



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ**

**Συμμετέχουσες σχολές: Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών και
Πολιτικών Μηχανικών**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΜΜΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ
ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ**



MSc THESIS

**MECHANICAL RESPONSE OF SANDS TREATED WITH
COLLOIDAL SILICA SOL**

ΕΛΕΝΗ-ΜΑΡΙΑ ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπουσα:

Β.Ν. Γεωργιάννου, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

**ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΜΜΩΝ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ**

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν να ολοκληρώσω αυτό το έργο.

Πρώτα απ' όλους, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Αναπλ. Καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κυρία Β. Ν. Γεωργιάννου που ήταν και η επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Η συνεχής και υποδειγματική της καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική της κατάρτιση, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μελέτης διαμόρφωσαν τις πιο ευνοϊκές συνθήκες για τη διεξαγωγή της έρευνας μου. Η διδασκαλία και ο συμβουλευτικός της ρόλος με εφοδίασαν με το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο για την ενασχόληση μου με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο και αποτέλεσαν έμπνευση για εμένα. Επιπλέον, την ευχαριστώ για την υποστήριξή της όλο αυτό το διάστημα, και την υπομονή της ακόμα και στις πιο δύσκολες στιγμές.

Για την ακούραστη συμπαράσταση, την άψογη συνεργασία και την αμέριστη βοήθειά του, καθώς και για τις ευχάριστες καθημερινές στιγμές θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Στέλιο Τσεντίδη, τεχνικό του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου για τη συμπαράσταση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και στην Αναστασία και στο Βασίλη που με στήριξαν, με βοήθησαν και με ανέχτηκαν αυτό το διάστημα.

Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου
Φεβρουάριος 2017

Εκτενής Περίληψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της παθητικής σταθεροποίησης μη συνεκτικών εδαφών με χρήση υγρόλυματος κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά τους. Στο πεδίο η σταθεροποίηση γίνεται με αργή εισπίεση του κολλοειδούς σταθεροποιητή, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές. Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας διοχετεύεται στη ρευστοποιήσιμη εδαφική μάζα μέσω φυσικής ή τεχνητής ροής του υπόγειου νερού. Πρόκειται για μία εναλλακτική μέθοδο χαμηλής διατάραξης που αποσκοπεί στον περιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης, σε περιοχές με ανεπτυγμένες και ευαίσθητες σε ρευστοποίηση υποδομές. Στην παρούσα έρευνα για να μελετηθεί η επίδραση του σταθεροποιητή στα μη συνεκτικά εδάφη εκτελέστηκαν μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες. Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι: i) η κατανόηση των φυσικοχημικών διαδικασιών του υγρόλυματος και της γέλης κολλοειδούς πυριτίας, ii) η αποσαφήνιση του πώς αυτές οι διαδικασίες επηρεάζουν τους μηχανισμούς μεταφοράς των κολλοειδών μέσα στους εδαφικούς πόρους και κυρίως, iii) πώς επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων εδαφών. Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν η λεπτόκοκκη άμμος M31 με $D_{50}=0.31$ mm.

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 μεγάλο ανάπτυγμα, η δομή και οι ιδιότητες της επιφάνειας των σωματιδίων πυριτίας παίζουν έναν ουσιαστικό ρόλο σε όλες τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υγρόλυματος και της γέλης. Κατ' επέκταση, οι επιφανειακές ιδιότητες είναι σημαντικές και για τη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους. Η χημική αντίδραση σχηματισμού των δεσμών ονομάζεται συμπύκνωση (condensation). Δύο ομάδες σιλανόλης Si-OH στην επιφάνεια δύο σωματιδίων συνδέονται και σχηματίζουν έναν δεσμό σιλοξάνης Si – O – Si και ένα μόριο νερού

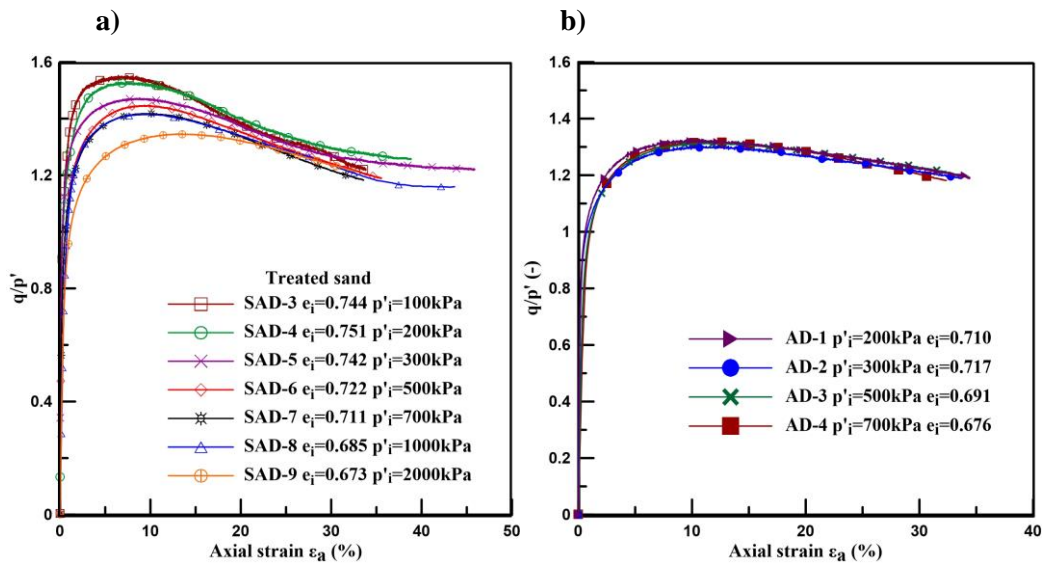
H₂O. Η αντίδραση της συμπύκνωσης, όπως αποκαλύπτει ο ίδιος ο όρος, οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή και εκτοπισμό νερού.

Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση πυριτίας και αλάτων, τόσο πιο ταχύς είναι ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοξάνης. Ο ρόλος του pH είναι περισσότερο σύνθετος και η επίδραση του δεν είναι μονότονη. Σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τιμές pH οι ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, οι οποίες συμπεριφέρονται ως ασθενή οξέα, προσλαμβάνουν ή αποβάλλουν πρωτόνια, αντίστοιχα. Η πρόσληψη πρωτονίων H⁺ φορτίζει την επιφάνεια θετικά, ενώ η αποβολή τους την φορτίζει αρνητικά. Σε ενδιάμεσες τιμές pH (5 < pH < 7) αναμένεται, επομένως, ο χρόνος γέλης να είναι ελάχιστος.

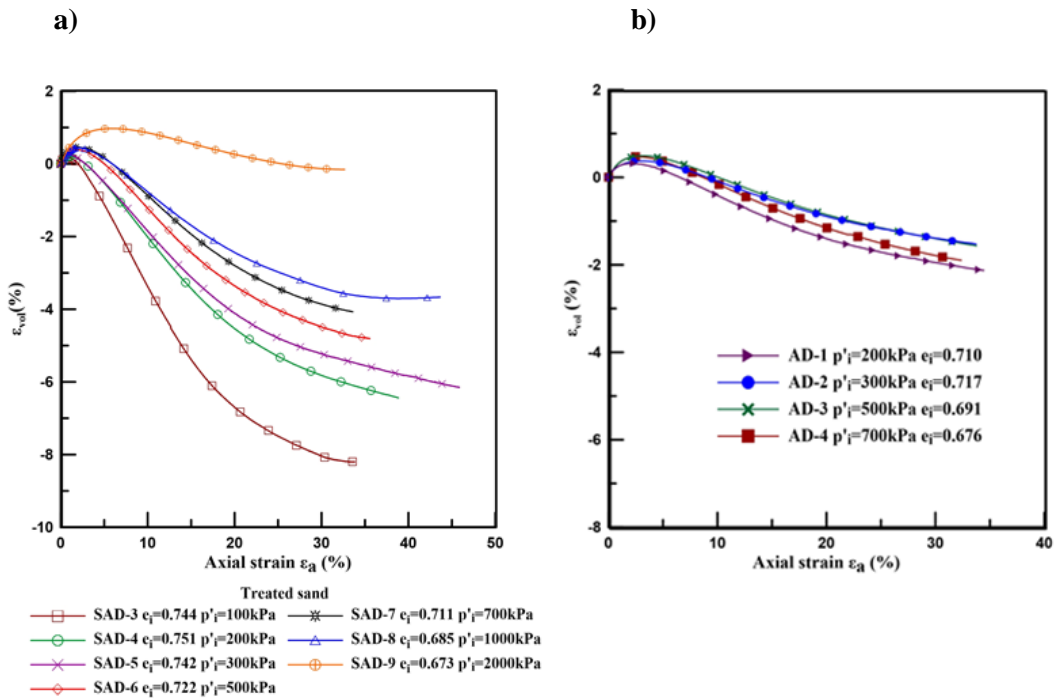
Το παχύρευστο υγρόλυμα μετατρέπεται σταδιακά σε μία ελαστική γέλη. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό πυριτικό σκελετό και την παγιδευμένη υδάτινη φάση. Στα πρώτα στάδια της διαδικασίας μετατροπής, το υγρόλυμα συμπεριφέρεται ως νευτώνειο υγρό. Καθώς τα συμπλέγματα πυριτικών αλυσίδων μεγαλώνουν, ορισμένα σπάνε από την επιβαλλόμενη διατμητική τάση. Η ελαστική γέλη μπορεί να επιστρέψει στη μορφή του παχύρευστου υγρού αν ο στερεός σκελετός τραυματιστεί εκτεταμένα. 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 μεταπτυχιακής εργασίας, μία σειρά από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη άμμο M31. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρής άμμου σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας (CS=10%). Τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του άτονου εδαφικού σκελετού. Στη συνέχεια τα σταθεροποιημένα δοκίμια κορέστηκαν με μεγάλες αρχικές τιμές αντιπίεσης (300-700 kPa). Οι υψηλές τιμές αντιπίεσης είναι απαραίτητες για να εξεταστεί η πιθανή βλάβη των δεσμών της κολλοειδούς πυριτίας λόγω της επιβολής αντιπίεσης στις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης, αλλά και για να αποφευχθεί η σπηλαίωση (cavitation) των δοκιμίων στις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν να είναι ανεξάρτητα από την τιμή της επιβαλλόμενης αντιπίεσης.

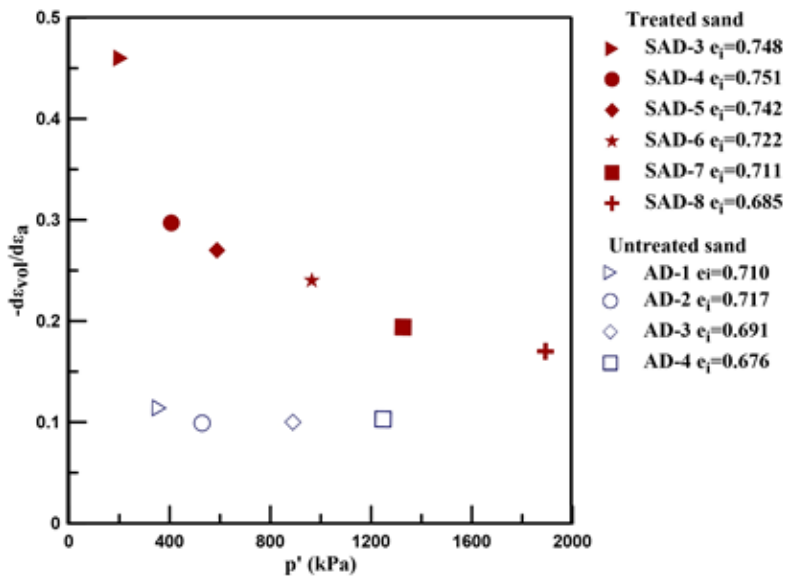
Όλα τα δοκίμια κορέστηκαν με τιμές της παραμέτρου του Skempton $B > 0.97$. Στη συνέχεια τα σταθεροποιημένα δοκίμια στερεοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή, με αργούς ρυθμούς, σε ένα μεγάλο εύρος πλευρικών πιέσεων (100-2000 kPa), ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης στους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Κατά τη διαδικασία αυτή τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου αναπτύσσουν τις ίδιες ογκομετρικές παραμορφώσεις με τα δοκίμια άμμου. Η τριαξονική θλίψη υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκε με επιβολή ρυθμού παραμόρφωσης 0.025 mm / min. Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια σε όρους λόγου τάσεων q/p' σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια, ο μέγιστος λόγος τάσεων εξαρτάται από την αρχική ενεργό τάση, αφού μειώνεται με την αύξηση της. Στο ίδιο εύρος τάσεων, η άμμος αναπτύσσει μια μικρότερη, σταθερή τιμή του λόγου τάσεων $q/p' = 1.31$. Η ογκομετρική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων και φυσικών δοκιμών άμμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια, στερεοποιημένα σε αρχικές ενεργές τάσεις $p'_i < 1000$ kPa, αρχικά συστέλλονται, ελαφρώς λιγότερο από την άμμο και στη συνέχεια διαστέλλονται με πολύ υψηλούς ρυθμούς διαστολής στη μέγιστη αντοχή, καταλήγοντας στο τελικό στάδιο να έχουν αναπτύξει ογκομετρική παραμόρφωση δύο με τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή των δοκιμών άμμου. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο με αρχική ενεργό τάση $p'_i = 2000$ kPa συστέλλεται για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, στη συνέχεια διαστέλλεται ελαφρώς και τελικά σταθεροποιείται σε μία ογκομετρική παραμόρφωση. Η μέγιστη διαστολικότητα σε σχέση με την τρέχουσα ενεργό τάση για τις στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Για ένα μεγάλο εύρος τάσεων η διαστολικότητα των σταθεροποιημένων δοκιμών παραμένει μεγαλύτερη από αυτή των φυσικών δοκιμών άμμου, αλλά μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης, πλησιάζοντας τη σταθερή τιμή που παρατηρείται στα δοκίμια άμμου.



Σχήμα 1. Καμπύλες λόγου τάσεων q/p' -αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης σε (α) σταθεροποιημένα και (β) φυσικά δοκίμια άμμου M31. Επίδραση της ενεργού τάσης.



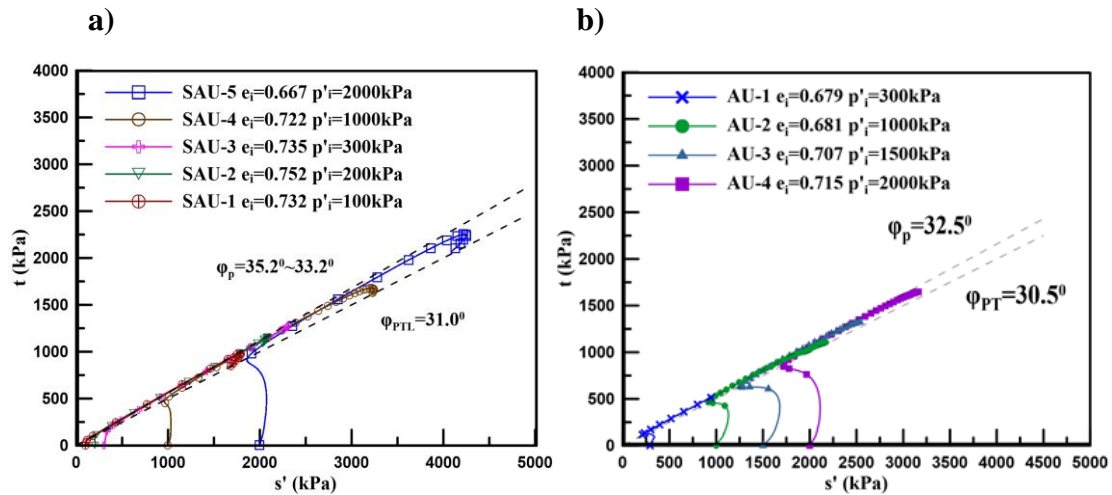
Σχήμα 2. Καμπύλες ογκομετρικής- αξονικής παραμόρφωση από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης σε (α) σταθεροποιημένα και (β) φυσικά δοκίμια άμμου M31. Επίδραση της ενεργού τάσης.



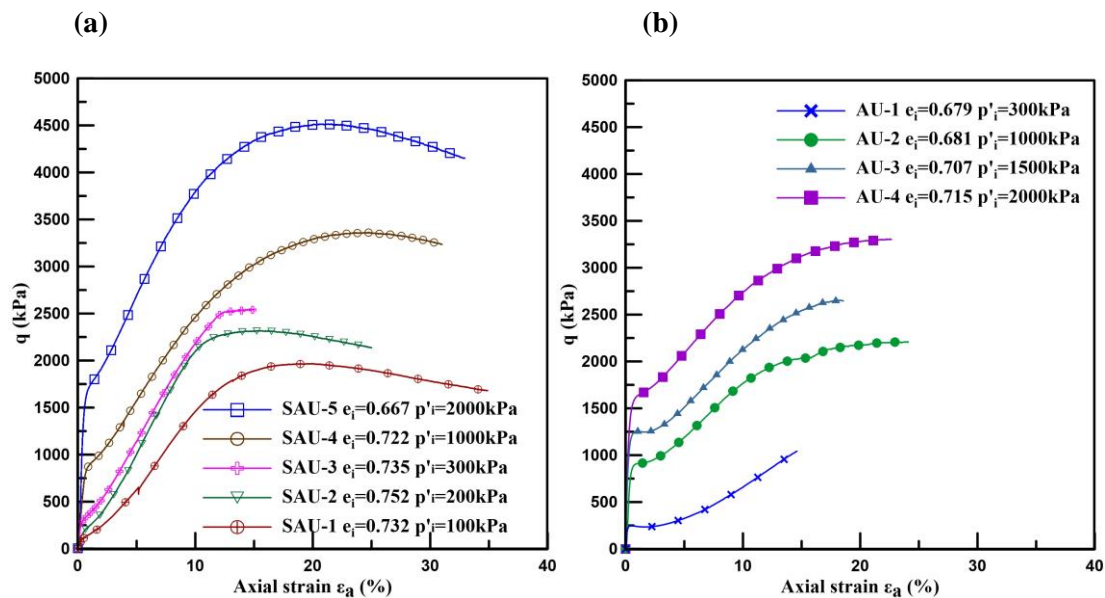
Σχήμα 3. Μέγιστη διαστολικότητα σε σχέση με την τρέχουσα ενεργό τάση για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31.

Η επόμενη σειρά των εργαστηριακών δοκιμών ήταν οι μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε φυσική και σταθεροποιημένη ($CS=10\%$) άμμο M31, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Οι διαδρομές τάσεων ($t-s'$) αυτών των δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Η σταθεροποιημένη άμμος (M31) εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή από τη φυσική άμμο. Η περιβάλλουσα αστοχίας και η γραμμή της αλλαγής κατάστασης (PTL) παραθέτονται στο Σχήμα 4. Η γωνία διατμητικής αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμών είναι υψηλότερη από αυτή των δοκιμών άμμου και είναι εξαρτημένη από την ενεργό τάση, καθώς μειώνεται με την αύξηση της. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια αναπτύσσουν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις (Σχήμα 5) και πιο έντονη τάση για διαστολή. Οι αντίστοιχες καμπύλες υπερπίεσης υγρού των πόρων- αξονικής παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν αρχικά μια συστολική συμπεριφορά αναπτύσσοντας μόνο 10% μικρότερες υπερπίεσεις πόρων από την άμμο, υποδεικνύοντας ότι ο σκελετός της άμμου ελέγχει την ανάπτυξή τους. Ωστόσο, τα σταθεροποιημένα δοκίμια μετά την αλλαγή κατάστασης παρουσιάζουν μια πολύ έντονη τάση για διαστολή. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια με αρχική ενεργό τάση $p'_i=100, 200$ και 300 kPa αναπτύσσουν πολύ υψηλές αρνητικές υπερπίεσεις ($\Delta u=-700$

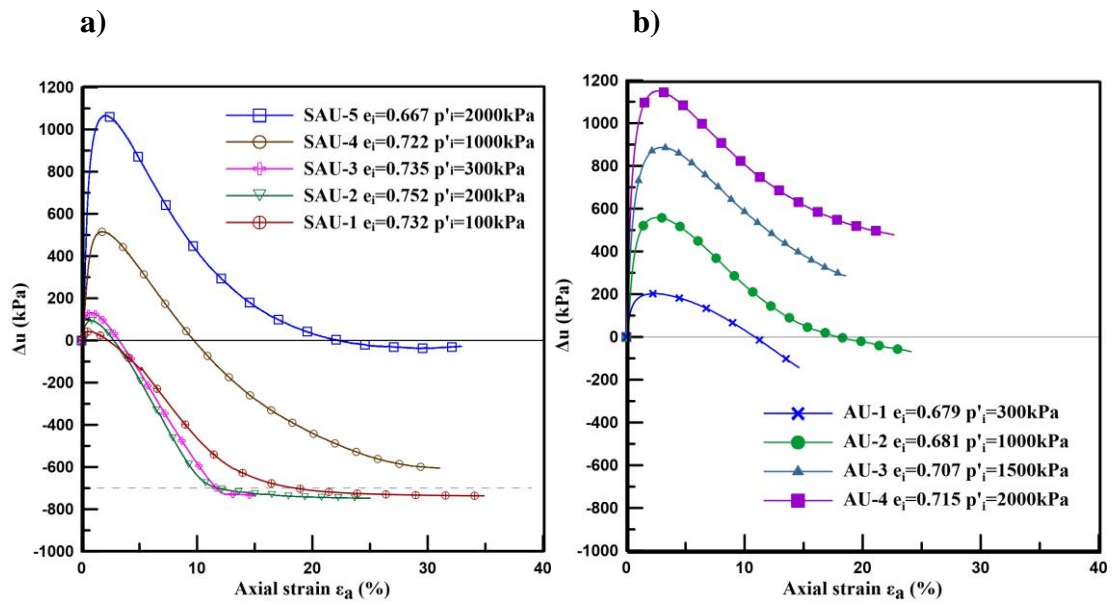
kPa) και υφίστανται σπηλαίωση. Οι υπερπίεσεις του υγρού των πόρων για τα σταθεροποιημένα δοκίμια με $p'_i=1000$ και 2000 kPa σταθεροποιούνται σε μεγάλες παραμορφώσεις υποδεικνύοντας συμπεριφορά κρίσιμης κατάστασης



Σχήμα 4. Διαδρομές ενεργών τάσεων για τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης σε (α) σταθεροποιημένα και (β) φυσικά δοκίμια άμμου M31.



Σχήμα 5. Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης για τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης σε (α) σταθεροποιημένα και (β) φυσικά δοκίμια άμμου M31.



Σχήμα 6. Καμπύλες υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης σε (α) σταθεροποιημένα και (β) φυσικά δοκίμια άμμου M31.

Extended Summary and Conclusions

In this project the effect of passive stabilisation of non-cohesive soils on their subsequent behavior is examined in the laboratory using as stabilizing substance a colloidal silica sol. In the field stabilisation takes place by slowly injecting the stabilising colloidal substance, underneath existing structures. The colloidal silica (CS) sol is delivered through the liquefiable soil mass using the natural or enhanced groundwater flow. This is an alternative method for non-invasive and non-disruptive mitigation of liquefaction risk, at developed sites susceptible to liquefaction. In this thesis monotonic triaxial compression tests were performed under drained and undrained loading conditions to investigate the effect of colloidal silica on non-cohesive soils' behavior. The main goals of the project are: i) to comprehend the physicochemical processes involved in the formation of the colloidal silica aquasol and gel; ii) to understand how these processes affect the transportation mechanisms of the colloids inside the soil pores; iii) and mostly, understand how the mechanical properties of the stabilised soil are affected. The stabilised soil was a medium fine sand having $D_{50} = 0.31$ mm the M31 sand.

The colloidal silica used in this project, comes under the commercial Ludox® SM brand, and is a water dispersion (aquasol) 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 tremendous spread, the structure and the properties of the surface of the silica particles play a significant role to all physicochemical properties of the sol and the gel. Hence the surface properties are also important for the mechanical behavior of the stabilised soil. The chemical reaction of bond formation is called condensation. 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 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. At very low

and very high pH values the silanol groups at the particles' surface, which actually act as weak acids, protonate and deprotonate, respectively. The gain of protons H^+ charges the surface positively while their loss charges it negatively. So at intermediate values of pH ($5 < pH < 7$) 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. At the early stages of this process the sol inhibits Newtonian viscosity. As the silica clusters grow larger, some of them break under the shear stress. The elastic gel can return to a viscous liquid form, if the solid skeleton is extensively injured. 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 monotonic triaxial compression tests were conducted on natural and stabilised M31 sand. The stabilised specimens were produced by pluviation of dry soil sand into molds filled with silica sol (CS= 10%). The molds were sealed and the gel was formed into the pores of unstressed soil skeleton. The stabilised specimens were then saturated with high initial values of back pressure (300-700kPa); these are required to check potential damage to the gel due to increasing values of back pressure in drained tests and to prevent cavitation in their undrained counterparts. The results were shown to be independent of the values of back pressure adopted. All specimens are saturated with B values greater than 0.97. The stabilised specimens were then consolidated at slow rates, within a wide range of confining pressures (100-2000 kPa), to investigate the effect of confinement on the bonds of the gel in the triaxial apparatus. In the process the stabilised soil developed the same volumetric strains as the natural sand. Triaxial compression tests were performed under strain control, at a rate of 0.025 mm / min during drained and undrained loading. The results of drained triaxial tests in terms stress ratio, q/p' , against axial strain for a range of confining stresses, are shown in Figure 1 for treated and untreated sand. For treated specimens the peak stress ratio appears to be stress level dependent, decreasing with increasing stress level. Within the same stress range, the untreated sand exhibits a common lower value of $q/p'=1.31$. The volumetric behavior of the treated and untreated specimens is shown in Figure 2. The treated

specimens at $p'_i < 1000$ kPa, initially contract, slightly less than sand and subsequently dilate under very high dilatancy rates at peak strength, dilating at ultimate strength two to four times more the sand specimens. The treated specimen at $p'_i = 2000$ kPa contracts for a longer period and then slightly dilates until a constant volumetric strain is established. The peak dilatancy ratio is plotted against the mean effective stress for the drained triaxial tests in Figure 3. For a wide stress range, the ratio remains higher for treated sand, but decreases with stress level towards the nearly constant value observed for the untreated sand.

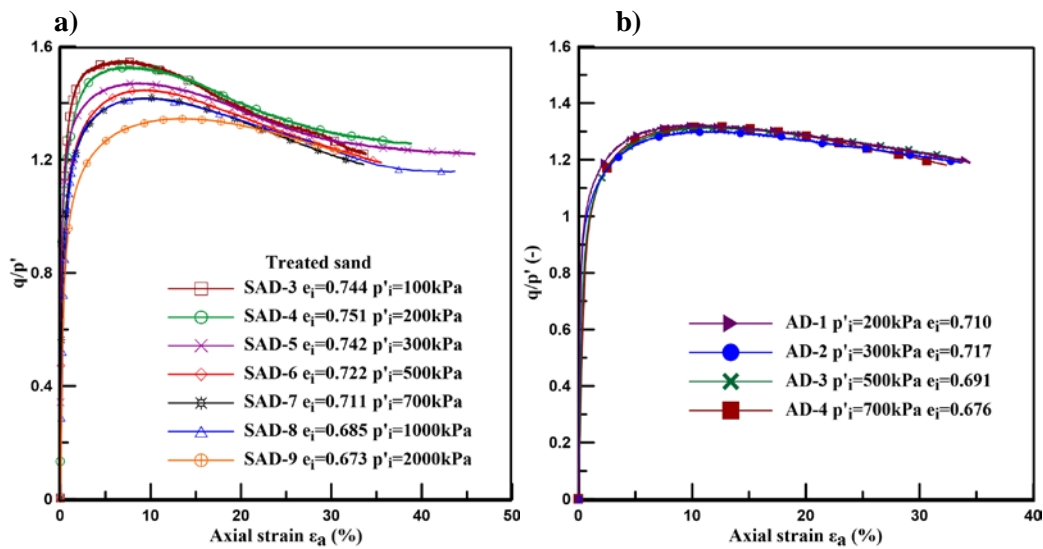


Figure 1. Stress ratio q/p' against axial strain curves for drained triaxial tests on (a) treated and (b) untreated M31 sands. Effect of confinement.

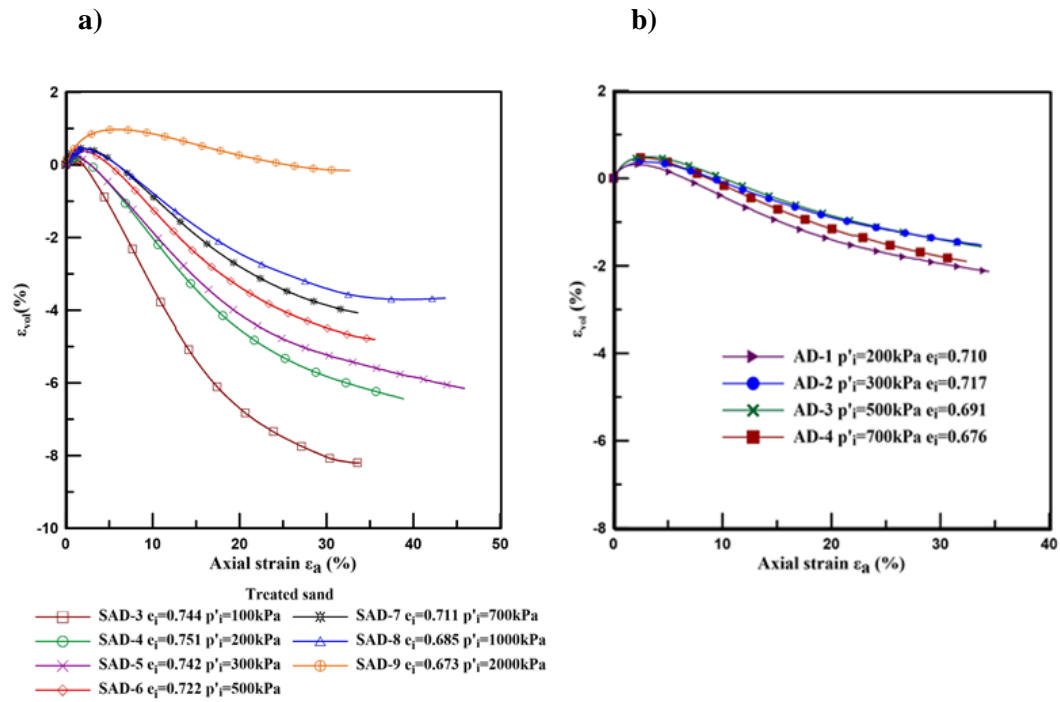


Figure 2. Volumetric strain against axial strain curves for drained triaxial tests on (a) treated and (b) untreated M31 sand. Effect of confinement.

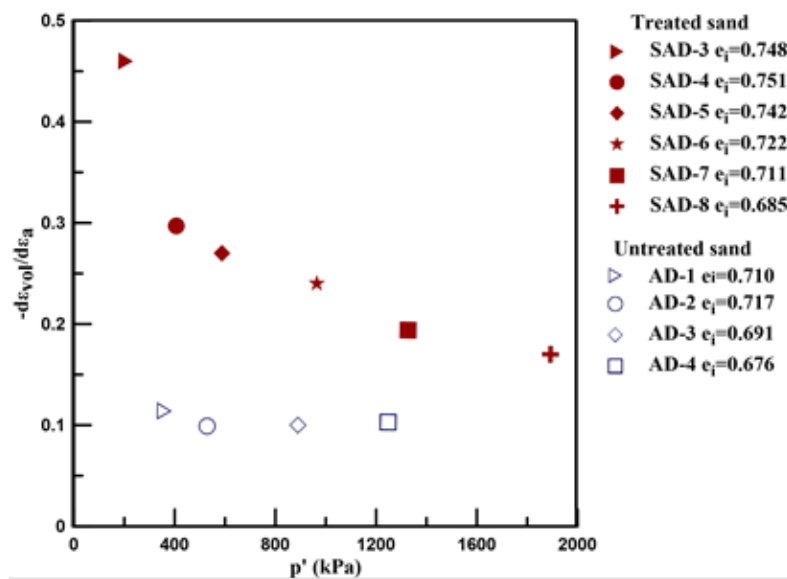


Figure 3. Peak dilatancy ratio against mean effective stress level for treated and untreated M31 sand.

The next series of tests on natural and stabilised (CS=% w.t.) M31 sand were monotonic triaxial compression tests, under undrained loading conditions. The stress paths (t - s') of these tests are shown in Figure 4. The stabilised sand (M31) showed an increase in strength compared to the strength of the natural sand. The failure envelope and the phase transformation lines have also been plotted in Figure 4. The mobilized angle of shearing resistance is higher for the treated specimens and is also stress dependent; decreasing e_i with increasing stress level. The response of treated sand samples indicated clearly larger shear stresses (Figure 5) and more pronounced tendency for dilation. The corresponding excess pore-water pressure against axial strain curves are shown in Figure 6. The treated specimens show an initial contractive phase, with only 10% lower excess pore pressures at phase transformation compared to untreated sand, indicating that the sand skeleton controls their development. However, the treated specimens show extremely high dilative tendencies after phase transformation. The treated specimens at $p'_i=100, 200$ and 300 kPa develop very high negative excess pore water pressure ($\Delta u=-700$ kPa) and cavitation occurs. The excess pore water pressure values for the treated specimens at $p'_i=1000$ and 2000 kPa remain constant at large strains indicating critical state behaviour.

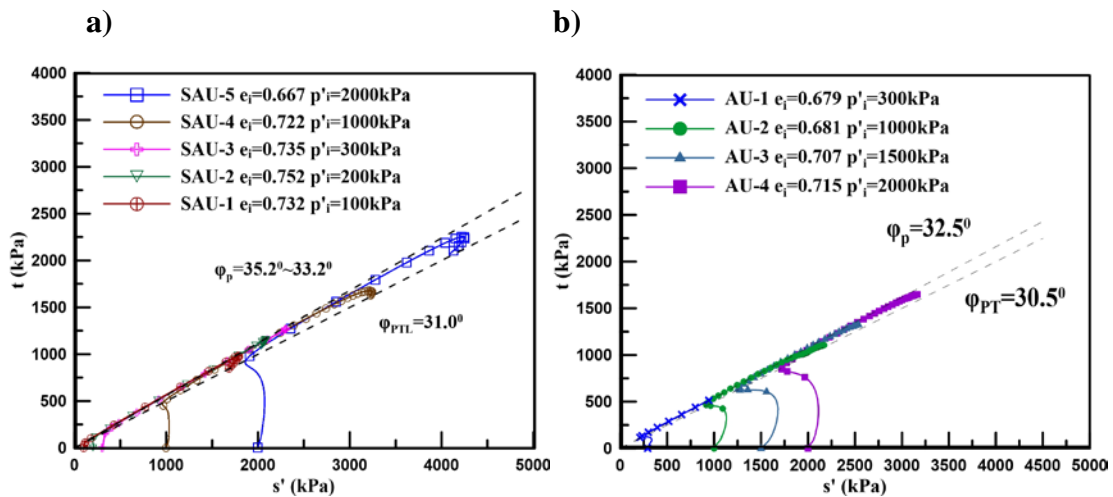


Figure 4. Effective stress paths for undrained triaxial tests on (a) treated and (b) untreated M31 sand.

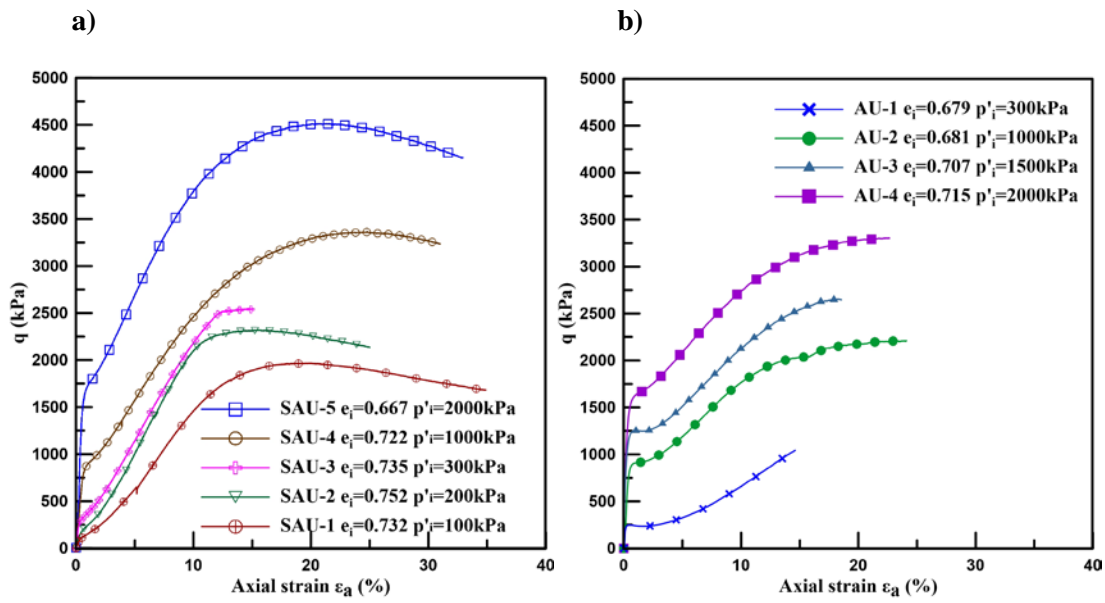


Figure 5. Deviatoric stress- against axial strain curves for undrained triaxial tests on (a) treated and (b) untreated M31 sand

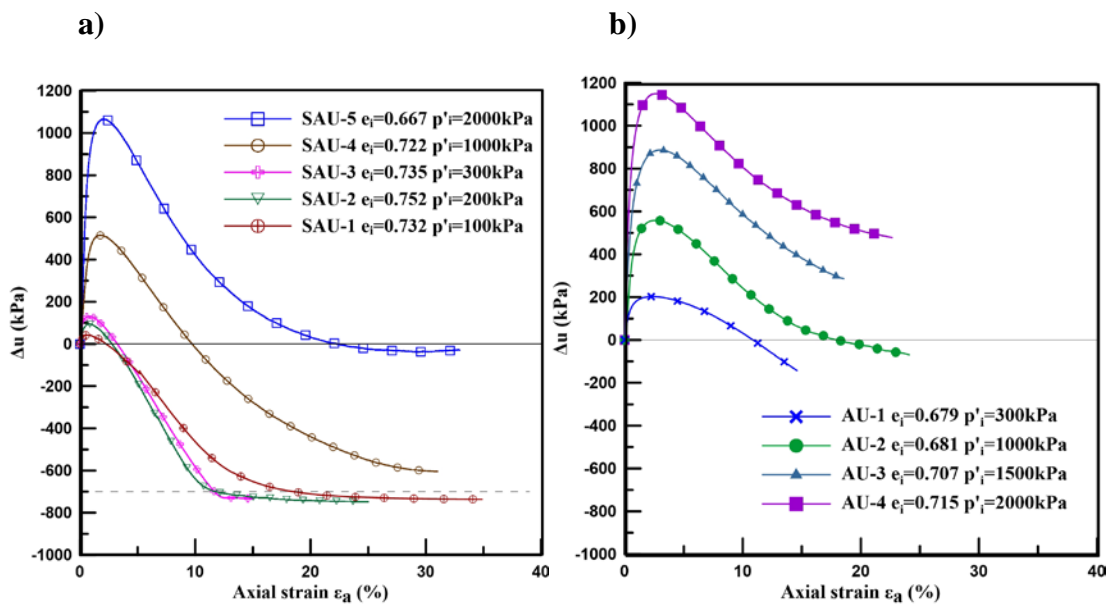


Figure 6. Excess pore water pressure- against axial strain curves for undrained triaxial tests on (a) treated and (b) untreated M31 sand.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2. 1. Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας	12
Σχήμα 2. 2. Σταθεροποίηση του υγρολύματος με χρήση του αλκαλικού παράγοντα	12
Σχήμα 3. 1 Μέθοδος παθητικής σταθεροποίησης (Gallagher and Mitchell, 2002)	22
Σχήμα 3. 2 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές α) άμμος, β) σταθεροποιημένη άμμος (Gallagher and Mitchell, 2002).....	23
Σχήμα 3. 3 Ανακυκλική διατμητική αντοχή σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=40\%$ (Rodriguez et al.,2008).	25
Σχήμα 3. 4 Ανακυκλική διατμητική αντοχή σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=60\%$ (Rodriguez et al.,2008).	25
Σχήμα 3. 5 Ρυθμός υπερπίεσης των πόρων σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή, $D_r=40\%$ και $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa (Rodriguez et al., 2008).	26
Σχήμα 3. 6 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για α) άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $CS=4\%$ (Kodaka et al., 2005).	27

Σχήμα 3. 7 Διάγραμμα διαδρομών τάσεων για μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για α) άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με CS=4% (Kodaka et al., 2005).	28
Σχήμα 3. 8 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για α) καθαρή άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με CS=4% (Kodaka et al 2005).....	28
Σχήμα 3. 9 Δοκιμές προσδιορισμού ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια (Porcino et al., 2011).	30
Σχήμα 3. 10 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης σε (α) δοκίμια άμμου (b) σταθεροποιημένα δοκίμια.....	31
Σχήμα 3. 11 Αστραγγιστη τριαξονική ανακυκλική δοκιμή σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (αριστερά) και σε φυσικό δοκίμιο άμμου (δεξιά). (Porcino et al., 2011).	33
Σχήμα 3. 12 Διαγραμματική απεικόνιση του λόγου υπερπιέσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου σε τριαξονική φόρτιση και σε απλή διάτμηση (Porcino et al.,2011).....	34
Σχήμα 3. 13 Μηχανική συμπεριφορά (α) σταθεροποιημένων και (b) φυσικών δοκιμίων άμμου σε τριαξονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al.,2012).	35
Σχήμα 3. 14 Διάγραμμα μέγιστου λόγου τάσεων-μέσης ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμο (Porcino et al.,2012).....	36
Σχήμα 3. 15 Περιβάλλουσα αστοχίας στη μέγιστη διατμητική αντοχή σε διάγραμμα q-p' για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al., 2012).....	37
Σχήμα 3. 16 Περιβάλλουσα αστοχίας στη στην κρίσιμη κατάσταση σε διάγραμμα q-p' για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al., 2012).	37

Σχήμα 3. 17 Συσχέτιση λόγου τάσεων-διαστολικότητας για (a) σταθεροποιημένο δοκίμιο με χαμηλή τάση στερεοποίησης (b) σταθεροποιημένο δοκίμιο με υψηλή τάση στερεοποίησης και (c) φυσικό δοκίμιο με υψηλή τάση στερεοποίησης (Porcino et al., 2012).	39
Σχήμα 3. 18 Συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων και διαδρομές ενεργών τάσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε (a) χαλαρό φυσικό, (b) χαλαρό σταθεροποιημένο και (c) πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου (Porcino et al., 2012).	40
Σχήμα 3. 19 Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου TS (Porcino et al.,2012).....	41
Σχήμα 3. 20 Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου TS με διάφορες αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις (Porcino et al.,2012).	42
Σχήμα 4. 1 Εικόνα κόκκων χαλαζιακής άμμου M31 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	46
Σχήμα 4. 2 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31.....	47
Σχήμα 4. 3 Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.	48
Σχήμα 4. 4 Φωτογραφία υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.	49
Σχήμα 4. 5 Φωτογραφία ξηραμένου δείγματος σταθεροποιημένης άμμου από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.....	49
Σχήμα 4. 6 Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ.....	55

Σχήμα 4. 7 Τριαξονική συσκευή του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ.....	55
Σχήμα 4. 8 Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs).....	56
Σχήμα 4. 9 Φωτογραφία σταθεροποιημένου δοκιμίου πριν την τοποθέτησή του στην τριαξονική συσκευή.	56
Σχήμα 4. 10 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης $e-p'$ άμμου M31	58
Σχήμα 4. 11 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.	59
Σχήμα 4. 12 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης.	59
Σχήμα 4. 13 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Καμπύλες λόγου τάσεων- παραμορφώσεων.....	60
Σχήμα 4. 14 Αστοχία δοκιμίου που εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (bulging).....	60
Σχήμα 4. 15 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επίδραση της τιμής αντιπίεσης. Καμπύλες λόγου τάσης- παραμόρφωσης.	63
Σχήμα 4. 16 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επίδραση της τιμής αντιπίεσης. Καμπύλες ογκομετρικής- αξονικής παραμόρφωσης.	64
Σχήμα 4. 17 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επίδραση της τιμής αντιπίεσης. Καμπύλες λόγου τάσης- αξονικής παραμόρφωσης.	64
Σχήμα 4. 18 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης $e-p'$ για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου. Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου.....	67

Σχήμα 4. 19 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης $\varepsilon_{vol-p'}$ για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου. Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου.....	67
Σχήμα 4. 20 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες τάσης-αξονικής παραμόρφωσης.....	69
Σχήμα 4. 21 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης.....	70
Σχήμα 4. 22 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες λόγου τάσεων-αξονικής παραμόρφωσης.....	70
Σχήμα 4. 23 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa.	72
Σχήμα 4. 24 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa.	73
Σχήμα 4. 25 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa.	73
Σχήμα 4. 26 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=300$ kPa.	74
Σχήμα 4. 27 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=300$ kPa.	74
Σχήμα 4. 28 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=300$ kPa.	75
Σχήμα 4. 29 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=500$ kPa.	75

Σχήμα 4. 30 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=500$ kPa.	76
Σχήμα 4. 31 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=500$ kPa.	76
Σχήμα 4. 32 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa.	77
Σχήμα 4. 33 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa	77
Σχήμα 4. 34 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa.	78
Σχήμα 4. 35 Καμπύλες λόγου τάσεων-διαστολικότητας για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31 με αρχική ενεργό τάση (a) $p'_i=200$ kPa ; (b) $p'_i=700$ kPa.	80
Σχήμα 4. 36 Σχέση μέγιστου ρυθμού διαστολικότητας- ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31.	80
Σχήμα 4. 37 Σχέση μέγιστος λόγος τάσεων- ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31.	81
Σχήμα 4. 38 Περιβάλλουσες αστοχίας για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31, από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης.....	81
Σχήμα 4. 39 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες τάσεων αξονικών παραμορφώσεων.	84
Σχήμα 4. 40 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες υπερπίεσης υγρού των πόρων- αξονικών παραμορφώσεων.	84

Σχήμα 4. 41 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q-p'.	85
Σχήμα 4. 42 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο t-s'.	85
Σχήμα 4. 43 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων.	89
Σχήμα 4. 44 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες υπερπίεσης υγρού των πόρων- αξονικών παραμορφώσεων.	89
Σχήμα 4. 45 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q-p'.	90
Σχήμα 4. 46 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο t-s'.	90
Σχήμα 4.47 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια σε όρους (a) e-p'; (b) ϵ_{vol} -p'.	92
Σχήμα 4. 48 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=300$ kPa:	93
Σχήμα 4. 49 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=1000$ kPa:	94
Σχήμα 4. 50 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=2000$ kPa:	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4. 1 Χαρακτηριστικά κοσκίνων	46
Πίνακας 4. 2 Χαρακτηριστικά της άμμου M31	47
Πίνακας 4. 3 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης άμμου M31	57
Πίνακας 4. 4 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης σταθεροποιημένης άμμου M31.....	61
Πίνακας 4. 5 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης άμμου M31.....	82
Πίνακας 4. 6 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης σταθεροποιημένης άμμου M31.....	86

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	xv
Κατάλογος Πινάκων	xxii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ.....	9
2.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ	9
2.1.1. Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών.....	9
2.1.2 Η ορολογία των χημικών όρων.....	10
2.1.3 Το υγρόλυμα (aquasol) κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM	10
2.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΥΓΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΛΩΝ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	13
2.2.1 Γελοποίηση (Gelation).....	15
2.2.2 Ωρίμανση (Aging).....	15
2.2.3 Ξήρανση (Drying).....	16
2.2.4 Μηχανισμός αυτό-ίασης του σταθεροποιημένου εδάφους (self-healing mechanism).....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	20
3.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ	20
3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	21
3.2.1 Εργαστηριακές μελέτες.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΜΜΟΥ.....	43

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
4.2 ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	44
4.2.1. Η άμμος M31	44
4.3. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ	48
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	50
4.3.1 Τριαξονική Δοκιμή Θλίψης	50
4.3.2 Τριαξονικές συσκευές του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής	51
4.3.3 Προετοιμασία και διαμόρφωση δοκιμών.....	51
4.3.4 Πειραματική διαδικασία.....	52
4.4 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ M31	57
4.5 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΑΜΜΟ M31	61
4.5.1. Εισαγωγή.....	61
4.5.2. Επίδραση του κορεσμού	62
4.5.3 Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης	65
4.5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31	68
4.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ M31 ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	71
4.7 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ M31	82

4.7.1 Εισαγωγή.....	82
4.8 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΑΜΜΟ Μ31	86
4.8.1. Εισαγωγή.....	86
4.8.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης στη σταθεροποιημένη άμμο Μ31	87
4.9 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ Μ31 ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστοχία του εδάφους λόγω ρευστοποίησης μπορεί να προκαλέσει μεγάλες παραμορφώσεις και καθιζήσεις, που οδηγούν σε αχρήστευση της θεμελίωσης και κατ' επέκταση στην καταστροφή των κατασκευών. Πιο ευαίσθητα σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης είναι τα μη συνεκτικά εδάφη όπως οι χαλαρές άμμοι. Γι' αυτό το λόγο είναι κρίσιμη η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των μη συνεκτικών εδαφών.

