

ΠΡΑΞΗ:

**«ΘΑΛΗΣ- Π.Θ.: ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΜΕΣΩ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΠΟΡΩΝ ΜΕ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΣ ΑΣΦΑΛΗ ΝΑΝΟ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ»
MIS 375618**

Επιστημονικός Υπεύθυνος:
Επικ. Καθ. Αχ. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

ΔΡΑΣΗ 1

Βιβλιογραφική έρευνα: επιλογή υλικών - διαδικασίες

ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ:

Τεχνική Έκθεση Πεπραγμένων (Π1)

Φεβρουάριος 2013

Περιεχόμενα

	Περιεχόμενα	1
	Κατάλογος συμβόλων	2
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	4
2.1	Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών	5
2.1.1	Προέλευση και ορυκτολογική σύσταση	5
2.1.2	Φυσικές ιδιότητες	6
3.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗ	9
3.1	Χαρακτηριστικά σταθεροποιητή	11
4.	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	13
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	17

Κατάλογος συμβόλων

C_u	συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u=D_{60}/D_{10}$)
D_{50} (mm)	μέση διάμετρος κόκκων για 50% συγκρατούμενο ποσοστό
e_{max}	μέγιστος δείκτης πόρων
e_{min}	ελάχιστος δείκτης πόρων
f_c (%)	ποσοστό λεπτοκόκκων
G_s	ειδικό βάρος στερεών κόκκων
PI	δείκτης πλαστικότητας
γ_{dmax} (kN/m ³)	μέγιστο ξηρό ειδικό βάρος
γ_{dmin} (kN/m ³)	ελάχιστο ξηρό ειδικό βάρος
ρ_{dmin} (g/cm ³)	ελάχιστη ξηρή πυκνότητα
ρ_{dmax} (g/cm ³)	μέγιστη ξηρή πυκνότητα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί το **Παραδοτέο 1** του Ερευνητικού Προγράμματος:

ΘΑΛΗΣ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ - «Αποτροπή σεισμικής ρευστοποίησης εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών μέσω εμπλουτισμού του υγρού πόρων με περιβαλλοντικώς ασφαλή νάνο-σωματίδια»

Το εν λόγω Ερευνητικό Πρόγραμμα έχει κωδικό MIS 375618, και εκπονείται υπό το συντονισμό του Επίκουρου Καθηγητή **Αχιλλέα Παπαδημητρίου** (Επιστημονικός Υπεύθυνος).

Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω Παραδοτέο σχετίζεται με τη **Δράση 1** του Προγράμματος, η οποία έχει τίτλο **Βιβλιογραφική έρευνα: Επιλογή υλικών – διαδικασίες**, και η οποία «αποτελείται από μια σειρά προκαταρκτικών εργασιών, με πιο σημαντική τη κατοχύρωση του βέλτιστου σταθεροποιητή, και την πιστοποίηση των διαδικασιών για τις εργαστηριακές δοκιμές με βάση τη βιβλιογραφία», με βάση την εγκεκριμένη απόφαση εκτέλεσης με ίδια μέσα.

Με βάση την ίδια απόφαση, το **Παραδοτέο 1** συνίσταται από μία «Τεχνική Έκθεση για: (α) ιδιότητες και προδιαγραφές των επιλεγέντων υλικών (άμμος, ιλύς, σταθεροποιητής), (β) προδιαγραφές για τη μέθοδο προετοιμασίας δοκιμίων για τους 2 εδαφικούς τύπους που θα σταθεροποιηθούν (άμμος, ιλυώδης άμμος), αλλά και τον εμπλουτισμό του υγρού πόρων».

Έτσι, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα επιλεγέντα εδαφικά υλικά (άμμος, ιλύς), στο Κεφάλαιο 3 γίνεται το ίδιο για τον επιλεγέντα σταθεροποιητή, ενώ στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διαδικασία προετοιμασίας των φυσικών και σταθεροποιημένων εδαφικών δειγμάτων. Χάριν πληρότητας, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται ενδεικτικά και οι εργαστηριακές διατάξεις που διαμορφώθηκαν για το σκοπό αυτό στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής (ΕΕΘΓΣΜ) του Α.Π.Θ.

Οι ερευνητικές δραστηριότητες της Δράσης 1, και η καταγραφή τους στο Παραδοτέο 1, εκτελέσθηκαν με την πολύτιμη συνδρομή των κάτωθι:

Μέλη ΚΕΟ

- **Θεοδώρα Τίκα**, Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ.
- **Δημήτριος Αχιλιάς**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Χημείας του Α.Π.Θ.
- **Αχιλλέας Παπαδημητρίου**, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ.

Μέλη ΟΕΣ

- **Αντιγόνη Βράννα**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.
- **Γεωργία Αγαπουλάκη**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Π.Θ.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: **ΘΑΛΗΣ**. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η επιλογή των εδαφικών υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα στάδια του Προγράμματος, έγινε λαμβάνοντας υπόψη αφενός μεν τα φυσικά ρευστοποιήσιμα εδάφη στα οποία είναι δυνητικά εφαρμόσιμη η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης και αφετέρου τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αντίστοιχες εργαστηριακές μελέτες. Συγκεκριμένα, σε μελέτες επίδρασης της παρουσίας κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου στην αντίσταση ρευστοποίησης άμμων και ιλυωδών άμμων, έχει γίνει χρήση των (ως επί το πλείστον) ομοιόμορφων άμμων Trevino (Persoff et al., 1999), Monterey No. 30 (Gallagher P., 2000), Nevada (Koch, 2002, Lin, 2006, Pamuk et al., 2007, Spencer et al., 2008), Ottawa (Lin, 2006), Toyoura (Kodaka et al., 2005), Lazaro Cardenas (Diaz-Rodriguez et al, 2008) και ιλυωδών άμμων με ποσοστό ιλύος ίσο με 5% και 10% (Lin, 2006).

