



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ  
ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ  
ΠΥΡΙΤΙΑ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΛΑΦΗ**



**ΕΛΕΝΗ-ΜΑΡΙΑ Ε. ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ**

**ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ Β. ΤΣΙΒΟΥ**

Επιβλέπουσα:

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



**Μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα  
με κολλοειδή πυριτία μη συνεκτικά εδάφη**



**Στον αείμνηστο Καθηγητή Σταύρο Χριστούλα**



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κυρία Β. Ν. Γεωργιάννου που ήταν και η επιβλέπουσα της διπλωματικής μας 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 μας. Η διδασκαλία και ο συμβουλευτικός της ρόλος μας εφοδίασαν με το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο για την ενασχόληση με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο.

Για την ακούραστη συμπαράσταση, την άψογη συνεργασία και την αμέριστη βοήθειά του, καθώς και για τον αστείρευτο ενθουσιασμό του για έρευνα που αποτέλεσε έμπνευση για εμάς, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Παναγιώτη Τριαντάφυλλο.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον τεχνικό του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Στέλιο Τσεντίδη, για τις τεχνικές πληροφορίες και οδηγίες που μας έδωσε σχετικά με την χρήση και λειτουργία των συσκευών του εργαστηρίου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στα μέλη των οικογενειών μας για τη συμπαράσταση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη στήριξη που μας προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου  
Ευφροσύνη Τσίβου  
Οκτώβριος 2015

## Αφιέρωση

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος των σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μ' αυτή την αφορμή θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια του Καθηγητή Σταύρου Χριστούλα καθώς και τους συνεργάτες του για την υποτροφία που είχα λάβει κατά την εισαγωγή μου στη σχολή. Η μελέτη των βιβλίων και των δημοσιεύσεών του με έφεραν σε επαφή με το σπουδαίο έργο του στη Γεωτεχνική Μηχανική που αποτελεί αξιόλογη πηγή γνώσεων για τους νέους ερευνητές. Αυτό ήταν και το ερέθισμα που με ώθησε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο τομέα. Γι' αυτό το λόγο αυτή η διπλωματική εργασία αφιερώνεται στον αείμνηστο Καθηγητή Σταύρο Χριστούλα.

Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα με κολλοειδή  
πυριτία μη συνεκτικά εδάφη**

**Ελένη-Μαρία Ε. Παυλοπούλου  
Ευφροσύνη Β. Τσίβου**

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:  
Β. Ν. Γεωργιάννου, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

### **Εκτενής Περίληψη και Συμπεράσματα**

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την παθητική σταθεροποίηση των μη συνεκτικών εδαφών με χρήση υγρόλυματος κολλοειδούς πυριτίας. Στην πράξη 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 έρευνά μας για να μελετήσουμε την επίδραση του σταθεροποιητή στα μη συνεκτικά εδάφη εκτελέσαμε μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης και ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης σε φυσική και σε σταθεροποιημένη άμμο M31 καθώς και σε φυσικό και σταθεροποιημένο μίγμα 85% κατά βάρος άμμου M31 με 15% κατά βάρος ιλύ D6 ( $f_c=10\%$ ) υπό αστράγγιστες συνθήκες. Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η κατανόηση των φυσικοχημικών διαδικασιών του υγρόλυματος και της γέλης

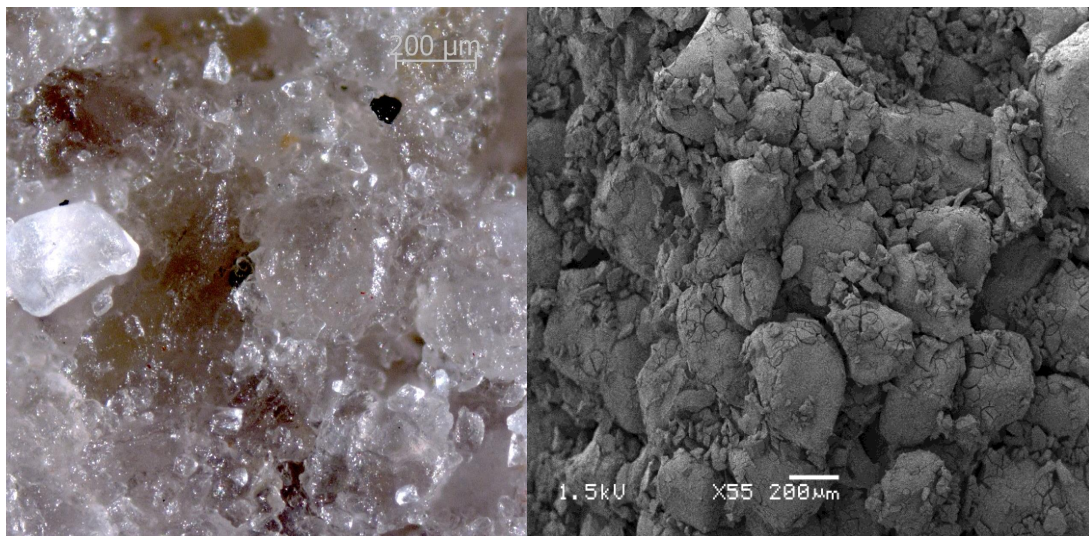
κολλοειδούς πυριτίας, η αποσαφήνιση του πώς αυτές οι διαδικασίες επηρεάζουν τους μηχανισμούς μεταφοράς των κολλοειδών μέσα στους εδαφικούς πόρους και κυρίως, πώς επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων εδαφών.

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 υγρολύματος και της γέλης. Κατ' επέκταση, οι επιφανειακές ιδιότητες είναι σημαντικές και για τη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους. Το υγρόλυμα Ludox® SM έχει περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου  $\text{SiO}_2$  ίση με 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένο σε αλκαλικό  $\text{pH}=10$ . Ο παράγοντας σταθεροποίησης του υγρολύματος είναι το οξείδιο του νατρίου  $\text{Na}_2\text{O}$ . Ο όρος «σταθεροποιημένο υγρόλυμα» σημαίνει ότι τα σωματίδια έχουν ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά τους και απωθούν το ένα το άλλο, επομένως πολύ λίγοι δεσμοί δημιουργούνται μεταξύ τους, και το υγρόλυμα δεν μετατρέπεται σε γέλη. Ο όρος «σταθεροποιημένο έδαφος» σημαίνει ότι το έδαφος έχει σχηματισμένη γέλη πυριτίας μέσα στους πόρους του. Υπό την επίδραση συγκεκριμένων παραγόντων το υγρόλυμα αποσταθεροποιείται και δεσμοί σχηματίζονται μεταξύ των σωματιδίων. Η χημική αντίδραση σχηματισμού των δεσμών ονομάζεται συμπύκνωση (condensation). Δύο ομάδες σιλανόλης  $\text{Si-OH}$  στην επιφάνεια δύο σωματιδίων συνδέονται και σχηματίζουν έναν δεσμό σιλοξάνης  $\text{Si-O-Si}$  και ένα μόριο νερού  $\text{H}_2\text{O}$ . Η αντίδραση της συμπύκνωσης, όπως αποκαλύπτει ο ίδιος ο όρος, οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή και εκτοπισμό νερού. Έχουμε την πεποίθηση ότι αυτό το χαρακτηριστικό της αντίδρασης της συμπύκνωσης έχει πολύ σημαντικές συνέπειες στη συμπεριφορά του εδάφους, όταν οι υπό συρρίκνωση αλυσίδες πυριτίας, που εμφανίζουν έντονη συνάφεια, αναπτύσσονται μέσα στο εδαφικό πορώδες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό συμπύκνωσης είναι πολύ σημαντικοί, καθώς το υγρόλυμα πυριτίας αναμένεται να εγγυθεί στην εδαφική μάζα, στο χρονικό διάστημα που το ιξώδες του έχει χαμηλή τιμή (χαμηλότερη από 3.5 – 4.0 cP). Μετά από τη σύντομη περίοδο έγχυσης το υγρόλυμα αναμένεται να μετατραπεί απότομα σε γέλη, προτού απομακρυνθεί από τη στοχευόμενη περιοχή. Κάθε παράγοντας που προωθεί τις βίαιες συγκρούσεις μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων και μειώνει το επιφανειακό ηλεκτρικό φορτίο επιταχύνει καταλυτικά τις αντιδράσεις συμπύκνωσης. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση πυριτίας και αλάτων, τόσο πιο ταχύς είναι ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοξάνης. Ο ρόλος του  $\text{pH}$  είναι περισσότερο σύνθετος και η επίδραση του δεν είναι μονότονη. Σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τιμές  $\text{pH}$  οι ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, οι οποίες συμπεριφέρονται ως ασθενή οξέα, προσλαμβάνουν ή αποβάλλουν πρωτόνια, αντίστοιχα. Η πρόσληψη πρωτονίων  $\text{H}^+$  φορτίζει την επιφάνεια θετικά, ενώ η αποβολή τους την φορτίζει αρνητικά. Σε ενδιάμεσες τιμές  $\text{pH}$  ( $5 < \text{pH} < 7$ ) αναμένεται, επομένως, ο χρόνος γέλης να είναι ελάχιστος.

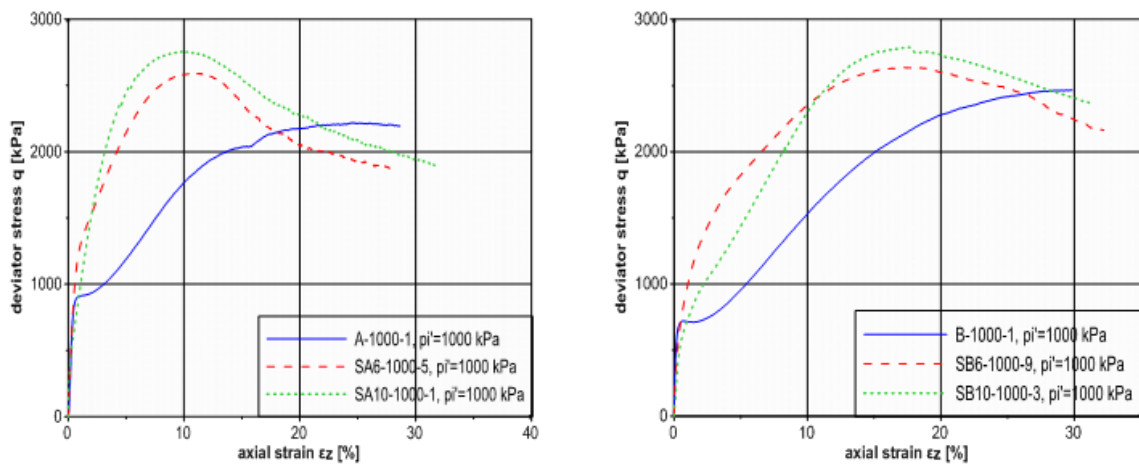
Το παχύρευστο υγρόλυμα μετατρέπεται σταδιακά σε μία ελαστική γέλη. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό πυριτικό

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 αλληλεπίδραση των πυριτικών αλυσίδων με την υγρή φάση κάνει την εκροή του νερού κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων να διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, προκαλεί μία υστέρηση της εκδήλωσης της πίεσης του υγρού των πόρων στον μετρητή, στα πρώτα στάδια της αστράγγιστης διάτμησης. Το σταθεροποιημένο κοκκώδες έδαφος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας μετά τον σχηματισμό της γέλης μέσα το πορώδες. 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 1 παρουσιάζονται φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού δοκιμίου με κολλοειδή πυριτία από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του Imperial College London. Αριστερά φαίνεται το σταθεροποιημένο CS=10% δοκίμιο ιλυώδους άμμου, όπου η πυριτία καλύπτει τους κόκκους πλην ενός. Δεξιά απεικονίζεται το σταθεροποιημένο CS=10% δοκίμιο ιλυώδους άμμου σε στιγμιότυπο όπου το υγρόλυμα έχει ξεραθεί και γίνεται εμφανές ότι οι κόκκοι είχαν καλυφθεί πλήρως από την κολλοειδή πυριτία.



*Σχήμα 1. Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.*

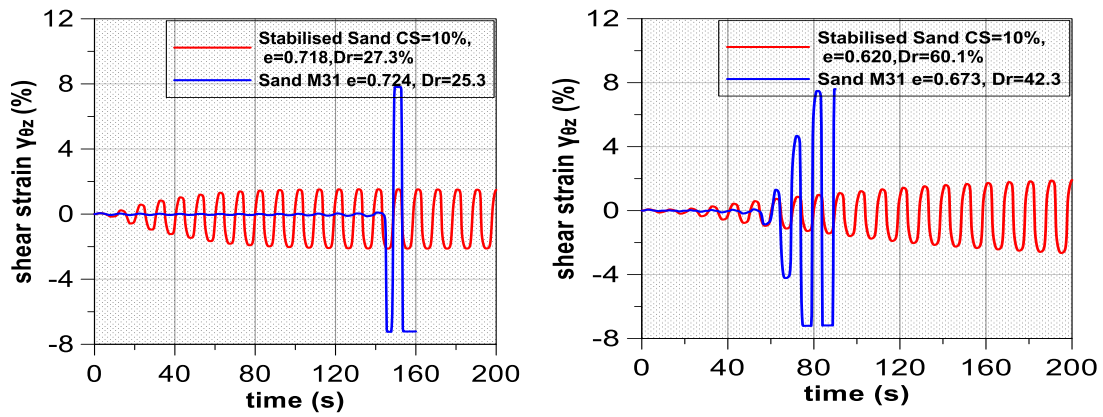
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, μία σειρά από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη άμμο M31 και επίσης, σε φυσικό και σε σταθεροποιημένο μίγμα 85% κατά βάρος άμμου M31 με 15% κατά βάρος ιλύ D6 ( $f_c=10\%$ ). Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας (CS=6% και 10%). Τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του άτονου εδαφικού σκελετού. Στη συνέχεια τα σταθεροποιημένα δοκίμια στερεοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή. Η εκροή του νερού των πόρων χρειάστηκε αρκετό χρόνο για να εκδηλωθεί, αλλά μακροπρόθεσμα το σταθεροποιημένο έδαφος ανέπτυξε ουσιαστικά τις ίδιες ογκομετρικές παραμορφώσεις με το φυσικό. Οι παραμορφώσεις στερεοποίησης και η εκροή του νερού των πόρων ενδέχεται να τραυματίζει ελαφρώς το στερεό πυριτικό δίκτυο. Η τριαξονική θλίψη εκτελέστηκε με επιβολή ρυθμού παραμόρφωσης 0.30 mm / min. Η διάτμηση των δοκιμών εκτελέστηκε σε καθεστώς πολύ υψηλών αρχικών ενεργών τάσεων (300, 1000, 1500, 2000 kPa) για να διερευνηθεί η επίδραση τέτοιων εντατικών πεδίων πάνω στους δεσμούς της γέλης. Η σταθεροποιημένη άμμος M31 αύξησε την αντοχή της κατά δύο έως τρεις φορές συγκριτικά με τη φυσική άμμο. Η περιεκτικότητα σε πυριτία (CS=6% και 10% w.t) δεν έχει ουσιαστική επίδραση πάνω στην αύξηση της αντοχής. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για την ιλυώδη άμμο.



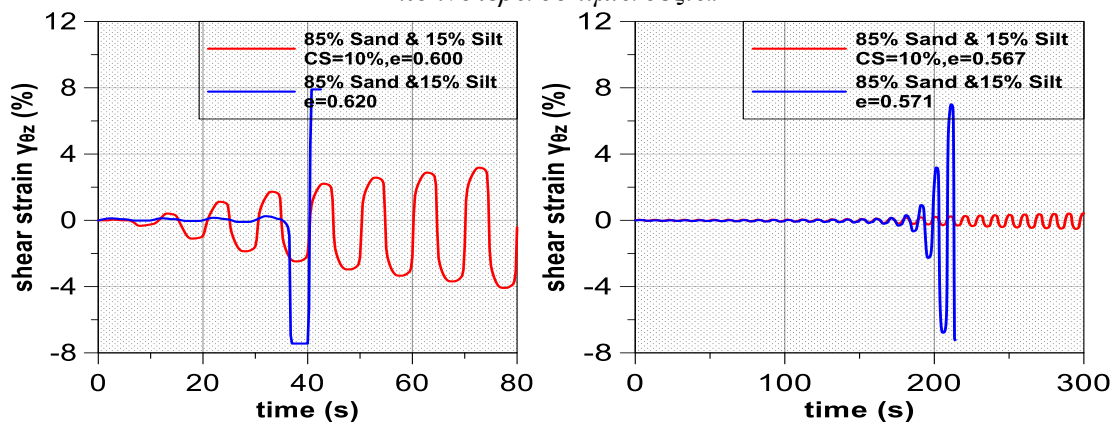
**Σχήμα 2.** Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 αριστερά και ιλυώδους άμμου δεξιά σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa.

Ακόμα μία σειρά δοκιμών εκτελέστηκε στο εργαστήριό μας πάνω σε φυσική και σταθεροποιημένη (CS=6% και 10% w.t) άμμο M31 καθώς και σε φυσικό και σε σταθεροποιημένο μίγμα 85% κατά βάρος άμμου M31 με 15% κατά βάρος ιλύ D6 ( $f_c=10\%$ ). Πρόκειται για ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλων κυλινδρικών δοκιμών, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η μέθοδος παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμών ήταν η ίδια με αυτήν, που χρησιμοποιήθηκε στα δοκίμια των τριαξονικών δοκιμών. Η φάση στερεοποίησης ήταν, επίσης, η ίδια. Η διάτμηση εκτελέστηκε με επιβολή ημιτονικής διατμητικής τάσης πλάτους  $\Delta\tau$  και περιόδου  $T=10$  s. Η πίεση του υγρού των πόρων μετρήθηκε και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Ως κριτήριο ρευστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ίσης με  $\gamma_{DA}=5\%$ . Το πλήθος των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση συμβολίζεται με  $N_{5\%}$ . Τα αποτελέσματα σχεδιάζονται ως καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στους άξονες CSR –  $N_{5\%}$  και  $CRR_{15} - D_r$ . Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως  $CSR=\Delta\tau / p'_{in}$ , όπου  $p'_{in}$  είναι η μέση ενεργός τάση στην έναρξη της διάτμησης.

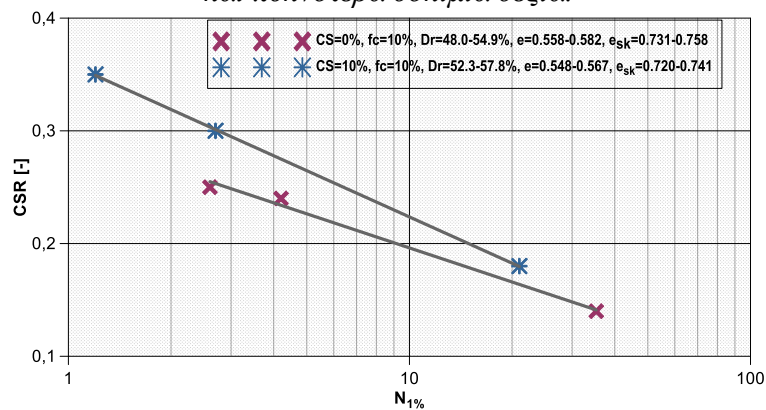
Η βασική διαφορά στη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου και του φυσικού εδαφικού δοκιμίου είναι ότι το πρώτο μπορεί να ανθίσταται σε πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, με μεγάλες παραμορφώσεις και υψηλή πίεση υγρού πόρων, χωρίς να καταρρέει. Αυτό οφείλεται στη συνοχή που προσφέρει η γέλη στους ενθυλακωμένους εδαφικούς κόκκους. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης όμως η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών δεν ήταν κοινή σε όλα τα πειράματα. Παρατηρήσαμε ότι στα χαλαρότερα δοκίμια η σταθεροποιημένη άμμος ανέπτυξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις στους πρώτους κύκλους φόρτισης από αυτές που αναπτύσσει η φυσική άμμος αντίστοιχης πυκνότητας. Αντίθετα, στα πυκνότερα δοκίμια η σταθεροποιημένη άμμος ανέπτυξε στους πρώτους κύκλους φόρτισης παραμορφώσεις ίδιας τάξης με αυτές που αναπτύσσει η φυσική άμμος αντίστοιχης πυκνότητας. Η επίδραση της πυκνότητας στη συμπεριφορά του δοκιμίου στους πρώτους κύκλους φόρτισης είναι εμφανής και στην ιλυώδη άμμο. Η συμπεριφορά της ιλυώδους άμμου ήταν αντίστοιχη με αυτή της άμμου που περιγράφηκε παραπάνω, αλλά με μικρότερες διαφορές από το φυσικό δοκίμιο σε σχέση με αυτές που συναντήσαμε στην άμμο. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού του σταθεροποιητή από CS=6% σε CS=10% είχε ευεργετική επίδραση στην ανακυκλική συμπεριφορά των δοκιμών άμμου και ιλυώδους άμμου. Η συμπεριφορά των δοκιμών σε ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζεται ενδεικτικά στα Σχήματα 3, 4 5 και 6.



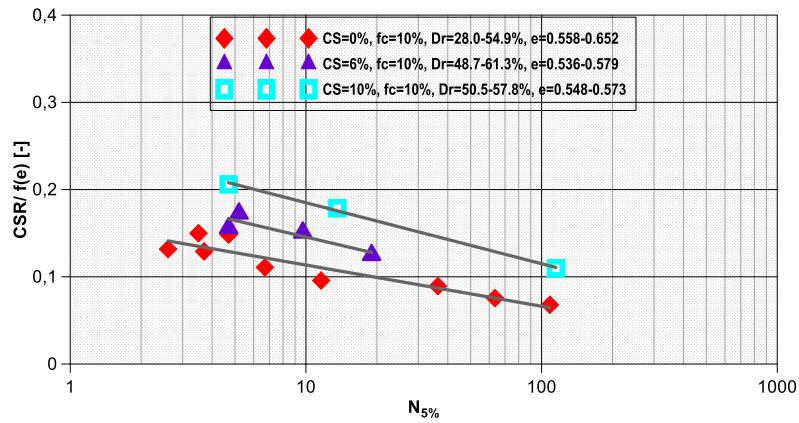
Σχήμα 3. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  άμμο. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά.



Σχήμα 4. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά.



Σχήμα 5. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$  Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης  $CS=10\%$  ιλυώδους άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες.



**Σχήμα 6.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR / f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=(2.17-e)^2 / (1+e)$ . Σύγκριση φυσικής ιλυώδους άμμου με σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  και  $10\%$  ιλυώδη άμμο.





## **Extended Summary and Conclusions**

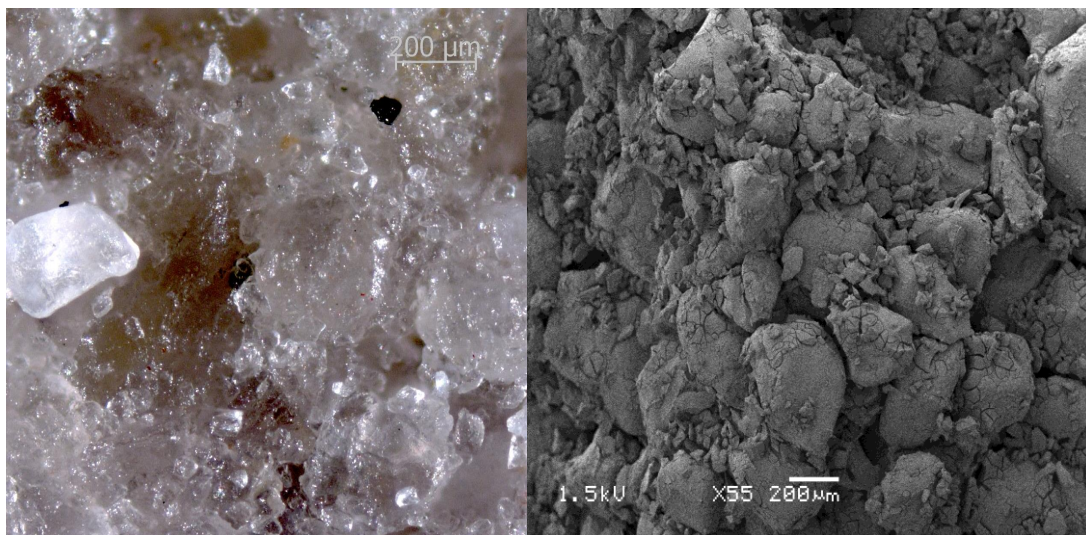
In this project the effect of passive stabilization of non-cohesive soils on their subsequent behavior is examined using a stabilizing colloidal substance. In actual fact stabilization takes place by slowly injecting the stabilizing colloidal substance, underneath existing structures. The colloidal silica (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 diploma thesis in order to investigate the effect of colloidal silica on non-cohesive soils' behavior monotonic triaxial compression tests and cyclic torsional shear tests were performed under undrained loading conditions. The materials used were M31 sand and a mixture of sand (M31) with silt (D6) (85% wt. & 15% wt. respectively). The main goals of the project are to comprehend the physicochemical processes of the colloidal silica aquasol and gel, to understand how these processes affect the transportation mechanisms of the colloids inside the soil pores and mostly, understand how the mechanical properties of the stabilized soil are affected.

The colloidal silica used in this project, under the commercial Ludox® SM brand, 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 m<sup>2</sup> / g. The tremendous spread, the structure and the properties of the surface of the silica particles play a substantial role to all physicochemical properties of the sol and the gel. Hence the surface properties are also important for the mechanical behavior of the stabilized soil. The Ludox® SM sol has a concentration of silicon dioxide SiO<sub>2</sub> equal to 30% wt. and is stabilized at alkaline pH=10. The stabilizing agent of the sol is sodium oxide Na<sub>2</sub>O. The term “stabilized sol” means that the particles have an electrical surface charge and repel each other, so very few bonds form between them, and the sol doesn't transform into a gel. The term “stabilized soil” means that the soil has formed silica gel inside the pores. Under the influence of certain factors the sol is destabilized and bonds form between the particles. 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<sub>2</sub>O. The condensation reaction, as the term actually indicates, leads to contraction of the solid silica phase and expulsion of the liquid phase. It is our firm belief that this feature of the condensation reaction has a significant effect on the soil behavior, when the contracting, adhesive silica chains are formed inside the soil pores.

The factors that affect the condensation rate are very important, as the silica sol is expected to be injected into the soil mass, as long as the viscosity is low (lower than 3.5 – 4.0 cP). After the short period injection time the sol is expected to quickly transform into a gel, before it is leached away from the target region. Every factor that promotes violent collisions between the colloidal particles and reduces their surface electrical charge plays a catalytic role on the condensation reaction. The higher the

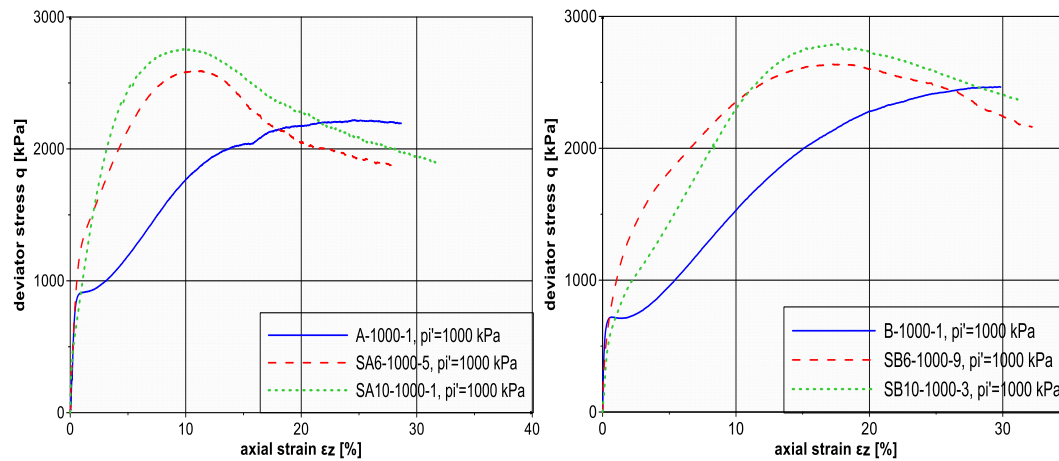
temperature and the concentration of silica and salt, the faster the rate of formation of siloxane bonds is. The role of pH is more complicated and its influence is not monotonic. At very low and very high PH values the silanol groups at the particles' surface, which actually act as weak acids, protonate 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 interaction of silica clusters with water makes the consolidation of stabilized soil last for a long time. It also leads to retarded manifestation of the pore water pressure at the pressure transducer, during the early stages of undrained tests. The stabilized granular soil develops some kind of cohesion after the gel formation inside the soil pores. The colloidal silica is channeled evenly in the soil and covers the whole surface of the grains offering them its beneficial properties. Figure 1 displays pictures of soil material stabilized with colloidal silica taken under the electron scanning microscope of Imperial College London. The stabilized CS=10% specimen appears on the left and the stabilized CS=10% dry specimen appears on the right. It is obvious that the sand and/or silt grains are completely covered with the gel.



**Figure 1.** Pictures of stabilized soil under the electron scanning microscope.

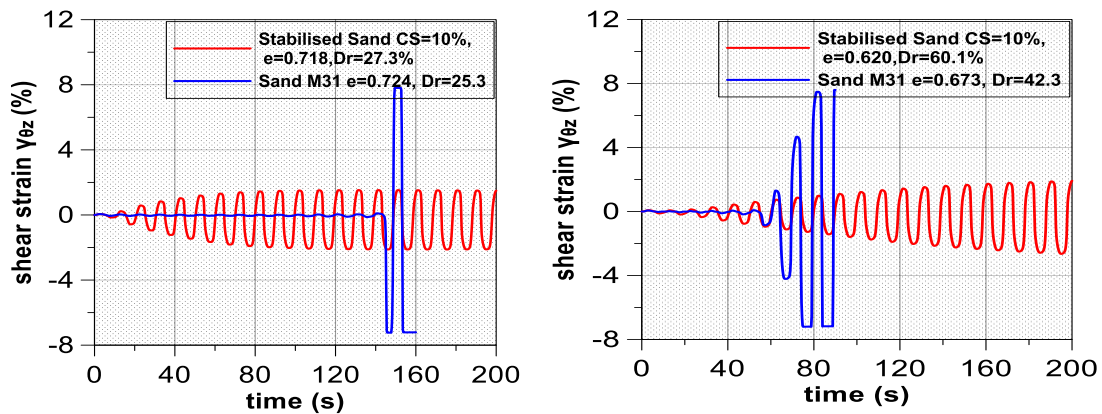
As part of this thesis a series of monotonic triaxial compression tests were conducted on natural and stabilized M31 sand and also on natural and stabilized mixture of 85% by weight M31 sand with 15% by weight silt (D6) ( $f_c=10\%$ ). The stabilized specimens were produced by pluviation of dry soil material into molds filled with silica sol (CS=6% and 10%). The molds were sealed and the gel was formed into the pores of unstressed soil skeleton. The stabilized specimens were then consolidated in the triaxial apparatus. The expulsion of pore water took a long time to occur but the stabilized soil achieved essentially the same volumetric strains as the natural soil. The consolidation strains and the expulsion of water might cause a minor injury of the silica solid network. The triaxial compression was performed under strain control, at a rate of 0.30 mm / min. Shearing in compression was conducted at very high initial effective stresses (300, 1000, 1500, 2000 kPa) to investigate the effect of such stresses on the bonds of the gel. The stabilized sand (M31) showed an increase in strength two to three times compared to the strength of the natural sand. The concentration of silica (CS=6% and 10% wt.) did not significantly affect the increase in strength. Similar observations were made for the stabilized and natural mixtures of sand and silt.



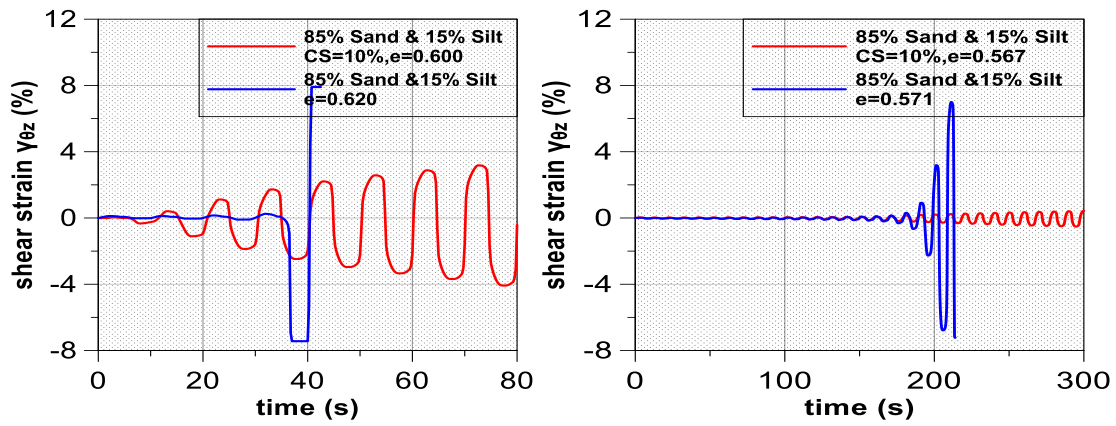
**Figure 2.** Deviator stress versus axial strain for natural and stabilized sand on the left diagram and mixture of sand and silt on the right diagram under an initial effective stress of 1000 kPa.

Another series of tests was conducted in our laboratory on natural and stabilized (CS=6% and 10% w.t.) M31 sand as well as on natural and stabilized mixture of 85% by weight M31 sand with 15% by weight silt D6 ( $f_c=10\%$ ). These were cyclic torsional shear tests on hollow cylinder specimens, under undrained loading conditions. The preparation method for the stabilized specimens was the same as for the specimens subjected to triaxial testing. The consolidation phase was also the same. During cyclic loading a sinusoidal shear stress amplitude  $\Delta\tau$  and period  $T=10s$  was applied. The pore water pressure was measured for both stabilized and natural specimens. The liquefaction criterion used was the development of double amplitude shear strain equal to  $\gamma_{DA}=5\%$ . The number of cycles to liquefaction is denoted as  $N_{5\%}$ . The results are plotted as liquefaction resistance curves in  $CSR - N_{5\%}$  and  $CRR_{15} - D_r$  axes. The cyclic stress ratio is defined as  $CSR=\Delta\tau / p'_{in}$ , where  $p'_{in}$  is the mean effective stress at the beginning of shearing.

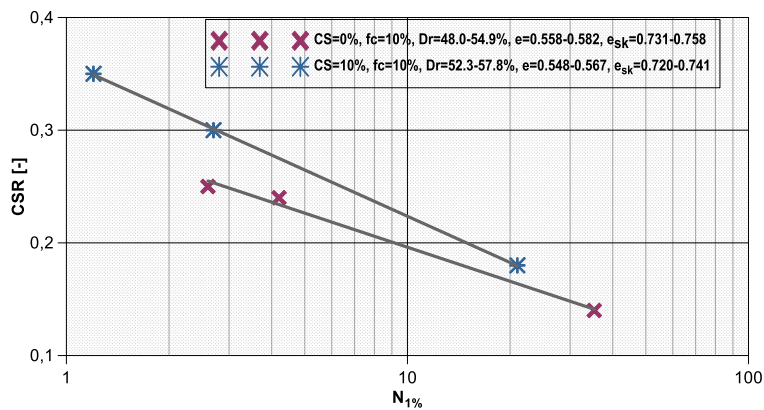
The basic difference between the behavior of stabilized and natural sand is that the first can sustain too many cycles under large deformations and pore water pressures, without collapsing. This may be due to the cohesion that the gel provides to the encapsulated soil grains. During the first cycles, though, the behavior of the stabilized specimens wasn't the same among all the experiments. We observed that during the first cycles, the looser specimens developed larger deformations than the ones that the natural specimens developed. On the contrary, the denser specimens developed deformations of the same size. The effect of the density on the behavior of the soil specimen during the first cycles is apparent in the mixture of sand and silt too and resembles the behavior observed for the sand that was analyzed above. Additionally, it was noted that an increase of the colloidal silica percentage from CS=6% to 10% has a beneficial impact on the mechanical behavior of both the sand and the mixture of sand and silt specimens (Figures 3, 4, 5 and 6).



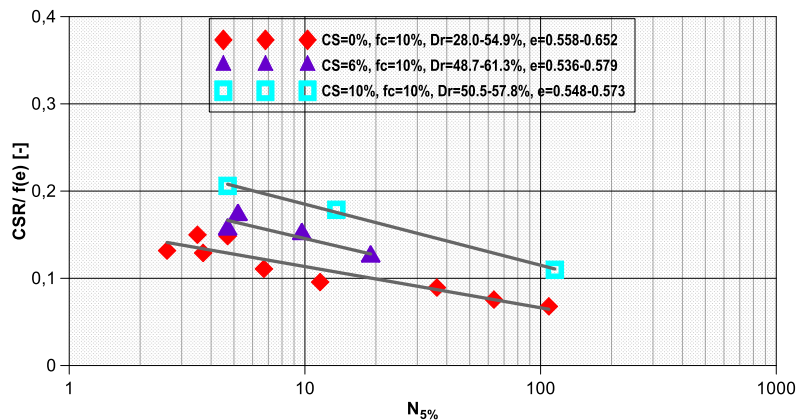
**Figure 3.** Shear strain versus time for natural and stabilized sand specimens. Looser specimens on the left and denser specimens on the right.



**Figure 4.** Shear strain versus time for natural and stabilized mixture of sand and silt specimen. Looser specimens on the left and denser specimens on the right.



**Figure 5.** Cyclic stress ratio versus the number of cycles required for double amplitude shear strain of  $\gamma_{DA}=1\%$  to be developed. Comparison between natural and stabilized mixture of sand and silt in similar densities.



**Figure 6.** Normalized cyclic stress ratio versus the number of cycles required for double amplitude shear strain of  $\gamma_{DA}=5\%$  to be developed. Comparison between natural and stabilized CS=6% and 10% mixture of sand and silt in similar densities. Normalization factor  $f(e)=(2.17-e)^2 / (1+e)$ .



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ.....	6
2.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ.....	6
2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών.....	6
2.1.2 Η ορολογία των χημικών όρων.....	7
2.1.3 Το υγρόλυμα (aquasol) κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM.....	7
2.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΥΓΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΛΩΝ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	8
2.2.1 Γελοποίηση (Gelation).....	9
2.2.2 Ωρίμανση (Aging).....	10
2.2.3 Ξήρανση (Drying).....	10
2.2.4 Μηχανισμός αυτό-ίασης του σταθεροποιημένου εδάφους (self-healing mechanism).....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	26
3.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	26
3.1.1 Μικροδομή των υλικών.....	26
3.1.2 Παράγοντες που επιδρούν στην συμπεριφορά καθαρής άμμου και μιγμάτων και μεταβάλλουν την αντίστασή τους έναντι ρευστοποίησης.....	30
3.2 ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	32
3.2.1. Η φυσική άμμος M31.....	32
3.2.2. Η φυσική ιλύς D6.....	34
3.2.3. Η ιλυώδης άμμος M31 – D6.....	34
3.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΟΡΩΝ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ M31 ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΜΜΟΥ M31 – ΙΛΥΟΣ D6.....	36
3.4. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ.....	39
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	39
4.1.1 Βασικές παράμετροι και αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών.....	41
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	43
4.2.1 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική άμμο M31.....	44
4.2.2 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη άμμο M31.....	49

4.2.3 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική ιλυώδη άμμο M31 – D6.....	56
4.2.4 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο M31 – D6 .....	60
4.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ .....	71
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	71
5.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά - Μηχανισμοί - Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου .....	71
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	83
5.2.1 Προετοιμασία φυσικού δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης	83
5.2.2 Φόρτιση φυσικού δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης.....	84
5.2.3 Προετοιμασία σταθεροποιημένου δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης.....	85
5.2.4 Φόρτιση σταθεροποιημένου δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης.....	87
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ .....	91
5.3.1 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα μη σταθεροποιημένα εδάφη .....	92
5.3.2 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα σταθεροποιημένα εδάφη .....	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	122
6.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	122
6.1.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης.....	122
6.1.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης .....	127
6.2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΆΜΜΟΥ .....	152
6.2.1 Εισαγωγή .....	152
6.2.2 Τα αποτελέσματα της έρευνας Kodaka et al.....	153
6.2.3. Τα αποτελέσματα της έρευνας Rodriguez et al .....	159
6.3.4 Τα αποτελέσματα της έρευνας των Daniela Porcino, Vincenzo Marcianò και Raffaella Granata.....	163
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	166
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	169
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	171



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

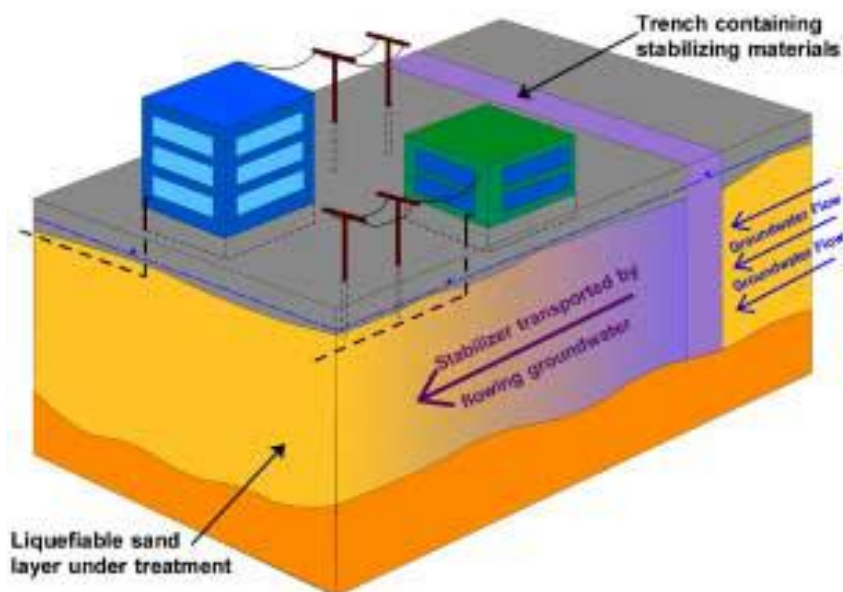
Η αστοχία του εδάφους λόγω ρευστοποίησης μπορεί να προκαλέσει μεγάλες παραμορφώσεις και καθιζήσεις, που οδηγούν σε αχρήστευση της θεμελίωσης και κατ' επέκταση στην καταστροφή των κατασκευών. Πιο ευαίσθητα σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης είναι τα μη συνεκτικά εδάφη όπως οι χαλαρές άμμοι. Γι' αυτό το λόγο 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. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει την τεχνική της

παθητικής σταθεροποίησης των ρευστοποιήσιμων εδαφών, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές.



*Σχήμα 1.1. Παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμου εδάφους κάτω από υφιστάμενη κατασκευή, για τον περιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης. Σχήμα από Gallagher 2000.*

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 M31 και του μίγματος άμμου M31 με ιλύ D6 (85% κατά βάρος & 15% κατά βάρος αντίστοιχα) διερευνήθηκε με την εκτέλεση μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης και ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης, υπό 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** παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές. Επιπρόσθετα παρατίθενται φωτογραφίες από μικροσκοπική ανάλυση δοκιμίου σταθεροποιημένου μίγματος άμμου και ιλύος όπου διακρίνεται η διάταξη των κόκκων και η ένωση τους με την κολλοειδή πυριτία.

Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσικά και σταθεροποιημένα εδάφη. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών και γίνεται η προσπάθεια να συγκριθεί η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών με αυτή των φυσικών.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται η διαδικασία εκτέλεσης και τα αποτελέσματα δοκιμών ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσικά και σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά. Παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών και γίνεται η προσπάθεια να συγκριθεί η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών με αυτή των φυσικών.

Στο **κεφάλαιο 6** αναλύονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και γίνεται σύγκριση αυτών με τα συμπεράσματα της σχετικής βιβλιογραφίας.

Στο **κεφάλαιο 7** 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, Π2, Π3 αφορούν τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Τα παραρτήματα Π4 και Π5 αφορούν τις ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης.



## 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 δοκιμίων. 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 δοκιμών 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 m<sup>2</sup>/g. Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO<sub>2</sub> 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10 με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na<sub>2</sub>O. Το ιζώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP, ενώ του νερού είναι 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία. Μετά την αραίωση του υγρολύματος το ιζώδες του μικραίνει ακόμα περισσότερο.

Το σωματίδιο της κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Έχει αναπτυχθεί στο μέγεθος των 7 nm ύστερα από διαδοχικό πολυμερισμό και συμπύκνωση (polymerization and condensation) της βασικής τετραεδρικής μονάδας [SiO<sub>4</sub>]<sup>-</sup>. 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 υγρολύματος 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. 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.

## 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 συγγέεται με τη διαδικασία της γελοποίησης. Η γέλη είναι ένα διφασικό 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 κolloειδή 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 κolloειδούς 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 συνεχές 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 υγρολύματος 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 συμπίεστος 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)

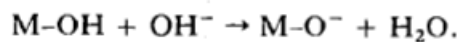
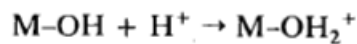
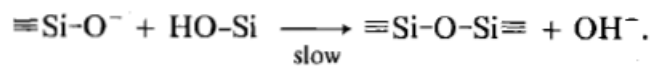
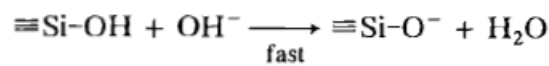
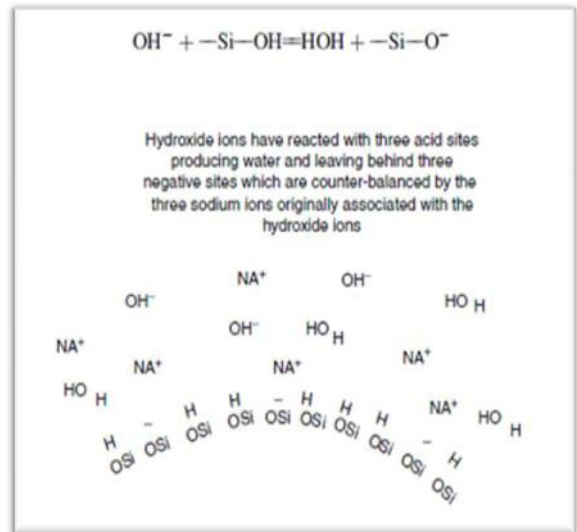
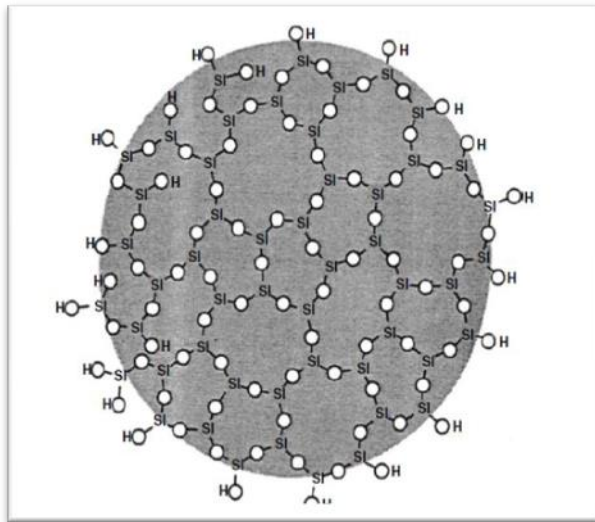
Μία πολύ σημαντική ιδιότητα της γέλης είναι ότι μπορεί να εμφανίσει αυτό-ίαση (self-healing) μετά από μερική καταστροφή των δεσμών της στερεάς φάσης. Για παράδειγμα, μετά από ένα έντονο σεισμικό γεγονός που θα τραυματίσει τη στερεά φάση της γέλης, το σταθεροποιημένο έδαφος θα εκτονώσει αργά τις πιέσεις 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 ανθεκτικότητα 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.

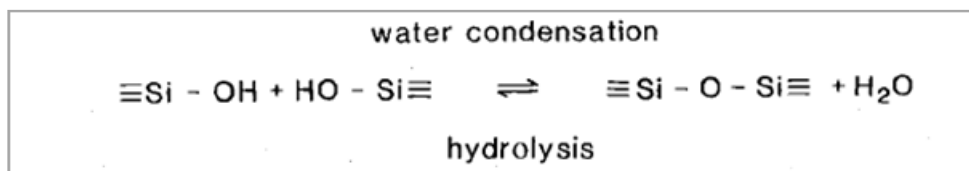
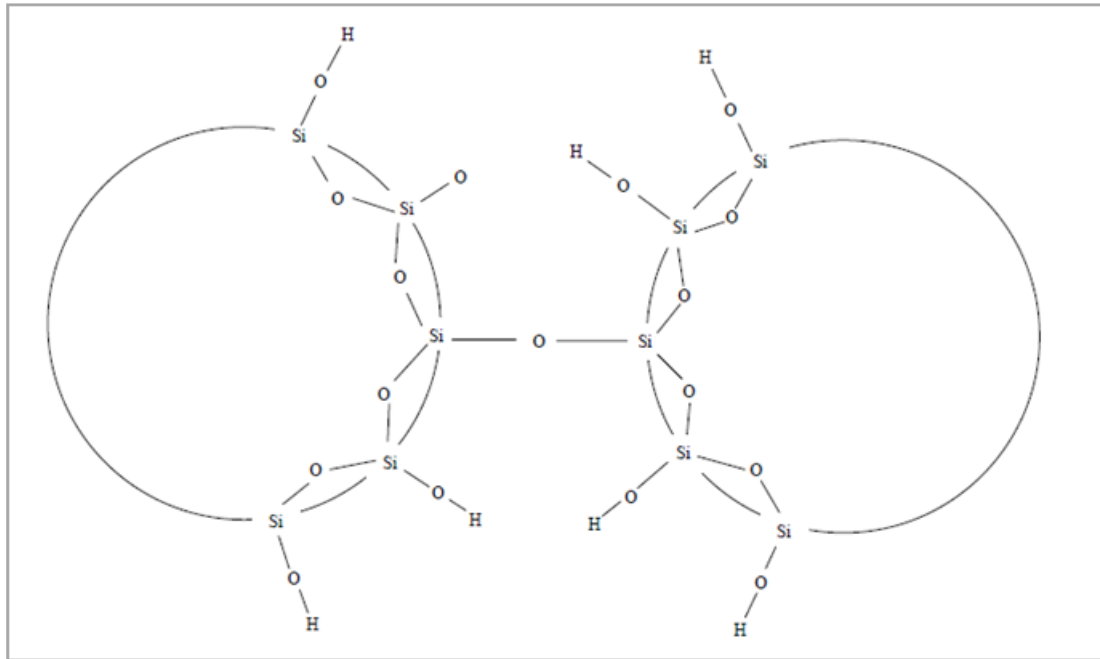
Η ευεργετική δράση της γέλης, όσο αναφορά τη βελτίωση της εδαφικής απόκρισης, οφείλεται στην αλληλεπίδραση του στερεού σκελετού της γέλης με τον εδαφικό σκελετό. Η καθαρή κορεσμένη γέλη πυριτίας είναι ένα πολύ μαλακό ευπαραμόρφωτο υλικό με αμελητέα διατμητική αντοχή. Το σταθεροποιημένο έδαφος που περιέχει 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

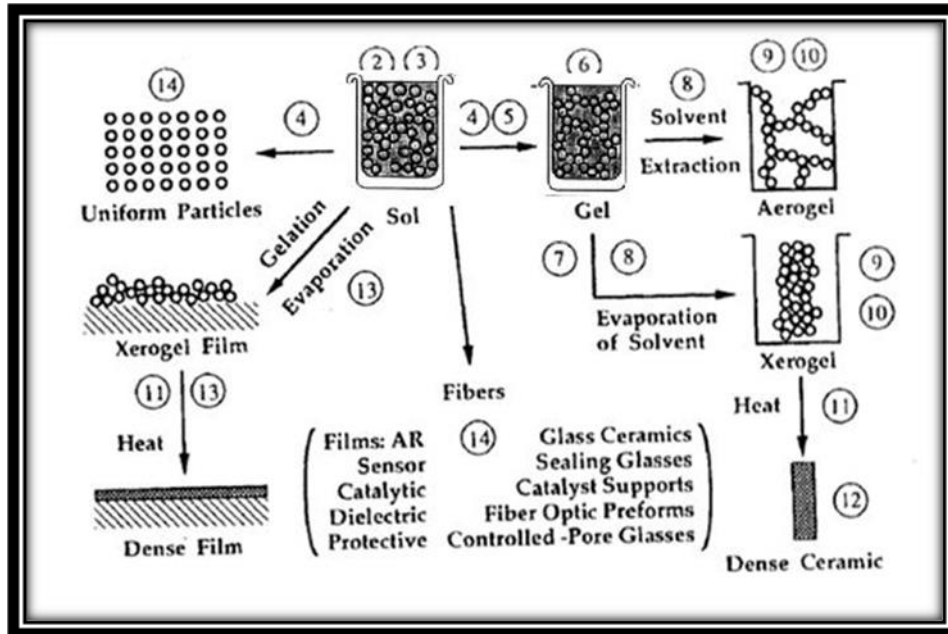
δεσμός θα δημιουργηθεί όταν ένα αιωρούμενο σωματίδιο συγκρουστεί με ένα άλλο, ή με μια σχηματισμένη αλυσίδα σωματιδίων. Στην περίπτωση που το σεισμικό γεγονός (ή η συστολή στερεοποίησης) συμβεί σε προχωρημένο στάδιο ωρίμανσης, οπότε τα αιωρούμενα σωματίδια είναι πολύ λίγα, υπάρχει και πάλι η δυνατότητα 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.



**Σχήμα 2.1. Πάνω αριστερά:** Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας. Το τέταρτο οξυγόνο της βασικής τετραεδρικής μονάδας  $\text{SiO}_4$  βρίσκεται εκτός του επιπέδου της σελίδας. Στην άμορφη πυριτία η γωνία του δεσμού σιλοξάνης  $\text{Si-O-Si}$  ποικίλει, η απόσταση όμως πυριτίου - οξυγόνου  $\text{Si-O}$  είναι σταθερή. Η επιφάνεια του σωματιδίου είναι πλήρως υδροξυλιωμένη και εμφανίζει μία αρνητικά φορτισμένη στρώση, όταν αποβάλλει πρωτόνια  $\text{H}^+$  σε αλκαλικό περιβάλλον. Επίσης, εμφανίζει μία θετικά φορτισμένη στρώση, όταν προσλαμβάνει πρωτόνια  $\text{H}^+$  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. **Πάνω δεξιά:** Σταθεροποίηση του υγρούματος με χρήση του αλκαλικού παράγοντα  $\text{NaOH}$  (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  $\text{pH}$  βοηθά να εμφανιστούν αρνητικά φορτισμένες περιοχές στην επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων και αποτρέπει τον σχηματισμό γέλης. **Μέση:** Σε ενδιάμεσες τιμές  $\text{pH}$  το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως καταλύτης στην αντίδραση της συμπύκνωσης και προάγει τον σχηματισμό γέλης. **Κάτω:** Οι επιφανειακές ομάδες σιλανόλης προσλαμβάνουν πρωτόνια από ένα έντονα όξινο περιβάλλον και φορτίζονται θετικά, ενώ αποβάλλουν πρωτόνια σε ένα αλκαλικό περιβάλλον και φορτίζονται αρνητικά. Το μέταλλο  $\text{M}$  είναι το πυρίτιο  $\text{Si}$ .



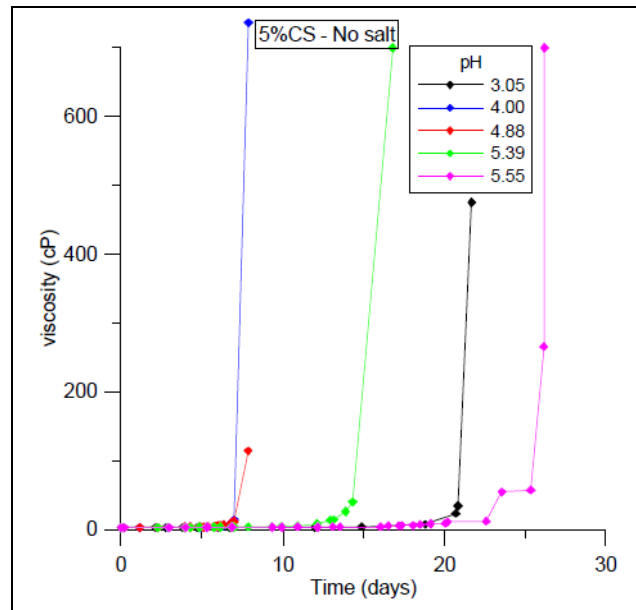
**Σχήμα 2.2. Πάνω:** σύνδεση δύο σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά τη γελοποίηση. **Κάτω:** η χημική αντίδραση της συμπύκνωσης (condensation) που περιγράφει αυτήν τη σύνδεση με τη δημιουργία δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si και την αποβολή ενός μορίου νερού. Το αποβαλλόμενο νερό παραμένει μέσα στους πόρους της σχηματιζόμενης γέλης. Ο σχηματισμός του δεσμού σιλοξάνης είναι μη αναστρέψιμος χημικά, όταν δεν προάγεται ο από - πολυμερισμός.



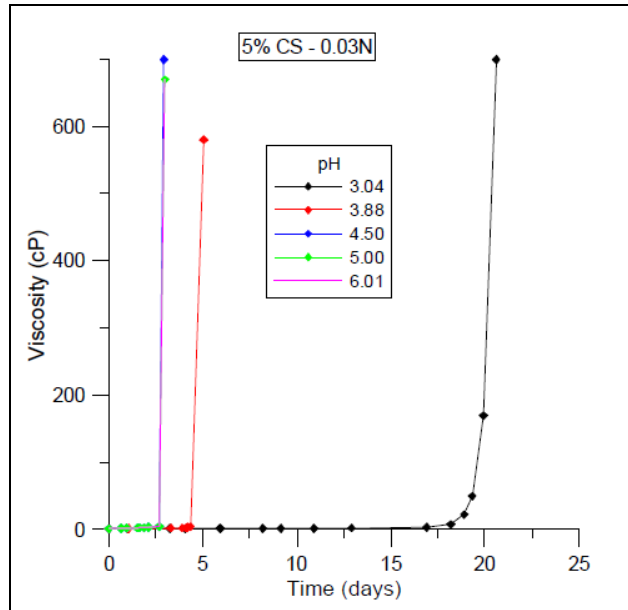
**Σχήμα 2.3.** Σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών (sol - gel processing).

(2), (3) : υδρόλυση και συμπύκνωση (hydrolysis and condensation), (4) : δημιουργία σωματιδίων από υγρές διασπορές και γέλες (particulate sols and gels), (5) : γελοποίηση (gelation), (6) : ωρίμανση γελών (aging), (7) : θεωρία παραμορφώσεων και ροής στις γέλες (theory of deformation and flow in gels), (8) : ξήρανση (drying), (9) : ανάπτυξη δομής κατά την στερεοποίηση (structural evolution during consolidation), (10) : χημεία επιφανειών και χημικές τροποποιήσεις (surface chemistry and chemical modifications), (11) : συσσωμάτωση και συμπύκνωση με μείωση της διεπιφάνειας στερεής - αέριας φάσης, υπό καθεστώς υψηλών θερμοκρασιών (sintering), (12) : σύγκριση κεραμικών που παρήχθησαν από γέλη και συμβατικών κεραμικών (comparison of gel - derived ceramics and conventional ceramics), (13) : σχηματισμός φιλμ (film formation), (14) : εφαρμογές (applications).

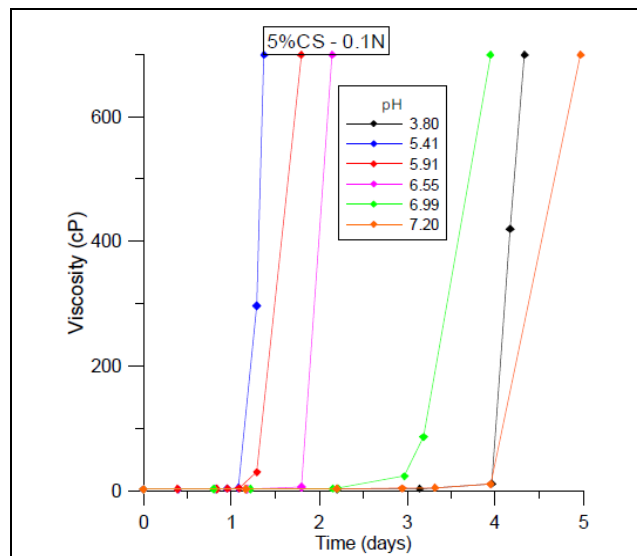
Παρουσιάζονται παρακάτω μερικά από τα πειράματα του ερευνητικού Θαλής - Π.Θ. (MIS 375618). Στα διαγράμματα διαφαίνεται η μεταβολή του ιξώδους (viscosity, Cp) με το χρόνο (time,days) για διάφορες τιμές περιεκτικότητας κολλοειδούς πυριτίας CS (% κατά βάρος),συγκέντρωσης αλάτων NaCl (σε όρους κανονικότητας N) και pH.



*Σχήμα 2.4. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% κατά βάρος και κανονικότητα 0 N.*

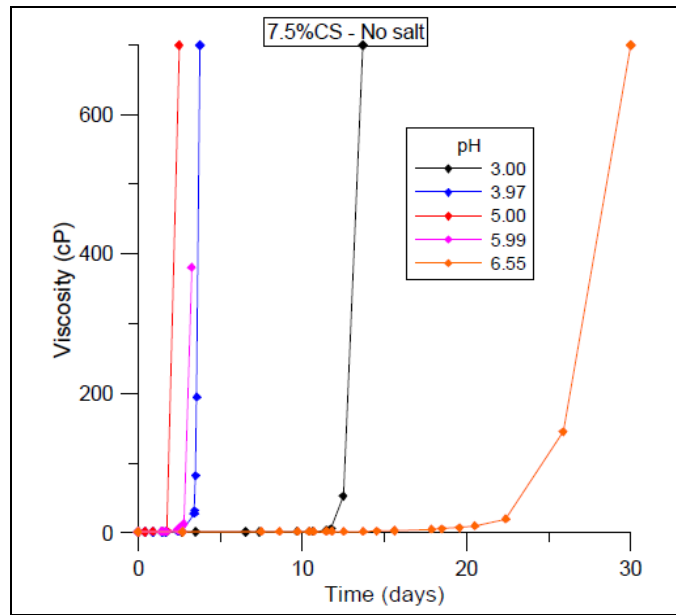


*Σχήμα 2.5. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% κατά βάρος και κανονικότητα 0.03 N.*

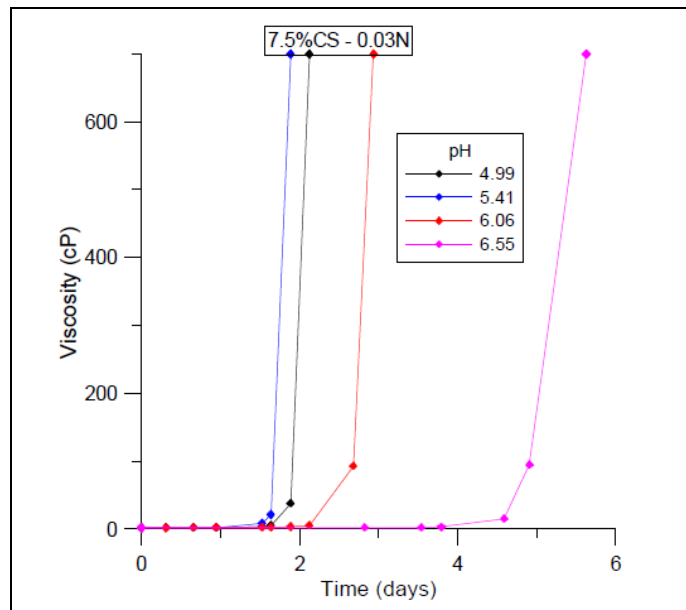


*Σχήμα 2.6. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% κατά βάρος και κανονικότητα 0.1 N.*

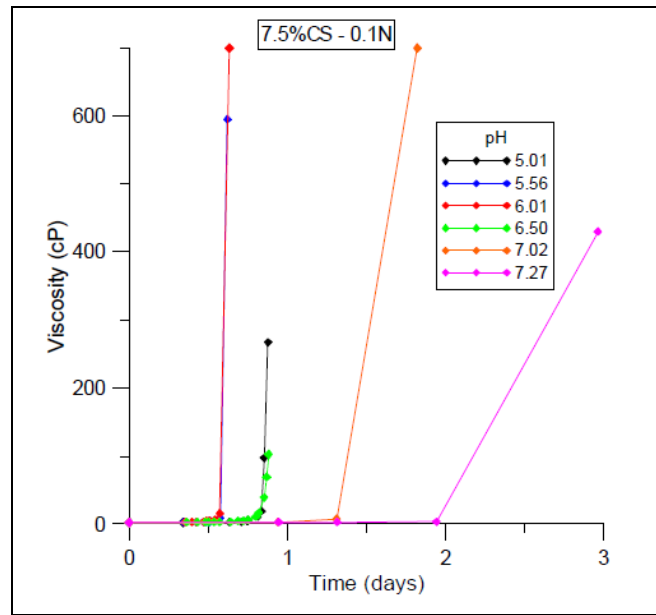




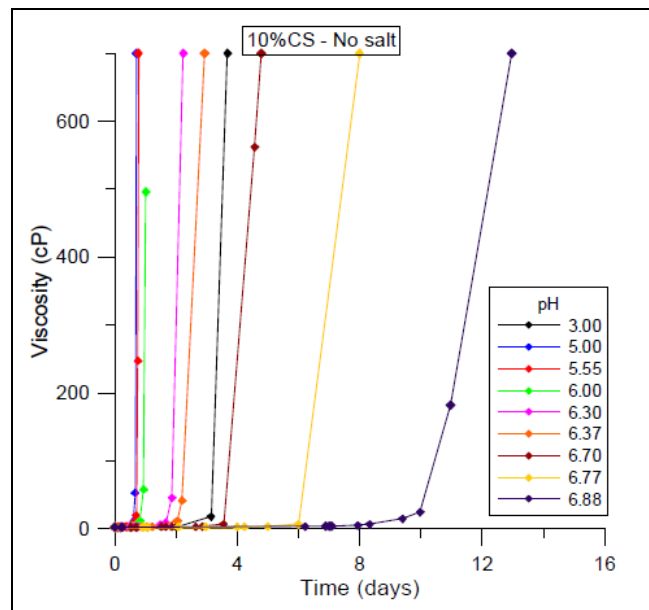
*Σχήμα 2.7. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5 % κατά βάρος και κανονικότητα 0N.*



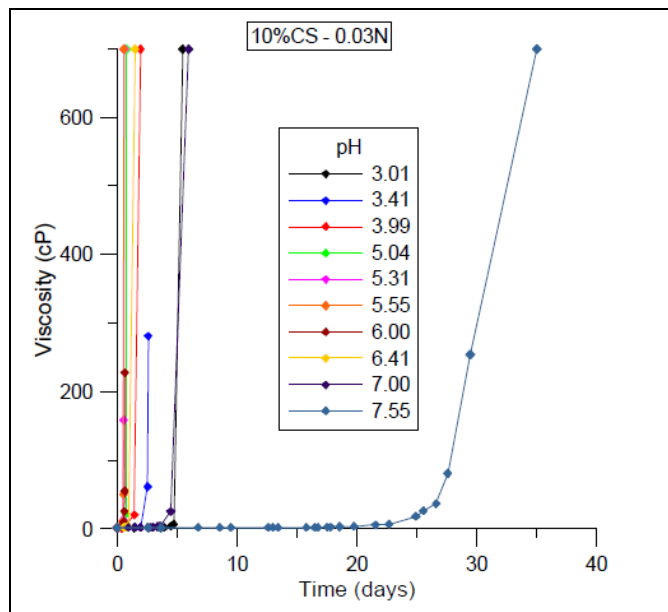
*Σχήμα 2.8. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5 % κατά βάρος και κανονικότητα 0.03 N.*



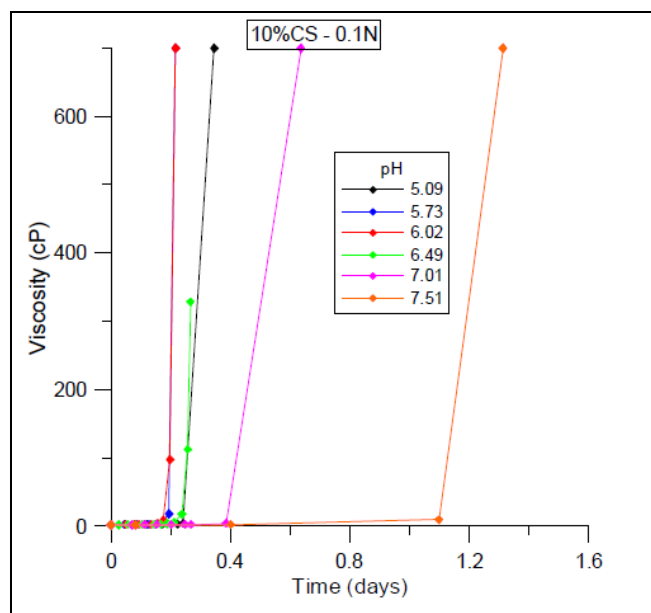
**Σχήμα 2.9.** Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5 % κατά βάρος και κανονικότητα 0.03 N.



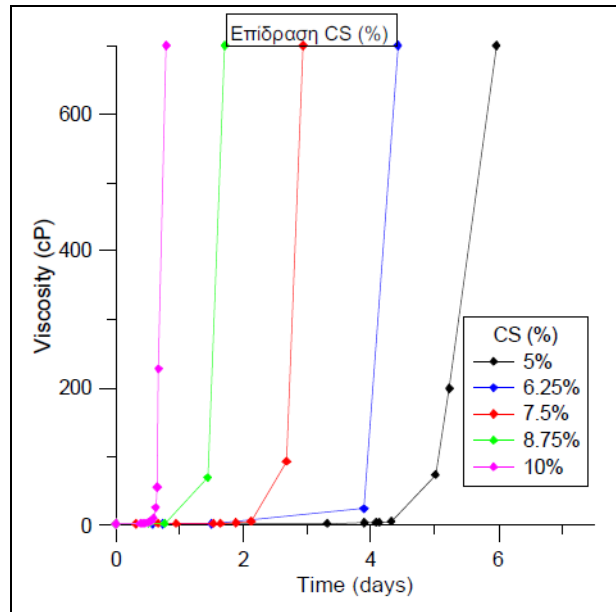
**Σχήμα 2.10.** Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=10 % κατά βάρος και κανονικότητα 0N.



*Σχήμα 2.11. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=10 % κατά βάρος και κανονικότητα 0.03N.*

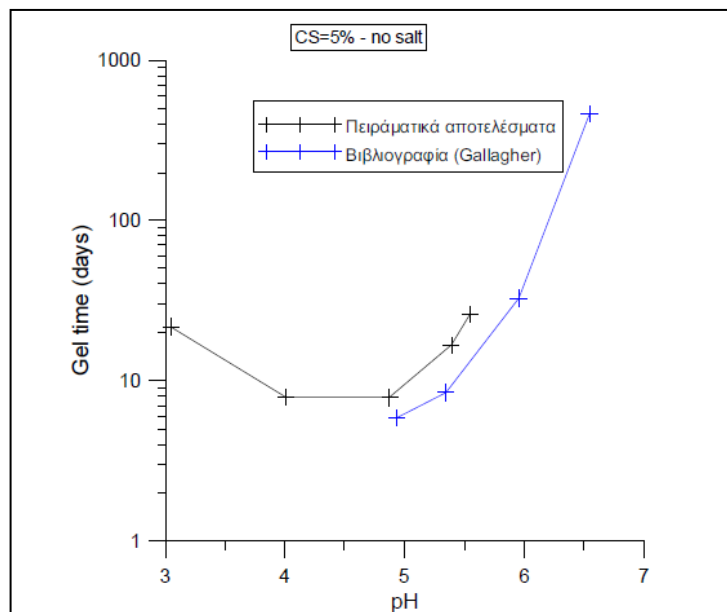


*Σχήμα 2.12. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=10 % κατά βάρος και κανονικότητα 0.1N.*

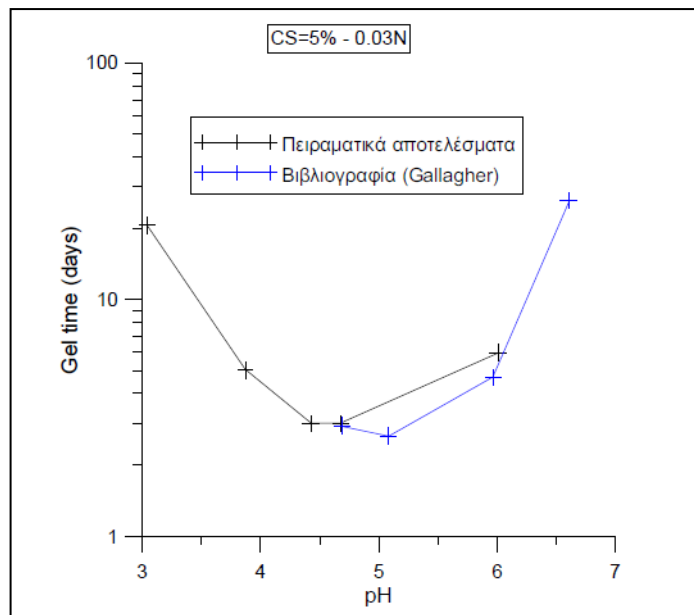


**Σχήμα 2.13.** Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρολύματα με  $pH=6.00$ , με κανονικότητα  $0.03\ N$  και με διάφορες περιεκτικότητες  $CS(\%)$ .

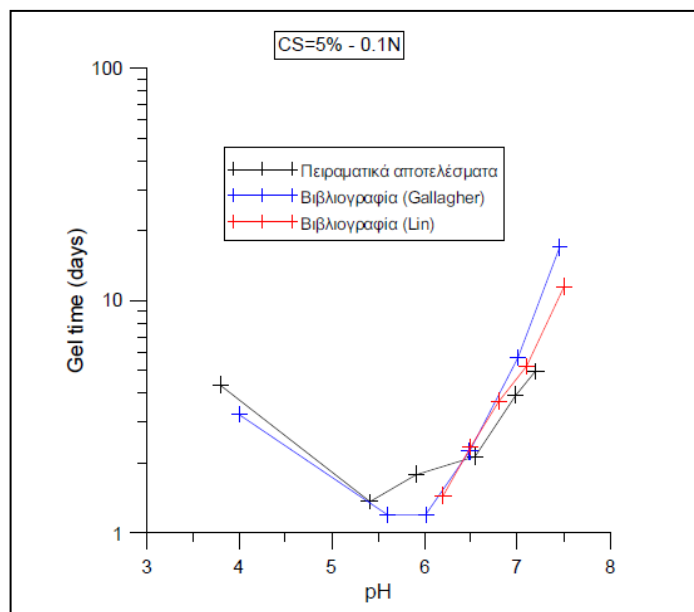
Παρουσιάζονται παρακάτω μερικά από τα πειράματα του ερευνητικού Θαλής - Π.Θ. (MIS 375618). Στα διαγράμματα διαφαίνεται η σχέση του χρόνου γέλης με το  $pH$  για διάφορες τιμές περιεκτικότητας κολλοειδούς πυριτίας  $CS(\%)$  κατά βάρος) και συγκέντρωσης αλάτων  $NaCl$  (σε όρους κανονικότητας  $N$ ). Επιπλέον, παρατίθεται η καμπύλη των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας.



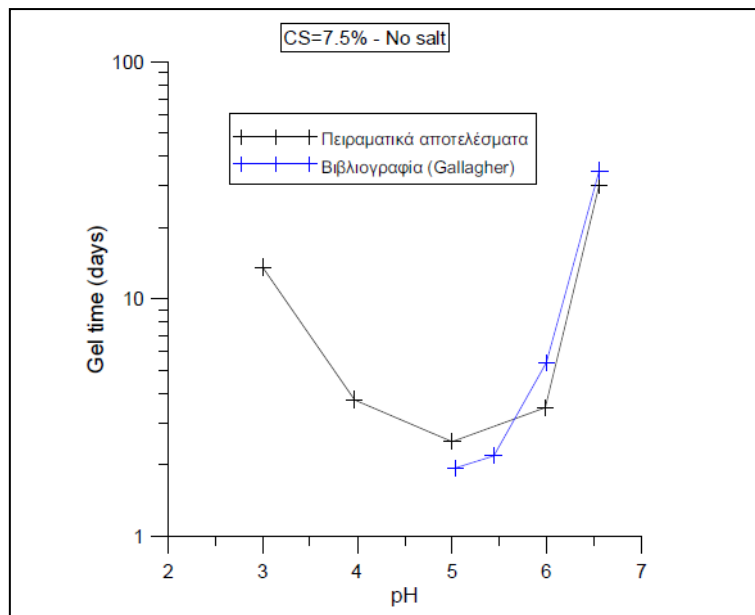
**Σχήμα 2.14.** Καμπύλη χρόνου γέλης –  $pH$  για περιεκτικότητα  $CS=5\%$  και κανονικότητα  $0\ N$ . Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



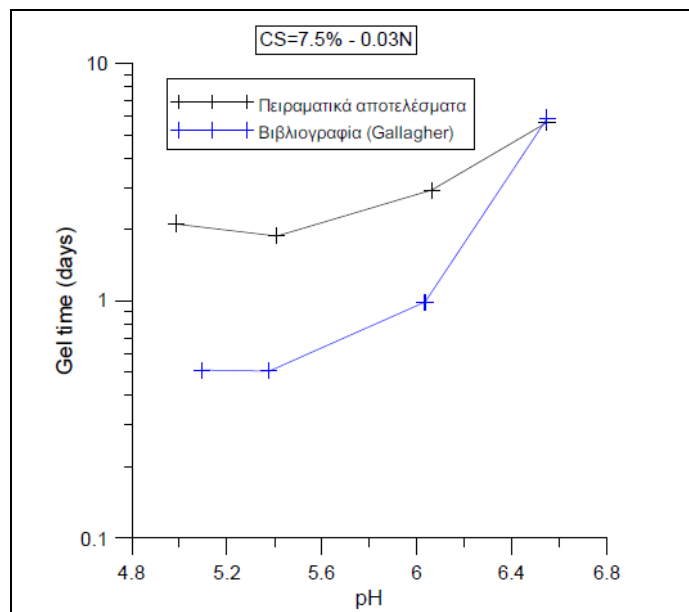
**Σχήμα 2.15.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=5% και κανονικότητα 0.03 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



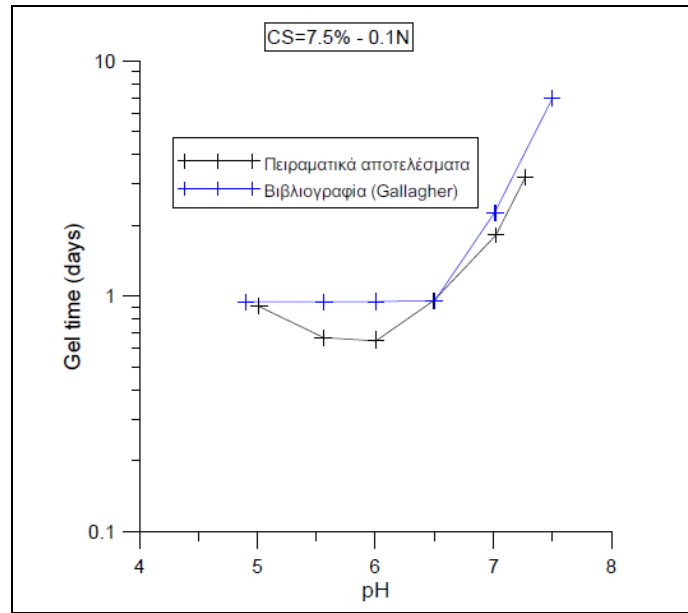
**Σχήμα 2.16.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=5% και κανονικότητα 0.1 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



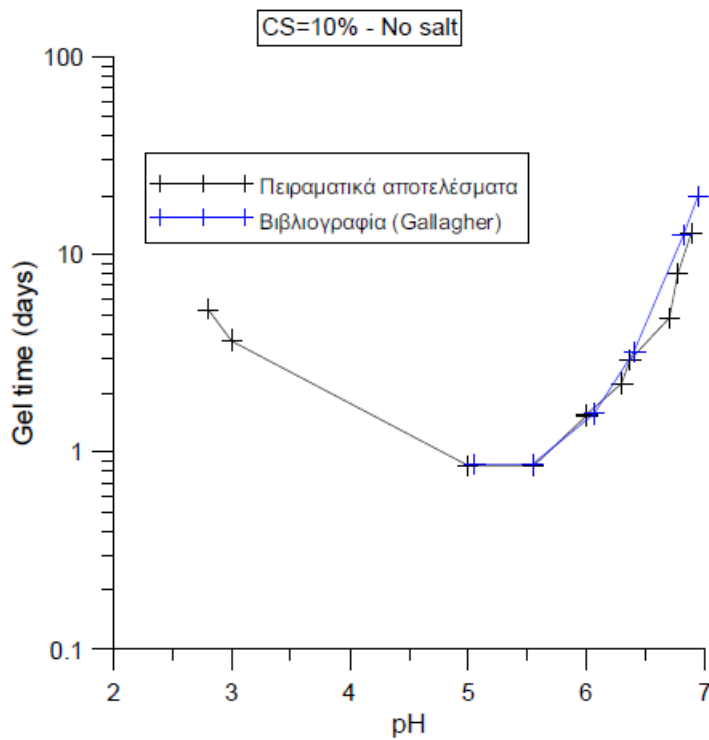
**Σχήμα 2.17.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=7.5% και κανονικότητα 0 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



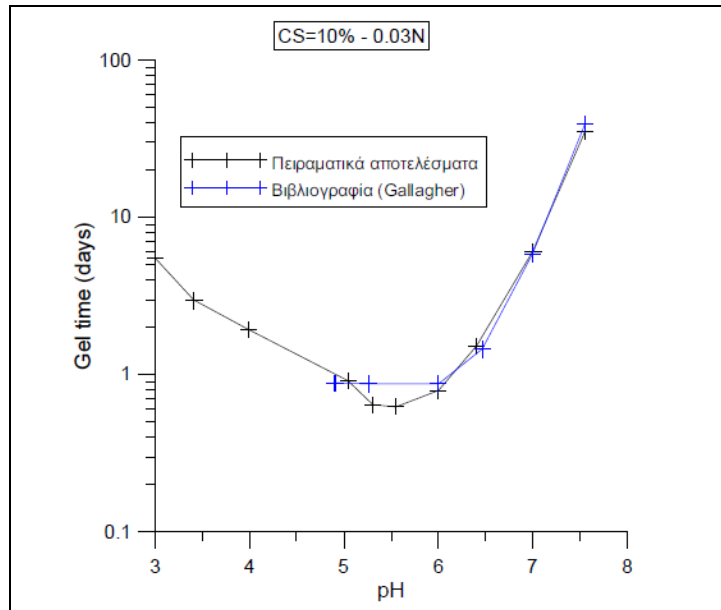
**Σχήμα 2.18.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=7.5% και κανονικότητα 0.03 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



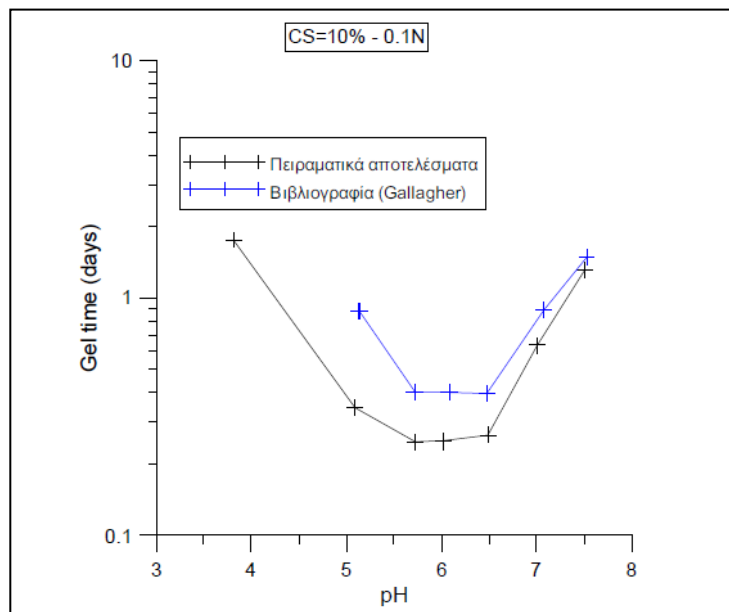
**Σχήμα 2.19.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=7.5% και κανονικότητα 0.1 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



**Σχήμα 2.20.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=10% και κανονικότητα 0 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



**Σχήμα 2.21.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=10% και κανονικότητα 0.03 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



**Σχήμα 2.22.** Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=10% και κανονικότητα 0.1 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

### 3.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι πλέον ευρέως γνωστό ότι η μηχανική συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητά τους. Συγκεκριμένα, ένας αμμώδης σχηματισμός που βρίσκεται σε χαλαρή δομή μειώνει τον όγκο του κατά τη διάτμηση με αποτέλεσμα σε αστράγγιστες φορτίσεις να αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων (συστολικότητα). Αντίθετα, εάν ο ίδιος σχηματισμός βρίσκεται σε πυκνή δομή η αναδιάταξη των κόκκων στην αρχή της διάτμησης τείνει να μειώσει τα κενά αλλά πολύ γρήγορα αυτό ανατρέπεται. Έτσι στα πιο πυκνά δοκίμια παρατηρείται διαστολική συμπεριφορά συνήθως, δηλαδή τάση του υλικού να αυξήσει τα κενά του, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αρνητικές πιέσεις πόρων.

#### 3.1.1 Μικροδομή των υλικών

Γνωρίζοντας τη σχετική πυκνότητα ( $D_r$ ) ή το δείκτη πόρων ( $e$ ) μιας καθαρής άμμου μπορούμε να εκτιμήσουμε την απόκρισή της. Η χρήση αυτών των δεικτών κατάστασης θα λέγαμε ότι είναι αμφιλεγόμενη στην περίπτωση μιγμάτων όπου δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο κατά πόσο το ποσοστό ύψους συμβάλλει στην καλύτερη αλληλεμπλοκή των κόκκων η όχι. Όσο αφορά τα μίγματα θα λέγαμε ότι η συμπεριφορά εξαρτάται από τις επιμέρους ιδιότητες των δυο υλικών όπως το σχήμα των κόκκων και την σχετική τους κοκκομετρία (Monkul 2010). Έρευνες στην μελέτη μειγμάτων άμμου με ποσοστά ύψους (Carraro et al. 2003, Kuerbis and Vaid 1988, Polito and Martin 2003, Salgado et al. 2000, Thevanayagam et al. 2002) έδειξαν ότι για να γίνει σωστή σύγκριση και αποτίμηση πειραμάτων είναι αναγκαία η σωστή επιλογή του κατάλληλου δείκτη πυκνότητας.

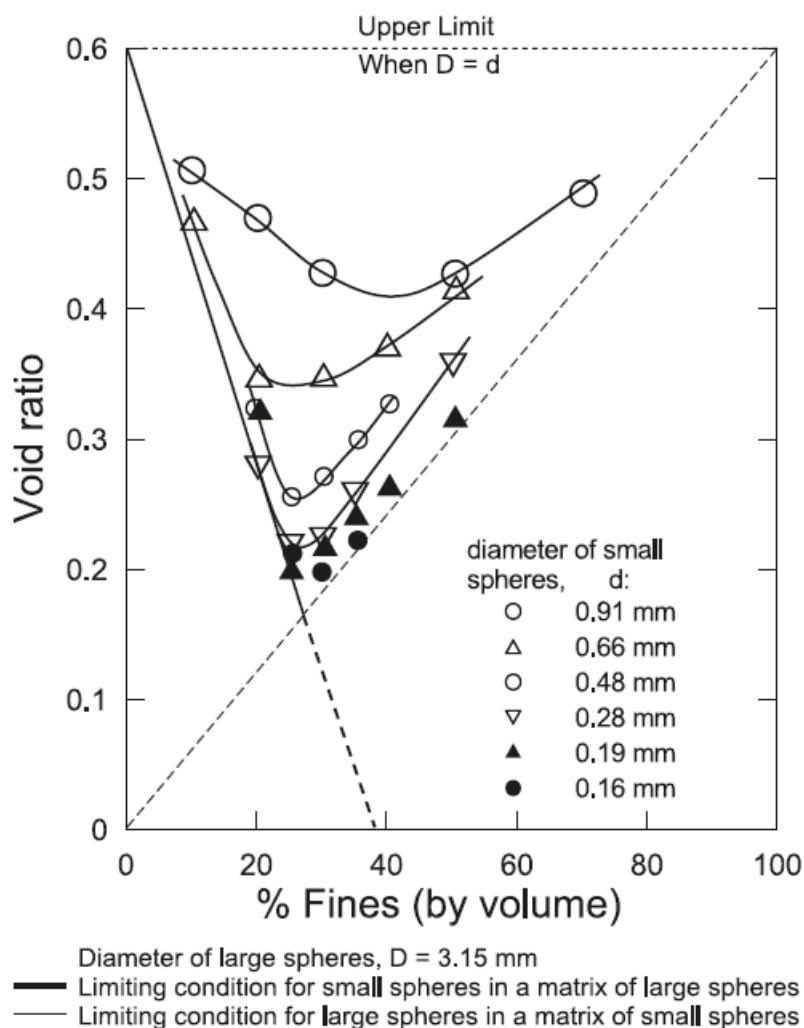
Στο παρελθόν έχουν δημοσιευθεί αντιφατικά αποτελέσματα σχετικά με την διατμητική αντοχή μειγμάτων λόγω της ακατάλληλης επιλογής του δείκτη κενών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του δείκτη πόρων σκελετού  $e_{sk}$  (skeleton void ratio) ( Kuerbis et al. 1988, Georgiannou et al. 1990, Georgiannou Burland Hight, Shen et al. 1977) όπου οι πυκνότητες των διαφόρων δοκιμίων εκφράζονται σε όρους σκελετού με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$e_{sk} = (e+FC/100)/(1-FC/100)$$

όπου FC είναι ο λόγος του ξηρού βάρους των λεπτοκόκκων προς το συνολικό ξηρό βάρος.

Η διάμετρος των κόκκων των εδαφικών υλικών είναι μια άλλη βασική παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση του εδάφους. Οι Lade et al. (1998), μεταβάλλοντας το ποσοστό των μικρών σφαιριδίων από 0% σε 100%, υπολόγισαν

πειραματικά αλλά και θεωρητικά τις πιο πυκνές διατάξεις που μπορούν να επιτευχθούν (binary packing). Η διαδικασία επαναλαμβάνονταν για ζεύγη σφαιριδίων με διαφορετικούς λόγους διαμέτρων, τα αποτελέσματα της οποίας παριστάνονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Επίδραση του λόγου διαμέτρων και του ποσοστού λεπτόκοκκων στον ελάχιστο δείκτη πόρων – πραγματικές μετρήσεις για εναπόθεση μεταλλικών σφαιριδίων.

Από το Σχήμα 3.1. μπορούμε να παρατηρήσουμε τα ότι οι θεωρητικές ευθείες γραμμές αναφέρονται σε σφαιρίδια απειροστού μεγέθους. Όσο η διάμετρος των μικρών σφαιρών πλησιάζει εκείνη των μεγάλων, τόσο απομακρυνόμαστε από τις θεωρητικές τιμές καθώς οι μικροί κόκκοι δυσκολεύονται να χωρέσουν στα κενά. Επιπλέον, υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του Ποσοστού Λεπτόκοκκων (Fines Content Threshold Value)  $FC_{th} \approx 30\%$ , όπου η μικροδομή αλλάζει. Για  $FC < FC_{th}$  έχουμε λεπτόκοκκα σε ένα σκελετό από χονδρόκοκκα. Για  $FC > FC_{th}$  έχουμε χονδρόκοκκα σε ένα σκελετό από λεπτόκοκκα.

Η ύπαρξη οριακής τιμής του ελάχιστου δείκτη πόρων ( $e_{\min}$ ) και του μέγιστου δείκτη πόρων ( $e_{\max}$ ) για συγκεκριμένο ποσοστό λεπτόκοκκων, όπως και το ότι η ικανότητα ενός σκελετού να φέρει φορτίο είναι ευθέως ανάλογη των ενεργών επαφών που δημιουργούνται εντός του σκελετού αναγνωρίζεται και στην εργασία του Thevanayagam et al. (2002)

Ως προς τον δείκτη πόρων κενών ( $e$ ) προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις στη διεθνή βιβλιογραφία, όμως στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί.

Ολικός Δείκτης Πόρων ( $e$ ):

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

όπου  $V_v$  : όγκος κενών (voids)  
 $V_s$  : όγκος στερεών (solids)

Θα λέγαμε ότι αυτή η προσέγγιση ταιριάζει περισσότερο σε ομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς γιατί αυτός ο ολικός δείκτης πόρων δεν κάνει διάκριση μεταξύ λεπτόκοκκων ή χονδρόκοκκων.

Δείκτης Πόρων Σκελετού ( $e_{sk}$ ):

$$e_{sk} = \frac{V_v + V_f}{V_s} = \frac{e + FC}{1 - FC}$$

όπου  $e$  : ο ολικός δείκτης πόρων  
 $FC$  : το ποσοστό λεπτόκοκκων  
 $V_v$  : όγκος κενών (voids)  
 $V_s$  : όγκος στερεών (solids)  
 $V_f$  : όγκος λεπτόκοκκων (fines)

Σε αυτόν τον δείκτη πόρων, η ύπαρξη του λεπτόκοκκου υλικού αγνοείται και όλος ο λεπτόκοκκος σχηματισμός θεωρείται μέρος των κενών. Επίσης για  $FC=0\%$  ο δείκτης πόρων σκελετού ( $e_{sk}$ ) ταυτίζεται με τον ολικό δείκτη πόρων ( $e$ ).

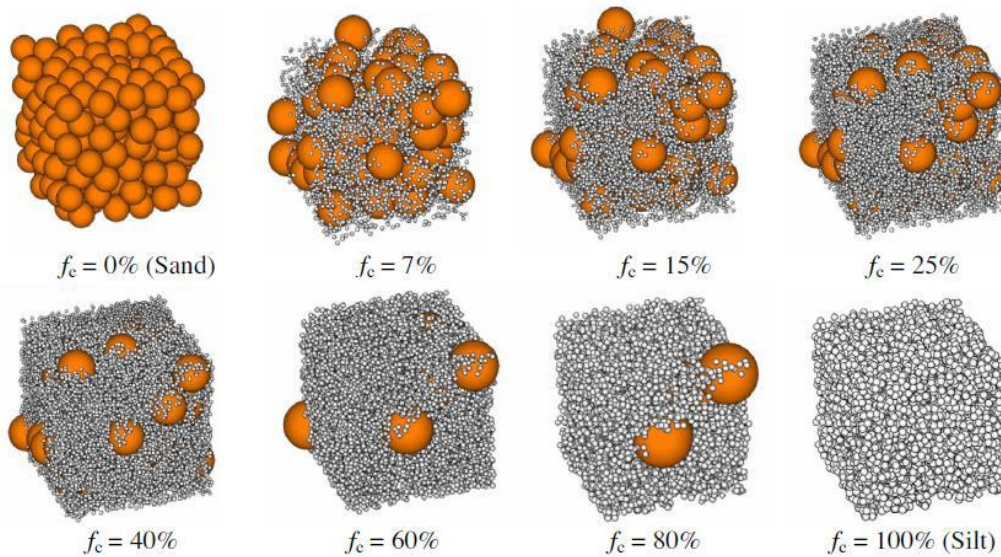
Δείκτης Πόρων Λεπτόκοκκων ( $e_f$ ):

$$e_f = \frac{V_v - V_f}{V_f} = \frac{e}{FC}$$

όπου  $e$  : ο ολικός δείκτης πόρων  
 $FC$  : το ποσοστό λεπτόκοκκων  
 $V_v$  : όγκος κενών (voids)  
 $V_f$  : όγκος λεπτόκοκκων (fines)

Για  $FC=100\%$ , ο δείκτης πόρων λεπτόκοκκων ( $e_f$ ) ταυτίζεται με τον ολικό δείκτη πόρων σε δείγμα από καθαρή ιλύ. Στην περίπτωση μίγματος, ως διαθέσιμος χώρος λαμβάνονται τα κενά που αφήνει ο σκελετός των χονδρόκοκκων.

Στο Σχήμα 3.2. φαίνονται οι διάφορες μορφές μικροδομής σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Παρατηρώντας την εικόνα αυτή, μπορούμε να πούμε ότι μέχρι ένα ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού στο μίγμα γύρω στο 25%, τα λεπτόκοκκα υλικά δεν συμμετέχουν στην μεταφορά δυνάμεων εντός του σκελετού και κατάλληλος δείκτης πόρων θεωρείται ο δείκτης πόρων σκελετού ( $e_{sk}$ ).