Η βελτίωση των μη συνεκτικών εδαφών γίνεται με ένα πλήθος μεθόδων και τεχνικών. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η συμπύκνωση (densification) των χαλαρών, κορεσμένων, μη συνεκτικών εδαφικών αποθέσεων. Η συμπύκνωση μπορεί να γίνει με επαναλαμβανόμενη πτώση βαρών από μεγάλο ύψος (deep dynamic compaction), με πρόκληση τεχνητών εκρήξεων μέσα στο έδαφος (explosive compaction) ή με πρόκληση δονήσεων μέσα σε γεωτρήσεις (vibrocompaction). Η βελτίωση του εδάφους κάτω από υφιστάμενα κτήρια ή υποδομές ευαίσθητες σε δονήσεις και καθιζήσεις γίνεται παραδοσιακά με τη διείδυση μικρό - πασσάλων (micro - piles) στο έδαφος θεμελίωσης ή με την εισπίεση ενέματος υπό χαμηλή ή υψηλή πίεση (permeation or jet grouting).

Η παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization) είναι μία εναλλακτική μεθοδολογία βελτίωσης των ρευστοποιησίμων εδαφών. Το πλεονέκτημα της έναντι των άλλων μεθόδων είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη κάτω από υφιστάμενες υποδομές, χωρίς να προκαλέσει διατάραξη του εδάφους ή να παρεμποδίσει τη φυσιολογική λειτουργία των υποδομών. Επίσης, δεν απαιτείται πρόσβαση κάτω από εκτεταμένες θεμελιώσεις. Η επιλογή μιας παραδοσιακής μεθόδου βελτίωσης μη συνεκτικών εδαφών θα ήταν ακριβή και μη πρακτική λύση λόγω της δύσκολης πρόσβασης στο έδαφος θεμελίωσης. Η παθητική σταθεροποίηση βασίζεται στη γενική ιδέα της αργής εισπίεσης του σταθεροποιητικού παράγοντα (π.χ. υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας) μέσα στο έδαφος. Το ένεμα δένει τους κόκκους του εδάφους ενισχύοντας τη διατμητική του αντοχή. Οι δύο κύριοι τύποι ενέματος είναι το ένεμα με τσιμέντο (cement-based suspension) και το ένεμα με κυρίαρχο συστατικό κάποιο χημικό διάλυμα (chemical solution). Τα ενέματα με χημικό διάλυμα είναι ομογενή μίγματα που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά.

Ο σταθεροποιητικός παράγοντας μεταφέρεται με τη φυσική υπόγεια ροή νερού στην επιθυμητή τοποθεσία. Αν δεν υφίσταται φυσική ροή ή είναι ασθενής, τότε η ροή ενισχύεται με τεχνητά πηγάδια παροχής και άντλησης, τα οποία εξασφαλίζουν χαμηλή υδραυλική κλίση. Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας έχει χαμηλό ιξώδες στην αρχή της εισπίεσης, γεγονός που βοηθά ιδιαίτερα τη διοχέτευση. Ρυθμίζοντας τους κατάλληλους παράγοντες, όπως το pH και η περιεκτικότητα σε αλάτι, το υγρόλυμα υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη. Η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευσή της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα ανθεκτική στον χρόνο και στους φυσικοχημικούς παράγοντες. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η γέλη πυριτίας που διατηρείται κορεσμένη αναμένεται να παραμείνει υγιής για 25 έτη στο πεδίο. Αναφέρει, επίσης, ότι αποτελεί μία λύση οικονομικά ελκυστική με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των παραδοσιακών μεθόδων βελτίωσης.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά, προσπαθήσαμε να κατανοήσουμε τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υγρολύματος και της γέλης κολλοειδούς πυριτίας. Στη συνέχεια εξετάσαμε την επίδραση αυτών των ιδιοτήτων στη μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών. Η μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου διερευνήθηκε με την εκτέλεση μονοτονικών τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες. Στη συνέχεια αναλύεται η δομή της παρούσας διπλωματικής.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων, του υγρολύματος και της γέλης κολλοειδούς πυριτίας. Παρουσιάζονται η δομή και οι ιδιότητες της επιφάνειας των κολλοειδών σωματιδίων, οι οποίες είναι καθοριστικές για όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες. Επιπλέον, αναλύεται η χημική αντίδραση της συμπύκνωσης (condensation reaction) που οδηγεί στην ένωση των κολλοειδών σωματιδίων με δεσμούς σιλοξάνης. Ο σχηματισμός τέτοιων δεσμών μετατρέπει το υγρόλυμα σε γέλη. Κατά το μεταβατικό αυτό στάδιο αναλύονται τα ρεολογικά χαρακτηριστικά και η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υγρολύματος και της γέλης. Έμφαση δίνεται στους παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό της συμπύκνωσης και

επιταχύνουν τον σχηματισμό της γέλης. Εκτός από τη διαδικασία σχηματισμού της γέλης, παρουσιάζονται και τα στάδια της ωρίμανσης αλλά και της ξήρανσής της.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται διερεύνηση της υπάρχουσας σχετικής βιβλιογραφίας, δίνοντας έμφαση στη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά της άμμου M31 και της κολλοειδούς πυριτίας που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές. Επιπρόσθετα, περιγράφονται οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Στη συνέχεια παραθέτονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες δοκιμών.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες με τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που εκτελέστηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων. Τα επιμέρους παραρτήματα Π1 και Π2 αφορούν τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο αντίστοιχα. Τα παραρτήματα Π3 και Π4 αφορούν τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ

2.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης του αντικειμένου της Επιστήμης των Κολλοειδών και της κλίμακας των μεγεθών στην οποία εξελίσσονται τα κολλοειδή φαινόμενα. Παρουσιάζεται και επεξηγείται η χρησιμοποιούμενη ορολογία και γίνονται οι απαραίτητες μεταφράσεις των όρων της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της πυριτίας Ludox-SM που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών. Η ενότητα 2.1 ολοκληρώνεται με τη συνοπτική παρουσίαση του συνόλου των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρολυμάτων και των γελών (sol-gel processing), ενώ στην επόμενη ενότητα 2.2 αναπτύσσονται οι διαδικασίες που σχετίζονται άμεσα με τη σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών με κολλοειδή πυριτία.

2.1.1. Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών

Η κολλοειδής επιστήμη μελετά συστήματα που περιλαμβάνουν κινητικές ομάδες, οι οποίες έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τις ατομικές διαστάσεις ($> 1 \text{ nm}$) και ταυτόχρονα αρκετά μικρό ($< 1 \mu\text{m}$), ώστε να μην επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Επομένως, με αυτές τις διαστάσεις τα κολλοειδή σωματίδια διαφοροποιούνται αισθητά από τα αιωρήματα και από τα πραγματικά διαλύματα. Τα κολλοειδή σωματίδια μπορεί να είναι διακριτά, όπως για παράδειγμα ένα πλήθος σκεδασμένων σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας μέσα στον υδάτινο διασπορέα πριν τη γελοποίηση αλλά και μη διακριτά, όπως ένα συνεχές δίκτυο από διασυνδεδεμένα κολλοειδή σωματίδια πυριτίας μετά τη γελοποίηση.

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των σωματιδίων της κολλοειδούς κατάστασης υποδηλώνουν τεράστιους λόγους επιφάνειας/όγκου ή επιφάνειας/ μάζας. Συγκεκριμένα οι προδιαγραφές του παραγωγού για την πυριτία Ludox-SM είναι $345\text{m}^2/\text{g}$. Συμπεραίνουμε ότι αυτά 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 σχηματιστεί 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.

2.1.2 Η ορολογία των χημικών όρων

Αρχικά θεωρούμε ότι χρειάζεται να αποσαφηνίσουμε τους χημικούς όρους που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία. Μια σταθερή διασπορά στερεών κολλοειδών σωματιδίων σε υγρό διασπορέα ονομάζεται υγρόλυμα (sol). Όταν ο υγρός διασπορέας είναι νερό τότε η διασπορά ονομάζεται “aquasol ή hydrosol”. Ο όρος γέλη (gel) αφορά ένα σύστημα που αποτελείται από ένα συνεχή στερεό σκελετό, ο οποίος συντίθεται από κολλοειδή σωματίδια ή πολυμερή και περιβάλλει μια συνεχή υγρή φάση. Με τον όρο σταθεροποιημένο υγρόλυμα εννοούμε ότι οι απωστικές δυνάμεις αποτρέπουν τη συσσωμάτωση των κολλοειδών σφαιριδίων και τη γελοποίηση, ενώ με τον όρο σταθεροποιημένο έδαφος εννοούμε το έδαφος που έχει στους πόρους του γέλη πυριτίας.

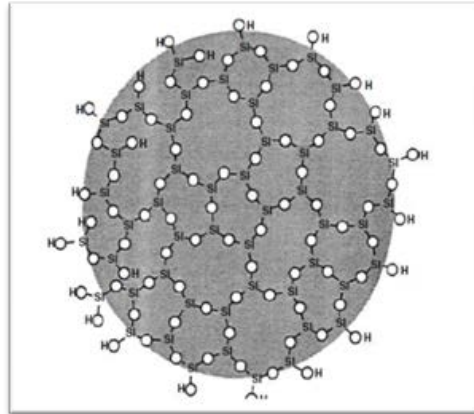
2.1.3 Το υγρόλυμα (aquasol) κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμίων μας έχει την εμπορική ονομασία Ludox-SM και είναι μια υδάτινη διασπορά (aquasol) διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με μέγεθος στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους (7 nm). Τα σωματίδια είναι συμπαγή (μη πορώδη) και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή. Η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων είναι 345 m²/g. Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO₂ 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10 με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na₂O. Το ιξώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP, ενώ του νερού είναι 1 cP σε

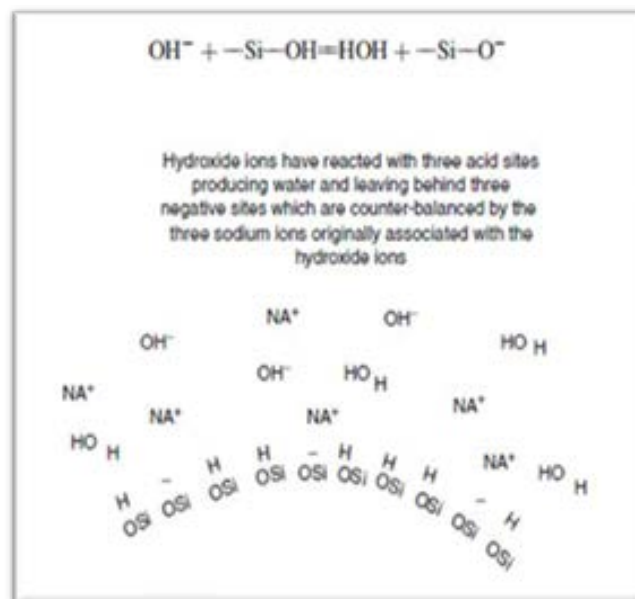
συνήθη θερμοκρασία. Μετά την αραίωση του υγρούματος το ιξώδες του μικραίνει ακόμα περισσότερο.

Το σωματίδιο της κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Το τέταρτο οξυγόνο της βασικής τετραεδρικής μονάδας SiO_4 βρίσκεται εκτός του επιπέδου της σελίδας. Στην άμορφη πυριτία η γωνία του δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si ποικίλει, η απόσταση όμως πυριτίου – οξυγόνου Si-O είναι σταθερή. Η επιφάνεια του σωματιδίου είναι πλήρως υδροξυλιωμένη και εμφανίζει μία αρνητικά φορτισμένη στρώση, όταν αποβάλλει πρωτόνια H^+ σε αλκαλικό περιβάλλον. Επίσης, εμφανίζει μία θετικά φορτισμένη στρώση, όταν προσλαμβάνει πρωτόνια H^+ από ένα έντονα όξινο περιβάλλον. Η αμοιβαία ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των επιφανειακών στρώσεων των σωματιδίων αποτρέπει τη συσσωμάτωση και τη γελοποίηση, δηλαδή σταθεροποιεί το υγρόλυμα. Το σωματίδιο έχει αναπτυχθεί στο μέγεθος των 7 nm ύστερα από διαδοχικό πολυμερισμό και συμπύκνωση (polymerization and condensation) της βασικής τετραεδρικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Τα σωματίδια της κολλοειδούς πυριτίας παρασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ομοιόμορφα και συγκεκριμένου μεγέθους. Αυτό επιτυγχάνεται με ελεγχόμενες διαδικασίες πυρηνοποίησης (nucleation), πολυμερισμού (polymerization) και ανάπτυξης. Όταν φτάσουν στο επιθυμητό μέγεθος το υγρόλυμα σταθεροποιείται με προσθήκη αλκαλικού παράγοντα. Όταν χρειαστεί να γίνει αποσταθεροποίηση του υγρούματος τότε προσθέτουμε οξύ (ρυθμίζοντας το pH) και άλας επιτυγχάνοντας τη γελοποίηση. Η σύνδεση των σωματιδίων κατά τη γελοποίηση (gelation) γίνεται με το σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης και την αποβολή νερού που παραμένει στους πόρους της γέλης. Στο Σχήμα 2.2. παρουσιάζεται Σταθεροποίηση του υγρούματος με χρήση του αλκαλικού παράγοντα NaOH (υδροξείδιο νατρίου). Ο αλκαλικός παράγοντας αντιδρά με ένα ποσοστό από τις ασθενώς όξινες ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, σχηματίζοντας ένα μόριο νερού και αφήνοντας πίσω μία φορτισμένη περιοχή. Το ιόν υδροξυλίου έχει διττό ρόλο. Σε υψηλές τιμές pH βοηθά να εμφανιστούν αρνητικά φορτισμένες περιοχές στην επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων και αποτρέπει τον σχηματισμό γέλης. Σε ενδιάμεσες τιμές pH το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως καταλύτης στην αντίδραση της συμπύκνωσης και προάγει τον σχηματισμό γέλης. Η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δε χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη

διοχέτευσή της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Η διάρκεια της ζωής της πυριτίας ξεπερνά τα 25 έτη και προτείνεται για την καλύτερη διατήρησή της η αποθήκευση σε ξηρό περιβάλλον θερμοκρασίας 20-25 °C.



Σχήμα 2. 1. Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας.



Σχήμα 2. 2. Σταθεροποίηση του υγρολύματος με χρήση του αλκαλικού παράγοντα

2.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΥΓΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΛΩΝ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Από όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών ορισμένες σχετίζονται άμεσα με την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών μέσω διοχέτευσης κολλοειδούς πυριτίας στους εδαφικούς πόρους. Για παράδειγμα, οι παράγοντες που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του υγρολύματος και αποτρέπουν τη γελοποίηση του είναι ιδιαίτερα κρίσιμοι σε θέματα αποθήκευσης μεταφοράς και διαχείρισης της πυριτίας, τόσο στο εργαστήριο, όσο και στο πεδίο. Η ρύθμιση αυτών των παραγόντων μπορεί να οδηγήσει σε ελεγχόμενη χρονικά γελοποίηση καθιστώντας την κολλοειδή πυριτία ένα πολύ ελκυστικό μέσο σταθεροποίησης των εδαφών. Η πυριτία μπορεί να διοχετεύεται στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών υπό χαμηλή υδραυλική κλίση λόγω του χαμηλού αρχικά ιξώδους της. Στη συνέχεια είναι εφικτός ο ταχύς σχηματισμός γέλης όταν έχει προηγηθεί κατάλληλη ρύθμιση του pH και της περιεκτικότητας αλάτων. Η ταχεία αυτή γελοποίηση εξασφαλίζει ότι το υγρόλυμα πυριτίας που έχει αντικαταστήσει το νερό των εδαφικών πόρων δε θα αντικατασταθεί εκ νέου από νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ούτε θα αραιώσει σημαντικά λόγω διάχυσης.

Η κατανόηση των μηχανισμών γελοποίησης, ωρίμανσης και ξήρανσης καθώς και η εμπειρική παρατήρηση στο εργαστήριο μας οδηγεί στο να θέσουμε υπό αμφισβήτηση ορισμένες τοποθετήσεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Για παράδειγμα, αναφέρουμε την τοποθέτηση ότι «τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν εμφανίζουν πίεση πόρων και γι' αυτό δεν την μετράμε στα πειράματα, αφού μέσα στους εδαφικούς πόρους η γέλη έχει μετατραπεί σε στερεό». Χρησιμοποιείται μάλιστα ο λανθασμένος όρος «στερεοποίηση της πυριτίας» ο οποίος συγχέεται με τη διαδικασία της γελοποίησης. Η γέλη είναι ένα διαφασικό υλικό, αφού αποτελείται από ένα συνεχή στερεό σκελετό που περικλείει μια συνεχή υγρή φάση. Ένα σταθεροποιημένο εδαφικό δοκίμιο, με μη ξηραμένη γέλη στους πόρους του, το οποίο υπόκειται σε διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες, αναπτύσσει πίεση στο νερό των πόρων. Μάλιστα, η πίεση αυτή μπορεί να είναι μετρήσιμη υπό προϋποθέσεις. Σε όσα

πειράματα εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, τα δοκίμια ωρίμασαν υπό συνθήκες που επέτρεπαν την ξήρανση της γέλης, δηλαδή υπό αεροστεγείς συνθήκες και με σταθερή υγρασία. Αν η γέλη ξεραθεί, το δοκίμιο συμπεριφέρεται σαν φυσική άμμος, δηλαδή δεν παρουσιάζει συνεκτικότητα και δε διατηρεί τη δομή της χωρίς περίσφιξη.

Σε θεωρητικό επίπεδο η γέλη με πόρους πλήρως κορεσμένους με νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστη αν αποτραπεί η στράγγιση του υγρού από τους πόρους. Η συμπεριφορά είναι ανάλογη με αυτή του πλήρως κορεσμένου εδάφους που φορτίζεται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Οι Brinker και Scherer αναφέρουν ότι σε μια γέλη είναι απαραίτητο να διαχωρίζουμε τις ιδιότητες του στερεού σκελετικού δικτύου, το οποίο αποκαλύπτεται αν απομακρυνθεί η υγρή φάση, από τις ιδιότητες της γέλης που έχει πόρους γεμάτους υγρό. Αν η γέλη υποβληθεί σε υδροστατική πίεση τότε θα προκύψει αμελητέα παραμόρφωση, καθώς η υγρή φάση είναι πρακτικώς ασυμπίεστη και παραλαμβάνει όλο το φορτίο. Ωστόσο, το μέτρο συμπίεσης του σκελετικού δικτύου αν δεν υπήρχε το υγρό θα ήταν ιδιαίτερα μικρό. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η στερεά φάση καταλαμβάνει ένα μικρό κλάσμα από το συνολικό όγκο της γέλης. Η συμπίεστικότητα μιας κορεσμένης γέλης νοείται μόνο αν επιτραπεί η στράγγιση του υγρού των πόρων. Γίνεται σαφές ότι δε μπορούμε να ισχυριστούμε πως ένα σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία έδαφος, σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, αναπτύσσει μικρότερη πίεση πόρων όταν διατέμνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε σχέση με την περίπτωση που το υγρό πόρων είναι καθαρό νερό.

Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση που σχετίζεται με τις φυσικοχημικές διαδικασίες της κολλοειδούς πυριτίας είναι το χρονικό διάστημα ωρίμανσης της γέλης. Στη βιβλιογραφία διατυπώνεται ότι η ωρίμανση της γέλης για παρατεταμένο χρονικό διάστημα οδηγεί σε περισσότερο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή. Με την πάροδο του χρόνου το ιξώδες συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη μετατροπή σε στερεό. Η ωρίμανση πραγματοποιείται κυρίως με την προοδευτική ανάπτυξη περισσότερων αλυσίδων σωματιδίων. Τα ελεύθερα σωματίδια μέσα στο νερό των πόρων της γέλης συγκρούονται, συσσωματώνονται και συνδέονται με το συνεχή στερεό σκελετό. Η διαδικασία εξελίσσεται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά

από το σχηματισμό της γέλης. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στον νερό των πόρων της γέλης που μόλις έχει σχηματιστεί, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να συμβούν συγκρούσεις. Σε συνθήκες εργαστηρίου, τα δοκίμια ωριμάζουν αεροστεγώς κλεισμένα και διατηρούν τη δική τους υγρασία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες αλυσίδες και να πυκνώνει ο στερεός σκελετός της γέλης.

2.2.1 Γελοποίηση (Gelation)

Οι Brinker και Scherer δίνουν τον εξής ορισμό της διαδικασίας μετατροπής ενός υγρού υγρού υγρού σε γέλη: «γελοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία συμπλέγματα δημιουργούνται από τη συμπύκνωση των πολυμερών ή τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέχρι τη στιγμή που τα συμπλέγματα συγκρούονται. Τότε, δεσμοί δημιουργούνται 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. 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 αποτελεί το ορόσημο έναρξης της ελαστικότητας του συνεχούς στερεού σκελετού. Στο σημείο γελοποίησης το ιξώδες αυξάνεται απότομα και η γέλη αρχίζει να αποκρίνεται ελαστικά στην τάση».

2.2.2 Ωρίμανση (Aging)

Οι αντιδράσεις που προκαλούν τη γελοποίηση δε σταματούν στο σημείο γέλης (gel point). Υπάρχει μια σημαντική ποσότητα ολιγομερών που είναι ελεύθερα να διαχυθούν και να συγκρουστούν και επίσης η σκελετική δομή διαθέτει ικανή εσωτερική κινητικότητα, ώστε να προκύψουν περαιτέρω αντιδράσεις συμπύκνωσης. Οι μηχανικές ιδιότητες της γέλης συνεχίζουν να μεταβάλλονται για μακρύ χρονικό διάστημα μετά το χρόνο γέλης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ωρίμανση και οδηγεί σε ένα πιο στιβαρό και πιο πυκνό στερεό σκελετικό δίκτυο. Οι διάφορες χημικές αντιδράσεις και φυσικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται κατά την ωρίμανση

είναι ο πολυμερισμός, η εκτράχυνση και η αλλαγή φάσης. Η εκτράχυνση πραγματοποιείται με την μεταφορά υλικού της στερεάς φάσης από περιοχές υψηλής διαλυτότητας προς περιοχές χαμηλής διαλυτότητας. Το σκελετικό δίκτυο γίνεται πιο στιβαρό χωρίς να συρρικνώνεται, αφού τα κέντρα των σωματιδίων δε συγκλίνουν. Ο πολυμερισμός μέσω συμπύκνωσης είναι η κύρια διεργασία που σχετίζεται με την ωρίμανση της κολλοειδούς πυριτίας. Πρόκειται για τον ίδιο μηχανισμό που προκαλεί συσσωμάτωση κατά τη γελοποίηση και επομένως εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες, δηλαδή από τη συγκέντρωση πυριτίας που δεν έχει ενσωματωθεί ακόμα στο στερεό ιστό, από το pH, από την περιεκτικότητα αλάτων και από τη θερμοκρασία.

2.2.3 Ξήρανση (Drying)

Με τον όρο ξήρανση εννοούμε την απομάκρυνση του νερού από τους πόρους της γέλης υπό συνθήκες συνήθους θερμοκρασίας. Η απομάκρυνση της υγρής φάσης γίνεται αρχικά με εξάτμιση του νερού στην επιφάνεια της γέλης, με αποτέλεσμα οι πόροι να αδειάζουν προοδευτικά και να συρρικνώνονται. Οι επιφανειακή τάση εφελκύει το νερό και η τριχοειδής πίεση συμπιέζει τον εύκαμπτο αρχικά στερεό σκελετό και τον βυθίζει στο υγρό. Ο σκελετός προοδευτικά γίνεται πιο δύσκαμπτος καθώς το πορώδες μειώνεται, οι αλυσίδες των συσσωμάτων συγκλίνουν και η πιθανότητα δημιουργίας νέων δεσμών μεγαλώνει. Το γεγονός ότι η κορεσμένη γέλη (διφασικό υλικό) μεταπίπτει λόγω ξήρανσης σε τριφασικό υλικό με την εμφάνιση ακόρεστων πόρων που περιέχουν αέρα μπορεί να δικαιολογήσει τις διατυπώσεις της βιβλιογραφίας περί συμπιεστότητας υπό αστράγγιστες συνθήκες. Ο ισχυρισμός ότι ο σχηματισμός της γέλης είναι μια διαδικασία μετατροπής του υγρολύματος σε καθαρό στερεό είναι επίσης ασταθής και οδηγεί στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι το σταθεροποιημένο έδαφος είναι μονοφασικό υλικό, αποτελούμενο από δύο στερεά.

2.2.4 Μηχανισμός αυτό-ίασης του σταθεροποιημένου εδάφους (self-healing mechanism)

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα της γέλης είναι ότι μπορεί να εμφανίσει αυτό-ίαση (self-healing) μετά από μερική καταστροφή των δεσμών της στερεάς φάσης. Για παράδειγμα, μετά από ένα έντονο σεισμικό γεγονός που θα τραυματίσει τη στερεά φάση της γέλης, το σταθεροποιημένο έδαφος θα εκτονώσει αργά τις πιέσεις μέσα από τους πόρους της και η συνεπαγόμενη καθίζηση θα φέρει κοντά τις στερεές πυριτικές αλυσίδες. Νέοι δεσμοί σιλοξάνης θα προκύψουν και το τραυματισμένο στερεό δίκτυο θα γίνει πιο στιβαρό και λιγότερο διαπερατό. Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να εξελίσσεται και σε εργαστηριακό επίπεδο κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων εδαφών. Ακόμα και κατά την εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε ένα σταθεροποιημένο έδαφος είναι πιθανό να υφίσταται μια συνεχής διαδικασία καταστροφής και δημιουργίας δεσμών στον στερεό σκελετό της γέλης. Είναι εμφανές ότι αυτή η συμπεριφορά έχει καίρια σημασία για τις εφαρμογές της γεωτεχνικής.

Ένα από τα χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας που την καθιστά ελκυστική ως μέσο σταθεροποίησης ρευστοποιήσιμων εδαφών είναι η εξαιρετική ανθεκτικότητά της στη φθορά του χρόνου. Οι παραμορφώσεις που θα προκαλέσει ένα σεισμικό γεγονός αναμένεται να καταστρέψουν ένα μέρος από το σκελετικό δίκτυο της γέλης. Το ίδιο αναμένεται να συμβεί και κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων σε συνθήκες εργαστηρίου. Η ενδεχόμενη ανάκαμψη της γέλης της πυριτίας σχετίζεται με κάποιον μηχανισμό αυτό-ίασης.

Η ευεργετική δράση της γέλης, όσο αναφορά τη βελτίωση της εδαφικής απόκρισης, οφείλεται στην αλληλεπίδραση του στερεού σκελετού της γέλης με τον εδαφικό σκελετό. Η καθαρή κορεσμένη γέλη πυριτίας είναι ένα πολύ μαλακό ευπαραμόρφωτο υλικό με αμελητέα διατμητική αντοχή. Το σταθεροποιημένο έδαφος που περιέχει γέλη στους πόρους του, όπως θα δείξουμε σε επόμενες ενότητες, παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη αντοχή σε συνθήκες τριαξονικής μονοτονικής φόρτισης. Επιπλέον, διατηρεί τη δομή του χωρίς να καταρρέει σε συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης πολλών κύκλων. Η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας, αφού παρουσιάζει αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη. Μπορούμε,

επομένως, να συμπεράνουμε ότι ο σκελετός της πυριτίας δρα ευεργετικά μέσω των δεσμών που δημιουργεί μεταξύ των κόκκων του εδάφους και μέσω της ενθυλάκωσής τους.

Από την παραπάνω συλλογιστική συμπεραίνουμε ότι για να υπάρχει ικανότητα αυτό-ίασης θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης νέων δεσμών στο τραυματισμένο δίκτυο της γέλης. Αν μάλιστα προάγεται η δημιουργία νέων δεσμών, προάγεται και ο μηχανισμός αυτό-ίασης. Οι δύο αυτές προϋποθέσεις υφίστανται στην περίπτωση της γέλης πυριτίας. Ο σχηματισμός νέων δεσμών σιλοξάνης γνωρίζουμε ότι συνεχίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το σχηματισμό της γέλης. Η επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων είναι πλούσια σε ενεργές ομάδες σιλανόλης και εξασφαλίζει τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων δεσμών σιλοξάνης. Ένας νέος δεσμός θα δημιουργηθεί όταν ένα αιωρούμενο σωματίδιο συγκρουστεί με ένα άλλο, ή με μια σχηματισμένη αλυσίδα σωματιδίων. Στην περίπτωση που το σεισμικό γεγονός (ή η συστολή στερεοποίησης) συμβεί σε προχωρημένο στάδιο ωρίμανσης, οπότε τα αιωρούμενα σωματίδια είναι πολύ λίγα, υπάρχει και πάλι η δυνατότητα δημιουργίας νέων δεσμών σιλοξάνης. Αυτή τη φορά ο σχηματισμός των δεσμών προάγεται από τη σύγκλιση των υπαρχουσών αλυσίδων του σκελετού της γέλης. Η σύγκλιση προκαλείται από τις παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια και μετά από το σεισμό (ή από τη συστολή στερεοποίησης). Οι ενεργές ομάδες σιλανόλης έρχονται κοντά και προάγεται η αντίδραση της συμπύκνωσης. Η συστολή κατά την ξήρανση της γέλης είναι τόσο έντονη, ώστε οδηγεί στο σχηματισμό ενός μεγάλου πλήθους νέων δεσμών. Η γέλη μετατρέπεται σε ένα σκληρό υλικό που μοιάζει με πλαστικό και δε θυμίζει σε τίποτα την αρχική μαλακή μορφή της. Είναι εμφανές ότι αυτή η συμπεριφορά έχει καίρια σημασία για τις εφαρμογές της γεωτεχνικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

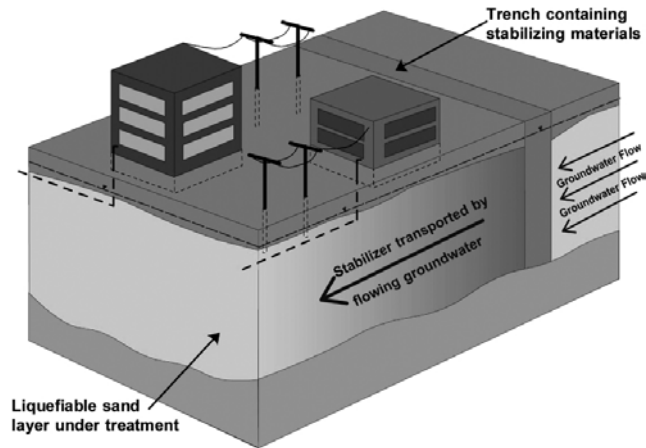
3.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχαλίκων, άμμων, μιγμάτων αμμοιλλύων, μη-πλαστικών ιλύων) θεωρείται σήμερα μια εκ των πλέον σημαντικών αιτιών δομικών αστοχιών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Η αύξηση της πίεσης των πόρων σε κορεσμένους μη συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς, η οποία προκαλείται από δυναμικές φορτίσεις, όπως οι σεισμικές διεγέρσεις, υπό αστράγγιστες συνθήκες μπορεί να επιφέρει συσσώρευση παραμορφώσεων και τη μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού δημιουργώντας το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Η αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών μπορεί να επιτευχθεί με μία σειρά από καθιερωμένες μεθοδολογίες βελτίωσης του εδάφους (Seed and Lee, 1966) πριν την κατασκευή του κτιρίου. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται συνήθως στη συμπύκνωση (π.χ. δυναμική συμπύκνωση, βαθιά δονητική συμπύκνωση ή αντικατάσταση), τη σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) ή την αποτόνωση των σεισμικών υπερπιέσεων πόρων (π.χ. χαλικο-στραγγιστήρια) και έχουν εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο (D' Appolonia et al., 1954; Manye et al., 1984; Donovan et al., 1984; Maher et al., 1994). Οι παραπάνω μέθοδοι προσφέρουν άμεσο έλεγχο της πυκνότητας του εδάφους, αλλά συνήθως δεν μπορούν να εφαρμοσθούν σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών. Η αδυναμία εφαρμογής τους συνίσταται είτε στην έλλειψη επαρκούς χώρου για την τοποθέτηση του απαιτούμενου εξοπλισμού (π.χ. σε συνεχή αστική δόμηση ή στο μέσο της κάτοψης του κτιρίου) ή σε πιθανές δομικές ζημιές που μπορούν να προκληθούν στην κατασκευή από τη χρήση δονητικών ή δυναμικών μεθόδων βελτίωσης. Επιπλέον, το κόστος εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων είναι απαγορευτικό σε μεγάλης έκτασης περιοχές με υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης. Για αυτούς τους λόγους, σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών οι πλέον συνήθεις μεθοδολογίες βελτίωσης έναντι σεισμικής ρευστοποίησης είναι η τοποθέτηση μικροπασσάλων (underpinning ή micropiles), η εισπίεση ενεμάτων (grouting) υψηλού ιξώδους μέσω γειτονικών γεωτρήσεων, και η έμπηξη στραγγιστηρίων της μορφής διακορευμένων πλαστικών σωλήνων (perforated drains). Οι παραπάνω μεθοδολογίες, ωστόσο, κρίνονται μερικώς αναποτελεσματικές, διότι δεν μπορούν να βελτιώσουν το έδαφος σε ολόκληρη την κάτοψη, ενώ ενδέχεται

να προκαλέσουν και προβλήματα στο υπάρχον κτίριο (π.χ. η εισπίεση ενεμάτων, λόγω μεγάλων πιέσεων, μπορεί να προκαλέσει και ανασήκωμα θεμελίου). Επιπλέον συνοδεύονται από υψηλό κόστος και εμποδίζουν την κανονική λειτουργία της κατασκευής κατά την εφαρμογή τους.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα τελευταία χρόνια, μία εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης που δεν παρουσιάζει τα παραπάνω μειονεκτήματα είναι η παθητική σταθεροποίηση (Gallagher, 2000). Πρόκειται για την εισπίεση με χαμηλή υδραυλική κλίση ενός σταθεροποιητή (stabiliser), δηλαδή ενός υλικού που αποτελείται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανοσωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της κάτοψης μιας υφιστάμενης κατασκευής (Σχήμα 3.1). Μέσω του εμπλουτισμού του υγρού των πόρων με τον σταθεροποιητή αλλάζει η μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού - υγρού των πόρων και επιτυγχάνεται ο περιορισμός της συσσώρευσης παραμορφώσεων κατά τη σεισμική διέγερση. Έτσι αποφεύγονται οι καταστροφικές συνέπειες της ρευστοποίησης για την κατασκευή. Οι Gallagher et al. (2007), διεξήγαγαν μεγάλης κλίμακας πειράματα στο πεδίο όπου εισπίεσαν υγρόλυμα κολλοειδής πυριτίας 8% w.t. σε βάθος 2 m ενός ρευστοποιήσιμου έδαφος πάχους 10 m και στη συνέχεια προκάλεσαν ρευστοποίηση με ανατινάξεις. Στο σταθεροποιημένο έδαφος αναπτύχθηκαν μικρότερες καθιζήσεις (0.3m) ενώ στο φυσικό γειτονικό έδαφος παρατηρήθηκαν καθιζήσεις περίπου 0.5 m.



Σχήμα 3. 1 Μέθοδος παθητικής σταθεροποίησης (Gallagher and Mitchell, 2002)

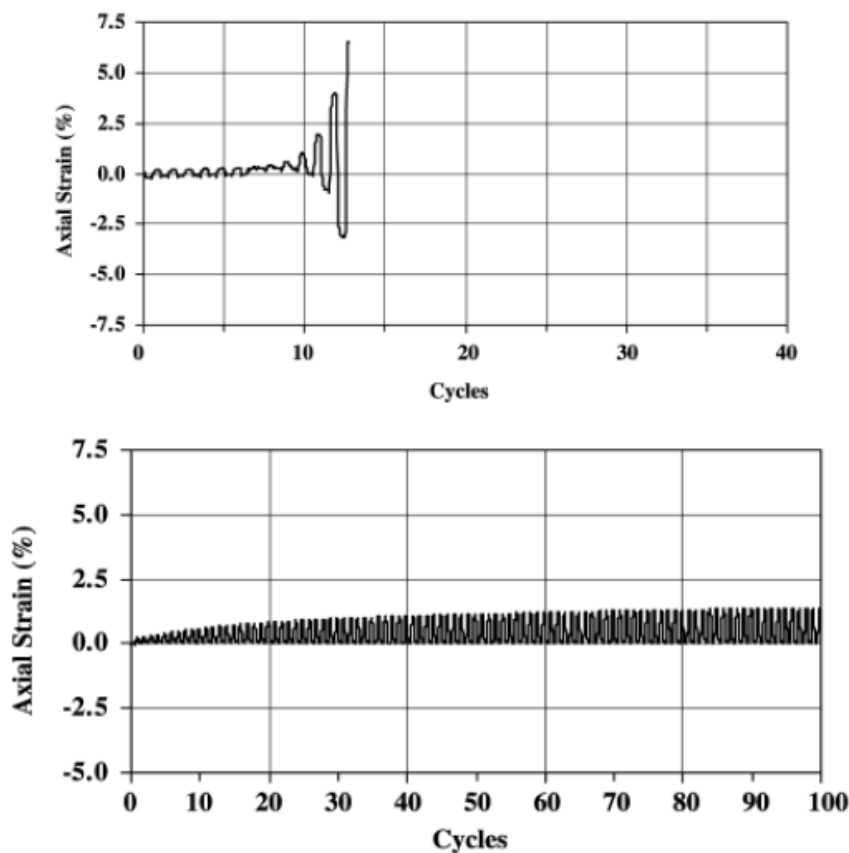
3.2.1 Εργαστηριακές μελέτες

Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας, CS, στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου έχουν διεξαχθεί διάφορες εργαστηριακές μελέτες που επικεντρώνονται σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές προκειμένου να καθοριστεί η αντίσταση του σταθεροποιημένου με κολλοειδή πυριτία εδάφους στη ρευστοποίηση.

Στις περισσότερες εργαστηριακές μελέτες (Towhata and Kabashima, 2001; Gallagher and Mitchell, 2002) η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση ορίζεται από τους κύκλους ανακυκλικής φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους (DA) καθορισμένης τιμής χωρίς να γίνεται μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων. Διευκρινίζεται ότι ως DA (double amplitude) ορίζεται η μέγιστη διαφορά σε παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου κύκλου θλίψης και εφελκυσμού.

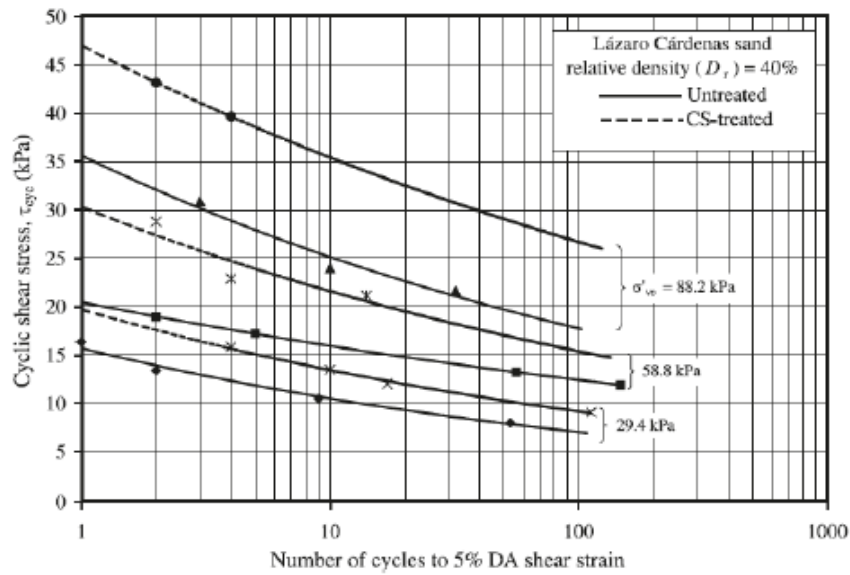
Οι Gallagher and Mitchell (2002) διεξήγαγαν αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου Monterey No. 0/30 με και χωρίς προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση της ξηρής άμμου στο υγρόλυμα πυριτίας από συγκεκριμένο ύψος για να εξασφαλισθεί ο κορεσμός σε πυριτία του δοκιμίου. Τα δοκίμια έχουν σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ και εύρος ποσοστού σταθεροποιητή 5-20% κατά βάρος. Η σταθεροποίηση με Ludox®-SM οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε

ρευστοποίηση συγκριτικά με τα δοκίμια άμμου χωρίς CS. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι αξονικές παραμορφώσεις για καθαρή και σταθεροποιημένη άμμο σε λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.27$ ($CSR= \Delta\tau_{\theta z} / p'_i$). Η άμμος ανέπτυξε αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους (double amplitude) $DA=5\%$ σε 12 κύκλους φόρτισης και στους 13 κύκλους κατέρρευσε. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος με ποσοστό σταθεροποιητή, $CS=10\%$ ανέπτυξε πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις που συσσωρεύονταν κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, φτάνοντας την τιμή $DA=5\%$ μετά από 276 κύκλους, ενώ δεν κατέρρευσε ούτε ρευστοποιήθηκε.

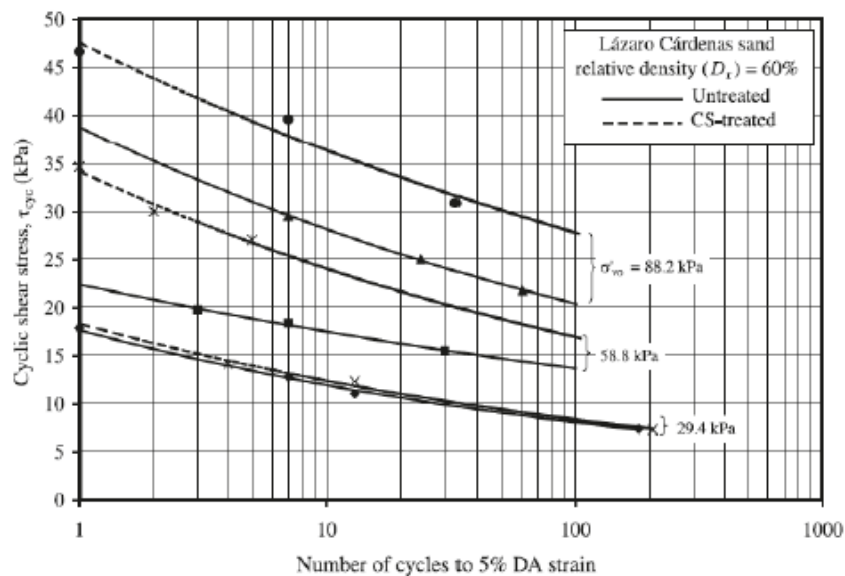


Σχήμα 3. 2 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές α) άμμος, β) σταθεροποιημένη άμμος (Gallagher and Mitchell, 2002).

