



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΑΜΜΩΝ



ΜΠΙΚΟΣ ΖΗΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Β. Ν. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017

**Επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στη συμπεριφορά
κορεσμένων λεπτόκοκκων άμμων**

**Effect of stabilization with colloidal silica on the
mechanical behavior of saturated fine sands**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω όλους, όσοι με βοήθησαν να επιτύχω τους στόχους μου όλα αυτά τα χρόνια, με κορύφωση την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω ονοματικά την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Δρ. Βασιλική Ν. Γεωργιάννου για την αρωγή, τη συνεχή καθοδήγηση και την αστείρευτη μεταλαμπάδευση των γνώσεων της, τους υποψήφιους Διδάκτορες Ε.Μ.Π. Παναγιώτη Τριαντάφυλλο και Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου καθώς τον τεχνικό του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής Ε.Μ.Π. κ. Στέλιο Τσεντίδη για την εργαστηριακή τους βοήθεια, την άψογη συνεργασία και την αμέριστη συμπαράστασή τους και, τέλος, τον Δρ. Ιωάννη-Ορέστη Γεωργόπουλο για την τεχνική γνώση και κατάρτιση που μου προσέφερε.

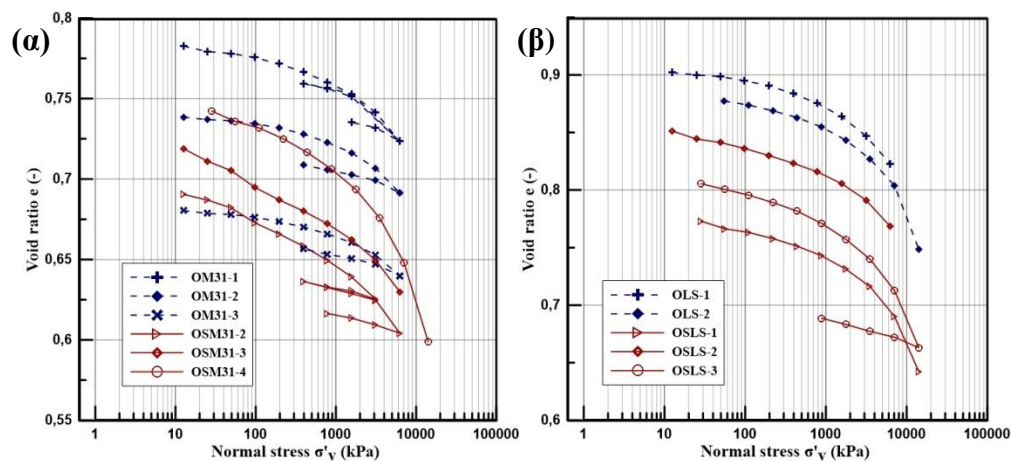
ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

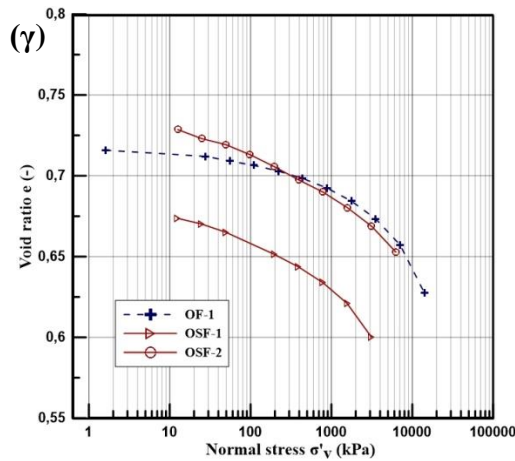
Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την παθητική σταθεροποίηση των αμμωδών εδαφικών υλικών με κολλοειδή πυριτία. Η σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο περιορισμού του κινδύνου ρευστοποίησης, σε περιοχές με ευαίσθητες σε ρευστοποίηση υποδομές. Πρόκειται για ένα πολλά υποσχόμενο σταθεροποιητή, μιας και μπορεί να εισπιέζεται κάτω από υφιστάμενες κατασκευές και να διοχετεύεται στη ρευστοποιήσιμη εδαφική μάζα μέσω φυσικής ή τεχνητής ροής του υπογείου νερού. Επιπρόσθετα, το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας έχει μικρό ιξώδες και ένα μεγάλο εύρος ελεγχόμενου χρόνου πήξης. Στην έρευνα αυτή, για να μελετηθεί η επίδραση του σταθεροποιητή στα μη συνεκτικά εδάφη εκτελέστηκαν δοκιμές συμπίεσόμετρου και απ' ευθείας διάτμησης σε φυσικές και σε σταθεροποιημένες άμμους M31, Longstone και Fontainebleau. Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία στη μηχανική συμπεριφορά κορεσμένων λεπτόκοκκων αμμωδών υλικών, αλλά και πως το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων τους επηρεάζει την απόκριση τους.

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε, με την εμπορική ονομασία Ludox® SM, είναι μία υδάτινη διασπορά (υγρόλυμα) διακριτών, συμπαγών (μη πορωδών), σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με διαστάσεις στο κάτω όριο της κολλοειδούς κλίμακας. Τα σωματίδια, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, μπορούν να αναπτύξουν πολύ ισχυρούς δεσμούς συνάφειας και συνοχής. Η διάμετρος των κολλοειδών σφαιρών είναι 7 nm και η ειδική επιφάνεια τους είναι ίση με $345 \text{ m}^2 / \text{g}$. Το υγρόλυμα Ludox® SM έχει περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 ίση με 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένο σε αλκαλικό $\text{pH}=10$. Ο παράγοντας σταθεροποίησης του υγρολύματος είναι το οξείδιο του νατρίου Na_2O . Ο όρος «σταθεροποιημένο έδαφος» σημαίνει ότι το έδαφος έχει σχηματισμένη γέλη πυριτίας μέσα στους πόρους του. Η χημική αντίδραση σχηματισμού των δεσμών ονομάζεται συμπύκνωση, σύμφωνα με την οποία δύο ομάδες σιλανόλης Si-OH στην επιφάνεια δύο σωματιδίων συνδέονται και σχηματίζουν έναν δεσμό σιλοξάνης Si-O-Si και ένα μόριο νερού H_2O . Η αντίδραση της συμπύκνωσης, όπως αποκαλύπτει ο ίδιος ο όρος, οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή και εκτοπισμό νερού. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό συμπύκνωσης είναι πολύ σημαντικοί, καθώς το υγρόλυμα πυριτίας αναμένεται να εγχυθεί στην εδαφική μάζα, στο χρονικό διάστημα που το ιξώδες του έχει χαμηλή τιμή (χαμηλότερη από 3.5–4.0

cP). Μετά από τη σύντομη περίοδο έγχυσης το υγρόλυμα αναμένεται να μετατραπεί απότομα σε γέλη, προτού απομακρυνθεί από τη στοχευόμενη περιοχή. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση πυριτίας και αλάτων, τόσο πιο ταχύς είναι ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοζάνης. Ο ρόλος του pH είναι περισσότερο σύνθετος και η επίδραση του δεν είναι μονότονη και αναμένεται ο χρόνος πήξης της γέλης να είναι ελάχιστος σε ενδιάμεσες τιμές pH ($5 < \text{pH} < 7$). Το παχύρευστο υγρόλυμα μετατρέπεται σταδιακά σε μία ελαστική γέλη. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό πυριτικό σκελετό και την παγιδευμένη υδάτινη φάση. Το σταθεροποιημένο κοκκώδες έδαφος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας μετά τον σχηματισμό της γέλης μέσα στους πόρους. Η κολλοειδής πυριτία διοχετεύεται ομοιόμορφα στο εδαφικό υλικό και καλύπτει όλη την επιφάνεια των κόκκων προσδίδοντας τις ευεργετικές της ιδιότητες σε όλη την έκταση του υλικού.

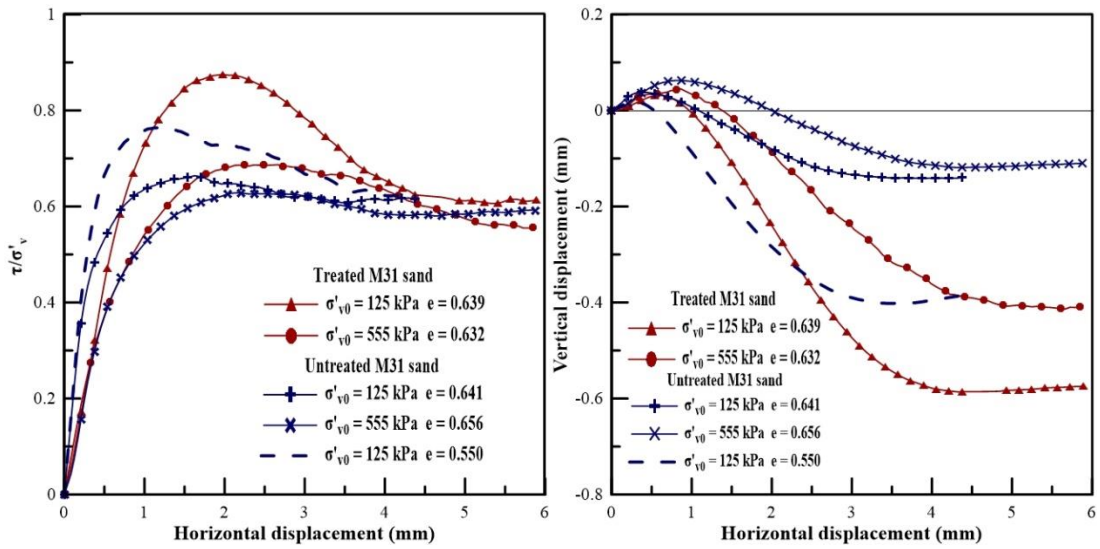
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, μία σειρά από δοκιμές συμπίεσμετρου εκτελέστηκαν σε φυσικές και σε σταθεροποιημένες άμμους M31, Longstone και Fontainebleau. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφύσηση ξηρού εδαφικού υλικού μέσα στο πληρωμένο με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας δαχτυλίδι στερεοποίησης και φορτίστηκαν με υψηλές τάσεις (έως 14 MPa περίπου). Η σταθεροποιημένη άμμος M31 εμφάνισε μεγαλύτερη ενδοσιμότητα από τη φυσική. Αντίστοιχα αποτελέσματα έδωσαν και οι δοκιμές στην άμμο Fontainebleau. Αντίθετα, στη γωνιώδη άμμο Longstone, η σταθεροποίηση δεν επηρέασε την καθίζηση του υλικού, οδηγώντας στο συμπέρασμα πως το σχήμα του κόκκου της άμμου επηρεάζει την ενδοσιμότητα του σταθεροποιημένου υλικού. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1.





Σχήμα 1. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσόμετρου για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου (α) M31, (β) Longstone και (γ) Fontainebleau.

Πραγματοποιήθηκε, επίσης, μία σειρά δοκιμών απ' ευθείας διάτμησης σε φυσικές και σταθεροποιημένες άμμους M31 και Longstone. Η μέθοδος παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμίων ήταν παρόμοια με αυτήν, που χρησιμοποιήθηκε στα δοκίμια των δοκιμών συμπίεσόμετρου. Η διάτμηση εκτελέστηκε με επιβολή σταθερής ταχύτητας 0,005 mm/min για τα σταθεροποιημένα και 0,5 mm/min για τα φυσικά δοκίμια. Τα αποτελέσματα σχεδιάζονται ως καμπύλες λόγου τάσεων τ/σ'_v – οριζόντιας μετατόπισης και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης. Η βασική διαφορά στη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου και του φυσικού εδαφικού δοκιμίου είναι ότι το πρώτο εμφανίζει αυξημένη αντοχή σε διάτμηση καθώς και μεγαλύτερη διαστολικότητα και συνολική διαστολή. Η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης, η αύξηση της οποίας συνεπάγεται μείωση της διατμητικής αντοχής και της διαστολής του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η περιβάλλουσα αστοχίας να είναι μια καμπύλη γραμμή. Τέλος, παρατηρήθηκε πως η απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου δεν εξαρτάται από το σχήμα των κόκκων της άμμου, παρά μόνο κατά την κρίσιμη κατάσταση. Χαρακτηριστικά διαγράμματα φαίνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (αριστερά) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (δεξιά) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 (κόκκινες καμπύλες) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31 (μπλε καμπύλες).

EXTENDED SUMMARY

In this Diploma Thesis the effect of passive stabilization of non-cohesive soils on their subsequent behavior is examined using a stabilizing colloidal substance. This is an alternative method for non-invasive and non-disruptive mitigation of liquefaction risk, at developed sites susceptible to liquefaction. Colloidal silica is a potential stabilizer because it can be injected underneath existing structures and be delivered through the liquefiable soil mass using the natural or enhanced groundwater flow. Furthermore, colloidal silica grout has a low viscosity and a wide range of controllable gel times. In this Diploma Thesis, in order to investigate the effect of colloidal silica on the response of non-cohesive soils, oedometer and direct shear tests were performed on treated and untreated M31, Longstone and Fontainebleau sands. The main goals of the project are to investigate the influence of stabilization with colloidal silica grout on the mechanical behavior of saturated fine sands, and to assess how the grain shape and angularity affects their response.

The colloidal silica used in this project, under the commercial Ludox® SM brand, is a water dispersion (aqua-sol) of discrete, compact (not porous), spherical particles of amorphous silica, with dimensions at the lower end of the colloidal scale. The particles can develop, under certain conditions, very strong adhesive and cohesive bonds. The diameter of the solid colloidal spheres is 7 nm and their specific surface is equal to $345 \text{ m}^2 / \text{g}$. The Ludox® SM sol has a concentration of silicon dioxide SiO_2 equal to 30% wt. and is stabilized at alkaline $\text{pH}=10$. The stabilizing agent of the sol is sodium oxide Na_2O . The term “stabilized soil” means that the soil has formed silica gel inside the pores. The chemical reaction of bond formation is called condensation, according to which two surface silanol groups Si-OH of two different particles are connected to form a siloxane bond Si-O-Si and a water molecule H_2O . The condensation reaction, as the term actually indicates, leads to contraction of the solid silica phase and expulsion of the liquid phase. The factors that affect the condensation rate are very important, as the silica sol is expected to be injected into the soil mass, as long as the viscosity is low (lower than 3.5–4.0 cP). After the short period injection time the sol is expected to quickly transform into a gel, before it is leached away from the target region. The higher the temperature and the concentration of silica and salt, the faster the rate of formation of siloxane bonds is. The role of pH is more complicated and its influence is not monotonic and at intermediate values of pH ($5 < \text{pH} < 7$) the gel time is expected to be minimum. The viscous sol

progressively turns into an elastic gel. The saturated gel is a two-phase material made of a solid silica skeleton which encloses the liquid phase. The stabilized granular soil develops some kind of cohesion after the gel formation inside the soil pores. The colloidal silica is channeled evenly in the soil and covers the whole surface of the grains offering them its beneficial properties.

As part of this thesis, a series of oedometer tests were conducted on natural and stabilized M31, Longstone and Fontainebleau sands. The stabilized specimens were produced by pluviation of dry soil material into the oedometer ring filled with silica sol and were tested under high pressures (up to approximately 14MPa). The treated M31 sand showed increased compressibility in comparison with the untreated. Similar results were noticed when testing Fontainebleau sand. On the contrary, stabilizing the angular Longstone sand did not affect the settlement of the material, leading to the conclusion, that the grain shape plays an important role on the compressibility of a treated specimen. Typical test results are shown in Figure 1.

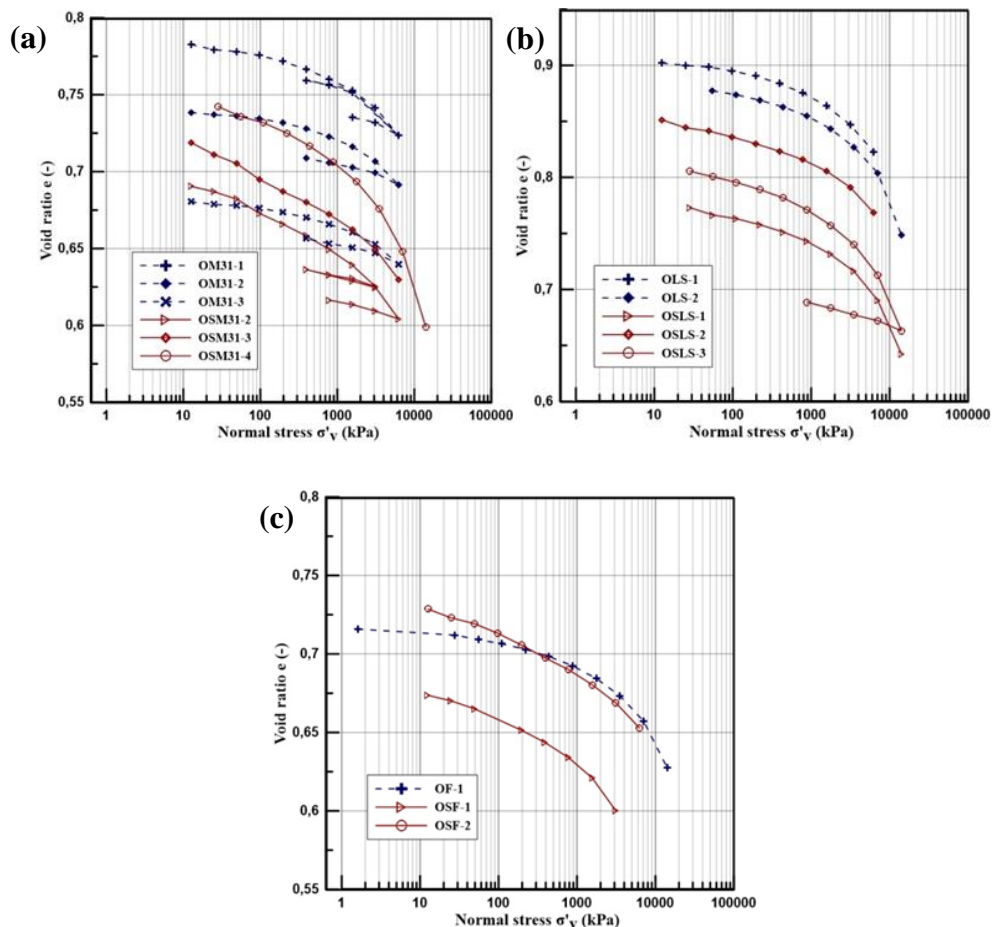


Figure 3. Oedometer test results for treated (red curves) and untreated (blue curves) specimens of (a) M31 sand, (b) Longstone sand and (c) Fontainebleau sand.

A series of direct shear tests on natural and stabilized M31 and Longstone sand were, also, conducted in our laboratory, as part of this dissertation. The preparation method of the treated specimens was similar to this used in the oedometer tests. In the shear box strain rates of 0.005 mm/min and 0.5 mm/min were applied on the treated and the untreated specimens, respectively. The results are depicted as stress ratio τ/σ'_v against horizontal displacement and vertical displacement against horizontal displacement curves. The main difference between the response of the treated and untreated sand specimen is that the former one shows higher peak strength, dilatancy rate and final dilation than the latter. The mechanical behavior of the treated sand depends on the stress level, the increase of which results in lower peak strength and dilation of the material. Finally, it was noticed that the grain shape does not affect the response of the treated sand, except during the critical state. Typical test results are illustrated in Figure 2.

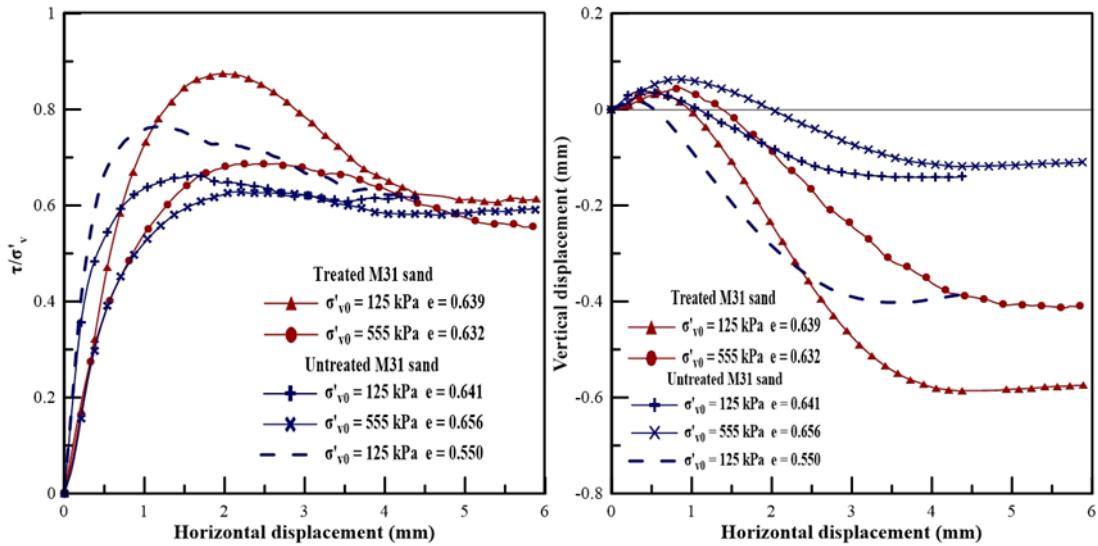


Figure 2. Stress ratio τ/σ'_v against horizontal displacement curves (left) and vertical displacement against horizontal displacement curves (right) from direct shear tests on treated (red curves) and untreated (blue curves) M31 sand specimens.

Λίστα Συμβόλων

c	Συνοχή	cohesion
D_{50}	Διάμετρος μέσου κόκκου	mean particle size
D_r	Σχετική πυκνότητα	relative density
e	Δείκτης πόρων	void ratio after consolidation
e_{max}	Μέγιστος δείκτης πόρων	maximum void ratio
e_{min}	Ελάχιστος δείκτης πόρων	minimum void ratio
G_s	Ειδικό βάρος	specific gravity
ϵ_{vol}	Ογκομετρική παραμόρφωση	volumetric strain
σ'_{v0}	Αρχική κατακόρυφη ενεργός τάση	initial normal effective stress
σ'_v	Κατακόρυφη ενεργός τάση	current normal effective stress
σ'_{vp}	Κατακόρυφη ενεργός τάση κατά την κορυφαία αντοχή	normal effective stress at peak strength
σ'_{vu}	Κατακόρυφη ενεργός τάση κατά την κρίσιμη κατάσταση	normal effective stress at ultimate strength
τ	Διατμητική τάση	shear stress
τ_p	Διατμητική τάση κατά την κορυφαία αντοχή	shear stress at peak strength
τ_u	Διατμητική τάση κατά την κρίσιμη κατάσταση	shear stress at ultimate strength
ϕ_u	Γωνία τριβής κατά την κρίσιμη κατάσταση	angle of shearing resistance at ultimate strength
ϕ_p	Γωνία τριβής κατά την κορυφαία αντοχή	angle of shearing resistance at peak strength

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1.	Αντικείμενο της έρευνας	1
1.2.	Στόχοι της έρευνας	2
1.3.	Δομή της εργασίας	2
2	ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ	5
2.1.	Επιστήμη των Κολλοειδών	5
2.1.1.	Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών	5
2.1.2.	Ορολογία	6
2.1.3.	Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox SM	7
2.2.	Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας	9
2.2.1.	Συσχέτιση διαδικασιών με τη σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών	9
2.2.2.	Πήξη της γέλης	11
2.2.3.	Ωρίμανση	13
2.2.4.	Ξήρανση	14
2.2.5.	Αυτοϊάση	14
3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	21
3.1.	Συμπεριφορά φυσικού εδάφους κατά τη διάτμηση	21
3.1.1.	Νόμος της αστοχίας	21
3.1.2.	Διαστολικότητα	22
3.1.3.	Τυπική συμπεριφορά αμμωδών εδαφών κατά τη δοκιμή απ' ευθείας διάτμησης	23
3.2.	Συμπεριφορά σταθεροποιημένου εδάφους	27
4	ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΛΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	35
4.1.	Πειραματικός προσδιορισμός μεγέθους κόκκων	35

4.1.1.	Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα.....	36
4.2.	Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων.....	37
4.3.	Φυσικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά.....	38
4.3.1.	Άμμος M31	38
4.3.2.	Άμμος Longstone	39
4.3.3.	Άμμος Fontainebleau	39
4.4.	Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά	40
5	ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ.....	43
5.1.	Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασίας παρασκευής δοκιμών.....	43
5.1.1.	Περιγραφή συσκευής.....	43
5.1.2.	Παρασκευή δοκιμών.....	44
5.2.	Εκτέλεση της δοκιμής	45
5.2.1.	Συμμόρφωση συσκευής.....	45
5.2.2.	Διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής.....	46
5.3.	Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσόμετρου.....	47
5.3.1.	Άμμος M31	47
5.3.2.	Άμμος Longstone	51
5.3.3.	Άμμος Fontainebleau	52
6	ΔΟΚΙΜΗ ΑΠ' ΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	55
6.1.	Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασίας παρασκευής δοκιμών.....	55
6.1.1.	Περιγραφή εξοπλισμού.....	55
6.1.2.	Παρασκευή δοκιμών.....	58
6.2.	Διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής	60
6.3.	Αποτελέσματα δοκιμών απ' ευθείας διάτμησης	61
6.3.1.	Συμπεριφορά φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου κατά τη διάτμηση.....	61

6.3.2.	Επίδραση σχήματος κόκκου άμμου.....	75
6.3.3.	Επίδραση υγρασίας σταθεροποιημένων δοκιμίων.....	77
6.3.4.	Αυτοΐαση (self-healing).....	80
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά της κolloειδούς πυριτίας Ludox-SM.....	9
Πίνακας 4.1 Διαστάσεις οπών κοσκίνων.....	37
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά άμμων M31, Longstone και Fontainebleau.....	41
Πίνακας 5.1 Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή στο δοκίμιο για φόρτιση 1 kg.....	47
Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά δακτυλιδιών συμπιεσόμετρου.....	47
Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας στοιχείων των δοκιμών συμπιεσόμετρου.....	54

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Παθητική σταθεροποίηση εδάφους για την άμβλυνση του κινδύνου ρευστοποίησης. Πηγή: Gallagher (2000).	1
Σχήμα 2.1 Κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής τετραεδρικής δομικής ιοντικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Πηγή: Bergna και Roberts (2006).	6
Σχήμα 2.2 Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κolloειδούς πυριτίας. Το τέταρτο οξυγόνο της βασικής τετραεδρικής μονάδας SiO_4 βρίσκεται εκτός του επιπέδου της σελίδας. Πηγή: Gallagher (2010).....	8
Σχήμα 2.3 Σε ενδιάμεσες τιμές pH το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως καταλύτης στην αντίδραση της συμπύκνωσης. Πηγή: Brinker και Scherer (1990).	8
Σχήμα 2.4 Σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών. (2), (3): υδρόλυση και συμπύκνωση, (4): δημιουργία σωματιδίων από υγρές διασπορές και γέλες, (5): πήξη γέλης, (6): ωρίμανση γελών, (7): θεωρία παραμορφώσεων και ροής στις γέλες, (8): ξήρανση, (9): ανάπτυξη δομής κατά την στερεοποίηση, (10): χημεία επιφανειών και χημικές τροποποιήσεις, (11): συσσωμάτωση και συμπύκνωση με μείωση της διεπιφάνειας στερεής – αέριας φάσης, υπό καθεστώς υψηλών θερμοκρασιών, (12): σύγκριση κεραμικών που παρήχθησαν από γέλη και συμβατικών κεραμικών, (13): σχηματισμός φιλμ, (14): εφαρμογές. Πηγή: Brinker και Scherer (1990).....	10
Σχήμα 2.5 Σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου με CS=10%wt. Πάνω αριστερά και στη μέση: το δοκίμιο αμέσως μετά την ωρίμανση των 30 ημερών, χωρίς να υποστεί διάτμηση. Πάνω δεξιά: το δοκίμιο μετά την αποθήκευση μέσα σε νερό για 45 ημέρες. Κάτω	

αριστερά: το δοκίμιο εκτεθειμένο στον αέρα για 8 ώρες. Κάτω στη μέση και δεξιά: Το δοκίμιο εκτεθειμένο στον αέρα για 3 ημέρες. Η άμμος καταρρέει με το άγγιγμα. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).....	11
Σχήμα 2.6 Καμπύλες χρόνου πήξης γέλης - pH υγρολύματος Ludox-SM περιεκτικότητας 10% wt .για διάφορες τιμές περιεκτικότητας άλατος (NaCl). Πηγή: Gallagher (2000).....	12
Σχήμα 2.7 Αριστερά: Καμπύλες ιξώδους - χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας (Ludox-SM περιεκτικότητας 10% wt.) χωρίς την προσθήκη άλατος για τιμές pH=3.00 - 6.88. όσο αυξάνεται η τιμή του pH, η καμπύλη μετατοπίζεται δεξιότερα στο διάγραμμα. Πηγή: Agaroulaki και Papadimitriou (2015). Δεξιά: Καμπύλες ιξώδους - χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας (Ludox-SM περιεκτικότητας 10% wt.) με κανονικότητα 0,03 N για τιμές pH=3.01 – 7.55. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).....	13
Σχήμα 2.8 Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης της γέλης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του εδαφικού υλικού. Πηγή: Yonekura et al. (2001) και Miwa et al. (2001).....	14
Σχήμα 2.9 Πρώτη σειρά από αριστερά προς τα δεξιά: το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας CS=10% wt. τη στιγμή που παρασκευάζεται, τη στιγμή που μετατρέπεται σε ελαστική γέλη και έπειτα, κατά την ωρίμανση. Δεύτερη σειρά: συστολή ξήρανσης της γέλης. Τρίτη σειρά από αριστερά προς τα δεξιά: καθαρή κολλοειδής πυριτία CS=10% wt. μετά από μερική ξήρανση σε θερμοκρασία δωματίου, πυριτία μετά από πλήρη ξήρανση σε θερμοκρασία δωματίου και, τέλος, η κολλοειδής πυριτία σε μερική και πλήρη ξήρανση της γέλης. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).....	16
Σχήμα 2.10 Δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό αστράγγιστες συνθήκες. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).....	17
Σχήμα 2.11 Σύνδεση δύο σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά την πήξη της γέλης. Πηγή: Gallagher (2000).....	18
Σχήμα 2.12 Η χημική αντίδραση της συμπύκνωσης. Πηγή: Brinker και Scherer (1990).	18
Σχήμα 2.13 Ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίου καθαρής πυριτίας CS=6.5%, ύστερα από ωρίμανση 30 ημερών μέσα σε νερό. Παρουσιάζονται: (α) τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων της δοκιμής και (β) φωτογραφίες του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή. Πηγή: Towhata (2008).....	19

Σχήμα 2.14 Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρολύματα με $pH=6.00$, με κανονικότητα 0.03 N και με διάφορες περιεκτικότητες $CS\ (\%)$. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).....	19
Σχήμα 3.1 Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επαφή δύο κόκκων ενός αμμόδους υλικού. Πηγή: Καββαδάς (2005).....	22
Σχήμα 3.2 Τυπικό διάγραμμα Mohr-Coulomb. Πηγή: Καββαδάς (2005).....	22
Σχήμα 3.3 Αποτελέσματα στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε διάφορες ταχύτητες διατμητικής παραμόρφωσης. Αριστερά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων- αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για χαλαρά δοκίμια υπό ενεργό πίεση 98 kPa . Δεξιά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων- αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για μέσης πυκνότητας δοκίμια υπό ενεργό πίεση 98 kPa . Πηγή: Yamamuro et al. (2011).....	26
Σχήμα 3.4 Αποτελέσματα στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε διάφορες ταχύτητες διατμητικής παραμόρφωσης. Αριστερά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων- αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για χαλαρά δοκίμια υπό ενεργό πίεση 350 kPa . Δεξιά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων- αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για μέσης πυκνότητας δοκίμια υπό ενεργό πίεση 350 kPa . Πηγή: Yamamuro et al. (2011).....	27
Σχήμα 3.5 Διαγράμματα ανακυκλικής δοκιμής άμμου Monterey με $D_r=22\%$, $CSR=0.27$. Πηγή: Gallagher και Mitchell (2002).	28
Σχήμα 3.6 Διαγράμματα ανακυκλικών δοκιμών σταθεροποιημένης άμμου Monterey με (α) $10\% \text{ wt.}$ και (β) $5\% \text{ wt.}$ κολλοειδή πυριτία. Πηγή: Gallagher και Mitchell (2002).	29
Σχήμα 3.7 Διαγράμματα: (α) ισότροπης συμπίεσης για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS, (β) μεταβολής του bulk modulus σε σχέση με την ενεργό τάση για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).....	30
Σχήμα 3.8 Μηχανική απόκριση (α) σταθεροποιημένης και (β) μη σταθεροποιημένης άμμου TS για διάφορες τιμές ενεργών πιέσεων. Πηγή: Porcino et al. (2012).	31
Σχήμα 3.9 Επιρροή της ενεργού τάσης στο μέγιστο q/p' για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS (από στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές). Πηγή: Porcino et al. (2012).	32

Σχήμα 3.10 Περιβάλλουσες αστοχίας κατά την κορυφαία κατάσταση για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).	33
Σχήμα 3.11 Περιβάλλουσα κατά την κρίσιμη κατάσταση για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).	33
Σχήμα 3.12 Διαγραμμα διαστολικότητας-λόγου q/p' για σταθεροποιημένη (αριστερά) και μη σταθεροποιημένη (δεξιά) άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).	34
Σχήμα 4.1 Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης 100×) των κόκκων της (α) άμμου M31, (β) άμμου Longstone και (γ) άμμου Fontainebleau. Πηγή: Tsomokos και Georgiannou (2010).	39
Σχήμα 4.2 Κοκκομετρικές καμπύλες.	40
Σχήμα 4.3 Φωτογραφίες (από μικροσκόπιο) σταθεροποιημένης M31 άμμου.	41
Σχήμα 5.1 Συσκευή Wykeham Farrance No 24255.	45
Σχήμα 5.2 Αποτελέσματα της δοκιμής συμμόρφωσης.	46
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για την άμμο M31.	48
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για την σταθεροποιημένη άμμο M31.	49
Σχήμα 5.5 Καμπύλη τετραγωνικής ρίζας χρόνου-καθίζησης για φορτίο 256 kg (6276 kPa) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου M31.	49
Σχήμα 5.6 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου M31. Οι μπλε καμπύλες συμβολίζουν τα φυσικά δοκίμια ενώ οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.	50
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης – ενεργού τάσης για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου M31.	50
Σχήμα 5.8 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Longstone. Οι μπλε καμπύλες συμβολίζουν τα φυσικά δοκίμια ενώ οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.	51
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης – ενεργού τάσης για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Longstone.	52

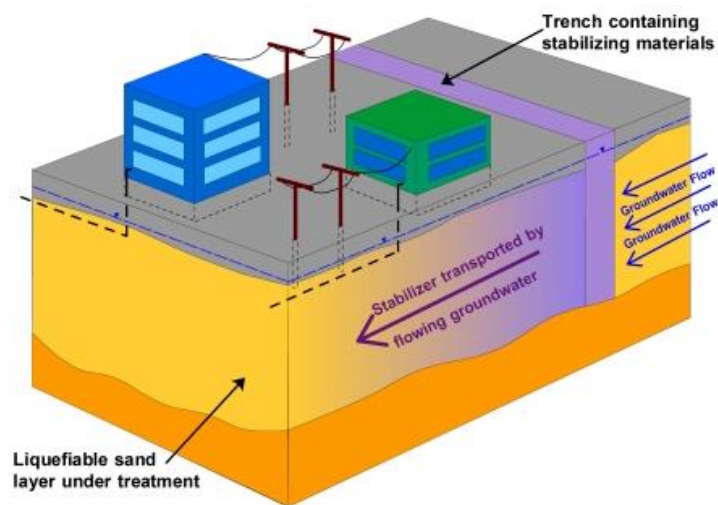
Σχήμα 5.10 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Fontainebleau. Οι μπλε καμπύλες συμβολίζουν τα φυσικά δοκίμια ενώ οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.....	53
Σχήμα 5.11 Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης – ενεργού τάσης για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Fontainebleau.....	53
Σχήμα 6.1 Συσκευή απ' ευθείας διάτμησης Wykeham Farrance N ^o 25402	56
Σχήμα 6.2 Διατομή συσκευής απ' ευθείας διάτμησης.....	57
Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης κατακόρυφου μηκυνσίόμετρου.	57
Σχήμα 6.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης δυναμόμετρου.....	58
Σχήμα 6.5 Παρασκευή σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου για την δοκιμή απ' ευθείας διάτμησης. Οι διαδικασίες κατά σειρά είναι: (α) η παρασκευή υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας, (β) η μέτρηση του pH και της θερμοκρασίας του υγρολύματος, (γ) η τοποθέτηση του υγρολύματος και του δακτυλίου της συσκευής σε μεταλλικό δοχείο και (δ) η ξηρή εμφάπτιση του υλικού.....	59
Σχήμα 6.6 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε άμμο M31.....	62
Σχήμα 6.7 Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για δοκιμές σε άμμο M31 σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης, κορυφαίας αντοχής δοκιμίων μέσης σχετικής πυκνότητας και κορυφαίας αντοχής πυκνών δοκιμίων.	63
Σχήμα 6.8 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31.	65
Σχήμα 6.9 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 (κόκκινες καμπύλες) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31 (μπλε καμπύλες).	66
Σχήμα 6.10 Κοκκομετρικές καμπύλες άμμου M31 πριν και μετά τη διάτμηση υπό 1 MPa ορθής ενεργού τάσης.....	67
Σχήμα 6.11 Φωτογραφίες σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία δοκιμίων άμμου M31, μετά από τη διάτμηση.	67

Σχήμα 6.12 Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κolloειδή πυριτία άμμο M31 σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης και κορυφαίας αντοχής δοκιμίων μέσης σχετικής πυκνότητας.	68
Σχήμα 6.13 Καμπύλες διαστολικότητας- τ/σ'_v φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.....	69
Σχήμα 6.14 Διάγραμμα μέγιστης διαστολικότητας - ορθής ενεργού τάσης.....	70
Σχήμα 6.15 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε άμμο Longstone.....	71
Σχήμα 6.16 Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για δοκιμές σε άμμο Longstone σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης και κορυφαίας αντοχής δοκιμίων μέσης σχετικής πυκνότητας.	72
Σχήμα 6.17 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κolloειδή πυριτία άμμο Longstone.....	73
Σχήμα 6.18 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κolloειδή πυριτία άμμο Longstone (κόκκινες καμπύλες) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο Longstone (μπλε καμπύλες).	74
Σχήμα 6.19 Καμπύλες διαστολικότητας- τ/σ'_v φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και άμμου Longstone.	76
Σχήμα 6.20 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κolloειδή πυριτία άμμο Longstone (κόκκινη καμπύλη) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο Longstone (μπλε καμπύλη). Η πράσινη καμπύλη παριστάνει σταθεροποιημένο δοκίμιο που έχει υποστεί μερική ξήρανση.	78
Σχήμα 6.21 Φωτογραφίες πριν (επάνω) και μετά (κάτω) τη διάτμηση μερικώς κορεσμένου σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου Longstone.	79
Σχήμα 6.22 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμή αυτό-ίασης σε σταθεροποιημένη με κolloειδή πυριτία άμμο M31.	81

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο της έρευνας

Ο κίνδυνος αστοχίας μη συνεκτικών κοκκωδών εδαφικών σχηματισμών από ρευστοποίηση, συνήθως απόρροια των σεισμικών δονήσεων, είναι μείζων και χρήζει αντιμετώπισης. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι μετριασμού αυτού του φαινομένου, οι περισσότερες εκ των οποίων αφορούν την παθητική σταθεροποίηση του εδάφους. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την παθητική σταθεροποίηση των αμμωδών εδαφικών υλικών με κολλοειδή πυριτία. Η σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο περιορισμού του κινδύνου ρευστοποίησης, σε περιοχές με ευαίσθητες σε ρευστοποίηση υποδομές. Πρόκειται για έναν πολλά υποσχόμενο σταθεροποιητή, μιας και μπορεί να εισπιέζεται κάτω από υφιστάμενες κατασκευές και να διοχετεύεται στη ρευστοποιήσιμη εδαφική μάζα μέσω φυσικής ή τεχνητής ροής του υπογείου νερού (Σχήμα 1.1). Επιπρόσθετα, το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας έχει μικρό ιξώδες και ένα μεγάλο εύρος ελεγχόμενου χρόνου πήξης (Gallagher (2000)). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου, σε σχέση με άλλες μεθόδους αποκατάστασης και άμβλυνσης του κινδύνου ρευστοποίησης, είναι το χαμηλό κόστος.