Σχήμα 3.2. Τρισδιάστατη απεικόνιση της μικροδομής μειγμάτων άμμου με διάφορα ποσοστά ιλύος

### 3.1.2 Παράγοντες που επιδρούν στην συμπεριφορά καθαρής άμμου και μιγμάτων και μεταβάλλουν την αντίσταση τους έναντι ρευστοποίησης

#### ➤ Ποσοστό λεπτόκοκκων

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που συμβάλει θετικά και αρνητικά στην αντίσταση έναντι ρευστοποίησης είναι το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο εδαφικό δοκίμιο. Τα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών είναι αντιφατικά και αντικρουόμενα. Υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι η αύξηση του ποσοστού μη πλαστικής ιλύος αυξάνει το δυναμικό ρευστοποίησης και άλλες που δείχνουν ότι το δυναμικό ρευστοποίησης μειώνεται. Επίσης μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι το δυναμικό ρευστοποίησης δεν είναι τόσο συνάρτηση του ποσοστού ιλύος, όσο είναι συνάρτηση του δείκτη πόρων του εδαφικού σκελετού ( $e_{sk}$ ).

#### ➤ Δείκτης πόρων

Ο δείκτης πόρων, μπορούμε να πούμε ότι είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή ως προς την ρευστοποίηση. Είναι δυνατόν δοκίμια μιγμάτων με ίδια αρχική ενεργό τάση, να συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά λόγω διαφορετικής πυκνότητας. Τα χαλαρά δοκίμια τείνουν να αναπτύσσουν υπερπίεσεις πόρων (συστολική συμπεριφορά), ενώ εκείνα με μικρές τιμές του δείκτη πόρων αναπτύσσουν αρνητικές πιέσεις πόρων (διαστολικότητα). Για ενδιάμεσες τιμές του δείκτη πόρων τα δοκίμια παρουσιάζουν αρχικά συστολική συμπεριφορά και αργότερα μια τάση για διαστολή. Διάφοροι δείκτες πόρων έχουν χρησιμοποιηθεί για μίγματα άμμων με ποσοστό ιλύος, όμως στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν συγκρίσεις με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού (Skeleton Void Ratio) .

#### ➤ Ενεργός τάση

Ένας άλλος παράγοντας, η σημασία του οποίου είναι καθοριστική στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης είναι η ενεργός τάση. Σε πειράματα που έγιναν στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές, παρατηρήθηκε ότι σε δοκίμια τα οποία είχαν την ίδια πυκνότητα, αυτά που στερεοποιήθηκαν σε μεγαλύτερη αρχική ενεργό τάση, είχαν και την μεγαλύτερη τάση για συστολή. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 20% παρατηρείται ταύτιση της συμπεριφοράς των δοκιμίων που στερεοποιούνται σε διαφορετικές τάσεις η οποία προσεγγίζει παρόμοια τιμή αντοχής στη σταθερή κατάσταση.

#### ➤ Αρχική δομή

Η αρχική δομή του μίγματος ή της καθαρής άμμου είναι ένας άλλος παράγοντας που δεν θα μπορούσε να αμεληθεί. Στα διάφορα εργαστήρια έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες όσον αφορά τον τρόπο παρασκευής των δοκιμίων και την μελέτη της δομής και της αντίστοιχης συμπεριφοράς των δοκιμίων σε φόρτιση. Στόχος είναι η παραγωγή στο εργαστήριο δοκιμίων που να έχουν κατά το δυνατόν παρόμοια δομή με εκείνη των φυσικών αποθέσεων των διάφορων εδαφικών υλικών. Υπάρχουν

τρόποι εναπόθεσης δειγμάτων που από τη φύση της μεθοδολογίας τα δοκίμια γίνονται πιο στιβαρά (π.χ. water pluviation). Αντίθετα, υπάρχουν και άλλοι τρόποι παρασκευής δοκιμίων (π.χ. wet tamping) οι οποίοι παράγουν πιο χαλαρά δοκίμια. Στην παρούσα διπλωματική η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της εμφάνισης σε νερό (water pluviation).

➤ Αρχική διατμητική τάση (προδιάτμηση)

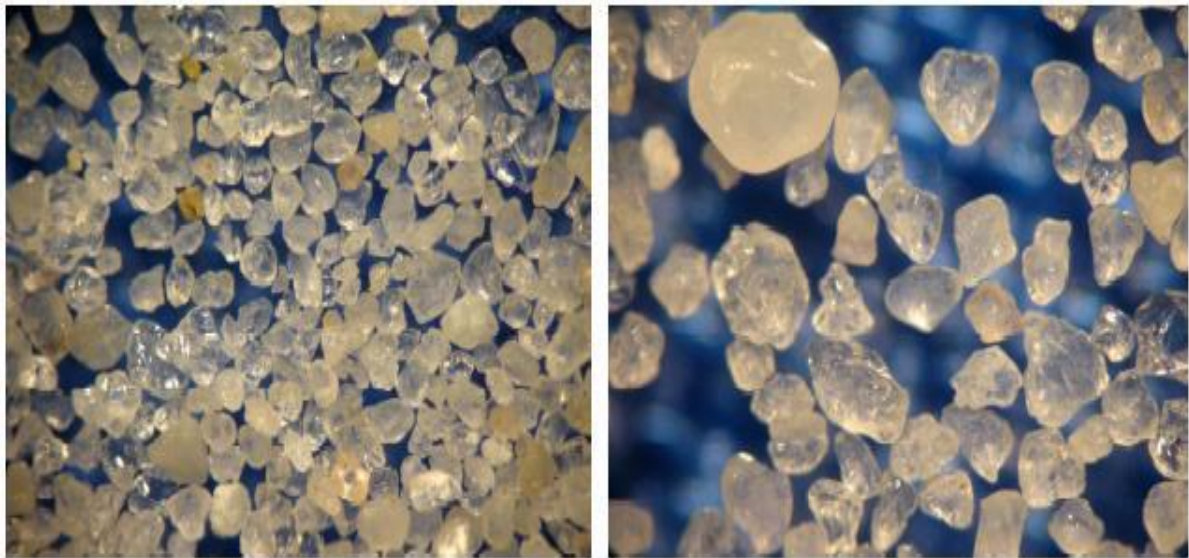
Τέλος, ένας παράγοντας με καίρια σημασία είναι η αρχική διατμητική τάση (προδιάτμηση). Τις περισσότερες φορές, η εντατική κατάσταση ενός δοκιμίου είναι ανισότροπη και είναι πολύ πιθανόν να βρίσκεται υπό μια αρχική διατμητική τάση πριν εφαρμοσθεί οποιαδήποτε άλλη φόρτιση. Το γεγονός αυτό έχει απασχολήσει αρκετούς επιστήμονες που με διάφορες δοκιμές προσπάθησαν να εξακριβώσουν τον ρόλο και την σημασία του παράγοντα αυτού. Οι Lee and Seed (1967), Lee et al. (1975), Seed et al. (1975), Seed (1983) και Hosono and Yoshimine (2004) υποδεικνύουν ότι όταν η άμμος υποβάλλεται σε ανακυκλική φόρτιση, η παρουσία αρχικής διατμητικής τάσης αυξάνει την αντίσταση της έναντι ρευστοποίησης. Αντίθετα, οι Castro (1965, 1975), Casagrande (1975), Castro and Poulos (1977) και Yoshimi and Tokimatsu (1978) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της αρχικής διατμητικής τάσης μπορεί να μειώσει την αντίσταση της άμμου έναντι ρευστοποίησης ή να την αφήσει ανεπηρέαστη. Πολλές φορές στο εργαστήριο επιτυγχάνεται η προδιάτμηση στην τριαξονική συσκευή κάνοντας ανισότροπη στερεοποίηση όπου ο λόγος  $K_c = \sigma_{1c}'/\sigma_{3c}'$  είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Στην συσκευή κοίλου δοκιμίου η προδιάτμηση επιβάλλεται με μία αρχική στρεπτική τάση στερεοποίησης  $\tau_s$  πριν από την κυρίως φόρτιση.

## 3.2 ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Στα πειράματα που εκτελούνται στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιείται εργαστηριακή άμμος και ιλύς και όχι εδαφικά υλικά που μπορούμε να συλλέξουμε από το φυσικό περιβάλλον. Αυτά τα εδαφικά υλικά είναι κατάλληλα επεξεργασμένα ώστε να είναι καθαρά (χωρίς προσμίξεις με άλλα υλικά), σχετικά ομοιογενή, κατάλληλα διαβαθμισμένα και να περιέχουν κόκκους με χαρακτηριστικό μέγεθος και σχήμα. Η χρήση τέτοιων εδαφικών υλικών οδηγεί σε ακριβή συμπεράσματα για την εδαφική απόκριση καθώς είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές της παρούσας εργασίας είναι η άμμος M31 και η ιλυώδης άμμος, που προκύπτει από το μίγμα 85% κατά βάρος άμμου M31 και 15% κατά βάρος ιλύος D6. Η ιλυώδης άμμος έχει λεπτόκοκκο υλικό σε ποσοστό  $f_c=10\%$ .

### 3.2.1. Η φυσική 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 εργαστήριο του ΕΜΠ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της άμμου M31. Το ειδικό βάρος έχει τιμή  $G_s=2.66$ , ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι  $e_{max}=0.80$  και  $e_{min}=0.50$  αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι  $D_{10}=0.213\text{mm}$ ,  $D_{30}=0.258\text{mm}$ ,  $D_{60}=0.336\text{mm}$  και  $C_u=1.58$ . Επιπλέον προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διαπερατότητας στο εύρος  $k=(1.09-3.40)*10^{-4}\text{m/s}$ .



*Σχήμα 3.3. Εικόνα από μικροσκόπιο κόκκων χαλαζιακής άμμου M31.*

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 κοσκίων διαφορετικής διαμέτρου οπής σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στα British Standards 1377 (BS1377). Η σειρά κοσκίων που επιλέγει για τα εξεταζόμενα υλικά περιγράφεται στον Πίνακα 3.1. Επίσης, στο Σχήμα 3.5. παρουσιάζεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 όπως προέκυψε μετά από την παραπάνω πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο μαζί με τις καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης της ιλύς D6 και του μίγματος άμμου 85% w.tκαι ιλύος 15 % κατά βάρος

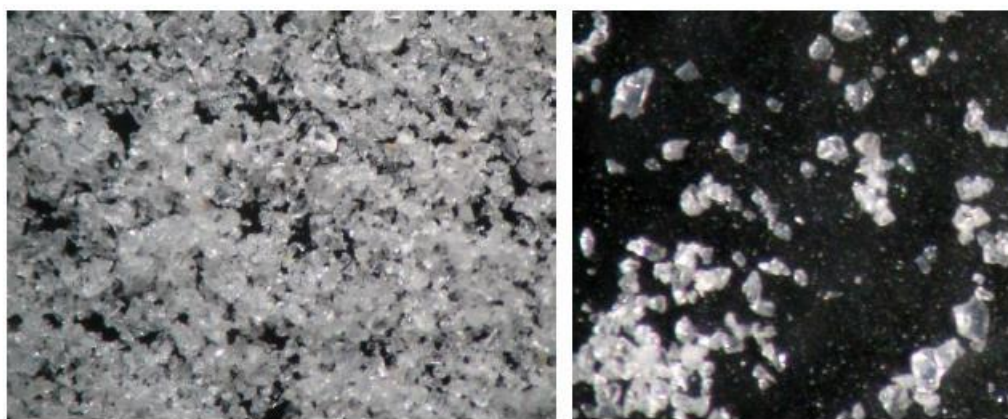
Ονομασία κόσκινου	Διάμετρος οπής κόσκινου (mm)
No 10	2.000
No 20	0.850
No 40	0.425
No 50	0.300
No 70	0.212
No 100	0.150
No 200	0.075

*Πίνακας 3.1.*



### 3.2.2. Η φυσική ιλύς D6

Σύμφωνα με την ανάλυση που εκτελέστηκε στο μικροσκόπιο η ιλύς D6 είναι προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου. Οι κόκκοι της D6 είναι διαυγείς και, σε αντίθεση με την άμμο M31, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα, γεγονός που αποδίδεται στην κογχώδη θραύση τους. Η ιλύς D6 είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερο pH. Στο εργαστήριο του ΕΜΠ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της ιλύος D6. Το ειδικό βάρος έχει τιμή  $G_s=2.62$ , ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι  $e_{max}=1.06$  και  $e_{min}=0.66$  αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι  $D_{10}=0.026$  mm,  $D_{30}=0.040$  mm,  $D_{60}=0.066$  mm και  $C_u=2.54$ . Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης της ιλύος D6 χρησιμοποιήθηκε από την παραπάνω διαδικασία μόνο το κόσκινο Νο 200. Όσο ποσοστό πέρασε από το κόσκινο αυτό, διαβαθμίστηκε με την βοήθεια πυκνόμετρου. Η τελική κοκκομετρική καμπύλη της ιλύος, όπως υπολογίστηκε πειραματικά στο εργαστήριο φαίνεται στο Σχήμα 2.5.

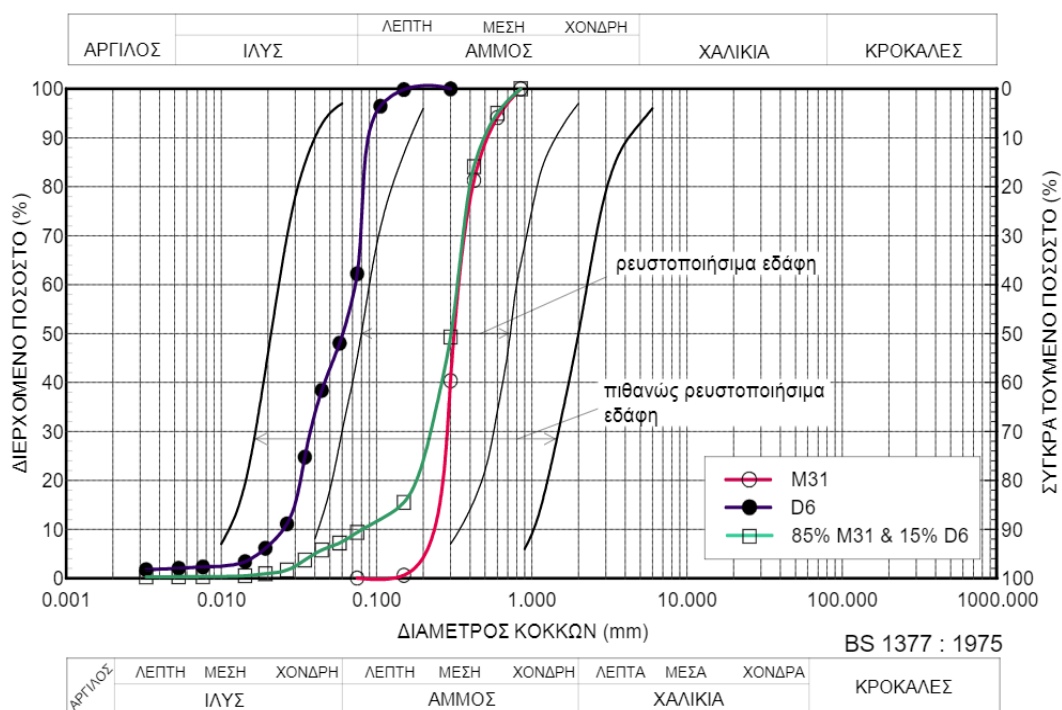


Σχήμα 3.4. Εικόνα από μικροσκόπιο κόκκων ιλύς D6.

### 3.2.3. Η ιλυώδης άμμος M31 – D6

Το μίγμα άμμου M31 και ιλύος D6 παρασκευάστηκε με ποσοστά 85% κατά βάρος σε άμμο M31 και 15% κατά βάρος σε ιλύ D6, που οδηγεί σε λεπτόκοκκο κλάσμα  $f_c=10\%$  κατά βάρος. Το ειδικό βάρος έχει τιμή  $G_s=2.66$ , ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι  $e_{max}=0.75$  και  $e_{min}=0.40$  αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι  $D_{10}=0.067$  mm,  $D_{30}=0.234$  mm,  $D_{60}=0.320$  mm και  $C_u=4.78$ . Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διαπερατότητας στο εύρος  $k=(0.96-1.33)\cdot 10^{-4}$  m/s. Στο Σχήμα 3.5. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις της άμμου M31 της ιλύος D6 και του μίγματος 85%

άμμου M31 και 15% ιλύος D6 που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αυτής της διπλωματικής εργασίας.



**Σχήμα 3.5.** Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31, ιλύος D6 και ιλυώδους άμμου 85% κατά βάρος M31 & 15% κατά βάρος D6.

Χαρακτηριστικά φυσικών εδαφικών υλικών προσδιορισμένα στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ .			
Φυσική Ιδιότητα	Άμμος M31	Ιλύς D6	Ιλυώδης άμμος 85% κατά βάρος M31 & 15% κατά βάρος D6
$G_s$	2,660	2,620	2,650
$e_{max}$	0,800	1,060	0,750
$e_{min}$	0,500	0,660	0,400
$D_{10}(mm)$	0,213	0,026	0,067
$D_{30}(mm)$	0,258	0,040	0,234
$D_{60}(mm)$	0,336	0,066	0,320
$C_u$	1,580	2,540	4,780

**Πίνακας 3.2.**

### 3.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΟΡΩΝ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ Μ31 ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΜΜΟΥ Μ31 – ΙΛΥΟΣ D6

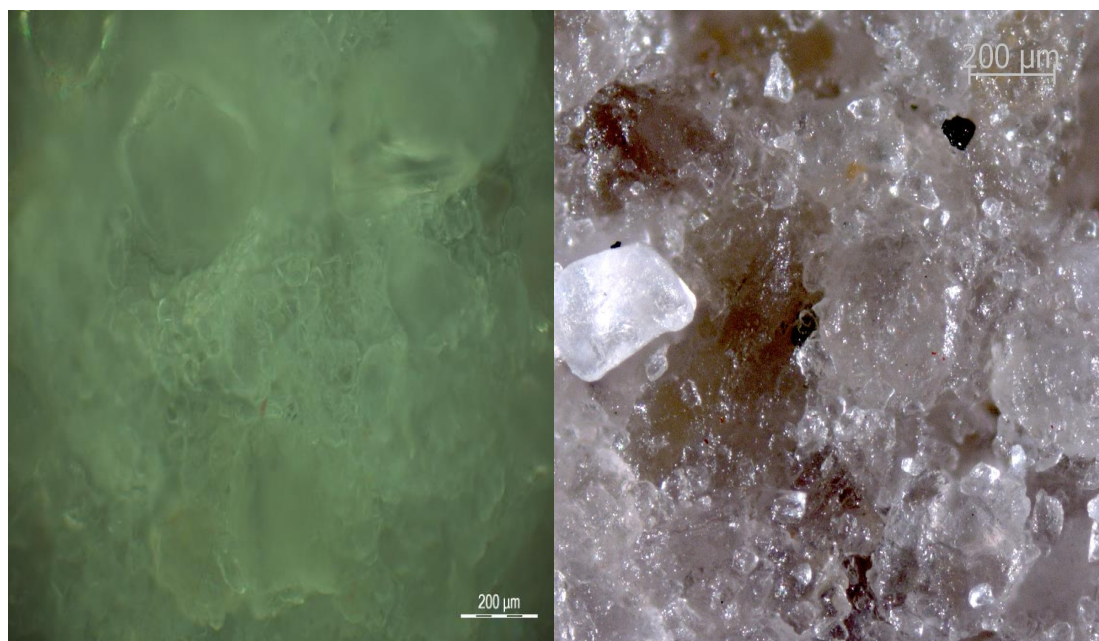
Ο μέγιστος δείκτης πόρων  $e_{max}$ , δηλαδή η χαλαρότερη δομή της άμμου Μ31 προσδιορίστηκε με βάση την μέθοδο του Kolbuszewski (1948). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η διαδικασία έχει ως εξής: σε γυάλινο δοκιμαστικό σωλήνα χωρητικότητας 1lt αποτίθενται περίπου 500gr ξηρής άμμου και στο ελεύθερο άκρο σωλήνα 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 Μ31  $e_{max} = 0,80$ . Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία για την εύρεση του μέγιστου δείκτη πόρων μίγματος που περιέχει άμμο Μ31 ιλύος D6. Θεωρήθηκε ότι η άμμος περιέχει 100% χονδρόκοκκο υλικό ενώ η ιλύς αποτελείται από 67,5% λεπτόκοκκο υλικό και 32,5% χονδρόκοκκο. Προέκυψε η τιμή για το μίγμα  $e_{max}=0.75$ .

Ο ελάχιστος δείκτης πόρων  $e_{min}$ , δηλαδή η πυκνότερη δομή της άμμου Μ31 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  $e_{min}$ .

Με βάση την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι η τιμή του ελάχιστου δείκτη πόρων  $e_{min}$  της καθαρής άμμου Μ31 είναι  $e_{min}=0,50$ . Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία για την εύρεση του ελάχιστου δείκτη πόρων μίγματος που περιέχει 85 % κατά βάρος άμμο Μ31 και 15% κατά βάρος ιλύ D6. Προέκυψε η τιμή για το μίγμα  $e_{min}=0.40$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.2.

### 3.4. ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

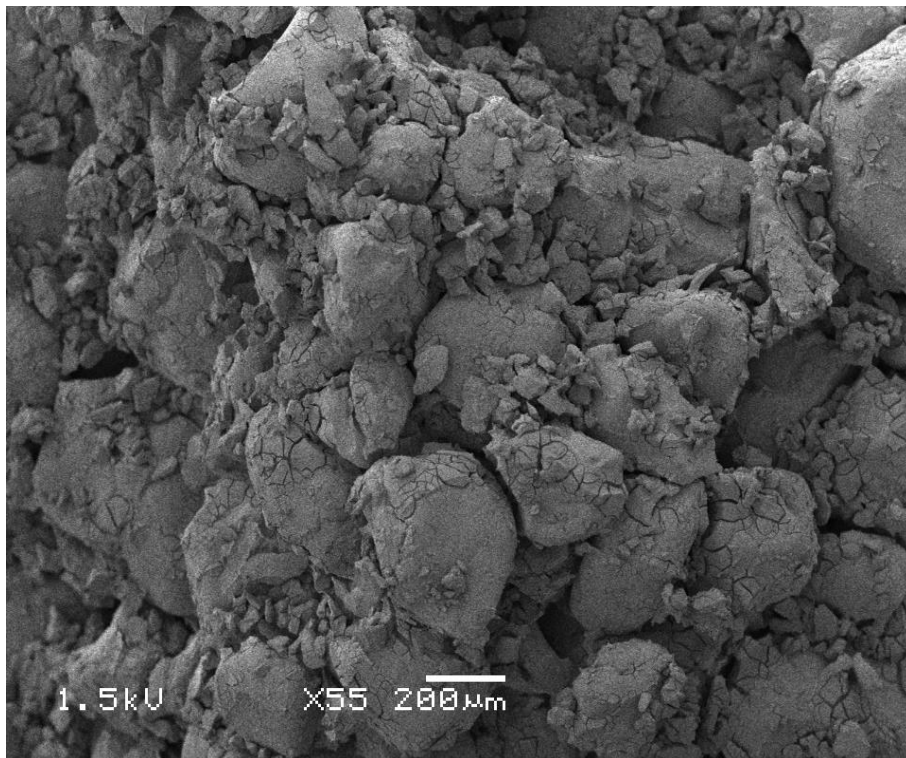
Για να παρατηρήσουμε σε μικροσκοπική κλίμακα το υλικό της κολλοειδούς πυριτίας και να κατανοήσουμε τον τρόπο που συνδέεται με το φυσικό έδαφος, δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας και σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία ιλυώδους άμμου παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του ΕΜΠ και του Imperial 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 3.6 παρουσιάζεται το δείγμα σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου, σε φωτογραφία από το μικροσκόπιο του ΕΜΠ αριστερά και του Imperial College δεξιά. Παρατηρούμε τους κόκκους άμμου που ξεχωρίζουν ενώ διαπιστώνουμε ότι η ιλύς χάνεται μέσα στη γέλη της κολλοειδούς πυριτίας. Για να βεβαιωθούμε ότι αυτό που θεωρήσαμε στη φωτογραφία είναι η γέλη εξετάσαμε στο μικροσκόπιο και ένα δείγμα καθαρής κολλοειδούς πυριτίας CS=10%. Η μορφή του φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Επιπλέον μελετήσαμε ένα δείγμα σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου που είχε υποστεί ξήρανση. Διαπιστώσαμε ότι οι κόκκοι του εδάφους έχουν καλυφθεί σε όλη τους την έκταση από κολλοειδή πυριτία (Σχήμα 3.8).



*Σχήμα 3.6. Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.*



*Σχήμα 3.7. Φωτογραφία δείγματος καθαρής κολλοειδούς πυριτίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο*



*Σχήμα 3.8. Φωτογραφία ξηραμένου δείγματος σταθεροποιημένης ιλωδούς άμμου από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ

### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η ονομασία της δοκιμής αυτής υποδηλώνει την 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.
- 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.
- 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 αποστράγγιση με μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων (CU) και δοκιμή με στερεοποίηση και αποστράγγιση (CD).

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης, φυσικών και σταθεροποιημένων εδαφών, σε υψηλά επίπεδα τάσεων. Τα φυσικά εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι η καθαρή άμμος M31 και το μίγμα 85% κατά βάρος και 15% κατά βάρος ιλύος D6 (λεπτόκοκκα  $f_c=10\%$ ). Τα εδαφικά υλικά αυτά στη

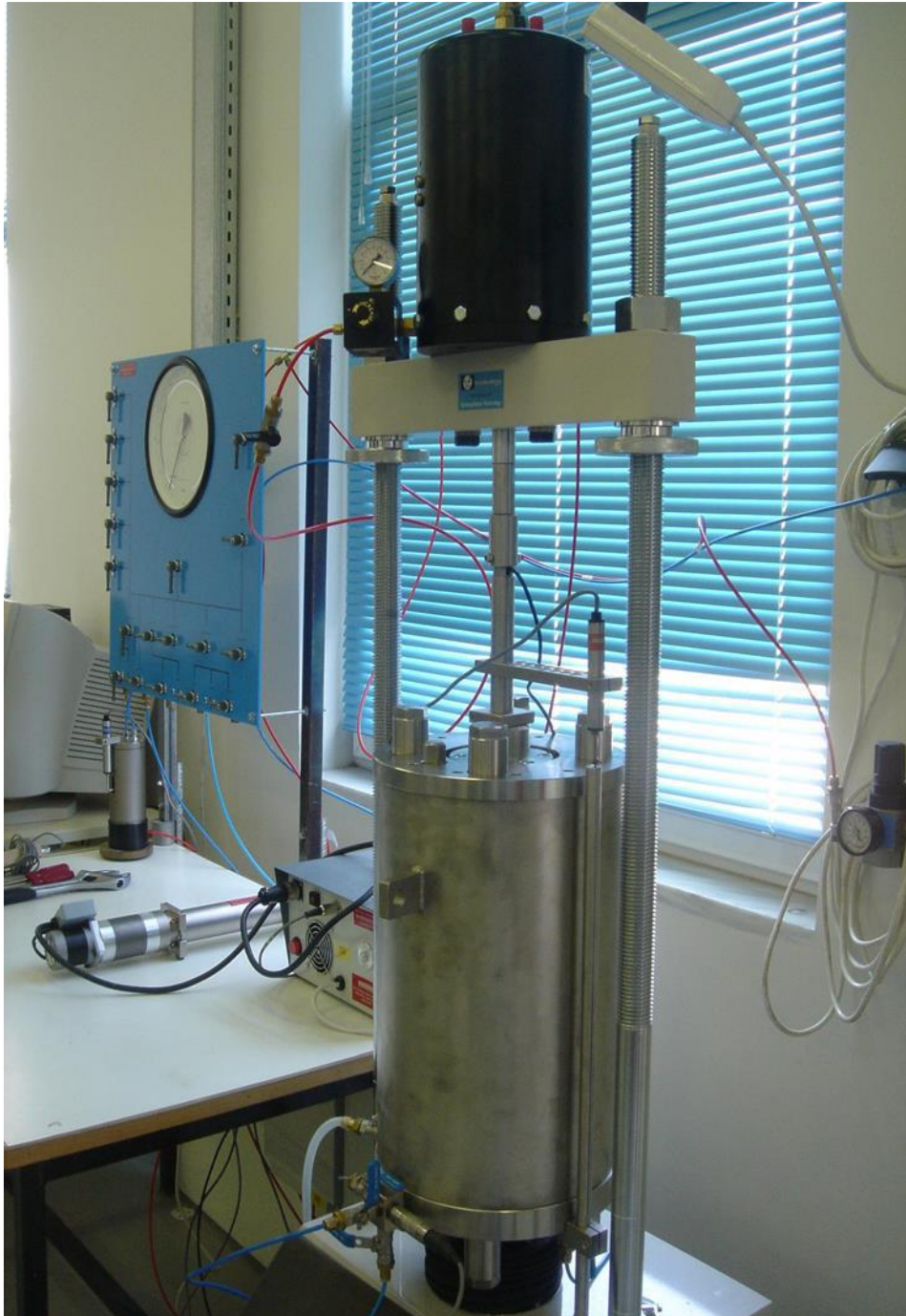
συνέχεια σταθεροποιήθηκαν με το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica Ludox SM-30) σε ποσοστά σταθεροποιητή CS= 6% και CS=10% κατά βάρος και μετέπειτα φορτίστηκαν. Τα δοκίμια είχαν κατά μέσο όρο διάμετρο 50 mm και ύψος 100 mm και παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε νερό ή σε υγρόλυμα εμπλουτισμένο με σταθεροποιητή. Το υγρόλυμα περιείχε κατάλληλο ποσοστό αλάτων (0.03 N NaCl για CS=10% και 0.18 N NaCl για CS=6%) και το pH του ρυθμίστηκε στην τιμή 6 με χρήση όξινου διαλύματος HCl. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται ο χρόνος σχηματισμού της γέλης και η συνεπαγόμενη αύξηση του ιξώδους. Ο χρόνος γέλης για το υγρόλυμα με CS=6% είναι 11 ώρες και για το υγρόλυμα με CS=10% είναι 10 ώρες. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια αφέθηκαν να ωριμάσουν σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια υπό αεροστεγείς συνθήκες. Η ηλικία των σταθεροποιημένων εδαφών για το υγρόλυμα με CS=6% κατά τη δοκιμή ήταν 55 ώρες και για το υγρόλυμα με CS=10% ήταν 50 ώρες. Πριν από κάθε δοκιμή προηγήθηκε το στάδιο του κορεσμού ελέγχοντας μετά από κάποιο χρονικό διάστημα την παράμετρο πίεσης πόρων B ( $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ ). 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 B 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 κατά το οποίο το δοκίμιο αφήνεται να στραγγίσει κάτω από συγκεκριμένη πλευρική πίεση  $\sigma_3$  για κάποιο χρονικό διάστημα. Οι δοκιμές μας εκτελέστηκαν με τάση ισότροπης στερεοποίησης  $p_i' = 1000, 1500$  και  $2000$  kPa, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των υψηλών τάσεων πάνω στους χημικούς δεσμούς των σταθεροποιημένων εδαφών. Επιπλέον, εκτελέστηκαν και δοκιμές σε χαμηλότερη τάση  $p_i' = 300$  kPa για πληρότητα στη σύγκριση. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμίων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 ήταν στο εύρος  $D_r = 30-40\%$  ενώ των δοκιμίων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος ήταν  $D_r = 25-35\%$ . Οι δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης, κατά το στάδιο της διάτμησης εκτελέστηκαν με ταχύτητα φόρτισης (ρυθμό διάτμησης)  $0.30 \text{ mm/min}$  που είναι αρκετά βραδεία ώστε η πίεση του νερού των πόρων να είναι περίπου ίδια καθ' όλο το ύψος του δοκιμίου. Για την εκτέλεση των δοκιμών της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία διαθέτει κυψέλη μέγιστης πίεσης 7 MPa και πλαίσιο μέγιστου αξονικού φορτίου 50 kN. Η μέτρηση των αξονικών μετακινήσεων έγινε με εξωτερικό μετρητή αλλά και με εσωτερικούς μετρητές επί του δοκιμίου. Κατά τη φάση της στερεοποίησης λαμβάνουμε μόνο τις μετρήσεις των εσωτερικών μετρητών (inclinometers) που είναι ευαίσθητοι σε μικρές παραμορφώσεις, ενώ στη φάση της διάτμησης δεχόμαστε μετρήσεις και από τα δύο είδη μετρητών, με πιο αξιόπιστες αυτές του εξωτερικού μετρητή. Όλα τα μετρητικά όργανα βαθμονομήθηκαν στο εύρος των επιβαλλόμενων φυσικών μεγεθών.

Επιπρόσθετα, εκτελέστηκαν και μερικές μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε καθαρή άμμο υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, οι οποίες παρουσιάζονται ενδεικτικά στο τέλος του κεφαλαίου.



#### 4.1.1 Βασικές παράμετροι και αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών

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. 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  $\epsilon_z$ , της υπερπίεσης πόρων  $\Delta u$  και του δείκτη πόρων  $e$ . Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγουμε τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν.



*Σχήμα 4.1. Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*

## 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης που εκτελέστηκαν σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια. Έχουμε κατατάξει τις δοκιμές σε πέντε κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσική άμμο M31, ενώ στη δεύτερη κατατάσσουμε τις δοκιμές που εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένη άμμο M31. Στην τρίτη και στην τέταρτη κατηγορία κατατάσσουμε τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια ιλυώδους άμμου M31-D6 αντίστοιχα. Στην πέμπτη κατηγορία ανήκουν οι ενδεικτικές δοκιμές που εκτελέστηκαν υπό στραγγιζόμενες συνθήκες σε φυσική άμμο M31. Στον Πίνακα 4.1. απεικονίζεται η κατάταξη των πειραμάτων στις 5 κατηγορίες.

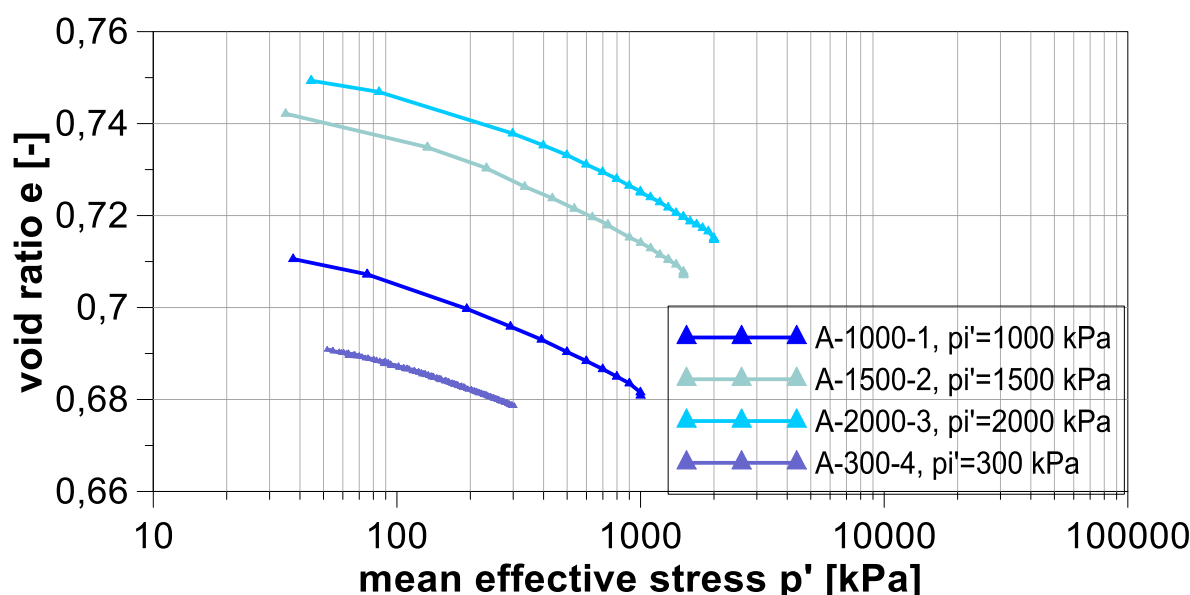
Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Μονοτονικών Δοκιμών Τριαξονικής Θλίψης			
1 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Μονοτονικές Δοκιμές σε φυσική άμμο M31	A-300-4, A-1000-1, A-1500-2, A-2000-3	
2 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Μονοτονικές Δοκιμές σε σταθεροποιημένη άμμο M31	Ποσοστό Πυριτίας 6%	Ποσοστό Πυριτίας 10%
		SA6-300-8, SA6-1000-5, SA6-1500-6, SA6-2000-7	SA10-300-4, SA10-1000-1, SA10-1500-2, SA10-2000-3
3 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Μονοτονικές Δοκιμές σε ιλυώδη άμμο M31-D6	B-300-4, B-1000-1, B-1500-2	
4 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Μονοτονικές Δοκιμές σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο M31-D6	Ποσοστό Πυριτίας 6%	Ποσοστό Πυριτίας 10%
		SB6-1500-10	SB10-1500-7
5 <sup>η</sup> Κατηγορία	Στραγγιζόμενες Μονοτονικές Δοκιμές σε φυσική άμμο M31	AD-300-2, AD-300-3, AD-300-4, AD-1000-1	

**Πίνακας 4.1.**

Ο Πίνακας 4.1. περιέχει κάθε δοκιμή και τον κωδικό της. Ο κωδικός A-300-4 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή μη σταθεροποιημένης, καθαρής άμμου M31, με αρχική ισότροπη ενεργό τάση  $p_i'=300$  kPa και με αριθμό δοκιμής 4. Ο κωδικός B-300-4 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή μη σταθεροποιημένης, ιλυώδους άμμου, με αρχική ισότροπη ενεργό τάση  $p_i'=300$  kPa και με αριθμό δοκιμής 5. Οι κωδικοί SA6 και SA10 αφορούν τα πειράματα που εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένα εδαφικά δοκίμια άμμου με ποσοστό πυριτίας CS=6 και 10% αντίστοιχα. Ομοίως για τους κωδικούς SB6 και SB10 που αναφέρονται στη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο. Τέλος, ο κωδικός AD αναφέρεται στις στραγγιζόμενες δοκιμές σε άμμο.

#### 4.2.1 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική άμμο M31

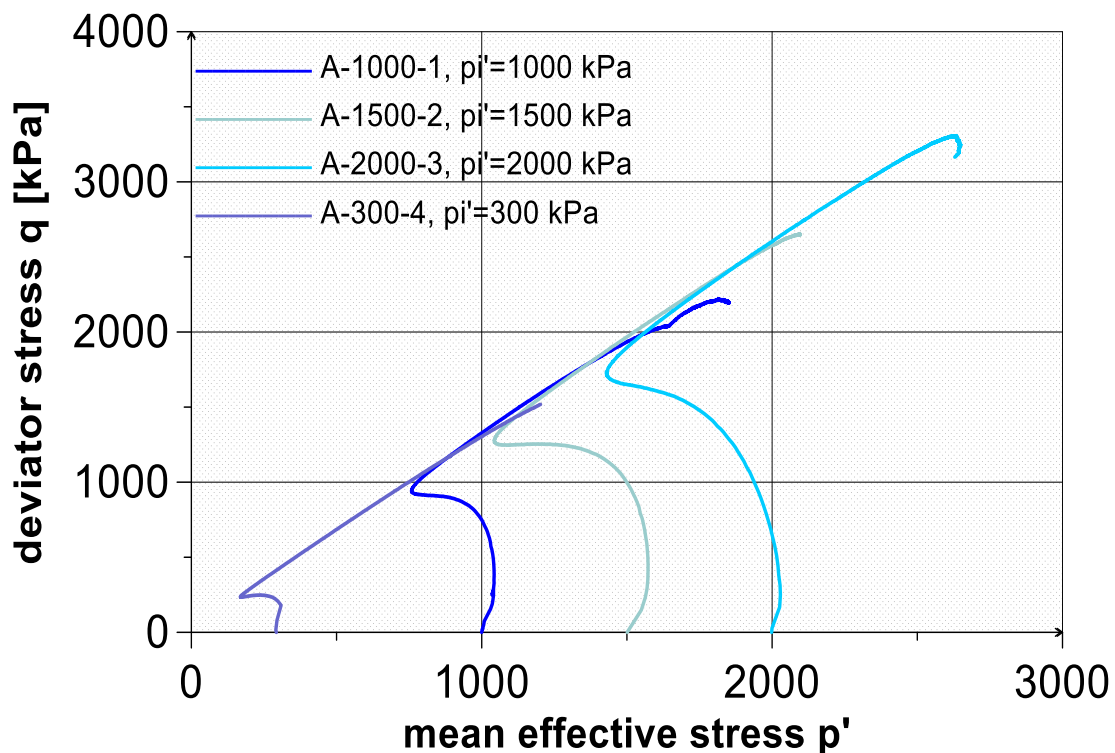
Η πρώτη κατηγορία πειραμάτων περιλαμβάνει τα δοκίμια καθαρής άμμου M31 τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ενεργές τάσεις  $p_i' = 1000, 1500, 2000$  και  $300$  kPa και στη συνέχεια ακολούθησε περίοδος ηρεμίας 1.5 ώρας. Η περίοδος ηρεμίας επιλέχθηκε τόσο εκτενής, ώστε να είναι συγκρίσιμη με τη χρονική διάρκεια στράγγισης του νερού από τους πόρους των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Οι σχετικές πυκνότητες που προέκυψαν ανήκουν στο εύρος  $D_r = 30-40\%$ . Τα διαγράμματα στερεοποίησης  $e-\log p'$  των δοκιμών φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.2. Παρατηρείται τυπική συμπεριφορά άμμου με παράλληλες τις ευθείες στην ημιλογαριθμική κλίμακα.



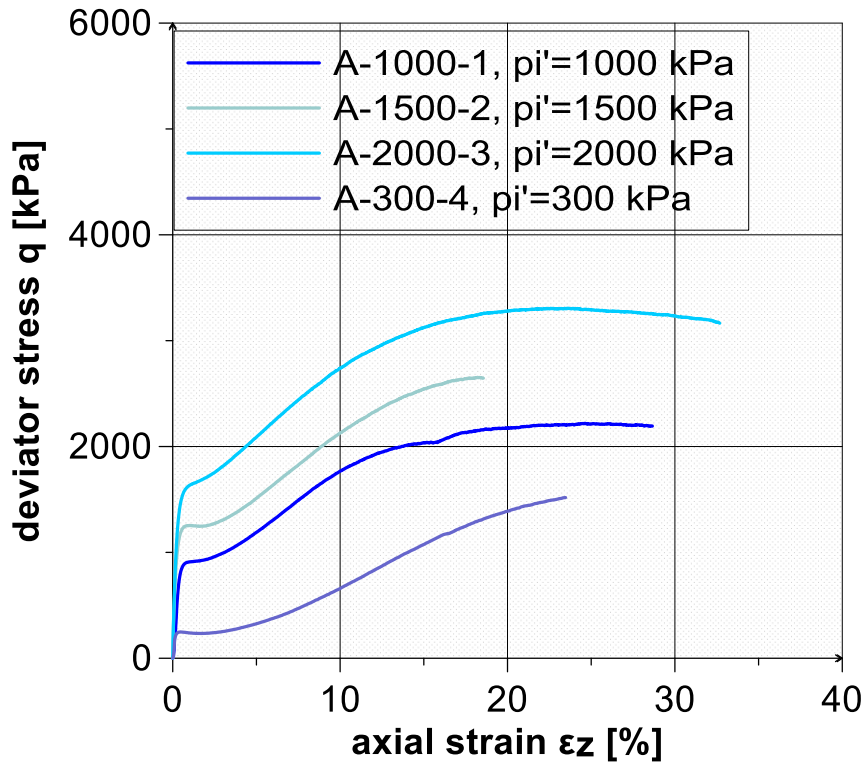
Σχήμα 4.2. Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης  $e-p'$  άμμου M31

Αφότου 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 διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.3. Η συστολική συμπεριφορά της άμμου είναι εντονότερη όσο η αρχική ενεργός τάση αυξάνεται. Σε όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων η άμμος εμφανίζει αλλαγή φάσης και στη συνέχεια τάση για διαστολή κατά μήκος μιας κοινής περιβάλλουσας αστοχίας. Η γωνία αλλαγής φάσης βρέθηκε

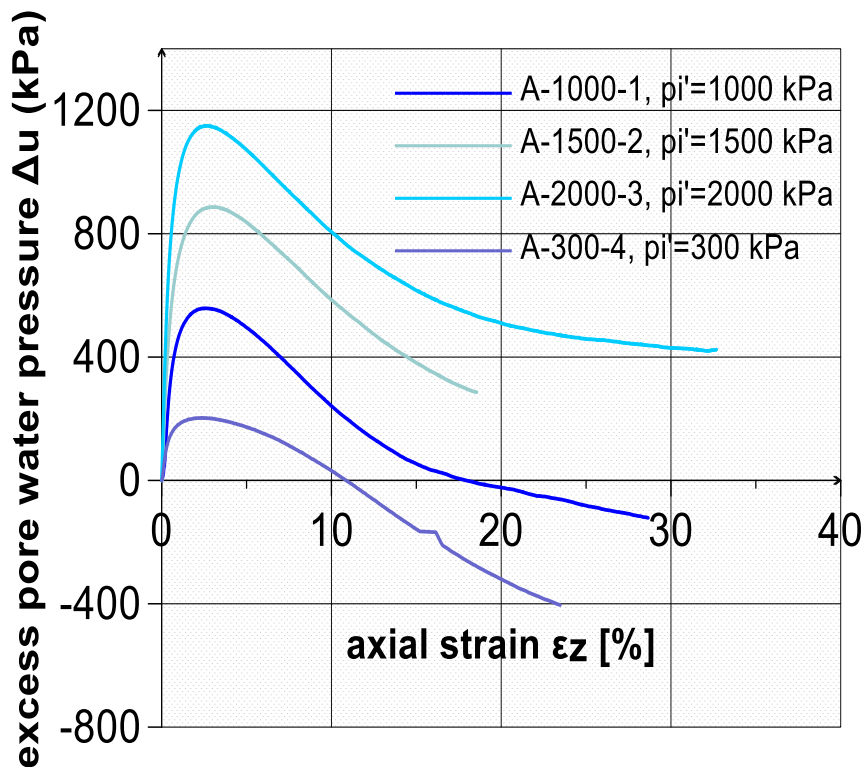
$\phi'_{PTL}=31^\circ$  ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής  $\phi' = 33^\circ$ . Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων  $q$ - $\varepsilon_z$ . Στις υψηλές ενεργές τάσεις περίσφιγξης (1000, 1500 και 2000 kPa) η άμμος φαίνεται να εγκαταλείπει τη διαστολική συμπεριφορά για αξονικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 20% και να σταθεροποιεί την αποκλίνουσα τάση  $q$ . Αντίθετα, για τη χαμηλή ενεργό τάση 300 kPa η άμμος παραμένει εντόνως διαστολική και στις υψηλές αξονικές παραμορφώσεις. Οι υπερπίεσεις του ύδατος των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση παραθέτονται στο Σχήμα 4.5. Επισημαίνεται ότι η αλλαγή φάσης εμφανίζεται περίπου σε αξονική παραμόρφωση 2-3% για όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων εγκιβωτισμού, ενώ η διαστολική συμπεριφορά της άμμου διακόπτεται στην περίπτωση των υψηλών τάσεων, καθώς οι καμπύλες υπερπίεσης τείνουν να οριζοντιωθούν. Αντίθετα, στην περίπτωση της χαμηλής τάσης η καμπύλη υπερπίεσης δείχνει έναν φθίνοντα κλάδο που συνεχίζει και στα υψηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Παρατηρούμε ότι, σε καμία περίπτωση δεν προέκυψε εμφανής συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων σε επίπεδο. Η αστοχία εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (bulging) που προσδίδει στο δοκίμιο μορφή βαρελιού όπως διαφαίνεται και στο Σχήμα 4.6. Σημειώνεται ότι ο οπτικός έλεγχος των δοκιμών έγινε μετά το πέρας των δοκιμών, αφού η κυψέλη έχει αδιαφανές περιβλήμα.



Σχήμα 4.3. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  άμμου M31



Σχήμα 4.4. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  άμμου M31



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα υπερπίεσης ύδατος πόρων - αξονικών παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  άμμου M31



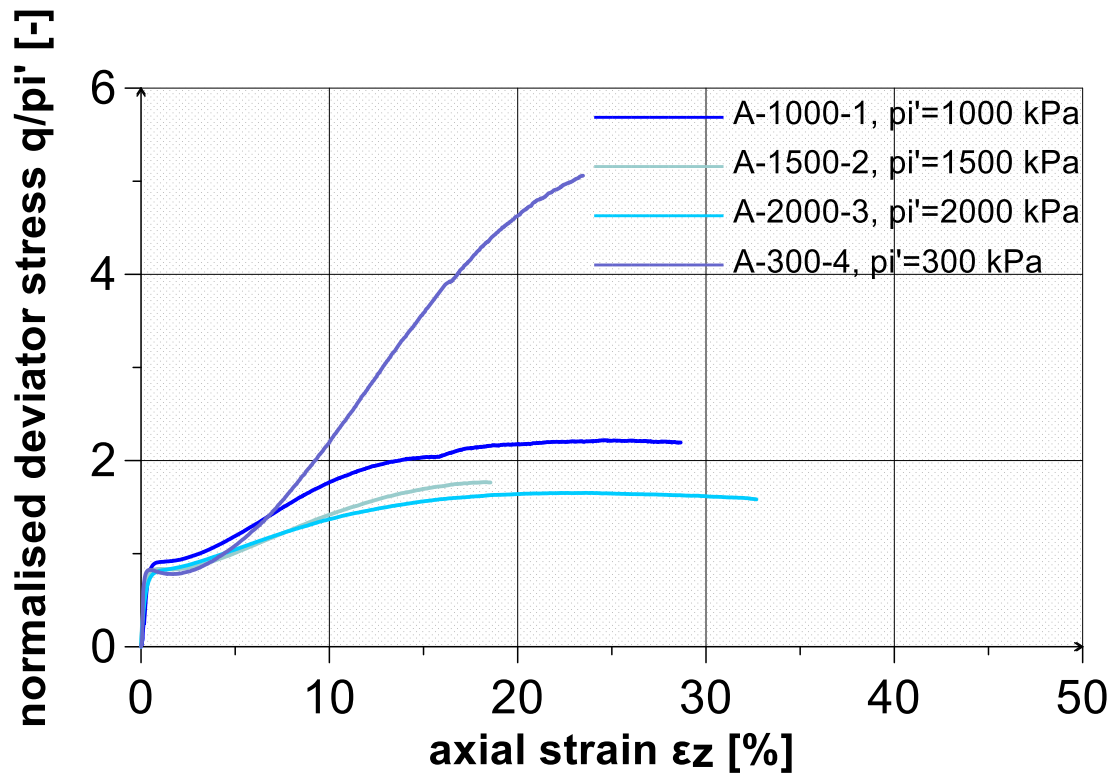
**Σχήμα 4.6.** Αστοχία δοκιμίου που εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (*bulging*)

Για να διαπιστώσουμε την επιρροή του παράγοντα της αρχικής ενεργού τάσης, τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων και υπερπιέσεων ύδατος πόρων – παραμορφώσεων κανονικοποιήθηκαν ως προς την αρχική ενεργό τάση και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7 και 4.8 αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι, οι κανονικοποιημένες καμπύλες  $q/p_i' - \epsilon_z$  στις υψηλές ενεργές τάσεις 1500 και 2000 kPa ταυτίζονται, ενώ η καμπύλη των 1000 kPa υπερέχει ελαφρώς, γεγονός που ίσως οφείλεται στην πυκνότερη δομή της άμμου. Παραθέτουμε στον Πίνακα 4.1. τις τιμές της σχετικής πυκνότητας και της αρχικής ενεργού τάσης των δοκιμίων:

Πίνακας Σχετικών Πυκνοτήτων δοκιμίων		
Κωδικός πειράματος	Αρχική Ενεργός Τάση	Σχετική Πυκνότητα
A-300-4	$p_i'=300\text{kPa}$	$D_r=40\%$
A-1000-1	$p_i'=1000\text{kPa}$	$D_r=40\%$
A-1500-2	$p_i'=1500\text{kPa}$	$D_r=30\%$
A-2000-3	$p_i'=2000\text{kPa}$	$D_r=30\%$

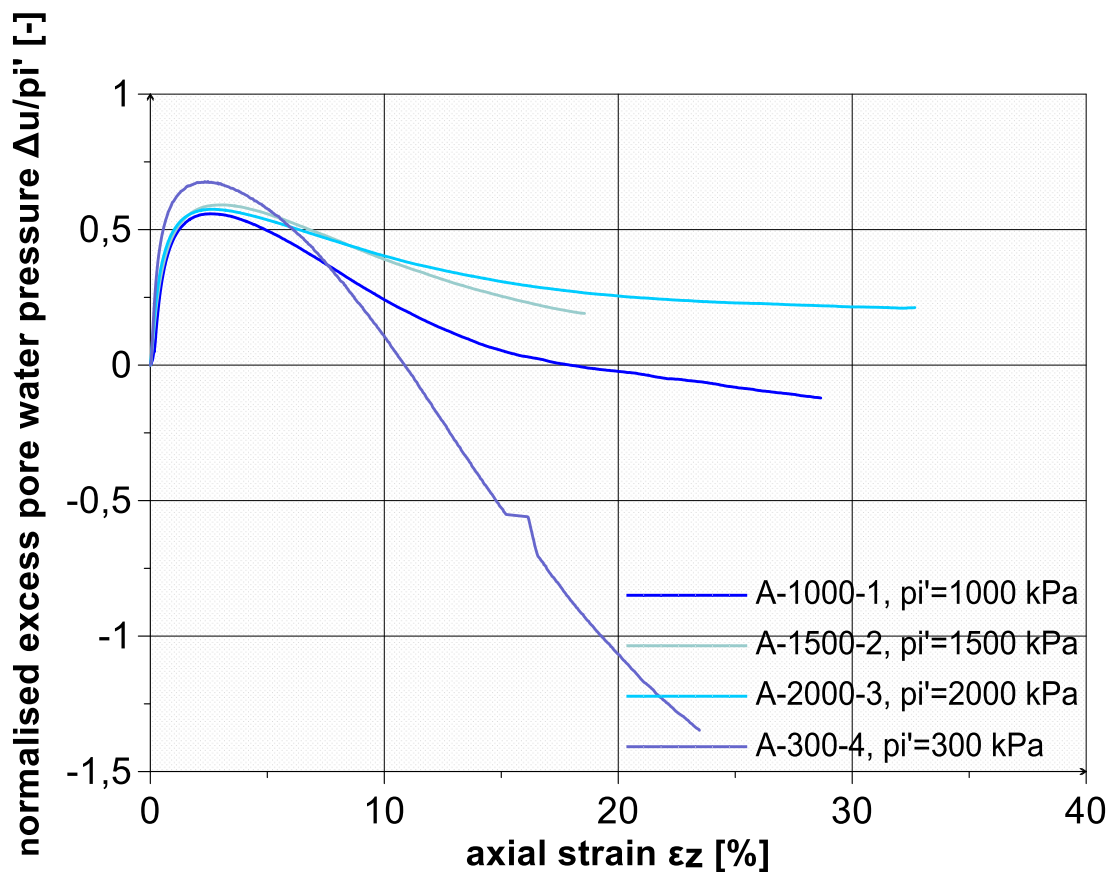
**Πίνακας 4.1.**

Η κανονικοποιημένη καμπύλη της ενεργού τάσης 300 kPa διαχωρίζεται από τις υπόλοιπες για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%, καθώς το δοκίμιο αυτό ήταν εντόνως διαστολικό μέχρι τα υψηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Η κανονικοποιημένη τιμή  $q/p_i'$  για αξονική παραμόρφωση 5% κυμαίνεται από 1.0 έως 1.1 για όλα τα επίπεδα τάσεων. Όσον αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες  $\Delta u/p_i' - \varepsilon_z$ , δείχνουν σύγκλιση για τις ενεργές τάσεις 1500 και 2000 kPa, η καμπύλη των 1000 kPa αποκλίνει ελαφρώς προς εντονότερη διαστολή λόγω υψηλότερης πυκνότητας, ενώ η καμπύλη των 300 kPa διαχωρίζεται αισθητά λόγω της έντονης διαστολικότητας, η οποία εκδηλώνεται στις χαμηλότερες τάσεις περίσφιξης.



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων – παραμορφώσεων  $q/p_i' - \varepsilon_z$  άμμου M31





*Σχήμα 4.8. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπίεσεων ύδατος πόρων - παραμορφώσεων  $\Delta u - \epsilon_z$  άμμου M31*

#### 4.2.2 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη άμμο M31

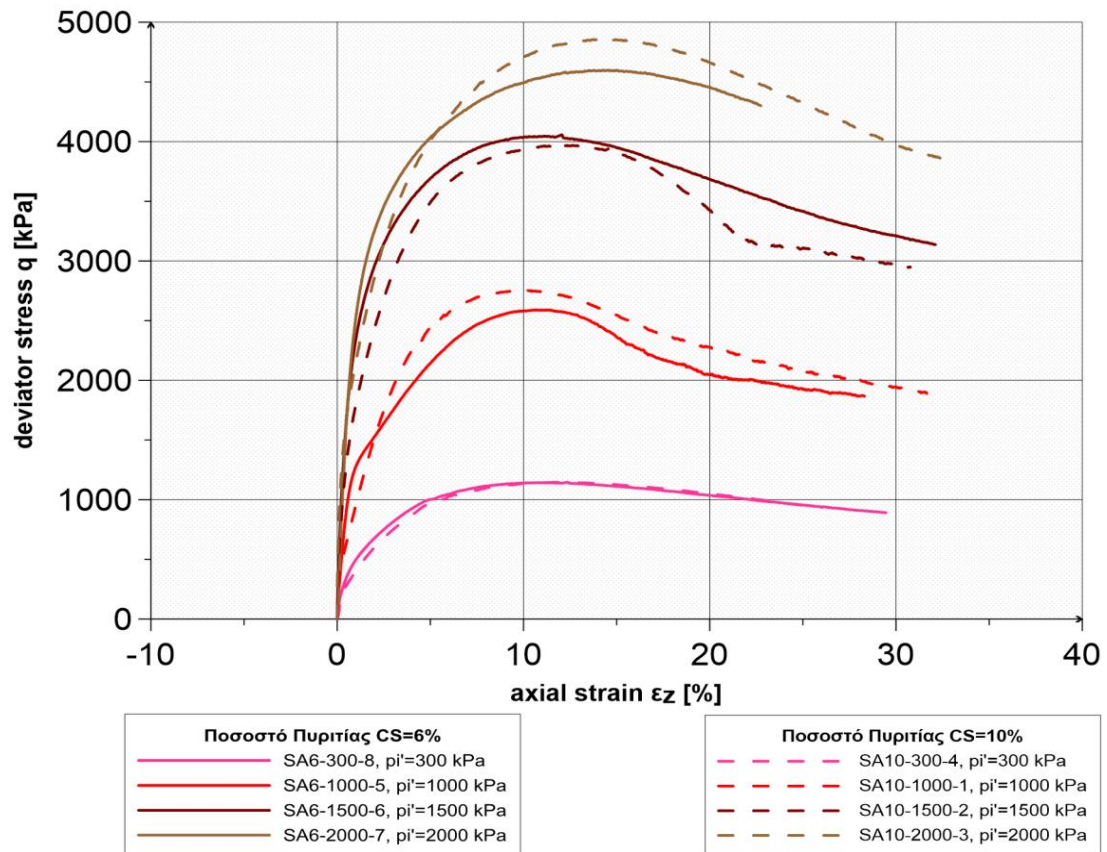
Στη δεύτερη κατηγορία πειραμάτων ανήκουν τα δοκίμια άμμου M31 που έχουν σταθεροποιηθεί με κολλοειδή πυριτίδα σε ποσοστά 6 και 10% κατά βάρος και είναι ηλικίας 55 και 50 ωρών, αντίστοιχα. Τα δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της ωρίμανσης μεταφέρθηκαν από τα καλούπια στην τριαξονική συσκευή. Ακολούθησε η ισότροπη στερεοποίηση τους η οποία έγινε με μέτρηση της πίεσης πόρων (με χρήση εξωτερικού μετρητή στη γραμμή αμέσως μετά τη βάση του δοκιμίου), αλλά χωρίς μέτρηση της μεταβολής όγκου, καθώς υπήρχε ο κίνδυνος εκτεταμένης κυκλοφορίας του κολλοειδούς ρευστού στις σωληνώσεις της συσκευής (απομακρυσμένος ο μετρητής μεταβολής όγκου). Τα δοκίμια κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης αφέθηκαν να στραγγίζουν, μέσω δεύτερης σωλήνωσης στη βάση του δοκιμίου, σε δεξαμενή πληρωμένη με νερό η οποία επέβαλε υδροστατική πίεση περίπου 10 kPa.

Μετά την αύξηση της πίεσης της κυψέλης στα επίπεδα τάσεων 1000, 1500, 2000 και 300 kPa ακολούθησε περίοδος στράγγισης τουλάχιστον 1.5 ώρας.

Η στράγγιση του νερού μέσα από τους πόρους της πυριτίας είναι μια αργή διαδικασία και για να εξακριβωθεί αν έχει ολοκληρωθεί, εκτελέστηκε ο εξής έλεγχος. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα διακόπτεται η στράγγιση με κλείσιμο της βάνας εκροής. Το νερό μέσα στους πόρους της πυριτίας βρίσκεται υπό πίεση και τείνει να εκτονωθεί προς το νερό που πληρώνει τις σωληνώσεις μέχρι τον μετρητή πίεσης. Η εκτόνωση δε γίνεται ακαριαία διότι η υγρή φάση της γέλης αλληλεπιδρά με τη στερεή. Η πίεση που μετράται εκτός δοκιμίου αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό μέχρι να σταθεροποιηθεί σε ένα πλατό, που εκφράζει την πίεση ισορροπίας των δύο συγκοινωνούντων δοχείων. Η πίεση ισορροπίας έχει επέλθει ύστερα από μεταφορά μικροποσότητας υγρής μάζας από το ένα δοχείο (πορώδες σταθεροποιημένου δοκιμίου) στο άλλο (νερό σωληνώσεων μέχρι τον μετρητή). Ανοίγοντας τη βάνα εκροής μία ποσότητα πεπιεσμένου νερού εκρέει από τους πόρους της γέλης και του εδάφους και το φορτίο του μεταβιβάζεται στη στερεή φάση. Κάθε επόμενη φορά που κλείνει η βάνα εκροής η τιμή του ρυθμού ανάπτυξης της πίεσης και του πλατό ισορροπίας είναι μικρότερη, υποδηλώνοντας ότι μεγαλύτερος όγκος νερού έχει απομακρυνθεί από τους πόρους της γέλης και η παγιδευμένη πίεση έχει μερικώς εκτονωθεί. Όταν η τιμές των δύο αυτών μεγεθών γίνουν αρκετά μικρές θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου δοκιμίου. Επισημαίνεται ότι η καθαρή, φυσική άμμος αποβάλλει ταχύτατα το νερό από τους πόρους της, όταν αυξάνεται η πίεση περίσφιγξης. 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 διαφασικό 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.

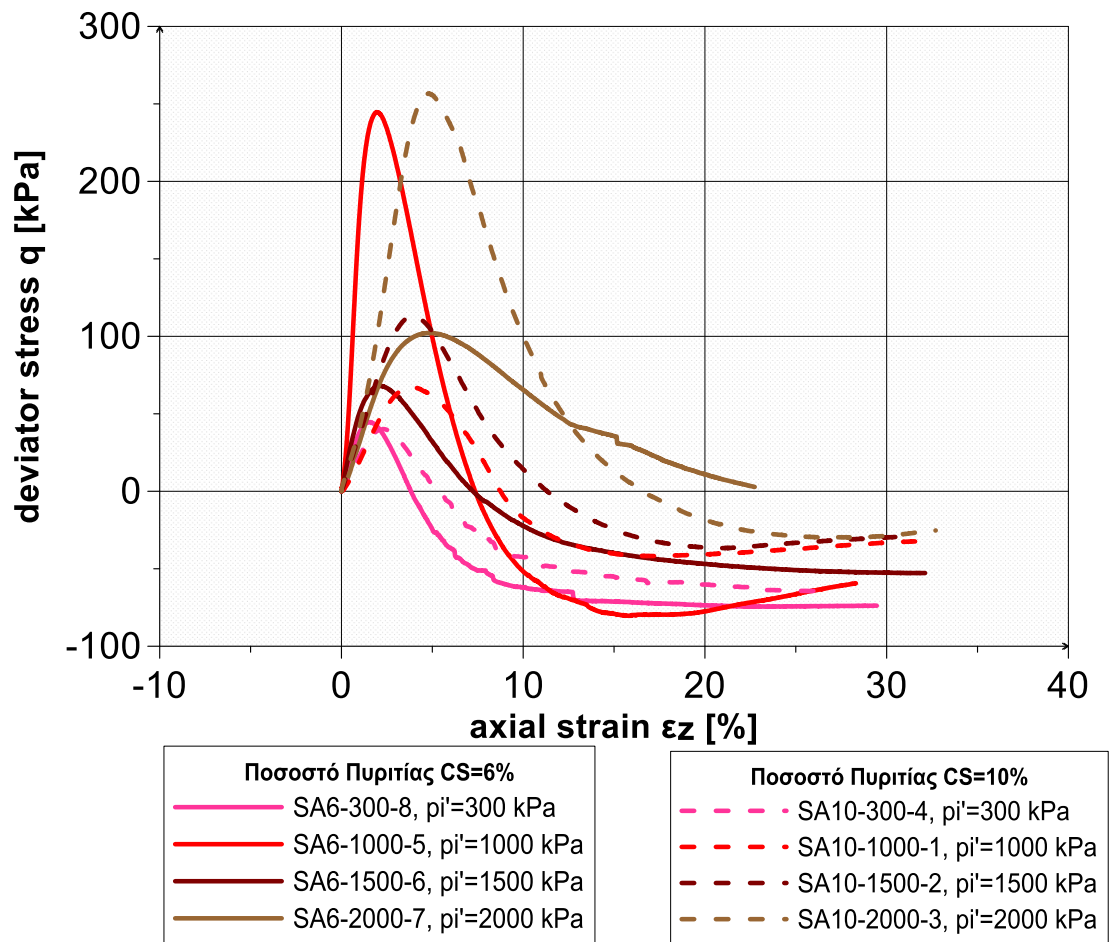
Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου M31 υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων  $q - \epsilon_z$  για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστά πυριτίας CS=6% & CS=10%. 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 και για τα δύο ποσοστά σταθεροποιητή, η αποκλίνουσα τάση μεγιστοποιείται και παραμένει σταθερή στο εύρος των αξονικών παραμορφώσεων 8-12% και στη συνέχεια ακολουθεί μία ομαλή μείωση προς μία παραμένουσα τιμή. Επισημαίνουμε ότι στα περισσότερα σταθεροποιημένα δοκίμια προέκυψε συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων σε επίπεδο (shear band). Η

συγκέντρωση του σταθεροποιητή, ποσοστό CS δε φαίνεται να μεταβάλλει έντονα τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών.



**Σχήμα 4.9.** Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 & 10%).

Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζονται συγκεντρωτικά, για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 με ποσοστά πυριτίας CS=6% & CS=10%, οι υπερπίεσεις του υγρού των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι, η σταθεροποιημένη άμμος M31 παρουσιάζει πρώτα συστολική και ύστερα διαστολική συμπεριφορά και υπάρχει μεγάλη διακύμανση στην τιμή της αξονικής παραμόρφωσης που οριοθετεί την έναρξη της διαστολής (2-5%). Σημαντικό είναι να επισημάνουμε ότι σε κάθε περίπτωση οι υπερπίεσεις ύδατος πόρων που αναπτύσσονται στα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου είναι πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται στα δοκίμια φυσικής άμμου. Προσπαθώντας να ερμηνεύσουμε αυτή τη συμπεριφορά καταλήγουμε στα παρακάτω: Αρχικά, εξαιτίας της συμπίεσής που χαρακτηρίζει την κορεσμένη γέλη κολλοειδούς πυριτίας, κατά τη διάτμηση του σταθεροποιημένου εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες η γέλη μειώνει τον όγκο της και αναπτύσσει μικρότερη πίεση, σε σχέση με το φυσικό έδαφος που έχει νερό στους πόρους του. Έχοντας διαπιστώσει πως η κορεσμένη γέλη είναι ένα διασπαστικό υλικό που αποτελείται από τον πρακτικά ασυμπίεστο στερεό σκελετό σωματιδίων πυριτίας και από το πρακτικά ασυμπίεστο νερό που συγκρατείται στους πόρους της, συμπεραίνουμε ότι το σύνολο της είναι πρακτικά ασυμπίεστο υπό αστράγγιστες συνθήκες. Κάθε σημαντική μεταβολή όγκου της γέλης συνοδεύεται από εκροή ή εισροή νερού μέσα στους πόρους της. Έπειτα, η ανάπτυξη μικρότερης πίεσης στο νερό των πόρων του σταθεροποιημένου εδάφους ίσως οφείλεται στην πιθανότητα να υφίσταται κακός κορεσμός στο δοκίμιο αλλά και στις σωληνώσεις. Επειδή όμως έχουμε υψηλή τιμή της παραμέτρου B, που υποδηλώνει καλό κορεσμό η εξήγηση που απομένει είναι ότι η πίεση μέσα στους πόρους της γέλης είναι υψηλή αλλά δεν εκδηλώνεται στον μετρητή πίεσης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ρυθμός διάτμησης είναι γρήγορος ώστε να προστατευτεί η συσκευή από την κυκλοφορία της κολλοειδούς ουσίας. Το στερεό σκελετικό δίκτυο της πυριτίας είναι σχετικά άθικτο στην αρχή της διάτμησης και καλύπτει τους πόρους του εδάφους δυσκολεύοντας την κίνηση του νερού. Όταν η αντί - πίεση που καταγράφεται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη στο φυσικό, αυτό υποδηλώνει ότι το στερεό σκελετικό δίκτυο της πυριτίας είναι υγιές και καλύπτει σχεδόν ομοιόμορφα όλο τον χώρο που υπάρχει στους πόρους μεταξύ των κόκκων. Αντίθετα, όταν αυτή είναι συγκρίσιμη με την πίεση πόρων του φυσικού δοκιμίου, αυτό δείχνει ότι το στερεό σκελετικό δίκτυο της γέλης έχει τραυματιστεί εκτεταμένα ή δεν αναπτύσσεται σε όλο το εδαφικό πορώδες. Αναφέρεται ότι, η λεπτόκοκκη ιλύς μέσω κάποιου μηχανισμού πυρηνοποίησης συγκεντρώνει γύρω της πολλά σωματίδια πυριτίας που συνδέονται σε αλυσίδες κατά τον σχηματισμό της γέλης με συνέπεια το δίκτυο των πυριτικών ινών να μην κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εδαφικό υλικό. Παρατηρήσαμε ότι η συμπεριφορά αρκετών δοκιμίων σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου προσομοιάζει αυτή της φυσικής ιλυώδους άμμου, ίσως λόγω της προαναφερθείσας επιλεκτικής συγκέντρωσης των σωματιδίων πυριτίας γύρω από το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό. Η αύξηση της αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους δεν εξαρτάται από τις μειωμένες πιέσεις στο νερό των πόρων της γέλης αλλά υποθέτουμε ότι οφείλεται στην αλληλεπίδραση της στερεάς φάσης της πυριτίας με τη στερεά εδαφική φάση. Εξάλλου, έχουμε τονίσει ότι η γέλη αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό κατά μάζα και κατ' όγκο από νερό και δεν υφίσταται κάποια λογική αιτία ώστε να μην αναπτύσσει μεγάλη πίεση στους πόρους της.

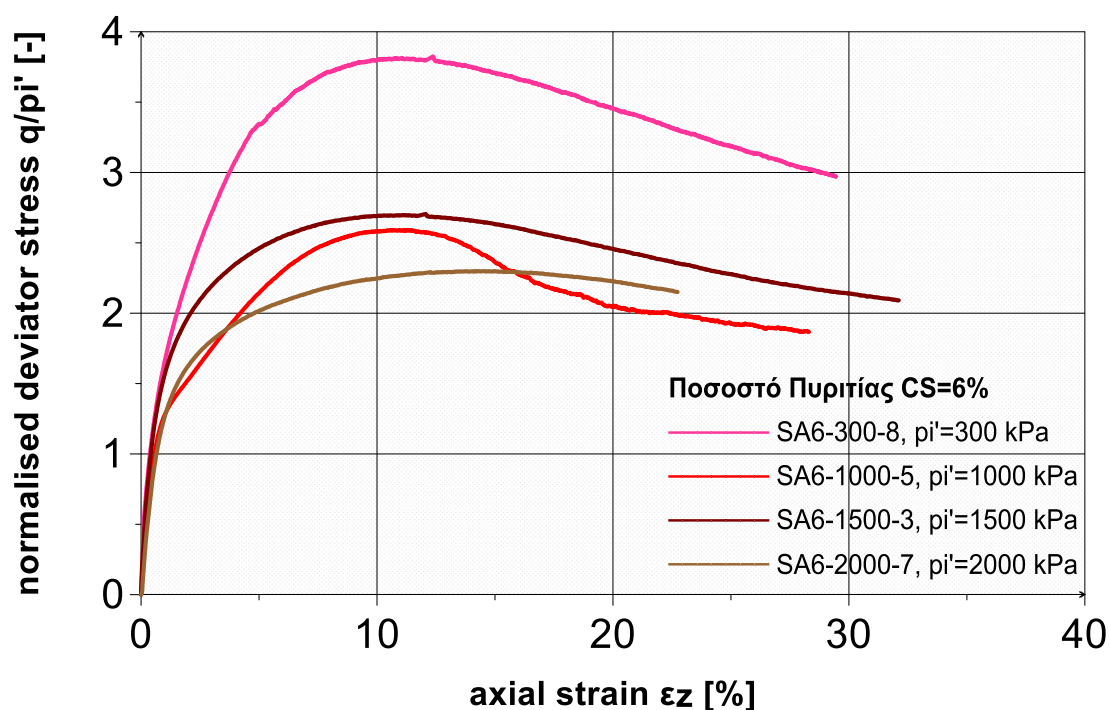


Σχήμα 4.10. Διάγραμμα υπερπίεσης υγρού των πόρων-αξονικών παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 & 10%).

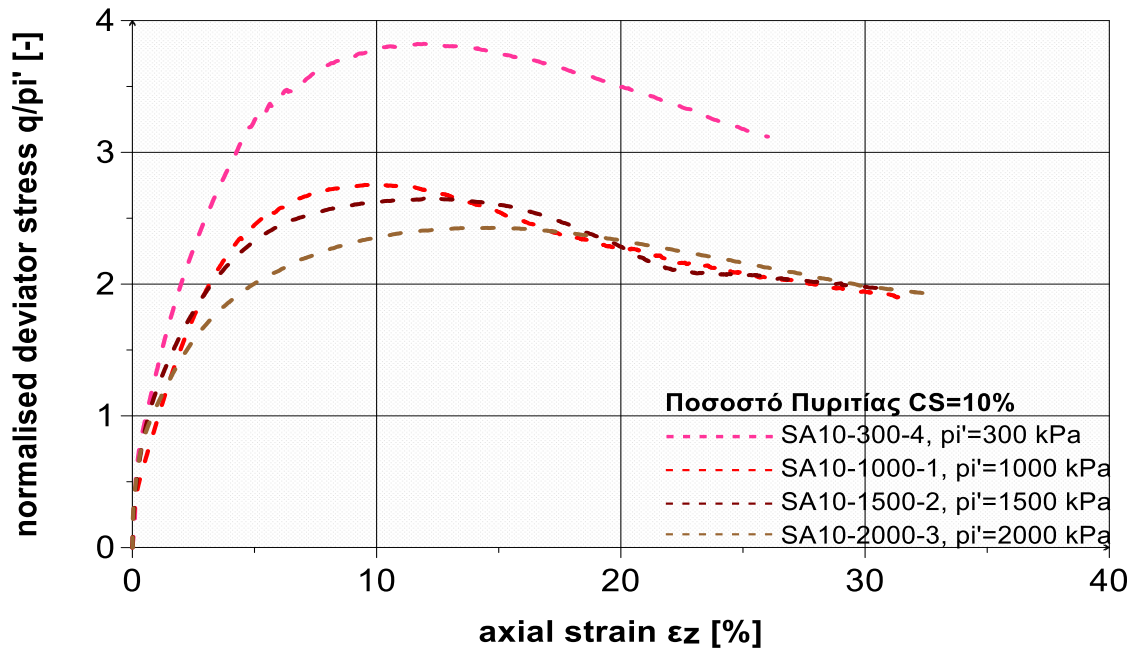
Στα Σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ολική τάση εγκιβωτισμού καμπύλες  $q/p_i' - \epsilon_z$  για τα σταθεροποιημένα δοκίμια M31 (6% CS) και M31 (10% CS) αντίστοιχα. Στις υψηλές τάσεις 1000, 1500 και 2000 kPa οι κανονικοποιημένες καμπύλες  $q/p_i' - \epsilon_z$  συγκλίνουν ικανοποιητικά σε μία δέσμη, ενώ για την τάση των 300 kPa η καμπύλη υπερέχει αισθητά. Αυτό οφείλεται στην περισσότερο διαστολική συμπεριφορά λόγω χαμηλότερης περίσφιγξης και ίσως να οφείλεται επίσης στον τραυματισμό των δεσμών του σταθεροποιητή στις υψηλές τάσεις στερεοποίησης. Παρατηρούμε επίσης, ότι σε πολύ υψηλές παραμορφώσεις (>20%) οι κανονικοποιημένες καμπύλες της σταθεροποιημένης άμμου (στα επίπεδα υψηλών τάσεων) τείνουν στην τιμή 2.0, ενώ της φυσικής άμμου στην τιμή 1.8. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, καθώς οι δεσμοί του σταθεροποιητή καταστρέφονται με την προοδευτική αύξηση των παραμορφώσεων, η παραμένουσα αντοχή των σταθεροποιημένων εδαφών είναι ελαφρώς βελτιωμένη προσεγγίζοντας

όμως την αντοχή των φυσικών εδαφών. Επιπλέον, επειδή τα σταθεροποιημένα δοκίμια στα περισσότερα πειράματα είχαν χαμηλή αρχική πίεση στο νερό των πόρων, εμφάνισαν μικρότερες αναρροφητικές πιέσεις σε σύγκριση με τα φυσικά δοκίμια, κατά τη φάση της διαστολής.

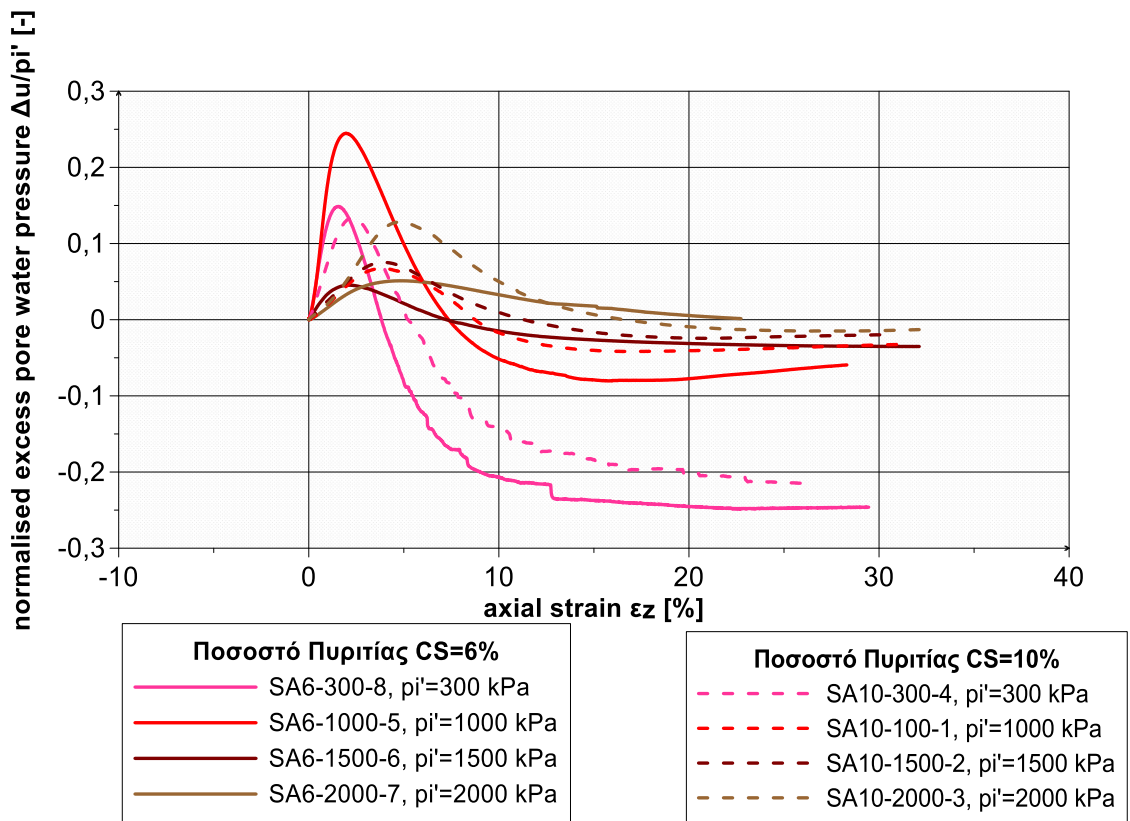
Συγκρίνοντας τα κανονικοποιημένα διαγράμματα της αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο M31, προκύπτει ότι η σταθεροποιημένη άμμος υπερέχει αισθητά δίνοντας στις ίδιες παραμορφώσεις μεγαλύτερες τάσεις. Για παράδειγμα σε παραμόρφωση 5% η κανονικοποιημένη τιμή  $q/p_i'$  της φυσικής άμμου κυμαίνεται από 1.0 έως 1.1, ενώ της σταθεροποιημένης άμμου από 2.0 έως 3.3.



*Σχήμα 4.11. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων  $q/p_i'$ - $\epsilon_z$  σταθεροποιημένης άμμου M31 (6% CS).*



*Σχήμα 4.12. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων  $q/\rho_i'$  -  $\epsilon_z$  σταθεροποιημένης άμμου M31 (10% CS).*



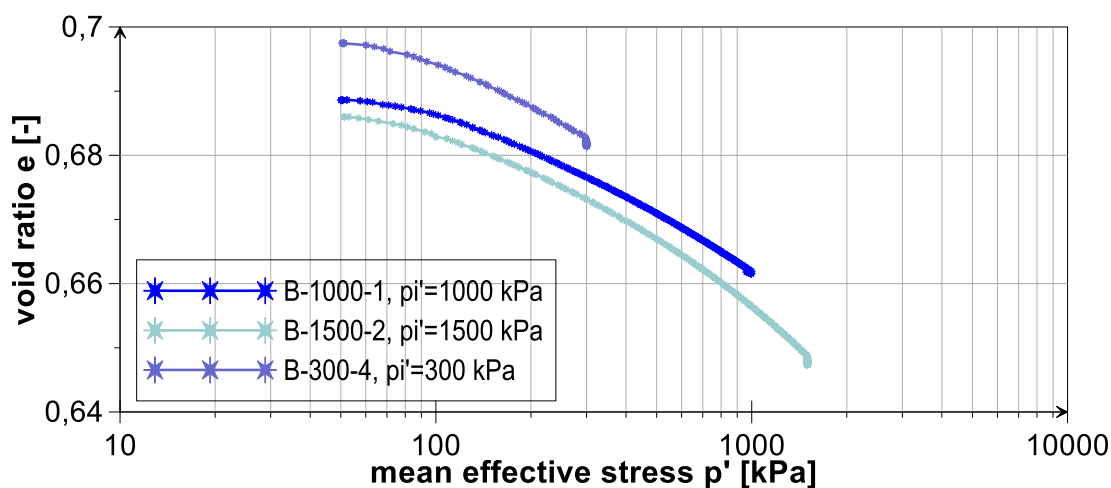
*Σχήμα 4.13. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπιέσεων ρευστού πόρων - παραμορφώσεων  $\Delta u/\rho_i'$  -  $\epsilon_z$  σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 και 10%).*

### 4.2.3 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική ιλυώδη άμμο M31 – D6

Για τη διεκπεραίωση της τρίτης κατηγορίας πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μίγματος 85% κατά βάρος άμμου M31 και 15% κατά βάρος ιλύος D6. Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης σε ενεργές τάσεις  $p_i'=1000, 1500, 2000$  και  $300$  kPa ακολούθησε περίοδος ηρεμίας 1.5 ώρας. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα στερεοποίησης  $e - \log p'$ . Οι σχετικές πυκνότητες που προέκυψαν ανήκουν στο εύρος  $D_r=20-30\%$  και παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας Σχετικών Πυκνοτήτων δοκιμίων		
Κωδικός πειράματος	Αρχική Ενεργός Τάση	Σχετική Πυκνότητα
B-300-4	$p_i'=300\text{kPa}$	$D_r=20\%$
B-1000-1	$p_i'=1000\text{kPa}$	$D_r=25\%$
B-1500-2	$p_i'=1500\text{kPa}$	$D_r=30\%$

Πίνακας 4.2.

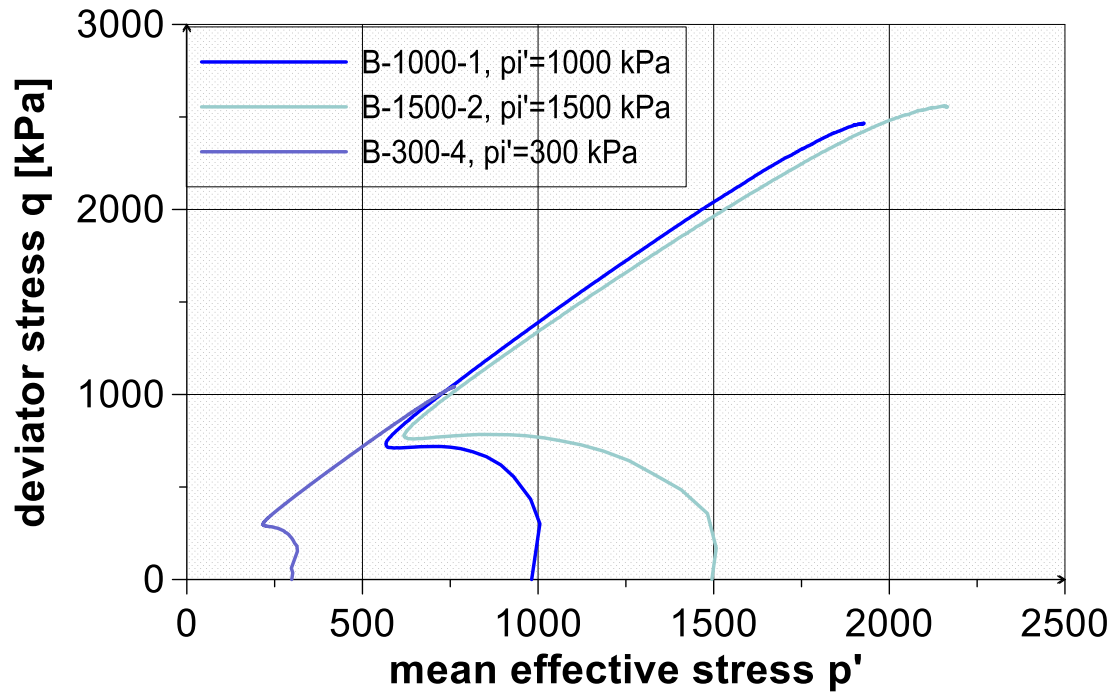


Σχήμα 4.14. Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης  $e-p'$  μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6.

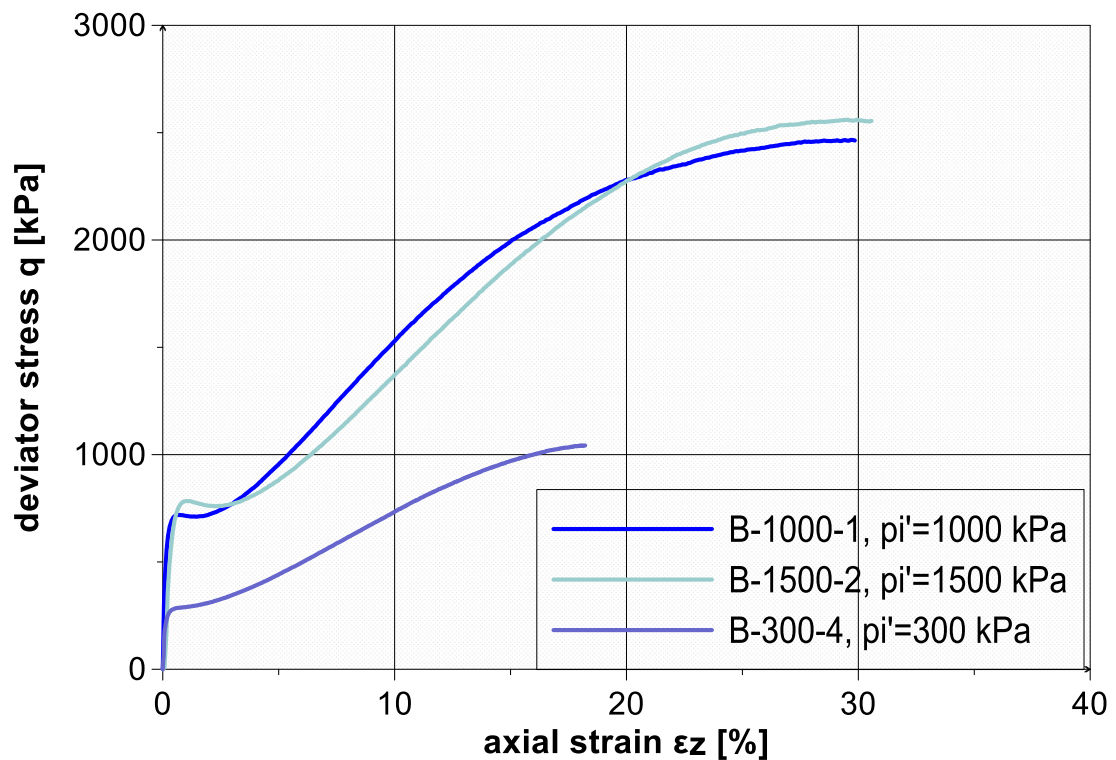


Στη συνέχεια, τα δοκίμια μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6 φορτίστηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα 4.15 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Παρατηρούμε ότι είναι πιο έντονη η συστολική συμπεριφορά του μίγματος σε σχέση με αυτή της καθαρής άμμου M31 καθώς και πιο τονισμένη στις υψηλές ενεργές τάσεις εγκιβωτισμού. Επιπλέον, σε όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων το μίγμα εμφανίζει αλλαγή φάσης και στη συνέχεια τάση για διαστολή κατά μήκος μιας κοινής περιβάλλουσας αστοχίας. Σημειώνεται ότι, η γωνία αλλαγής φάσης βρέθηκε  $\varphi'_{PTL}=33^{\circ}$ , ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής  $\varphi'=34^{\circ}$  διαπιστώνοντας ότι η περιβάλλουσα αστοχίας του μίγματος είναι ποιοτικώς ίδια με αυτήν της καθαρής άμμου. Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων  $q - \varepsilon_z$ . Διαπιστώνουμε ότι η διατμητική αντίσταση του μίγματος είναι υποδεέστερη της καθαρής άμμου εξαιτίας της εντονότερης συστολικής συμπεριφορά του μίγματος σε σύγκριση με την καθαρή άμμο καθώς και των συνεπαγόμενων μεγεθυμένων υπερπιέσεων πόρων.

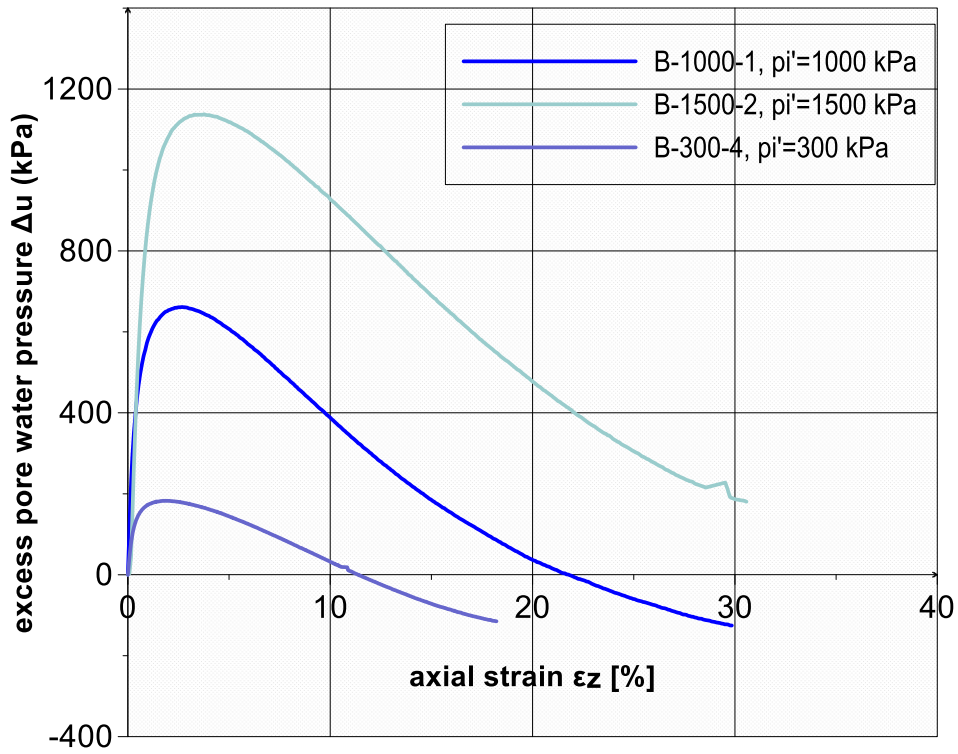
Τα δοκίμια μίγματος παραμένουν διαστολικά σε πιο προχωρημένες παραμορφώσεις από ότι η καθαρή άμμος. Σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 25% η αποκλίνουσα τάση  $q$  σταθεροποιείται. Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με ενεργό τάση εγκιβωτισμού 1000 και 1500 kPa δεν αστόχησαν με εμφάνιση επιπέδου, ενώ το δοκίμιο των 300 kPa εμφάνισε επίπεδο. Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζονται οι υπερπιέσεις του ύδατος των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση  $\Delta u - \varepsilon_z$ . Παρατηρούμε ότι οι υπερπιέσεις είναι σαφώς μεγεθυμένες κατά τη συστολή σε σχέση με τις αντίστοιχες της καθαρής άμμου και αργούν να σταθεροποιηθούν. Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων  $q/p_i' - \varepsilon_z$  και στο και Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα τάσεων υπερπιέσεων - παραμορφώσεων  $\Delta u/p_i' - \varepsilon_z$ . Ενδιαφέρον είναι ότι οι κανονικοποιημένες καμπύλες δεν συγκλίνουν καθώς η συστολική συμπεριφορά ενισχύεται δυσανάλογα με την αύξηση της ενεργού τάσης.



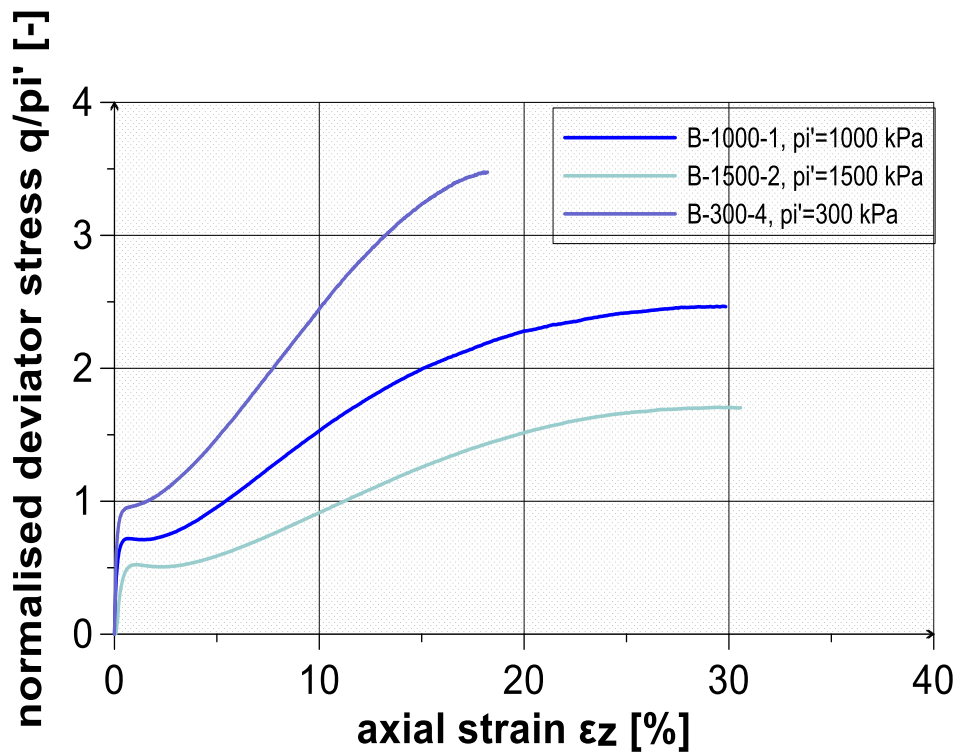
Σχήμα 4.15. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q$ - $p'$  μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6.