Στο πλαίσιο του εν λόγω Προγράμματος πρόκειται να εξεταστεί η συμπεριφορά άμμων και ιλυωδών άμμων με σχετικά μικρή περιεκτικότητα λεπτοκόκκων (π.χ. ίση με 10%). Για να είναι συγκρίσιμη η συμπεριφορά των δύο τύπων εδαφών, η ιλυώδης άμμος θα διαμορφωθεί με ανάμειξη του υλικού της επιλεγείσας άμμου με άλλο λεπτόκοκκο υλικό, κατά προτίμηση ίδιας ορυκτολογικής σύστασης. Έτσι, για τις ανάγκες του Προγράμματος επιλέγησαν προς χρήση δύο εδαφικά υλικά, ίδιας ορυκτολογικής σύστασης:

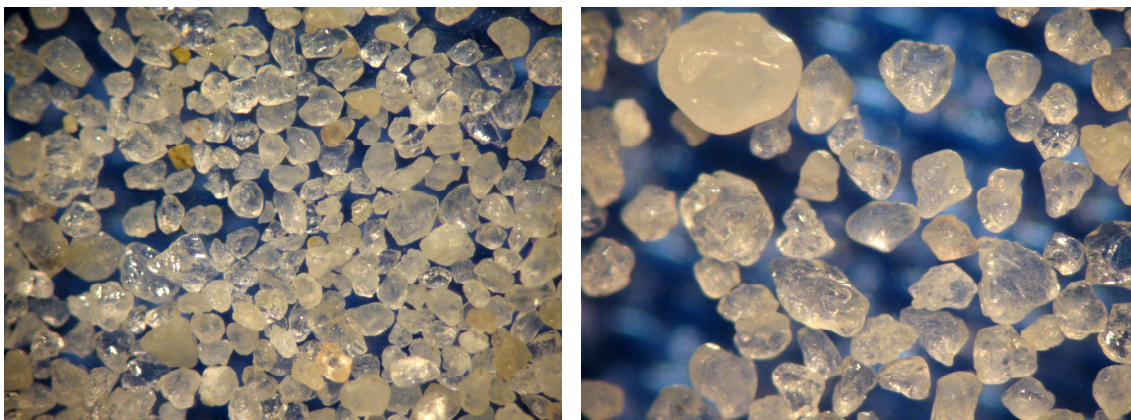
- η ομοιόμορφη μεσόκοκκη έως λεπτόκοκκη καθαρή άμμος **M31**, και
- η μη-πλαστική αμμώδης ιλύς **D6**, με ποσοστό ιλύος 67%.

Επισημαίνεται ότι η επιλεγείσα (αμμώδης) ιλύς με κωδικό όνομα **D6** είναι αρκετά ομοιόμορφη και έχει σχετικά μεγάλη διαπερατότητα, ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα κατά τον διαποτισμό των εδαφικών δοκιμίων με τον επιλεγμένο σταθεροποιητή. Η διαμόρφωση δοκιμίων ιλυώδους άμμου συνεπάγεται την ανάγκη ανάμειξης των δύο υλικών, και για παράδειγμα για την επίτευξη ποσοστού λεπτόκοκκων $f_c=10\%$ χρειάζεται ανάμειξη της **M31** και της **D6** σε ποσοστά 85% και 15% αντίστοιχα.

2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών

2.1.1 Προέλευση και ορυκτολογική σύσταση

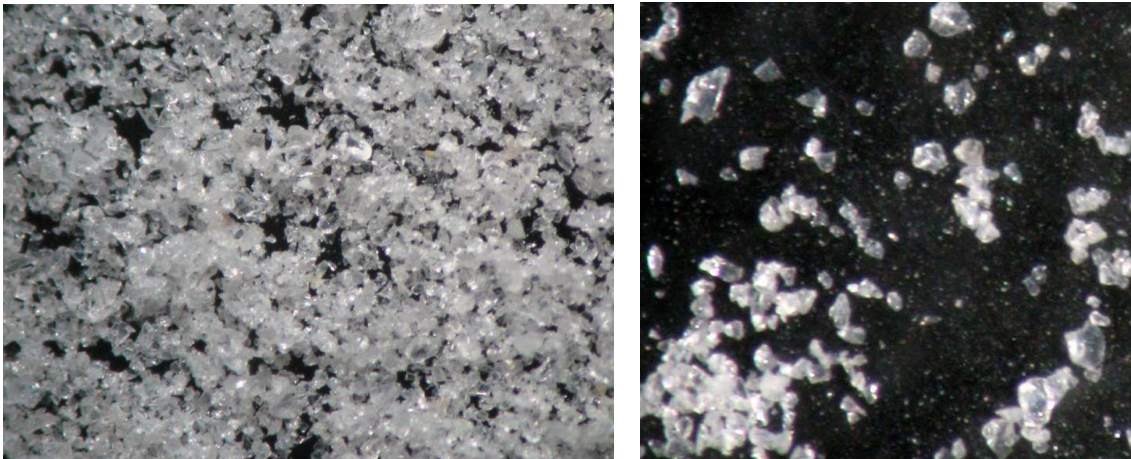
Η άμμος **M31** είναι φυσική χαλαζιακή άμμος από το Βέλγιο. Μετά από εξέτασή της σε μικροσκόπιο διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για καθαρή άμμο με σχετικά ομοιόμορφα στιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα, Σχήμα 1. Η στίλβωση αποτελεί ένδειξη προέλευσης από υδάτινο περιβάλλον. Οι κόκκοι στην πλειονότητά τους είναι διαυγείς, ενώ ένα ποσοστό $5\pm 10\%$ είναι γαλακτόχρωμοι (ημιδιαφανείς), άλλης γενετικής προέλευσης. Υπάρχει απειροελάχιστη ποσότητα ($<1\%$) μαύρων κόκκων σιδηροξειδίων άγνωστης προέλευσης.



Σχήμα 1. Άποψη του σχήματος και της μορφής των κόκκων της άμμου M31.

Η αμμώδης ιλύς **D6**, Σχήμα 2, είναι προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου, με απειροελάχιστη ποσότητα ($<1\text{‰}$) μαύρων κόκκων, που οφείλονται πιθανόν σε ανθρώπινη επιμόλυνση. Οι κόκκοι της D6 είναι διαυγείς και, σε αντίθεση με την άμμο M31, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα, γεγονός που αποδίδεται στην κογχώδη θραύση τους.

Σημειώνεται ότι η ιλύς D6 είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερη ενεργό οξύτητα (pH).