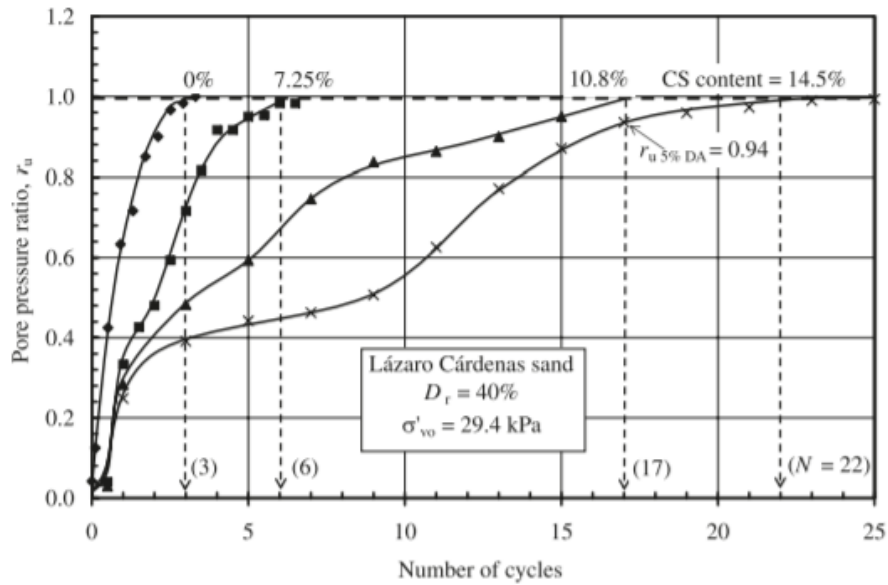
Οι Diaz-Rodriguez et al. (2008) διεξήγαγαν μία σειρά από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο για να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα της ανάπτυξης της πίεσης των πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση σύμφωνα με τους Finn and Vaid, (1977). Στην εργαστηριακή μελέτη των Diaz-Rodriguez et al. χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια άμμου Lazaro Carenas και σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό σταθεροποιητή, $CS=14.5\%$ κατά βάρος, της οποίας ο τύπος δε διευκρινίζεται στη δημοσίευση. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι κακής διαβάθμισης, με 11.5% ποσοστό λεπτόκοκκων με $e_{max}=1.17$, $e_{min}=0.77$ και $D_{50}=0.17$ mm. Τα δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου είχαν αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa, $\sigma'_{v0}=58.8$ kPa και $\sigma'_{v0}=88,2$ kPa. Επιπλέον, για να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r=40\%$ και $D_r=60\%$. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προκύπτει σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους. Παρατηρείται ότι, ότι η κολλοειδής πυριτιία έχει μεγαλύτερη επίδραση στις άμμους με μικρή σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$ (Σχήμα 3.3) σε σχέση με αυτές με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$ (Σχήμα 3.4). Συγκεκριμένα, η αύξηση της διατμητικής τάσης της σταθεροποιημένης άμμου έναντι αυτής της φυσικής άμμου στους 10 κύκλους φόρτισης είναι 30% , 35% και 41% για τις διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις στα δοκίμια με $D_r=40\%$ ενώ σε αυτά με $D_r=60\%$ η αντίστοιχη αύξηση είναι 4% , 37% και 29% . Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η αρχική ενεργός τάση αυξάνεται η βελτίωση σε διατμητική αντοχή του σταθεροποιημένου έναντι του φυσικού εδάφους, αλλά η βελτίωση στις χαμηλές τάσεις ($\sigma'_{v0}=50 < kPa$) είναι πολύ μικρή (4% για τα δοκίμια με $D_r=60\%$ και $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa). Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η μείωση του ρυθμού ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων στο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτιία έδαφος για τα δοκίμια με $D_r=40\%$ και $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa σε διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή CS. Παρατηρείται, ότι χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στο σταθεροποιημένο έδαφος έναντι του φυσικού για να γίνει ο λόγος υπερπίεσεων πόρων $r_u=u/\sigma'_{v0}$ ίσος με 1 και ότι η αύξηση του ποσοστού σταθεροποιητή οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντίστασης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης.



Σχήμα 3. 3 Ανακυκλική διατμητική αντοχή σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=40\%$ (Rodriguez et al.,2008).



Σχήμα 3. 4 Ανακυκλική διατμητική αντοχή σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=60\%$ (Rodriguez et al.,2008).

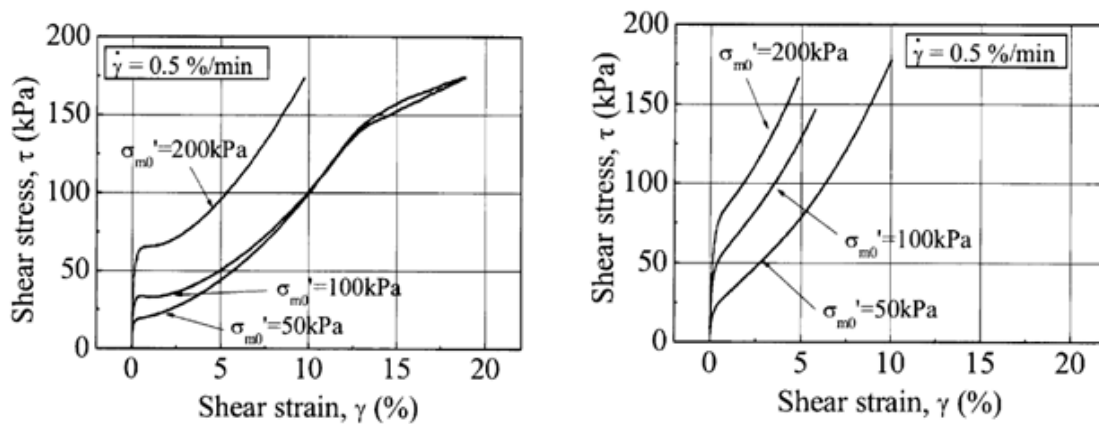


Σχήμα 3. 5 Ρυθμός υπερπίεσης των πόρων σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή, $D_r=40\%$ και $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa (Rodriguez et al., 2008).

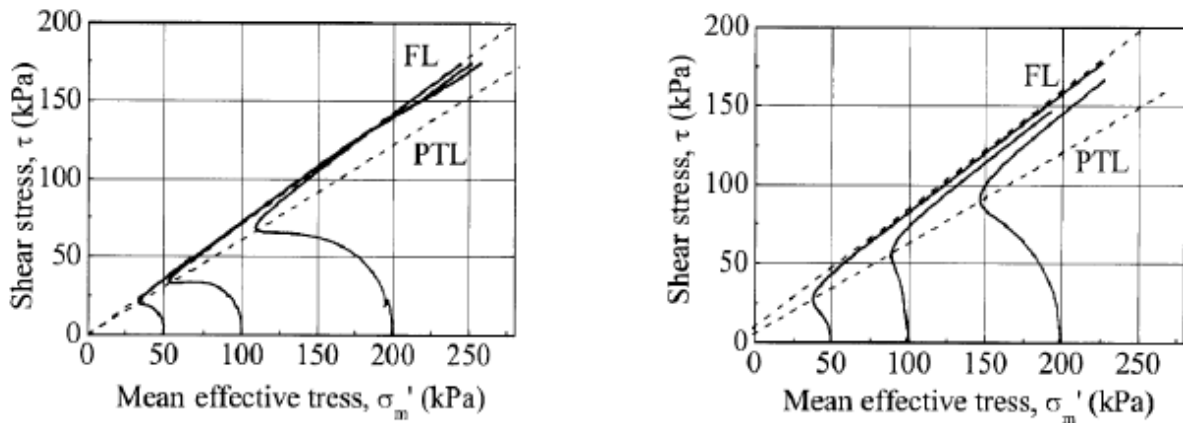
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε ελάχιστες μελέτες έχει γίνει μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων κατά τη διάρκεια της αστράγγιστης ανακυκλικής φόρτισης. Μία από αυτές τις μελέτες ήταν αυτή των Kodaka et al. (2005). Σε αυτή την έρευνα, εκτελέστηκαν τόσο μονοτονικές όσο και ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο Toyoura με μέτρηση της πίεσης πόρων για να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου. Οι μονοτονικές και οι ανακυκλικές δοκιμές εκτελέστηκαν σε συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου κυλινδρικού δοκιμίου. Τα δοκίμια σταθεροποιήθηκαν με ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας CS=4% κατά βάρος και αφέθηκαν να ωριμάσουν και να στερεοποιηθούν για 4 βδομάδες. Ο κορεσμός του δοκιμίου έγινε εισπίζοντας αέριο CO₂ και απαερωμένο νερό από τη βάση του καλουπιού. Η πυριτία διοχετεύεται σταδιακά μέσα στην κορεσμένη άμμο από τη βάση του δοκιμίου καταλαμβάνοντας τη θέση του απαερωμένου νερού. Τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.6 και 3.7. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου παρατηρείται μια σημαντική αύξηση της

διατμητικής αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου. Επιπλέον, μελετώντας τις ενεργές διαδρομές τάσεων συμπεραίνουμε ότι η γραμμή αστοχίας (FL) και η phase transformation line (PTL) απομακρύνονται στα σταθεροποιημένα εδάφη και η περιοχή διόγκωσης αυξάνεται. Οι Kodaka et al. αναφέρουν ότι αυτό ίσως οφείλεται στη “συνεκτικότητα” που προσδίδει η πυριτία στην άμμο.

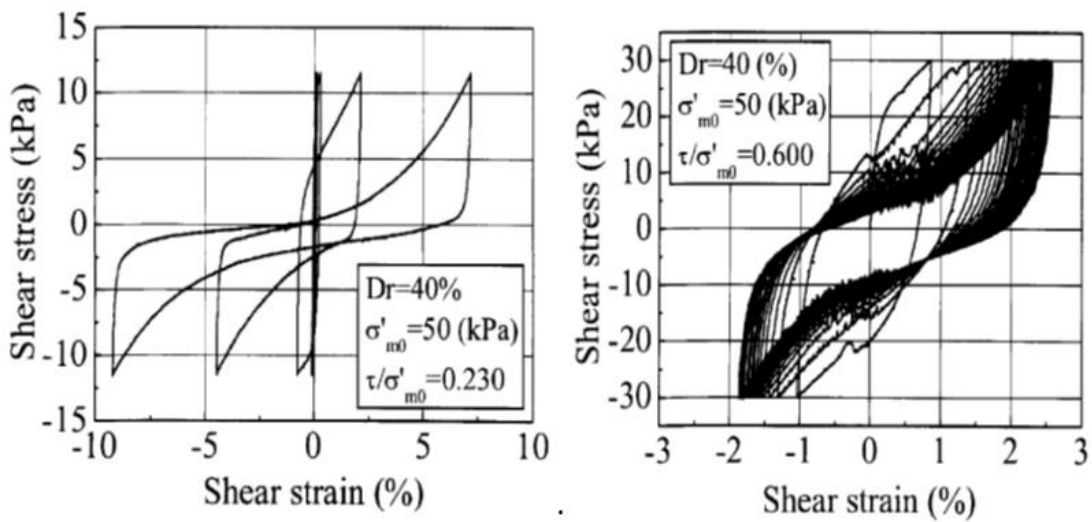
Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανακυκλικής αστράγγιστης στρεπτικής διάτμησης σταθεροποιημένης και μη άμμου για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.23$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8. Γίνεται φανερό ότι το δοκίμιο της καθαρής άμμου ρευστοποιείται και καταρρέει από τους πρώτους κύκλους φόρτισης ενώ το δοκίμιο της σταθεροποιημένης άμμου παρουσιάζει πολύ αυξημένη αντοχή σε στρεπτική διάτμηση και δεν καταρρέει. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα σταθεροποιημένα εδάφη αναπτύσσουν μεγάλες παραμορφώσεις από το αρχικό στάδιο φόρτισης, οι οποίες όμως δεν αυξάνουν σημαντικά με τους κύκλους, ούτε οδηγούν σε κατάρρευση ή ρευστοποίηση του δοκιμίου.



Σχήμα 3. 6 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για α) άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $CS=4\%$ (Kodaka et al., 2005).



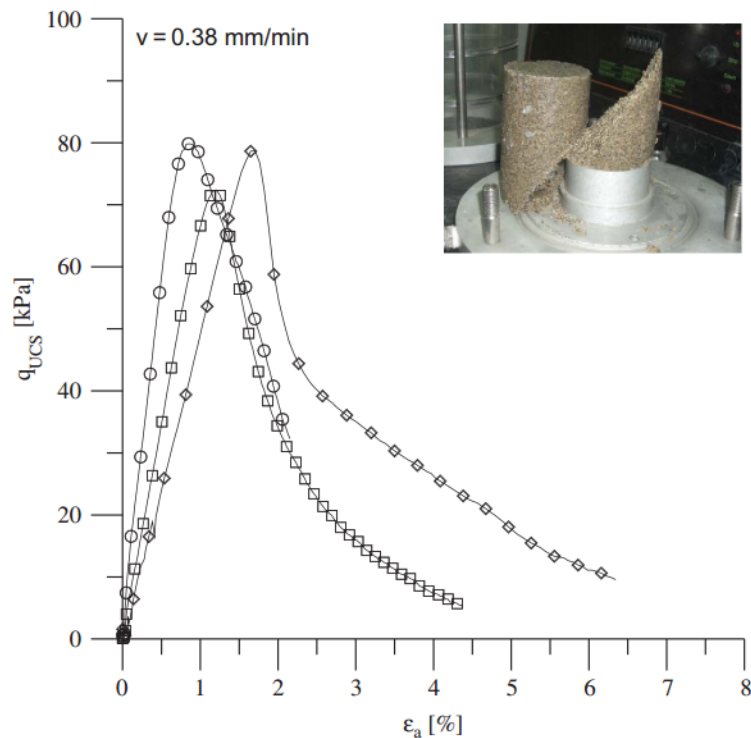
Σχήμα 3. 7 Διάγραμμα διαδρομών τάσεων για μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για α) άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $CS=4\%$ (Kodaka et al., 2005).



Σχήμα 3. 8 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για α) άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $CS=4\%$ (Kodaka et al 2005).

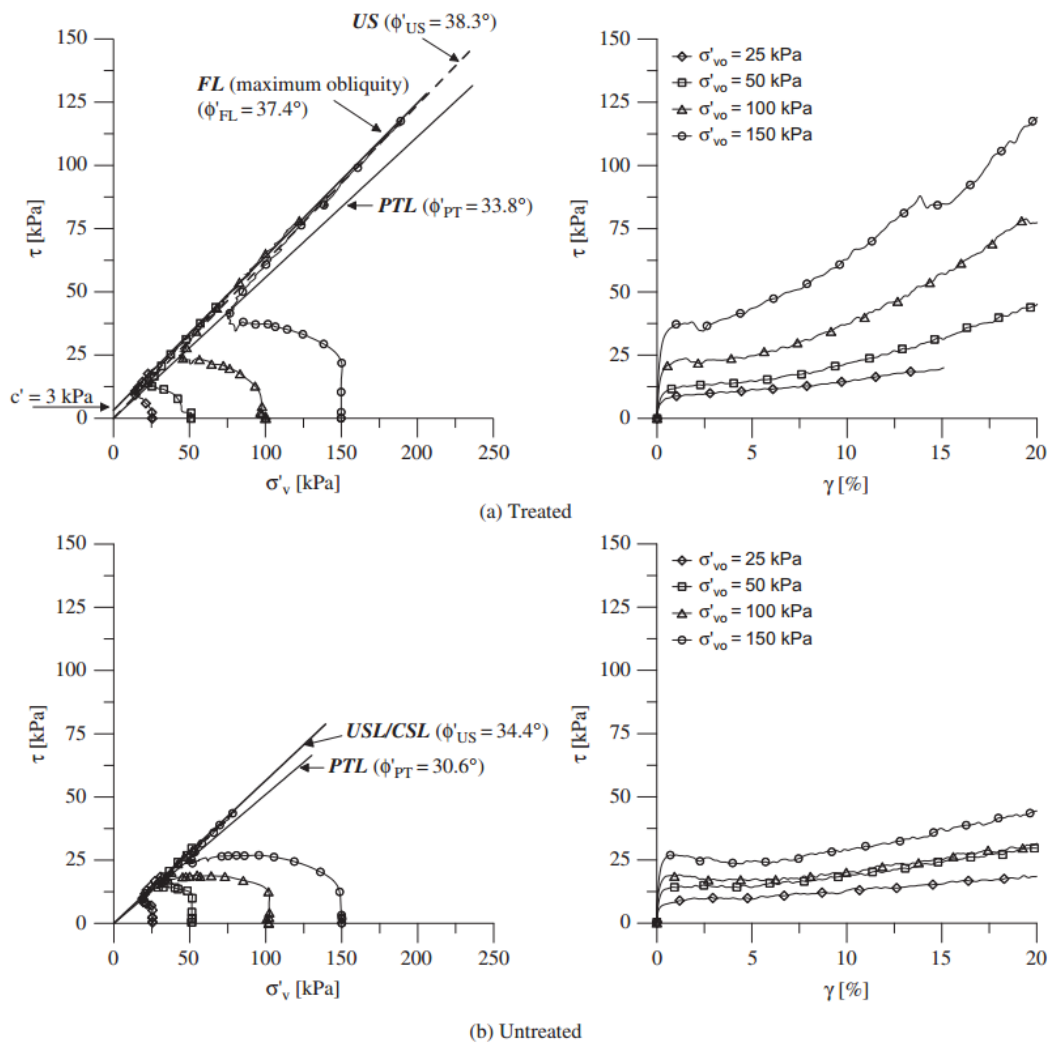
Άλλες δύο εργαστηριακές μελέτες που ασχολήθηκαν με τη μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου είναι αυτή των Porcino et al. (2011) και των Porcino et al. (2012). Στην πρώτη εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης και αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης και αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου Ticino silica και σε σταθεροποιημένα με sodium-silicate δοκίμια άμμου. Τα δοκίμια άμμου παρασκευάστηκαν με ξηρή εμφύσηση εδαφικού υλικού (dry air pluviation). Καθορισμένη ποσότητα ξηρής άμμου διοχετεύεται στο καλούπι από συγκεκριμένο ύψος επιτυγχάνοντας σχετικές αρχικές πυκνότητες $I_r= 45$ και 75% . Κατακόρυφη τάση 10 kPa ασκείται στο πάνω μέρος του δοκιμίου για να διατηρηθεί η ευστάθεια. Στη συνέχεια, για την παρασκευή των σταθεροποιημένων δοκιμίων εισπνέζεται διοξείδιο του άνθρακα και απαερωμένο νερό για να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας. Το υγρόλυμα πυριτίας 10% συγκέντρωσης κατά βάρος εισπνέζεται από το κάτω μέρος του καλουπιού ως το πάνω μέχρι να αντικατασταθεί όλο το νερό που βρίσκεται στους πόρους. Για να εξασφαλισθεί αυτό, εισπνέζεται στο δοκίμιο τριπλάσιος όγκος υγρολύματος από τον όγκο των κενών. Το δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει για 24 ώρες ώστε να αναπτυχθούν οι δεσμοί του. Αφού τοποθετηθεί το δοκίμιο στην τριαξονική συσκευή, του επιβάλλεται πίεση κυψέλης 15 kPa. Ο κορεσμός του δοκιμίου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αντιπίεσης (back pressure) 300 kPa για 12 ώρες εξασφαλίζοντας τιμές $B>0.96$. Στη συνέχεια το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα και αφήνεται σε ισορροπία για 3 ώρες πριν τη διάτμηση. Αυτός ο χρόνος θεωρήθηκε από τους συγγραφείς αρκετός για την ολοκλήρωση της στράγγισης και την αποφυγή φαινομένων ερπυσμού.

Οι δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη διεξήχθησαν με ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης $0.38\text{mm}/\text{min}$ και η μέση αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη προέκυψε $q_{ucs}=75$ kPa (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3. 9 Δοκιμές προσδιορισμού ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια (Porcino et al., 2011).

Στις αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης (Σχήμα 3.10) στα δοκίμια άμμου παρατηρείται ελάχιστη διαστολική συμπεριφορά μετά τη γραμμική αλλαγής φάσης (phase transformation line, (PTL)). Η γωνία τριβής στο στάδιο αλλαγής κατάστασης, υπολογίζεται $\phi_{PT} = 31^{\circ}$ για την άμμο Ticino. Στις μεγάλες παραμορφώσεις παρατηρείται μία κρίσιμη κατάσταση με $\phi_{us} = 34^{\circ}$. Η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων διαφέρει αρκετά. Παρατηρούνται μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις και είναι αρκετά σημαντικότερη η διαστολικότητα. Επιπλέον, η περιβάλλουσα αστοχίας των σταθεροποιημένων δοκιμίων παρουσιάζει μια μικρή καμπύλωση καθώς οι τιμές του λόγου (τ/σ_v) ποικίλλουν από 0.63-0.78. Οι ερευνητές αναφέρουν ότι για τα σταθεροποιημένα εδάφη η συνοχή προκύπτει $c' = 3\text{kPa}$, η μέγιστη γωνία τριβής $\phi_p = 37.4^{\circ}$ και η γωνία τελικής κατάστασης $\phi_{us} = 38.3^{\circ}$ που είναι μεγαλύτερη από αυτή των δοκιμίων άμμου. Η γραμμή της αλλαγής φάσης (PTL) των σταθεροποιημένων δοκιμίων βρίσκεται συνεχώς πάνω από την αντίστοιχη γραμμή των δοκιμίων άμμου. Η γωνία αλλαγής κατάστασης των σταθεροποιημένων δοκιμίων υπολογίζεται $\phi_{PT} = 34.4^{\circ}$.

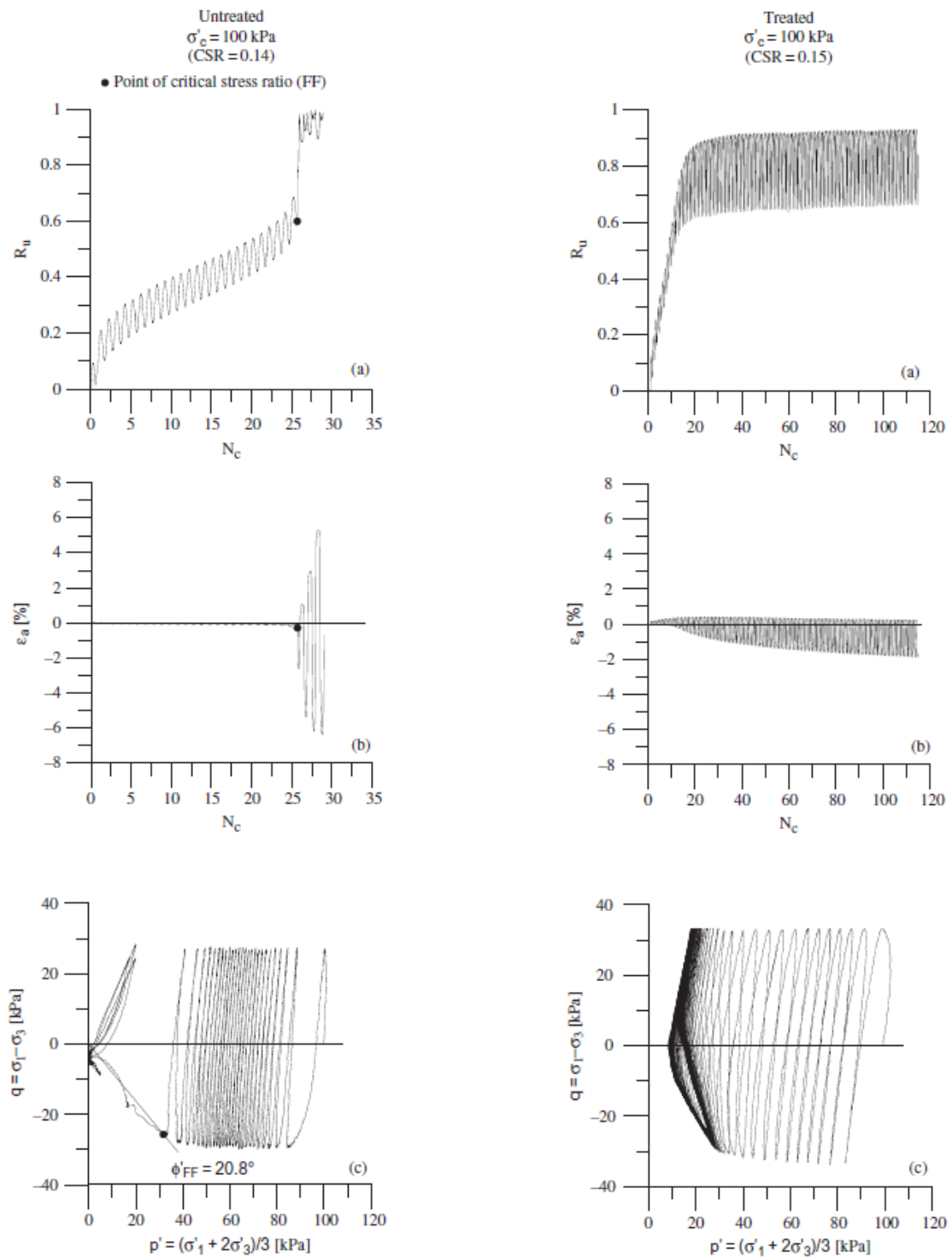


Σχήμα 3. 10 Αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης σε (α) δοκίμια άμμου (β) σταθεροποιημένα δοκίμια.

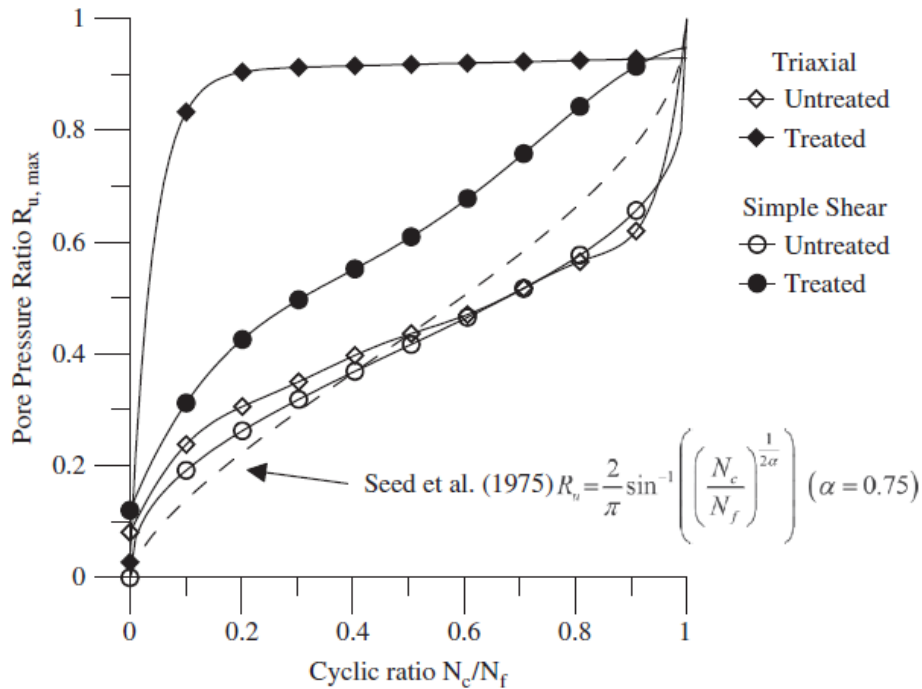
Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου δοκιμίου σε αστράγγιστη ανακυκλική φόρτιση στην τριαξονική συσκευή σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του φυσικού δοκιμίου. Τα δύο δοκίμια υποβλήθηκαν σε λόγο ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.15$. Παρατηρείται πολύ διαφορετική συμπεριφορά των δοκιμίων και στην ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων και στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Το δοκίμιο άμμου σε 25 κύκλους έφτασε σε ένα σημείο αστοχίας της ροής στη φάση του εφέλκυσμού. Τελικά, αστοχεί από τη συσσώρευση των ανακυκλικών παραμορφώσεων. Η γωνία της αστοχίας υπολογίζεται σε $\phi_{FF}=17-20.8^{\circ}$ για όλα τα δοκίμια άμμου. Αντίθετα, τα σταθεροποιημένα δοκίμια μετά από 120 κύκλους αναπτύσσουν αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $DA < 2.5\%$. Το μεγαλύτερο ποσοστό της πίεσης του υγρού των πόρων αναπτύσσεται

στο αρχικό στάδιο της φόρτισης και μετά από αυτό ελάχιστη επιπρόσθετη πίεση αναπτύσσεται παρά την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Στο διάγραμμα της διαδρομής των τάσεων παρατηρείται ένας κλάδος φόρτισης επαναφόρτισης που συμφωνεί με αυτόν της υπερπίεσης πόρων. Το διάγραμμα των αξονικών παραμορφώσεων δεν είναι συμμετρικό καθώς παρατηρείται μεγαλύτερη ανάπτυξη παραμορφώσεων στην εφελκυστική φάση. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο ακόμη και μετά το πείραμα δεν καταρρέει όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι ερευνητές.

Οι Porcino et al., (2011) αναφέρουν ότι ο λόγος υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης είναι πάντα μεγαλύτερος για τα σταθεροποιημένα δοκίμια και για την τριαξονική φόρτιση και για την απλή διάτμηση (Σχήμα 3.12). Παρατηρείται όμως, ότι η μορφή των καμπυλών για τους δύο τύπους φόρτισης διαφέρει αρκετά για τα σταθεροποιημένα δοκίμια ενώ είναι σχεδόν ταυτόσημη για τα φυσικά δοκίμια. Στην τριαξονική φόρτιση ο λόγος υπερπίεσεων πόρων R_u σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης αυξάνεται απότομα και στη συνέχεια παραμένει σταθερός, ενώ στην απλή διάτμηση η συμπεριφορά της υπερπίεσης του υγρού των πόρων προσομοιάζει αυτή των φυσικών δοκιμίων άμμου. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι οι εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν την ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων δεν είναι κατάλληλες για τα σταθεροποιημένα εδάφη.



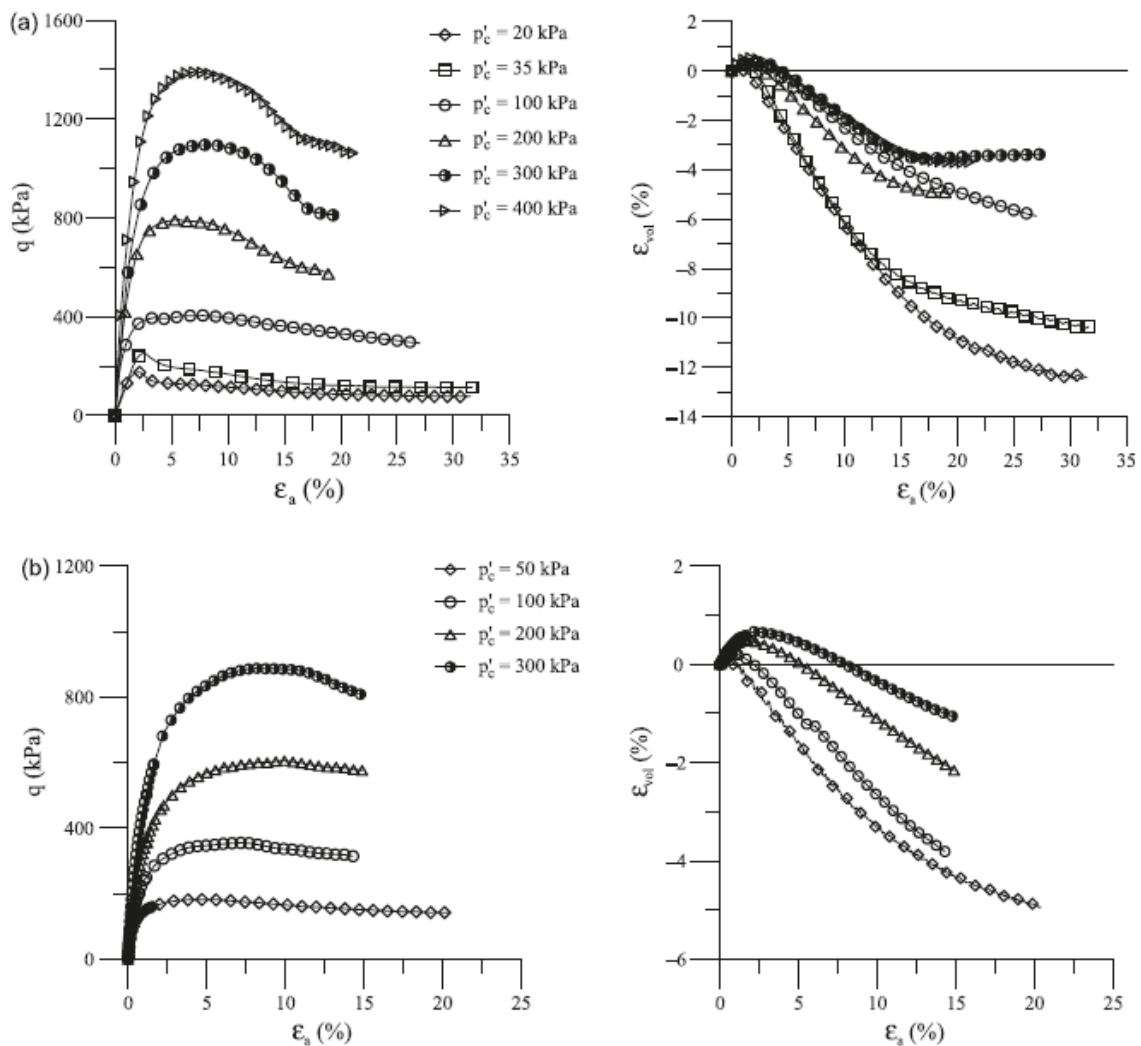
Σχήμα 3. 11 Αστράγγιστη τριαξονική ανακυκλική δοκιμή σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμον (αριστερά) και σε φυσικό δοκίμιο άμμον (δεξιά). (Porcino et al., 2011).



Σχήμα 3. 12 Διαγραμματική απεικόνιση του λόγου υπερπίεσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου σε τριαξονική φόρτιση και σε απλή διάτμηση (Porcino et al., 2011).

Οι D. Porcino, V. Marcianò, and R. Granata, (2012) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων (sodium-silicate) δοκιμίων άμμου, διεξάγοντας τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης και ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης. Ο τρόπος παρασκευής των δοκιμίων καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κοινά με την αντίστοιχη έρευνα των Porcino et al. (2011) που έχει ήδη αναφερθεί στην παρούσα εργασία

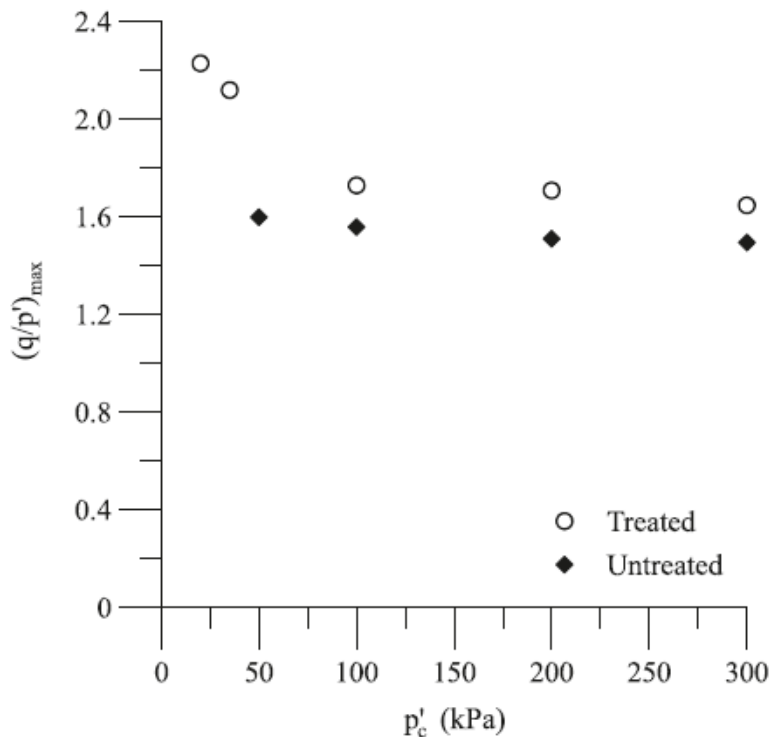
Η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων συγκρίνεται με αυτή των δοκιμίων άμμου με παρόμοιες αρχικές πυκνότητες σε διάφορες τάσεις στερεοποίησης (Σχήμα 3.13) και παρατηρούνται αρκετές διαφορές. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο το εύρος της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης από την τελική τιμή είναι μεγαλύτερο από το εύρος των τάσεων στα φυσικά δοκίμια. Επιπλέον, μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής στα σταθεροποιημένα δοκίμια παρατηρείται ένας κλάδος χαλάρωσης (strain softening) που συνοδεύεται με την εμφάνιση διατμητικών επιπέδων (shear bands).



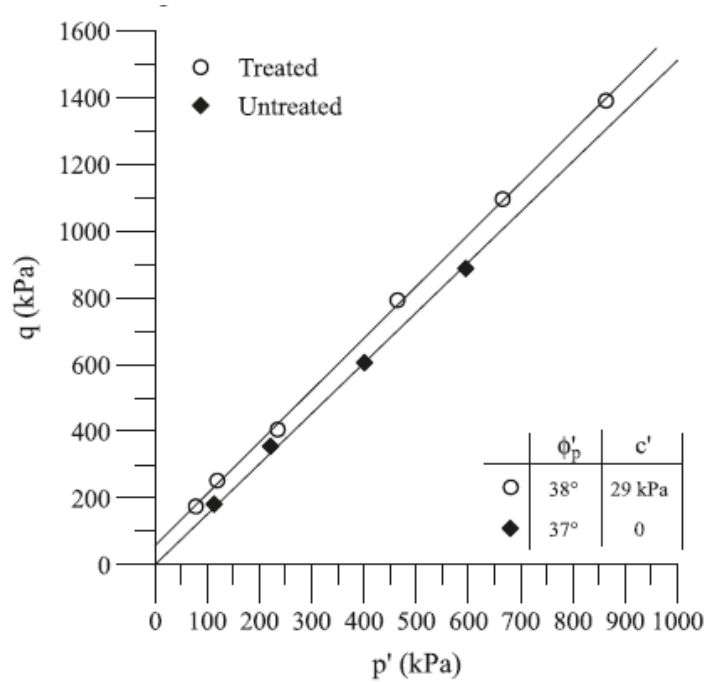
Σχήμα 3. 13 Μηχανική συμπεριφορά (α) σταθεροποιημένων και (β) φυσικών δοκιμίων άμμου σε τριαξονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al.,2012).

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμίων έναντι των φυσικών γίνεται εμφανής από το Σχήμα 3.14, όπου απεικονίζονται οι τιμές του μέγιστου λόγου τάσεων $(q/p')_{max}$ σε σχέση με τις αρχικές τάσεις στερεοποίησης (p'_c). Παρατηρείται ότι υπάρχει μια τάση μείωσης του μέγιστου λόγου τάσεων $(q/p')_{max}$ όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης (p'_c) στα σταθεροποιημένα δοκίμια, ενώ στα φυσικά δοκίμια, ο μέγιστος λόγος τάσεων παραμένει σταθερός με την αύξηση της τάσης στερεοποίησης. Οι ερευνητές αναφέρουν στη δημοσίευσή τους, ότι αυτή η τάση μείωσης υποδεικνύει την έντονη καμπύλωση της περιβάλλουσας αστοχίας των σταθεροποιημένων εδαφών στο εύρος των μικρών τάσεων, ενώ η αντίστοιχη

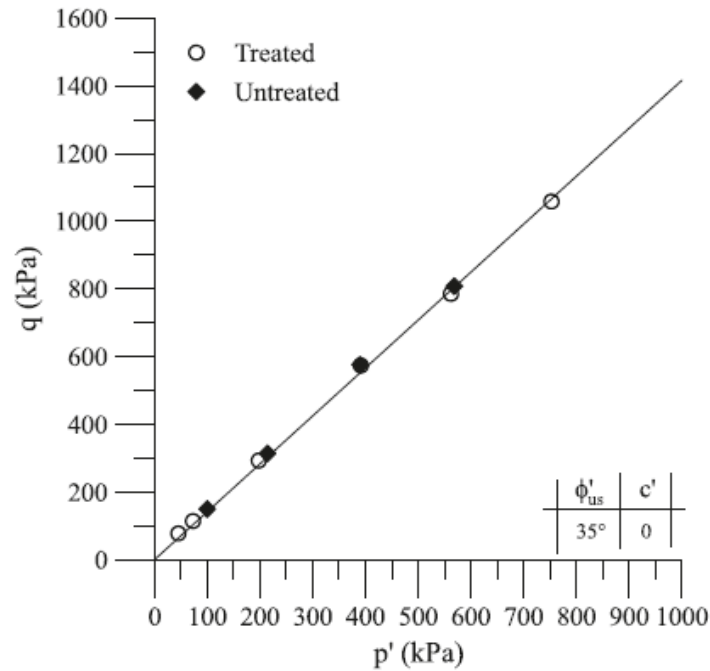
περιβάλλουσα για τα φυσικά δοκίμια είναι γραμμική. Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες αστοχίας Mohr-Coulomb σε διάγραμμα αποκλίνουσας και μέσης ενεργού τάσης ($q-p'$) για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια. Αναφέρεται ότι η περιβάλλουσα για τα σταθεροποιημένα δοκίμια σχεδιάστηκε γραμμική και προκύπτει ότι οι περιβάλλουσες είναι παράλληλες. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι το ένεμα της πυριτίας προσδίδει μόνο συνοχή στα σταθεροποιημένα δοκίμια που προκύπτει $c'=29$ kPa ενώ η μέγιστη γωνιά διατμητικής αντοχής προκύπτει $\phi_p=38^\circ$, πρακτικά ίδια με αυτή της άμμου, δηλαδή $\phi_p=37^\circ$. Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι τιμές της αποκλίνουσας και της ενεργού τάσης στην κρίσιμη κατάσταση, δηλαδή σε μεγάλες παραμορφώσεις όπου ο λόγος τάσεων είναι σταθερός και η διαστολικότητα είναι μηδενική. Παρατηρείται ότι η περιβάλλουσα κρίσιμης κατάστασης είναι κοινή για τα σταθεροποιημένα και τα φυσικά δοκίμια και η γωνία κρίσιμης κατάστασης προκύπτει $\phi_u=35^\circ$.



Σχήμα 3. 14 Διάγραμμα μέγιστου λόγου τάσεων-μέσης ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμο (Porcino et al.,2012).



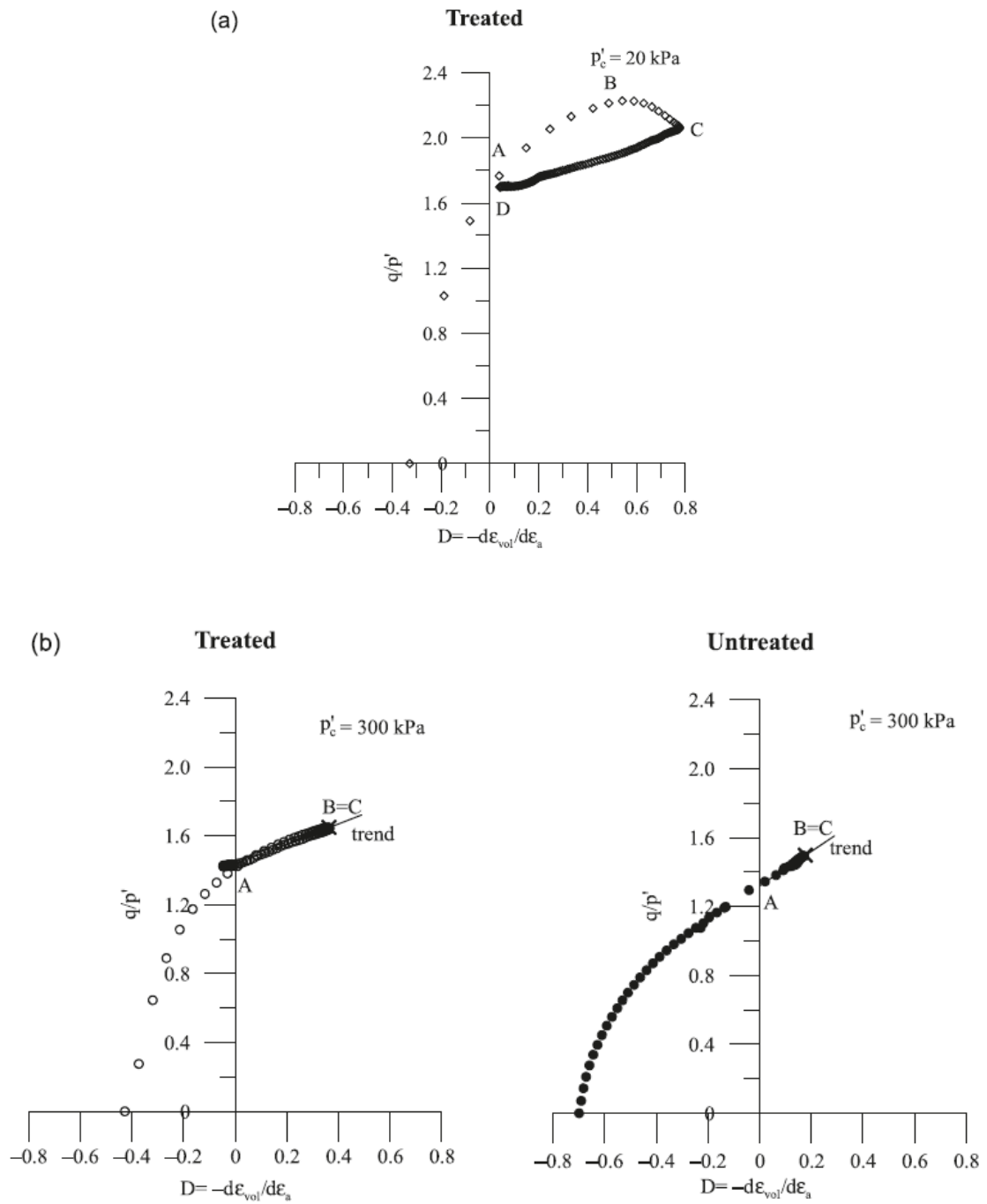
Σχήμα 3. 15 Περιβάλλουσα αστοχίας στη μέγιστη διατμητική αντοχή σε διάγραμμα $q-p'$ για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al., 2012).