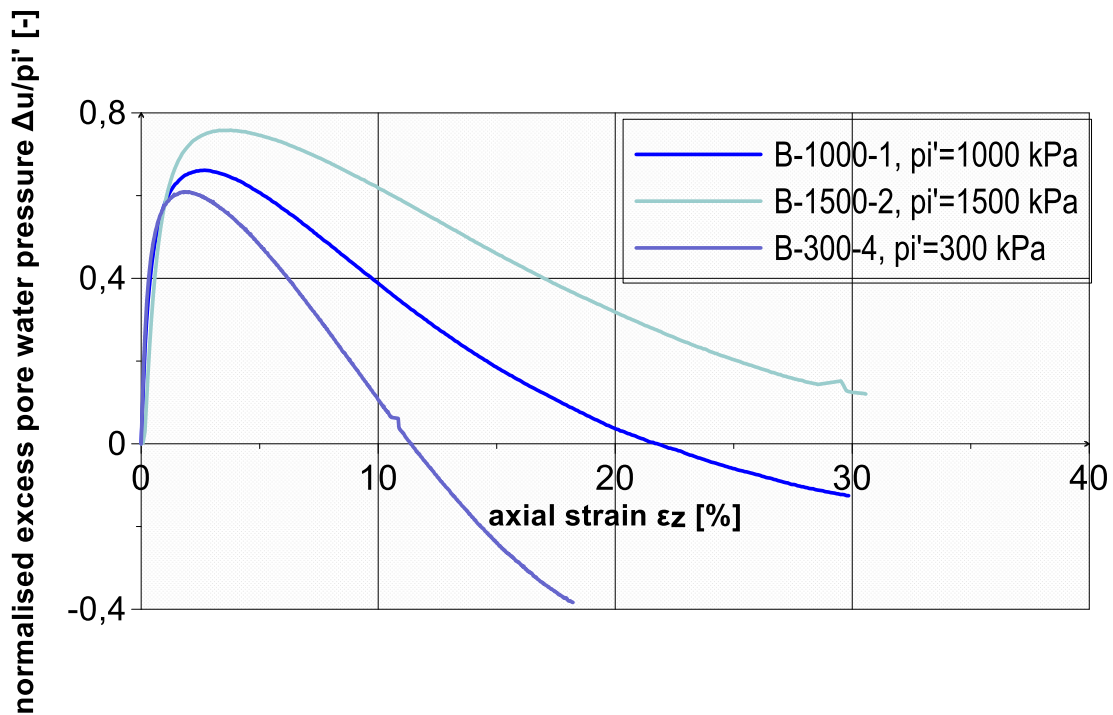
Σχήμα 4.16. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6.



Σχήμα 4.17. Διάγραμμα υπερπίεσης ύδατος πόρων - αξονικών παραμορφώσεων  $\Delta u - \epsilon_z$  μίγματος άμμου M31-ιλύος D6.



Σχήμα 4.18. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων  $q/p_i' - \epsilon_z$  μίγματος άμμου M31-ιλύος D6.



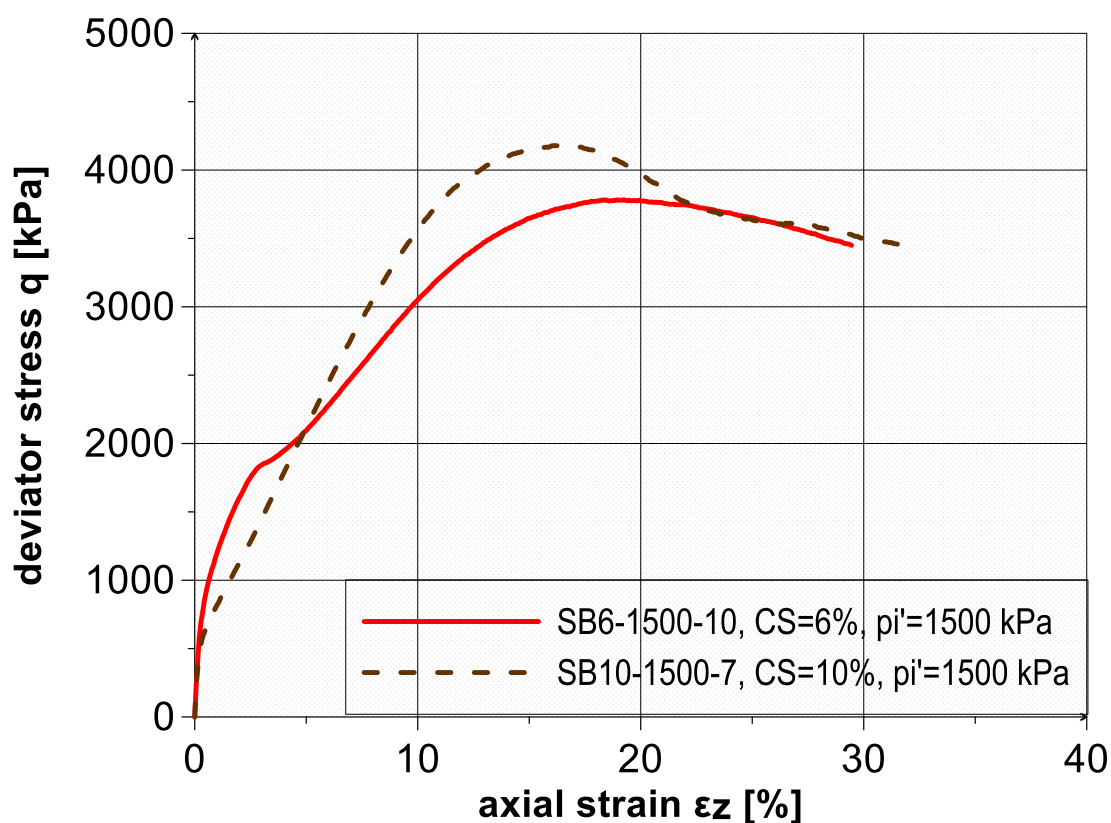
*Σχήμα 4.19. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπίεσεων ύδατος πόρων - παραμορφώσεων  $\Delta u/\rho_i' - \epsilon_z$  μίγματος άμμου M31-ιλύος D6.*

#### 4.2.4 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο M31 – D6

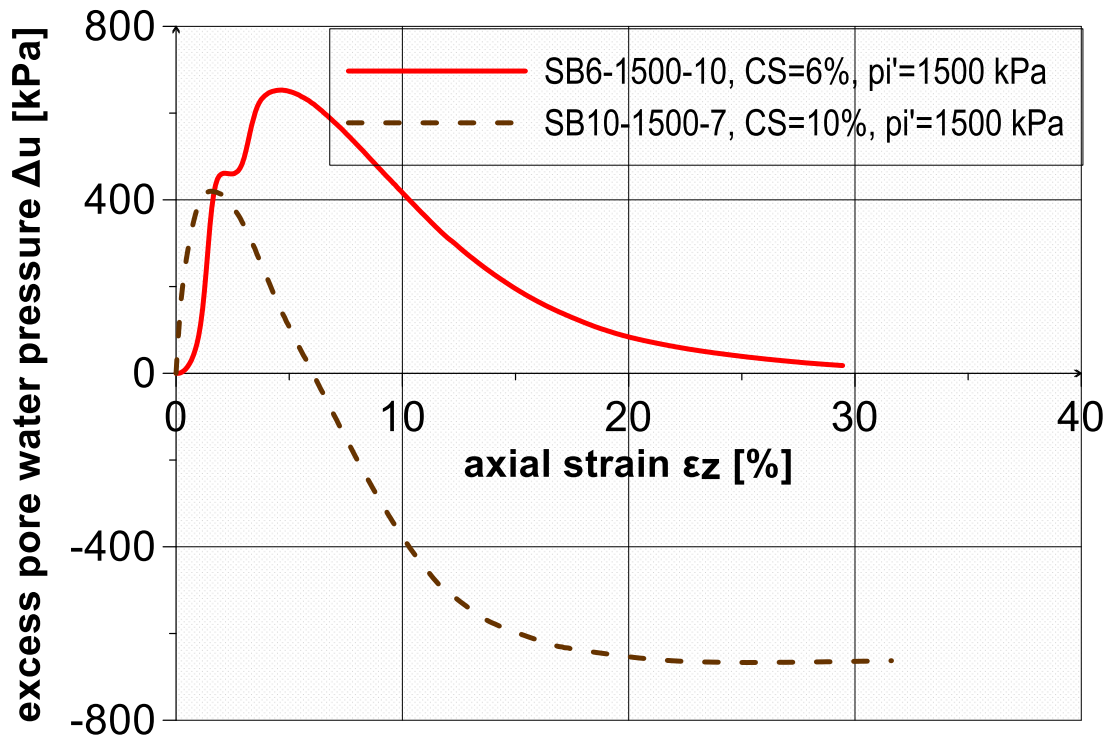
Για τη διεκπεραίωση της τρίτης κατηγορίας πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μίγματος 85% κατά βάρος άμμου M31 και 15% w.t ιλύος D6 σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία (CS=6 και 10%). Τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε τάσεις 1000 kPa και 1500 kPa με την ίδια διαδικασία στερεοποίησης με τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου.

Αφότου ολοκληρώθηκε το στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια του σταθεροποιημένου μίγματος υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων  $q - \epsilon_z$  για τα δοκίμια με ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας CS=6 και 10% με τάση ισότροπης στερεοποίησης  $\rho_i'=1500$  kPa. Παρατηρούμε ότι η διατμητική αντίσταση του σταθεροποιημένου εδάφους είναι σαφώς μεγαλύτερη από του φυσικού. Στο Σχήμα 4.21 απεικονίζονται οι υπερπίεσεις του ρευστού των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση  $\Delta u - \epsilon_z$ . Στο Σχήμα 4.22 απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση στερεοποίησης καμπύλες τάσης παραμόρφωσης  $q/\rho_i' - \epsilon_z$  και στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική τάση στερεοποίησης

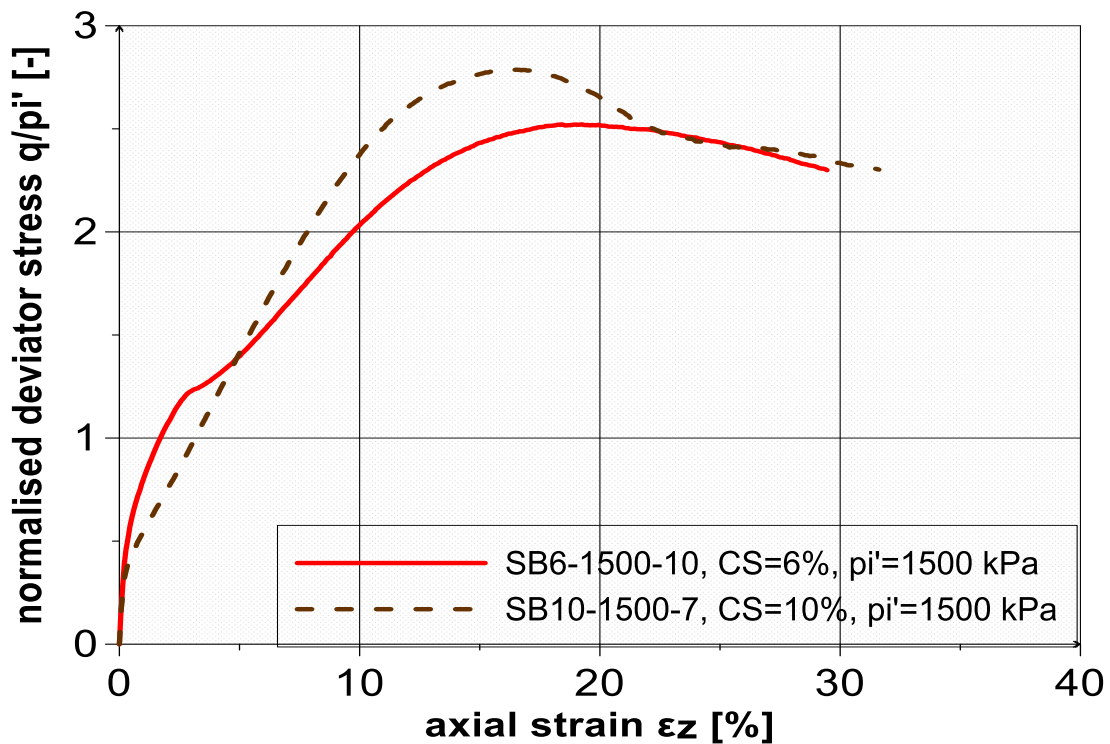
καμπύλες υπερπίεσης υγρού των πόρων  $\Delta u/p_i - \varepsilon_z$  για τα σταθεροποιημένα δοκίμια μίγματος (CS=6 και 10%). Σε παραμόρφωση 5% η κανονικοποιημένη τιμή  $q/p_i$  του σταθεροποιημένου μίγματος για τάση στερεοποίησης  $p_i'=1500$  kPa είναι 1.4 (για CS=6 και 10%), ενώ η αντίστοιχη τιμή για το φυσικό μίγμα είναι 0.6. Παρατηρώντας τα διαγράμματα, διαπιστώνουμε ότι, τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει για το σταθεροποιημένο μίγμα άμμου - ιλύος είναι ποιοτικά ανάλογα με αυτά που αφορούν τη σταθεροποιημένη άμμο.



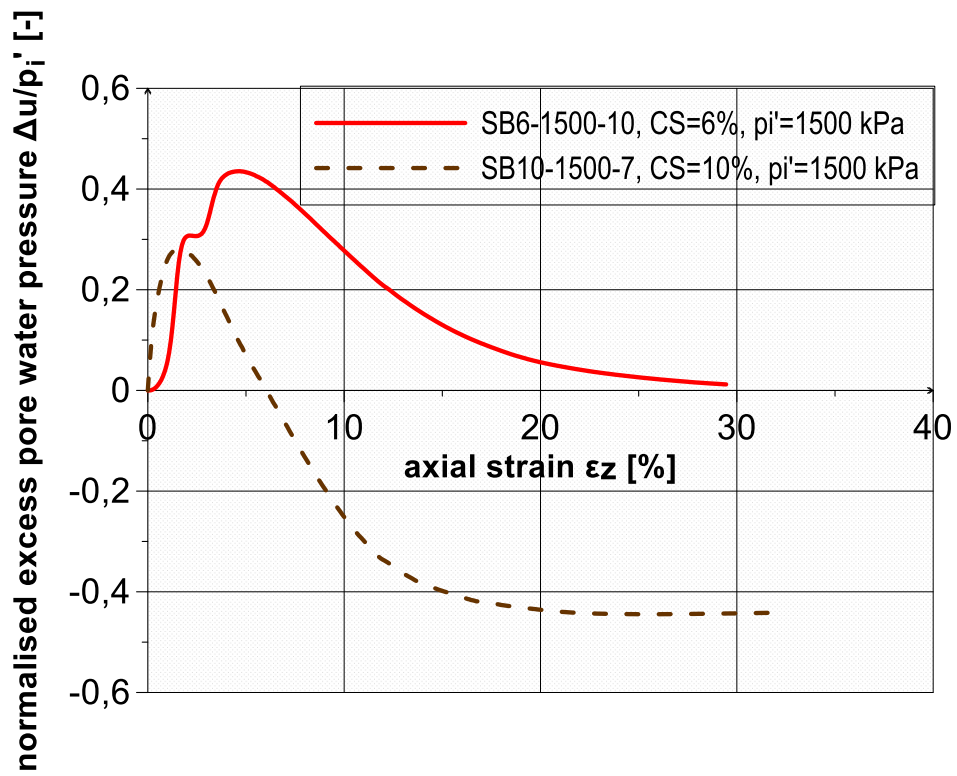
*Σχήμα 4.20. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6 (CS=6 & 10%).*



Σχήμα 4.21. Διάγραμμα υπερπίεσης υγρού πόρων - αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου – ιλύος (CS=6 & 10%).



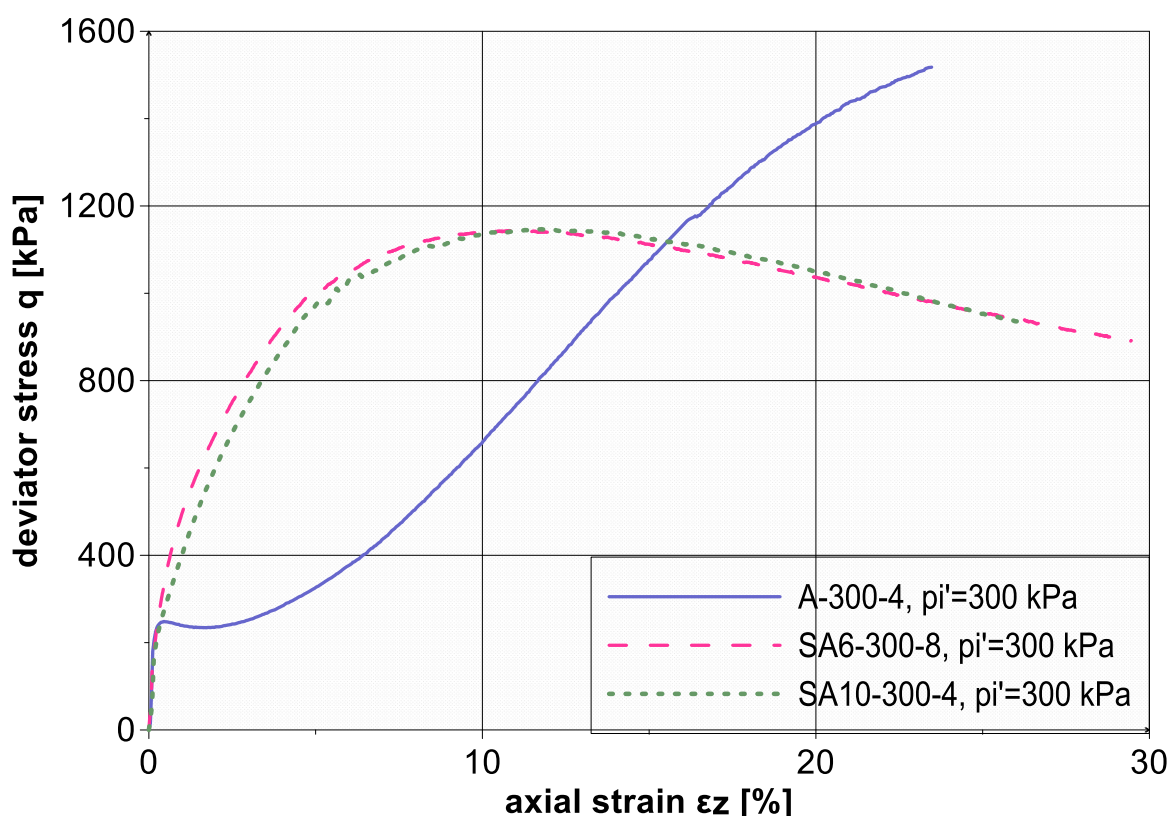
Σχήμα 4.22. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6 (CS=6 & 10%).



*Σχήμα 4.23. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπιέσεων ρευστού πόρων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 – ιλύος D6 (CS=6 & 10%).*

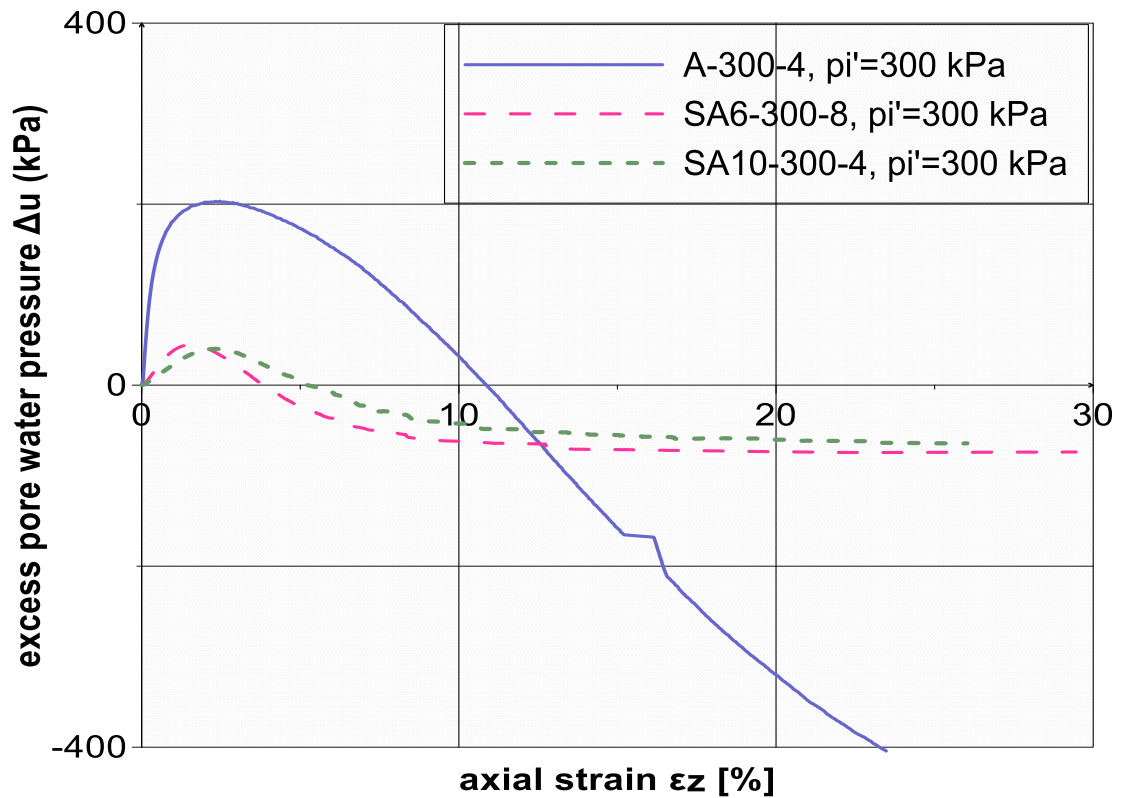
### 4.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια φυσικής άμμου M31, σε δοκίμια ιλυώδης άμμου (85% κατά βάρος άμμου M31 και 15% κατά βάρος ιλύος D6) σε σταθεροποιημένα δοκίμια καθαρής άμμου και μίγματος με κολλοειδή πυριτία (ποσοστό σταθεροποιητή CS=6 και 10%). Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των φυσικών και των αντίστοιχων σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών σε όρους αποκλίνουσας τάσης- παραμόρφωσης ( $q$ - $\epsilon_z$ ) και υπερπίεσης υγρού πόρων- παραμόρφωσης ( $\Delta u$ - $\epsilon_z$ ).

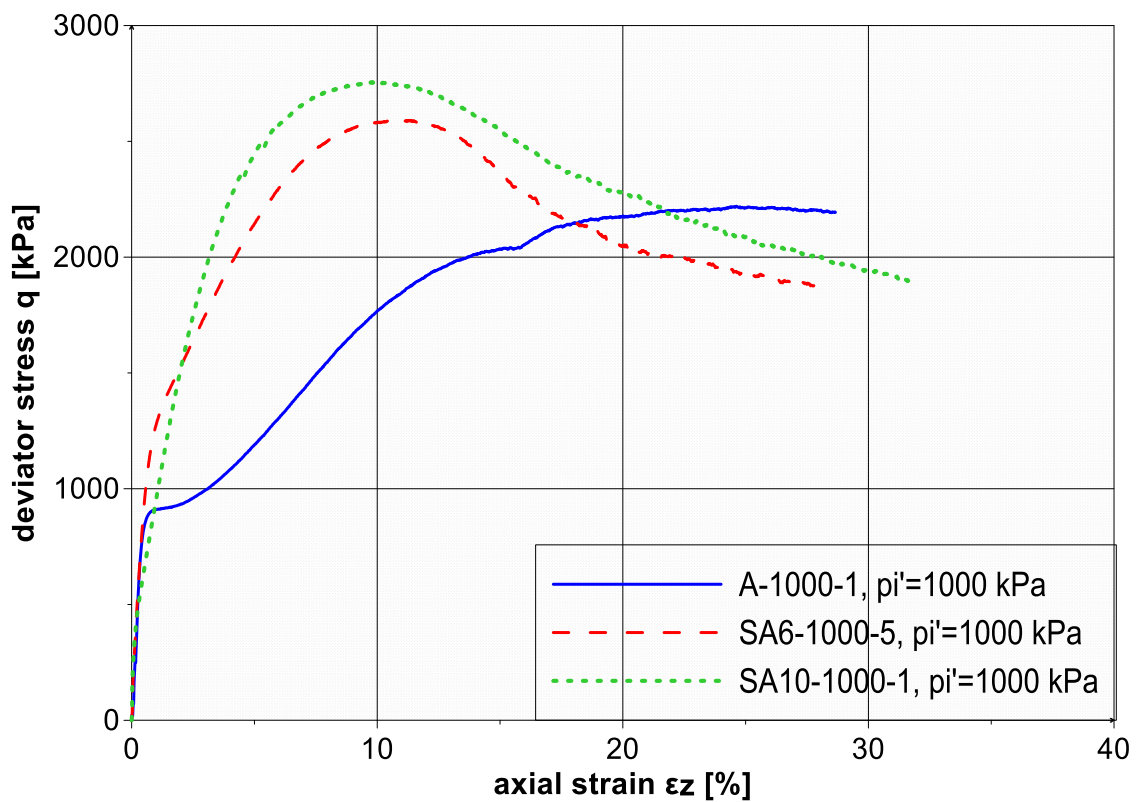


*Σχήμα 4.24. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 300 kPa.*

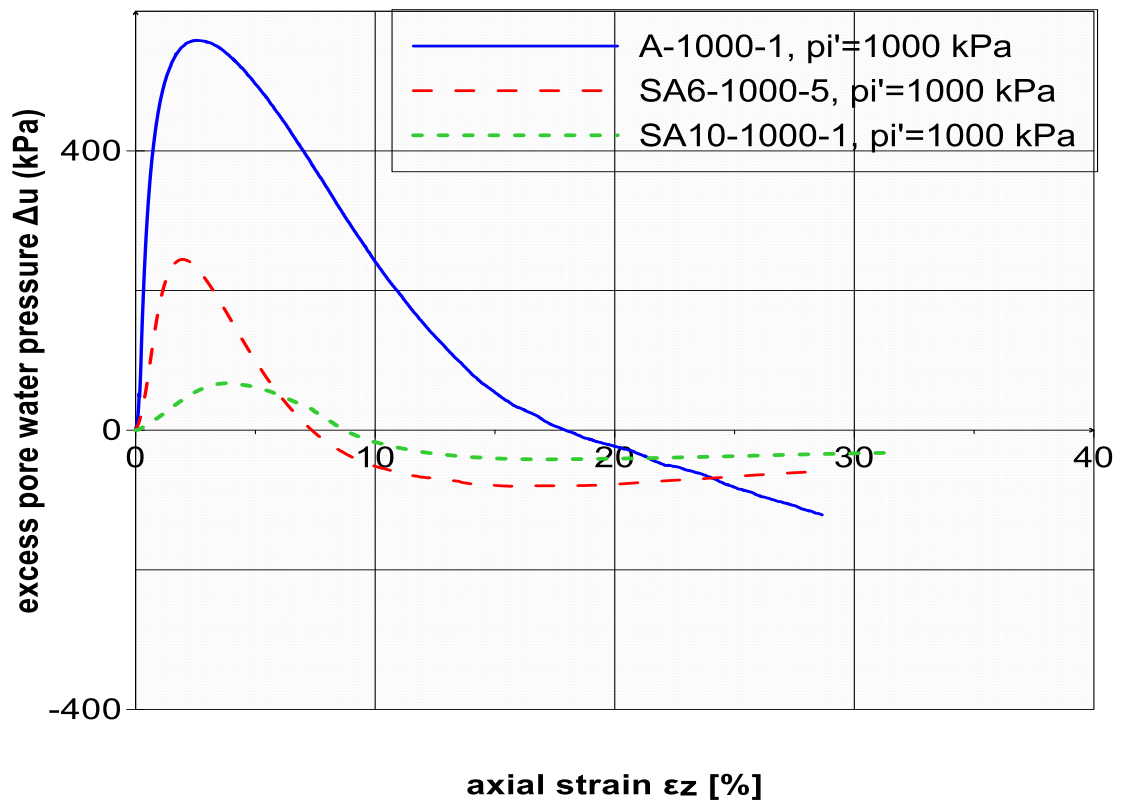




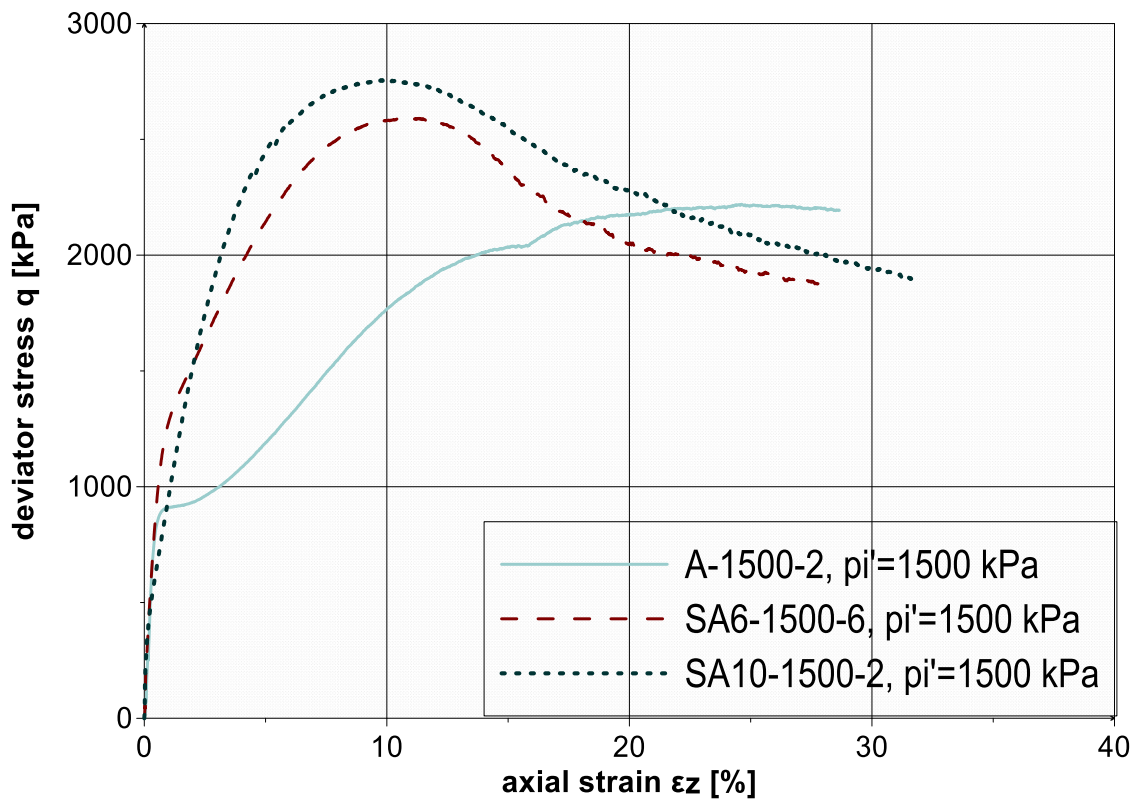
Σχήμα 4.25. Διάγραμμα υπερπίεσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 300 kPa.



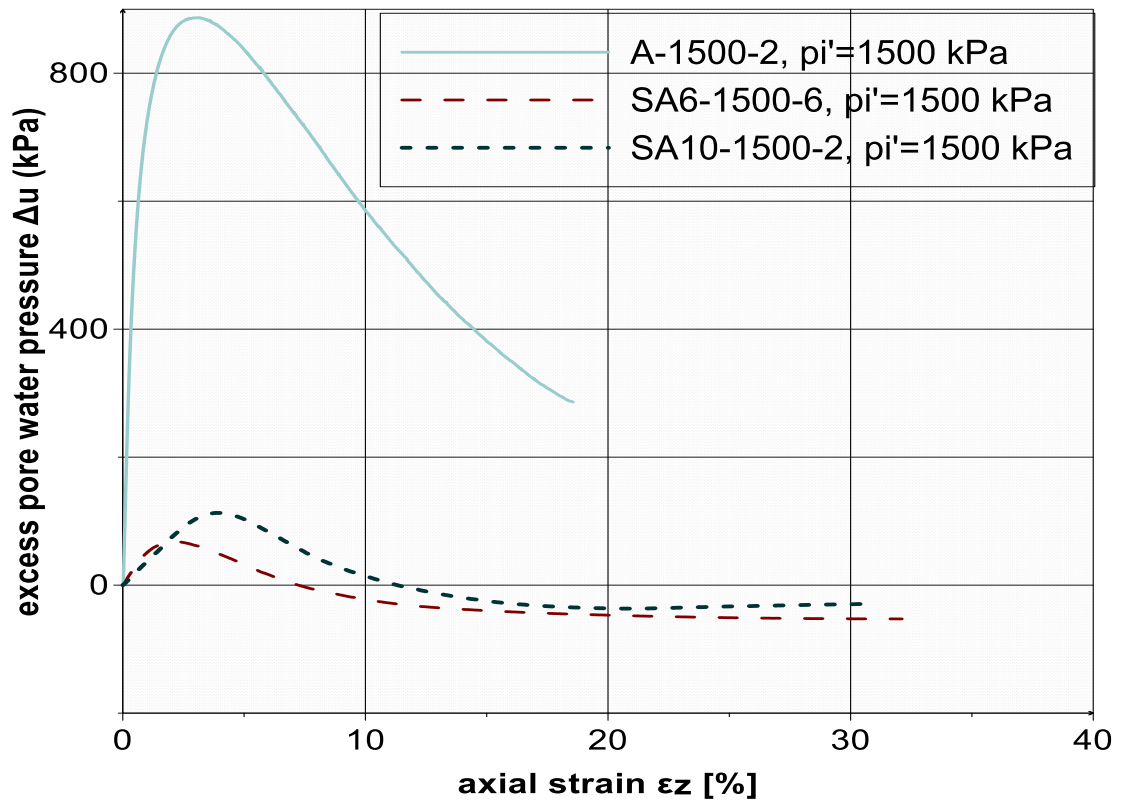
Σχήμα 4.26. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa.



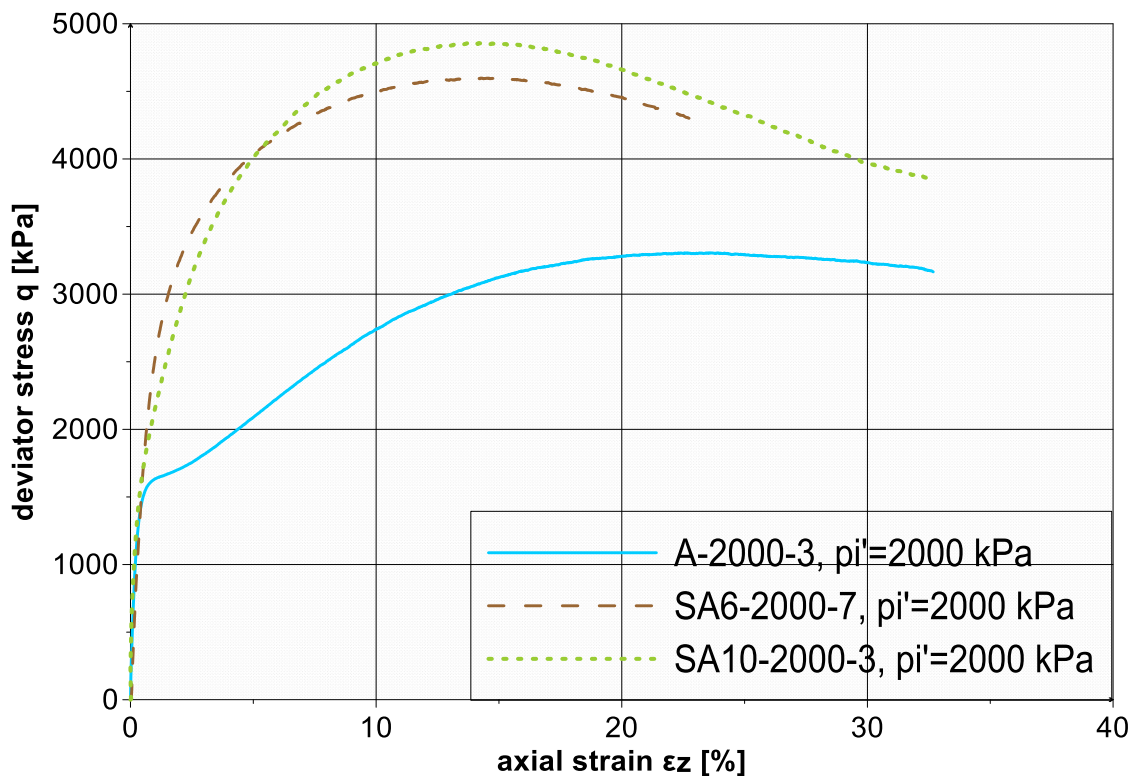
*Σχήμα 4.27. Διάγραμμα υπερπίεσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa.*



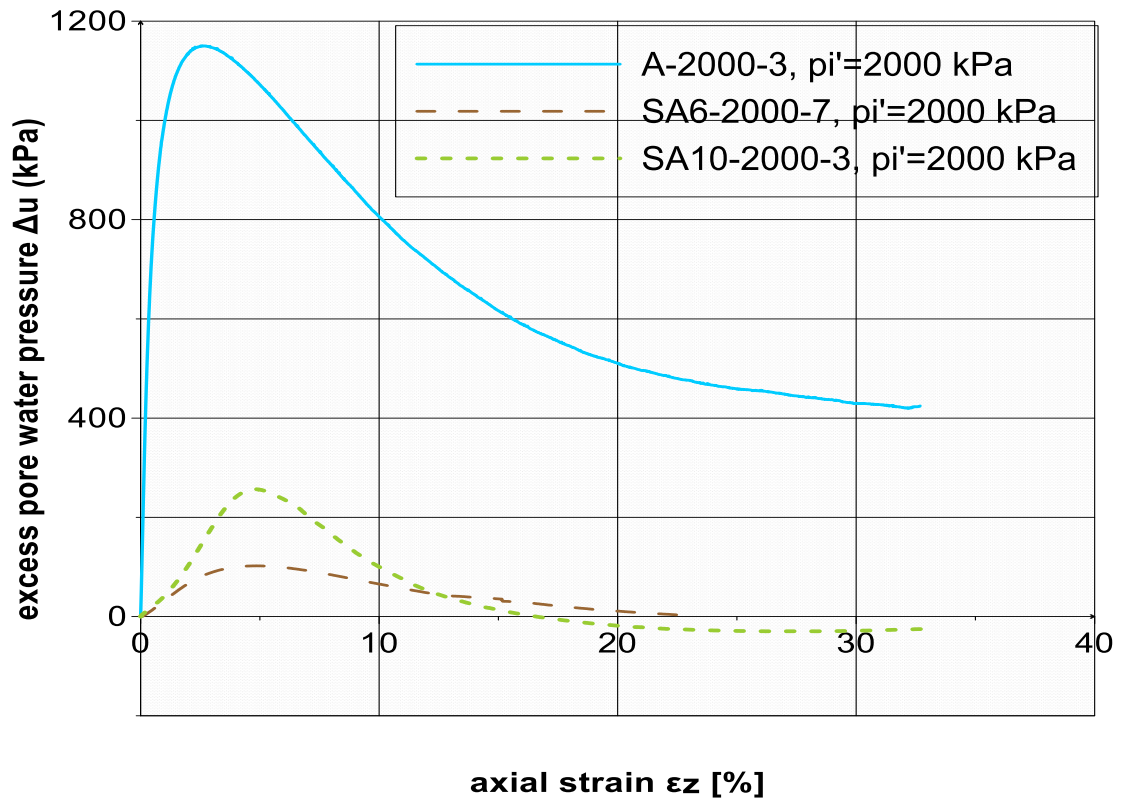
*Σχήμα 4.28. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa.*



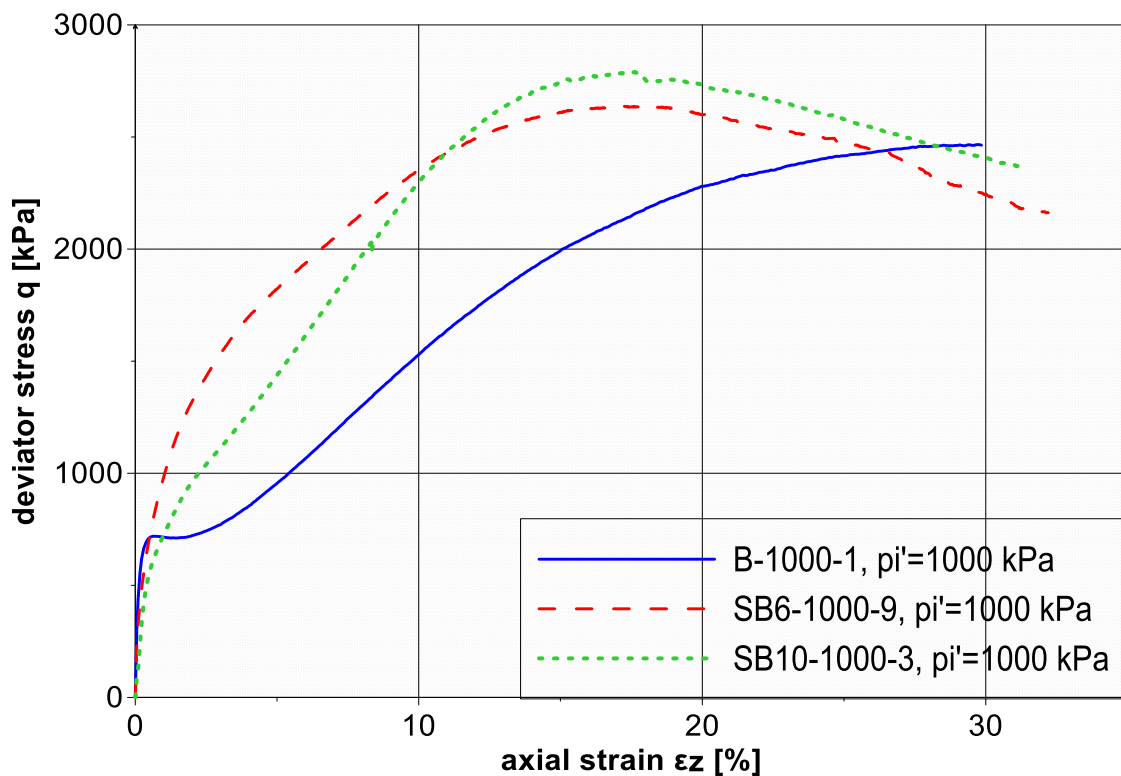
Σχήμα 4.29. Διάγραμμα υπερπιέσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa.



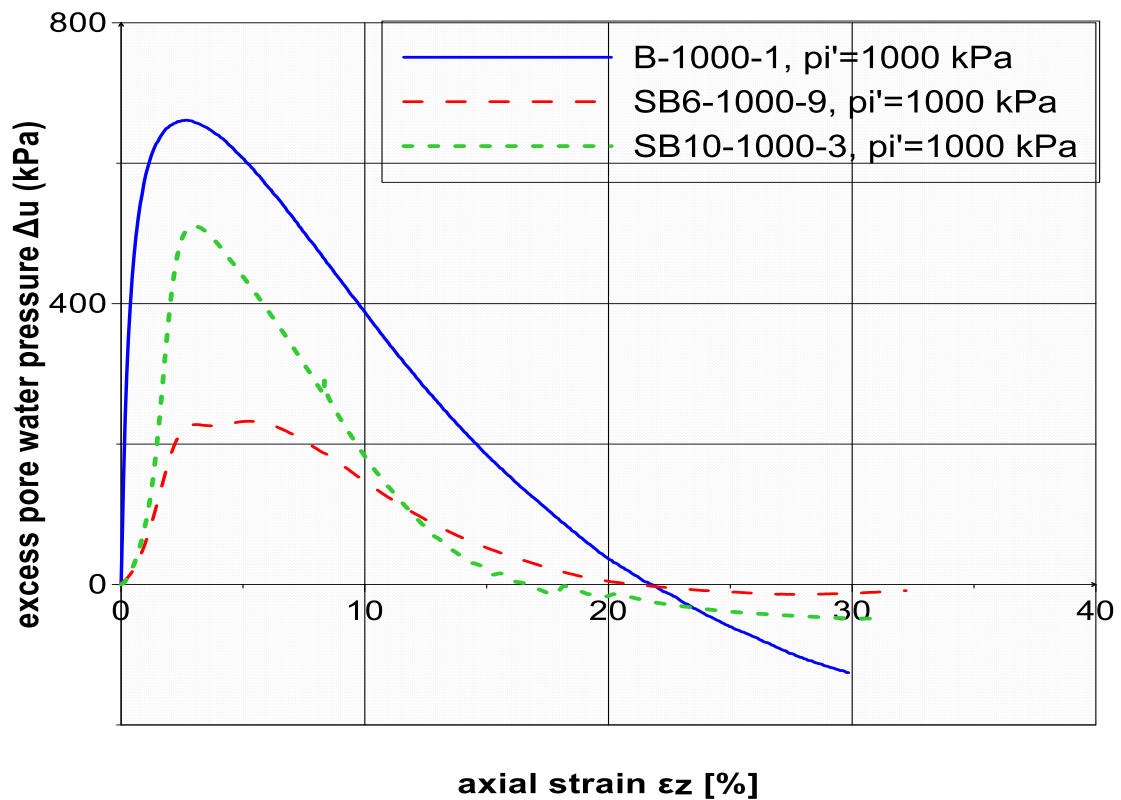
Σχήμα 4.30. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 2000 kPa.



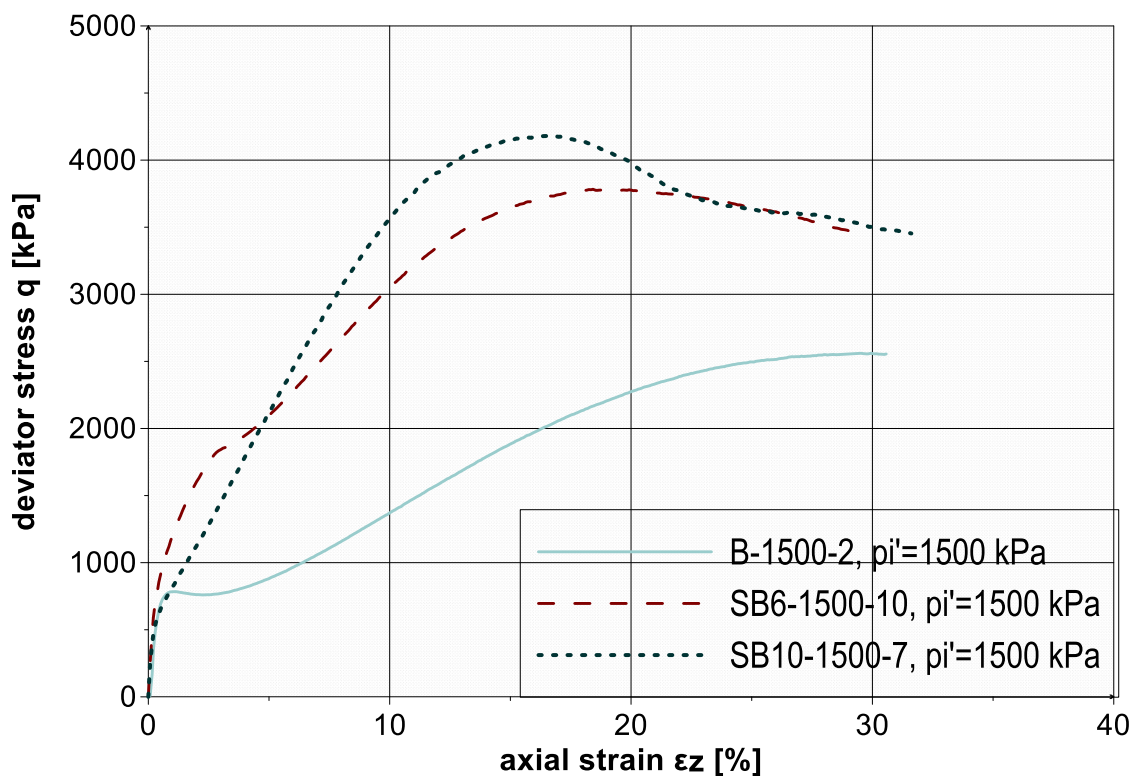
Σχήμα 4.31. Διάγραμμα υπερπίεσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 2000 kPa.



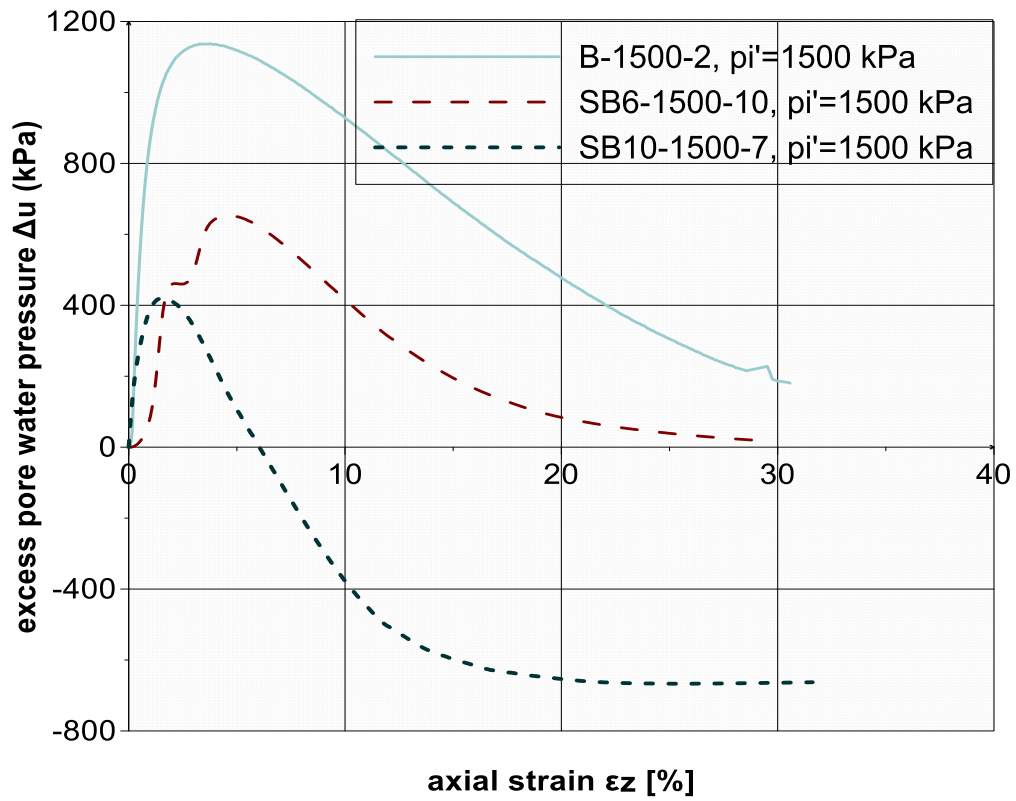
Σχήμα 4.32. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa.



Σχήμα 4.33. Διάγραμμα υπερπίεσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa.



Σχήμα 4.34. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa.



*Σχήμα 4.35. Διάγραμμα υπερπιέσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa.*

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ**

### **5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ**

Οι πειραματικές δοκιμές της παρούσης διπλωματικής εργασίας εκτελέστηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus) του Εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συσκευή έχει κατασκευαστεί από την Ιαπωνική εταιρεία SEIKEN INC και με αυτή είναι δυνατόν να επιβληθούν στα δοκίμια μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση με έλεγχο της επιβαλλόμενης τάσης ή της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Η συσκευή μπορεί να καταγράφει τη μεταβολή των πιέσεων πόρων με ακρίβεια της τάξης του 0,5 kPa. Η συσκευή δίνει την δυνατότητα τα προς εξέταση δοκίμια να είναι είτε συμπαγή ή κοίλα. Στην παρούσα διπλωματική εκτελέστηκαν μόνο ανακυκλικές δοκιμές με τη συγκεκριμένη συσκευή και τα δοκίμια φορτίζονται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (με έλεγχο δηλαδή του στρεπτικού φορτίου και όχι της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης). Το τυπικό δοκίμιο ήταν κοίλο, εξωτερικής διαμέτρου 70 mm, εσωτερικής διαμέτρου 40 mm και ύψους 140 mm.

#### **5.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά - Μηχανισμοί - Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου**

Η γενική όψη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.1. και 5.2. Το Σχήμα 5.2. συνοδεύεται και από υπόμνημα στο οποίο κατονομάζονται τα συστήματα που προσομοιώνονται. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα μέρη που απαρτίζουν την συσκευή.

##### **Βάση συσκευής**

Το κύριο μέρος της συσκευής, που απαρτίζεται από την τριαξονική κυψέλη και το μηχανισμό επιβολής της φόρτισης, εδράζεται σε στερεό μεταλλικό πλαίσιο το οποίο έχει διαστάσεις 700x600x105mm. Η βάση της συσκευής στηρίζεται σε τέσσερις μεταλλικές κολώνες, ενώ έχει μεγάλη ακαμψία, ώστε να πραγματοποιείται απρόσκοπτα η πειραματική διαδικασία κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης φόρτισης. Η τριαξονική κυψέλη μπορεί και ολισθαίνει στη βάση της συσκευής με τη βοήθεια αέρα, διευκολύνοντας την παρασκευή των δοκιμίων και τη σύνδεση της κυψέλης με το σύστημα επιβολής φόρτισης.

##### **Τριαξονική κυψέλη**

Η τριαξονική κυψέλη (Σχήματα 5.3. και 5.4.) έχει ύψος ίσο με 835mm και διάμετρο βάσης ίση με 200 mm. Πάνω στη βάση της κυψέλης βιδώνεται η βάση του δοκιμίου η οποία διαθέτει ενσωματωμένο πορώδη δίσκο για τη στράγγιση του δοκιμίου. Στην

κορυφή του δοκιμίου τοποθετείται ειδικό κάλυμμα που φέρει και αυτό πορώδη δίσκο για στράγγιση, αλλά και κυκλοφορία απαερωμένου νερού στη φάση παρασκευής του δοκιμίου. Το άνω τμήμα της τριαξονικής κυψέλης στηρίζεται στη βάση με τη βοήθεια τριών μεταλλικών ράβδων, εξασφαλίζοντας την ευθυγράμμιση των δύο άκρων του δοκιμίου. Η μέτρηση της γωνίας στρέψης κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιείται μέσω ειδικού οργάνου που τοποθετείται σε επαφή με το άνω κάλυμμα του δοκιμίου. Τα όργανα μέτρησης του κατακόρυφου φορτίου και της στρεπτικής ροπής συνδέονται επίσης με το κάλυμμα της κορυφής του δοκιμίου. Το δοκίμιο περιβάλλεται από το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης που έχει ύψος 450 mm, ενώ πάνω από το περίβλημα τοποθετείται μεταλλικός δακτύλιος στεγάνωσης του οποίου η επαφή με το περίβλημα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια τριών μεταλλικών κοχλιών. Η τριαξονική κυψέλη φέρει έμβολο το οποίο μπορεί να κινείται ελεύθερα στον κατακόρυφο άξονα και συνδέεται με τα συστήματα επιβολής φόρτισης της συσκευής. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω ειδικού μηχανισμού που βρίσκεται στην κορυφή του εμβόλου για την απορρόφηση κραδασμών. Στο ύψος του μηχανισμού βρίσκεται και το όργανο για την καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων. Δεξιά της τριαξονικής κυψέλης υπάρχει το σύστημα που ρυθμίζει την παροχή του αέρα για την επιβολή της επιθυμητής στρεπτικής φόρτισης, καθώς και η δεξαμενή εκτόνωσης. Αριστερά της τριαξονικής κυψέλης βρίσκεται το όργανο μέτρησης μεταβολής του όγκου του δοκιμίου. Τέλος, στη βάση της τριαξονικής κυψέλης υπάρχει σύστημα βαλβίδων οι οποίες συνδέονται με τη μονάδα παροχής νερού στο δοκίμιο και την κυψέλη (Σχήμα 5.2.) και ρυθμίζουν την πλήρωση της κυψέλης με νερό, τον κορεσμό του δοκιμίου και την ολίσθηση της τριαξονικής κυψέλης στη βάση της συσκευής στρεπτικής διάτμησης.

#### **Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου**

Ο μηχανισμός αυτός (Σχήμα 5.2.) λειτουργεί με την διαφορά πίεσης αέρα που διοχετεύεται σε έμβολο το οποίο συνδέεται με τη βοήθεια κοχλιών με το έμβολο φόρτισης της τριαξονικής κυψέλης. Η πίεση αυτή ελέγχεται από την κεντρική μονάδα παροχής αέρα στην οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω.

#### **Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου**

Ο μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου (Σχήμα 5.7.) όπως και ο μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου λειτουργεί με τη διαφορά πίεσης αέρα που παρέχεται σε έμβολο στην οριζόντια θέση. Η πίεση στο έμβολο ρυθμίζεται μέσω του συστήματος τροφοδότησης και της δεξαμενής εκτόνωσης (Relief Tank) που βρίσκονται δεξιά της τριαξονικής κυψέλης (Σχήμα 5.3.).

#### **Κεντρική μονάδα παροχής αέρα**

Η κεντρική μονάδα παροχής αέρα (Σχήματα 5.2. και 5.5.) όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, ελέγχει την παροχή αέρα στα υποσυστήματα της συσκευής. Η μέγιστη πίεση που δύναται να παρέχει η συσκευή είναι της τάξεως των  $8 \frac{kgf}{cm^2}$ . Η κατανομή της πίεσης του αέρα στα διάφορα υποσυστήματα γίνεται μέσω ρυθμιστών παροχής και βαλβίδων που κατευθύνουν τον αέρα στα σημεία που χρειάζεται.



### **Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου**

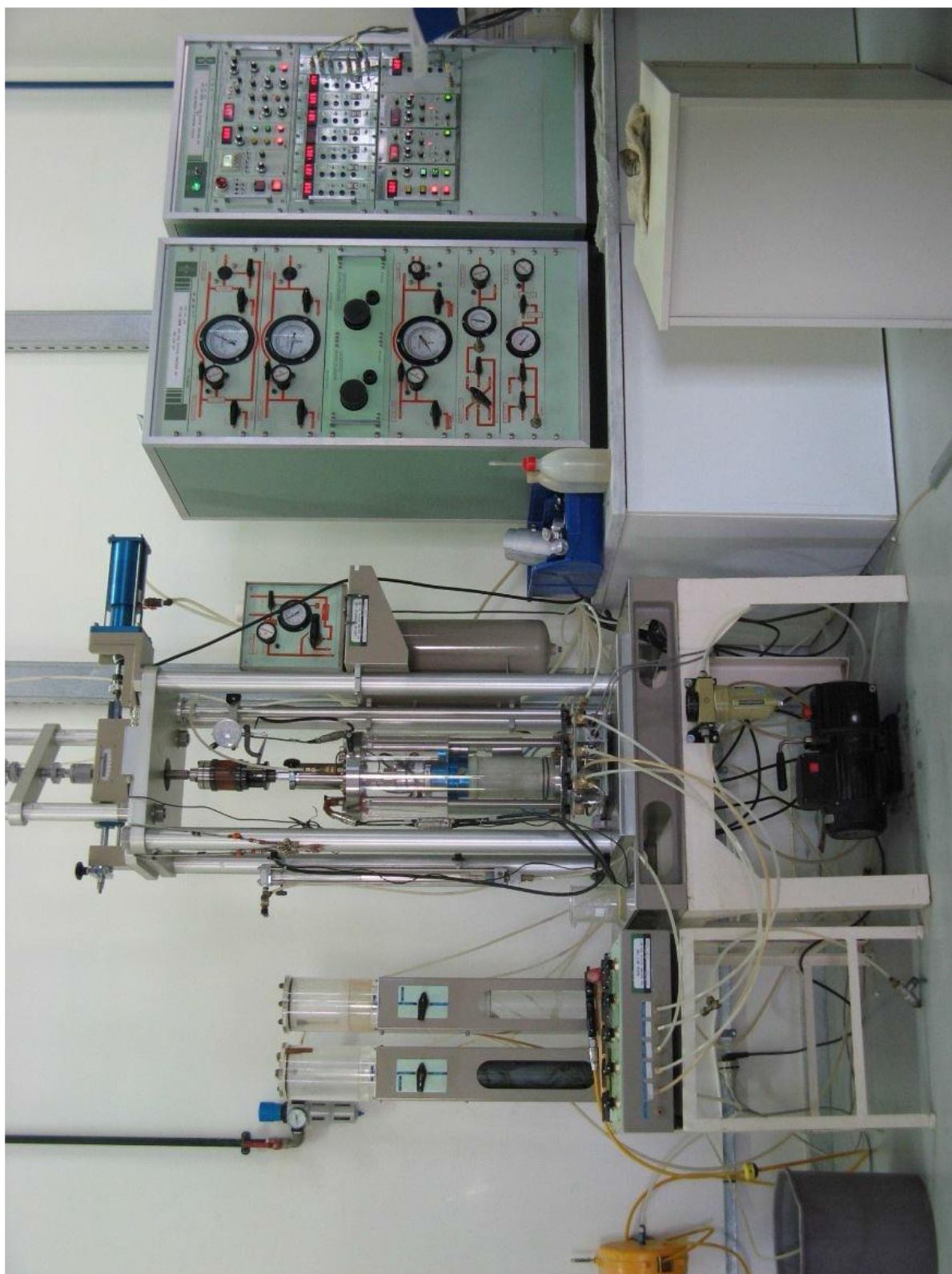
Η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (Σχήματα 5.2. και 5.6.) επιβάλλει τον έλεγχο όσον αφορά στον τύπο της φόρτισης που θα επιβληθεί στο δοκίμιο (μονοτονική ή ανακυκλική) καθώς και το ρυθμό με τον οποίο αυτή επιβάλλεται, στο μέγεθος των κατακόρυφων και των πλευρικών πιέσεων και επικοινωνεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής.

### **Μονάδα παροχής νερού**

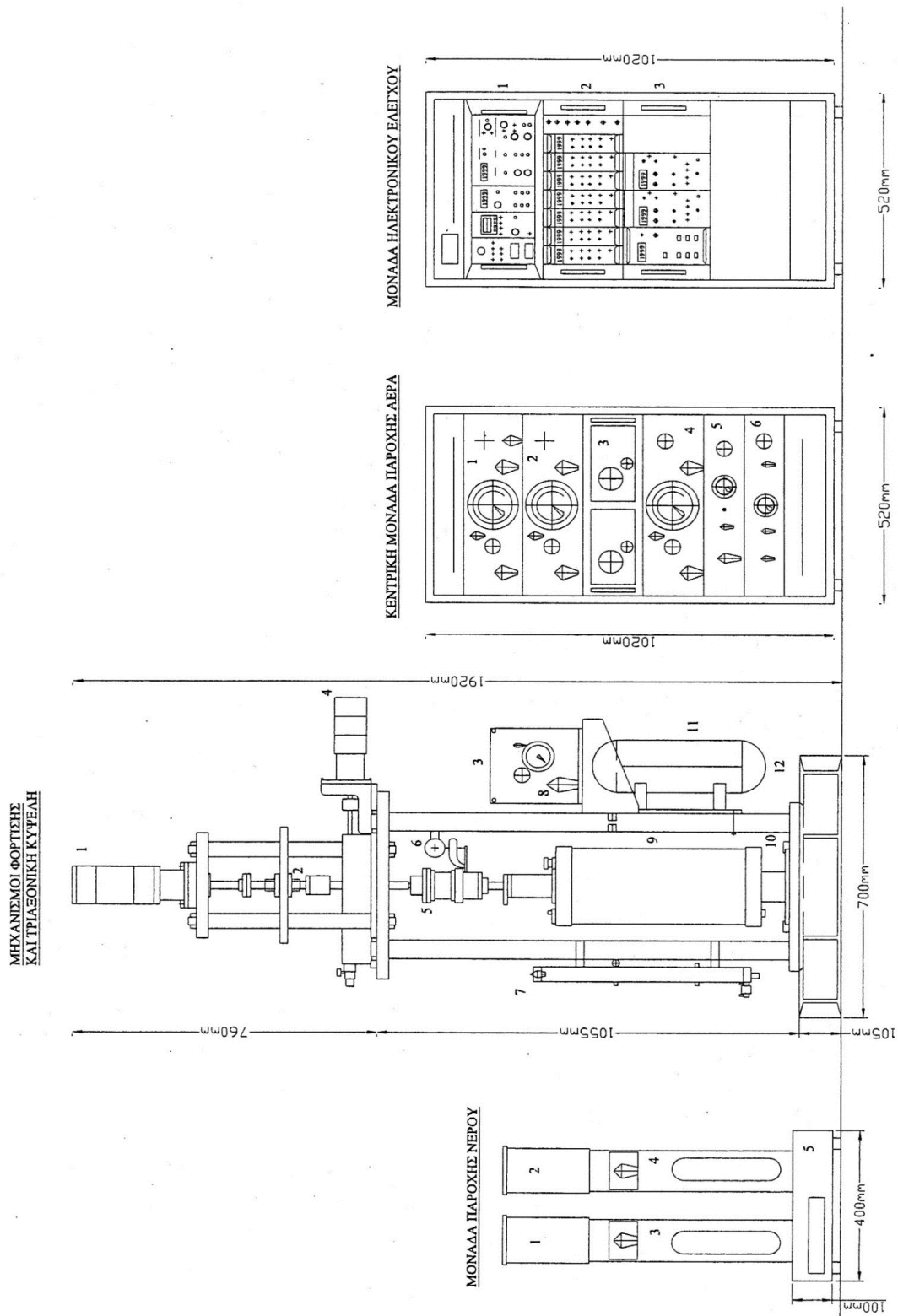
Η συγκεκριμένη μονάδα (Σχήμα 5.7.) ρυθμίζει την κίνηση του νερού από και προς την τριαξονική κυψέλη και το εσωτερικό του δοκιμίου. Το νερό χρησιμοποιείται κυρίως για τον κορεσμό του δοκιμίου και την απαέρωση των γραμμών στράγγισης, συνεπώς είναι απαραίτητο να είναι εκ των προτέρων απαερωμένο. Η απαέρωση του νερού γίνεται στη δεξαμενή απαέρωσης μέσω του συστήματος επιβολής αρνητικών πιέσεων της κεντρικής μονάδας παροχής αέρα. Η δεξαμενή αντιπίεσης (Back Pressure Tank) καθορίζει την πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου, ενώ η δεξαμενή πλευρικής πίεσης την πλευρική πίεση που εξασκείται στο δοκίμιο. Η παροχή πεπιεσμένου αέρα που καταλήγει στη φούσκα της δεξαμενής αντιπίεσης διοχετεύεται επίσης και στην κορυφή της προχοΐδας μέτρησης των μεταβολών όγκου. Η προχοΐδα είναι γεμάτη με νερό μέχρι ενός σημείου και στη βάση της επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με το εσωτερικό του δοκιμίου. Το νερό στη βάση της προχοΐδας και το νερό των πόρων του δοκιμίου έχουν μία διαφορά υδροστατικής πίεσης, η οποία μετράται με διαφορικό αισθητήρα πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο μετράται έμμεσα η μεταβολή του όγκου του νερού μέσα στην προχοΐδα και άρα ο όγκος του νερού που εκρέει από ή εισρέει στο δοκίμιο.

### **Καταγραφή πειραματικών δεδομένων - Ηλεκτρονικός Υπολογιστής**

Η συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του ΕΜΠ είναι μονίμως συνδεδεμένη με Η/Υ ο οποίος διαθέτει κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για την αυτόματη καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, γίνεται καταγραφή του αξονικού φορτίου, της πλευρικής πίεσης της κυψέλης, της πίεσης πόρων του δοκιμίου, του στρεπτικού φορτίου, της κατακόρυφης μετακίνησης του δοκιμίου, της γωνίας στρέψης και της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου (συνολικά επτά κανάλια πειραματικών δεδομένων).



*Σχήμα 5.1. Γενική όψη συσκευής στροπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου*



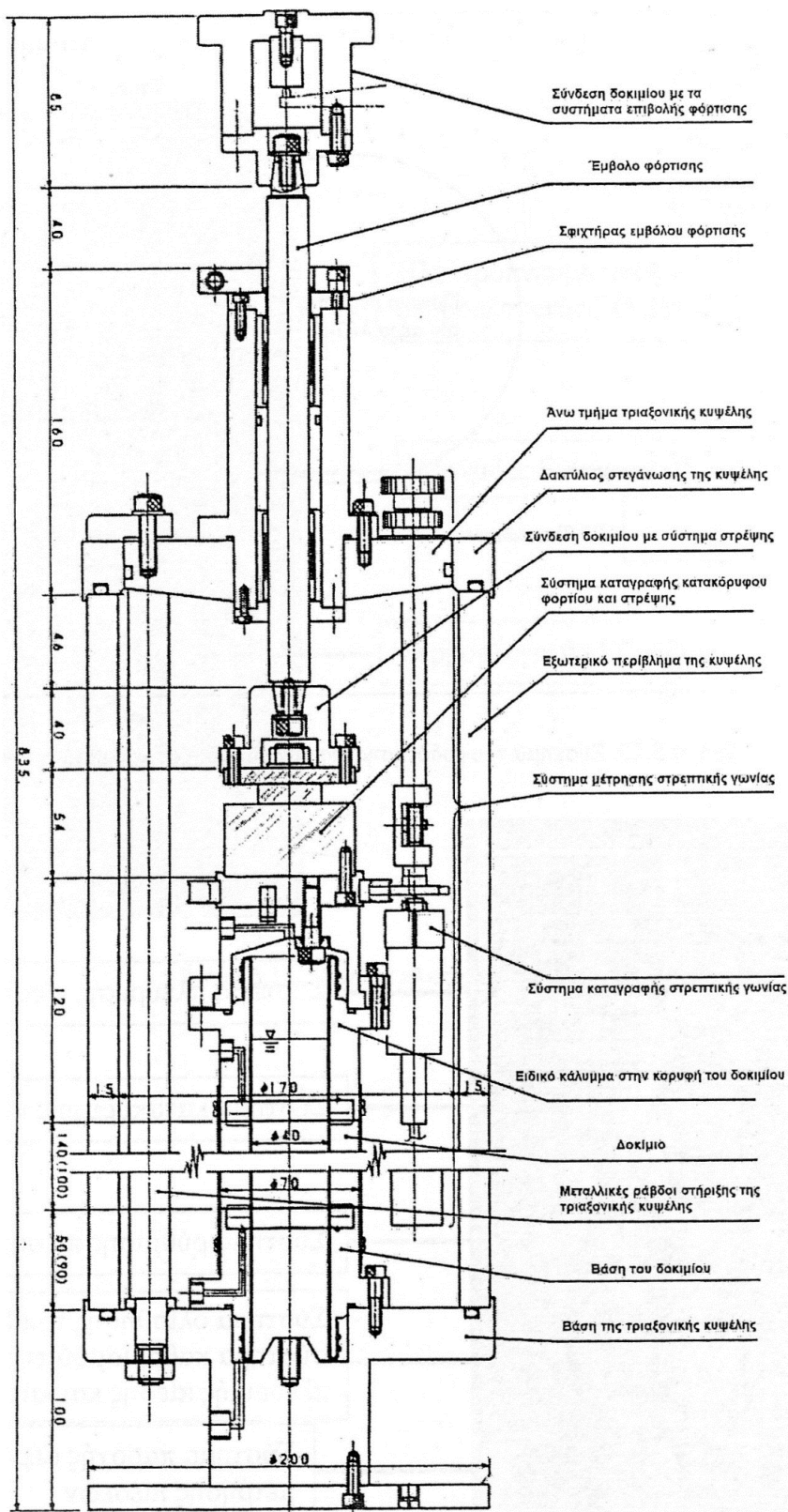
Σχήμα 5.2. Διαγραμματική απεικόνιση συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.2)</b>	
<b>A: Μηχανισμοί Επιβολής Φόρτισης Και Τριαζονική Κυψέλη</b>	
1.	Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου
2.	Σύστημα καθορισμού της θέσης του εμβόλου
3.	Σύστημα τροφοδότησης για την επιβολή στρεπτικού φορτίου
4.	Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου
5.	Μηχανισμός απορρόφησης των κραδασμών
6.	Όργανο καταγραφής κατακόρυφων μετακινήσεων εύρους 200mm
7.	Όργανο μέτρησης μεταβολής του όγκου με μέγιστη χωρητικότητα 50ml
8.	Βαλβίδα για την τροφοδότηση του συστήματος ενεργοποίησης της στρεπτικής φόρτισης με αέρα
9.	Τριαζονική κυψέλη
10.	Βάση τριαζονικής κυψέλης
11.	Δεξαμενή εκτόνωσης με χωρητικότητα 5lt
12.	Βάση της συσκευής
<b>B. Μονάδα Παροχής Νερού:</b>	
1.	Δεξαμενή απαέρωσης με χωρητικότητα 1lt
2.	Δεξαμενή επιβολής αρνητικών πιέσεων με χωρητικότητα 1,5lt
3.	Δεξαμενή υποπίεσης με χωρητικότητα 2lt
4.	Δεξαμενή πλευρικής πίεσης με χωρητικότητα 2lt
5.	Βάση: περιέχει τις βαλβίδες που καθορίζουν την κίνηση του νερού
<b>Γ. Κεντρική Μονάδα Παροχής Αέρα:</b>	
1.	Σύστημα πλευρικής πίεσης και υποπίεσης
2.	Σύστημα κατακόρυφης πίεσης
3.	Σύστημα ρύθμισης πίεσης αέρα
4.	Σύστημα ολίσθησης τριαζονικής κυψέλης και σύστημα καθορισμού της σχέσης μεταξύ πλ
5.	Σύστημα παροχής αέρα και σύστημα μέτρησης πιέσεων
6.	Σύστημα επιβολής αρνητικών πιέσεων
<b>Δ. Μονάδα Ηλεκτρονικού Ελέγχου:</b>	
1.	Ηλεκτροπνευματικός σερβοελεγκτής ΕΟ – 290U
2.	Μονάδες ενίσχυσης
3.	Σερβοελεγκτής ΕΟ - 470U

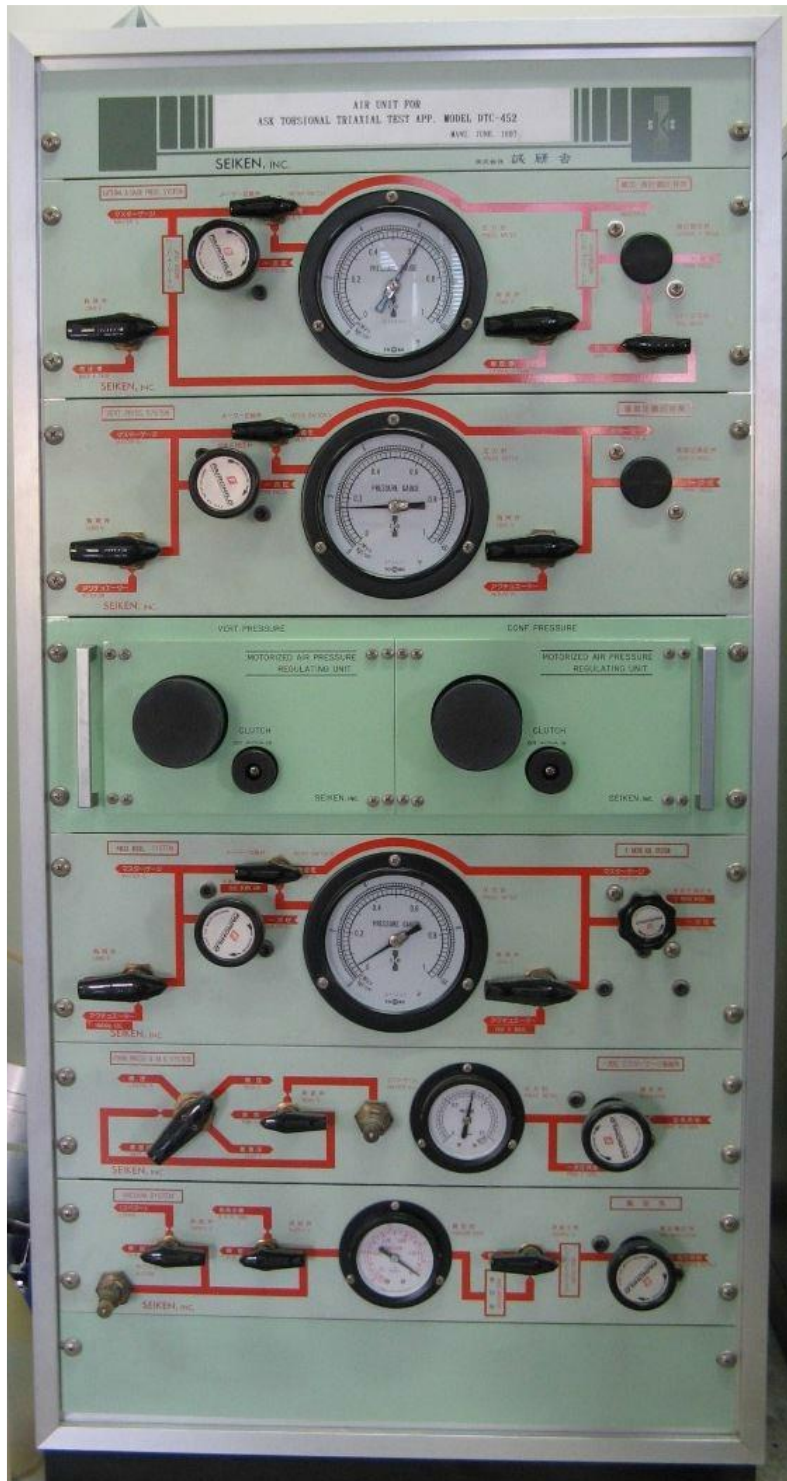
*Πίνακας 5.1.*



*Σχήμα 5.3. Τριαξονική κυψέλη (διακρίνεται στο κέντρο της συσκευής). Δεξιά πάνω βρίσκεται το σύστημα τροφοδότησης για την επιβολή στρεπτικού φορτίου και από κάτω η δεξαμενή εκτόνωσης*



Σχήμα 5.4. Τριαξονική κυψέλη (διαστάσεις σε mm)

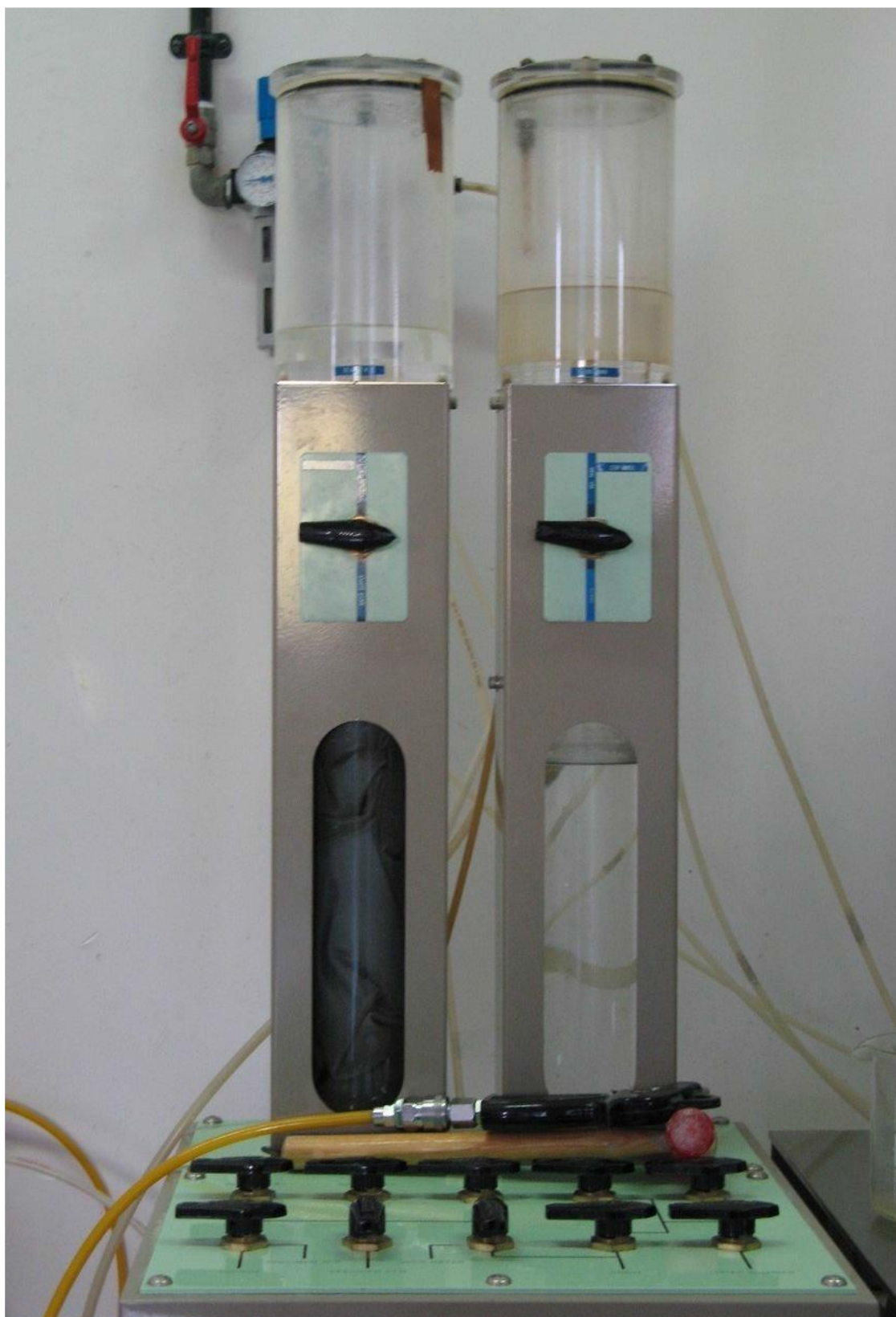


*Σχήμα 5.5. Κεντρική μονάδα παροχής αέρα*

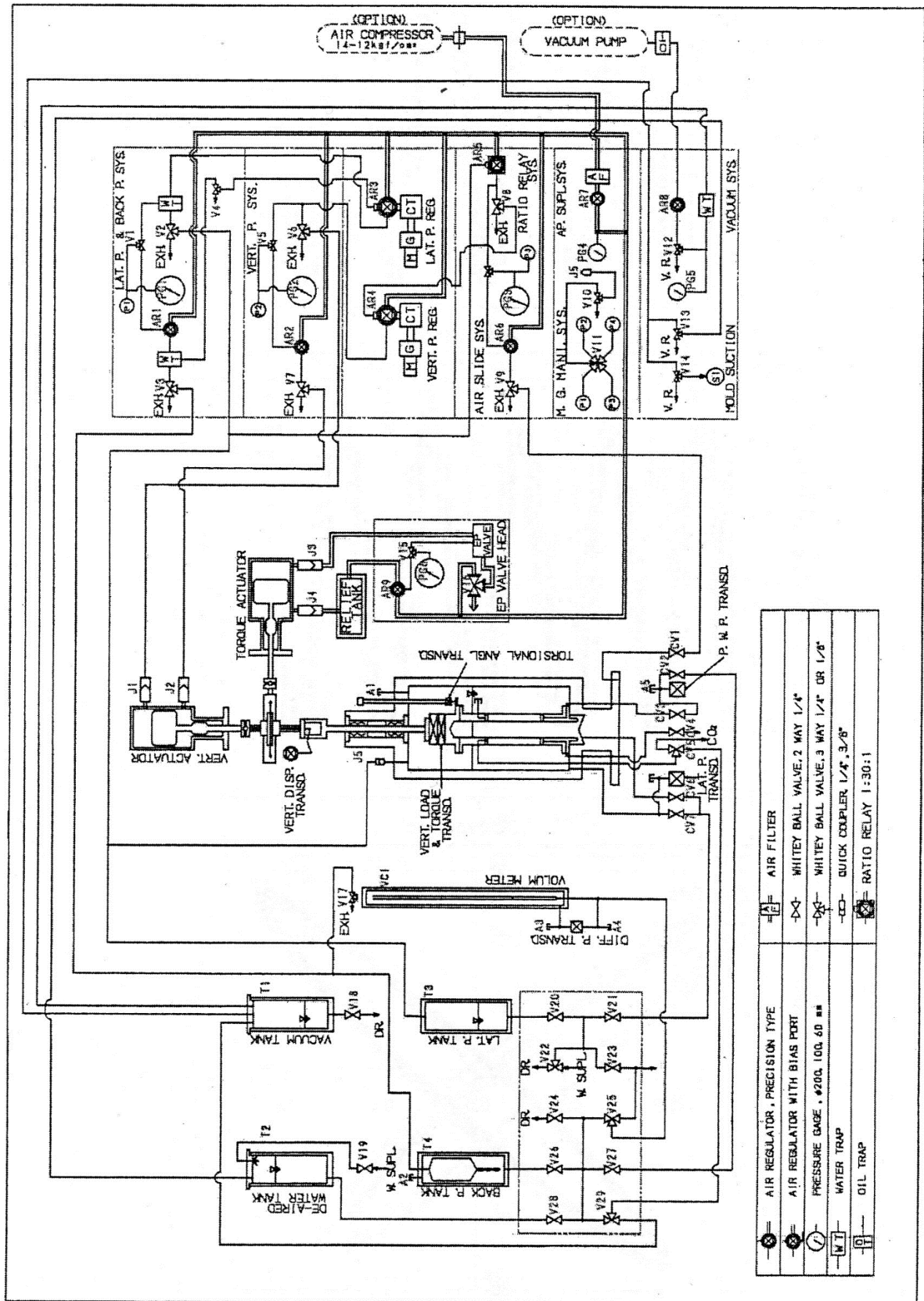


Σχήμα 5.6. Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου





*Σχήμα 5.7. Μονάδα παροχής νερού*



Σχήμα 5.8. Γενική όψη συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

## 5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 5.2.1 Προετοιμασία φυσικού δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τα φυσικά εδαφικά υλικά που φορτίστηκαν είναι καθαρή άμμος M31 και μίγμα 85% άμμου M31 & 15% ιλύος D6 (λεπτόκοκκα  $f_c=10\%$ ).

Αρχικά, μετράται το πάχος της εσωτερικής και της εξωτερικής αδιαπέρατης ελαστικής μεμβράνης, μέσα στις οποίες περικλείεται το δοκίμιο. Η εσωτερική μεμβράνη είναι αυτή που τοποθετείται πρώτη στην κυλινδρική βάση του δοκιμίου, ενώ συγκρατείται και στεγανοποιείται εκεί με τη βοήθεια ειδικών ελαστικών δακτυλίων από καουτσούκ. Η κυλινδρική βάση τοποθετείται και βιδώνεται στη βάση της τριαξονικής κυψέλης και εν συνεχεία συνδέονται οι σωληνώσεις που αποτελούν τις γραμμές στράγγισης της βάσης του δοκιμίου. Έπειτα, ακολουθεί η τοποθέτηση και στερέωση της εξωτερικής μεμβράνης με τρόπο όμοιο με την εσωτερική (χρησιμοποιούνται δύο στεγανωτικοί δακτύλιοι). Γύρω από την εξωτερική ελαστική μεμβράνη και μέσα από την εσωτερική κλείουν ειδικά μεταλλικά καλούπια. Μέσω της μονάδας παροχής αέρα επιβάλλεται αρνητική πίεση στο κενό μεταξύ της εξωτερικής μεμβράνης και του καλουπιού. Με αυτό τον τρόπο η μεμβράνη αναρροφάται, «κολλάει» στα τοιχώματα και αποκτά την απαιτούμενη κυλινδρική μορφή. Στη συνέχεια δια μέσου των γραμμών στράγγισης περνάει απιονισμένο και απαερωμένο νερό με το οποίο πληρώνεται ο χώρος του δοκιμίου. Χρησιμοποιώντας χωνί με προσαρτημένο σωλήνα διαμέτρου 1.5cm, αποτίθεται σε ξηρή μορφή η άμμος ή το μίγμα αντίστοιχα στον ίδιο χώρο ώστε να διασφαλιστεί ο καλύτερος κορεσμός του δοκιμίου. Η απόθεση του δείγματος γίνεται από ύψος το οποίο μεταβάλλεται διαρκώς, ούτως ώστε η απόσταση από την επιφάνεια της άμμου που έχει ήδη εναποτεθεί και συνεπώς η ενέργεια πρόσπτωσης να διατηρείται σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται κατά το δυνατό η ομοιομορφία και η επαναληπτικότητα του δοκιμίου. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο που προτάθηκε από τους Bishop και Henkel (1957), και ονομάζεται «εμβάπτιση στο νερό» (water pluviation) και στη συνέχεια συμπυκνώθηκαν με συγκεκριμένο αριθμό κτύπων, ώστε να επιτευχθούν δομές σε διάφορες πυκνότητες. Τέλος, η κορυφή του δείγματος επιπεδοποιείται, τοποθετείται ειδικό κάλυμμα με άκαμπτο πορώδη δίσκο και συνδέεται η γραμμή στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου.

Μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου, μέσω της γραμμής στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου, επιβάλλεται στο δοκίμιο αρνητική πίεση της τάξεως των 40 kPa και καταγράφεται η μεταβολή του όγκου του. Η αρνητική πίεση, που ισοδυναμεί με μέση ενεργό τάση  $p' = 40$  kPa, προσδίδει αντοχή στο δοκίμιο και καθίσταται δυνατή η αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών που το συγκρατούσαν. Μετά την αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών μετράται η εξωτερική διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου με μηκυνσίόμετρο ακρίβειας 0,01 mm. Στη συνέχεια συνδέεται το τμήμα της συσκευής με το οποίο θα επιβληθεί η εξωτερική φόρτιση και ακολουθεί η διέλευση απαερωμένου νερού μέσα από το δοκίμιο (το νερό εισέρχεται από τις γραμμές στράγγισης στη βάση του δοκιμίου και εξέρχεται από τη γραμμή στράγγισης

στην κορυφή του). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο πλήρης κορεσμός του δοκιμίου και των γραμμών στράγγισης. Έπειτα, τοποθετείται το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης και σφίγγονται όλοι οι κοχλίες, ώστε να επιτευχθεί η στεγάνωση του θαλάμου. Κατόπιν, ανοίγεται η βαλβίδα παροχής νερού και γεμίζει με νερό ο θάλαμος.

### 5.2.2 Φόρτιση φυσικού δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης

Αρχικά πραγματοποιείται η διαδικασία ελέγχου του κορεσμού μέσω της αύξησης της πλευρικής πίεσης της κυψέλης με ταυτόχρονη ισόποση αύξηση της πίεσης πόρων, ώστε η ενεργός τάση του δοκιμίου να διατηρείται κάθε φορά σταθερή και ίση με 50 kPa. Για τις σειρές πειραμάτων που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία, η τελική τιμή της πλευρικής πίεσης ήταν ίση με 350 kPa ενώ της πίεσης πόρων ίση με 300 kPa. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας (αλλά και αργότερα κατά την ισότροπη στερεοποίηση του δοκιμίου) το αξονικό φορτίο διατηρείται σταθερό μέσω της επιβολής πίεσης ισορροπίας. Με τον τρόπο αυτό, η μεταβολή της πίεσης  $\Delta\sigma$  επί του δοκιμίου γίνεται ισότροπα. Για τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού του δοκιμίου χρησιμοποιείται η παράμετρος  $B$  του Skempton (1954). Κατά τη μέθοδο αυτή, εάν σε ένα πλήρως κορεσμένο εδαφικό στοιχείο ασκηθεί ισότροπα και υπό αστράγγιστες συνθήκες μία μεταβολή τάσης  $\Delta\sigma$ , τότε σε αυτό αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων  $\Delta u = \Delta\sigma$ . Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι πλήρως κορεσμένο, αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων  $\Delta u < \Delta\sigma$ . Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί πλήρης κορεσμός του δοκιμίου για τιμές της παραμέτρου  $B$  μεγαλύτερες από 0.97, οι οποίες συνήθως προέκυπταν μετά από διάστημα μερικών ωρών από την παρασκευή του δοκιμίου.

Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της στερεοποίησης, όπου το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα μεταβάλλοντας την πλευρική πίεση μέχρι την τιμή των 600 kPa, διατηρώντας σταθερή την πίεση πόρων στα 300 kPa ώστε να διαμορφωθεί αρχική ισότροπη ενεργός τάση  $p_i' = 300$  kPa. Οι συνθήκες ισότροπης στερεοποίησης επιτυγχάνονται διατηρώντας την αξονική δύναμη του εμβόλου σταθερή και ίση με μηδέν, έτσι ώστε η αξονική ολική τάση να ισούται με την πίεση της κυψέλης. Μετά την ισότροπη στερεοποίηση ακολουθεί περίοδος ηρεμίας του δοκιμίου διάρκειας 90 min. Η περίοδος αυτή διατηρείται σταθερή για όλα τα δοκίμια, ώστε η ιστορία φόρτισης πριν από τη διάτμηση να είναι κοινή.

Την περίοδο ηρεμίας, διαδέχεται η διαδικασία φόρτισης του δοκιμίου σε στρέψη. Η ανακυκλική στρεπτική διάτμηση έγινε υπό αστράγγιστες συνθήκες, διατηρώντας την πίεση της κυψέλης σταθερή και την αξονική δύναμη του εμβόλου σταθερή και ίση με μηδέν. Η πίεση της κυψέλης μέσα και έξω από τον κοίλο κύλινδρο ήταν κοινή. Επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με συχνότητα  $f = 0.10$  Hz και ημιεύρος  $\Delta\tau_{\theta z}$  (έλεγχος τάσεων). Τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη ήταν η ροπή στρέψης, το αξονικό φορτίο, η πίεση της κυψέλης, η πίεση του υγρού των πόρων, η γωνία στροφής, η αξονική μετατόπιση και ο χρόνος. Για να προσδιοριστεί η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση εκτελέστηκαν δοκιμές σε διάφορους λόγους ανακυκλικής τάσης  $CSR = \Delta\tau_{\theta z} / p_i'$  και προσδιορίστηκαν οι κύκλοι φόρτισης  $N_{1\%}$ ,  $N_{2.5\%}$  και  $N_{5\%}$  που απαιτούνται για την ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους  $\gamma_{DA} = 1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ , αντίστοιχα. Κριτήριο ρευστοποίησης θεωρήθηκε η ανάπτυξη

παραμόρφωσης διπλού πλάτους ίσης με  $\gamma_{DA}=5\%$ . Τα πειράματα σε δοκίμια παρόμοιας πυκνότητας μετά την στερεοποίηση ορίζουν μία καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση στον χώρο CSR - N. Τα σημεία της καμπύλης είναι οι οριακοί λόγοι ανακυκλικής τάσης  $CSR_{lim} \equiv CRR$  και χωρίζουν το επίπεδο σε δύο περιοχές. Η μία περιοχή αποτελείται από ασφαλείς (για τη δεδομένη πυκνότητα εδάφους) συνδυασμούς N κύκλων με λόγο ανακυκλικής τάσης CSR, ενώ η άλλη ορίζει τους συνδυασμούς που προκαλούν ρευστοποίηση. Η εξίσωση της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει στατιστικά τα δεδομένα των πειραμάτων είναι φθίνουσα συνάρτηση. Από αυτήν την καμπύλη για  $N_{5\%}=15$  προκύπτει ο λόγος ανακυκλικής τάσης (cyclic stress ratio) που προκαλεί ρευστοποίηση σε 15 κύκλους φόρτισης και ορίζεται ως ο λόγος αντίστασης σε ρευστοποίηση CRR (cyclic resistance ratio), δηλαδή  $CRR_{15}=CSR_{Dr} (N_{5\%}=15)$ . Απεικονίζεται με αυτόν τον τρόπο μία εναλλακτική καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση στον χώρο  $CRR_{15} - D_r$ , η οποία είναι αύξουσας μορφής.