Σχήμα 1.1 Παθητική σταθεροποίηση εδάφους για την άμβλυνση του κινδύνου ρευστοποίησης. Πηγή: Gallagher (2000).

1.2. Στόχοι της έρευνας

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία στη μηχανική συμπεριφορά λεπτόκοκκων αμμοδών υλικών, αλλά και πως το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων τους επηρεάζει την απόκριση τους. Πιο συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμων M31, Longstone και Fontainebleau δοκιμές:

1. Συμπιεσόμετρου, με σκοπό τη διερεύνηση της ενδοσιμότητας των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου και σύγκριση της με αυτή των φυσικών.
2. Απ' ευθείας διάτμησης, με σκοπό τη διερεύνηση των διατμητικών παραμέτρων των σταθεροποιημένων και των φυσικών δοκιμίων άμμου, καθώς και τη σύγκριση της απόκρισης τους κατά τη διάτμηση.

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται συνολικά από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Επιγραμματικά:

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται, συνοπτικά, η επιστήμη των κολλοειδών, επεξηγούνται βασικοί χημικοί όροι που χρησιμοποιούνται στην εργασία και αναλύονται μερικές φυσικοχημικές διαδικασίες και ιδιότητες του υγρολύματος της κολλοειδούς πυριτίας.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η βιβλιογραφική επισκόπηση σε παλαιότερες μελέτες, οι οποίες κατά κύριο λόγο αφορούν την περιγραφή της συμπεριφοράς των αμμοδών υλικών κατά τη διάτμηση, τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μηχανική τους συμπεριφορά καθώς και την επιρροή της σταθεροποίησης στην εδαφική απόκριση.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται αναλυτικά τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές, καθώς και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον προσδιορισμό τους.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης, ο τρόπος παρασκευής των δοκιμίων καθώς και η λειτουργία της συσκευής. Παρατίθενται και περιγράφονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και γίνεται η προσπάθεια ερμηνείας της συμπεριφοράς τους.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής απ' ευθείας διάτμησης και επεξηγείται, επίσης, ο τρόπος παρασκευής των δοκιμίων και ο τρόπος

λειτουργία της συσκευής. Αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και επιχειρείται η σύγκριση και η ερμηνεία τους.

Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 8 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Τέλος, συμπεριλαμβάνεται παράρτημα με τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ

2.1. Επιστήμη των Κολλοειδών

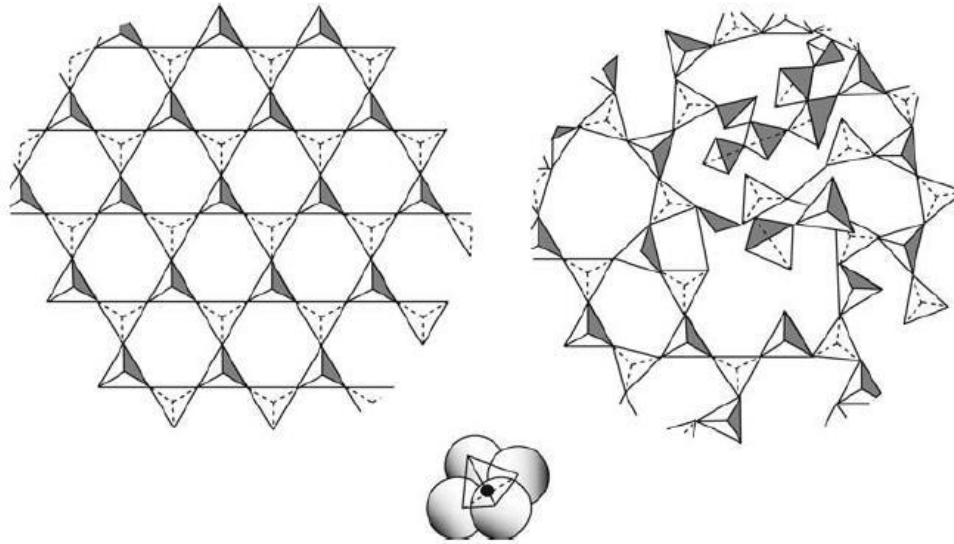
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το αντικείμενο της Επιστήμης των Κολλοειδών καθώς και η κλίμακα των μεγεθών στην οποία εξελίσσονται τα κολλοειδή φαινόμενα. Επεξηγούνται, επίσης κάποιοι χρήσιμοι χημικοί όροι και αναλύονται τα είδη της κολλοειδούς πυριτίας. Στην επόμενη ενότητα (2.2), γίνεται λόγος για τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και τις αντίστοιχες διαδικασίες.

2.1.1. Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών

Η κολλοειδής επιστήμη μελετά τα ομογενή συστήματα που περιέχουν μικροσκοπικά σωματίδια μιας χημικής ουσίας, ομοιόμορφα διασκορπισμένα μέσα σε μια άλλη, και που παραμένουν μη αναμίξιμα (Χατζηγιάννου (1993)). Κολλοειδή σωματίδια θεωρούνται όσα έχουν μέγεθος μικρότερο από 1 μm και μεγαλύτερο από 1 nm, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Τα κολλοειδή συστήματα διαφοροποιούνται από τα αιωρήματα, στα οποία τα αιωρούμενα σωματίδια πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα (>1000 nm) και από τα πραγματικά διαλύματα. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να έχουν μία, δύο ή τρεις διαστάσεις στην κλίμακα των κολλοειδών και να είναι διακριτά, όπως, για παράδειγμα, ένα πλήθος σκεδασμένων σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας μέσα στον υδάτινο διασπορέα, ή μη διακριτά, όπως, για παράδειγμα, ένα συνεχές δίκτυο από διασυνδεδεμένα κολλοειδή σωματίδια πυριτίας. Τα άτομα ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να διατάσσονται σε κρυσταλλική ή άμορφη δομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των σωματιδίων της κολλοειδούς κατάστασης υποδηλώνουν τεράστιους λόγους επιφάνειας/όγκου ή επιφάνειας/ μάζας. Αυτά, λοιπόν, τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με ένα ιδιαίτερο τρόπο που καθορίζεται από τις ιδιότητες των επιφανειών και των διεπιφανειών. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης είναι κυρίως ηλεκτροστατικές (απωστικές) λόγω της φορτισμένης στρώσης στην επιφάνειά τους και δυνάμεις τύπου Van der Waals (ελκτικές) που προκύπτουν εξαιτίας της μόνιμης ή παροδικής πόλωσης. Όταν υπερτερούν οι πρώτες τα σωματίδια παραμένουν σκεδασμένα στον υγρό διασπορέα (υγρόλυμα), ενώ όταν υπερτερούν οι δεύτερες τα σωματίδια συνενώνονται και το υγρόλυμα μετατρέπεται σε γέλη. Η συνάφεια της γέλης (που έχει

σηματιστεί στους πόρους του εδάφους) με τους κόκκους του εδαφικού σχηματισμού προσδίδει ένα είδος συνεκτικότητας στην εδαφική μάζα και την προστατεύει από την κατάρρευση λόγω σεισμικής ρευστοποίησης.



Σχήμα 2.1 Κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής τετραεδρικής δομικής ιοντικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Πηγή: Bergna και Roberts (2006).

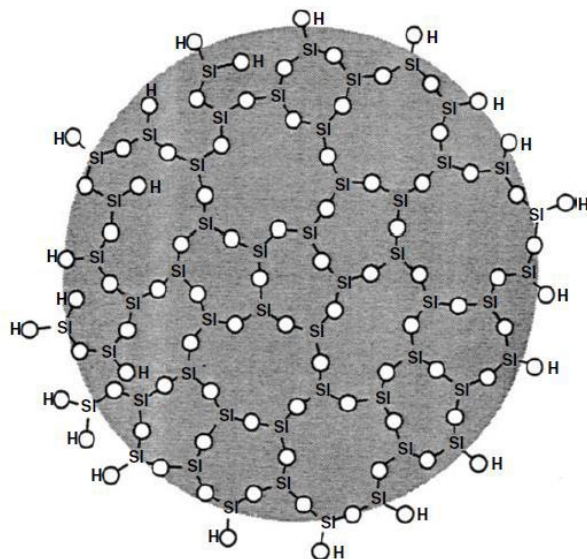
2.1.2. Ορολογία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρονται χημικοί όροι, είτε στην ελληνική είτε στην αγγλική γλώσσα, οπότε θεωρήθηκε απαραίτητη η επεξήγηση και η αποσαφήνιση αυτών των όρων. Με τον όρο “υγρόλυμα” ή “sol” αναφερόμαστε σε μία σταθερή διασπορά στερεών κολλοειδών σωματιδίων σε υγρό διασπορέα. Όταν ο υγρός διασπορέας είναι το νερό τότε το υγρόλυμα ονομάζεται “aquesol” ή “hydrosol” ενώ όταν είναι οργανικός η διασπορά ονομάζεται “organosol” (Bergna και Roberts (2006)). Γέλη ή “gel” ονομάζεται το σύστημα που αποτελείται από ένα συνεχή στερεό σκελετό, ο οποίος συντίθεται από κολλοειδή σωματίδια ή πολυμερή και περιβάλλει μια συνεχή υγρή φάση, δηλαδή περιέχει πόρους στη μάζα της. Οι πόροι αυτοί είναι αρχικά γεμάτοι με υγρό διασπορέα και με κάποια ποσότητα αιωρούμενης κολλοειδούς ουσίας, που δεν έχει ενωθεί ακόμα με την στερεή σκελετική δομή, και κατά την πήξη ή “gelation” δημιουργείται ένα μεμονωμένο, μεγάλο σύμπλεγμα αλυσίδων σε αντίθεση με άλλες διαδικασίες συσσωμάτωσης όπως η κροκίδωση, όπου δημιουργούνται μη συνδεδεμένα συσσωματώματα τα οποία καθιζάνουν. Η ξήρανση της γέλης μέσω εξάτμισης υπό συνθήκες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης μετατρέπει τη γέλη σε ξηρο-γέλη ή “xerogel”. Η ξηρο-γέλη μειώνει τον όγκο της 5 έως 10 φορές σε σχέση με την υγρή γέλη.

Η συρρίκνωση οφείλεται στις τριχοειδείς δυνάμεις που ασκούνται στον σκελετό και τον συμπιέζουν καθώς η υγρή φάση εγκαταλείπει τους πόρους. Η ξηρο-γέλη περιέχει ακόμα μία ποσότητα χημικά δεσμευμένου νερού (Bergna και Roberts (2006), Brinker και Scherer (1990)). Η ξήρανση της υγρής γέλης σε αεροστεγή κλίβανο υπό συνθήκες πέραν από το κρίσιμο σημείο του υγρού των πόρων εξαφανίζει την πίεση από τριχοειδείς δυνάμεις και επομένως περιορίζει την συρρίκνωση ξήρανσης. Το προϊόν που προκύπτει αποτελείται κυρίως από αέρα, με περιεκτικότητα σε στερεή φάση της τάξεως 0.10% κατ' όγκο και ονομάζεται αερο-γέλη (aerogel). Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η εξαφάνιση της πίεσεως από τριχοειδείς δυνάμεις που αναφέρει η βιβλιογραφία οφείλεται στο γεγονός ότι πέραν από το κρίσιμο σημείο ($P > P_{cr}$ και $T > T_{cr}$) στο διάγραμμα φάσης πίεσης P -θερμοκρασίας T (δηλαδή για σταθερό όγκο $V = \text{σταθ.}$) υπάρχει η περιοχή του υπερκρίσιμου ρευστού. Σε αυτήν την κατάσταση η υγρή και η αέρια φάση είναι αδιαχώριστες. Το υλικό τείνει να εισέλθει στην αέρια φάση λόγω υψηλής θερμοκρασίας, αλλά παράλληλα τείνει και προς την υγρή φάση λόγω της υψηλής πίεσης. Επομένως, η πίεση λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, που αναπτύσσεται κατά την ξήρανση υπό φυσιολογικές συνθήκες, εξαλείφεται υπό υπερκρίσιμες συνθήκες.

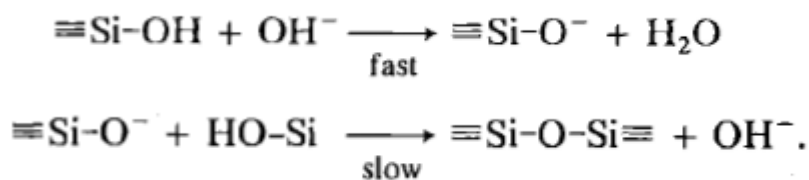
2.1.3. Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox SM

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών έχει την εμπορική ονομασία Ludox® SM (προϊόν της Sigma - Aldrich®) και είναι μία υδάτινη διασπορά διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με μέγεθος 7 nm. Τα σωματίδια είναι συμπαγή και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή (Ludox Colloidal Silica brochure (2012)). Η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων είναι $345 \text{ m}^2/\text{g}$. Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 30% wt. και είναι σταθεροποιημένο σε $\text{pH}=10$ με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na_2O . Το ιξώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP. Η τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτήν του νερού, το οποίο ισούται με 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία. Μετά την αραιώση του υγρολύματος, το ιξώδες του παίρνει ακόμα μικρότερη τιμή. Με τον όρο σταθεροποιημένο υγρόλυμα εννοούμε ότι οι απωστικές δυνάμεις αποτρέπουν τη συσσωμάτωση των κολλοειδών σφαιριδίων και την πήξη, ενώ με τον όρο σταθεροποιημένο έδαφος εννοούμε το έδαφος που έχει στους πόρους του γέλη πυριτίας. Το σωματίδιο της κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας. Το τέταρτο οξυγόνο της βασικής τετραεδρικής μονάδας SiO₄ βρίσκεται εκτός του επιπέδου της σελίδας. Πηγή: Gallagher (2010)

Οι Brinker και Scherer (1990) αναφέρουν πως κάθε άτομο πυριτίου Si τείνει να δημιουργήσει γύρω του τέσσερις δεσμούς σιλοξάνης ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$) υπό εξώθερμη αντίδραση συμπύκνωσης ενώ τα σωματίδια που βρίσκονται στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους έχουν περισσότερα από 50% των ατόμων πυριτίου Si στην επιφάνειά τους, οπότε πρέπει να έχουν έναν ή περισσότερους δεσμούς σιλανόλης ($\equiv\text{Si-OH}$). Η επιφάνεια των σωματιδίων της κολλοειδούς πυριτίας αποβάλλει πρωτόνια H⁺ και φορτίζεται αρνητικά όταν ο διασπορέας είναι αλκαλικός και απουσιάζουν τα άλατα. Η ηλεκτροστατική άπωση των σωματιδίων λόγω αυτής της στρώσης εξασφαλίζει την σταθερότητα της διασποράς. Η ελεγχόμενη πήξη της διασποράς επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του pH και την προσθήκη αλάτων που συρρικνώνουν τη φορτισμένη στρώση. Τα βασικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.3 Σε ενδιάμεσες τιμές pH το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως καταλύτης στην αντίδραση της συμπύκνωσης. Πηγή: Brinker και Scherer (1990).

Είδος πυριτίας	Ludox®-SM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50
Σταθεροποιητής	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30
Ιξώδες (cP)	5.5
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).

2.2. Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας

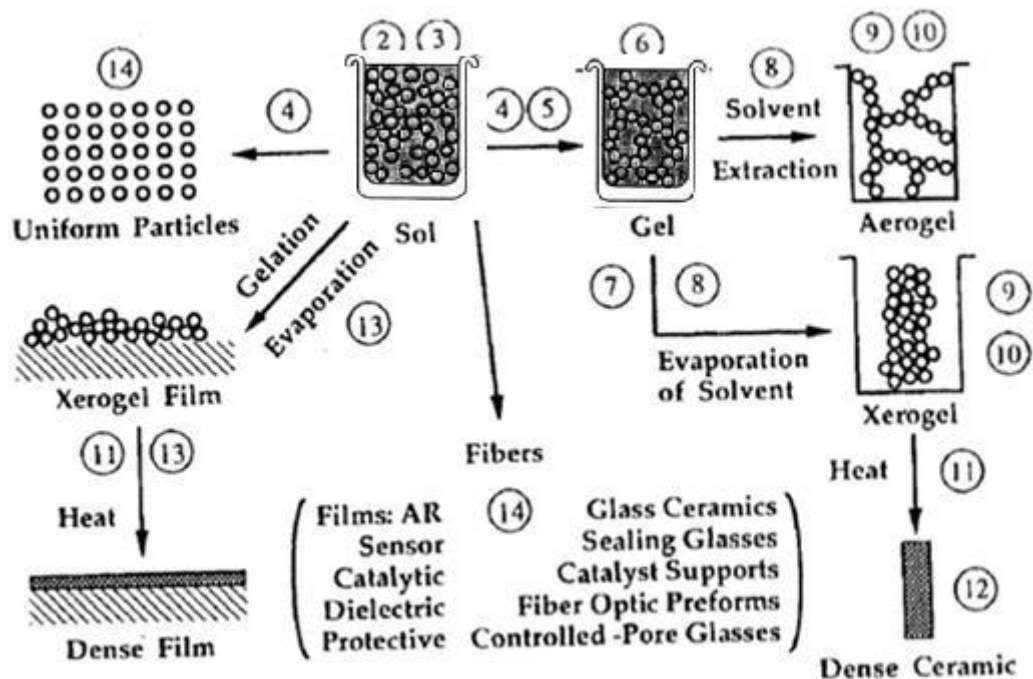
Στο Σχήμα 2.4. παρουσιάζονται μερικές βασικές φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρών διαπορών και των γελών. Η κολλοειδής πυριτία αποτελεί τα τελευταία χρόνια ένα ιδιαίτερα λειτουργικό μέσο σταθεροποίησης, αφού με σωστή διαχείριση, μεταφορά και αποθήκευση μπορεί να οδηγηθεί σε ελεγχόμενη πήξη. Επίσης, διοχετεύεται εύκολα στο έδαφος (ακόμα και υπό χαμηλή υδραυλική κλίση) λόγω του αρχικά χαμηλού ιξώδους της. Έχει τη δυνατότητα να οδηγηθεί σε ταχεία πήξη έπειτα από προσθήκη αλάτων και ρύθμιση του pH της, εξασφαλίζοντας έτσι την παραμονή της στους εδαφικούς πόρους, χωρίς να κινδυνεύει από αντικατάσταση της από το νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ή την αραιώση της λόγω διάχυσης.

2.2.1. Συσχέτιση διαδικασιών με τη σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών

Η γέλη αποτελεί ένα διφασικό και, σε κάποιες περιπτώσεις, τριφασικό υλικό. Αποτελείται από ένα στερεό σκελετό που περικλείει μια υγρή φάση. Αν υποστεί μερική ξήρανση μπορεί να περικλείει και υγρή και αέρια φάση. Σε όσα πειράματα εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα δοκίμια ωρίμασαν σε αεροστεγείς και με σταθερή υγρασία και θερμοκρασία συνθήκες για την αποφυγή της ξήρανσης. Αν το δοκίμιο υποστεί ξήρανση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5., τότε συμπεριφέρεται σαν φυσική άμμος, αφού η γέλη δεν διατηρεί τη δομή και την υποτυπώδη συνεκτικότητα της με

αποτέλεσμα το δοκίμιο να αποκτήσει σταδιακά την αρχική ψαθυρή και εύθρυπτη δομή του.

Η γέλη της κolloειδούς πυριτίας αποτελεί μια μαλακή, ελαστική, υδαρή μάζα η οποία είναι πρακτικώς ασυμπίεστη υπό αστράγγιστες συνθήκες, μιας και αποτελείται από ένα στερεό ασυμπίεστο σκελετό (τα σωματίδια της πυριτίας είναι συμπαγή και το εσωτερικό τους είναι μια πυκνή διάταξη SiO_2) που περικλείει στους πόρους του νερό και αιωρούμενα σωματίδια πυριτίας, τα οποία είναι και αυτά ασυμπίεστα. Βέβαια, αν επιτραπεί η στράγγιση, αποβάλλεται νερό από τους πόρους της και το σκελετικό δίκτυο ενδίδει υπό ισότροπη πίεση (Brinker και Scherer (1990)). Παρουσιάζει επίσης αμελητέα μέτρα διάτμησης και ελαστικότητας (Towhata (2008)).



Σχήμα 2.4 Σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών. (2), (3): υδρόλυση και συμπύκνωση, (4): δημιουργία σωματιδίων από υγρές διασπορές και γέλες, (5): πήξη γέλης, (6): ωρίμανση γελών, (7): θεωρία παραμορφώσεων και ροής στις γέλες, (8): ξήρανση, (9): ανάπτυξη δομής κατά την στερεοποίηση, (10): χημεία επιφανειών και χημικές τροποποιήσεις, (11): συσσωμάτωση και συμπύκνωση με μείωση της διεπιφανείας στερεής - αέριας φάσης, υπό καθεστώς υψηλών θερμοκρασιών, (12): σύγκριση κεραμικών που παρήχθησαν από γέλη και συμβατικών κεραμικών, (13): σχηματισμός φιλμ, (14): εφαρμογές. Πηγή: Brinker και Scherer (1990).



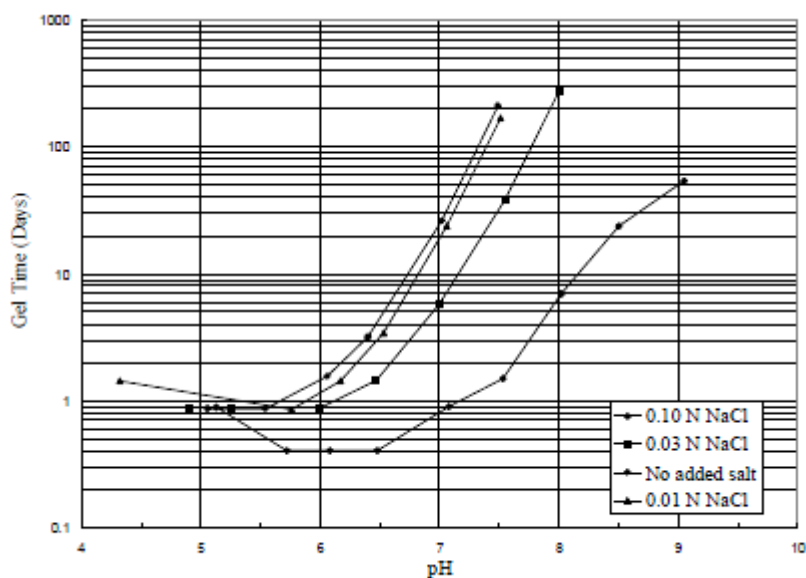
Σχήμα 2.5 Σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου με CS=10%wt. Πάνω αριστερά και στη μέση: το δοκίμιο αμέσως μετά την ωρίμανση των 30 ημερών, χωρίς να υποστεί διάτμηση. Πάνω δεξιά: το δοκίμιο μετά την αποθήκευση μέσα σε νερό για 45 ημέρες. Κάτω αριστερά: το δοκίμιο εκτεθειμένο στον αέρα για 8 ώρες. Κάτω στη μέση και δεξιά: Το δοκίμιο εκτεθειμένο στον αέρα για 3 ημέρες. Η άμμος καταρρέει με το άγγιγμα. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).

2.2.2. Πήξη της γέλης

Σύμφωνα με τους Brinker και Scherer (1990), πήξη της γέλης ή “gelation” είναι η διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται συμπλέγματα από την συμπύκνωση των πολυμερών ή τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέχρι τη στιγμή που τα συμπλέγματα συγκρούονται. Τότε, δημιουργούνται δεσμοί μεταξύ των συμπλεγμάτων και σχηματίζεται ένα μεμονωμένο γιγαντιαίο σύμπλεγμα που ονομάζεται γέλη. Τη στιγμή που σχηματίζεται η γέλη, αρκετά συμπλέγματα βρίσκονται σκεδασμένα στην υγρή φάση, χωρίς να έχουν ακόμα ενωθεί στη σκελετική δομή. Με την πάροδο του χρόνου συνδέονται προοδευτικά με το δίκτυο και η δυσκαμψία της γέλης αυξάνεται. Σύμφωνα με αυτή την διαδικασία, η γέλη εμφανίζεται όταν ο τελευταίος δεσμός σχηματίζεται μεταξύ δύο μεγάλων συμπλεγμάτων και δημιουργείται έτσι η ενιαία σκελετική δομή της στερεάς φάσης. Ο τελευταίος δεσμός δεν διαφέρει σε τίποτα από τους αναρίθμητους άλλους που σχηματίζονται πριν και μετά το σημείο πήξης της γέλης, πέραν από το γεγονός ότι είναι το

ορόσημο έναρξης της ελαστικότητας του συνεχούς στερεού σκελετού. Στο σημείο πήξης της γέλης, το ιξώδες αυξάνεται απότομα και η γέλη αρχίζει να αποκρίνεται ελαστικά.

Οι Gallagher και Mitchell (2002) υπογραμμίζουν πως ο χρόνος πήξης της γέλης (“gel time”) είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον ρυθμό αλληλεπιδράσεως των κόκκων της πυριτίας. Έτσι, εξαρτάται από την περιεκτικότητα του υγρούματος σε στερεούς κόκκους, από το μέγεθος της επιφάνειας των κόκκων, από το pH του υγρούματος και από την συγκέντρωση του άλατος στο υγρόλυμα. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος πήξης αυξάνεται με την μείωση της περιεκτικότητας των στερεών κόκκων και με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων του. Όσον αφορά το pH, οι μεγάλες και οι μικρές τιμές του οδηγούν σε αύξηση του χρόνου πήξης. Η ελαχιστοποίηση του προκύπτει για τιμές pH μεταξύ 5 και 6 (Σχήμα 2.6.). Τέλος, ο χρόνος πήξης της γέλης αυξάνεται με την μείωση της περιεκτικότητας του άλατος στο διάλυμα.

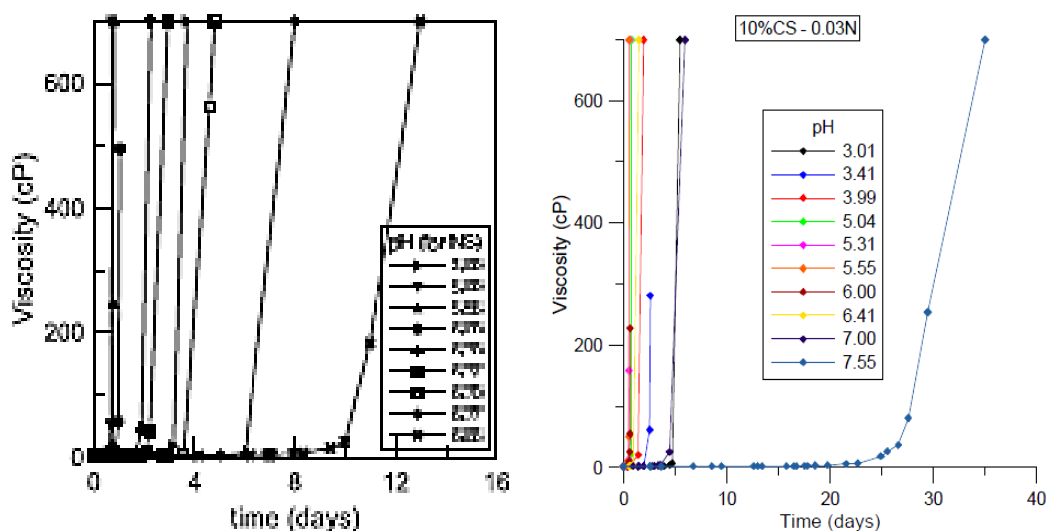


Σχήμα 2.6 Καμπύλες χρόνου πήξης γέλης - pH υγρούματος Ludox-SM περιεκτικότητας 10% wt για διάφορες τιμές περιεκτικότητας άλατος (NaCl). Πηγή: Gallagher (2000).

Ο προσδιορισμός του χρόνου πήξης (“gel time”) υπολογίζεται με την μελέτη της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του υγρούματος κατά την μετατροπή του σε γέλη, με τη χρήση ιξωδομέτρου (Brinker και Scherer (1990)). Οι Gallagher (2000) και Agaroulaki και Papadimitriou (2015) παρουσίασαν τις καμπύλες ιξώδους-χρόνου (Σχήμα 2.7.) παρατηρώντας πως ενώ το υγρόλυμα είχε αρχικά πολύ μικρό ιξώδες (λίγο μεγαλύτερο από του νερού), υπήρξε ξαφνική και απότομη αύξηση του ιξώδους σε μερικές χιλιάδες cP. Αυτό συνδέθηκε με το σχηματισμό και της γέλης και υπολογίστηκε ο χρόνος πήξης της

γέλης ως ο χρόνος που απαιτείται να αποκτήσει το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας ιξώδες μεγαλύτερο των 100 cP (Τριαντάφυλλος, 2015).

Είναι πολύ σημαντικό να υπογραμμίσουμε πως πολύ μεγάλο ρόλο στον χρόνο πήξης παίζει η θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνοδεύεται από μείωση του χρόνου πήξης της γέλης. Είναι ενδεικτικό πως για περίπου κάθε 10 °C μείωσης της θερμοκρασίας, ο χρόνος αυτός διπλασιάζεται (Bergna και Roberts (2006)).

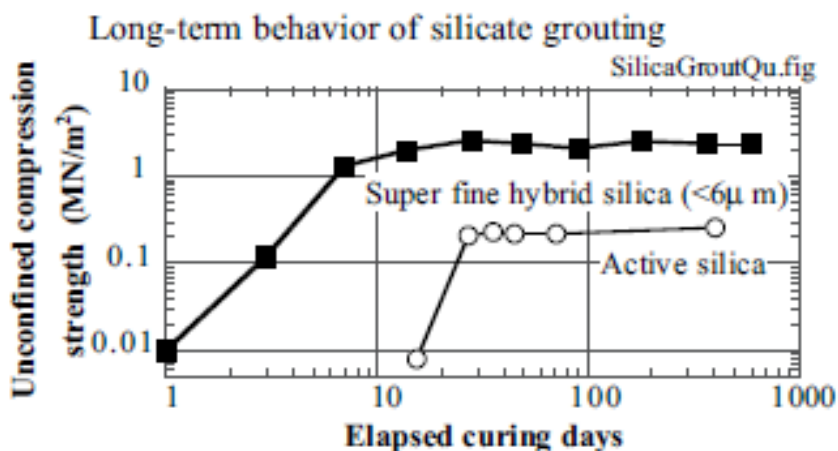


Σχήμα 2.7 Αριστερά: Καμπύλες ιξώδους - χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας (Ludox-SM περιεκτικότητας 10% wt.) χωρίς την προσθήκη άλατος για τιμές pH=3.00 - 6.88. όσο αυξάνεται η τιμή του pH, η καμπύλη μετατοπίζεται δεξιότερα στο διάγραμμα. Πηγή: Agaroulaki και Papadimitriou (2015). Δεξιά: Καμπύλες ιξώδους - χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας (Ludox-SM περιεκτικότητας 10% wt.) με κανονικότητα 0,03 N για τιμές pH=3.01 - 7.55. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).

2.2.3. Ωρίμανση

Έχει παρατηρηθεί πως οι μηχανικές ιδιότητες της γέλης συνεχίζουν να μεταβάλλονται ακόμα και για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το χρόνο πήξης της . Αυτό συμβαίνει διότι ακόμα και μετά την πήξη υπάρχει μια ποσότητα ολιγομερών που είναι ελεύθερα να συγκρουστούν και να προκύψουν, έτσι, αντιδράσεις συμπύκνωσης (Brinker και Scherer (1990)). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ωρίμανση ή “aging” και οδηγεί σε ένα πιο στιβαρό στερεό σκελετικό δίκτυο. Αρκετοί (Gallagher και Mitchell (2002), Yonekura et al. (2001), Porcino et al. (2012)) μέτρησαν την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη σταθεροποιημένης άμμου (με κολλοειδή πυριτία ή πυριτικό νάτριο ως σταθεροποιητές). Παρατήρησαν πως όσο αυξάνονταν οι μέρες ωρίμανσης, αυξανόταν και η αντοχή του σταθεροποιημένου δοκιμίου σε ανεμπόδιστη θλίψη (Σχήμα 2.8.). Με αυτόν τον τρόπο επαληθεύεται το

γεγονός πως η ωρίμανση της γέλης για μεγάλο χρονικό διάστημα οδηγεί σε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή.



Σχήμα 2.8 Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης της γέλης στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του εδαφικού υλικού. Πηγή: Yonekura et al. (2001) και Miwa et al. (2001).

2.2.4. Ξήρανση

Με τον όρο ξήρανση ή “drying” αναφερόμαστε στην απομάκρυνση του νερού από τους πόρους της γέλης υπό συνήθη θερμοκρασία. Αρχικά, το νερό από την επιφάνεια της γέλης εξατμίζεται με αποτέλεσμα το προοδευτικό άδειασμα των πόρων και τελικά την συρρίκνωση τους. Οι ανομοιόμορφες τάσεις ξήρανσης οδηγούν τη γέλη στη μείωση της ευκαμψίας της και τελικά στη ρωγμάτωση της (Σχήμα 2.9.). Η κορεσμένη γέλη αποτελεί ένα διαφασικό υλικό το οποίο μετά την ξήρανση της μετατρέπεται σε τριφασικό, αφού εμφανίζονται πλέον ακόρεστοι πόροι που περιέχουν αέρα. Αυτή η συρρίκνωση της γέλης, της επιτρέπει να δημιουργεί νέους δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων της αφού η συστολή της φέρνει πιο κοντά ενεργές ομάδες σιλανόλης με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται νέες αντιδράσεις συμπύκνωσης (Brinker και Scherer (1990)). Το δίκτυο που θα προκύψει θα είναι στιβαρότερο και λιγότερο διαπερατό από το προηγούμενο. Είναι δυνατόν να δημιουργούνται νέοι δεσμοί σιλοξάνης, παρόλο που η συστολή τραυματίζει τους πιο δύσκαμπτους δεσμούς της στερεάς φάσης της γέλης, και να εμφανίζει, έτσι, η γέλη αυτό-ίαση (self-healing).

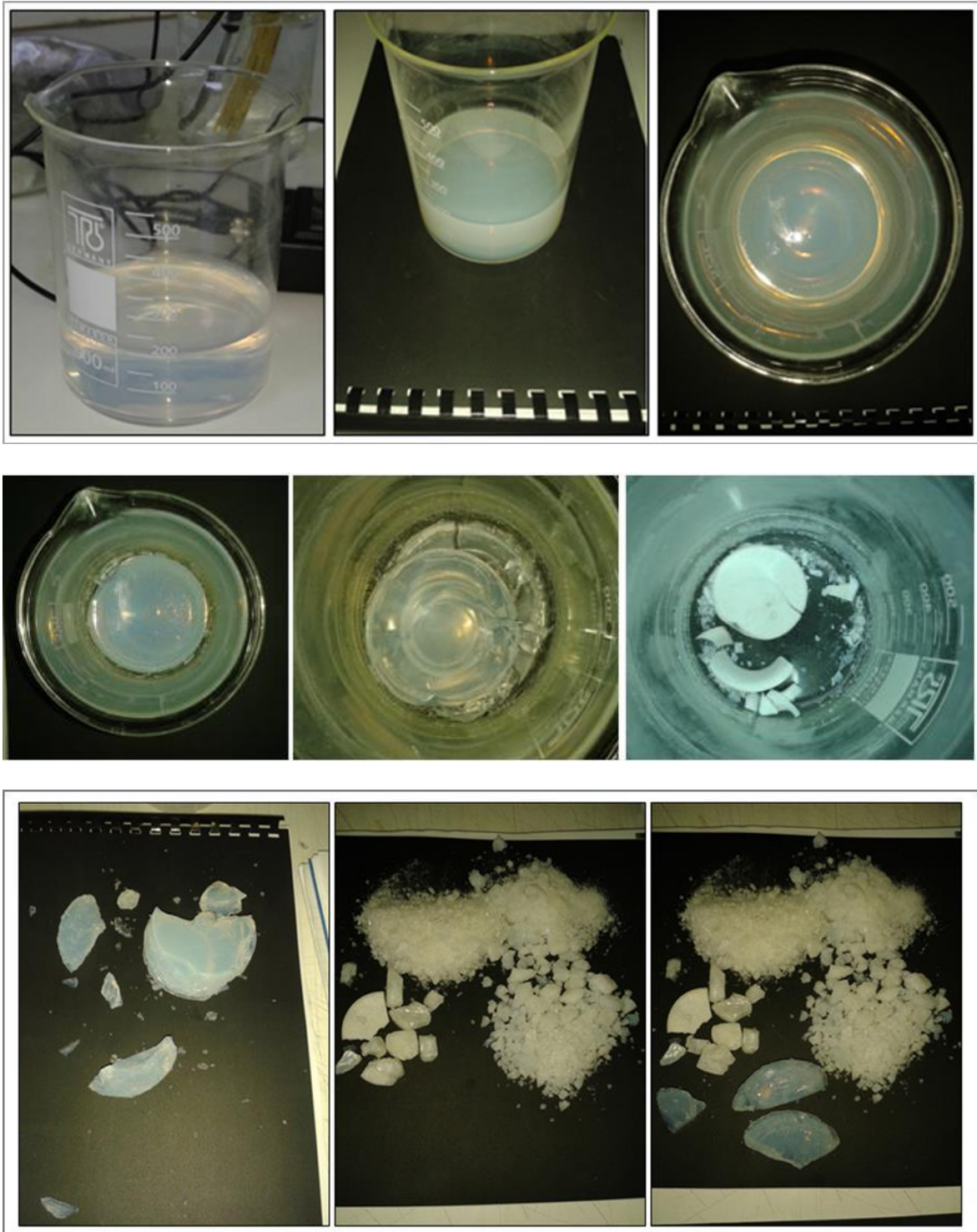
2.2.5. Αυτοΐαση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η γέλη έχει την ικανότητα να αναδημιουργεί δεσμούς σιλοξάνης μεταξύ των μορίων της μετά από την στερεοποίηση και τη συστολή της λόγω της ύπαρξης ενεργών ομάδων σιλανόλης. Κι αυτό διότι ελεύθερα σωματίδια έρχονται σε κοντινότερη απόσταση μεταξύ τους, διευκολύνοντας με αυτό τον τρόπο τη

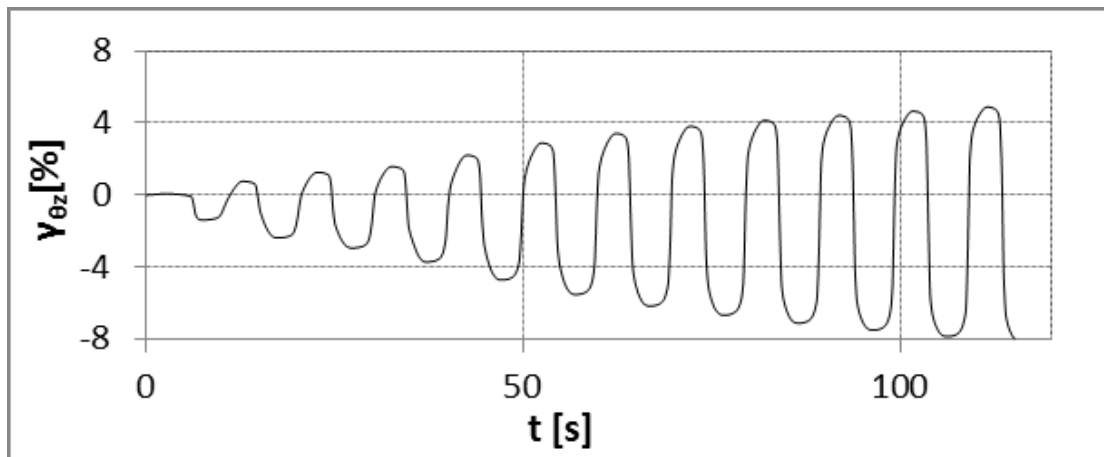
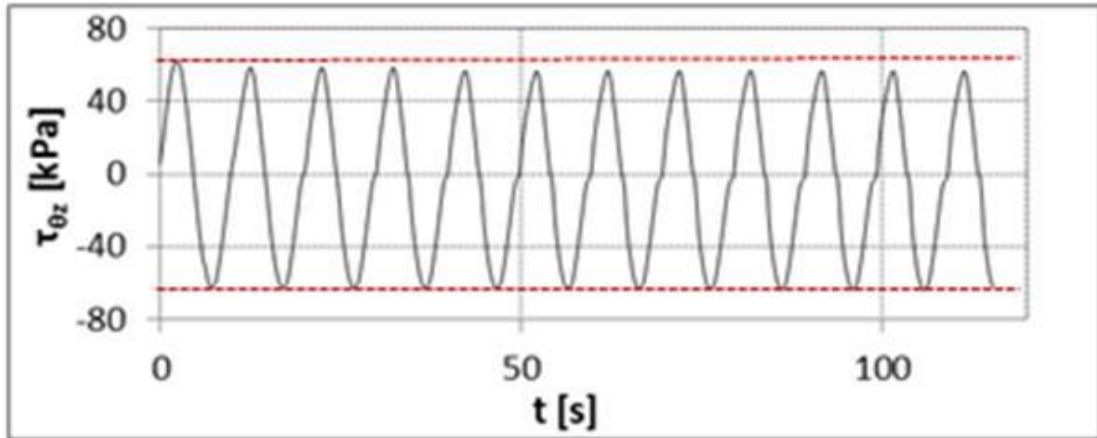
σύγκρουσή τους και τη δημιουργία νέων στερεών αλυσίδων. Εξετάζοντας τη θεωρία αυτή σε προβλήματα μηχανικού, είναι πιθανό σε επεισόδια σεισμού, όπου προκαλείται σύγκλιση της γέλης (ή του σταθεροποιημένου με γέλη εδαφικού σκελετού) από τις μεγάλες παραμορφώσεις και την συστολή της στερεοποίησης, να αναδιαταχτούν οι στερεές της αλυσίδες και να προαχθούν αντιδράσεις συμπύκνωσης. Η υπόθεση αυτή εξετάζεται σε παρακάτω ενότητα.