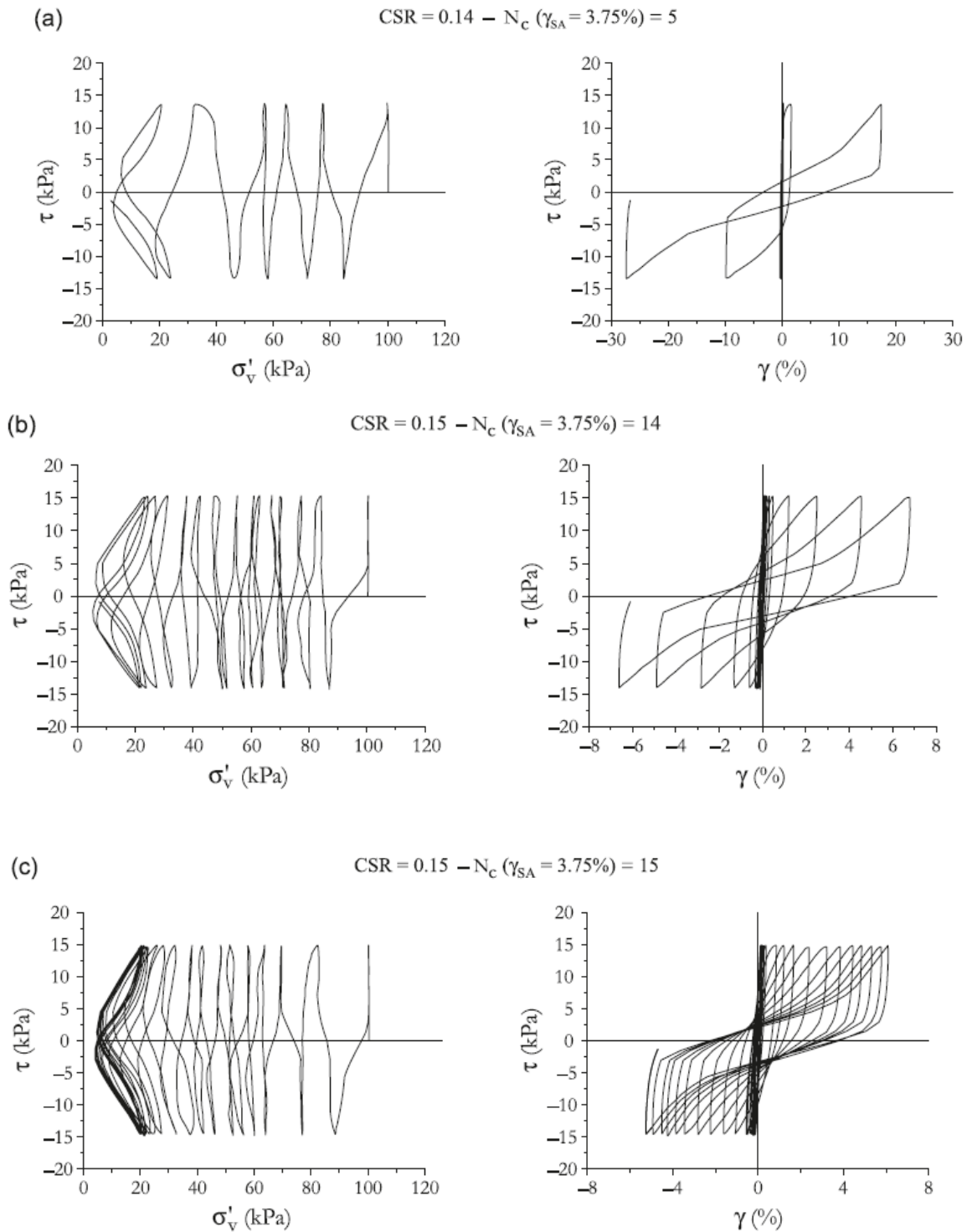
Σχήμα 3. 16 Περιβάλλουσα αστοχίας στη στην κρίσιμη κατάσταση σε διάγραμμα $q-p'$ για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al., 2012).

Για να διερευνήσουν τη διαστολικότητα των σταθεροποιημένων δοκιμίων οι Porcino et al., (2012) χρησιμοποίησαν διαγράμματα τάσεων-διαστολικότητας. (Σχήμα 3.17). Στο διάγραμμα απεικονίζεται ο λόγος των τάσεων (αποκλίνουσα τάση προς τη μέση ενεργό τάση, q/p') σε σχέση με το λόγο της διαστολικότητας (προσαυξητική ογκομετρική παραμόρφωση προς την προσαυξητική αξονική παραμόρφωση, de_{vol}/de_a) κατά τη διάρκεια της διάτμησης του δοκιμίου. Σε πολύ χαμηλές τάσεις στερεοποίησης ($p'_c=20kPa$), ο μέγιστος λόγος τάσεων και η μέγιστη διαστολικότητα δεν πραγματοποιούνται στην ίδια αξονική παραμόρφωση. Σύμφωνα με τους Porcino et al., (2012) αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τσιμεντοποίηση παρεμποδίζει την εμφάνιση των πλαστικών παραμορφώσεων και της συσχετιζόμενης διαστολικότητας, καθυστερώντας την εμφάνιση της μέγιστης διαστολικότητας. Μετά την ανάπτυξη του μέγιστου λόγου τάσεων, ακολουθεί μια σταδιακή αποδόμηση των δεσμών που επιτρέπει το ξεκλείδωμα των κόκκων και οδηγεί στην ταχεία αύξηση της διαστολικότητας. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου που έχουν υψηλότερες τάσεις στερεοποίησης καθώς και τα φυσικά δοκίμια άμμου παρουσιάζουν το μέγιστο λόγο τάσεων και τη μέγιστη διαστολικότητα στην ίδια αξονική παραμόρφωση.

Η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων και φυσικών δοκιμίων από τις αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης των Porcino et al. (2012), απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18. Το φυσικό δοκίμιο μικρής πυκνότητας παρουσιάζει γρήγορα μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις και ρευστοποιείται μετά από λίγους κύκλους φόρτισης ($N_f=5$). Το σταθεροποιημένο δοκίμιο μικρότερης πυκνότητας, δεν καταρρέει και διατηρεί ένα χαμηλό επίπεδο ανάπτυξης διατμητικών παραμορφώσεων ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου με πυριτία χαλαρού δοκιμίου ($I_r=45\%$) προσομοιάζει τη συμπεριφορά του πυκνού φυσικού δοκιμίου ($I_r=75\%$). Αυτό ίσως οφείλεται στην αυξημένη διαστολή που προκύπτει από το σπάσιμο των δεσμών, όπως υποστηρίζουν οι ερευνητές.

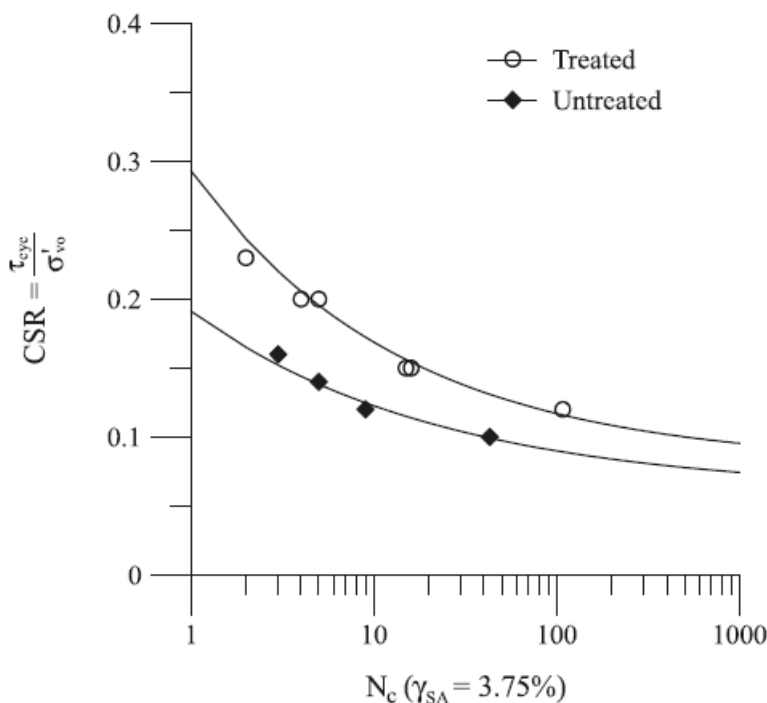


Σχήμα 3.17 Συσχέτιση λόγου τάσεων-διαστολικότητας για (a) σταθεροποιημένο δοκίμιο με χαμηλή τάση στερεοποίησης (b) σταθεροποιημένο δοκίμιο με υψηλή τάση στερεοποίησης και (c) φυσικό δοκίμιο με υψηλή τάση στερεοποίησης (Porcino et al., 2012).

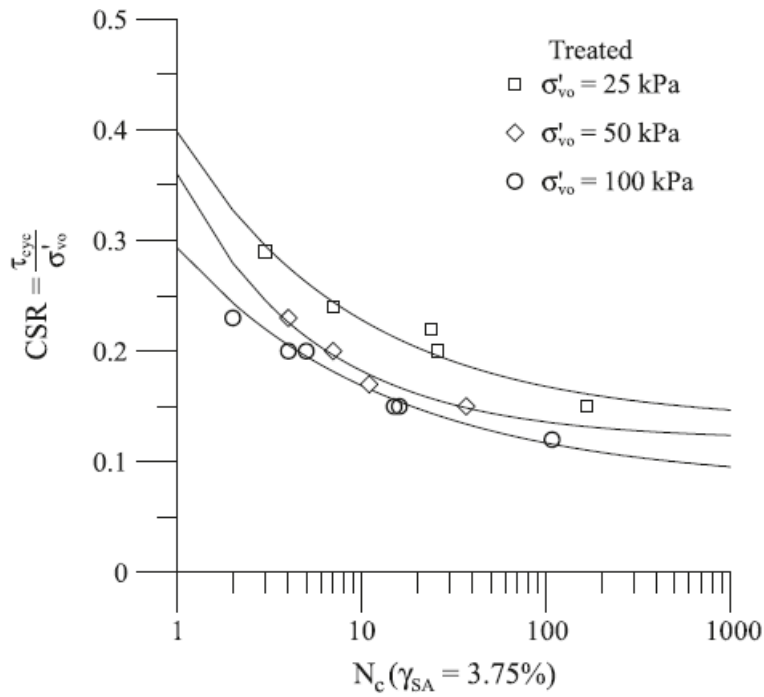


Σχήμα 3. 18 Συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων και διαδρομές ενεργών τάσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε (a) χαλαρό φυσικό, (b) χαλαρό σταθεροποιημένο και (c) πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου (Porcino et al., 2012).

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης ($CSR = \tau_{eye} / \sigma'_{v0}$) σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης (N_c) που απαιτούνται για να επέλθει η ρευστοποίηση του δοκιμίου ($q_{SA} = 3.75\%$) για σταθεροποιημένα χαλαρά και φυσικά χαλαρά δοκίμια άμμου με αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{v0} = 100$ kPa από αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρέχουν μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση υπό ανακυκλική φόρτιση από τα φυσικά δοκίμια. Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζονται οι καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για σταθεροποιημένα δοκίμια με διάφορες αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις στερεοποίησης ($\sigma'_{v0} = 25, 50$ και 100 kPa). Παρατηρείται ότι η καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση των δοκιμίων με τη μικρή ενεργό τάση ($\sigma'_{v0} = 25$ kPa) βρίσκεται υψηλότερα και η καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση των δοκιμίων με την υψηλή ενεργό τάση ($\sigma'_{v0} = 100$ kPa) βρίσκεται χαμηλότερα υποδεικνύοντας την μεγάλη εξάρτηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων από την αρχική κατακόρυφο ενεργό τάση.



Σχήμα 3. 19 Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου TS (Porcino et al.,2012).



Σχήμα 3. 20 Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου TS με διάφορες αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις (Porcino et al.,2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΜΜΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέστηκαν στην παρούσα εργασία. Αρχικά, περιγράφονται τα υλικά, (άμμος M31 και κολλοειδής πυριτία) και οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των δοκιμών. Επιπλέον, γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο προετοιμασίας των δοκιμών και περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας διατριβής διακρίνεται σε πέντε μέρη: τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (CD) για την άμμο M31, τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (CD) για τη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31, τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες (CU) για την άμμο M31, τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες (CU) για τη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 και τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UCS) για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Στις επόμενες ενότητες γίνεται η ανάλυση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παραπάνω δοκιμών. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά στην επίδραση της πυκνότητας, της ενεργού τάσης και του χρόνου ωρίμανσης στη μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών. Ακόμη, εξετάζεται η επίδραση της επιβολής αντιπίεσης (back pressure) και ο βέλτιστος ρυθμός αύξησης της πλευρικής τάσης στο στάδιο του κορεσμού για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης (CS=10%) στις χαρακτηριστικές καταστάσεις συμπεριφοράς των εδαφών, δηλαδή στην αλλαγή φάσης (phase transformation), στην κατάσταση μέγιστης αντοχής (peak strength) και στην κρίσιμη κατάσταση (critical state).

4.2 ΦΥΣΙΚΑ ΕΛΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Στα πειράματα που εκτελούνται στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιείται εργαστηριακή άμμος και όχι εδαφικό υλικό που μπορούμε να συλλέξουμε από το φυσικό περιβάλλον. Αυτά τα εργαστηριακά 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.

4.2.1. Η άμμος M31

Η ανάλυση στο μικροσκόπιο 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, ενώ ένα ποσοστό 5-10% είναι γαλακτόχρωμοι (ημιδιαφανείς). Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται φωτογραφίες από το μικροσκόπιο της άμμου M31. Στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της άμμου M31 με διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω.

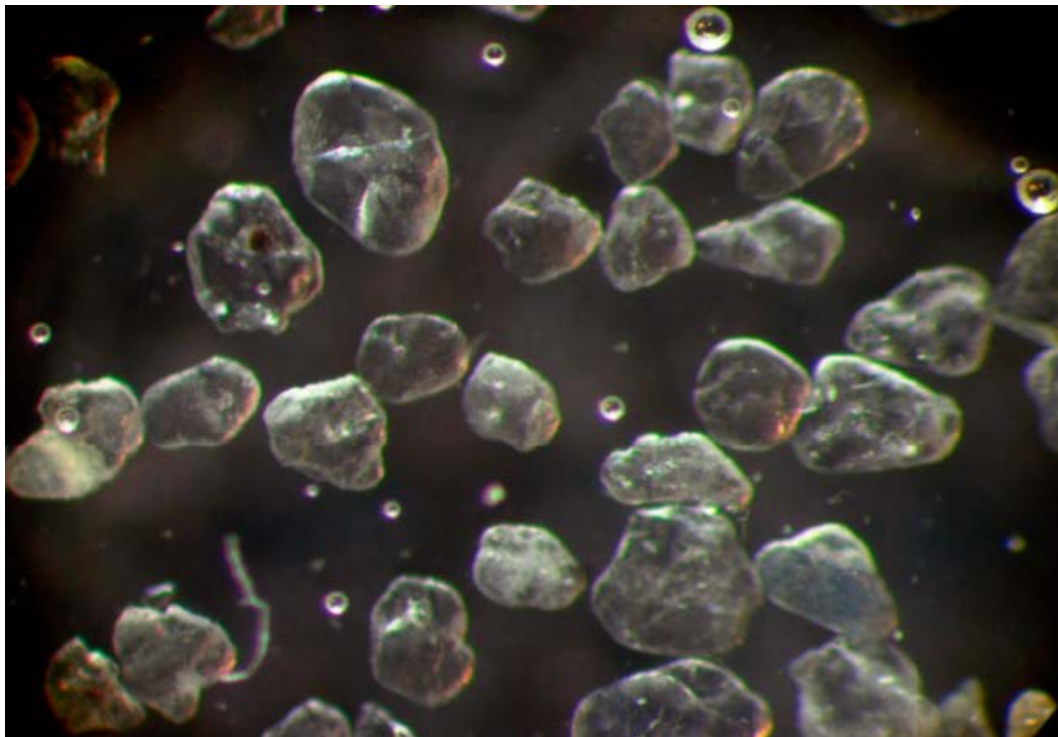
Ο μέγιστος δείκτης πόρων e_{max} , δηλαδή η χαλαρότερη δομή της άμμου M31 προσδιορίστηκε με βάση την μέθοδο του Kolbuszewski, (1948). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η διαδικασία έχει ως εξής: σε γυάλινο δοκιμαστικό σωλήνα χωρητικότητας 1lt αποτίθενται περίπου 500gr ξηρής άμμου και στο ελεύθερο άκρο σωλήνα τοποθετείται ελαστικό κάλυμμα. Ο δοκιμαστικός σωλήνας αναταράσσεται μερικές φορές μαζί με την άμμο και αναποδογυρίζεται. Κατόπιν και πολύ γρήγορα με μια κίνηση, αναποδογυρίζεται και πάλι και επιστρέφει στην κανονική του θέση. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τουλάχιστον 5 φορές και καταγράφεται ο μέγιστος όγκος του δοκιμίου (που αντιστοιχεί και στην χαλαρότερη δομή) με βάση την ένδειξη του δοκιμαστικού σωλήνα. Μέσω του όγκου του δοκιμίου, του G_s και του βάρους της

άμμου υπολογίζεται ο μέγιστος δείκτης πόρων e_{max} . Με βάση την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι η τιμή του μέγιστου δείκτη πόρων της καθαρής άμμου M31 $e_{max} = 0,844$.

Ο ελάχιστος δείκτης πόρων e_{min} , δηλαδή η πυκνότερη δομή της άμμου M31 προσδιορίστηκε ως εξής: Σε ειδικό δοχείο κυλινδρικού σχήματος αποτίθεται σε τρεις διαδοχικές στρώσεις η εξεταζόμενη άμμος. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με συνεχή χτυπήματα της άμμου (100 περίπου ανά στρώση), από ειδικό χειροκίνητο όργανο. Στη συνέχεια καταγράφεται ο συνολικός όγκος του δοκιμίου και ζυγίζεται το βάρος του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Μέσω του όγκου του δοκιμίου, του G_s και του βάρους της άμμου υπολογίζεται ο ελάχιστος δείκτης πόρων που προέκυψε για την άμμο M31 $e_{min}=0,504$.

Το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων μιας άμμου επηρεάζουν σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά της και για τον λόγο αυτό μελετώνται ξεχωριστά στα πλαίσια της διαδικασίας εύρεσης της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 σε αυτή την διπλωματική εργασία προσδιορίστηκε με την βοήθεια κοσκίνων διαφορετικής διαμέτρου οπής σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στα British Standards 1377 (BS1377). Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν για τα εξεταζόμενα υλικά περιγράφονται στον Πίνακα 4.1. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 όπως προέκυψε μετά από την παραπάνω πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο.

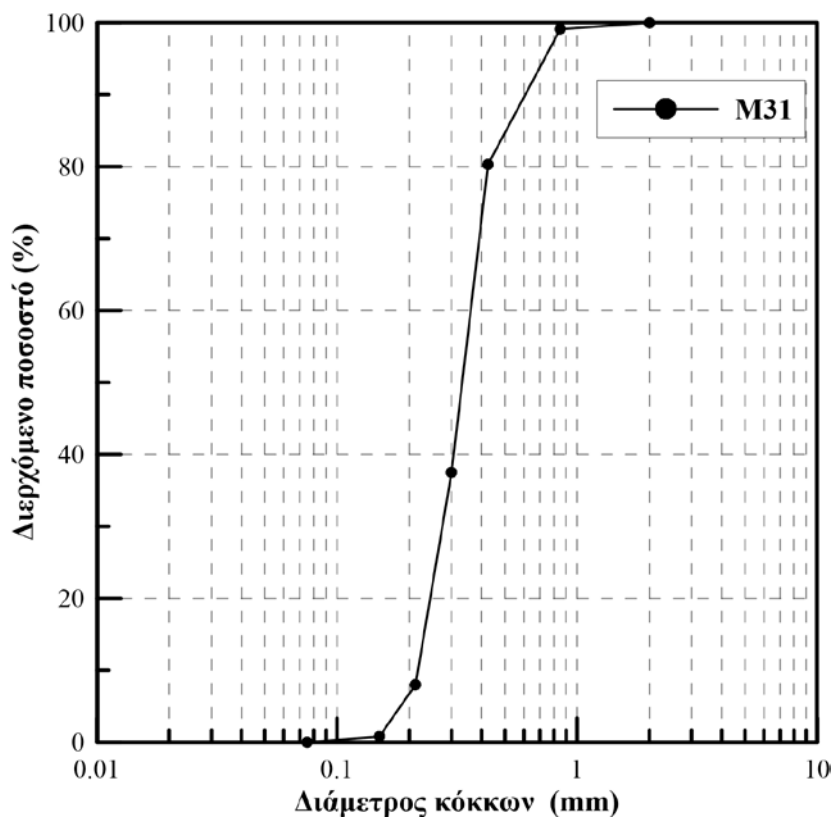
Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα εδαφικά χαρακτηριστικά της άμμου M31. Το ειδικό βάρος προκύπτει $G_s=2.66$, ενώ ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών προκύπτουν $e_{max}=0.844$ και $e_{min}=0.505$ αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι $D_{10}=0.218$ mm, $D_{30}= 0.275$ mm, $D_{60}=0.361$ mm και $C_u=1.65$. Επιπλέον προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διαπερατότητας στο εύρος $k=(1.09-3.40)*10^{-4}$ m/s (Πίνακας 4.2).



Σχήμα 4. 1 Εικόνα κόκκων χαλαζιακής άμμου M31 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Georgiannou and Konstadinnou ,2014).

Πίνακας 4. 1 Χαρακτηριστικά κόσκινων

Ονομασία κόσκινου	Διάμετρος οπής κόσκινου (mm)
No 10	2.000
No 20	0.850
No 40	0.425
No 50	0.300
No 70	0.212
No 100	0.150
No 200	0.075



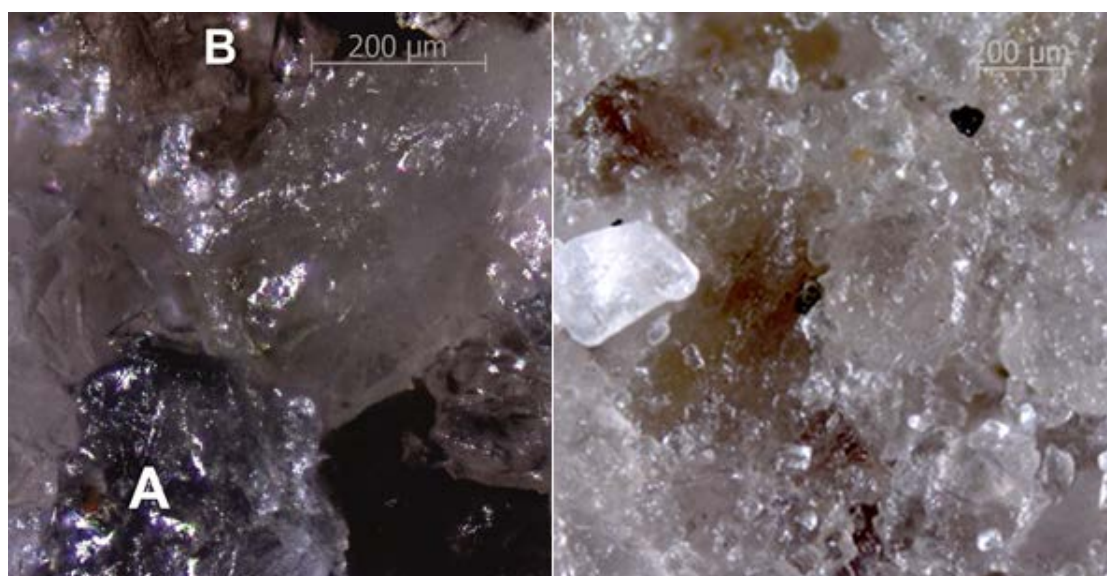
Σχήμα 4. 2 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31

Πίνακας 4. 2 Χαρακτηριστικά της άμμου M31

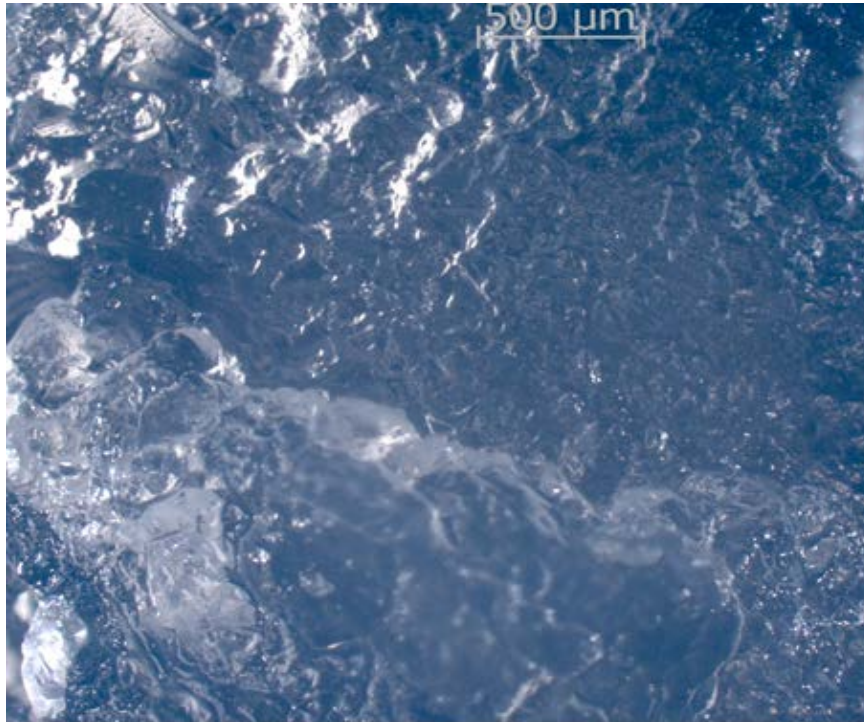
G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10} : mm	D_{30} : mm	D_{60} : mm	C_u
2.66	0.844	0.505	0.218	0.275	0.361	1.65

4.3. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΛΑΦΗ

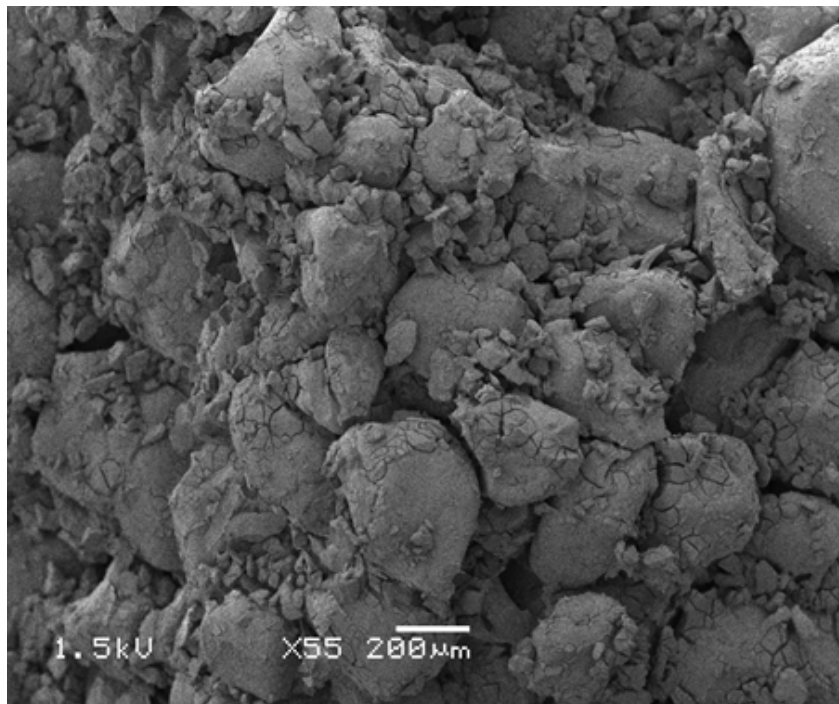
Για να παρατηρήσουμε σε μικροσκοπική κλίμακα το υλικό της κολλοειδούς πυριτίας και να κατανοήσουμε τον τρόπο που συνδέεται με το φυσικό έδαφος, δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας και σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία ιλυώδους άμμου παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του ΕΜΠ και του Imperial 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 M31, σε φωτογραφία από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του Imperial College London. Παρατηρούμε στην αριστερή φωτογραφία τους κόκκους άμμου, σημεία A και B, που ξεχωρίζουν και το υγρόλυμα ανάμεσα στις επαφές των κόκκων. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η μορφή του υγρολύματος (hydrogel) με CS=10% όπως αυτή προκύπτει από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Στη συνέχεια μελετήσαμε ένα δείγμα σταθεροποιημένης άμμου, CS=10%, που είχε υποστεί ξήρανση (air-dried xerogel). Διαπιστώσαμε ότι οι κόκκοι του εδάφους έχουν καλυφθεί σε όλη τους την έκταση από κολλοειδή πυριτία (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.3 Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 4. 4 Φωτογραφία υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 4. 5 Φωτογραφία ξηραμένου δείγματος σταθεροποιημένης άμμου από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

4.3.1 Τριαξονική Δοκιμή Θλίψης

Η ονομασία της δοκιμής αυτής υποδηλώνει τη θεώρηση τριών ανεξάρτητων κάθετων μεταξύ τους αξόνων. Στη συνήθη τριαξονική δοκιμή όμως, οι δύο ως προς το οριζόντιο επίπεδο άξονες ταυτίζονται. Η δοκιμή αυτή καλύπτει τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων ψαθυρών ή συνεκτικών εδαφών, σε αδιατάρακτη κατάσταση, ή ύστερα από αναζύμωση, για διάφορες συνθήκες στράγγισης. Παρέχει επομένως, τα δεδομένα για τον υπολογισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (γωνία εσωτερικής τριβής και συνοχή) και τις σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης των εδαφών.

Η δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης είναι ένα πολύπλοκο πείραμα της Εδαφομηχανικής έχει όμως σοβαρά επιστημονικά πλεονεκτήματα: Έχουμε σαφή εικόνα της εντατικής κατάστασης του δοκιμίου γιατί έχουμε τη δυνατότητα να μετρήσουμε όχι μόνο τις επιβαλλόμενες τάσεις, αλλά και την πίεση του νερού των πόρων. Επιπλέον, η μέτρηση της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι πολύ ακριβής. Το δοκίμιο δέχεται ομοιόμορφα κατανεμημένες τάσεις και αποφεύγεται η επίδραση άλλων παραγόντων. Τέλος, η συσκευή προσαρμόζεται εύκολα σε ειδικές απαιτήσεις κάθε πειράματος και διευκολύνεται πολύ η έρευνα.

Σε αυτή τη δοκιμή, ένα κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους, που περιβάλλεται με μία ελαστική μεμβράνη και στη συνέχεια από νερό μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένο θάλαμο πίεσης, υποβάλλεται σε ομοιόμορφη πλευρική πίεση. Στη συνέχεια το δοκίμιο υφίσταται κατακόρυφη αυξανόμενη σταδιακά φόρτιση. Για να καθορίσουμε εντελώς τη δοκιμή πρέπει να γνωρίζουμε τις αρχικές συνθήκες των εφαρμοζόμενων τάσεων καθώς επίσης και τις συνθήκες στράγγισης κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Ανάλογα με τις συνθήκες στράγγισης διακρίνουμε δύο βασικούς τύπους δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας: δοκιμή με στερεοποίηση χωρίς ελεύθερη στράγγιση με μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων (CU) και δοκιμή με στερεοποίηση και ελεύθερη στράγγιση (CD).

4.3.2 Τριαξονικές συσκευές του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής

Στην παρούσα εργασία, για τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων (high pressure triaxial apparatus) του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Σχήμα 4.6). Η συσκευή αυτή είναι κατάλληλη για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς στιφρών εδαφών με χρήση δοκιμίων διαμέτρου 50, 75 και 100mm . Η μέγιστη πίεση κυψέλης είναι 7 MPa και το αξονικό φορτίο 50 kN . Η διακριτότητα στη μέτρηση πιέσεων είναι 0.1 kPa (για πίεση κυψέλης έως 4 MPa) και 0.5 kPa για μεγαλύτερες πιέσεις. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μια κλασική τριαξονική συσκευή του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής (Σχήμα 4.7). Η μέγιστη πίεση κυψέλης είναι 1.7 MPa και το αξονικό φορτίο 8 kN. Η μεταβολή της αξονικής τάσης επιτυγχάνεται με επιβολή σχετικής μετακίνησης του εμβόλου φόρτισης με σταθερό ρυθμό. Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με μετρητές αξονικών παραμορφώσεων επί του δοκιμίου, (LVDTs) για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων αποφεύγοντας τα λάθη που οφείλονται στην ευθυγράμμιση και το βαθμό επαφής των άκρων καθώς και στη συμπίεση του υλικού των άκρων, του μετρητή φορτίου και γενικά των τμημάτων της συσκευής που παρεμβάλλονται στη γραμμή μέτρησης της σχετικής μετακίνησης. Επιπλέον με τους εσωτερικούς μετρητές είναι δυνατή η μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου ακόμη και όταν δεν μεταβάλλεται η αξονική τάση με την επιβολή της μετακίνησης, δηλαδή στο στάδιο του κορεσμού και της ισότροπης στερεοποίησης. Οι εσωτερικοί μετρητές επί του δοκιμίου απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8 πριν ξεκινήσει το πείραμα τριαξονικής θλίψης.

4.3.3 Προετοιμασία και διαμόρφωση δοκιμίων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής των σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία δοκιμίων άμμου της παρούσας εργασίας. Τα δοκίμια άμμου M31 παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση του εδαφικού ξηρού υλικού σε απαερωμένο νερό (water pluviation). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την παρασκευή ομοιόμορφων δοκιμίων με δομή που προσομοιάζει τη δομή των των εδαφικών υλικών στη φύση (Vaid et al., 1999). Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν

με εμφάνιση του ξηρού εδαφικού υλικού (άμμος M31) στο υγρόλυμα πυριτίας. Το υγρόλυμα πυριτίας παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας κolloειδή πυριτία, τύπου Ludox-SM, σε μορφή διαλύματος με κατά βάρος συγκέντρωση 30% CS. Το pH του αρχικού διαλύματος είναι 10.0 και το ιξώδες του 5.5 Cp (Dupont, 1997). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η μελέτη σταθεροποιημένων δοκιμίων με ποσοστό σταθεροποιητή CS=10% κατά βάρος. Για να επιτευχθεί αυτή η συγκέντρωση, προστίθεται στο αρχικό διάλυμα πυριτίας απεσταγμένο νερό. Επιπλέον, χλωριούχο νάτριο, NaCl, και υδροχλωρικό οξύ, HCl, κανονικότητας N=6 προστίθενται στο διάλυμα για να ρυθμίσουν την τιμή της ιοντικότητας σε 0.03 N και την τιμή του pH σε 6. Υπό αυτές τις συνθήκες ο χρόνος γέλης, που ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την αύξηση του ιξώδους σε 100 cP, υπολογίστηκε ότι είναι 10 ώρες (Agaroulaki and Padimitriou, 2015). Το διάλυμα αναδεύεται ενδελεχώς μέχρι να γίνει ομοιογενές και ελέγχεται αν η θερμοκρασία και το pH του έχουν τις επιθυμητές τιμές. Στη συνέχεια το υγρόλυμα πυριτίας διοχετεύεται σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια και γίνεται η εμφάνιση του ξηρού εδαφικού υλικού σε αυτό. Τα δοκίμια αφήνονται να ωριμάσουν στα καλούπια υπό αεροστεγείς συνθήκες σε θερμοκρασία δωματίου για χρονικό διάστημα πενταπλάσιο του χρόνου γέλης, δηλαδή περίπου 50 ώρες. Αφού επέλθει αυτό το χρονικό διάστημα αφαιρείται το καλούπι και η μεμβράνη που περιέβαλλε το δοκίμιο και μετρώνται οι διαστάσεις του (διάμετρος ~50 mm και ύψος ~100mm). Το σταθεροποιημένο δοκίμιο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9. Οι σχετικές αρχικές πυκνότητες των δοκιμίων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 ήταν στο εύρος $D_r = 30-50\%$.

4.3.4 Πειραματική διαδικασία

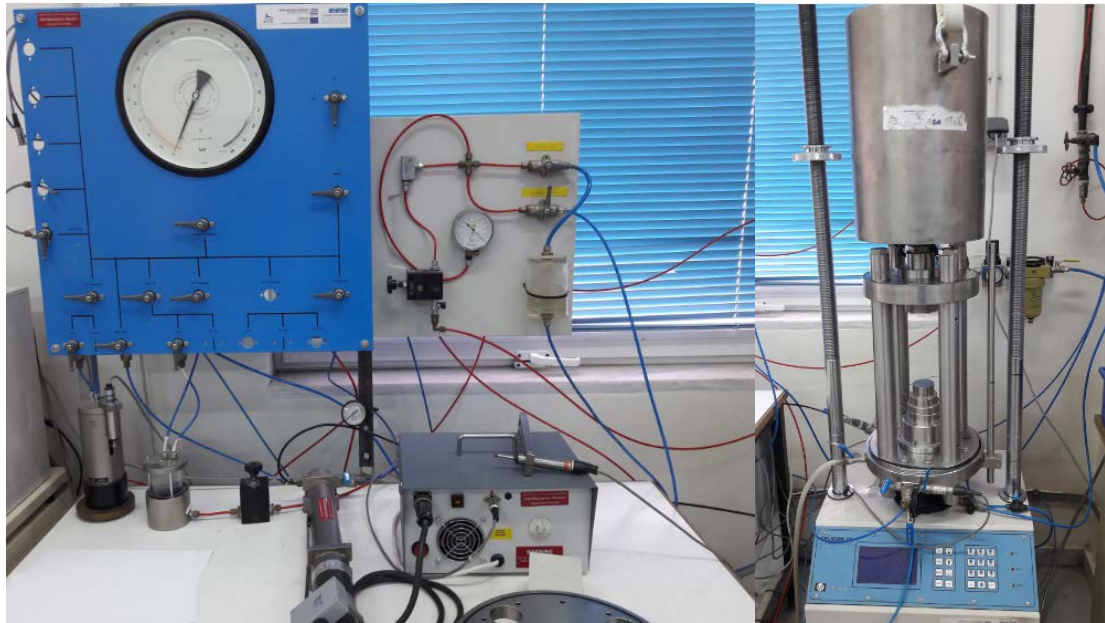
Πριν από κάθε δοκιμή προηγήθηκε το στάδιο του κορεσμού. Στα δοκίμια άμμου επιβλήθηκαν υψηλές τιμές αντιπίεσης (back pressure) 700 kPa. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια επιβλήθηκε ένα εύρος τιμών αντιπίεσης (300-700 kPa) για να ελεγχθεί πιθανός τραυματισμός του gel της πυριτίας, όπως θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα. Μετά την επιβολή των επιθυμητών πιέσεων τα σταθεροποιημένα δοκίμια αφήνονται σε ηρεμία για 24 ώρες. Στη συνέχεια, σε κάθε δοκιμή υπολογίζεται η παράμετρος Skempton ($B = \Delta u / \Delta \sigma_3$) για να ελεγχθεί ο κορεσμός. Συγκεκριμένα, ο κορεσμός ελέγχεται με τον εξής τρόπο: κλείνει η βαλβίδα αποστραγγίσεως και αυξάνεται η

πλευρική πίεση. Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων που προκαλείται, καταγράφεται από τη συσκευή μέτρησης της πίεσης των πόρων. Αν το Β απέχει αρκετά από τη μονάδα τότε η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την τιμή περίπου 0.97, οπότε και θεωρείται ότι το δοκίμιο είναι κορεσμένο.

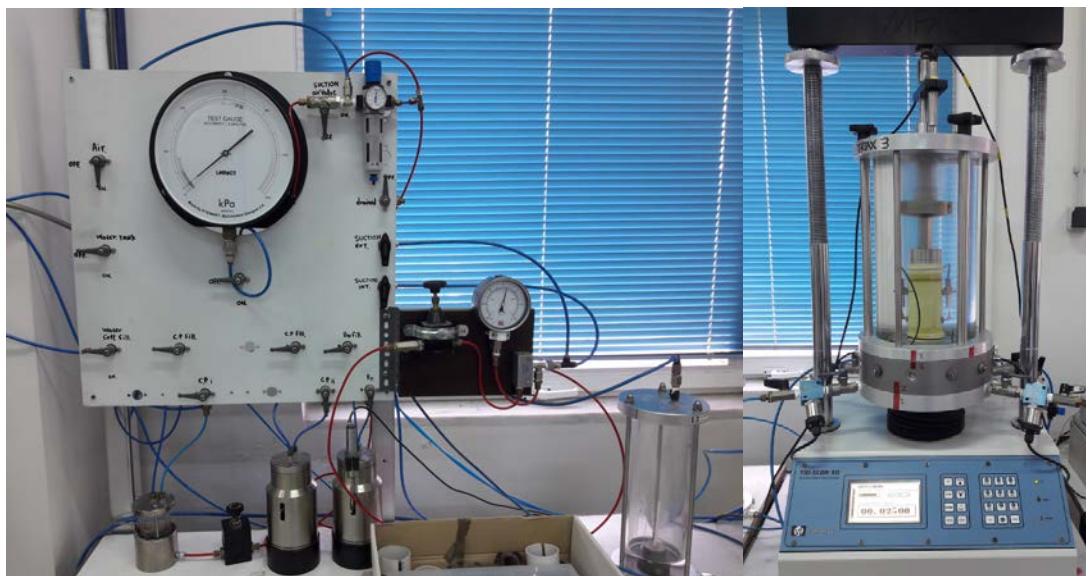
Ακολουθεί το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, στο οποίο αυξάνεται σταδιακά, με συγκεκριμένο ρυθμό η πίεση της κυψέλης και το δοκίμιο αφήνεται να στραγγίσει κάτω από τη συγκεκριμένη πλευρική πίεση σ_3 για 24 ώρες. Για τα σταθεροποιημένα δοκίμια ελέγχθηκε ο ρυθμός αύξησης της πλευρικής, όπως αναφέρεται σε επόμενη ενότητα. Η επίδραση της αρχικής τάσης στερεοποίησης στη μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων εξετάστηκε ενδελεχώς καθώς εκτελέστηκαν δοκιμές με διάφορες αρχικές τάσεις ισότροπης στερεοποίησης ($p'_i=100$ έως 2000 kPa). Στις τριαξονικές δοκιμές, μετά τη φάση της στερεοποίησης οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι μικρότερες από τις αρχικές, εφόσον ο όγκος του μειώθηκε. Οι νέες διαστάσεις μπορούν να προσδιοριστούν θεωρώντας ότι το δοκίμιο παραμένει κυλινδρικό και η συμπεριφορά του υλικού είναι ισοτροπική. Αξιοποιώντας τις μετρήσεις των εσωτερικών μετρητών υπολογίζουμε το νέο ύψος του δοκιμίου. Η ποσότητα νερού που αποστραγγίζεται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης καταγράφεται από κατάλληλη συσκευή, με τις μετρήσεις της υπολογίζουμε το νέο όγκο και το νέο δείκτη πόρων.

Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της διάτμησης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης και τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με αργή ταχύτητα φόρτισης (ρυθμό διάτμησης) 0,025 mm/min ώστε το σταθεροποιημένο δοκίμιο να προλαβαίνει να στραγγίξει ομοιόμορφα στις στραγγιζόμενες δοκιμές ή να αναπτύξει τις πιέσεις πόρων καθ' όλο το ύψος του δοκιμίου στις αστράγγιστες δοκιμές. Στο στάδιο της διάτμησης, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρητών (αξονικό φορτίο, πίεση κυψέλης, αντιπίεση, αξονική μετακίνηση, και μεταβολή όγκου) υπολογίζουμε την πορεία της αποκλίνουσας τάσης q , της μέσης ενεργού τάσης p' , της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a , της υπερπίεσης πόρων Δu και του δείκτη πόρων e . Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγουμε τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν.

Επιπρόσθετα, εκτελέστηκαν και μερικές δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια με διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης για να προσδιοριστεί η τιμή της αντοχής των δοκιμίων σε ανεμπόδιστη θλίψη, αλλά και η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης.



*Σχήμα 4. 6 Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του εργαστηρίου Πειραματικής
Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ*



*Σχήμα 4. 7 Τριαξονική συσκευή του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής
του ΕΜΠ*



Σχήμα 4. 8 Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs).



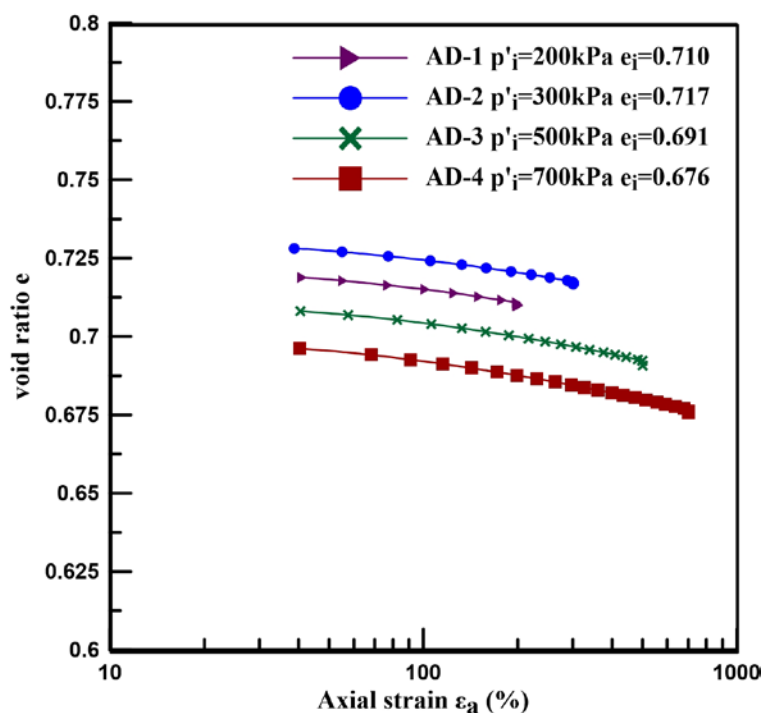
Σχήμα 4. 9 Φωτογραφία σταθεροποιημένου δοκιμίου πριν την τοποθέτησή του στην τριαξονική συσκευή.

4.4 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ M31

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε δοκίμια άμμου M31. Τα δεδομένα αυτών των δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3. Για κάθε δοκιμή δίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων στο στάδιο του κορεσμού, της στερεοποίησης και της μονοτονικής φόρτισης. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες στην άμμο M31 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π-1, υπό μορφή διαγραμμάτων $q/p' - \varepsilon_a$, $q - \varepsilon_a$, $\varepsilon_{vol} - \varepsilon_a$. Σε όλες τις μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης στο στάδιο του κορεσμού επιβλήθηκε αντιπίεση (back pressure) 700 kPa και η παράμετρος Skempton προκύπτει $B > 0.97$ υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμών άμμου. Τα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχικές ενεργές τάσεις $p'_i = 200, 300, 500$ και 700 kPa και αφέθηκαν σε ηρεμία για 1,5 ώρα. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμών έχουν εύρος τιμών $D_r = 40-50\%$. Το διάγραμμα στερεοποίησης $e - \log p'$ των παραπάνω δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Παρατηρείται ότι οι ευθείες είναι παράλληλες στην ημιλογαριθμική κλίμακα.