### 5.2.3 Προετοιμασία σταθεροποιημένου δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εκτελέστηκαν δοκιμές σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 και σταθεροποιημένου μίγματος 85% M31 & 15% D6, με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% και 6% κατά βάρος. Τα σταθεροποιημένα εδαφικά δοκίμια φορτίστηκαν σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες με σκοπό να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και η αντίσταση του σε ρευστοποίηση. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται παρομοιάζει αυτή που ακολουθείται για τα φυσικά εδαφικά δοκίμια. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρής άμμου ή μίγματος αντίστοιχα στο υγρόλυμα και στη συνέχεια συμπυκνώθηκαν με συγκεκριμένο αριθμό κτύπων, ώστε να επιτευχθούν δομές σε διάφορες πυκνότητες. Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε υπό αεροστεγείς συνθήκες για χρονική διάρκεια κατά κανόνα 40 ωρών ή 44 ωρών μετά το πέρας του χρόνου γέλης, για υγρόλυμα περιεκτικότητας CS=10% ή 6%, αντίστοιχα. Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε πάνω σε τροποποιημένη βάση με μεταλλικό δακτύλιο εφοδιασμένο με μεταλλικά πτερύγια, ώστε να αποφευχθεί η αχρήστευση των πορόλιθων από τη γελοποίηση του υγρούλυματος. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται ο τραυματισμός του κοίλου δοκιμίου κατά τη μεταφορά από εξωτερικό καλούπι πάνω στη συσκευή, καθώς τα δοκίμια παρασκευάζονται πάνω στην ίδια τη συσκευή. Επίσης, δεν τοποθετούνται μεμβράνες εκ των υστέρων, οπότε αποφεύγεται και η παγίδευση αέρα μεταξύ δοκιμίου και μεμβράνης. Οι γραμμές της βάσης σφραγίστηκαν και έγινε κατάλληλη τροποποίηση των σωληνώσεων στο καπάκι (topcap) και στη συσκευή. Το καπάκι τοποθετείται μετά την ωρίμανση του δοκιμίου και διαθέτει πορόλιθο με πτερύγια και δύο αντιδιαμετρικούς σωλήνες. Ο ένας σωλήνας συνδέεται με τη γραμμή που οδηγεί στη δεξαμενή απαερωμένου νερού και περνάει από τον αισθητήρα πίεσης και ο δεύτερος σωλήνας συνδέεται με τη δεξαμενή αναρρόφησης. Με αυτήν τη συνδεσμολογία επιτρέπεται η κυκλοφορία απαερωμένου νερού για την απομάκρυνση του αέρα από τις γραμμές, χωρίς το νερό να κυκλοφορήσει μέσα από το δοκίμιο.

Μετά τον καθαρισμό των γραμμών και την πλήρωσή τους με απαερωμένο νερό η κορυφή του δοκιμίου έρχεται σε επαφή με το νερό του πορόλιθου το οποίο πληρώνει

τις σωληνώσεις μέχρι τον αισθητήρα πίεσης (pressure transducer). Με αυτόν τον τρόπο κάθε συστολική αναδιάταξη των κόκκων του εδαφικού υλικού πιέζει και τείνει να εκτοπίσει τη γέλη από τους πόρους, η οποία με τη σειρά της πιέζει το νερό στο άνω σύνορο του δοκιμίου. Αν οι συνθήκες είναι αστράγγιστες ο αισθητήρας καταγράφει μία αύξηση της πίεσης του νερού μέσα στον πορόλιθο και μέσα στις σωληνώσεις, η οποία δίνει πληροφορία για την αναδιάταξη των κόκκων που προκάλεσε συμπίεση της γέλης. Αντίστοιχα, κάθε διαστολική αναδιάταξη των κόκκων του εδαφικού υλικού τείνει να προκαλέσει μία εισροή ρευστού προς το εσωτερικό των πόρων που θέλουν να διογκωθούν, και αν οι συνθήκες είναι αστράγγιστες ο αισθητήρας καταγράφει μία πτώση πίεσης του νερού στον πορόλιθο και μέσα στις σωληνώσεις. Επομένως, η πίεση ρευστού πόρων που καταγράφηκε και στα σταθεροποιημένα εδάφη είναι η πίεση του απαερωμένου νερού που έρχεται σε επαφή με την κορυφή του δοκιμίου και πληρώνει τον πορόλιθο και τις σωληνώσεις μέχρι τον αισθητήρα πίεσης. Η καταγραφή αυτή θεωρείται αξιόπιστη στο βαθμό που έχει επιτευχθεί καλός καθαρισμός των γραμμών από φυσαλίδες αέρα και πλήρωσή τους με απαερωμένο νερό. Επίσης, θεωρείται χρήσιμη διότι δίνει πληροφορίες για τη συστολική ή διαστολική συμπεριφορά του εδάφους, καθώς και για την κατάσταση του στερεού ιστού της γέλης.

Είναι πολύ σημαντικό, επομένως, να γίνεται καταγραφή της αντί – πίεσης των σταθεροποιημένων δοκιμίων, ακόμα και αν η πίεση του νερού που εκδηλώνεται στον μετρητή δεν είναι ταυτόσημη με την πίεση του νερού μέσα στους πόρους της γέλης και του δοκιμίου. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διασπαστικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό ιστό πυριτικών αλυσίδων, ο οποίος περικλείει μία συνεχή υγρή φάση νερού. Η στερεά φάση της γέλης, παρόλο το γεγονός ότι είναι πολύ αραιή (για CS=10% ή 6%), αλληλεπιδρά έντονα με την υγρή φάση, μέσω τριχοειδών δυνάμεων, απορροφητικής – προσροφητικής δράσης και τριβής κατά τη σχετική κίνηση. Όταν ο στερεός σκελετός της γέλης είναι υγιής και καλύπτει κατά το δυνατόν ομοιόμορφα το εδαφικό πορώδες, παρεμποδίζονται οι μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται, για να εκδηλωθεί στον μετρητή η πίεση του υγρού μέσα στο πορώδες του δοκιμίου. Η εκδήλωση της πίεσης γίνεται με υστέρηση. Αντίθετα, ο τραυματισμός του στερεού σκελετού της γέλης, που προκαλείται κυρίως από τη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους, επιτρέπει την άμεση επικοινωνία του υγρού των πόρων με τον μετρητή πίεσης. Η υστέρηση στην εκδήλωση της πίεσης γίνεται μικρότερη, όσο αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.9. Το σχήμα παρουσιάζει την καταγραφή της υπέρ – πίεσης που αναπτύσσεται στο υγρό των πόρων ενός φυσικού και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου, τα οποία υπόκεινται σε αστράγγιστη ανακυκλική στρεπτική διάτμηση. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο υπάρχει μία υστέρηση της εκδήλωσης της πίεσης στους πρώτους κύκλους φόρτισης, η οποία περιορίζεται στους επόμενους κύκλους.

#### 5.2.4 Φόρτιση σταθεροποιημένου δοκιμίου ανακυκλικής φόρτισης στρεπτικής διάτμησης

Τα σταθεροποιημένα εδαφικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε ισότροπη στερεοποίηση διάρκειας τουλάχιστον 90 min για να επιτραπεί στην παχύρρευστη γέλη να ολοκληρώσει την αργή κίνησή της από τους πόρους του δοκιμίου προς τη δεξαμενή εκτόνωσης. Η πίεση στη δεξαμενή εκτόνωσης είναι ίση με την ατμοσφαιρική, ενώ το νερό που ωθείται από την εξερχόμενη γέλη δε διέρχεται από την προχοΐδα μέτρησης των μεταβολών όγκου (volume change burette), διότι κάτι τέτοιο απαιτεί τροποποίηση των συνδέσεων των σωληνώσεων της συσκευής που θα περιόριζε τη λειτουργικότητα της σε δοκιμές φυσικών εδαφών. Η πίεση περισφιγξης τείνει να προκαλέσει μία αναδιάταξη των κόκκων με ταυτόχρονο εκτοπισμό κάποιου όγκου γέλης από τους πόρους. Η πεπιεσμένη γέλη θέλει να κερδίσει όγκο εις βάρος του νερού που βρίσκεται σε πίεση μίας ατμόσφαιρας και σπρώχνει το νερό, το οποίο δεδομένου ότι δεν μπορεί να κινηθεί προς τη δεξαμενή εκτόνωσης όσο η βάνα είναι κλειστή, αναπτύσσει πίεση. Αυτή η αργή ανάπτυξη πίεσης στο νερό του πορόλιθου και των σωληνώσεων ολοκληρώνεται σε χρονικό διάστημα της τάξεως των 10-20 ωρών, με την τελική τιμή της (οριζόντιο πλάτο) να υποδηλώνει ένα βαθμό κορεσμού της τάξεως  $B > 0.90$ . Για παράδειγμα, μία αύξηση της πίεσης της κυψέλης ίση με 300 kPa οδηγεί μακροχρόνια σε ανάπτυξη πίεσης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, στο νερό των σωληνώσεων ίση με 275 kPa, δηλαδή  $B = 0.92$ . Στη συνέχεια ανοίγει η βάνα εκροής και ακολουθεί η στερεοποίηση του δοκιμίου για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 90 min. Η διαδικασία εκροής είναι ταχύτερη από τη διαδικασία ανάπτυξης πίεσης στο νερό των σωληνώσεων διότι το κινητήριο δυναμικό πίεσης είναι συνεχώς 300 kPa. Τα μεγέθη που σχετίζονται με τη στερεοποίηση των φυσικών και των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι ίδιας τάξης, με το φαινόμενο να ολοκληρώνεται ταχύτατα στην περίπτωση της φυσικής άμμου.

Μετά την στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων ακολούθησε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες, διατηρώντας την πίεση της κυψέλης σταθερή και την αξονική δύναμη του εμβόλου σταθερή και ίση με μηδέν. Η πίεση της κυψέλης μέσα και έξω από τον κοίλο κύλινδρο ήταν κοινή. Επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με συχνότητα  $f = 0.10$  Hz και ημιεύρος  $\Delta\tau_{\theta z}$  (έλεγχος τάσεων). Τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη ήταν τα ίδια όπως και στην περίπτωση των φυσικών δοκιμίων και παρήχθησαν οι αντίστοιχες καμπύλες CSR - N και CRR -  $D_r$ . Ο μετρητής της αντί - πίεσης βρίσκεται εκτός δοκιμίου και γι' αυτό η πίεση του υγρού των πόρων αργά να εκδηλωθεί. Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η ανάπτυξη υπέρ - πίεσης του υγρού πόρων σε συνάρτηση με το χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31 (μπλε καμπύλη) και ενός σταθεροποιημένου (CS=10%) δοκιμίου άμμου M31 (κόκκινη καμπύλη). Τα δοκίμια είχαν σχετικές πυκνότητες  $D_r = 42.3\%$  και  $38.0\%$  αντίστοιχα, και ίδιους λόγους ανακυκλικής τάσης CSR=0.25. Παρατηρούμε ότι, το φυσικό δοκίμιο με νερό στους πόρους αναπτύσσει υπέρ - πίεση αμέσως μετά την έναρξη της διάτμησης, ενώ το σταθεροποιημένο δοκίμιο με γέλη στους πόρους παρουσιάζει μία υστέρηση μερικών κύκλων στην εκδήλωση της υπέρ - πίεσης. Στη συνέχεια όμως η αύξηση πίεσης είναι ραγδαία και η καμπύλη είναι παρόμοιας μορφής με την καμπύλη του φυσικού

δοκιμίου. Η πίεση του ρευστού των πόρων, όπως έχει ήδη επεξηγηθεί, μετράται στο απαερωμένο νερό που πληρώνει τον πορόλιθο και τις σωληνώσεις μέχρι τον μετρητή πίεσης αλλά περιγράφει το πόσο συμπιεσμένη είναι η γέλη μέσα στους πόρους του εδαφικού δοκιμίου. Όπως αποδείχτηκε ανωτέρω, κάθε μεταβολή της μετρούμενης πίεσης ρευστού πόρων οφείλεται στην κίνηση της γέλης που θέλει να εξέλθει από τους πόρους που συστέλλονται ή να υποχωρήσει μέσα στους πόρους που διαστέλλονται. Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρηθεί ότι κατά τη διάτμηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων, η πίεση ρευστού των πόρων μετά τους πρώτους κύκλους αναπτύσσεται ταχέως, υποδηλώνοντας μία ευκολία στην κίνηση της γέλης. Η γέλη πυριτίας αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από νερό, το οποίο συγκρατείται από τον στερεό πυριτικό σκελετό. Η διάτμηση κάνει πιο υδαρή και ρευστή τη γέλη, με αποτέλεσμα οι μεταβολές πίεσης να εκδηλώνονται ταχύτερα.

Παρατηρούμε ότι, το φυσικό δοκίμιο με νερό στους πόρους αναπτύσσει υπέρ - πίεση αμέσως μετά την έναρξη της διάτμησης, ενώ το σταθεροποιημένο δοκίμιο με γέλη στους πόρους παρουσιάζει μία υστέρηση μερικών κύκλων στην εκδήλωση της υπέρ - πίεσης. Εκφράζουμε την πεποίθηση ότι πρόκειται για υποβαθμισμένη εκδήλωση της πραγματικής πίεσης και όχι για μειωμένη πραγματική πίεση, όπως ακριβώς συμβαίνει στην ισότροπη συμπίεση του δοκιμίου. Αν η πραγματική πίεση στο υγρό των πόρων ήταν μικρή, όταν η πίεση της κυψέλης αυξήθηκε στα 300 kPa, τότε η ισορροπία δυνάμεων απαιτεί το φορτίο να το έχει παραλάβει ο εδαφικός σκελετός. Ας δεχτούμε ότι η γέλη είναι όντως συμπιεστή (Towhata) και επέτρεψε στους εδαφικούς κόκκους να αναδιαταχθούν, ώστε να παραλάβουν το φορτίο. Σε αυτήν την περίπτωση αδυνατούμε να εξηγήσουμε γιατί με την πάροδο του χρόνου το φορτίο περίσφιγξης μεταβιβάζεται από τον εδαφικό σκελετό στην υγρή φάση, η οποία αυξάνει την πίεσή της. Ούτε μπορούμε να αιτιολογήσουμε γιατί η συμπιεστή γέλη στο εδαφικό πορώδες αποκτά μακροχρόνια τόσο υψηλή πίεση. Άλλος ένας λόγος που ενισχύει την τοποθέτηση ότι η πίεση του υγρού των πόρων είναι υψηλή, αλλά δεν εκδηλώνεται αμέσως στον μετρητή, είναι οι μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις του σταθεροποιημένου εδάφους, στους πρώτους κύκλους, κατά τους οποίους η πίεση υγρού που καταγράφεται είναι χαμηλή.

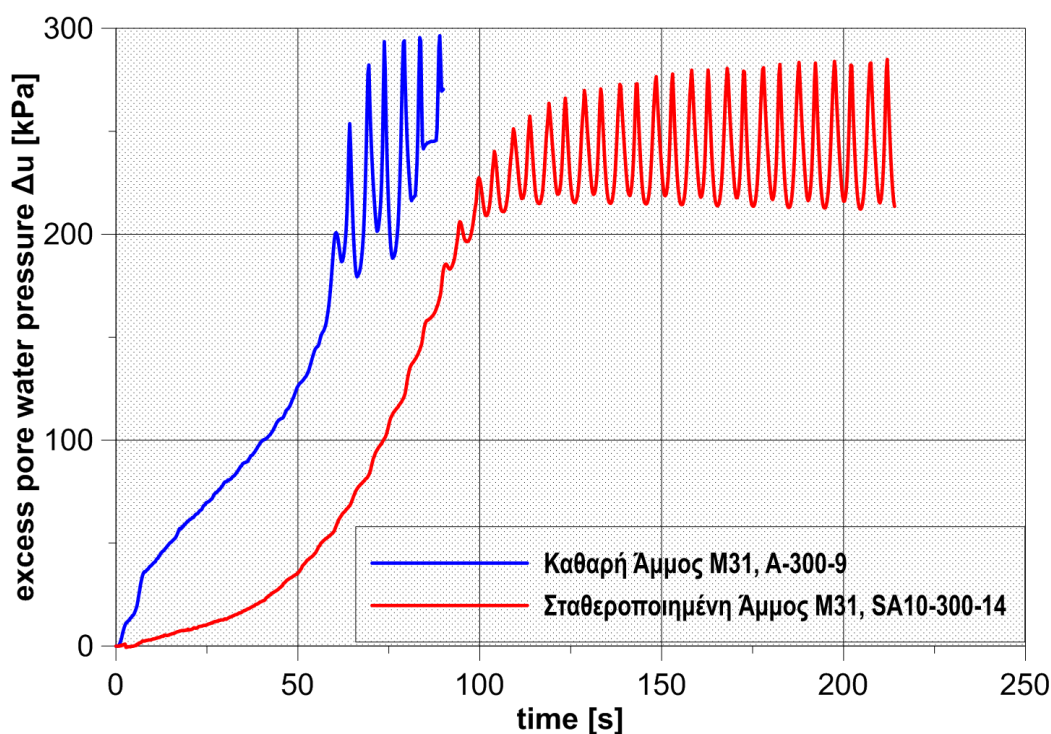
Το Σχήμα 5.10 παρουσιάζει την εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων ενός φυσικού και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου, που υποβάλλονται σε ανακυκλική διάτμηση. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, παρά τις μεγάλες παραμορφώσεις και την υψηλή πίεση πόρων στους προχωρημένους κύκλους φόρτισης, δεν παρουσιάζει την κλασική κατάρρευση λόγω ρευστοποίησης. Η ευεργετική δράση της γέλης φαίνεται να έγκειται στο γεγονός ότι ενθυλακώνει και συγκρατεί σε μία σταθερή δομή τους κόκκους της άμμου, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται πλήρης κατάρρευση του εδαφικού σκελετού. Η ευεργετική αυτή δράση παραμένει ακόμα και όταν η διάτμηση καταστρέφει μεγάλο μέρος των δεσμών του ιστού της γέλης, αφού κανένα σταθεροποιημένο δοκίμιο δεν παρουσίασε πλήρη κατάρρευση, σε όσους κύκλους και αν φορτίστηκε.

Το Σχήμα 5.10 παρουσιάζει, επίσης, τις διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα δύο δοκίμια. Παρατηρούμε ότι το σταθεροποιημένο έδαφος, σε αντίθεση με το φυσικό, αναπτύσσει μεγάλες παραμορφώσεις από τους πρώτους κίονες κύκλους, όταν υπόκειται σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με έλεγχο τάσεων (stress control). Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία (Gallagher 2000 , Gallagher and Mitchell, Kodaka et al.), στην οποία

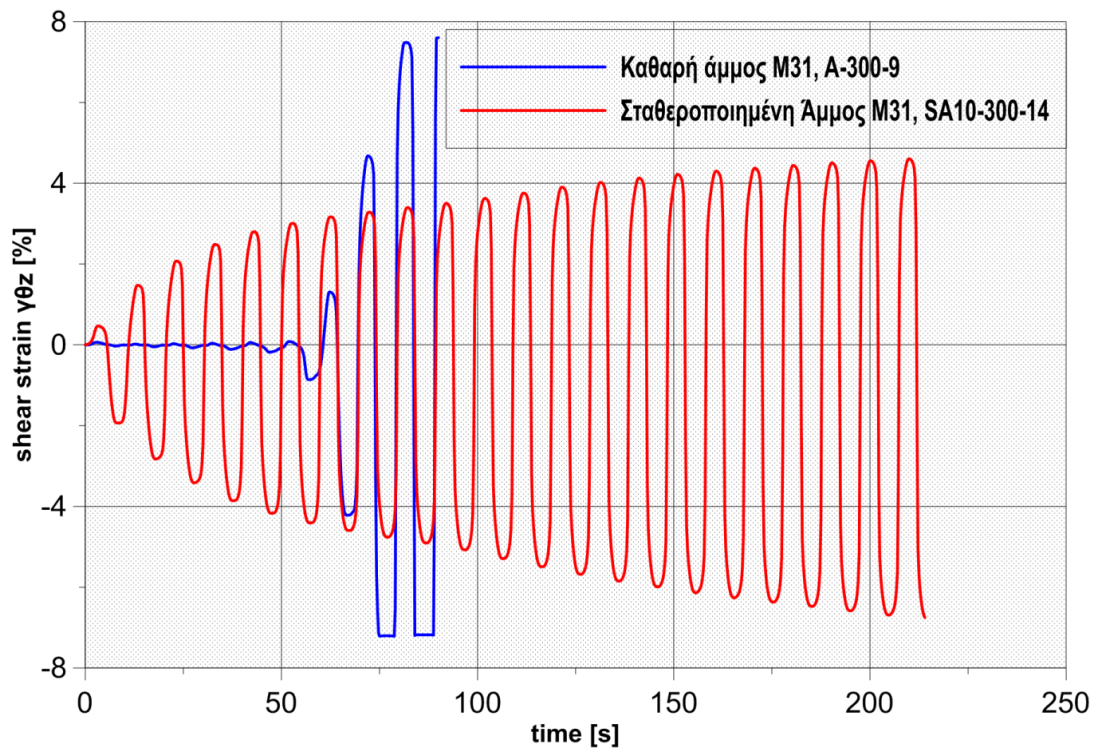


αναφέρεται ότι το σταθεροποιημένο έδαφος παρουσιάζει πολύ μικρές παραμορφώσεις σε σχέση με το φυσικό.

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε συνάρτηση με το χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31 και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου CS=10% άμμου M31. Όπως φαίνεται από στο Σχήμα 5.10 το φυσικό έδαφος στους 6 πρώτους κύκλους διατηρεί εύρος διατμητικής παραμόρφωσης μικρότερο από 1%, ενώ στον όγδοο κύκλο οι παραμορφώσεις αυξάνουν απότομα και το δοκίμιο καταρρέει πριν ολοκληρωθεί ο δέκατος κύκλος. Οφείλουμε να αναρωτηθούμε ποιος είναι ο λόγος που το σταθεροποιημένο δοκίμιο δεν εμφανίζει στους πρώτους κύκλους δυσμησία ανάλογη με αυτή του φυσικού δοκιμίου. Η πιθανή καταστροφή των δεσμών της γέλης κατά τη στερεοποίηση θα αναιρούσε μερικώς τα ευεργετικά αποτελέσματα της ενθυλάκωσης των κόκκων. Το σταθεροποιημένο έδαφος σε αυτήν την περίπτωση θα εμφάνιζε παραμορφώσεις που θα εξελίσσονταν παρόμοια με το φυσικό έδαφος. Οι αυξημένες παραμορφώσεις από τους πρώτους κύκλους, επομένως, δεν δικαιολογούνται από την καταστροφή των δεσμών. Αντιθέτως, μάλιστα, έχουμε την πεποίθηση ότι σχετίζονται με τον μηχανισμό δημιουργίας δεσμών.



**Σχήμα 5.9.** Ανάπτυξη υπέρ - πίεσης ρευστού πόρων σε συνάρτηση με τον χρόνο  $\Delta u$  κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31, σχετικής πυκνότητας  $D_r=42.3\%$ , με λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR=0.25$  (μπλε καμπύλη) και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου CS=10% άμμου M31, ηλικίας ωρίμανσης 115 ωρών, σχετικής πυκνότητας  $D_r=38.0\%$ , με λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR=0.25$  (κόκκινη καμπύλη).



**Σχήμα 5.10.** Εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31, σχετικής πυκνότητας  $D_r=42.3\%$ , με λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR=0.25$  (μπλε καμπύλη) και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου  $CS=10\%$  άμμου M31, ηλικίας ωρίμανσης 115 ωρών, σχετικής πυκνότητας  $D_r=38.0\%$ , με λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR=0.25$  (κόκκινη καμπύλη).

### 5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η δεύτερη κύρια σειρά πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής που πραγματοποιήθηκε στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αυτή η σειρά πειραμάτων περιλαμβάνει δοκιμές ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης. Έχουμε κατατάξει τις δοκιμές σε πέντε κατηγορίες όπως και στην πρώτη κύρια σειρά πειραμάτων, αυτή των μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι δοκιμές ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσική άμμο M31, ενώ στη δεύτερη κατατάσσουμε τις δοκιμές που εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένη άμμο M31. Στην τρίτη και στην τέταρτη κατηγορία κατατάσσουμε τις δοκιμές ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια ιλυώδους άμμου M31-D6 αντίστοιχα (85% κατά βάρος άμμος M31 15% w.t ιλύς D6). Στην πέμπτη κατηγορία ανήκουν οι ενδεικτικές δοκιμές που εκτελέστηκαν υπό στραγγιζόμενες συνθήκες σε φυσική άμμο M31. Στον Πίνακα 5.2. απεικονίζεται η κατάταξη των πειραμάτων στις 5 κατηγορίες.

Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης			
1 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Ανακυκλικές Δοκιμές σε φυσική άμμο M31	A-300-4, A-1000-1, A-1500-2, A-2000-3	
2 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Ανακυκλικές Δοκιμές σε σταθεροποιημένη άμμο M31	Ποσοστό Πυριτίας 6%	Ποσοστό Πυριτίας 10%
		SA6-300-8, SA6-1000-5, SA6-1500-6, SA6-2000-7	SA10-300-4, SA10-1000-1, SA10-1500-2, SA10-2000-3
3 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Ανακυκλικές Δοκιμές σε ιλυώδη άμμο M31-D6	B-300-4, B-1000-1, B-1500-2	
4 <sup>η</sup> Κατηγορία	Αστράγγιστες Ανακυκλικές Δοκιμές σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο M31-D6	Ποσοστό Πυριτίας 6%	Ποσοστό Πυριτίας 10%
		SB6-1500-10	SB10-1500-7
5 <sup>η</sup> Κατηγορία	Στραγγιζόμενες Ανακυκλικές Δοκιμές σε φυσική άμμο M31	AD-300-2, AD-300-3, AD-300-4, AD-1000-1	

**Πίνακας 5.2.**

Ο Πίνακας 5.2. περιέχει κάθε δοκιμή και τον κωδικό της. Ο κωδικός A-300-4 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή μη σταθεροποιημένης, καθαρής άμμου M31, με αρχική ισότροπη ενεργό τάση  $p_i'=300$  kPa και με αριθμό δοκιμής 4. Ο κωδικός B-300-4 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή μη σταθεροποιημένης, ιλυώδους άμμου, με αρχική ισότροπη ενεργό τάση  $p_i'=300$  kPa και με αριθμό δοκιμής 5. Οι κωδικοί SA6 και SA10 αφορούν τα πειράματα που εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένα εδαφικά δοκίμια άμμου με ποσοστό πυριτίας CS=6 και 10% αντίστοιχα. Ομοίως για τους κωδικούς SB6 και SB10 που αναφέρονται στη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο. Τέλος, ο κωδικός AD αναφέρεται στις στραγγιζόμενες δοκιμές σε άμμο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πειράματα αυτά θεωρήθηκε ότι η άμμος M31 είναι μια ομοιόμορφη μέσης διαμέτρου  $D_{50}=0.31$  mm, ενώ η υλός D6 είναι πολύ λεπτότερο υλικό μέσης διαμέτρου  $D_{50}=0.06$  mm με το 80% των κόκκων κατά βάρος να είναι μικρότερο των 0.074 mm. Επίσης, στη σειρά αυτή τα διάφορα δοκίμια έχουν στερεοποιηθεί ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση  $p_i'=300$  kPa. Μετά από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κυρίως οι καμπύλες ρευστοποίησης και μερικά ενδεικτικά διαγράμματα τα οποία περιγράφουν με λεπτομέρεια την συμπεριφορά των δοκιμίων. Η αρχική ρευστοποίηση, η κατάσταση δηλαδή κατά την οποία η υπερπίεση των πόρων  $\Delta u$  αποκτά τιμή περίπου ίση με την αρχική μέση ολική τάση  $p$ , σηματοδοτεί την έναρξη δραστηκών αλλαγών στην συμπεριφορά των δοκιμίων με κύριο χαρακτηριστικό την ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Στην δική μας περίπτωση, θεωρήθηκε ότι η ρευστοποίηση επέρχεται όταν το δοκίμιο αναπτύξει εύρος διατμητικής παραμόρφωσης 5% ( $\gamma_{DA}=5\%$ ) και για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο τα αποτελέσματα των δοκιμών να συνοψιστούν σε ένα διάγραμμα που θα παρουσιάζεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης  $N$  (5%), ως συνάρτηση του λόγου  $\tau_{\theta z}/p_i'$  (CSR), δηλαδή του λόγου της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση. Αυτή είναι μια κλασική μέθοδος προσδιορισμού της αντίστασης σε ρευστοποίηση ενός εδαφικού υλικού στο εργαστήριο.

### 5.3.1 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα μη σταθεροποιημένα εδάφη

Οι αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια άμμου M31 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Ο Πίνακας περιέχει τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμής και τον κωδικό της. Τα δοκίμια χωρίζονται με βάση την πυκνότητά τους σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν δοκίμια με σχετική πυκνότητα στο εύρος  $D_r=25.3 - 29.3\%$  και δείκτη πόρων  $e=0.712 - 0.724$ , και στη δεύτερη ανήκουν τα δοκίμια με  $D_r=41.3 - 42.6\%$  και  $e=0.672 - 0.676$ . Στα δοκίμια που ανήκουν στην ίδια κατηγορία πυκνότητας επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με διάφορα πλάτη  $\Delta\tau_{\theta z}$  και προέκυψαν λόγοι ανακυκλικής τάσης στο εύρος  $CSR=0.12 - 0.25$ . Το Σχήμα 5.11 παρουσιάζει τις καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης  $N_{5\%}$  που απαιτείται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ , για τις δύο κατηγορίες πυκνοτήτων. Οι καμπύλες είναι φθίνουσες και μετατοπίζονται προς τα δεξιά όταν η σχετική πυκνότητα αυξάνεται. Αυτό συνεπάγεται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος CSR τόσο λιγότεροι κύκλοι φόρτισης απαιτούνται για τη ρευστοποίηση, και για δεδομένο λόγο CSR η ρευστοποίηση πυκνότερων εδαφών απαιτεί περισσότερους κύκλους. Τα Σχήματα 5.12 και 5.13 απεικονίζουν για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων ξεχωριστά τις καμπύλες CSR –  $N$ , όπου  $N$  είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Παρατηρούμε ότι οι 3 καμπύλες ταυτίζονται πρακτικά για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων, κάτι που σημαίνει ότι η μη σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει στον

ίδιο κύκλο παραμορφώσεις  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ , δηλαδή το δοκίμιο καταρρέει απότομα.

Οι αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια ιλυώδους άμμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Ο Πίνακας περιέχει τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμής και τον κωδικό της. Ο κωδικός B-300-2 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή μη σταθεροποιημένης, ιλυώδους άμμου (κατηγορία δοκιμών B), με αρχική ισότροπη ενεργό τάση  $p_i'=300$  kPa και με αριθμό δοκιμής 2. Τα δοκίμια χωρίζονται με βάση την πυκνότητά τους σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν δοκίμια με σχετική πυκνότητα στο εύρος  $D_r=28.0 - 37.1\%$  και δείκτη πόρων  $e=0.620 - 0.652$ , και στη δεύτερη ανήκουν τα δοκίμια με  $D_r=45.4 - 51.1\%$  και  $e=0.571 - 0.591$ . Στα δοκίμια που ανήκουν στην ίδια κατηγορία πυκνότητας επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με διάφορα πλάτη  $\Delta\tau_{\theta z}$  και προέκυψαν λόγοι ανακυκλικής τάσης στο εύρος  $CSR=0.10 - 0.24$ . Το σχήμα 5.14 παρουσιάζει τις καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης  $N_{5\%}$  που απαιτείται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ , για τις δύο κατηγορίες πυκνοτήτων. Η αύξηση της πυκνότητας μετατοπίζει τις καμπύλες προς τα πάνω και δεξιά. Τα σχήματα 5.15 και 5.16 απεικονίζουν για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων ξεχωριστά τις καμπύλες  $CSR - N$ , όπου  $N$  είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Παρατηρούμε ότι οι 3 καμπύλες ταυτίζονται πρακτικά για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων, κάτι που σημαίνει ότι η μη σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος αναπτύσσει στον ίδιο κύκλο παραμορφώσεις  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ , δηλαδή το δοκίμιο καταρρέει απότομα. Το σχήμα 5.17 απεικονίζει την καμπύλη του λόγου αντίστασης σε ρευστοποίηση  $CRR_{15}$  σε συνάρτηση με τη σχετική πυκνότητα  $D_r$  για τη φυσική ιλυώδη άμμο.

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται συχνά στα εργαστήρια είναι το γεγονός ότι καθώς παρασκευάζουμε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο, δεν επιτυγχάνουμε πάντα τον επιθυμητό δείκτη πόρων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα δοκίμια να διαφέρουν έστω και ελάχιστα ως προς τον δείκτη πόρων και αναπόφευκτα να έχουμε σφάλματα στις συγκρίσεις. Για τον λόγο αυτό στα παραπάνω πειράματα έγινε προσπάθεια κανονικοποίησής τους ώστε να απαλείψουμε αυτό το σφάλμα κατά το δυνατό. Ακόμη, όπως θα δούμε και στην συνέχεια με εφαρμογή της κανονικοποίησης, έχοντας απαλείψει την επίδραση του δείκτη πόρων, καθίσταται δυνατό να συμπεριληφθούν στις συγκρίσεις πειράματα τα οποία έχουν απόκλιση ως προς την πυκνότητα, και να εμφανιστεί μια πιο ξεκάθαρη εικόνα ως προς την συνολική συμπεριφορά των δοκιμίων.

Στην δική μας περίπτωση, αρχικά κανονικοποιήσαμε τα παραπάνω αποτελέσματα ως προς την συνάρτηση  $f(e)=e^{-1.3}$  (LoPresti et al. 1997) όπου  $e$  είναι ο δείκτης πόρων των δοκιμίων πριν από την διάτμηση, με τον τύπο  $f(e)=(2.17-e)^2 / (1+e)$  και με τον τύπο  $f(e)=e^{-2}$ . Παρατηρώντας τα Σχήματα 5.37 έως 5.48 που προέκυψαν μετά από την κανονικοποίηση παρατηρούμε ότι τόσο στα δοκίμια της καθαρής άμμου, όσο και στα δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού  $10\%$ , οι καμπύλες πλησιάζουν αρκετά με αποτέλεσμα ο ρόλος της πυκνότητας να μειώνεται σημαντικά. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι αυτού του είδους η κανονικοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην καθνή άμμο, όσο και σε μίγματα άμμου-ιλύος ούτως ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν πειράματα τα οποία έχουν απόκλιση ως προς την πυκνότητα και έτσι με μεγαλύτερο αριθμό πειραμάτων να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για την συνολική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών.

Στο σχήμα 5.39 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες CSR / f(e) σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων N<sub>5%</sub>, για τη φυσική άμμο και τη φυσική ιλυώδη άμμο.

<b>Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης</b>			
<b>ΚΑΘΑΡΗ ΑΜΜΟΣ M31 CS=0%</b>			
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr= 25,3-29,3% e=0,712-0,724	A-300-2	Dr=26,7	e=0,720
	A-300-3	Dr=25,3	e=0,724
	A-300-4	Dr=28,0	e=0,716
	A-300-6	Dr=29,0	e=0,713
	A-300-8	Dr=29,3	e=0,712
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr= 41,3-42,6% e=0,672-0,676	A-300-5	Dr=41,3	e=0,676
	A-300-7	Dr=42,6	e=0,672
	A-300-9	Dr=42,3	e=0,673
<b>ΚΑΘΑΡΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ CS=0%</b>			
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr= 28,0-37,1% e=0,620-0,652	B-300-1	Dr=35,2	e=0,627
	B-300-2	Dr=28,0	e=0,652
	B-300-3	Dr=36,3	e=0,623
	B-300-7	Dr=37,1	e=0,620
	B-300-9	Dr=37,1	e=0,620
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr= 45,4-51,1% e=0,571-0,591	B-300-5	Dr=50,9	e=0,572
	B-300-6	Dr=45,4	e=0,591
	B-300-8	Dr=48	e=0,582
	B-300-10	Dr=47,4	e=0,584
	B-300-11	Dr=51,1	e=0,571

**Πίνακας 5.3.**

### 5.3.2 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα σταθεροποιημένα εδάφη

Οι αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Τα δοκίμια με CS=10% χωρίζονται με βάση την πυκνότητά τους σε τέσσερις κατηγορίες με σχετική πυκνότητα και δείκτη πόρων στο εύρος  $D_r=8.7 - 11.3\%$  και  $e=0.766 - 0.774$  για την πρώτη,  $D_r=12.3 - 16.7\%$  και  $e=0.750 - 0.763$  για τη δεύτερη,  $D_r=25.0 - 28.3\%$  και  $e=0.715 - 0.725$  για την τρίτη και  $D_r=33.3 - 38.0\%$  και  $e=0.686 - 0.700$  για την τέταρτη. Το Σχήμα 5.18 παρουσιάζει τις καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης  $N_{5\%}$  που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ , για τις τέσσερις κατηγορίες πυκνοτήτων. Παρατηρούμε ότι, για τις δύο καμπύλες των χαμηλότερων πυκνοτήτων υπάρχει σαφής διαχωρισμός, με την καμπύλη της υψηλότερης πυκνότητας να μετατοπίζεται προς τα δεξιά, ενώ οι δύο καμπύλες των υψηλότερων πυκνοτήτων πρακτικά ταυτίζονται. Η δέσμη των τεσσάρων καμπυλών συγκλίνει για μικρούς λόγους CSR και υψηλούς αριθμούς κύκλων  $N_{5\%}$ . Τα Σχήματα 5.19 έως 5.22 απεικονίζουν για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων ξεχωριστά τις καμπύλες CSR – N, όπου N είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}= 1\%, 2.5\%$  και  $5\%$ . Παρατηρούμε ότι οι 3 καμπύλες διαχωρίζονται για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων, δηλαδή το δοκίμιο αναπτύσσει προοδευτικά παραμόρφωση με αυξανόμενο εύρος.

Το σχήμα 5.23 παρουσιάζει την καμπύλη του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης  $N_{5\%}$  για τη σταθεροποιημένη CS=6% άμμο. Το σχήμα 5.24 απεικονίζει τις καμπύλες CSR – N για τη σταθεροποιημένη CS=6% άμμο, όπου N είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}=1\%, 2.5\%$  και  $5\%$ . Στο σχήμα 5.31 γίνεται η σύγκριση των καμπυλών CSR –  $N_{5\%}$  για σταθεροποιημένη άμμο με CS=6% και 10%. Το γεγονός ότι η καμπύλη για CS=6% βρίσκεται ελαφρώς κάτω από αυτήν για CS=10%, παρόλο που αφορά μεγαλύτερες σχετικές πυκνότητες, υποδηλώνει ότι η αύξηση του ποσοστού πυριτίας από 6% σε 10% έχει ευεργετική επίδραση στην αντίσταση σε ρευστοποίηση.

Τα Σχήματα 5.29 και 5.30 παρουσιάζουν τις καμπύλες CSR –  $N_{5\%}$  για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα εδάφη παρόμοιων πυκνοτήτων. Στο εύρος πυκνοτήτων  $D_r= 25.0 - 28.0\%$  η καμπύλη των σταθεροποιημένων εδαφών είναι δεξιότερα της καμπύλης των μη σταθεροποιημένων, δηλαδή για δεδομένο λόγο CSR απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να αναπτυχθεί παραμόρφωση  $\gamma_{DA}=5\%$  σε ένα σταθεροποιημένο δοκίμιο. Η εικόνα αντιστρέφεται για τις καμπύλες στο εύρος πυκνοτήτων  $D_r= 33.3 - 42.6\%$ , γεγονός που μπορεί να οφείλεται στις ελαφρώς μικρότερες πυκνότητες των σταθεροποιημένων εδαφών. Τα Σχήματα 5.33 και 5.34 παρουσιάζουν μία εναλλαγή των θέσεων των καμπυλών του Σχήματος 5.29, όταν στον οριζόντιο άξονα τοποθετηθεί το πλήθος των κύκλων που απαιτούνται για

ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}=1\%$  και  $2.5\%$ . Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι τα σταθεροποιημένα εδάφη είναι ιδιαίτερα ευπαραμόρφωτα και εκδηλώνουν από τους πρώτους κιόλας κύκλους υψηλές παραμορφώσεις, που αυξάνονται προοδευτικά. Στο Σχήμα 5.10 μπορεί να γίνει φανερό ότι στο σταθεροποιημένο έδαφος απουσιάζουν οι πρώτοι κύκλοι μικρής παραμόρφωσης, οι οποίοι παρατηρούνται στο φυσικό έδαφος. Το σταθεροποιημένο έδαφος, μπορεί μεν να εκδηλώνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το φυσικό στους πρώτους κύκλους φόρτισης, συνεχίζει όμως να διατηρεί τη δομή του χωρίς να καταρρέει, για όσους κύκλους και αν συνεχιστεί η φόρτιση. Οι δοκιμές ουσιαστικά τερματίζονται διότι τα μετρητικά όργανα φτάνουν στα όρια τους. Το Σχήμα 5.35 απεικονίζει τις καμπύλες του λόγου αντίστασης σε ρευστοποίηση  $CRR_{15}$  σε συνάρτηση με τη σχετική πυκνότητα  $D_r$  για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα εδάφη. Η καμπύλη για τα σταθεροποιημένα εδάφη είναι ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα αριστερά σε σχέση με την καμπύλη για τα φυσικά, δηλαδή το σταθεροποιημένο έδαφος εμφανίζει τον ίδιο λόγο αντίστασης σε ελαφρώς μικρότερη πυκνότητα από ότι το φυσικό.

Οι αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Ο Πίνακας περιέχει τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμής και τον κωδικό της. Το σχήμα 5.25 παρουσιάζει τις καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης  $N_{5\%}$  που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ , για σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο. Το σχήμα 5.26 απεικονίζει τις καμπύλες CSR – N για τη σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο ( $f_c=10\%$ ), όπου N είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος, σε αντίθεση με τη φυσική ιλυώδη άμμο, αναπτύσσει προοδευτικά παραμόρφωση με αυξανόμενο εύρος. Η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτήν της σταθεροποιημένης άμμου. Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο εδαφικών υλικών έγκειται στο γεγονός ότι η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος κατά κανόνα δεν εμφανίζει στους πρώτους κύκλους φόρτισης μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τη φυσική ιλυώδη άμμο. Αντίθετα, όπως υποδεικνύουν τα σχήματα 5.33 και 5.34, η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει πιο γρήγορα από τη φυσική παραμορφώσεις  $\gamma_{DA}=1\%$  και  $2.5\%$ . Στα σχήματα 5.49 και 5.50 απεικονίζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται με την πάροδο του χρόνου, σε φυσική και σε σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο, για ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης CSR και παραπλήσιους δείκτες πόρων e. Η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους είναι σαφώς βελτιωμένη σε σύγκριση με το φυσικό, καθώς οι παραμορφώσεις είναι συνεχώς μικρότερες και αυξάνονται αργά και προοδευτικά. Στα σχήματα 5.51, 5.52 και 5.53 παρουσιάζεται συγκριτικά η συμπεριφορά σε διάγραμμα τάσεων  $\tau_{\theta z}$  – παραμορφώσεων  $\gamma_{\theta z}$ , σε διάγραμμα τασικής όδευσης  $\tau_{\theta z} - p'$  και σε διάγραμμα υπερπίεσης υγρού πόρων  $\Delta u - \text{χρόνου } t$ .

Το σχήμα 5.27 παρουσιάζει την καμπύλη του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης  $N_{5\%}$  για τη σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  ιλυώδη άμμο. Το σχήμα 5.28 απεικονίζει τις καμπύλες CSR – N για τη σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  ιλυώδη άμμο, όπου N είναι το πλήθος των κύκλων

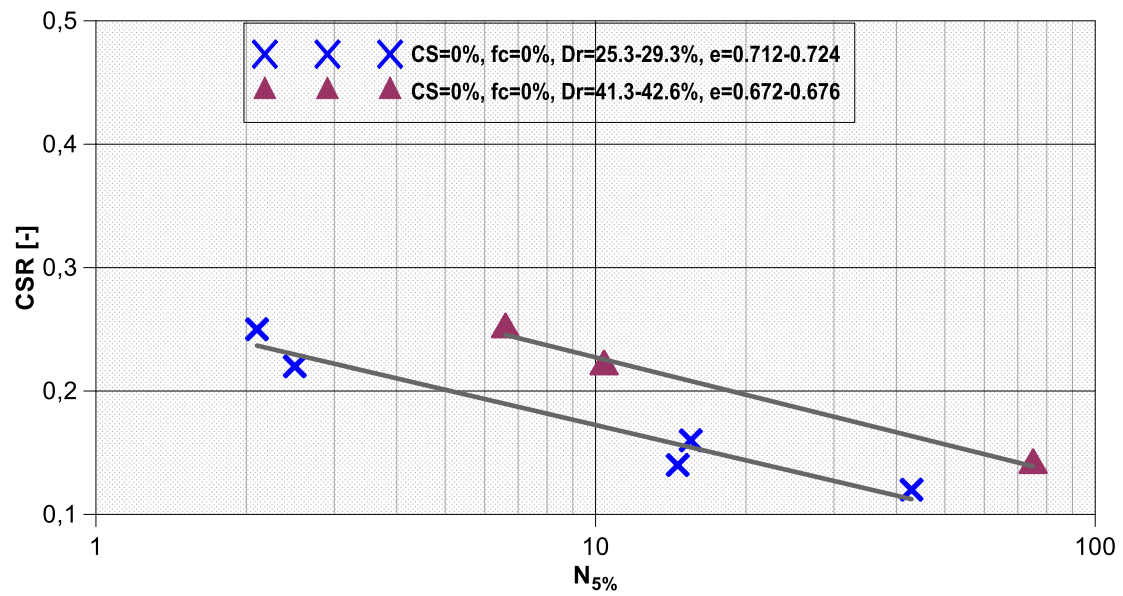


φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Στο σχήμα 5.36 γίνεται η σύγκριση των καμπύλων CSR –  $N_{5\%}$  για σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο με CS=6% και 10%. Το γεγονός ότι η καμπύλη για CS=6% βρίσκεται ελαφρώς κάτω από αυτήν για CS=10%, παρόλο που αφορά μεγαλύτερες σχετικές πυκνότητες, υποδηλώνει ότι η αύξηση του ποσοστού πυριτίας από 6% σε 10% έχει ευεργετική επίδραση στην αντίσταση σε ρευστοποίηση. Στα σχήματα 5.37 και 5.38 γίνεται η σύγκριση των κανονικοποιημένων λόγων ανακυκλικής τάσης CSR /  $f(e)$  σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων  $N_{5\%}$  για τη φυσική και σταθεροποιημένη με CS=6% και 10% άμμο, καθώς και για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη με CS=6% και 10% ιλυώδη άμμο ( $f_c=10\%$ ). Οι τρεις καμπύλες για την άμμο δεν φαίνεται να διαχωρίζονται αισθητά, ενώ αντίθετα για την ιλυώδη άμμο το σταθεροποιημένο με CS=10% έδαφος έχει μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση από το σταθεροποιημένο με CS=6%, το οποίο έχει μεγαλύτερη αντίσταση από το φυσικό.

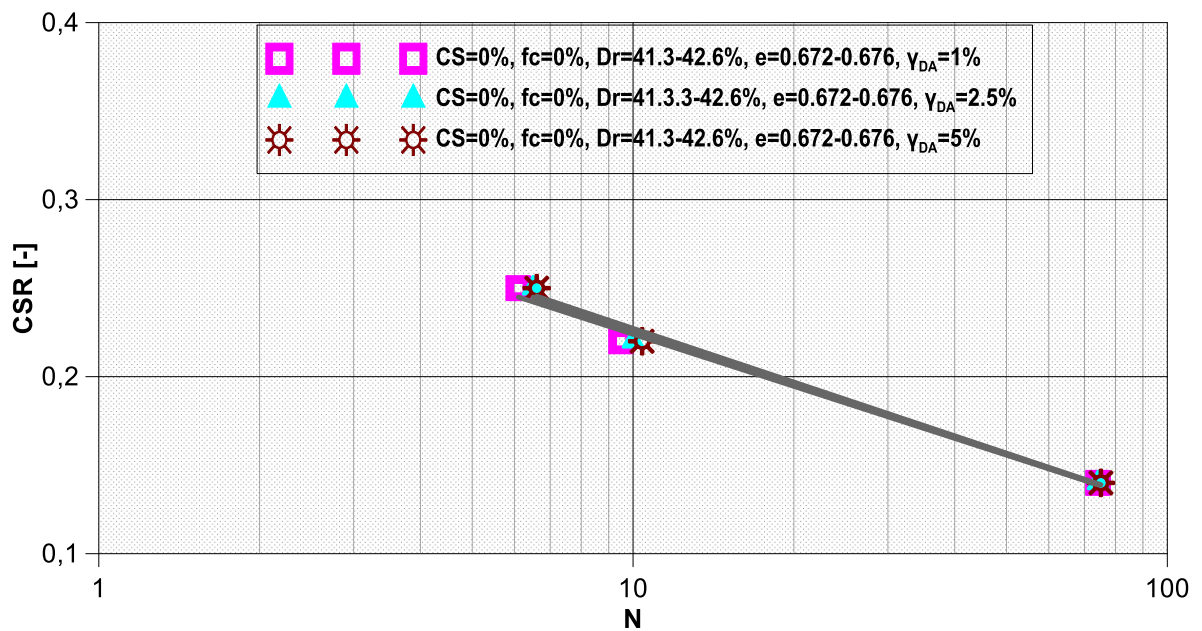
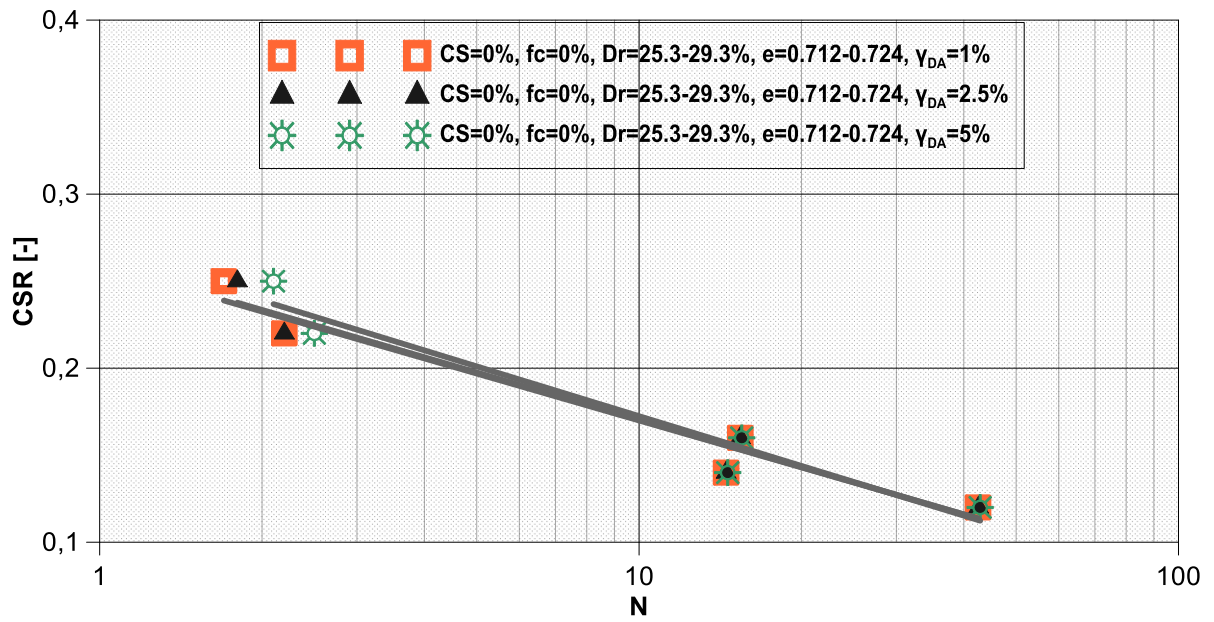
Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης

<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ CS=6%</b>			
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=35,6-40,9% e=0,677-0,693	SA6-300-1	Dr=40,3	e=0,679
	SA6-300-2	Dr=41,0	e=0,677
	SA6-300-3	Dr=35,6	e=0,693
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ CS=10%</b>			
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=33,3-38,0% e=0,686-0,700	SA10-300-14	Dr=38,0	e=0,686
	SA10-300-16	Dr=36,7	e=0,690
	SA10-300-18	Dr=33,3	e=0,700
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=25,0-28,3% e=0,715-0,725	SA10-300-7	Dr=27,3	e=0,718
	SA10-300-9	Dr=28,0	e=0,716
	SA10-300-10	Dr=25,3	e=0,724
	SA10-300-11	Dr=25,0	e=0,725
	SA10-300-12	Dr=27,0	e=0,719
	SA10-300-13	Dr=27,0	e=0,719
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=12,3-16,7% e=0,750-0,763	SA10-300-3	Dr=15,7	e=0,753
	SA10-300-4	Dr=16,7	e=0,750
	SA10-300-8	Dr=12,3	e=0,763
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=8,7-11,3% e=0,766-0,774	SA10-300-1	Dr=11,3	e=0,766
	SA10-300-2	Dr=9,3	e=0,772
	SA10-300-5	Dr=8,7	e=0,774
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΑΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ CS=6%</b>			
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=48,7-61,1% e=0,536-0,579	SB6-300-5	Dr=57,7	e=0,548
	SB6-300-6	Dr=48,7	e=0,579
	SB6-300-7	Dr=54,0	e=0,561
	SB6-300-8	Dr=61,1	e=0,536
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΑΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ CS=10%</b>			
Εύρος Κατηγορίας	Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων
Dr=50,5-57,8% e=0,548-0,573	SB10-300-1	Dr=52,3	e=0,567
	SB10-300-2	Dr=56,0	e=0,554
	SB10-300-3	Dr=57,8	e=0,548
	SB10-300-4	Dr=50,5	e=0,573

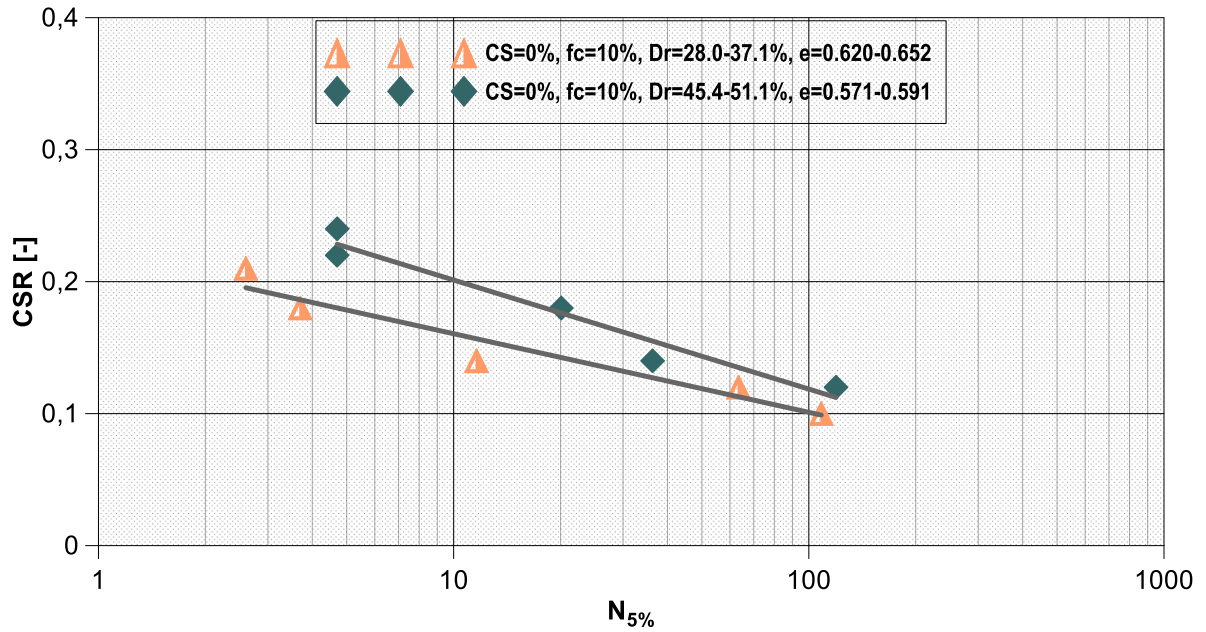
Πίνακας 5.4.



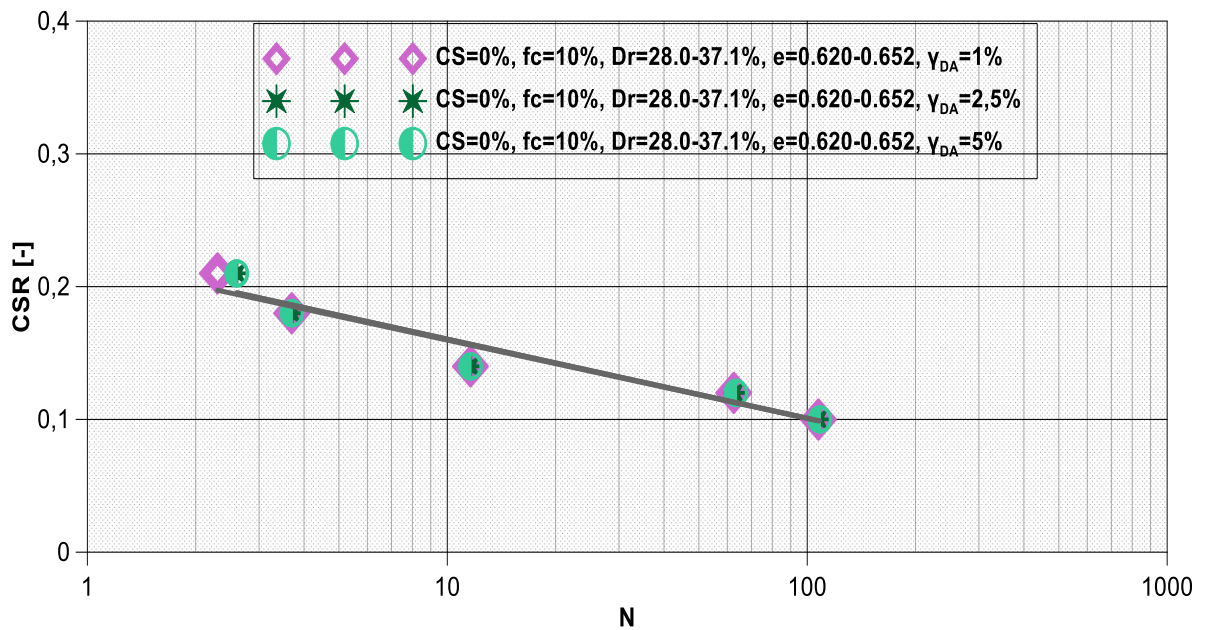
*Σχήμα 5.11. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Μη σταθεροποιημένη καθαρή άμμος M31.*



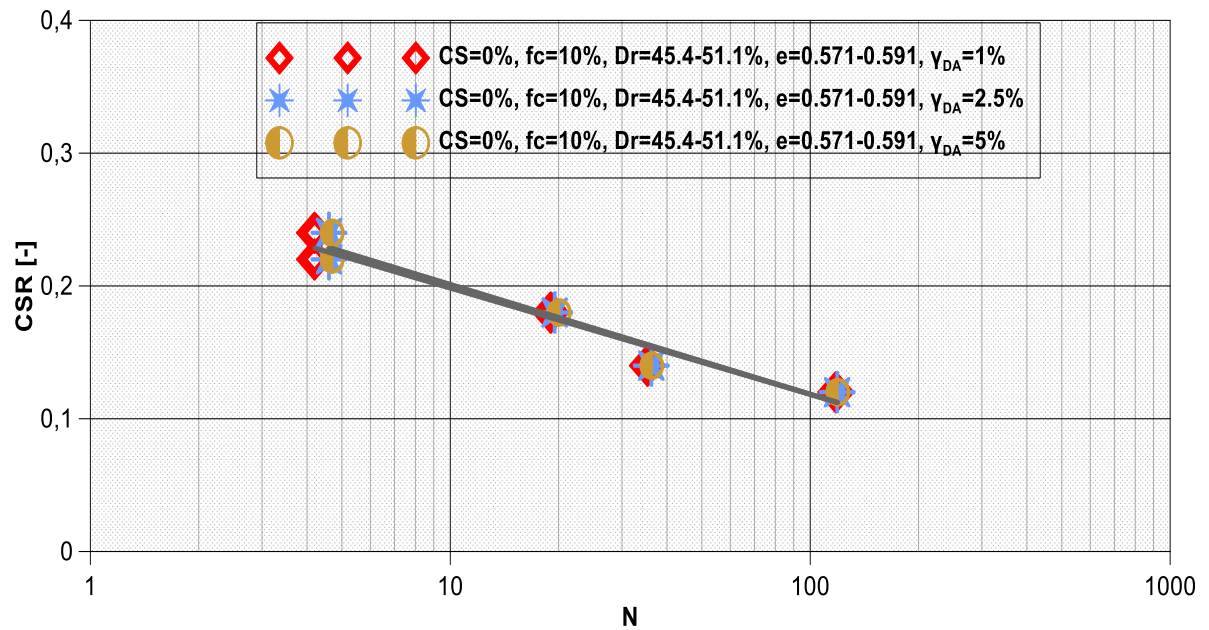
*Σχήματα 5.12 και 5.13. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Μη σταθεροποιημένη καθαρή άμμος M31.*



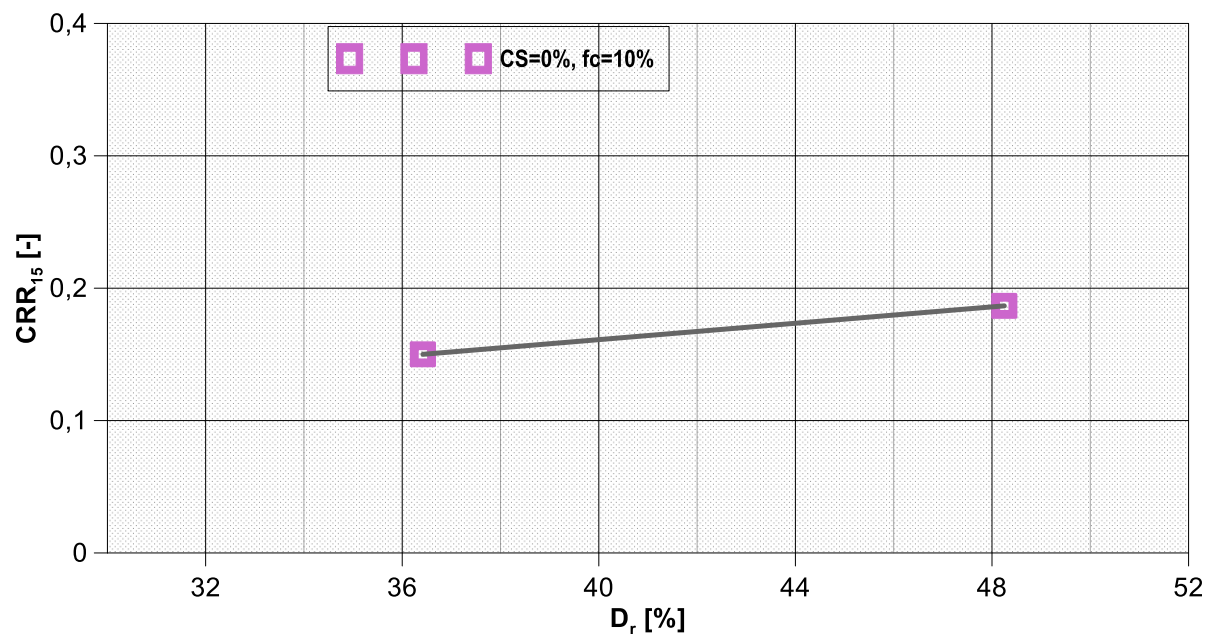
**Σχήμα 5.14.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Μη σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



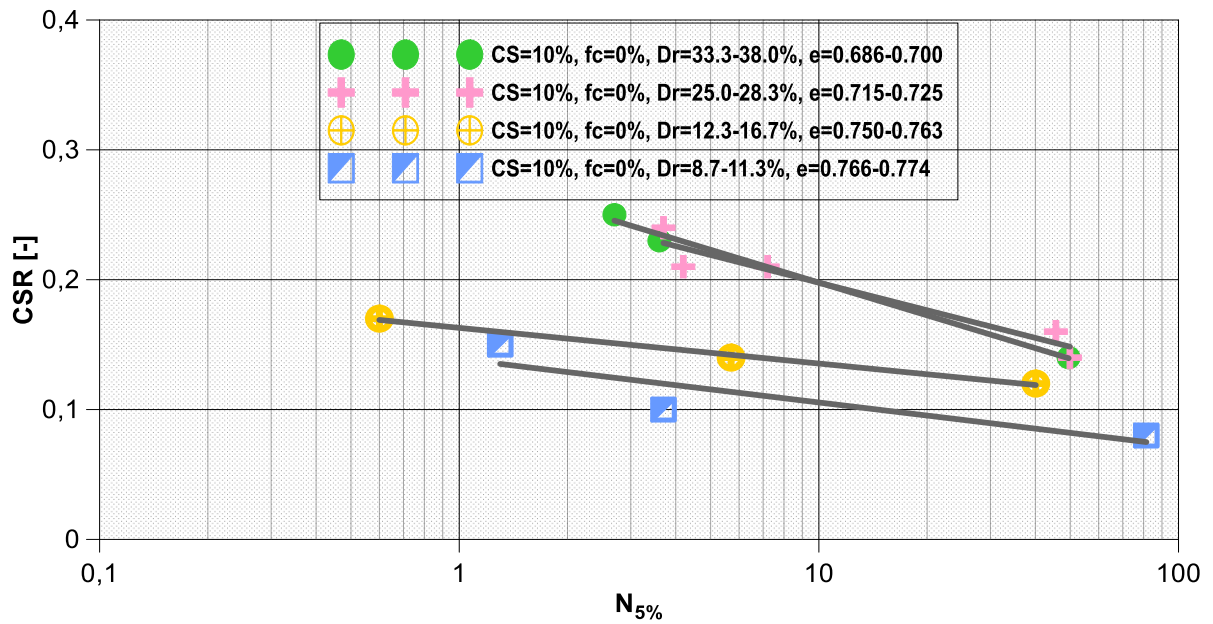
**Σχήμα 5.15** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%, 2.5\%$  και  $5\%$ . Μη σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



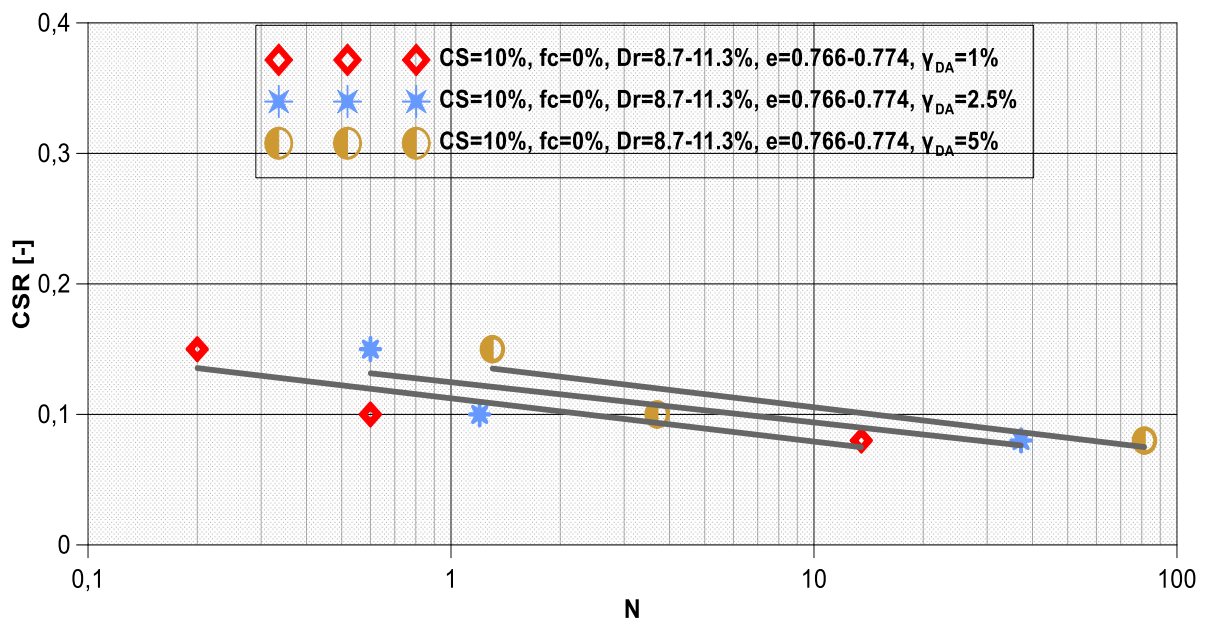
**Σχήμα 5.16.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%, 2.5\%$  και  $5\%$ . Μη σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



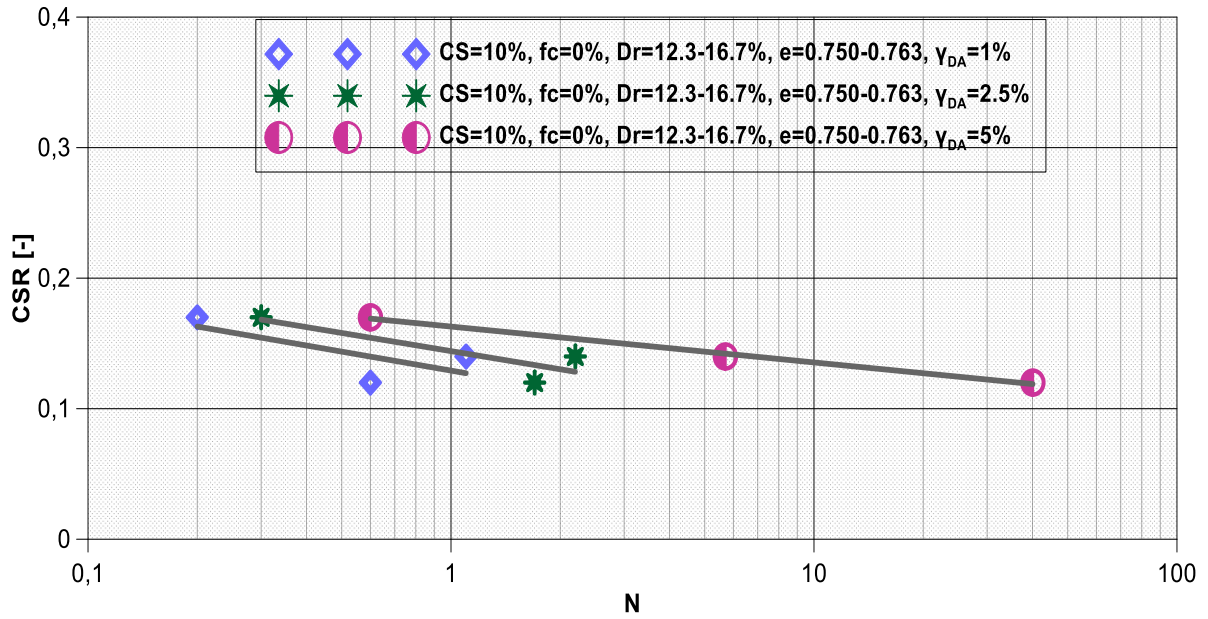
**Σχήμα 5.17.** Λόγος αντίστασης σε ρευστοποίηση  $CRR_{15}$  σε συνάρτηση με τη σχετική πυκνότητα  $D_r$ . Μη σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



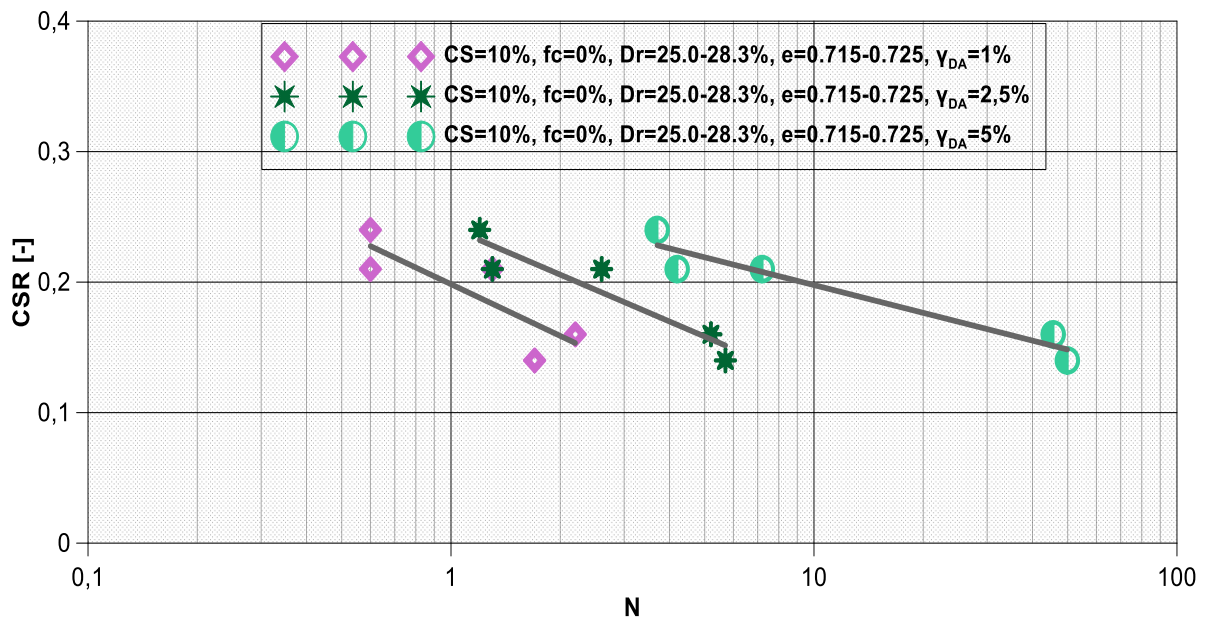
**Σχήμα 5.18.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=10% καθαρή άμμος M31.



**Σχήμα 5.19.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=10% καθαρή άμμος M31.

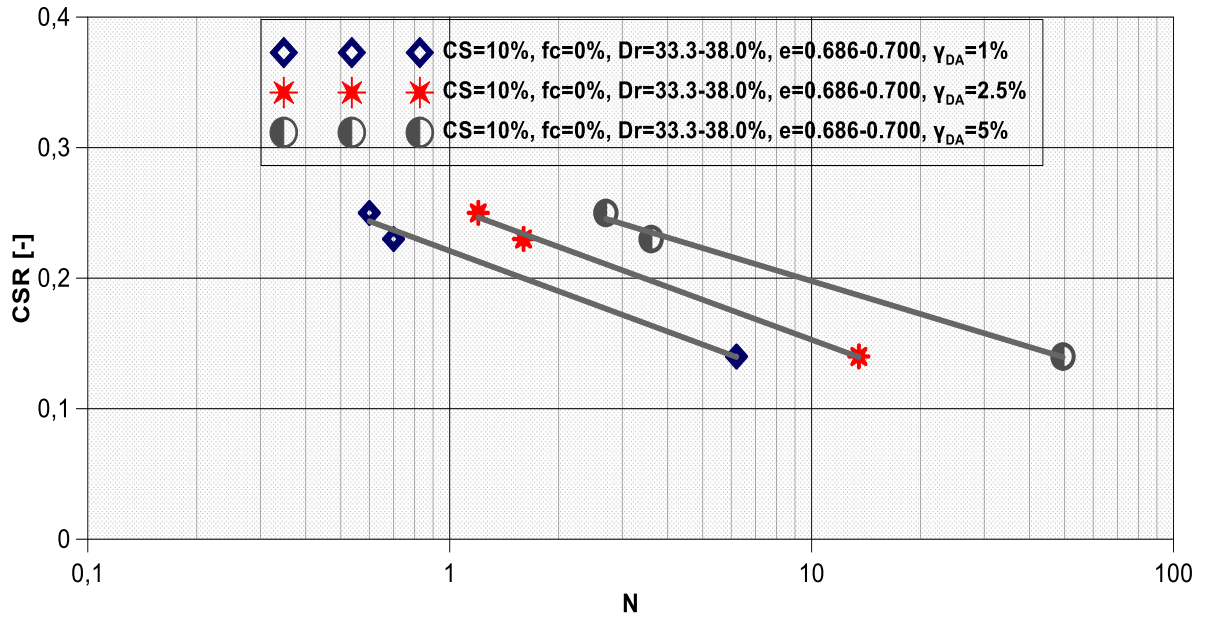


**Σχήμα 5.20.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  καθαρή άμμος M31.

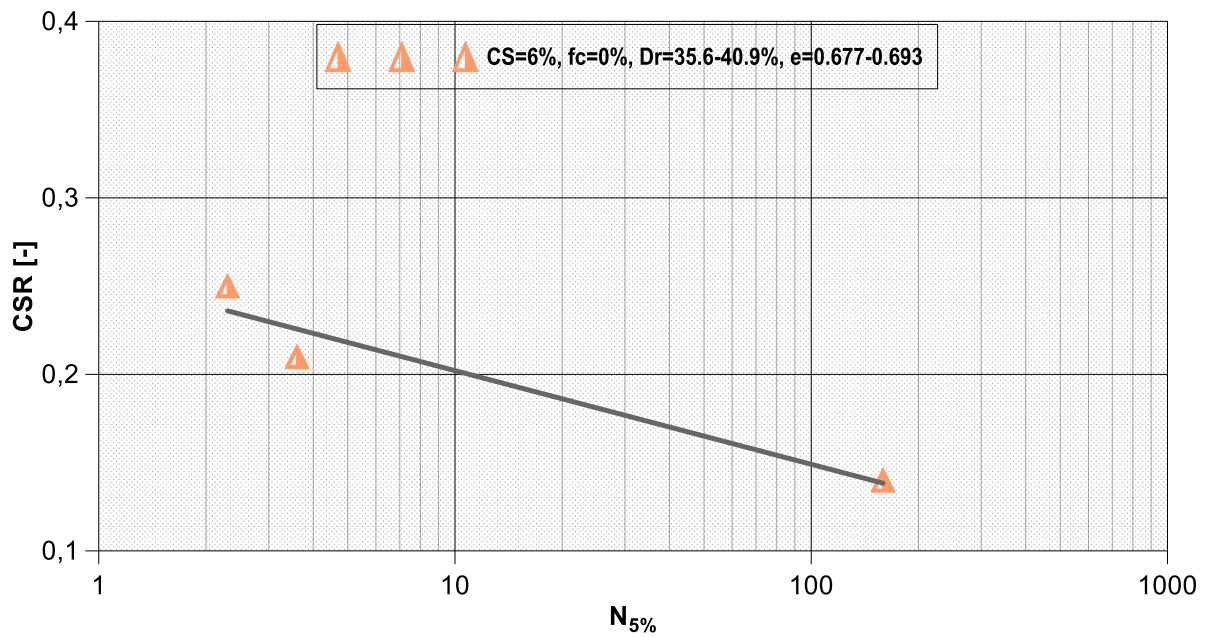


**Σχήμα 5.21.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  καθαρή άμμος M31.

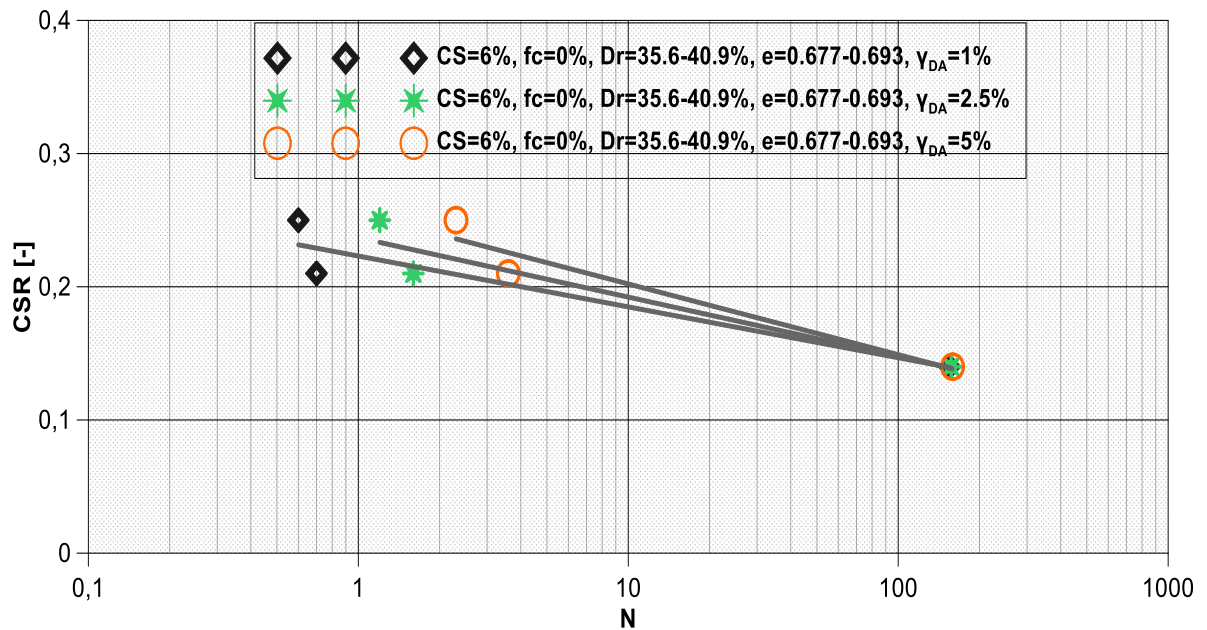




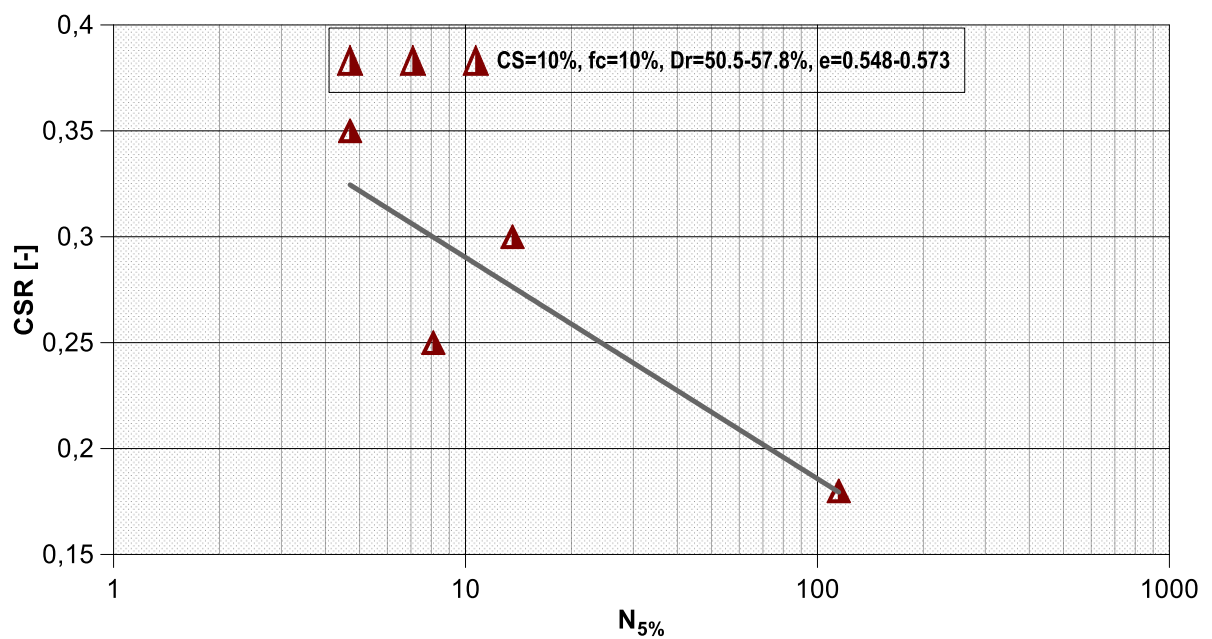
**Σχήμα 5.22.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%, 2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=10% καθαρή άμμος M31.



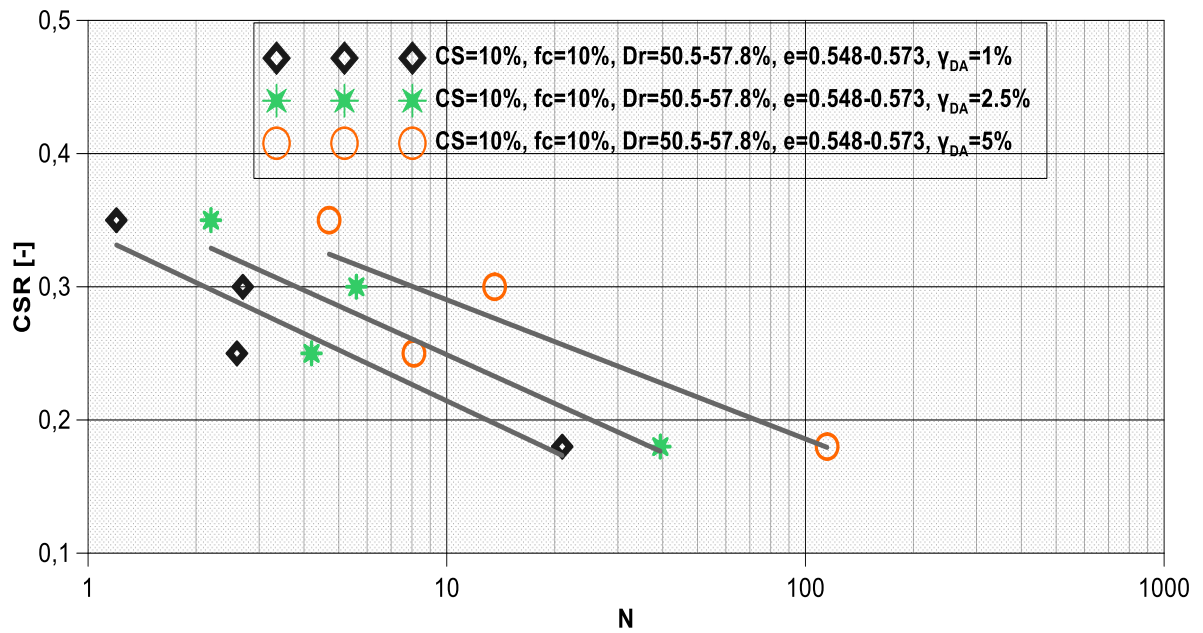
**Σχήμα 5.23.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=6% καθαρή άμμος M31



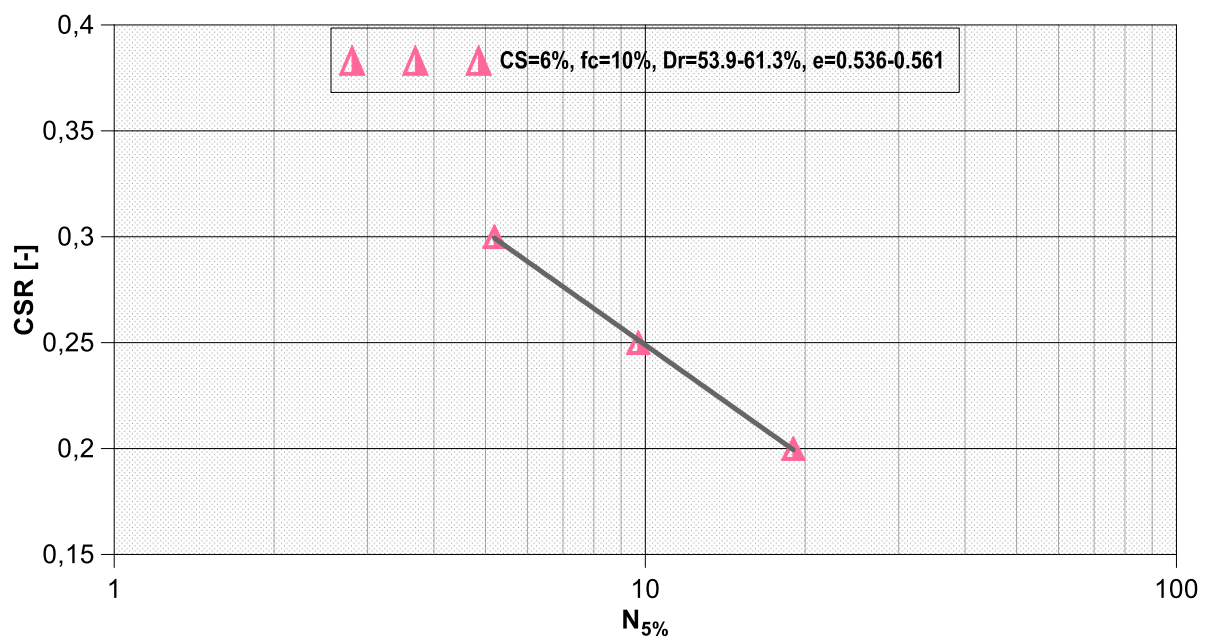
**Σχήματα 5.24.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=6% καθαρή άμμος M31.



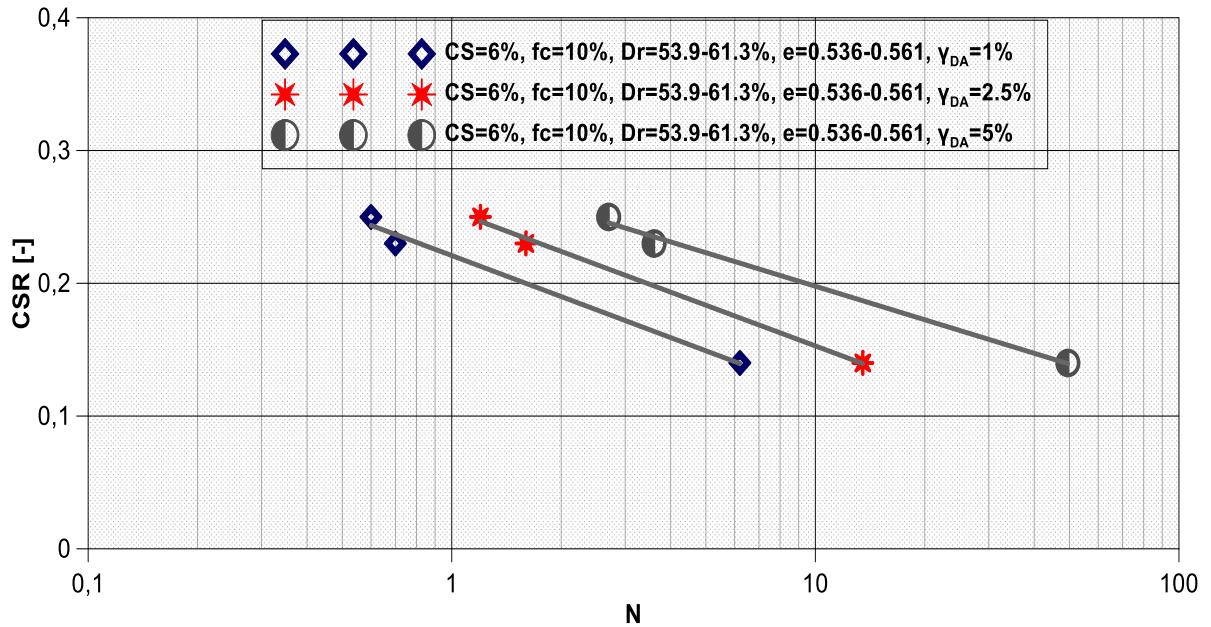
**Σχήμα 5.25.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=10% ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



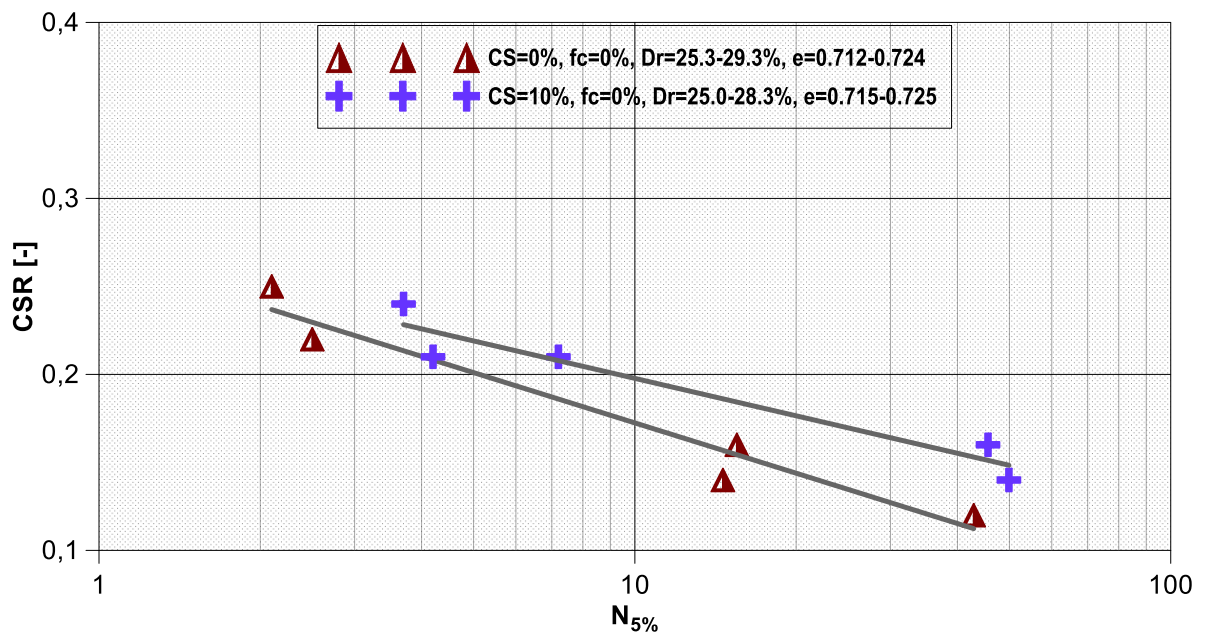
**Σχήμα 5.26.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=10% ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



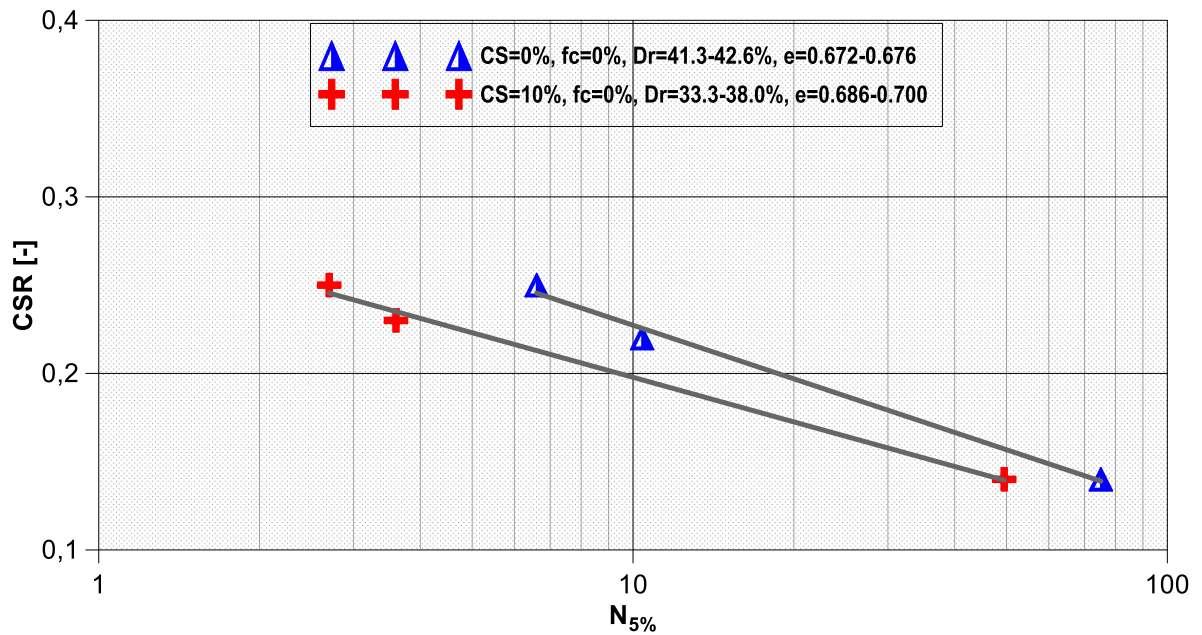
**Σχήμα 5.27.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σταθεροποιημένη CS=6% ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



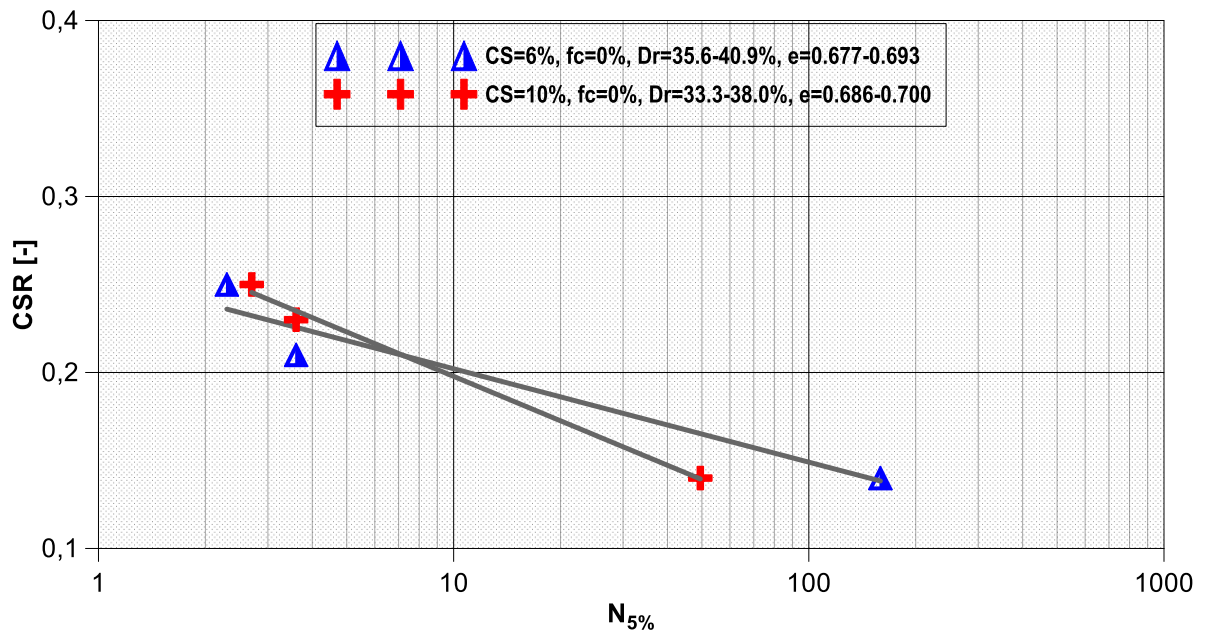
**Σχήμα 5.28.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ ,  $2.5\%$  και  $5\%$ . Σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  ιλυώδης άμμος ( $f_c=10\%$ ).