Ο Τριαντάφυλλος (2015), προκειμένου να επαληθεύσει τον παραπάνω μηχανισμό παρασκεύασε αραιό υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας 6% wt., το οποίο χρησιμοποίησε για να την σταθεροποίηση δοκιμίου άμμου M31. Το υγρόλυμα που περίσσεψε αφέθηκε για 50 ώρες σε ένα δοχείο. Έπειτα, κατέστρεψε τον σκελετό της γέλης με μηχανική ανάδευση που είχε ως αποτέλεσμα να προκύψει ένα παχύρευστο υγρό το οποίο αφέθηκε άλλες 25 ώρες στο δοχείο. Αυτό που παρατήρησε ήταν πως, μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, το παχύρευστο υγρό είχε μετατραπεί ξανά σε στιβαρή γέλη. Προσθέτει, επίσης, πως η πλήρης ανάκαμψη της γέλης ευνοήθηκε, στην συγκεκριμένη περίπτωση, από την έντονη συστολή της ξήρανσης.

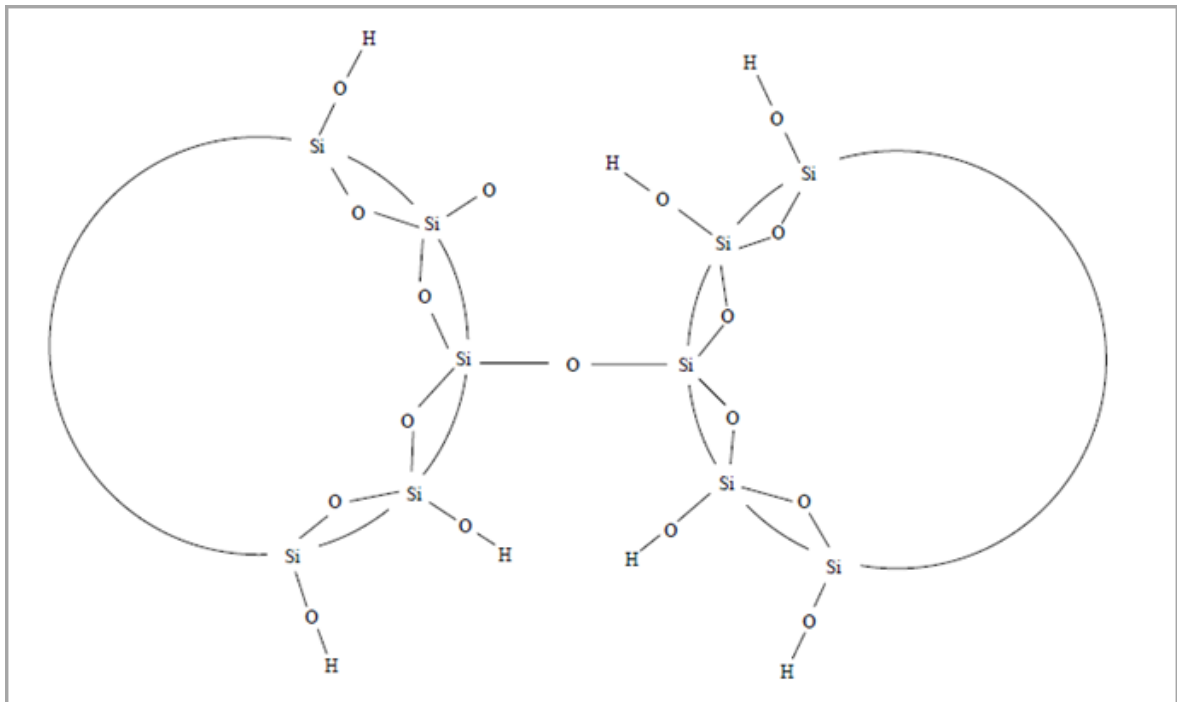
Προσπάθησε να επιβεβαιώσει τον μηχανισμό της αυτοΐασης με μια ακόμα μέθοδο, η οποία δεν θα επέτρεπε, αυτή τη φορά, την συστολή λόγω ξήρανσης. Σταθεροποίησε με κολλοειδή πυριτία 6% wt. δοκίμιο άμμου M31 και πραγματοποίησε ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης. Κατά την ανακυκλική δοκιμή, επιβλήθηκε αρμονικά μεταβαλλόμενη διατμητική τάση με περίοδο $T=10$ s, πλάτος $\Delta\tau=62$ kPa και αρχική ισότροπη ενεργό τάση $p'_0=300$ kPa ($CSR=\Delta\tau/p'_0=0.21$). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10., εμφανίστηκαν σημαντικές παραμορφώσεις από τους πρώτους κιόλας κύκλους, το οποίο σημαίνει πως το στερεό δίκτυο της γέλης είχε σίγουρα τραυματιστεί αρκετά. Παρόλα αυτά, το σταθεροποιημένο έδαφος συνέχιζε να αντιστέκεται στην επιβαλλόμενη τάση. Μετά το πέρας της δοκιμής (κατά την οποία δεν εκδηλώθηκε κατάρρευση του δοκιμίου), το δοκίμιο αφέθηκε για 12 ώρες σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης και έπειτα επανέλαβε τη δοκιμή. Το δοκίμιο παρουσίασε άμεση απόκριση δείχνοντας πως η αποκατάσταση του ιστού της γέλης δεν είχε πραγματοποιηθεί, δεν ενεργοποιήθηκε δηλαδή ο μηχανισμός αυτοΐασης. Τέλος, προτείνει ότι η αποκατάσταση είναι ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να απαιτεί χρονικό ορίζοντα ημερών και όχι ωρών.



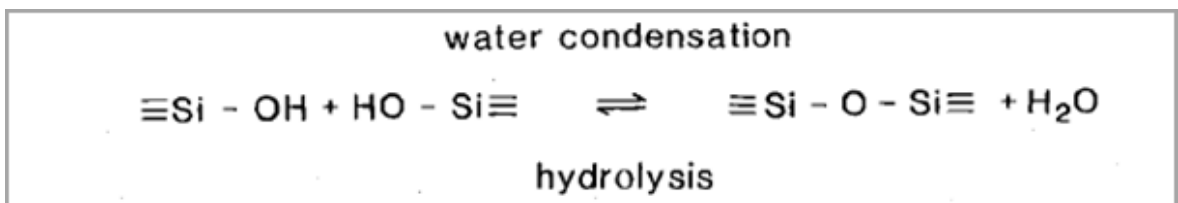
Σχήμα 2.9 Πρώτη σειρά από αριστερά προς τα δεξιά: το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας CS=10% wt. τη στιγμή που παρασκευάζεται, τη στιγμή που μετατρέπεται σε ελαστική γέλη και έπειτα, κατά την ωρίμανση. Δεύτερη σειρά: συστολή ξήρανσης της γέλης. Τρίτη σειρά από αριστερά προς τα δεξιά: καθαρή κολλοειδής πυριτία CS=10% wt. μετά από μερική ξήρανση σε θερμοκρασία δωματίου, πυριτία μετά από πλήρη ξήρανση σε θερμοκρασία δωματίου και, τέλος, η κολλοειδής πυριτία σε μερική και πλήρη ξήρανση της γέλης. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).



Σχήμα 2.10 Δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό αστάργγιστες συνθήκες. Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).

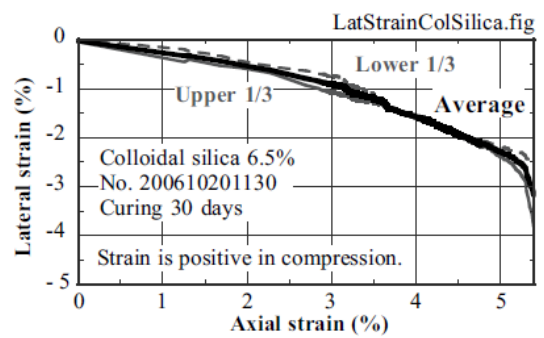
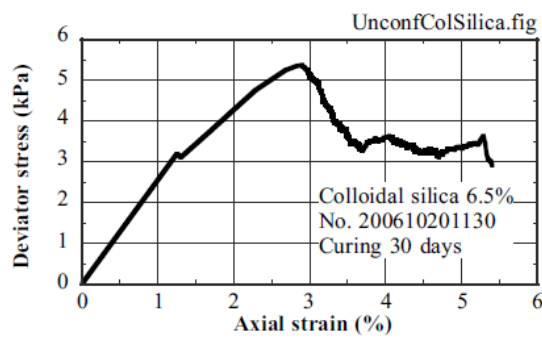


Σχήμα 2.11 Σύνδεση δύο σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά την πήξη της γέλης. Πηγή: Gallagher (2000).



Σχήμα 2.12 Η χημική αντίδραση της συμύκνωσης. Πηγή: Brinker και Scherer (1990).

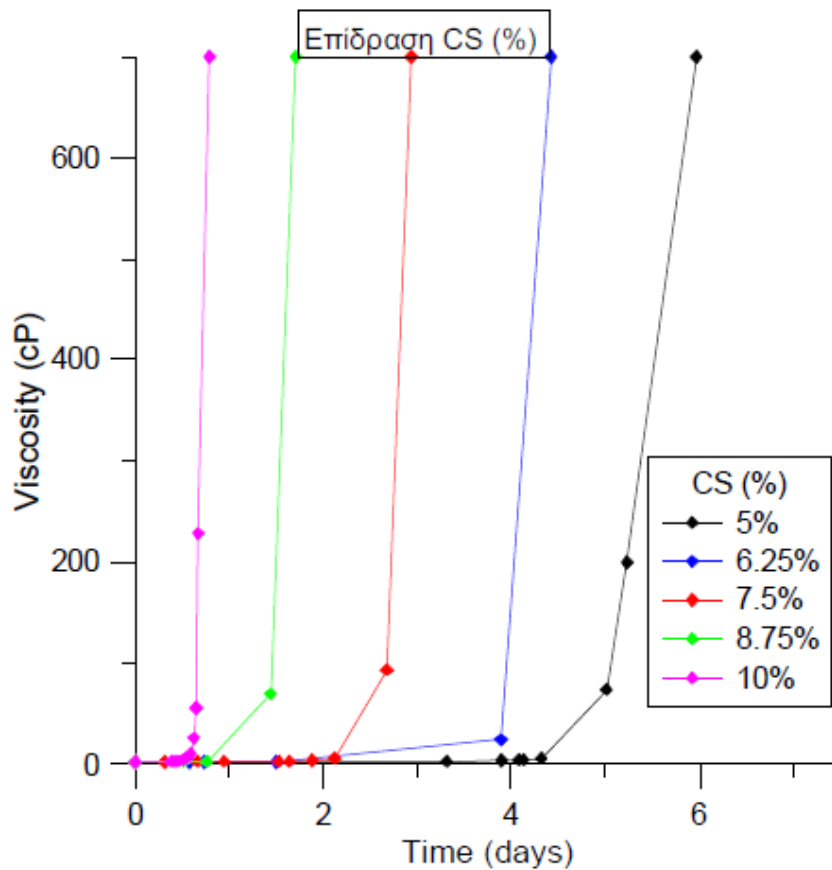
(α)



(β)



Σχήμα 2.13 Ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίου καθαρής πυριτίας CS=6.5%, ύστερα από ωρίμανση 30 ημερών μέσα σε νερό. Παρουσιάζονται: (α) τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων της δοκιμής και (β) φωτογραφίες του δοκιμίου πριν και μετά τη δοκιμή. Πηγή: Towhata (2008).



Σχήμα 2.14 Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρολύματα με pH=6.00, με κανονικότητα 0.03 N και με διάφορες περιεκτικότητες CS (%). Πηγή: Τριαντάφυλλος (2015).

3

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται στοιχεία παλαιότερων μελετών, σχετικών με την απόκριση φυσικών και σταθεροποιημένων μη συνεκτικών υλικών κατά τη διάτμηση. Η επισκόπηση τους κρίθηκε απαραίτητη για τη δημιουργία ενός ισχυρού θεωρητικού υποβάθρου με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους.

3.1. Συμπεριφορά φυσικού εδάφους κατά τη διάτμηση

3.1.1. Νόμος της αστοχίας

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αστοχίας του εδάφους παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, το οποίο απεικονίζει την επαφή μεταξύ δύο κόκκων αμμόδους υλικού και τις ορθές (N) και διατμητικές (T) δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ αυτών. Σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της μηχανικής τριβής ισχύει ότι:

$$T=N \times \tan(\varphi)$$

Ο συντελεστής $\tan\varphi$ είναι χαρακτηριστική τιμή των εδαφικών υλικών, η οποία εξαρτάται από τον τύπο και την ομαλότητα της επιφάνειας επαφής μεταξύ των κόκκων. Η γωνία φ ονομάζεται πραγματική γωνία τριβής του υλικού των κόκκων.

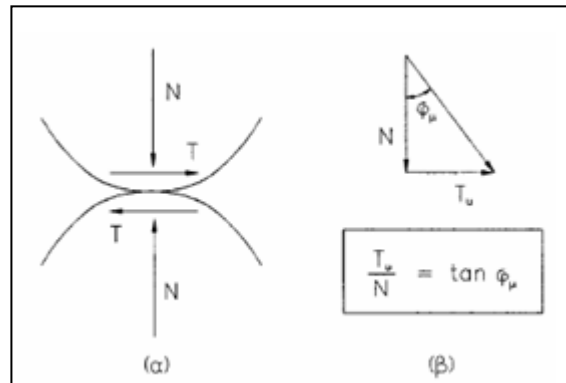
Από την παραπάνω μαθηματική σχέση, μεταφράζοντας τις δυνάμεις σε όρους ενεργών τάσεων, προκύπτει ο νόμος αστοχίας (ή νόμος του Coulomb) που καθορίζει όλους τους κρίσιμους συνδυασμούς των ενεργών τάσεων κατά την αστοχία. Η μαθηματική του έκφραση δίνεται από τον τύπο:

$$\tau = \sigma' \times \tan\varphi$$

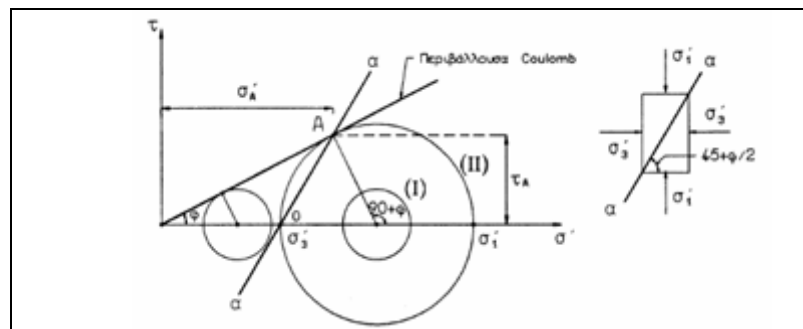
Προκύπτει λογικά από τον παραπάνω μαθηματικό τύπο ότι, για τα κοκκώδη εδάφη, το έδαφος δεν αστοχεί κατά μήκος του επιπέδου στο οποίο αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική τάση, αλλά κατά μήκος ενός επιπέδου στο οποίο ο λόγος της διατμητικής τάσης (τ) προς την ορθή τάση (σ') είναι ίσος με $\tan\varphi$.

Η γραφική παράσταση του νόμου αστοχίας του Coulomb είναι ευθεία με κλίση φ και ονομάζεται περιβάλλουσα Coulomb ή περιβάλλουσα αστοχίας. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται μια περιβάλλουσα αστοχίας και δύο κύκλοι Mohr. Ο κύκλος I προκύπτει

από την εντατική κατάσταση ενός εδαφικού στοιχείου που είναι ευσταθές, αφού ο κύκλος δεν εφάπτεται στην περιβάλλουσα. Αντίθετα, ο κύκλος II, που εφάπτεται, παριστάνει ένα στοιχείο το οποίο έχει αστοχήσει. Ο κρίσιμος συνδυασμός τάσεων στον κύκλο II παρατηρείται στο επίπεδο aa και οι τιμές της ορθής και διατμητικής δύναμης δίνονται από της συντεταγμένες του σημείου επαφής του κύκλου με την περιβάλλουσα αστοχίας (σημείο A).



Σχήμα 3.1 Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επαφή δύο κόκκων ενός αμμώδους υλικού. Πηγή: Καββαδάς (2005).

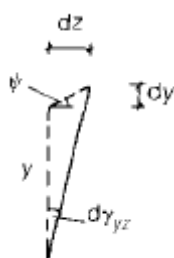


Σχήμα 3.2 Τυπικό διάγραμμα Mohr-Coulomb. Πηγή: Καββαδάς (2005).

3.1.2. Διαστολικότητα

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα κοκκώδη εδάφη κατά τη διάτμηση τους είναι η διαστολικότητα. Διαστολικότητα είναι η τάση των κοκκωδών εδαφών να αυξάνουν τον όγκο τους κατά τη διατμητική τους παραμόρφωση. Αυτό

συμβαίνει επειδή οι κόκκοι δεν έχουν την ελευθερία να κινούνται ο ένας γύρω από τον άλλο με αποτέλεσμα, όταν φορτίζονται, οι κόκκοι να υπερπηδούν τους γειτονικούς τους κόκκους και το έδαφος να διαστέλλεται. Αντίθετα, όταν το κοκκώδες υλικό έχει πολύ χαλαρή δομή μπορεί αρχικά να συστέλλεται αντί να διαστέλλεται υπό διάτμηση. Διαστολικό, λοιπόν, ονομάζεται ένα υλικό που αυξάνει τον όγκο του όταν αυξάνεται η διάτμηση του (Reynolds (1885)). Ένας άλλος ορισμός της διαστολικότητας είναι αυτός του Bolton (1986), όπου η γωνία της διαστολικότητας δίνεται από τον εξής τύπο (όπως φαίνεται και στο Σχήμα):



$$\tan\psi = \frac{dy}{dz}$$

Οι Rowe (1962) και Bolton (1986) συσχέτισαν την γωνία διαστολικότητας (ψ) με την μέγιστη γωνία τριβής ($\phi_{\max} = \arctan(\tau/\sigma'_{\nu})_{\max}$) και την γωνία τριβής κατά την κρίσιμη κατάσταση (ϕ_{crit}) της άμμου. Η μαθηματική σχέση που συνδέει τις τρεις αυτές γωνίες είναι:

$$\phi_{\max} = \phi_{\text{crit}} + \psi$$

Είναι προφανές, λοιπόν, πως η διαστολικότητα του εδάφους παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην συμπεριφορά του, μιας και η γωνία διαστολικότητας συνδέεται με τη γωνία τριβής του. Μπορεί, ακόμα, να παίζει κυρίαρχο ρόλο στην απόκριση του εδάφους σε έργα Πολιτικού Μηχανικού, όπως η διάνοιξη σήραγγας, η θεμελίωση πασσάλων κ.α. (Houlsby (1991)). Εν κατακλείδι, ο υπολογισμός της γωνίας διαστολικότητας της άμμου κρίνεται επιτακτικός για το σχεδιασμό ενός έργου και την πρόβλεψη της απόκρισης του εδάφους γύρω από αυτό.

3.1.3. Τυπική συμπεριφορά αμμωδών εδαφών κατά τη δοκιμή απ' ευθείας διάτμησης

Στη δοκιμή της απ' ευθείας διάτμησης, το επίπεδο θραύσης είναι προκαθορισμένο. Οι συνοριακές συνθήκες επιβολής του οριζόντιου φορτίου στο δοκίμιο είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και κατά συνέπεια, η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο δοκίμιο

είναι ανομοιομορφη. Επιπλέον, κατά τη διάτμηση είναι γνωστές μόνον οι ενεργές τάσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Επειδή, λοιπόν, είναι γνωστές οι τάσεις μόνο σε ένα επίπεδο, δεν είναι δυνατόν να σχεδιασθεί η τασική διαδρομή ούτε οι αντίστοιχοι κύκλοι Mohr κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Έτσι, οι δοκιμές αποσκοπούν στην κατασκευή της περιβάλλουσας αστοχίας και στην ερμηνεία της συμπεριφοράς του υλικού κατά την διάτμηση.

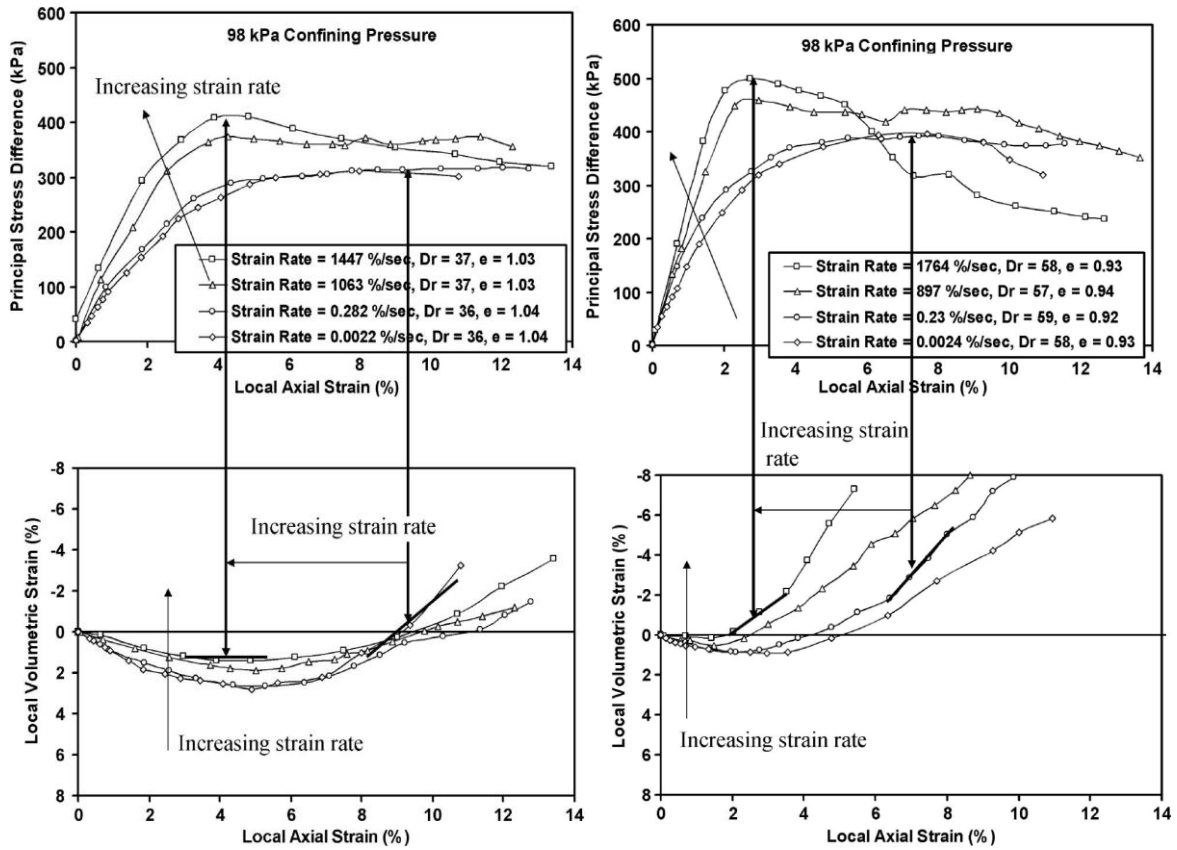
Η αρχική δομή των κόκκων του εδάφους παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του εδάφους κατά τη διάτμηση. Η χαλαρή δομή συνεπάγεται με αρχική συστολή του εδαφικού δείγματος, το οποίο δεν εμφανίζει διαφορά στην κορυφαία αντοχή του και στην αντοχή κατά την κρίσιμη κατάσταση. Αντίθετα, ένα αρχικά πυκνό δοκίμιο διαστέλλεται, αναπτύσσει μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και συνεπώς κινητοποιεί μια γωνία τριβής, μεγαλύτερη από αυτή της κρίσιμης κατάστασης (Terzaghi και Peck (1948), Taylor (1948)). Η κρίσιμη γωνία τριβής, δηλαδή η γωνία τριβής που αναπτύσσεται όταν το έδαφος υφίσταται διάτμηση υπό σταθερό όγκο, είναι χαρακτηριστική για κάθε έδαφος και είναι συνάρτηση της κοκκομετρίας του (Bolton (1986)). Σύμφωνα με τους Roscoe et al. (1958), το συσσωμάτωμα των κόκκων καταλήγει, κατά την κρίσιμη κατάσταση, στον ίδιο δείκτη πόρων, ανεξαρτήτως της αρχικής δομής τους, του οποίου η τιμή εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων.

Οι Terzaghi και Peck (1948) υποστήριξαν πως, όχι μόνο η σχετική πυκνότητα του δοκιμίου, αλλά και η επιβαλλόμενη κατακόρυφη ενεργός τάση επηρεάζει την διαστολικότητα και την διατμητική αντοχή του εδάφους. Πραγματοποίησαν δύο πειράματα σε τριαξονική συσκευή, τα οποία είχαν τον ίδιο αρχικό δείκτη πόρων αλλά διαφορετική πίεση κυψέλης (210 και 4500 kPa). Το δοκίμιο με την μικρή πίεση κυψέλης συμπεριφέρθηκε σαν πυκνό δοκίμιο, εμφανίζοντας σημαντική διαστολή σε αντίθεση με το άλλο δοκίμιο, το οποίο εμφάνισε συστολή. Σε μεγάλες τάσεις, η θραύση των κόκκων επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του υλικού κατά την διάτμηση. Αν οι κόκκοι ήταν τελείως σκληροί και άκαμπτοι, τότε μόνο η σχετική πυκνότητα θα επηρέαζε τη συμπεριφορά τους (Bolton (1986)). Η αύξηση, όμως, της πίεσης οδηγεί στη θραύση των κόκκων και τη μείωση των γωνιών τριβής και διαστολικότητας (Bishop (1972), Vesic και Clough (1968)).

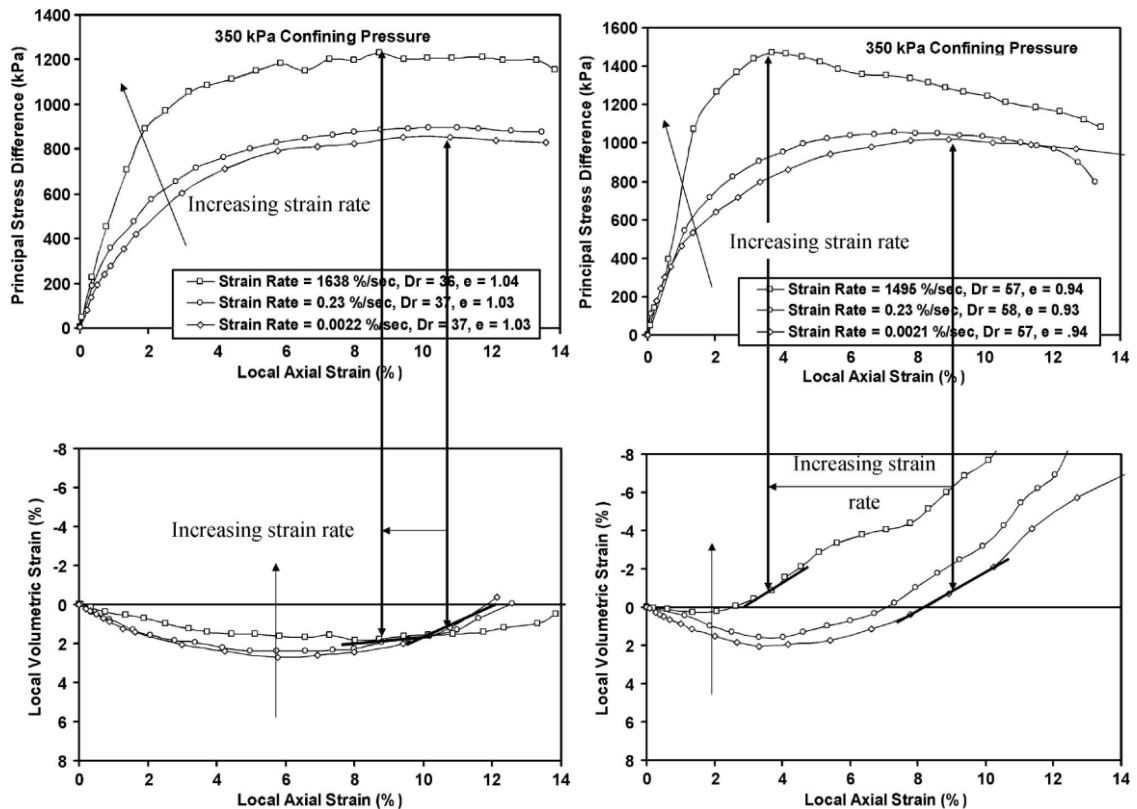
Ένας ακόμα παράγοντας, που φαίνεται να επηρεάζει τη διατμητική αντοχή των μη συνεκτικών εδαφών, είναι η ταχύτητα επιβολής διατμητικής παραμόρφωσης. Σε, στραγγιζόμενα και μη, τριαξονικά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, έχει επαληθευτεί πως η αύξηση της ταχύτητας συνεπάγεται μερική αύξηση της διατμητικής αντοχής του κοκκώδους εδάφους (Casagrande και Shannon (1948), Seed και Lundgren (1954), Yamamuro et al. (2011)). Μια πρόσφατη μελέτη έγινε από τους Yamamuro et al. (2011), οι οποίοι πραγματοποίησαν τριαξονικές δοκιμές σε ένα θρυμματισμένο κοραλλιογενές μη συνεκτικό έδαφος με $G_s=2.86$, $e_{max}=1.20$, $e_{min}=0.74$ και $D_{50}=0.32$ mm. Τα πειράματα ήταν στραγγιζόμενα και, επειδή οι μεγάλες ταχύτητες θα επηρέαζαν μερικώς (ή πλήρως) την στράγγιση, δημιούργησαν υποπίεση (98 kPa) στα κενά των κόκκων. Τα δοκίμια είχαν σχετικές πυκνότητες 38% και 58% και τέθηκαν υπό ενεργό πίεση 98 και 350 kPa. Για να πετύχουν μεγάλες ταχύτητες παραμόρφωσης κατασκεύασαν ένα σύστημα, στο οποίο ένα βαρίδιο έπεφτε (λόγω βαρύτητας) από διάφορα ύψη (μέχρι 5,5 m) και επέβαλλε, με αυτό τον τρόπο, τις εκλεγμένες ταχύτητες στο δοκίμιο. Οι ταχύτητες κυμαίνονταν από 0,0021%/s ως 1750%/s. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4. Είναι σαφές πως, όσο αυξάνεται η ταχύτητα:

1. Η αστοχία πραγματοποιείται σε μικρότερες παραμορφώσεις.
2. Η διαστολικότητα αυξάνεται αισθητά, σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες από το σημείο που πραγματοποιείται η αστοχία (χαρακτηριστικό των κοκκωδών εδαφών, όπως επιβεβαιώνεται κι εδώ για μικρές ταχύτητες).
3. Η ογκομετρική διαστολή αυξάνεται.

Σε αντίστοιχα συμπεράσματα κατέληξαν οι Mamo και Dey (2014), οι οποίοι πραγματοποίησαν δοκιμές απ' ευθείας διάτμησης σε φυσική άμμο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών τους έδειξαν πως η αύξηση του ρυθμού διάτμησης συνεπάγεται και αύξηση της εσωτερικής γωνίας τριβής του υλικού, με τη διαφορά να μειώνεται όσο αυξάνεται η σχετική πυκνότητα των δοκιμών.



Σχήμα 3.3 Αποτελέσματα στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε διάφορες ταχύτητες διατημητικής παραμόρφωσης. Αριστερά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων-αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για χαλαρά δοκίμια υπό ενεργό πίεση 98 kPa. Δεξιά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων-αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για μέσης πυκνότητας δοκίμια υπό ενεργό πίεση 98 kPa. Πηγή: Yamamuro et al. (2011)

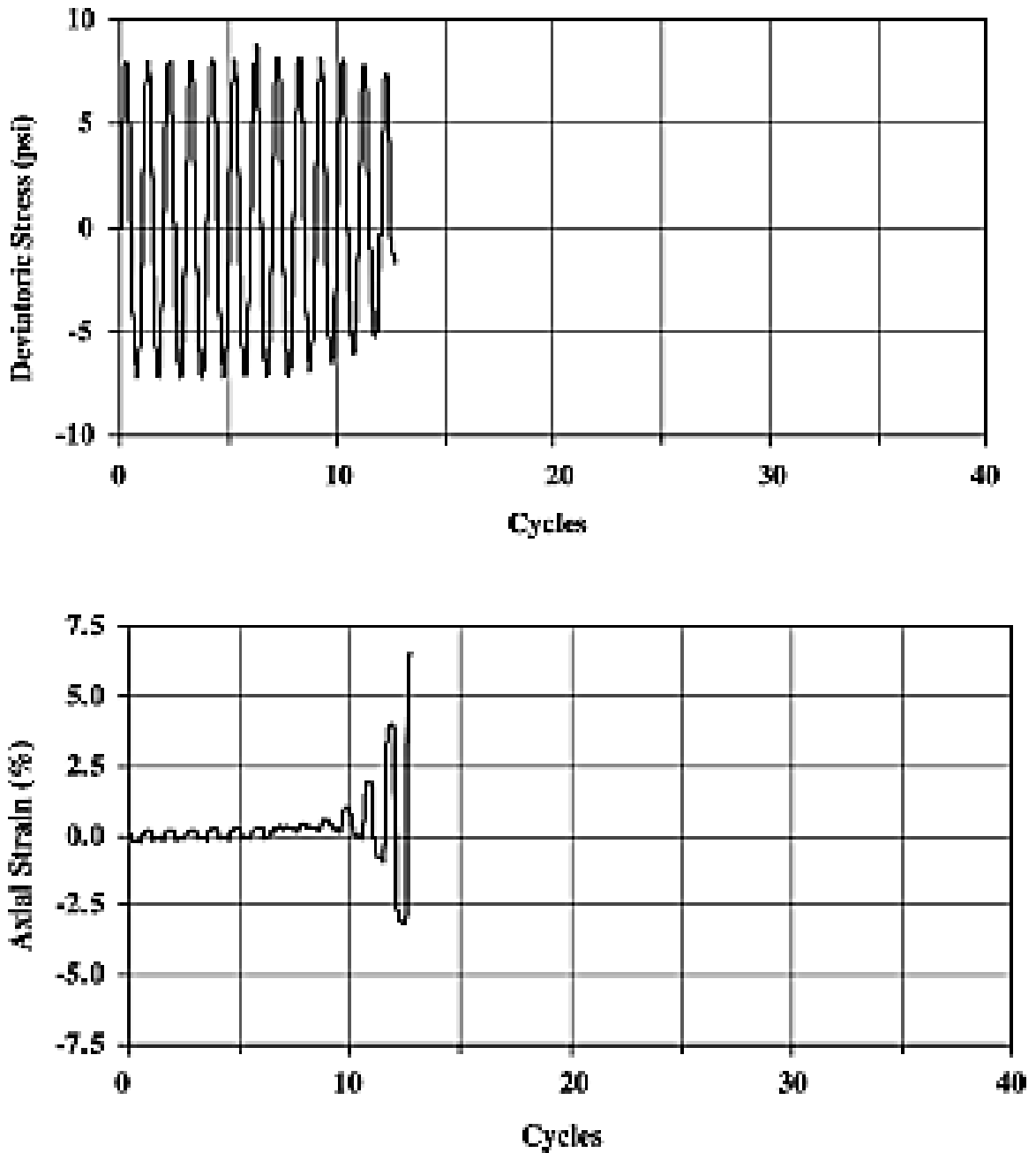


Σχήμα 3.4 Αποτελέσματα στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε διάφορες ταχύτητες διατμητικής παραμόρφωσης. Αριστερά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων-αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για χαλαρά δοκίμια υπό ενεργό πίεση 350 kPa. Δεξιά παρουσιάζονται οι καμπύλες διαφοράς κυρίων τάσεων-αξονικής παραμόρφωσης (επάνω) και ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης (κάτω) για μέσης πυκνότητας δοκίμια υπό ενεργό πίεση 350 kPa. Πηγή: Yamamuro et al. (2011)

3.2. Συμπεριφορά σταθεροποιημένου εδάφους

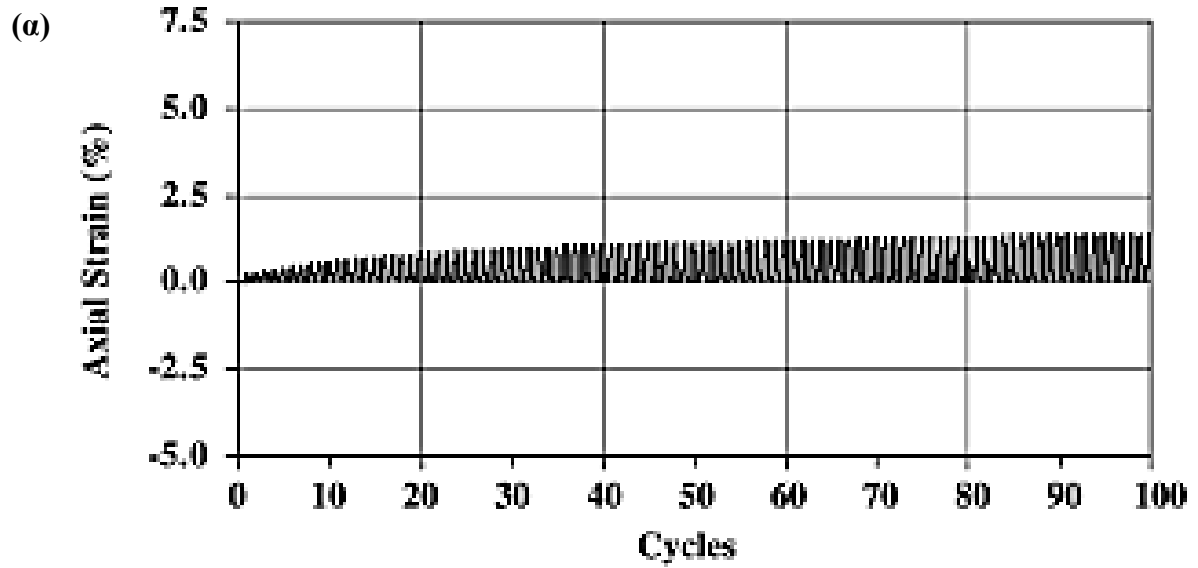
Η γέλη, πέρα από τα ελκυστικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά που εμφανίζει, παρουσιάζει και ιδιαίτερα ευεργετική δράση στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού σκελετού. Η αλληλεπίδραση του στερεού σκελετού της γέλης με τον εδαφικό σκελετό είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη βελτίωση της εδαφικής απόκρισης. Οι Gallagher και Mitchell (2002) και οι Porcino et al. (2011) παρατήρησαν πως η σταθεροποίηση των λεπτόκοκκων μη συνεκτικών εδαφικών υλικών με χημικά ενέματα πυριτίας βελτίωσε σημαντικά την αντοχή τους έναντι ρευστοποίησης. Οι πρώτοι, μετά από μια σειρά ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το φυσικό υλικό αποκτά μεγάλες παραμορφώσεις και καταρρέει σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από το σταθεροποιημένο, το οποίο και δεν καταρρέει. Πιο συγκεκριμένα, τα μη

σταθεροποιημένα δοκίμια ρευστοποιήθηκαν σε 1 με 2 κύκλους όταν και ανέπτυξαν παραμόρφωση 2% διπλού πλάτους (η μέγιστη, δηλαδή, αξονική παραμόρφωση που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου θλίψης και εφελκυσμού). Αντίθετα, τα σταθεροποιημένα δοκίμια ανέπτυξαν μεγάλες παραμορφώσεις μετά από αρκετούς κύκλους αλλά συνέχισαν να παραλαμβάνουν αντίστοιχου μεγέθους παραμορφώσεις για πολλούς ακόμα κύκλους, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.5 και 3.6.