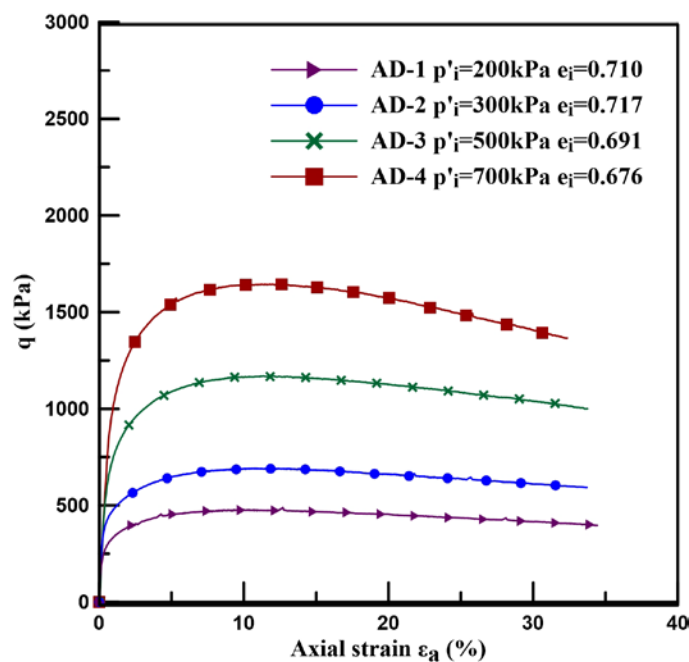
Πίνακας 4. 3 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης άμμου M31

Δοκιμή	Τύπος	e_i	e_p	$D_r : \%$	p'_i	q/p'_{max}	$u_0 : kPa$
AD-1	TR-D	0.710	0.716	39.52	200	1.33	700
AD-2	TR-D	0.717	0.718	37.46	300	1.30	700
AD-3	TR-D	0.691	0.693	45.13	500	1.31	700
AD-4	TR-D	0.676	0.681	49.55	700	1.32	700



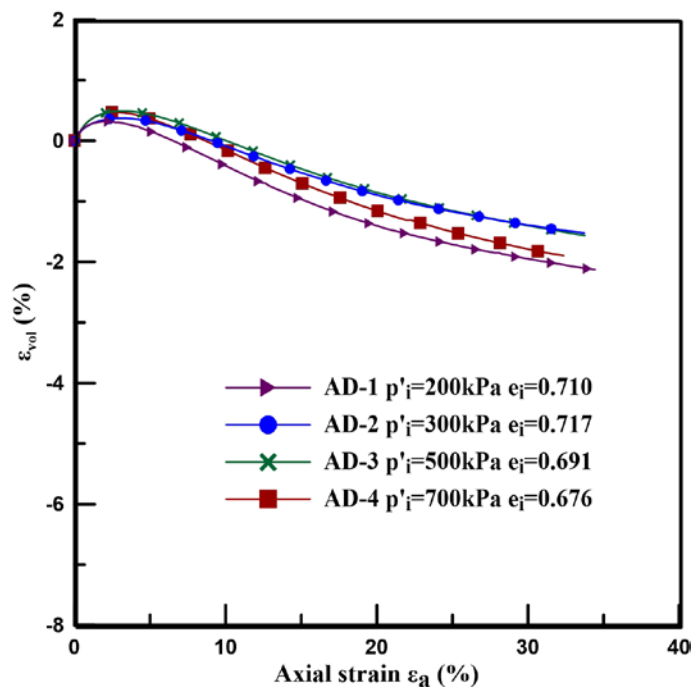
Σχήμα 4. 10 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης $e-p'$ άμμου M31

Αφού ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, η άμμος M31 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων $q-\epsilon_a$ φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.11 για τα δοκίμια άμμου M31 πυκνότητας $D_r=40-50\%$ για τις διάφορες ενεργές τάσεις. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η ογκομετρική συμπεριφορά των δοκιμίων άμμου. Παρατηρείται αρχικά συστολική συμπεριφορά μέχρι να αναπτυχθεί αξονική παραμόρφωση περίπου $\epsilon_a=2.5\%$ και μετά παρατηρείται διαστολική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ο λόγος τάσεων q/p' σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση. Ο μέγιστος λόγος προκύπτει 1,32 σε αξονική παραμόρφωση $\epsilon_a=10\%$ περίπου. Στην κρίσιμη κατάσταση ο λόγος τάσεων σταθεροποιείται σε τελική τιμή $q/p'=1.20$. Η γωνία διατμητικής αντοχής στη μέγιστη αντοχή προκύπτει $\phi_p=32.5^\circ$ και στην τελική κατάσταση $\phi_u=29.8^\circ$. Η γωνία αλλαγής φάσης υπολογίζεται σε $\phi_{PTL}=29,8^\circ$. Παρατηρούμε ότι, σε καμία δοκιμή δεν προέκυψε εμφανής συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων σε επίπεδο (shear band). Η αστοχία εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (bulging) που προσδίδει στο δοκίμιο μορφή βαρελιού όπως διαφαίνεται και στο Σχήμα 4.6.



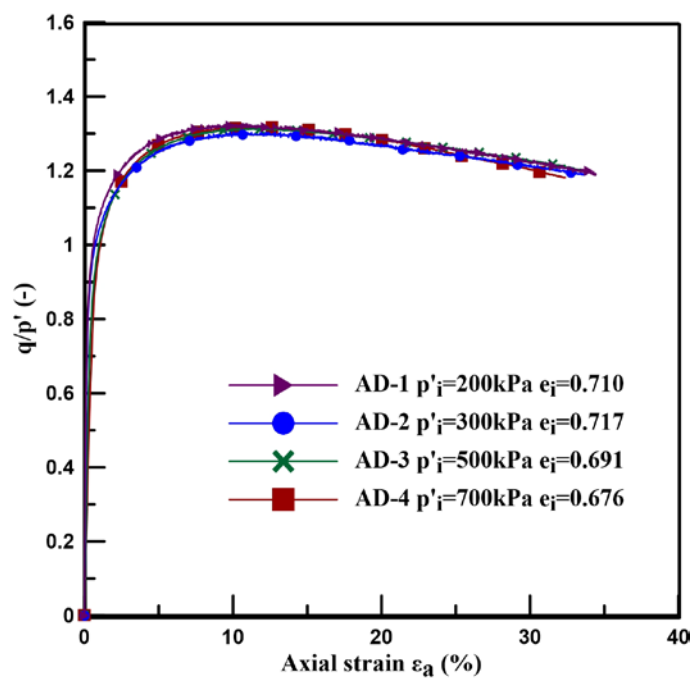
Σχήμα 4. 11 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης.

Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.



Σχήμα 4. 12 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης.

Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4. 13 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Καμπύλες λόγου τάσεων- παραμορφώσεων.



Σχήμα 4. 14 Αστοχία δοκιμίου που εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (bulging).

4.5 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΑΜΜΟ Μ31

4.5.1. Εισαγωγή

Στη δεύτερη κατηγορία πειραμάτων ανήκουν τα δοκίμια άμμου Μ31 που έχουν σταθεροποιηθεί με κολλοειδή πυριτία σε ποσοστό 10% κατά βάρος, είναι ηλικίας 50 ωρών και υποβλήθηκαν σε μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης. Τα δοκίμια που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα έχουν στερεοποιηθεί ισότροπα σε ένα εύρος τάσεων $p'_i=100-2000$ kPa με τιμές του δείκτη πόρων μετά το στάδιο της στερεοποίησης $e_i=0,673-0,748$. Τα στοιχεία των πειραμάτων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.4. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες στη σταθεροποιημένη άμμο Μ31 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π-2, υπό μορφή διαγραμμάτων $q/p'-\varepsilon_a$, $q-\varepsilon_a$, $\varepsilon_{vol}-\varepsilon_a$.

Πίνακας 4. 4 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης σταθεροποιημένης άμμου Μ31

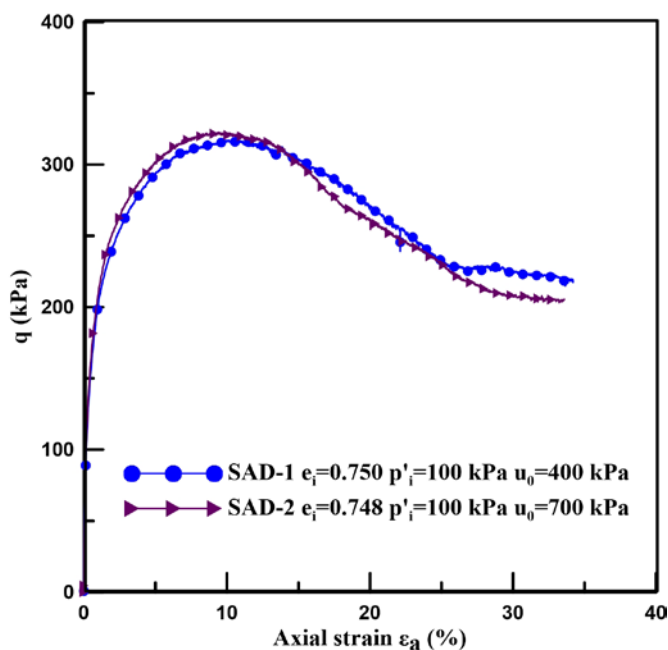
Δοκιμή	Τύπος	e_i	e_p	D_r :%	p'_i :kPa	q/p'_{max}	u_0 :kPa
SAD-1	TR-D	0.750	0.793	27.78	100	1.56	300
SAD-2	TR-D	0.748	0.795	28.32	100	1.56	700
SAD-3	TR-D	0.744	0.775	29.45	100	1.55	700
SAD-4	TR-D	0.751	0.774	32.15	200	1.53	700
SAD-5	TR-D	0.742	0.769	30.09	300	1.47	700
SAD-6	TR-D	0.722	0.742	35.99	500	1.45	700
SAD-7	TR-D	0.711	0.724	39.23	700	1.42	700
SAD-8	TR-D	0.685	0.697	46.9	1000	1.41	700
SAD-9	TR-D	0.673	0.662	50.44	2000	1.35	700

4.5.2. Επίδραση του κορεσμού

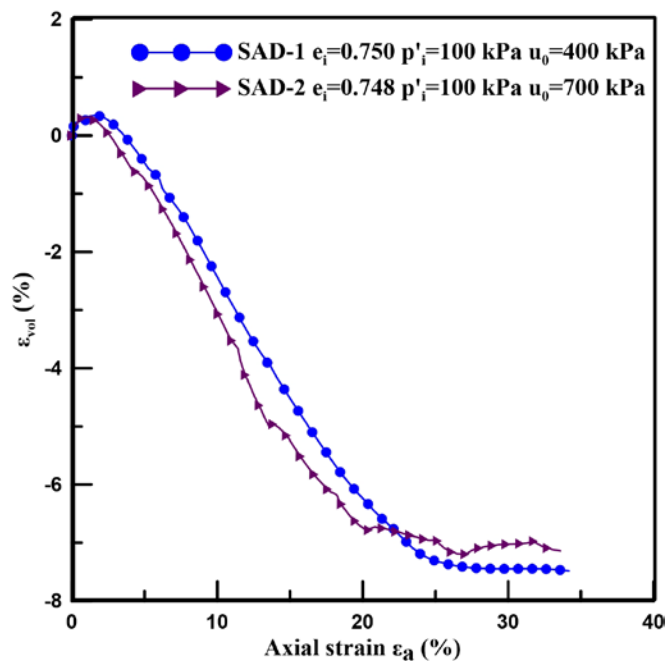
Τα δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της ωρίμανσης μεταφέρθηκαν από τα καλούπια στην τριαξονική συσκευή. Ακολούθησε το στάδιο του κορεσμού του δοκιμίου ώστε να διαλυθεί ο εγκλωβισμένος αέρας στο εσωτερικό του δοκιμίου, σε τμήματα του εξοπλισμού (πορόλιθοι, σωληνώσεις) αλλά και στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τη μεμβράνη. Επισημαίνεται ότι σε προηγούμενες εργαστηριακές μελέτες (Gallagher and Mitchell, 2002; Diaz Rodriguez et al., 2008) παραλείφθηκε το στάδιο του κορεσμού γιατί οι μελετητές θεωρούσαν ότι η επιβολή της αντιπίεσης θα διατάρρασε ή θα κατέστρεφε τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Επειδή όμως, ο κορεσμός του δοκιμίου είναι απαραίτητος για την αποφυγή σφαλμάτων στις μετρήσεις των μεταβολών του όγκου και της πίεσης του ύδατος των πόρων, στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε το στάδιο του κορεσμού σε κάθε δοκιμή.

Για να εξεταστεί η επίδραση της αύξησης της τιμής αντιπίεσης στους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτία εκτελέστηκαν δύο πειράματα με διαφορετικές τιμές back pressure (300 και 700 kPa). Τα δύο δοκίμια είχαν αρχικό δείκτη πόρων 0,750 και 0,748. Στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση $p'_i=100\text{kPa}$ και φορτίστηκαν με ρυθμό διάτμησης 0,005 mm/min. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε διαγράμματα $q-\varepsilon_a$, $\varepsilon_{vol}-\varepsilon_a$ και $q/p'-\varepsilon_a$ στα Σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι τα δύο δοκίμια παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη μηχανική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, ο λόγος τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά είναι 1,29 όταν η αξονική παραμόρφωση είναι 1,3% περίπου. Επιπλέον, στην κατάσταση μέγιστης αντοχής, ο λόγος τάσεων είναι $q/p'=1.56$, η γωνία διατμητικής αντοχής προκύπτει $\varphi=38,3^\circ$, ενώ έχει αναπτυχθεί αξονική παραμόρφωση, $\varepsilon_a=10.5\%$. Η παρόμοια συμπεριφορά των δοκιμών υποδεικνύει ότι η επιβολή εσωτερική πίεσης υγρού των πόρων στο στάδιο του κορεσμού, δεν καταστρέφει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Επιπλέον, όπως θα αποδείξουμε σε επόμενη ενότητα η μεγάλη τιμή αντιπίεσης είναι απαραίτητη στις τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης για να αποφευχθεί η σπηλαιώση (cavitation) των δοκιμίων. Συμπερασματικά, επειδή η επιβολή αντιπίεσης $u_0=700\text{kPa}$

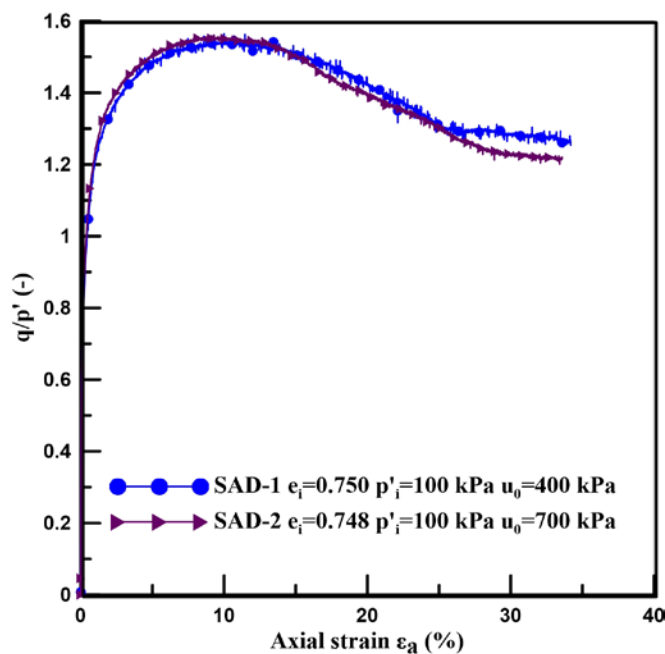
δε φαίνεται να διαταράσσει το σταθεροποιημένο δοκίμιο, αλλά παρέχει υψηλές τιμές της παραμέτρου του Skempton, $B > 0.97$, εξασφαλίζοντας τον κορεσμό του δοκιμίου και για να είναι συγκρίσιμα οι τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης με τα τις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης, όλα τα πειράματα διεξήχθησαν με επιβολή αντιπίεσης $u_0 = 700 \text{ kPa}$ στο στάδιο του κορεσμού. Η παραπάνω τιμή είναι η μέγιστη δυνατή πίεση που μπορεί να επιβάλλει η συσκευή μέτρησης όγκου της τριαξονικής συσκευής και είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε και για τα δοκίμια άμμου M31. Τελικά, στο στάδιο του κορεσμού, υπό σταθερή ενεργό τάση 40 kPa αυξάνουμε σταδιακά και ισόποσα την ολόπλευρη πίεση (cell pressure) και πίεση πόρων (back pressure) μέχρι την τιμή 740 kPa και 700 kPa αντίστοιχα, ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται ο όγκος του νερού που εισρέει στο δοκίμιο. Αφού επιτύχουμε τις επιθυμητές τιμές πιέσεων, το δοκίμιο αφήνεται σε ηρεμία για 24 ώρες.



Σχήμα 4. 15 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επίδραση της τιμής αντιπίεσης. Καμπύλες λόγω τάσης- παραμόρφωσης.



Σχήμα 4. 16 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επίδραση της τιμής αντιπίεσης. Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4. 17 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επίδραση της τιμής αντιπίεσης. Καμπύλες λόγου τάσης-αξονικής παραμόρφωσης.

4.5.3 Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης

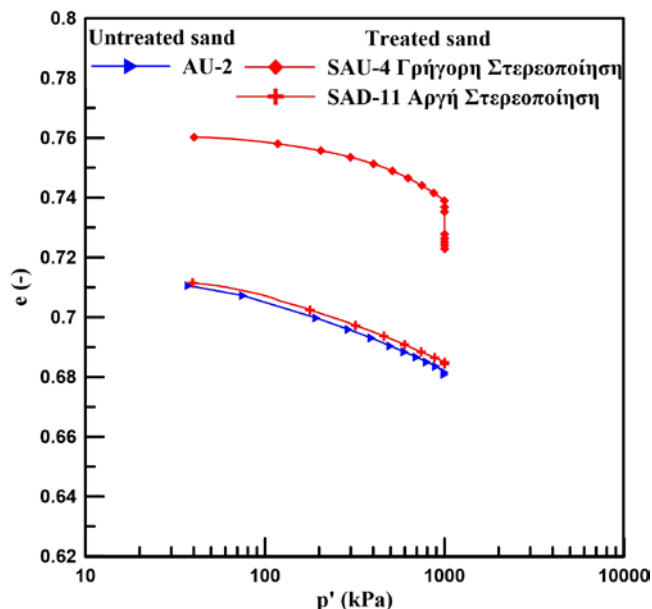
Μετά την ολοκλήρωση του κορεσμού τα δοκίμια στερεοποιούνται ισότροπα στο επίπεδο της επι θυμητής ισότροπης ενεργού τάσης p'_i . Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις τάσεις 100, 200, 300, 500, 700, 1000 και 2000 kPa. Η ισότροπη στερεοποίηση γίνεται με μέτρηση της πίεσης πόρων (με χρήση εξωτερικού μετρητή στη γραμμή αμέσως μετά τη βάση του δοκιμίου), αλλά και μέτρηση της αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης, ώστε να σχεδιασθεί η καμπύλη στερεοποίησης. Η στράγγιση του νερού μέσα από τους πόρους της πυριτίας είναι μια αργή διαδικασία και θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί όταν ο όγκος δε μεταβάλλεται και το ύψος του δοκιμίου παραμένει σταθερό. Επισημαίνεται ότι η καθαρή, φυσική άμμος αποβάλλει ταχύτατα το νερό από τους πόρους της, όταν αυξάνεται η πίεση περίσφιξης. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος στραγγίζει πολύ αργά, αλλά μακροπρόθεσμα καταλήγει σε ογκομετρικές παραμορφώσεις αντίστοιχες της φυσικής άμμου. Η εκροή νερού μέσα από το σταθεροποιημένο δοκίμιο σημαίνει ότι η γέλη, ως διασπαστικό υλικό, αποβάλλει το νερό μέσα από τους πόρους της, με ταυτόχρονη συστολή της στερεάς φάσης (αλυσίδες σωματιδίων πυριτίας). Αυτή η συστολή του στερεού σκελετού της γέλης πιθανότατα να καταστρέφει έναν αριθμό από τους δεσμούς σιλοξάνης μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων πυριτίας και να οδηγεί σε θραύση μερικών αλυσίδων της σκελετικής δομής. Ταυτόχρονα, δημιουργούνται νέοι δεσμοί σιλοξάνης και νέες αλυσίδες στον στερεό σκελετό της γέλης, καθώς συγκλίνουν σωματίδια με μεγάλο πλήθος ενεργών ομάδων σιλανόλης στην επιφάνειά τους. Η γέλη κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζει αυτό-ίαση λόγω της πλούσιας σε ομάδες σιλανόλης επιφάνειας των μικροσκοπικών σωματιδίων.

Για να εξακριβωθεί ο κατάλληλος χρόνος στερεοποίησης, αλλά και η βέλτιστη ταχύτητα αύξησης της πλευρικής πίεσης, ώστε να μη διαταραχθούν τα σταθεροποιημένα δοκίμια, εκτελέστηκαν δοκιμές με διαφορετικές ταχύτητες στερεοποίησης. Τα αποτελέσματα κάποιων ενδεικτικών δοκιμών παρουσιάζονται στα διάγραμμα $e-\log p'$ (Σχήμα 4.18) και $e_{vol}-p'$ (Σχήμα 4.19). Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο SAU-4 στο στάδιο της στερεοποίησης, η πλευρική πίεση αυξάνεται με μεγάλη ταχύτητα, ίδια με αυτή που επιβάλλεται στα μη σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 και στη συνέχεια αφήνεται σε ηρεμία για 24 ώρες, ελεύθερο να στραγγίζει. Στο

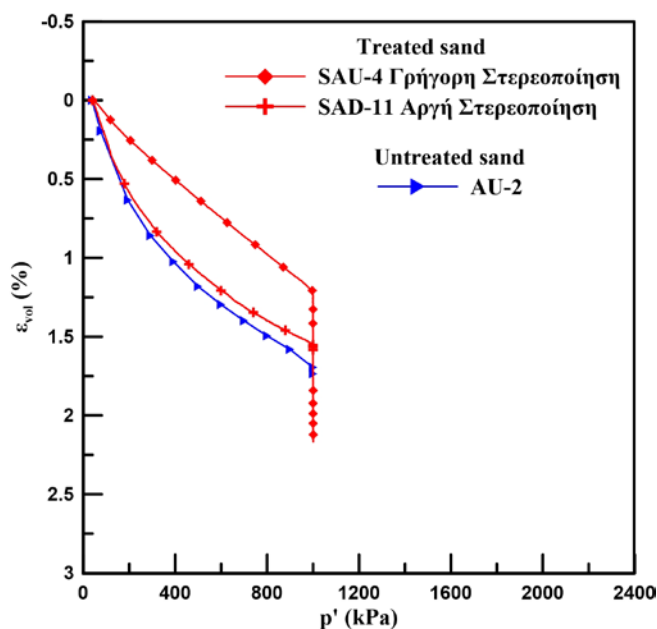
δοκίμιο SAD-11 η πλευρική πίεση αυξάνεται με αργό ρυθμό, 1.4 kPa/min, και αφού φτάσει τις επιθυμητές τιμές αφήνεται επίσης να στραγγίξει για 24 ώρες. Η καμπύλη της δοκιμής SAU-4 παρουσιάζει μια πιο ήπια κλίση στο διάγραμμα $e\text{-log}p'$ και μετά μία απότομη μείωση, που φανερώνει την αντίσταση στη στράγγιση του σταθεροποιημένου δοκιμίου που μετά παρουσιάζεται συσσωρευμένη. Στο διάγραμμα $e_{vol}\text{-}p'$ παρατηρούμε ότι η ταχεία αύξηση της πλευρικής πίεσης οδηγεί σε μικρές τιμές ογκομετρικής παραμόρφωσης όσο διαρκεί η αύξηση της ενεργού τάσης και στη συνέχεια, εμφανίζεται απότομη αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης. Αυτή η συμπεριφορά θα μπορούσε συνδεθεί με φαινόμενα ερπυσμού, ενώ στην πραγματικότητα είναι η εμφάνιση της καθυστερημένης στράγγισης που δεν είχε προλάβει να ολοκληρωθεί. Αντίθετα, η δοκιμή SAD-11 στο διάγραμμα $e_{vol}\text{-}p'$ παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης με την αύξηση της ενεργού. Μετά την επίτευξη της επιθυμητής ενεργού τάσης το δοκίμιο αφήνεται σε ηρεμία για 24 ώρες και δεν παρουσιάζει περαιτέρω ογκομετρική παραμόρφωση, που σημαίνει ότι η στερεοποίηση είχε ολοκληρωθεί. Στα διαγράμματα $e\text{-log}p'$ και $e_{vol}\text{-}p'$ παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη ισότροπης στερεοποίησης της άμμου M31, όπως προκύπτει από τη δοκιμή AU-2. Παρατηρούμε ότι η κλίση της καμπύλης SAD-11 είναι παρόμοια με αυτή της άμμου στο διάγραμμα $e\text{-log}p'$ και στο διάγραμμα $e_{vol}\text{-}p'$ οι ογκομετρικές παραμορφώσεις των δύο δοκιμών πρακτικά ταυτίζονται. Αντίθετα, η κλίση της δοκιμής SAU-4 στο διάγραμμα $e\text{-log}p'$ είναι τελείως διαφορετική από αυτή της άμμου και στο διάγραμμα $e_{vol}\text{-}p'$ οι τελικές ογκομετρικές παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από αυτές του φυσικού. Αυτό ίσως οφείλεται στον πιθανό τραυματισμό των δεσμών εξαιτίας της ταχείας φόρτισης, αλλά και στο γεγονός ότι το δοκίμιο SAU-4 είναι πιο χαλαρό από το μη σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου.

Συμπερασματικά, αποφασίστηκε σε όλες τις τριαξονικές δοκιμές η στερεοποίηση να γίνεται με τον αργό ρυθμό (αύξηση της πλευρικής πίεσης κατά 1.4 kPa/min) γιατί αναπτύσσεται η ογκομετρική παραμόρφωση σταδιακά με την αύξηση της πίεσης και καταλήγει σε τιμές παρόμοιες με αυτές του αντίστοιχης πυκνότητας φυσικού δοκιμίου άμμου M31. Επιπλέον, μετά την επίτευξη της επιθυμητής ισότροπης

ενεργού τάσης, τα δοκίμια αφήνονται σε ηρεμία για 24 ώρες για να επαληθεύεται η ότι η στράγγιση έχει ολοκληρωθεί.



Σχήμα 4. 18 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης $e-p'$ για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου. Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου.

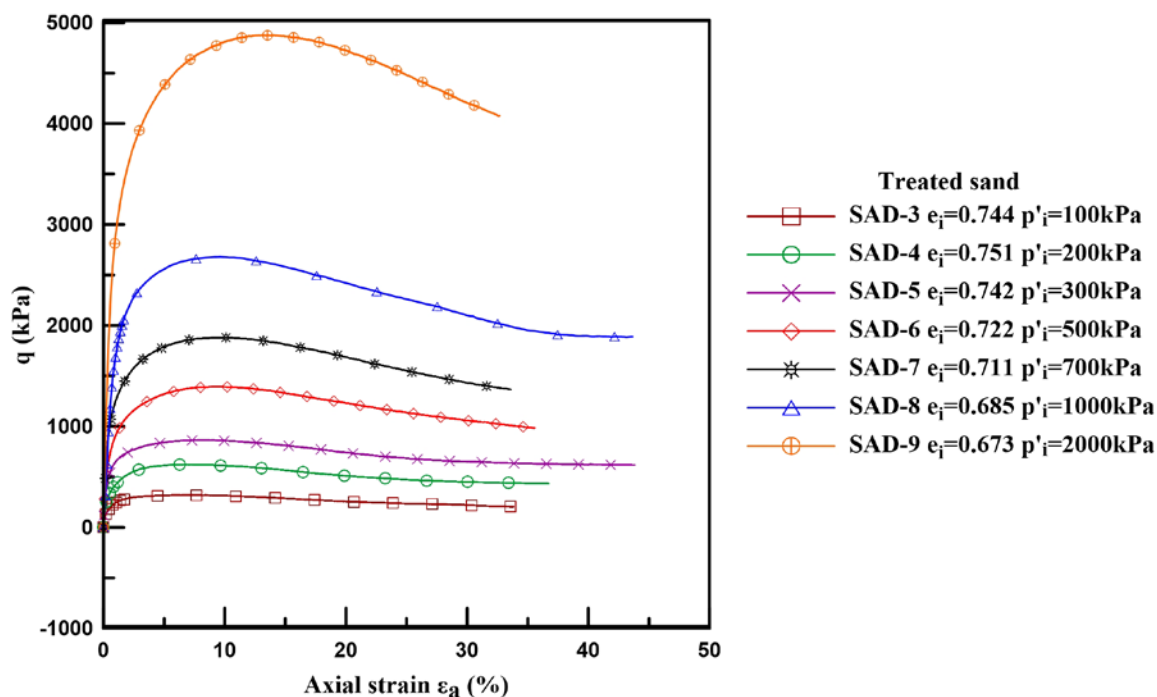


Σχήμα 4. 19 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης $\epsilon_{vol}-p'$ για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου. Επίδραση της ταχύτητας στερεοποίησης των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου.

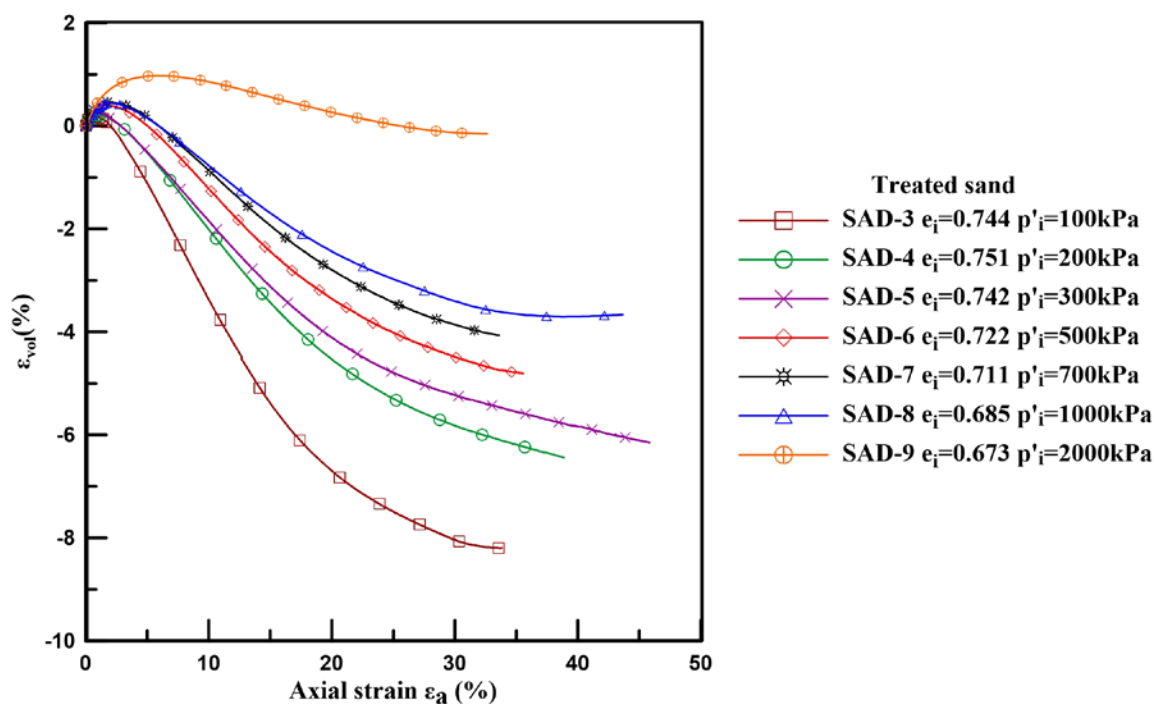
4.5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31

Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου M31 υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.025 mm/min. Οι τριαξονικές δοκιμές για διάφορες τάσεις εγκιβωτισμού ($p'_i=100-2000$ kPa) σε παρόμοιες πυκνότητες ($e_i=0.673-0.751$) παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.20, 4.21 και 4.22 ώστε να προδιορισθεί η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31 τριαξονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων ($q - \epsilon_a$) για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό πυριτίας CS=10% κατά βάρος. Οι καμπύλες είναι ομοιόθετες υποδηλώνοντας σαφή και έντονη εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους από το επίπεδο της τάσης εγκιβωτισμού. Σε όλα τα επίπεδα τάσης, η αποκλίνουσα τάση, q , φτάνει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές από αυτές της άμμου στη συνέχεια ακολουθεί μία ομαλή μείωση προς μία παραμένουσα τιμή. Επισημαίνουμε ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία δεν εμφάνισαν κάποιο εμφανές επίπεδο συγκέντρωσης τάσεων (shear band). Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η ογκομετρική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών. Για τιμές αρχικής ενεργού τάσης μικρότερες των 2000 kPa, τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά για τιμές αξονική παραμόρφωσης $\epsilon_a=1$ έως 2.5%, για $p'_i=100$ και 1000 kPa αντίστοιχα και στη συνέχεια παρουσιάζουν διαστολική συμπεριφορά με μεγάλους ρυθμούς διαστολικότητας μέχρι το σημείο της μέγιστης αντοχής. Ο ρυθμός αύξησης της διαστολικότητας μειώνεται με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης και τελικά η ογκομετρική παραμόρφωση σταθεροποιείται σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από αυτές της άμμου. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αύξησης της διαστολικότητας μειώνεται με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης. Για τη δοκιμή SAD-9 με αρχική ενεργό τάση $p'_i=2000$ kPa παρατηρείται μια παρατεταμένη συστολική συμπεριφορά, μέχρι την ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_a=6\%$ και στη συνέχεια το δοκίμιο διαστέλλεται λίγο με μικρό ρυθμό αύξησης της διαστολικότητας, μέχρι μία σταθερή ογκομετρική παραμόρφωση. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται οι καμπύλες λόγου

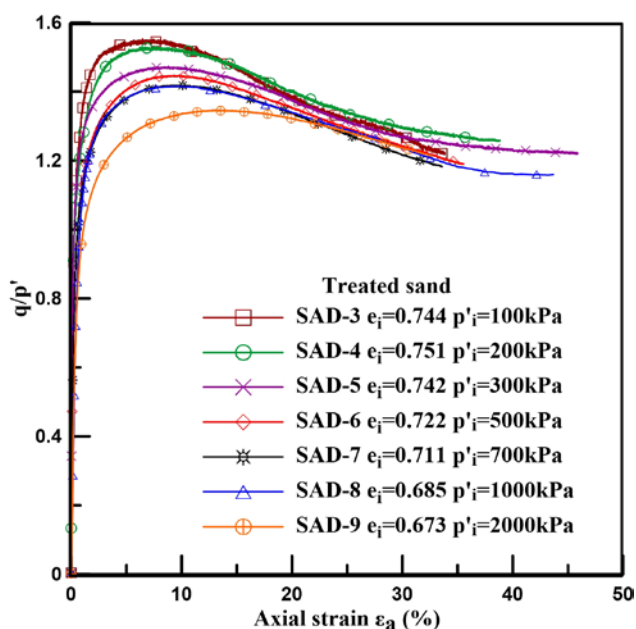
τάσεων q/p' σε σχέση με την αναπτυσσόμενη αξονική παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων είναι άμεσα εξαρτημένη από την αρχική ενεργό τάση του δοκιμίου αφού μειώνεται με την αύξηση της τάσης εγκιβωτισμού. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων για τη δοκιμή SAD-3 με $p'_i=100$ kPa είναι 1.55 ενώ για τη δοκιμή SAD-9 με $p'_i=2000$ kPa είναι $q/p'=1.35$. Όλες οι καμπύλες, ανεξαρτήτως αρχικής ενεργού τάσης καταλήγουν σε μία παραμένουσα τιμή λόγου τάσεων, $q/p'=1.22$ περίπου. Επιπλέον, ο λόγος τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά είναι $q/p'=1,22-1.25$ για τις δοκιμές με αρχική ενεργό τάση $p'_i < 2000$ kPa και $q/p'=1.28$ για $p'_i=2000$ kPa.



Σχήμα 4. 20 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες τάσης- αξονικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4. 21 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης.



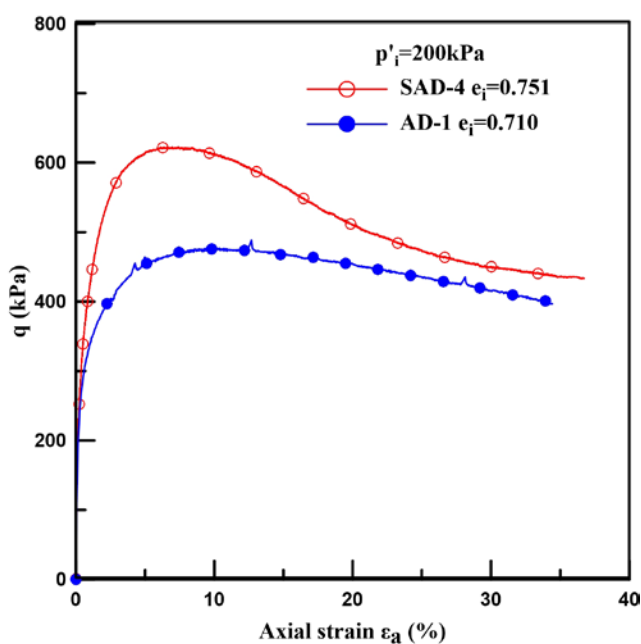
Σχήμα 4. 22 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες λόγου τάσεων-αξονικής παραμόρφωσης

4.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ M31 ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.

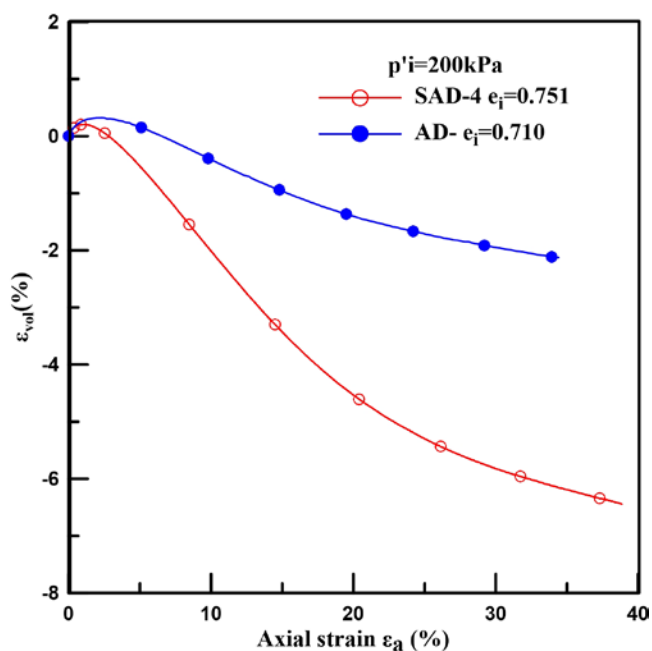
Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άμμου M31 και σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου με κολλοειδή πυριτία (ποσοστό σταθεροποιητή CS=10%). Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των φυσικών και των αντίστοιχων σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών σε όρους αποκλίνουσας τάσης- παραμόρφωσης (q - ϵ_a), ογκομετρικής- αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_{vol} - ϵ_a), λόγου τάσεων –παραμόρφωσης (q/p' - ϵ_a) και λόγου τάσεων – διαστολικότητας (q/p' - $d\epsilon_{vol}/d\epsilon_a$). Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η σχέση της τιμής της μέγιστης διαστολικότητας, η σχέση του μέγιστου λόγου τάσεων και της μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής με την αρχική ενεργό τάση για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια. Τέλος, παραθέτεται η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια.

Στα Σχήματα 4.23 έως 4.34 συγκρίνεται η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων με αυτή των φυσικών αντίστοιχης ή μεγαλύτερης πυκνότητας σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις ($p'_i=200, 300, 500$ και 700 kPa). Παρατηρούμε ότι για όλες τις τάσεις εγκιβωτισμού, τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τα αντίστοιχα φυσικά δοκίμια άμμου M31. Η αύξηση αυτή περιορίζεται με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης από 30% για τα δοκίμια με $p'_i=200$ kPa σε 15% για τα δοκίμια με $p'_i=700$ kPa. Η αποκλίνουσα τάση για τα σταθεροποιημένα δοκίμια, μετά την ανάπτυξη της μέγιστης τιμής της, μειώνεται αρκετά μέχρι να φτάσει τα επίπεδα της άμμου M31. Ομοίως, ο λόγος των τάσεων για τα σταθεροποιημένα δοκίμια αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή που είναι 15% μεγαλύτερη από αυτή των μη σταθεροποιημένων δοκιμίων, για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa και 10% μεγαλύτερη για τα δοκίμια με $p'_i=700$ kPa. Τελικά, ο λόγος τάσεων σταθεροποιημένων και μη δοκιμίων σταθεροποιείται σε μια παραμένουσα τιμή. Στα διαγράμματα ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} - ϵ_a , διαφαίνεται ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια συστέλλονται για μικρότερο χρονικό

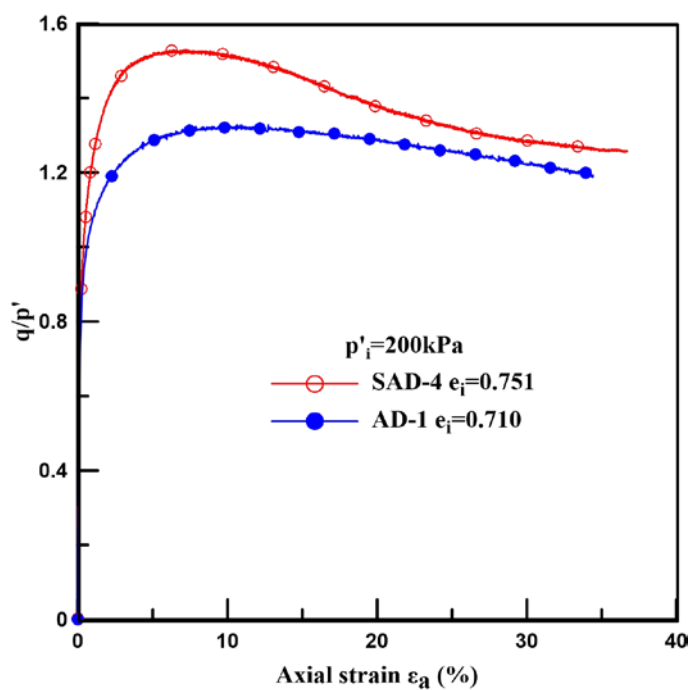
διάστημα από τα δοκίμια άμμου και γρήγορα περνάνε στη διαστολική φάση με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς αύξησης της διαστολής από τα φυσικά. Τελικά οι ογκομετρικές παραμορφώσεις σταθεροποιούνται σε τελικές τιμές πολύ μεγαλύτερες από αυτές των αντίστοιχων φυσικών δοκιμίων.



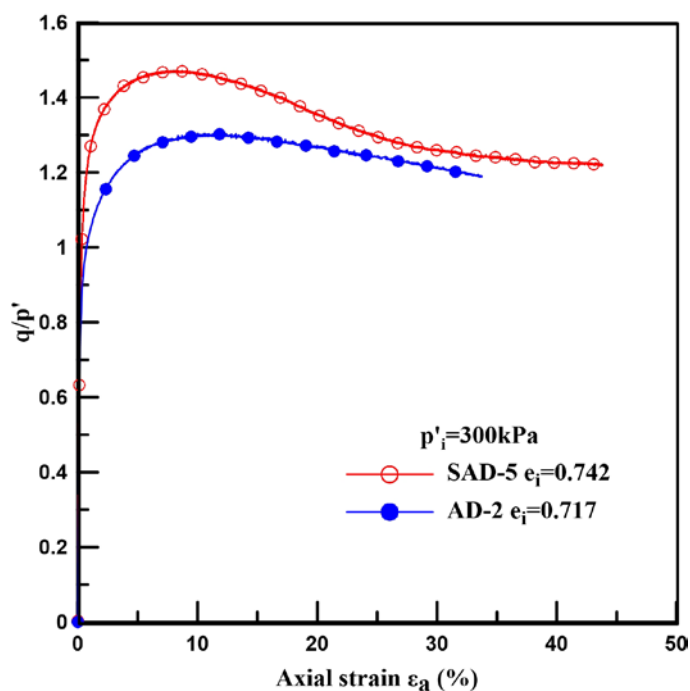
Σχήμα 4. 23 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa.



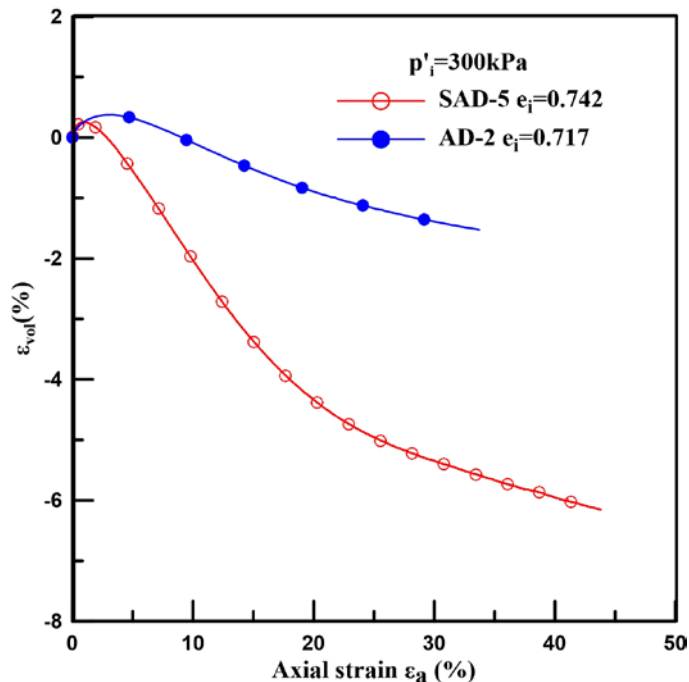
Σχήμα 4. 24 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200 \text{ kPa}$.