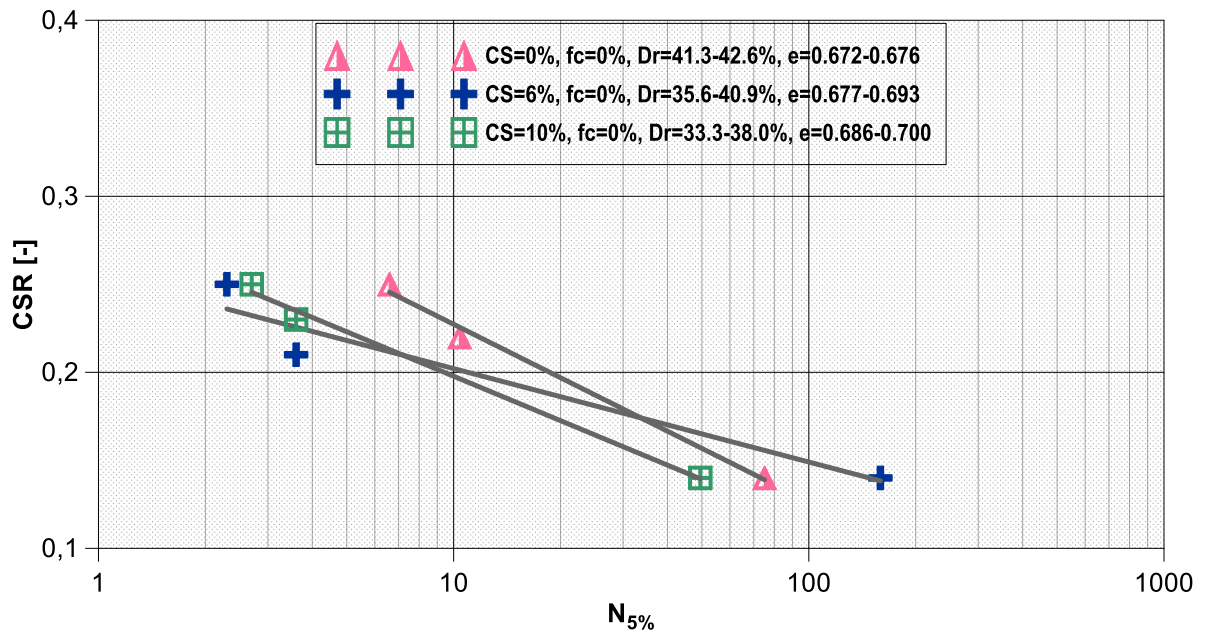
**Σχήματα 5.29.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης  $CS=10\%$  καθαρής άμμου M31 σε παρόμοιες πυκνότητες.



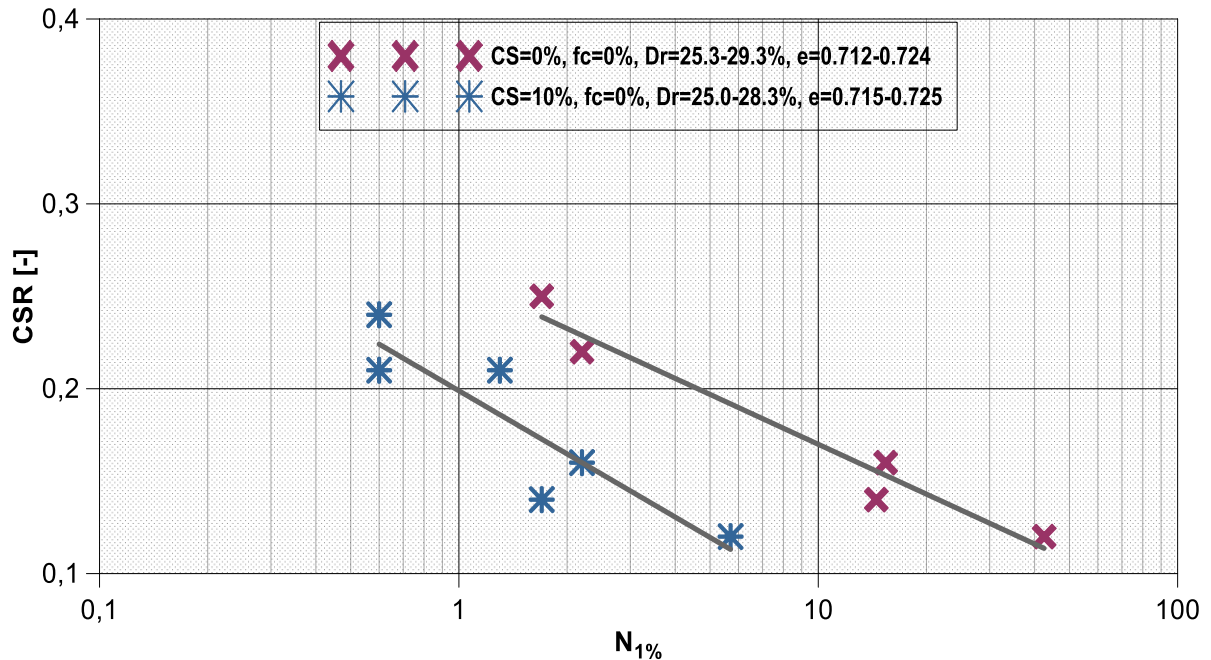
**Σχήμα 5.30.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA} = 5\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=10% καθαρής άμμου σε παρόμοιες πικνότητες.



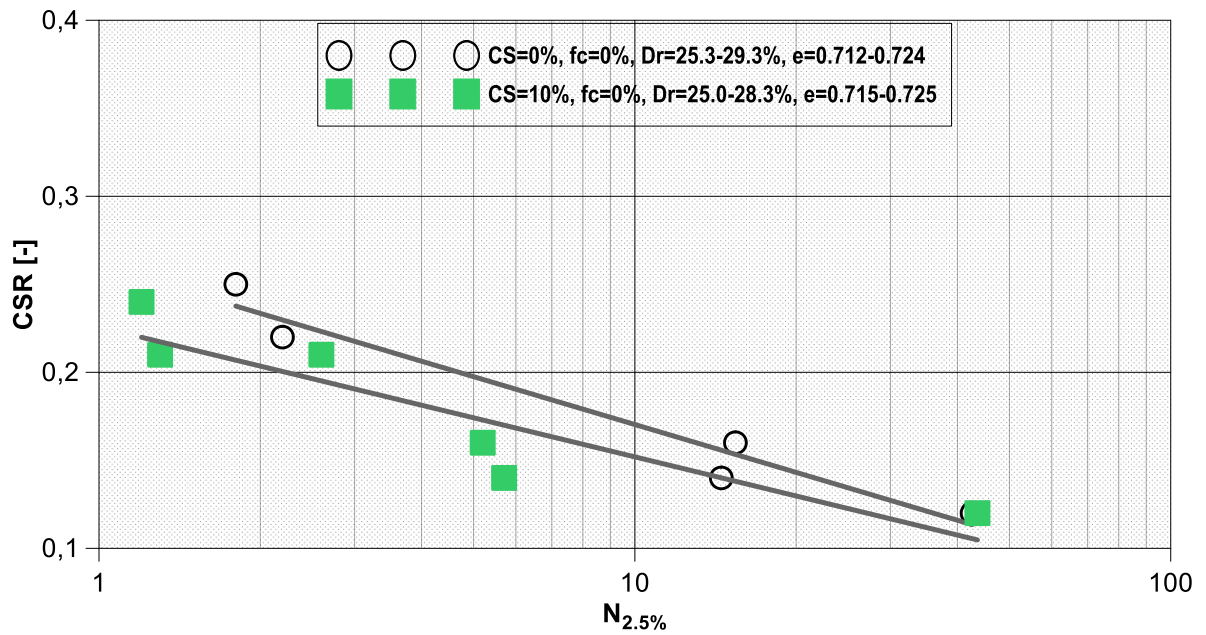
**Σχήμα 5.31.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA} = 5\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=6% και CS=10% καθαρής άμμου σε παρόμοιες πικνότητες.



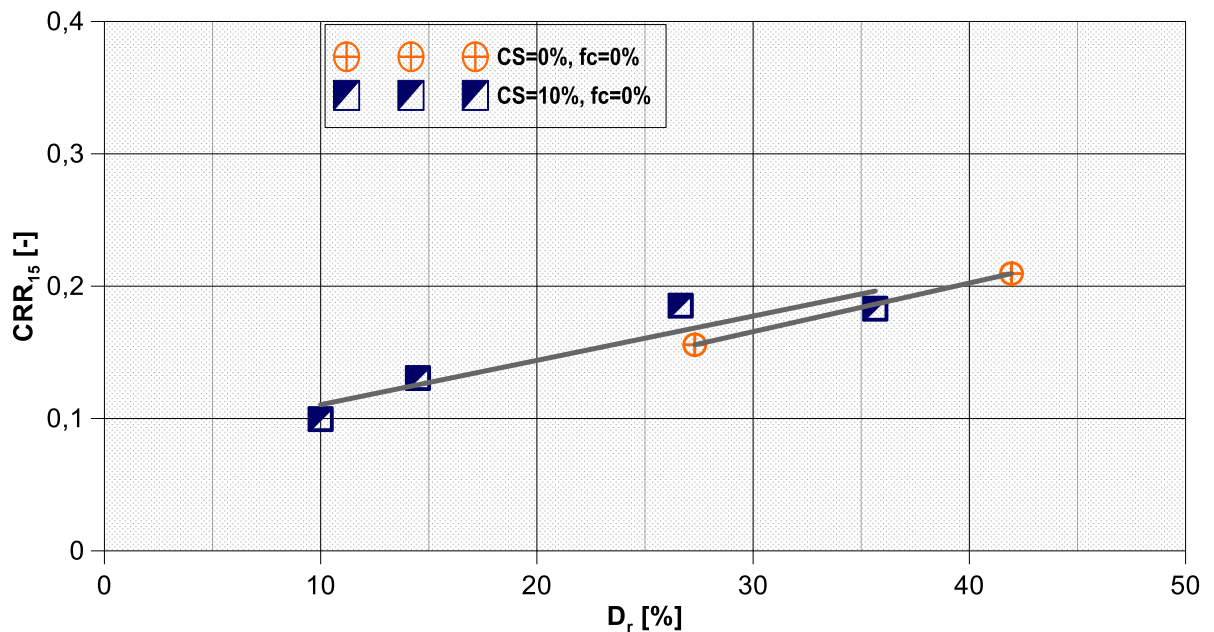
**Σχήματα 5.32.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=6% και 10% καθαρής άμμου M31 σε παρόμοιες πυκνότητες.



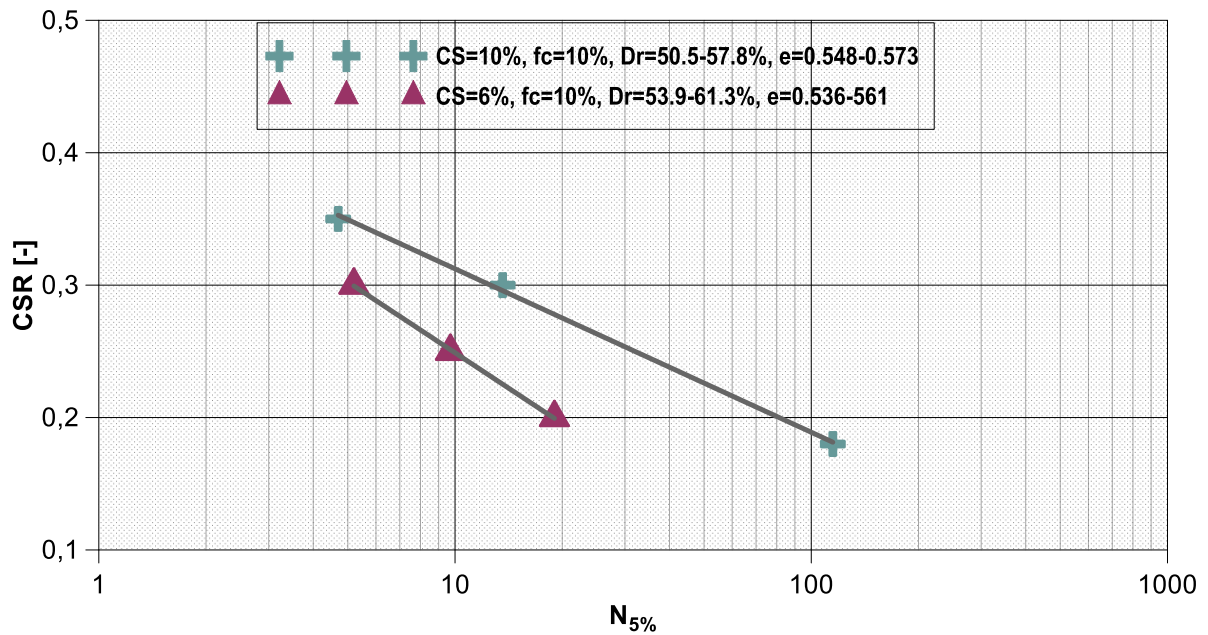
**Σχήμα 5.33** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=10% καθαρής άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες.



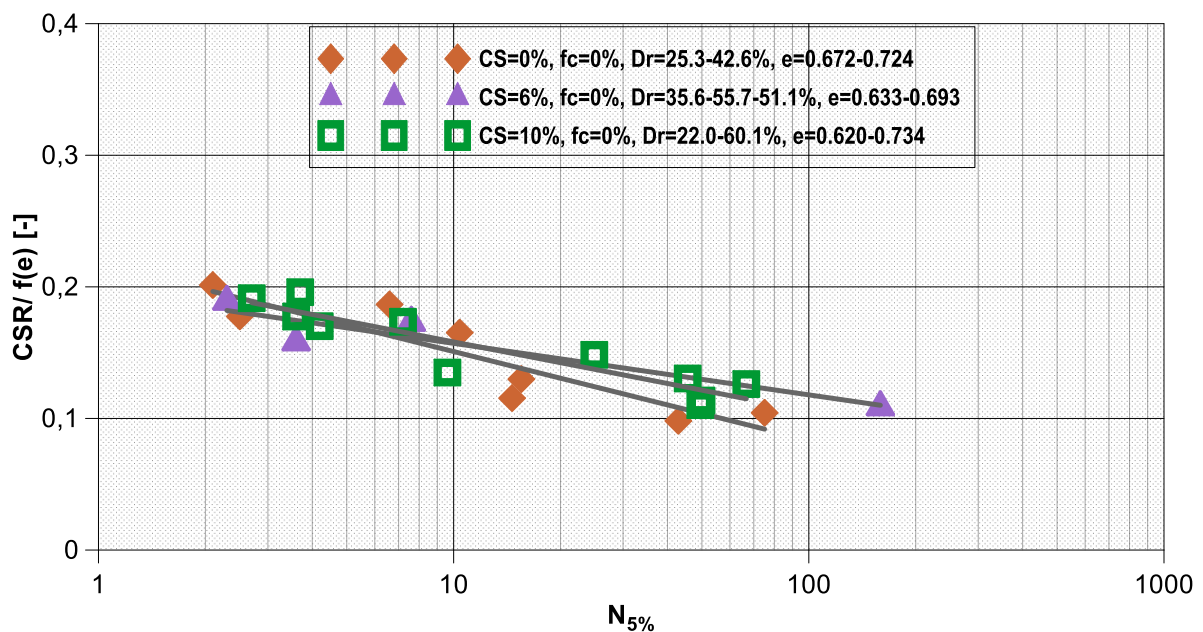
**Σχήμα 5.34.** Λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=2.5\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης  $CS=10\%$  καθαρής άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες.



**Σχήμα 5.35.** Λόγος αντίστασης σε ρευστοποίηση  $CRR_{15}$  σε συνάρτηση με τη σχετική πυκνότητα  $D_r$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης  $CS=10\%$  καθαρής άμμου.

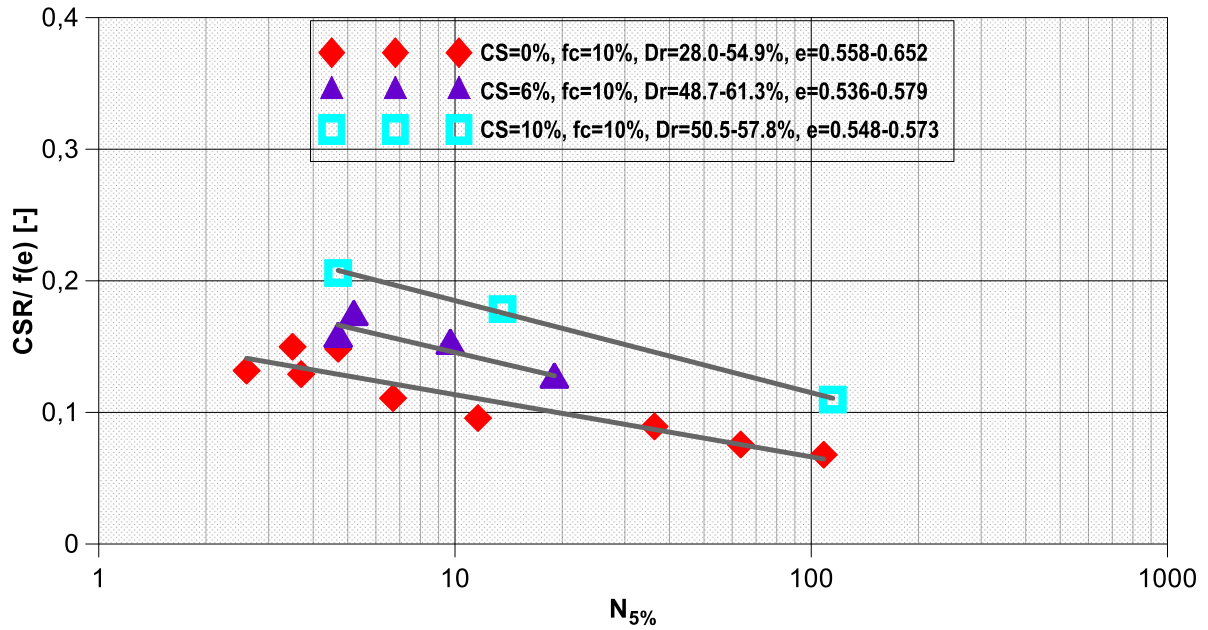


**Σχήμα 5.36.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση σταθεροποιημένης CS=6% και CS=10% ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).

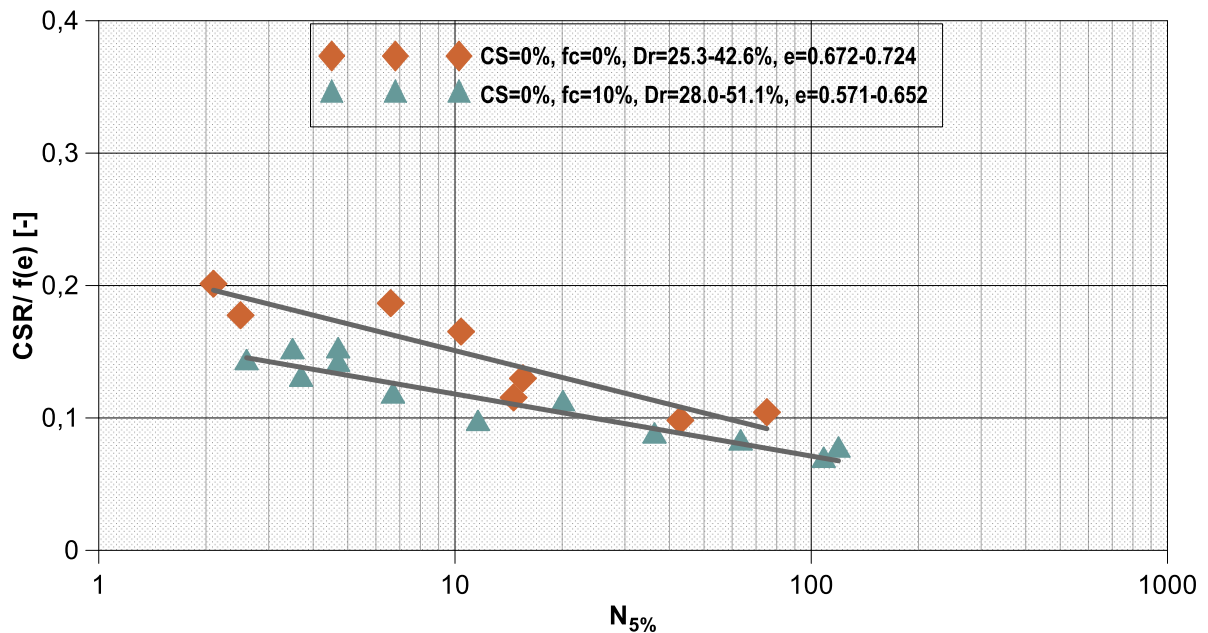


**Σχήμα 5.37.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης CSR / f(e) σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=(2.17-e)^2 / (1+e)$ . Σύγκριση φυσικής άμμου και σταθεροποιημένης CS=6% και 10% άμμου.

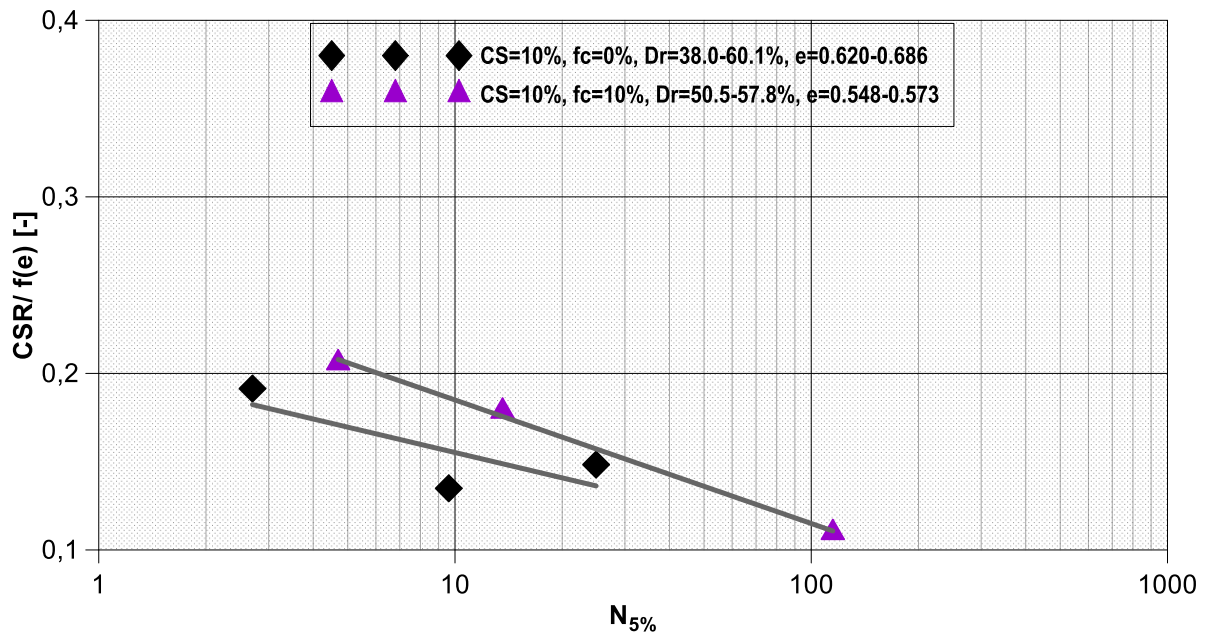




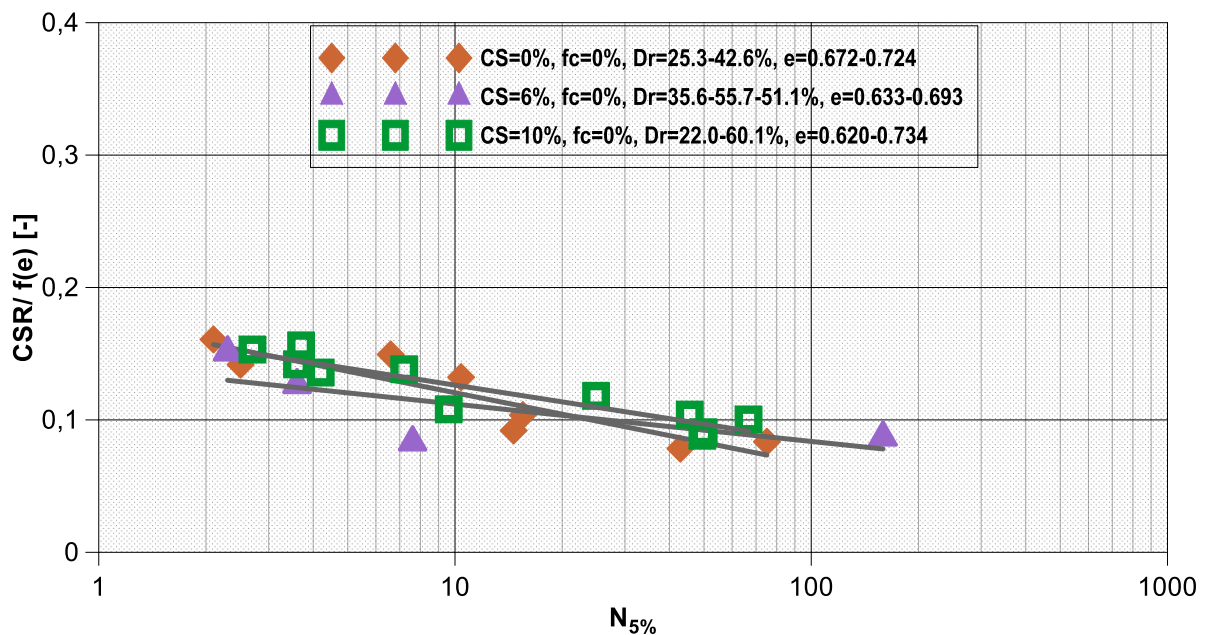
**Σχήμα 5.38.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$ . Σύγκριση φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ) και σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $10\%$  ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



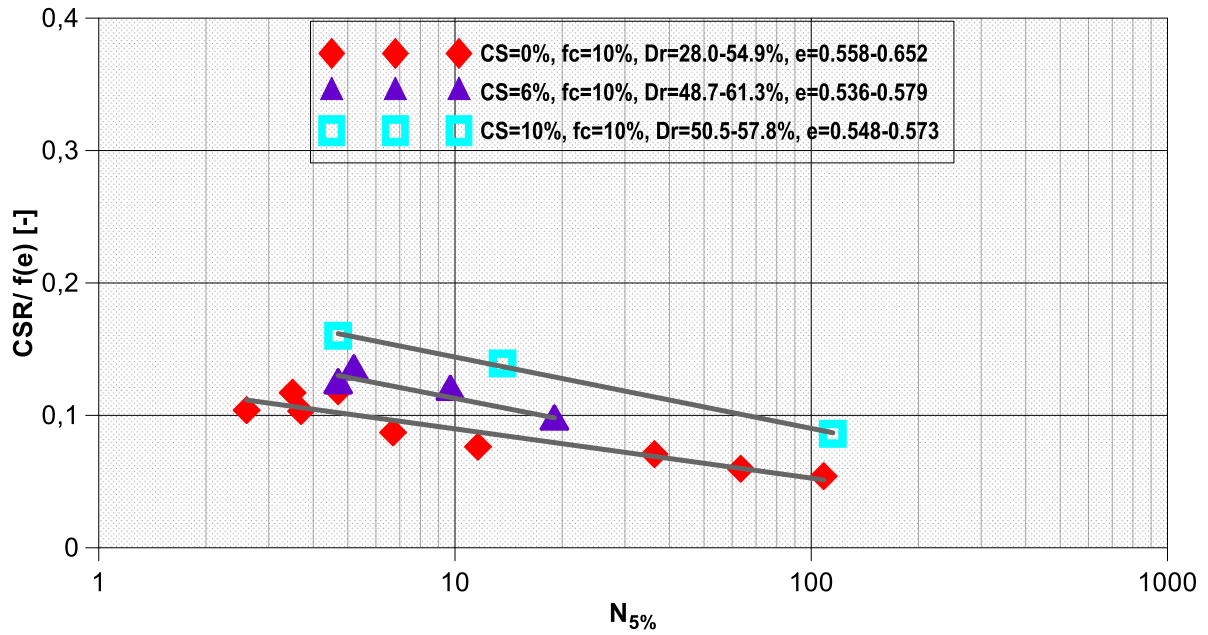
**Σχήμα 5.39.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$ . Σύγκριση φυσικής άμμου και φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



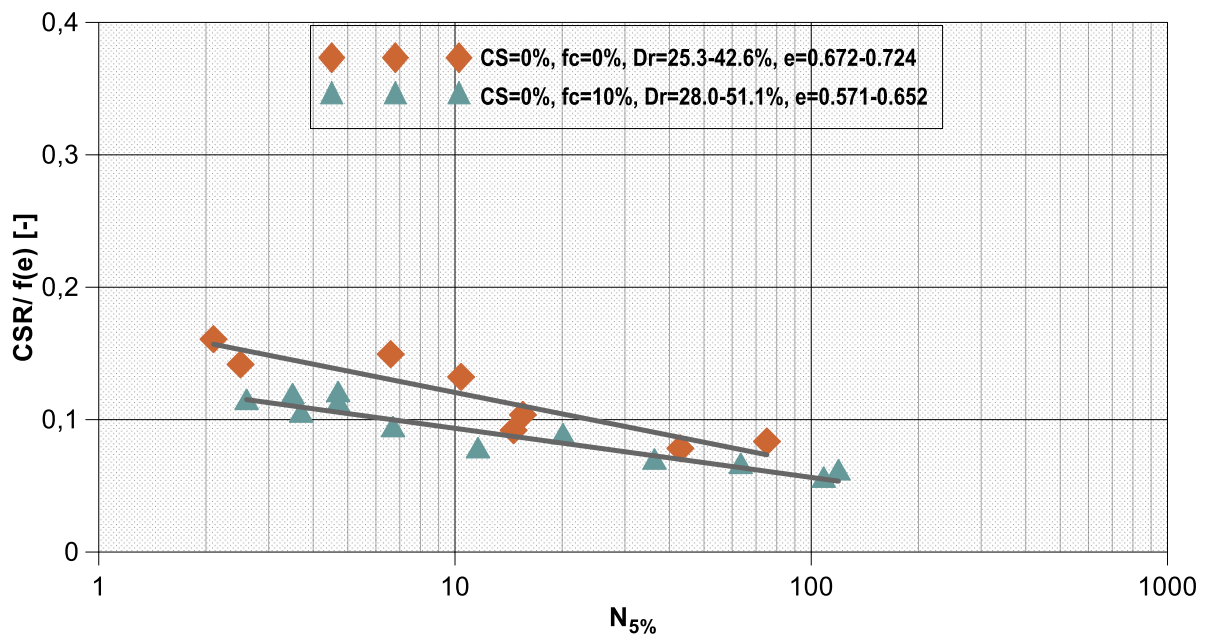
**Σχήμα 5.40.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=(2.17-e)^2 / (1+e)$ . Σύγκριση σταθεροποιημένης άμμου  $CS=10\%$  και σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου  $CS=10\%$ .



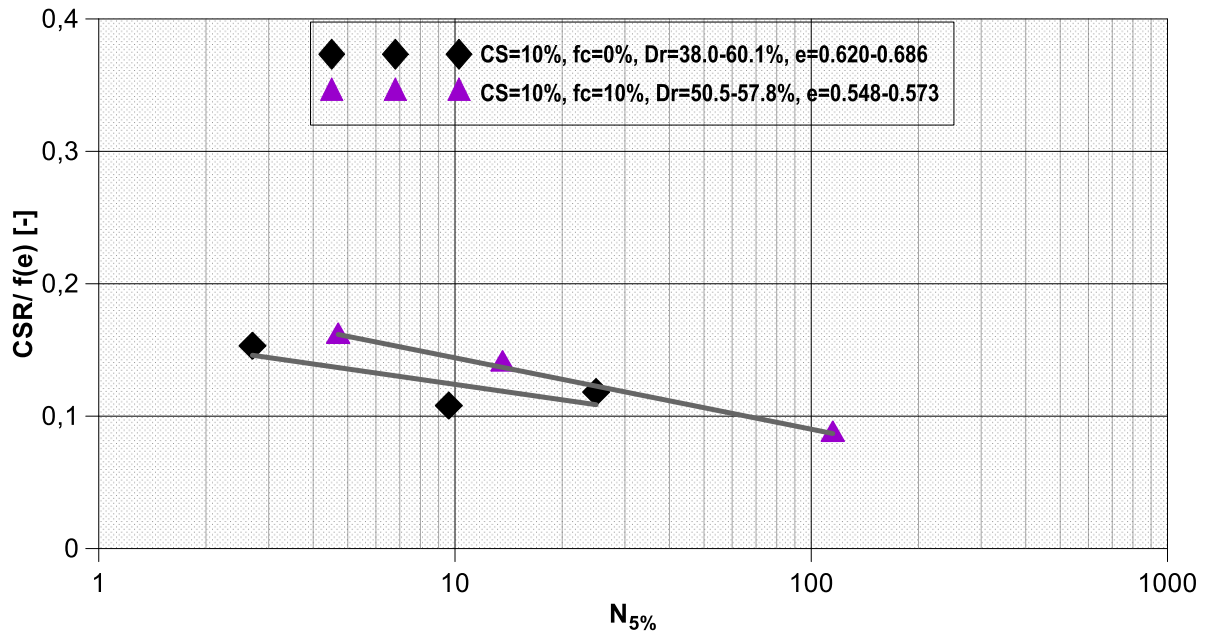
**Σχήμα 5.41.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR / f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-1.3}$ . Σύγκριση φυσικής άμμου και σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $10\%$  άμμου.



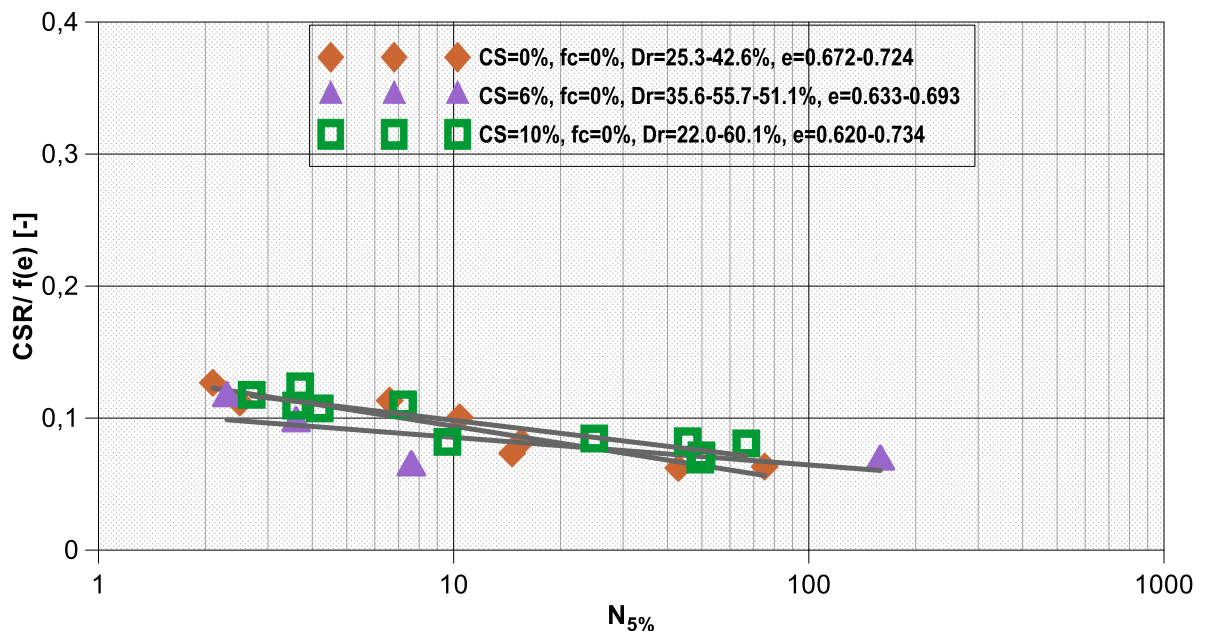
**Σχήμα 5.42.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR / f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-1.3}$ . Σύγκριση φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ) και σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $10\%$  ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



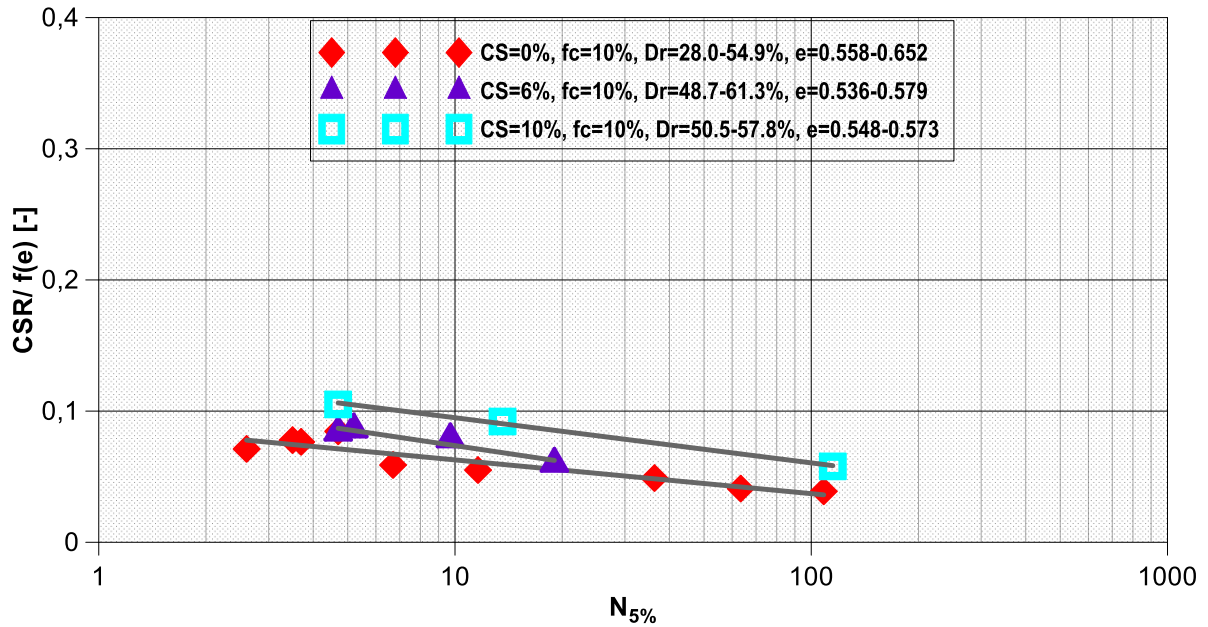
**Σχήμα 5.43.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-1.3}$ . Σύγκριση φυσικής άμμου και φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



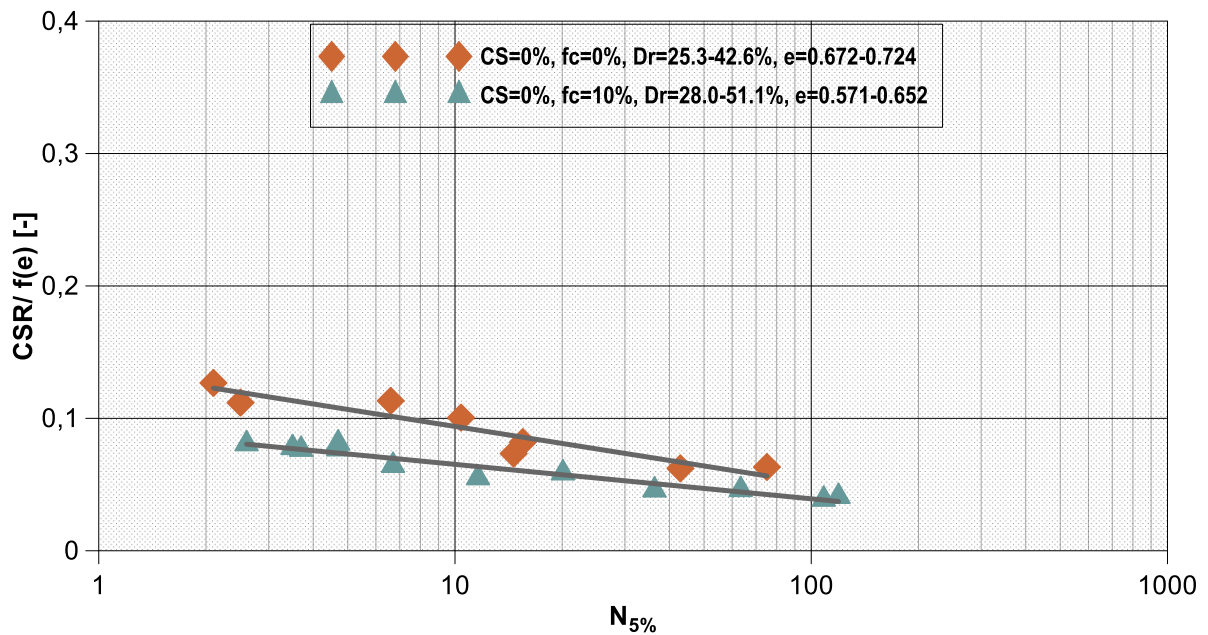
**Σχήμα 5.44.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-1.3}$ . Σύγκριση σταθεροποιημένης άμμου  $CS=10\%$  και σταθεροποιημένης ιλωδούς άμμου  $CS=10\%$ .



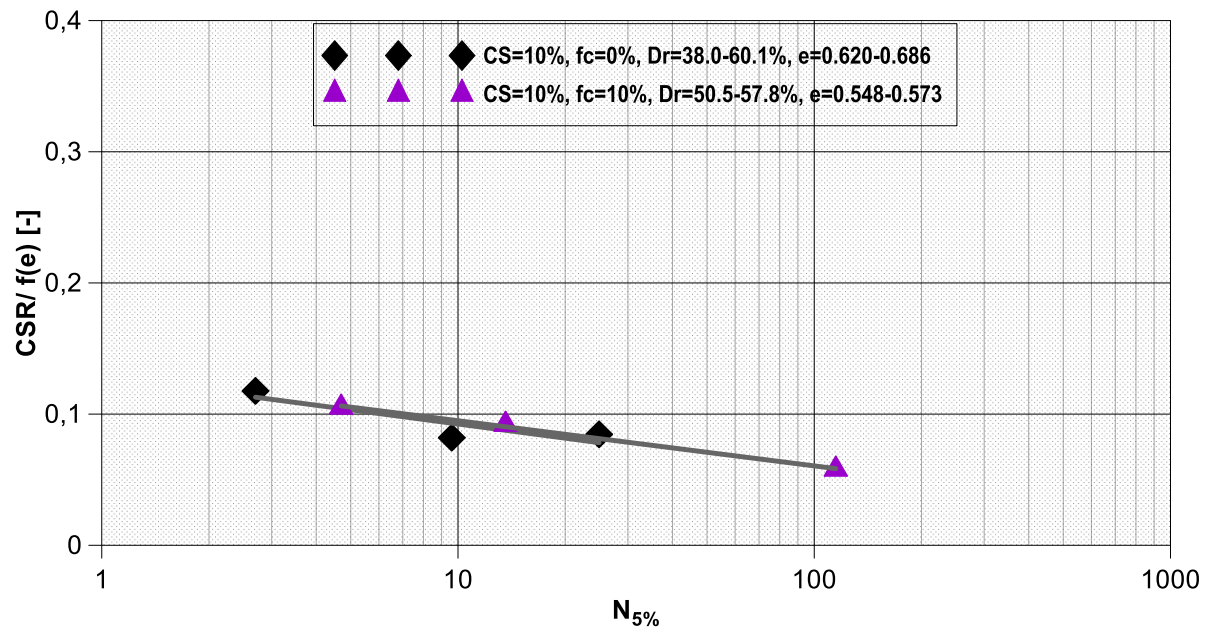
**Σχήμα 5.45** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR / f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-2}$ . Σύγκριση φυσικής άμμου και σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $10\%$  άμμου.



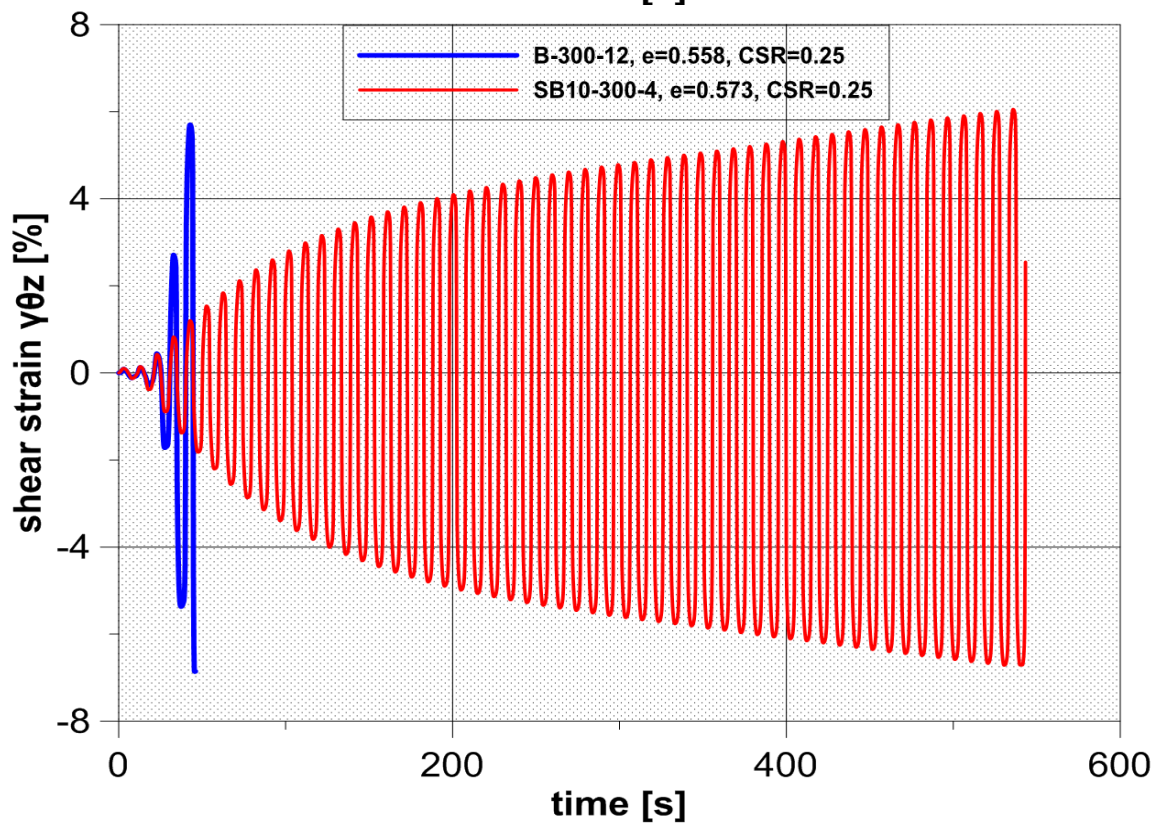
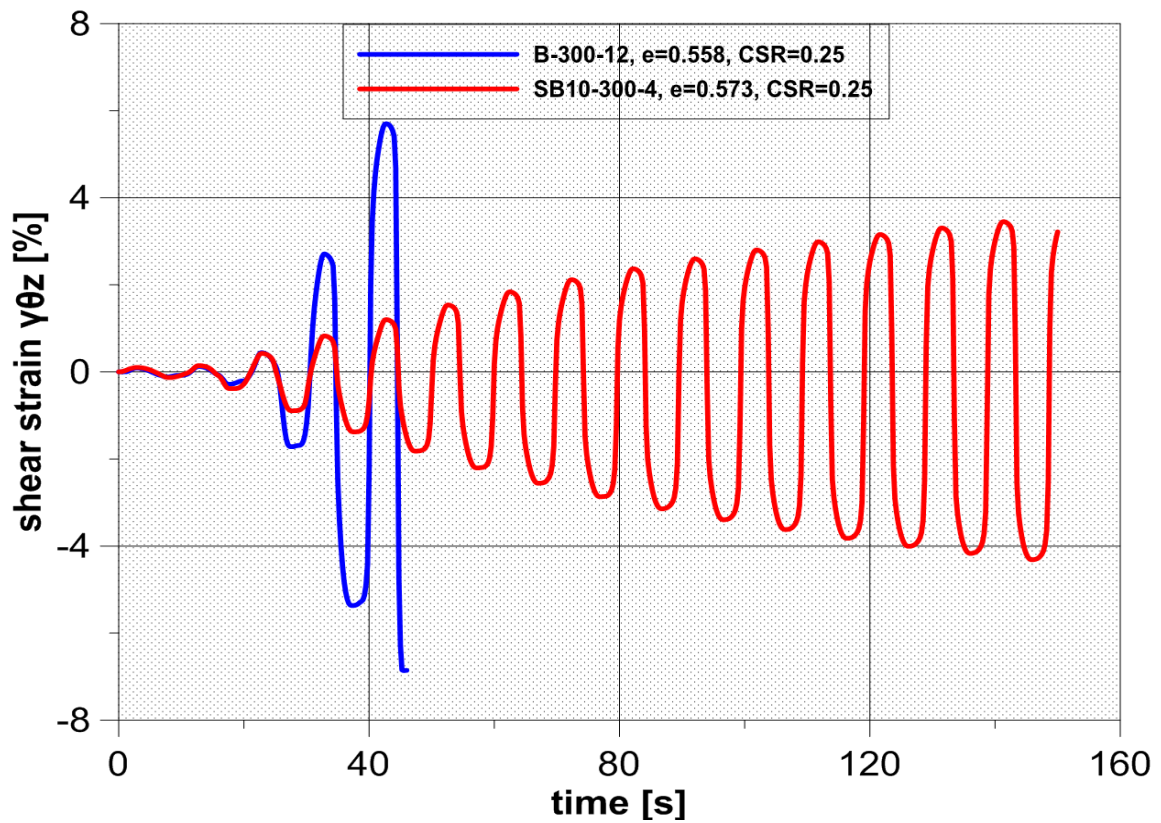
**Σχήμα 5.46.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR / f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-2}$ . Σύγκριση φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ) και σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $10\%$  ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



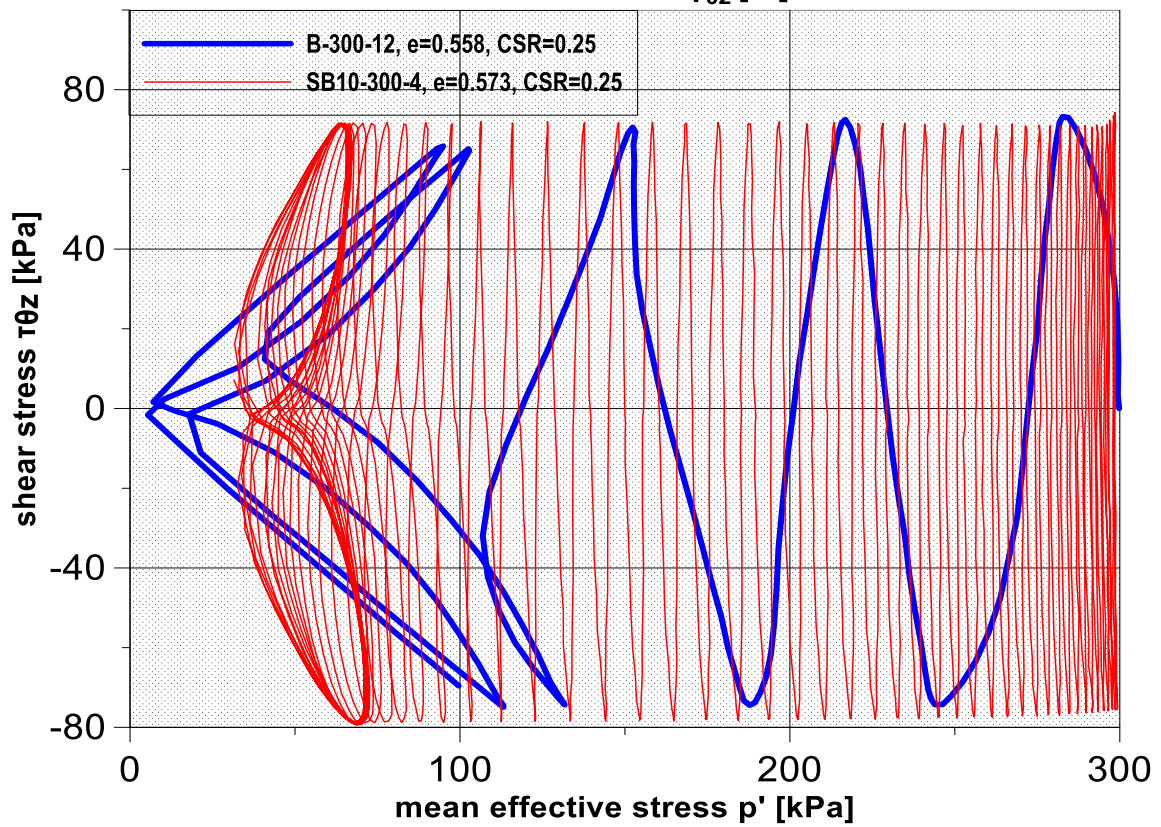
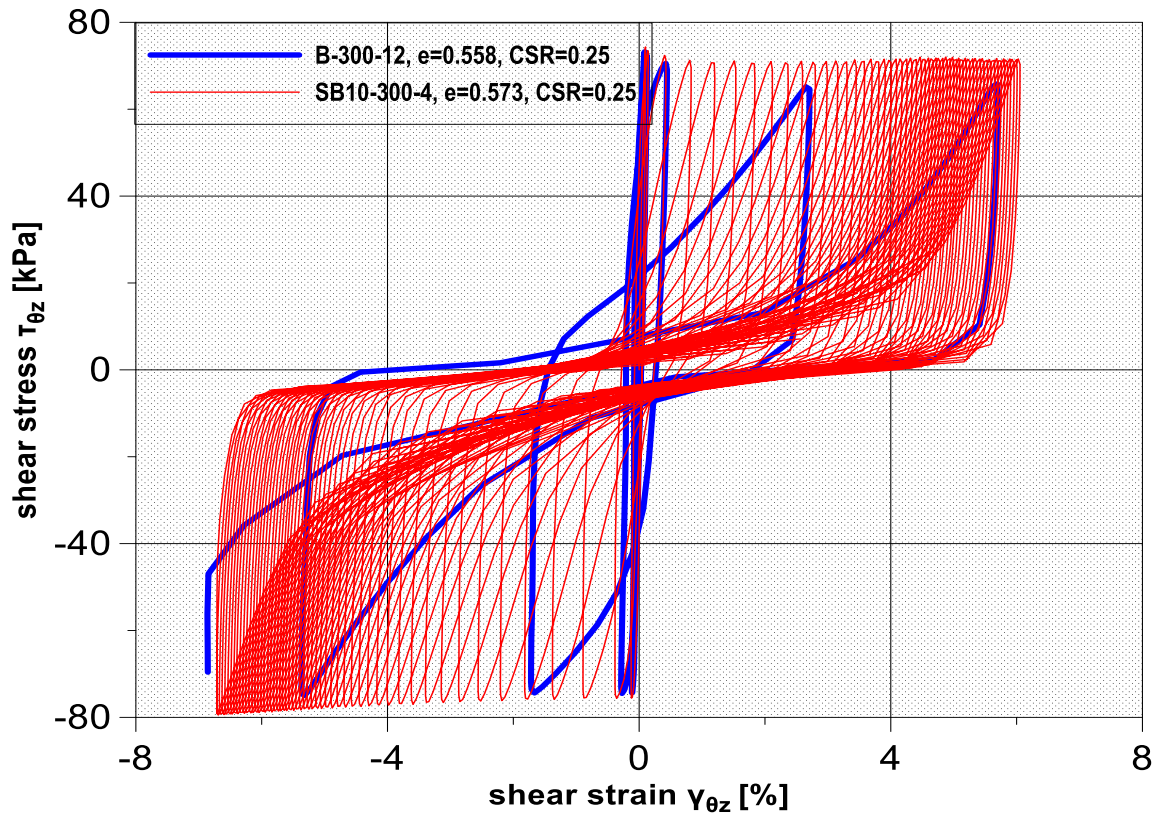
**Σχήμα 5.47.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-2}$ . Σύγκριση φυσικής άμμου και φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



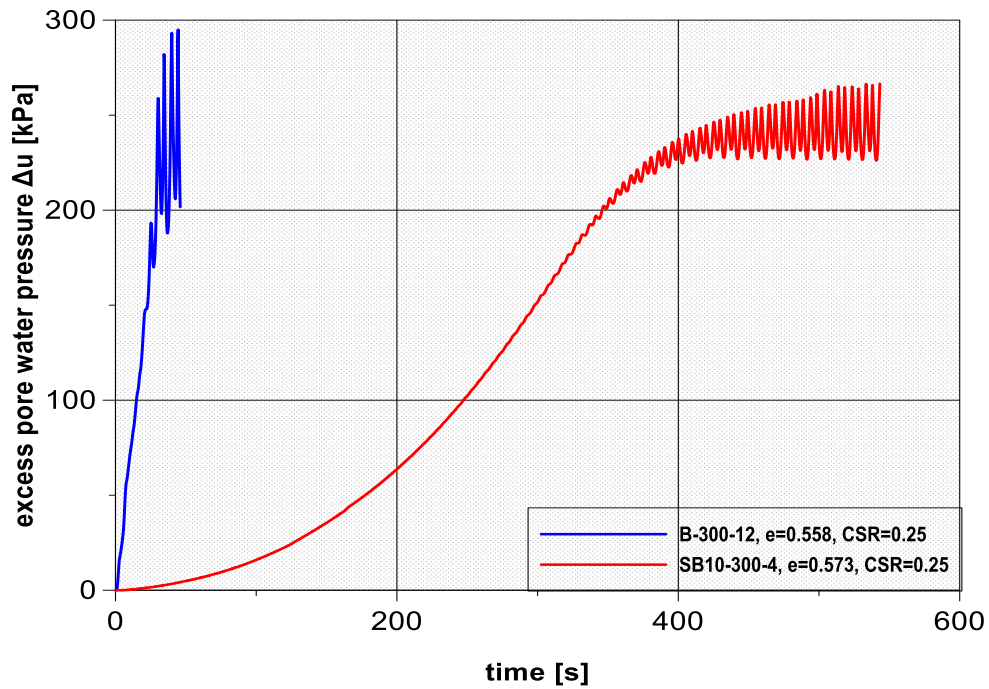
**Σχήμα 5.48.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR/f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=e^{-2}$ . Σύγκριση σταθεροποιημένης άμμου  $CS=10\%$  και σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου  $CS=10\%$ .



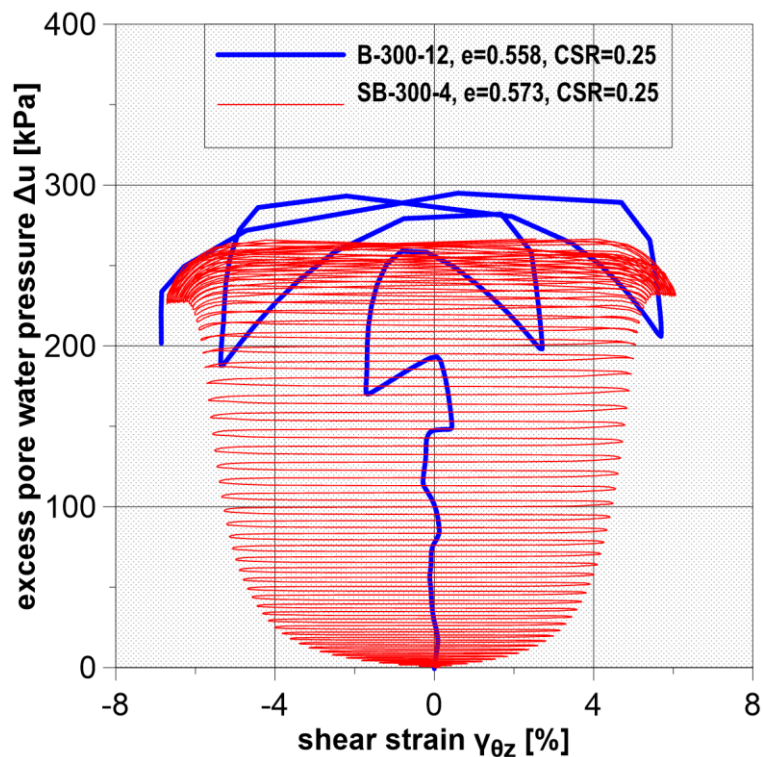
Σχήματα 5.49 και 5.50. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο, για ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR$  και παραπλήσιους δείκτες πόρων  $e$ .







Σχήματα 5.51 5.52 5.53. Σύγκριση των διαγραμμάτων  $\tau_{\theta z} - \gamma_{\theta z}$ ,  $\tau_{\theta z} - p'$  και  $\Delta u - t$  για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο, για ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR$  και παραπλήσιους δείκτες πόρων  $e$ .



Σχήμα 5.54. Σύγκριση των διαγραμμάτων  $\Delta u - \gamma_{\theta z}$  για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο, για ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR$  και παραπλήσιους δείκτες πόρων  $e$ .



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

### **6.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα διπλωματική εκτελέστηκαν δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης και ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης για να προσδιορίσουμε την επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά των μη συνεκτικών εδαφών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις πειραματικές δοκιμές που εκτελέστηκαν.

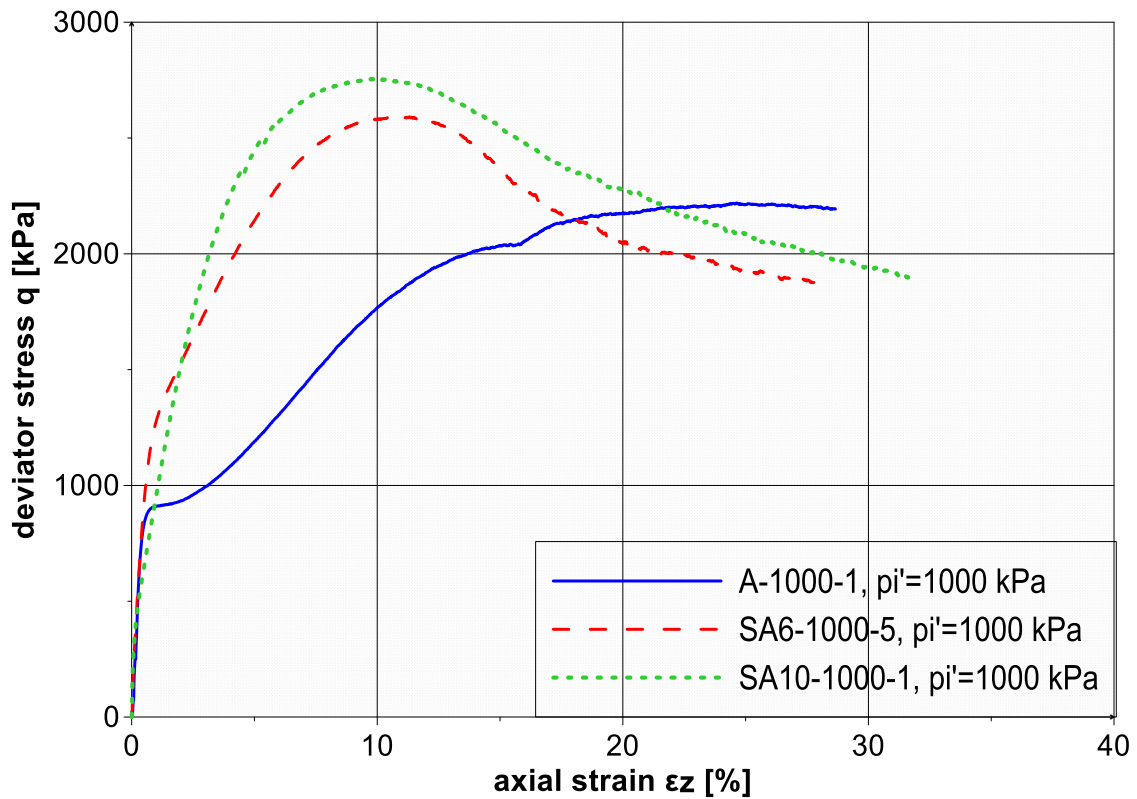
#### **6.1.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης**

Δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε άμμο M31 και σε ιλυώδη άμμο 85% κατά βάρος M31 & 15% κατά βάρος D6. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα πυριτίας (CS=6% και 10% κατά βάρος). Τα καλούπια σφραγίστηκαν και ο σχηματισμός της γέλης έγινε μέσα σε άτονο εδαφικό σκελετό. Μετά από την ωρίμανση τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη συσκευή και ακολούθησε η στερεοποίησή τους. Η εκροή του υγρού των πόρων γίνεται αργά, διότι το νερό αλληλεπιδρά με τον στερεό ιστό της γέλης. Το σταθεροποιημένο έδαφος μακροχρόνια υπόκειται ογκομετρικές παραμορφώσεις αντίστοιχες με το φυσικό. Η εκροή νερού και οι συνεπαγόμενες ογκομετρικές παραμορφώσεις ενδέχεται να τραυματίζουν ελαφρώς τον στερεό ιστό της γέλης.

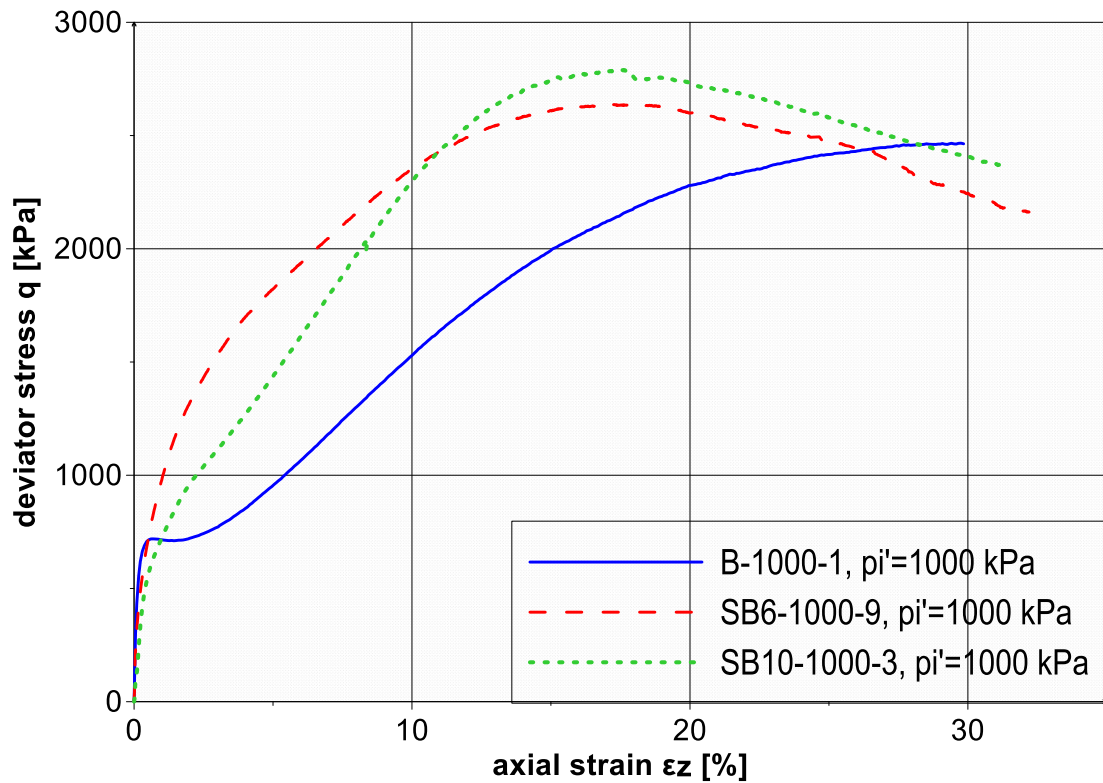
Οι μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν σε υψηλές ενεργές τάσεις (300, 1000, 1500 , 2000 kPa) για να εξεταστεί η επίδραση τέτοιων εντατικών πεδίων πάνω στους δεσμούς της γέλης. Έγινε έλεγχος παραμορφώσεων (strain control) και μετρήθηκε η πίεση του υγρού των πόρων και στα σταθεροποιημένα εδάφη. Όταν ο ιστός της γέλης είναι υγιής αδρανοποιεί το νερό και αργούν να εκδηλωθούν στον μετρητή τα μέτωπα πίεσης. Έχουμε την πεποίθηση ότι σε μικρές τιμές παραμορφώσεων υπάρχει υποβαθμισμένη εκδήλωση της πραγματικής πίεσης και όχι μικρή πραγματική πίεση. Με αυτήν την συλλογιστική αποδίδουμε την ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης στην αλληλεπίδραση της στερεάς φάσης της γέλης με τους εδαφικούς κόκκους. Δεν πιστεύουμε ότι οι πιέσεις μέσα στο υγρό της κορεσμένης γέλης είναι μικρές, καθώς η κορεσμένη γέλη αποτελείται κατά κύριο λόγο από πρακτικώς ασυμπίεστο νερό.

Το Σχήμα 6.2 παρουσιάζει την τυπική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 σε σύγκριση με τη φυσική, σε δοκιμή μονοτονικής τριαξονικής θλίψης με αρχική ενεργό τάση 1000 kPa, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση από τη φυσική, στις ίδιες παραμορφώσεις.

Οι δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε ιλυώδη άμμο M31 - D6, έδειξαν αποτελέσματα ποιοτικώς ανάλογα με αυτά της άμμου M31. Η βελτίωση, όμως, της αντοχής ήταν μικρότερη. Το 6.3 παρουσιάζει την τυπική συμπεριφορά της ιλυώδους άμμου σε δοκιμή με ενεργό τάση 1000 kPa.

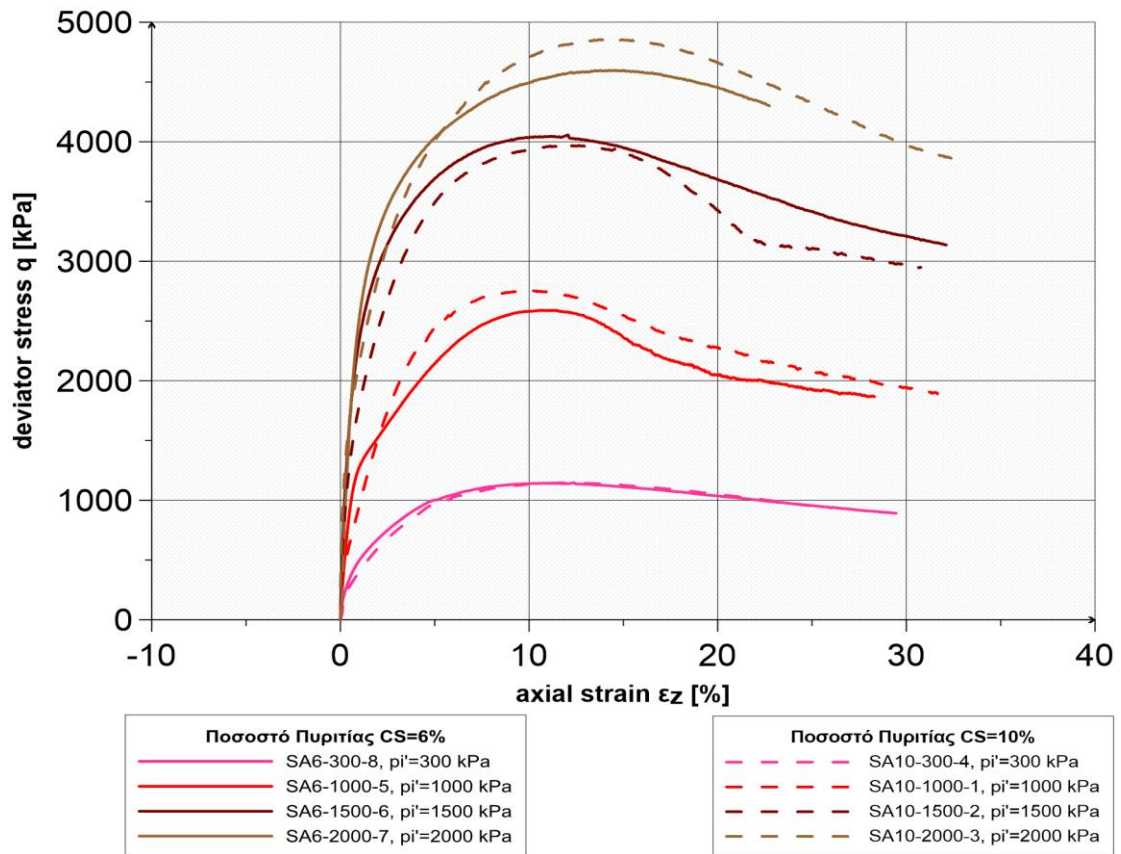


**Σχήμα 6.2.** Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa



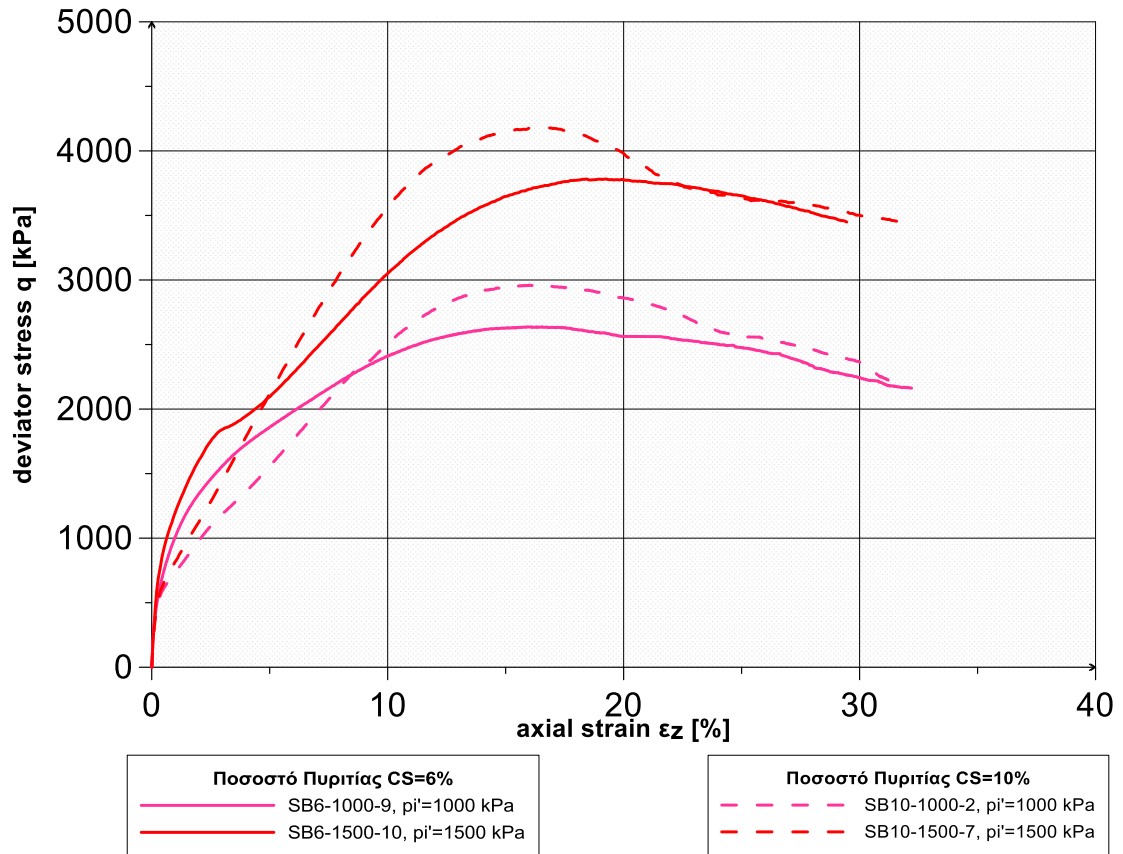
**Σχήμα 6.3.** Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa

Ενδιαφέρον είναι το συμπέρασμα που προκύπτει από το σχήμα 6.4 στο οποίο απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων  $q-\epsilon_z$  για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 & 10%). Οι καμπύλες που αναφέρονται στην ίδια τάση στερεοποίησης παρατηρούμε ότι δεν έχουν σημαντική απόκλιση για τα δύο διαφορετικά ποσοστά σταθεροποιητή που εξετάζουμε. Συμπεραίνουμε ότι υπάρχει έντονη εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους μόνο από το επίπεδο της τάσης εγκιβωτισμού και όχι από το ποσοστό CS. Σε όλα τα επίπεδα τάσης και για τα δύο ποσοστά σταθεροποιητή, η αποκλίνουσα τάση μεγιστοποιείται και παραμένει σταθερή στο εύρος των αξονικών παραμορφώσεων 8-12 % και στη συνέχεια ακολουθεί μια ομαλή μείωση προς μία παραμένουσα τιμή.



**Σχήμα 6.4.** Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  σταθεροποιημένης άμμου M31(CS=6 & 10%)

Παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και για το μίγμα ιλυώδους άμμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5 στο οποίο απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων  $q$ - $\epsilon_z$  για τα δοκίμια σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 και ιλύος D6 (CS=6 & 10%). Οι καμπύλες που αναφέρονται στην ίδια τάση στερεοποίησης παρατηρούμε ότι δεν έχουν σημαντική απόκλιση για τα δύο διαφορετικά ποσοστά σταθεροποιητή που εξετάζουμε. Σε όλα τα επίπεδα τάσης και για τα δύο ποσοστά σταθεροποιητή, η αποκλίνουσα τάση μεγιστοποιείται και παραμένει σταθερή στο εύρος των αξονικών παραμορφώσεων 13-18 % και στη συνέχεια ακολουθεί μια ομαλή μείωση προς μία παραμένουσα τιμή.



*Σχήμα 6.5. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων  $q-\varepsilon_z$  σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 και ιλύος D6 (CS=6 & 10%)*

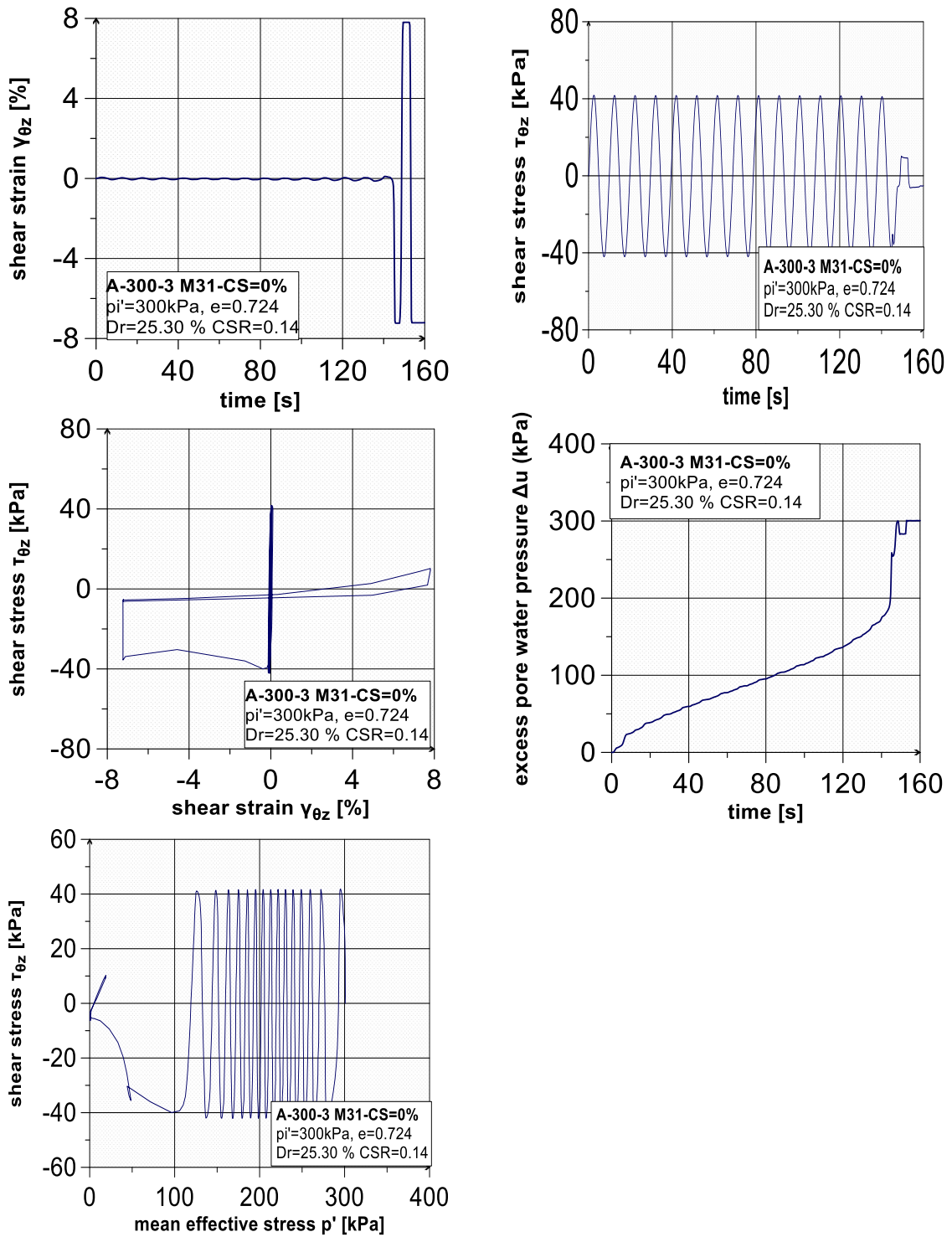
### 6.1.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης

Ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη ( $CS=6\%$  και  $10\%$  κατά βάρος) άμμο M31. Η διαδικασία παρασκευής σταθεροποιημένων δοκιμών ήταν η ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε στα δοκίμια της τριαξονικής συσκευής. Η στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμών έγινε με την ίδια αργή διαδικασία. Η εκτέλεση των δοκιμών ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης έγινε με επιβολή ημιτονοειδούς διατμητικής τάσης, με περίοδο  $T=10$  s (stress control). Η πίεση του υγρού των πόρων καταγραφόταν και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Κριτήριο ρευστοποίησης θεωρήθηκε η ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους ίση με  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σημειώθηκε το πλήθος των κύκλων  $N_{5\%}$  που απαιτείται για την ανάπτυξη αυτής της παραμόρφωσης και παρήχθησαν οι καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στο επίπεδο  $CSR - N_{5\%}$ . Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως  $CSR=\Delta\tau_{\theta z} / p'_{in}$  (πλάτος διατμητικής τάσης διά τη μέση ενεργό τάση στην αρχή της διάτμησης).

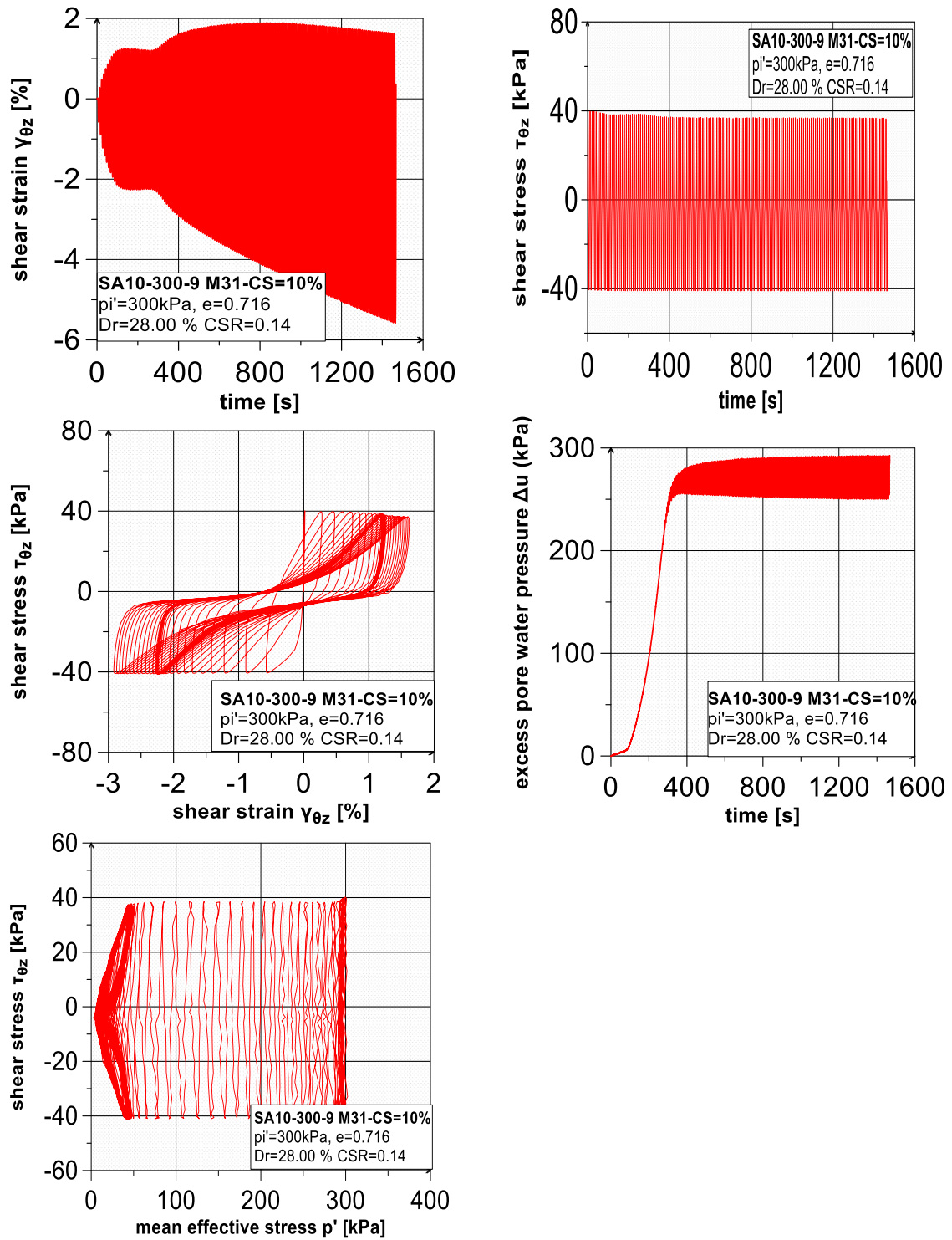
Η τυπική συμπεριφορά της φυσικής άμμου M31 σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6. Παρατηρούμε ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης η φυσική άμμος εμφανίζει πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης του υγρού πόρων αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή  $Ru= \Delta u/p'_i=0.65$ . Κατά τον δέκατο τέταρτο κύκλο η υπέρ – πίεση του υγρού των πόρων εκτινάσσεται και το δοκίμιο εμφανίζει απότομα πάρα πολύ υψηλές παραμορφώσεις και καταρρέει.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρατηρούμε ότι διαφέρει ριζικά από αυτήν της φυσικής (Σχήμα 6.7). Η σταθεροποιημένη άμμος διατηρεί τη δομή της χωρίς να καταρρέει ακόμα και όταν οι παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης του υγρού πόρων λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές. Η συμπεριφορά αυτή συνεχίζεται για πάρα πολλούς κύκλους και η δοκιμή ολοκληρώνεται αναγκαστικά, διότι τερματίζεται η ωφέλιμη διαδρομή των μετρητικών οργάνων.





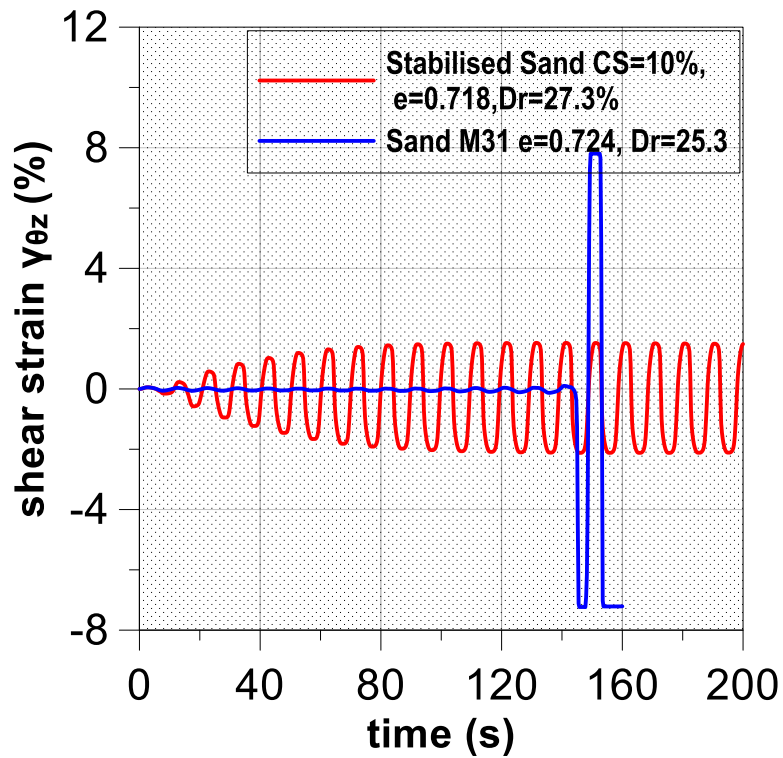
**Σχήμα 6.6.** Ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες φυσικής άμμου M31. Δοκιμή A-300-3,  $D_r = 25.3\%$ ,  $\text{CSR} = 0.14$ ,  $N_{5\%} = 14.6$ ,  $N_{1\%} = 14.5$ .



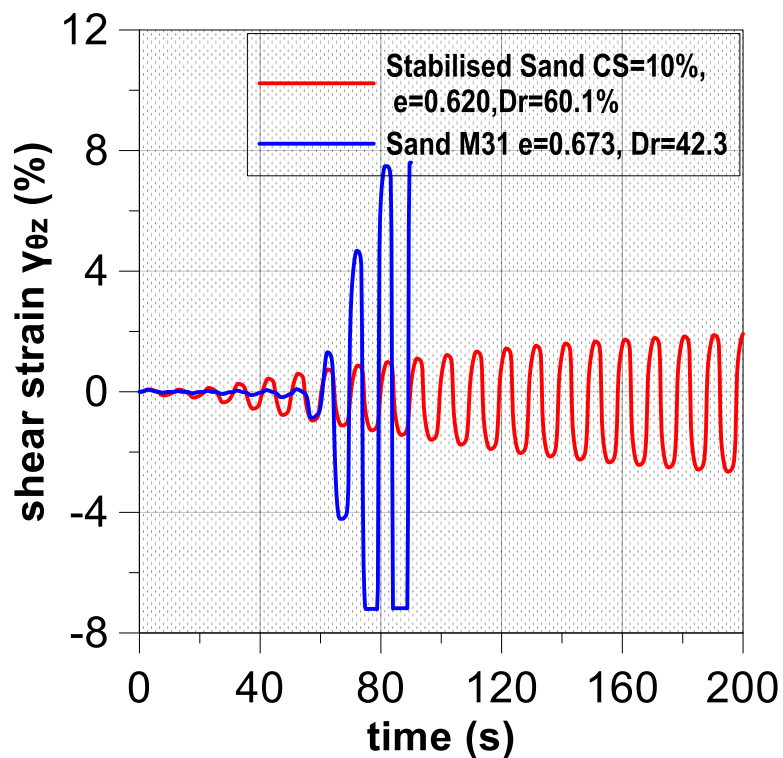
**Σχήμα 6.7.** Ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες σταθεροποιημένης άμμου M31. Δοκιμή SA-300-9,  $D_r = 28.0\%$ ,  $CSR = 0.14$ ,  $N_{5\%} = 49.9$ ,  $N_{1\%} = 1.7$ .

Στους πρώτους κύκλους φόρτισης τα δοκίμια της άμμου που εξετάσαμε δεν παρουσίασαν όλα την ίδια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, ορισμένα δοκίμια εμφάνισαν παραμορφώσεις μεγαλύτερες από αυτές του φυσικού αντίστοιχης πυκνότητας, είτε είχαν σταθεροποιηθεί με ποσοστό πυριτίας CS=6% είτε CS=10% (Σχήμα 6.8), ενώ άλλα εμφάνισαν παραμορφώσεις της ίδιας τάξης (Σχήμα 6.9). Για να διαπιστώσουμε την αιτία αυτής της διαφορετικής συμπεριφοράς εξετάσαμε την επίδραση του χρόνου στερεοποίησης, του χρόνου ωρίμανσης της γέλης και την επίδραση της πυκνότητας των δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια που εξετάσαμε έχουν στερεοποιηθεί σε τάση  $p_i=300$  kPa.

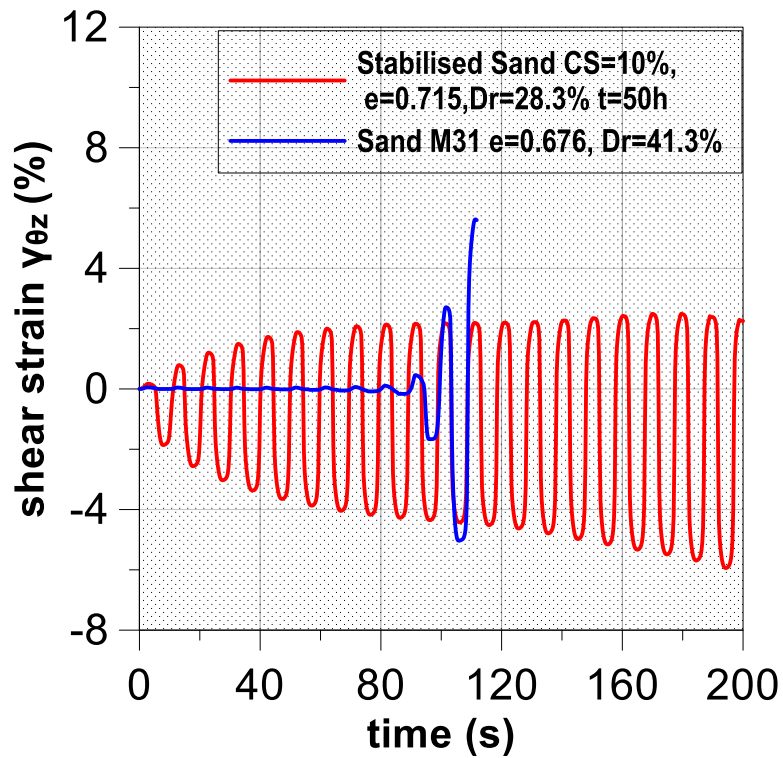
Ο παράγοντας του χρόνου ωρίμανσης της γέλης στο δοκίμιο δε φαίνεται να έχει κάποια επίδραση, αφού δοκίμια με διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης σε 50, 90 και 115 ώρες υπό άτονες συνθήκες παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει γιατί οι επιπλέον δεσμοί που αναπτύσσονται λόγω μεγαλύτερου χρόνου ωρίμανσης θα καταστραφούν στο στάδιο της στερεοποίησης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται δύο δοκιμές σε με χρόνο ωρίμανσης 50 και 115 ώρες στα Σχήματα 6.10 και 6.11 αντίστοιχα.