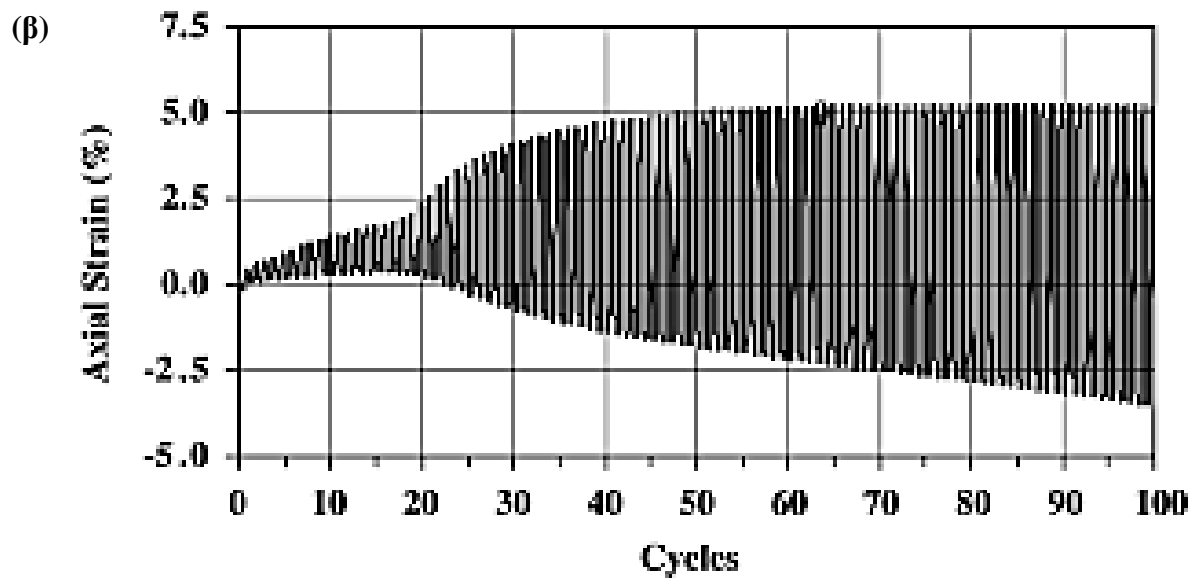


Σχήμα 3.5 Διαγράμματα ανακυκλικής δοκιμής άμμου Monterey με $D_r=22\%$, $CSR=0.27$. Πηγή: Gallagher και Mitchell (2002).

Treatment with 10% colloidal silica, CSR = 0.27

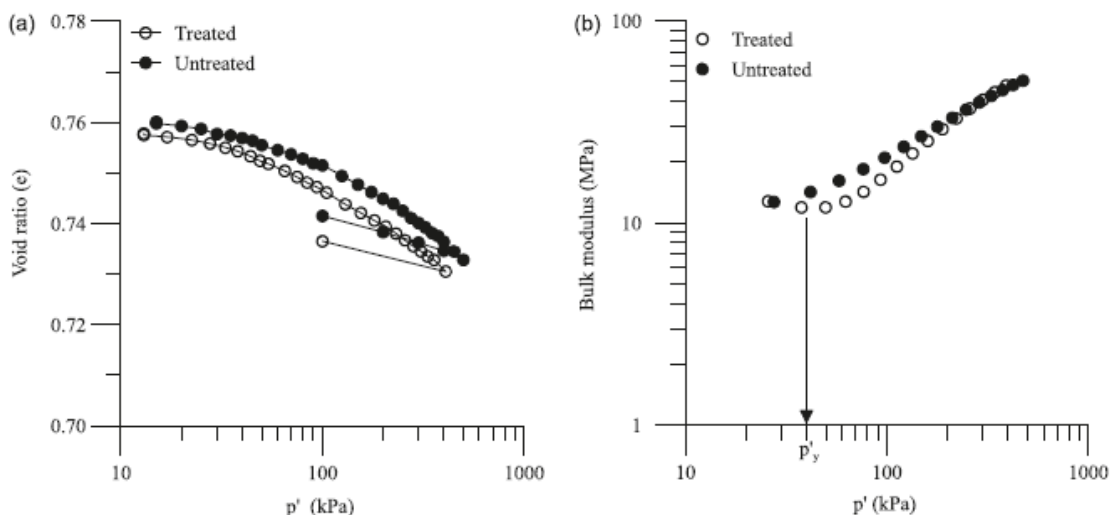


Treatment with 5% colloidal silica, CSR = 0.24



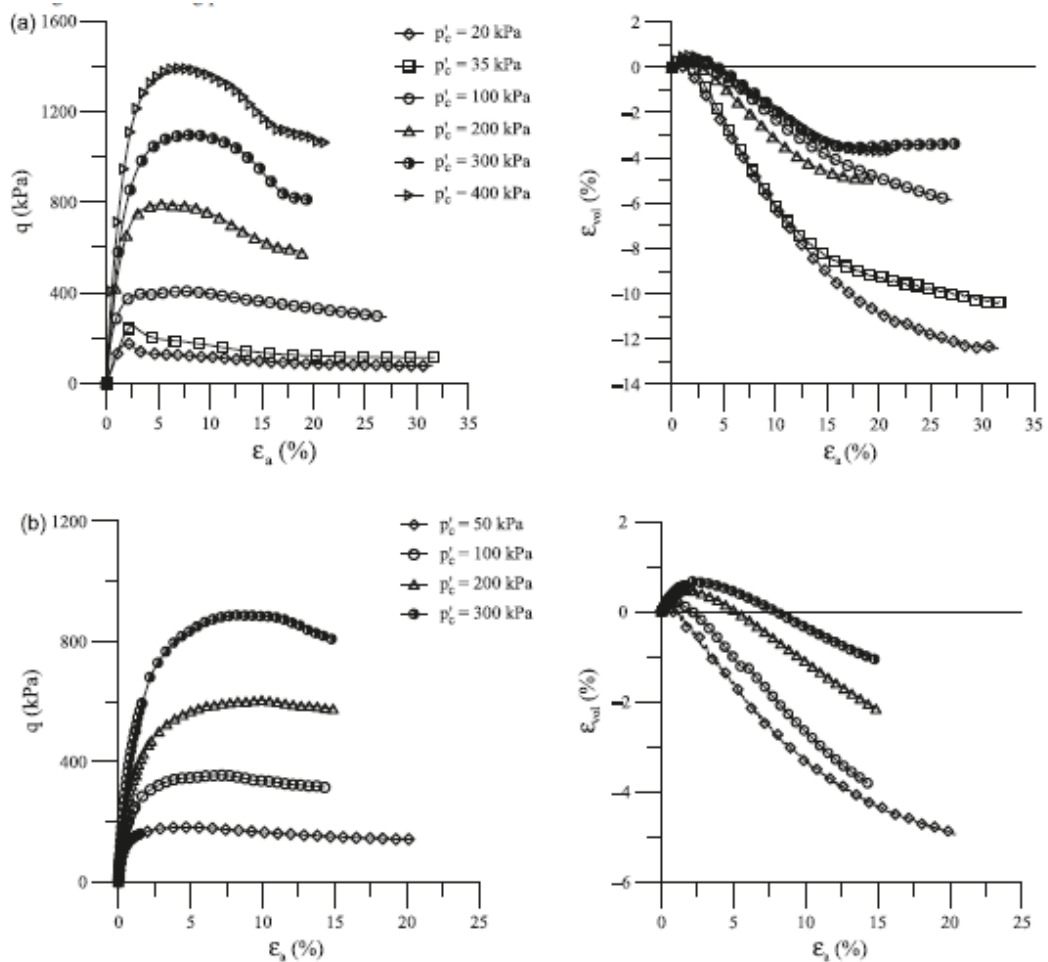
Σχήμα 3.6 Διαγράμματα ανακυκλικών δοκιμών σταθεροποιημένης άμμου Monterey με (α) 10% wt. και (β) 5% wt. κolloειδή πυριτία. Πηγή: Gallagher και Mitchell (2002).

Οι Porcino et al. (2011) και (2012) κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα πως η σταθεροποίηση του μη συνεκτικού εδαφικού υλικού με διάλυμα πυριτικού νατρίου οδήγησε σε πιο διαστολική συμπεριφορά και σε αξιόλογη αύξηση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Εξέτασαν φυσικά και σταθεροποιημένα (με υγρόλυμα πυριτικού νατρίου 10% wt.) δοκίμια άμμου Ticino River (TS), με χαρακτηριστικά $G_s=2.68$, $\gamma_{max}=16.67$, $\gamma_{min}=13.64$ και $D_{50}=0.6$ mm, σε τριαξονικές δοκιμές και σε δοκιμές απλής διάτμησης. Τα δοκίμια ήταν πλήρως κορεσμένα ($B \geq 0.96$) και είχαν όλα παρόμοια σχετική πυκνότητα, $D_r=45\%$, εκτός από κάποια σταθεροποιημένα, τα οποία είχαν $D_r=75\%$, ώστε να εξεταστεί η απόκριση των σταθεροποιημένων εδαφών για πυκνές αρχικές δομές. Οι δοκιμές που πραγματοποιήσαν στην τριαξονική συσκευή ήταν σε στραγγιζόμενες συνθήκες και η στερεοποίηση ήταν ισότροπη. Οι πιέσεις κυψέλης είχαν εύρος 50-300 kPa για τα φυσικά και 20-400 kPa για τα σταθεροποιημένα. Στο Σχήμα 3.7 (a) και (b) παρουσιάζονται οι καμπύλες της ισότροπης στερεοποίησης για σταθεροποιημένη και μη άμμο και το διάγραμμα μεταβολής του bulk modulus σε σχέση με το p' , αντίστοιχα. Παρατήρησαν πως, το bulk modulus μειώνεται αρχικά στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, μιας και, σε αντίθεση με τα κοκκώδη εδάφη, η σταθεροποίηση περιορίζει αρχικά την ευρεία θραύση των κόκκων, δίνοντας στο έδαφος περίπου ελαστική απόκριση. Από μια τιμή πίεσης και μετά (p'_y), η σταθεροποίηση παύει να επηρεάζει την συμπεριφορά του bulk modulus και το δοκίμιο συμπεριφέρεται σαν το φυσικό.

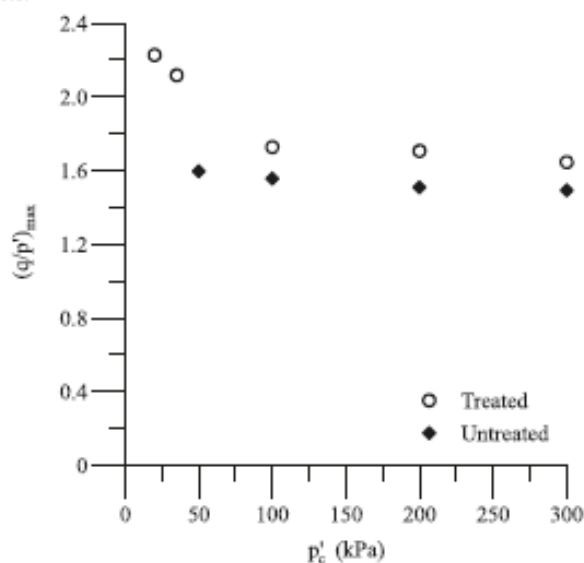


Σχήμα 3.7 Διαγράμματα: (a) ισότροπης συμπίεσης για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS, (b) μεταβολής του bulk modulus σε σχέση με την ενεργό τάση για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα q - αξονικής παραμόρφωσης ε_a και ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} - αξονικής παραμόρφωσης ε_a , όπου $q = \sigma_1 - \sigma_3$ (σ_1, σ_3 : κύριες τάσεις). Παρατήρησαν σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης μεταξύ των σταθεροποιημένων και των φυσικών εδαφικών δειγμάτων, όπως: μεγαλύτερη ψαθυρότητα, αυξημένη ογκομετρική διαστολή και διατμητική αντοχή των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Η μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, που επιτυγχάνεται λόγω της σταθεροποίησης, παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.9, όπου ο μέγιστος λόγος q/p' μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης, σε αντίθεση με τα φυσικά δοκίμια, όπου ο λόγος παραμένει εξ' αρχής σταθερός σε χαμηλότερες τιμές.



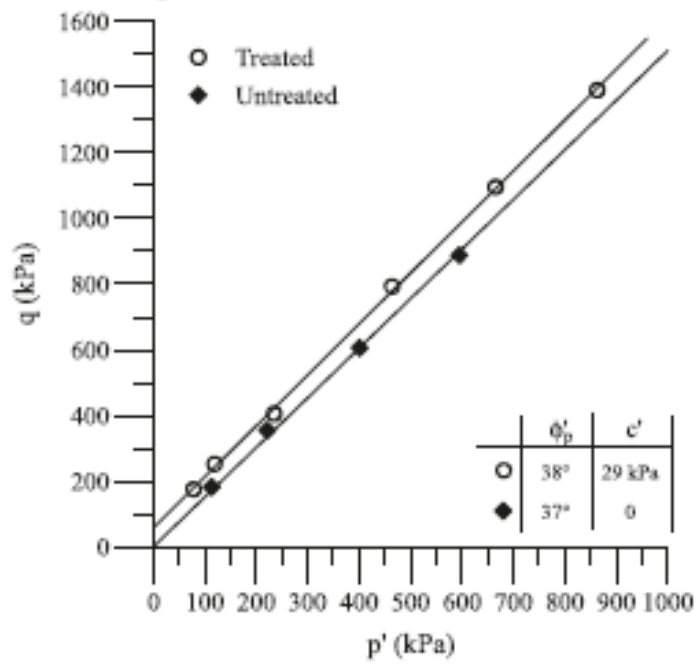
Σχήμα 3.8 Μηχανική απόκριση (a) σταθεροποιημένης και (b) μη σταθεροποιημένης άμμου TS για διάφορες τιμές ενεργών πιέσεων. Πηγή: Porcino et al. (2012).



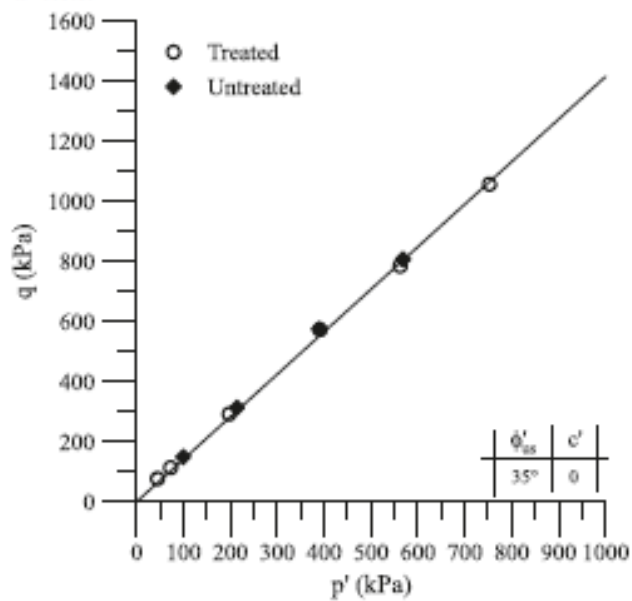
Σχήμα 3.9 Επιρροή της ενεργού τάσης στο μέγιστο q/p' για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS (από στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές). Πηγή: Porcino et al. (2012).

Όσον αφορά την αστοχία, οι Porcino et al. (2012) υποστήριξαν πως, η σταθεροποίηση της άμμου της προσδίδει μια μικρή συνοχή και, ταυτόχρονα, οι περιβάλλουσες αστοχίας του φυσικού και του σταθεροποιημένου εδάφους είναι παράλληλες (Σχήμα 3.10). Κατά την κρίσιμη κατάσταση, βέβαια, η σταθεροποίηση δεν επηρεάζει την αντοχή και όλα τα δοκίμια καταλήγουν στην ίδια περιβάλλουσα (για μεγάλες αξονικές παραμορφώσεις), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11.

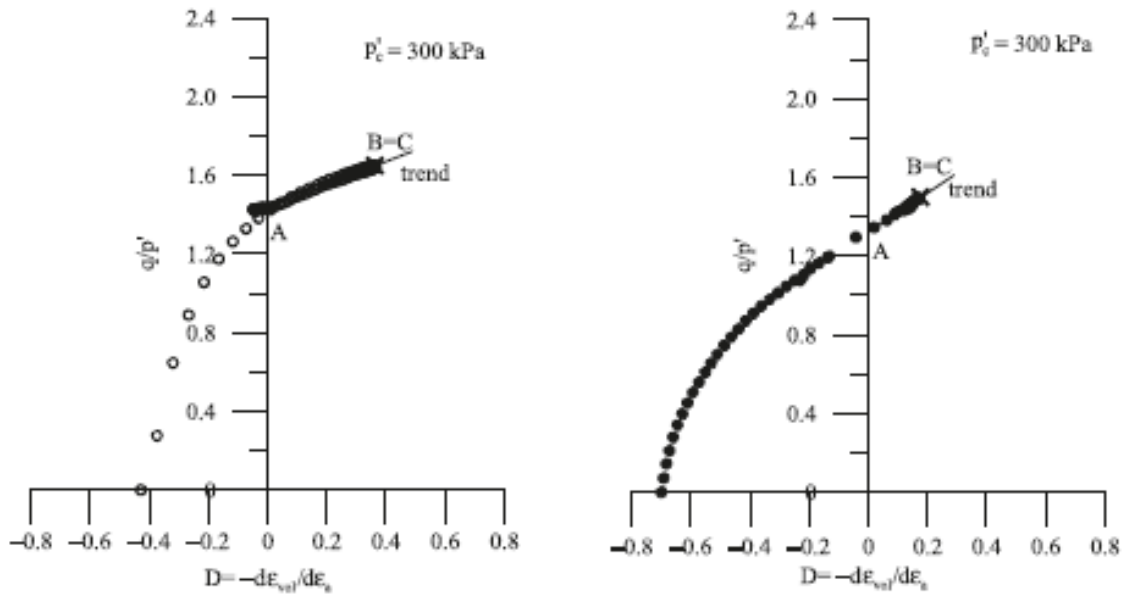
Τέλος, σχεδιάζοντας τα διαγράμματα διαστολικότητας (λόγος ογκομετρικής προς την αξονική παραμόρφωση) – q/p' (Σχήμα 3.12), ισχυρίστηκαν πως το έδαφος παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της διαστολικότητας κατά τη μέγιστη τιμή q/p' , είτε είναι σταθεροποιημένο είτε όχι. Από το σχήμα γίνεται επίσης σαφές και η μεγαλύτερη διαστολικότητα του σταθεροποιημένου εδαφικού δείγματος.



Σχήμα 3.10 Περιβάλλουσες αστοχίας κατά την κορυφαία κατάσταση για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).



Σχήμα 3.11 Περιβάλλουσα κατά την κρίσιμη κατάσταση για σταθεροποιημένη και μη άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα διαστολικότητας-λόγου q/p' για σταθεροποιημένη (αριστερά) και μη σταθεροποιημένη (δεξιά) άμμο TS. Πηγή: Porcino et al. (2012).

4 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων ενός εδαφικού υλικού είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν συνδέονται άμεσα με τις φυσικές, αλλά μέσω εμπειρικών σχέσεων επιτρέπεται ο προσεγγιστικός προσδιορισμός τους. Ο αριθμός των φυσικών ιδιοτήτων που είναι απαραίτητος για τον πλήρη χαρακτηρισμό του εδάφους είναι αρκετά μεγάλος, αφού είναι ένα υλικό που αποτελείται από τρεις φάσεις (στερεή, υγρή και αέρια), κάνοντας την μελέτη του δυσκολότερη από των υπολοίπων υλικών. Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται κάποιες βασικές μέθοδοι προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και τα αποτελέσματά τους.

4.1. Πειραματικός προσδιορισμός μεγέθους κόκκων

Το μέγεθος των εδαφικών κόκκων είθισται να εκφράζεται σαν διάμετρος του κόκκου. Το εύρος των μεγεθών ποικίλει για τα συνήθη εδαφικά υλικά από 0,00001 mm ως 10 mm. Για τα αμμώδη εδαφικά υλικά, η διάμετρος του κόκκου τους υπολογίζεται ως το μέγεθος της μικρότερης τετραγωνικής οπής του κόσκινου, δια μέσου του οποίου διέρχεται ο κόκκος. Αυτή η διάμετρος δεν είναι απαραίτητα η μικρότερη εκ των τριών καθέτων διαστάσεων του κόκκου, αλλά κάποια ενδιάμεση, έτσι ώστε η μεγαλύτερη διάσταση να είναι κάθετη στην οπή του κόσκινου. Το μέγεθος του κόκκου τους κυμαίνεται από 0,06 mm έως και 2 mm, αρκετά μεγάλο, δηλαδή, ώστε οι δυνάμεις βαρύτητας να παίζουν καθοριστικό ρόλο στην μηχανική συμπεριφορά αυτών των υλικών και να παρουσιάζουν, έτσι, τελείως διαφορετική συμπεριφορά από τα κολλοειδή.

Οι κόκκοι στα εδάφη ποικίλουν όχι μόνο ως προς το μέγεθος, αλλά και ως προς το σχήμα τους. Δύο είναι οι βασικές διακρίσεις ως προς το σχήμα των κόκκων: οι περίπου σφαιρικού σχήματος κόκκοι, που οι τρεις διαστάσεις τους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, και οι πλατύς κόκκοι, με πάχος πολύ μικρότερο της διαμέτρου τους. Οι σφαιροειδής κόκκοι παρουσιάζονται κατά κανόνα στα αμμώδη εδάφη και τα αμμοχάλικα ενώ οι πλατύς συναντώνται, κυρίως, στις ιλεις και τις αργίλους. Τα αμμώδη εδάφη αποτελούνται από

περίπου σφαιρικούς κόκκους που μπορεί να έχουν στρογγυλό ή γωνιώδες σχήμα. Είναι δυνατόν να φέρουν μεγάλα στατικά φορτία και να προκαλούνται σχετικά μικρές παραμορφώσεις (ιδιαίτερα όταν οι κόκκοι τους είναι γωνιώδεις). Επίσης, με την επίδραση δονήσεων τα εδάφη αυτά υφίστανται εύκολα μετατοπίσεις και αναδιάταξη των κόκκων τους.

4.1.1. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα

Η κατανομή των κόκκων και το σχήμα που γενικά επικρατεί στα εδάφη είναι από τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν τους διάφορους τύπους εδαφών και παίζουν πολύ ουσιώδη ρόλο στη συμπεριφορά τους. Για τον προσδιορισμό αυτής της κατανομής πραγματοποιήθηκαν κοκκομετρικές αναλύσεις με αμερικάνικα πρότυπα κόσκινα, σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM D422-63 και BS-1377. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Η ποσότητα του δείγματος που χρησιμοποιείται για την κοκκομετρική ανάλυση δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το μέγεθος του μεγίστου κόκκου του εδάφους. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα εδαφικού υλικού, που τουλάχιστον ποσοστό 95% διέρχεται από το κόσκινο N° 8 (οπή διαμέτρου 2,38 mm), είναι 100 gr. Σε κάθε κοκκομετρική ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν περίπου 200 gr φυσικού υλικού.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των εδαφών μπορεί να αξιοποιηθούν, εκφράζοντας τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά τους, με σχέσεις που χρησιμοποιούν αριθμητικές τιμές των διαμέτρων των κόκκων της καμπύλης διαβάθμισης. Ένας συνήθης τρόπος έκφρασης των χαρακτηριστικών αυτών είναι ο συντελεστής C_u (ή συντελεστής Hazen) και είναι ενδεικτικός του βαθμού ομοιομορφίας ενός εδάφους. Αν ο δείκτης είναι μικρότερος του 5, το έδαφος θεωρείται ομοιόμορφο ενώ για $5 < C_u < 15$ θεωρείται μέσης ομοιομορφίας. Ο συντελεστής υπολογίζεται από την έκφραση:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Όνομασία κόσκινου	Διάμετρος οπής κόσκινου (mm)
N° 10	2,000
N° 20	0,850
N° 40	0,425
N° 50	0,300
N° 60	0,250
N° 70	0,212
N° 100	0,150
N° 200	0,075

Πίνακας 4.1 Διαστάσεις οπών κοσκίνων.

4.2. Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων

Γνωρίζοντας τη σχετική πυκνότητα (D_r) ή το δείκτη πόρων (e) μιας καθαρής άμμου μπορούμε να εκτιμήσουμε την απόκρισή της. Ο δείκτης πόρων ενός εδαφικού υλικού ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών (V_v) προς τον όγκο των στερεών κόκκων (V_s) και δίνεται από την σχέση:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1 - n}, \text{ όπου } n: \text{ πορώδες}$$

Τα μη συνεκτικά εδαφικά υλικά μπορεί να εμφανιστούν στη φύση με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων, ανάλογα με τη διάταξη των κόκκων τους. Η πλέον χαλαρή διάταξη των κόκκων, με το μέγιστο ποσοστό κενών, αντιστοιχεί στην ελάχιστη πυκνότητα ενώ η πλέον πυκνή διάταξη των κόκκων, με το ελάχιστο ποσοστό κενών, αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα. Ένα χρήσιμο μέγεθος για το χαρακτηρισμό της κατάστασης μιας άμμου σε σχέση με την ελάχιστη και τη μέγιστη πυκνότητα είναι η σχετική πυκνότητα (D_r), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητος, ο πειραματικός προσδιορισμός του μέγιστου (e_{\max}) και του ελάχιστου (e_{\min}) δείκτη πόρων.

Ο μέγιστος δείκτης πόρων προσδιορίστηκε με τη μέθοδο του Kolbuszewski (1948). Σε διάφορους γυάλινους ογκομετρικούς σωλήνες αποτέθηκαν ποικίλες ποσότητες ξηρού

εδαφικού υλικού και το άκρο τους καλύφθηκε με ελαστική μεμβράνη. Στις σωλήνες επιβλήθηκε χειροκίνητη ανάδευση, αναποδογυρίστηκαν μερικές φορές και επέστρεψαν στην αρχική τους θέση. Η διαδικασία επαναλήφθηκε 5 φορές για κάθε δόκιμή. Μετά το τέλος της δοκιμής, καταγράφηκε η ένδειξη του ογκομετρικού σωλήνα και το εδαφικό υλικό ζυγίστηκε. Μέσω του όγκου του δοκιμίου, του ειδικού βάρους (G_s) και της μάζας της άμμου υπολογίστηκε ο μέγιστος δείκτης πόρων.

Ο ελάχιστος δείκτης πόρων προσδιορίστηκε ως εξής: σε ειδικό δοχείο κυλινδρικού σχήματος αποτέθηκε σε πέντε διαδοχικές στρώσεις η εξεταζόμενη άμμος. Κάθε στρώση συμπυκνώθηκε με συνεχή χτυπήματα της άμμου (100 περίπου ανά στρώση), από ειδικό χειροκίνητο όργανο. Στη συνέχεια καταγράφηκε ο συνολικός όγκος του δοκιμίου και ζυγίστηκε το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε. Αντίστοιχα με τον υπολογισμό του μέγιστου δείκτη πόρων, υπολογίζεται και ο ελάχιστος δείκτης πόρων.

4.3. Φυσικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά

Στα πειράματα που εκτελούνται στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιείται εργαστηριακή άμμος, και όχι εδαφικά υλικά που μπορούμε να συλλέξουμε από το φυσικό περιβάλλον. Αυτά τα εδαφικά υλικά είναι κατάλληλα επεξεργασμένα ώστε να είναι καθαρά (χωρίς προσμίξεις με άλλα υλικά), σχετικά ομοιογενή, κατάλληλα διαβαθμισμένα και να περιέχουν κόκκους με χαρακτηριστικό μέγεθος και σχήμα. Η χρήση τέτοιων εδαφικών υλικών οδηγεί σε ακριβή συμπεράσματα για την εδαφική απόκριση καθώς είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές της παρούσας εργασίας είναι η άμμος M31, η άμμος Longstone και η άμμος Fontainebleau. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και οι κοκκομετρικές καμπύλες τους στο Σχήμα 4.2.

4.3.1. Άμμος M31

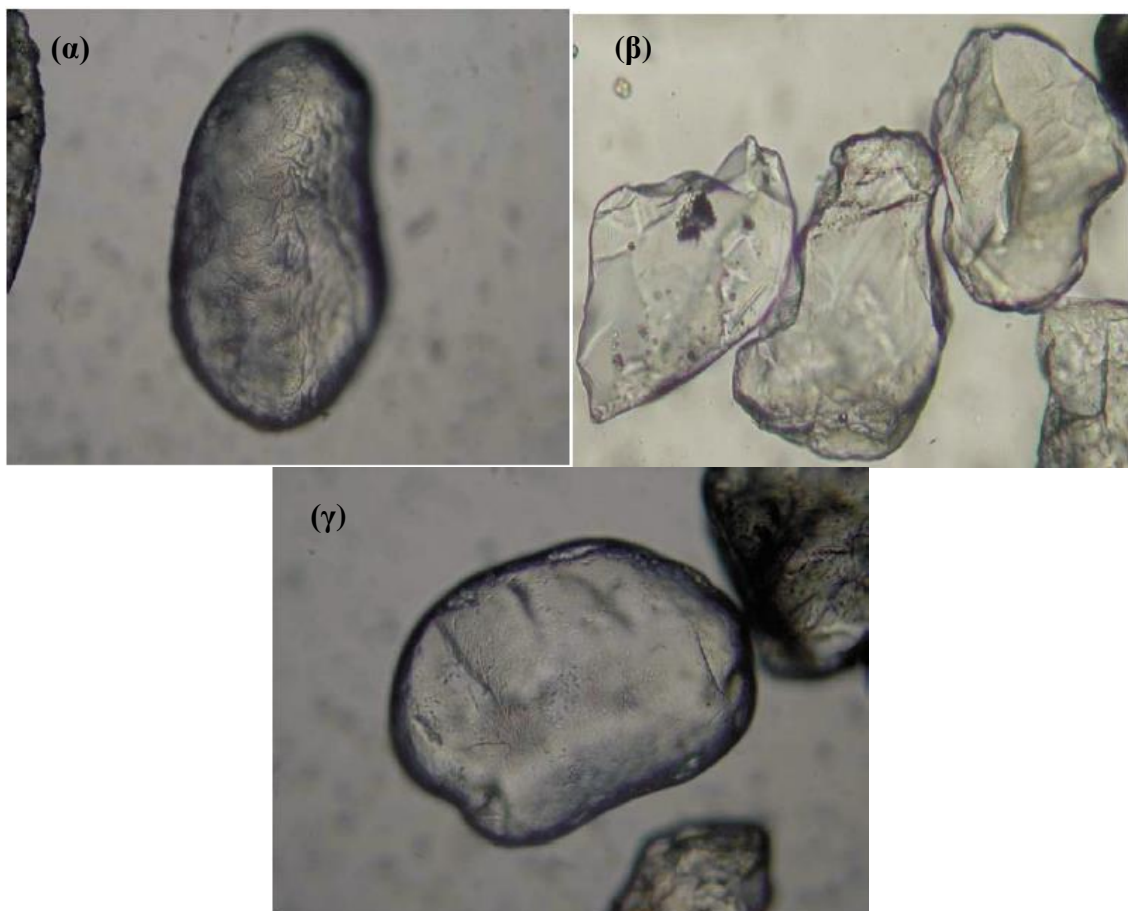
Η ανάλυση στο μικροσκόπιο (Σχήμα 4.1) έδειξε ότι η άμμος M31 πρόκειται για καθαρή άμμο, με σχετικά ομοιόμορφα στιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα. Η στιλβωση αποτελεί ένδειξη προέλευσης από υδάτινο περιβάλλον. Οι κόκκοι στην πλειονότητά τους είναι διαυγείς. Το ειδικό βάρος της έχει τιμή $G_s=2.66$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων της είναι $e_{\max}=0.844$ και $e_{\min}=0.505$ αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά της μεγέθη είναι $D_{10}=0.218$ mm, $D_{30}=0.275$ mm, $D_{50}=0.314$ mm, $D_{60}=0.359$ mm και $C_u=1.66$.

4.3.2. Άμμος Longstone

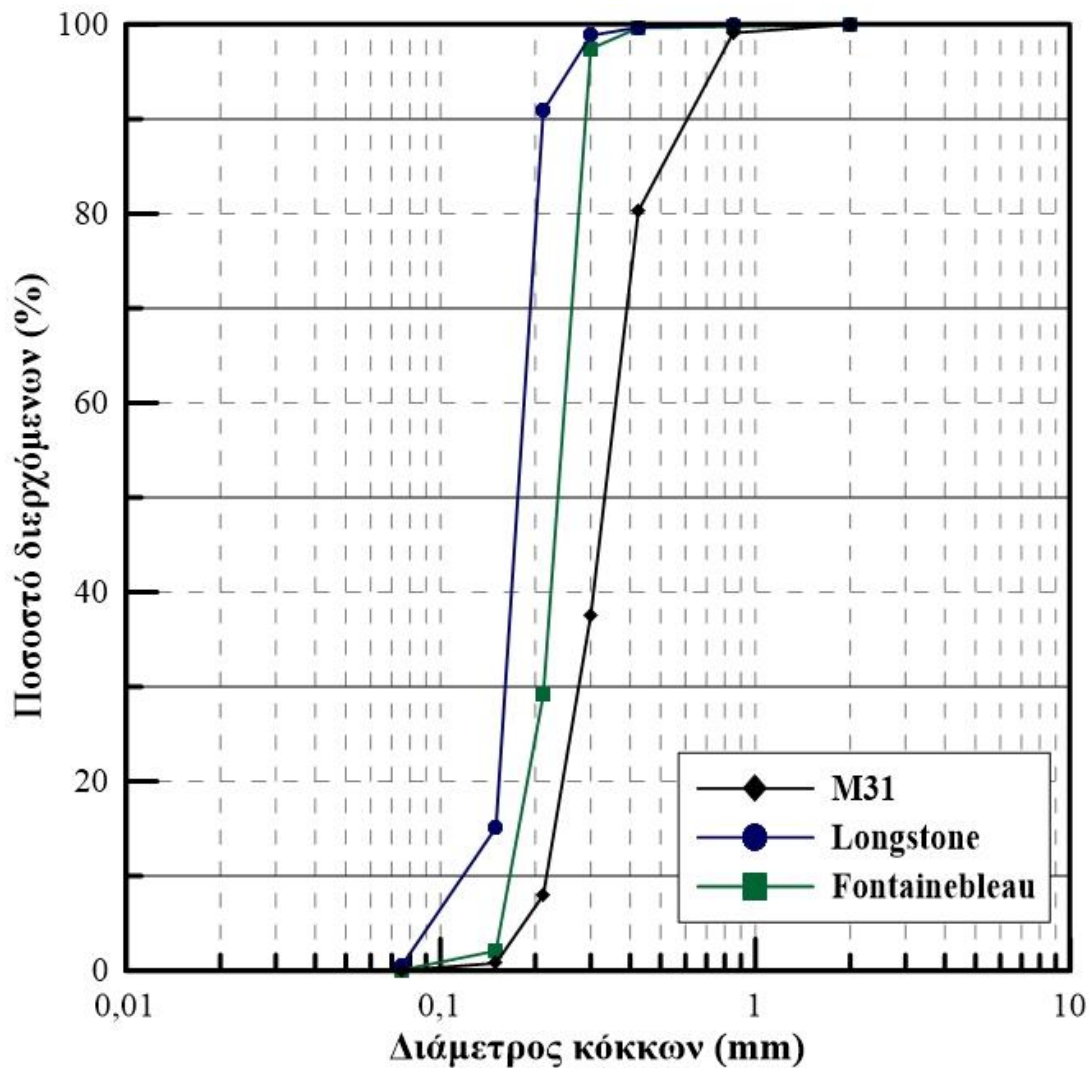
Η άμμος Longstone αποτελείται από λεπτούς και γωνιώδεις κόκκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το ειδικό βάρος της έχει τιμή $G_s=2.64$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων της είναι $e_{max}=0.995$ και $e_{min}=0.614$ αντίστοιχα, τιμές μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες άμμους λόγω των γωνιωδών κόκκων της. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά της μεγέθη είναι $D_{10}=0.118$ mm, $D_{30}=0.161$ mm, $D_{50}=0.176$ mm, $D_{60}=0.184$ mm και $C_u=1.56$.

