμενης τάσης των τσιμεντοποιημένων και μη καθαρών άμμων, για μικρές παραμορφώσεις (Purpala, 1996).

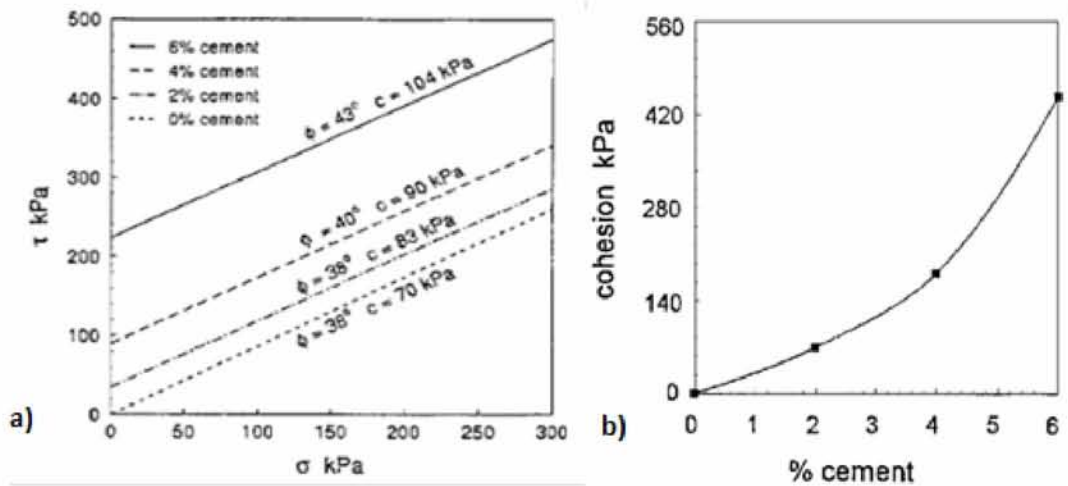
- Από τις τριαξονικές δοκιμές παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης γωνίας τριβής με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας. Ενώ η UCS ήταν ανάλογη με την ενεργή συνοχή.

(η) Οι Baig, Picornel, Nazarian ερεύνησαν το μέτρο διάτμησης υπό μικρές παραμορφώσεις για τσιμεντοποιημένα εδάφη (1997). Τα τσιμεντοποιημένα εδάφη της συγκεκριμένης μελέτης, διαμορφώθηκαν από την ανάμιξη άμμου Ottawa και τσιμέντου Portland, τύπου I και II. Χρησιμοποιήθηκε μόνο το κλάσμα άμμου που διήλθε από το κόσκινο No.40 και δεν διαπέρασε το κόσκινο No.100. Ο βαθμός τσιμεντοποίησης των δειγμάτων, κυμαινόταν από 1-5%. Οι ποσότητες άμμου και τσιμέντου που χρειάστηκαν για τα πειράματα, αναμίχθηκαν και προστέθηκε νερό. Τα δείγματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας μία σταθερή ποσότητα νερού, ενώ ο λόγος ύδατος/τσιμέντου ήταν διαφορετικός για κάθε βαθμό τσιμεντοποίησης. Το μίγμα χωρίστηκε σε έξι ίσα μέρη. Κάθε τμήμα συμπίεστηκε χωριστά με τον ίδιο αριθμό χτύπων, χρησιμοποιώντας μία ράβδο, σε επικαλυμμένο καλούπι (PVC). Μετά τη συμπύκνωση, η κορυφή κάθε στρώματος αποξηράνθηκε, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων. Τα συμπιεσμένα δείγματα στη συνέχεια, σκληρύνθηκαν εντός των καλουπιών για 6 ημέρες σε περιβάλλον με 100% σχετική υγρασία. Επίσης, τοποθετήθηκαν σε επιταχυνόμενη δεξαμενή σκλήρυνσης υπό την παρουσία νερού στους 60 °C. Μετά από 7 ημέρες, τα δείγματα απομακρύνθηκαν από τη δεξαμενή και ξηράνθηκαν στον αέρα για μια εβδομάδα. Οι σφινγκήρες και το καλούπι αφαιρέθηκαν και το δείγμα διατηρήθηκε σε αεροστεγείς πλαστικές σακούλες. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές (με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία) καθώς και δοκιμές στήλης συντονισμού στρέψης. Τα δείγματα στερεοποιήθηκαν σε ισότροπες τάσεις, που κυμαινόταν από 70-700 kPa. Τα

αποτελέσματα και των δύο δοκιμών, υπέδειξαν αμελητέα επίδραση της τάσης στο G_{max} των τσιμεντοποιημένων άμμων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, απέδειξαν ότι ο βαθμός τσιμεντοποίησης ήταν η πιο σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης.

(θ) Η συμπεριφορά τσιμεντοποιημένων άμμων, μελετήθηκε επίσης από τους Abdulla και Kiousis (1997). Χρησιμοποιήθηκε καθαρή και κακώς διαβαθμισμένη άμμος, με συντελεστές καμπυλότητας $C_c=0,76$ και ομοιομορφίας $C_u=2,3$. Διαμορφώθηκαν τεχνητά τσιμεντοποιημένα κυλινδρικά δείγματα (ύψος/διάμετρος= 0.75-2), από την προσθήκη στην άμμο, ποσοτήτων τσιμέντου Portland, τύπων I και II, σε περιεκτικότητες 2, 4 και 6% κατά βάρος. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές από τις οποίες εξετάστηκε η σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η συνοχή της τσιμεντοποιημένης άμμου αυξήθηκε μη γραμμικά με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ενώ η μέγιστη γωνία τριβής παρέμεινε πρακτικά αμετάβλητη (Σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3 a) Η επίδραση της περιεκτικότητας του τσιμέντου στη συνοχή και τη γωνία τριβής, της καθαρής άμμου, b) η μη γραμμική αύξηση της συνοχής με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο (Kiousis, 1997).

- Η αρχική δυσκαμψία της άμμου αυξήθηκε ως συνάρτηση της επεξεργασίας με τσιμέντο.

- Η αρχική ογκομετρική συμπίεση μιας διασταλτικής άμμου αυξήθηκε με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και την τάση στερεοποίησης και ο τελικός ρυθμός διαστολής δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ενώ μειώθηκε με την αυξανόμενη τάση.
- Η μείωση της αντίστασης σε διάτμηση, μετά την απόκτηση της μέγιστης τιμής της, έγινε πιο έντονη με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και τη μείωση της τάσης.

(i) Οι Fernandez και Santamarina (2001), μελέτησαν τις επιδράσεις της τσιμεντοποίησης σε μικρές παραμορφώσεις άμμων. Ως έδαφος χρησιμοποιήθηκε, λεπτή πυριτική άμμος, με δείκτη ομοιομορφίας $C_u=2,1$ και δείκτη καμπυλότητας $C_c=0,98$. Αρχικά, αναμιχθηκαν το τσιμέντο Portland No.2 με το νερό, σε αναλογία 1:1, η άμμος προστέθηκε στο διάλυμα και αναμιχθηκαν μαζί για 10 λεπτά. Το μίγμα τοποθετήθηκε και συμπιέστηκε σε στρώσεις σε ένα καλούπι εντός της συσκευής RC. Η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή σε 7 ημέρες ήταν 138 kPa και επιτεύχθηκε σε αξονική παραμόρφωση 1,7%. Ο πλήρης χρόνος ανάμιξης, η πλήρωση του καλουπιού και η συναρμολόγηση της στήλης συντονισμού χρειάστηκαν λιγότερο από 45 λεπτά. Μόλις προετοιμάστηκε το δοκίμιο και τοποθετήθηκε το άνω πώμα, εφαρμόστηκε εφελκυστική τάση για να αφαιρεθεί το καλούπι. Διαμορφώθηκαν έτσι, ελαφρώς τσιμεντοποιημένα δείγματα, με περιεκτικότητα του τσιμέντου 2% κατά βάρος. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στρέψης στήλης συντονισμού, από τις οποίες μελετήθηκαν ιδιότητες όπως το μέτρο διάτμησης, η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων και η απόσβεση. Από τις δοκιμές προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

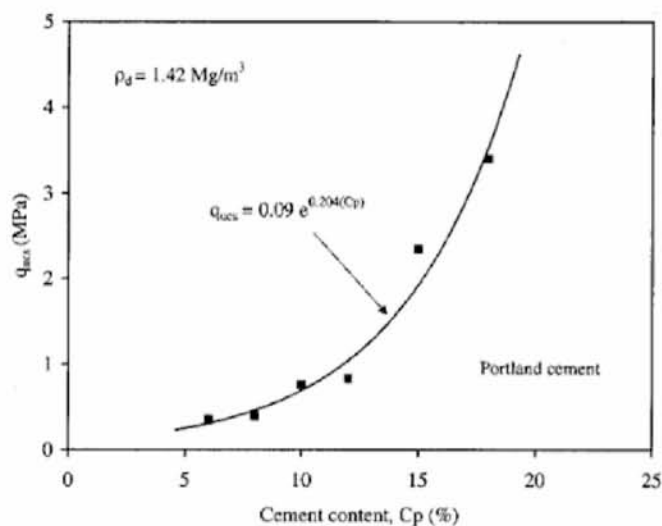
- Η επίδραση της τσιμεντοποίησης στην αντοχή και στη δυσκαμψία ήταν πολύ σημαντική, σε χαμηλές τάσεις. Σε υψηλές τάσεις, η αντοχή και η δυσκαμψία ήταν εξαρτώμενες από τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης.
- Η διαστολή έτεινε να είναι υψηλότερη στις τσιμεντοποιημένες άμμους από ότι στις μη τσιμεντοποιημένες.

- Οι μεταβολές στην ισότροπη τάση στερεοποίησης, μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στην τσιμεντοποίηση.
- Η δυσκαμψία της άμμου, σε μικρές παραμορφώσεις, αυξήθηκε κατά μία τάξη μεγέθους ή περισσότερο, λόγω της τσιμεντοποίησης.
- Οι αλλαγές στην απόσβεση, αποδείχθηκε ότι μπορούν να επηρεάσουν την τσιμεντοποίηση, συνεπώς οι συγκρίσεις πρέπει να γίνονται με την ίδια συχνότητα και υγρασία, λόγω της επικρατούσας επίδρασης της βισκώδους απόσβεσης.
- Αποδείχθηκε ότι η ελαφριά τσιμεντοποίηση επαρκούσε για να καλύψει την επίδραση της τάσης στερεοποίησης, στη δυσκαμψία.

(κ) Οι Ismail, Joer, Sim και Randolph (2002), ασχολήθηκαν με την επίδραση του τύπου του τσιμέντου στη διατμητική συμπεριφορά, των τσιμεντοποιημένων ασβεστολιθικών άμμων. Για τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε καθαρή ανθρακική άμμος, με $D_{max} = 2\text{mm}$, χωρίς λεπτόκοκκα και κόκκους βιοκλαστικής προέλευσης, με περιεκτικότητα σε CaCO_3 85-94%. Για να μελετηθεί η επίδραση του τύπου του τσιμέντου ήταν σημαντικό να διατηρηθεί η συνέπεια μεταξύ των δειγμάτων. Η συνέπεια επιτεύχθηκε με τον καθορισμό της πυκνότητας και της ανεμπόδιστης μονοαξονικής αντοχής. Επιλέχθηκαν δύο επίπεδα τσιμεντοποίησης: $q = 0,5$ και $q = 2,5$ MPa. Οι αναλογίες τσιμέντου προς την ποσότητα του εδάφους, με τις οποίες επιτεύχθηκαν οι παραπάνω τιμές, ήταν 10 και 20% για το γύψο, 8 και 15% για το τσιμέντο Portland και 3,5 και 7% για τον ασβεστίτη. Για την προετοιμασία των δειγμάτων ασβεστίτη, η ξηρανθείσα (από αέρα) άμμος, ρυθμίστηκε έτσι ώστε να έχει μια ορισμένη πυκνότητα και εφαρμόστηκε σε αυτή, κατακόρυφη τάση 60 kPa, μέσω νεκρού φορτίου. Το νερό εισήχθη από κάτω προς τα πάνω και έπειτα ακολούθησε η εισαγωγή του χημικού διαλύματος. Τέλος τα δείγματα, σκληρύνθηκαν για 24 ώρες. Για την προετοιμασία των δειγμάτων τσιμέντου Portland και γύψου, η άμμος αναμίχθηκε με τον παράγοντα τσιμέντου και η πυκνότητα του μίγματος, ρυθμίστηκε, στη συνέχεια, με τη μεταβολή του ύψους του δείγματος. Εφαρμόστηκε κατακόρυφη τάση 200 kPa και το νερό ξεπλύθηκε μέσω των δειγμάτων για να επιτρέψει την ενυδάτωση του τσιμέντου. Η περίοδος σκλήρυνσης

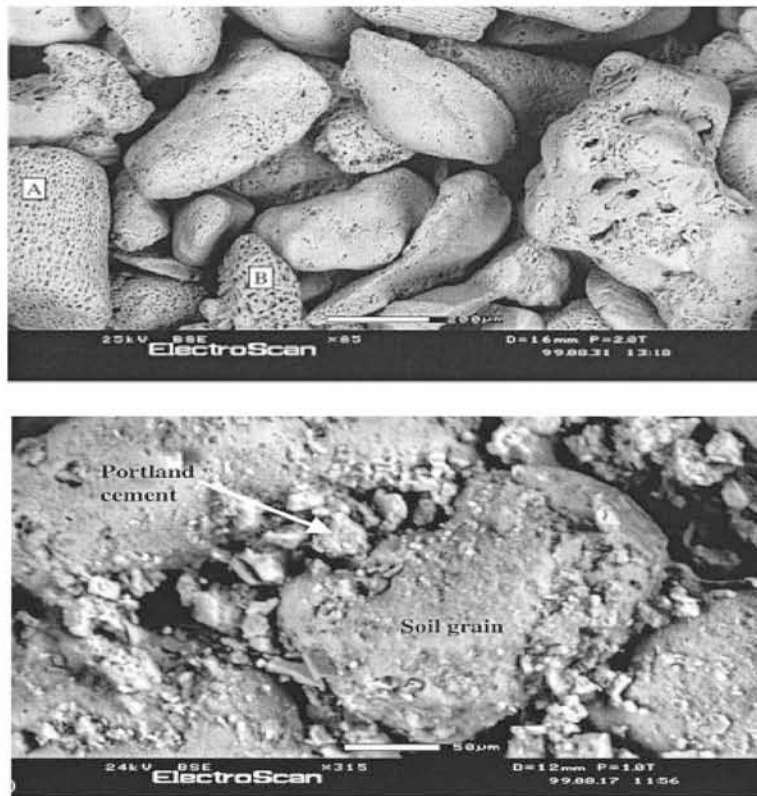
διήρησε μία εβδομάδα και 3 ημέρες για το τσιμέντο Portland και για το γύψο, αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ESEM και εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές CU, με ισότροπη τάση στερεοποίησης μέχρι τα 800 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Οι μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων που είχαν την ίδια ανεμπόδιση αντοχή και πυκνότητα συμπίεσης ποίκιλαν σημαντικά, κυρίως λόγω της διαφορετικής παραμόρφωσης κατά τη διάτμηση.
- Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τσιμέντο Portland παρουσίασαν όλκιμη συμπεριφορά και στη συνέχεια υψηλή διαστολή. Αντίθετα, τα δείγματα με ασβέστιο και γύψο εμφάνισαν ψαθυρή συμπεριφορά και περισσότερη συστολή. Συμπερασματικά, η προσθήκη τσιμέντου Portland στην άμμο, έδωσε μια πιο όλκιμη συμπεριφορά και περαιτέρω αύξηση της αντοχής έπειτα από τη διαρροή (strain hardening response) σε σύγκριση με τους άλλους τύπους τσιμέντου.
- Η UCS αυξήθηκε μη γραμμικά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4 Σχέση UCS-περιεκτικότητας σε τσιμέντο (Ismail, 2002).

- Οι αναλύσεις ESEM, έδειξαν την πραγματοποίηση της τσιμεντοποίησης στους κόκκους της άμμου (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5 Εικόνες ESEM των εδαφικών κόκκων, πριν και μετά την τσιμεντοποίηση (Ismail, 2002).