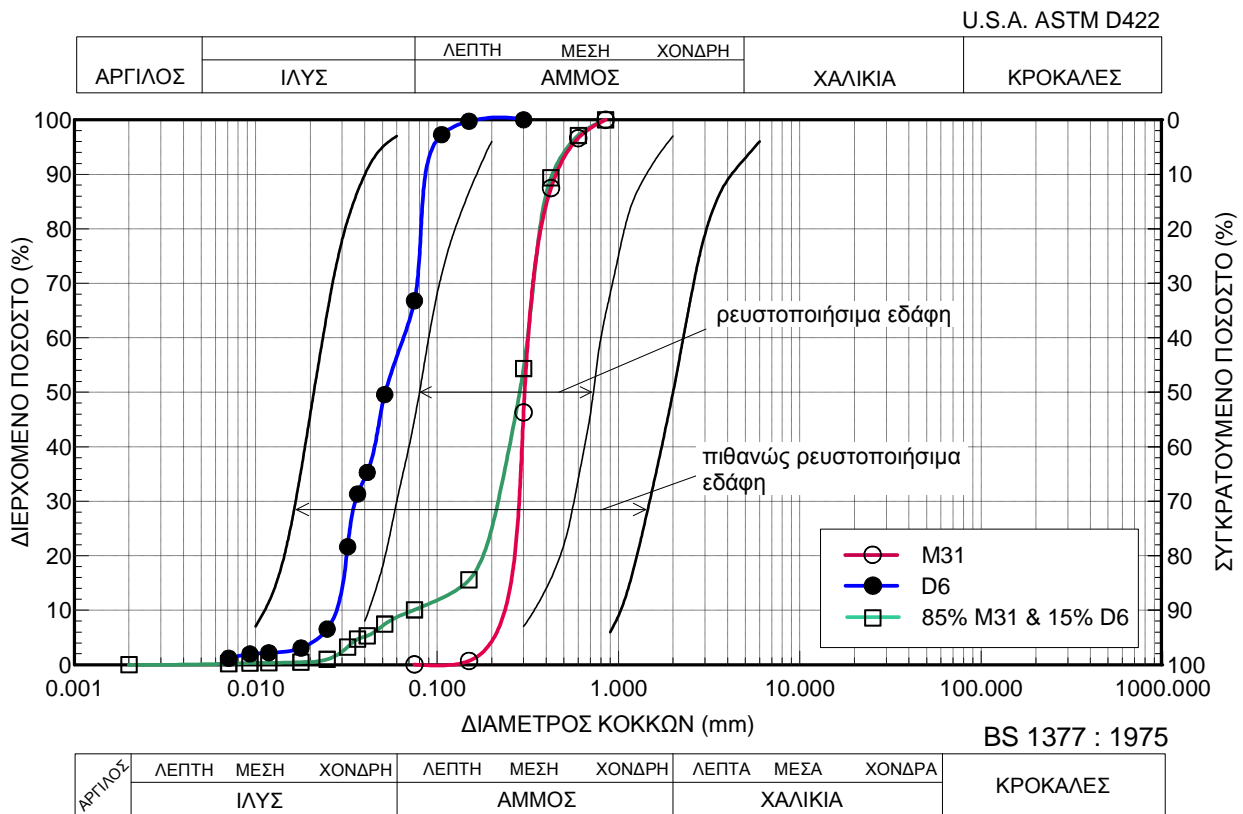
Σχήμα 2. Άποψη του σχήματος και της μορφής των κόκκων της ιλύος D6.

2.1.2 Φυσικές ιδιότητες

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει την κοκκομετρική διαβάθμιση των επιλεγέντων εδαφών: M31, D6 και, χάριν παραδείγματος, ενός μίγματος ιλυώδους άμμου των δύο εδαφών με $f_c=10\%$.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα εύρη κοκκομετρίας για ομοιόμορφα εδάφη, που σχετίζονται στη βιβλιογραφία με ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης, καθώς και εκείνα που σχετίζονται με πιθανό σχετικό κίνδυνο. Όπως προκύπτει, η M31 θεωρείται ρευστοποιήσιμο έδαφος, ενώ και η καθαρή D6 μπορεί να θεωρηθεί ως πιθανώς ρευστοποιήσιμο έδαφος, τουλάχιστον με βάση τις κοκκομετρίες τους. Επιπλέον, η προαναφερθείσα ανάμειξη τους διαμορφώνει μια ιλυώδη άμμο χαμηλού ποσοστού λεπτοκόκκων (π.χ. $f_c=10\%$) που θεωρείται και αυτή ρευστοποιήσιμο έδαφος, δηλαδή διατηρεί το χαρακτηρισμό της μητρικής άμμου.

Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών παρατίθενται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 3. Κοκκομετρικές καμπύλες για την άμμο M31, την ιλύ D6 και τα μείγματα άμμου-ιλύος (85% M31 & 15% D6) με ποσοστό ιλύος 10%.

Στο Σχήμα 4 γίνεται συγκριτική παράθεση των κοκκομετρικών καμπυλών των επιλεγέντων υλικών, με άμμους που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες της παθητικής σταθεροποίησης εδαφών. Όπως προκύπτει, τόσο η άμμος M31 όσο και η ιλυώδης άμμος με χαμηλό ποσοστό λεπτόκοκκων (π.χ. $f_c=10\%$) που προκύπτει από την ανάμειξη της με την αμμώδη ιλύ D6 έχουν κοκκομετρική διαβάθμιση εντός του εύρους των εδαφών που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα είναι εν δυνάμει συγκρίσιμα με εκείνα της βιβλιογραφίας. Επιπλέον όμως, με τη χρήση των επιλεγέντων υλικών, για πρώτη φορά θα διερευνηθεί η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων στην παθητική σταθεροποίηση.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες των επιλεγέντων εδαφικών υλικών

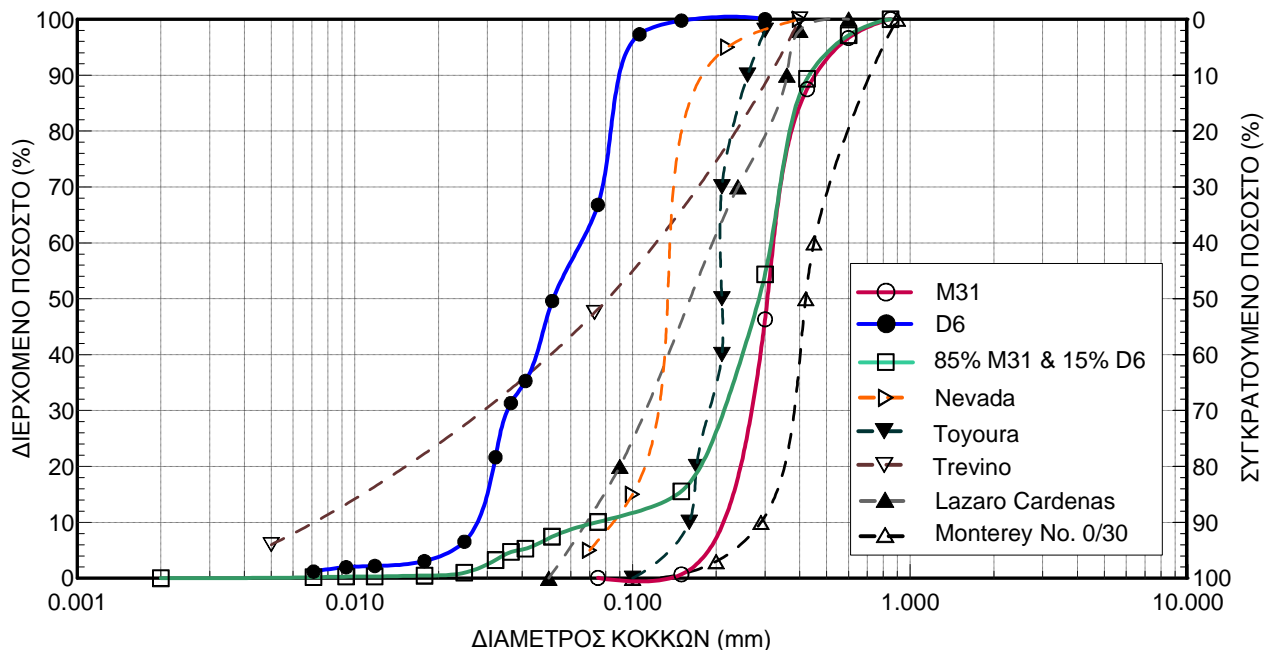
Μέγεθος	Άμμος M31	Ιλύς D6 ³	85% M31 + 15% D6
e_{max}	0.826	-	0.780
e_{min}	0.548	-	0.415
ρ_{dmin} ¹ (g/cm ³)	1.455	-	1.537
ρ_{dmax} ² (g/cm ³)	1.717	-	1.877
γ_{dmin} (kN/m ³)	14.27	-	15.07
γ_{dmax} (kN/m ³)	16.84	-	18.41
G_s	2.657	2.657	2.657
D_{50} (mm)	0.30	0.05	0.27
C_u	1.3	2.4	4
f_c (%)	0	67	10.61
PI	-	0	0