4.3.3. Άμμος Fontainebleau

Η Fontainebleau είναι μια λευκή πυριτική άμμος που αποτελείται από λεπτούς στρογγυλούς κόκκους (Σχήμα 4.1). Έχει ειδικό βάρος $G_s=2.64$, μέγιστο και ελάχιστο δείκτη πόρων $e_{max}=0.866$ και $e_{min}=0.540$ και τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά μεγέθη της είναι $D_{10}=0.165$ mm, $D_{30}=0.214$ mm, $D_{50}=0.236$ mm, $D_{60}=0.246$ mm και $C_u=1.49$.



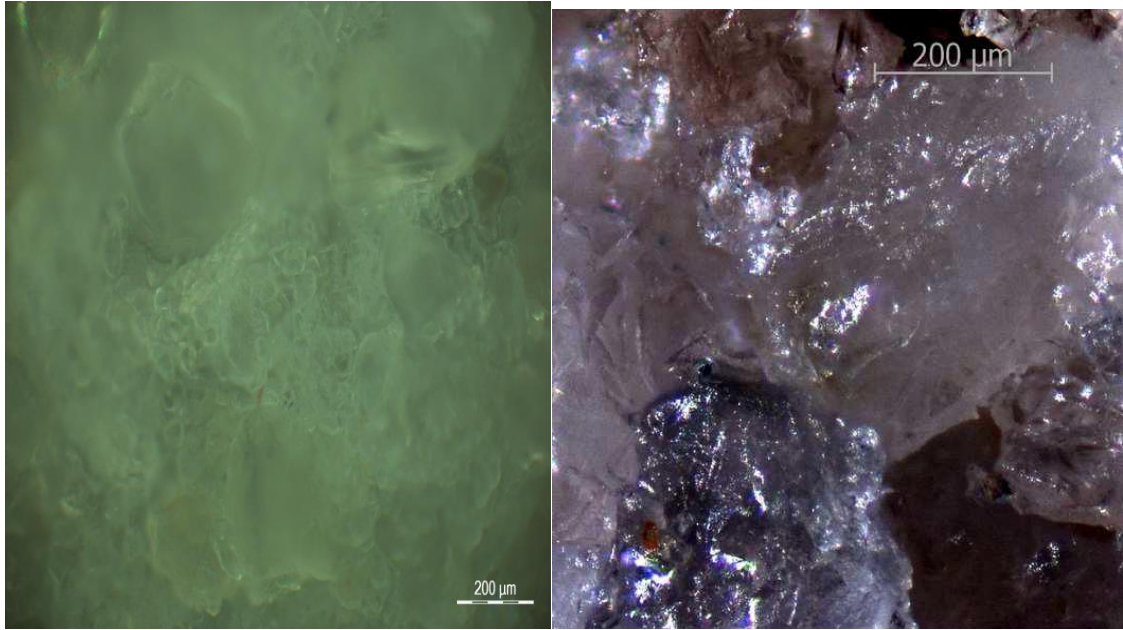
Σχήμα 4.1 Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης 100×) των κόκκων της (α) άμμου M31, (β) άμμου Longstone και (γ) άμμου Fontainebleau. Πηγή: Tsomokos και Georgiannou (2010).



Σχήμα 4.2 Κοκκομετρικές καμπύλες.

4.4. Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά

Για να παρατηρήσουμε σε μικροσκοπική κλίμακα το υλικό της κολλοειδούς πυριτίας και να κατανοήσουμε τον τρόπο που συνδέεται με το φυσικό έδαφος, δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας και σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του ΕΜΠ και του Imperial College of London. Η κολλοειδής πυριτία διοχετεύεται ομοιόμορφα στο εδαφικό υλικό και καλύπτει όλη την επιφάνεια των κόκκων προσδίδοντας τις ευεργετικές της ιδιότητες σε όλη την έκταση του υλικού. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το δείγμα σταθεροποιημένης άμμου, σε φωτογραφία από το μικροσκόπιο του ΕΜΠ αριστερά και του Imperial College δεξιά.



Σχήμα 4.3 Φωτογραφίες (από μικροσκόπιο) σταθεροποιημένης M31 άμμου.

Sand	M31	Longstone	Fontainebleau
G _s	2.66	2.64	2.64
e _{min}	0.505	0.614	0.540
e _{max}	0.844	0.995	0.866
D ₁₀ (mm)	0.218	0.118	0.165
D ₃₀ (mm)	0.275	0.161	0.214
D ₅₀ (mm)	0.314	0.176	0.236
D ₆₀ (mm)	0.359	0.184	0.246
C _u	1.66	1.56	1.49

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά άμμων M31, Longstone και Fontainebleau.

5

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που εξετάζει ο κλάδος της Εδαφομηχανικής είναι το φαινόμενο της στερεοποίησης. Το φαινόμενο της στερεοποίησης των εδαφών οφείλεται στην πολυφασικότητα τους και, ειδικότερα, στη μεγάλη διαφορά συμπίεστότητας μεταξύ του εδαφικού σκελετού και του νερού των πόρων. Στο Κεφάλαιο αυτό μελετάται η μονοδιάστατη συμπίεση αμμωδών εδαφικών υλικών. Μονοδιάστατη συμπίεση είναι η φόρτιση ενός εδαφικού στοιχείου κατά την οποία του επιβάλλεται ορθή παραμόρφωση στον κατακόρυφο άξονα με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών παραμορφώσεων στους οριζόντιους άξονες καθώς και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων. Η μονοδιάστατη συμπίεση είναι συνήθης τρόπος παραμόρφωσης ενός εδαφικού υλικού. Παρατηρείται, παραδείγματος χάριν, σε τεχνικά έργα όπου κατακόρυφες φορτίσεις μεγάλης έκτασης ασκούνται στις εδαφικές στρώσεις, παρεμποδίζοντας τις οριζόντιες πλευρικές παραμορφώσεις (π.χ. έργα οδοποιίας, μεγάλες θεμελιώσεις).

5.1. Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασίας παρασκευής δοκιμίων

5.1.1. Περιγραφή συσκευής

Η δοκιμή της μονοδιάστατης συμπίεσης πραγματοποιήθηκε στη συσκευή του συμπιεσόμετρου (Wykeham Farrance N^o 24255), που φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Η συσκευή αποτελείται από μια συσκευή φόρτισης και από ένα κυλινδρικό δοχείο που ονομάζεται κυψέλη στερεοποίησης.

Η συσκευή φόρτισης έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει ένα μεγάλο εύρος ορθών τάσεων στο δοκίμιο, ανάλογο των κιλών που εφαρμόζονται χειροκίνητα από τον πειραματιστή, καθώς, και από το μοχλοβραχίονα τους. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τάσεις που μεταβιβάζει η συσκευή στο δοκίμιο με την τοποθέτηση 1 kg σε 3 διαφορετικές θέσεις (με διαφορετικό μοχλοβραχίονα), για 3 διαφορετικές τιμές διαμέτρου του δαχτυλιδιού. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αναλάβει η συσκευή είναι 400 kg.

Η κυψέλη στερεοποίησης απαρτίζεται από ένα δαχτυλίδι στερεοποίησης (λείο εσωτερικά, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι για να παρεμποδίζεται η ανάπτυξη πλευρικών τριβών και παραμορφώσεων), από μια στεγανή βάση και σώμα κυψέλης, από

δύο πορόλιθους (για να επιτρέπεται η στράγγιση) και από ένα μεταλλικό κεφαλόδεσμο φόρτισης.

5.1.2. Παρασκευή δοκιμών

Για την παρασκευή των δοκιμών ακολουθήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη αφορά την παρασκευή δοκιμίου μη σταθεροποιημένης άμμου (φυσικής) και η άλλη της σταθεροποιημένης. Οι κανονισμοί που ακολουθήθηκαν ήταν οι BS 1377:1975, Test 17, αλλά λήφθηκαν υπόψιν και οι αμερικανικοί κανονισμοί (ASTM D2435). Για τις ανάγκες των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δαχτυλίδια στερεοποίησης, με διαμέτρους $d=50$ mm και $d=75$ mm (Πίνακας 5.2).

Όσον αφορά τα φυσικά δοκίμια, η παρασκευή του δοκιμίου εκτελέστηκε εντός της κυψέλης στερεοποίησης. Η κυψέλη τοποθετήθηκε, αρχικά, στη συσκευή του συμπιεσόμετρου και εφαρμόστηκαν μέσα σε αυτή ένας στεγνός πορόλιθος στη βάση και πάνω του το δαχτυλίδι στερεοποίησης. Έπειτα, με τη βοήθεια ενός χωνιού αποτέθηκε μια ποσότητα άμμου μέσα στο δαχτυλίδι, μέχρι την πλήρωσή του. Τέλος, τοποθετήθηκαν ο άλλος πορώδης δίσκος, μια διάταξη σταθεροποίησης του δακτυλίου με βίδες και ένας μεταλλικός κεφαλόδεσμος φόρτισης (top cap). Τα δοκίμια ζυγίστηκαν μετά το πέρας των δοκιμών.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Το υγρόλυμα αποτελείται από αποσταγμένο νερό στο οποίο έχει προστεθεί σταθεροποιητής (LUDOX SM-30), σε ποσοστό 10% wt., και κατάλληλο ποσοστό αλάτων (0,03 N NaCl). Το pH του ρυθμίστηκε με την προσθήκη αραιού διαλύματος HCl ώστε να έχει τιμές $pH=5\div 6$. Σε ένα δοχείο τοποθετήθηκε το δαχτυλίδι στερεοποίησης και το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας και εμβαπτίστηκε το ξηρό εδαφικό υλικό. Το δοκίμιο παρέμεινε σε αεροστεγείς συνθήκες για 50 ώρες, χρόνος που σηματοδοτεί το τέλος της πήξης του υγρούλυματος. Στη συνέχεια, το δαχτυλίδι με το εδαφικό υλικό στο εσωτερικό του μεταφέρθηκε και τοποθετήθηκε στη συσκευή, προσπαθώντας να μην υπάρξουν διαταράξεις κατά τη μεταφορά. Οι πορόλιθοι ήταν κορεσμένοι και, μετά την τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων που περιγράφονται στην παρασκευή του φυσικού δοκιμίου, η κυψέλη πληρώθηκε με αποσταγμένο νερό, σε συνήθεις θερμοκρασίες (θερμοκρασίες δωματίου).

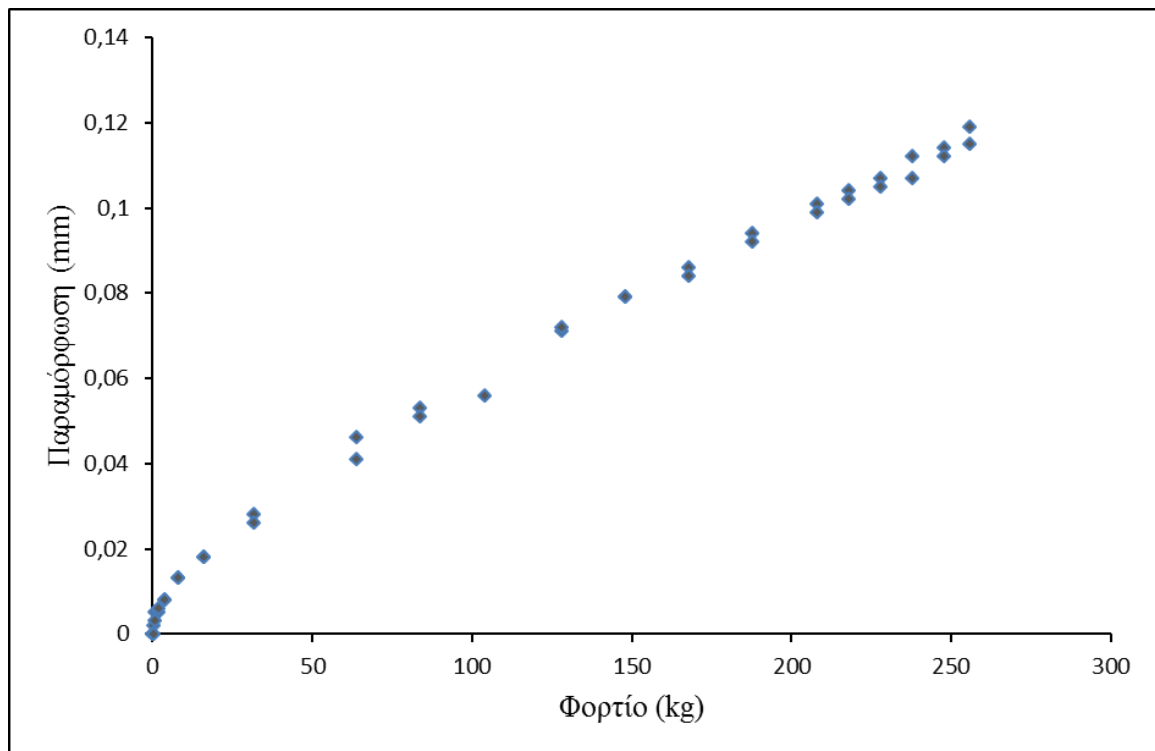


Σχήμα 5.1 Συσκευή Wykeham Farrance No 24255.

5.2. Εκτέλεση της δοκιμής

5.2.1. Συμμόρφωση συσκευής

Πριν την εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής. Η συσκευή αποτελείται από μεταλλικά αντικείμενα με κοχλιωτές συνδέσεις, οπότε ήταν απαραίτητη η μέτρηση των παραμορφώσεων που οφείλεται στη συσκευή και όχι στην καθίζηση του δοκιμίου. Για να επιτευχθεί αυτό, τοποθετήθηκε στη συσκευή η κυψέλη στερεοποίησης, η οποία περιείχε ένα μεταλλικό, σχετικώς άκαμπτο δοκίμιο. Το δοκίμιο αυτό φορτίστηκε και αποφορτίστηκε με ένα εύρος κιλών και καταγράφηκαν ηλεκτρονικά οι αποκρίσεις του μηκυσιόμετρου. Η δοκιμή επαναλήφθηκε δύο φορές και τα αποτελέσματα της φαίνονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Αποτελέσματα της δοκιμής συμμόρφωσης.

5.2.2. Διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής

Αφού τα δοκίμια παρασκευαστούν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, ξεκινάει η εκτέλεση του πειράματος. Αρχικά, ισορροπείται η δοκός φόρτισης και τοποθετείται το ηλεκτρονικό μηκυσιόμετρο στο σύστημα της κυψέλης. Το εδαφικό δοκίμιο φορτίζεται χειροκίνητα με την τοποθέτηση κιλών στο γάντζο φόρτισης της συσκευής, σύμφωνα με την εξής αλληλουχία: 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 και 256 kg. Κάθε φόρτιση διαρκεί 24 ώρες και καταγράφονται οι καθιζήσεις του δοκιμίου (με ακρίβεια 0,001 mm) για χρονικά διαστήματα 6, 15, 30 δευτερολέπτων, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 λεπτών και 24 ωρών μετά την επιβολή της φόρτισης. Αρχικά, είχε καταγραφεί η ένδειξη του μηκυσιόμετρου πριν την επιβολή των φορτίων έτσι ώστε να αφαιρεθεί από τις επόμενες τιμές. Στις περισσότερες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μια ή και δύο αποφορτίσεις και επαναφορτίσεις του δοκιμίου. Μετά το πέρας της δοκιμής, τα εδαφικά δοκίμια ξηραίνονται (εάν είναι ξηρά παραλείπεται αυτό το στάδιο) και έπειτα ζυγίζονται. Ανάλογα με τη διάμετρο και το ύψος των δακτυλιδιών, το φορτίο μετατράπηκε σε ορθή τάση και η κατακόρυφη μετατόπιση σε μεταβολή του δείκτη πόρων.

Wykeham Farrance Model: 24255			
W=1 kg	1^η οπή (1:9.62)	2^η οπή (1:9.82)	3^η οπή (1:11.04)
d=50 mm	48.063 kPa	49.063 kPa	55.158 kPa
d= 70 mm	24.522 kPa	25.032 kPa	28.142 kPa
d= 75 mm	21.361 kPa	21.806 kPa	24.515 kPa

Πίνακας 5.1 Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή στο δοκίμιο για φόρτιση 1 kg.

Δακτυλίδι	d (mm)	h (mm)	W (gr)
A	74.89	19.13	121.83
B	74.90	18.95	118.38
50	49.90	17.60	54.10

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά δακτυλιδιών συμπιεσόμετρου.

5.3. Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσόμετρου

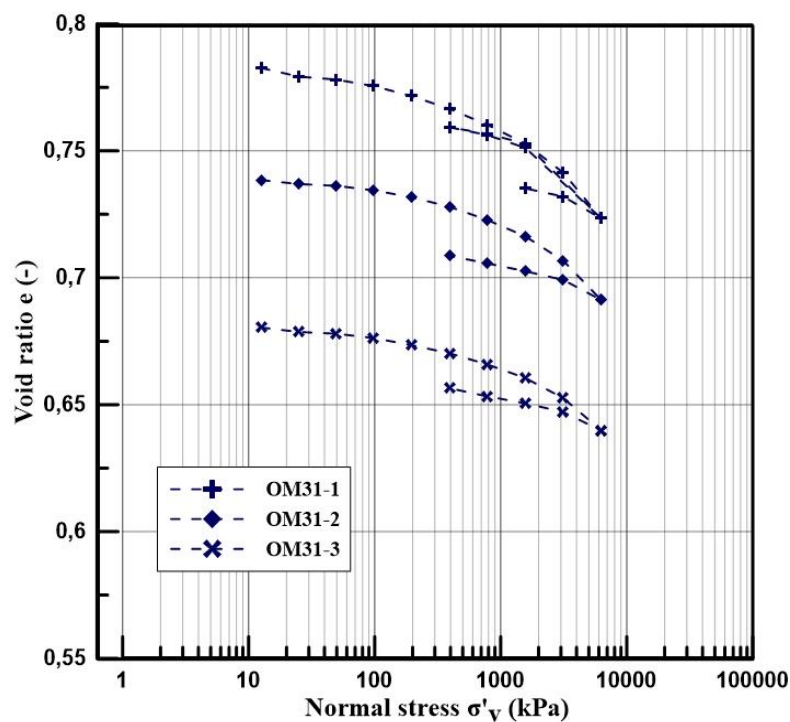
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται, αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών του οιδήμετρου. Τα βασικά διαγράμματα για κάθε υλικό είναι τα διαγράμματα δείκτη πόρων – λογαρίθμου της επιβαλλόμενης ενεργού τάσης και ογκομετρικής παραμόρφωσης – επιβαλλόμενης ενεργού τάσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά όλων των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

5.3.1. Άμμος M31

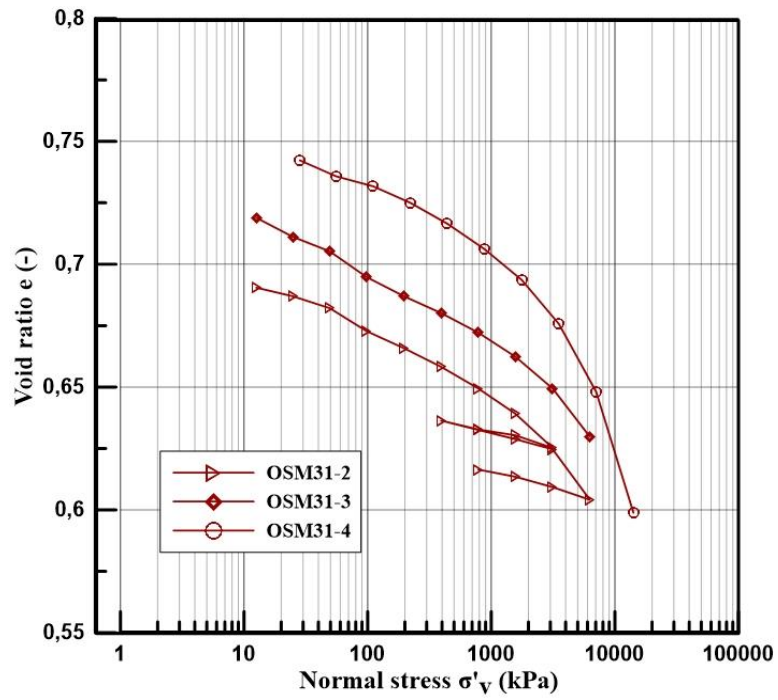
Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής του δείκτη πόρων των δοκιμών άμμου M31 σε σχέση με το λογάριθμο της ενεργού τάσης. Οι τρεις καμπύλες είναι παράλληλες για όλο το εύρος των ενεργών επιβαλλόμενων τάσεων, παρά τον διαφορετικό αρχικό δείκτη πόρων (διαφορετική αρχική σχετική πυκνότητα) των δοκιμών. Αρχικώς τα δοκίμια δεν παραλαμβάνουν μεγάλες καθιζήσεις, λόγω της μικρής ενεργού τάσης, αλλά η κλίσεις των καμπυλών αυξάνουν σταδιακά και γίνονται ακόμα πιο έντονες κυρίως μετά το 1 MPa. Παράλληλες επίσης είναι και οι καμπύλες αποφόρτισης των τριών αυτών δοκιμών. Τα αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται από το Σχήμα 5.4 για τα σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτίδα δοκίμια άμμου M31. Όπως φαίνεται και από τον

Πίνακα 5.3, τα δοκίμια OSM31-3 και OSM31-4 υποβάλλονται σε φόρτιση ανά 30 λεπτά, σε αντίθεση με το δοκίμιο OSM31-2, στο οποίο η κάθε φόρτιση παραμένει για 24 ώρες. Παρόλα αυτά, και τα τρία δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια κλίση. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το Σχήμα 5.5, όπου φαίνεται πως το σταθεροποιημένο δοκίμιο παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της καθίζησης του από τα πρώτα δευτερόλεπτα ($\approx 90\%$ της συνολικής καθίζησης στα 30 πρώτα λεπτά).

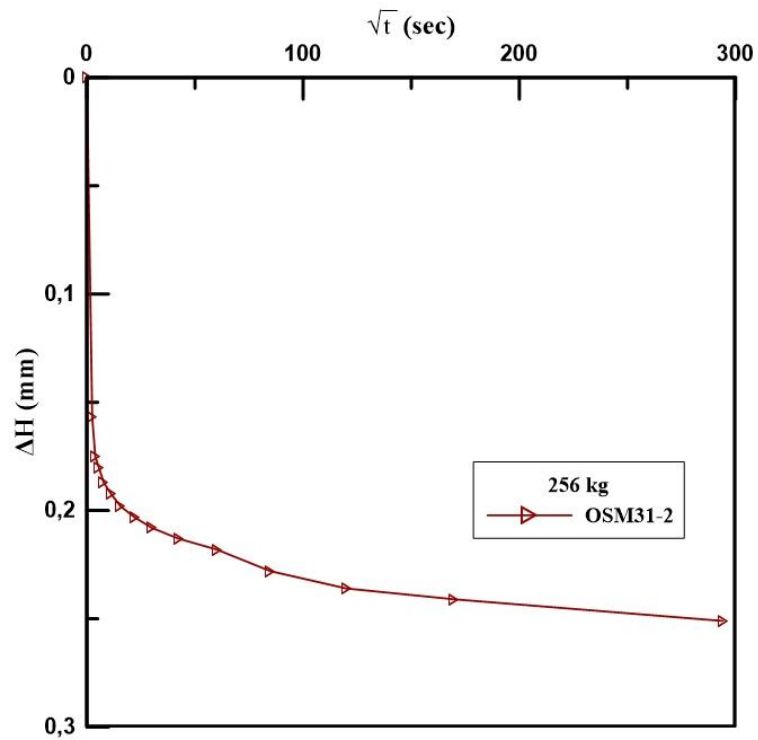
Όταν, όμως, οι καμπύλες των σταθεροποιημένων (κόκκινο χρώμα) και των φυσικών (μπλε χρώμα) δοκιμίων άμμου M31 τοποθετηθούν στο ίδιο διάγραμμα (Σχήμα 5.6), γίνεται ξεκάθαρο πως, μακροσκοπικά κάθε άλλο παρά παράλληλες είναι μεταξύ τους. Οι καμπύλες των σταθεροποιημένων δοκιμίων έχουν μεγαλύτερες κλίσεις από αυτές των φυσικών, αποδεικνύοντας πως τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη ενδοσιμότητα. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να προκύψει ευκολότερα από το Σχήμα 5.7, όπου είναι εμφανές πως ενώ τα φυσικά δοκίμια μειώνουν τον όγκο τους κατά 2-3% στα 6500 kPa περίπου, τα σταθεροποιημένα μειώνουν τον όγκο τους κατά περίπου 5% στην ίδια ενεργό τάση. Είναι ενδιαφέρον να συμπληρωθεί πως, οι καμπύλες αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι όλες μακροσκοπικά παράλληλες, ανεξάρτητα από τη σταθεροποίηση ή όχι του δοκιμίου. Από τα παραπάνω, συνάγεται εύλογα το συμπέρασμα, πως η σταθεροποίηση της άμμου M31 της προσδίδει μια πιο ενδόσιμη συμπεριφορά σε συνθήκες μονοαξονικής ανισότροπης συμπίεσης.



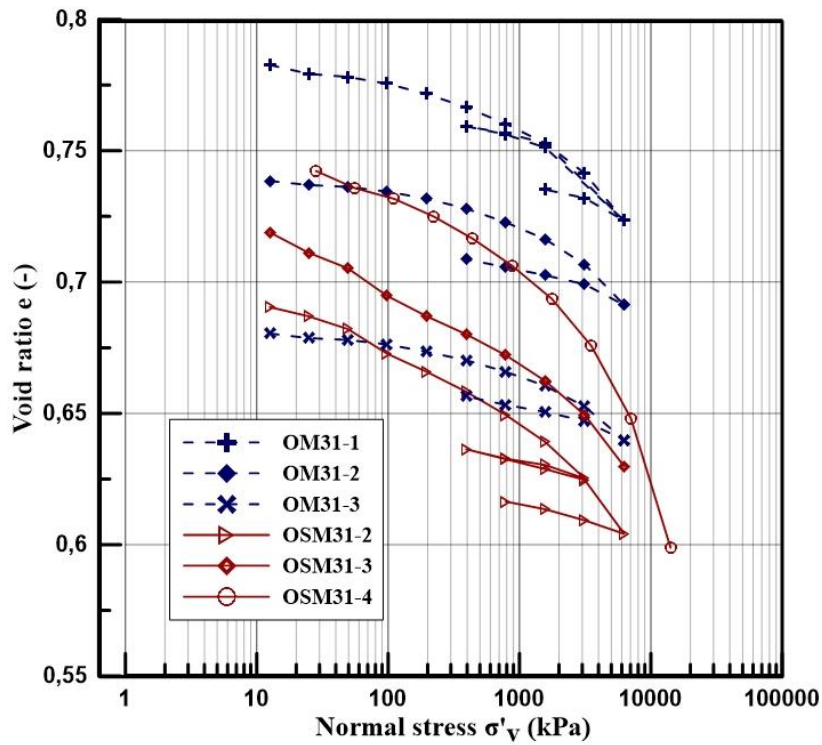
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για την άμμο M31.



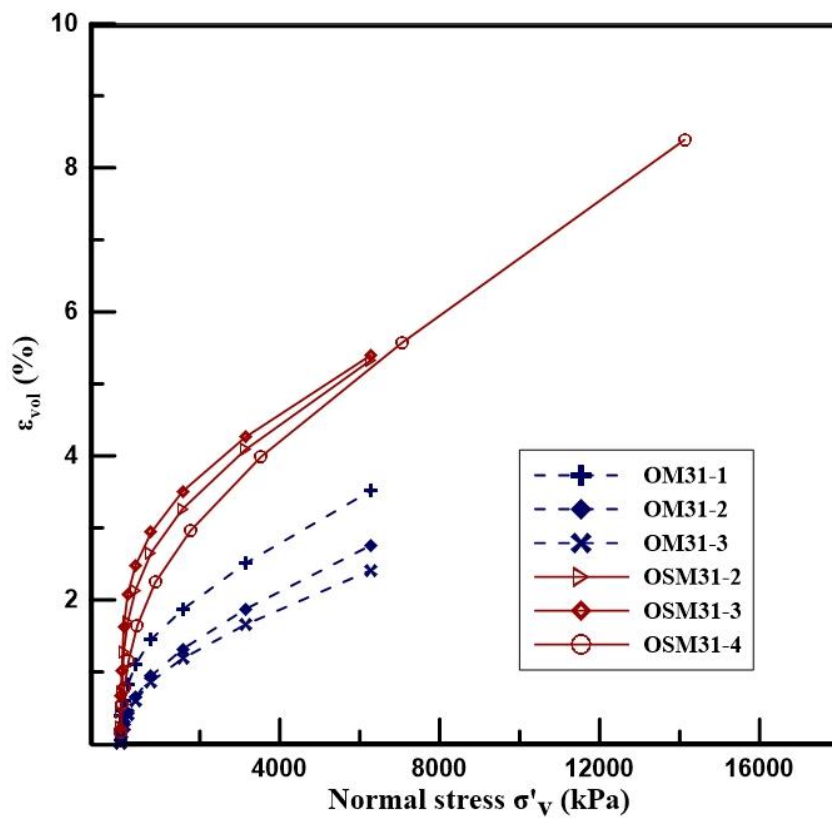
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για την σταθεροποιημένη άμμο M31.



Σχήμα 5.5 Καμπύλη τετραγωνικής ρίζας χρόνου-καθίζησης για φορτίο 256 kg (6276 kPa) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου M31.



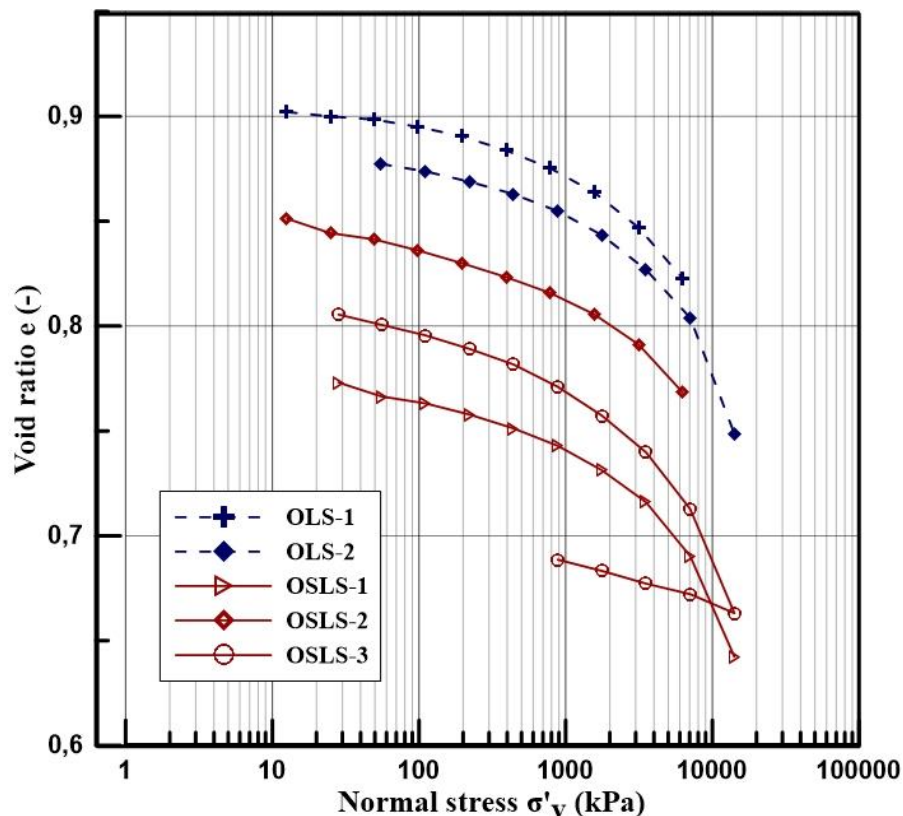
Σχήμα 5.6 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου M31. Οι μπλε καμπύλες συμβολίζουν τα φυσικά δοκίμια ενώ οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.



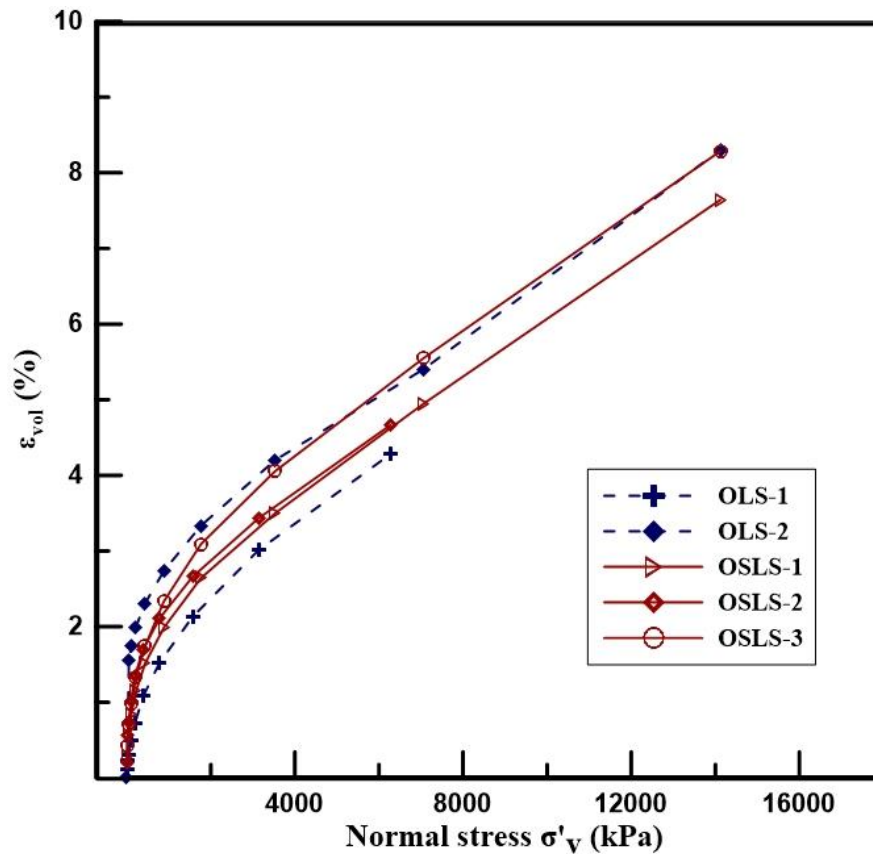
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης – ενεργού τάσης για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου M31.

5.3.2. Άμμος Longstone

Στην προσπάθεια επιβεβαίωσης του παραπάνω συμπεράσματος, εξετάστηκε η απόκριση μιας πιο λεπτόκοκκης και γωνιώδους άμμου (Longstone) στη δοκιμή του συμπιεσόμετρου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.8 και 5.9. Σε αντίθεση με την άμμο M31, οι καμπύλες μεταβολής του δείκτη πόρων ως προς την ορθή ενεργό τάση των σταθεροποιημένων (κόκκινο χρώμα) και φυσικών (μπλε χρώμα) δοκιμών άμμου Longstone είναι, καθ' όλο το μήκος τους, παράλληλες. Ειδικότερα, στο Σχήμα 5.9 φαίνεται πως, και τα σταθεροποιημένα και τα φυσικά εδαφικά δοκίμια ενδίδουν κατά το 4-5% του αρχικού τους όγκου στα περίπου 6500 kPa κατακόρυφης ενεργού τάσης. Είναι γνωστό πως, το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων της άμμου παίζουν μεγάλο ρόλο στην μηχανική απόκριση του εδάφους (Georgiannou και Tsomokos (2008), Altuhafi et al. (2016)). Είναι πιθανό, η σταθεροποίηση της άμμου με γέλη κολλοειδούς πυριτίας να της επιτρέπει να οδηγηθεί ευκολότερα σε μια πιο πυκνή δομή. Η γωνιότητα των κόκκων, θα μπορούσε να αποτρέψει μια τέτοια συμπεριφορά, καθώς η αλληλοεμπλοκή των κόκκων θα δυσχέραινε την αναδιάταξη τους και, τελικώς, την πύκνωση της δομής τους.



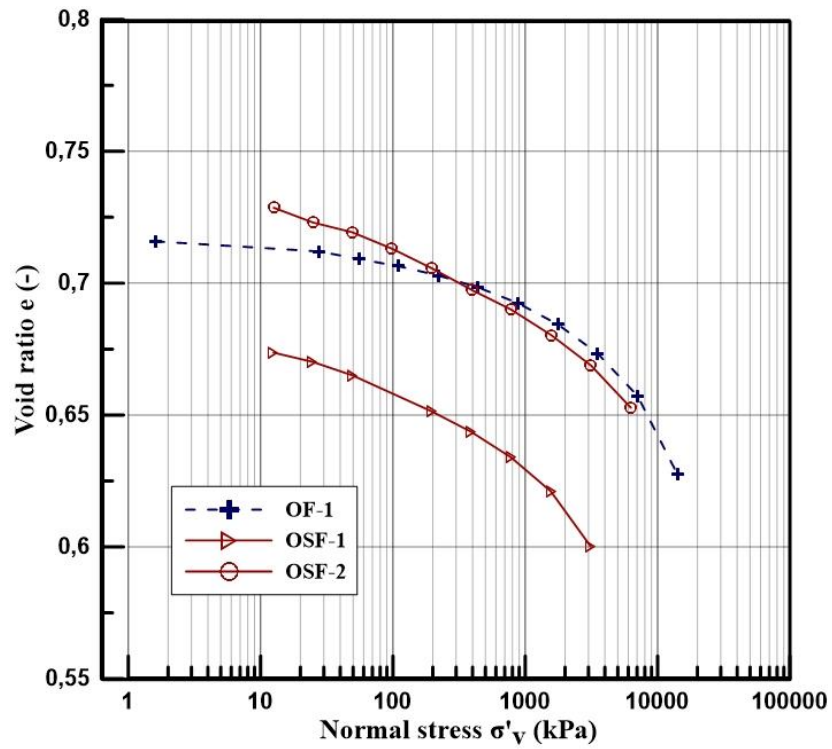
Σχήμα 5.8 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Longstone. Οι μπλε καμπύλες συμβολίζουν τα φυσικά δοκίμια ενώ οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.