(λ) Οι Yun και Santamarina (2005) διερεύνησαν την επίδραση της μονοαξονικής συμπίεσης τσιμεντοποιημένων δειγμάτων στη δυσκαμψία σε μικρές παραμορφώσεις. Δόθηκε έμφαση στην υποβάθμιση και στη χαλάρωση των δεσμών τσιμεντοποίησης των χαλαρών εδαφών. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμο Nevada (με γωνιακούς κόκκους, $D_{50}=0,14-0,17$ mm, $C_u=1,67$) καθώς και ανθρακική άμμος πυριτίας ($C_u = 5,9$, $C_c = 1,9$) με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα και ανθρακικούς κόκκους 24,5% και 90%, αντίστοιχα. Για την προετοιμασία των δειγμάτων, η άμμος τοποθετήθηκε σε φούρνο για 24 ώρες πριν από τη δοκιμή. Τα μη επεξεργασμένα δείγματα εδάφους παρασκευάστηκαν σε κυψέλη οιδημέτρου (διαμέτρου 100 mm) με τη μέθοδο της συμπύκνωσης, σε χαλαρές και πυκνές συνθήκες. Τα τεχνητά τσιμεντοποιημένα εδάφη παρασκευάστηκαν από την ανάμιξη της άμμου με τσιμέντο Portland τύπου I ($G_s=3,15$) σε περιεκτικότητες 2 και 4% κατά βάρος. Στη συνέχεια, προστέθηκε στο μείγμα νερό, το μίγμα ομογενοποιήθηκε για 5 λεπτά και τοποθετήθηκε στο κελί όπου συμπίεστηκε για την παραγωγή τόσο χαλαρών όσο και πυκνών δειγμάτων. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές οιδημέτρου στα επεξεργασμένα και μη δείγματα και προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες διατμητικών κυμάτων μέσω των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Η μέγιστη αξονική τάση που εφαρμόστηκε κατά τη δοκιμή ήταν 1MPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

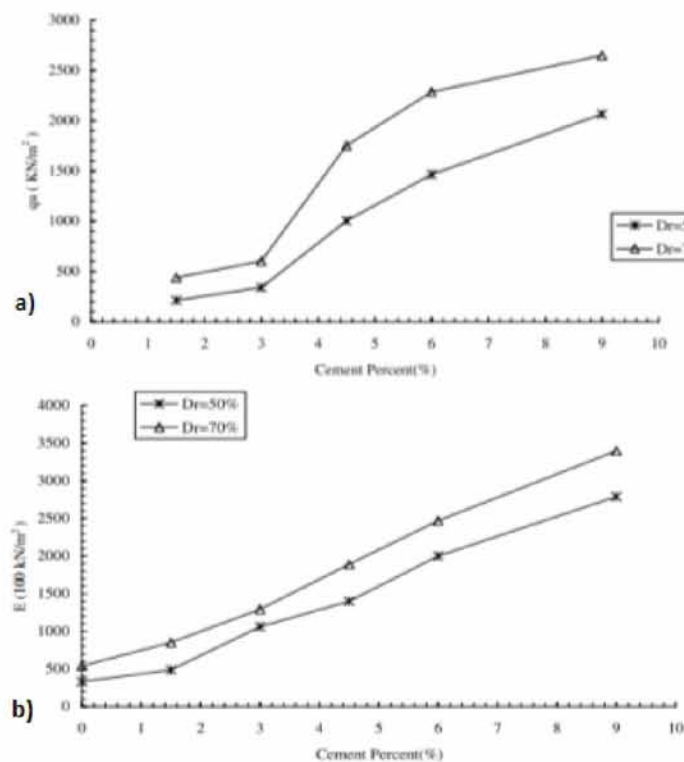
(μ) Οι Ismail, Sharma και Fahey (2005) πραγματοποίησαν εργαστηριακές δοκιμές για την ανίχνευση της ασθενούς τσιμεντοποίησης σε υπεράκτιες αποθέσεις ανθρακικών αλάτων. Για τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε ανθρακική πυριτική άμμος ($C_u=5,9$, $C_c=1,9$) με περιεκτικότητες σε λεπτόκοκκα 24,5% και σε ανθρακικό 90%. Η προετοιμασία του δείγματος ξεκίνησε με την ανάμιξη της άμμου με τσιμέντο Portland σε περιεκτικότητες τσιμέντου 2 και 4%, για την παραγωγή δειγμάτων με αντοχή UCS=50 και 100 kPa, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές αντοχής υπέδειξαν πολύ ασθενώς τσιμεντοποιημένα δείγματα. Μετά την ανάμιξη, το μίγμα τοποθετήθηκε σε κυλινδρικό καλούπι (διαμέτρου 72 mm). Τα δείγματα δονήθηκαν με κτύπους μέχρι το ύψος των 163 mm και στη συνέχεια μετακινήθηκαν σε ένα πλαίσιο φόρτισης όπου εφαρμόστηκε τάση σκλήρυνσης (300 kPa). Το CO_2 ξεπλύθηκε από τον πυθμένα και ακολούθησε το ξέπλυμα με αλατόνερο για τον κορεσμό του δείγματος και την ενυδάτωση του τσιμέντου. Στη συνέχεια, έκλεισαν οι βαλβίδες στράγγισης και τα δείγματα αφέθηκαν να σκληρυνθούν για 3 ημέρες. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και τριαξονικές δοκιμές από τις οποίες προσδιορίστηκε και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (V_s). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη σύγκριση της μηχανικής συμπεριφοράς των ελαφρώς τσιμεντοποιημένων δειγμάτων με εκείνη των πρόσφατα εναποτιθέμενων και υπερστερεοποιημένων δειγμάτων (μη επεξεργασμένα δείγματα). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Τα εδάφη ανθρακικών αλάτων είναι επιρρεπή στη θραύση των κόκκων (από τη συμύκνωση) σε σχετικά χαμηλές καταπονήσεις. Στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, η σύνθλιψη των κόκκων εδάφους προσδιορίστηκε σε χαμηλό επίπεδο τάσης, 500 kPa.
- Η ελαφριά τσιμεντοποίηση μείωσε το K_0 από 0,32, για το μη επεξεργασμένο έδαφος, σε 0,18 και 0,05 για το επεξεργασμένο δείγμα με 2 και 4% περιεκτικότητες τσιμέντου, αντίστοιχα. Οι χαμηλές τιμές K_0 των ελαφρώς τσιμεντοποιημένων δειγμάτων αυξήθηκαν με την αύξηση της τάσης, καθώς οι δεσμοί τσιμεντοποίησης περιορίστηκαν στα διακριτά σημεία διαρροής.

(ν) Οι Haeri, Hosseini, Toll και Yasrebi (2005) μελέτησαν τη συμπεριφορά της τεχνητά τσιμεντοποιημένης, καλά διαβαθμισμένης χαλικώδης άμμου-αμμώδης χαλίκι (περιεκτικότητα σε χαλίκια 65%). Το δείγμα παρασκευάστηκε από χαλικώδη άμμο και

τσιμέντο Portland σε περιεκτικότητες 1.5, 3, 4.5, 6 και 9%. Εκτός από τα τσιμεντοποιημένα δείγματα, για τις δοκιμές προετοιμάστηκαν και μη τσιμεντοποιημένα. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές UCS και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι:

- Η υφή και η δομή της τσιμεντοποιημένης άμμου επηρέαζε σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά της.
- Η ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή και το αρχικό μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκαν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και την αύξηση της σχετικής πυκνότητας (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7 a) Σχέση UCS - περιεκτικότητας σε τσιμέντο, b) σχέση μέτρου ελαστικότητας - περιεκτικότητας σε τσιμέντο, για Dr=50 & 70% (Haeri, 2005).

(ξ) Οι Kokusho, Nagao, Ito και Fumkuyama (2011) μελέτησαν την επίδραση της γήρανσης στη ρευστοποιημένη άμμο που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού του 2011. Η άμμος (Ιαπωνία) που χρησιμοποιήθηκε περιείχε ποσοστό λεπτόκοκκων 0-30%. Το δείγμα (διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm) παρασκευάστηκε από άμμο και τσιμέντο Portland

με περιεκτικότητες 0-1%. Πραγματοποιήθηκαν αρχικά δοκιμές κώνου διείδυσης και στη συνέχεια κυκλικές τριαξονικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Σχεδόν όλες οι εναποθέσεις άμμου κατά μήκος του κόλπου του Τόκιο, που ανακτήθηκαν στη δεκαετία 1960 ή αργότερα, ρευστοποιήθηκαν, ενώ οι παλαιότερες άμμοι δεν είχαν ρευστοποιηθεί.
- Τα δείγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε CC/FC (περιεκτικότητα σε περιεχόμενο τσιμέντου/περιεκτικότητα σε λεπτά σωματίδια που προσομοιώνουν μεγαλύτερη γεωλογική ηλικία) οδήγησε σε υψηλότερη αντίσταση έναντι ρευστοποίησης, για την ίδια αντίσταση κώνου διείδυσης, δηλώνοντας ότι το φαινόμενο της τσιμεντοποίησης έτεινε να αυξήσει τη γραμμή RL (αντοχή έναντι ρευστοποίησης) $-q_t$ (αντίσταση κώνου διείδυσης) σε σύγκριση με το μη τσιμεντοποιημένο έδαφος (έδαφος χωρίς γήρανση).
- Το φαινόμενο της τσιμεντοποίησης εκδηλώθηκε εντονότερα καθώς αυξανόταν η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα.

(ο) Οι Consoli, Forra, Festugato και Heineck (2007) μελέτησαν τις βασικές παραμέτρους για τον έλεγχο της αντοχής των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ήταν αργιλώδης άμμος ($WL=23\%$, $PI=10\%$, $d<0,6\text{mm}$ $C_u=50$) η οποία προήλθε από ψαμμίτη (Porto). Η περιεκτικότητα της άμμου σε λεπτόκοκκα ήταν $38,4\%$ και σε άργιλο 5% . Η διαμόρφωση του μίγματος έγινε με την ανάμιξη της άμμου με τσιμέντο Portland τύπου III ($G_s=3,15$) και νερό, μέχρι τη δημιουργία μια ομοιογενής πάστα. Το μίγμα αποθηκεύτηκε σε ένα κυλινδρικό δοχείο (διαμέτρου $D=5\text{cm}$ και ύψους 10cm) πριν από τη συμπίεση. Η διάρκεια της ανάμιξης και της συμπίεσης ήταν μικρότερη από 1 ώρα. Το δείγμα συμπίεστηκε στατικά σε τρία στρώματα και στη συνέχεια τοποθετήθηκε μέσα σε πλαστικές σακούλες. Τέλος, αφέθηκε να σκληρυνθεί στους $23\text{ }^\circ\text{C}$, σε σχετική υγρασία πάνω από 95% , για 6 ημέρες και βυθίστηκε σε δεξαμενή νερού για 24 ώρες προκειμένου να κορεσθεί. Μετά τη διαμόρφωση του δείγματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές UCS και τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης CU, με τάση στερεοποίησης 20kPa . Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η προσθήκη τσιμέντου, ακόμη και σε μικρές ποσότητες, βελτίωσε σημαντικά την αντοχή του εδάφους.
- Για δεδομένη ξηρή πυκνότητα, η αντοχή του εδάφους αυξήθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό, μέχρι την επίτευξη μέγιστης τιμής, μετά την οποία μειώθηκε η αντοχή του εδάφους.
- Ο λόγος κενών / τσιμέντου (V_v/V_{ci}) βρέθηκε να είναι ο πιο κατάλληλος για την αξιολόγηση το q_u αντί του λόγου εδάφους/τσιμέντου.

(π) Οι Hamidi και Haeri (2008) μελέτησαν τη δυσκαμψία και την παραμόρφωση σε μια τσιμεντοποιημένη χαλικώδη άμμο. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε χαλίκι (Τεχεράνη, Ιράν) το οποίο σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης USCS χαρακτηρίστηκε ως χονδρόκοκκη άμμος, με περιεκτικότητα σε χαλίκια 45%, σε άμμο 49% και σε λεπτόκοκκα 6% ($D_{50}=4\text{mm}$, $G_s=2.58$).

Για την παρασκευή των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκαν καλούπια (διάμετρος 100 mm και ύψους 200 mm). Για κάθε μια από τις 8 στρώσεις στο καλούπι, αναμίχθηκε κατάλληλη ποσότητα εδάφους με γύψο (περιεκτικότητες 1.5, 3, 4.5 και 6%) και 8.5% απεσταγμένο νερό. Ο μέσος χρόνος πήξης για τον γύψο ήταν 13 λεπτά. Το δείγμα διατηρήθηκε στο καλούπι περίπου μία ώρα για πλήρη ενυδάτωση και στη συνέχεια το καλούπι ανοίχθηκε και το δείγμα σκληρύνθηκε στους 50 °C, σε φούρνο. Τα δείγματα διατηρήθηκαν σε χρονική περίοδο περίπου μιας εβδομάδας για να εξασφαλιστεί η ξηρή κατάσταση. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες. Οι τάσεις στερεοποίησης που εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές κυμαίνονταν από 25 έως 500 kPa. Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η συμπεριφορά του τσιμεντοποιημένου εδάφους ήταν πιο ψαθυρή στις στραγγιζόμενες από ότι στις αστράγγιστες συνθήκες.
- Το εφαπτομενικό μέτρο δυσκαμψίας των τσιμεντοποιημένων εδαφών ήταν πάντοτε υψηλότερο από εκείνο των μη τσιμεντοποιημένων. Η διαφορά ήταν πιο εμφανής στις χαμηλότερες τάσεις στερεοποίησης.

- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της τρέχουσας μελέτης με αντίστοιχες μελέτες σε τσιμέντο Portland και ασβέστη, προέκυψε ότι το τσιμέντο Portland ήταν το καταλληλότερο τσιμέντο όταν η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ήταν $> 4\%$, σε σχέση με τον ασβεστίτη ο οποίος ήταν πιο αποτελεσματικός όταν η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ήταν $< 4\%$. Επομένως, κατά τη μελέτη της δυσκαμψίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο τύπος της τσιμεντοποίησης ο οποίος είναι μια σημαντική παράμετρος.

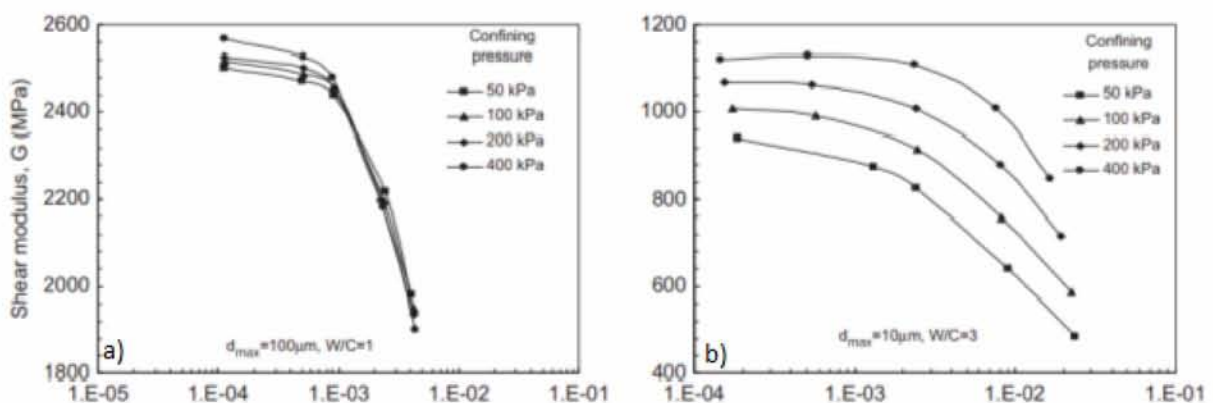
(ρ) Οι Lu, Wang και Zhang (2012) μελέτησαν την επίδραση του τσιμέντου στις μηχανικές ιδιότητες της ανθρακικής άμμου. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ανθρακική άμμος, κακώς διαβαθμισμένη, ($D_{50}=0.41\text{mm}$, $D_{\max}<5\text{mm}$, $C_u=2.83$), από μία θάλασσα της νότιας Κίνας (κοντά στον ύφαλο Yongfu). Η άμμος αναμείχθηκε με γύψο ή ασβεστίτη ή τσιμέντο Portland σε διάφορες περιεκτικότητες. Κατά την προετοιμασία των δειγμάτων το τσιμέντο, η άμμος και το νερό αναμείχθηκαν μαζί. Το μίγμα στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε καλούπι και αφέθηκε να ωριμάσει για 3 ημέρες. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη μελέτη ήταν τριαξονικές δοκιμές CD και οι τάσεις στερεοποίησης που εφαρμόστηκαν ήταν 50, 100 και 200 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η αντοχή της άμμου με 15% τσιμέντο Portland ήταν 1,7 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων που δεν είχαν Portland.
- Η συνοχή της τσιμεντοποιημένης ανθρακικής άμμου με Portland σε περιεκτικότητες 0, 5, 10 και 15% ήταν 0, 10, 50 και 100 kPa, αντίστοιχα και η γωνία τριβής ήταν 46.4, 46.4, 45 και 45°.
- Βρέθηκε ότι το τσιμέντο Portland ήταν το καταλληλότερο υλικό για την τσιμεντοποίηση της ανθρακικής άμμου, σε σύγκριση με τον ασβεστίτη και το γύψο. Η αντοχή της άμμου αυξήθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο Portland. Σε περίπτωση που απαιτούνταν δείγματα με μικρή αύξηση της αντοχής το καταλληλότερο υλικό τσιμεντοποίησης θα ήταν ο ασβεστίτης.