¹ Η ελάχιστη πυκνότητα (ρ_{dmin}) προσδιορίστηκε με δύο μεθόδους:

- εναπόθεση των υλικών στην πλέον δυνατή χαλαρή κατάσταση σε δοχείο γνωστού όγκου
- τοποθέτηση 1000±1g του υλικού σε κυλινδρικό ογκομετρικό σωλήνα (2000ml) και στη συνέχεια αναποδογύρισμα και επαναφορά (ASTM D4254-00)

² Η μέγιστη πυκνότητα (ρ_{dmax}) προσδιορίστηκε στη συσκευή δονητικής τράπεζας (συχνότητα 60Hz, διάρκεια 12min) (ASTM D4253)

³ Οι τιμές των μεγεθών των επιλεγέντων εδαφικών υλικών προέκυψαν από τα δείγματα που εστάλησαν στο ΕΕΘΓΣΜ του Α.Π.Θ. προς εξέταση και αποτελούν προεκτίμηση.



Σχήμα 4. Συγκριτική παράθεση κοκκομετρικών καμπυλών για την άμμο M31, την ιλύ D6 και τα μείγματα άμμου-ιλύος (π.χ. με $f_c=10\%$) με άμμους που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗ

Βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή σταθεροποιητή του υγρού πόρων αποτελούν: α) χρονικά μεταβαλλόμενο μα ελεγχόμενο ιξώδες, β) μη-τοξικότητα, γ) υψηλή ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής, δ) χαμηλό κόστος. Με βάση τα ανωτέρω κριτήρια, ως πιθανοί σταθεροποιητές προκρίνονται κατ' αρχήν το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου (colloidal silica), αργιλικά πλακίδια νανοειδών διαστάσεων (nano-clay particles), χημικά ενέματα (chemical grouts) και ο αδρανής σίδηρος (zero-valent iron). Σύμφωνα με την Gallagher (2000), μια σειρά από χημικά ενέματα αποκλείονται για διαφορετικούς λόγους (π.χ. το πυριτικό νάτριο (sodium silicate) επειδή αλλάζει ιξώδες γρήγορα, το ακριλαμίδιο (acrylamide) επειδή είναι τοξικό αλλά και ακριβό. Επιπλέον, ο αδρανής σίδηρος αποκλείεται επειδή είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε οξειδωση, και συνεπώς υπάρχει θέμα διάρκειας ζωής της βελτίωσης.

Επιπλέον, η χρήση βιολογικών τεχνικών για τη σταθεροποίηση εδαφών (bio-grouts) αρχίζει να κερδίζει έδαφος παγκοσμίως (π.χ DeJong et al 2006, van Paasen et al 2009), σύμφωνα με τις οποίες μικρο-οργανισμοί που εισάγονται στο υγρό των πόρων ξεκινούν χημικές αντιδράσεις που οδηγούν σε ιζηματοποίηση (ή διάλυση) ανόργανων ορυκτών που μεταβάλλουν τη μηχανική συμπεριφορά του φυσικού εδάφους. Το πώς μεταβάλλεται η μηχανική συμπεριφορά εξαρτάται από το είδος του φυσικού εδάφους, μα κυρίως από το είδος των εισαγόμενων μικρο-οργανισμών. Για παράδειγμα, η ιζηματοποίηση τριοξειδίου του ασβεστίου με χρήση βακτηρίων μετατρέπει σε ικανό χρόνο χαλαρές άμμους σε σιμεντωμένο εδαφικό υλικό που ομοιάζει του ψαμμίτη. Μια τέτοιου είδους διαδικασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί δυνητικά και για την αποτροπή της σεισμικής ρευστοποίησης, μα είναι αμφίβολη η διάρκεια ζωής της καθώς οι εν λόγω βιολογικές διαδικασίες μπορεί να είναι αντιστρεπτές. Το ίδιο συμβαίνει και με άλλου είδους μικροβιακές δράσεις που μπορεί να φράσσουν επαρκώς τους πόρους του εδάφους με βιοφίλμ, μα τα βιοφίλμ αυτά μπορούν να διαλυθούν εύκολα από ισχυρά οξειδωτικά, οπότε δημιουργούνται αμφιβολίες για τη διάρκεια ζωής της βελτίωσης σε αστικό περιβάλλον όπου είναι πιο πιθανή η περιβαλλοντική επιβάρυνση του υδροφορέα (Gallagher 2000).

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και την εγκεκριμένη ερευνητική πρόταση, οι πλέον βασικές επιλογές για σταθεροποιητή είναι οι κάτωθι δύο (2):

- (α) το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου (colloidal silica), (π.χ. Gallagher 2000, Gallagher & Mitchell 2002, Gallagher et al 2007, Spencer et al 2008), και
- (β) διάλυμα αργιλικών πλακιδίων νανοειδούς μεγέθους, (π.χ. Haldavnekar et al 2004, Gratchev et al., 2007, El Mohtar 2008, El Mohtar et al 2008).

Επικεντρώνοντας αρχικώς στην επιλογή (β), αναφέρεται ότι η χρήση μπετονίτη (αργιλικών πλακιδίων μοντμοριλλονίτη υψηλής πλαστιμότητας) σε μικρά ποσοστά κατά βάρος (3-5%) σε νερό δημιουργεί ένα θιξοτροπικό (thixotropic) υγρό πόρων.