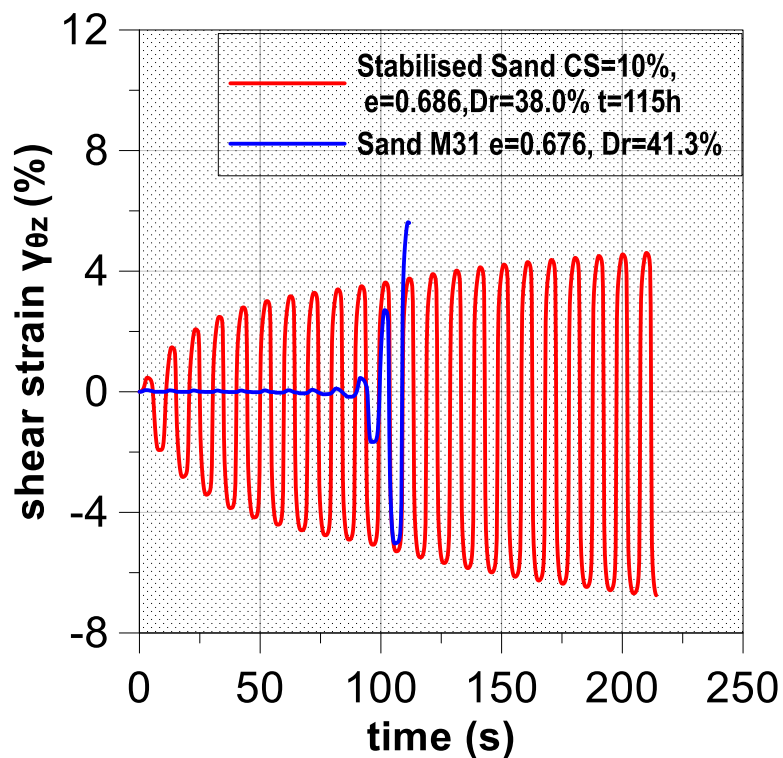
Σχήμα 6.8. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο.



Σχήμα 6.9. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο.

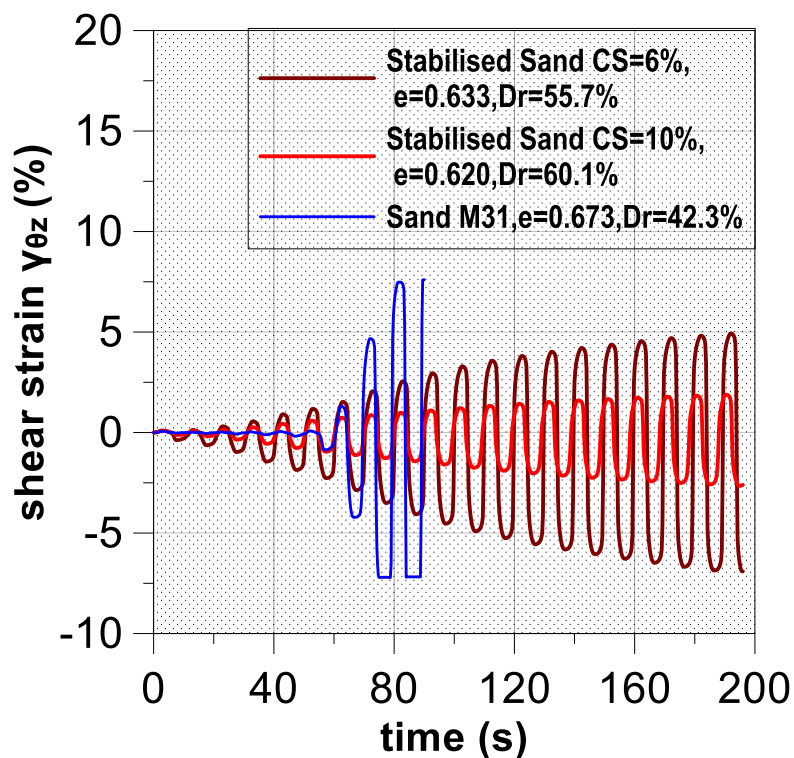


*Σχήμα 6.10. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο με ηλικία ωρίμανσης 50 hr.*

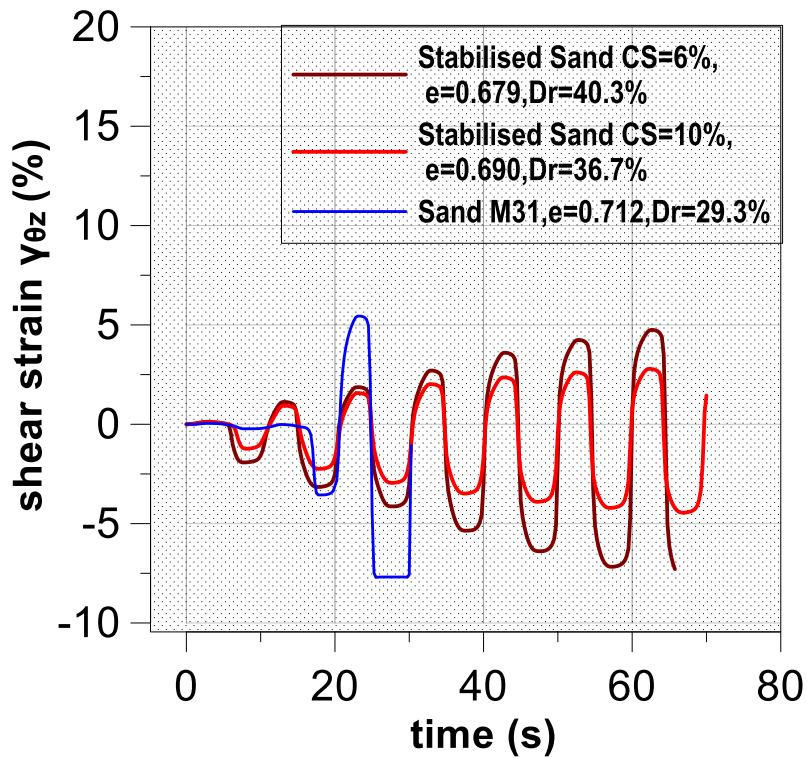


*Σχήμα 6.11. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο με ηλικία ωρίμανσης 115 hr.*

Εξετάζοντας την επίδραση του ποσοστού του σταθεροποιητή, παρατηρήσαμε ότι από τα δοκίμια που εμφάνισαν παραμορφώσεις μεγαλύτερες από αυτές του φυσικού εδάφους στους πρώτους κύκλους, οι παραμορφώσεις αυτών που είχαν σταθεροποιηθεί με ποσοστό  $CS=10\%$  ήταν αισθητά μικρότερες από τις παραμορφώσεις αυτών που είχαν σταθεροποιηθεί με  $CS=6\%$ . Σχήμα 6.12. Αντίστοιχα, το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και από τα δοκίμια που εμφάνισαν παραμορφώσεις της ίδιας τάξης με το φυσικό έδαφος στους πρώτους κύκλους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13.

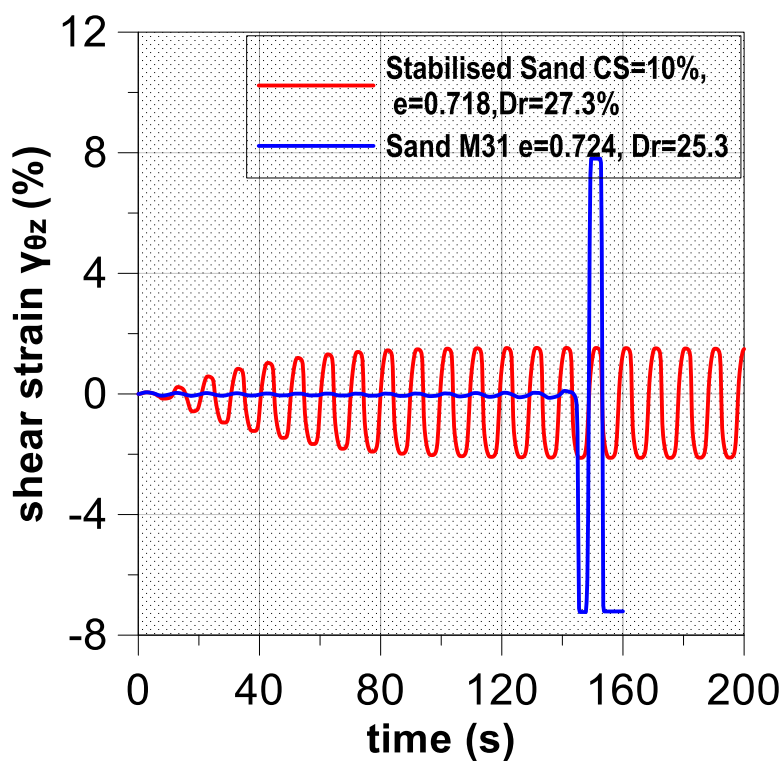


**Σχήμα 6.12.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική, σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  και  $CS=10\%$  άμμο.

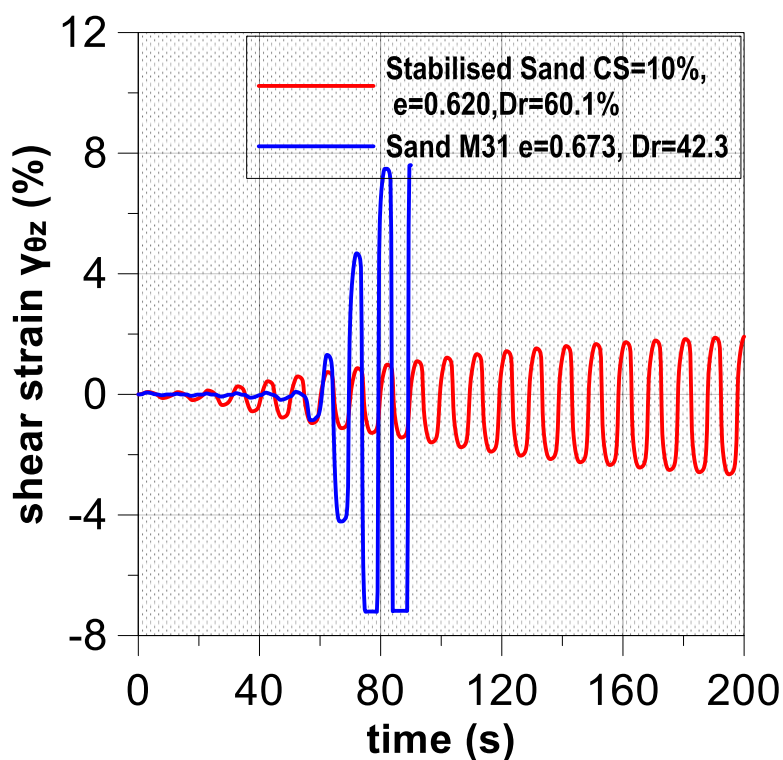


*Σχήμα 6.13. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική, σταθεροποιημένη CS=6% και CS=10% άμμο.*

Ο παράγοντας που φαίνεται να έχει καθοριστική σημασία στη συμπεριφορά του δοκιμίου της άμμου στην ανακυκλική φόρτιση στους πρώτους κύκλους είναι η πυκνότητα του. Παρατηρούμε ότι όσα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το αντίστοιχο φυσικό ήταν πιο χαλαρά, ενώ τα δοκίμια που εμφανίζουν παραμορφώσεις που προσομοιάζουν τις παραμορφώσεις του φυσικού ήταν κατά κανόνα πιο πυκνά. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $\gamma_{\theta z}$ -t εστιασμένα στους πρώτους κύκλους φόρτισης όπου παρατηρήσαμε και τη διαφορά στα Σχήματα 6.14 και 6.15.



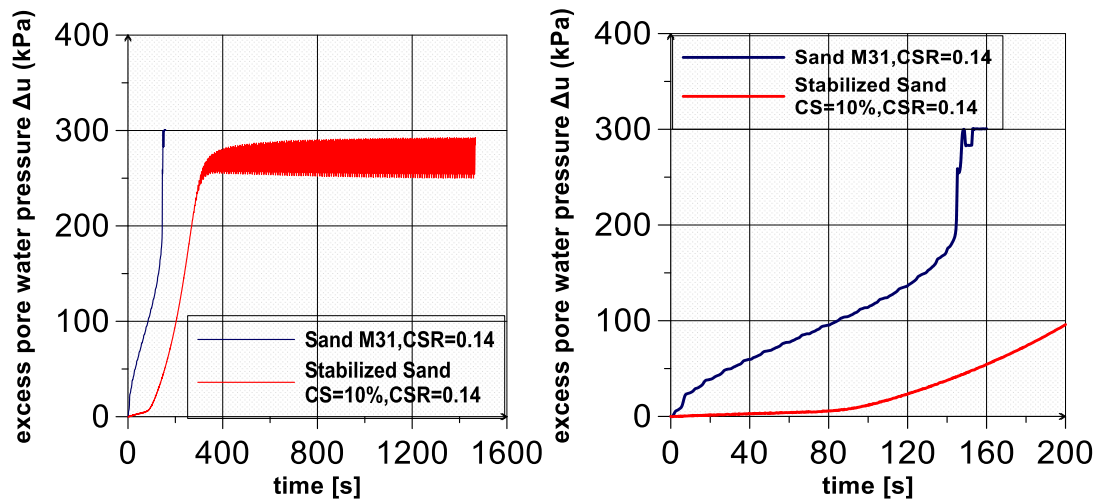
*Σχήμα 6.14. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο. Χαλαρότερα δοκίμια.*



*Σχήμα 6.15. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο. Πυκνότερα δοκίμια.*

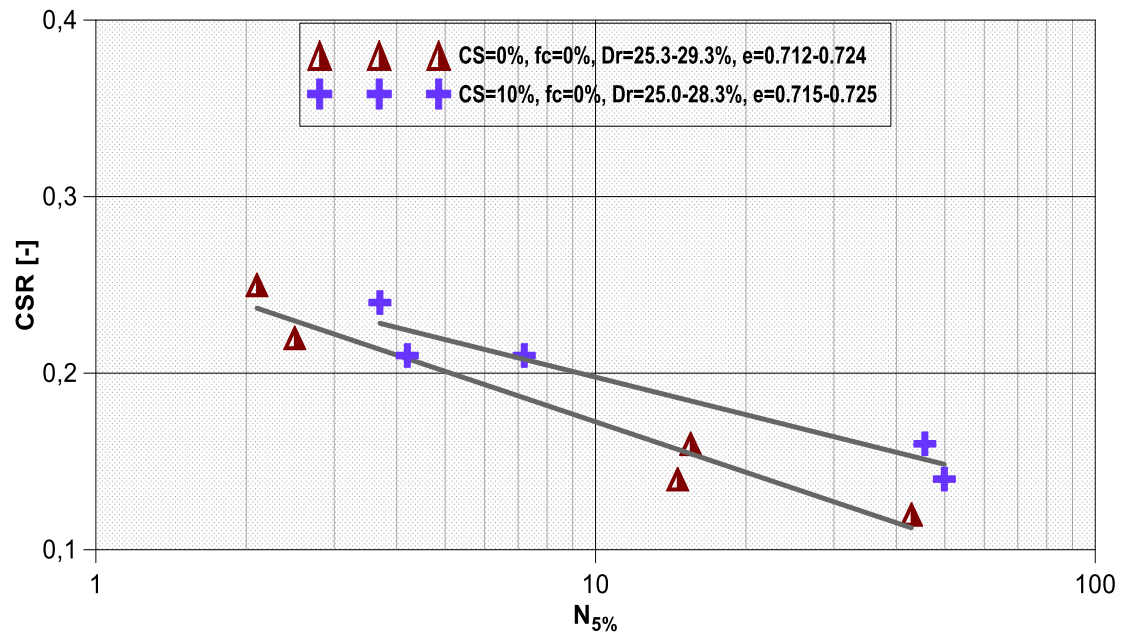


Η πίεση του υγρού των πόρων στους πρώτους κύκλους καταγράφεται πολύ χαμηλή. Έχουμε την πεποίθηση ότι η πραγματική πίεση μέσα στο υγρό των πόρων της γέλης είναι υψηλή, αφού και οι παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές, αλλά δεν εκδηλώνεται άμεσα στον μετρητή. Ο στερεός ιστός της γέλης είναι σχετικά υγής και αδρανοποιεί το νερό των πόρων, οπότε καθυστερεί τις μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται για να εκδηλωθεί το μέτωπο πίεσης στο νερό εκτός του δοκιμίου. Σε προχωρημένους κύκλους, ο ιστός της γέλης έχει υποστεί σοβαρό τραυματισμό και το ιξώδες του συστήματος έχει μειωθεί σημαντικά. Η εκδήλωση της πίεσης του υγρού πόρων είναι περισσότερο άμεση και ακολουθεί πρακτικά τους κύκλους φόρτισης. Το Σχήμα 6.16 απεικονίζει την ανάπτυξη της υπέρ - πίεσης του υγρού των πόρων στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο.



*Σχήμα 6.16. Σύγκριση της ανάπτυξης υπέρ-πίεσης του υγρού των πόρων της φυσικής και της σταθεροποιημένης CS=10% άμμου.*

Οι καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης (CS=10%) άμμου M31 στο επίπεδο CSR – N<sub>5%</sub> απεικονίζονται στο Σχήμα 6.17. Παρατηρούμε ότι με κριτήριο ρευστοποίησης την ανάπτυξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους γ<sub>DA</sub>=5% η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει καμπύλη στο επίπεδο CSR - N πιο πάνω και δεξιότερα από αυτήν της φυσικής. Αυτό σημαίνει ότι για τον ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στη σταθεροποιημένη άμμο, σε σύγκριση με τη φυσική παρόμοιας πυκνότητας, για να αναπτυχθεί παραμόρφωση διπλού πλάτους 5%.

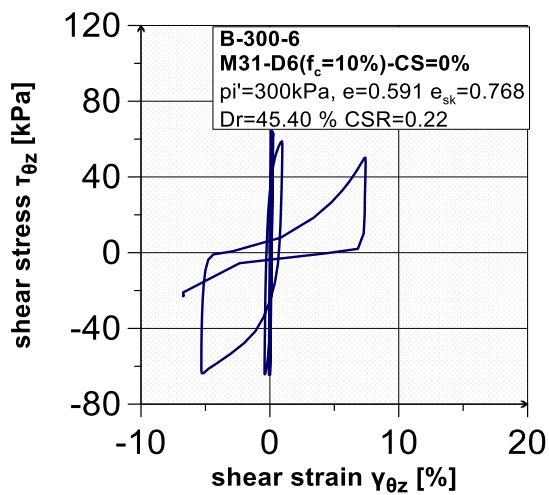
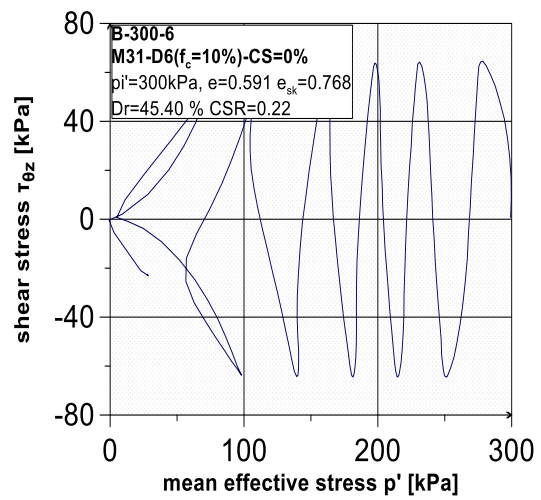
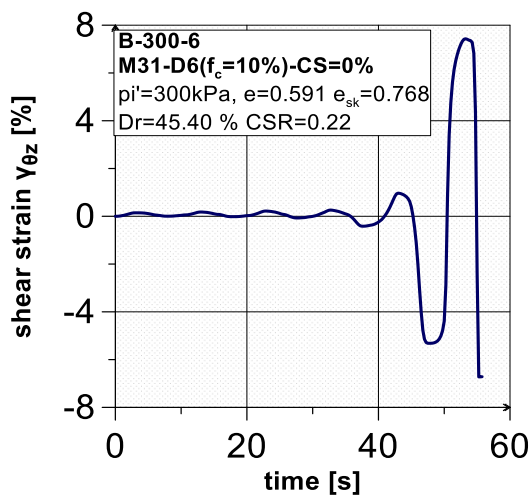
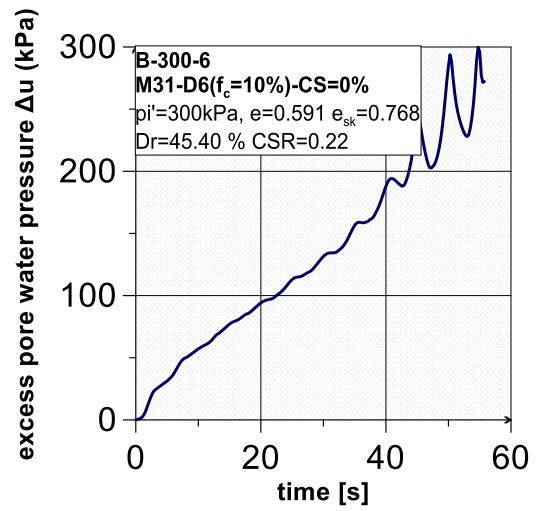
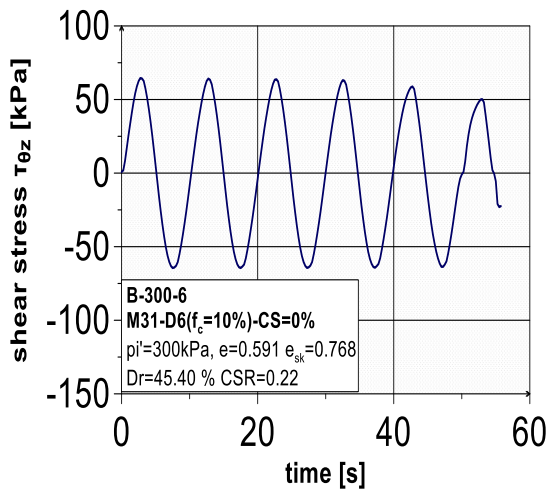


**Σχήμα 6.17.** Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης CS=10% άμμου M31 στο επίπεδο CSR-N<sub>5%</sub>.

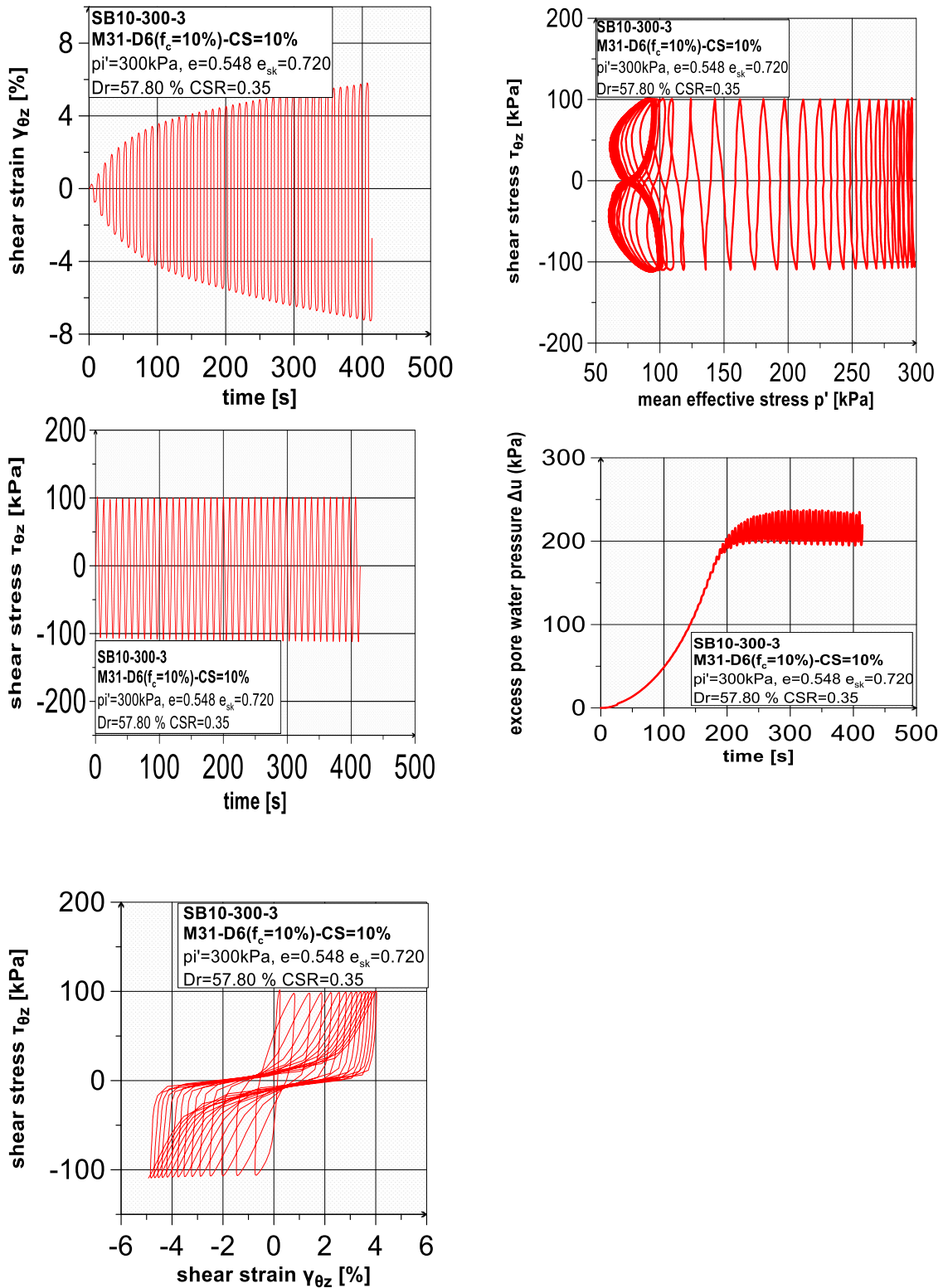
Ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη (CS=6% και 10% κατά βάρος) ιλυώδη άμμο 85% κατά βάρος M31 & 15% κατά βάρος D6. Η διαδικασία παρασκευής σταθεροποιημένων δοκιμίων ήταν η ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε στα δοκίμια της τριαξονικής συσκευής. Η στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων έγινε με την ίδια αργή διαδικασία. Η εκτέλεση των δοκιμών ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης έγινε με επιβολή ημιτονοειδούς διατμητικής τάσης, με περίοδο  $T=10$  s (stress control). Η πίεση του υγρού των πόρων καταγραφόταν και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Κριτήριο ρευστοποίησης θεωρήθηκε η ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους ίση με  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σημειώθηκε το πλήθος των κύκλων  $N_{5\%}$  που απαιτείται για την ανάπτυξη αυτής της παραμόρφωσης και παρήχθησαν οι καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στο επίπεδο CSR –  $N_{5\%}$ . Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως  $CSR=\Delta\tau_{\theta z} / p'_{in}$  (πλάτος διατμητικής τάσης διά τη μέση ενεργό τάση στην αρχή της διάτμησης).

Η τυπική συμπεριφορά της φυσικής ιλυώδους άμμου σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.18. Παρατηρούμε ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης η φυσική ιλυώδης άμμος εμφανίζει πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης του υγρού πόρων αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή  $Ru= \Delta u/p_i=0.66$ . Κατά τον έκτο κύκλο η υπέρ – πίεση του υγρού των πόρων εκτινάσσεται και το δοκίμιο εμφανίζει απότομα πάρα πολύ υψηλές παραμορφώσεις και καταρρέει.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρατηρούμε ότι διαφέρει ριζικά από αυτήν της φυσικής (Σχήμα 6.19). Η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος διατηρεί τη δομή της χωρίς να καταρρέει ακόμα και όταν οι παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης του υγρού πόρων λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές. Η συμπεριφορά αυτή συνεχίζεται για πάρα πολλούς κύκλους και η δοκιμή ολοκληρώνεται αναγκαστικά, διότι τερματίζεται η ωφέλιμη διαδρομή των μετρητικών οργάνων.

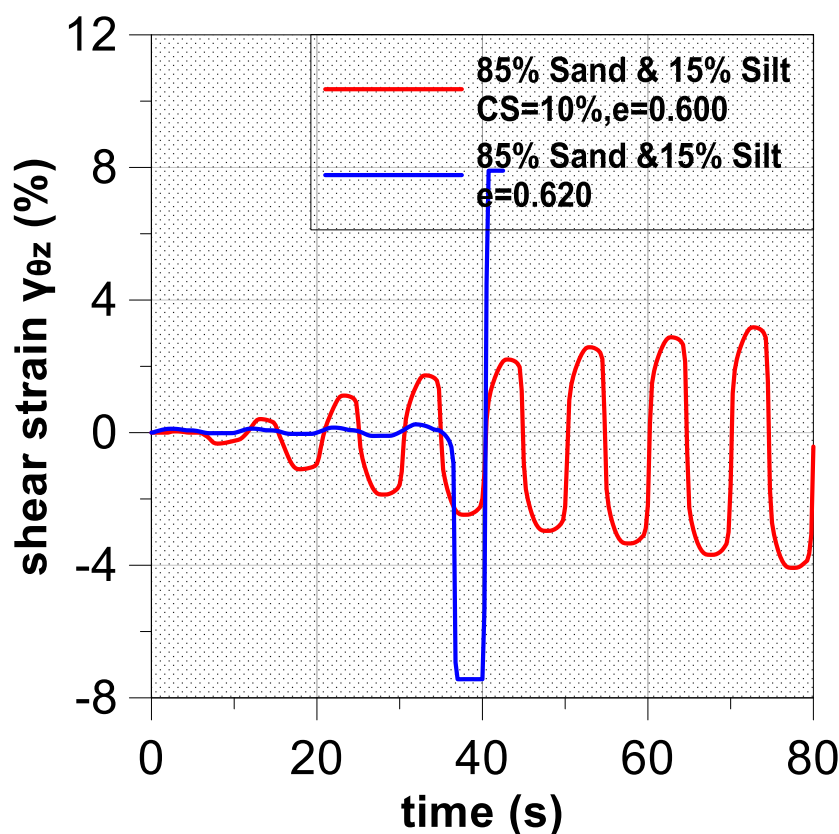


**Σχήμα 6.18.** Ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες φυσικής ιλύοδης άμμον. Δοκιμή B-300-6,  $D_r=45,40\%$ ,  $CSR=0.22$ ,  $N_{5\%}=4.7$ ,  $N_{1\%}=4.2$ .

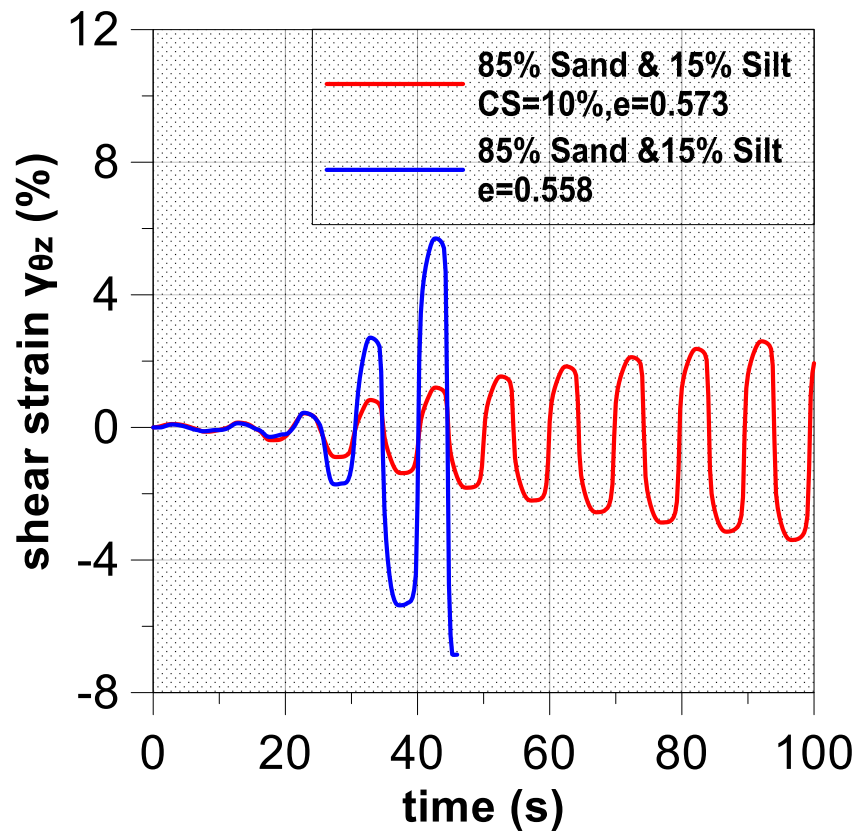


**Σχήμα 6.19.** Ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες σταθεροποιημένης ιλυώδης άμμων. Δοκιμή SB10-300-3,  $D_r=57.8\%$ , CSR=0.35,  $N_{5\%}=4.7$ ,  $N_{1\%}=1.2$

Στους πρώτους κύκλους φόρτισης τα δοκίμια της ιλυώδους άμμου που εξετάσαμε δεν παρουσίασαν όλα την ίδια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, ορισμένα δοκίμια εμφάνισαν παραμορφώσεις μεγαλύτερες από αυτές του φυσικού αντίστοιχης πυκνότητας, με μικρότερες βέβαια διαφορές από αυτές που συναντήσαμε στην άμμο (Σχήμα 6.20), ενώ άλλα εμφάνισαν παραμορφώσεις της ίδιας τάξης ακόμα και μικρότερες (Σχήμα 6.21). Για να διαπιστώσουμε που οφείλεται η διαφορετική απόκριση των δοκιμίων εξετάσαμε την επίδραση της πυκνότητας και του χρόνου στερεοποίησης του δοκιμίου. Επιπλέον ερευνήσαμε και την επίδραση του ποσοστού σταθεροποιητή (CS=6% και 10%) στο μίγμα. Θεωρούμε, όπως και στην άμμο, ότι ο παράγοντας του χρόνου ωρίμανσης της γέλης στο δοκίμιο δεν έχει κάποια επίδραση. Όλα τα δοκίμια που εξετάσαμε έχουν στερεοποιηθεί σε τάση  $p_i=300$  kPa.

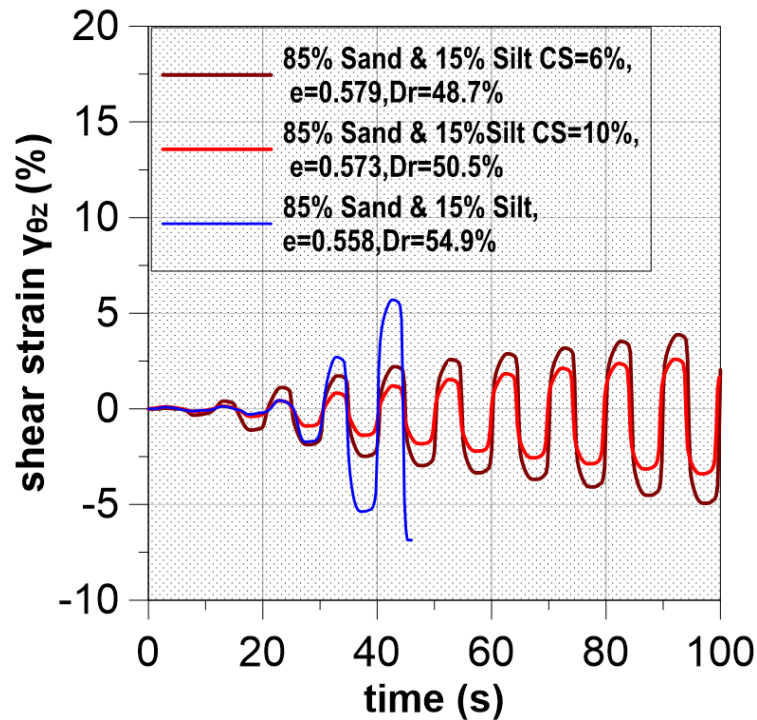


**Σχήμα 6.20.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% ιλυώδη άμμο.



*Σχήμα 6.21. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο.*

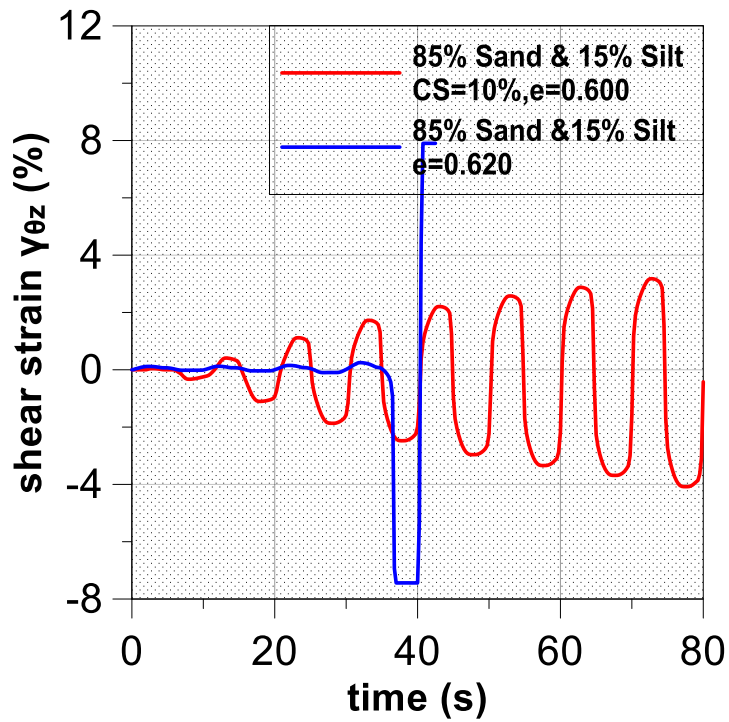
Εξετάζοντας την επίδραση του ποσοστού του σταθεροποιητή, παρατηρήσαμε ότι τα δοκίμια που είχαν σταθεροποιηθεί με ποσοστό πυριτίας CS=10% εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά, δηλαδή μικρότερες παραμορφώσεις, από αυτά που είχαν σταθεροποιηθεί με ποσοστό CS=6%. Αυτή η συμπεριφορά απεικονίζεται στο Σχήμα 6.22. Η βελτίωση της συμπεριφοράς, σε όρους παραμορφώσεων, της ιλυώδους άμμου με την αύξηση του ποσοστού του σταθεροποιητή από CS=6% σε CS=10% δεν είναι τόσο σημαντική όσο στην καθαρή άμμο.



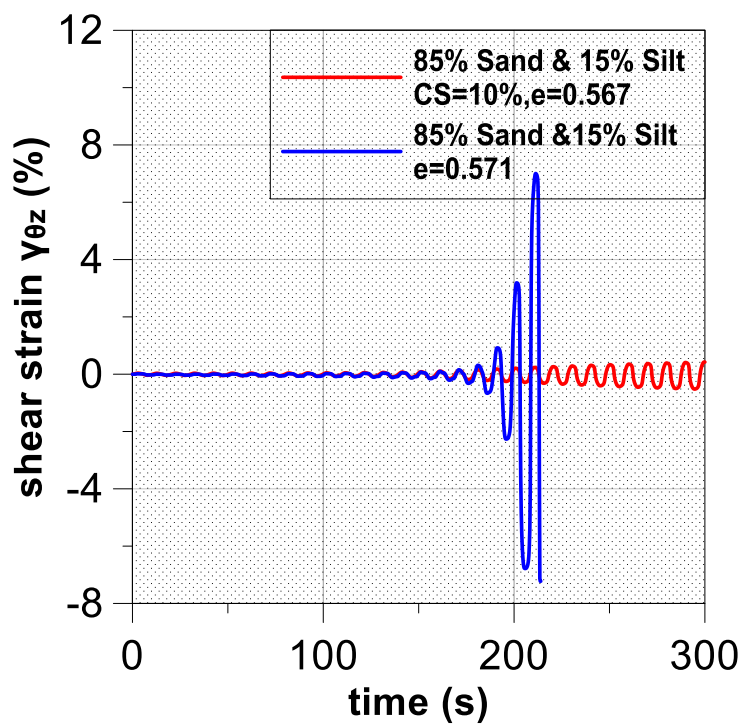
**Σχήμα 6.22.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=6 και 10% ιλυώδη άμμο.

Ο παράγοντας που φαίνεται να έχει καθοριστική σημασία στη συμπεριφορά του δοκιμίου της ιλυώδους άμμου στην ανακυκλική φόρτιση στους πρώτους κύκλους είναι η πυκνότητα του. Παρατηρούμε ότι όσα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από του αντίστοιχου φυσικού ήταν πιο χαλαρά, ενώ τα δοκίμια που εμφανίζουν παραμορφώσεις που προσομοιάζουν τις παραμορφώσεις του φυσικού ήταν κατά κανόνα πιο πυκνά. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $\gamma_{\theta z}$ -t εστιασμένα στους πρώτους κύκλους φόρτισης όπου παρατηρήσαμε και τη διαφορά στα Σχήματα 6.23, 6.24, 6.25.

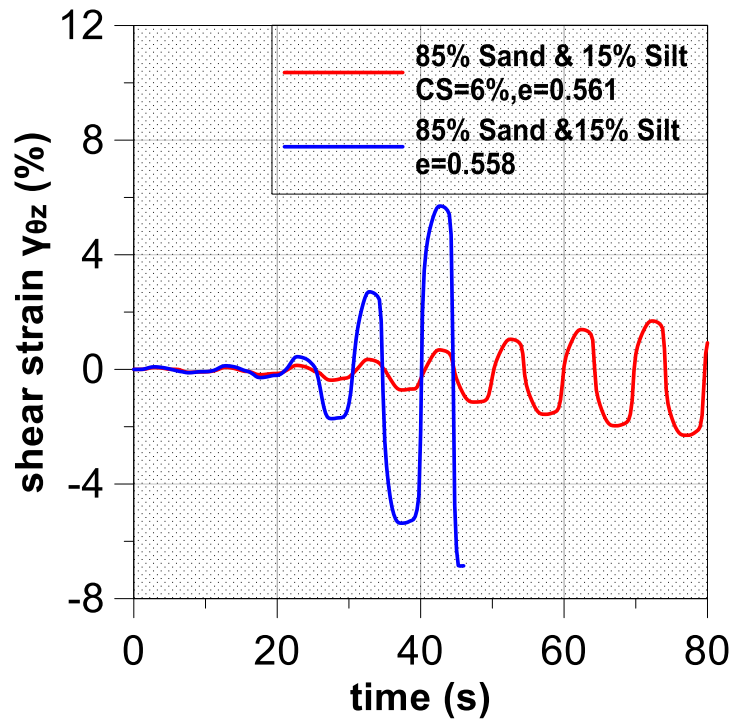




*Σχήμα 6.23. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο. Χαλαρότερο δοκίμιο.*



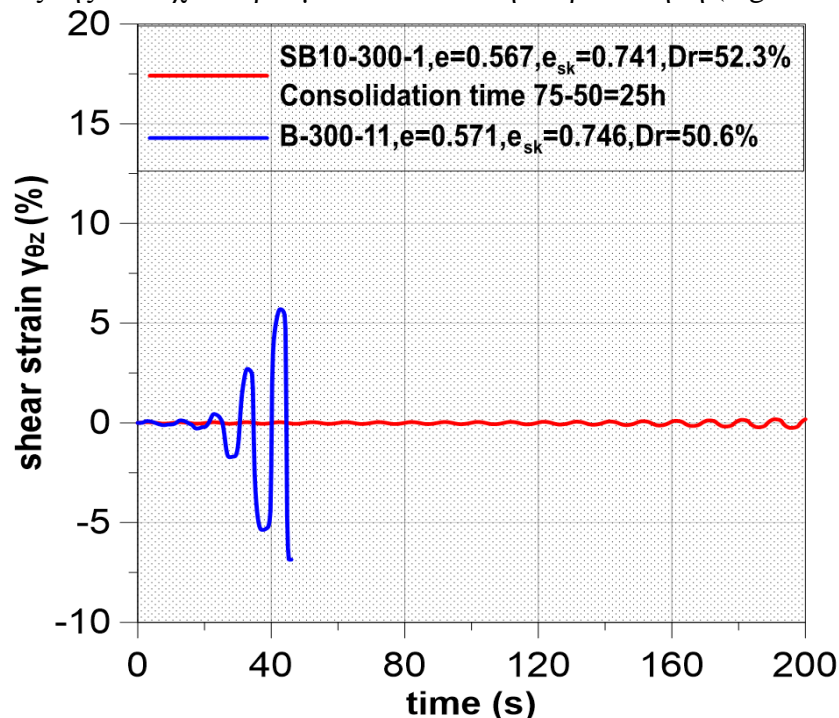
*Σχήμα 6.24. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο. Πυκνότερο δοκίμιο.*



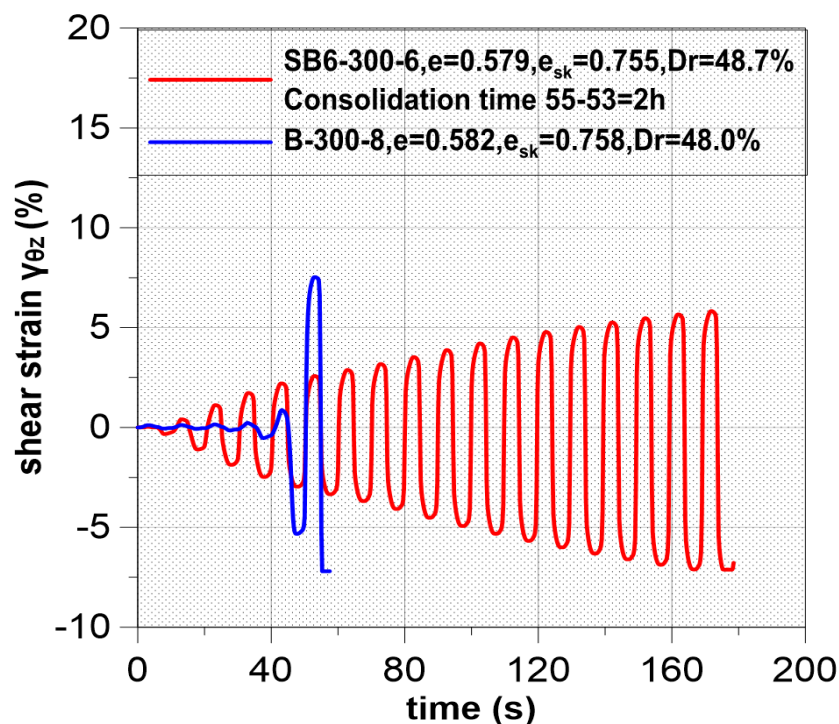
*Σχήμα 6.25. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο. Πυκνότερο δοκίμιο.*

Για να ερευνησουμε την επίδραση του χρόνου στερεοποίησης στη μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου εκτελέσαμε δοκιμές στη σταθεροποιημένη (CS=6% και 10%) ιλυώδη άμμου με αυξημένο χρόνο στερεοποίησης. Ενώ τα προηγούμενα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με χρόνο στερεοποίησης 2 ώρες, σε αυτή τη σειρά πειραμάτων για να διαπιστώσουμε την επίδραση του χρόνου, αφήσαμε τα δοκίμια να στερεοποιηθούν 2,5,15,20,22 και 25 ώρες. Παρατηρήσαμε ότι τα δοκίμια ιλυώδους άμμου που στερεοποιήθηκαν για πάνω από 10 ώρες παρουσίασαν μικρότερες παραμορφώσεις από αυτές του φυσικού, παρόμοιας πυκνότητας και λόγου CSR, στους πρώτους κύκλους φόρτισης. Αντίθετα, τα δοκίμια ιλυώδους άμμου που αφέθηκαν να στερεοποιηθούν για 2 ώρες εμφάνισαν παραμορφώσεις μεγαλύτερες του αντίστοιχου φυσικού (Σχήματα 6.26, 6.27, 6.28). Παρόμοια συμπεριφορά εμφάνισαν και τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου που στερεοποιήθηκαν για 2 ώρες.

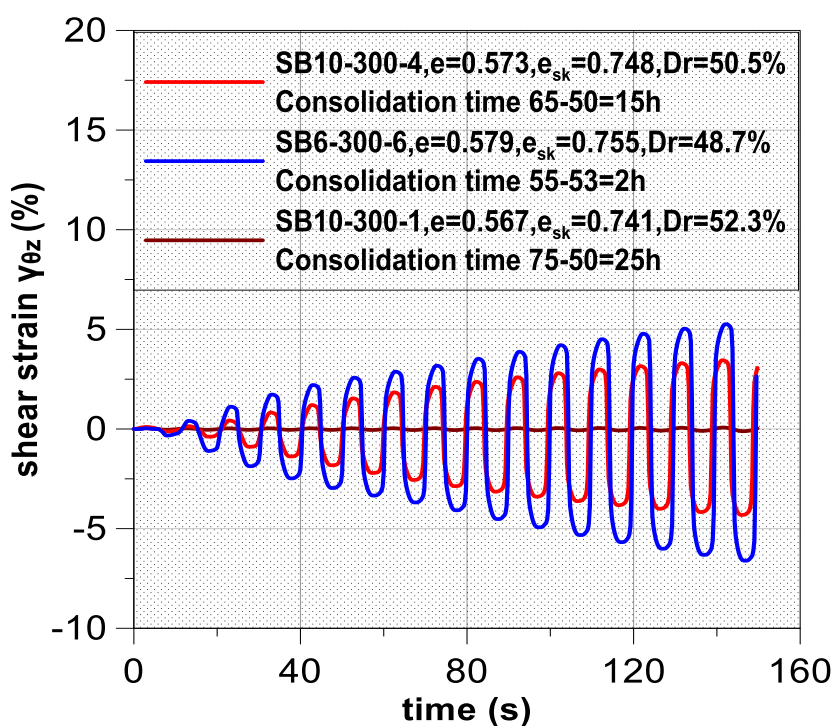
Οφείλουμε να επισημάνουμε ότι η βελτιωμένη συμπεριφορά φαίνεται να συνδέεται με την αύξηση του χρόνου στερεοποίησης και όχι με την αύξηση του χρόνου παρασκευής-διάτμησης (αυξημένος χρόνος ωρίμανσης), που αναπόφευκτα συνεπάγεται η αύξηση του χρόνου στερεοποίησης. Πρόκειται δηλαδή για παρατεταμένη στερεοποίηση και ανάπλαση δεσμών και όχι για παρατεταμένη ωρίμανση. Αυτό επαληθεύεται από τη δοκιμή SB6-300-5 που ενώ αφέθηκε να ωριμάσει για 140 ώρες στο καλούπι και στερεοποιήθηκε για 5 ώρες (Σχήματα 6.29, 6.30) παρουσίασε μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το φυσικό δοκίμιο αντίστοιχης πυκνότητας και CSR στους πρώτους κύκλους φόρτισης. Η αύξηση του χρόνου στερεοποίησης έχει διττό ρόλο: αρχικά εξασφαλίζεται η ολοκλήρωση της εκροής του νερού από τους πόρους και στη συνέχεια η γέλη έχει τη δυνατότητα να αναπλάσει τους δεσμούς της που έχουν τραυματιστεί κατά τη στερεοποίηση (regenerate).



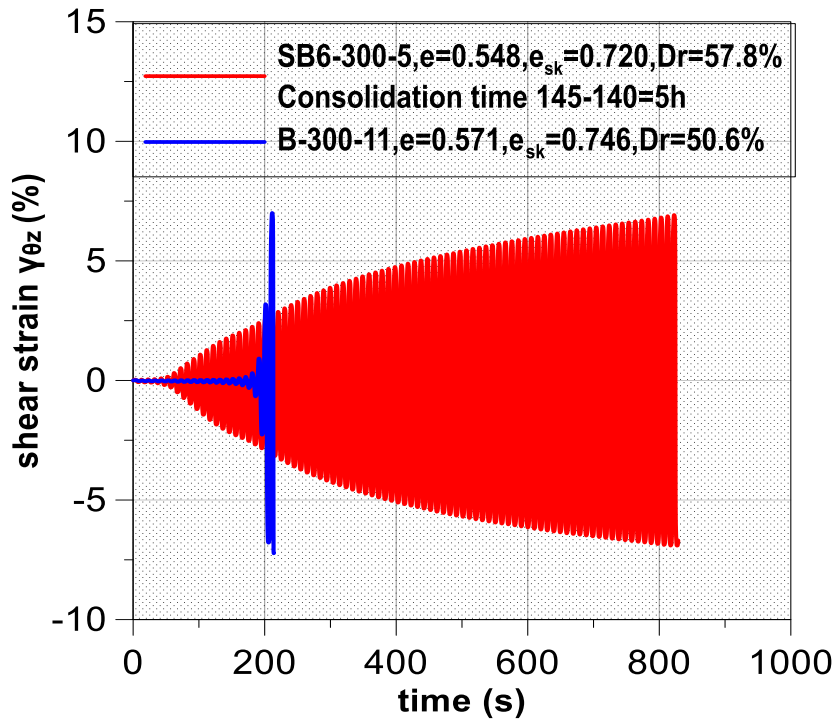
**Σχήμα 6.26.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% ιλυώδη άμμο. Χρόνος στερεοποίησης 25 h.



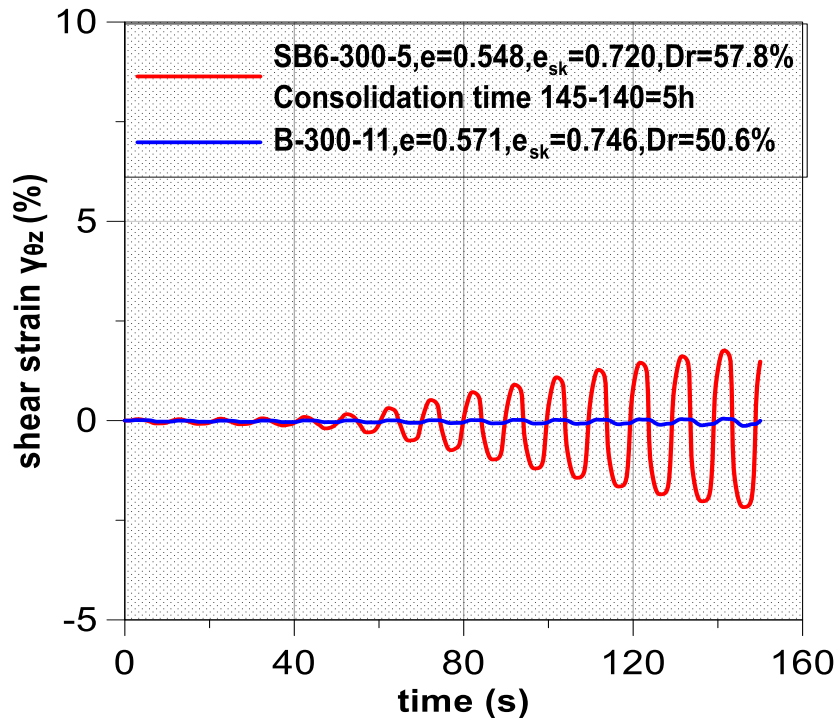
**Σχήμα 6.27.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  ιλυώδη άμμο. Χρόνος στερεοποίησης 2 h.



**Σχήμα 6.28.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλυώδη άμμο. Χρόνοι στερεοποίησης 2, 15, 25 h.

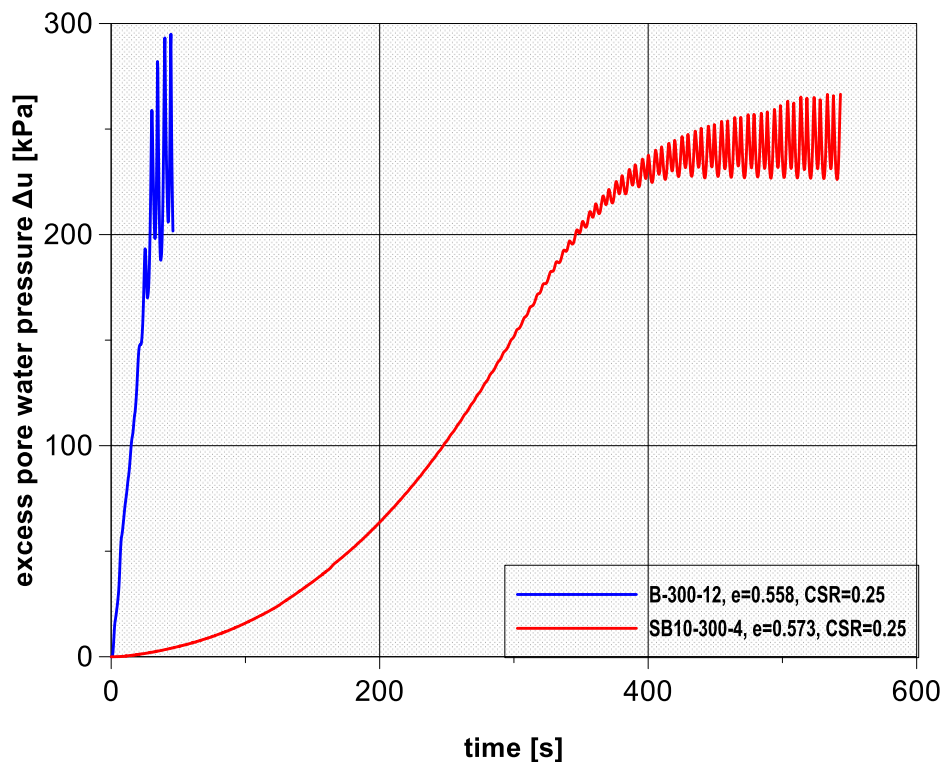


**Σχήμα 6.29.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  ιλύδη άμμο. Χρόνος ωρίμανσης 140 h και χρόνος στερεοποίησης 5 h.



**Σχήμα 6.30.** Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων εν τω χρόνω για φυσική και σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  ιλύδη άμμο. Χρόνος ωρίμανσης 140 h και χρόνος στερεοποίησης 5 h. Εστιασμένο στους πρώτους κύκλους.

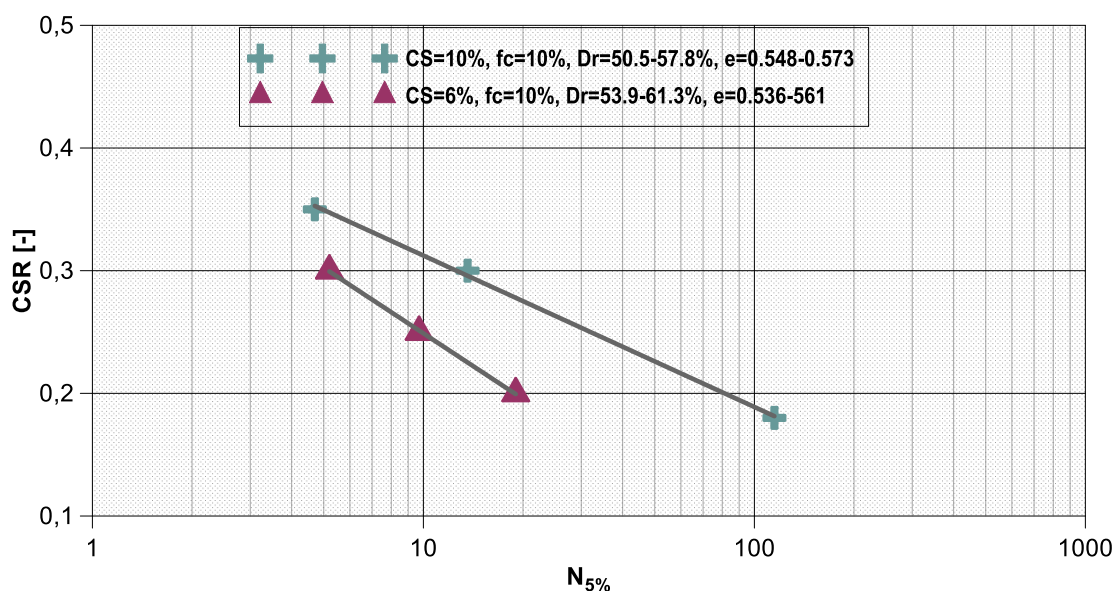
Η πίεση του υγρού των πόρων στους πρώτους κύκλους καταγράφεται πολύ χαμηλή. Έχουμε την πεποίθηση ότι η πραγματική πίεση μέσα στο υγρό των πόρων της γέλης είναι υψηλή, αφού και οι παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές, αλλά δεν εκδηλώνεται άμεσα στον μετρητή. Ο στερεός ιστός της γέλης είναι σχετικά υγιής και αδρανοποιεί το νερό των πόρων, οπότε καθυστερεί τις μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται για να εκδηλωθεί το μέτωπο πίεσης στο νερό εκτός του δοκιμίου. Σε προχωρημένους κύκλους, ο ιστός της γέλης έχει υποστεί σοβαρό τραυματισμό και το ιξώδες του συστήματος έχει μειωθεί σημαντικά. Η εκδήλωση της πίεσης του υγρού πόρων είναι περισσότερο άμεση και ακολουθεί πρακτικά τους κύκλους φόρτισης. Το Σχήμα 6.31 απεικονίζει την ανάπτυξη της υπέρ - πίεσης του υγρού των πόρων στη φυσική και στη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο.



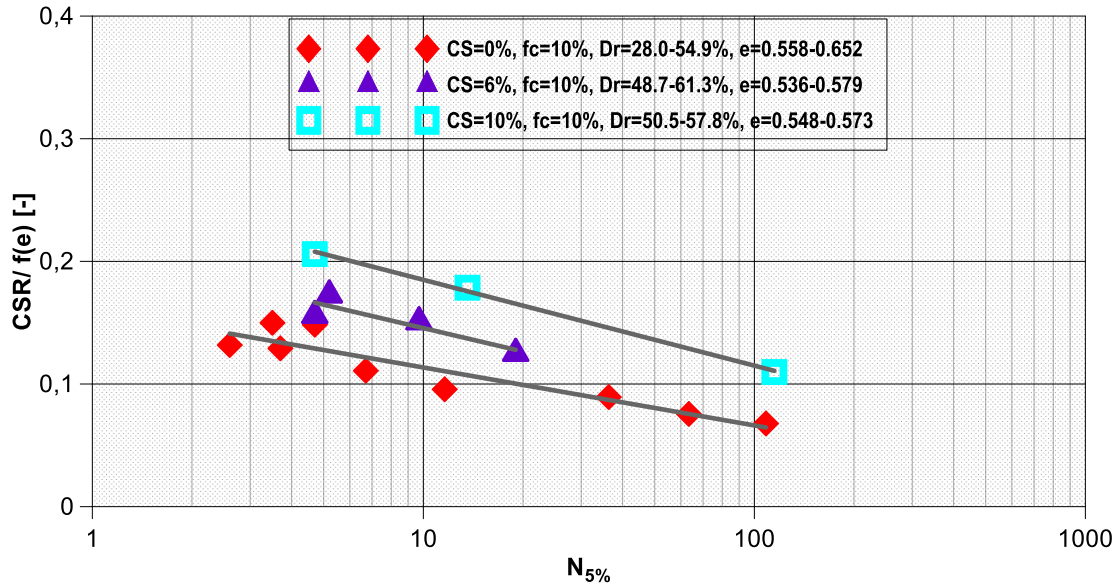
**Σχήμα 6.31.** Σύγκριση της ανάπτυξης υπερ-πίεσης του υγρού των πόρων της φυσικής και της σταθεροποιημένης CS=10% ιλυώδους άμμου.

Οι καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης (CS=6% και 10%) ιλυώδους άμμου M31 στο επίπεδο CSR – N<sub>5%</sub> απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα. Στο Σχήμα 6.32 φαίνεται η καλύτερη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης με CS=10% ιλυώδους άμμου έναντι της σταθεροποιημένης με CS=6%. Στο σχήμα 6.33 απεικονίζονται οι καμπύλες αντίστασης στη ρευστοποίηση της σταθεροποιημένης (CS=10% και 6%) και της φυσικής ιλυώδους άμμου κανονικοποιημένες ως προς το δείκτη πόρων για να αφαιρέσουμε την επίδραση της πυκνότητας. Παρατηρούμε ότι με κριτήριο ρευστοποίησης την ανάπτυξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους γ<sub>DA</sub>=5% η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος με

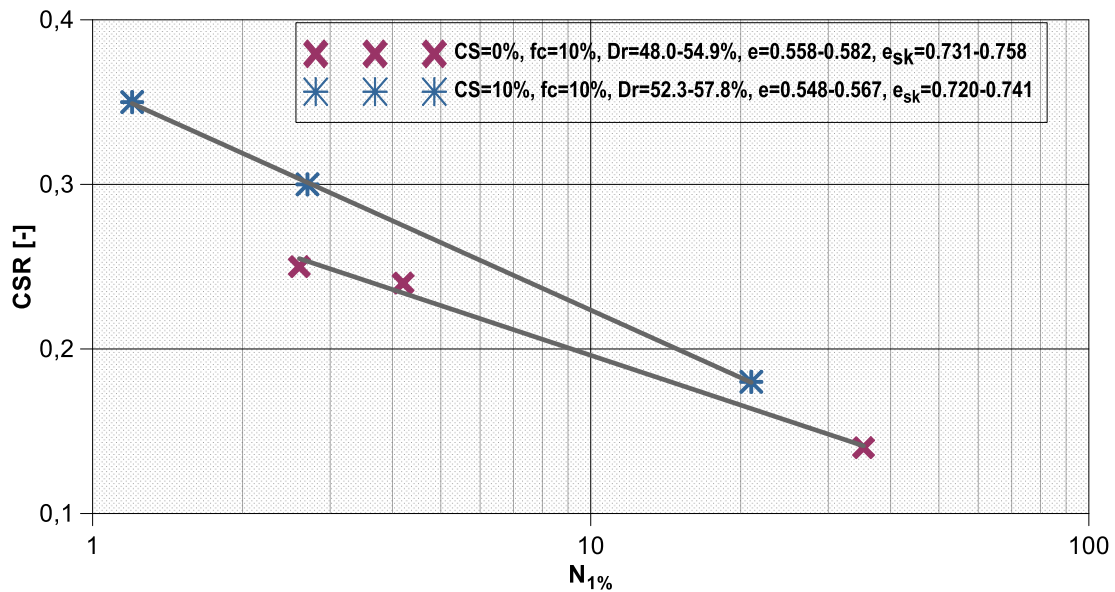
ποσοστό πυριτίας  $CS=10\%$  εμφανίζει καμπύλη στο επίπεδο  $CSR - N$  πιο πάνω και δεξιότερα από αυτήν της σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου  $CS=6\%$  και έπειτα ακολουθεί πιο κάτω η καμπύλη της φυσικής. Αυτό σημαίνει ότι για τον ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο ( $CS=10\%$  και  $CS=6\%$ ), σε σύγκριση με τη φυσική παρόμοιας πυκνότητας, για να αναπτυχθεί παραμόρφωση διπλού πλάτους  $5\%$ . Στο Σχήμα 6.34 φαίνεται ότι η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τη φυσική και για τις μικρές παραμορφώσεις αφού η καμπύλη της σταθεροποιημένης είναι πιο πάνω από αυτή της φυσικής. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να αναπτυχθεί παραμόρφωση  $\gamma_{DA}=1\%$  για τον ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης.



**Σχήμα 6.32.** Λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $CS=10\%$  ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



**Σχήματα 6.33.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR / f(e)$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Παράγοντας κανονικοποίησης  $f(e)=(2.17-e)^2 / (1+e)$ . Σύγκριση φυσικής ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ) και σταθεροποιημένης  $CS=6\%$  και  $10\%$  ιλυώδους άμμου ( $f_c=10\%$ ).



**Σχήμα 6.34.** Λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης  $CS=10\%$  ιλυώδους άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες



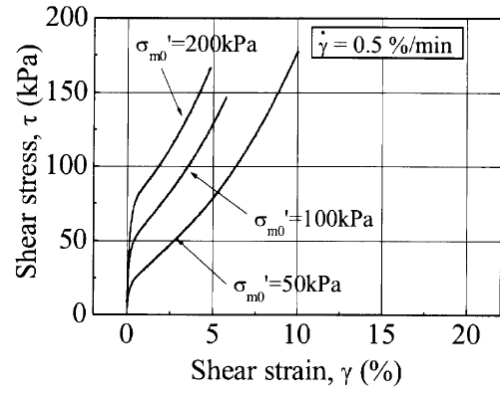
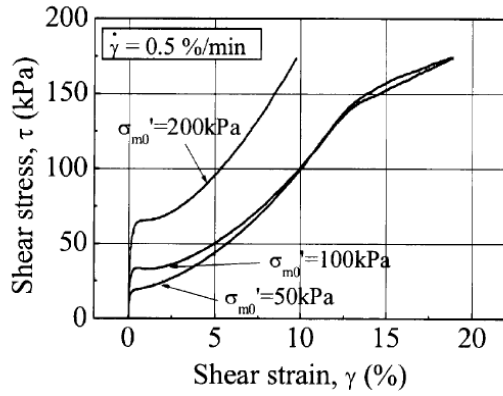
## 6.2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ

### 6.2.1 Εισαγωγή

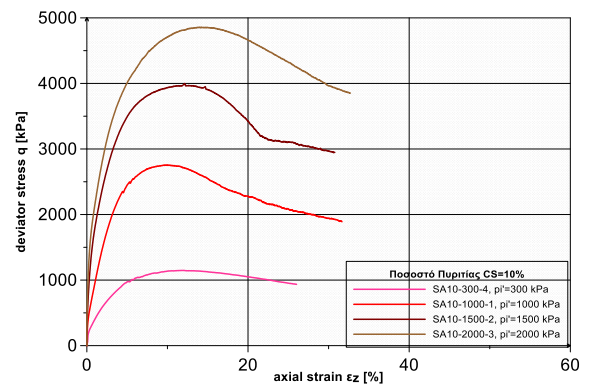
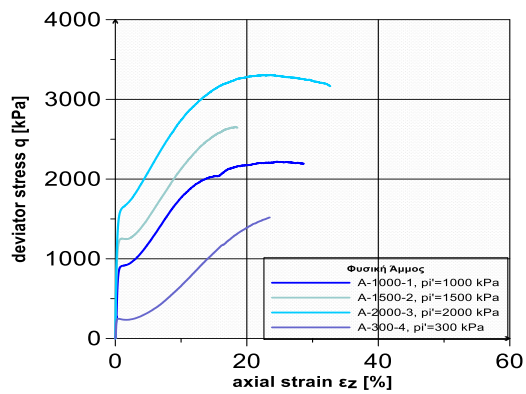
Τα χαρακτηριστικά της προκαλούμενης από σεισμό ρευστοποίησης σχετίζονται με την αντίδραση των εδαφών σε ανακυκλική φόρτιση. Αυτή η αντίδραση οφείλεται στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφών. Οι ιδιότητες των φυσικών εδαφών, όπως οι άμμοι και οι άργιλοι, έχουν μελετηθεί και είναι αρκετά γνωστές. Αντίθετα, εδάφη σταθεροποιημένα με χημικά υλικά όπως η κολλοειδής πυριτία, αντιπροσωπεύουν ένα σύνθετο υλικό, το οποίο έχει τις δικές του μοναδικές μηχανικές ιδιότητες. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα σταθεροποιημένα με πυριτία εδάφη εμφανίζουν μικρότερες διατμητικές παραμορφώσεις και καθιζήσεις υπό ανακυκλική φόρτιση. Ωστόσο υπάρχει ανάγκη να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων με πυριτία εδαφών με τρόπο τέτοιο ώστε να τους επιτρέπεται η ενσωμάτωση σε εδαφικά μοντέλα που χαρακτηρίζουν την ανακυκλική συμπεριφορά. Για αυτό το λόγο παράγοντες όπως η πίεση πόρων, η επίδραση της πυκνότητας του δοκιμίου, το ποσοστό σταθεροποιητή και ο χρόνος στερεοποίησης πρέπει να ερευνηθούν σε ένα ευρύ πεδίο τάσεων φόρτισης. Η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με την ρευστοποίηση της άμμου έχει προσεγγιστεί με διάφορες δοκιμές στη βιβλιογραφία: ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές (Maher et al. 1994b, Gallagher 2000, Towata and Kabashima 2001, Gallagher and Mitchell 2002, Liao et al. 2003), ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης (Kodaka et al. 2005), ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης (Rodriguez et al. 2008) και δοκιμές στήλης (Al et al. 2004, Gallagher et al. 2007, Spencer and Rix 2008) όπως και δοκιμές πεδίου σε πραγματική κλίμακα (Gallagher et al. 2007, Conlee et al. 2009). Οι περισσότεροι από τους παραπάνω ερευνητές (Persoff et al. 1999, Gallagher and Mitchell 2002, Rodriguez et al. 2008) βρήκαν ότι το ποσοστό της πυριτίας που χρησιμοποιείται έχει σημαντική επίδραση στη αύξηση της αντοχής των ρευστοποιήσιμων εδαφών. Οι υπάρχουσες έρευνες δεν είναι πολλές και συχνά έρχονται σε αντίθεση η μία με την άλλη καθώς το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική είναι σχετικά καινούριο. Εδώ θα γίνει μια προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τη σχετική βιβλιογραφία ώστε να βρεθούν σημεία σύγκλισης ή απόκλισης.

## 6.2.2 Τα αποτελέσματα της έρευνας Kodaka et al

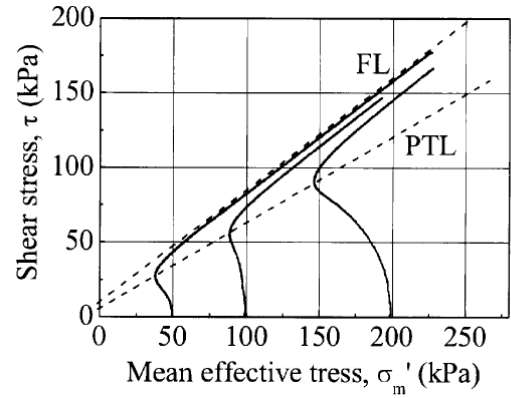
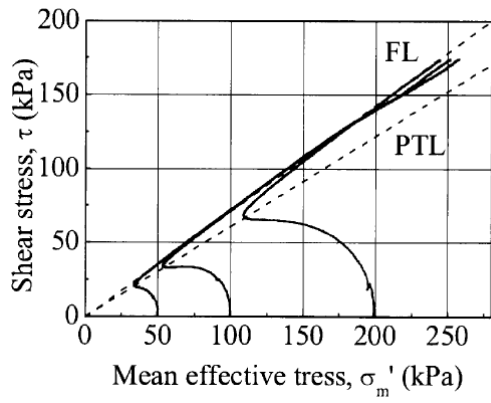
Σε αυτή την έρευνα, εκτελέστηκαν τόσο μονοτονικές όσο και ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη με πυριτία άμμο, με μέτρηση της πίεσης πόρων για να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου. Οι μονοτονικές και οι ανακυκλικές δοκιμές εκτελέστηκαν σε συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου. Τα δοκίμια σταθεροποιήθηκαν με ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας CS=4% και αφήθηκαν να ωριμάσουν και στερεοποιηθούν για 4 βδομάδες. Ο κορεσμός του δοκιμίου έγινε εισπίζοντας αέριο CO<sub>2</sub> 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 6.35 και 6.37. Παρατίθενται τα διαγράμματα της παρούσας διπλωματικής για λόγους σύγκρισης (Σχήματα 6.36 και 6.38). Παρατηρούμε στα αποτελέσματα και των δύο ερευνών ότι στα διαγράμματα διάτμησης-παραμόρφωσης 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. Ο Kodaka αναφέρει ότι αυτό ίσως οφείλεται στη “συνεκτικότητα” που προσδίδει η πυριτία στην άμμο.



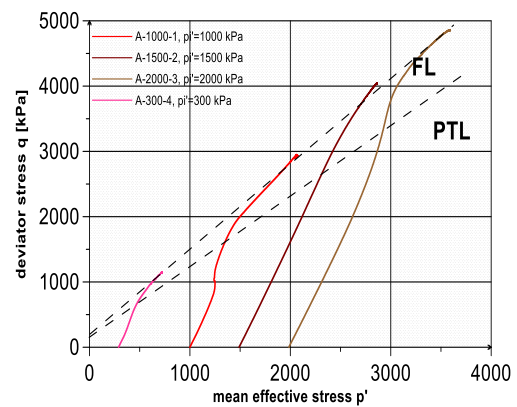
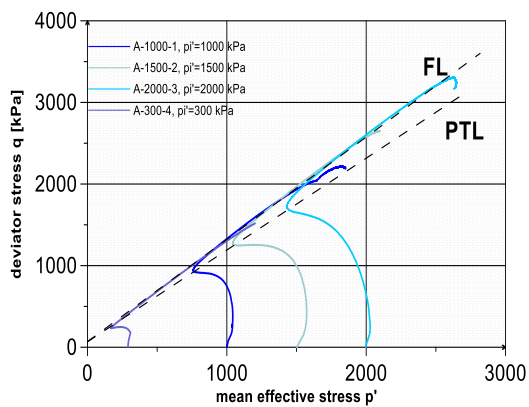
Σχήμα 6.35. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά). Kodaka et al



Σχήμα 6.36. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά).

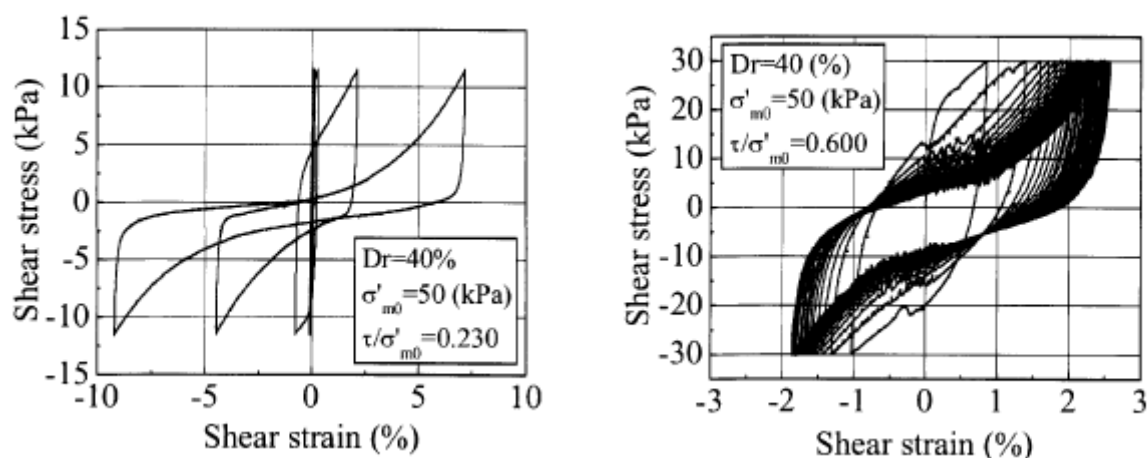


**Σχήμα 6.37.** Διάγραμμα διαδρομών τάσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά). Kodaka et al



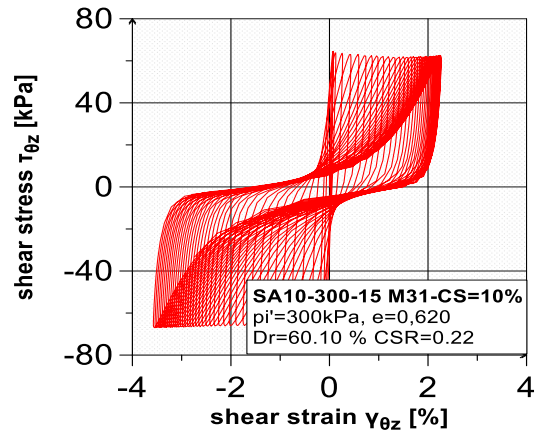
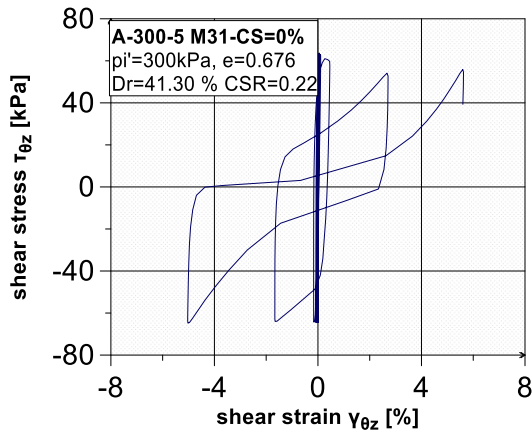
**Σχήμα 6.38.** Διάγραμμα διαδρομών τάσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανακυκλικής αστράγγιστης στρεπτικής διάτμησης σταθεροποιημένης και μη άμμου για λόγο ανακυκλικής τάσης  $CSR=0.23$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.39. 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.

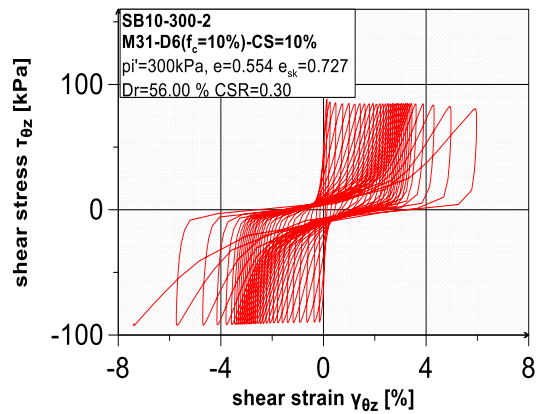
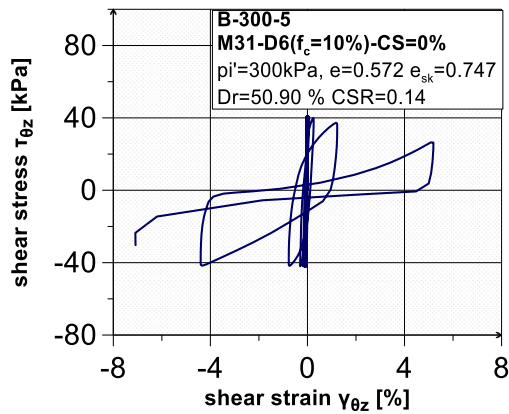


**Σχήμα 6.39.** Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά).Kodaka et al

Παρατίθενται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής για τη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο στο Σχήμα 6.40 καθώς και για τη φυσική και σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο στο Σχήμα 6.41. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά μας με αυτά της έρευνας του Kodaka παρατηρούμε ότι τα πυκνότερα δοκίμια άμμου εμφάνισαν συμπεριφορά που συγκλίνει με αυτή του Kodaka. Συγκεκριμένα απαιτούνται πολλοί κύκλοι φόρτισης για να επέλθει η αστοχία ( $\gamma_{\theta z}=2\%$ ) και το δοκίμιο δεν καταρρέει ακόμη και μετά από πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για τα πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου.

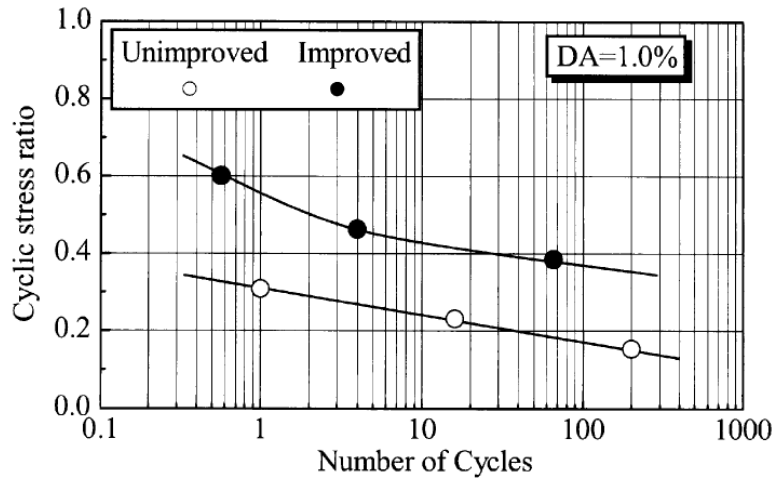


Σχήμα 6.40. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά).

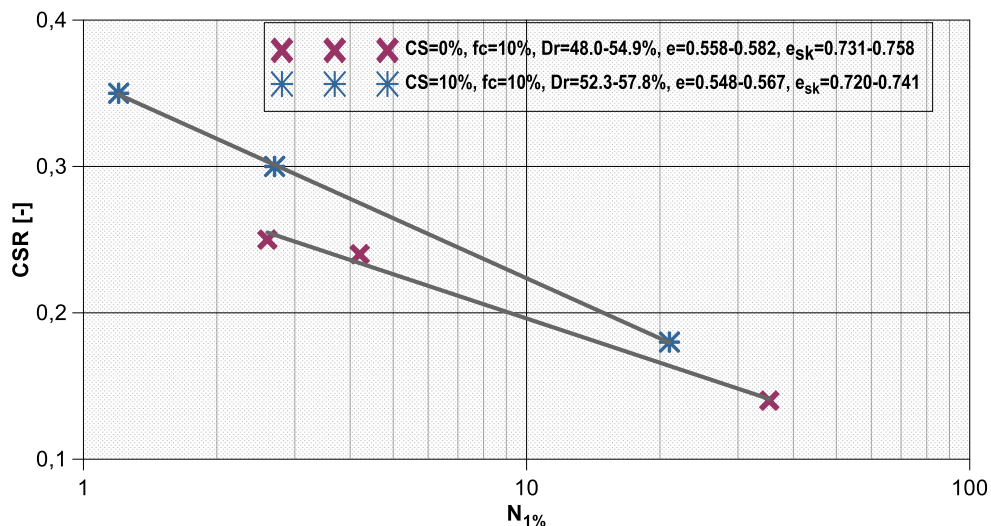


Σχήμα 6.41. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη ιλύδη άμμο (δεξιά).

Στο Σχήμα 6.42 παρουσιάζεται το διάγραμμα του Kodaka του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$  για τη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο παρόμοιων πυκνοτήτων. Συμπεραίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τη φυσική και για τις μικρές παραμορφώσεις αφού η καμπύλη της σταθεροποιημένης είναι πιο πάνω από αυτή της φυσικής. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να αναπτυχθεί παραμόρφωση  $\gamma_{DA}=1\%$  για τον ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης. Αυτό το συμπέρασμα επαληθεύεται και από το διάγραμμα της παρούσας διπλωματικής για πυκνά δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου στο Σχήμα 6.43.



**Σχήματα 6.42.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=4% καθαρής άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες. Διάγραμμα Kodaka et al.



**Σχήματα 6.43.** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=1\%$ . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=10% ιλυώδους άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες.

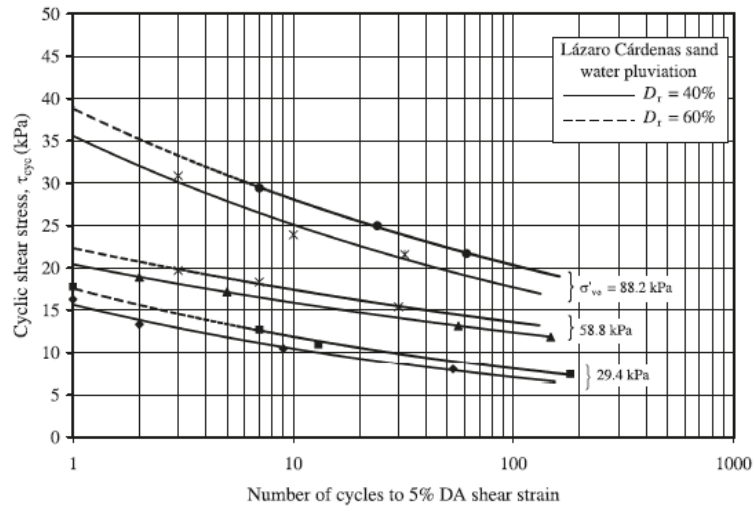
### 6.2.3. Τα αποτελέσματα της έρευνας Rodriguez et al

Αυτή η έρευνα παρουσιάζει τα αποτελέσματα από μία σειρά ανακυκλικών δοκιμών απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο σε δοκίμια φυσικής άμμου και σε δοκίμια άμμου σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία. Τα δοκίμια της σταθεροποιημένης με πυριτία άμμου παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο water pluviation όπου η άμμος εμβαπτίστηκε σε διάλυμα πυριτίας CS=14.5% και ωρίμασαν για 7 ημέρες. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές απλής διάτμησης για δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου με σχετικές πυκνότητες  $D_r= 40$  και  $60\%$  και για τρεις τάσης αρχικής ισότροπης στερεοποίησης  $p_i'=29.4, 58.8$  και  $88.2$  kPa. Τα αποτελέσματα έδειξαν, όπως περιμένουμε, ότι για συγκεκριμένη σχετική πυκνότητα  $D_r$  και τάση στερεοποίησης  $p_i'$  ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται μέχρι την αστοχία (διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_{DA}=5\%$ ) αυξάνει όσο η διατμητική τάση που επιβάλλεται μειώνεται. Έγινε φανερό από αυτή την έρευνα ότι η αντοχή σε ρευστοποίηση εξαρτάται από την αρχική σχετική πυκνότητα, την αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης και το ποσοστό CS που χρησιμοποιήθηκε. Η αύξηση της τάσης στερεοποίησης οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα και στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο. Παρατηρήθηκε ότι τα πυκνότερα δείγματα φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση από τα πιο χαλαρά δείγματα. Τα παραπάνω συμπεράσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 6.44, 6.45, 6.46 και 6.47 Το διάγραμμα της παρούσας διπλωματικής που επαληθεύει τα συμπεράσματα αυτά παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.48.

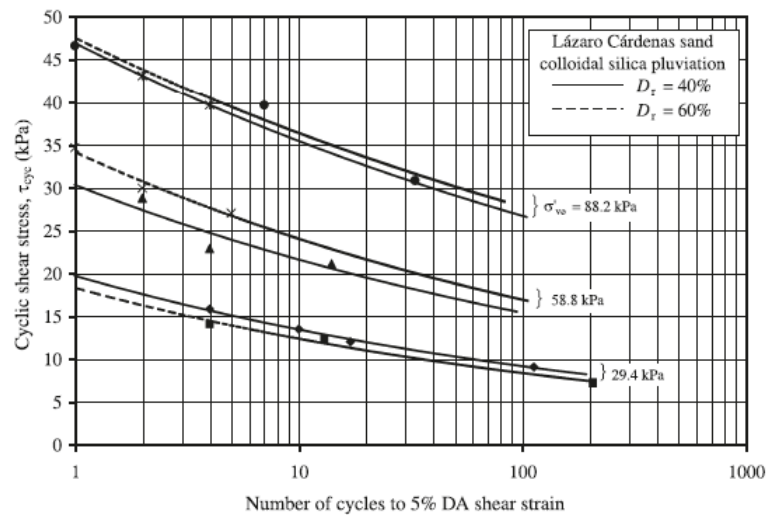
Στην έρευνα των Rodriguez et al επισημαίνεται ότι η χαλαρή σταθεροποιημένη άμμος στερεοποιημένη σε χαμηλές τάσεις  $p_i'$  έχει ελαφρώς μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση από την πυκνότερη σταθεροποιημένη άμμο. Αυτό πιθανώς συμβαίνει γιατί στη χαλαρή άμμο υπάρχει μεγαλύτερη αναλογία πυριτίας-άμμου ανά μονάδα όγκου σε σχέση με πυκνότερα δείγματα, για το ίδιο ποσοστό πυριτίας. Με την αύξηση της τάσης στερεοποίησης, η επιρροή αυτής της αναλογίας πυριτίας-άμμου δεν επηρεάζει τόσο και παρατηρήθηκε ότι η διαστολικότητα του εδαφικού σκελετού συμβάλει όλο και περισσότερο στην αντίσταση της σταθεροποιημένης άμμου σε ρευστοποίηση.

Επιπλέον, στην έρευνα των Rodriguez et al αναφέρεται ότι για συγκεκριμένη πυκνότητα  $D_r$  και τάση στερεοποίησης  $p_i'$  ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που προκαλούν ρευστοποίηση αυξάνουν με το ποσοστό CS. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύεται και από το Σχήμα 6.49 της διπλωματικής μας.

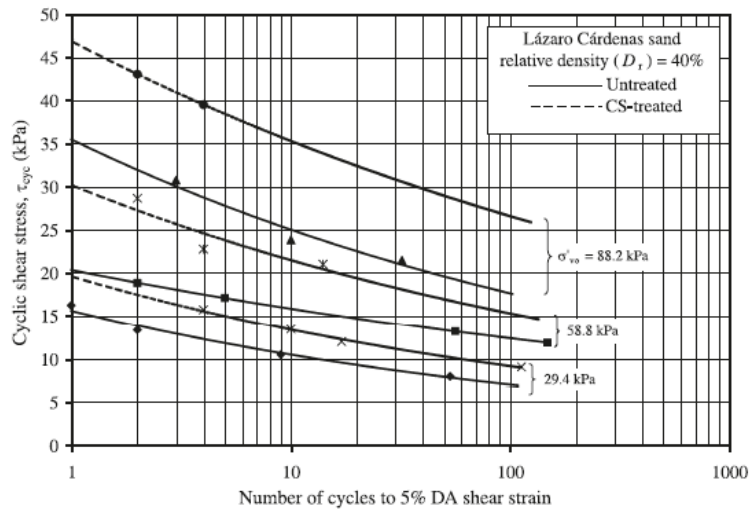




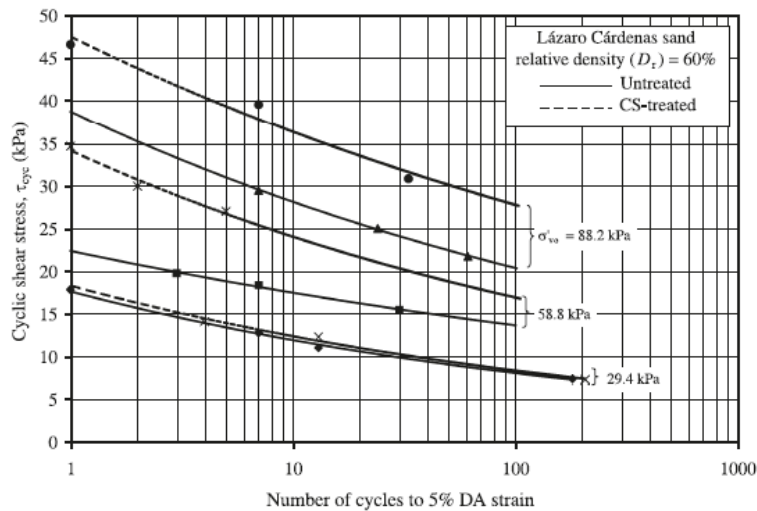
**Σχήματα 6.44.** Διάγραμμα ανακυκλικής τάσης διάτμησης σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής άμμου με  $D_r=40\%$  και  $60\%$ .



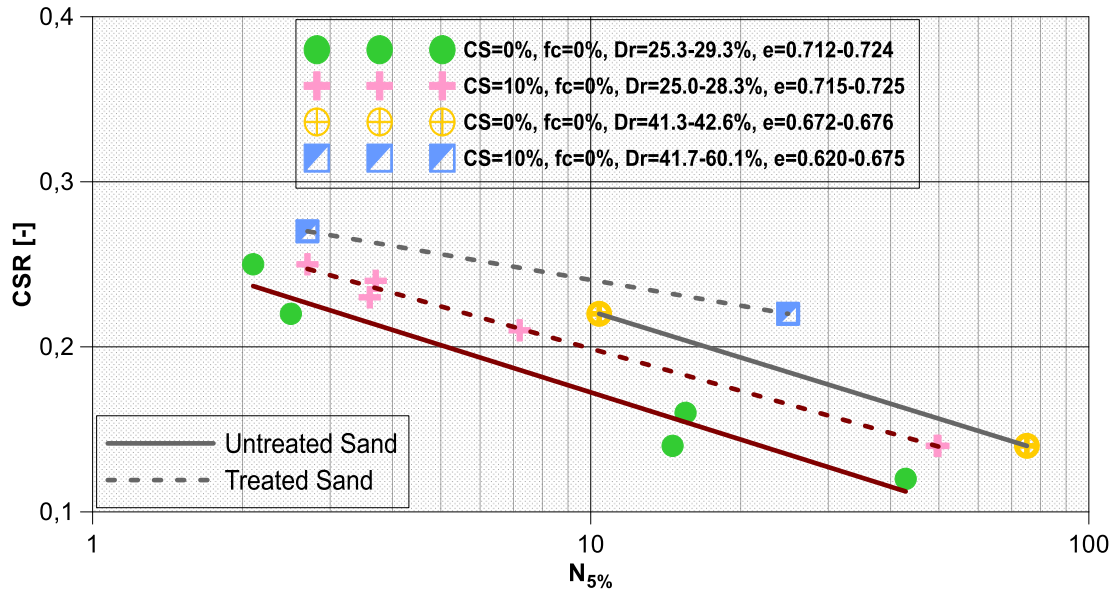
**Σχήματα 6.45.** Διάγραμμα ανακυκλικής τάσης διάτμησης σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση σταθεροποιημένης άμμου  $CS=14.5\%$  με  $D_r=40\%$  και  $60\%$ .