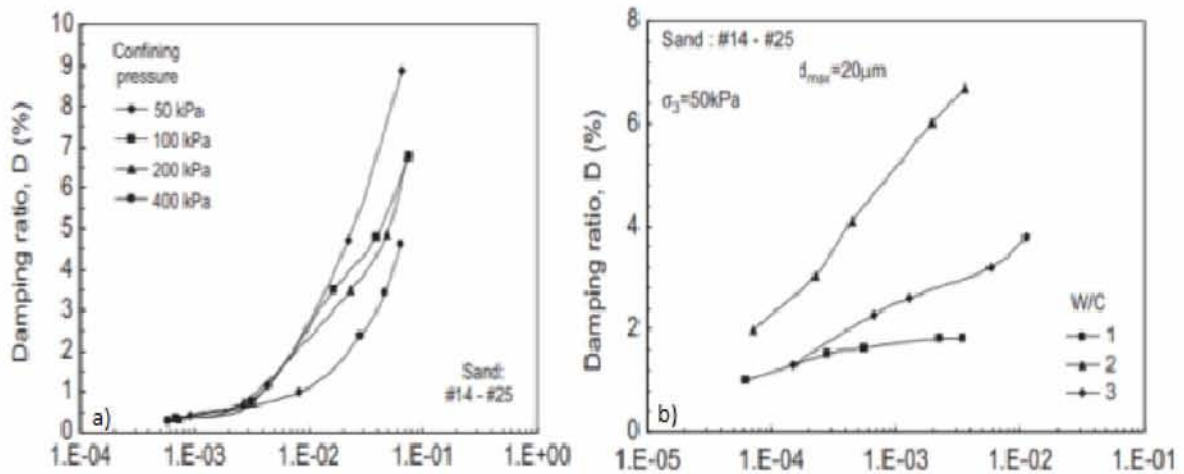
(σ) Οι Pantazopoulos και Atmatzidis (2012) μελέτησαν τις δυναμικές ιδιότητες των τσιμεντοποιημένων microfines άμμων. Τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ήταν

καθαρές και ομοιόμορφες ανθρακικές άμμοι με γωνιώδεις κόκκους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διαβαθμίσεις άμμου, η πρώτη άμμος είχε $D_{15}=0,8\text{mm}$, $C_u=1,43$, D_r 90% και η δεύτερη είχε $D_{15}=0,34\text{mm}$, $C_u=1,56$, D_r 85%. Τα δείγματα αναμίχθηκαν με τρεις διαφορετικούς τύπου τσιμέντου: τσιμέντο Portland (CEMI), σύνθετο Portland (CEM II/B-M) και ποζολανικό τσιμέντο (CEM IV/B). Κάθε τσιμέντο κονιοροποιήθηκε για να παραχθούν τσιμέντα με $D_{\text{max}} = 40, 20$ και $10 \mu\text{m}$. Τα δείγματα άμμου τσιμεντοποιήθηκαν από τα λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα εναιωρήματα. Όλα τα εναιωρήματα παρασκευάστηκαν με τη χρήση νερού σε λόγους νερού/τσιμέντου (W/C) 1, 2 και 3. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού. Οι τάσεις που εφαρμόστηκαν στις δοκιμές στήλης συντονισμού ήταν 50, 100, 200 και 400 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Ο λόγος W/C του ενέματος ήταν η ισχυρότερη παράμετρος που επίδρασε επί των τιμών των δυναμικών ιδιοτήτων των ενεματωμένων άμμων. Η επίδραση του μεγέθους των κόκκων του τσιμέντου και της περιεκτικότητας σε ποζολάνη του τσιμέντου ήταν δευτερεύουσες παράμετροι αλλά όχι αμελητέες.
- Ο συντελεστή διάτμησης (G) (Σχήμα 6.8) και το μέτρο του Young (E) της άμμου μειώθηκαν με την αύξηση του λόγου W/C, ενώ οι τιμές του λόγου απόσβεσης (D) (Σχήμα 6.9) αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε επίσης, αύξηση των τιμών G και E με την αύξηση της τάσης και τη μείωση της παραμόρφωσης, ενώ για την τιμή D παρατηρήθηκε μείωση.



Σχήμα 6.8 Σχέση μέτρου διάτμησης-παραμόρφωσης για τις διάφορες επιβαλλόμενες τάσεις, για αναλογίες a) W/C=1 και b) W/C=3 (Pantazopoulos, 2012).



Σχήμα 6.9 Σχέση λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης α) για τις διάφορες επιβαλλόμενες τάσεις β) για του διάφορους λόγους W/C (Pantazopoulos, 2012).

- Οι τσιμεντοποιημένες microfine άμμοι πέτυχαν υψηλότερες τιμές G , E & D (κατά 25-40%) από ότι οι κοινώς τσιμεντοποιημένες άμμοι.

(τ) Οι Consoli, da Fonseca, Silva, Cruz και Fonini (2012) μελέτησαν τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη δυσκαμψία και την αντοχή των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι άμμων, Porto (Porto, Northern Portugal) και Osorio (Osorio, Porto Alegre, Southern Brazil). Η άμμος Porto ήταν μια καλά διαβαθμισμένη ιλυώδης άμμος ($C_u=113$, $FC=29\%$ όπου $CF=6,5\%$) με όριο υδαρότητας $WL=34\%$, δείκτη πλαστιμότητας $PI=3\%$ (μη πλαστική), μέση διάμετρο κόκκων $D_{50}=0,25mm$, και συντελεστή καμπυλότητας $C_c=2,7$. Το έδαφος περιέχει ορυκτά χαλαζία και άργιλο από καολίνη. Η άμμος Osorio είναι μια ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμος, μη πλαστική, με $D_{50}=0,16mm$, $C_u=1,9$, $C_c=1,2$ η οποία περιείχε χαλαζία. Οι δύο άμμοι αναμίχθηκαν με τσιμέντο Portland τύπου III για 4 διαφορετικά περιεχόμενα τσιμέντου ($G_s=3,15$ περιεκτικότητες: 2, 3, 5, 7%). Κάθε δείγμα άμμου αναμίχθηκε με τσιμέντο και νερό μέχρι να επιτευχθεί ομοιόμορφη πάστα. Έπειτα, τοποθετήθηκε σε καλούπια, πριν από τη συμπίκνωση. Η στατική συμπίκνωση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε 3 στρώματα. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, τα δείγματα απομακρύνθηκαν από τα καλούπια, ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες. Τα δείγματα σκληρύνθηκαν στους $23^\circ C$ και σε σχετική υγρασία πάνω από 95% για 6 ημέρες. Στη συνέχεια, βυθίστηκαν σε δεξαμενή νερού για 24 ώρες για να κορεστούν. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα ήταν UCS και δοκιμές πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η παράμετρος $n/(Civ)^{\text{exponent}}$ ήταν η καταλληλότερη για την εκτίμηση της επίδρασης τόσο του πορώδους όσο και της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στη μέγιστη διατμητική αντοχή G_{\max} και στην ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή (q_u) των μιγμάτων άμμου – τσιμέντου.

Για την άμμο Porto:

Για την άμμο Osorio:

$$q_u \text{ (kPa)} = 4 * 10^9 [n/(Civ^{0.21})]^{-4.29} \quad q_u \text{ (kPa)} = 137.649 [n/(Civ^{1.0})]^{-1.96}$$

$$G_{\max} \text{ (MPa)} = 1 * 10^8 [n/(Civ^{0.21})]^{-3.33} \quad G_{\max} \text{ (MPa)} = 17.504 [n/(Civ^{1.0})]^{-0.99}$$

- Για δεδομένο μίγμα άμμου - τσιμέντου, το G_{\max}/q_u είναι σχεδόν γραμμικό με το $n/(Civ)^{\text{exponent}}$, γεγονός που φανερώνει την εξάρτηση μεταξύ του δείκτη και των παραπάνω γεωτεχνικών ιδιοτήτων. Χρησιμοποιώντας τον δείκτη $n/(Civ)^{\text{exponent}}$, οι επαγγελματίες μπορούν να επιλέξουν την ποσότητα τσιμέντου και την κατάλληλη πυκνότητα για την παρασκευή μίγματος το οποίο θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του έργου ως προς την αντοχή και τη δυσκαμψία.

(υ) Οι Consoli, Cruz, da Fonseca και Coop (2012) ασχολήθηκαν με την επίδραση της σχέσης τσιμέντου-λόγου κενών στη συμπεριφορά τάσης-διαστολής της τσιμεντοποιημένης άμμου. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε άμμος Osorio (ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμος (FC=0%), μη πλαστική, με $D_{50}=0,16\text{mm}$, $C_u=1,9$, $C_c=1,2$, $D<0,3\text{mm}$) η οποία περιείχε χαλαζία και αναμίχθηκε με τσιμέντο Portland τύπου III για 6 διαφορετικά περιεχόμενα τσιμέντου ($G_s=3,15$ περιεκτικότητες: 3, 3.3, 5, 6, 8.6 και 10,3%). Μετά την ανάμιξή τους προστέθηκε νερό και το δείγμα αναμίχθηκε εκ νέου μέχρι το σχηματισμό ομοιόμορφης πάστας. Έπειτα, τοποθετήθηκε σε καλούπια, πριν από τη συμπίκνωση. Η διάρκεια ανάμιξης και συμπίκνωσης ήταν λιγότερη από 1 ώρα. Η στατική συμπίκνωση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε 3 στρώματα. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, τα δείγματα απομακρύνθηκαν από τα καλούπια, ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες. Τα δείγματα σκληρύνθηκαν στους 23 °C και σε σχετική υγρασία πάνω από 95% για 6 ημέρες. Στη συνέχεια, βυθίστηκαν σε δεξαμενή νερού για 24 ώρες για να κορεσθούν.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές UCS καθώς και τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης. Οι τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης (CID) πραγματοποιήθηκαν για τρεις διαφορετικές αναλογίες τσιμέντου-κενών, με δύο συνδυασμούς όγκων κενών και όγκων τσιμέντου σε κάθε αναλογία. Για κάθε αναλογία, υπήρξαν τρεις δοκιμές με ισότροπες τάσεις των 20, 200 και 400 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Για δεδομένο επίπεδο τάσης, ο λόγος τσιμέντου/κενών (V_{ce} / V_v) έλεγχε την απόκριση τάσης – παραμόρφωσης μέχρι την κορυφή (μέγιστη τάση). Μετά την κορυφή, τα πυκνότερα δείγματα ήταν πιο διασταλτικά. Η καταπόνηση του εδάφους μειώθηκε (softening) προς μια κρίσιμη κατάσταση στην οποία η συμπεριφορά του εδάφους οφείλεται καθαρά στην τριβή.
- Η σχέση τάσης-διαστολής ήταν ίδια για δεδομένη αναλογία τσιμέντου-κενών και η συμπεριφορά τάσης-καταπόνησης ήταν επίσης παρόμοια.
- Η αναλογία τσιμέντου/κενών βρέθηκε ότι ήταν μια κατάλληλη παράμετρος για την εκτίμηση της τάσης-διαστολής του μείγματος άμμου-τσιμέντου που μελετήθηκε. Για το λόγο αυτό προτάθηκε μια εμπειρική σχέση V_{ce}/V_v , για την ποσοτικοποίηση της αναλογίας τσιμέντου σε σχέση με το συνολικό όγκο κενών.

$$\frac{V_{ce}}{V_v} = \frac{\text{Volume of cement}}{\text{Volume of voids (water+air)}}$$

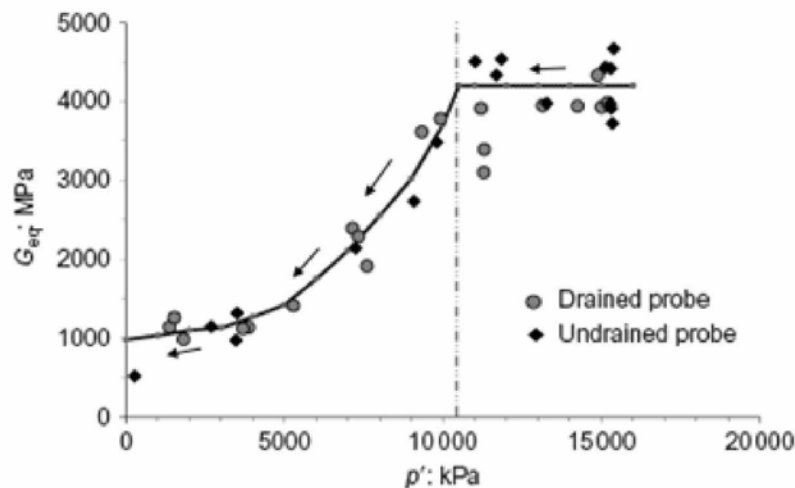
- Τέλος, παρατηρήθηκε συσχέτιση μεταξύ του λόγου V_{ce}/V_v και της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (q_u) στην τσιμεντοποιημένη άμμο. Η αύξηση του όγκου των κενών προκάλεσε μείωση του q_u , ενώ οι αυξημένες τιμές του όγκου του τσιμέντου είχαν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές q_u .

$$q_u \text{ (kPa)} = 29,266 \left(\frac{V_{ce}}{V_v} \right)^{1.35}$$

(φ) Οι Alvarado, Coop και Willson (2012) μελέτησαν τη διάσπαση των δεσμών των ασθενών ψαμμιτών εξαιτίας της αποφόρτισης. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε άμμος

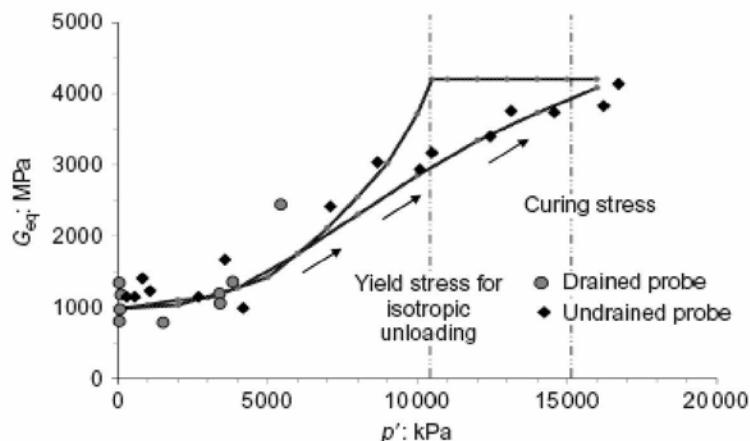
Τουoura, η οποία είναι μία χαλαζιακή άμμος. Το δείγμα αποτελούνταν από άμμο, τσιμέντο Portland 1,4% και χλωριούχο ασβέστιο 0,14%. Η προετοιμασία του δείγματος ξεκίνησε με την ανάμιξη του τσιμέντου και της άμμου με το χέρι. Στη συνέχεια προστέθηκε στο μίγμα 80% του ξηρού βάρους απεσταγμένο νερό μέσα στο οποίο είχε διαλυθεί ήδη το χλωριούχο ασβέστιο και αναμίχθηκε ξανά με το χέρι μέχρι να επιτευχθεί ομοιόμορφη πάστα. Το μίγμα τοποθετήθηκε έπειτα σε ένα καλούπι, και συμπίεστηκε σε 5 στρώσεις. Μετά την τοποθέτηση της άνω πλάκας, εφαρμόστηκε πίεση (vacuum) περίπου 80kPa (για τη συγκράτηση του δείγματος). Για τη σκλήρυνση εφαρμόστηκε μια ενεργή πίεση των 15 kPa. Οι δοκιμές που διεξήχθησαν ήταν οι τριαξονικές δοκιμές μαζί με τοπικό LVDT και πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Η τάση στερεοποίησης (p') που εφαρμόστηκε ήταν μέχρι 16 GPa. Έγιναν συγκρίσεις μεταξύ της συμπεριφοράς των δειγμάτων που είχαν αποφορτιστεί σε μηδενική τάση με δείγματα στα οποία εφαρμόστηκαν διάφορα επίπεδα τάσης κατά τη διάρκεια της τσιμεντοποίησης. Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών έδειξαν ότι:

- Καθώς το έδαφος αποφορτίστηκε το G_{max} αρχικά ήταν σταθερό, αλλά στη συνέχεια, (σε περίπου 10,4 MPa), άρχισε να μειώνεται (γόνατο), το ίδιο και η δυσκαμψία (Σχήμα 6.10). Στο σημείο αυτό άρχισε η διαρροή και η ρηγμάτωση του τσιμέντου.



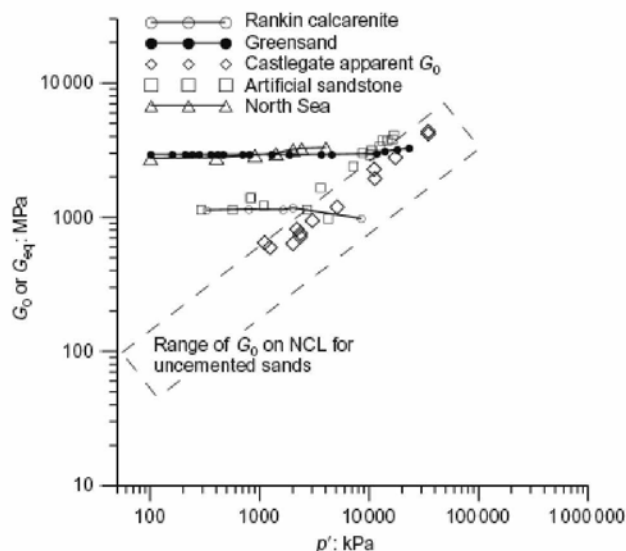
Σχήμα 6.10 Το μέτρο διάτμησης κατά την ισότροπη αποφόρτιση (Alvarado, 2012).

- Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης, το G_{max} ήταν παρόμοιο με εκείνο της αποφόρτισης, αλλά διέφερε στις ενδιάμεσες καταπονήσεις, δείχνοντας ότι η βλάβη στο τσιμέντο ήταν μόνιμη (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11 Το μέτρο διάτμησης κατά την ισότροπη επαναφόρτιση (Alvarado, 2012).

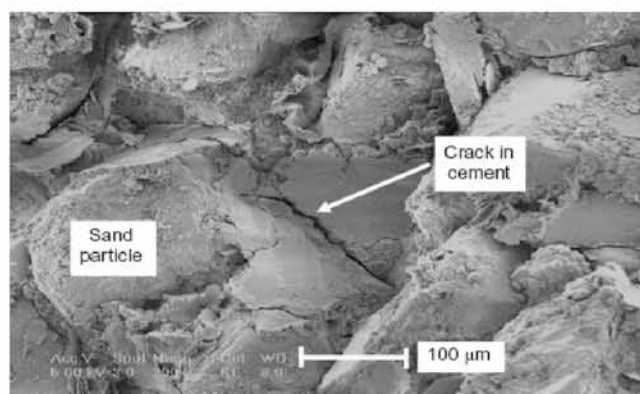
- Το G_{max} για τον τσιμεντοποιημένο ψαμμίτη ήταν ανεξάρτητο από την τάση, για σχετικά χαμηλά επίπεδα τάσης (από 100 kPa) μέχρι την τάση των 15MPa (threshold stress), όπου θα εξαρτιόταν από την τάση και θα συνέπιπτε με την περιοχή των μη τσιμεντοποιημένων εδαφών. Μέχρι την τάση των 15MPa δεν είχε υποβαθμιστεί η δυσκαμψία και το G_{max} ήταν της τάξης των 4,5GPa (Σχήμα 6.12).



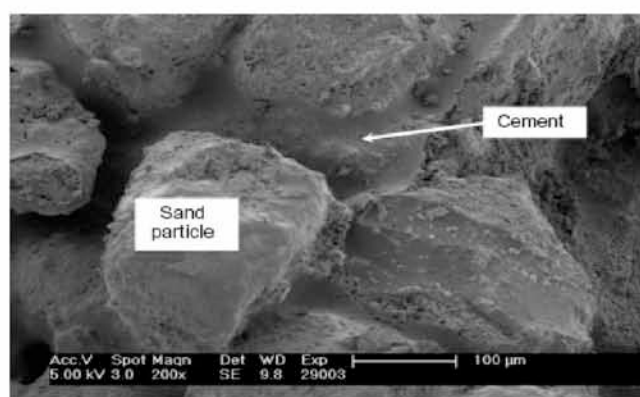
Σχήμα 6.12 Σύγκριση του μέτρου διάτμησης του τσιμεντοποιημένου ψαμμίτη και των μη επεξεργασμένων άμμων (Alvarado, 2012).

- Η ανάλυση SEM του τσιμεντοποιημένου ψαμμίτη που είχε αποφορτιστεί σε μηδενική τάση (Σχήμα 6.20a), έδειξε ότι υπήρχαν πολλές ρωγμές στο τσιμέντο μεταξύ των σωματιδίων άμμου. Για λόγους σύγκρισης, το Σχήμα 6.20b δείχνει μία εικόνα SEM ενός παρόμοια τσιμεντοποιημένου δείγματος που δημιουργήθηκε σε επίπεδο μηδενικής τάσης (δεν υπήρχε αποφόρτιση εδώ, από την αρχή είναι 0). Στο δείγμα αυτό δε

δημιουργήθηκαν ρωγμές (Σχήμα 6.13). Η σύγκριση των δειγμάτων έδειξε ότι η ρωγμή ήταν αποτέλεσμα της διαδικασίας αποφόρτισης.



(a)



(b)

Σχήμα 6.13 Εικόνες SEM που απεικονίζουν τις επιπτώσεις της αποφόρτισης στο τσιμέντο. a) Ρωγμές στο δείγμα κατά την αποφόρτιση, b) δεν εμφανίστηκαν ρωγμές στο δείγμα που είχε δημιουργηθεί σε μηδενική τάση (Alvarado, 2012).

(χ) Οι Consoli, Fonini, Maghous, Schnaid και da Fonseca (2013) ασχολήθηκαν με την πειραματική ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων των τσιμεντοποιημένων εδαφών καθώς και με την εξέλιξή τους στο χρόνο. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε άμμος Osorio (ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμος $FC=0\%$, μη πλαστική, με $D_{50}=0,16\text{mm}$, $C_u=1,9$, $C_c=1,2$, $D<0,3\text{mm}$) η οποία περιείχε χαλαζία. Η άμμος αναμίχθηκε με τσιμέντο Portland τύπου III για 4 σχετικές πυκνότητες άμμου και 5 διαφορετικά περιεχόμενα τσιμέντου ($G_s=3,15$ περιεκτικότητες: 1, 2, 3, 5 και 7%). Μετά την ανάμιξή τους προστέθηκε νερό και το δείγμα αναμίχθηκε εκ νέου μέχρι το σχηματισμό ομοιόμορφης πάστας. Έπειτα, τοποθετήθηκε σε καλούπια, πριν από τη συμπίκνωση. Η διάρκεια ανάμιξης και συμπίκνωσης ήταν λιγότερη από 1 ώρα. Η στατική συμπίκνωση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε 3 στρώματα. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, τα δείγματα απομακρύνθηκαν από τα καλούπια, ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες. Τα δείγματα σκληρύνθηκαν στους $23\text{ }^\circ\text{C}$ και σε σχετική υγρασία πάνω

από 95% για 6 ημέρες. Στη συνέχεια, βυθίστηκαν σε δεξαμενή νερού για 24 ώρες για να κορεσθούν. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές οιδημέτρου και πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η αναλογία πορώδους/τσιμέντου ήταν μια κατάλληλη παράμετρος για την εκτίμηση του μέτρου διάτμησης (G_{max}) και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης (M_o), σε ένα μίγμα τσιμέντου-εδάφους για όλες τις μελετηθείσες περιόδους σκλήρυνσης.
- Σε σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα άμμου, με παρόμοια πορώδη, παρατηρήθηκαν αυξήσεις περίπου 360% έως 6300%, λόγω εισαγωγής τσιμέντου, για το G_{max} και 900% έως 6700% για το M_o .
- Αποδείχθηκε ότι το G_{max} και το M_o θα μπορούσαν να βρεθούν από τις ακόλουθες σχέσεις. Και οι δυο παράμετροι εξαρτιόνται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, το χρόνο σκλήρυνσης και το πορώδες.

$$G_{max} \text{ (MPa)} = (2,022 + 7,250 \ln(t)) * \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{-0.95}$$

όπου C_{iv} = περιεκτικότητα σε όγκο του τσιμέντου

$$M_o \text{ (MPa)} = (7,631 + 12,038 \ln(t)) * \frac{\eta}{C_{iv}}^{-0.81}$$

6.2.2 Λεπτόκοκκα εδάφη

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές, από το 1995, για λεπτόκοκκα τσιμεντοποιημένα εδάφη με Portland. Πιο συγκεκριμένα, τα εδάφη που μελετήθηκαν είναι κυρίως αργιλικά εδάφη και μάργες.

(α) Το 1995, ο Aiban μελέτησε την αντοχή και τη διαπερατότητα της μάργας Abqaiq, στη Σαουδική Αραβία. Η μάργα που χρησιμοποιήθηκε ήταν μη πλαστική ($PI=2\%$, $WL=47\%$) και αποτελούνταν από 14% λεπτόκοκκα. Ήταν καλά διαβαθμισμένη με συντελεστή ομοιομορφίας $C_u=635$ και συντελεστή καμπυλότητας $C_c=1,42$ και αποτελούνταν από 43%

χαλαζία, 40% δολομίτη και 14% ανθρακικό ασβέστιο (περιεχόμενο σε ανθρακικό άλας 54%). Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δείγματα τα οποία συμπυκνώθηκαν, για υγρασία είτε λίγο μικρότερη είτε λίγο μεγαλύτερη από τη βέλτιστη (dry&wet sides). Επίσης, διαμορφώθηκαν συμπυκνωμένα δοκίμια στη βέλτιστη υγρασία. Επιπλέον, διαμορφώθηκαν δοκίμια με την προσθήκη 2% τσιμέντου Portland. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης, ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, CBR και δοκιμές διαπερατότητας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η μέθοδος παρασκευής (η περιεκτικότητα σε νερό) επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των λεπτόκοκκων ασβεστολιθικών ιζημάτων. Τα δείγματα που είχαν συμπυκνωθεί σε ξηρή πυκνότητα που αντιστοιχεί στο 95% της βέλτιστης υγρασίας του εδάφους (dry & wet sides) είχαν μικρότερες αντοχές από εκείνα που συμπυκνώθηκαν στη βέλτιστη. Συγκριτικά, τα δείγματα που συμπυκνώθηκαν σε ξηρή πυκνότητα που αντιστοιχεί σε υγρασία μεγαλύτερη από τη βέλτιστη είχαν μικρότερη αντοχή από εκείνα που συμπυκνώθηκαν σε πυκνότητα που αντιστοιχεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης.
- Η γωνία εσωτερικής τριβής δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την περιεκτικότητα σε νερό, αν και μειώθηκε ελαφρά με την αύξησή της. Η συνοχή αποδείχθηκε πως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε νερό, αν και η μάργα ήταν μη πλαστική. Όσο μεγαλύτερη ήταν η περιεκτικότητα σε νερό, τόσο μικρότερη ήταν η συνοχή.
- Η προσθήκη 2% τσιμέντου είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών CBR κατά 2-8 φορές.

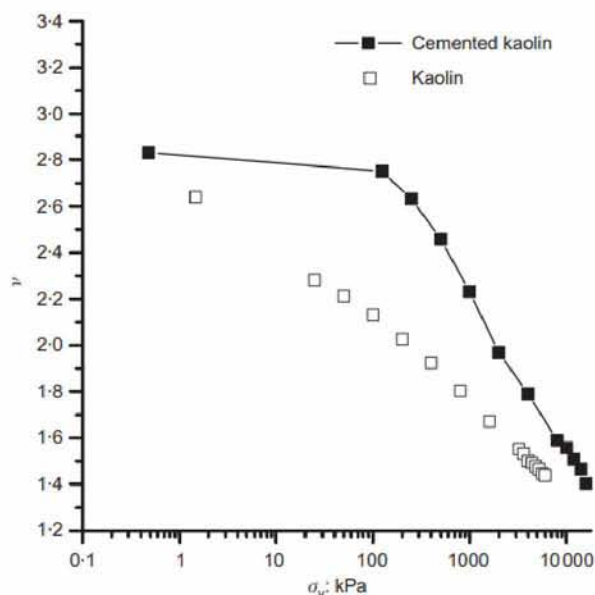
(β) Οι Sorensen, Baudet και Simpson (2007) μελέτησαν την επίδραση της δομής στην εξαρτώμενη από το χρόνο συμπεριφορά, μιας άκαμπτης ιζηματογενούς αργίλου. Χρησιμοποιήθηκε καολίνη, πλαστικός (WL=46%, PI=25%), με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 100%, ο οποίος τσιμεντοποιήθηκε από τσιμέντο Portland ταχείας πήξεως σε περιεκτικότητα 3% (κατά βάρος). Η προετοιμασία του μίγματος ξεκίνησε με την ανάμιξη του καολίνη με τσιμέντο σε μπλέντερ το οποίο στη συνέχεια συμπίεστηκε υπό ξηρές συνθήκες σε καλούπι, υπό κατακόρυφη ενεργή τάση 600 kPa. Μετά τη συμπίεση, το μίγμα τοποθετήθηκε σε τριαξονική κυψέλη, υποβλήθηκε σε προσρόφηση στα 90 kPa και στη

συνέχεια κορέσθηκε αργά σε ενεργή τάση 100 kPa. Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών συμπίεσης έδειξαν ότι:

- Ο τσιμεντοποιημένος καολίνης παρουσίασε προσωρινή επίδραση στο ρυθμό παραμόρφωσης κατά τη διάτμηση, στη μέγιστη και στην αμέσως μετά τη μέγιστη περιοχή.
- Η προσθήκη τσιμέντου στον καολίνη προσομοίωσε τη συγκόλληση που δημιουργείται σε φυσικούς αργίλους, αλλά με πολύ ταχύτερο ρυθμό.
- Οι επιδράσεις των μεταβολών του ρυθμού παραμόρφωσης στην απόκριση τάσης-παραμόρφωσης του τσιμεντοποιημένου καολίνη κατά τη διάρκεια της στραγγιζόμενης διάτμησης, γίνονταν για μικρό χρονικό διάστημα (γρήγορα), κατά την προσέγγιση της μέγιστης αντοχής. Αυτό συνέβη όταν κατά τη διάτμηση σε υψηλές παραμορφώσεις, οι δεσμοί τσιμεντοποίησης άρχισαν να θραύονται, σχηματίζοντας συσσωματώματα του τσιμεντοποιημένου καολίνη τα οποία συνέβαλλαν στην αλλαγή της συμπεριφοράς του εδάφους.

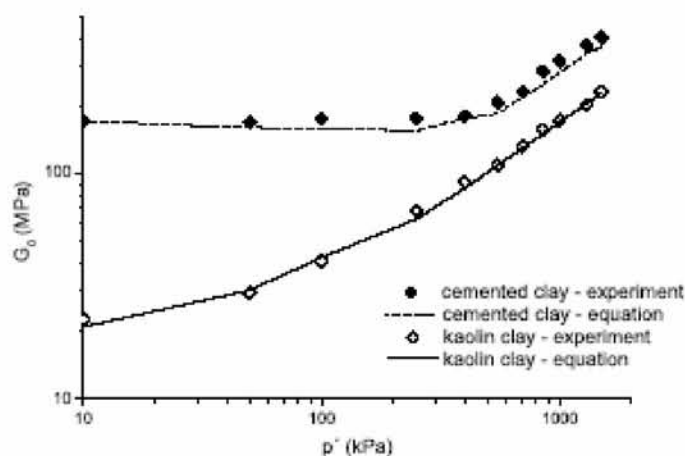
(γ) Οι Trhlikova, Masin και Bohac (2012) μελέτησαν τη συμπεριφορά των τσιμεντοποιημένων εδαφών σε μικρές παραμορφώσεις. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε άργιλος (καολίνης), υψηλής πλαστικότητας ($PI=45\pm 6\%$) με όριο υδαρότητας $WL=70\%$. Για την προετοιμασία των δειγμάτων αναμίχθηκε, αρχικά, ο καολίνης με απεσταγμένο νερό σε υγρασία που αντιστοιχεί στο όριο υδαρότητας WL . Μετά την ομογενοποίηση, προστέθηκε στα δείγματα τσιμέντο Portland, σε περιεκτικότητες 0% και 4% της ξηρής μάζας καολίνη. Αφού δημιουργήθηκε ομοιόμορφη πάστα, το μίγμα μεταφέρθηκε σε κυβέλη οιδημέτρου (διαμέτρου 38 mm και ύψους 76 mm) και στερεοποιήθηκε υπό κατακόρυφη τάση 5 kPa. Μετά από 3 ημέρες σκλήρυνσης (για τα τσιμεντοποιημένα δείγματα) ή 10 ημέρες στερεοποίησης (για τα φυσικά δείγματα), τα τριαξονικά δείγματα κόπηκαν. Μετά τη δοκιμή οιδημέτρου, τα δείγματα υποβλήθηκαν σε τριαξονικές δοκιμές, με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, όπου εφαρμόστηκε ισότροπη τάση 1500 kPa. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Από τις δοκιμές οιδημέτρου, παρατηρήθηκε ότι για τον ίδιο αρχικό ειδικό όγκο, η τσιμεντοποιημένη άργιλος παρουσίασε σταθερή συμπίεστικότητα μέχρι την τάση διαρροής, στην οποία ξεκίνησε η υποβάθμιση των δεσμών τσιμεντοποίησης, ενώ η φυσική άργιλος παρουσίασε αυξημένη συμπίεστικότητα από την αρχή της συμπίεσης. Σε μεγάλες τάσεις, τα δύο εδάφη είχαν σχεδόν την ίδια συμπίεστικότητα (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14 Σχέση ειδικού όγκου-επιβαλλόμενης τάσης για την τσιμεντοποιημένη και την καθαρή άργιλο (Tihlikova, 2012).

- Οι τιμές του G_{max} του τσιμεντοποιημένου εδάφους, ήταν εξαρτώμενες από την τσιμεντοποίηση και δεν μεταβάλλονταν για τάσεις μικρότερες από 400 kPa (τάση διαρροής). Ωστόσο, σε υψηλότερες τάσεις το G_{max} αυξήθηκε με την αύξηση της τάσης. Στη φυσική άργιλο, το G_{max} αυξανόταν με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15 Σχέση G_{max} -μέσης ενεργής τάσης, για την τσιμεντοποιημένη και τη φυσική άργιλο (Tihlikova, 2012).