Το θιξοτροπικό αυτό υγρό πόρων αποκτά επαρκώς μικρό ιξώδες που να επιτρέπει τη διήθησή του, μόνο μετά από χημική διαφοροποίησή του με πυροφωσφορικό άλας νατρίου (sodium pyrophosphate). Η εν λόγω χημική διαφοροποίησή του δεν είναι μόνιμη, δεδομένης της υδρόλυσης του πυροφωσφορικού άλατος νατρίου, και έτσι μακροπρόθεσμα το υγρό πόρων με μπετονίτη επανακτά τη θιξοτροπική του σύσταση. Εναλλακτικά, το πρόβλημα διηθησιμότητας που εμφανίζει το διάλυμα μπετονίτη μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας άλλα αργιλικά νανοσωματίδια μικρότερων διαστάσεων, όπως ο λαπτονίτης (laponite), δηλαδή μια συνθετική, περιβαλλοντικά αδρανής, άργιλος υψηλής πλαστιμότητας, με πλακίδια που έχουν διάμετρο 25nm και πάχος 1nm, δηλαδή μια τάξη μεγέθους μικρότερα από τα πλακίδια του μπετονίτη, αλλά και πάλι δεν έχει κατοχυρωθεί στη βιβλιογραφία ευστάθεια στο μίγμα και ομοιόμορφος εμποτισμός. Επιπλέον, η παρουσία ιόντων στο νερό των πόρων του εδάφους διαφοροποιεί σε μεγάλο βαθμό την αργιλική μικροδομή, μειώνοντας την αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση (Gratchev et al., 2007).

Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της παρουσίας αργιλικών νανοσωματιδίων όπως μπετονίτη και λαπτονίτη στη συμπεριφορά αμμωδών εδαφών σε ρευστοποίηση έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές (π.χ. Haldavnekar et al 2004, Gratchev et al., 2007, El Mohtar 2008, El Mohtar et al 2008). Τα συμπεράσματα ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις είναι αντιφατικά, γεγονός που αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στους διαφορετικούς τύπους της δημιουργούμενης εδαφικής μικροδομής, η οποία εξαρτάται από την ποσότητα και τη φύση των λεπτοκόκκων. Επιπλέον, οι όποιες δημοσιευμένες δοκιμές αφορούν μικρά δοκίμια, ενώ δεν βρέθηκαν στη βιβλιογραφία δοκιμές υπό κλίμακα ή πείραμα φυσικής κλίμακας για τη μελέτη της εν λόγω βελτίωσης.

Από την άλλη μεριά, η επιλογή (**α**), δηλαδή το κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (colloidal silica, ή CS), είναι ένα υδατικό διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων οξειδίου του πυριτίου, με μεγέθη που κυμαίνονται από 7 έως 22nm. Για παράδειγμα, σε μίγματα με CS 5% κατά βάρος, το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου έχει αρχικώς ιξώδες αντίστοιχο (έως διπλάσιο) του νερού, και γίνεται γέλη (gel) απότομα μετά από μερικούς μήνες, μέσω δημιουργίας οργανικών ενώσεων πυριτίου (siloxane bonds) λόγω συγκρούσεων των νανο-σωματιδίων. Κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών το ιξώδες παραμένει μικρό (και επιτρέπει τη διήθηση στην επιθυμητή θέση), ενώ ο χρόνος κατά τον οποίον γίνεται γέλη ρυθμίζεται από το ποσοστό κατά βάρος, το ακριβές μέγεθος των σωματιδίων, το pH και την ποσότητα (κανονικότητα) και την ιοντική ισχύ κατιόντων στο διάλυμα. Επιπλέον, το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου είναι μη-τοξικό, βιολογικά και χημικά αδρανές και ανθεκτικό στο χρόνο. Μακροσκοπική μέτρηση της επίδρασης της βελτίωσης με χρήση CS σε μίγματα από 4% έως 14.5% κατά βάρος στο υγρό των πόρων, σε διάφορες άμμους και σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και απλής διάτμησης υποδεικνύει την αποτελεσματικότητά της. Πέραν των εργαστηριακών μετρήσεων σε μικρά δοκίμια, έχουν γίνει και δοκιμές υπό κλίμακα σε προσομοιώματα βελτιωμένου εδάφους στο

φυγοκεντριστή (Pamuk et al 2007, Conlee 2010) και ένα πείραμα φυσικής κλίμακας (Gallagher et al 2007) για τη μελέτη της εν λόγω βελτίωσης με ασαφή αλλά ελπιδοφόρα αποτελέσματα (π.χ. οι υπερπίεσεις πόρων μηδένισαν τις ενεργές τάσεις στο σταθεροποιημένο έδαφος, δηλαδή δεν απέτρεψαν τη ρευστοποίηση στο προαναφερθέν πείραμα φυσικής κλίμακας, και έτσι οδήγησαν σε μείωση των καθιζήσεων σε σχέση με το φυσικό έδαφος αλλά όχι στο μηδενισμό τους).

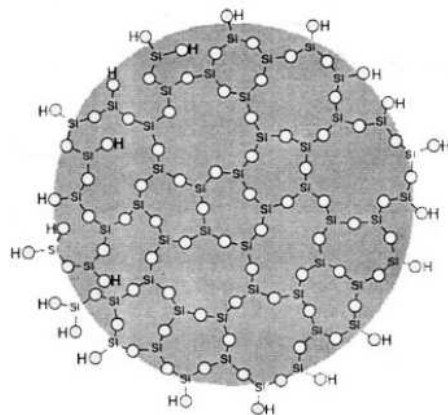
Είναι μη τοξικό, βιολογικά και χημικά αδρανές, άφλεκτο και με μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο. Επιπλέον δεν απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις κατά τη διάρκεια ή μετά τη χρήση του. Οι χρόνοι γέλης προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια και έχουν μεγάλο εύρος: στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι μπορούν να φτάσουν έως και τους 7 μήνες. Το κόστος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου είναι σχετικά χαμηλό, σε σύγκριση με το αντίστοιχο της χρήσης αργιλικών νανοσωματιδίων και εξαρτάται από την κατά βάρος περιεκτικότητα του διαλύματος. Θεωρώντας πορώδες $\eta=35\%$, το κόστος του κολλοειδούς οξειδίου της πυριτίας σε διαλύματα 5, 10 και 15% θα ήταν αντίστοιχα 60\$, 120\$ και 180\$ ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους, ενώ το κόστος για αργιλικά νανοσωματίδια θα ήταν 100÷200\$ ανά κυβικό μέτρο (Gallagher, 2000).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, ως υλικό εμποτισμού του υγρού πόρων των εδαφικών δοκιμίων στο παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα, επιλέχθηκε το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου, στο εξής αναφερόμενο ως κολλοειδής πυριτία (colloidal silica, CS). Ως βασικότεροι λόγοι αυτής της επιλογής θεωρούνται:

- Η ευχερέστερη διηθησιμότητα, σε όρους ομοιομορφίας και σταθερότητας μίγματος
- Η σαφέστερη και πληρέστερη βιβλιογραφική κατοχύρωση της αποτελεσματικότητας στη σταθεροποίηση άμμων έναντι ρευστοποίησης
- Το ελαφρώς μικρότερο κόστος

3.1 Χαρακτηριστικά σταθεροποιητή

Όπως προαναφέρθηκε το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica, ή CS), ή απλούστερα η κολλοειδής πυριτία, είναι ένα υδατικό διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων οξειδίου του πυριτίου (βλ. Σχήμα 5)



Σχήμα 5. Σχηματική απεικόνιση μορίου οξειδίου του πυριτίου (Silco Inc. 1995)

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, τα μόρια του οξειδίου του πυριτίου (δηλ. της πυριτίας) είναι σφαιρικά πολυμερή με αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια. Λόγω του μικρού μεγέθους και της αρνητικής φόρτισης της επιφάνειας, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις καθορίζουν τη συμπεριφορά και τη δομή τους στο διάλυμα. Η γέλη προκύπτει από σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης (siloxane, Si-O-Si) μεταξύ μορίων πυριτίας, απελευθερώνοντας νερό στο διάλυμα. Έτσι, το μέγεθος των σωματιδίων μεγαλώνει, κάτι που μακροσκοπικά οδηγεί σε αύξηση του ιξώδους και εν τέλει σε μετατροπή του διαλύματος σε γέλη. Η διαδικασία μετατροπής του διαλύματος σε γέλη είναι αέναη, και ο χρόνος που απαιτείται γι' αυτήν εξαρτάται από την ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων. Συνεπώς, μπορεί να ελεγχθεί με προσθήκη αλάτων και μεταβολή του pH, καθώς και οι δύο αυτοί παράγοντες μεταβάλλουν τις απωθητικές δυνάμεις των μορίων της πυριτίας στο διάλυμα. Για παράδειγμα, η προσθήκη χλωριούχου νατρίου σε διάλυμα πυριτίας μειώνει το διπλό στρώμα νερού που δημιουργείται στα μόρια της πυριτίας λόγω της ηλεκτροστατικής έλξης των διπόλων μορίων του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση των απωθητικών δυνάμεων μεταξύ των μορίων της πυριτίας, και επιταχύνει τη δημιουργία δεσμών σιλοξάνης που είναι το προαπαιτούμενο για να ξεκινήσει η διαδικασία μετατροπής του διαλύματος σε γέλη.

Η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή προϋποθέτει τη βιομηχανική διάθεση του προϊόντος, με πιστοποιημένες διαδικασίες παρασκευής, σε ικανές ποσότητες και μικρό σχετικά κόστος. Στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί η χρήση κυρίως τριών (3) διαφορετικών ειδών κολλοειδούς πυριτίας, και τα οποία διερευνήθηκαν ως προς το ιξώδες και τους χρόνους γέλης τους, για να εντοπιστεί το βέλτιστο είδος προς χρήση για την παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών. Τα διαλύματα κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου που επιλέχθηκαν από την Gallagher (2000) για τις δοκιμές ήταν τα Ludox®-SM, Ludox®-HS-40 και Ludox®-TM. Μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες αυτών των σταθεροποιητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά τύπων κολλοειδούς πυριτίας (Du Pont 1997)

Είδος πυριτίας	Ludox®-SM	Ludox®-HS-40	Ludox®-TM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50	95	225
Σταθεροποιητής	Νάτριο	Νάτριο	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό	Αρνητικό	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30	40	50
Ιξώδες (cP)	5.5	16	40
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7	12	22
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345	220	140

Με βάση τα αποτελέσματα της Gallagher (2000), μα και το γεγονός ότι είναι ο πλέον χρησιμοποιηθείς τύπος κολλοειδούς πυριτίας σε παθητική σταθεροποίηση εδαφών, για τις ενάγκες του Προγράμματος επελέγη ο τύπος Ludox®-SM. Διαθέτει τη μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια (345m²/g) και το μικρότερο μέγεθος κόκκων (7nm), καθιστώντας έτσι πιο μικρούς του χρόνους γέλης, σε σχέση με τους άλλους τύπους. Αντίστοιχα, χρειάζεται και μικρότερες ποσότητες κατά βάρος για να δημιουργηθεί γέλη, όντας έτσι και πιο οικονομική επιλογή.

Στην Ελλάδα, το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο σε μορφή διαλύματος με κατά βάρος συγκέντρωση 30% CS. Το pH του αρχικού διαλύματος είναι 10.0 και το ιξώδες του 5.5 cP (Duront, 1997). Έπειτα από τη διάλυσή του με νερό βρύσης σε κατά βάρος συγκέντρωση 5% CS, το ιξώδες του γίνεται περίπου ίσο με 2cP ή λίγο μικρότερο, αλλά εν πάσει περιπτώσει συγκρίσιμο με εκείνο του καθαρού νερού. Καθώς το διάλυμα παρασκευάζεται σε αλκαλικό περιβάλλον (pH = 10) για να αποφεύγεται η μετατροπή του σε γέλη πριν τον επιθυμητό χρόνο, ο χρόνος αυτός μπορεί να μειωθεί και εν πάσει περιπτώσει να βαθμονομηθεί με μείωση του pH (έως τιμές 5 έως 7) ή/και αυξάνοντας την ιοντική ισχύ του διαλύματος, γεγονότα που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας υδροχλωρικό οξύ και χλωριούχο νάτριο αντίστοιχα.

Οι χρόνοι γέλης της κολλοειδούς πυριτίας, και ο τρόπος ελέγχου τους, θα προσδιοριστούν με τη χρήση περιστροφικού ιξωδόμετρου, που αγοράστηκε για τις ανάγκες του προγράμματος, και αποτελεί αντικείμενο της Δράσης 2 που ακολουθεί.

4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Ακολούθως περιγράφεται η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων που θα χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης, καθώς και στις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, που θα πραγματοποιηθούν στο ΕΕΘΓΣΜ του Α.Π.Θ. Χάριν συμβατότητας των εργαστηριακών μετρήσεων, αντίστοιχες διαδικασίες θα χρησιμοποιηθούν και στα υπόλοιπα συνεργαζόμενα εργαστήρια

Γεωτεχνικής Μηχανικής μελών της ΚΕΟ, με τις όποιες μικροδιαφορές να οφείλονται στους διαφορετικούς τύπους συσκευών που το κάθε εργαστήριο κατέχει και θα χρησιμοποιήσει στο Πρόγραμμα. Συνεπώς, η πλήρης παρουσίαση των διαδικασιών ενός εργαστηρίου κρίνεται ως επαρκής.