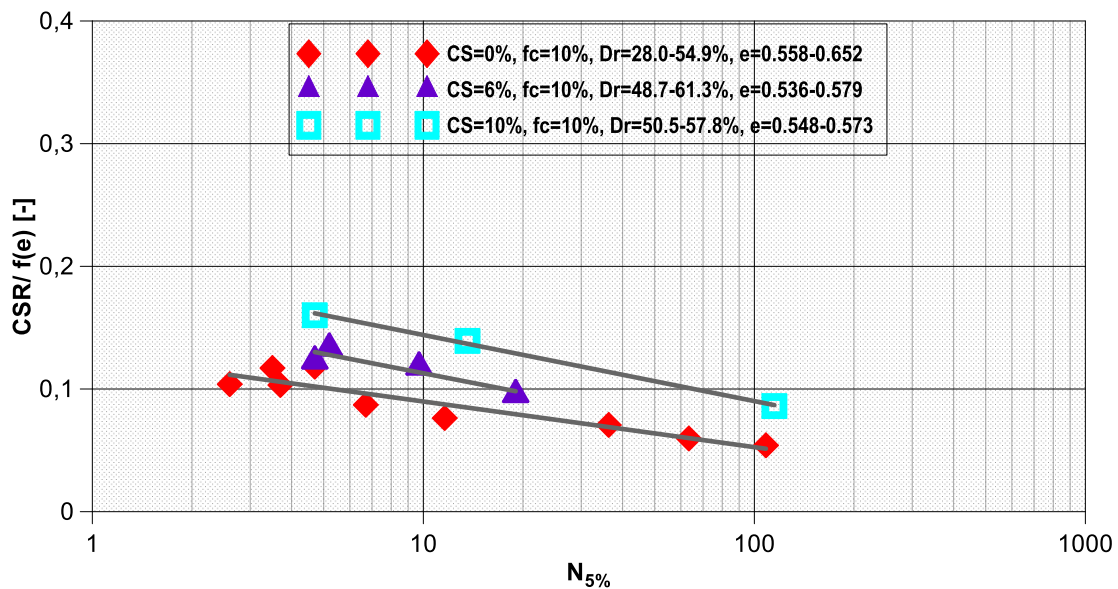
**Σχήματα 6.46.** Διάγραμμα ανακυκλικής τάσης διάτμησης σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής άμμου με  $D_r=40\%$  και σταθεροποιημένης άμμου  $CS=14.5\%$  με  $D_r=40\%$ .



**Σχήματα 6.47.** Διάγραμμα ανακυκλικής τάσης διάτμησης σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής άμμου με  $D_r=60\%$  και σταθεροποιημένης άμμου  $CS=14.5\%$  με  $D_r=60\%$ .



**Σχήμα 6.48.** Λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής άμμου με σταθεροποιημένη  $CS=10\%$  άμμο σε πυκνά και χαλαρά δοκίμια.

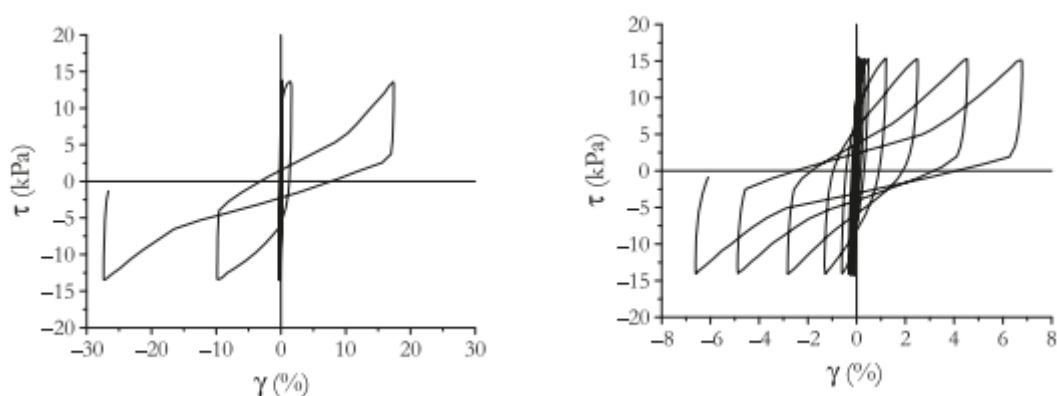


**Σχήμα 6.49.** Κανονικοποιημένος λόγος ανακυκλικής τάσης  $CSR$  σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους  $\gamma_{DA}=5\%$ . Σύγκριση φυσικής ιλυώδους άμμου με σταθεροποιημένη  $CS=6\%$  και  $10\%$  ιλυώδη άμμο σε πυκνά δοκίμια.

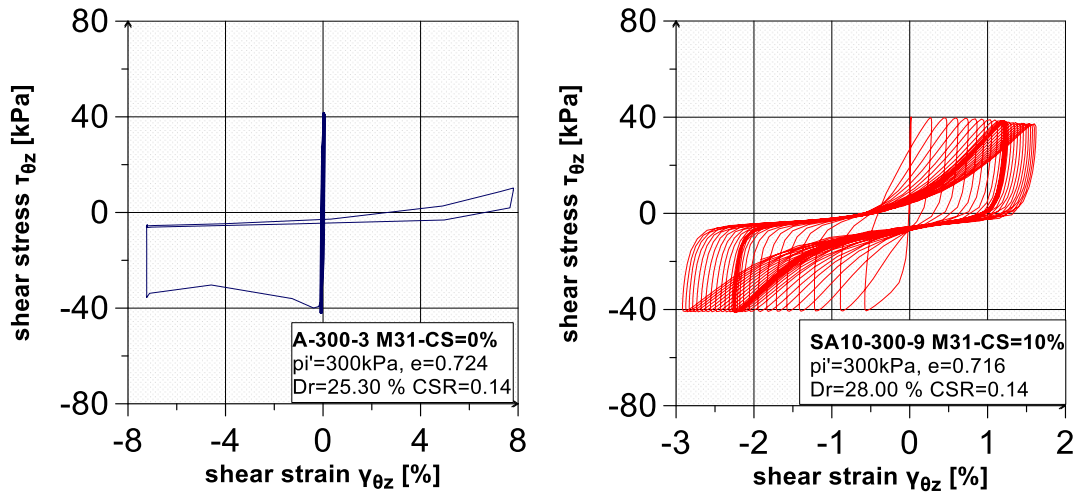
### 6.3.4 Τα αποτελέσματα της έρευνας των Daniela Porcino, Vincenzo Marciandò και Raffaella Granata.

Η δημοσίευση αυτή περιγράφει τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης της συμπεριφοράς σταθεροποιημένης με πυριτία χαλαρής άμμου σε ανακυκλική δοκιμή απλής διάτμησης. Εκτελέστηκαν πειράματα σε δείγματα χαλαρής άμμου, χαλαρής σταθεροποιημένης με πυριτία άμμου και σε πυκνά δείγματα άμμου. Τα αποτελέσματα από τις ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε καθαρή χαλαρή άμμο φανερώνουν ότι συνέβησαν απότομα μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις και το δοκίμιο ρευστοποιήθηκε εντελώς μέσα σε λίγους κύκλους ( $N_f=5$ ) (Σχήμα 6.50). Αντίθετα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.50, παρατηρούνται εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά παραμόρφωσης στο δοκίμιο σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου. Είναι φανερό ότι η ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  (%) δεν έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση του δοκιμίου. Το δείγμα αυτό παρουσιάζει χαμηλές τιμές διατμητικής παραμόρφωσης ακόμα και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης και δεν καταρρέει. Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής για τη χαλαρή άμμο έρχονται σε συμφωνία με αυτά της έρευνας. Η βελτίωση της σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου έναντι της φυσικής είναι μεγαλύτερη καθώς απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για να αναπτυχθεί παραμόρφωση  $\gamma_{0z}=2$  %. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 6.51.

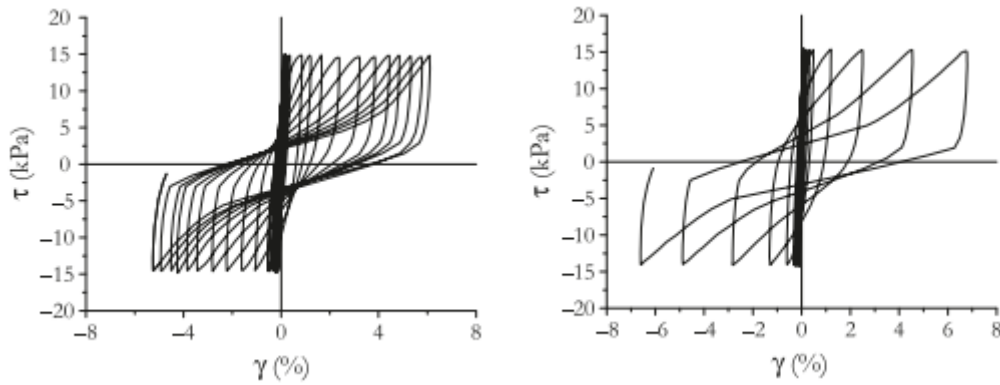
Ακόμη παρατηρήθηκε στην έρευνα Porcino et al μια ομοιότητα ανάμεσα στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου και στη συμπεριφορά του δείγματος πυκνής μη σταθεροποιημένης άμμου (Σχήμα 6.52). Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι αυτή η ομοιότητα οφείλεται στη βελτίωση των χαρακτηριστικών διαστολικότητας του σταθεροποιημένου δείγματος χαλαρής άμμου που προκαλείται από το σπάσιμο των δεσμών που συμβαίνει με την προσθήκη πυριτίας. Η ιδιαιτερότητα αυτή δε φαίνεται να ισχύει στη δική μας διπλωματική καθώς η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου παρουσιάζεται καλύτερη από αυτή της πυκνής φυσικής άμμου (Σχήμα 6.53).



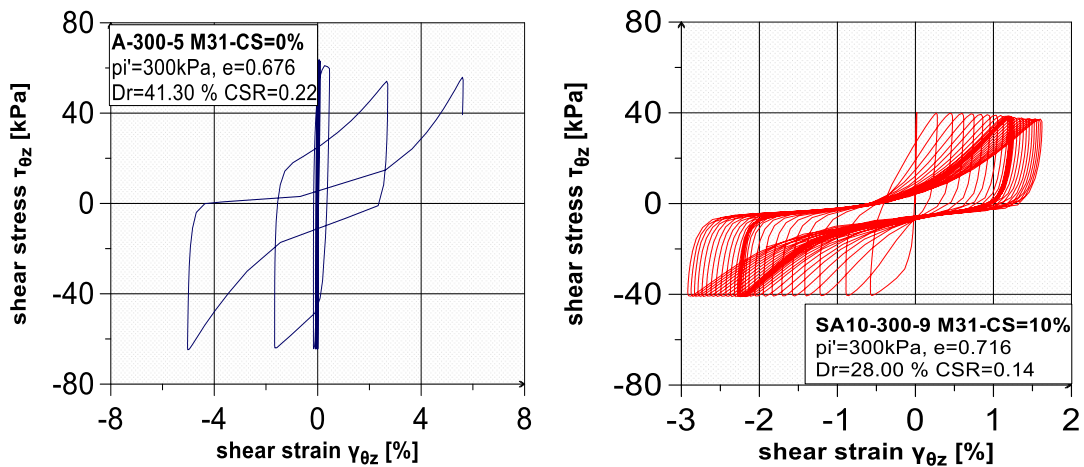
**Σχήμα 6.50.** Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά).



Σχήμα 6.51. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη άμμο (δεξιά).



Σχήμα 6.52. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε πυκνή φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη χαλαρή άμμο (δεξιά).



Σχήμα 6.53. Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σε πυκνή φυσική (αριστερά) και σταθεροποιημένη χαλαρή άμμο (δεξιά).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της διπλωματικής μας εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά των μη συνεκτικών εδαφών. Γι' αυτό το σκοπό εκτελέσαμε μονοτονικές τριαξονικές και ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο καθώς και σε φυσικό και σταθεροποιημένο μίγμα ιλυώδους άμμου. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών μας καταλήξαμε στα συμπεράσματα που παρατίθενται.

- Στις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής φόρτισης η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση από τη φυσική, στις ίδιες παραμορφώσεις. Παρατηρούμε ότι η βελτίωση της αντοχής γίνεται με έναν παράγοντα από 2 έως 3, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στις χαμηλές ενεργές τάσεις. Αυτό ίσως υποδηλώνει τον μεγαλύτερο τραυματισμό του ιστού της γέλης κατά την στερεοποίηση σε υψηλότερες τάσεις. Επίσης, παρατηρούμε ότι στις μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων ο παράγοντας βελτίωσης φθίνει προς τη μονάδα. Αυτό ίσως οφείλεται ξανά στον τραυματισμό της γέλης στις μεγάλες παραμορφώσεις.
- Οι δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε ιλυώδη άμμο M31 - D6, έδειξαν αποτελέσματα ποιοτικά ανάλογα με αυτά της άμμου M31. Η βελτίωση, όμως, της αντοχής ήταν μικρότερη. ο αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης της αντοχής, ο οποίος παίρνει τιμές 1.5 – 2.0.
- Στις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης που εκτελέσαμε σε δοκίμια άμμου, οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων που αναφέρονται στην ίδια τάση στερεοποίησης παρατηρούμε ότι δεν έχουν σημαντική απόκλιση για τα δύο διαφορετικά ποσοστά σταθεροποιητή που εξετάζουμε. Συμπεραίνουμε ότι υπάρχει έντονη εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους μόνο από το επίπεδο της τάσης εγκιβωτισμού και όχι από το ποσοστό CS.
- Παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και για το μίγμα ιλυώδους άμμου. Οι καμπύλες που αναφέρονται στην ίδια τάση στερεοποίησης παρατηρούμε ότι δεν έχουν σημαντική απόκλιση για τα δύο διαφορετικά ποσοστά σταθεροποιητή που εξετάζουμε.
- Όσον αφορά τη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρατηρούμε ότι διαφέρει ριζικά από αυτήν της φυσικής. Η σταθεροποιημένη άμμος διατηρεί τη δομή της χωρίς να καταρρέει ακόμα και όταν οι παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης του υγρού πόρων λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές. Η συμπεριφορά αυτή συνεχίζεται για πάρα πολλούς κύκλους και η

δοκιμή ολοκληρώνεται αναγκαστικά, διότι τερματίζεται η ωφέλιμη διαδρομή των μετρητικών οργάνων.

- Η πίεση του υγρού των πόρων στα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου, στους πρώτους κύκλους καταγράφεται πολύ χαμηλή. Έχουμε την πεποίθηση ότι η πραγματική πίεση μέσα στο υγρό των πόρων της γέλης είναι υψηλή, αφού και οι παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές, αλλά δεν εκδηλώνεται άμεσα στον μετρητή. Ο στερεός ιστός της γέλης είναι σχετικά υγιής και αδρανοποιεί το νερό των πόρων, οπότε καθυστερεί τις μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται για να εκδηλωθεί το μέτωπο πίεσης στο νερό εκτός του δοκιμίου. Σε προχωρημένους κύκλους, ο ιστός της γέλης έχει υποστεί σοβαρό τραυματισμό και το ιξώδες του συστήματος έχει μειωθεί σημαντικά. Η εκδήλωση της πίεσης του υγρού πόρων είναι περισσότερο άμεση και ακολουθεί πρακτικά τους κύκλους φόρτισης.
- Ο παράγοντας του χρόνου ωρίμανσης της γέλης στο δοκίμιο σταθεροποιημένης άμμου, δε φαίνεται να έχει κάποια επίδραση, αφού δοκίμια με διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης σε 50, 90 και 115 ώρες υπό άτονες συνθήκες παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει γιατί οι επιπλέον δεσμοί που αναπτύσσονται λόγω μεγαλύτερου χρόνου ωρίμανσης θα καταστραφούν στο στάδιο της στερεοποίησης.
- Εξετάζοντας την επίδραση του ποσοστού του σταθεροποιητή στις ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης, παρατηρήσαμε ότι η αύξηση του οδηγεί σε βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων άμμου.
- Ο παράγοντας που φαίνεται να έχει καθοριστική σημασία στη συμπεριφορά του δοκιμίου της σταθεροποιημένης άμμου στην ανακυκλική φόρτιση στους πρώτους κύκλους, είναι η πυκνότητα του. Παρατηρούμε ότι όσα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το αντίστοιχο φυσικό ήταν πιο χαλαρά, ενώ τα δοκίμια που εμφανίζουν παραμορφώσεις που προσομοιάζουν τις παραμορφώσεις του φυσικού ήταν κατά κανόνα πιο πυκνά.
- Όσον αφορά τη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρατηρούμε ότι διαφέρει ριζικά από αυτήν της φυσικής. Η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος διατηρεί τη δομή της χωρίς να καταρρέει ακόμα και όταν οι παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ - πίεσης του υγρού πόρων λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές. Η συμπεριφορά αυτή συνεχίζεται για πάρα πολλούς κύκλους και η δοκιμή ολοκληρώνεται αναγκαστικά, διότι τερματίζεται η ωφέλιμη διαδρομή των μετρητικών οργάνων.
- Η πίεση του υγρού των πόρων στα δοκίμια σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου, στους πρώτους κύκλους καταγράφεται πολύ χαμηλή. Έχουμε την πεποίθηση ότι η πραγματική πίεση μέσα στο υγρό των πόρων της γέλης είναι υψηλή, αφού και οι παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές, αλλά δεν εκδηλώνεται άμεσα στον μετρητή. Ο στερεός ιστός της γέλης είναι σχετικά υγιής και αδρανοποιεί το νερό των πόρων, οπότε καθυστερεί τις μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται για να εκδηλωθεί το μέτωπο πίεσης στο νερό εκτός του δοκιμίου. Σε προχωρημένους κύκλους, ο ιστός της γέλης έχει



υποστεί σοβαρό τραυματισμό και το ιξώδες του συστήματος έχει μειωθεί σημαντικά. Η εκδήλωση της πίεσης του υγρού πόρων είναι περισσότερο άμεση και ακολουθεί πρακτικά τους κύκλους φόρτισης.

- Θεωρούμε, όπως και στην άμμο, ότι ο παράγοντας του χρόνου ωρίμανσης της γέλης στο δοκίμιο δεν έχει κάποια επίδραση.
- Εξετάζοντας την επίδραση του ποσοστού του σταθεροποιητή στις ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης, παρατηρήσαμε ότι η αύξηση του οδηγεί σε βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων ιλυώδους άμμου.
- Ο παράγοντας που φαίνεται να έχει καθοριστική σημασία στη συμπεριφορά του δοκιμίου της ιλυώδους άμμου στην ανακυκλική φόρτιση στους πρώτους κύκλους είναι η πυκνότητα του. Παρατηρούμε ότι όσα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από του αντίστοιχου φυσικού ήταν πιο χαλαρά, ενώ τα δοκίμια που εμφανίζουν παραμορφώσεις που προσομοιάζουν τις παραμορφώσεις του φυσικού ήταν κατά κανόνα πιο πυκνά.
- Για να ερευνήσουμε την επίδραση του χρόνου στερεοποίησης στη μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου εκτελέσαμε δοκιμές στη σταθεροποιημένη (CS=6% και 10%) ιλυώδη άμμο με αυξημένο χρόνο στερεοποίησης. Ενώ τα προηγούμενα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με χρόνο στερεοποίησης 2 ώρες, σε αυτή τη σειρά πειραμάτων για να διαπιστώσουμε την επίδραση του χρόνου, αφήσαμε τα δοκίμια να στερεοποιηθούν 2,5,15,20,22 και 25 ώρες. Παρατηρήσαμε ότι τα δοκίμια ιλυώδους άμμου που στερεοποιήθηκαν για πάνω από 10 ώρες παρουσίασαν μικρότερες παραμορφώσεις από αυτές του φυσικού, παρόμοιας πυκνότητας και λόγου CSR, στους πρώτους κύκλους φόρτισης. Αντίθετα, τα δοκίμια ιλυώδους άμμου που αφέθηκαν να στερεοποιηθούν για 2 ώρες εμφάνισαν παραμορφώσεις μεγαλύτερες του αντίστοιχου φυσικού. Παρόμοια συμπεριφορά εμφάνισαν και τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου που στερεοποιήθηκαν για 2 ώρες.
- Οφείλουμε να επισημάνουμε ότι η βελτιωμένη συμπεριφορά φαίνεται να συνδέεται με την αύξηση του χρόνου στερεοποίησης και όχι με την αύξηση του χρόνου παρασκευής-διάτμησης (αυξημένος χρόνος ωρίμανσης), που αναπόφευκτα συνεπάγεται η αύξηση του χρόνου στερεοποίησης. Πρόκειται δηλαδή για παρατεταμένη στερεοποίηση και ανάπλαση δεσμών και όχι για παρατεταμένη ωρίμανση. Η αύξηση του χρόνου στερεοποίησης έχει διττό ρόλο: αρχικά εξασφαλίζεται η ολοκλήρωση της εκροής του νερού από τους πόρους και στη συνέχεια η γέλη έχει τη δυνατότητα να αναπλάσει τους δεσμούς της που έχουν τραυματιστεί κατά τη στερεοποίηση (regenerate).



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Baek S., Pence T. J., “Inhomogeneous deformations of elastomer gels in equilibrium under saturated and unsaturated conditions”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59 (2011) 561-582
- [2] Bergna H. E.( ed.), Roberts W. O.( ed.), “Colloidal silica: fundamentals and applications”, CRC, Taylor & Francis, 2006
- [3] Brinker C. J., Scherer G. W., “Sol - gel science: the physics and chemistry of sol – gel processing”, Academic Press, 1990
- [4] 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: 1345-1355 (2008)
- [5] Gallagher P. M. (2000), “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- [6] Gallagher P. M., Pamuk A., Abdoun T. (2007), “Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No.1, 0899-1561
- [7] Gallagher P. M., Conlee C. T., Rollins K. M., “Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, 2007; DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(186)
- [8] Gallagher P. M., Lin Y., “Colloidal silica transport through liquefiable porous media”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, 2009; DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000123
- [9] Gallagher P. M., Mitchell J. K. (2002), “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 1017-1026
- [10] Kodaka T., Oka F., Ohno Y., Takyu T., and Yamasaki N., “Modelling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand”, *Geomechanics, ASCE (2005)*, 10.1061/40797(172)11
- [11] Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J. M., “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.

- [12] Towhata I., “Geotechnical Earthquake Engineering”, Springer, 2008
- [13] Daniela Porcino, Vincenzo Marcianò, Raffaella Granata, “Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand”, NRC Research Press, 2012
- [14] Τσομώκος, Α., (2005), “Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς εδαφικού στοιχείου σε δοκιμές στατικής και δυναμικής στρέψης κοίλου δοκιμίου”, Ph.D.Thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [15] Γεωργιάννου Β.Ν., Τσομώκος Α., Σταύρου Κ., “Απόκριση Άμμου Σε Μονοτονική Και Ανακυκλική Φόρτιση Σε Στρέψη”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006
- [16] Boukvalas G.D., Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G., “A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) 115–125.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-1

171

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CU ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ  
ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

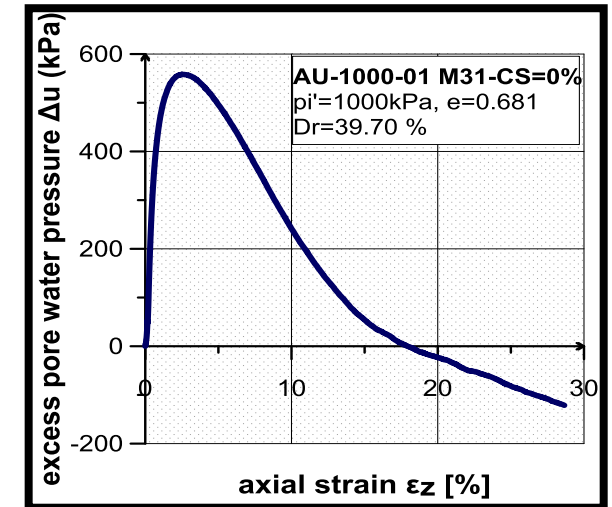
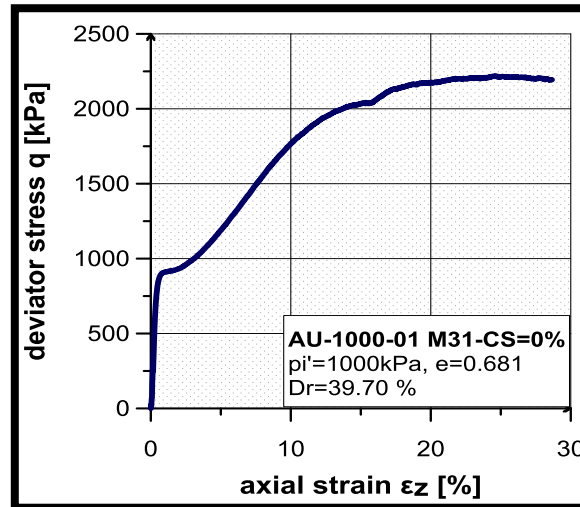
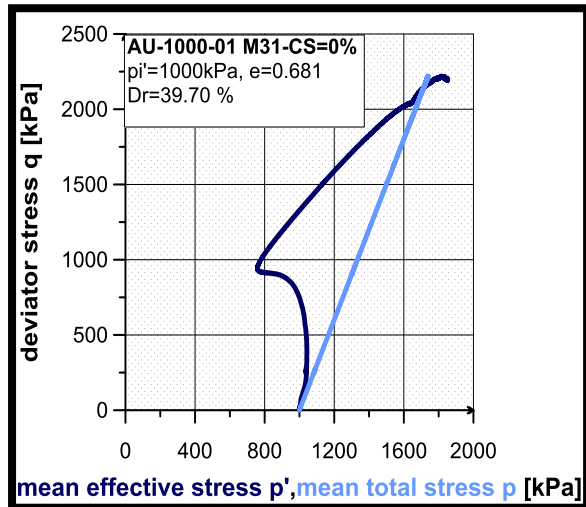
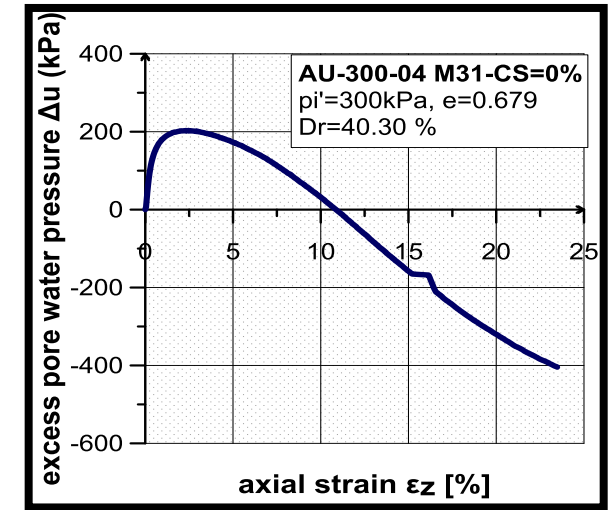
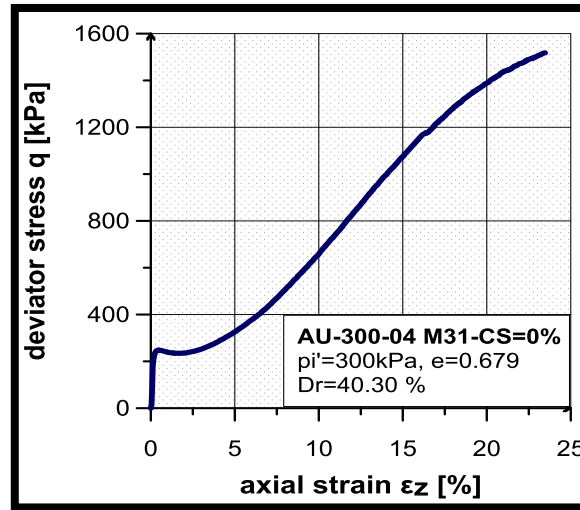
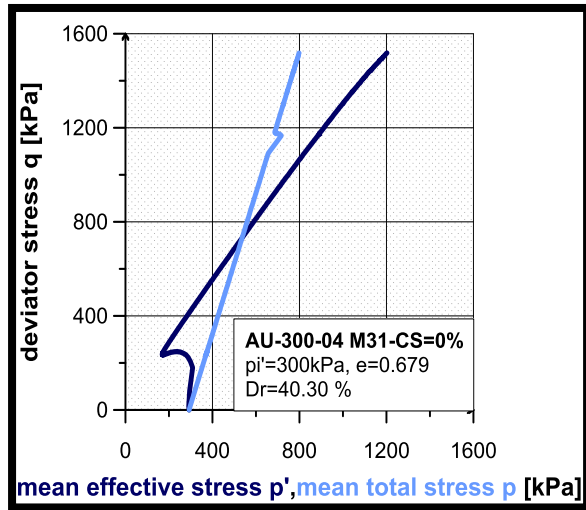
**Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Μονοτονικών Δοκιμών Τριαξονικής Θλίψης**

**ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ Μ31 CS=0% fc=0%**

<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
A-1000-1	Dr=39,7%	e=0,681	p <sub>i</sub> '=1000 kPa
A-1500-2	Dr=31,0%	e=0,707	p <sub>i</sub> '=1500 kPa
A-2000-3	Dr=28,4%	e=0,715	p <sub>i</sub> '=2000 kPa
A-300-4	Dr=40,3%	e=0,679	p <sub>i</sub> '=300 kPa

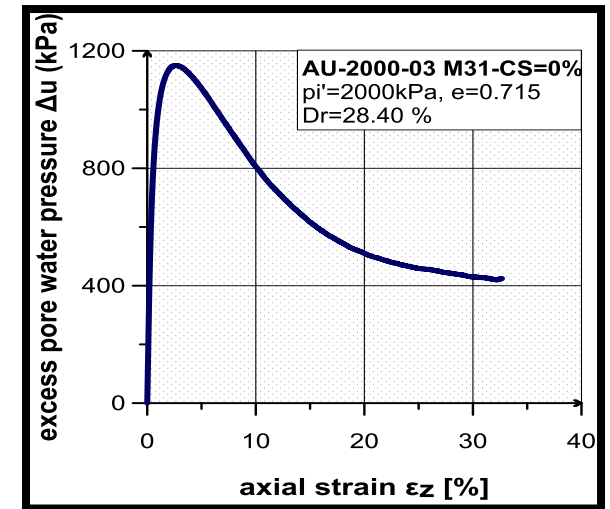
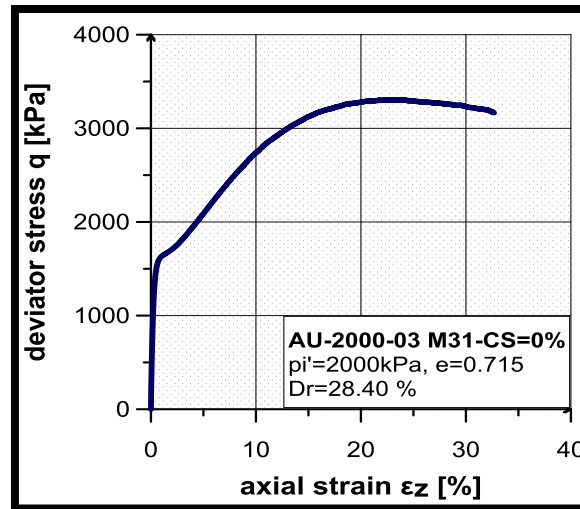
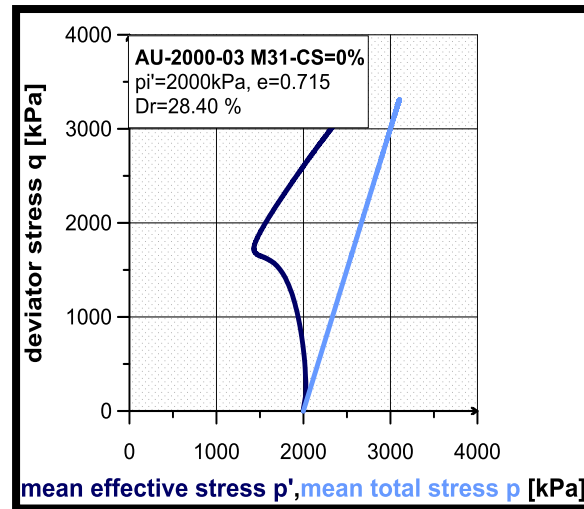
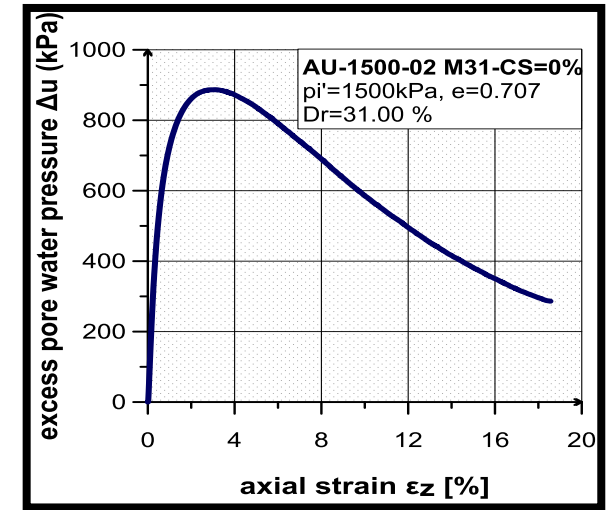
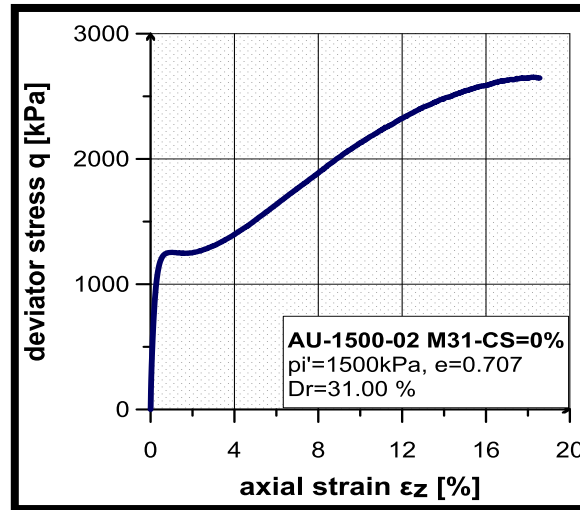
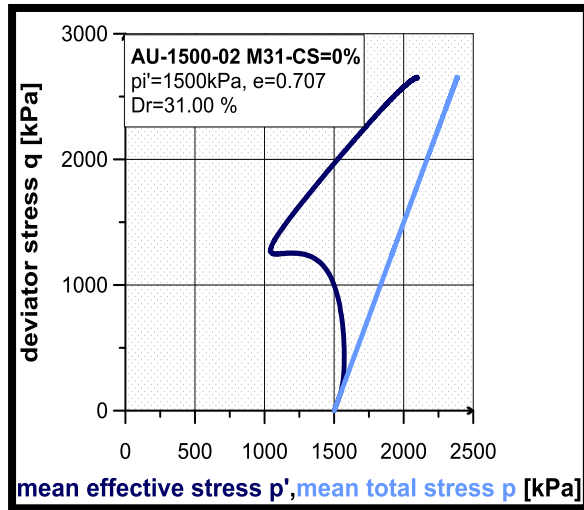
**ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ Μ31 & D6 CS=0% fc=10%**

<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
B-1000-1	Dr=25,1%	e=0,662	p <sub>i</sub> '=1000 kPa
B-1500-2	Dr=29,4%	e=0,647	p <sub>i</sub> '=1500 kPa
B-2000-3	Dr=39,4%	e=0,612	p <sub>i</sub> '=2000 kPa
B-300-4	Dr=19,7%	e=0,681	p <sub>i</sub> '=300 kPa

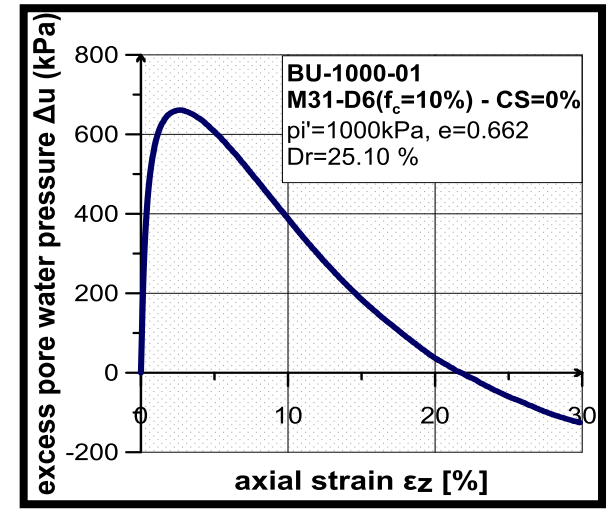
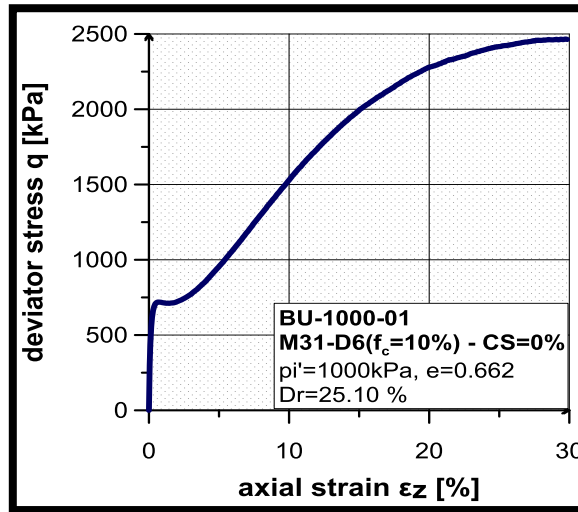
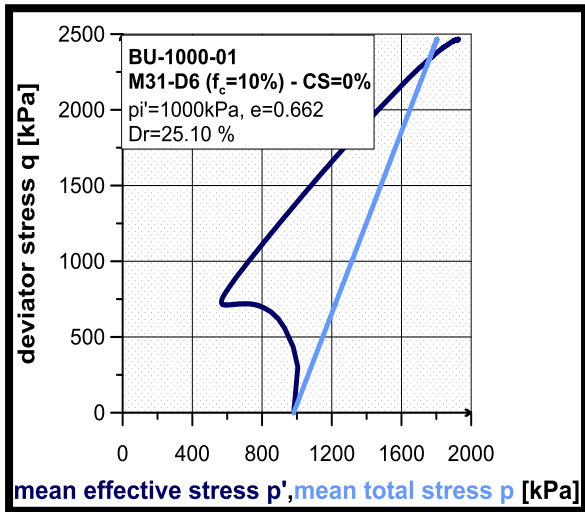
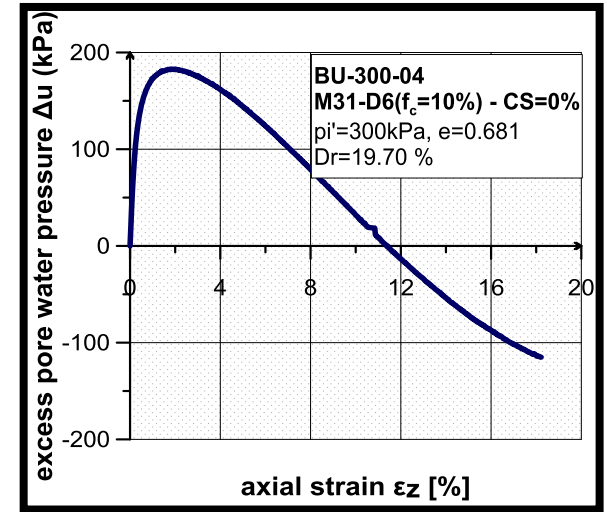
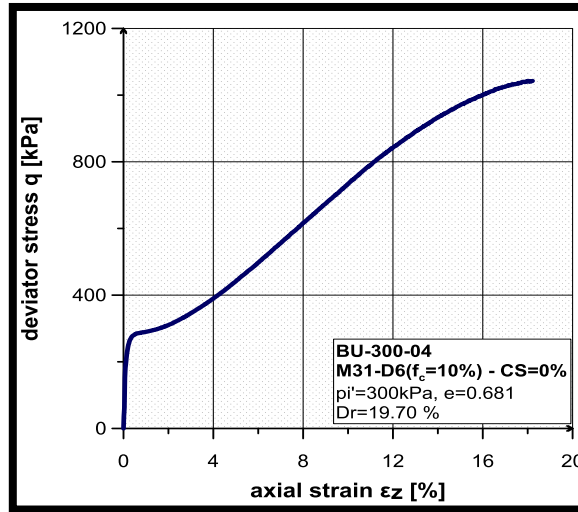
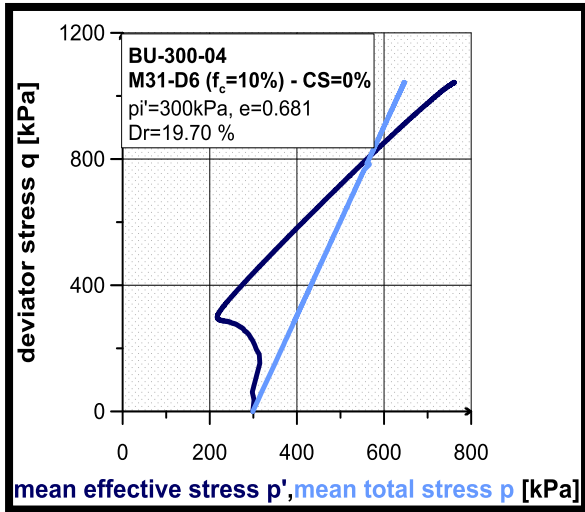


Σχήμα Π-1.1. Δοκιμή AU-300-4 (πάνω σειρά) και AU-1000-1 (κάτω σειρά)

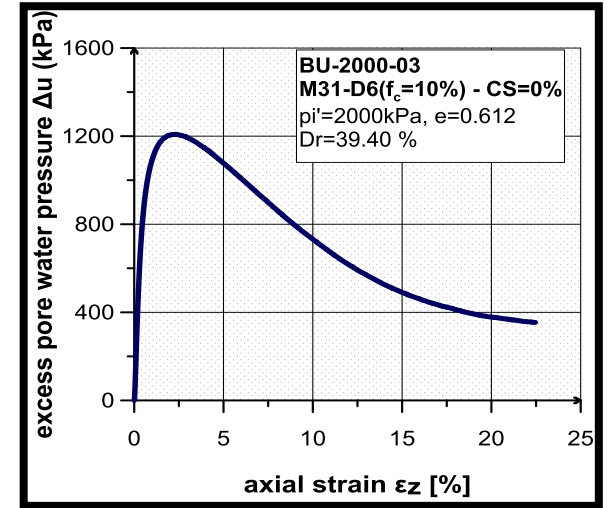
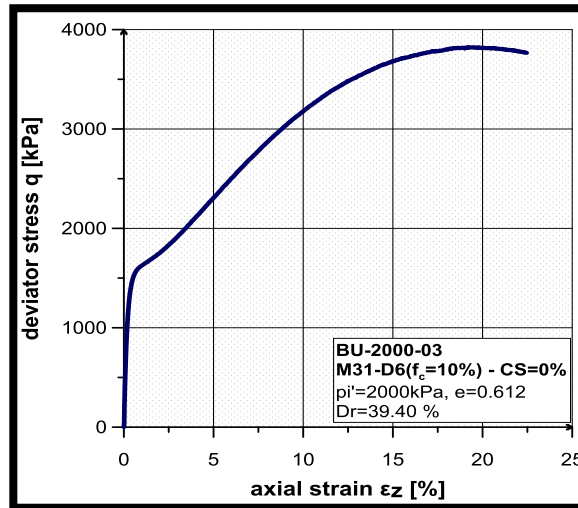
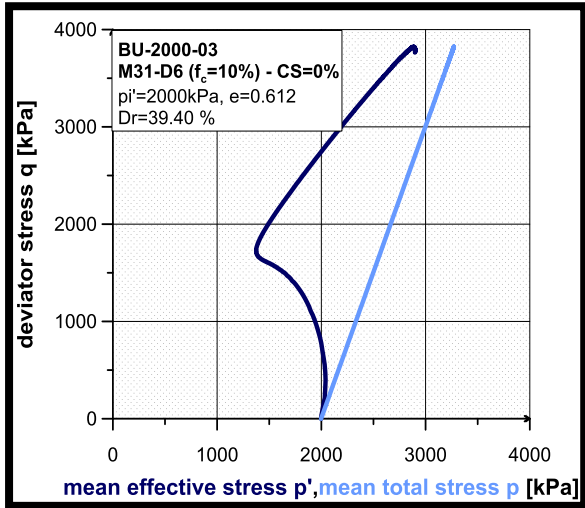
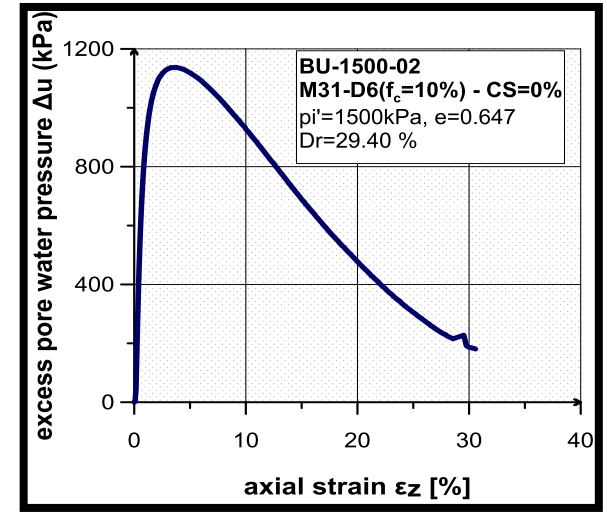
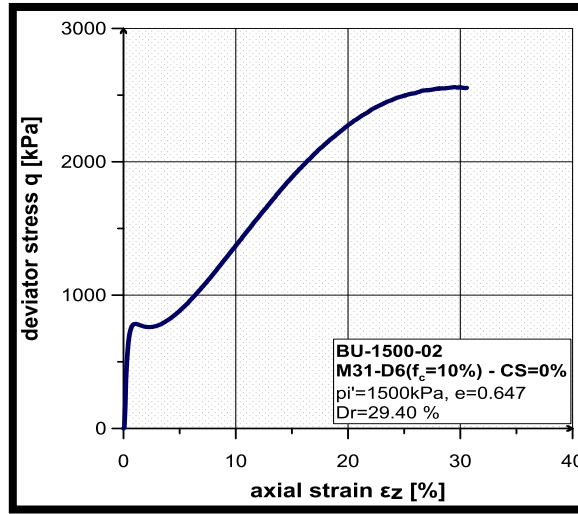
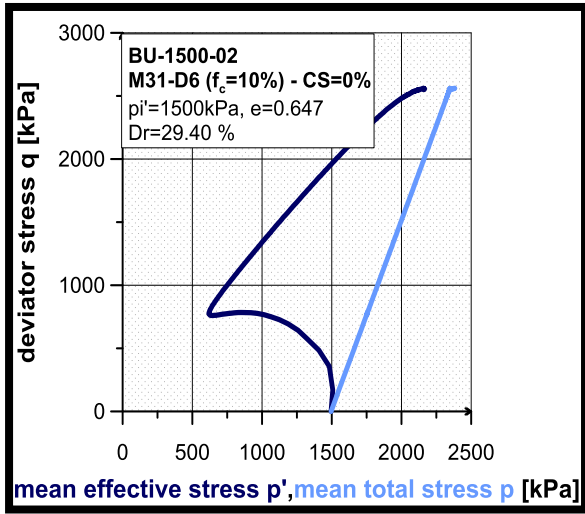




Σχήμα Π-1.2. Δοκιμή AU-1500-2 (πάνω σειρά) και AU-2000-3 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π-1.3. Δοκιμή BU-300-4 (πάνω σειρά) και BU-1000-1 (κάτω σειρά)

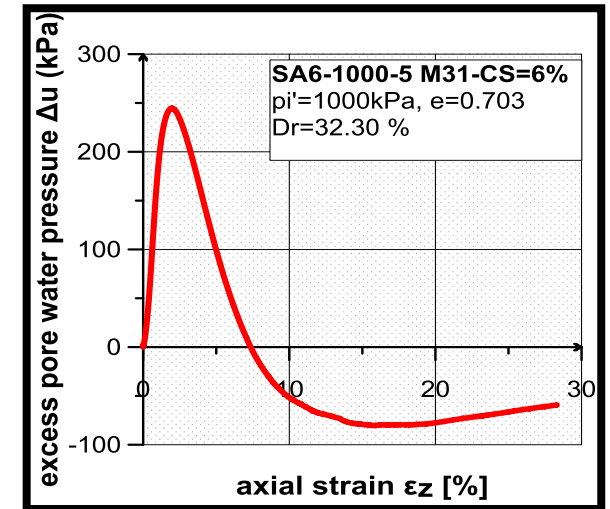
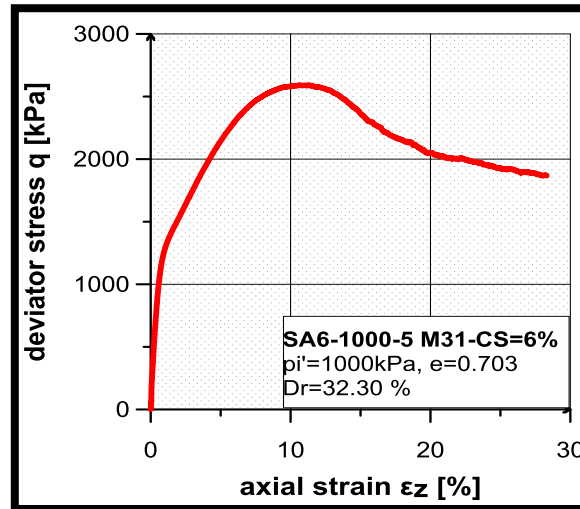
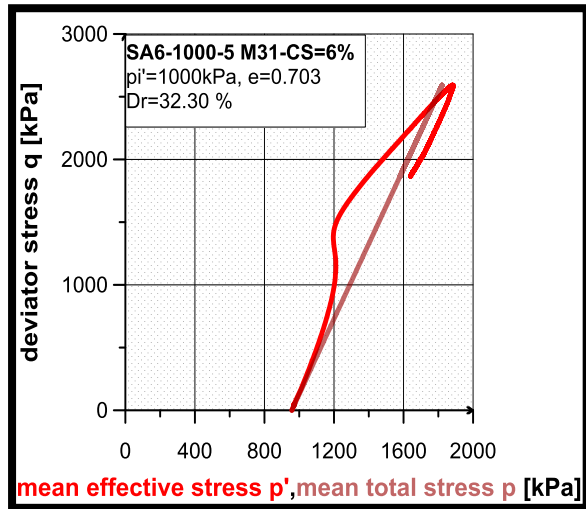
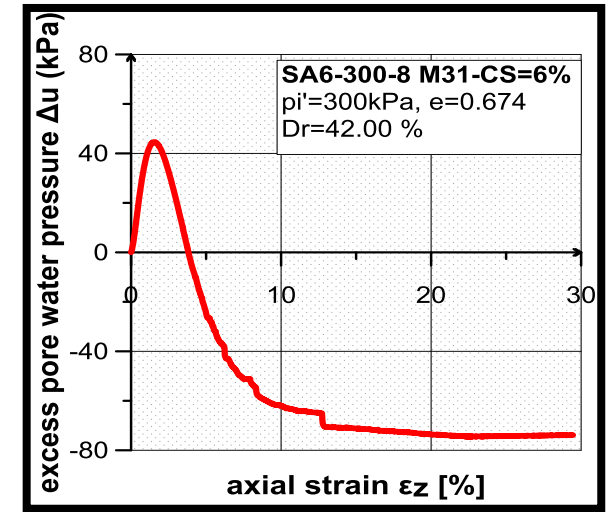
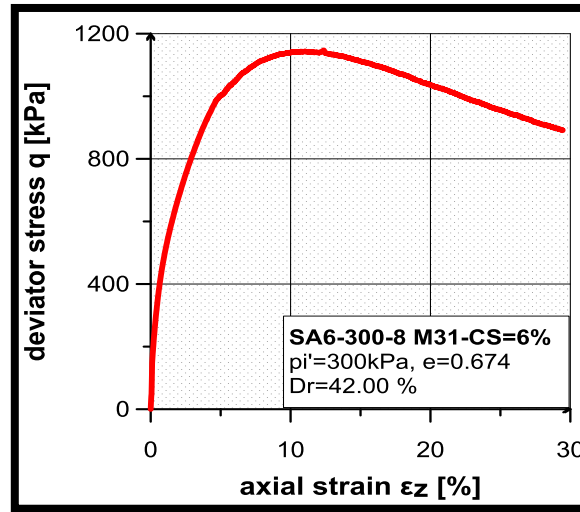
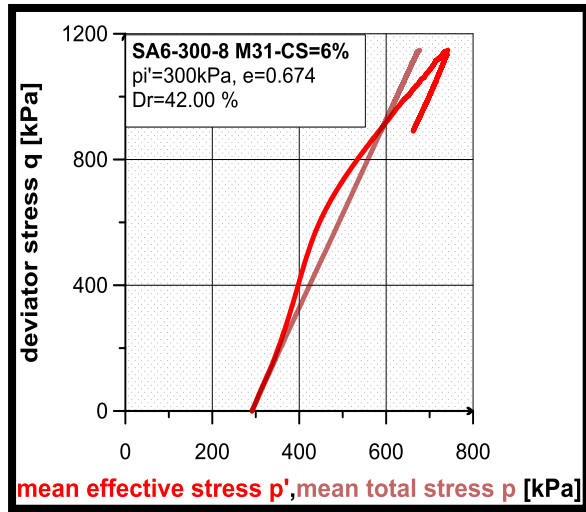


Σχήμα Π-1.4. Δοκιμή BU-1500-2 (πάνω σειρά) και BU-2000-3 (κάτω σειρά)

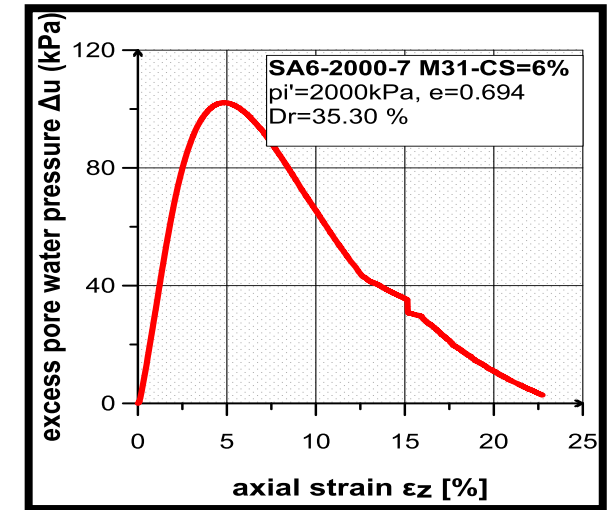
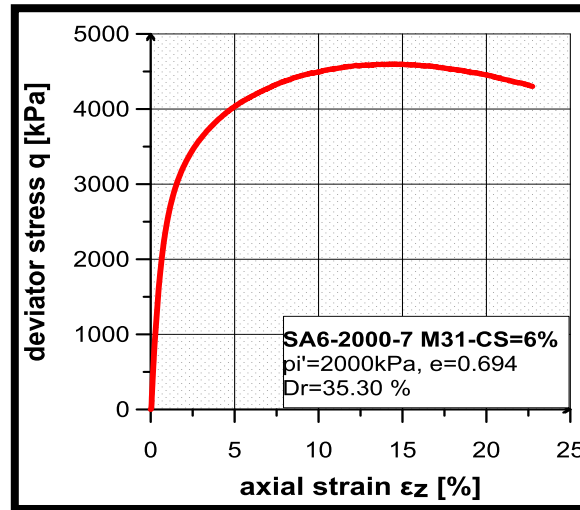
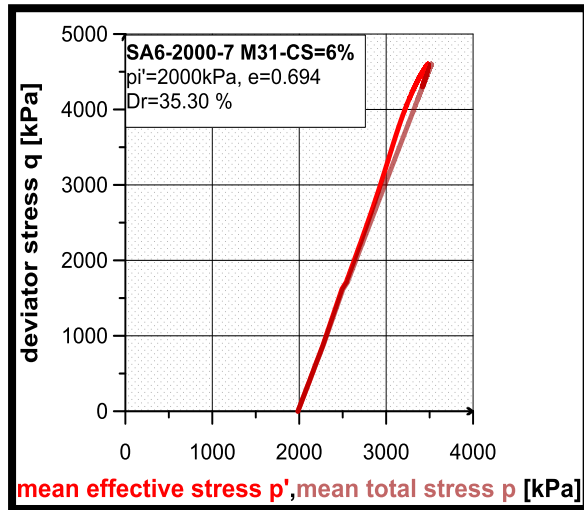
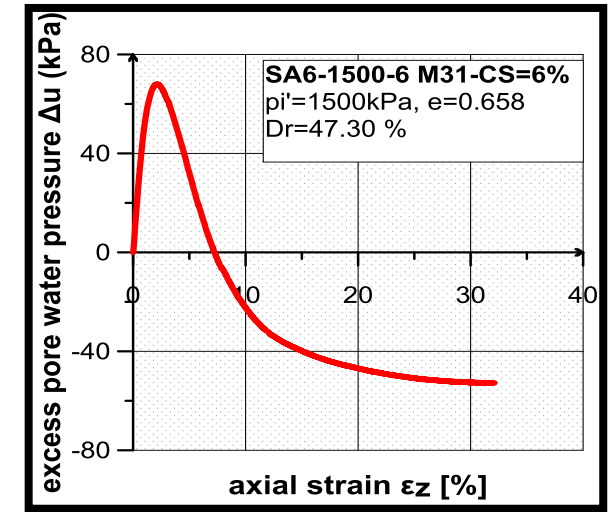
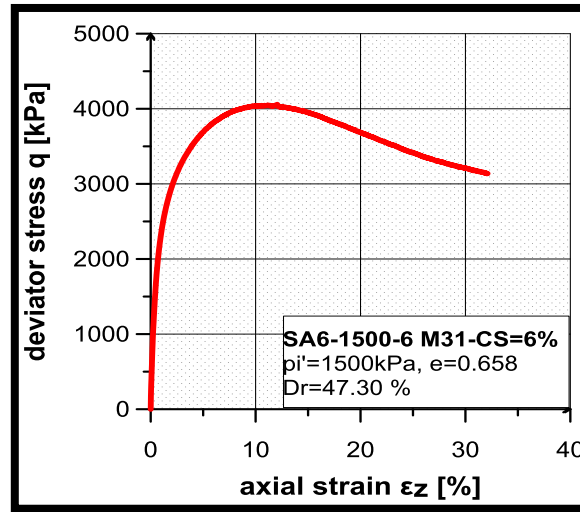
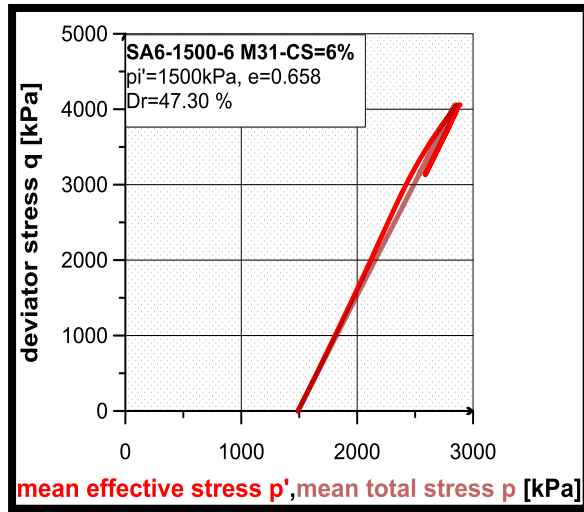
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-2

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CU ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ  
ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

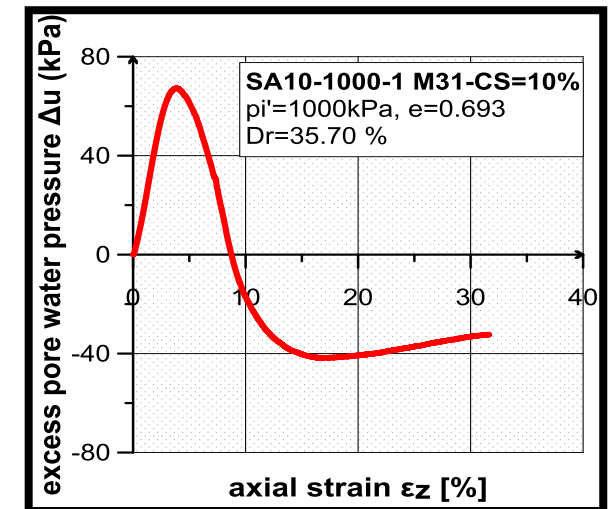
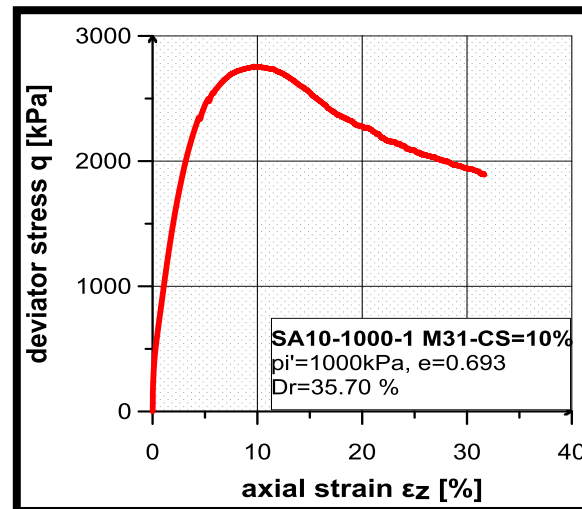
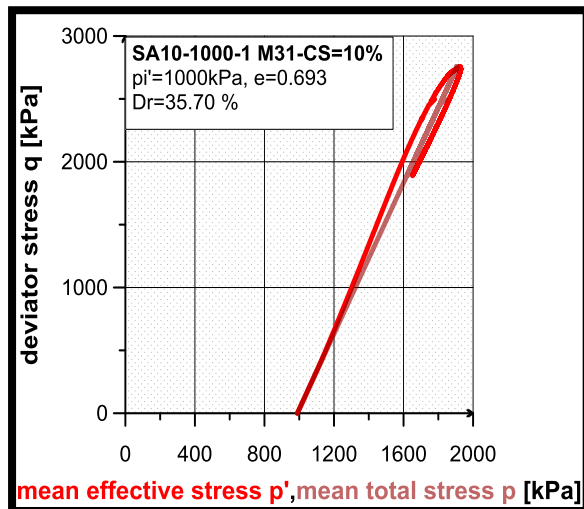
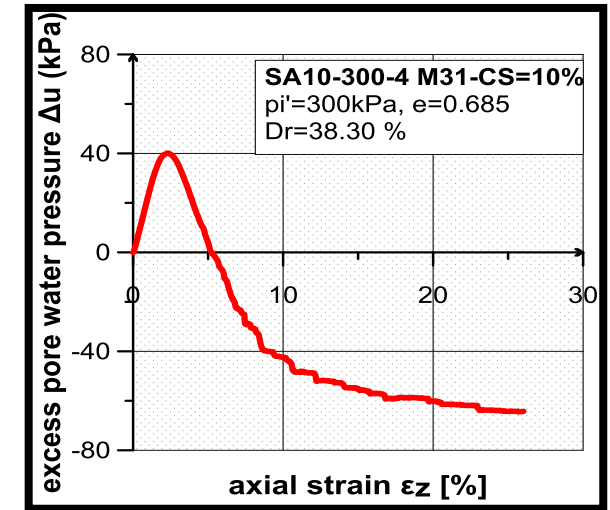
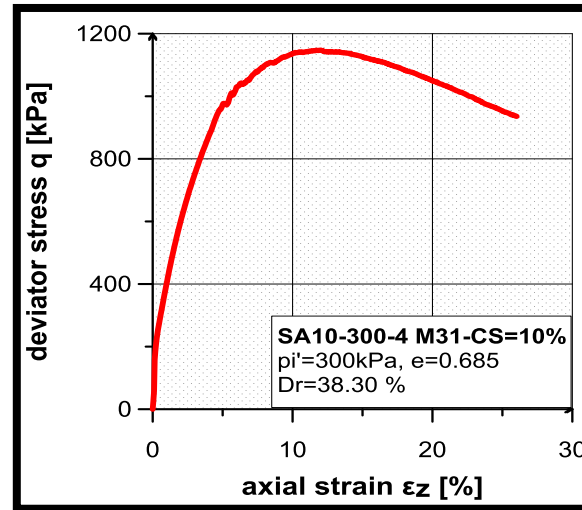
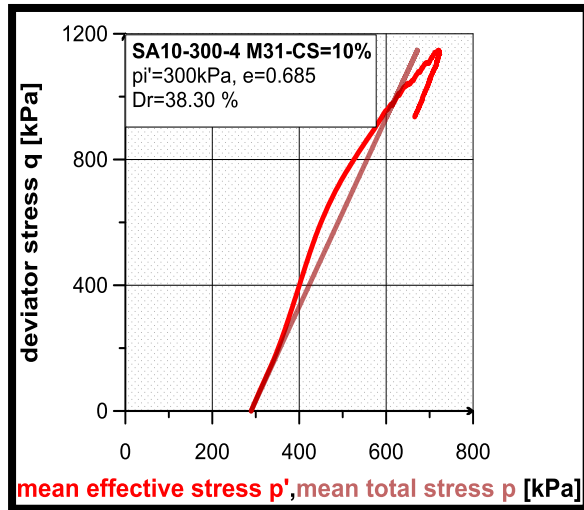
<b>Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Μονοτονικών Δοκιμών Τριαξονικής Θλίψης</b>			
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ Μ31 CS=6% <math>f_c=0\%</math></b>			
<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
SA6-1000-5	$D_r=32,3\%$	$e=0,703$	$p_i'=1000$ kPa
SA6-1500-6	$D_r=47,3\%$	$e=0,658$	$p_i'=1500$ kPa
SA6-2000-7	$D_r=35,3\%$	$e=0,694$	$p_i'=2000$ kPa
SA6-300-8	$D_r=42,0\%$	$e=0,674$	$p_i'=300$ kPa
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ Μ31 CS=10% <math>f_c=0\%</math></b>			
<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
SA10-1000-1	$D_r=35,7\%$	$e=0,693$	$p_i'=1000$ kPa
SA10-1500-2	$D_r=39,7\%$	$e=0,681$	$p_i'=1500$ kPa
SA10-2000-3	$D_r=41,0\%$	$e=0,677$	$p_i'=2000$ kPa
SA10-300-4	$D_r=38,3\%$	$e=0,685$	$p_i'=300$ kPa
SA10-1000-9	$D_r=32,1\%$	$e=0,704$	$p_i'=1000$ kPa
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ Μ31 &amp; D6 CS=6% <math>f_c=10\%</math></b>			
<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
SB6-1000-8	$D_r=34,0\%$	$e=0,631$	$p_i'=1000$ kPa
SB6-1000-9	$D_r=26,6\%$	$e=0,657$	$p_i'=1000$ kPa
SB6-1500-10	$D_r=28,3\%$	$e=0,651$	$p_i'=1500$ kPa
<b>ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ Μ31 &amp; D6 CS=10% <math>f_c=10\%</math></b>			
<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
SB10-1000-1	$D_r=30,0\%$	$e=0,645$	$p_i'=1000$ kPa
SB10-1000-2	$D_r=30,9\%$	$e=0,642$	$p_i'=1000$ kPa
SB10-1000-3	$D_r=22,0\%$	$e=0,673$	$p_i'=1000$ kPa
SB10-1000-4	$D_r=24,9\%$	$e=0,663$	$p_i'=1000$ kPa
SB10-1000-5	$D_r=24,9\%$	$e=0,663$	$p_i'=1000$ kPa
SB10-1000-6	$D_r=26,9\%$	$e=0,656$	$p_i'=1000$ kPa
SB10-1500-7	$D_r=35,1\%$	$e=0,627$	$p_i'=1500$ kPa



Σχήμα Π-2.1. Δοκιμή SA6-300-8 (πάνω σειρά) και SA6-1000-5 (κάτω σειρά)

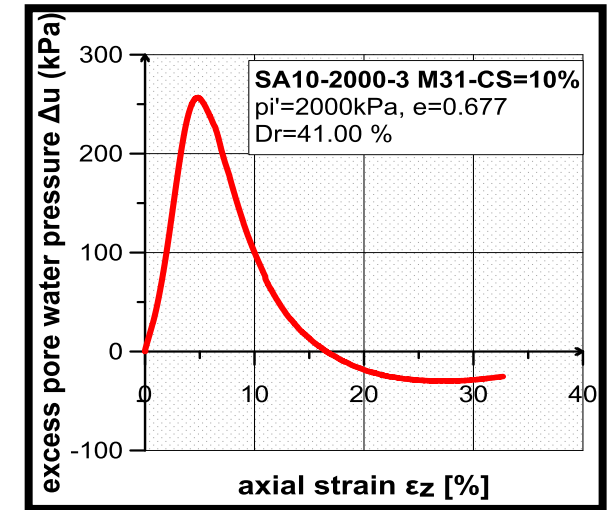
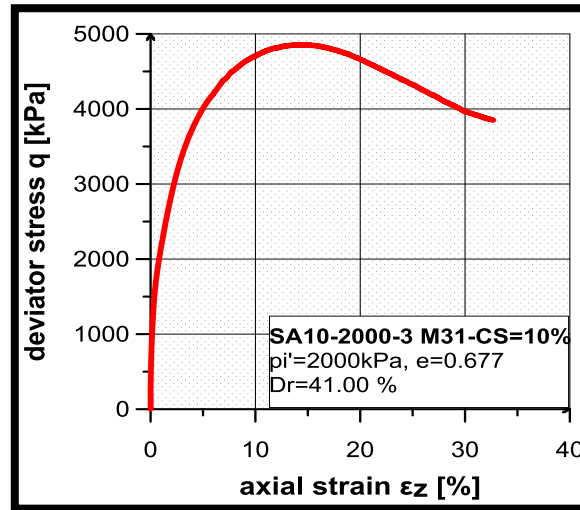
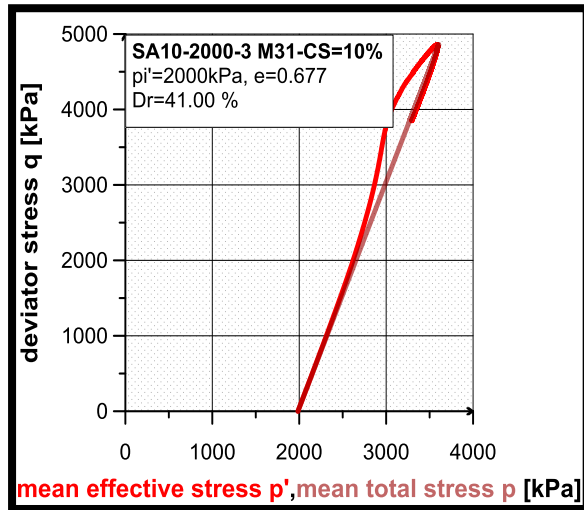
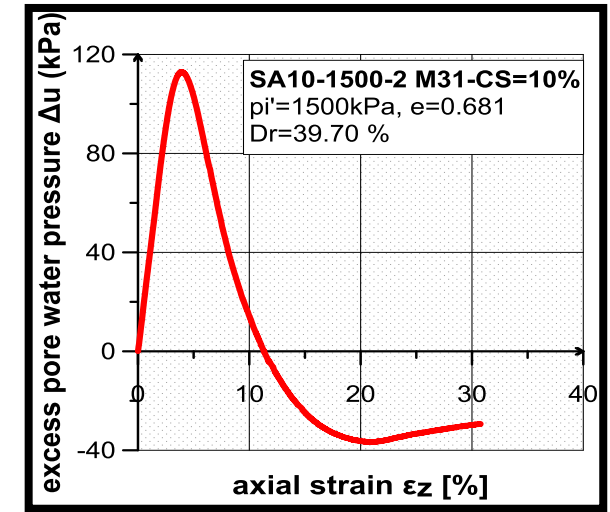
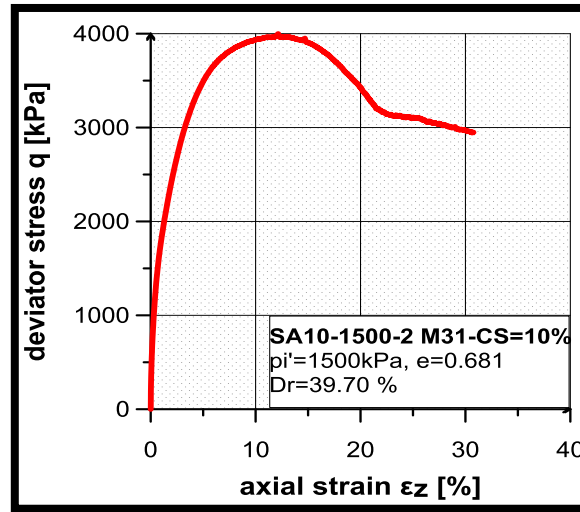
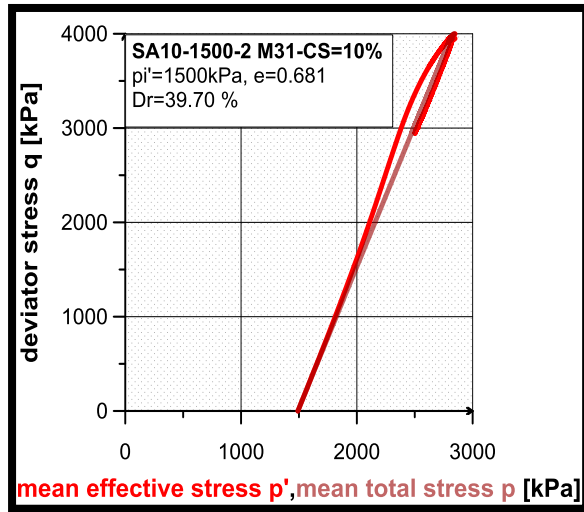


Σχήμα Π-2.2. Δοκιμή SA6-1500-6 (πάνω σειρά) και SA6-2000-7 (κάτω σειρά)

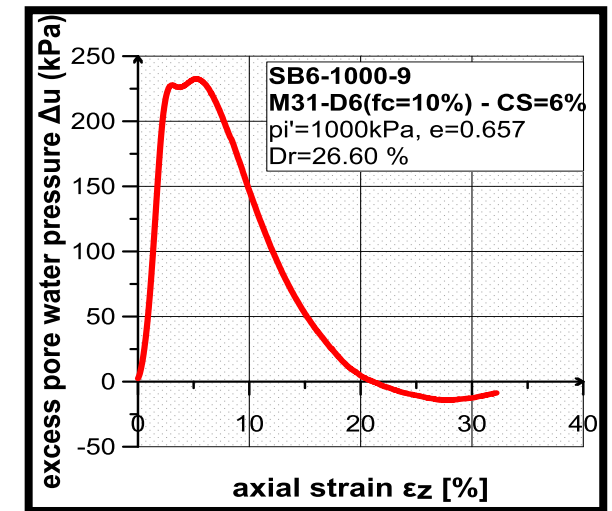
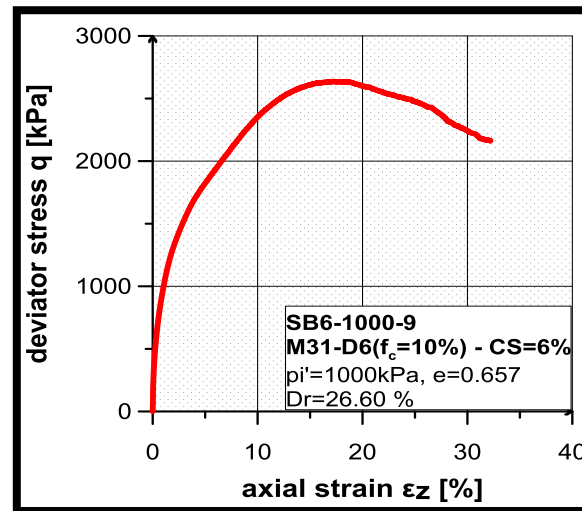
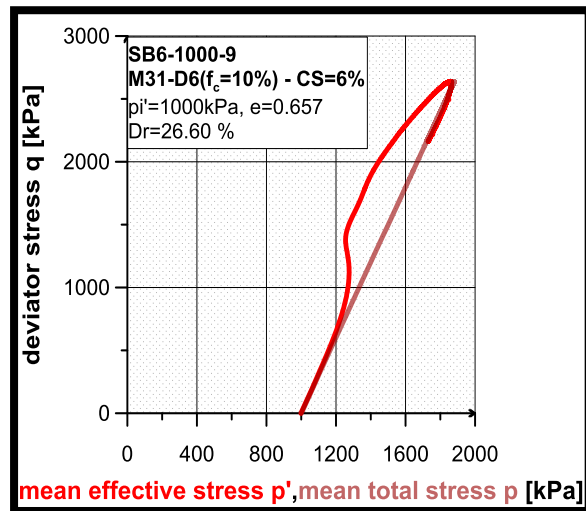
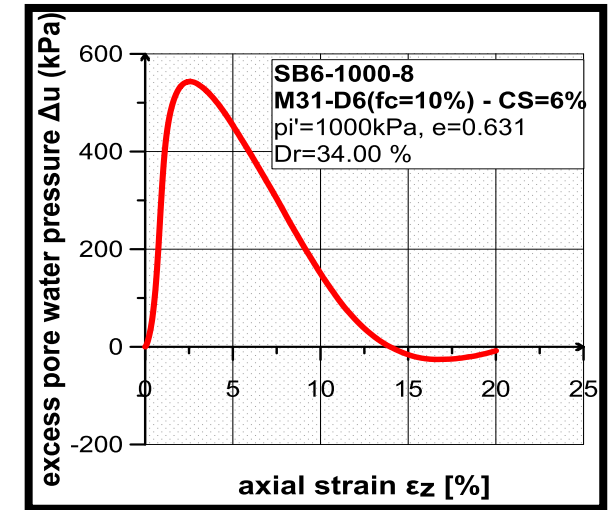
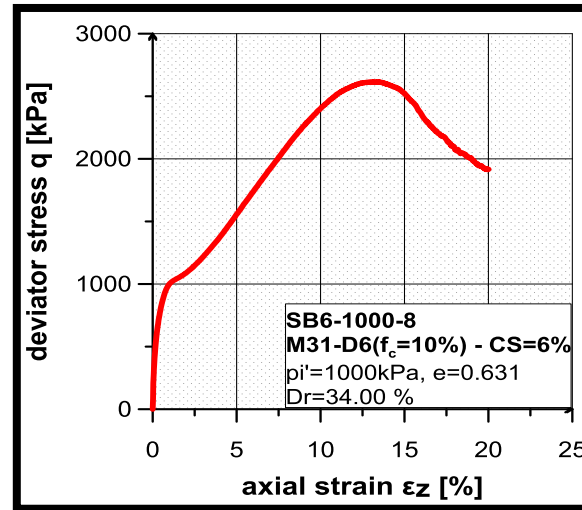
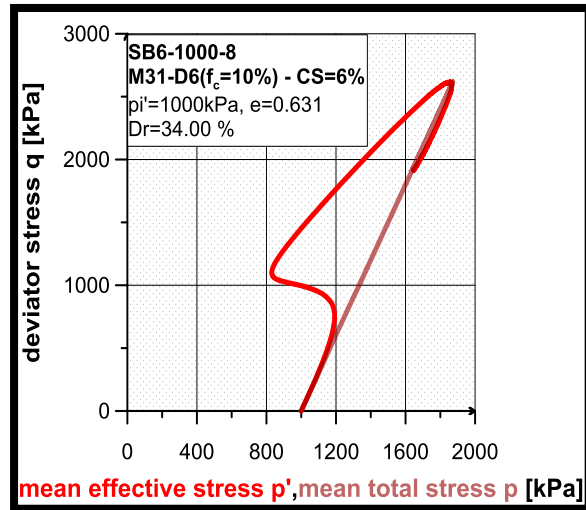


Σχήμα Π-2.3. Δοκιμή SA10-300-4 (πάνω σειρά) και SA10-1000-1 (κάτω σειρά)

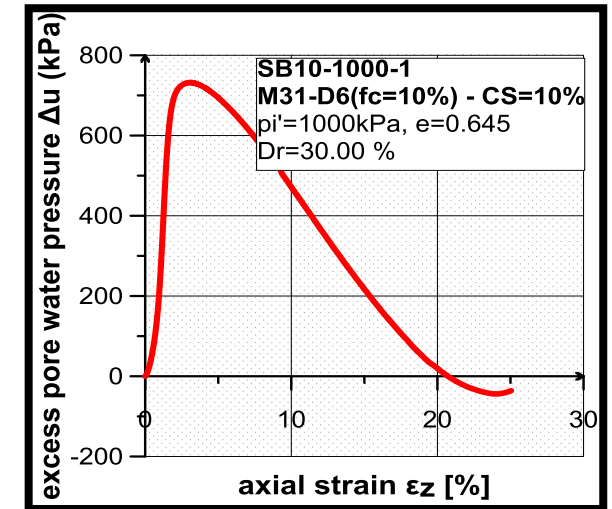
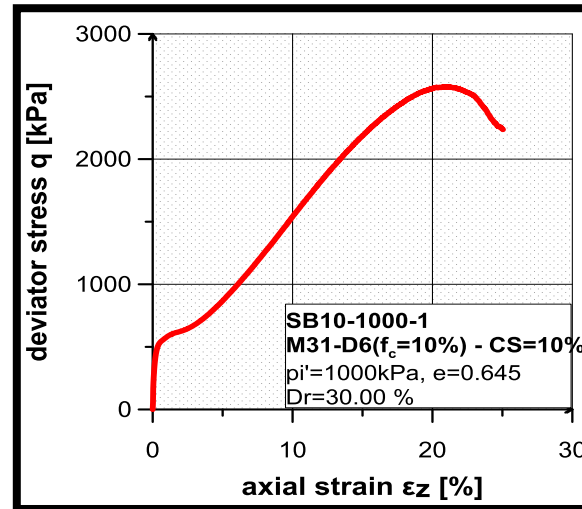
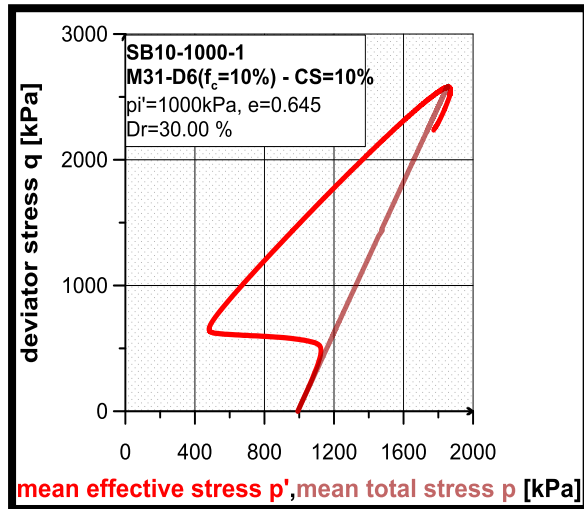
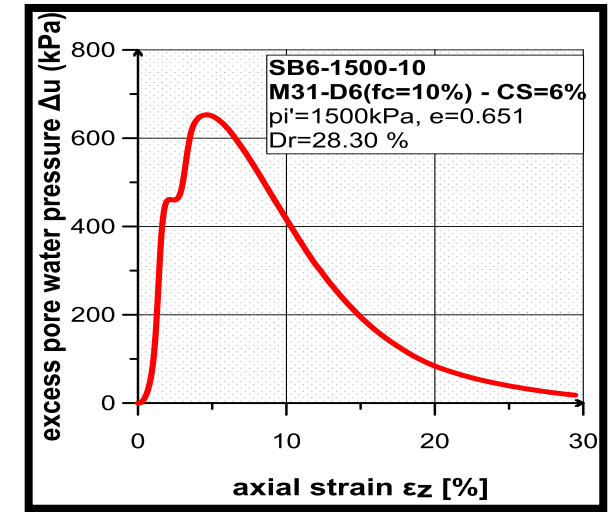
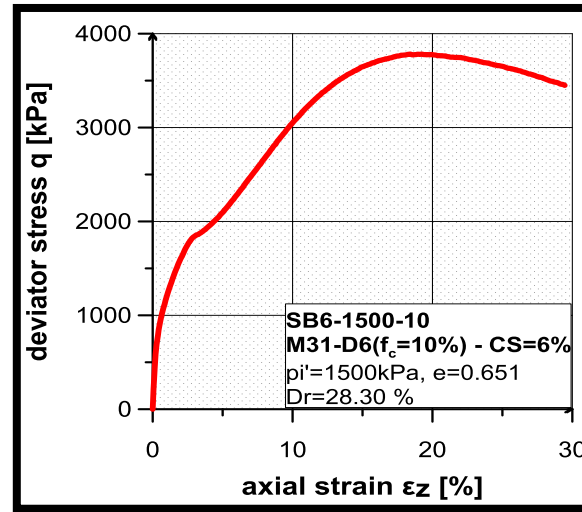
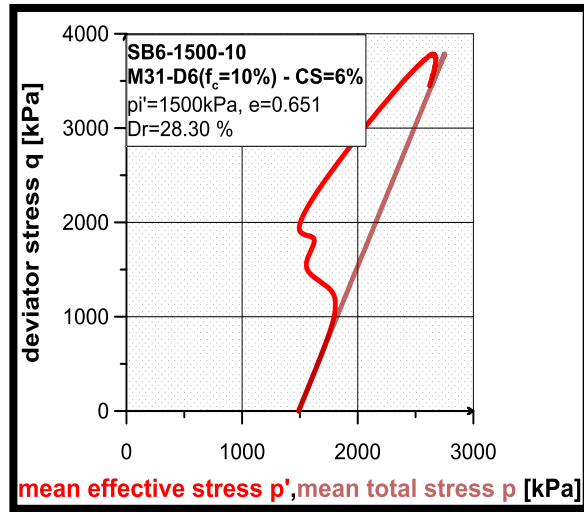




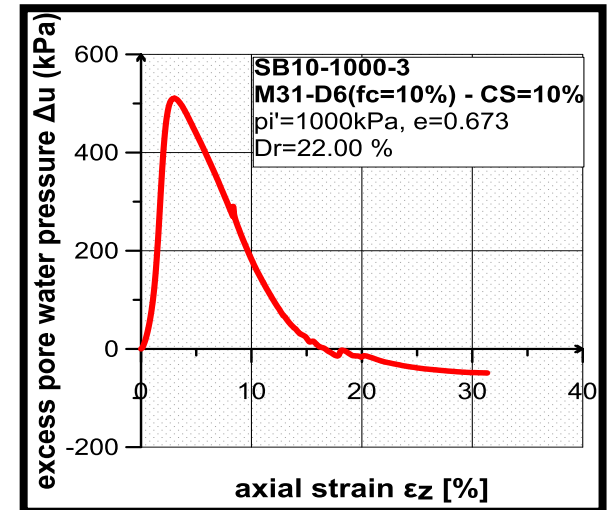
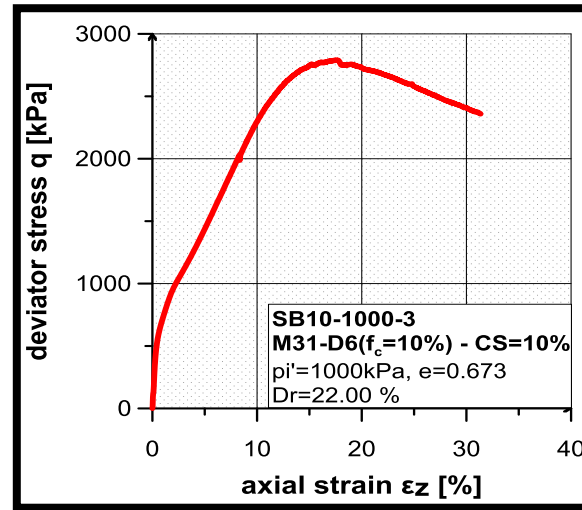
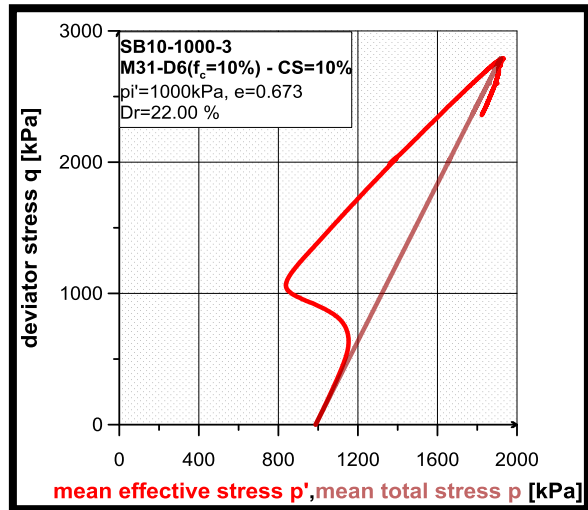
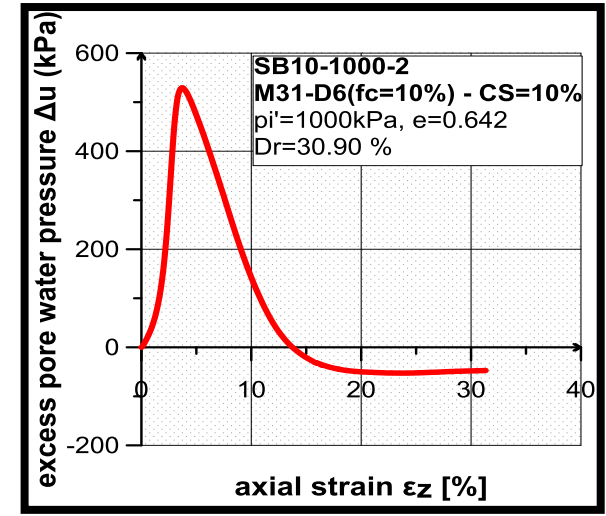
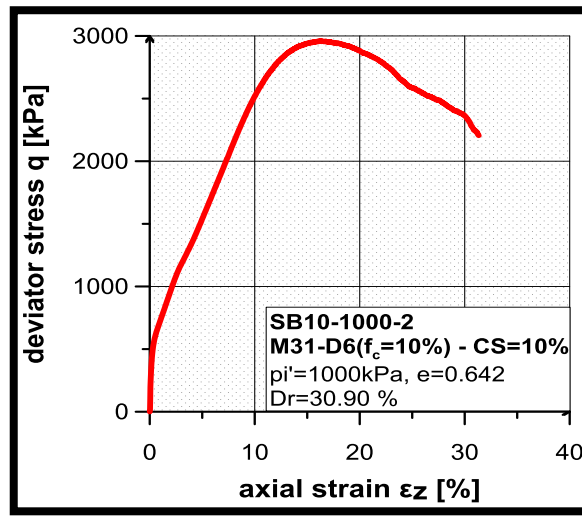
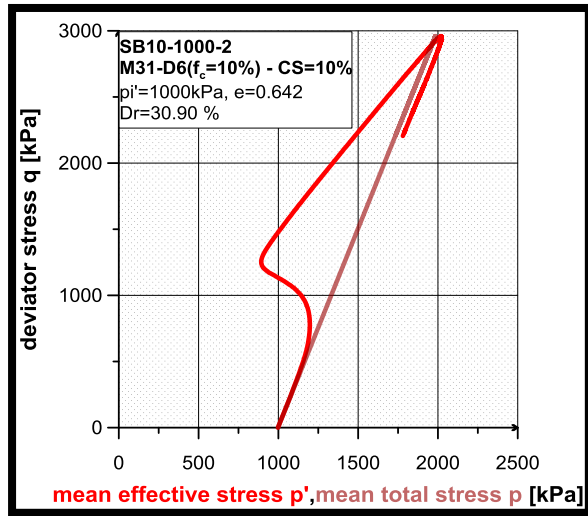
Σχήμα Π-2.4. Δοκιμή SA10-1500-2 (πάνω σειρά) και SA10-2000-3 (κάτω σειρά)



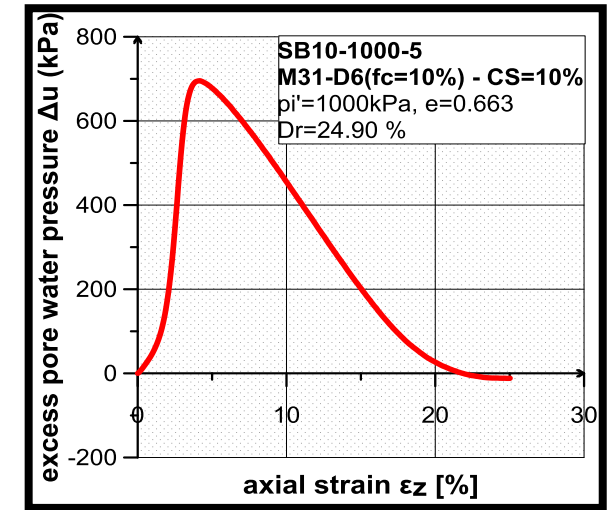
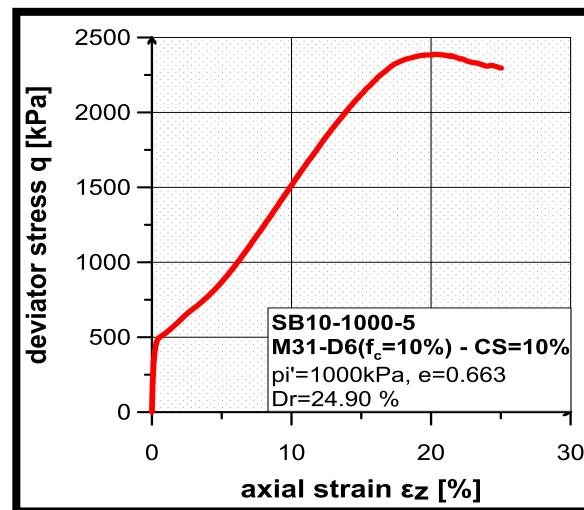
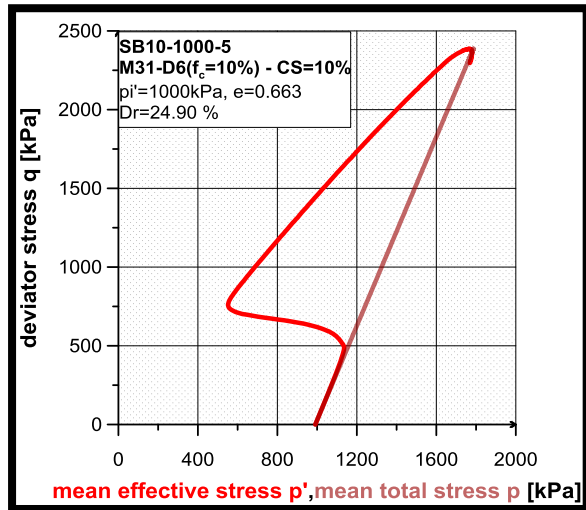
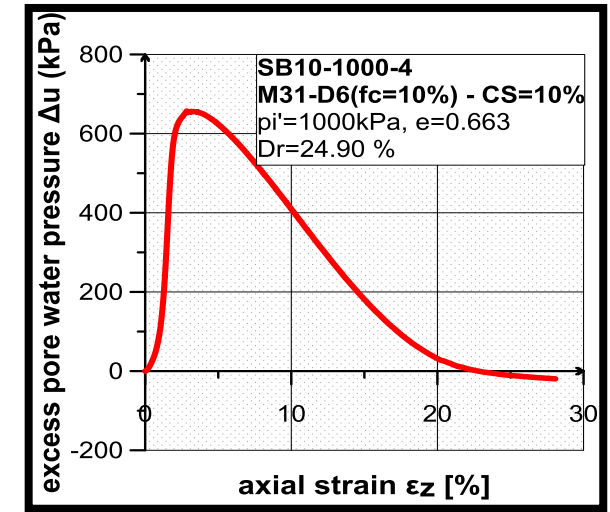
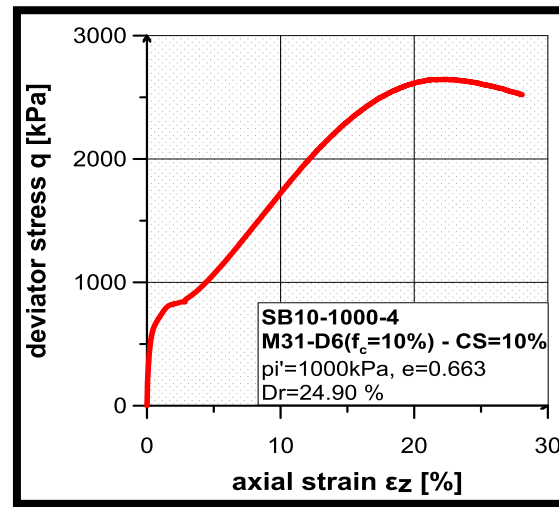
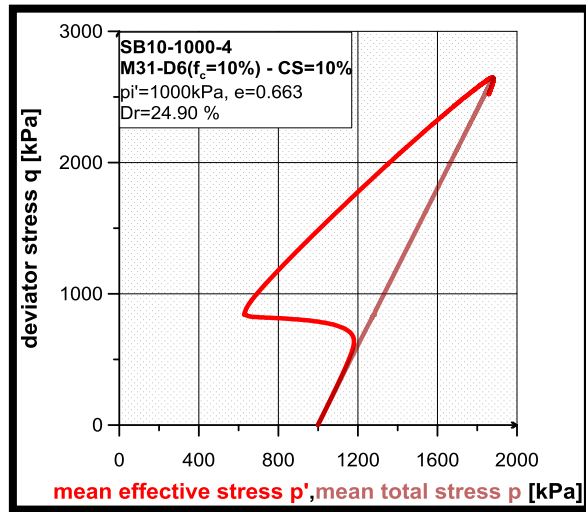
Σχήμα Π-2.5. Δοκιμή SB6-1000-8 (πάνω σειρά) και SB6-1000-9 (κάτω σειρά)