- Η συμπεριφορά της τσιμεντοποιημένης αργίλου που είχε τσιμεντοποιηθεί από 4% Portland, ήταν συγκρίσιμη με τη συμπεριφορά των φυσικών αργίλων.

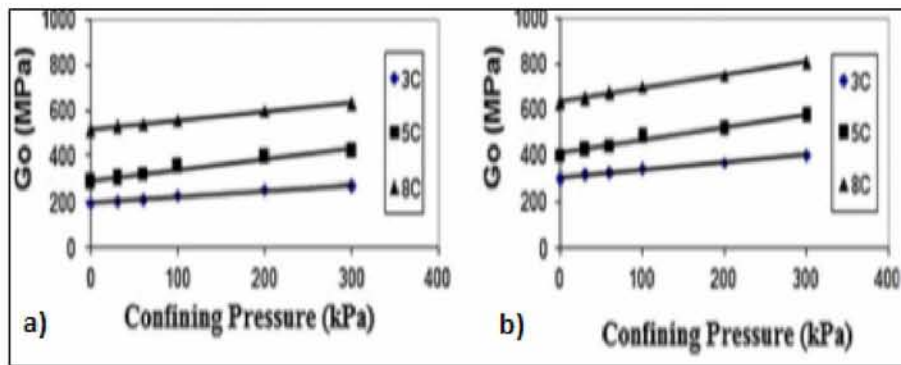
(δ) Οι Bahador και Pak (2012) ασχολήθηκαν με τη μελέτη του μέτρου διάτμησης, σε μικρές παραμορφώσεις, δειγμάτων που αποτελούνταν από ανάμιξη τσιμέντου-καολίνη. Ο καολίνης είχε δείκτη πλαστικότητας $PI=29\%$ ($WL=70\%$) και αποτελούνταν από 100% λεπτόκοκκα (56% άργιλο). Για την παρασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland σε περιεκτικότητες 3, 5 και 8% της ξηρής μάζας καολίνη. Διαμορφώθηκαν και επεξεργασμένα και μη επεξεργασμένα δείγματα. Η προετοιμασία των δειγμάτων ξεκίνησε με την ανάμιξη του ξηρού καολίνης με νερό και τσιμέντο, μέχρι να εξασφαλιστεί ομοιογένεια. Αμέσως μετά την ανάμιξη, το μίγμα συμπίεστηκε σε πέντε ίσες στρώσεις, σε καλούπι, για να ληφθεί η επιθυμητή ξηρή πυκνότητα. Στη συνέχεια, τα δείγματα τυλίχθηκαν με πλαστικό και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου σε θάλαμο ελεγχόμενης υγρασίας 100% για 7, 14 ή 24 ημέρες σκλήρυνσης. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές και χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Η τάση που εφαρμόστηκε κατά τις δοκιμές ήταν από 0-300 kPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Το G_{max} αυξήθηκε με την αύξηση του χρόνου σκλήρυνσης, της περιεκτικότητας σε νερό, της επιβαλλόμενης τάσης και της περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Μεταξύ των αναφερόμενων παραμέτρων, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο είχε την υψηλότερη επίδραση στο G_{max} , ακολουθούμενη από την περιεκτικότητα σε νερό, το χρόνο σκλήρυνσης και την επιβαλλόμενη τάση (Σχήμα 6.16). Η σχέση που αναπτύχθηκε για το G_{max} , σε μικρές παραμορφώσεις, είναι:

$$G_{max}(kPa) = (\sigma'_{o})^{0,1} * (A * CC * w + B)$$

Όπου:

σ'_{o} η επιβαλλόμενη τάση σε kPa, CC η περιεκτικότητα σε τσιμέντο (%), W η περιεκτικότητα σε νερό (%), A και B σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από το χρόνο σκλήρυνσης.

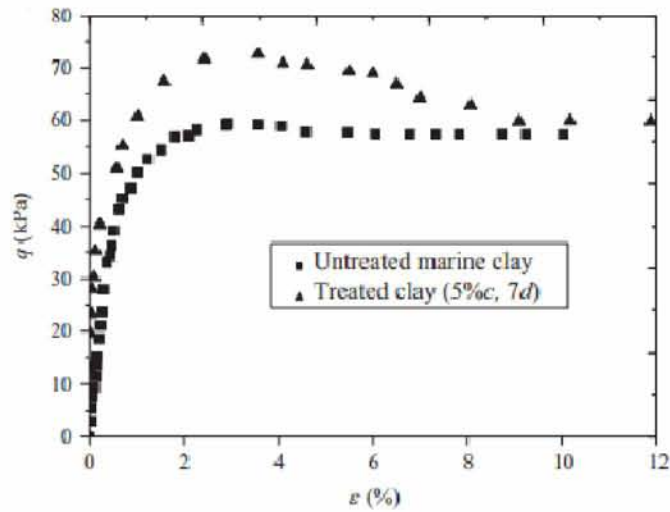


Σχήμα 6.16 Σχέση G_{max} -επιβαλλόμενης τάσης για διάφορες περιεκτικότητες σε τσιμέντο, για τη συμπύκνωση του δείγματος σε ξηρή πυκνότητα που αντιστοιχεί στη βέλτιστη υγρασία, a) για 7 και b) για 28 ημέρες σκλήρυνσης (Bahador, 2012).

- Στα τσιμεντοποιημένα εδάφη η συμπύκνωση σε ξηρή πυκνότητα για υγρασία λίγο μεγαλύτερη από τη βέλτιστη (wet side), απέδωσε μεγαλύτερη δυσκαμψία. Αντίθετα, τα μη επεξεργασμένα εδάφη απέδωσαν μεγαλύτερη δυσκαμψία σε ξηρή πυκνότητα για υγρασία λίγο μικρότερη από τη βέλτιστη (dry side).
- Η ενυδάτωση ήταν σημαντική καθώς επέτρεπε στο επεξεργασμένο έδαφος να έχει υψηλότερο μέτρο διάτμησης, λόγω του σχηματισμού ισχυρότερων δεσμών μεταξύ των κόκκων.

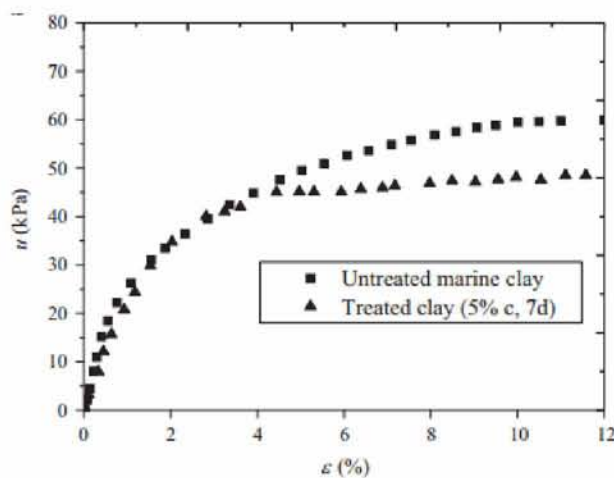
(ε) Οι Subramaniam και Banerjee (2014) μελέτησαν τους παράγοντες που επηρεάζουν το μέτρο διάτμησης της τσιμεντοποιημένης αργίλου. Για τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε άργιλος (Chennai) από ακτή της Ινδίας η οποία ήταν πλαστική ($WL=54\%$, $PI=24\%$), με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 90% , από τα οποία το 57% ήταν άργιλος. Το δείγμα διαμορφώθηκε από άργιλο και τσιμέντο Portland (53 grade) σε περιεκτικότητες τσιμέντου $2,5\%$, 5% και $7,5\%$. Η προετοιμασία των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με την ανάμιξη του τσιμεντοπολυτού ($W/C=0,8$) με την άργιλο και την τοποθέτησή τους σε σωλήνα (διαμέτρου 50 mm και ύψους 100 mm) σε πλαίσιο φόρτισης. Ο χρόνος σκλήρυνσης για τα δείγματα ήταν 7, 14 ή 28 ημέρες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές κυκλικές δοκιμές με ισότροπη τάση στερεοποίησης 100 kPa . Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης (q - ϵ) έδειξε ότι η τσιμεντοποιημένη άργιλος εμφάνισε κλάδο χαλάρωσης μετά την επίτευξη της μέγιστης τάσης, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στην (ανεπεξεργαστη) φυσική άργιλο (Σχήμα 6.17). Η τσιμεντοποιημένη άργιλος παρουσίασε μεγαλύτερη μέγιστη αποκλίνουσα τάση από τη φυσική.



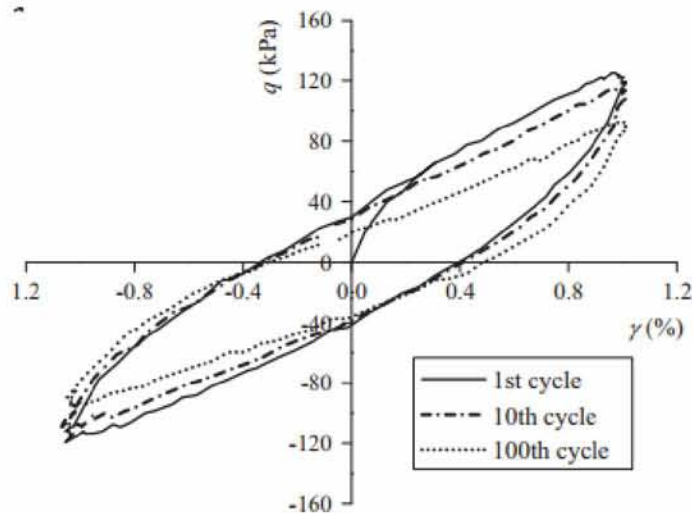
Σχήμα 6.17 Σχέση τάσης παραμόρφωσης για την τσιμεντοποιημένη (περιεκτικότητα σε τσιμέντο 5%) και τη φυσική άργιλο, μετά από 7 ημέρες σκλήρυνσης (Subramaniam, 2014).

- Η πίεση του νερού των πόρων αυξήθηκε με την παραμόρφωση, με τον ίδιο τρόπο τόσο για την επεξεργασμένη όσο και για τη φυσική άργιλο, μέχρι την αστοχία όπου η πίεση του νερού των πόρων, στην τσιμεντοποιημένη άργιλο, παρέμεινε σχεδόν σταθερή, με την αύξηση της παραμόρφωσης (Σχήμα 6.18).



Σχήμα 6.18 Σχέση πίεσης νερού των πόρων-παραμόρφωσης για την τσιμεντοποιημένη (περιεκτικότητα σε τσιμέντο 5%) και τη φυσική άργιλο, μετά από 7 ημέρες σκλήρυνσης (Subramaniam, 2014).

- Παρατηρήθηκε ότι η μείωση του μέτρου διάτμησης εξαρτιόταν από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης, την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, τις ημέρες σκλήρυνσης, το εύρος της κυκλικής παραμόρφωσης και τη συχνότητα φόρτισης (Σχήμα 6.19).



Σχήμα 6.19 Σχέση τάσης παραμόρφωσης για την τσιμεντοποιημένη άργιλο για τον 1^ο, 10^ο και 100^ο κύκλο φόρτισης (Subramaniam, 2014).

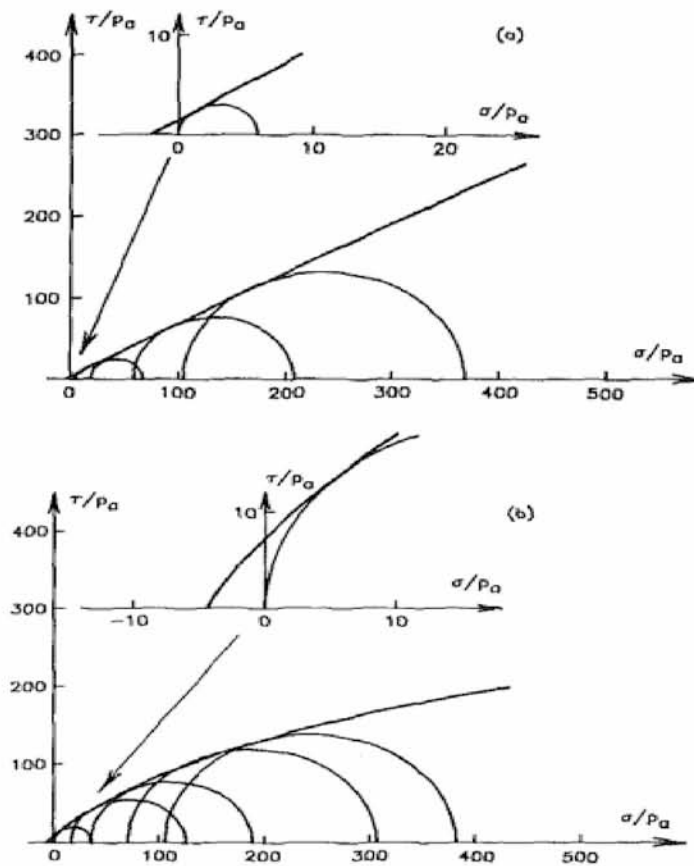
6.3 Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των τεχνητά τσιμεντοποιημένων εδαφών με τη χρήση τσιμέντου

6.3.1 Αμμώδη εδάφη

(α) Οι Overton, Lade (1989), μελέτησαν τα αποτελέσματα της τσιμεντοποίησης σε υλικά με υψηλό συντελεστή τριβής (frictional materials). Στη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφη άμμος με λεπτόκοκκα σε ποσοστό 34% και ποσοστό αργίλου 16%. Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δείγματα με διάμετρο $D=35,6$ mm και ύψος $H=101,6$ mm, τα οποία ήταν συμπυκνωμένα χωρίς τσιμέντο, τσιμεντοποιημένα δείγματα εδάφους με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 6% και τσιμεντοκονίαμα με 12% περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Τα τρία είδη δειγμάτων, παρασκευάστηκαν με την ίδια ποσότητα νερού και συμπιέστηκαν. Έπειτα, τοποθετήθηκαν μεταξύ ακρυλικών βάσεων και κλείστηκαν με μεμβράνες, βυθίστηκαν σε νερό και αφέθηκαν να σκληρυνθούν για 28 ημέρες. Για τα τσιμεντοποιημένα δείγματα, ως συνδετικός παράγοντας, χρησιμοποιήθηκε Inert rock flour, το οποίο έχει καμπύλη διαβάθμισης παρόμοια με αυτή του εμπορικού τσιμέντου. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και σε υψηλές πιέσεις, μέχρι 10.3 MPa. Μέσω των τριαξονικών δοκιμών, μελετήθηκαν ιδιότητες όπως η συνοχή, η γωνία τριβής, οι ογκομετρικές παραμορφώσεις και η εφελκυστική αντοχή. Οι τρεις διαφορετικές σειρές

τριαξονικών δοκιμών, στα τρία διαφορετικά είδη δειγμάτων, οδήγησαν στα εξής αποτελέσματα:

- Η αρχική δυσκαμψία αυξήθηκε με την αύξηση της τάσης και την ποσότητα της τσιμεντοποίησης. Η αύξηση της τσιμεντοποίησης οδήγησε επίσης, σε αύξηση της διαστολής.
- Η αύξηση της τσιμεντοποίησης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνοχής, της εφελκυστικής αντοχής και της γωνίας τριβής σε χαμηλές τάσεις. Οι αυξήσεις αυτές οφειλόταν στο γεγονός ότι οι μεγαλύτεροι κόκκοι του εδάφους, που παράχθηκαν από την τσιμεντοποίηση μικρότερων κόκκων, οδήγησαν σε μεγαλύτερη ρυθμό διαστολής. Αντίθετα, σε υψηλές τάσεις, τα μεγάλα σωματίδια συνθλίφθηκαν και συνεπώς τα τσιμεντοποιημένα εδάφη δεν παρουσίασαν πολύ διαφορετικές αντοχές (Σχήμα 6.20).



Σχήμα 6.20 Κύκλοι του Mohr a) για τα συμποκνωμένα και b) για τα τσιμεντοποιημένα δείγματα (Overton, 1989).

- Τελικά, αποδείχθηκε ότι σε πολύ υψηλές τάσεις, η αντοχή του συμπτυκνωμένου εδάφους ήταν υψηλότερη από εκείνη του τσιμεντοποιημένου, του οποίου η αντοχή ήταν μεγαλύτερη από εκείνη του κονιάματος.

(β) Οι Shibuya, Tatsuoka, Teachavorasinskun, Kong, Abe, Kim και Park (1992), ασχολήθηκαν με τις ελαστικές ιδιότητες των γεωυλικών. Στα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε η άμμος Sengenyama. Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δείγματα, τα οποία περιείχαν πολύ άμμου, θαλασσινού νερού και τσιμέντου. Εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, στις οποίες εφαρμόστηκε ισότροπη ενεργή τάση σε τιμές 20-245 kPa. Από τις δοκιμές, προέκυψε ότι το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας, ήταν περισσότερο σταθερό και δεν μεταβαλλόταν τόσο από την εφαρμοζόμενη τάση.