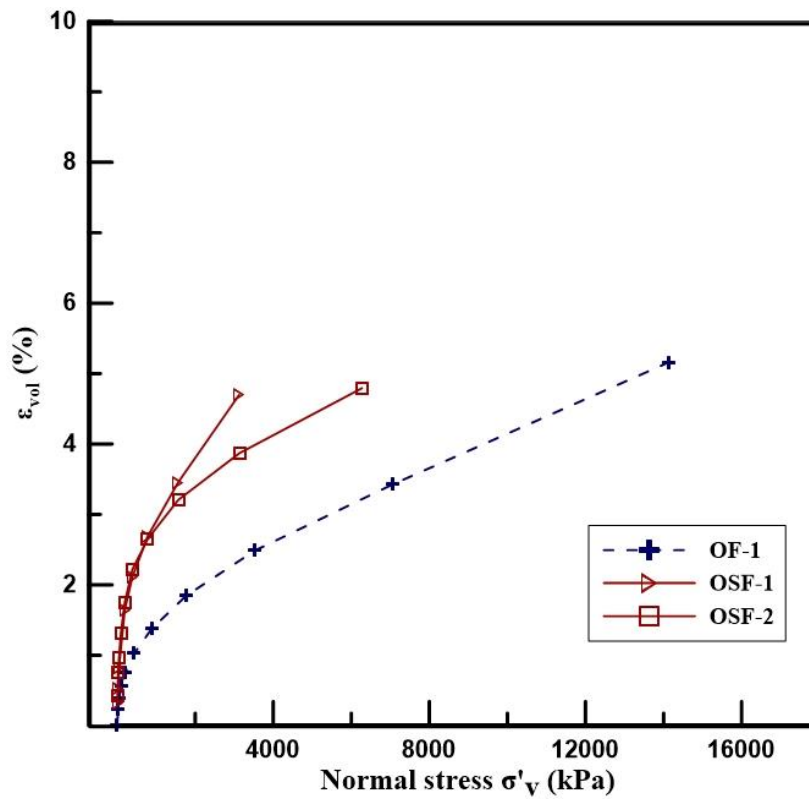
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης – ενεργού τάσης για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Longstone.

5.3.3. Άμμος Fontainebleau

Για την επιβεβαίωση των παραπάνω ισχυρισμών, εκτελέστηκαν δοκιμές μονοαξονικής ανισότροπης συμπίεσης σε μια τρίτη άμμο, με στρογγυλεμένους κόκκους, την Fontainebleau. Αν και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα σταθεροποιημένα δοκίμια είχαν χρόνο φόρτισης 30 λεπτά (ενώ το φυσικό δοκίμιο είχε 24 ώρες), φαίνεται να παρουσιάζεται μια συμπεριφορά, παρόμοια με αυτή της άμμου M31. Στα Σχήματα 5.10 και 5.11, οι καμπύλες των σταθεροποιημένων δοκιμών (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη κλίση από το φυσικό. Ήδη από τα 30 πρώτα λεπτά, οι καθιζήσεις των σταθεροποιημένων δοκιμών υπερéχουν αυτών του φυσικού. Βέβαια, αν και οι δοκιμές στη συγκεκριμένη άμμο είναι λιγοστές στην παρούσα διπλωματική εργασία και χρήζουν μεγαλύτερης διερεύνησης, φαίνεται να ενισχύουν την ορθότητα των παραπάνω ισχυρισμών.



Σχήμα 5.10 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων – $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Fontainebleau. Οι μπλε καμπύλες συμβολίζουν τα φυσικά δοκίμια ενώ οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης – ενεργού τάσης για δοκίμια σταθεροποιημένης και μη άμμου Fontainebleau.

Όνομα δοκιμής	Ημερομηνία	D _r (%)	ε ₀	Άμμος	Χρόνος φόρτισης
OM31-1	22/7/2016	17,11 %	0,786	M31	30 min
OM31-2	29/8/2016	22,71 %	0,767	M31	30 min
OM31-3	12/9/2016	48,38 %	0,680	M31	30 min
OM31-4	14/9/2016	28,91 %	0,746	M31	24 h
OSM31-2	17/10/2016	44,25 %	0,694	M31 (σταθεροποιημένη)	24 h
OSM31-3	16/11/2016	35,69 %	0,723	M31 (σταθεροποιημένη)	30 min
OSM31-4	24/11/2016	29,20 %	0,745	M31 (σταθεροποιημένη)	30 min
OLS-1	17/12/2016	23,88 %	0,904	Longstone	10 min
OLS-2	4/1/2017	23,10 %	0,907	Longstone	24 h
OSLS-1	16/12/2016	53,28 %	0,792	Longstone (σταθεροποιημένη)	30 min
OSLS-2	16/12/2016	36,75 %	0,855	Longstone (σταθεροποιημένη)	30 min
OSLS-3	26/1/2017	47,77 %	0,813	Longstone (σταθεροποιημένη)	24 h
OF-1	20/2/2017	46,01 %	0,716	Fontainebleau	24 h
OSF-1	19/1/2017	57,36 %	0,679	Fontainebleau (σταθεροποιημένη)	30 min
OSF-2	8/2/2017	39,88 %	0,736	Fontainebleau (σταθεροποιημένη)	30 min

Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας στοιχείων των δοκιμών συμπίεσόμετρου.

6

ΔΟΚΙΜΗ ΑΠ' ΕΥΘΕΙΑΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Τα κοκκώδη εδαφικά υλικά αποτελούνται από ασύνδετους ή χαλαρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους που σχηματίζουν τον εδαφικό σκελετό. Ο εδαφικός αυτός σκελετός αναλαμβάνει όλα τα εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία με την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών δυνάμεων. Αυτές οι δυνάμεις ασκούνται μεταξύ των κόκκων και προκαλούν τη σχετική ολίσθηση τους, η οποία μεταφράζεται σε παραμόρφωση. Η τριβή μεταξύ των κόκκων επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση των αμμοδών εδαφικών υλικών, αφού η ανάπτυξη ηλεκτροχημικών δυνάμεων (που συνεπάγεται με την συνοχή) μεταξύ των κόκκων είναι αμελητέα. Για να προσδιοριστούν οι παράμετροι αντοχής των σταθεροποιημένων και μη αμμοδών υλικών, καθώς και για να μελετηθεί η συμπεριφορά τους κατά την επιβολή εξωτερικών ορθών και διατμητικών δυνάμεων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές απ' ευθείας διάτμησης. Στις παρακάτω ενότητες αναλύεται η διαδικασία της δοκιμής, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και σχολιάζονται.

6.1. Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασίας παρασκευής δοκιμίων.

6.1.1. Περιγραφή εξοπλισμού

Τα πειράματα της απ' ευθείας διάτμησης πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή Wykeham Farrance No 25402 (Σχήμα 6.1). Η συσκευή επιτρέπει την εφαρμογή κατακόρυφου φορτίου στο δοκίμιο μέσω μοχλοβραχίονα, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία τοποθέτησης βαρών. Το βάρος δίνει δεκαπλάσια δύναμη με την οποία φορτίζεται κάθε φορά το δοκίμιο. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται μια διατομή της συσκευής, η οποία αποτελείται από τα εξής τμήματα:

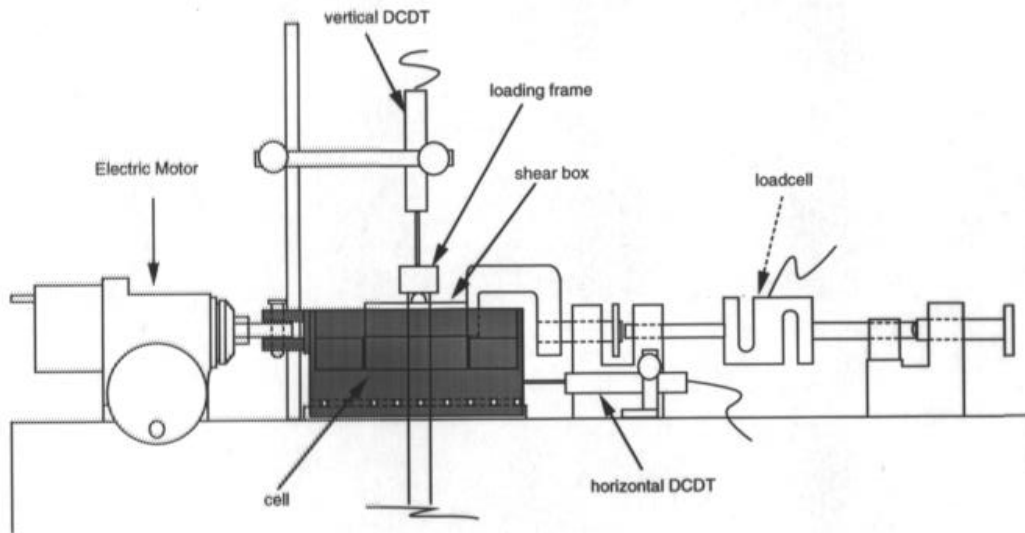
1. Κιβώτιο Casagrande (shear box), το οποίο αποτελείται από δύο δακτυλίους διάτμησης, οι οποίοι όταν εφαρμόζουν δημιουργούν ένα κενό σχήματος κυκλικού πρίσματος με διάμετρο 6 cm. Οι δακτύλιοι χρησιμοποιούνται απλά για την πλευρική στήριξη του δοκιμίου και δεν μεταβιβάζουν διατμητικές τάσεις.
2. Κοχλίας που κινείται με σταθερή εκλεγμένη ταχύτητα με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μοτέρ (electric motor).

3. Κυψέλη που κινείται με τη βοήθεια του κοχλίας (cell). Η κυψέλη έχει τη δυνατότητα να ολισθαίνει πάνω σε μεταλλικούς μπιλιοφόρους οδηγούς.
4. Κοχλίας ο οποίος ακινητοποιεί τον κάτω δακτύλιο διάτμησης.
5. Δυναμόμετρο (loadcell), το οποίο καταγράφει την αντίσταση σε θραύση του δοκιμίου.
6. Μηκυσιόμετρο (vertical DCDT), το οποίο τοποθετείται κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου και καταγράφει τις κατακόρυφες παραμορφώσεις του.
7. Δύο βίδες που κρατάνε αμετακίνητους τους δύο δακτυλίους διάτμησης και δύο που ανασηκώνουν ελαφρώς τον πάνω δακτύλιο.

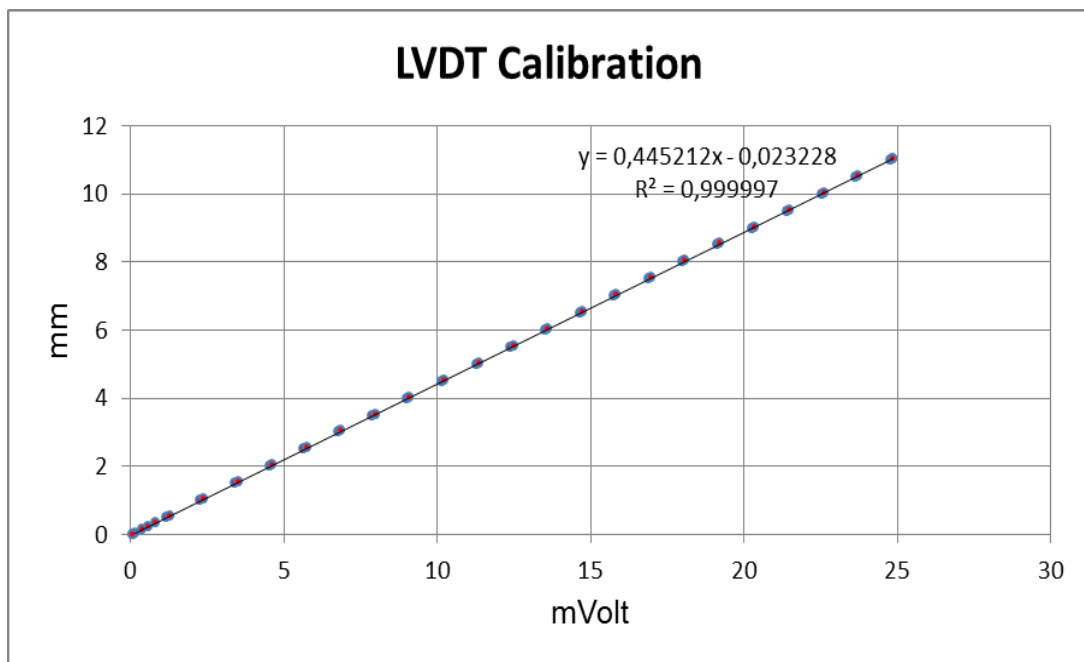
Επειδή οι μετρήσεις του δυναμόμετρου και του μηκυσιόμετρου καταγράφονται ηλεκτρονικά σε μονάδες τάσης του ρεύματος (Volt), έγιναν βαθμονομήσεις στα όργανα για να υπολογιστεί ο συντελεστής μετατροπής των ενδείξεων σε μονάδες δύναμης (N) και μήκους (m) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.3 και 6.4.



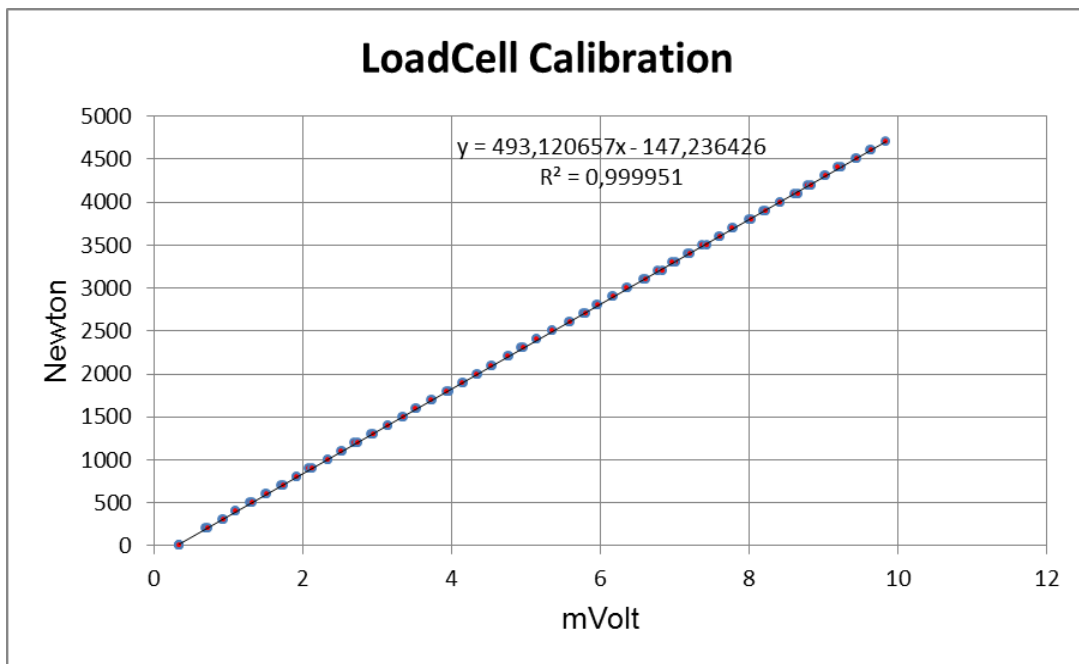
Σχήμα 6.1 Συσσκευή απ' ευθείας διάτμησης Wykeham Farrance N° 25402 .



Σχήμα 6.2 Διατομή συσκευής απ' ευθείας διάτμησης.



Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης κατακόρυφου μηχανοστάσιου.



Σχήμα 6.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης δυναμόμετρου.

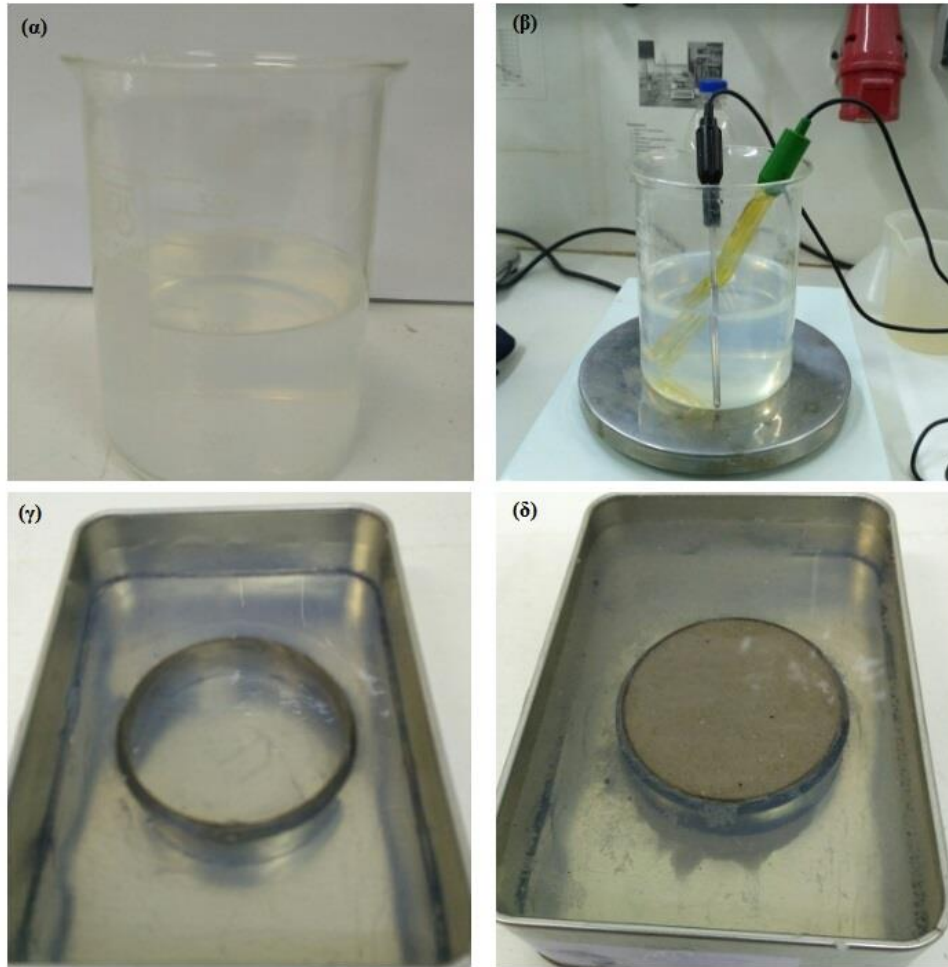
6.1.2. Παρασκευή δοκιμίων

Ομοίως με τη δοκιμή του συμπιεσόμετρου, για την παρασκευή των δοκιμίων ακολουθήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη αφορά την παρασκευή μη σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου και η δεύτερη των σταθεροποιημένων.

Όσον αφορά τα φυσικά δοκίμια, η παρασκευή του δοκιμίου εκτελέστηκε εντός των στερεοποιημένων δακτυλίων διάτμησης. Αφού το κιβώτιο Casagrande τοποθετηθεί στη συσκευή, τοποθετείται ο κάτω ακόρεστος πορώδης δίσκος και μετράται το ελεύθερο ύψος από την επιφάνεια του κιβωτίου. Στη συνέχεια με τη βοήθεια χωνιού εναποτίθεται μια ποσότητα άμμου μέσα στο κιβώτιο, μέχρι λίγο πριν την πλήρωσή του. Τέλος, τοποθετείται ο άλλος ακόρεστος πορώδης δίσκος και, μετά τη μέτρηση του εναπομείναντος ελεύθερου ύψους, τοποθετείται ο μεταλλικός κεφαλόδεσμος φόρτισης (top cap). Το δοκίμιο ζυγίζεται μετά το πέρας της δοκιμής.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Το υγρόλυμα παρασκευάζεται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εδάφιο 5.1.2. Σε ένα δοχείο τοποθετείται ένα λείο μεταλλικό δαχτυλίδι, εσωτερικής διαμέτρου 60 mm, και το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας και εμβαπτίζεται το ξηρό εδαφικό υλικό (Σχήμα 6.5). Το δοκίμιο παραμένει σε αεροστεγείς συνθήκες για 50 ώρες. Στη συνέχεια, το δαχτυλίδι αφαιρείται και το εδαφικό

υλικό μεταφέρεται και τοποθετείται στο κιβώτιο διάτμησης, προσπαθώντας να μην υπάρξουν αναταραχές κατά τη μεταφορά. Οι πορόλιθοι είναι κορεσμένοι και, μετά την τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων που περιγράφονται στην παρασκευή του φυσικού δοκιμίου, το κιβώτιο πληρείται με αποσταγμένο νερό, σε συνήθεις θερμοκρασίες (θερμοκρασίες δωματίου).



Σχήμα 6.5 Παρασκευή σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου για την δοκιμή απ' ευθείας διάτμησης. Οι διαδικασίες κατά σειρά είναι: (α) η παρασκευή υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας, (β) η μέτρηση του pH και της θερμοκρασίας του υγρολύματος, (γ) η τοποθέτηση του υγρολύματος και του δακτυλίου της συσκευής σε μεταλλικό δοχείο και (δ) η ξηρή εμβάπτιση του υλικού.

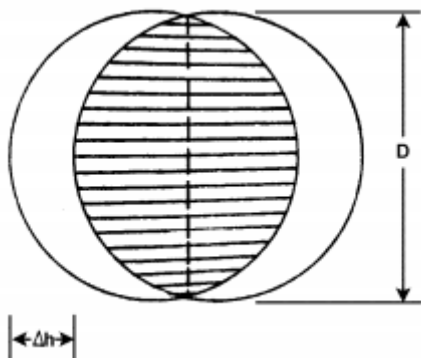
6.2. Διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής

Στην κυψέλη τοποθετείται και στερεώνεται το κιβώτιο Casagrande, το οποίο αποτελείται από δύο δακτυλίους διάτμησης. Οι δύο αυτοί δακτύλιοι είναι αρχικά συνδεδεμένοι με δύο βίδες, που όταν αφαιρεθούν, επιτρέπεται η μερική κίνηση του ενός δακτυλίου ως προς τον άλλο. Η συσκευή πληρείται με αποσταγμένο νερό (μόνο στις δοκιμές που το δοκίμιο ήταν σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία), ώστε το δοκίμιο να είναι εμβαπτισμένο. Το νερό, όμως, έχει την ατμοσφαιρική πίεση. Κατά συνέπεια, οι υδατικές πιέσεις στο εσωτερικό του δοκιμίου δεν ελέγχονται και δεν μπορεί να εξασφαλισθεί ο κορεσμός του δοκιμίου ούτε να ελεγχθούν οι συνθήκες στράγγισης.

Μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή, εφαρμόζεται το κατακόρυφο φορτίο με την τοποθέτηση βαρών στον γάντζο φόρτισης, οπότε το δοκίμιο υφίσταται μονοαξονική συμπίεση (στερεοποίηση) με παρεμπόδιση της πλευρικής παραμόρφωσης, επειδή ο δακτύλιος είναι ανένδοτος στην οριζόντια διεύθυνση. Τα δοκίμια αφήνονται σε αυτό το στάδιο για 24 ώρες, ώστε να επέλθει ισορροπία στο δείγμα, και καταγράφονται οι συνολικές καθιζήσεις

Μετά το τέλος της στερεοποίησης, οι βίδες που κρατούσαν συνδεδεμένους τους δύο δακτυλίους αφαιρούνται και, με τη βοήθεια των άλλων δύο βιδών που μπορούν να βιδωθούν μόνο στον πάνω δακτύλιο διάτμησης (οι οποίες δεν συνεχίζονται στον κάτω δακτύλιο), ανασηκώνεται ισχνά ο πάνω δακτύλιος, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η διάδοση των τάσεων μόνο μέσω του εδαφικού δείγματος και όχι μέσω της επαφής των δύο δακτυλίων. Σύμφωνα με τους Yamamuro et al. (2011) και τους Mamo και Dey (2014), ο ρυθμός επιβαλλόμενης μετατόπισης επηρεάζει την απόκριση του φυσικού υλικού, με την αύξηση του οποίου παρατηρείται και αύξηση της διαστολικότητας και της κορυφαίας αντοχής. Γι αυτό το λόγο, εκλέχθηκε μια μέση, σταθερή για όλες τις δοκιμές, ταχύτητα (στις δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν 0,5 mm/min (Παπαχαρίσης (2010)) για τα φυσικά και 0,005 mm/min (ώστε να επιτυγχάνεται πλήρως η στράγγιση) για τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου). Μέσω του προγράμματος LabVIEW καταγράφονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις και οι διατμητικές αντιστάσεις των δοκιμίων και παρουσιάζονται, ταυτόχρονα, τα τρέχοντα αποτελέσματα στην οθόνη, με τη μορφή διαγραμμάτων. Το πέρας των δοκιμών πραγματοποιείται, όταν το δοκίμιο έχει μετακινηθεί οριζόντια κατά 6,35 mm (Olson (1989)). Αυτό παρατηρήθηκε και στα πειράματα αυτής της εργασίας, τα αποτελέσματα των οποίων δε θεωρήθηκαν αξιόπιστα για οριζόντιες μετατοπίσεις μεγαλύτερες των 6,35 mm.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η κοινή επιφάνεια των δύο τμημάτων του εδαφικού δείγματος μειώνεται. Στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων, οι ορθές και οι διατμητικές δυνάμεις διαιρέθηκαν με τη διορθωμένη επιφάνεια $A=F \times A_0$, όπου F είναι συντελεστής που δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Olson (1989)):



$$F = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{\Delta h}{D} \right) - \left(\frac{\Delta h}{D} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta h}{D} \right)^2} \right\}$$

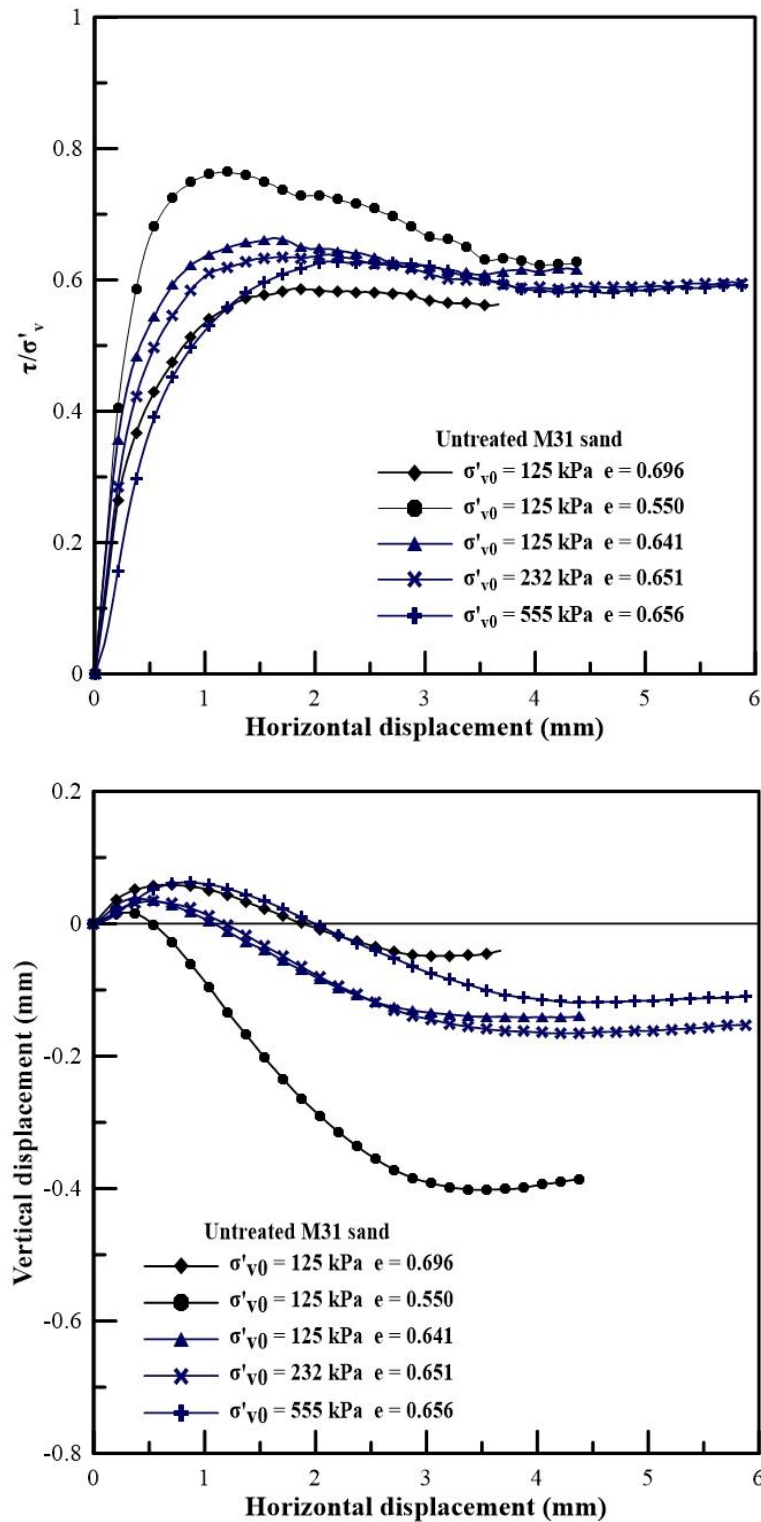
6.3. Αποτελέσματα δοκιμών απ' ευθείας διάτμησης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται, αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών της απ' ευθείας διάτμησης. Τα βασικά διαγράμματα για κάθε υλικό είναι τα διαγράμματα λόγου διατμητικής προς ορθής ενεργού τάσης – οριζόντιας μετατόπισης και κατακόρυφης – οριζόντιας μετατόπισης. Τα βασικά χαρακτηριστικά όλων των δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

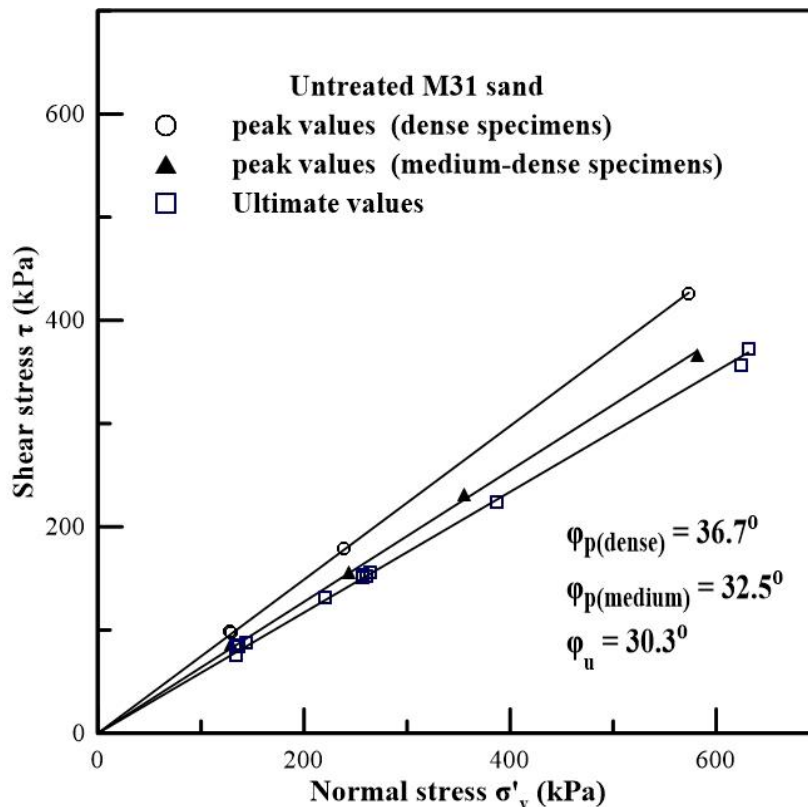
6.3.1. Συμπεριφορά φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου κατά τη διάτμηση

Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 3.1, ο αρχικός δείκτης πόρων των δοκιμίων καθώς και η επιβαλλόμενη σε αυτά φόρτιση αποτελούν τους δύο σημαντικότερους παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν τη συμπεριφορά τους κατά τη διάτμηση. Η επιβεβαίωση αυτού φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Δοκίμια άμμου M31, διαφορετικών αρχικών δεικτών πόρων και επιβαλλόμενης ορθής ενεργού τάσης, υποβλήθηκαν σε διάτμηση. Για την ίδια ορθή ενεργό τάση (125 kPa), με την αύξηση του αρχικού δείκτη πόρων από 0,55 (πυκνό δοκίμιο) σε 0,696 (χαλαρό δοκίμιο) παρατηρείται ξεκάθαρη πτώση της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ/σ'_v), η οποία συνοδεύεται από μείωση της διαστολικότητας και της συνολικής διαστολής. Αντίστοιχα, για παρόμοιους αρχικούς δείκτες πόρων, η αύξηση της ενεργού τάσης από τα 125 kPa στα 555 kPa συνεπάγεται, επίσης, μείωση της διατμητικής αντοχής, της διαστολικότητας και της συνολικής διαστολής. Αξίζει να παρατηρηθεί πως, η μεταβολή στην τιμή της ενεργού τάσης σε σύγκριση με τη μεταβολή του αρχικού δείκτη

πόρων επηρεάζει σε πολύ μικρότερο βαθμό την απόκριση του εδάφους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός πως, δοκίμια με ορθή ενεργό τάση 125 και 232 kPa και παρόμοιους δείκτες πόρων παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά.



Σχήμα 6.6 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε άμμο M31.

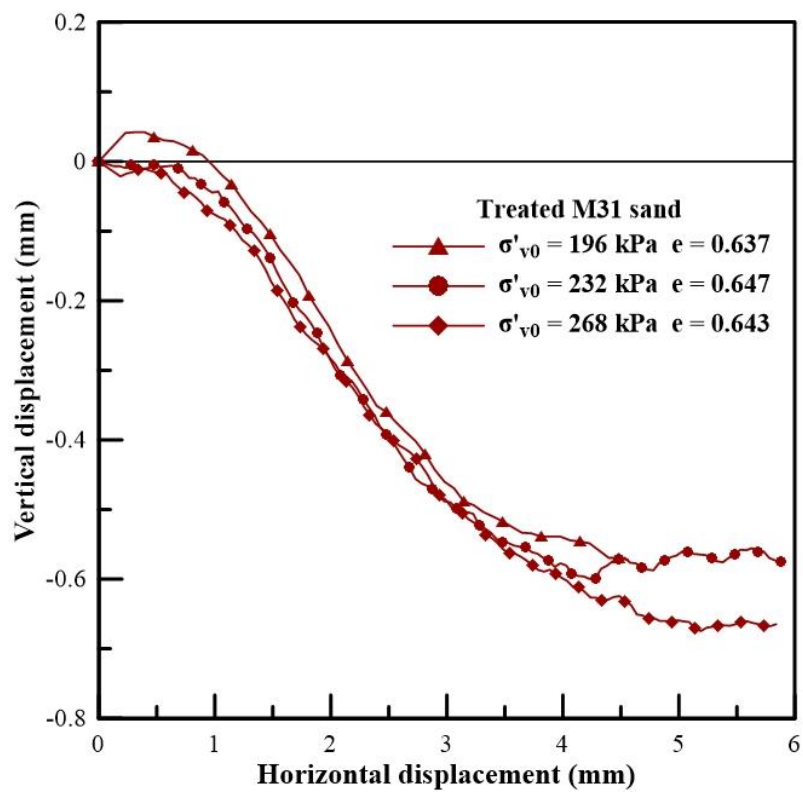
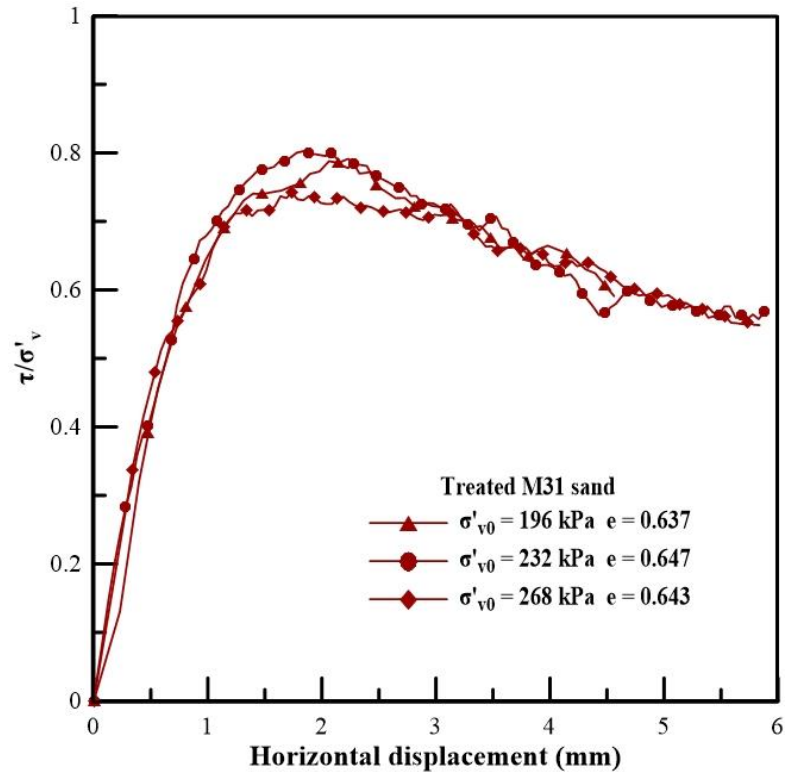


Σχήμα 6.7 Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για δοκιμές σε άμμο M31 σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης, κορυφαίας αντοχής δοκιμών μέσης σχετικής πυκνότητας και κορυφαίας αντοχής πυκνών δοκιμών.