Στην περίπτωση των φυσικών (κορεσμένων με νερό) δοκιμίων, αυτά προετοιμάζονται απ' ευθείας στη βάση της τριαξονικής συσκευής, σε μεταλλική μήτρα (ονομαστικό ύψος προς ονομαστική διάμετρο=100/50mm) σύμφωνα με τη μέθοδο της υγρής υποσυμπύκνωσης (Ladd, 1978). Μετά τη διαμόρφωση των δοκιμίων ακολουθεί το στάδιο του κορεσμού: αρχικά, διοχετεύεται CO₂ στο δοκίμιο, από τη βάση προς την κορυφή και στη συνέχεια απαερωμένο νερό για την αντικατάσταση του CO₂. Ακολουθεί η μέθοδος της διαδοχικής αύξησης της εσωτερικής πίεσης του ύδατος των πόρων του δοκιμίου, με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης της κυψέλης (back pressure method), μέχρι τον πλήρη κορεσμό (παράμετρος B του Skempton, $B \geq 0.96$).

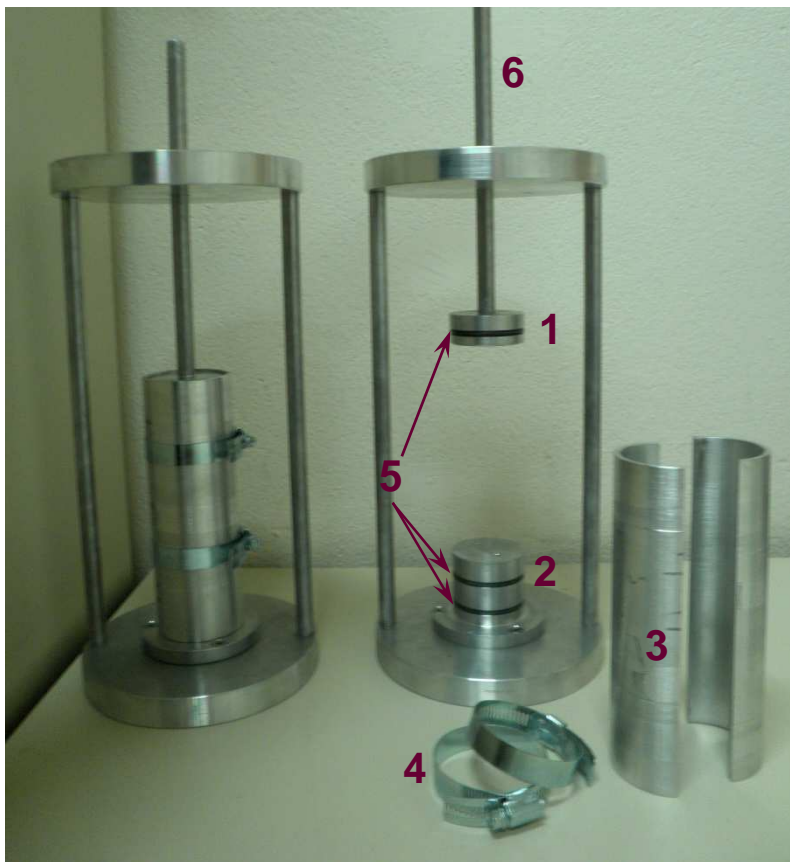
Στην περίπτωση των σταθεροποιημένων εδαφικών δοκιμίων, η προετοιμασία τους θα γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένα μεταλλικά πλαίσια που σχεδιάστηκαν για τους σκοπούς του προγράμματος, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική βιβλιογραφία (Σχήμα 6).

Συγκεκριμένα, κάθε δοκίμιο θα προετοιμάζεται με τη μέθοδο της υποσυμπύκνωσης, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, σε ειδικά διαμορφωμένη μεταλλική μήτρα (Σχήμα 7). Ακολούθως και όπως στην περίπτωση των φυσικών δοκιμίων, θα διοχετεύεται από τη βάση προς την κορυφή CO₂ και εν συνεχεία απαερωμένο νερό, που παρέχονται από Πίνακα Ελέγχου που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του προγράμματος. Με τον ίδιο τρόπο θα διοχετεύεται έπειτα το διάλυμα CS από τη βάση προς την κορυφή, μέχρις ότου να πληρωθούν τα κενά των πόρων του εδάφους με αυτό. Το δοκίμιο θα αφήνεται μέσα στη μεταλλική μήτρα μέχρις ότου γίνει γέλη. Μετά θα αφαιρείται η μεταλλική μήτρα και το δοκίμιο θα μεταφέρεται σε θάλαμο σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας για ωρίμανση, μέχρι τη στιγμή της φόρτισής του.

Στον Πίνακα Ελέγχου που αναφέρθηκε προηγουμένως αναρτώνται η δεξαμενή απαέρωσης και παροχής νερού και η δεξαμενή παροχής CS (Σχήμα 8) που σχεδιάστηκαν για το παρόν πρόγραμμα. Επιπλέον, μέσω του Πίνακα θα πραγματοποιείται ο έλεγχος της ροής του νερού και της CS στα εδαφικά δοκίμια. Ενδεικτικά σχέδια του Πίνακα Ελέγχου παρατίθενται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 6. Μεταλλικά πλαίσια διαμόρφωσης σταθεροποιημένων εδαφικών δοκιμών.