(γ) Το 2002, οι Haeri, Yasrebi και Asghar, ερεύνησαν τις επιδράσεις της τσιμεντοποίησης, στις παραμέτρους διατμητικής αντοχής αλλουβιακών αποθέσεων (Τεχεράνης). Διαμορφώθηκαν τεχνητά τσιμεντοποιημένα δείγματα από την ανάμιξη χαλικώδους εδάφους με τσιμέντο, σε περιεκτικότητες έως 6%. Εκτελέστηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης, από τις οποίες προέκυψε το συμπέρασμα ότι η δυσκαμψία και η ψαθυρότητα αυξήθηκαν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο.

(δ) Οι Dano και Hicher (2003), ερεύνησαν τη συμπεριφορά των μη τσιμεντοποιημένων άμμων και των άμμων ενεμάτωσης, πριν από την απόκτηση της μέγιστης αντοχής τους. Στα πειράματά τους, χρησιμοποιήθηκε άμμος Fontainebleau, η οποία αναμίχθηκε με εναιώρημα τσιμέντου σε περιεκτικότητα νερού προς τσιμέντο, ίση με 5.8. Από τις μετρήσεις με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, παρατηρήθηκε αύξηση του μέτρου διάτμησης με την αύξηση της πυκνότητας και μη επιρροή του από την εφαρμογή τάσης στερεοποίησης.

(ε) Οι Sharma και Fahey (2003), ασχολήθηκαν με το φαινόμενο υποβάθμισης της τσιμεντοποίησης, των τσιμεντοποιημένων ανθρακικών εδαφών, κατά την εκτέλεση κυκλικών τριαξονικών δοκιμών. Στις τριαξονικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε το έδαφος

Goodwyn, το οποίο χαρακτηρίστηκε ως μια ανθρακική, θαλάσσια, λεπτόκοκκη ιλυώδης άμμος (ποσοστό λεπτόκοκκων 37%). Στην προετοιμασία των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος CIPS (Calcite Insitu Precipitation System). Μέσω της μεθόδου αυτής, εφαρμόστηκε διάλυμα χαμηλού ιζώδους με βάση το νερό, ουδέτερο σε pH και μη τοξικό. Τα δείγματα τσιμεντοποιήθηκαν πριν από την στερεοποίηση. Η τεχνική αυτή, είχε ως αποτέλεσμα την επικάλυψη των σωματιδίων του εδάφους με ασβεστίτη και κάποια πλήρωση των κενών μεταξύ των σωματιδίων. Έπειτα από τη διαμόρφωση των τεχνητά τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες και υπό στατική και δυναμική φόρτιση, με ενσωματωμένο LVDT. Από τις τριαξονικές δοκιμές, προέκυψε ότι:

- Σε αντίθεση με τα μη τσιμεντοποιημένα δείγματα, το μέτρο διάτμησης των τσιμεντοποιημένων δειγμάτων, παρέμεινε σταθερό για το εύρος των τάσεων που εφαρμόστηκαν. Αυτό συνέβη διότι, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η τάση ήταν μικρότερη από την ισότροπη τάση διαρροής (2,5MPa), συνεπώς δεν παρατηρήθηκε κάποια υποβάθμιση της τσιμεντοποίησης. Διεξήχθη το συμπέρασμα ότι το μέτρο διάτμησης εξαρτάται από την τσιμεντοποίηση και όχι από την τάση στερεοποίησης.
- Η μείωση της δυσκαμψίας, με την αύξηση της παραμόρφωσης των τσιμεντοποιημένων άμμων, αποδείχθηκε ότι οφειλόταν κυρίως στην υποβάθμιση των δεσμών συγκόλλησης των κόκκων. Τέλος, η δυσκαμψία μειώθηκε γραμμικά με την αύξηση των αριθμών των κύκλων φόρτισης.

(στ) Οι Sharma και Fahey (2004) μελέτησαν τις παραμορφώσεις δύο τσιμεντοποιημένων ανθρακικών εδαφών. Οι άμμοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η άμμος Goodwyn (από την πλατφόρμα αερίου Goodwyn, Αυστραλία) με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 30% και σε άργιλο 5% ($D_{50}=0,1\text{mm}$) και η άμμος Ledge Point (Αυστραλία) η οποία δεν περιείχε λεπτόκοκκα ($D_{50}=0,3\text{mm}$). Αρχικά, οι ξηρές άμμοι τοποθετήθηκαν και συμπυκνώθηκαν σε καλούπια. Μετά τη συμπίεση διοχετεύτηκε στα δείγματα αέριο CO_2 και ακολούθησε έκπλυση των δειγμάτων με νερό και στη συνέχεια με διάλυμα CIPS (ουδέτερο διάλυμα χαμηλού ιζώδους με βάση το νερό, μη τοξικό διάλυμα). Η πίεση έκπλυσης ήταν 25 και 75 kPa και η πίεση με την οποία έκλεισε η βαλβίδα (seating pressure) ήταν 50 και 100 kPa. Ο χρόνος έκπλυσης ήταν 4 και 8 λεπτά. Μόλις τελείωσε η έκπλυση του CIPS, οι βαλβίδες

ήταν κλειστές και το δείγμα στη συνέχεια αφέθηκε να ωριμάσει για 24 ώρες. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν αστράγγιστες τριαξονικές υπό μονοτονική και κυκλική φόρτιση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

- Η αύξηση του επιπέδου τσιμεντοποίησης οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αρχικής δυσκαμψίας, με το μέτρο δυσκαμψίας να εξαρτάται όλο και λιγότερο από την επιβαλλόμενη τάση. Η σύγκριση της δυσκαμψίας που λήφθηκε από τα ανθρακικά εδάφη με εκείνη που λήφθηκε από άλλα μη ανθρακικά εδάφη έδειξε ότι στα πρώτα υποβαθμίστηκε γρηγορότερα η δυσκαμψία τους, αλλά σε υψηλότερο όριο παραμόρφωσης.
- Ο λόγος απόσβεσης των τσιμεντοποιημένων ανθρακικών εδαφών ήταν κάτω από το εύρος που ορίζεται για άλλα μη ανθρακικά εδάφη.

(ζ) Οι Delfosse-Ribay, Djeran-Maigre, Cabrillac και Gouvenot (2004) ασχολήθηκαν με τη μελέτη του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης των ενεματωμένων άμμων. Για τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε άμμος Fontainebleau, η οποία αναμίχθηκε με τρία διαφορετικά ενέματα, εναιώρημα τσιμέντου (microfine) με λόγο W/C=8, ανόργανο χημικό διάλυμα και ένα διάλυμα πυριτικού νατρίου. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στήλης συντονισμού και κυκλικές τριαξονικές για όλα τα δείγματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Το μέτρο διάτμησης G , για παραμορφώσεις 10^{-5} - $10^{-2}\%$, ήταν παρόμοιο για το τσιμέντο και το ανόργανο χημικό διάλυμα και υψηλότερο από εκείνο που προέκυψε από το διάλυμα πυριτικού νατρίου. Ωστόσο, για υψηλότερες παραμορφώσεις παρατηρήθηκε ότι το τσιμέντο δεν είχε καμία επίδραση στο G .
- Για πολύ μικρές παραμορφώσεις το ένεμα είχε πολύ μικρή επίδραση στην απόσβεση.
- Η τάση στερεοποίησης επηρέασε σημαντικά το μέτρο G αλλά είχε αμελητέα επίδραση στην απόσβεση των ενεματωμένων άμμων.

(η) Οι Silva, da Fonseca και Consoli (2009) ασχολήθηκαν με τις ιδιότητες της αντοχής και της δυσκαμψίας μιγμάτων γρανιτικού εδάφους και τσιμέντου. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν ιλυώδης άμμος Porto (από υπολειμματικό έδαφος) με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 30% και σε άργιλο 5%. Ο συντελεστής ομοιομορφίας ήταν $C_u=113$ (καλά διαβαθμισμένη) και ο συντελεστής καμπυλότητας ήταν $C_c=2,72$. Το μίγμα παρασκευάστηκε με τη χρήση τσιμέντου σε περιεκτικότητες 2, 4, 5 και 7%. Το μίγμα τοποθετήθηκε σε ένα καλούπι όπου υπέστη στατική συμπίεση σε τρία στρώματα. Έπειτα, παρέμεινε για 6 ημέρες σε υγρό θάλαμο και αναδεύτηκε σε νερό την 7η ημέρα για να κορεσθεί. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές UCS και τριαξονική δοκιμή CD. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

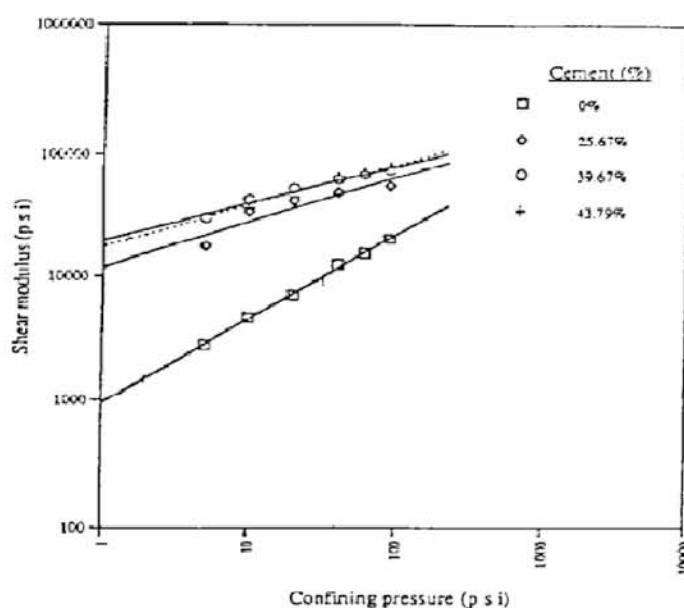
- Ο λόγος κενών/τσιμέντου (πορώδες/ογκομετρικό περιεχόμενο τσιμέντου) ήταν επαρκής για την ανάλυση της αντοχής.
- Στις υψηλά τσιμεντοποιημένες άμμους αυξήθηκε η δυσκαμψία με το επίπεδο τάσης, ενώ στις ελαφρά τσιμεντοποιημένες άμμους μειώθηκε, δείχνοντας ότι η δομή που δημιουργείται από την τσιμεντοποίηση θραύεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης.
- Τόσο στην ελαφρώς όσο και στην υψηλά τσιμεντοποιημένη άμμο παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής και της συνοχής, λόγω της τσιμεντοποίησης.

6.3.2 Λεπτόκοκκα εδάφη

(α) Το 1997, οι Tatsuoka, Jardine, Lo Presti, Di Benedetto και Kodata, ασχολήθηκαν με τις παραμορφώσεις πριν την αστοχία σε φυσικά εδάφη. Συγκεκριμένα, μελέτησαν τη δυσκαμψία σκληρών βράχων, σκυροδέματος και κονιάματος. Τα εύρη των μέτρων ελαστικότητας, ήταν 50-80 GPa για το σκληρό βράχο, 30-50 GPa για το σκυρόδεμα και 8-10 GPa για το κονίαμα. Επίσης, οι εργαστηριακές δοκιμές σε μαλακούς βράχους (άκαμπτες άργιλοι) ήταν παρόμοιες με τις γεωφυσικές μετρήσεις ταχύτητας στο πεδίο.

(β) Οι Chang, Vedula και Chang (2001) μελέτησαν τη βελτίωση των στατικών και δυναμικών ιδιοτήτων μαλακών αργίλων που είχαν επεξεργαστεί με ένεμα υψηλής πίεσης. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν άργιλοι από την Ταϊβάν οι οποίες ήταν ελαφρώς έως μέτρια πλαστικοποιημένες (PI=6,4-10,7%), είχαν όριο υδαρότητας WL=31,5-38% και περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα >70%. Διαμορφώθηκαν δυο ειδών δείγματα, φυσικά δείγματα χωρίς ένεμα και επιτόπου ενεματωμένα δείγματα. Στα ενεματωμένα δείγματα, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο κυμαίνονταν από 25,7% έως 45,2%. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές στήλης συντονισμού. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι:

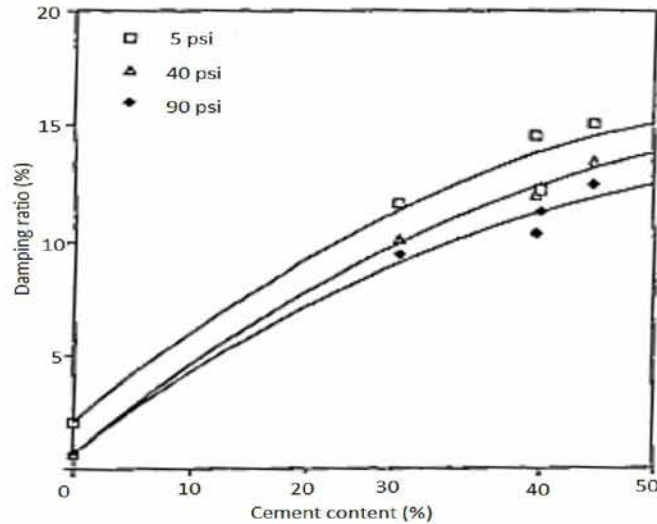
- Η μηχανική απόκριση των ενεματωμένων εδαφών βρέθηκε ότι εξαρτάται από την επιβαλλόμενη τάση, την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και την περιεκτικότητα σε νερό / τσιμέντο. Το μέτρο διάτμησης αυξήθηκε με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης για διαφορετικές περιεκτικότητες σε τσιμέντο (Σχήμα 6.21).



Σχήμα 6.21 Σχέση του μέτρου διάτμησης με την επιβαλλόμενη τάση για τα διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Chang, 2001).

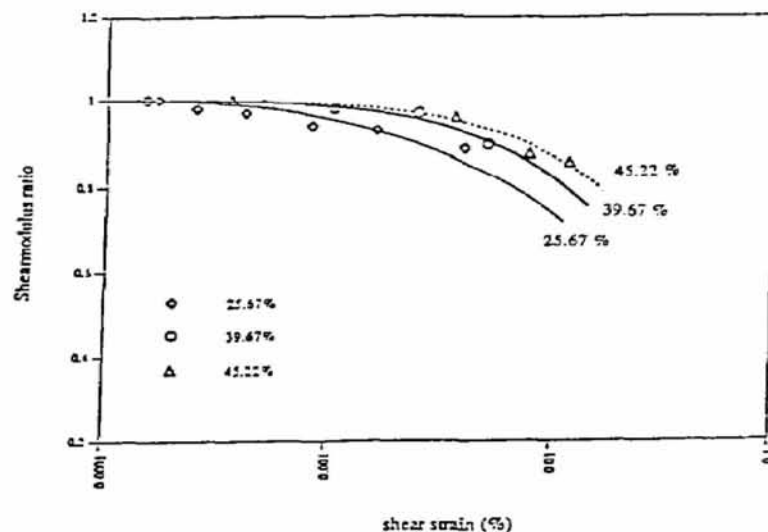
Σε υψηλές τάσεις, η αύξηση του μέτρου διάτμησης, για τα ενεματωμένα δείγματα, ήταν λιγότερο σημαντική σε σύγκριση με την αύξηση σε χαμηλές τάσεις (σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα).

- Ο λόγος απόσβεσης (D) αυξήθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμέντου. Ο λόγος απόσβεσης κυμαινόταν μεταξύ 8% και 14%, για περιεκτικότητα σε τσιμέντο μεταξύ 25% και 44%. Η αύξηση της τιμής της επιβαλλόμενης τάσης μείωσε το λόγο απόσβεσης (Σχήμα 6.22).



Σχήμα 6.22 Σχέση του λόγου απόσβεσης με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, για τα διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης τάσης (Chang, 2001).

- Σε υψηλότερα περιεχόμενα τσιμέντου, το έδαφος έγινε πιο άκαμπτο. Το μέτρο διάτμησης μειώθηκε με την αύξηση της παραμόρφωσης, στις ενεματωμένες αργίλους. Ωστόσο, η μείωση ήταν λιγότερη σε υψηλότερα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.23 Σχέση μέτρου διάτμησης- παραμόρφωσης για διάφορα επίπεδα τσιμεντοποίησης (Chang, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν για την εδαφική συμπεριφορά των τσιμεντοποιημένων εδαφών, με τις μεθόδους ενίσχυσης με βακτήρια ή τσιμέντο και για τα φυσικά τσιμεντοποιημένα εδάφη.

7.1 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα αμμώδη εδάφη με τη χρήση βακτηρίων

- Διαπερατότητα

Παρατηρείται μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με την αύξηση του ποσοστού CaCO_3 , σε όλες τις άμμους που εφαρμόστηκε η μέθοδος MICP. Ειδικά, στις λεπτόκοκκες έως μεσόκοκκες άμμους, η διαπερατότητα των βιο-τσιμεντοποιημένων δοκιμών μειώνεται τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τα μη τσιμεντοποιημένα δοκίμια. Η μείωση της διαπερατότητας στην ξηρή άμμο είναι μικρότερη από αυτή στην κορεσμένη. Τέλος, παρατηρείται περαιτέρω μείωση της διαπερατότητας με την αύξηση του αριθμού των ενέσεων.