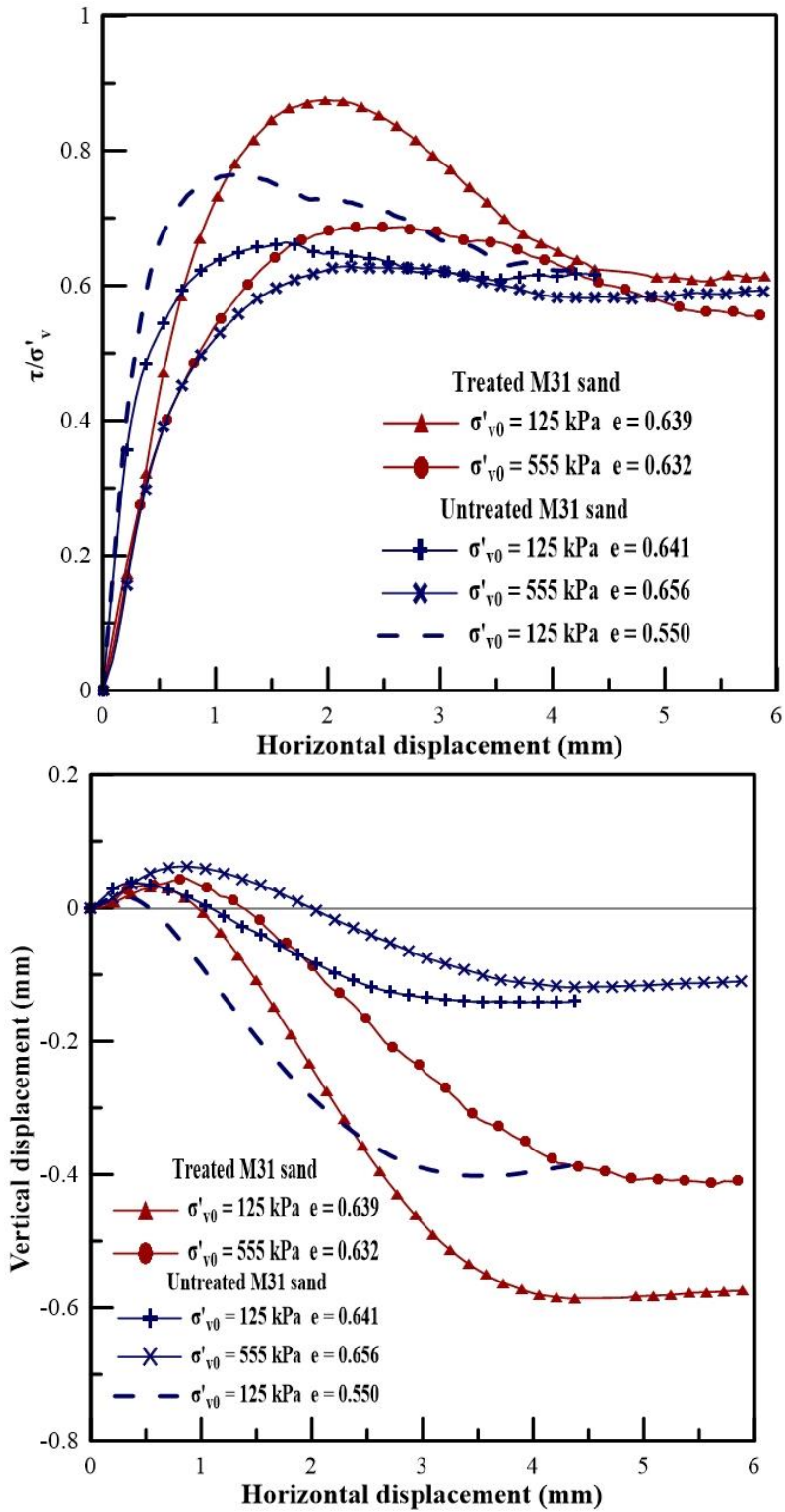
Οι βασικές παράμετροι αντοχής της άμμου M31 παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7. Η συνοχή του υλικού είναι μηδενική, αφού αποτελεί ένα κοκκώδες μη συνεκτικό εδαφικό υλικό. Η γωνία τριβής για την κρίσιμη κατάσταση υπολογίστηκε 30.3° , ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες πυκνότητας και φόρτισης των δοκιμών. Αντίθετα, η γωνία τριβής κατά τη μέγιστη διατμητική αντοχή εξαρτάται από την αρχική δομή των κόκκων του υλικού. Για μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου M31 ($D_r \approx 50\%$), η μέγιστη αυτή γωνία παίρνει την τιμή 32.5° ενώ για πυκνότερα δοκίμια ($D_r \approx 80\%$), η τιμή αυτή ανέρχεται στις 36.7° . Η επιτρεπτή απόκλιση στις παραπάνω τιμές είναι $\pm 0.10^\circ$ (Bareither et al. (2008)). Σύμφωνα με τον Rowe (1962), η διαφορά της μέγιστης από την κρίσιμη γωνία τριβής δίνει τη γωνία διαστολικότητας. Έτσι, η γωνία διαστολικότητας για τα μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου M31 είναι της τάξης των 2.2° , τιμή που σχεδόν τριπλασιάζεται (6.4°) για τα πυκνά δοκίμια.

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η σταθεροποιημένη άμμος M31. Εξετάστηκε η επίδραση της φόρτισης σε δοκίμια με δείκτες πόρων 0.644 ± 0.010 . Σύμφωνα με το Σχήμα 6.8, για ένα μικρό εύρος φόρτισης (196-268 kPa), τα αποτελέσματα σχεδόν

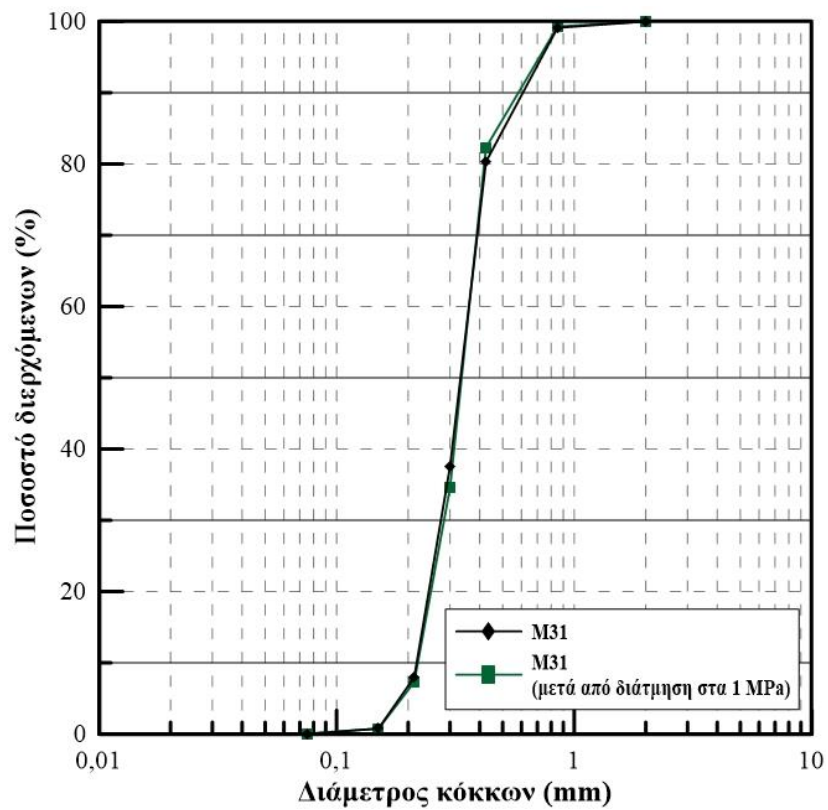
συμπίπτουν. Βέβαια, όταν διευρυνθεί η διαφορά στη φόρτιση, γίνεται πιο αισθητή η επιρροή της στη συμπεριφορά του δοκιμίου, ακολουθώντας πάντα το μοτίβο που περιγράφηκε και για τα φυσικά δοκίμια, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα του Σχήματος 6.9 για τιμές ορθής ενεργού τάσης 125 και 555 kPa. Αυτή η εξάρτηση της απόκρισης από τη φόρτιση οφείλεται, ίσως, στην υποβάθμιση που υφίσταται η δομή της γέλης, και κατά συνέπεια η δομή του σταθεροποιημένου δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο στην περίπτωση των φυσικών δοκιμίων. Άλλωστε, το εξεταζόμενο εύρος επιβαλλόμενων τάσεων δεν οδηγεί σε θραύση των κόκκων της άμμου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, η κοκκομετρία της άμμου παραμένει αλώβητη, ακόμα και μετά από διάτμηση υπό 1 MPa ορθής ενεργού τάσης. Όπως έχουν ισχυριστεί οι Porcino et al. (2012), έτσι κι εδώ, η σταθεροποιημένη άμμος παρουσιάζει μεγάλη διατμητική αντοχή και έντονα διαστολική συμπεριφορά. Το Σχήμα 6.9 επιδεικνύει τις διαφορές στη συμπεριφορά της φυσικής από τη σταθεροποιημένη άμμο. Ανεξάρτητα από το μέγεθος της ορθής ενεργού τάσης, τα σταθεροποιημένα δοκίμια, αρχικά, συστέλλονται, σε μικρότερο βαθμό από τα αντίστοιχης σχετικής πυκνότητας φυσικά δοκίμια, και στη συνέχεια παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλες τιμές μέγιστης διαστολικότητας, η οποίες παρατηρούνται κατά τη κορυφαία αντοχή. Αξιοσημείωτο είναι πως, τα σταθεροποιημένα δοκίμια καταλήγουν, κατά την κρίσιμη κατάσταση, σε πολύ μεγάλη συνολική διαστολή, περισσότερο από 4 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διαστολή των φυσικών δοκιμίων. Στο ίδιο σχήμα, μόνο το πολύ πυκνό δοκίμιο άμμου ($e=0.55$) μπορεί να συγκριθεί στην αρχική συστολή, στη διαστολικότητα και στη διαστολή με το μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου ($e=0.639$) υπό την ίδια ενεργό τάση. Εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι, επίσης, το γεγονός πως, το πυκνό και υπό μικρή κατακόρυφη ενεργό τάση δοκίμιο άμμου εμφανίζει κατακόρυφη μετατόπιση της τάξης του μεγέθους ενός μέσου κόκκου του υλικού ($\approx 0.3 \pm 0.4$ mm) σε πλήρη αντίθεση με το μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο, το οποίο ξεπερνά κατά πολύ αυτή την τιμή. Από το γεγονός αυτό φαίνεται πως, κατά τη σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία δημιουργούνται συσσωματώματα κόκκων, τα οποία, κατά τη διαστολή, αποδίδουν στο δοκίμιο μεγαλύτερη κατακόρυφη διόγκωση. Στην κρίσιμη, όμως, κατάσταση, καταστρέφεται η δομή της γέλης, η οποία χάνει το μεγάλο ιξώδες της, όπως μπορεί να διακρίνει κανείς στις φωτογραφίες του Σχήματος 6.11, με αποτέλεσμα το υλικό να παρουσιάζει, πλέον, ίδια αντοχή με το φυσικό.



Σχήμα 6.8 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31.



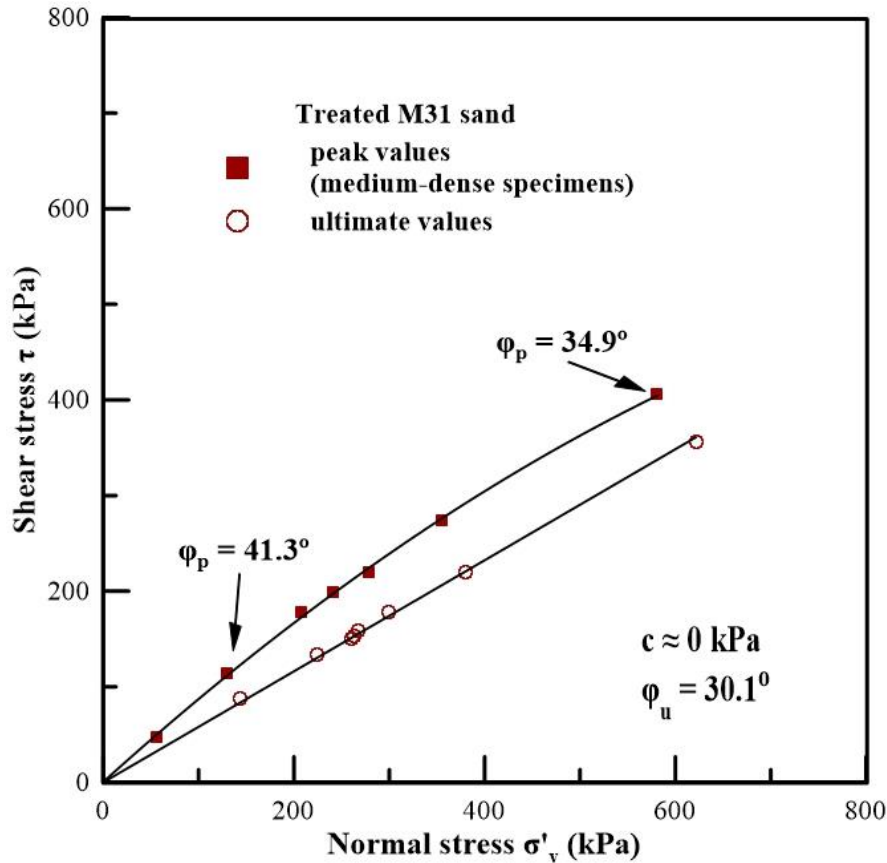
Σχήμα 6.9 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτρία άμμο M31 (κόκκινες καμπύλες) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31 (μπλε καμπύλες).



Σχήμα 6.10 Κοκκομετρικές καμπύλες άμμου Μ31 πριν και μετά τη διάτμηση υπό 1 MPa ορθής ενεργού τάσης.



Σχήμα 6.11 Φωτογραφίες σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία δοκιμών άμμου Μ31, μετά από τη διάτμηση.

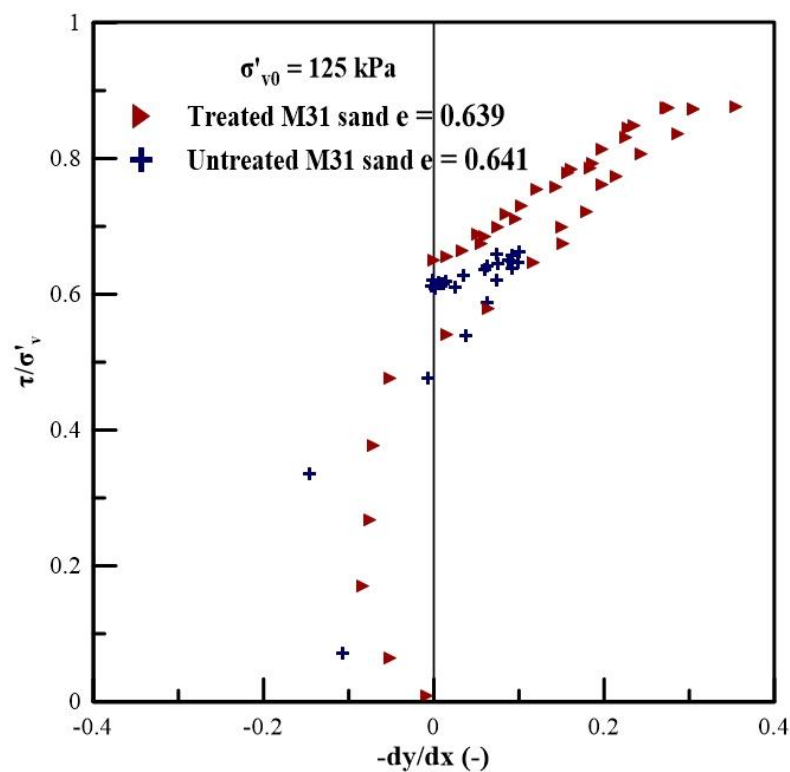


Σχήμα 6.12 Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης και κορυφαίας αντοχής δοκιμών μέσης σχετικής πυκνότητας.

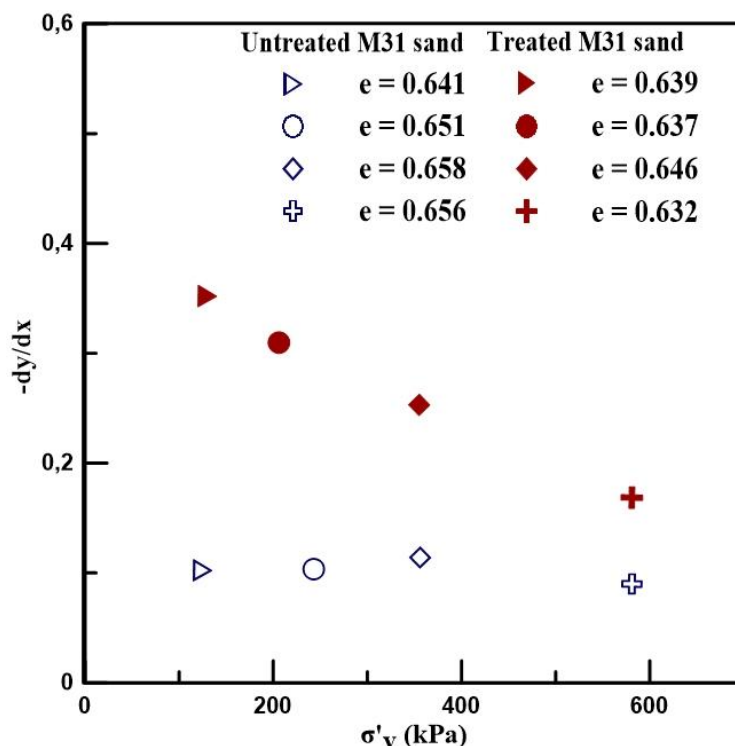
Η συνεχής μείωση του λόγου τ/σ'_v που παρατηρείται στα σταθεροποιημένα δοκίμια για $\sigma'_{v0} = 125 \div 555$ kPa συνάδει με τη συνεχή υποβάθμιση της δομής μεταξύ των κόκκων αλλά και στο εσωτερικό των πόρων. Δεδομένου, λοιπόν, πως η κορυφαία αντοχή των φυσικών δοκιμίων είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την κατακόρυφη τάση (για το εξεταζόμενο εύρος), μπορεί εύκολα να προκύψει το συμπέρασμα πως, τα σταθεροποιημένα δοκίμια έχουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή και διαστολικότητα από τα φυσικά, με τη διαφορά τους να μειώνεται με την αύξηση της ορθής ενεργού τάσης. Η συμπεριφορά αυτή της σταθεροποιημένης άμμου οδηγεί σε μια καμπυλωμένη περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (Σχήμα 6.12). Η καμπύλωση της είναι εντονότερη στις χαμηλές τάσεις, ενώ εξομαλύνεται με την αύξηση τους. Η συνοχή είναι μηδενική, όπως και στη μη σταθεροποιημένη άμμο, ενώ η γωνία τριβής για μέσης πυκνότητας δοκίμια κατά την κορυφαία αντοχή είναι 41.3° για $\sigma'_{v0} = 125$ kPa, τιμή που μειώνεται δραματικά στις 34.9° για $\sigma'_{v0} = 555$ kPa, πλησιάζοντας την αντίστοιχη γωνία τριβής της άμμου (32.5°). Αυτή η καμπυλωμένη περιβάλλουσα θυμίζει τις περιβάλλουσες αστοχίας

για τα βραχώδη υλικά, όπου η τραχύτητα μεταξύ των επαφών των τμημάτων του βραχώδους υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στις χαμηλές τάσεις και περιορίζεται με την αύξηση τους (Barton (1973)). Τέλος, η παρατήρηση πως, κατά την κρίσιμη κατάσταση, η επαφή μεταξύ των κόκκων της άμμου διατηρείται, ανεξάρτητα από την σταθεροποίηση, επιβεβαιώνεται από την γωνία τριβής των σταθεροποιημένων δοκιμών κατά την κρίσιμη κατάσταση, η οποία είναι ίση με 30.1° , τιμή που συμπίπτει με την αντίστοιχη τιμή του φυσικού υλικού (30.3°).

Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα διαστολικότητας $-dy/dx$ (Bolton (1986)) σε σχέση με το λόγο τ/σ'_v για $\sigma'_{v0} = 125$ kPa. Η μέγιστη διαστολικότητα εμφανίζεται κατά τη μέγιστη τιμή του λόγου τ/σ'_v και για το σταθεροποιημένο και για το φυσικό δοκίμιο άμμου, με την τιμή της μέγιστης διαστολικότητας του σταθεροποιημένου να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του φυσικού. Η διαφορά αυτή στη διαστολικότητα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 6.14, όπου ενώ η άμμος διατηρεί σταθερή διαστολικότητα για όλο το εύρος φόρτισης, η σταθεροποιημένη εμφανίζει ολοένα μικρότερες τιμές διαστολικότητας με την αύξηση της ενεργού τάσης, έως ότου πλησιάσουν στις αντίστοιχες τιμές της άμμου.

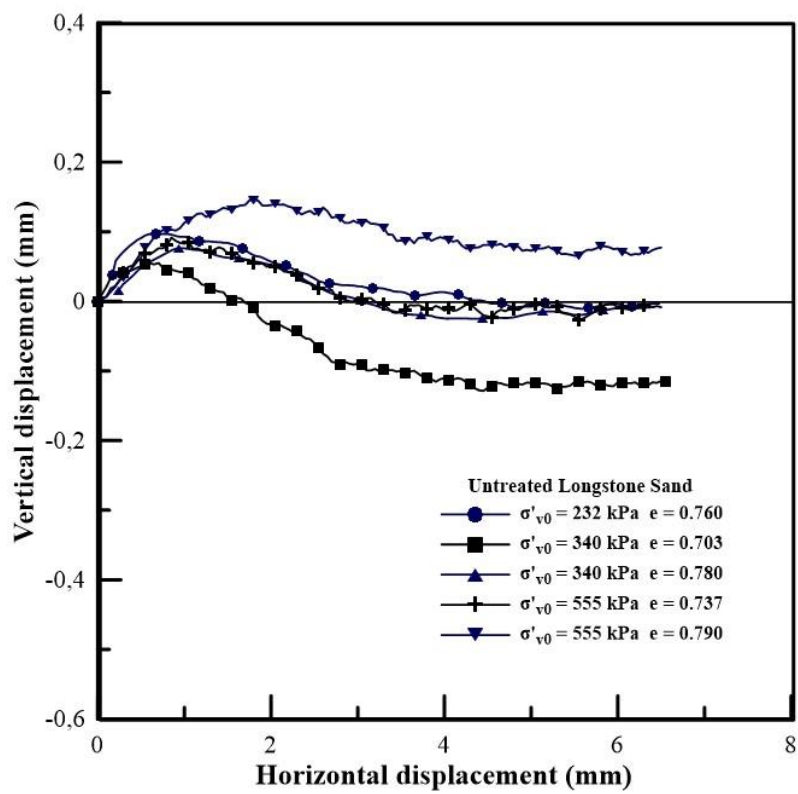
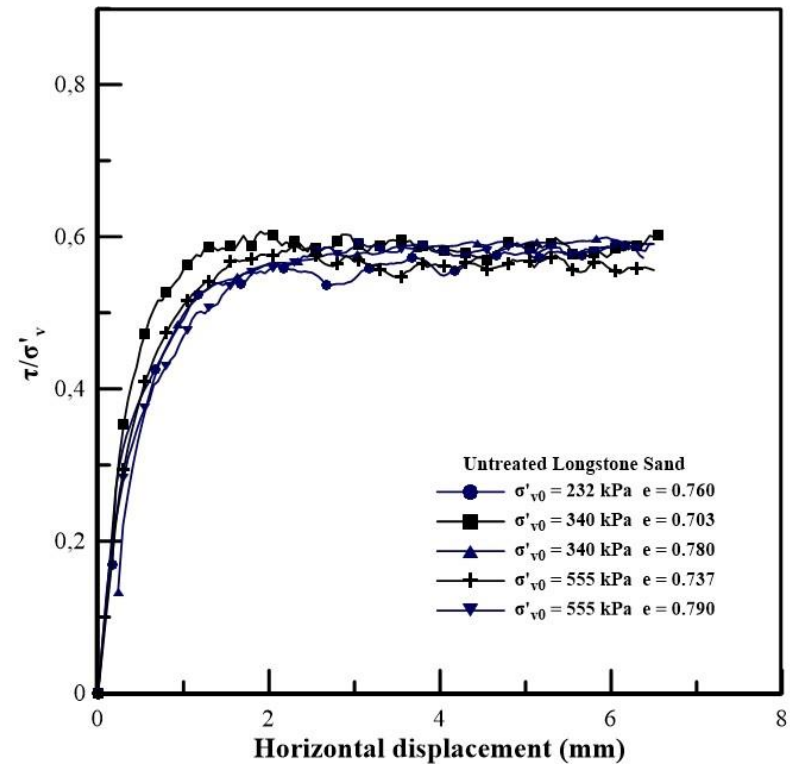


Σχήμα 6.13 Καμπύλες διαστολικότητας- τ/σ'_v φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.

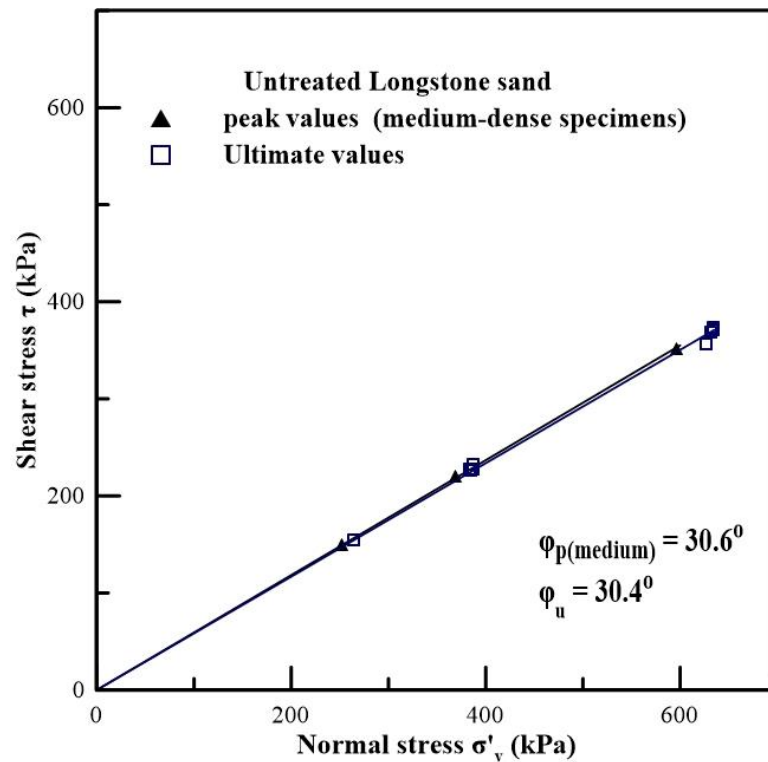


Σχήμα 6.14 Διάγραμμα μέγιστης διαστολικότητας - ορθής ενεργού τάσης.

Παρόμοιες παρατηρήσεις με τις παραπάνω εξάγονται και για την απόκριση κατά τη διάτμηση της γωνιώδους άμμου Longstone. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.15, η αύξηση της σχετικής πυκνότητας αυξάνει την διαστολικότητα και τη συνολική διαστολή της άμμου, σε αντίθεση με την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης, η οποία μειώνει αυτές τις δύο παραμέτρους. Η διαφορά στη διατμητική αντοχή για τα εξεταζόμενα δοκίμια με $e=0.703\div 0.790$ και $\sigma'_{v0}=232\div 555$ kPa είναι αμελητέα σε σύγκριση με την άμμο M31. Αυτό συμβαίνει διότι, η άμμος Longstone αποτελείται από λεπτούς γωνιώδης κόκκους, οι οποίοι εμφανίζουν μεγάλη αλληλεμπλοκή, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η ολίσθηση των κόκκων και ο σχηματισμός μιας πυκνότερης δομής. Έτσι, τα υπό εξέταση δοκίμια μπορούν τυπικά να θεωρηθούν χαλαρά, εξ ου και δεν εμφανίζουν απότομη μετάπτωση από την κορυφαία στην κρίσιμη αντοχή. Τα δε χαλαρά δοκίμια που υπόκεινται σε ενεργό τάση 555 kPa, μετά την αρχική τους συστολή, εμφανίζουν μια μικρή διαστολικότητα αλλά η δομή τους κατά την κρίσιμη κατάσταση παραμένει πυκνότερη από την αρχική τους δομή. Η μικρή διαφορά κορυφαίας και κρίσιμης αντοχής για παρόμοιους δείκτες πόρων επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό των διατμητικών παραμέτρων της άμμου (περιβάλλουσες Mohr-Coulomb, Σχήμα 6.16), όπου η μέγιστη γωνία τριβής της άμμου δεν διαφέρει σχεδόν καθόλου από την κρίσιμη γωνία τριβής, 30.6° και 30.3° αντίστοιχα.

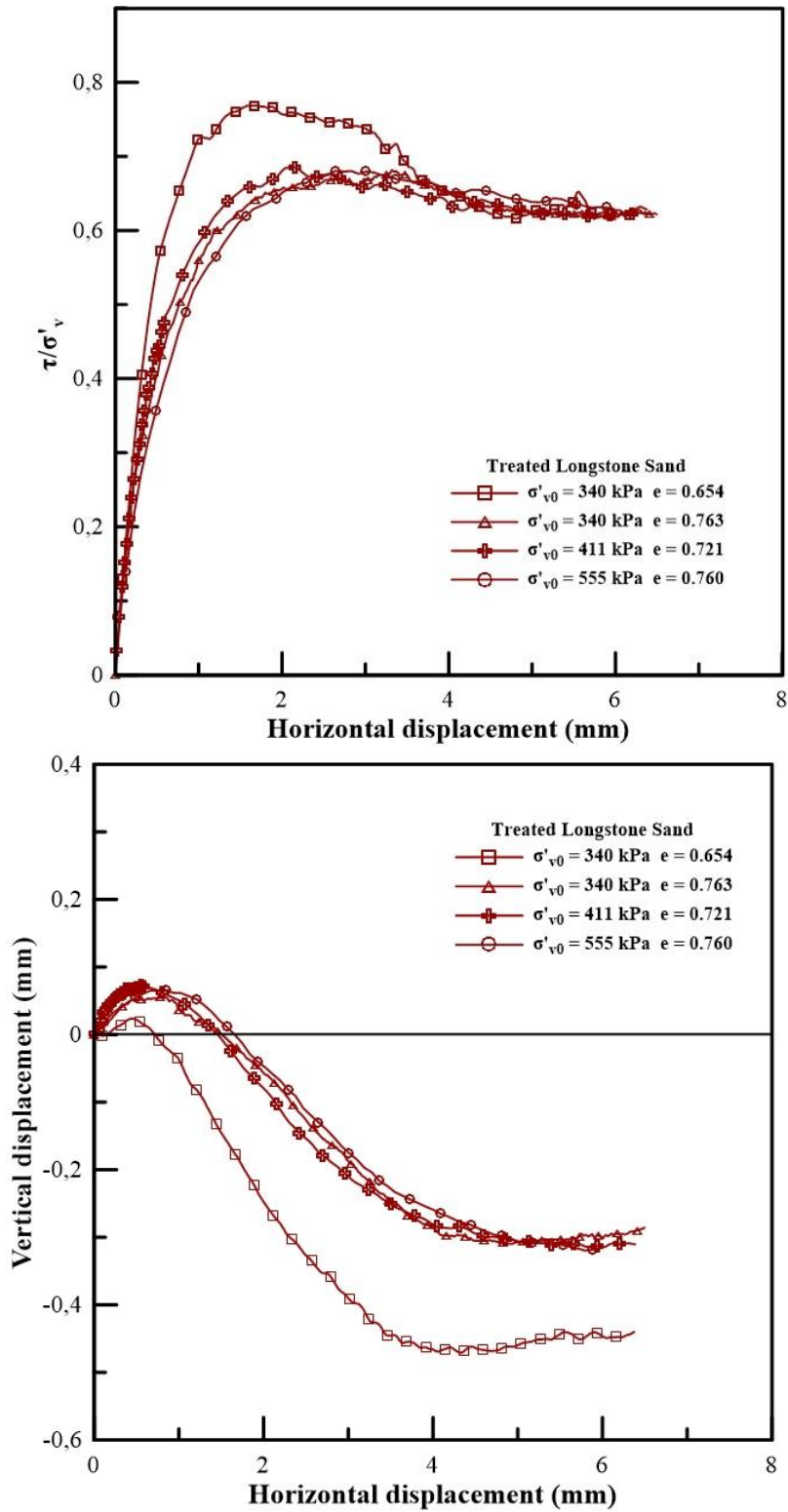


Σχήμα 6.15 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε άμμο Longstone.

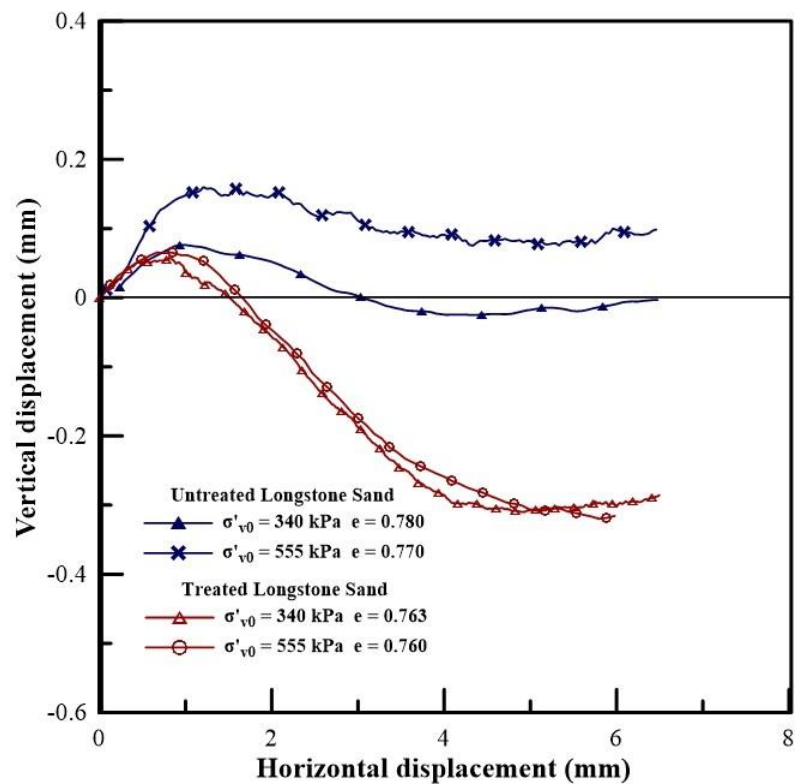
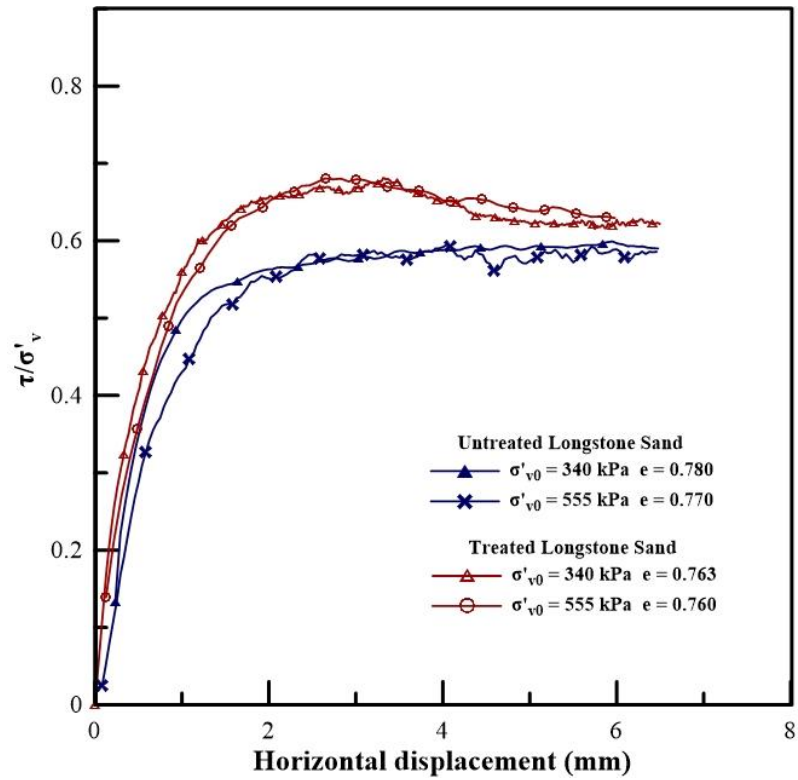


Σχήμα 6.16 Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για δοκιμές σε άμμο Longstone σε συνθήκες κρίσιμης κατάστασης και κορυφαίας αντοχής δοκιμών μέσης σχετικής πυκνότητας.

Αντίστοιχο μοτίβο συμπεριφοράς με τη σταθεροποιημένη άμμο M31 προσδίδει η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία και στην άμμο Longstone. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone, με αρχικούς δείκτες πόρων $e=0.742\pm 0.021$, παρουσιάζουν παρόμοια κορυφαία διατμητική αντοχή, στην ίδια οριζόντια παραμόρφωση, για ένα εύρος φόρτισης $\sigma'_{v0}=340\div 555$ kPa, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Παρόλο που, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.17, η διαφορά κορυφαίας και κρίσιμης διατμητικής αντοχής τους είναι αμελητέα, τα δοκίμια αυτά εμφανίζουν μεγάλη διαστολικότητα και, ενώ αρχικά συστέλλονται, καταλήγουν να αποκτούν μεγάλη αξονική διόγκωση κατά την κρίσιμη κατάσταση. Είναι αξιοσημείωτο πως, με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας ($e=0.654$), το υλικό γίνεται πιο ψαθυρό και ταυτόχρονα παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη διαστολή, περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από αυτή του δοκιμίου μέσης πυκνότητας, για την ίδια ενεργό τάση.



Σχήμα 6.17 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο Longstone.



Σχήμα 6.18 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο Longstone (κόκκινες καμπύλες) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο Longstone (μπλε καμπύλες).

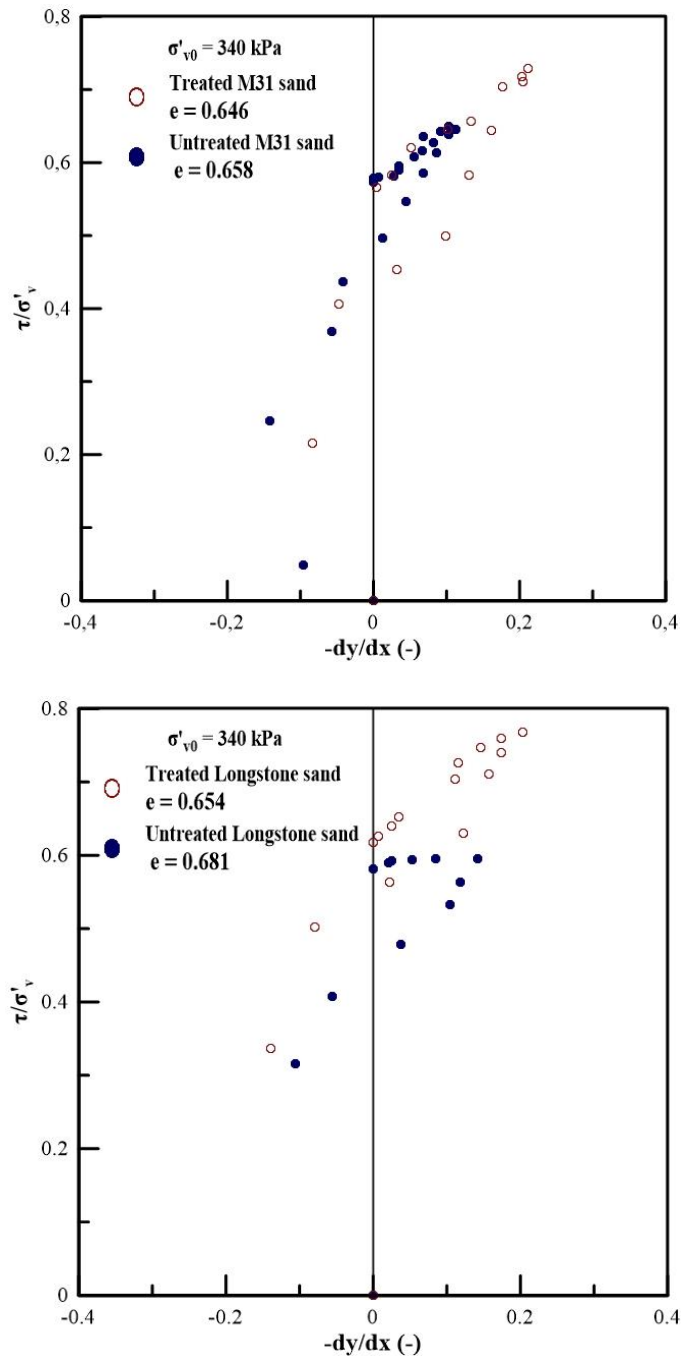
Όπως στην άμμο M31, έτσι και στην άμμο Longstone, η σταθεροποίηση της με κολλοειδή πυριτία δρα ευεργετικά στην απόκριση της έναντι διατμήσεως, προσδίδοντας της μεγαλύτερη αντοχή και διαστολικότητα. Φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone, με παρόμοια αρχική δομή, τέθηκαν υπό διάτμηση με ορθή ενεργό τάση 340 και 555 kPa. Όπως, εύλογα, προκύπτει από το Σχήμα 6.18, η βελτίωση που επέρχεται στις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους με τη σταθεροποίηση είναι σπουδαία. Η συνολική κατακόρυφη μετατόπιση των σταθεροποιημένων δοκιμίων ξεπερνά (και εδώ) τη μέση διάμετρο του κόκκου της άμμου, επιβεβαιώνοντας την θεωρία πως, κατά τη σταθεροποίηση, δημιουργούνται συσσωματώματα κόκκων άμμου και γέλης κολλοειδούς πυριτίας, τα οποία λειτουργούν ως ένας μεγαλύτερος κόκκος κατά τη διαδικασία της διαστολής. Αξίζει να σημειωθεί πως, τα φυσικά δοκίμια είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα στη μεταβολή της αρχικής σχετικής τους πυκνότητας και όχι στη μεταβολή της αρχικής φόρτισης, η οποία φαίνεται να μην επηρεάζει ούτε την απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμίων, για το εξεταζόμενο εύρος τάσεων.