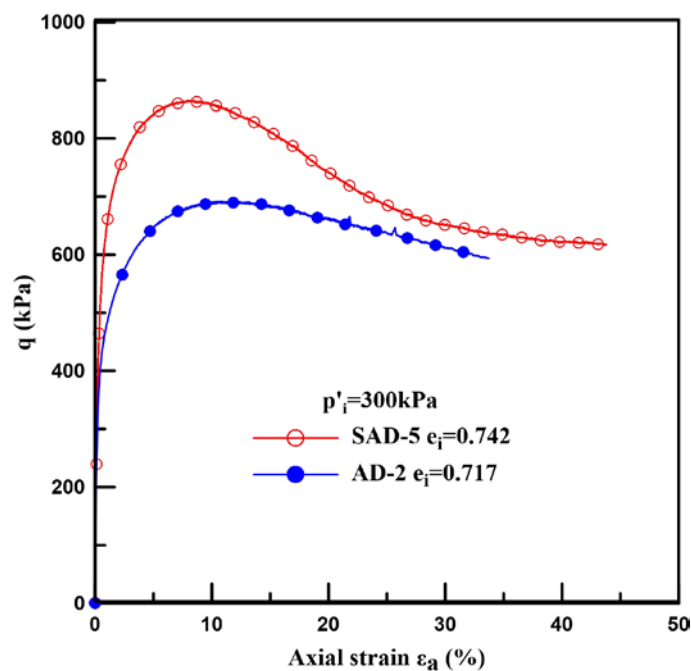
Σχήμα 4. 25 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=200 \text{ kPa}$.



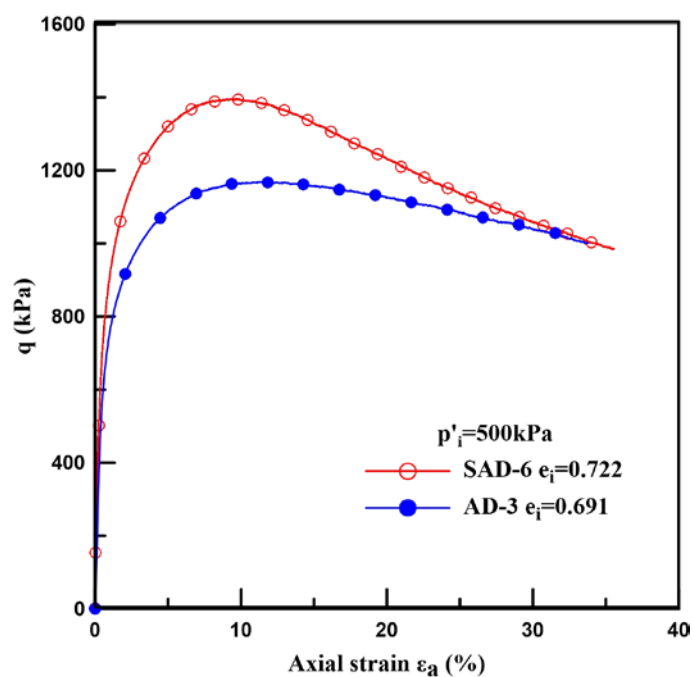
Σχήμα 4. 26 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i = 300 \text{ kPa}$.



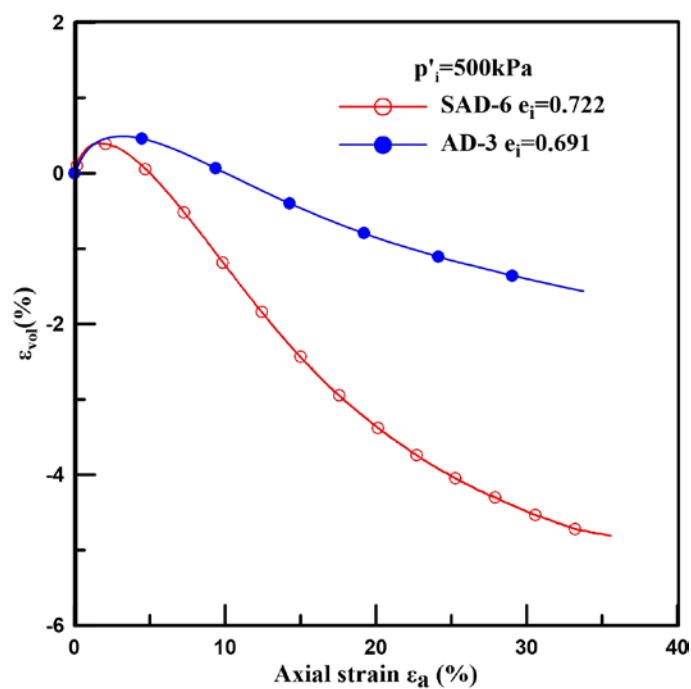
Σχήμα 4. 27 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i = 300 \text{ kPa}$.



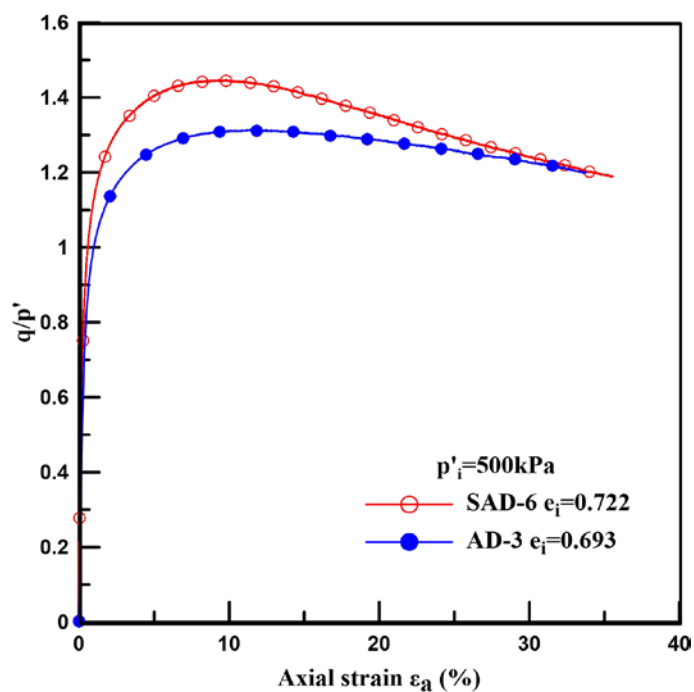
Σχήμα 4. 28 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=300$ kPa.



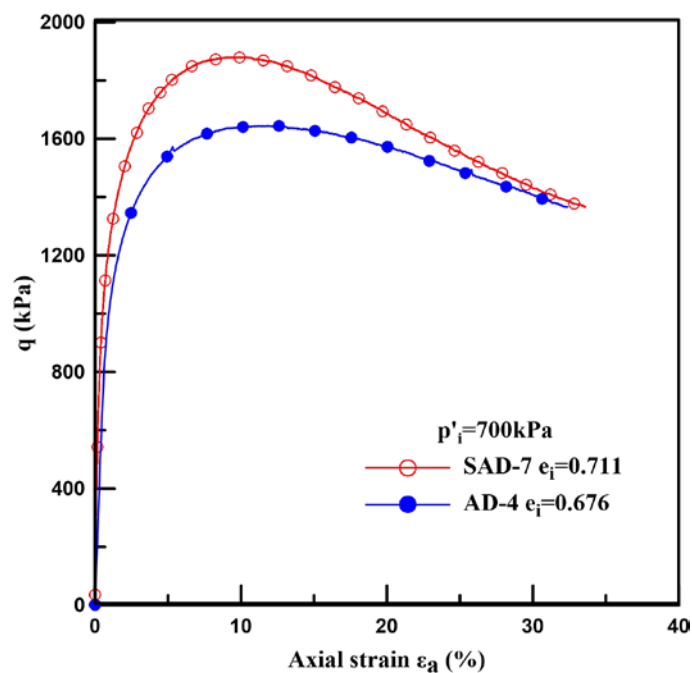
Σχήμα 4. 29 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=500$ kPa.



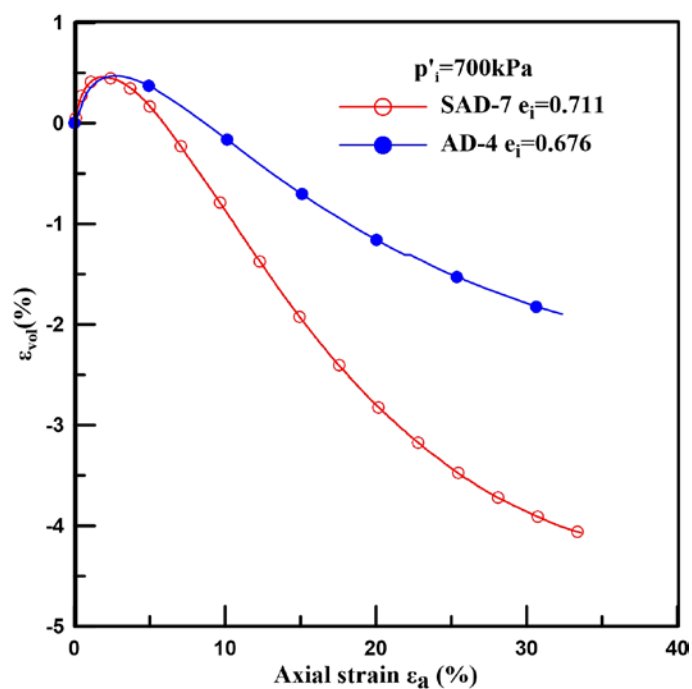
Σχήμα 4. 30 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=500 \text{ kPa}$.



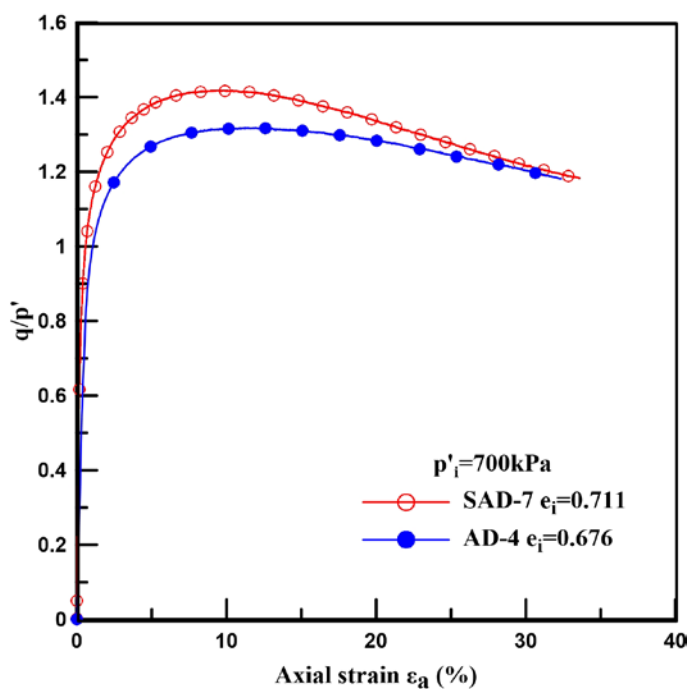
Σχήμα 4. 31 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=500 \text{ kPa}$.



Σχήμα 4. 32 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa.



Σχήμα 4. 33 Καμπύλες ογκομετρικής-αξονικής παραμόρφωσης, φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa



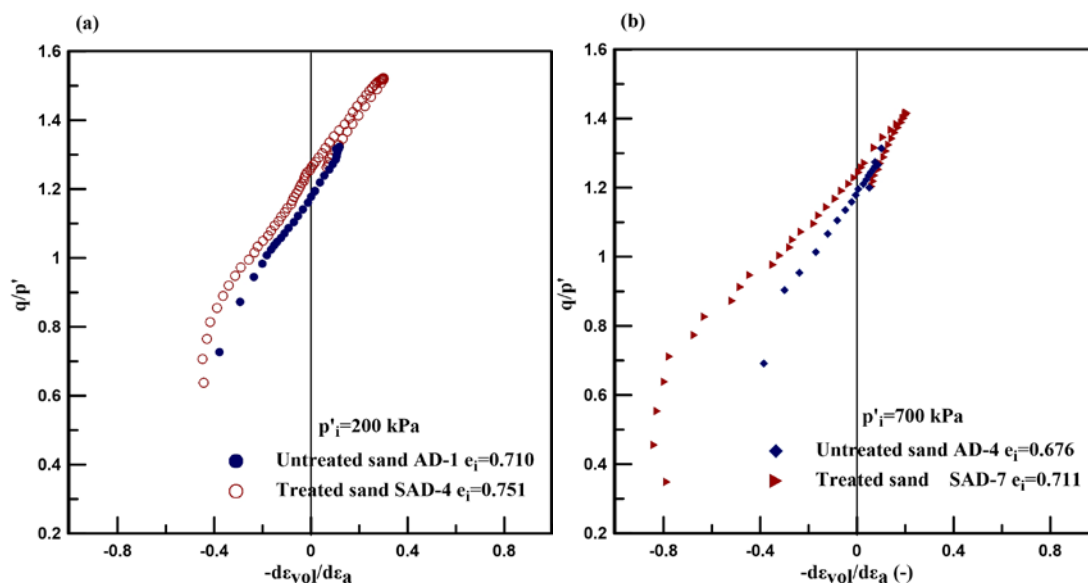
Σχήμα 4. 34 Καμπύλες λόγου τάσεων παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 για αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa.

Στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζεται η σχέση της διαστολικότητας των φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων με το λόγο τάσεων που εκφράζεται ως de_{vol}/de_a . Στο Σχήμα 4.35 (α) απεικονίζεται η εξέλιξη της διαστολικότητας κατά τη διάρκεια της φόρτισης για το σταθεροποιημένο και το φυσικό δοκίμιο άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=200$ kPa ενώ στο Σχήμα 4.35 (β) παρουσιάζεται η αντίστοιχη εξέλιξη για τα δοκίμια με αρχική ενεργό τάση $p'_i=700$ kPa. Επισημαίνεται ότι η μέγιστη διαστολικότητα συμβαίνει ταυτόχρονα με την ανάπτυξη του μέγιστου λόγου τάσεων τόσο στα σταθεροποιημένα όσο και φυσικά δοκίμια άμμου και για τις δύο τιμές αρχικής ενεργού τάσης. Αυτό υποδηλώνει την έλλειψη τσιμεντοποίησης των σταθεροποιημένων δοκιμίων (Cuccovillo and Coop, 1999). Επιπλέον, από τα διαγράμματα φαίνεται ότι το εύρος της μέγιστης τιμής διαστολικότητας σταθεροποιημένου και φυσικού δοκιμίου μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης από $p'_i=200$ kPa σε $p'_i=700$ kPa.

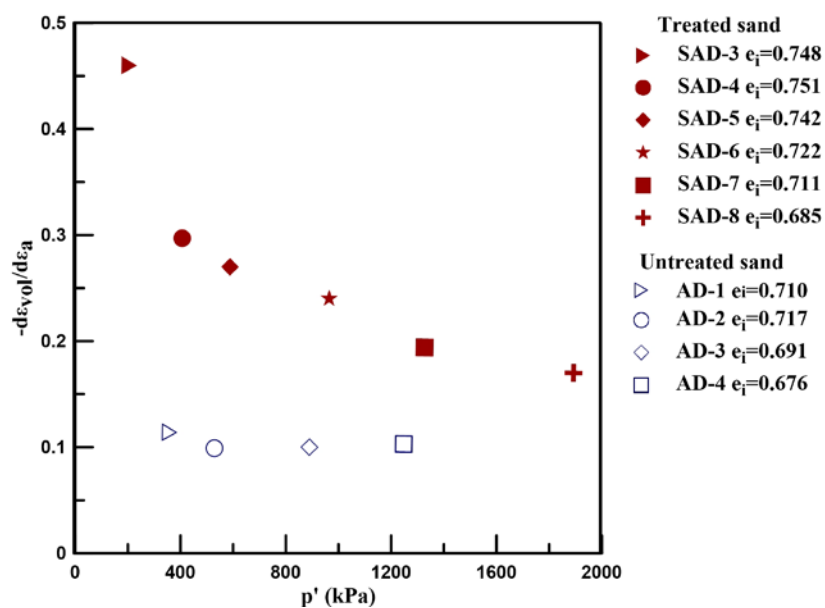
Στο Σχήμα 4.36 απεικονίζεται η τιμή του μέγιστου ρυθμού διαστολικότητας με την αντίστοιχη τιμή της ενεργού τάσης για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια

άμμου M31, για διάφορες τάσεις εγκιβωτισμού. Για αυτό το εύρος τάσεων ($p'_i=100-1000$ kPa) ο ρυθμός διαστολής των σταθεροποιημένων δοκιμίων παραμένει μεγαλύτερος από των φυσικών, αλλά μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της τάσης οδεύοντας προς την τιμή της άμμου, που παραμένει περίπου σταθερή. Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής του μέγιστου λόγου τάσεων q/p' με την αύξηση της ενεργού τάσης για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31. Για αυτό το εύρος τάσεων ($p'_i=100-1000$ kPa), ο μέγιστος λόγος τάσεων, q/p' , των σταθεροποιημένων δοκιμίων παραμένει μεγαλύτερος από των φυσικών, αλλά μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της τάσης, ενώ ο μέγιστος λόγος τάσεων για την άμμο παραμένει περίπου σταθερός. Η μείωση του μέγιστου λόγου τάσεων με την αύξηση της ενεργού τάσης, υποδηλώνει ότι η περιβάλλουσα αστοχίας των σταθεροποιημένων δοκιμίων θα είναι θα είναι καμπυλωμένη. Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζεται η περιβάλλουσα Mohr-Coulomb για τα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου. Παρατηρούμε ότι η περιβάλλουσα είναι ελαφρώς καμπυλωμένη, με μεγαλύτερη κλίση στις χαμηλότερες τάσεις. Η συνοχή που προκύπτει είναι περίπου $c=12$ kPa, αλλά χρειάζεται να επιβεβαιωθεί από δεδομένα σε μικρότερες τάσεις. Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την ενεργό τάση με τέμνουσες τιμές $\varphi=38,3^0$ για $p'_i=100$ kPa, $\varphi=35,0^0$ για $p'_i=700$ kPa και $\varphi=33,3^0$ για $p'_i=2000$ kPa. Η μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής πλησιάζει με την αύξηση της ενεργού τάσης πλησιάζει την τιμή της άμμου που προκύπτει $\varphi=32,5^0$.

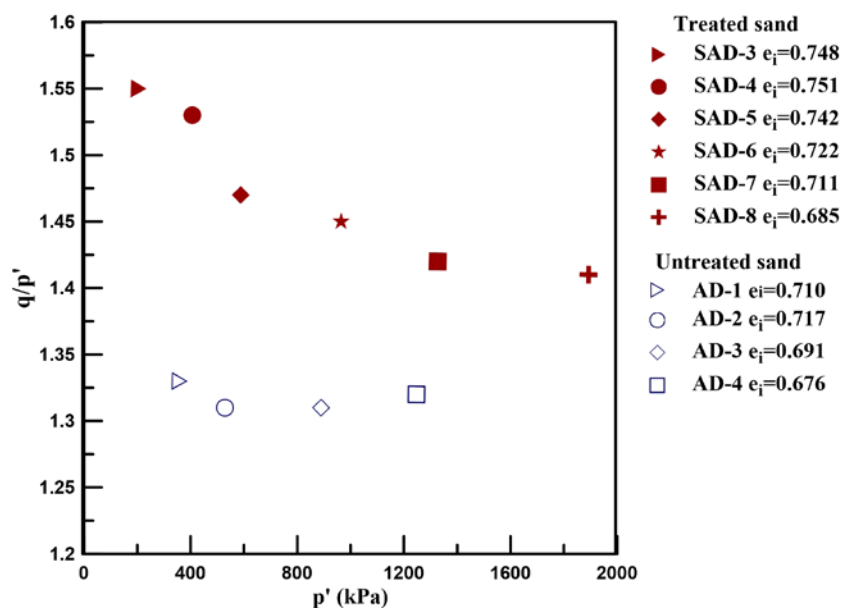
Συμπερασματικά, η αύξηση της τάσης και της παραμόρφωσης μπορεί να οδηγεί σε μείωση της υποστήριξης που παρέχει το υγρόλυμα πυριτίας στις επαφές των κόκκων, αλλά και στο εσωτερικό τους. Αυτή η υπόθεση ενισχύεται από το γεγονός ότι στην τελική κατάσταση ο λόγος τάσεων των σταθεροποιημένων δοκιμίων προσομοιάζει τον λόγο των δοκιμίων άμμου όταν έχουν παραμείνει μόνο οι επαφές των κόκκων. Ωστόσο, τονίζεται ότι η παρουσία της κολλοειδούς πυριτίας στους πόρους του αμμόδη σκελετού, αντιστέκεται στη συστολικότητα, επισπεύδει τη διαστολικότητα και πιέζοντας τους κόκκους αναδιατάσσει τις αλυσίδες μεταφοράς φορτίου σε μια πιο χαλαρή κατάσταση.



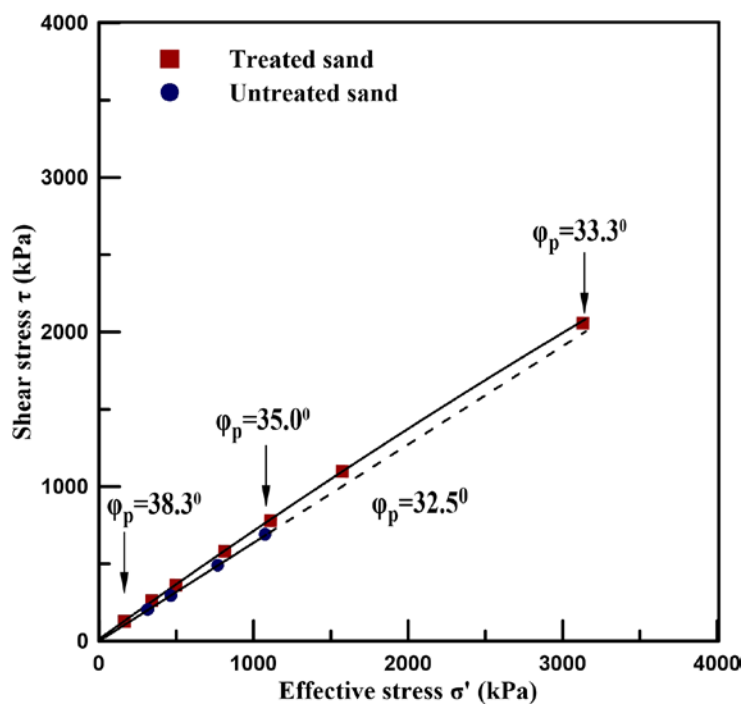
Σχήμα 4. 35 Καμπύλες λόγου τάσεων-διαστολικότητας για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31 με αρχική ενεργό τάση (a) $p'_i = 200$ kPa ; (b) $p'_i = 700$ kPa.



Σχήμα 4. 36 Σχέση μέγιστου ρυθμού διαστολικότητας- ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31.



Σχήμα 4. 37 Σχέση μέγιστος λόγος τάσεων- ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31.



Σχήμα 4. 38 Περιβάλλουσες αστοχίας για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31, από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης.

4.7 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ Μ31

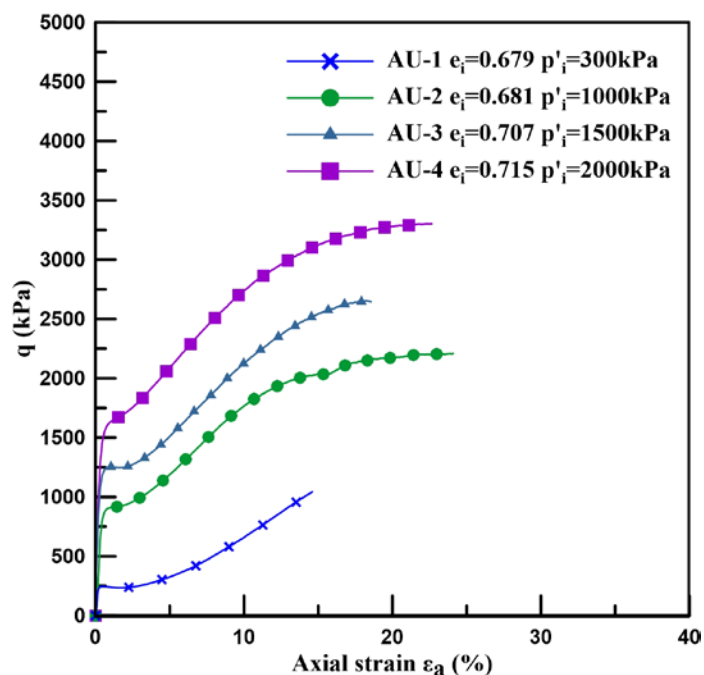
4.7.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες που εκτελέστηκαν σε δοκίμια άμμου Μ31. Τα δεδομένα αυτών των δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5 Για κάθε δοκιμή δίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων στο στάδιο του κορεσμού, της στερεοποίησης και της μονοτονικής φόρτισης. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες στην άμμο Μ31 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π-3, υπό μορφή διαγραμμάτων $q-p'$, $q-\varepsilon_a$, $\Delta u-\varepsilon_a$. Σε όλες τις μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης στο στάδιο του κορεσμού επιβλήθηκε αντιπίεση (back pressure) 700 kPa και η παράμετρος Skempton προκύπτει $B>0.97$ υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμών άμμου. Τα δοκίμια άμμου Μ31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχικές ενεργές τάσεις $p'_i=300, 1000, 1500$ και 2000 kPa και αφέθηκαν σε ηρεμία για 1,5 ώρα. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμών έχουν εύρος τιμών $D_r=40-50\%$.

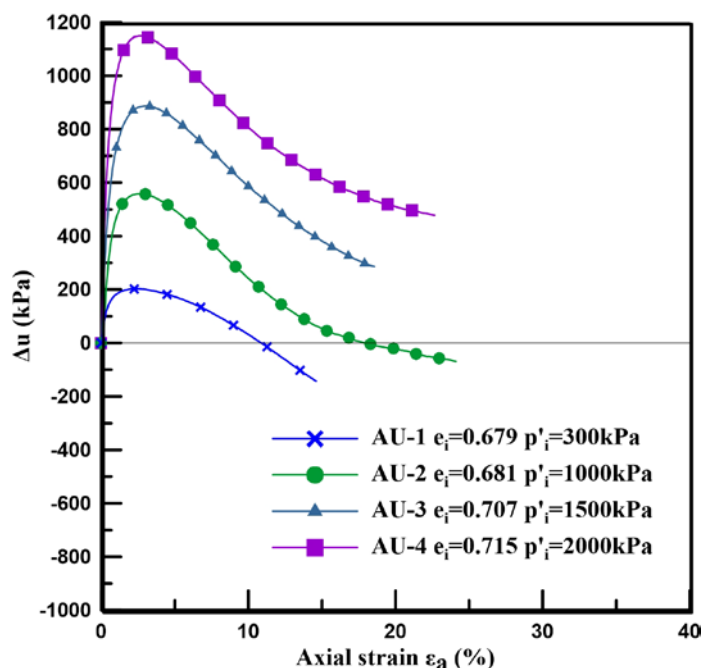
Πίνακας 4. 5 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης άμμου Μ31

Δοκιμή	Τύπος	ε_i	$D_r:\%$	p'_i	q/p'_{max}	$u_0:kPa$
AU-1	TR-U	0.679	48.67	300	1.41	700
AU-2	TR-U	0.681	48.08	1000	1.23	700
AU-3	TR-U	0.707	40.41	1500	1.24	700
AU-4	TR-U	0.715	38.05	2000	1.22	700

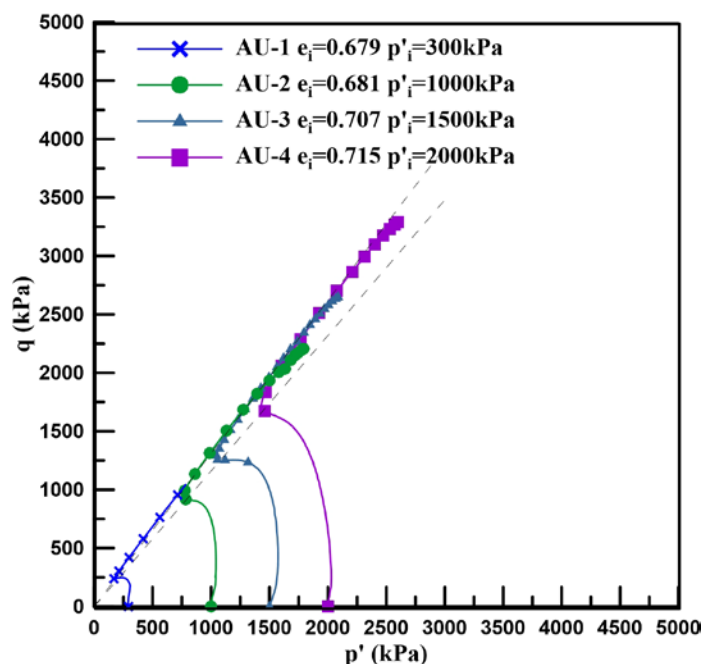
Αφού ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης, η άμμος M31 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων q - ϵ_a φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.39 για τα δοκίμια άμμου M31 πυκνότητας $D_r=40-50\%$ για τις διάφορες ενεργές τάσεις. Στο Σχήμα 4.40 παρουσιάζονται οι υπερπιέσεις του υγρού των πόρων για τα δοκίμια άμμου. Παρατηρείται αρχικά συστολική συμπεριφορά μέχρι να αναπτυχθεί αξονική παραμόρφωση περίπου $\epsilon_a=2.5\%$ και μετά παρατηρείται διαστολική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q - p' και στο Σχήμα 4.42 οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο t - s' . Ο μέγιστος λόγος προκύπτει 1,32 σε αξονική παραμόρφωση $\epsilon_a=7\%$ περίπου. Η γωνία διατμητικής αντοχής στη μέγιστη αντοχή προκύπτει $\phi_p=32.5^\circ$. Η γωνία αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά υπολογίζεται $\phi_{PTL}=29,8^\circ$. Παρατηρούμε ότι, σε καμία δοκιμή δεν προέκυψε εμφανής συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων σε επίπεδο (shear band). Στις υψηλές αρχικές ενεργές τάσεις (1000, 1500 και 2000 kPa) η άμμος φαίνεται να εγκαταλείπει τη διαστολική συμπεριφορά για αξονικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 20% και να σταθεροποιεί την αποκλίνουσα τάση q . Αντίθετα, για τη χαμηλή ενεργό τάση 300 kPa η άμμος παραμένει διαστολική και στις υψηλές αξονικές παραμορφώσεις.



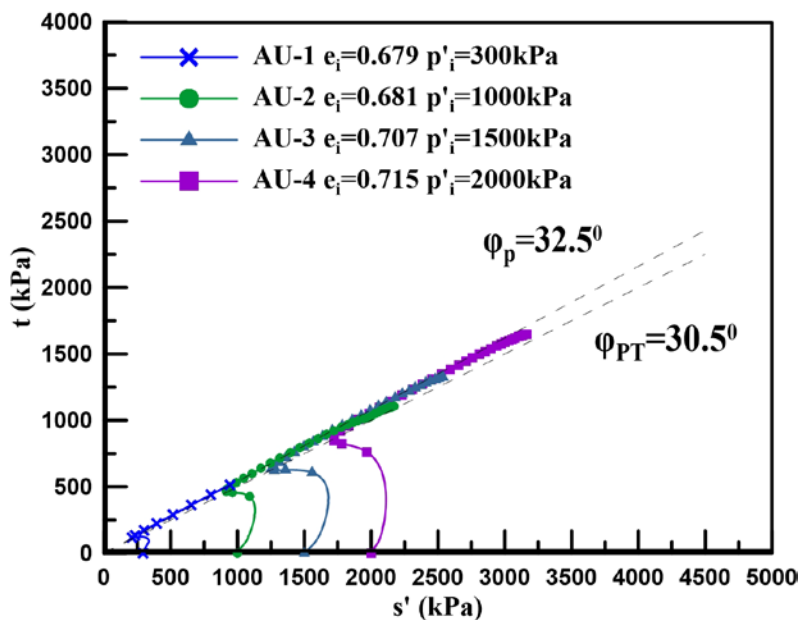
Σχήμα 4. 39 Τριαξονικές δοκιμές άμμον M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες τάσεων αξονικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 4. 40 Τριαξονικές δοκιμές άμμον M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες υπερπίεσης υγρού των πόρων- αξονικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 4. 41 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q-p'$.



Σχήμα 4. 42 Τριαξονικές δοκιμές άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $t-s'$.

4.8 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ ΑΜΜΟ Μ31

4.8.1. Εισαγωγή

Στην τέταρτη κατηγορία πειραμάτων ανήκουν τα δοκίμια άμμου Μ31 που έχουν σταθεροποιηθεί με κολλοειδή πυριτία σε ποσοστό 10% κατά βάρος, είναι ηλικίας 50 ωρών και υποβλήθηκαν σε μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα έχουν στερεοποιηθεί ισότροπα σε ένα εύρος τάσεων $p'_i=100-2000$ kPa με τιμές του δείκτη πόρων μετά το στάδιο της στερεοποίησης $e_i= 0,667-0,752$. Τα στοιχεία των πειραμάτων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.6. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες στη σταθεροποιημένη άμμο Μ31 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π-4, υπό μορφή διαγραμμάτων $q-p'$, $q-\varepsilon_a$ και $\Delta u-\varepsilon_a$.

Πίνακας 4. 6 Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης σταθεροποιημένης άμμου Μ31

Δοκιμή	Τύπος	e_i	D_r :%	p'_i :kPa	q/p'_{max}	u_0 :kPa
SAU-1	TR-U	0.732	33.03	100	1.43	700
SAU-2	TR-U	0.752	27.14	200	1.39	700
SAU-3	TR-U	0.735	32.15	300	1.38	700
SAU-4	TR-U	0.722	35.99	1000	1.35	700
SAU-5	TR-U	0.667	52.21	2000	1.34	700

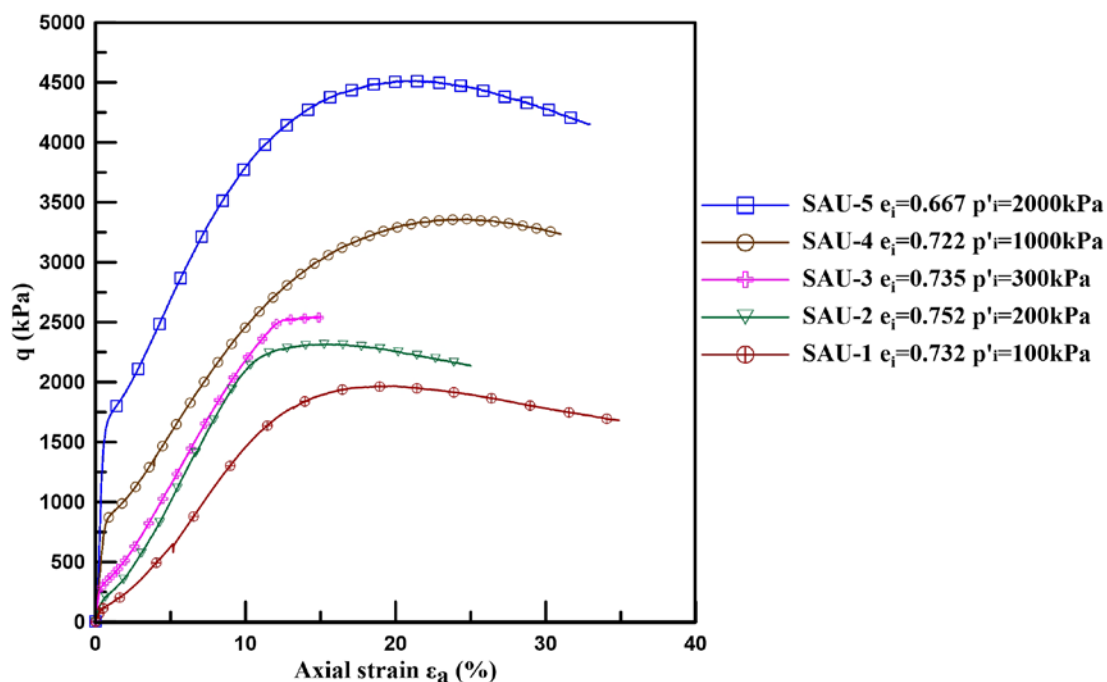
4.8.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31

Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου M31 υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.025 mm/min. Οι τριαξονικές δοκιμές για διάφορες τάσεις εγκιβωτισμού ($p'_i=100-2000$ kPa) σε παρόμοιες πυκνότητες ($e_i=0.667-0.752$) παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.43 έως 4.46 ώστε να προσδιορισθεί η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου M31 τριαξονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Στο Σχήμα 4.43 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων ($q - \epsilon_a$) για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό πυριτίας CS=10% κατά βάρος. Οι καμπύλες είναι ομοιόθετες υποδηλώνοντας εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους από το επίπεδο της τάσης εγκιβωτισμού. Σε όλα τα επίπεδα τάσης, η αποκλίνουσα τάση, q , φτάνει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές από αυτές της άμμου και στη συνέχεια ακολουθεί μία μικρή μείωση προς μία παραμένουσα τιμή. Επισημαίνουμε ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία δεν εμφάνισαν κάποιο εμφανές επίπεδο συγκέντρωσης τάσεων (shear band).

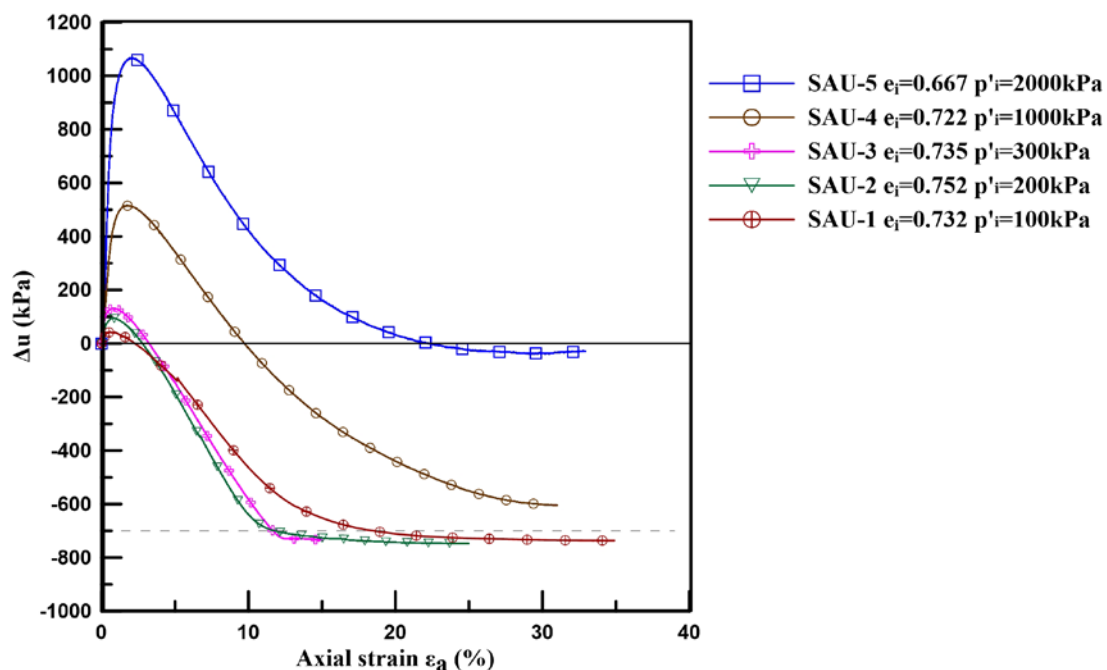
Στο Σχήμα 4.44 παραθέτονται οι υπερπίεσεις υγρού των πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση. Η συστολική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι εντονότερη όσο αυξάνεται η αρχική ενεργός τάση. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά μέχρι την ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_a \sim 1\%$ για $p'_i=100-300$ kPa και $\epsilon_a \sim 2\%$ για $p'_i=1000-2000$ kPa. Στη συνέχεια παρουσιάζουν έντονη διαστολική συμπεριφορά, αναπτύσσοντας πολύ μεγάλες υποπίεσεις. Η τάση για διαστολή είναι τόσο έντονη που τελικά το υγρό των πόρων υφίσταται σπηλαιώση (cavitation), αφού το υγρό έχει «καταναλώσει» όλη την πίεση που του είχαμε προσφέρει στο στάδιο του κορεσμού, back pressure=700 kPa. Οι καμπύλες υπερπίεσης πόρων για τα δοκίμια με $p'_i=100, 200$ και 300 kPa οριζοντιώνονται μόλις φτάσουν την τιμή $\Delta u=-700$ kPa, αφού τα δοκίμια αδυνατούν να αναπτύξουν περαιτέρω υποπίεση, όπως θα ήθελαν εξαιτίας της σπηλαιώσης. Τα παραπάνω καταδεικνύουν την αναγκαιότητα επιβολής αντιπίεσης στο στάδιο του

κορεσμού και μάλιστα όσο το δυνατόν μεγαλύτερης τιμής, για να αποφευχθεί η σπηλαιώση και να αναπτυχθούν οι υποπίεσεις πόρων. Για τις δοκιμές SAU-4 και SAU-5 με $p'_i=1000$ και 2000 kPa αντίστοιχα οι πιέσεις του υγρού των πόρων είναι $\Delta u > 700$ kPa, οπότε δεν εμφανίζεται σπηλαιώση. Οι καμπύλες των πιέσεων γι' αυτές τις δοκιμές, οριζοντιώνονται σε αξονικές παραμορφώσεις $\epsilon_a \sim 25\%$. Οι δοκιμές με μεγάλη ενεργό τάση εμφανίζουν πολύ μικρότερη τάση για διαστολικότητα από τις δοκιμές με μικρές ενεργές τάσεις.

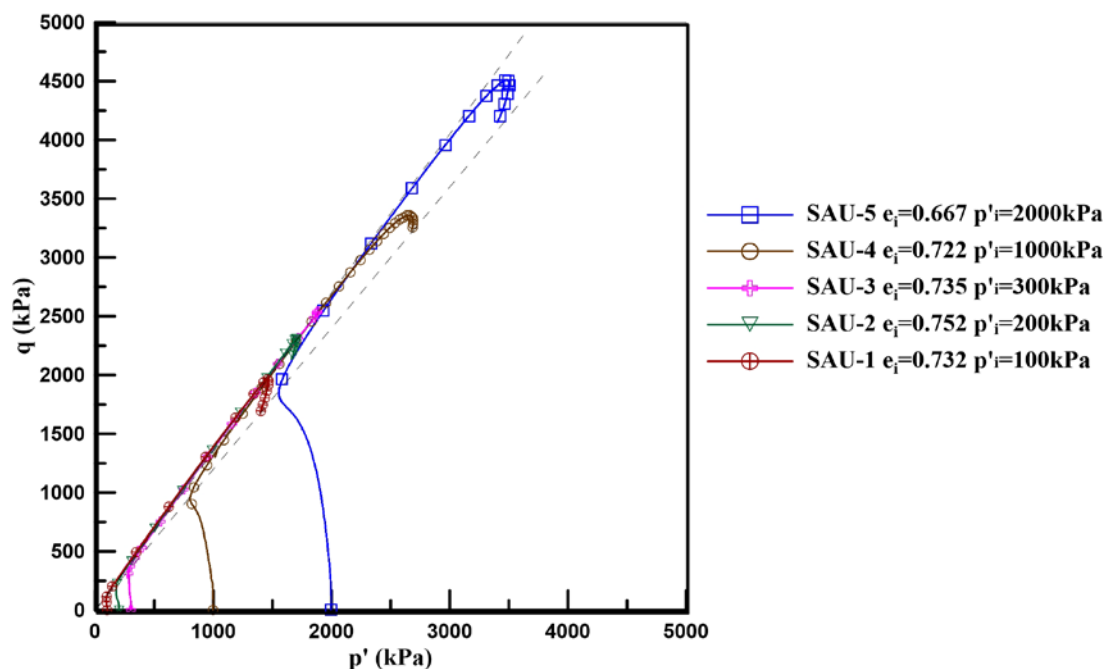
Στο Σχήμα 4.45 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q-p'$ και στο Σχήμα 4.46 οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $t-s'$. Η γωνία αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά υπολογίζεται $\phi_{PTL}=31^0$. Επιπλέον, ο λόγος τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά είναι $q/p'=1.25$. Η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων είναι άμεσα εξαρτημένη από την αρχική ενεργό τάση του δοκιμίου αφού μειώνεται με την αύξηση της τάσης εγκιβωτισμού. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων για τη δοκιμή SAU-1 με $p'_i=100$ kPa είναι 1.43 σε αξονική παραμόρφωση $\epsilon_a=4\%$ ενώ για τη δοκιμή SAU-5 με $p'_i=2000$ kPa είναι $q/p'=1.34$ σε αξονική παραμόρφωση $\epsilon_a=8\%$. Όλες οι καμπύλες, ανεξαρτήτως αρχικής ενεργού τάσης καταλήγουν σε μία παραμένουσα τιμή λόγου τάσεων, $q/p'=1.22$ περίπου. Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας γωνίας διατμητικής αντοχής είναι επίσης άμεσα εξαρτημένη από την αρχική ενεργό τάση του δοκιμίου αφού μειώνεται με την αύξηση της τάσης εγκιβωτισμού. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της για τη δοκιμή SAU-1 με $p'_i=100$ kPa είναι $\phi=35,2^0$ σε αξονική παραμόρφωση $\epsilon_a=4\%$ ενώ για τη δοκιμή SAU-5 με $p'_i=2000$ kPa είναι $\phi=33,2^0$ σε αξονική παραμόρφωση $\epsilon_a=8\%$. Η παραμένουσα γωνία διατμητικής αντοχής, για τις δοκιμές που δεν υπέστησαν σπηλαιώση είναι $\phi_u=30.3^0$.