- Αντοχή

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (s_u) και η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση των ενισχυμένων εδαφών με βακτήρια συγκριτικά με τα μη βελτιωμένα εδάφη. Η αύξηση της αντοχής εξαρτάται από την ποσότητα του CaCO_3 . Από τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών διάτμησης προκύπτει ότι η συνοχή και η γωνία τριβής αυξάνονται με τη δημιουργία δεσμών λόγω της παρουσίας CaCO_3 , ανεξαρτήτως του βαθμού κορεσμού της άμμου. Οι τσιμεντοποιημένες λεπτόκοκκες άμμοι έχουν υψηλότερη συνοχή και χαμηλότερη γωνία τριβής από τις χονδρόκοκκες, για τον ίδιο βαθμό κορεσμού. Ωστόσο, σύμφωνα με την Montoya (2012), οι τιμές της γωνίας τριβής των μη τσιμεντοποιημένων άμμων κυμαίνεται από $33-40^\circ$, των μέτρια τσιμεντοποιημένων από $37,4-39,2^\circ$ και των ισχυρά τσιμεντοποιημένων από $41,5-43,7^\circ$,

ενώ δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της συνοχής. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η παραμένουσα αντοχή των τσιμεντοποιημένων και των μη τσιμεντοποιημένων δοκιμίων άμμου είναι ίδια και ανεξάρτητη από την περιεκτικότητα σε CaCO_3 . Η κανονικοποιημένη εκτροπική τάση q/p' , στην περίπτωση τσιμεντοποιημένης άμμου είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές q/p' της μη τσιμεντοποιημένης, μέχρι την τάση αστοχίας. Η ισχυρά τσιμεντοποιημένη άμμος παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές της q/p' συγκριτικά με τη μέτρια και την ελαφρώς τσιμεντοποιημένη άμμο. Μετά την αστοχία, για τις αστράγγιστες δοκιμές, η ισχυρά τσιμεντοποιημένη άμμος παρουσιάζει κλάδο χαλάρωσης ενώ η ελαφρώς τσιμεντοποιημένη παρουσιάζει όλκιμη συμπεριφορά, παρόμοια με αυτή της χαλαρής μη τσιμεντοποιημένης άμμου. Στις στραγγιζόμενες δοκιμές, οι χαλαρές τσιμεντοποιημένες άμμοι παρουσιάζουν αργή μείωση της αντοχής.

- Δυσκαμψία

Από αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών προκύπτει πως η εδαφική δυσκαμψία αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού CaCO_3 , που περιέχεται στο έδαφος. Από τις δοκιμές φυγοκέντρισης προκύπτει ότι το μέτρο διάτμησης αυξάνεται με την αύξηση του επιπέδου της τσιμεντοποίησης. Σε υψηλά επίπεδα τσιμεντοποίησης η δυσκαμψία παύει να εξαρτάται από την τάση στερεοποίησης και η άμμος συμπεριφέρεται σα βράχος.

- Αντίσταση σε ρευστοποίηση

Από αποτελέσματα δοκιμών φυγοκέντρισης, παρατηρείται ότι η μέθοδος MICP συμβάλει στην ενίσχυση του εδάφους με τη μείωση του κινδύνου της ρευστοποίησης και των ζημιών που οφείλονται σε σεισμική φόρτιση. Η αυξημένη αντοχή έναντι ρευστοποίησης στα τσιμεντοποιημένα εδάφη αποδεικνύεται με τη μείωση του λόγου της πίεσης του νερού των πόρων. Οι μετακινήσεις από το σεισμό των τσιμεντοποιημένων άμμων είναι χαμηλότερες από αυτές των μη τσιμεντοποιημένων χαλαρών και παρόμοιες ή μικρότερες από εκείνες των πυκνών άμμων, μέχρι το σημείο όπου οι συγκολλητικοί δεσμοί λόγω τσιμεντοποίησης, καταστρέφονται. Ωστόσο, οι επιφανειακές επιταχύνσεις, ενισχύονται για τα υψηλά επίπεδα τσιμεντοποίησης.

- Συμπεράσματα για την εφαρμογή της μεθόδου

Η μέθοδος οδηγεί σε υψηλά ποσοστά τσιμεντοποίησης στην περίπτωση ομοιόμορφων άμμων με μεγάλο μέγεθος κόκκων. Σε ό,τι αφορά την εισαγωγή των διαλυμάτων στο έδαφος, καταλληλότερος τρόπος θεωρείται η σταδιακή έγχυση του βακτηριακού διαλύματος και του διαλύματος τσιμεντοποίησης με περίοδο συγκράτησης έναντι της (α) ταυτόχρονης μίξης των διαλυμάτων πριν την έγχυση, ή (β) της έγχυσης σε δυο στάδια χωρίς περίοδο συγκράτησης, ή (γ) της ταυτόχρονης έγχυσης. Η διοχέτευση των παραπάνω διαλυμάτων στα δοκίμια άμμου πραγματοποιείται είτε (α) μέσω ενέσεων με τη χρήση αντλίας, είτε (β) μέσω ανάμιξης των διαλυμάτων με το έδαφος, είτε (γ) μέσω επιφανειακής διήθησης. Οι δύο τελευταίες μέθοδοι οδηγούν στην ομοιόμορφη κατανομή του CaCO_3 στον εδαφικό σκελετό. Ωστόσο, στην πρώτη μέθοδο ο αριθμός των βακτηριακών κυττάρων είναι μεγαλύτερος. Το βακτηριακό στέλεχος που χρησιμοποιείται στη μέθοδο πρέπει να έχει υψηλή δραστικότητα ουρεάσης, τάση προσκόλλησης στις επιφάνειες των κόκκων και μεγάλη ανθεκτικότητα σε υψηλές τιμές pH και θερμοκρασίας. Η δραστικότητα της ουρεάσης επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία της τσιμεντοποίησης, και επιτυγχάνεται με την εισαγωγή διαλύματος σταθεροποίησης, συνήθως διαλύματος τσιμεντοποίησης, έτσι ώστε η ουρία να εισχωρήσει σε όλα τα σημεία του εδαφικού δοκιμίου πριν τα βακτήρια ενεργοποιήσουν τη μετατροπή της σε CaCO_3 . Συνίσταται η χρήση διαλύματος τσιμεντοποίησης χαμηλής συγκεντρώσεως σε σχέση με την ποσότητα της ουρεάσης, καθώς στην αντίθετη περίπτωση η δραστικότητα της τελευταίας περιορίζεται σημαντικά. Τέλος, παρατηρείται καλύτερη τσιμεντοποίηση με την αύξηση των κύκλων θρεπτικών ουσιών (αριθμός εγχύσεων των θρεπτικών διαλυμάτων μεγαλύτερος από ένα).

- Συμπιεστότητα

Από αποτελέσματα δοκιμών οιδιμέτρου παρατηρείται ότι η εφαρμογή της μεθόδου MICP μειώνει τη συμπιεστότητα του εδάφους.

7.2 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη με τη χρήση βακτηρίων

- Αντοχή

Από αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης προκύπτει αύξηση της διατμητική αντοχής των τσιμεντοποιημένων λεπτόκοκκων εδαφών σε σχέση με τα μη τσιμεντοποιημένα.

- Διαπερατότητα

Από αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας προκύπτει μείωση της διαπερατότητας των τσιμεντοποιημένων εδαφών σε σχέση με τα μη τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη.

7.3 Φυσικά τσιμεντοποιημένα αμμώδη εδάφη

- Δυσκαμψία

Από αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης και στήλης συντονισμού προκύπτουν υψηλότερες τιμές του μέτρου διάτμησης για τις φυσικές τσιμεντοποιημένες άμμους συγκριτικά με τις μη τσιμεντοποιημένες.

- Απόσβεση

Ο λόγος απόσβεσης δεν επηρεάζεται από την τσιμεντοποίηση.

7.4 Φυσικά τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη

- Αντοχή

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή των μαργαϊκών εδαφών είναι μεγαλύτερη από των μη τσιμεντοποιημένων εδαφών. Από τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών συμπίεσης, παρατηρείται ότι η γωνία εσωτερικής τριβής για τα μαργαϊκά εδάφη αυξάνεται με την

αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO_3 ενώ τα αποτελέσματα για τη συνοχή είναι αντικρουόμενα.

- Δυσκαμψία

Από αποτελέσματα τριαζονικών δοκιμών προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας των μαργαϊκών εδαφών αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO_3 . Από τα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού, παρατηρείται πως το μέτρο διάτμησης των μαργαϊκών εδαφών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των μη τσιμεντοποιημένων εδαφών. Παρατηρείται ότι τα μέτρα δυσκαμψίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τάση στερεοποίησης. Η μεταβολή του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση επηρεάζεται από το δείκτη πλαστικότητας του εδάφους, παρόμοια με την περίπτωση των μη τσιμεντοποιημένων εδαφών.

- Απόσβεση

Από τα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού προκύπτει ότι δεν υπάρχει σημαντική επίδραση της τσιμεντοποίησης στο λόγο απόσβεσης των μαργαϊκών εδαφών. Με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης, ο λόγος απόσβεσης αυξάνεται. Η πλαστικότητα είναι ο κυριότερος παράγοντας ελέγχου της απόσβεσης.

7.5 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα αμμώδη εδάφη με τη χρήση τσιμέντου Portland

- Συμπιεστότητα

Από αποτελέσματα δοκιμών οιδημέτρου προκύπτει αύξηση του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης με την τσιμεντοποίηση.

- Αντοχή

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή των τσιμεντοποιημένων άμμων αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Επίσης, από αποτελέσματα τριαζονικών δοκιμών, προκύπτει

ότι με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου, αυξάνεται η συνοχή ενώ η γωνία τριβής παραμένει σχεδόν σταθερή.

- Δυσκαμψία

Από αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών στήλης συντονισμού προκύπτει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και του μέτρου διάτμησης με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Παρατηρείται ακόμη για τις τσιμεντοποιημένες άμμους επίδραση της τάσης στερεοποίησης στα μέτρα δυσκαμψίας.

- Απόσβεση

Από αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού προέκυψε αρχικά αύξηση του λόγου απόσβεσης για μικρά ποσοστά περιεκτικότητας τσιμέντου, ενώ με την αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μεγαλύτερα ποσοστά παρατηρείται μείωση του λόγου απόσβεσης.

7.6 Τεχνητά τσιμεντοποιημένα λεπτόκοκκα εδάφη με τη χρήση τσιμέντου Portland

- Συμπιεστότητα

Από τα αποτελέσματα δοκιμών οιδιμέτρου, προκύπτει ότι τα τσιμεντοποιημένα εδάφη έχουν μικρή συμπιεστότητα έως μια τάση στερεοποίησης, όπου λαμβάνει χώρα σταδιακή κατάρρευση των συγκολλητικών δεσμών. Μετά από αυτή την τάση η συμπιεστότητα των εδαφών αυξάνεται.

- Αντοχή

Από αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών προκύπτει αυξημένη διατμητική αντοχή των τσιμεντοποιημένων αργίλων συγκριτικά με τις μη τσιμεντοποιημένες. Ακόμη, η σχέση τάσης – παραμόρφωσης ($q - \epsilon$) για τις τσιμεντοποιημένες αργίλους παρουσιάζει κλάδο χαλάρωσης μετά τη μέγιστη εκτροπική τάση σε αντίθεση με τις μη τσιμεντοποιημένες αργίλους.

- Δυσκαμψία

Από αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών στήλης συντονισμού προκύπτουν αυξημένες τιμές του μέτρου διάτμησης λόγω τσιμεντοποίησης. Στην περίπτωση των τσιμεντοποιημένων αργίλων το μέτρο διάτμησης έχει σταθερή τιμή και ανεξάρτητη της τάσης στερεοποίησης μέχρι μια τάση διαρροής, όπου οι συγκολλητικοί δεσμοί καταρρέουν. Πέραν αυτής της τάσης το μέτρο διάτμησης πλησιάζει τις τιμές των μη τσιμεντοποιημένων αργίλων, με ταυτόχρονη επίδραση της τάσης.

- Απόσβεση

Από αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών στήλης συντονισμού προκύπτει ότι ο λόγος απόσβεσης αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμέντου. Ωστόσο, η αύξηση της τιμής της επιβαλλόμενης τάσης προκαλεί μείωση στο λόγο απόσβεσης.

7.7 Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των τσιμεντοποιημένων με τη χρήση τσιμέντου Portland και των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών (MICP)

- Τα βιο-τσιμεντοποιημένα εδάφη παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή συγκριτικά με τα τσιμεντοποιημένα εδάφη με χρήση τσιμέντου Portland. Ωστόσο, τα αποτελέσματα αναστρέφονται με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης και του περιεχόμενου τσιμέντου Portland στα εδάφη.
- Η διαπερατότητα των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των τσιμεντοποιημένων εδαφών με τη χρήση τσιμέντου Portland. Ωστόσο, η διαπερατότητα των βιο-τσιμεντοποιημένων εδαφών μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό με την αύξηση της περιεκτικότητας σε CaCO_3 . Η ικανότητα της μεθόδου MICP να διατηρεί συνθήκες υψηλής διαπερατότητας είναι ένα σαφές πλεονέκτημα σε σύγκριση με την εναλλακτική λύση της χρήσης τσιμέντου Portland.

Βιβλιογραφία

1. Κάλτσιος, Α. (2012). Βελτίωση και ενίσχυση εδαφών. Τεχνικές Σελίδες Τεύχος 08/2012.
2. Σταυριδάκης, Ε. (2003). Μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών. Σς.61-67. Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
3. Βράννα, Α. (2016). Εργαστηριακή μελέτη της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς βελτιωμένων ρευστοποιήσιμων εδαφών (Διδακτορική Διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
4. Van Paassen, L. (2009). BiogROUT- Ground improvement by microbially induced carbonate precipitation (Διδακτορική Διατριβή). Delf University of technology.
5. Cheng, L., & Shahin, A. M. (2016). Urease active bio-slurry: a novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation. *Canadian Geotechnical Journal*.
6. Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., & Shahin, A. M. (2013). Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 50. pp 81–90.
7. Dejong, T. J., Mortensen, M. B., Martinez, C. B., & Nelson, C. D. (2010). Bio-mediated soil improvement', *Ecological Engineering* 36. pp 197-210.
8. 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.
9. Kavazanjian, E. Jr., & Karatas, I. (2008) Microbiological improvement of the physical properties of soil. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16.
10. Mitchell, K. J., & Santamarina, C. (2005). Biological Considerations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering (ASCE/October)*.
11. Umar, M., Kassim, A. K, & Chiet, P. T. K. (2016). Biological process of soil improvement in civil engineering: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 pp 767-774.
12. Ivanov, V. & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. Springer Science+Business Media B.V.
13. Kim, D., Park, K., & Kim, D. (2013). Effects of Ground Conditions on Microbial Cementation in Soils. *Materials* 2014, 7, pp 143-156.
14. Duraisamy, Y. (2016). Strength and stiffness improvement of bio-improvement of bio-cemented Sydney sand (Διδακτορική Διατριβή). University of Sydney.

15. Velpuri, K. P. V. N. (2015). Factors influencing the Microbial Calcium Carbonate Precipitation performance in sands (Διδακτορική Διατριβή). University of Texas at Arlington.
16. Hammes, F. (2003). Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation (Διδακτορική Διατριβή). University of Gent.
17. Cheng, L. (2012). Innovative Ground Enhancement by Improved Microbially Induced CaCO₃ Precipitation Technology (Διδακτορική Διατριβή). Murdoch University-Western Australia.
18. Dhama, K. N., Reddy, S. M., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(5), pp 707-714.
19. Dhama, K. N., Reddy, S. M., & Mukherjee, A. (2014). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *frontiers in microbiology*-October, Volume 4, Article 314.
20. Alvarado, D. (2009). Bio-mediated soil improvement: cementation of unsaturated sand samples. University of California, Davis
21. Dejong, T. J., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, A. L., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S. S., Burbank, M., Caslake, L.F., Chen, Y. C., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Esnault-Filet, A., Fauriel, S., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., Kuo, M., Laloui, L., Larrahondo, J., Manning, C. A. D., Martinez, B., Montoya, B. M., Nelson, D. C., 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* 63, No. 4, pp 287–301.
22. DeJong, T. J., Soga, K., Banwart, A. S., Whalley, W.R., Ginn, R. T., Nelson, D. C., Mortensen, M. B., Martinez, C. B., & Barkouki, T. (2011). Soil engineering in vivo: harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions. *Journal of the Royal society Interface* 8, pp 1–15.
23. Baskar, S., Baskar, R., Mauclaire L., & McKenzie, A. J. (2006). Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in Sahastradhara caves, Dehradun, India. *Current Science*, Vol. 90, No. 1, 10 January.
24. Ng, W. S., Lee, M. L., & Hii, S. L. (2012). An Overview of the Factors Affecting Microbial-Induced Calcite Precipitation and its Potential Application in Soil Improvement. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* Vol:6, No:2, 2012.
25. DeJong, T. J., Fritzges, B. M., & Nüsslein, K. (2006). Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* / November.