Συνοψίζοντας, η διατμητική αντοχή, η διαστολικότητα και η διαστολή των αμμωδών εδαφών εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη αρχική δομή των κόκκων (δείκτης πόρων) και σε μικρότερο βαθμό από το μέγεθος της κατακόρυφης φόρτισης. Η σταθεροποίηση τους με κολλοειδή πυριτία δρα προσαυξητικά στις παραπάνω παραμέτρους με βασική διαφορά πως, η επίδραση του μεγέθους της φόρτισης είναι, πλέον, τόσο σημαντική, ώστε η περιβάλλουσα αστοχίας να προσομοιάζεται καλύτερα με μια καμπύλη γραμμή, η οποία παρουσιάζει έντονη καμπυλότητα στις μικρές τάσεις και τείνει προς την περιβάλλουσα αστοχίας της άμμου στις μεγάλες τάσεις.

6.3.2. Επίδραση σχήματος κόκκου άμμου

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο εδάφιο, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία δημιουργεί συμπλέγματα κόκκων, τα οποία, κατά τη διάτμηση, προσδίδουν στο υλικό μεγάλη διαστολή. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο να διαπιστωθεί, εάν η γωνιότητα των κόκκων της άμμου, συνεπαγόταν με ακόμα πιο διαστολική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων, λόγω της τραχύτητας που θα εμφανιζόταν στην επιφάνεια επαφής των συσσωματωμάτων. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα διαστολικότητας της άμμου με στρογγυλεμένους κόκκους (M31) και της γωνιώδους (Longstone) άμμου (Σχήμα 6.19), η επίδραση του σχήματος του κόκκου είναι αμελητέα στη διαστολική συμπεριφορά του υλικού. Ενώ η φυσική γωνιώδης άμμος εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη διαστολικότητα από τη στρογγυλή (για την ίδια ενεργό τάση και με παρόμοιους αρχικούς

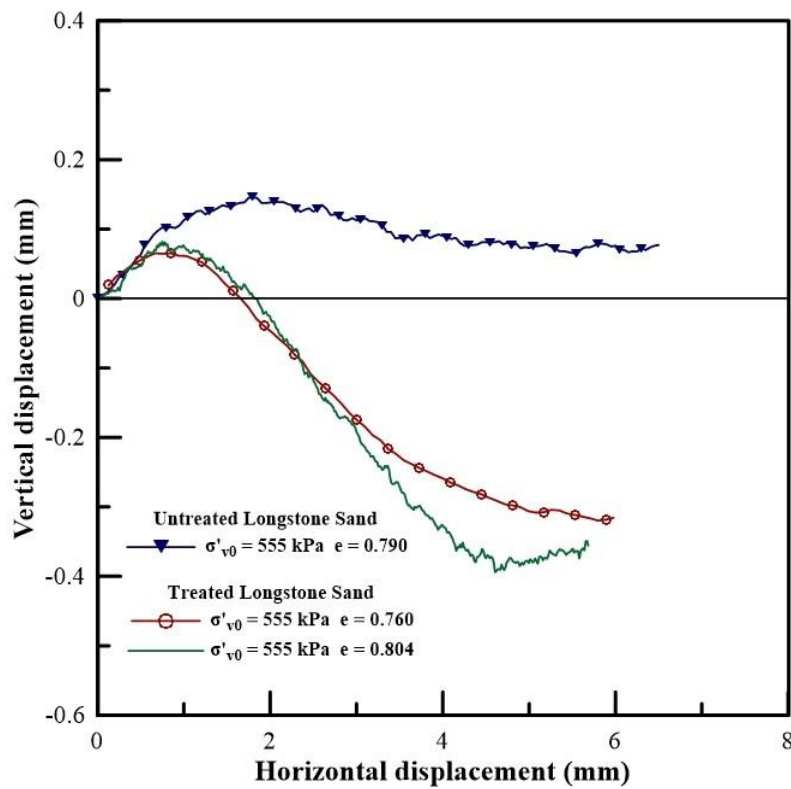
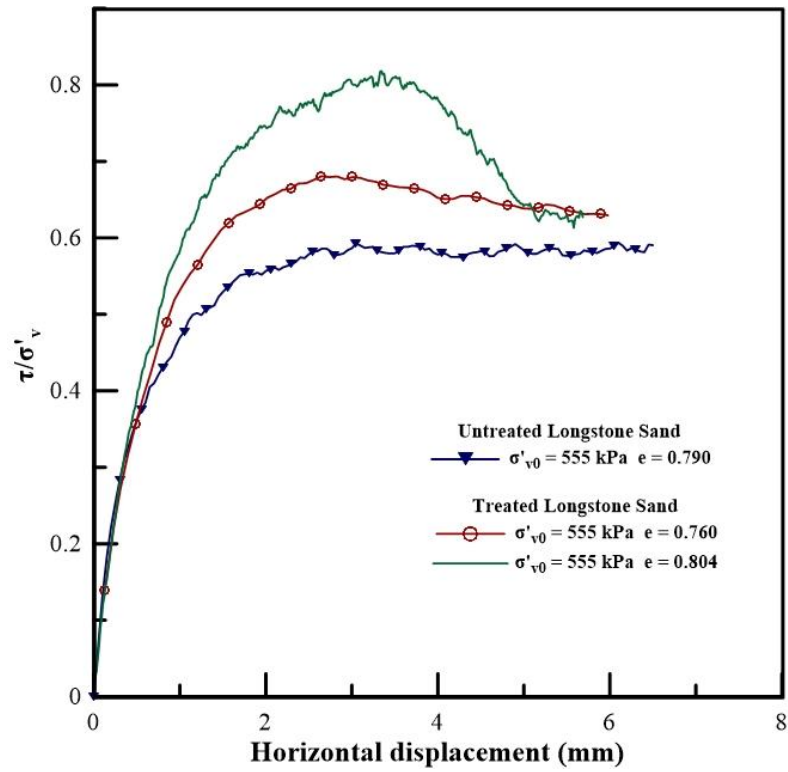
δείκτες πόρων), τα σταθεροποιημένα δοκίμια και των δύο άμμων δε διαφέρουν. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός πως, το σύμπλεγμα των κόκκων που δημιουργείται παρουσιάζει, ήδη, μεγάλη αλληλεμπλοκή με τα άλλα συμπλέγματα, ώστε η αρχική τραχύτητα των κόκκων της άμμου να μην επηρεάζει την διαστολική απόκριση του υλικού. Επακόλουθο αυτού, είναι πως, επειδή η διαστολικότητα των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι ανεξάρτητη από το σχήμα των κόκκων της άμμου, η σταθεροποίηση βελτιώνει σε μικρότερο βαθμό τα γωνιώδη υλικά, απ' ότι τα υλικά με στρογγυλούς κόκκους.



Σχήμα 6.19 Καμπύλες διαστολικότητας- τ/σ'_v φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και άμμου Longstone.

6.3.3. Επίδραση υγρασίας σταθεροποιημένων δοκιμίων

Όλες οι δοκιμές απ' ευθείας διάτμησης στα σταθεροποιημένα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν με πλήρωση της κυψέλης με αποσταγμένο νερό, ώστε να παραμένουν τα δοκίμια κορεσμένα. Σε πραγματικές συνθήκες, είναι πιθανόν, σε περιόδους ξηρασίας (που συνεπάγεται μερική πτώση του υδροφόρου ορίζοντα), το σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία έδαφος να μην είναι πλήρως κορεσμένο. Θέλοντας να εκτιμηθεί η απόκριση του εδάφους σε αυτές τις συνθήκες, κατασκευάστηκε δοκίμιο σταθεροποιημένης άμμου Longstone και αφέθηκε 100 ώρες ακάλυπτο σε θερμοκρασία δωματίου, ώστε να επιτρέπεται η εξάτμιση του νερού. Το αποτέλεσμα ήταν να εμφανιστούν ρωγμές στη γέλη που υπήρχε μέσα στο μεταλλικό κουτί, ενώ το δοκίμιο δεν παρουσίαζε καμία συνοχή και δε διατηρούσε τη δομή του χωρίς περίσφιξη (Σχήμα 6.21). Το δοκίμιο τέθηκε υπό διάτμηση χωρίς να πληρωθεί η κυψέλη με νερό. Η απόκριση αυτού του δοκιμίου παριστάνεται (με την πράσινη καμπύλη) στο Σχήμα 6.20 σε σύγκριση με την απόκριση ενός φυσικού κι ενός πλήρως κορεσμένου σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου Longstone, όλα υπό φορτίο 555 kPa. Αν και το μερικώς ξηρό δοκίμιο είχε πολύ χαλαρότερη αρχική δομή από τα άλλα δύο, παρουσίασε την ίδια διαστολική συμπεριφορά με το σταθεροποιημένο και κατά πολύ μεγαλύτερη κορυφαία αντοχή και από τα δύο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός πως, κατά την ξήρανση, οι δεσμοί της γέλης που βρίσκεται στους πόρους καταστρέφονται και τα σωματίδια πυριτίου «συγκολλούνται» στους κόκκους της άμμου, δημιουργώντας νέους χημικούς δεσμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του κόκκου καθώς και της τραχύτητας στις επιφάνειες επαφής των κόκκων (αφού πλέον οι κόκκοι εμφανίζουν έντονες προεξοχές) με επακόλουθο την έντονα διαστολική συμπεριφορά. Η φωτογραφία του δοκιμίου μετά τη διάτμηση δίνεται στο Σχήμα 6.21, όπου είναι ξεκάθαρο πως η δομή του είναι πιο κοντά με το φυσικό δοκίμιο, απέχοντας πολύ από τη συνοχή του κορεσμένου σταθεροποιημένου δοκιμίου. Φαίνεται, επίσης, πως το δοκίμιο είχε μια σχετική υγρασία, πράγμα που σημαίνει πως, υπάρχει περίπτωση να υπήρχαν κάποιοι κορεσμένοι αδιατάρακτοι πυρήνες σταθεροποιημένου υλικού στην επιφάνεια διάτμησης, οι οποίοι να έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της διαστολικής συμπεριφοράς του.



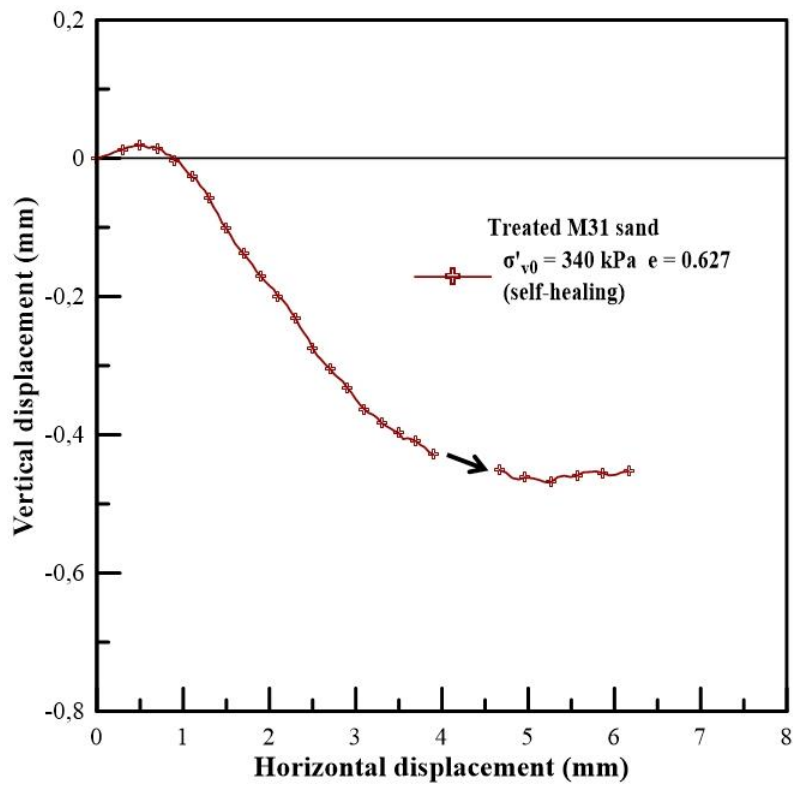
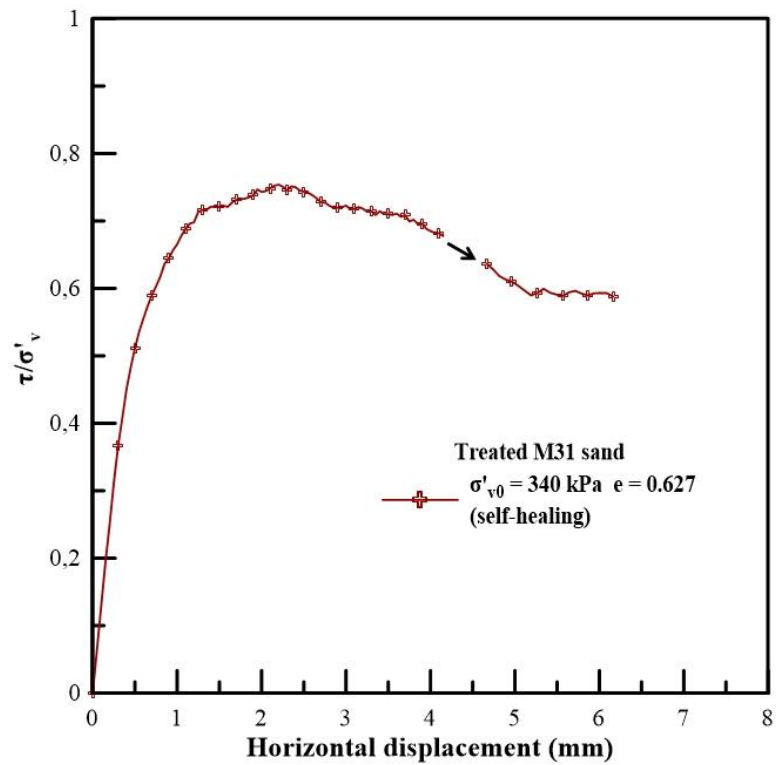
Σχήμα 6.20 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμές σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτίδα άμμο Longstone (κόκκινη καμπύλη) και σε μη σταθεροποιημένη άμμο Longstone (μπλε καμπύλη). Η πράσινη καμπύλη παριστάνει σταθεροποιημένο δοκίμιο που έχει υποστεί μερική ξήρανση.



Σχήμα 6.21 Φωτογραφίες πριν (επάνω) και μετά (κάτω) τη διάτμηση μερικώς κορεσμένου σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου Longstone.

6.3.4. Αυτοϊαση (self-healing)

Ένα άλλο φαινόμενο, του οποίου ο χημικός ορισμός αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, που παρουσιάζεται στη γέλη της κολλοειδούς πυριτίας είναι η αυτοϊαση. Η γέλη έχει τη δυνατότητα να αναδημιουργεί χημικούς δεσμούς μεταξύ των στερεών αλυσίδων της με το πέρασμα του χρόνου. Με αυτή τη λογική, όταν ένα δοκίμιο άμμου, σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία, υποβληθεί σε διάτμηση, υπάρχει η δυνατότητα επανεμφάνισης των κατεστραμμένων (λόγω διάτμησης) χημικών δεσμών στην επιφάνεια διάτμησης. Αυτό θα συνεπαγόταν με την ανάκαμψη της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου. Γι' αυτό το λόγο, σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου M31 με αρχικό δείκτη πόρων $e=0.627$ υποβλήθηκε σε διάτμηση με ορθή ενεργό τάση 340 kPa. Στο δοκίμιο επιβλήθηκε ρυθμός παραμόρφωσης 0.005 mm/min, έως ότου φτάσει στην κρίσιμη περιοχή (περίπου στα 4 mm οριζόντιας μετατόπισης). Έπειτα, του επιβλήθηκε ο μικρότερος δυνατός ρυθμός παραμόρφωσης (0.00001 mm/min), έτσι ώστε να μη σταματήσει η διαδικασία της διάτμησης του, και, ταυτόχρονα, εναλλασσόταν το νερό της κυψέλης με νερό θερμοκρασίας 80 °C, ώστε να διατηρείται συνεχώς θερμό περιβάλλον γύρω από το δοκίμιο. Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπεται η ταχύτερη κίνηση των σωματιδίων του πυριτίου και, κατά συνέπεια, διευκολύνεται η δημιουργία νέων χημικών δεσμών. Έπειτα από 30 ώρες, επιβλήθηκε ξανά στο δοκίμιο ο αρχικός ρυθμός παραμόρφωσης του μέχρι να φτάσει, πάλι, στην κρίσιμη περιοχή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.22, το δοκίμιο δεν εμφάνισε καμία μεταβολή στη συμπεριφορά του. Συνάγεται, έτσι, το συμπέρασμα πως η γέλη που υπήρχε στα κενά των πόρων και είχε τραυματιστεί κατά τη διάτμηση του δοκιμίου, δεν κατάφερε να αναδημιουργήσει τους χημικούς δεσμούς μεταξύ των αλυσίδων της και να προσδώσει στο δοκίμιο νέα αντοχή. Βέβαια, μπορεί οι 30 ώρες να μην ήταν αρκετές για να παρατηρηθεί αυτοϊαση, αλλά ήταν αρκετές για να αποκλείσουν την άμεση εμφάνιση του φαινομένου αυτού.



Σχήμα 6.22 Διαγράμματα τ/σ'_v - οριζόντιας μετατόπισης (επάνω) και κατακόρυφης - οριζόντιας μετατόπισης (κάτω) από δοκιμή αυτοϊασης σε σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυρτιά άμμο M31.

7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, μελετήθηκε, μέσω μιας σειράς εργαστηριακών δοκιμών, η επίδραση της χημικής βελτιστοποίησης στις μηχανικές ιδιότητες λεπτόκοκκων αμμωδών εδαφικών υλικών, χρησιμοποιώντας διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή. Τα αποτελέσματα τις έρευνας έδειξαν ότι:

1. Κατά τη μονοαξονική συμπίεση της άμμου M31 με στρογγυλεμένους κόκκους, η σταθεροποίηση προσδίδει στο δοκίμιο μεγαλύτερη ενδοσιμότητα καθώς η γέλη της κολλοειδούς πυριτίας που βρίσκεται στα κενά των πόρων φαίνεται, όταν τραυματίζεται η δομή της απελευθερώνοντας το δεσμευμένο νερό, να διευκολύνει την πύκνωση της δομής του εδαφικού σκελετού.
2. Το σχήμα των κόκκων της άμμου παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμίων κατά τη μονοαξονική συμπίεση τους. Στις γωνιώδεις άμμους, κατά την στράγγιση του νερού που απελευθερώνει η γέλη μετά τον τραυματισμό της, η αλληλεμπλοκή που αναπτύσσεται μεταξύ των κόκκων εμποδίζει την μετακίνησή τους και την αναδιάταξή τους σε μια πολύ πυκνότερη δομή.
3. Κατά την απ' ευθείας διάτμηση, ο αρχικός δείκτης πόρων των φυσικών δοκιμίων άμμου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά τους, ενώ αυτή είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το μέγεθος της αρχικής φόρτισης (για το εξεταζόμενο εύρος 125÷555 kPa). Αντιθέτως, τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της αρχικής φόρτισης, με την αύξηση της οποίας παρατηρείται μείωση της αντοχής και της διαστολικότητας των δοκιμίων.
4. Η προσθήκη της γέλης στα κενά των πόρων της άμμου αυξάνει τη διατμητική αντοχή της, προσδίδοντας, επίσης, στο υλικό μεγαλύτερη διαστολικότητα.
5. Η μέγιστη παρατηρηθείσα κατακόρυφη μετατόπιση που εμφάνισε η άμμος (πυκνό δοκίμιο και υπό μικρή φόρτιση) δεν ξεπερνούσε σε μέγεθος τη διάμετρο του μέσου κόκκου της. Τουναντίον, σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου, μέσης πυκνότητας και υπό την ίδια φόρτιση μετατοπίστηκε κατακόρυφα περίπου τρεις

φορές τη μέση διάμετρο κόκκου της άμμου. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει δημιουργία συσσωματωμάτων κόκκων και γέλης, τα οποία δρουν προσαυξητικά στη διαστολικότητα του υλικού.

6. Η διαστολικότητα που εμφανίζει ένα χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου υπό διάτμηση μπορεί να συγκριθεί με τη διαστολικότητα ενός πυκνού δοκιμίου άμμου στην ίδια κατακόρυφη ενεργό τάση, παρά της διαφορές τους στην αντοχή, την αρχική συστολή και την τελική διαστολή.
7. Κατά την κρίσιμη κατάσταση, η επαφή των κόκκων της άμμου παίζει, πλέον, τον κυρίαρχο ρόλο στην εδαφική απόκριση, αφού η σταθεροποίηση παύει να επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις περιβάλλουσες Mohr-Coulomb, όπου οι γωνίες τριβής κατά την κρίσιμη κατάσταση είναι 30.3° και 30.1° για το φυσικό και το σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό, αντίστοιχα.
8. Η σταθεροποίηση της άμμου, της προσδίδει μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, η οποία βελτίωση μειώνεται με την αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η περιβάλλουσα Mohr-Coulomb, σε συνθήκες κορυφαίας αντοχής, για τη σταθεροποιημένη άμμο να είναι καμπύλη, εμφανίζοντας μεγαλύτερη καμπυλότητα στις χαμηλές τάσεις και τείνοντας στην αντίστοιχη περιβάλλουσα της φυσικής άμμου στις υψηλές.
9. Η μέγιστη διαστολικότητα των σταθεροποιημένων δοκιμίων εμφανίζεται κατά την κορυφαία αντοχή, ακριβώς όπως και στα φυσικά δοκίμια άμμου.
10. Το σχήμα του κόκκου της άμμου δεν επηρεάζει τη διαστολική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου και επομένως μπορεί να θεωρηθεί πως η σταθεροποίηση βελτιώνει σε μικρότερο βαθμό τη διαστολικότητα των γωνιωδών άμμων, οι οποίες εμφανίζουν εν γένει έντονη διαστολική συμπεριφορά.
11. Δοκίμια άμμου, τα οποία έχουν σταθεροποιηθεί με διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας και έχουν αφεθεί να ξεραθούν μερικώς, εμφανίζουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και παρόμοια διαστολικότητα κατά τη διάτμηση από τα κορεσμένα σταθεροποιημένα δοκίμια, όμοιας αρχικής δομής και φόρτισης.

12. Το φαινόμενο της αυτοΐασης της γέλης δεν παρατηρήθηκε, κατά τη διάτμηση κορεσμένου σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου, μέσα σε διάστημα 30 ωρών και διατήρησης θερμού περιβάλλοντος.

8

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agapoulaki GI and Papadimitriou AG (2015) Rheological properties of colloidal silica as a means for designing passive stabilization of liquefiable soils. In Proceedings: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Winter MG, Smith DM, Eldred PJJ and Toll DG (eds)). Institution of Civil Engineers, London, UK, vol.5, pp. 2331–2336, <http://dx.doi.org/10.1680/ecsmge.60678.vol5.356>.

Altuhafi FN, Coop MR and Georgiannou VN (2016) Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **142(12)**: 04016071.

Asomoza M, Domínguez MP, Solís S and López T (1997) Calorimetric study of the sol-gel silica gelation stage: Effect of gelation pH. *Materials Letters* **33(3-4)**: 153-160.

Bareither CA, Benson CH and Edil TB (2008) Reproducibility of direct shear tests conducted on granular backfill materials. *Geotechnical Testing Journal* **31(1)**: 1–11.

Barton NR (1973) Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology* **7**: 287–332.

Been K and Jefferies MG (1985) A state parameter for sands. *Géotechnique* **35(2)**: 99-112.

Bergna HE and Roberts WO (eds) (2005) *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. CRC, Boca Raton, FL, USA.

Bishop AW (1972) Shear strength parameters for undisturbed and remolded soil specimens. In *Stress-strain behaviour of soils* (Parry RHG (ed.)), London, pp. 3-58.

Bolton MD (1986) The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique* **36(1)**: 65-78.

Brinker CJ and Scherer GW (eds) (1990) Sol–Gel Science: the Physics and Chemistry of Sol–Gel Processing. Academic Press, Cambridge, MA, USA.

Casagrande A and Shannon WL (1948) Strength of soils under dynamic loads. Proceedings of ASCE **74(4)**: 591-608.

Converse FJ (1953) The use of the direct shear testing machine in foundation engineering practice. Symposium on Direct Shear Testing of Soils, ASTM, vol. 131, pp. 75-80.

Cuccovillo T and Coop MR (1999) On the mechanics of structured sands. Géotechnique **49(6)**: 741–760, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.741>.

D’Appolonia E, Miller CE and Ware TM (1955) Sand compaction by vibroflotation. Transactions of the American Society of Civil Engineers **120(1)**: 154–168.

Díaz-Rodríguez JA, Antonio-Izarraras VM, Bandini P and López-Molina JA (2008) Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. Canadian Geotechnical Journal **45(10)**: 1345–1355, <http://dx.doi.org/10.1139/T08-072>.

Donovan NC, Becker AM and Lau GY (1984) Liquefaction mitigation by site improvement – a case study. In Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, vol. 1, pp. 693–700.

DuPont. (1997) Ludox colloidal silica: properties, uses, storage and handling. Product information, DuPont, Wilmington, DE.

Finn WDL and Vaid YP (1977) Liquefaction potential from drained constant volume cyclic simple shear tests. In Proceedings of the 6th World Conference on Earthquake Engineering. Sarita Prakashan, Meerut City, India, vol. 6, pp. 7–12.

Gallagher PM (2000) Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk. Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.

Gallagher PM and Mitchell JK (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.

Gallagher PM, Conlee CT and Rollins KM (2007a) Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **133(2)**: 186–196, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241.

Gallagher PM, Pamuk A and Abdoun T (2007b) Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout. *Journal of Materials in Civil Engineering* **19(1)**: 33–40.

Gan JKM, Fredlund DG and Rahardjo H (1988) Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal* **25(3)**: 500-510.

Georgiannou VN (2006) The undrained response of sands with additions of particles of various shapes and sizes. *Géotechnique* **56(9)**: 639–649.

Georgiannou VN and Tsomokos A (2008) Comparison of two fine sands under torsional loading. *Canadian Geotechnical Journal* **45(12)**: 1659–1672, doi: 10.1139/T08-083.

Ghafghazi M, Shuttle DA and DeJong JT (2014) Particle breakage and the critical state of sand. *Soils and Foundations* **54(3)**: 451-461.

Houlsby GT (1991) How the dilatancy of soils affects their behavior. Invited Theme Lecture, Proceedings of the Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, May 27-30, vol. 4, pp. 1189-1202.

Jewell RA (1989) Direct shear tests on sand. *Géotechnique* **39(2)**: 309-322.

Kodaka T, Oka F, Ohno Y, Takyu T and Yamasaki N (2005) Modeling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand. In *Geomechanics: Testing, Modeling, and Simulation* (Yamamuro JA and Koseki J (eds)). American

Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, Geotechnical Special Publications 143, pp. 205–216.

Lade PV and Yamamuro JA (1996) Undrained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures. *Journal of Geotechnical Engineering* **122(2)**: 120-129.

Maher MH, Ro S and Welsh JP (1994) Cyclic undrained behavior and liquefaction potential of sand treated with chemical grouts and microfine cement (MC-500). *Geotechnical Testing Journal* **17**: 159–170.

Mamo GB and Dey A (2014) Critical overview of the effect of strain rate on direct shear test results. In *Proceedings of North East Students Geo-Congress on Advances in Geotechnical Engineering*, 18th October 2014, IIT-Guwahati.

Mayne PW, Jones JS Jr. and Dumas JC (1984) Ground response to dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering* **110**: 757–774.

Mott PH, Dorgan JR and Roland CM (2008) The bulk modulus and Poisson's ratio of "incompressible" materials. *Journal of Sound and Vibration* **312(4-5)**: 572-575.

Olson RE (1989) Direct shear testing. Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology.

Porcino D, Marcianò V and Granata R (2011) Undrained cyclic response of a silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes. *Geomechanics and Geoengineering: an International Journal* **6(3)**: 155–170, doi: 10.1080/17486025.2011.560287.

Porcino D, Marcianò V and Granata R (2012) Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand. *Canadian Geotechnical Journal* **49(10)**: 1117–1133, <http://dx.doi.org/10.1139/T2012-069>.

Reynolds O (1885) On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol.20, No.127, pp. 469-481.

Roscoe KH, Schofield AN and Wroth CP (1958) On the yielding of soils. *Géotechnique* **8(1)**: 22-53.

Rowe PW (1962) The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol.269, No. 1339 (Oct. 9, 1962), pp. 500-527.

Seed HB and Lee KL (1966) Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* **92(118)**: 105–134.

Seed HB and Lundgren R (1954) Investigation of the effects of transient loading on the strength and deformation characteristics of saturated sands. *Proceedings of 57th Annual Meeting of the Society, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, No.54*, pp. 1288-1306.

Seed HB, Idriss IM, Makdisi FI and Banerjee NG (1975) Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA, Report No. EERC 75-29*.

Taylor DW (1948) *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons Inc., New York.

Terzaghi K (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.

Terzaghi K (1960) *From Theory to Practice in Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.

Terzaghi K and Peck RB (1948) *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.

Thermann K, Gau C and Tiedemann J (2006) Shear strength parameters from direct shear tests - influencing factors and their significance. *IAEG2006 Paper number 484*, pp. 1-12.

Towhata I (2008) Geotechnical earthquake engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering.

Towhata I and Kabashima Y (2001) Mitigation of seismically – induced deformation of loose sandy foundation by uniform permeation grouting. Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, Istanbul, Turkey, pp. 313–318.

Tsomokos A and Georgiannou VN (2010) Effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands. Canadian Geotechnical Journal **47(5)**: 539-551, doi: 10.1139/T09-121.

Vesic AS and Clough GW (1968) Behaviour of granular materials under high stresses. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE **94(SM3)**: 661-688.

Vigil G, Xu Z, Steinberg S and Israelachvili J (1994) Interactions of silica surfaces. Journal of Colloid and Interface Science **165**: 367–385.

Wang YH and Leung SC (2008) Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **134(7)**: 992–1004, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(992).

Yamamuro JA and Lade PV (1996) Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures. Journal of Geotechnical Engineering **122(2)**: 109-119.

Yamamuro JA, Abrantes AE and Lade PV (2011) Effect of strain rate on the stress-strain behavior of sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **137(12)**: 1169-1178.

Yamamuro JA, Bopp PA and Lade PV (1996) One-dimensional compression of sands at high pressures. Journal of Geotechnical Engineering **122(2)**: 147-154.

Yao YP, Sun DA and Luo T (2004) A critical state model for sands dependent on stress and density. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **28(4)**: 323-337.

Yonekura R, Miwa M (1993) Fundamental properties of sodium silicate based grout. in *Proceedings of the Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, 1993*, pp. 439-444.

Καββαδάς Μ (2005) *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα.

Παπαχαρίσης Ν, Γραμματικόπουλος Ι και Μάνου-Ανδρεάδη Ν (2010) *Γεωτεχνική Μηχανική (Β' Έκδοση)*. Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε.

Τριαντάφυλλος ΠΚ (2015) Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ρευστοποιήσιμων εδαφών, πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Μεταπτυχιακή διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Χατζιωάννου ΘΠ (1993) *Χημική Ισορροπία και Ανόργανη Ποιοτική Ημιμικροανάλυση*. Ιδιωτική Έκδοση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στοιχεία Δοκιμών Απ' ευθείας Διάτμησης

Φυσικά δοκίμια άμμου Μ31										
Όνομα	Ημερομηνία	σ'_{v0}	D_r (%)	e_0	φ_p (°)	φ_u (°)	τ_p (kPa)	σ'_{vp} (kPa)	τ_u (kPa)	σ'_{vu} (kPa)
A-DS-125-1	12/11/2016	125 kPa	59,88 %	0,641	33,61	31,57	86,00	129,38	83,68	136,18
A-DS-125-2	12/11/2016	125 kPa	86,73 %	0,55	37,44	31,96	97,98	127,97	85,44	136,97
A-DS-125-3	12/11/2016	125 kPa	43,66 %	0,696	30,42	29,48	76,18	129,74	75,62	133,79
A-DS-125-4	12/11/2016	125 kPa	91,15 %	0,535	37,17	32,60	97,47	128,56	85,57	133,79
A-DS-125-5	9/11/2016	125 kPa	76,70 %	0,584	38,89	31,34	103,68	128,56	87,69	144,00
A-DS-196-1	14/11/2016	196 kPa	56,05 %	0,654	32,96	30,90	132,29	204,03	131,80	220,19
A-DS-232-1	12/11/2016	232 kPa	56,93 %	0,651	32,66	30,50	155,77	243,02	151,09	256,53
A-DS-232-2	12/11/2016	232 kPa	53,98 %	0,661	31,45	30,88	148,92	243,48	153,40	256,53
A-DS-232-3	12/11/2016	232 kPa	93,22 %	0,528	36,85	32,10	179,13	239,05	166,69	265,71
A-DS-232-6	14/11/2016	232 kPa	64,31 %	0,626	36,09	30,49	176,11	241,57	155,62	264,25
A-DS-340-1	14/11/2016	340 kPa	54,87 %	0,658	33,01	30,01	231,07	355,64	223,22	386,51
A-DS-555-2	15/11/2016	555 kPa	55,46 %	0,656	32,19	30,57	365,88	581,17	372,81	631,04
A-DS-555-3	22/7/2016	555 kPa	85,55 %	0,554	36,56	29,67	425,31	573,47	355,90	624,79
A-DS-1056-1	15/7/2016	1056 kPa	78,76 %	0,577	32,83	30,83	717,10	1111,28	710,05	1189,70

Στοιχεία Δοκιμών Απ' ευθείας Διάτμησης

Σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31										
Όνομα	Ημερομηνία	σ'_{v0}	D_r (%)	e_0	ϕ_p (°)	ϕ_u (°)	τ_p (kPa)	σ'_{vp} (kPa)	τ_u (kPa)	σ'_{vu} (kPa)
SA-DS-53-2	2/12/2016	53 kPa	55,75 %	0,655	39,89	30,33	46,94	56,16	36,34	62,11
SA-DS-125-1	16/11/2016	125 kPa	60,47 %	0,639	41,25	31,39	114,14	130,16	87,89	144,03
SA-DS-196-1	22/10/2016	196 kPa	61,06 %	0,637	40,61	30,71	177,43	206,96	133,46	224,70
SA-DS-232-1	16/9/2016	232 kPa	58,11 %	0,647	39,50	30,13	199,11	241,51	150,85	259,92
SA-DS-232-2	6/10/2016	232 kPa	68,44 %	0,612	41,49	30,18	211,51	239,13	152,98	263,03
SA-DS-232-3	20/11/2016	232 kPa	72,86 %	0,597	40,50	30,57	205,05	240,08	158,18	267,79
SA-DS-268-1	19/10/2016	268 kPa	59,29 %	0,643	38,28	30,64	219,97	278,75	177,57	299,71
SA-DS-340-1	23/9/2016	340 kPa	58,41 %	0,646	37,60	29,85	273,43	355,08	217,50	379,07
SA-DS-340-2	10/10/2016	340 kPa	48,08 %	0,681	36,02	30,09	256,88	353,25	220,15	379,92
SA-DS-340-3	25/2/2017	340 kPa	64,01 %	0,627	37,01	30,65	268,68	356,40	229,07	386,58
SA-DS-555-1	5/7/2016	555 kPa	62,54 %	0,632	34,91	29,83	405,51	581,03	356,34	621,50

Στοιχεία Δοκιμών Απ' ευθείας Διάτμησης

Φυσικά δοκίμια άμμου Longstone										
Όνομα	Ημερομηνία	σ'_{v0}	D_r (%)	e_0	ϕ_p (°)	ϕ_u (°)	τ_p (kPa)	σ'_{vp} (kPa)	τ_u (kPa)	σ'_{vu} (kPa)
LS-DS-232-1	12/12/2016	232 kPa	61,68 %	0,76	30,72	30,23	150,12	252,59	154,00	264,25
LS-DS-340-1	10/1/2017	340 kPa	56,43 %	0,78	30,81	30,43	219,76	368,48	225,94	384,70
LS-DS-340-2	24/1/2017	340 kPa	53,02 %	0,793	31,54	30,94	224,21	365,33	231,97	386,90
LS-DS-340-3	24/1/2017	340 kPa	76,64 %	0,703	31,85	30,60	220,43	354,82	227,06	383,90
LS-DS-340-4	2/3/2017	340 kPa	82,41 %	0,681	31,55	30,53	222,80	362,85	228,00	386,66
LS-DS-555-1	12/12/2016	555 kPa	58,79 %	0,771	30,53	30,28	351,36	595,78	368,50	631,04
LS-DS-555-3	23/1/2017	555 kPa	53,81 %	0,79	30,68	30,32	351,54	592,41	370,91	634,34
LS-DS-555-4	23/1/2017	555 kPa	55,38 %	0,784	30,72	30,46	359,39	604,72	373,02	634,34
LS-DS-555-5	23/1/2017	555 kPa	67,72 %	0,737	30,57	29,59	343,71	581,87	355,98	626,77
LS-DS-555-6 (v=9mm/min)	6/3/2017	555 kPa	50,39 %	0,803	30,66	29,71	351,22	592,41	362,02	634,36

Σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone										
Όνομα	Ημερομηνία	σ'_{v0}	D_r (%)	e_0	ϕ_p (°)	ϕ_u (°)	τ_p (kPa)	σ'_{vp} (kPa)	τ_u (kPa)	σ'_{vu} (kPa)
SLS-DS-340-1	14/12/2016	340 kPa	60,37 %	0,765	35,90	32,56	265,73	367,02	249,16	390,23
SLS-DS-340-2	9/1/2017	340 kPa	89,50 %	0,654	36,51	31,96	271,64	367,02	241,97	387,83
SLS-DS-340-3 (v=9mm/min)	22/2/2017	340 kPa	68,24 %	0,735	37,76	32,10	277,74	358,59	241,08	384,36
SLS-DS-340-4	28/2/2017	340 kPa	60,89 %	0,763	34,76	32,01	253,96	365,96	245,30	392,37
SLS-DS-411-1	23/1/2017	411 kPa	71,92 %	0,721	34,70	31,92	298,80	431,55	294,33	472,47
SLS-DS-555-1	12/12/2016	555 kPa	61,68 %	0,76	34,64	32,11	406,89	588,91	396,87	632,51
SLS-DS-555-2 (ξηρό)	8/2/2017	555 kPa	50,13 %	0,804	39,30	31,98	488,61	596,97	392,15	627,97