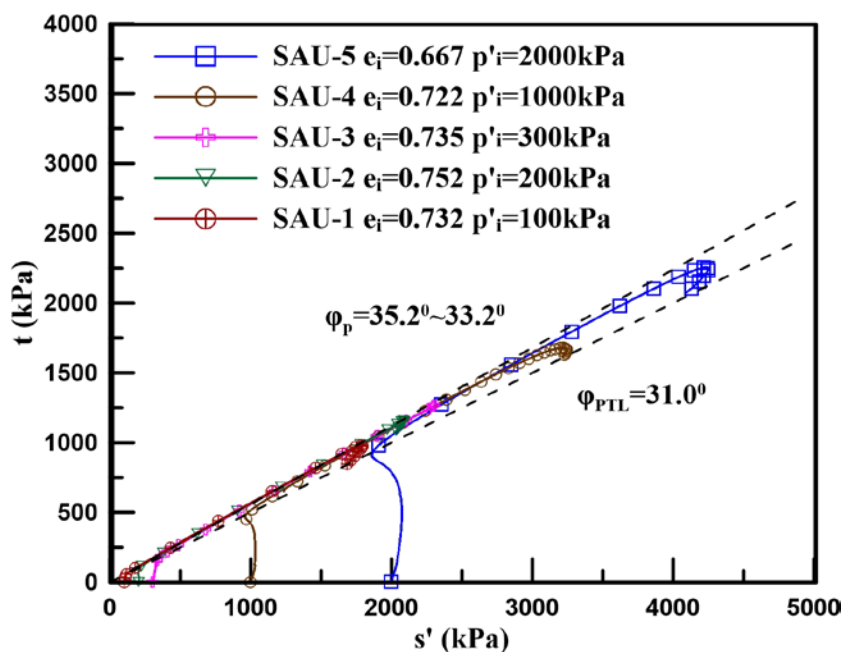
Σχήμα 4. 43 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 4. 44 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Καμπύλες υπερπίεσης υγρού των πόρων- αξονικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 4. 45 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q-p'$



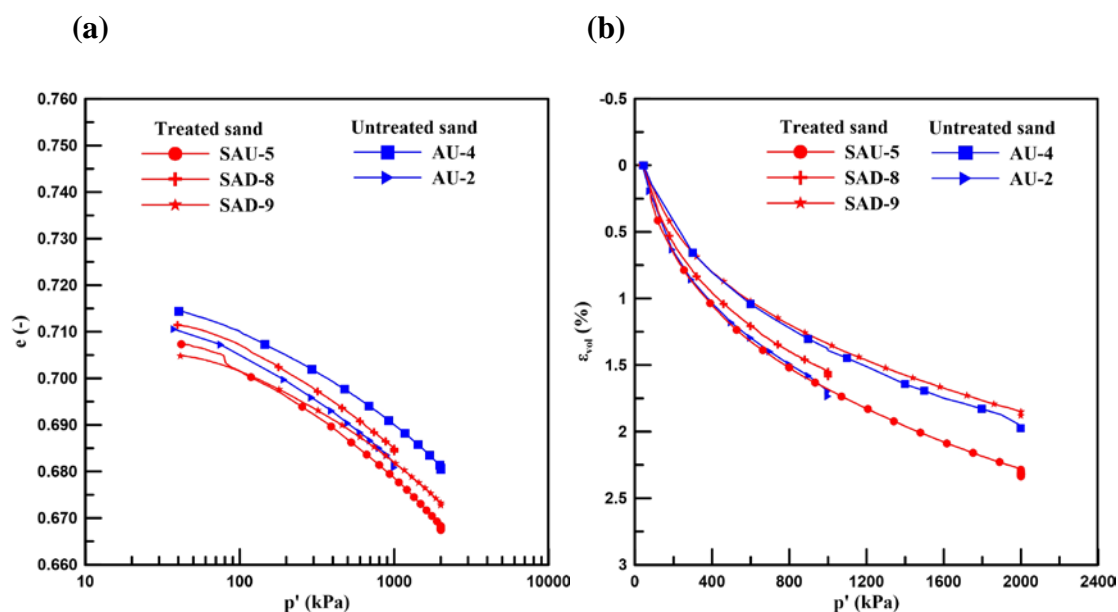
Σχήμα 4. 46 Τριαξονικές δοκιμές σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $t-s'$.

4.9 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ M31 ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΠΟΔΙΖΟΜΕΝΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ.

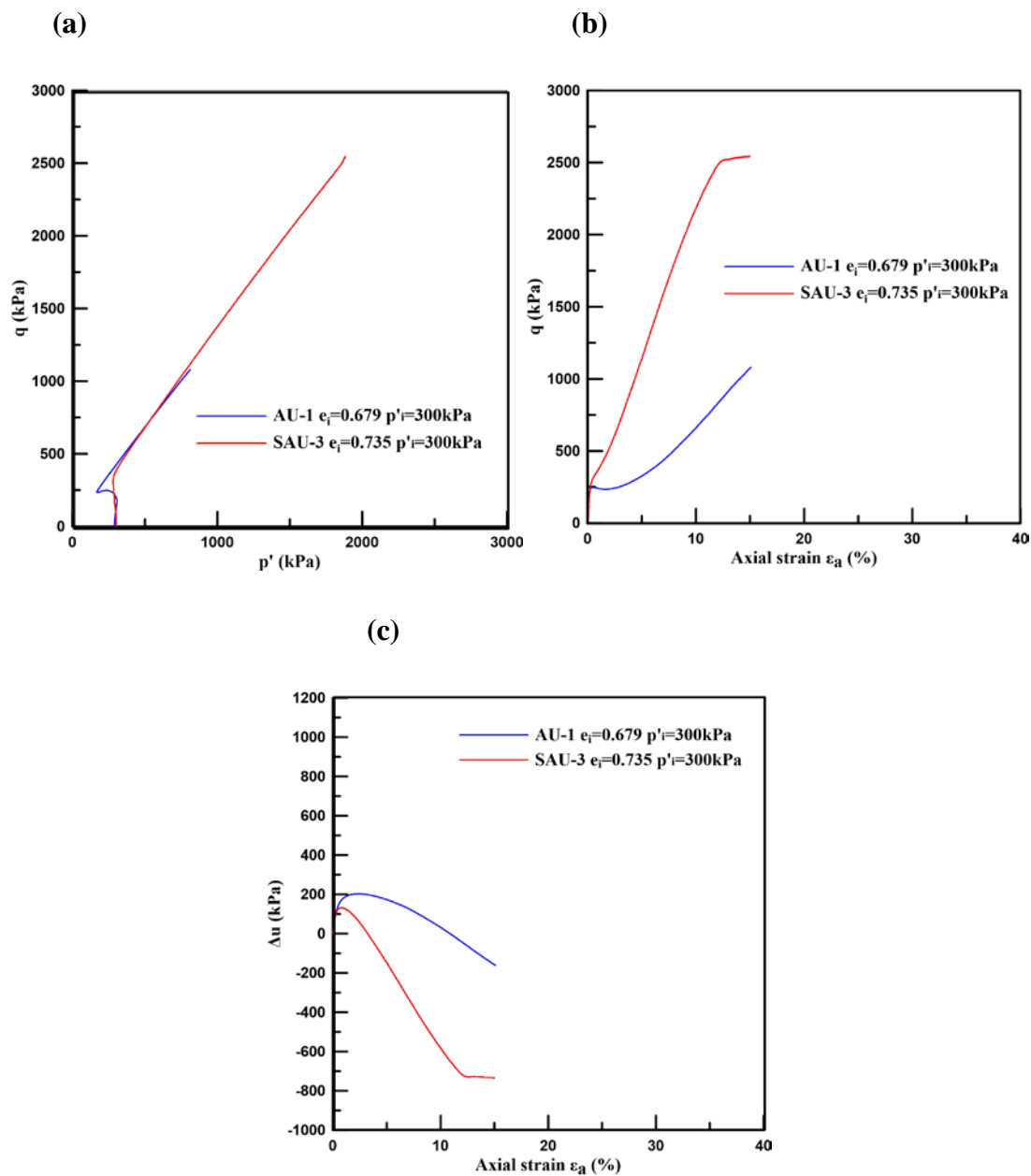
Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άμμου M31 και σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου με κολλοειδή πυριτία (ποσοστό σταθεροποιητή CS=10%). Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των φυσικών και των αντίστοιχων σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών σε όρους αποκλίνουσας τάσης-παραμόρφωσης ($q-\epsilon_a$), υπερπίεσης υγρού πόρων-παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_a$) και διαδρομών τάσεων ($q-p'$). Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται, η σχέση του μέγιστου λόγου τάσεων και της μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής με την αρχική ενεργό τάση για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.46 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης που προκύπτουν από τις αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου. Η ισότροπη στερεοποίηση για τα σταθεροποιημένα δοκίμια έχει επιβληθεί με αργό ρυθμό. Παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα 4.46(a) οι καμπύλες $e-p'$ για φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια είναι παράλληλες. Επιπλέον, στο διάγραμμα $e_{vol}-p'$ (Σχήμα 4.46 (b) παρατηρούμε ότι οι ογκομετρικές παραμορφώσεις φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων παρόμοιας πυκνότητας είναι σχεδόν ίδιες με μικρές αποκλίσεις. Στα Σχήματα 4.48 έως 4.49 συγκρίνεται η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων με αυτή των φυσικών αντίστοιχης ή μεγαλύτερης πυκνότητας σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις ($p'_i=300, 1000$ και 2000 kPa). Παρατηρούμε ότι για όλες τις τάσεις εγκιβωτισμού, τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τα αντίστοιχα φυσικά δοκίμια άμμου M31. Η αύξηση αυτή περιορίζεται με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης. Στα διαγράμματα υπερπίεσης υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης, $\Delta u-\epsilon_a$, διαφαίνεται ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια συστέλλονται για μικρότερο χρονικό διάστημα από τα δοκίμια άμμου, αναπτύσσοντας μικρότερες υπερπίεσεις και γρήγορα περνάνε στη διαστολική φάση. Οι καμπύλες υπερπίεσης του υγρού των πόρων των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι πιο απότομες στη

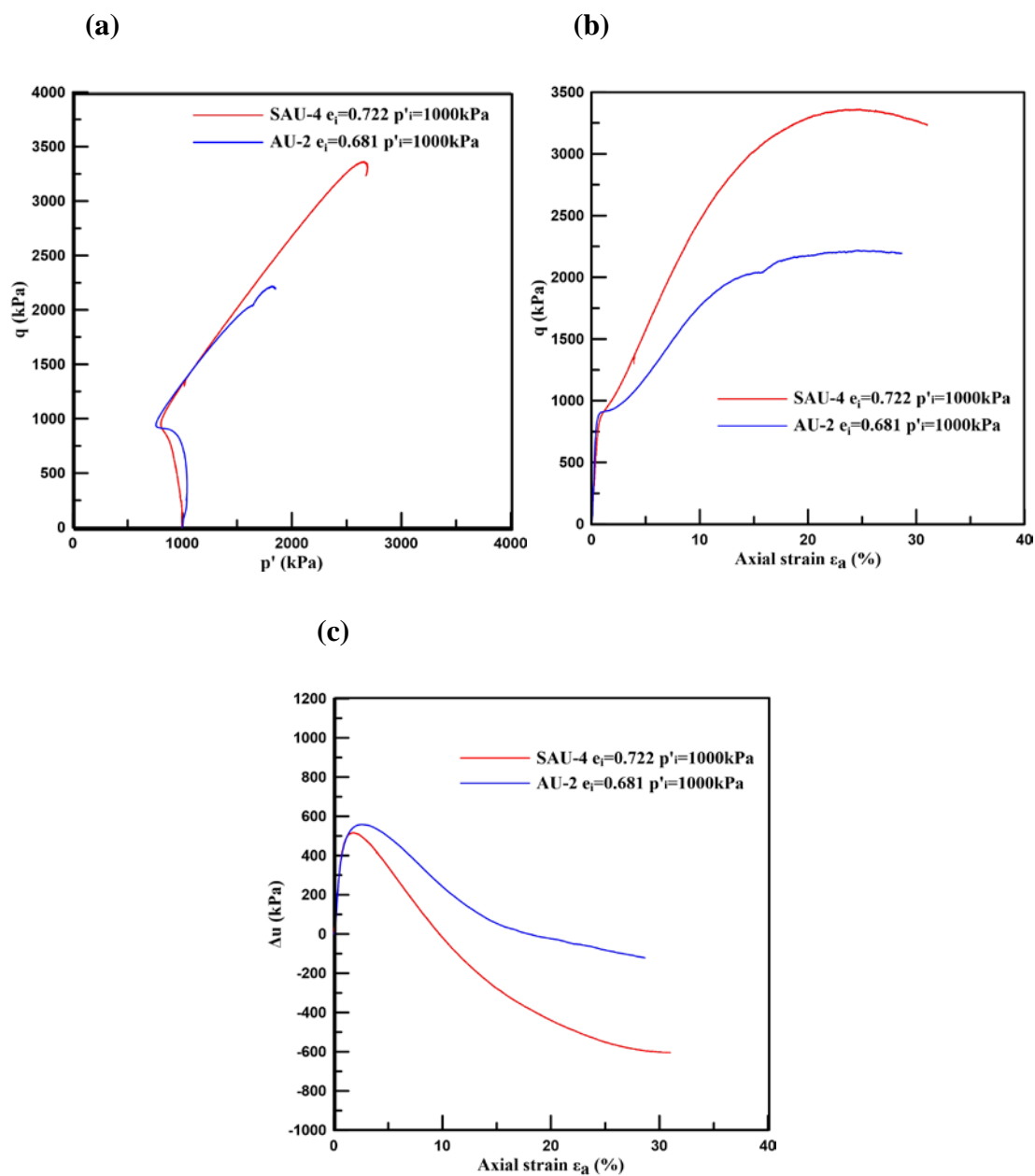
διαστολική φάση υποδηλώνοντας την πολύ υψηλότερη τάση για διαστολή των δοκιμίων. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.48 (c) αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες αρνητικές πιέσεις πόρων από το φυσικό δοκίμιο και υφίσταται σπηλαιώση. Αντίστοιχα, το σταθεροποιημένο δοκίμιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.49 (c) αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες αρνητικές πιέσεις πόρων από το φυσικό δοκίμιο οι οποίες σταθεροποιούνται σε αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_a=30\%$. Παρατηρώντας το διάγραμμα 4.50 συμπεραίνουμε ότι η τάση για διαστολικότητα του σταθεροποιημένου δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του αντίστοιχου φυσικού, αλλά αρκετά μικρότερη από αυτή των δοκιμίων με μικρότερη ενεργό τάση. Συγκεκριμένα, η τιμή της υπερπίεσης πόρων σταθεροποιείται σε τιμή $\Delta u = -20$ kPa σε αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_a=25\%$ πλησιάζοντας περισσότερο τη συμπεριφορά της άμμου.



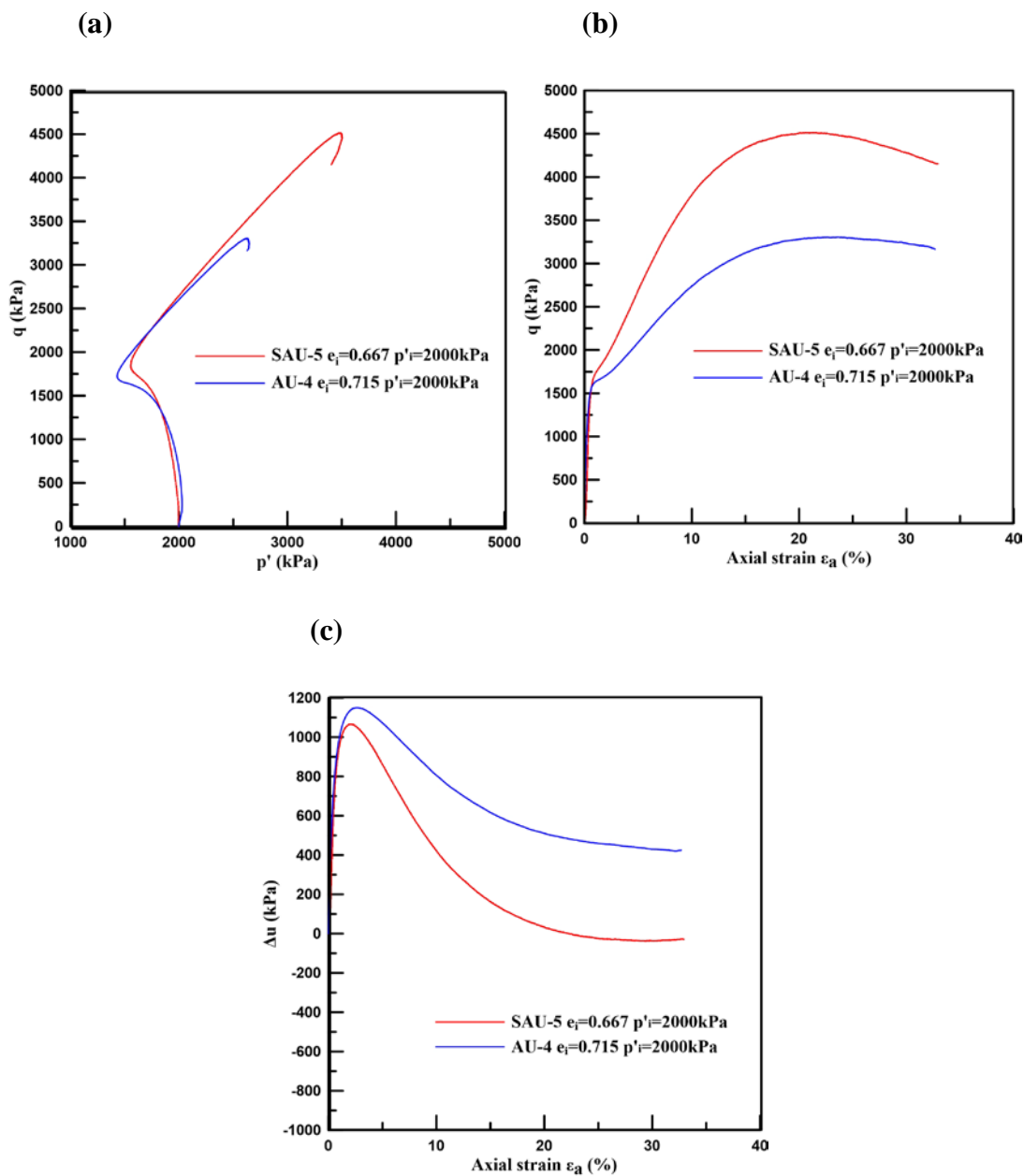
Σχήμα 4.47 Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια σε όρους (a) $e-p'$; (b) $\varepsilon_{vol}-p'$



Σχήμα 4. 48 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=300$ kPa: (a) καμπύλες διαδρομών τάσεων, (b) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (c) καμπύλες υπερπίεσης του υγρού των πόρων.



Σχήμα 4. 49 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=1000$ kPa: (a) καμπύλες διαδρομών τάσεων, (b) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (c) καμπύλες υπερπίεσης του υγρού των πόρων.



Σχήμα 4. 50 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 αρχικής ενεργού τάσης $p'_i=2000$ kPa: (a) καμπύλες διαδρομών τάσεων, (b) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (c) καμπύλες υπερπίεσης του υγρού των πόρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου M31. Γι' αυτό το σκοπό εκτελέστηκαν μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές στη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Στο στάδιο του κορεσμού η επιβολή μεγάλης τιμής αντιπίεσης (back pressure) δε φαίνεται να καταστρέφει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Κρίνεται απαραίτητη η επιβολή της, για να εξασφαλισθεί ο κορεσμός του δοκιμίου και κυρίως για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης (cavitation) στις αστράγγιστες δοκιμές.
- Στο στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης ο ρυθμός αύξησης της πλευρικής πίεσης επιδρά στη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου. Η διαδικασία στράγγισης των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι μια αργή διαδικασία, γι' αυτό και η αύξηση της ενεργού τάσης χρειάζεται να γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς, από αυτούς που εφαρμόζονται στην άμμο.
- Όταν η στερεοποίηση πραγματοποιείται με αργό ρυθμό, τότε τα σταθεροποιημένα δοκίμια υφίστανται τις ίδιες ογκομετρικές παραμορφώσεις με τα αντίστοιχης πυκνότητας δοκίμια άμμου M31.
- Στις τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης, τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τα δοκίμια άμμου. Το ποσοστό αύξησης της αποκλίνουσας τάσης για τα δοκίμια με μικρές ενεργές τάσεις ($p'_i=200$ kPa) είναι 30% και μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης ($p'_i=700$ kPa) σε 15%.
- Στις τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης τα σταθεροποιημένα δοκίμια αναπτύσσουν μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων q/p' μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή της φυσικής άμμου. Η μέγιστη τιμή αυτή για τα σταθεροποιημένα δοκίμια μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης: από $q/p'=1.55$ για αρχική ενεργό τάση $p'_i=100$ kPa σε $q/p'=1.35$ για

$p'_i=2000$ kPa. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων για την άμμο παραμένει περίπου σταθερή με τιμή $q/p'=1.32$.

- Στις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης η τιμή της αποκλίνουσας τάσης και του λόγου τάσεων μειώνεται με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης μέχρι μια παραμένουσα τιμή παρόμοια με αυτή της φυσικής άμμου για παραμορφώσεις $\varepsilon_a > 20\%$ στο τελικό στάδιο (ultimate state).
- Τα σταθεροποιημένα δοκίμια υπό στραγγιζόμενη φόρτιση αρχικά συστέλλονται ελαφρώς λιγότερο από τα δοκίμια άμμου και στη συνέχεια διαστέλλονται με πολύ υψηλό ρυθμό, καταλήγοντας σε πολύ μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις από αυτές της άμμου. Ο ρυθμός διαστολικότητας των σταθεροποιημένων δοκιμίων μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης.
- Η μέγιστη τιμή της διαστολικότητας αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την επίτευξη του μέγιστου λόγου τάσεων στα σταθεροποιημένα και τα φυσικά δοκίμια άμμου M31, με τα πρώτα να αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερη τιμή από τα δεύτερα.
- Η γωνία διατμητικής αντοχής στις τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης για τα σταθεροποιημένα δοκίμια μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης οδηγώντας σε μια καμπυλωμένη περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb με μικρή συνοχή, $c \sim 12$ kPa. Η μέγιστη τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής για τα σταθεροποιημένα δοκίμια προκύπτει $\phi' = 38.3^\circ$ για αρχική ενεργό τάση $p'_i = 100$ kPa και μειώνεται σε $\phi' = 33.3^\circ$ για $p'_i = 2000$ kPa. Αντίθετα, η μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής για την άμμο παραμένει περίπου σταθερή με τιμή $\phi' = 32.5^\circ$.
- Στις τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου αναπτύσσουν σημαντικά μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση, από τα δοκίμια άμμου σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων όπως παρατηρήθηκε και στις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης.
- Στις τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου αρχικά παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά, αναπτύσσοντας υπερπίεσεις πόρων περίπου ίδιες με τα φυσικά δοκίμια

άμμου. Στη συνέχεια, εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη τάση για διαστολή αναπτύσσοντας υψηλές αρνητικές πιέσεις. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια με αρχική ενεργό τάση $p'_i < 1000$ kPa ανέπτυξαν αρνητικές πιέσεις πόρων ($\Delta u = -700$ kPa) και υπέστησαν σπηλαίωση (cavitation). Το παραπάνω φαινόμενο αποδεικνύει την εξαιρετικά μεγάλη τάση για διαστολή των σταθεροποιημένων δοκιμίων, αλλά και την αναγκαιότητα επιβολής υψηλής αντιπίεσης (back pressure) για την αποτροπή του.

- Στο στάδιο αλλαγής κατάστασης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά (phase transformation) στις τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης, η γωνία διατμητικής αντοχής για τα δοκίμια άμμου προκύπτει $\phi'_{PTL} = 30.5^\circ$ και για τα σταθεροποιημένα δοκίμια προκύπτει $\phi'_{PTL} = 31.0^\circ$. Στην κατάσταση αστοχίας η μέγιστη τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής για την άμμο M31 προκύπτει $\phi' = 32.5^\circ$ ενώ για τα σταθεροποιημένα δοκίμια η τιμή αυτή κυμαίνεται ανάλογα με την αρχική ενεργό τάση από $\phi' = 35.2^\circ$ για $p'_i = 100$ kPa έως $\phi' = 33.2^\circ$ για $p'_i = 2000$ kPa.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agapoulaki G.I. and Papadimitriou A.G. (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 M.G., Smith D.M., Eldred P.J.L. and Toll D.G. (eds)). Institution of Civil Engineers, London, UK, vol. 5, pp. 2331–2336, <http://dx.doi.org/10.1680/ecsmge.60678>. vol5. 356.

Baek S., Pence T.J. (2011), “Inhomogeneous deformations of elastomer gels in equilibrium under saturated and unsaturated conditions”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59 (2011) 561-582

Bareither C.A., Benson C.H. and Edil T.B. (2008), Reproducibility of direct shear tests conducted on granular backfill materials. *Geotechnical Testing Journal* 31(1): 1–11.

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

Bergna H.E. and Roberts W.O. (eds) (2005), *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. CRC, Boca Raton, FL, USA.

Boukoulas G.D., Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G. (2003), “A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23 (2003) 115–125.

Brinker C.J. and Scherer G.W. (eds) (1990), *Sol–Gel Science: the Physics and Chemistry of Sol–Gel Processing*. Academic Press, Cambridge, MA, USA.

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

Díaz-Rodríguez J.A., Antonio-Izarraras V.M., Bandini P. and López-Molina J.A. (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 N.C., Becker A.M. and Lau G.Y. (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.

Finn W.D.L. and Vaid Y.P. (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 P.M. (2000), “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.

Gallagher P.M. and Lin Y. (2009), “Colloidal silica transport through liquefiable porous media”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, 2009; DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000123.

Gallagher P.M. and Mitchell J.K. (2002), Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22(9–12): 1017–1026.

Gallagher P.M., 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, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241).

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

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

Georgiannou V.N. and Konstadinou M. (2014), Torsional Shear Behavior of Anisotropically Consolidated Sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 140, Issue 2 (February 2014) DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000985. 2013 American Society of Civil Engineers.

Georgiannou V.N. and Tsomokos A. (2008), Comparison of two fine sands under torsional loading. Canadian Geotechnical Journal 45(12): 1659–1672, <http://dx.doi.org/10.1139/T08-083>.

Georgiannou V.N., Pavlopoulou E.M. and Bikos Z. (2017), Mechanical behaviour of sand stabilised with colloidal silica, Geotechnical Research (under publication), <http://dx.doi.org/10.1680/jgere.16.00017>

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

Βιβλιογραφία

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

Kolbuszewski J.J. (1948), An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 21-30 June 1948, 158-165.

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

Mayne P.W., Jones J.S. Jr. and Dumas J.C. (1984), Ground response to dynamic compaction. Journal of Geotechnical Engineering 110: 757–774.

Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J. M. (1999), “Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, 1999; 125(6):461–469.

Porcino D., Marciandò 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, <http://dx.doi.org/10.1080/17486025.2011.560287>.

Porcino D., Marciandò 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>.

Seed H.B. and Lee K.L. (1966), Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 92(SM6): 105–134.

Seed H.B., Idriss I.M., Makdisi F.I. and Banerjee N.G. (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.

Towhata I. (2008), “Geotechnical Earthquake Engineering”, Springer.

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

Βιβλιογραφία

Engineering, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, Istanbul, Turkey, pp. 313–318.

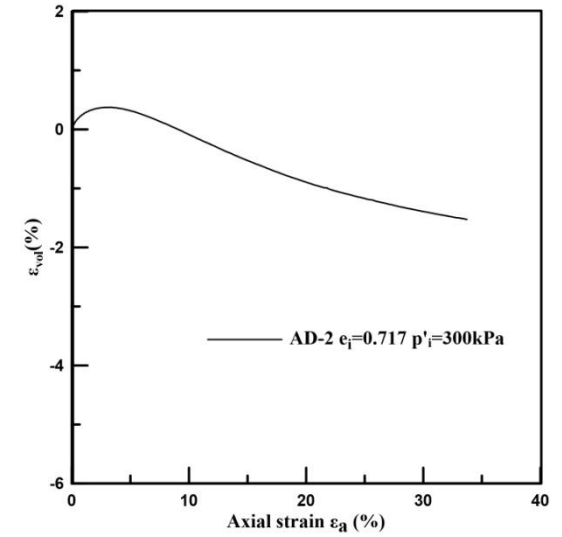
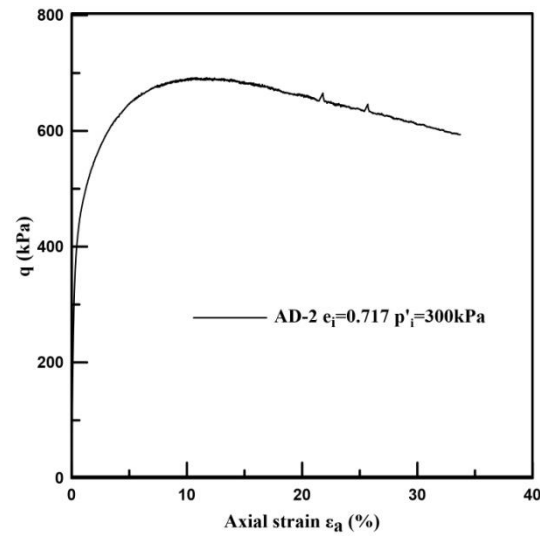
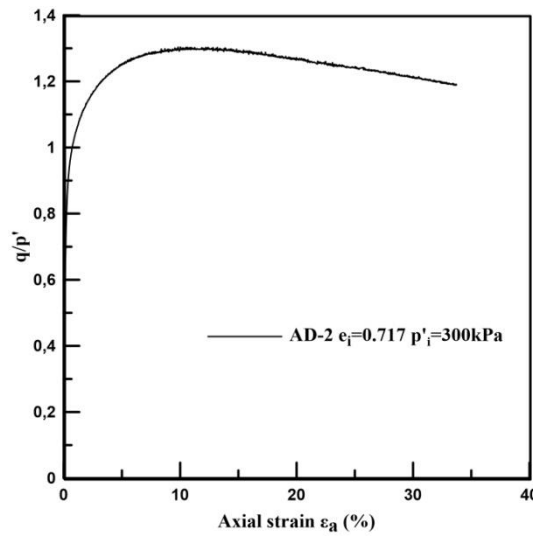
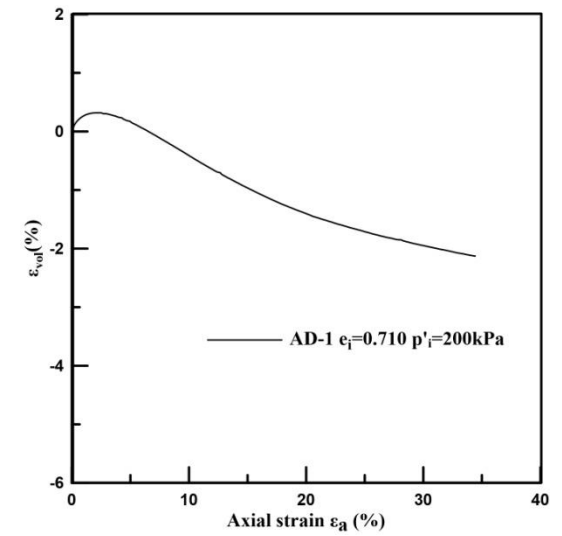
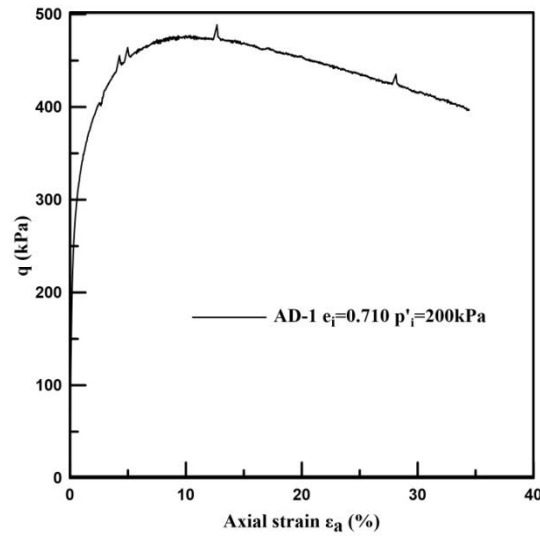
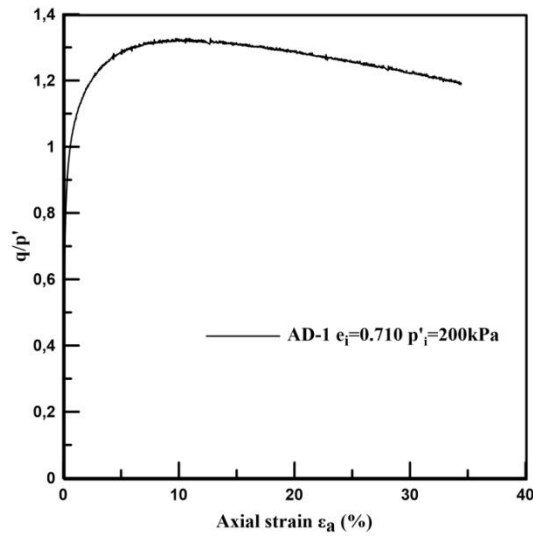
Vigil G., Xu Z., Steinberg S. and Israelachvili J. (1994) Interactions of silica surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* 165: 367–385.

Wang Y.H. and Leung S.C. (2008), Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134(7): 992–1004, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:7\(992\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(992)).

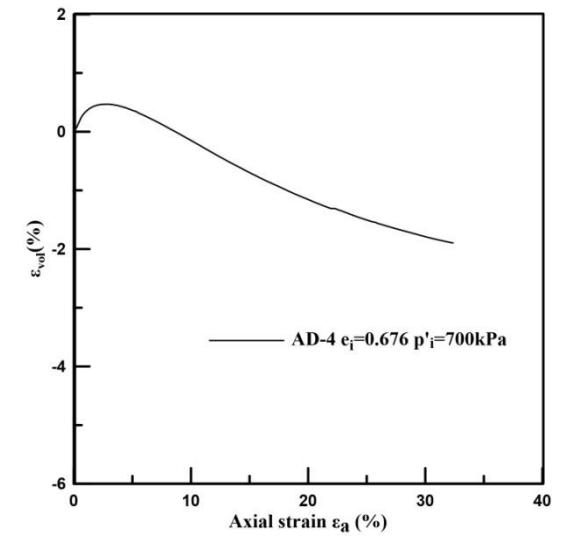
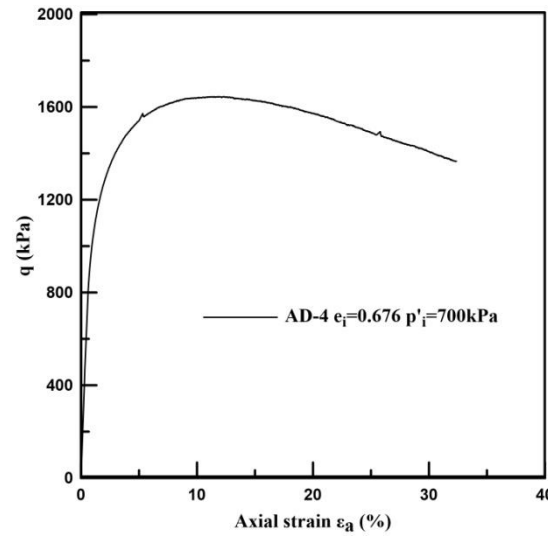
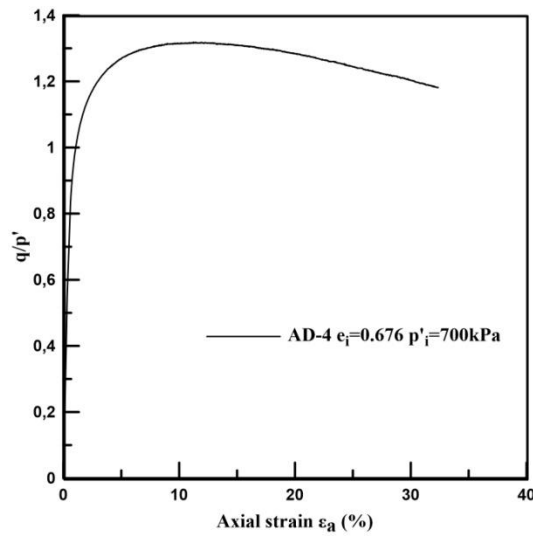
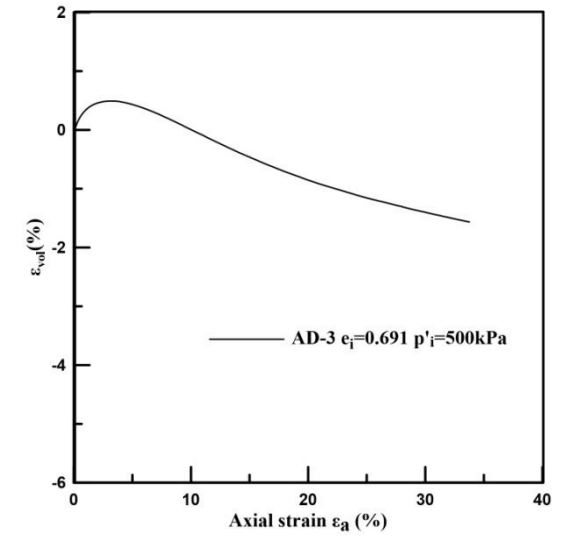
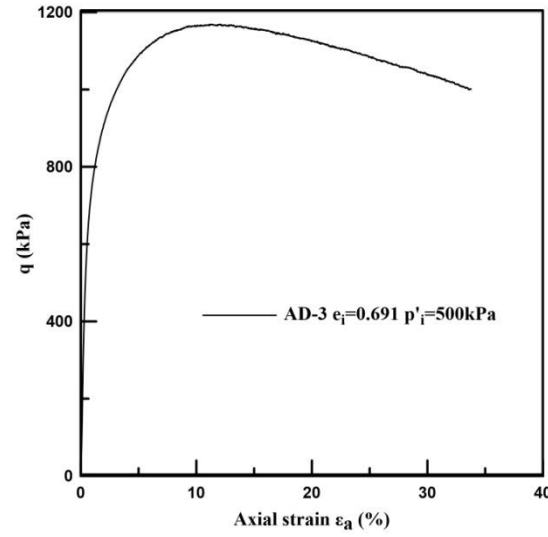
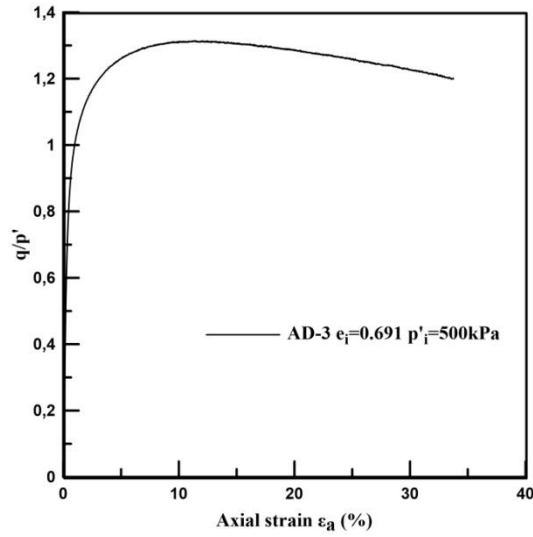
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-1

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΥΠΟ ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ Μ31



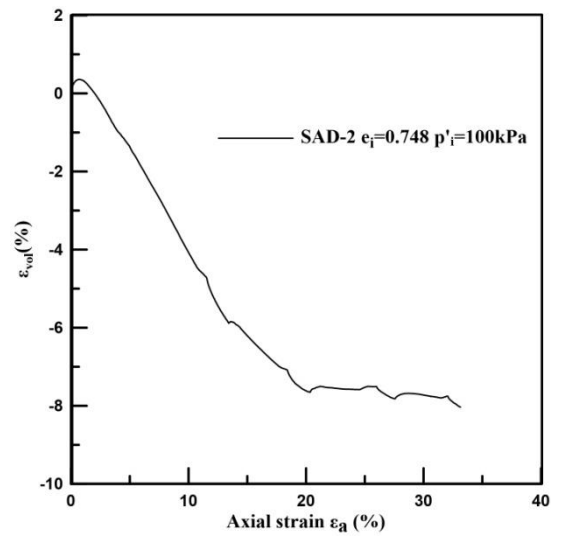
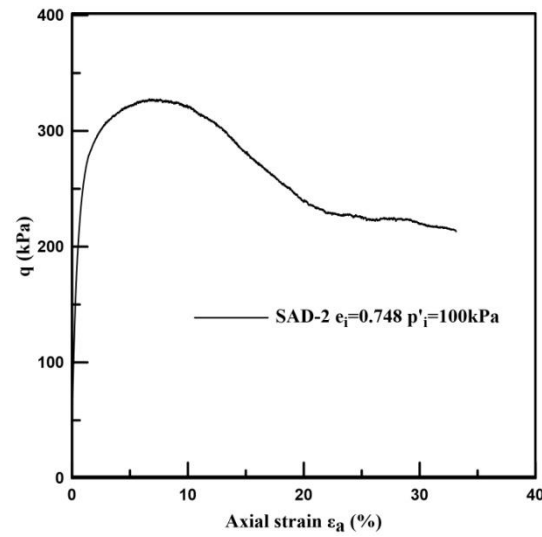
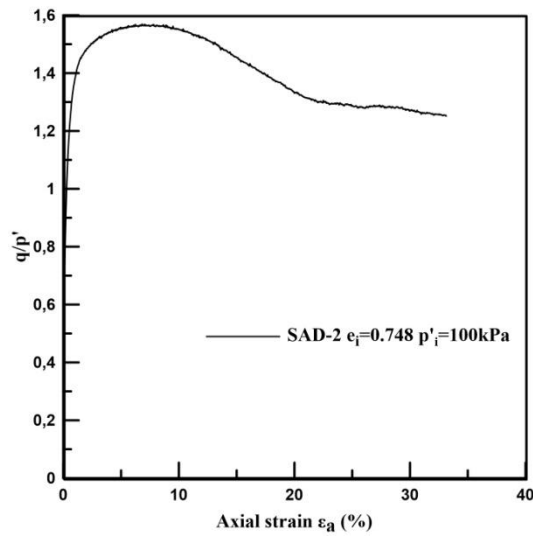
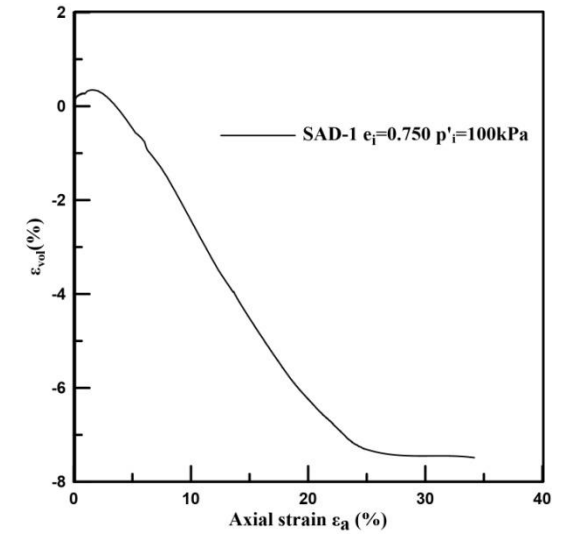
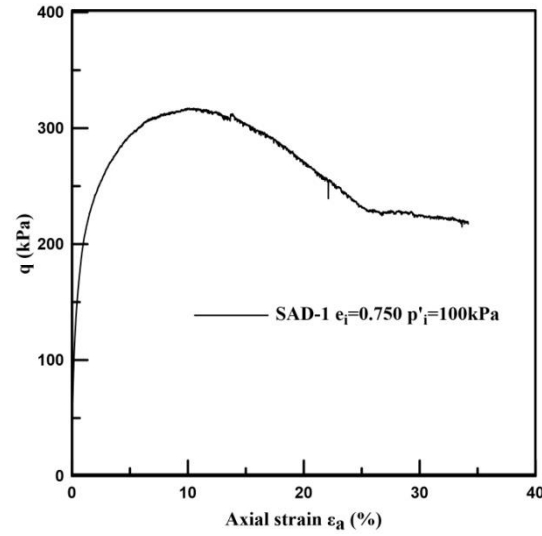
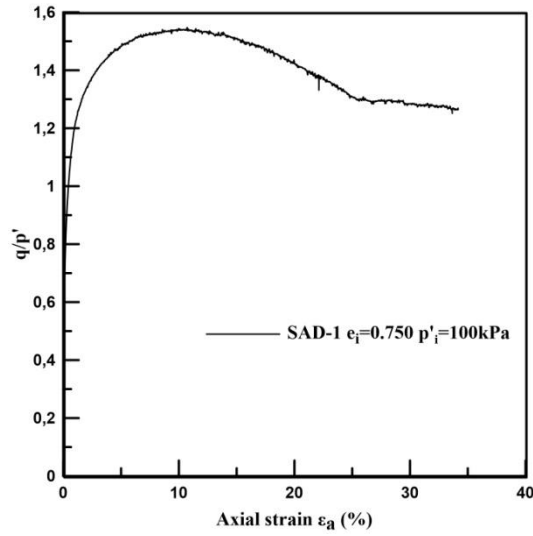
Σχήμα Π-1. 1 Δοκιμή AD-1 (πάνω σειρά) και AD-2 (κάτω σειρά)