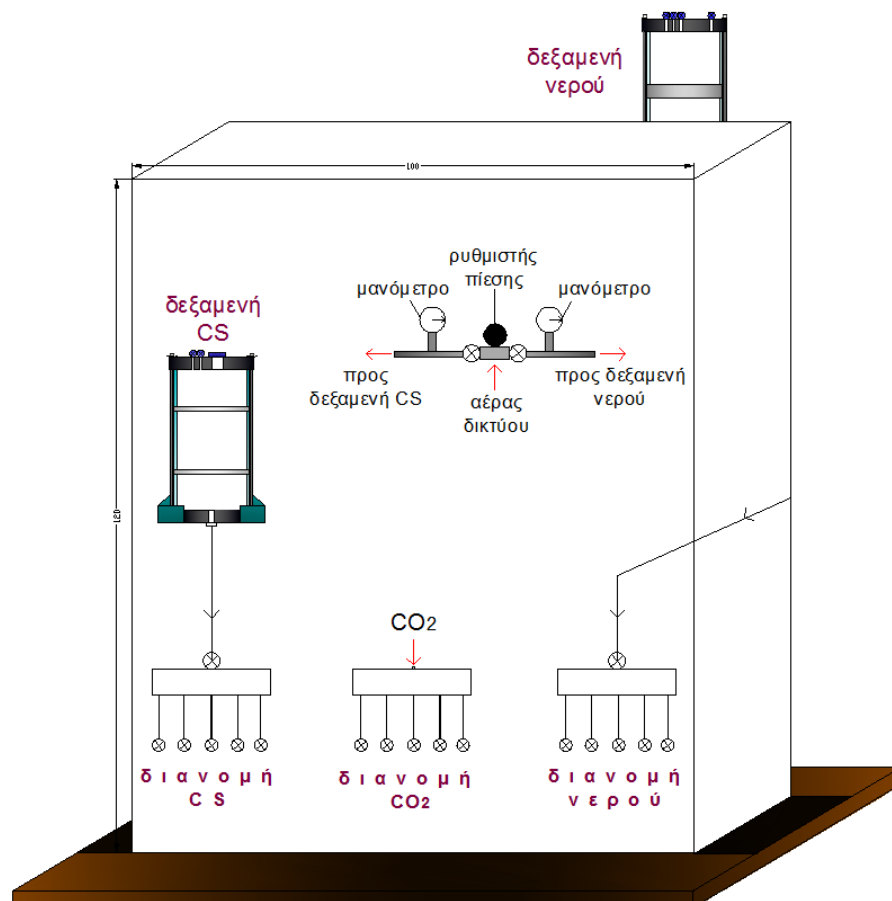


1. άνω πλάκα δοκιμίου
2. κάτω πλάκα δοκιμίου
3. διαιρετή μεταλλική μήτρα
4. σφιγκτήρες
5. o-rings
6. στέλεχος εφαρμογής φορτίου στο δοκίμιο για αποφυγή διόγκωσης

Σχήμα 7. Μεταλλικά πλαίσια διαμόρφωσης σταθεροποιημένων εδαφικών δοκιμών και στοιχεία που τα απαρτίζουν.



Σχήμα 8. Δεξαμενή απαέρωσης νερού (αριστερά) και δεξαμενή παροχής CS (δεξιά).



Σχήμα 9. Ενδεικτική όψη του Πίνακα Ελέγχου που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του Προγράμματος.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Bolisetti, T., Reitsma, S. & Balachandar, R. (2009). 'Experimental investigations of colloidal silica grouting in porous media'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 5, 697-700.
- Conlee, C. T. (2010). 'Dynamic properties of colloidal silica soils using centrifuge model tests and a full-scale field test'. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- DeJong J. T., Fritzges M. B., Nusslein K. (2006), "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11): 1381-1392.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Antonio-Izarraras, V. M., Bandini, P. & López-Molina, J. A. (2008). 'Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout'. *Can. Geotech. Journal*, 45, 1345-1355.
- DuPont. (1997). Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling. *product information*.
- El Mohtar C. S. (2008), "Pore fluid engineering: An autoadaptive design for liquefaction mitigation", PhD Thesis, Purdue University
- El Mohtar, C. S., Santagata, M., Bobet, A., Drnevich, V. P. & Johnston, C. (2008b). 'Effect of plastic fines on the small strain stiffness of sand'. *Proceedings*, 4th Intern. Symposium on deformational characteristics of geomaterials (IS-Atlanta), September 22-24.
- El Mohtar, C. S., Clarke, J., Bobet, A., Santagata, M., Drnevich, V. P. & Johnston, C. (2008a). 'Cyclic response of a sand'. *Proceedings*, 4th Intern. Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Sacramento, May 18-22.
- Gallagher, P. M. (2000). 'Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk'. *Ph.D. dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Gallagher, P. M., Conlee, S. T. & Rollins, K. M. (2007). 'Full-Scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 2, 186-196.
- Gallagher, P. M. & Mitchell, J. K. (2002). 'Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand'. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 9-12, 1017-1026.
- Gratchev, I. B. & Sassa, K. (2007). 'Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 2, 271-279.
- Gratchev, I. B., Sassa, K., Osipov, V. I., Fukuoka, H. & Wang, G. (2007). 'Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it'. *Geotech. Geol. Eng.*, 25: 349-367.
- Haldavnekar, V., Bobet, A., Santagata, M. & Drnevich, V. (2004). 'Soil treatment with a thixotropic fluid: an autoadaptive design for liquefaction prevention'. *Proceedings*, 11th Intern. Conference on Soil dynamics and earthquake engineering & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 2, 553-560.
- Hunt, J., Ezzedine, S., Bourcier, W., Roberts, S. & Roberts, J. (2012). 'Silica gel behavior under different EGS chemical and thermal conditions: an experimental study'. *Proceedings of the 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, SGP-TR-194.

- Kabashima, Y. & Towhata, I. (2000). 'Improvement of dynamic strength of sand by means of infiltration grouting'. *3rd International Conference on ground improvement techniques*, Singapore, 25-26 September.
- Kodaka, T., Ohno, Y. & Takyu, T. (2005). 'Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout'. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Conf. 16, Vol. 2, 401-404.
- Kodaka, T., Oka, F., Ohno, Y., Takyu, T. & Yamasaki, N. (2005). 'Modeling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand'. *Geomechanics, Testing, Modeling and Simulation, Geotechnical Special Publication No. 143*, ASCE, 205-216.
- Lin, Y. (2006). 'Colloidal silica transport mechanisms for passive site stabilization of liquefied soils'. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- Mollamahmutoglu, M. & Yilmaz, Y. (2010). 'Pre- and post-cyclic loading strength of silica-grouted sand'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 163, Issue GE6, 343-348.
- Pamuk, A., Gallagher, P. M., and Zimmie, T. (2007). 'Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique'. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 864-874
- Papadopoulou, A. I. (2008). 'Laboratory investigation into the behaviour of silty sands under monotonic and cyclic loading'. *PhD dissertation*, Civil Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- Papadopoulou, A. I. & Tika, Th. (2008). 'The effect of fines on critical state and liquefaction characteristics of silty sands'. *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 5, 713-725.
- Persoff, P., Moridis, J., Apps, J. A. & Pruess, K. (1998). 'Evaluation tests for colloidal silica for use in grouting applications'. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 21, No. 3, September, 264-269.
- Persoff, P., Apps, J., Moridis, J. & Whang, J. M. (1999). 'Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 6, Paper No. 16545
- Silco International;. (2005). Colloidal Silica Technical Information.
- Spencer, L. M., Rix, G. J. & Gallagher, P. (2008), 'Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties'. *Proceedings, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (GSP 181), Sacramento, CA.
- Towhata, I. (2007). 'Developments of soil improvement technologies for mitigation of liquefaction risk'. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering - Invited Lectures*, 355-383, Springer.
- Van Paasen L. A, Harkes M. P., van Zwieten G. A., van der Zon W. H., van der Star W. R. L., van Loosdrecht M. C. M. (2009), "Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method", *Proceedings, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, M. Hamza et al (eds), Egypt.
- Vipulanandan, C. & Ata, A. (2000). 'Cyclic and damping properties of silicate-grouted sand'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 7, 650-656.