26. Canakci, H., Sidika, W., & Kilic, H. I. (2015). Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil. *Soils and Foundations* 55, pp 1211–1221.
27. Tsukamoto, M., Inagaki, T., Sasaki, Y., & Oda, K. (2013). Influence of relative density on microbial carbonate precipitation and mechanical properties of sand. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris.
28. Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., & Okamura, M. (2015). Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation. *Soils and Foundations*, Volume 52, Issue 3, June , pp 539–549
29. 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.
30. Cheng, L., Shahin, A. M., Cord-Ruwisch, R. (2014). Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments. *Geotechnique* 64, No. 12, pp 1010–1013.
31. Al Qabany & Soga, K. (2013). Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils. *Geotechnique* 63, No. 4, pp 331–339.
32. Kim, G., & Youn, H. (2016). Microbially Induced Calcite Precipitation Employing Environmental Isolates. *Materials*, 9, 468.
33. Suprpto, H. Y., Mroueh, H., Lacroix, J. M., Madec, E., Soepandji, S.B., & Rahayu, W. (2014). Experimental Study of Utilization of *Bacillus subtilis* to improve the Shear Strength of Sand. International Conference on Civil, Biological and Environmental Engineering, May 27-28. Istanbul, Turkey.
34. Kalantarya, F., & Kahanib, M. (2015). Evaluation of the Ability to Control Biological Precipitation to Improve Sandy Soils. *Procedia Earth and Planetary Science* 15, pp 278–284.
35. Chou, W. C., Seagren, A. E., Aydilek, H. A., & Lai, M. (2011). Biocalcification of Sand through Ureolysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* © ASCE / December.
36. Shahrokhi-Shahraki, R., Zomorodian, S. M. A., Niazi, A., & O'Kelly, C. B. (2015). Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation. Institution of civil Engineers.
37. Lin, H., Suleiman, T. M., Brown, G. D., & Kavazanjian, Jr. E. (2016). Mechanical Behavior of Sands Treated by Microbially Induced Carbonate Precipitation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2016, 142(2).
38. Ozdogan, A. (2010). A study on the triaxial shear behavior and microstructure of biologically treated sand specimens (*Μεταπτυχιακή Εργασία*). University of Delaware.

39. Richardson, A., Coventry, K., Forster, A., & Jamison, C. (2014). Surface consolidation of natural stone materials using microbial induced calcite precipitation. Northumbria University Newcastle.
40. Gurbuz, A., Sari, D. S., Yuksekdog, N. Z., & Cinar, B. (2011). Cementation in a matrix of loose sandy soil using biological treatment method. *African Journal of Biotechnology* Vol. 10(38), pp. 7432-7440, 25 July.
41. Ringelberg, D. B., Cole, D. M., Foley, K. L., Ruidaz-Santiago, C. M., & Reynolds, C. M. (2014). Compressive strength of soils amended with a bacterial succinoglycan: effects of soluble salts and organic matter. *Can. Geotech. J.* 51: pp 747–757.
42. Al- Thawadi, M. S. (2008). High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria (Δημοσιευμένη Διδακτορική Διατριβή). Murdoch Univeristy, Western Australia.
43. Baig, S., Picornel, M. & Nazarian, S. (1997). Low Strain Shear Moduli of Cemented Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123 (No.6), pp 540-545.
44. Chiang, Y. C. & Chae, Y. S. (1972). Dynamic properties of cement treated Soils. *Highway Res. Rec.* No. 379. Highway Res. Board. Nat.Acad. of Sci, pp 39-51.
45. Sital, N.(1979). Behaviour of slopes in weakly cemented soils under static and dynamic loading. Department of Civil Engineering, Stanford University, California.
46. Durante, V.A. & Voronkevich, S.D.(1955). Studies of sand densities for construction project. *Annals of Moscow University*, No 2, pp 131-137.
47. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. & Rad, N. S.(1981). Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107 (No GT6), pp 799-817.
48. Acar, Y. B. & El-Tahir, E. A.(1986). Low Strain Dynamic Properties of Artificially Cemented Sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 112 (No.11), pp 1001-1005.
49. Saxena, S. K., Avramidis, A. S. & Reddy, K. R.(1987). Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strains. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp 353-368.
50. Li, N. & Woods, R. D. (1987). Dynamic behaviour of grouted sands. *Soil Structure Interaction*, pp 221-241.
51. Maccarini, M. (1987). Laboratory studies of a weakly bonded artificial soils. Imperial College of Science, London.
52. Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X. J., Abe, F., Kim, Y. S. & Park, C. S. (1992). Elastic deformation properties of geomaterial. *Soils and Foundations*, Vol. 32(No. 3), pp 26-46.

53. Lade, P. V. & Overton, D. D. (1989). Cementation effects in frictional material. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 115 (No 10), pp 1373-1387.
54. Al-Ghanem, A. (1989). Factors affecting the strength characteristics of calcium carbonate cemented soils. University of Arizona, Department of Civil Engineering.
55. Chang, T. S. & Woods, R. D. (1992). Effect of particle contact bond on shear modulus. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 118(No 8), pp 1216-1233.
56. Airey, D. W. (1993). Triaxial testing of natural cemented carbonate soil. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 119(No 9), pp 1379-1397.
57. Puppala, A. J., Acar, Y. B. & Tumay, M. T. (1995). Cone penetration in very weakly cemented sand. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 121(No 8), pp 589-600.
58. Puppala, A. J., Acar, Y. B. & Tumay, M. T. (1996). Low strain dynamic shear modulus of cemented sand from cone penetration test results. Small magnitude measurements in geotechnical engineering, Transportation Research Board, No 1548, pp 60-66.
59. Tatsuoka, F., Kahata, Y., Uchida, K. & Imai, K. (1996). Deformation and strength characteristics of cement-treated soils in Trans-Tokyo Bay Highway Project. Conference, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo.
60. Abdulla, A. A. & Kioussis, P. (1997). Behaviour of cemented sands - I. Testing. *International Journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, Vol. 21, pp 533-547.
61. Ismael, N. F. & Mollah, M. A. (1998). Leaching effects on properties of cemented sands in Kuwait. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Journal*, Vol. 124(No 10), pp 997-1004.
62. Haeri, S.M., Yasrebi, S. & Asghari, E. (2002). Effects of cementation on the shear strength parameters of Tehran alluvium. Conference, Proc. 9th IAEG Congress, pp 519-525, Durban.
63. Ghodss, M. (2002). The effect of reconstituted on the dynamic behaviour of cemented silty sands, Conference, Proc. 12th European Conference on Earthquake Engineering, (paper 126). London.
64. Dano, C. & Hicher, P-Y (2003). Behaviour of uncemented sands and grouted sands before peak strength. *Soils & Foundations*, Vol. 43, pp 13-19.
65. Fernandez, A.L. & Santamarina, J. C. (2001). Effects of cementation on the small strain parameters of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38(No. 1), pp 191-199.
66. Ismail, M. A., Joer, H.A., Sim, W. H. & Randolph, M. F. (2002). Effect of cement type on shear behaviour of cemented calcareous soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 125(No 6), pp 520-529.

67. Rotta, G. V., Consoli, N. C., Prietto, P.D.N. & J. Graham, J. (2003). Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress. *Geotechnique*, Vol. 53(No. 5), pp 493-501.
68. Sharma, S. S. & Fahey, M. (2003). Degradation of stiffness on cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129(No. 7), pp 619-629.
69. Aiban, S. A. (1995). Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia. *Engineering Geology*, Vol. 39, pp 203-215.
70. Quahwash, A.A. (1989). Geotechnical properties of fine-grained calcareous sediments for engineering purposes. *Engineering Geology Journal*, 26, pp 161-169.
71. Noorany, I. (1989). Classification of marine sediments. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 115(No 1), pp 23-37.
72. Ng, C., Bolton, M. & Dasari, G. (1994). The small strain stiffness of a carbonate stiff clay. *Soils & Foundations*, Vol. 35(No. 4), pp 109-114.
73. Amrani Paaza, N. El., Lamas, F., Irigaray, C. & Chacon, J. (1998). Engineering geological characterization of Neogene marls in the Southeastern Granada Basin, Spain. *Engineering Geology*, Vol. 50, pp 165-175.
74. Silvestri, F., Vinale, F. & A. d' Onofrio. (1999). Strain rate dependent behaviour of a natural stiff clay. *Soils and Foundations*, Vol 39(No 2), pp 69-82.
75. Lamas, F., Irigaray, C. & Chacon, J. (2002). Geotechnical characterization of carbonate marls for the construction of impermeable dam cores. *Engineering Geology*, No 66, pp 283-294.
76. Jovicic, V., Coop, M. & Simpson, B. (2006). Interpretation and modelling of deformation characteristics of a stiff North Sea clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 43, pp 341-354.
77. Sorensen, K.K., Baudet, B.A. & Simpson, B. (2007). Influence of structure on the time-dependent behaviour of a stiff sedimentary clay. *Geotechnique*, Vol. 57(No. 1), pp 113-124.
78. Amorosi, A. & Rampello, S. (2007). An experimental investigation into the mechanical behaviour of a structured stiff clay. *Geotechnique*, Vol. 57(No. 2), pp 153-166.
79. Jung, C., Bobet, A. & Siddiki, N. Z. (2011). A simple method to identify marl soils. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2232, pp 76-84.
80. Trhlikova, J., Masin, D. & Bohac, J. (2012). Small strain behaviour of cemented soils. *Geotechnique*, Vol. 62(No. 10), pp 943-947.
81. Cardoso, R., Maranha des Neves, E. & Alonso, E.E. (2012). Experimental behaviour of compacted marls. *Geotechnique*, Vol. 62(No 11), pp 999-1012.

82. Bahador, M. & Pak, A. (2012). Small-strain shear modulus of cement - admixed kaolinite. *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 30, pp 163-171.
83. Subramaniam, P. & Banerjee, S. (2014). Factors affecting shear modulus degradation of cement treated clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 65, pp 181-188.
84. Sharma, S. S. & Fahey, M. (2004). Deformation characteristics of two cemented calcareous soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41(No. 6), pp 1139-1151.
85. Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R. & Gouvenot, D. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, pp 461-471.
86. Yun, T. S. & Santamarina, J. C. (2005). Decementation, Softening and Collapse: Changes in small-strain shear stiffness in k_0 loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131(No.3), pp 350-358.
87. Haeri, S.M., Hosseini, S.M., Toll, D. & Yasrebi, S.S. (2005). The behaviour of an artificially cemented sandy gravel. *Geotechnical and geological engineering journal*, Vol 28(No. 4), pp 180-190.
88. Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L. & Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133(No. 2), pp 197-205.
89. Hamidi, A. & Haeri, S. M. (2008). Stiffness and deformation characteristics of a cemented gravely sand. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 6(No.3), pp 159-173.
90. Sharma, M. S. R., Baxter, C. D.P., Moran, K., Vazin, H. & Narayanasamy, R. (2011). Strength of weakly cemented sands from drained multistage triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 137(No 12), pp 1202-1210.
91. Lu, X. B., Wang, L. & Zhang, X. H. (2012). Cementing material on mechanical property of calcareous sand. *The Open Ocean Engineering*, No 5, pp 21-26.
92. Pantazopoulos, I. A. & Atmatzidis, D. K. (2012). Dynamic properties of microfine cement grouted sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 42, pp 17-31.
93. Consoli, N. C., V. da Fonseca, A., Silva, S. R., Cruz, R.C. & Fonini, A. (2012). Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. *Geotechnique*, Vol. 62(No. 2), pp 177-183.
94. Consoli, N. C., Cruz, R. C., V. da Fonseca, A. & Coop, M. R. (2012). Influence of cement-voids ratio on stress-dilatancy behaviour of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol .138(No 1), pp 100-109.
95. Alvarado, G., Coop, M.R. & Willson, S. (2012). On the role of bond breakage due to unloading in the behaviour of weak sandstones. *Geotechnique*, Vol. 62(No. 4), pp 303-316.

96. Brotons, V., Tomas, R., Ivorra, S. & Gradiaga, A. (2014). Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julian's stone. *Bulletin Eng Geol Environ*, Vol.73, pp 791-799.
97. Stokoe, K. H., Hwang, S. K., Lee, J. N. K. & Andrus, R. D. (1995). Effects of various parameters on the stiffness and damping of soils at small to medium strains. Conference, Pre-failure Deformation of Geomaterials, pp 785-816, Japan.
98. Aiban, S. A. (1995). Strength and leaching characteristics of Abqaiq marl. Conference, Proc of the 4th Saudi Engineering Conference, Vol. II, pp 393-399.
99. Rampell, S. & Silvestri, F. (1993). The stress-strain behaviour of natural and reconstituted samples of two overconsolidated clays. Conference, Geotechnical Engineering of Hard Soils.
100. Aversa, S., Evangelista, A., Leroueil S. & Picarelli, L. (1993). Some aspects of the mechanical behaviour of "structured" soils and soft rocks. Conference, Geotechnical Engineering of Hard Soils.
101. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. & Lo Presti, D. C. F. (1995). Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays. Conference, Pre-failure Deformation Characteristics, pp 817-836.
102. Tatsuoka, F., Jardine, R. J., Lo Presti, D., Di Benedetto, H. & Kodata, T. (1997). Theme Lecture: Characterizing the pre-failure deformation properties of geomaterials. Conference, Proc of the 14th International Conference on S.M.F.E., Vol. IV, pp 2129-2164.
103. D'Onofrio & Santucci de Magistris & Olivares. (1998). Influence of soil structure on the behaviour of two natural stiff clays in the pre-failure range. Conference, The Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks.
104. Kavvas, M. & Anagnostopoulos, A. (1998). A framework for the mechanical behaviour of structures soils. Conference, Proc. The Hard Soils and Soft Rocks, pp. 591-601.
105. Cotecchia, F. & Chandler, R. J. (1998). One-dimensional compression of a natural clay: Structural changes and mechanical effects. Conference, Proc. The Hard Soils and Soft Rocks, pp 103-114.
106. Sestanovic, S. (1998). Engineering geological characteristics of marl from Eocene flysh in the city of Split, Croatia. Conference, Proc. The Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks, pp 311-314.
107. Chang, T.S., Vedula, V. R. & Chang, K.P. (2001). Improvement of static and dynamic properties of soft clay using high pressure jet grout. Conference, Proc of the 4th Inter. Conf. on the Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, (paper No 1,31).
108. Χριστοδουλοπούλου, Τ. & Τσώλη – Καταγά, Π. (2004). Επίδραση της μικροδομής και της ορυκτολογικής σύστασης στη εργαστηριακή υδραυλική αγωγιμότητα των μαργών της

Βορείου Πελοποννήσου. Conference, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, σς 1902-1911.

109. Sfriso, A., Sagues, P., Quaglia, G., Quintela, M. & Ledesma, O. (2008). Small-strain stiffness of Pampeano Formation. Conference, 4th International Symposium on Deformation Characterization of Geomaterials, Atlanda.

110. Mansour, Z., Chik, Z. & Taha, M.R. (2008). Engineering properties of Lisan Marl - Dead Sea – Jordan. Conference, ICCBT2008, pp 380-390.

111. Μπαρδάνης, Μ. (2010). Πειραματική Διερεύνηση της Συμπιεστότητας των Αναζυμωμένων Εδαφικών Υλικών. Conference, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10, Βόλος.

112. Kokusho, T., Nagao, Y., Ito, F. & Fumkuyama, T. (2011). Aging effect on sand liquefaction observed during the 2011 earthquake and basic laboratory studies. Conference, Proc. Of the Int. Symposium. on Engineering Lessons Learned from Great East Japan Earthquake, pp 759-770, Tokyo.

113. Ismail, M.A., Sharma, S.S. & Fahey, M. (2005). Detection of slight cementation in offshore carbonate deposits from laboratory testing. Conference, Proc. Of the 1st Inter. Symp. On Frontiers in Offshore Geotechnics, pp 1033-1038, Perth Australia.

Διαδίκτυο:

1. Ενίσχυση των εδαφών. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: www.gaiapedia.gr. (10/07/2017)
2. Ουρία. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%85%CF%81%CE%AF%CE%B1>. (29/7/2017)
3. Σαββαΐδης, Ι. Γενική Μικροβιολογία- Ανάπτυξη βακτηρίων (Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων ανοικτά ακαδημαϊκά μαθήματα). (2014). Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <http://ecourse.uoi.gr/course/view.php?id=1151>. (8/9/2017)
4. Bioremediation. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bioremediation>. (28/7/2017)
5. Τι είναι η οπτική πυκνότητα;. (2014). Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=798>. (8/9/2017)
6. OD600. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/OD600>. (8/9/2017)
7. In vitro. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: https://el.wikipedia.org/wiki/In_vitro. (20/7/2017)

8. Shamsudin, R. S. (2011). Scanning electron microscope (SEM) & how it works. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <http://emicroscope.blogspot.gr/2011/03/scanning-electron-microscope-sem-how-it.html>. (2/8/2017)
9. A revolutionary way to ‘grow’ building bricks using bacteria and sand. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://shareahack.com/inventors-come-with-a-way-to-grow-building-bricks-using-bacteria-and-sand/>. (19/7/2017)
10. Nimertis, Vagenas. Ανθρακικό ασβέστιο. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1407/1/Nimertis_Vagenas.pdf. (30/7/2017)