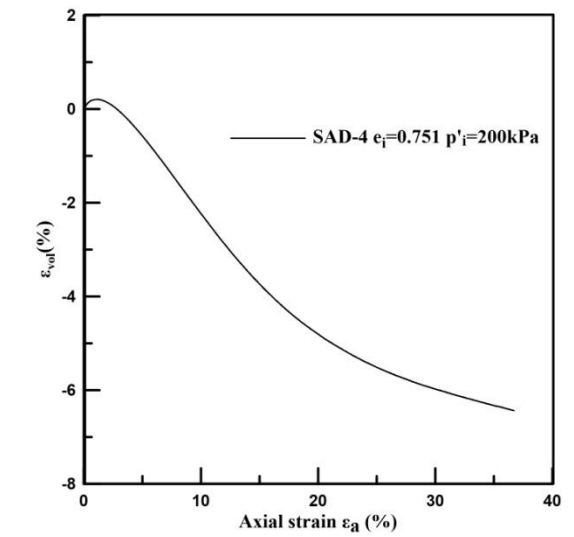
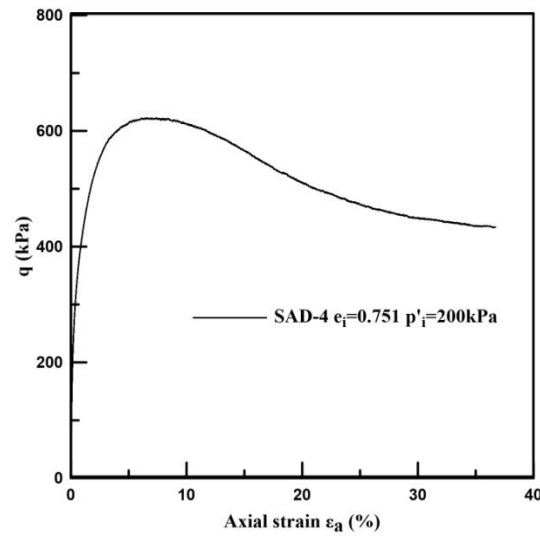
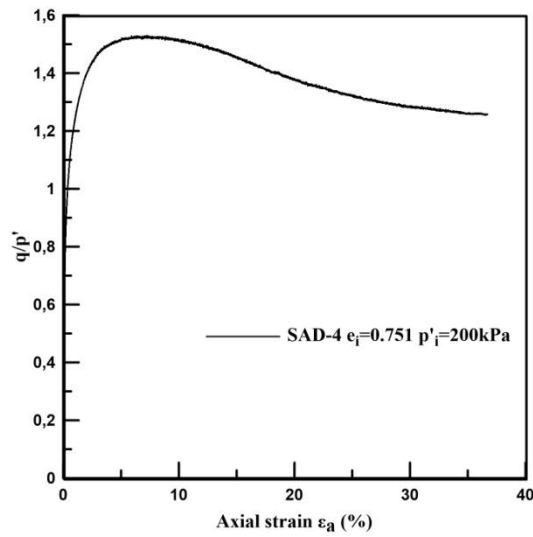
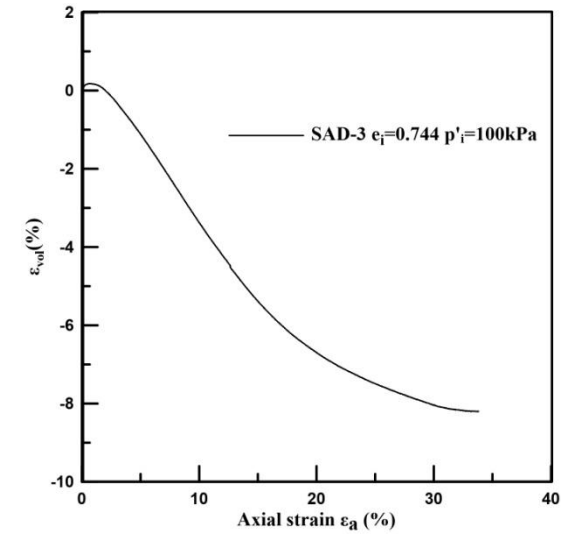
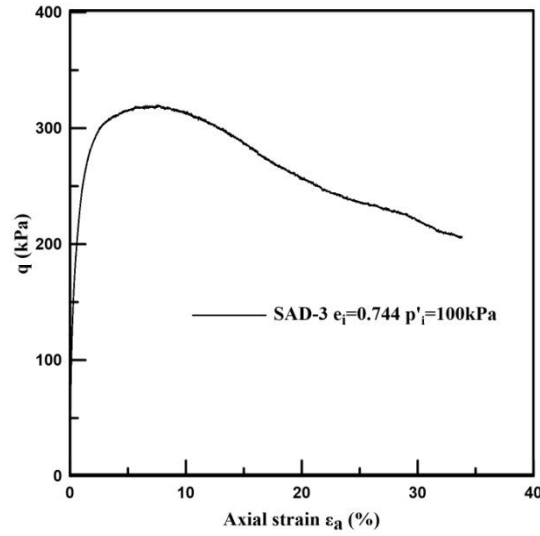
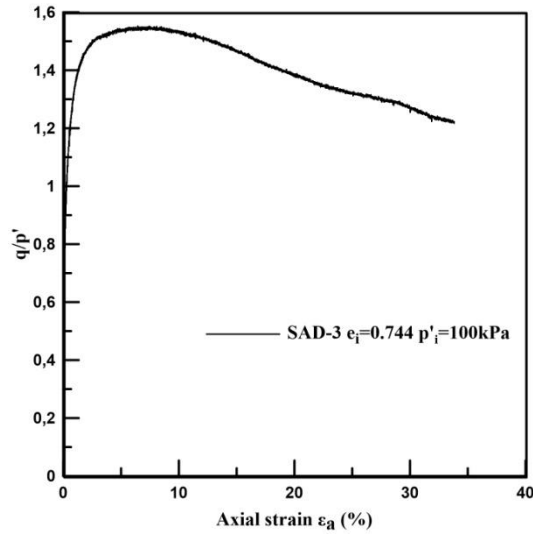
Σχήμα Π1. 2: Δοκιμή AD-3 (πάνω σειρά) και AD-4 (κάτω σειρά)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-2

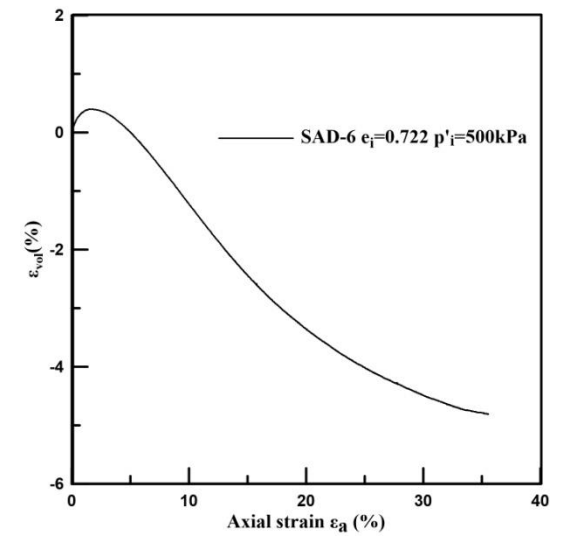
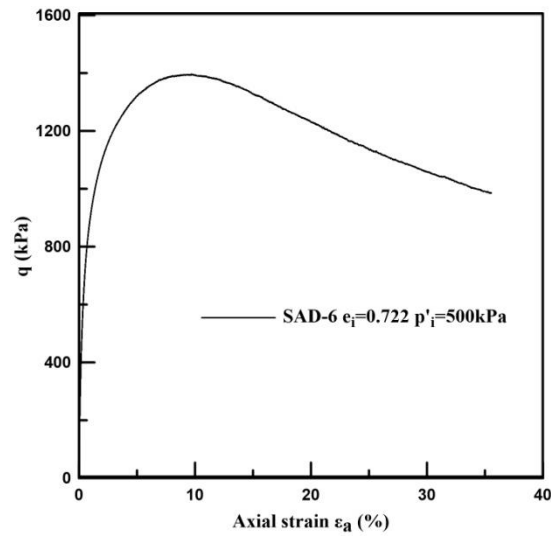
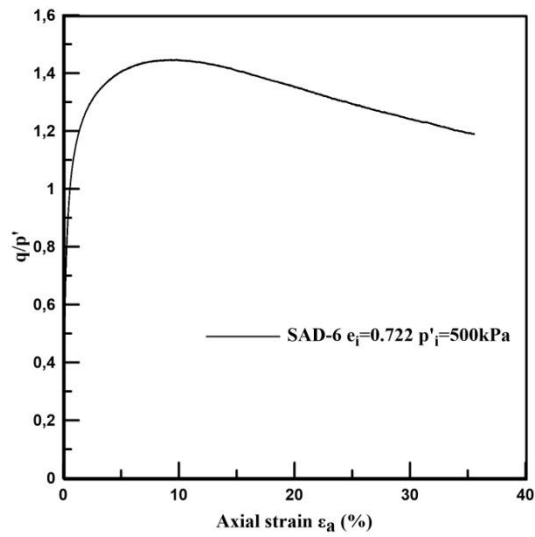
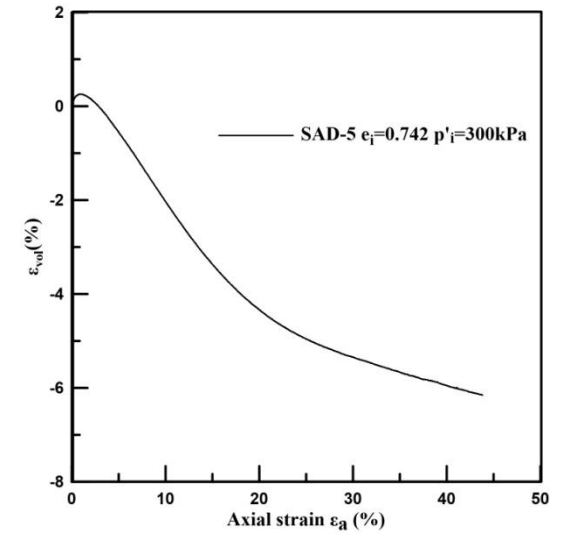
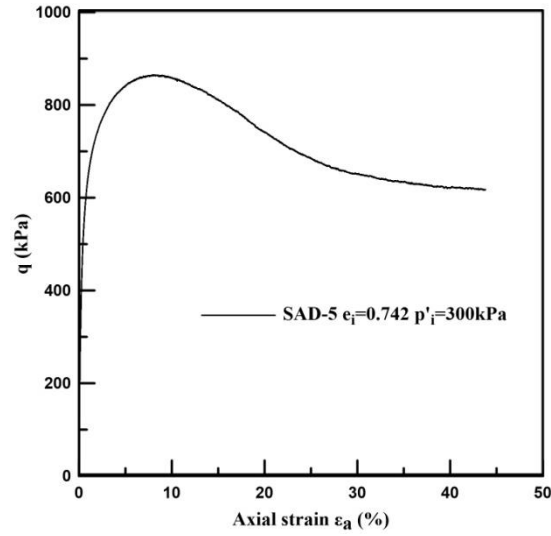
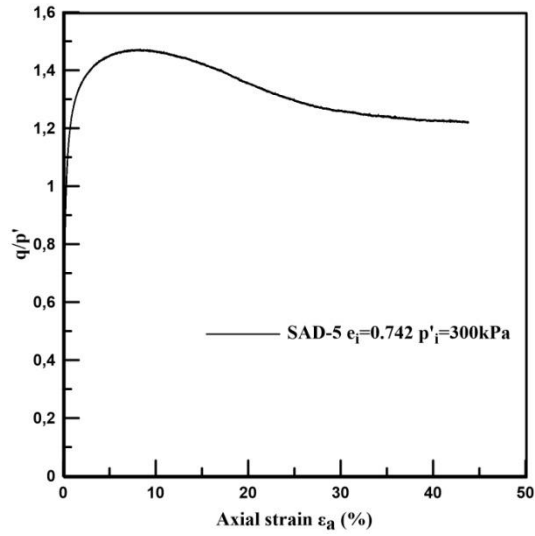
**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΥΠΟ
ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟ Μ31**



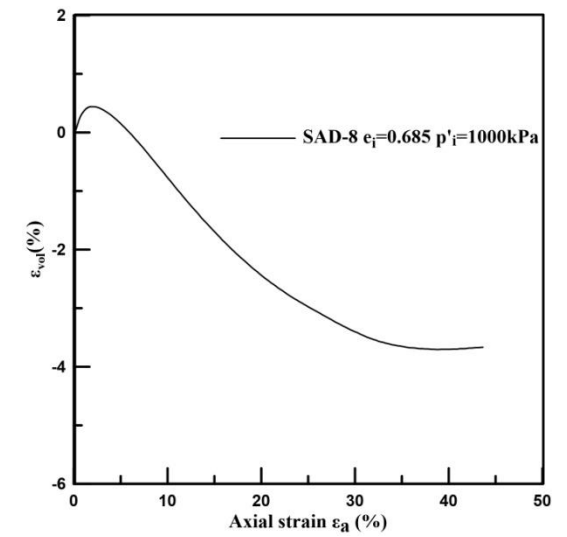
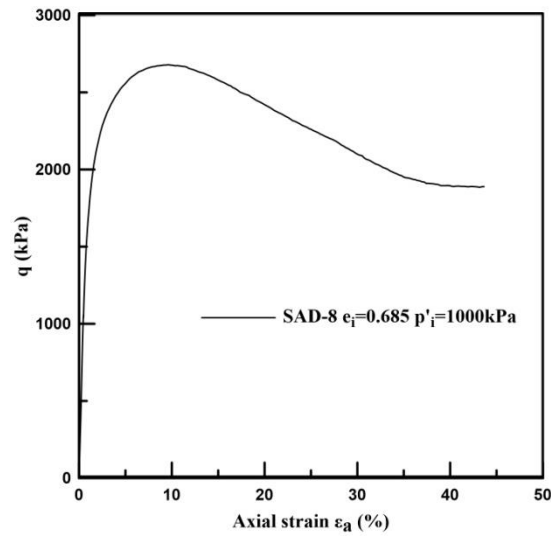
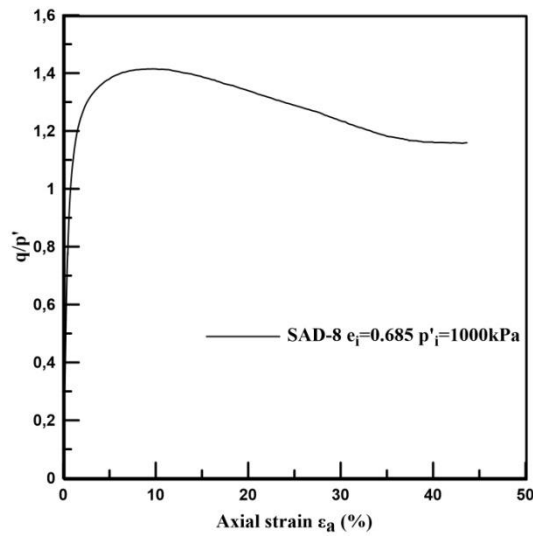
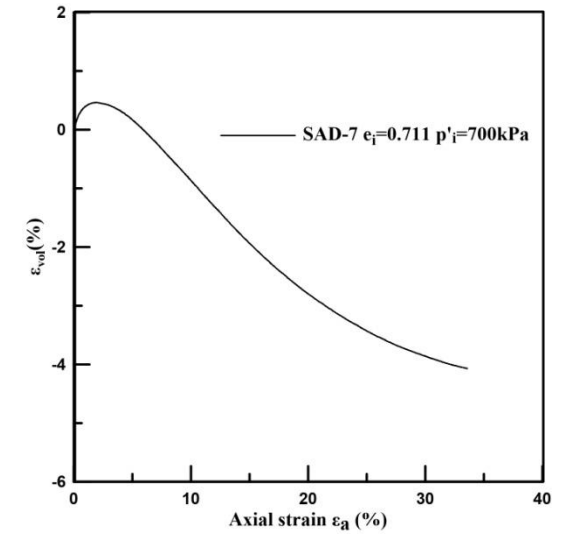
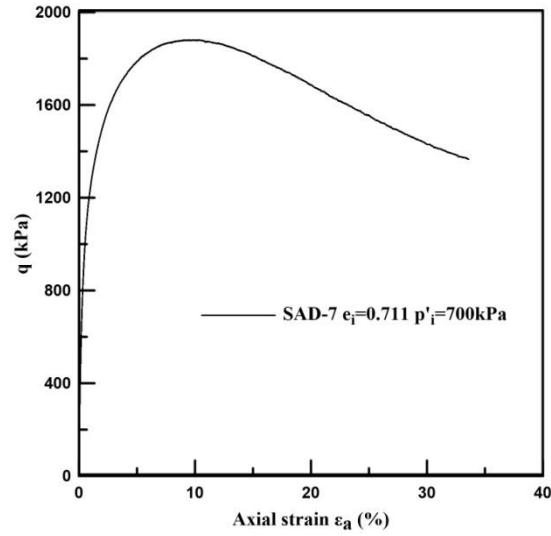
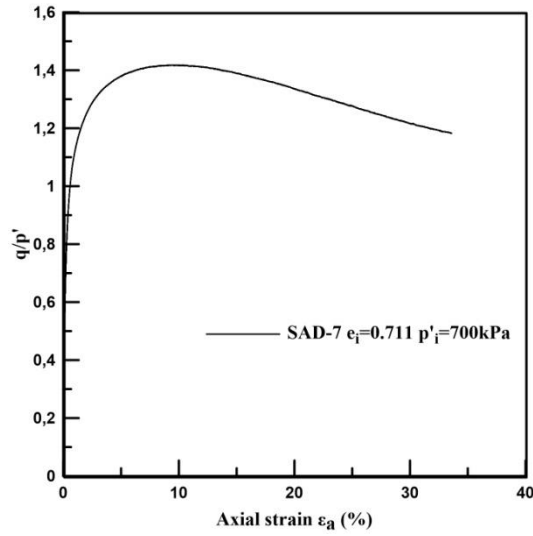
Σχήμα Π2. 1: Δοκιμή SAD-1 (πάνω σειρά) και SAD-2 (κάτω σειρά)



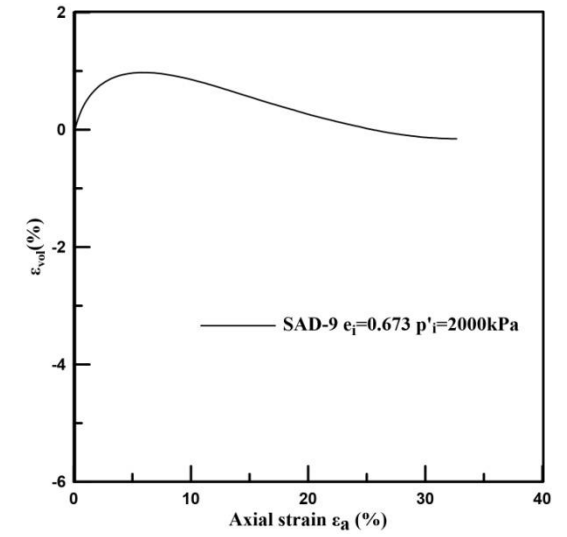
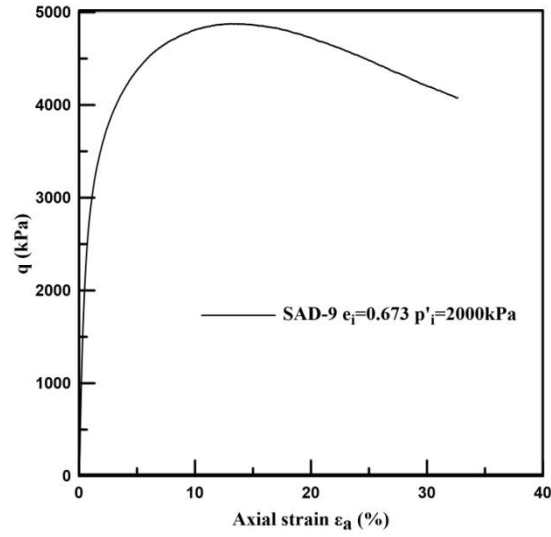
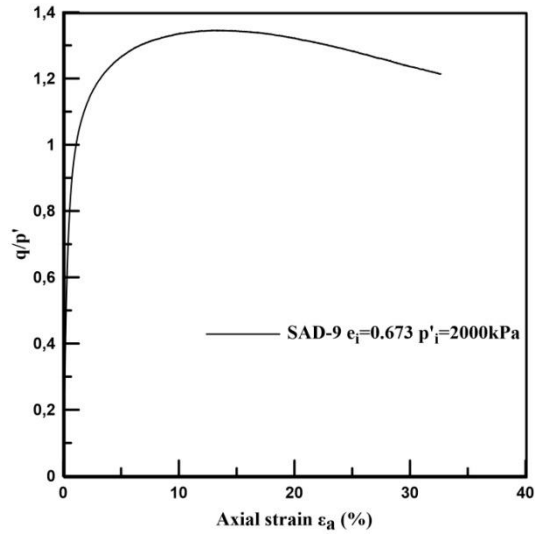
Σχήμα Π2. 2: Δοκιμή SAD-3 (πάνω σειρά) και SAD-4 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π2. 3: Δοκιμή SAD-5 (πάνω σειρά) και SAD-6 (κάτω σειρά)



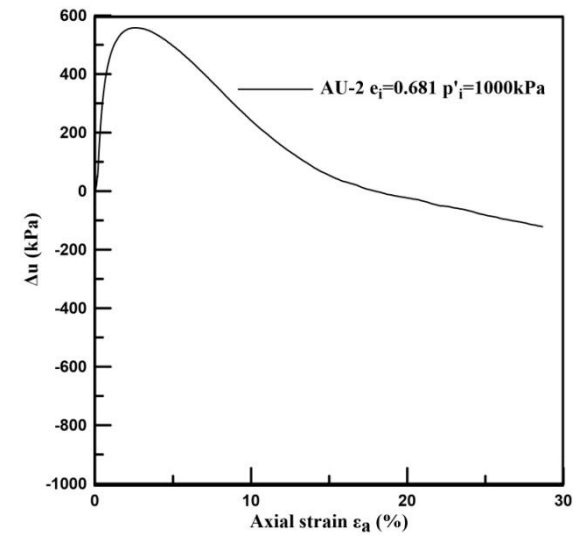
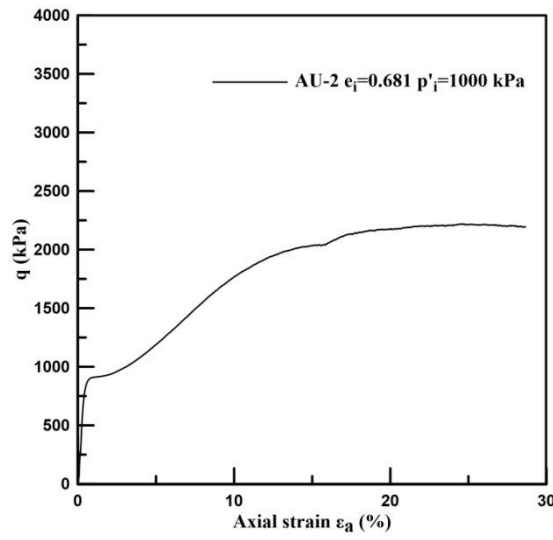
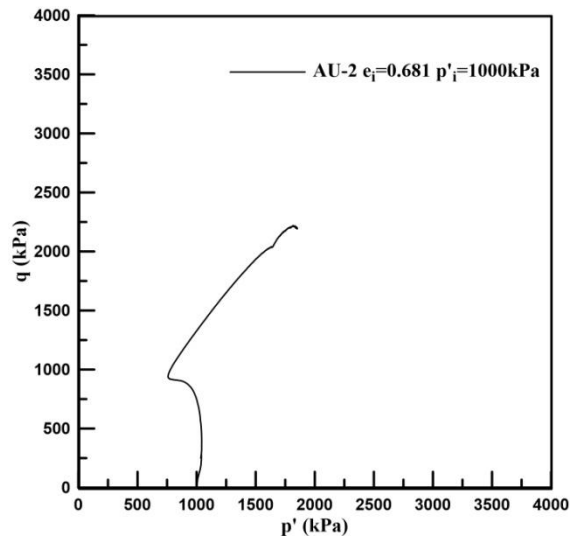
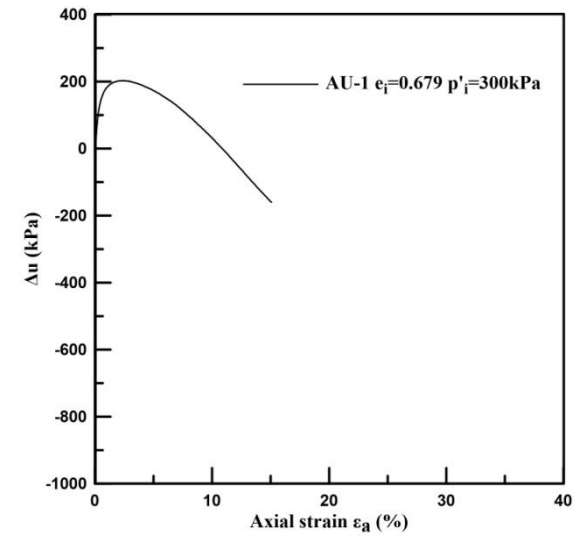
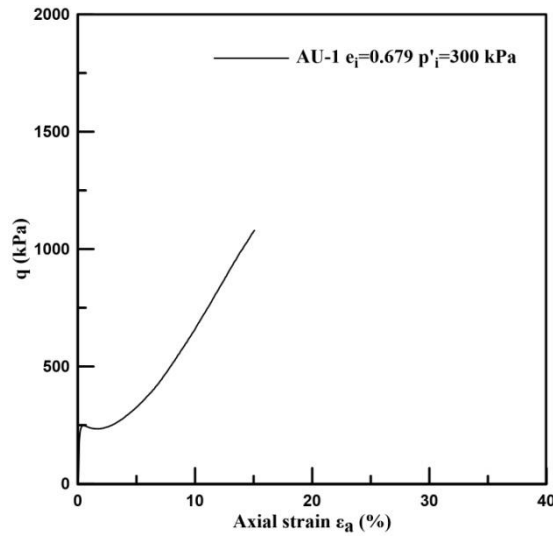
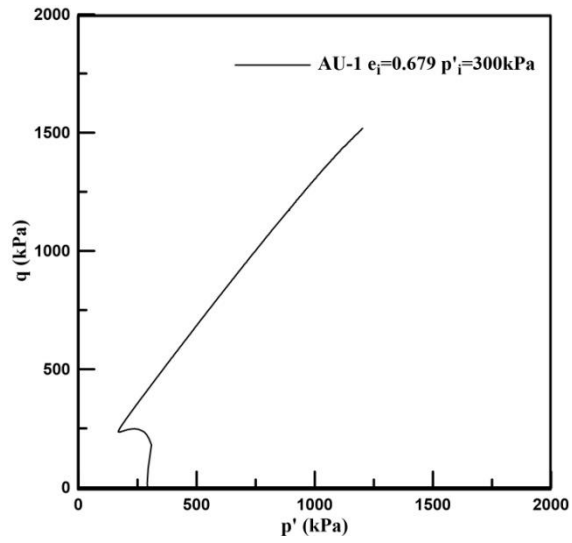
Σχ-ήμα Π2. 4: Δοκιμή SAD-7 (πάνω σειρά) και SAD-8 (κάτω σειρά)



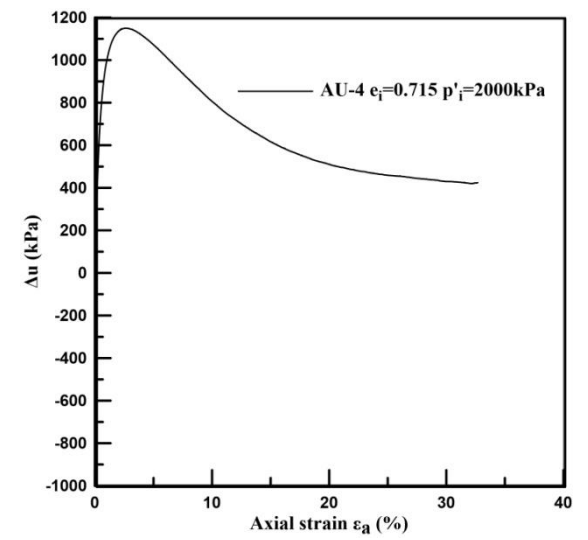
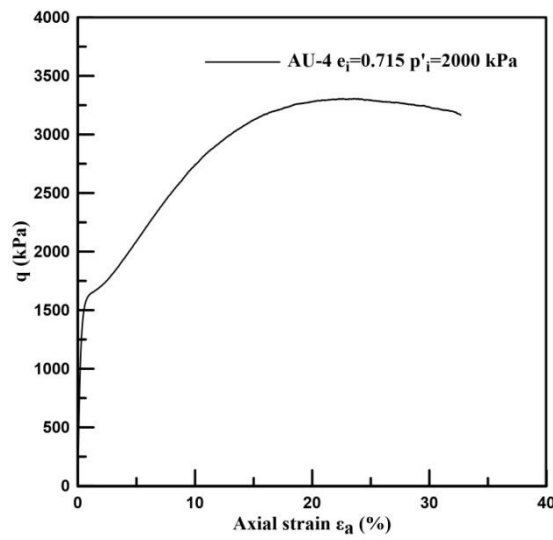
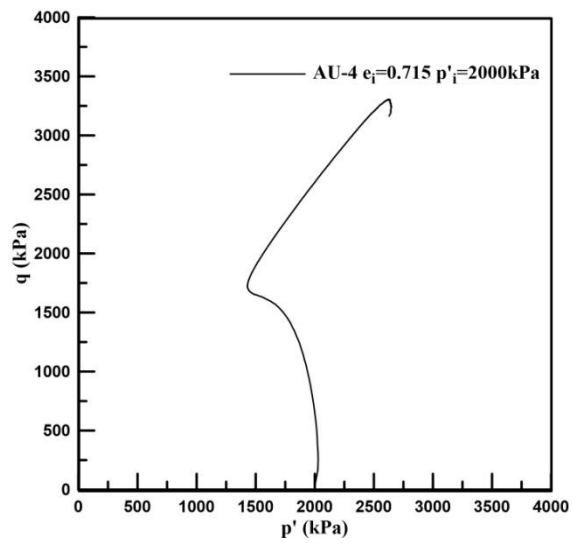
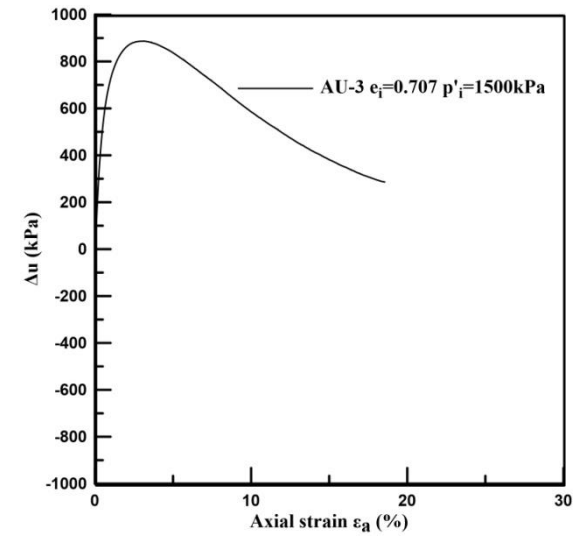
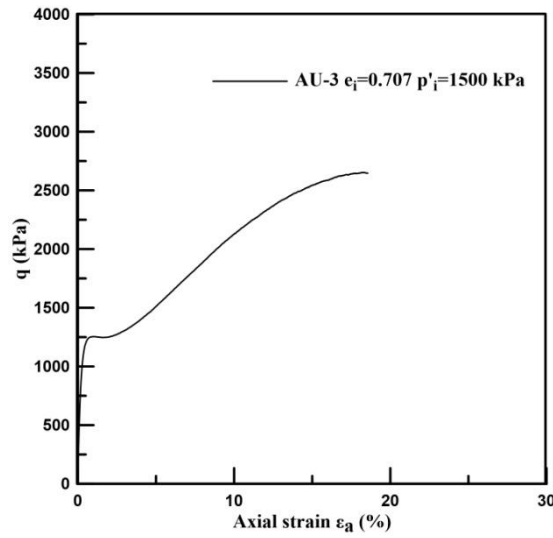
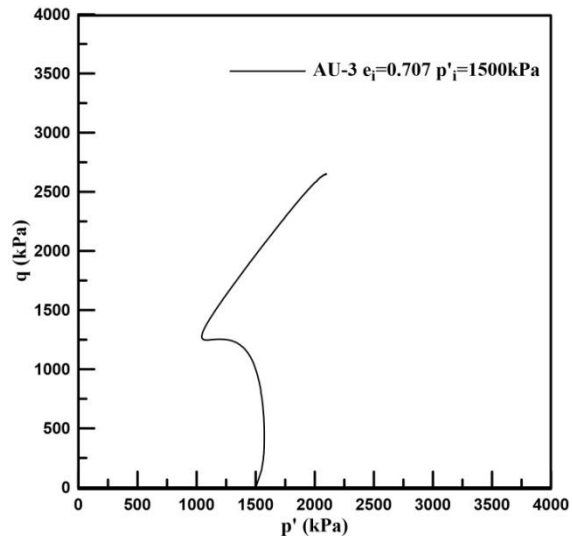
Σχήμα Π2. 5: Δοκιμή SAD-9

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-3

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΥΠΟ
ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ Μ31**



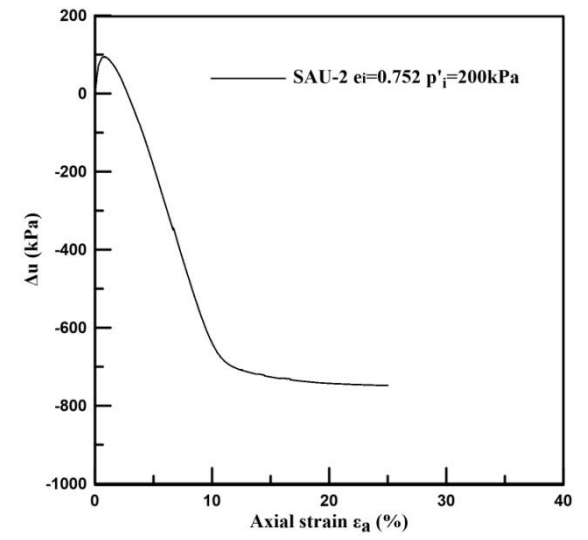
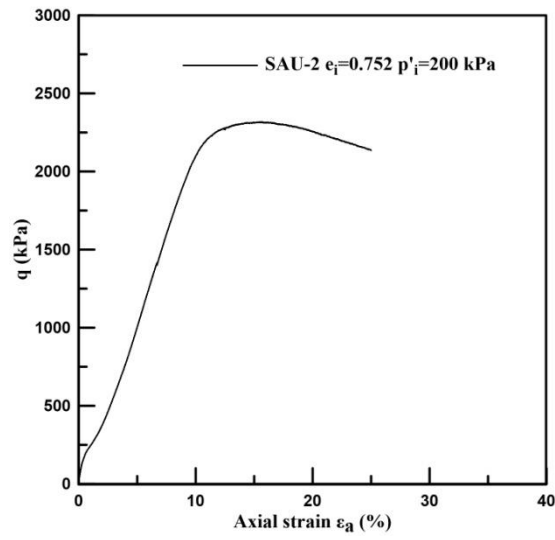
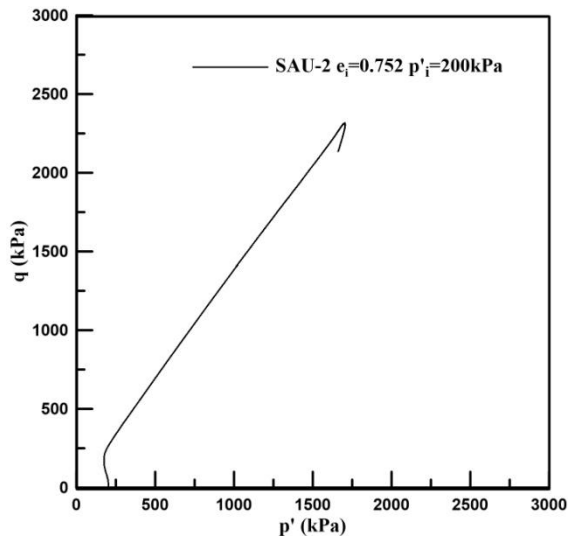
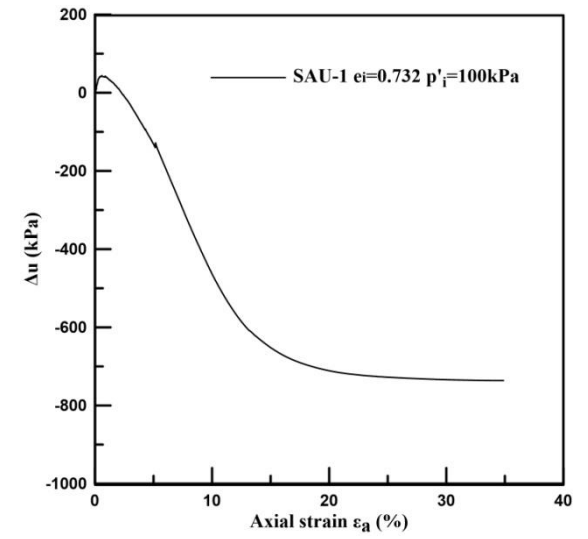
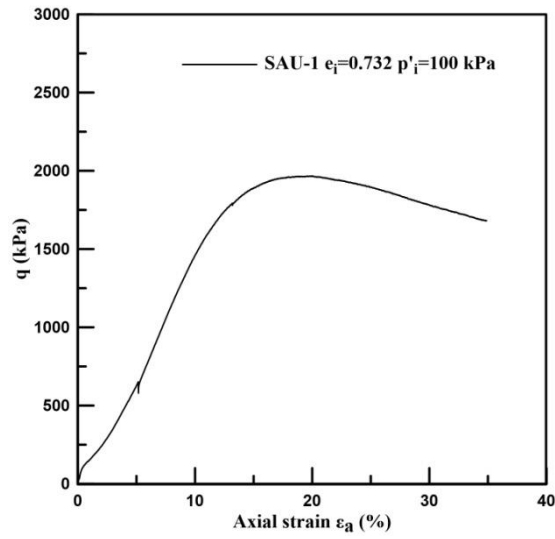
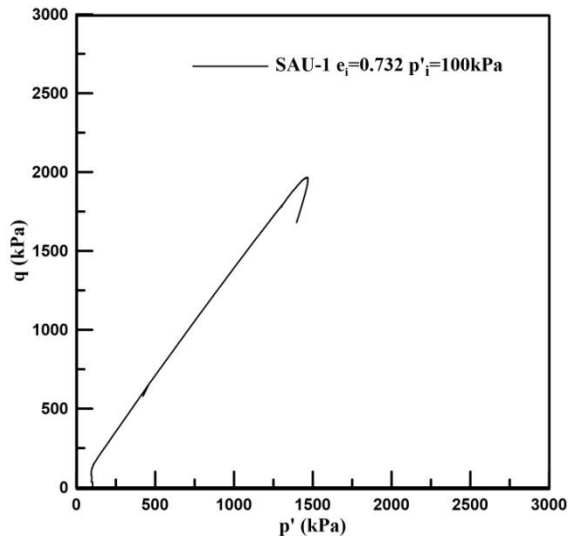
Σχήμα Π3. 1: Δοκιμή AU-1 (πάνω σειρά) και AU-2 (κάτω σειρά)



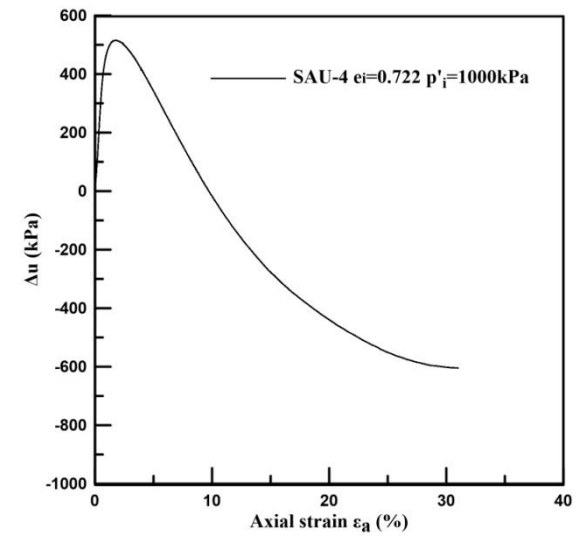
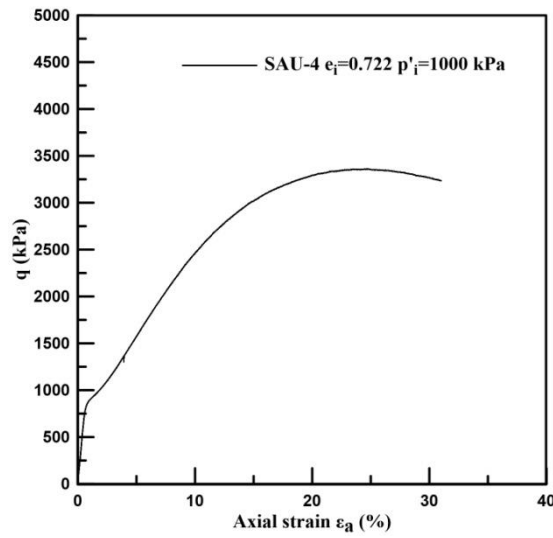
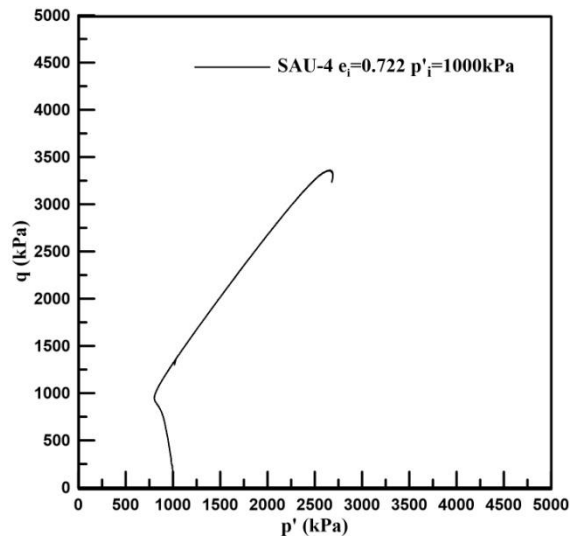
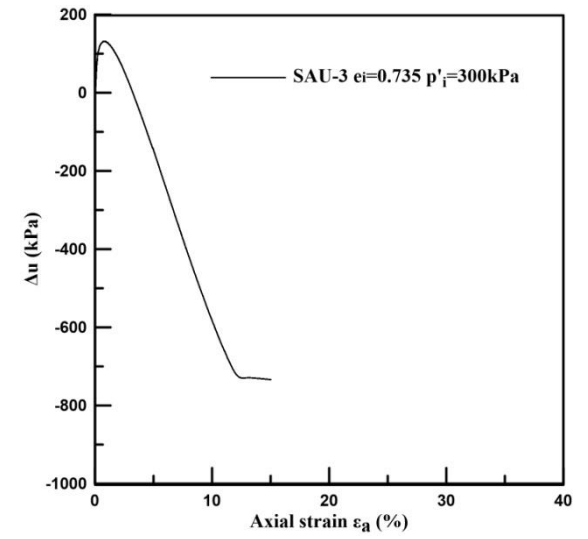
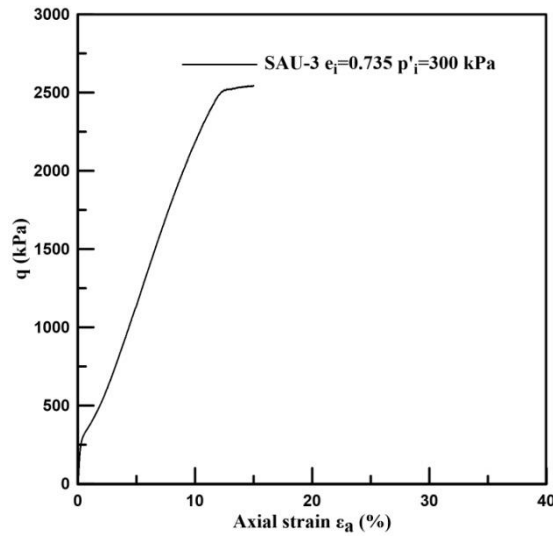
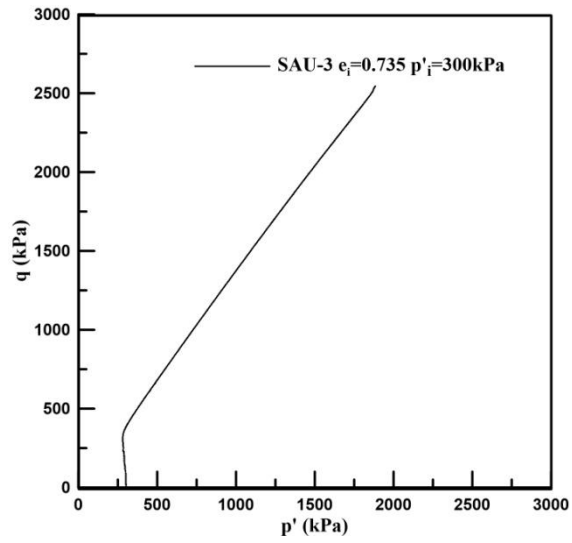
Σχήμα Π3. 2: Δοκιμή AU-3 (πάνω σειρά) και AU-4 (κάτω σειρά)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-4

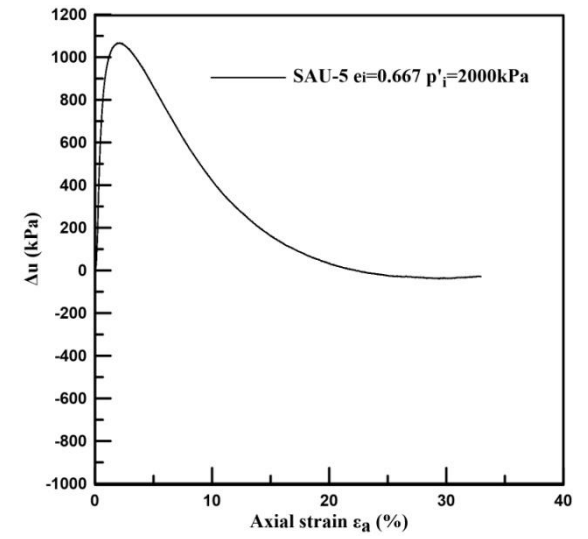
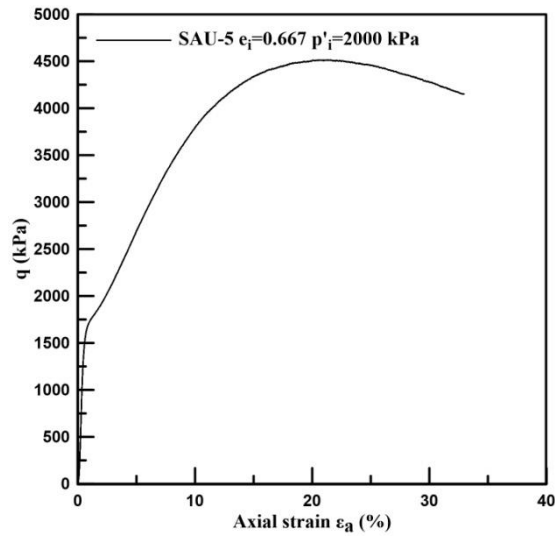
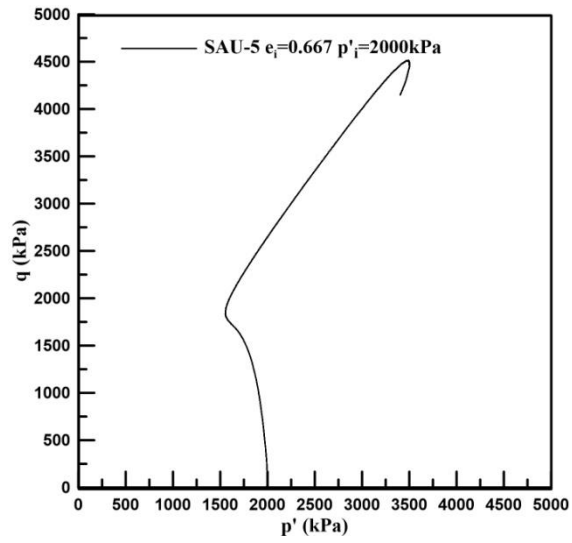
**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΥΠΟ
ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟ Μ31**



Σχήμα Π4. 1: Δοκιμή SAU-1 (πάνω σειρά) και SAU-2 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π4. 2: Δοκιμή SAU-3 (πάνω σειρά) και SAU-4 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π4. 3: Δοκιμή SAU-5