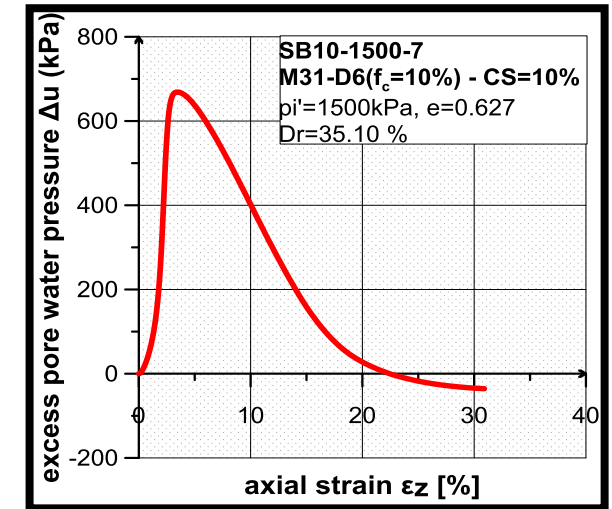
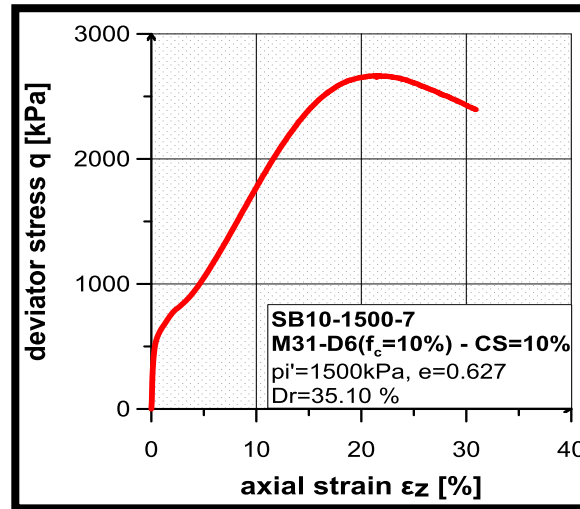
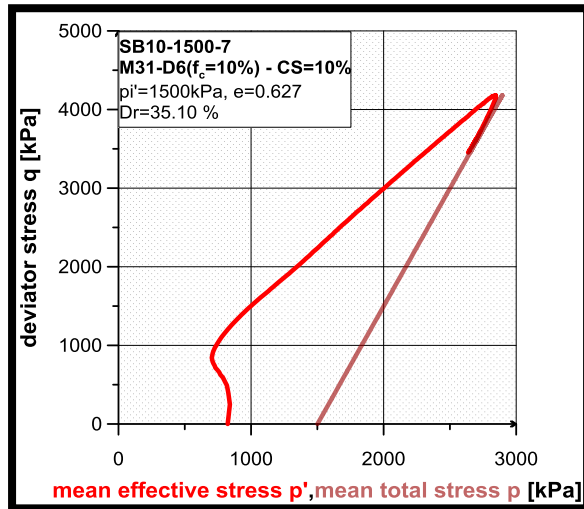
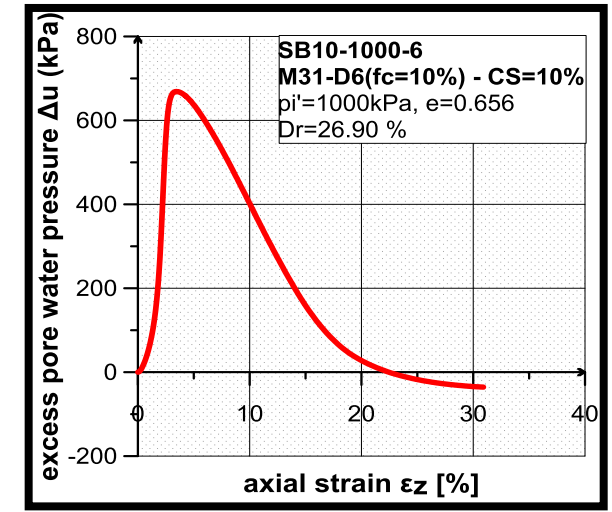
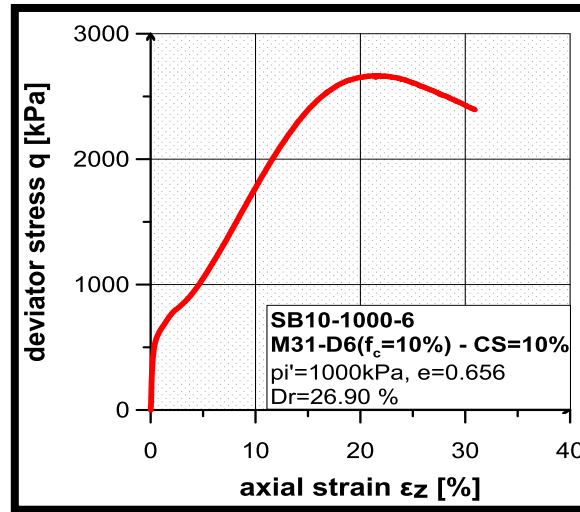
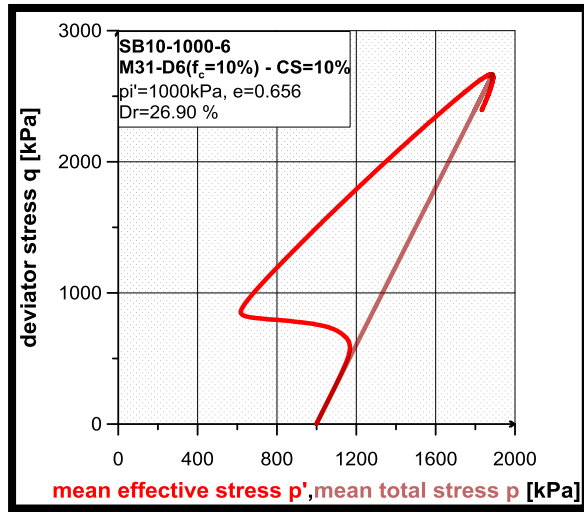
Σχήμα Π-2.6. Δοκιμή SB6-1500-10 (πάνω σειρά) και SB10-1000-1 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π-2.7. Δοκιμή SB10-1000-2 (πάνω σειρά) και SB10-1000-3 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π-2.8. Δοκιμή SB10-1000-4 (πάνω σειρά) και SB10-1000-5 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π-2.9. Δοκιμή SB10-1000-6 (πάνω σειρά) και SB10-1500-7 (κάτω σειρά)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CD ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ  
ΥΠΟ ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

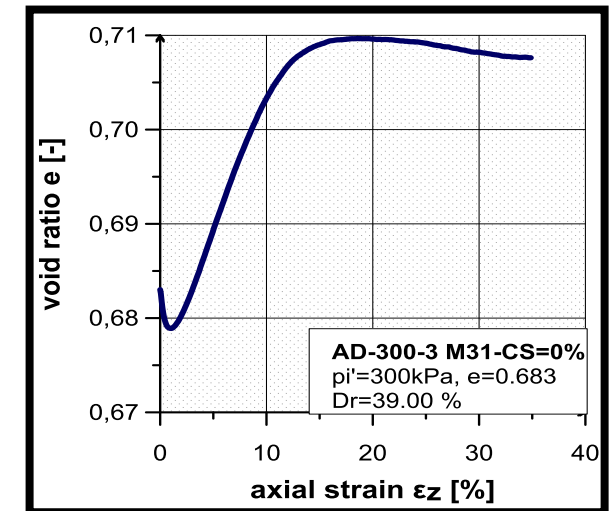
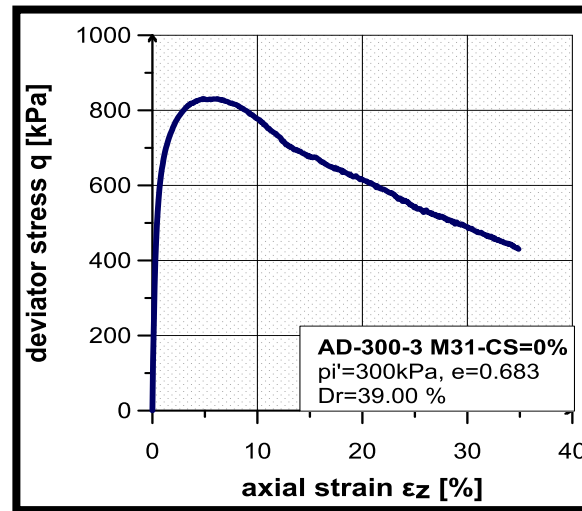
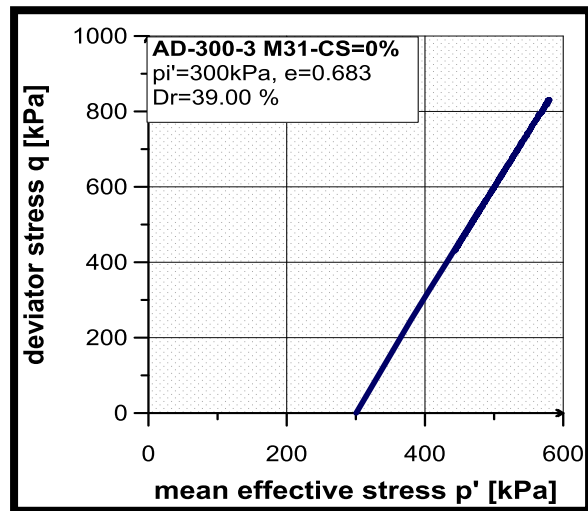
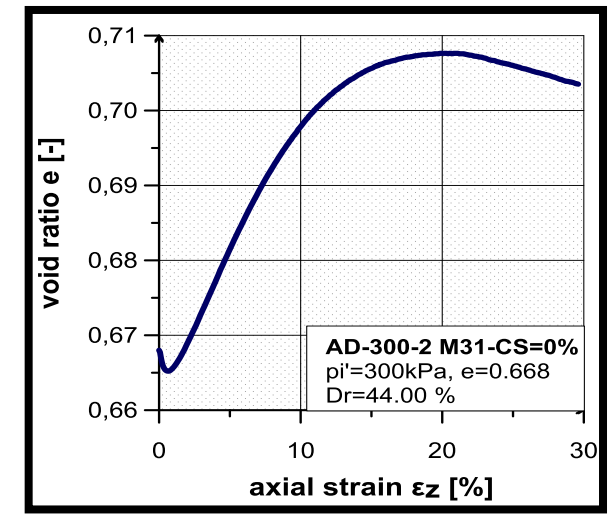
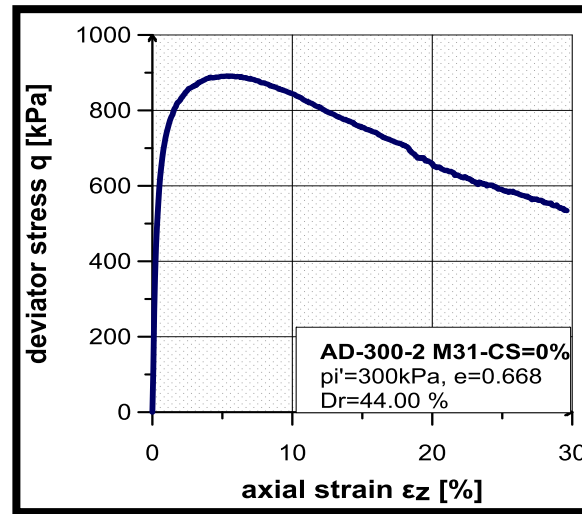
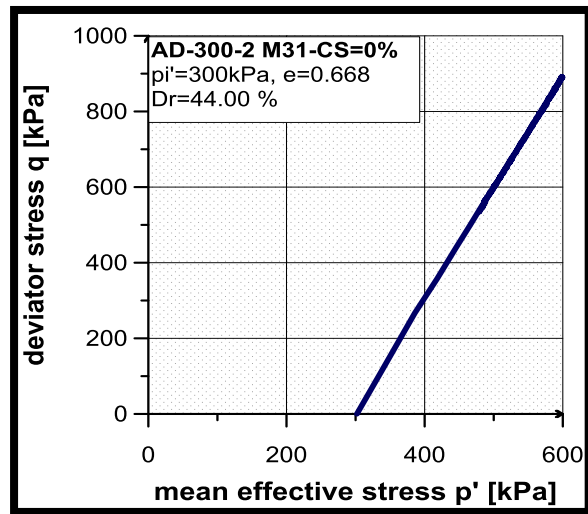




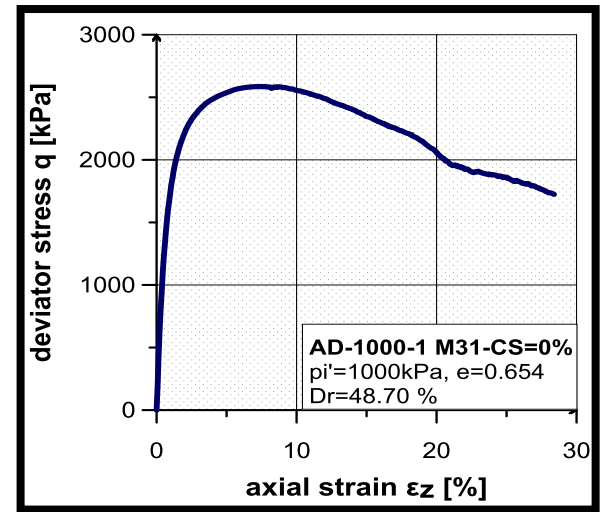
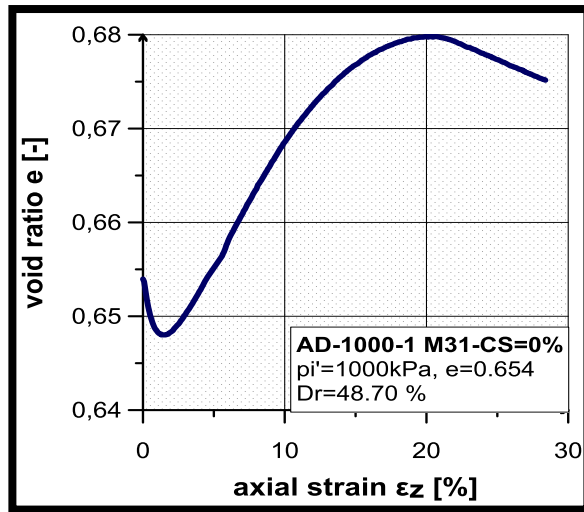
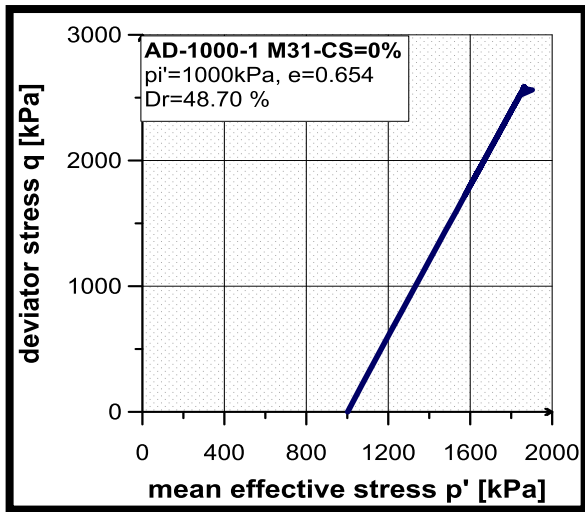
**Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Μονοτονικών Δοκιμών Τριαξονικής Θλίψης**

**ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ Μ31 CS=0% f<sub>c</sub>=0%**

<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Πυκνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>
AD-300-1	Dr=23,1%	e=0,731	p <sub>i</sub> '=300 kPa
AD-300-2	Dr=44,0%	e=0,668	p <sub>i</sub> '=300 kPa
AD-300-3	Dr=39,0%	e=0,683	p <sub>i</sub> '=300 kPa



Σχήμα Π-3.1. Δοκιμή AD-300-2 (πάνω σειρά) και AD-300-3 (κάτω σειρά)



Σχήμα Π-3.2. Δοκιμή AD-1000-1

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-4

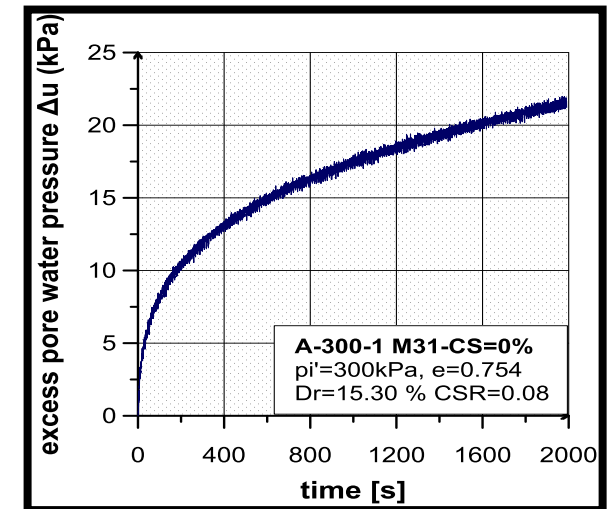
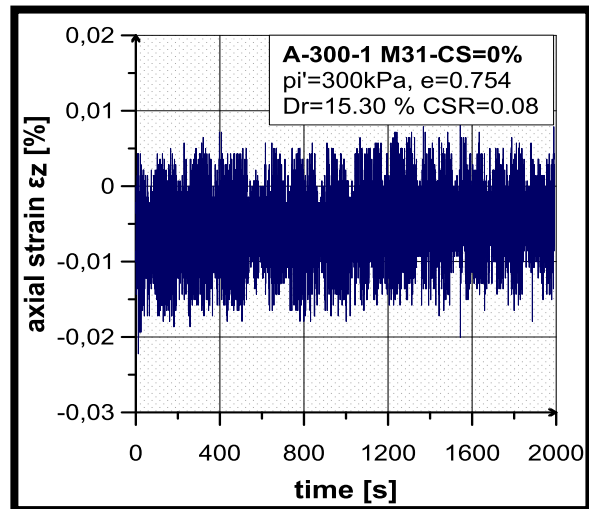
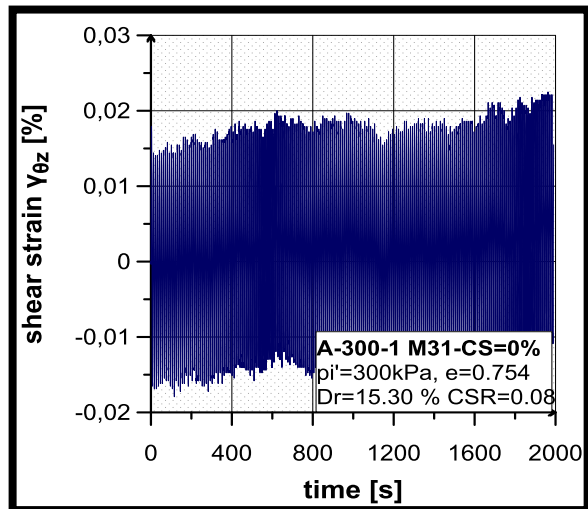
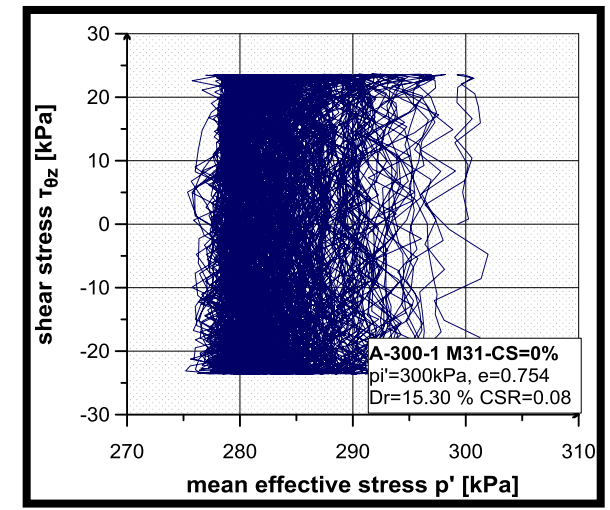
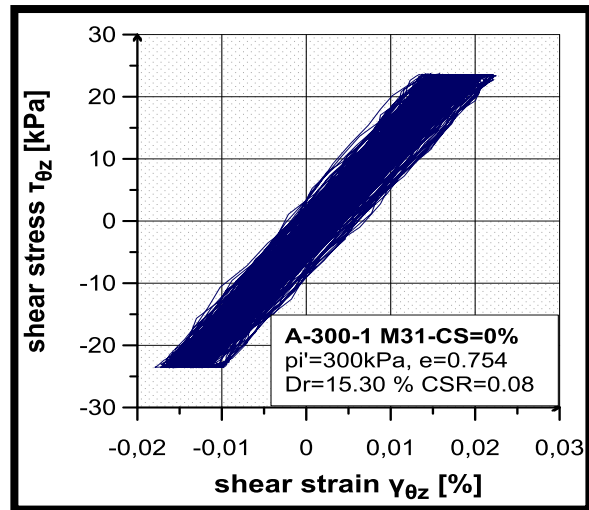
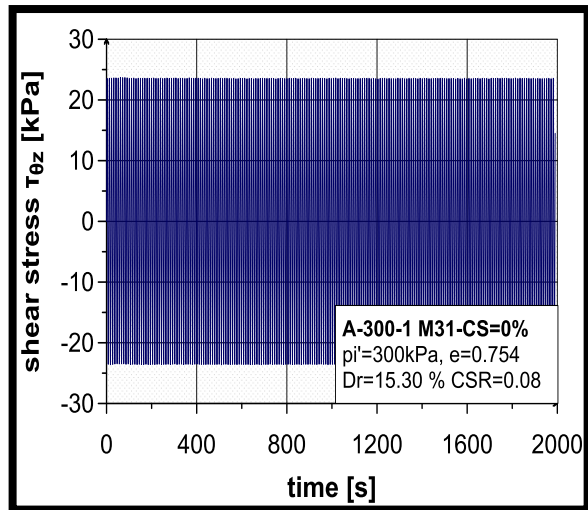
193

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CU ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ  
ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

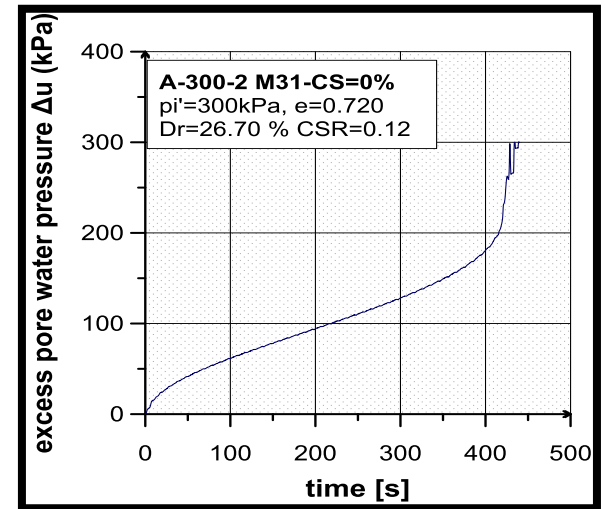
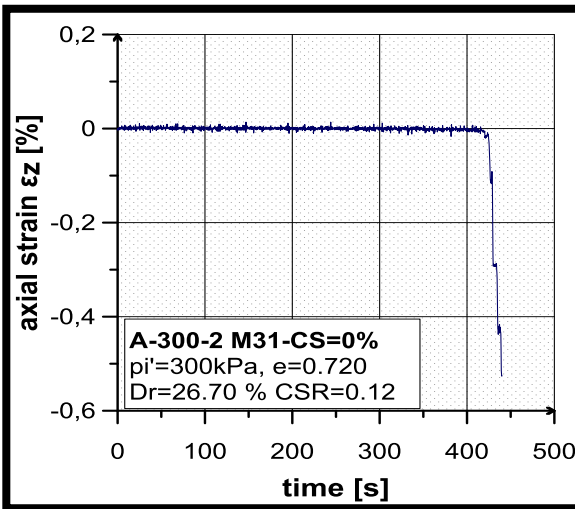
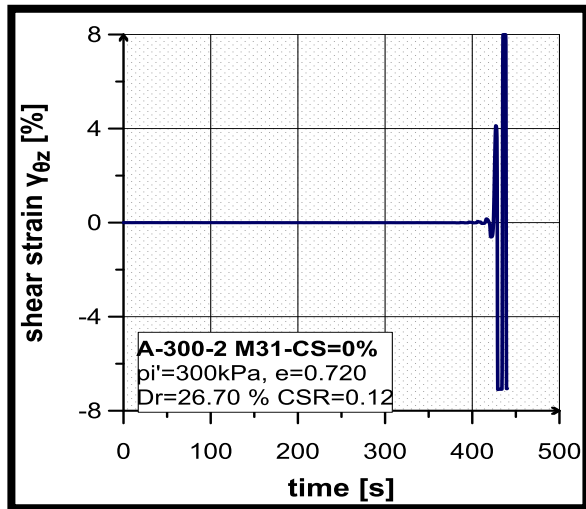
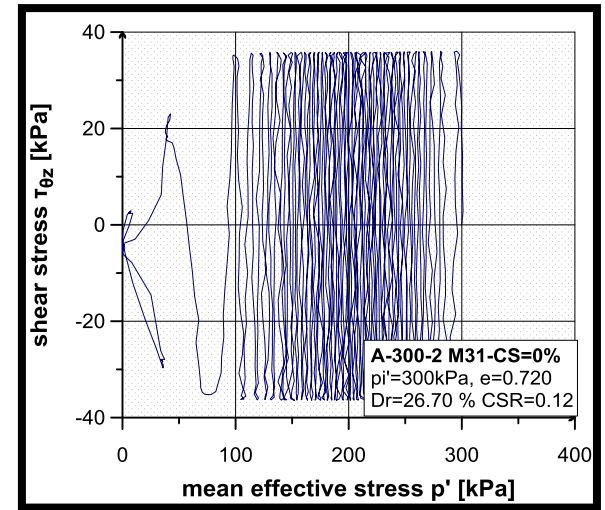
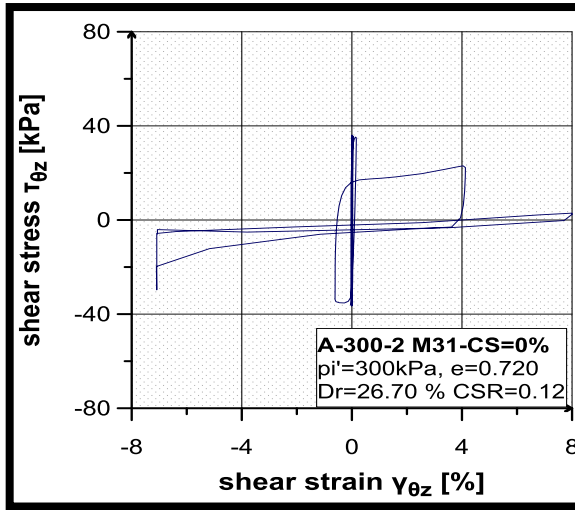
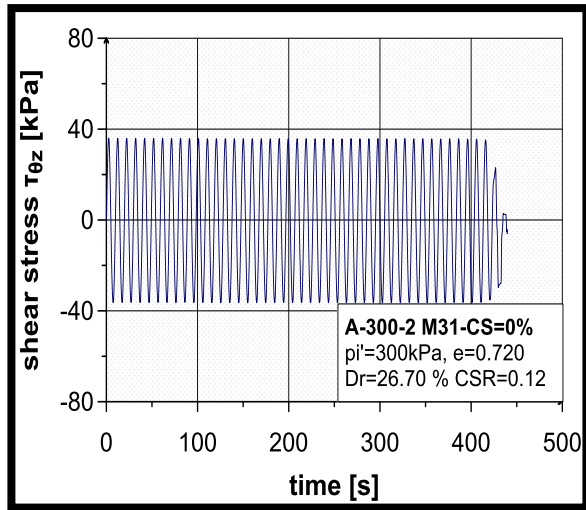
**Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης**

**ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ Μ31 CS=0%  $f_c=0\%$**

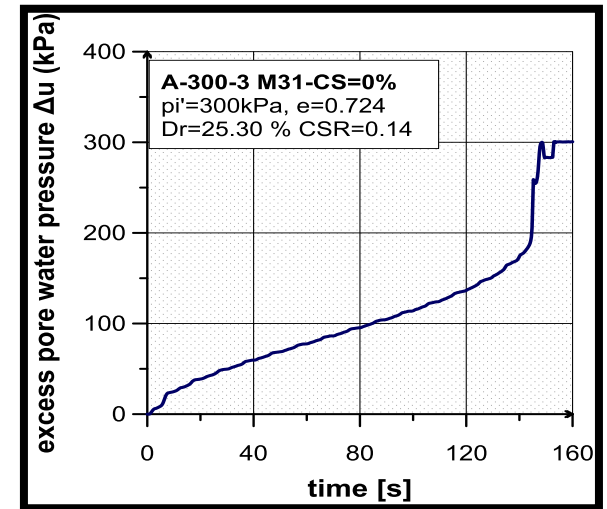
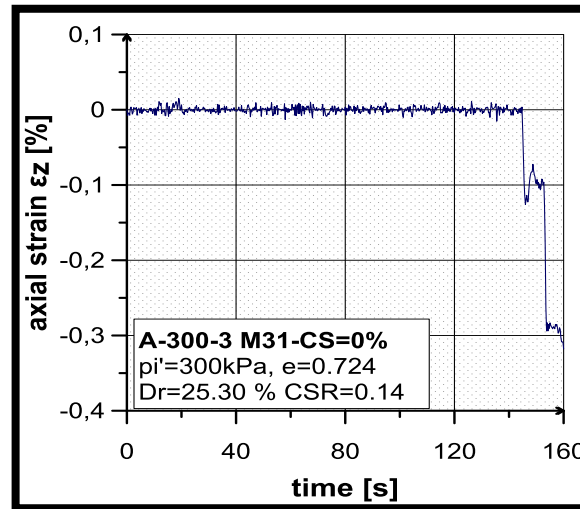
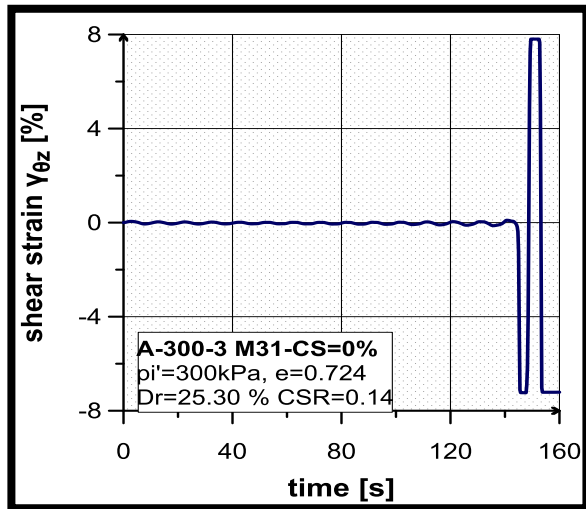
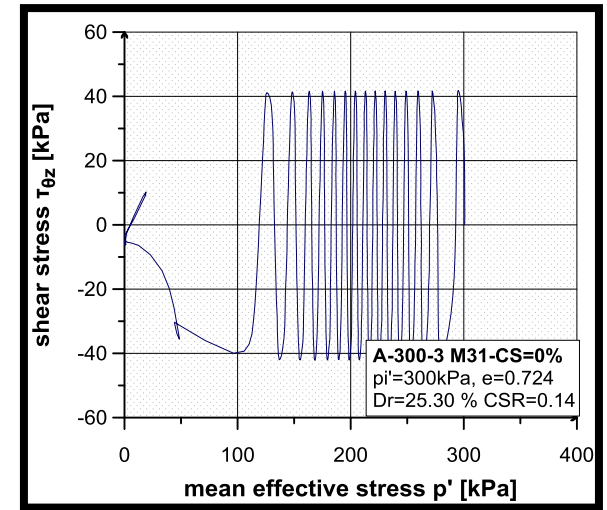
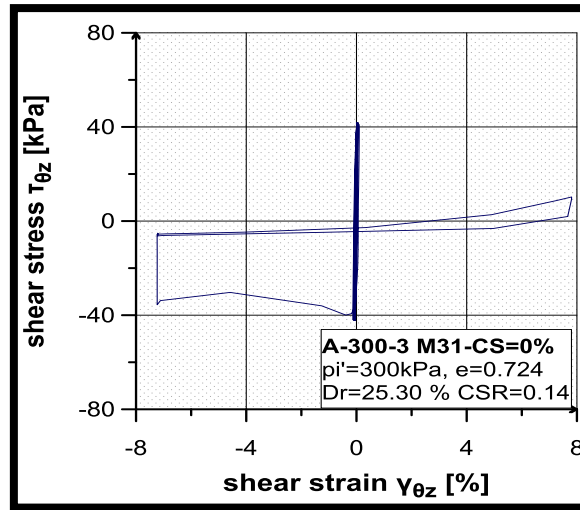
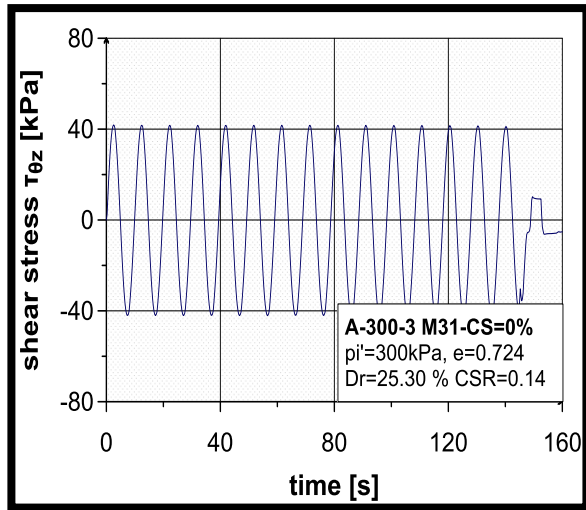
<b>Κωδικός Δοκιμής</b>	<b>Σχετική Ποικνότητα</b>	<b>Δείκτης Πόρων</b>	<b>Τάση Στερεοποίησης</b>	<b>CSR</b>	<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>N<sub>1%</sub></b>	<b>N<sub>2.5%</sub></b>	<b>N<sub>5%</sub></b>
A-300-1	D <sub>r</sub> =15,3%	e=0,754	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,08	199			
A-300-2	D <sub>r</sub> =26,7%	e=0,720	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,12	44	42,5	42,6	42,9
A-300-3	D <sub>r</sub> =25,3%	e=0,724	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	15	14,5	14,5	14,6
A-300-4	D <sub>r</sub> =28,0%	e=0,716	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,16	17	15,4	15,4	15,5
A-300-5	D <sub>r</sub> =41,3%	e=0,676	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,22	11	9,5	10	10,4
A-300-6	D <sub>r</sub> =29,0%	e=0,713	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,22	3	2,2	2,2	2,5
A-300-7	D <sub>r</sub> =42,6%	e=0,672	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	76	74,2	74,2	75,1
A-300-8	D <sub>r</sub> =29,3%	e=0,712	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,25	3	1,7	1,8	2,1
A-300-9	D <sub>r</sub> =42,3%	e=0,673	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,25	9	6,1	6,5	6,6



Σχήμα Π-4.1. Δοκιμή A-300-1

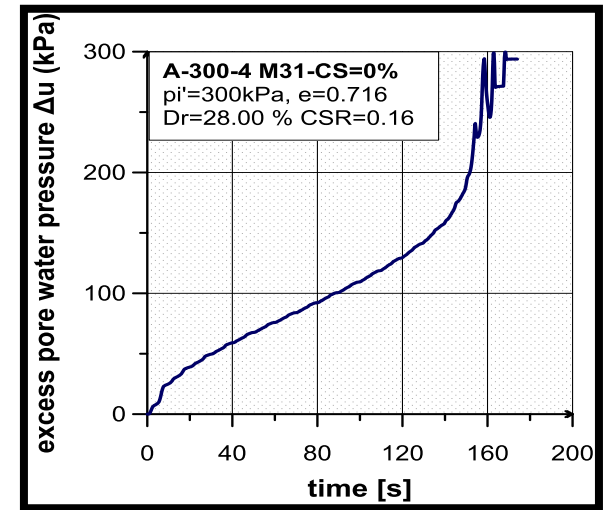
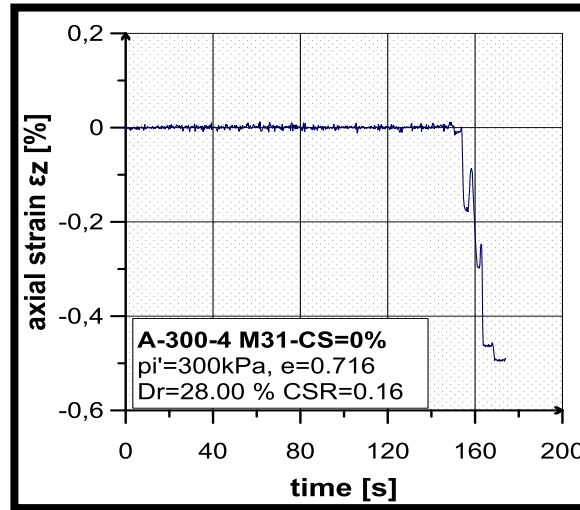
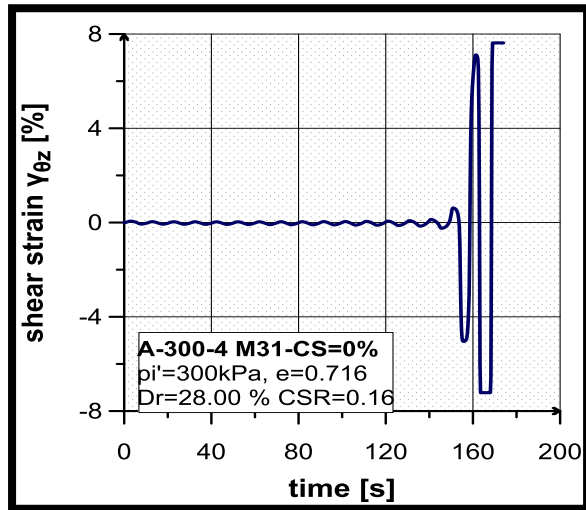
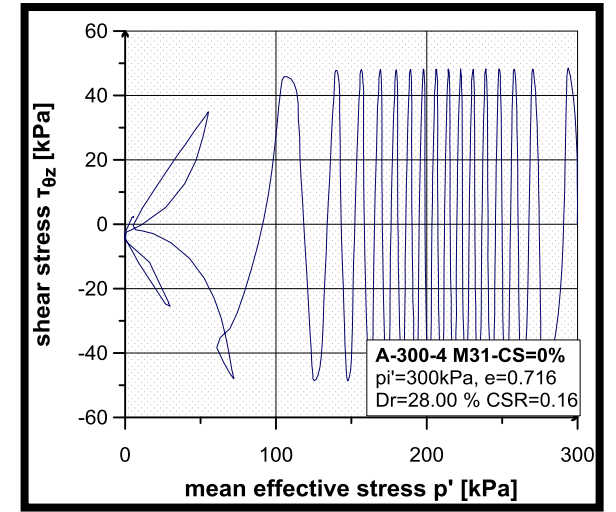
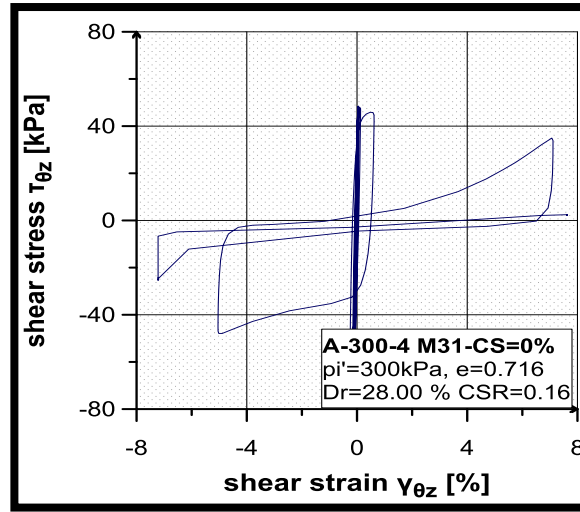
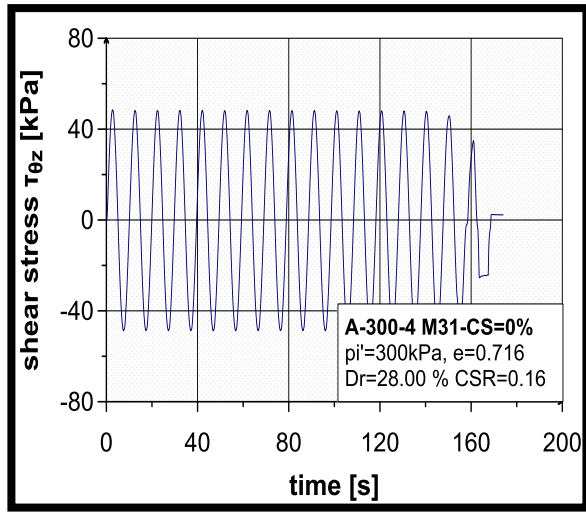


Σχήμα Π-4.2. Δοκιμή A-300-2

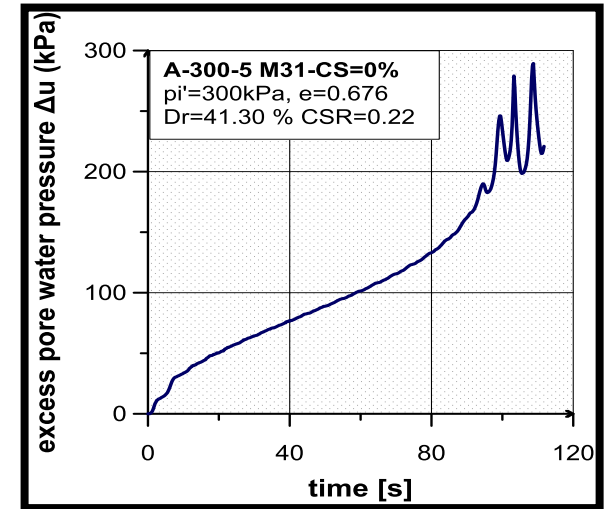
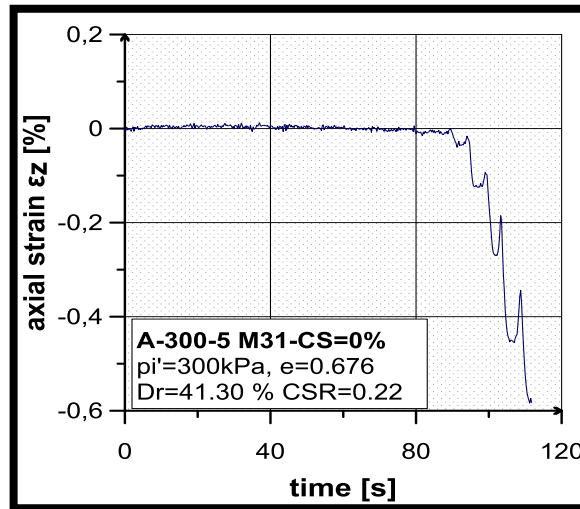
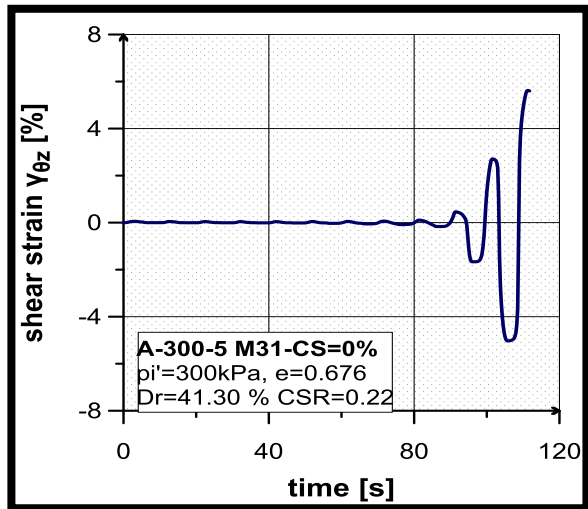
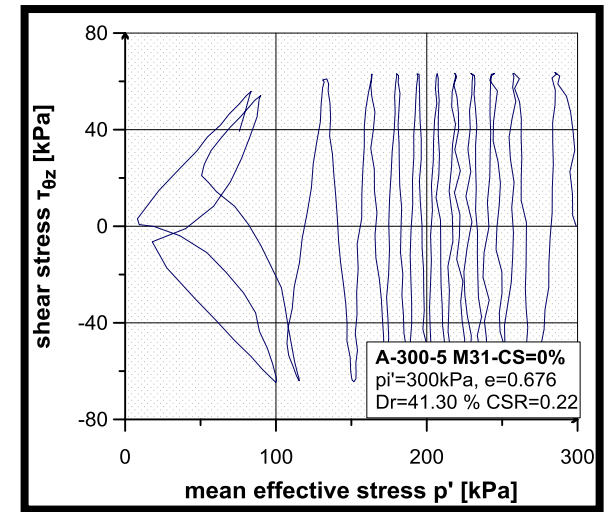
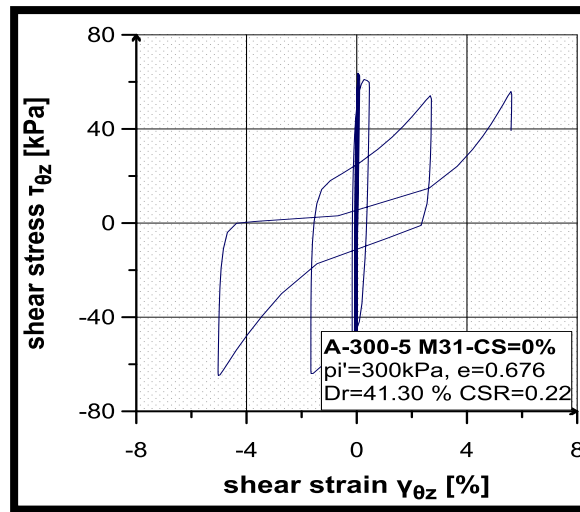
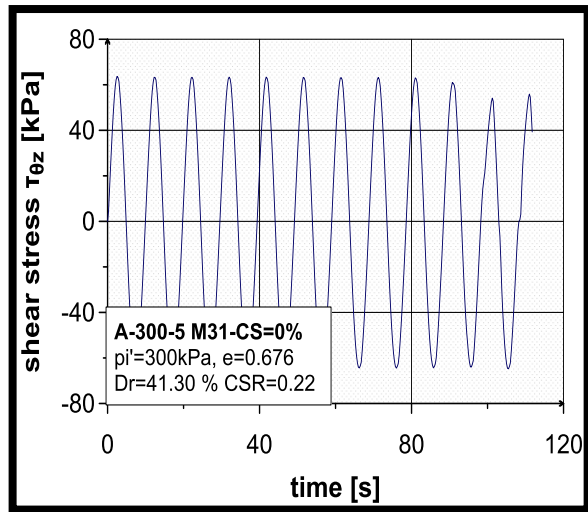


Σχήμα Π-4.3. Δοκιμή A-300-3

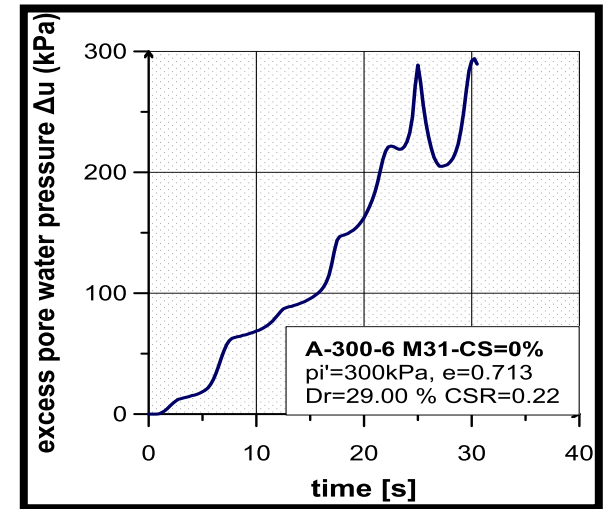
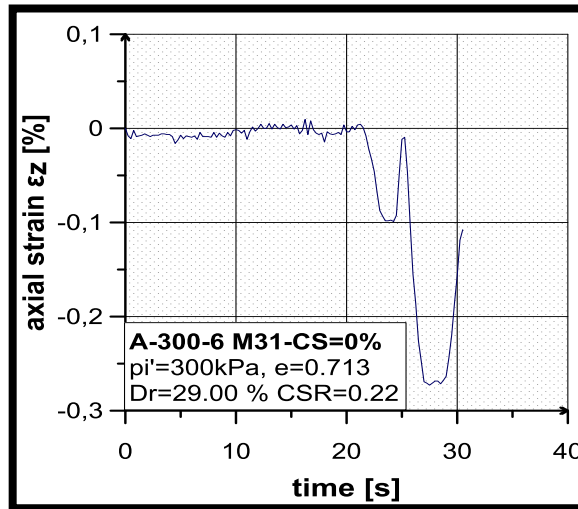
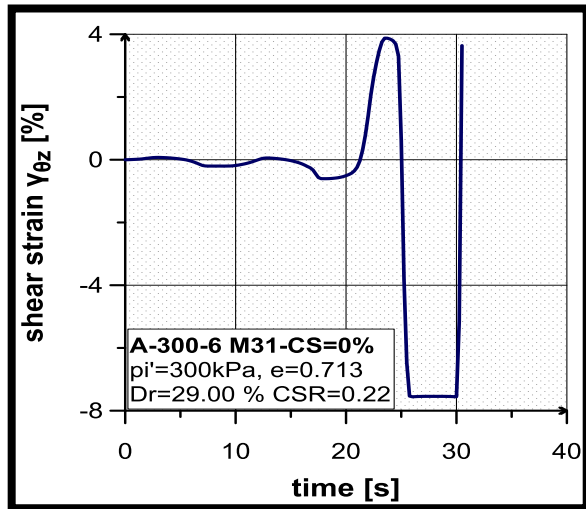
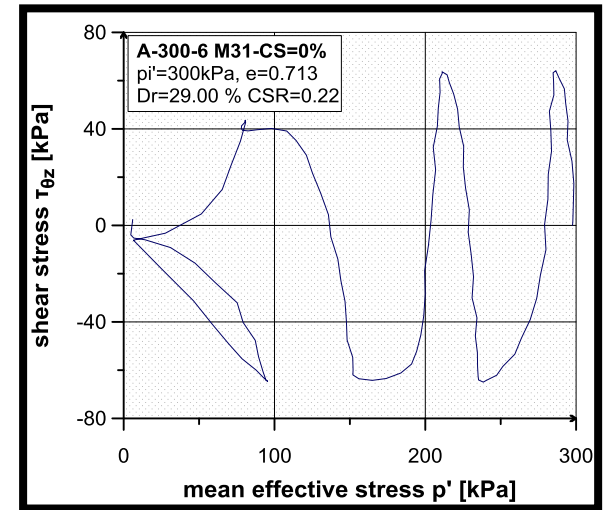
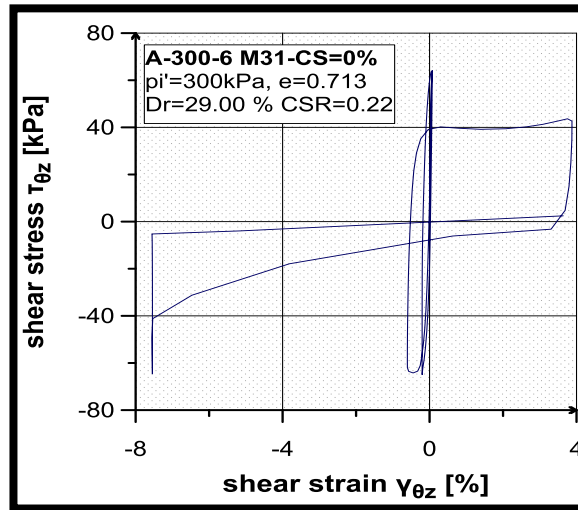
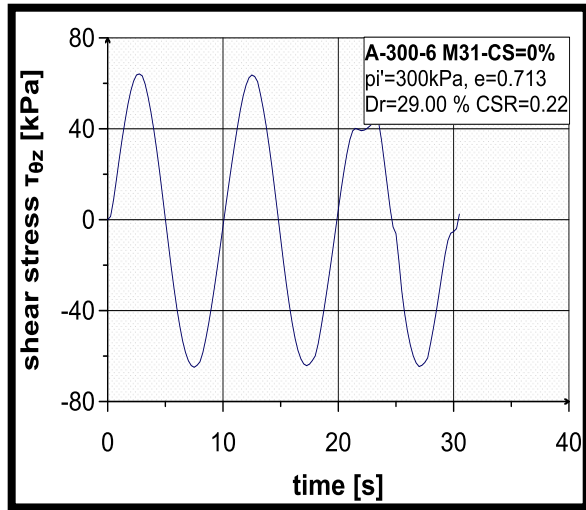




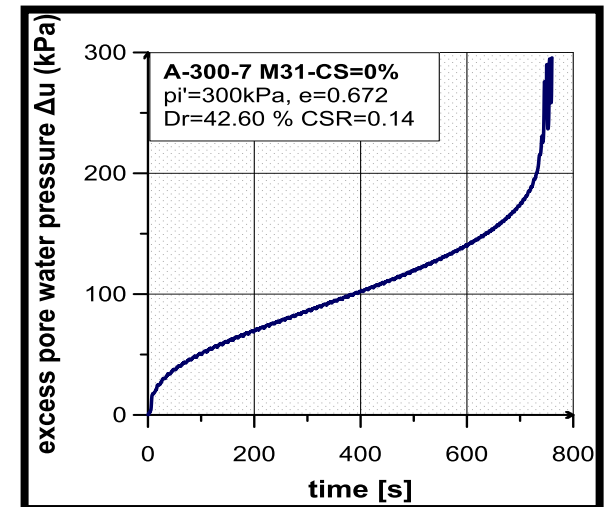
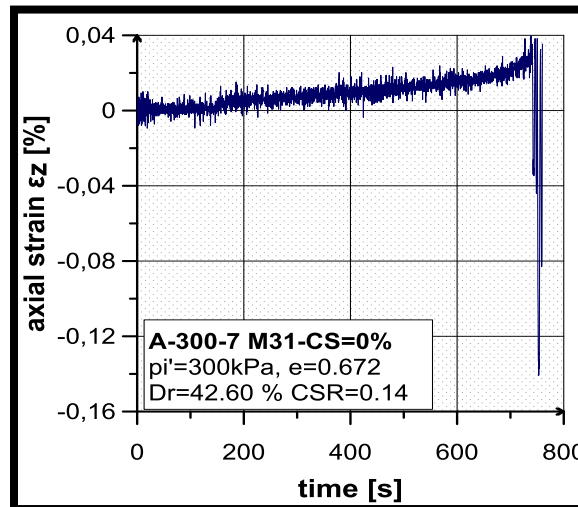
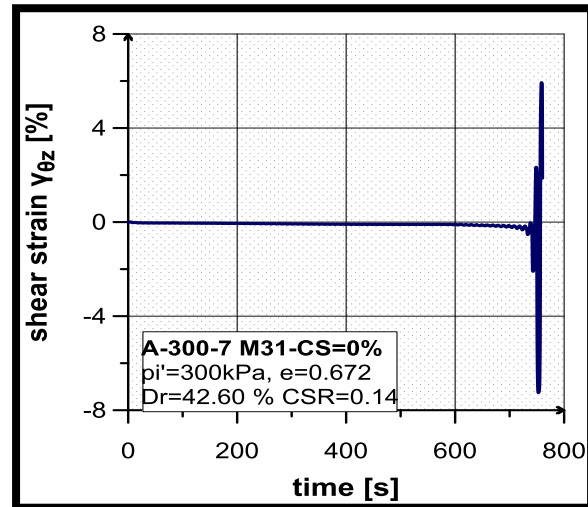
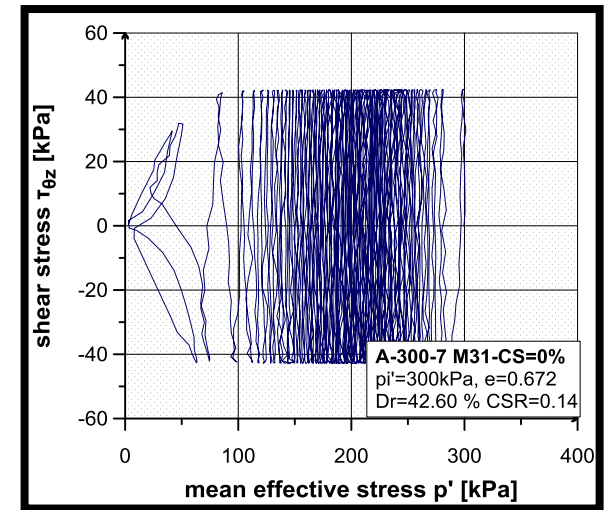
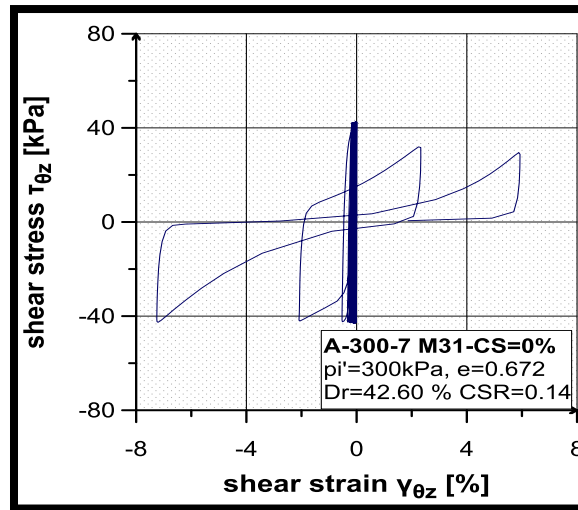
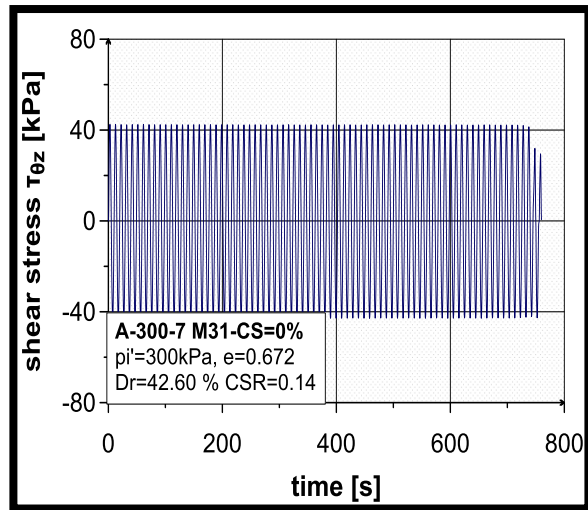
Σχήμα Π-4.4. Δοκιμή A-300-4



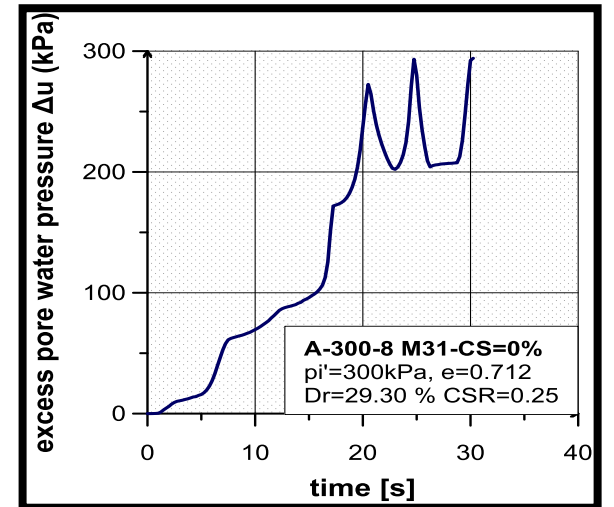
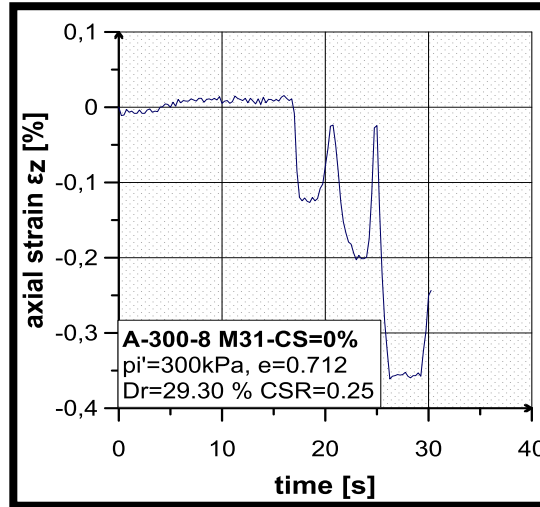
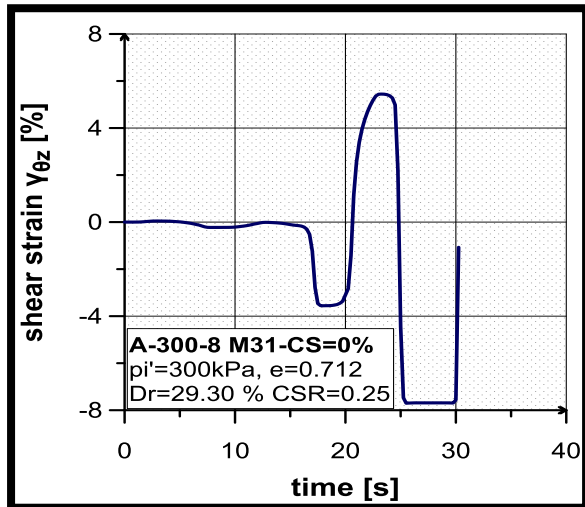
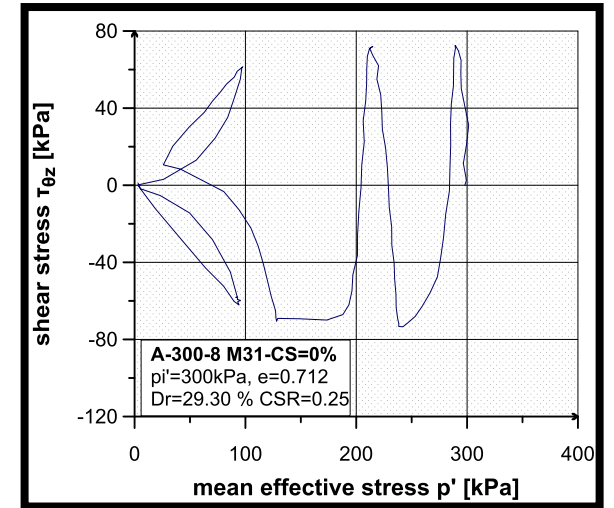
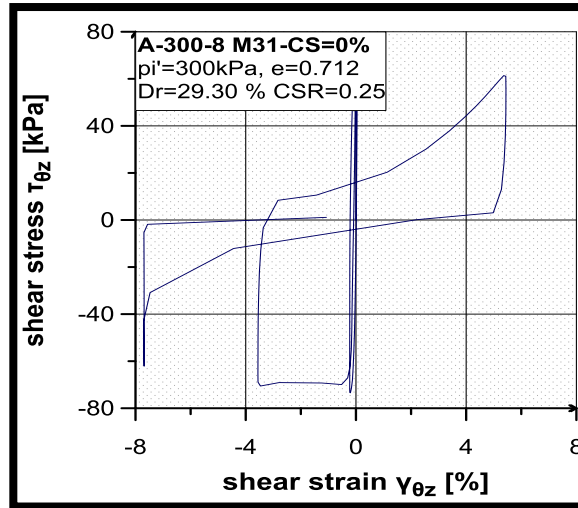
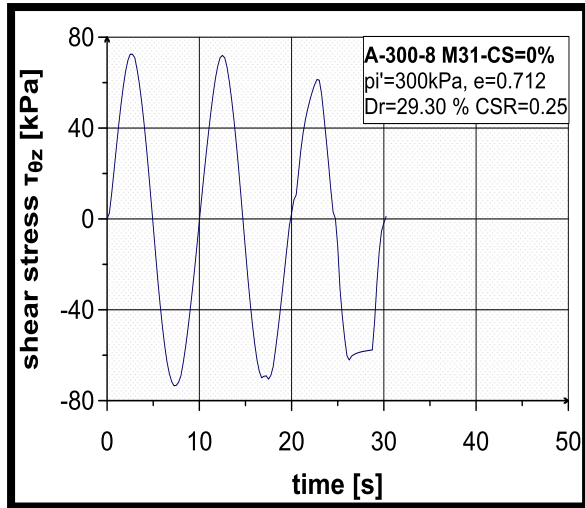
Σχήμα Π-4.5. Δοκιμή A-300-5



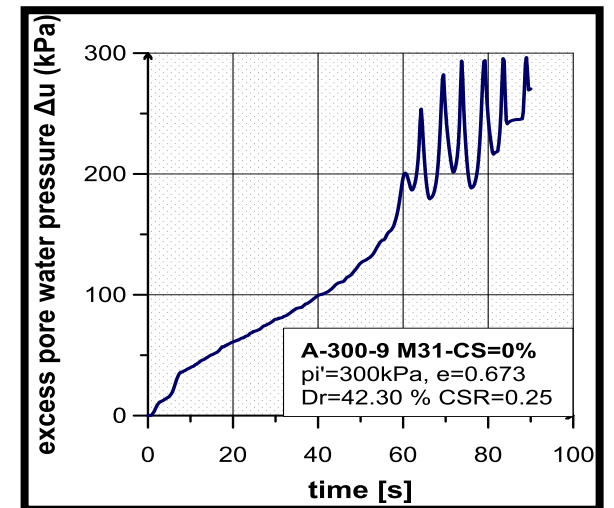
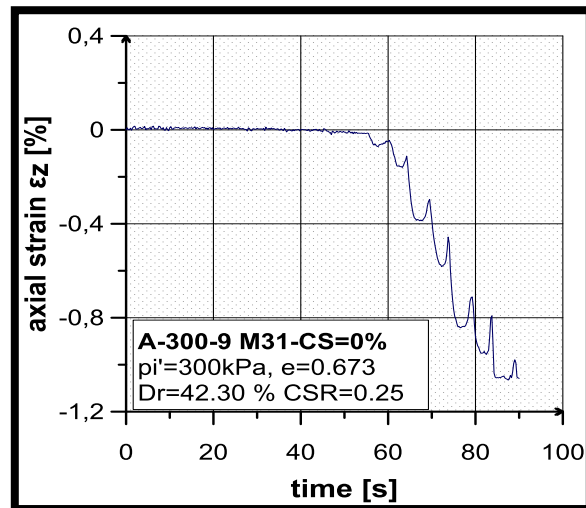
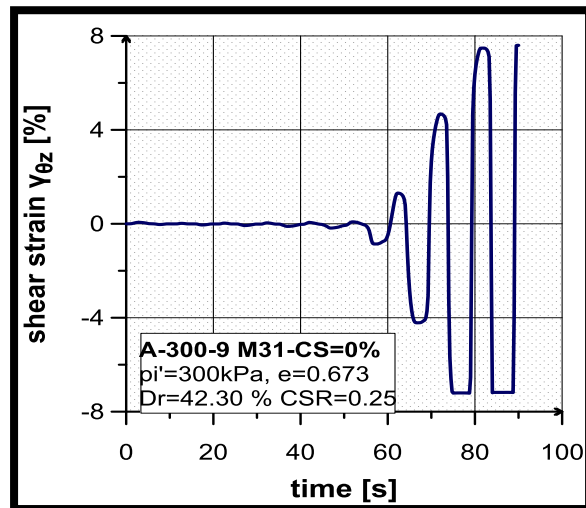
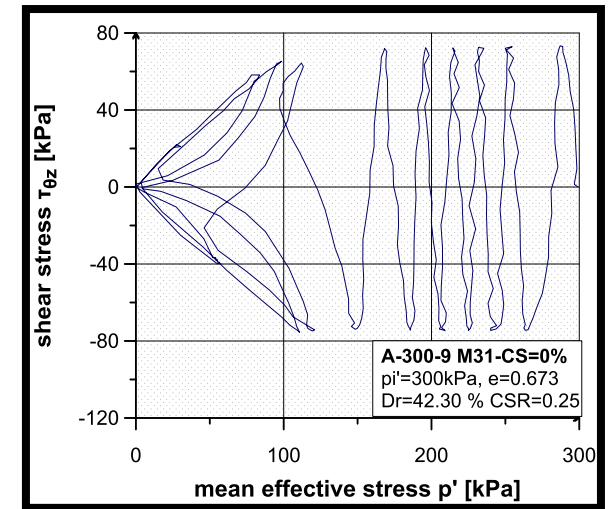
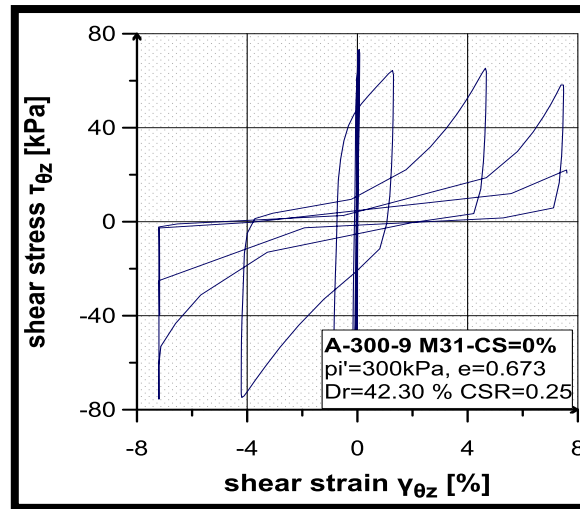
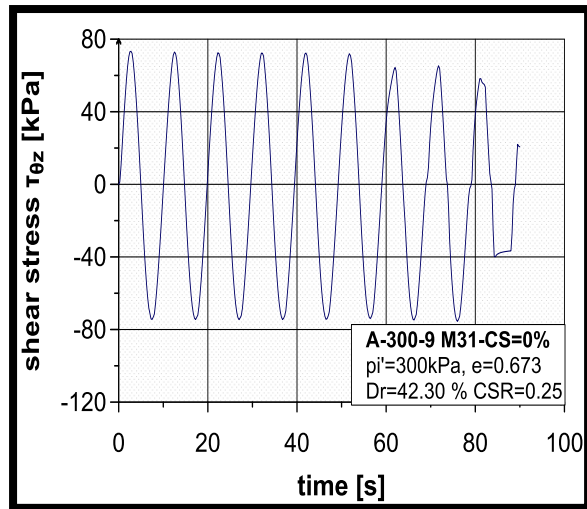
Σχήμα Π-4.6. Δοκιμή A-300-6



Σχήμα Π-4.7. Δοκιμή A-300-7



Σχήμα Π-4.8. Δοκιμή A-300-8



Σχήμα Π-4.9. Δοκιμή A-300-9

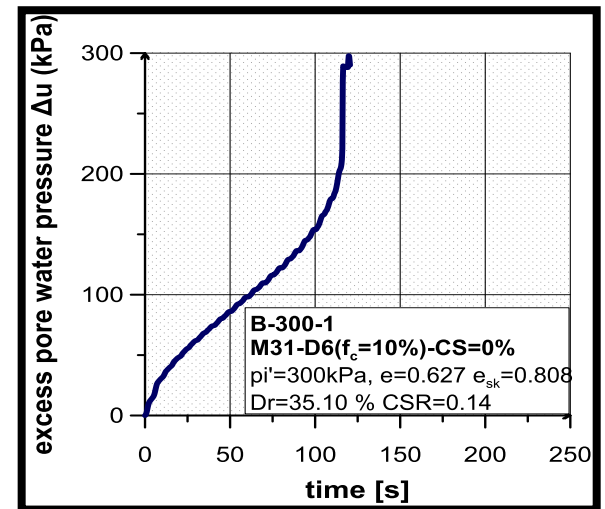
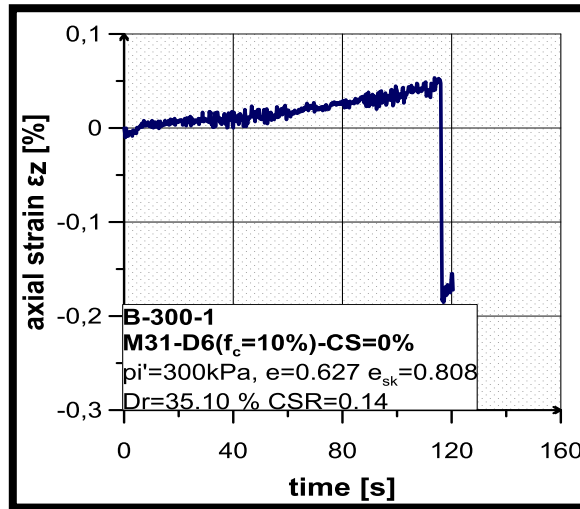
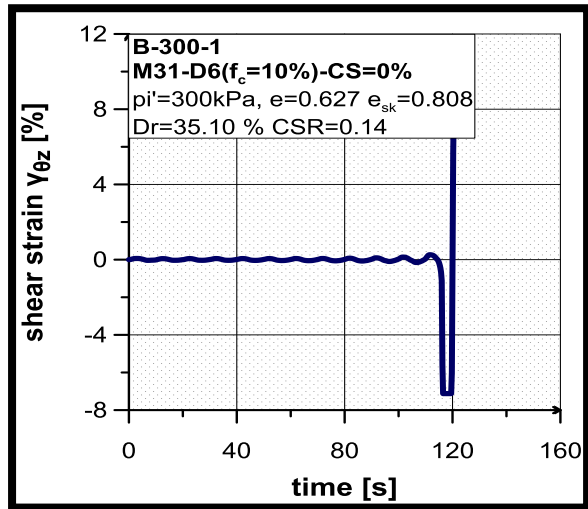
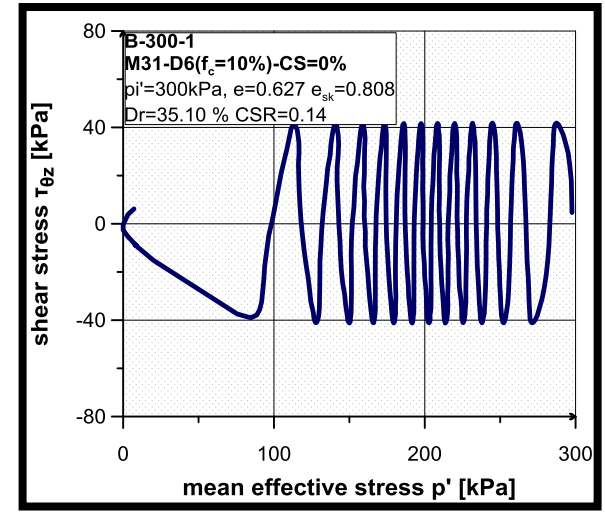
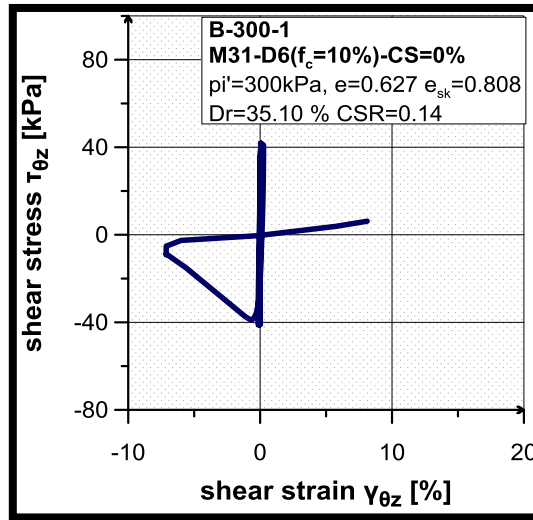
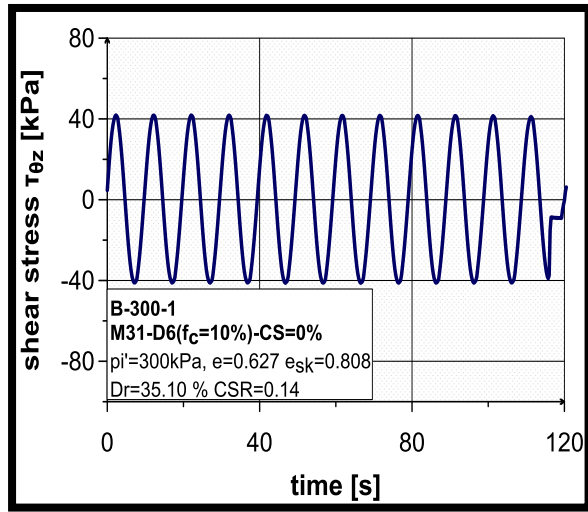


**Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης**

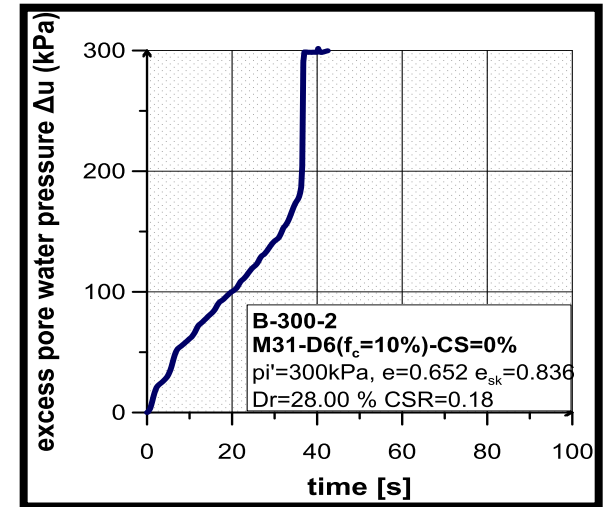
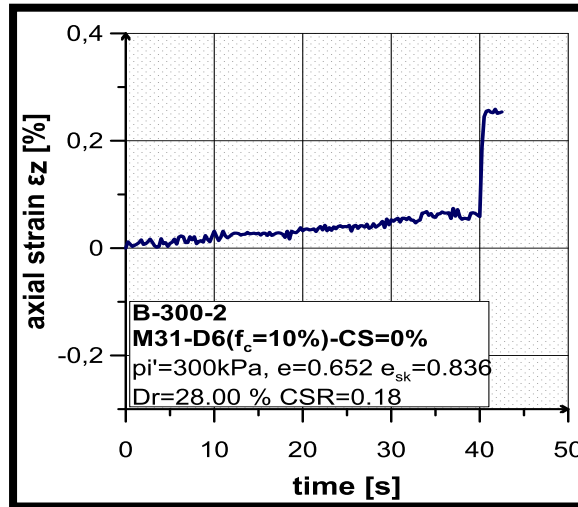
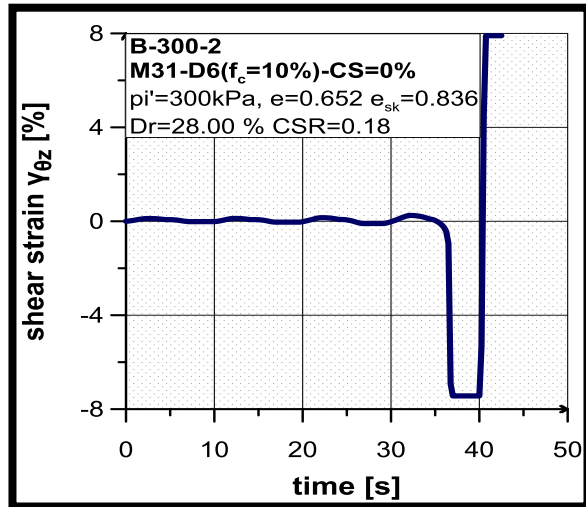
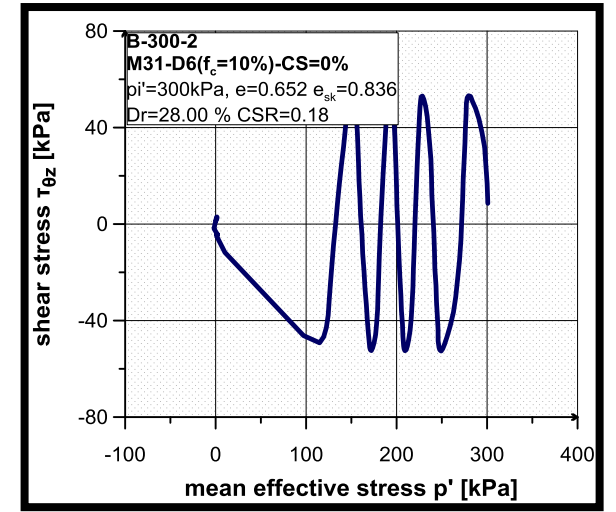
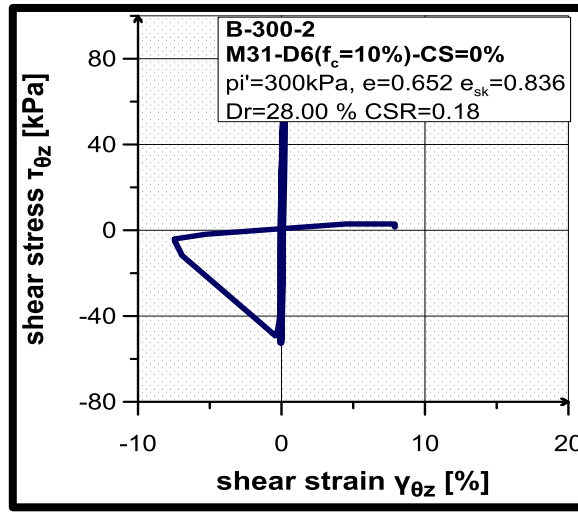
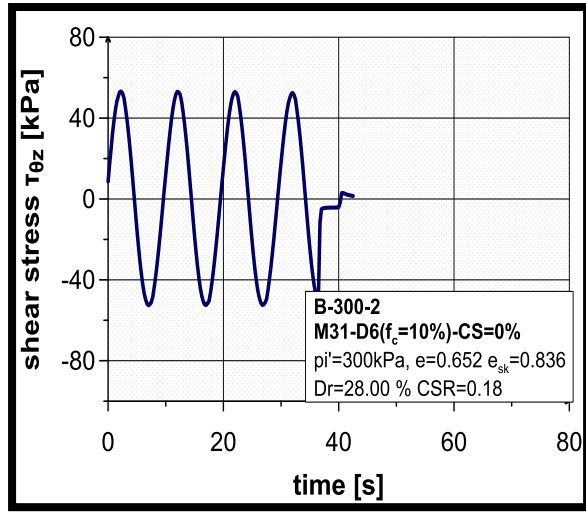
**ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ Μ31 & D6 CS=0%  $f_c=10\%$**

Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων	Δείκτης Πόρων Σκελετού	Τάση Στερεοποίησης	CSR	$N_{tot}$	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
B-300-1	$D_r=35,2\%$	$e=0,627$	$e_{sk}=0,808$	$p_i'=300$ kPa	0,14	12	11,6	11,6	11,6
B-300-2	$D_r=28,0\%$	$e=0,652$	$e_{sk}=0,836$	$p_i'=300$ kPa	0,18	4	3,7	3,7	3,7
B-300-3	$D_r=36,3\%$	$e=0,623$	$e_{sk}=0,803$	$p_i'=300$ kPa	0,10	108,4	107,4	107,5	108,4
B-300-4	$D_r=43,4\%$	$e=0,598$	$e_{sk}=0,776$	$p_i'=300$ kPa	0,18	7,6	6,2	6,6	6,7
B-300-5	$D_r=50,9\%$	$e=0,572$	$e_{sk}=0,747$	$p_i'=300$ kPa	0,14	37,2	35,3	36,2	36,3
B-300-6	$D_r=45,4\%$	$e=0,591$	$e_{sk}=0,768$	$p_i'=300$ kPa	0,22	5,6	4,2	4,6	4,7
B-300-7	$D_r=37,1\%$	$e=0,620$	$e_{sk}=0,800$	$p_i'=300$ kPa	0,21	2,7	2,3	2,6	2,6
B-300-8	$D_r=48,0\%$	$e=0,582$	$e_{sk}=0,758$	$p_i'=300$ kPa	0,24	5,6	4,2	4,6	4,7
B-300-9	$D_r=37,1\%$	$e=0,620$	$e_{sk}=0,800$	$p_i'=300$ kPa	0,12	63,8	62,5	62,9	63,4
B-300-10	$D_r=47,4\%$	$e=0,584$	$e_{sk}=0,760$	$p_i'=300$ kPa	0,12	121,2	117,8	118,8	119,3
B-300-11	$D_r=51,1\%$	$e=0,571$	$e_{sk}=0,746$	$p_i'=300$ kPa	0,18	21,4	19,0	19,5	20,1
B-300-12	$D_r=54,9\%$	$e=0,558$	$e_{sk}=0,731$	$p_i'=300$ kPa	0,25	4,6	2,6	3,2	3,5

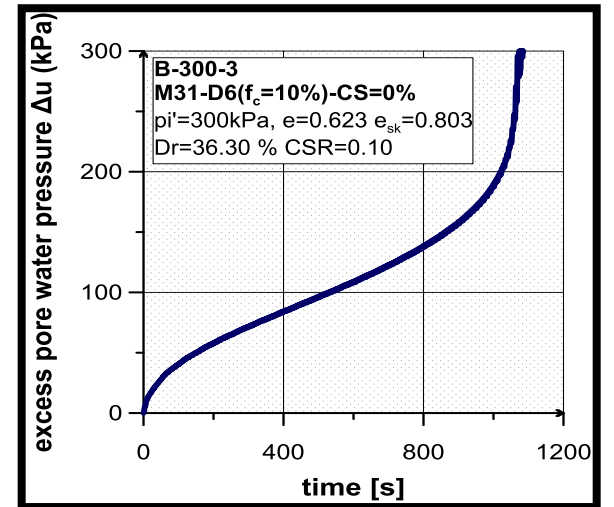
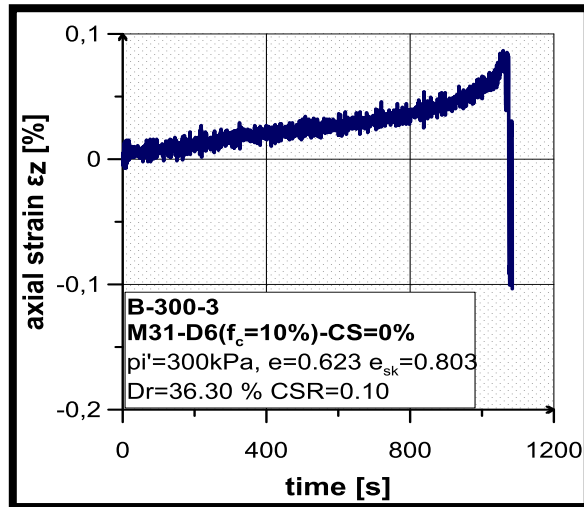
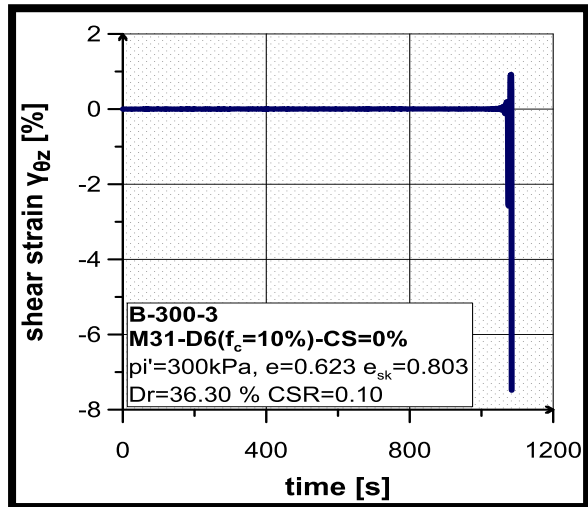
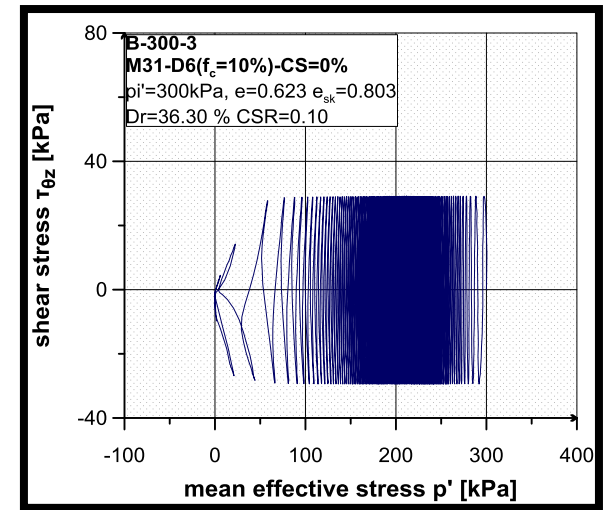
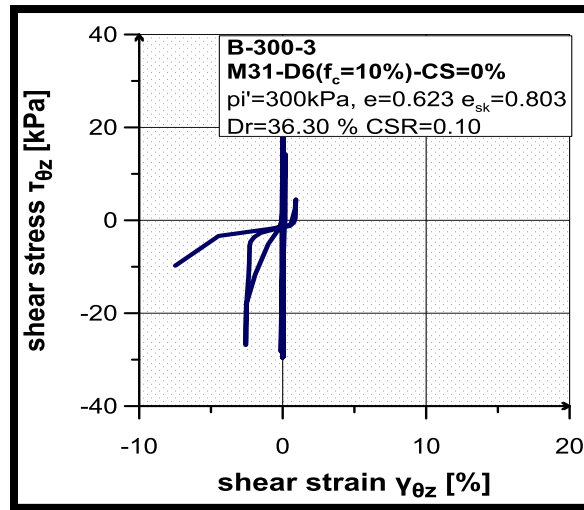
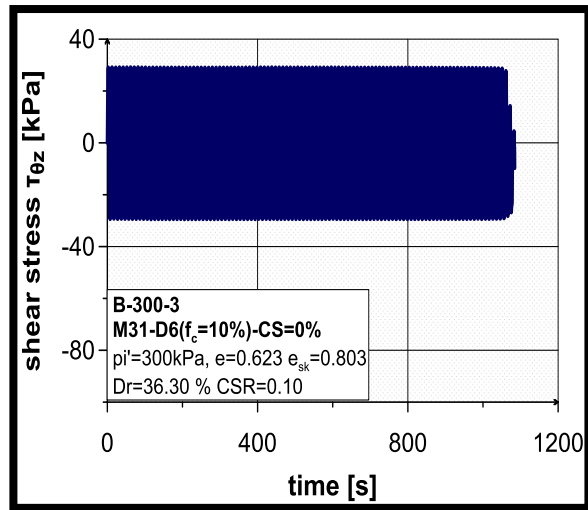




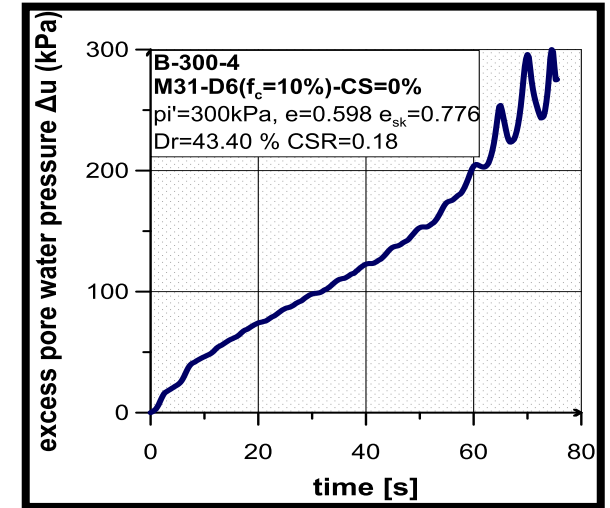
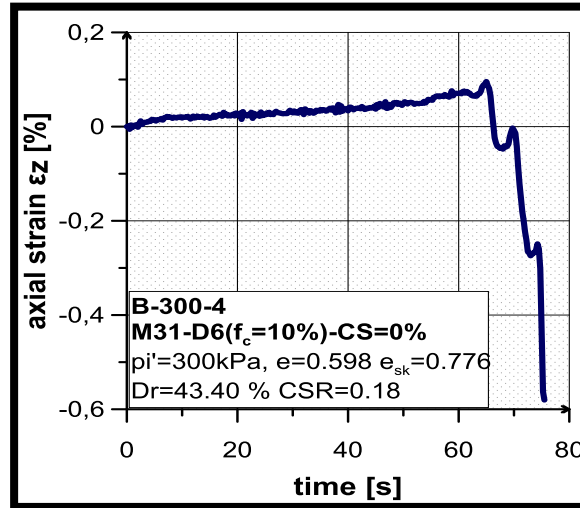
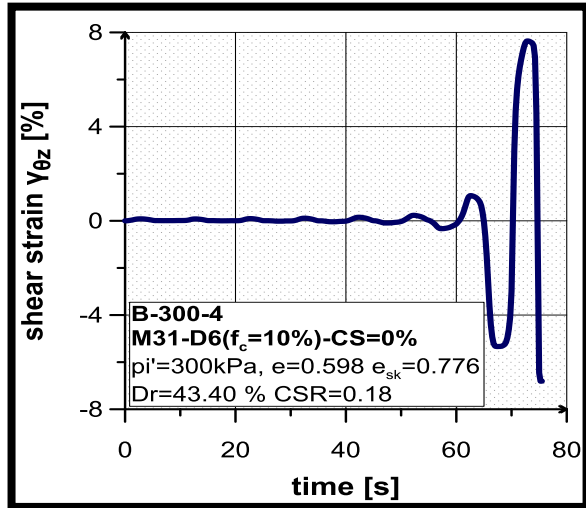
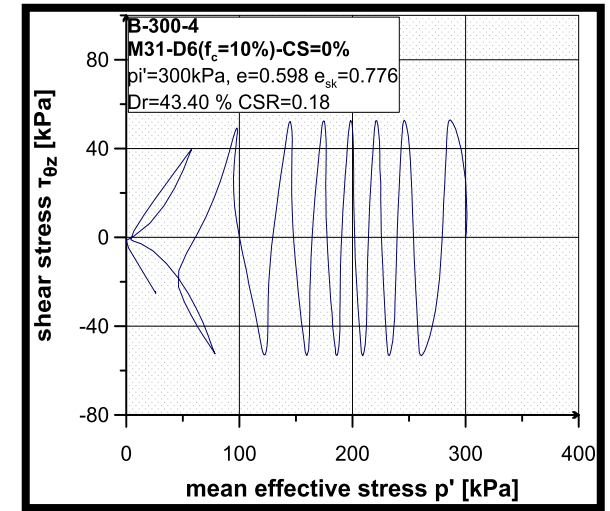
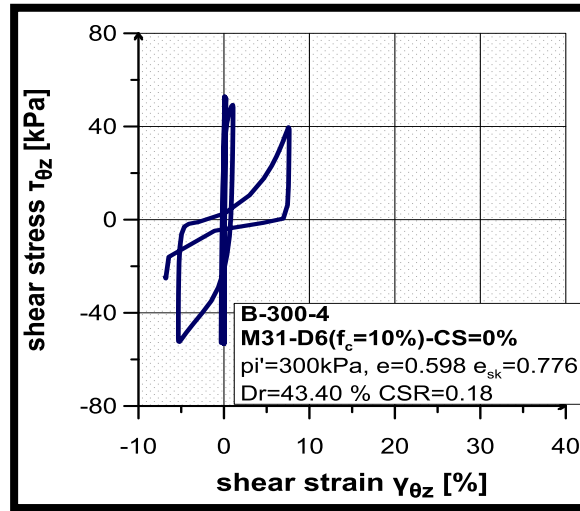
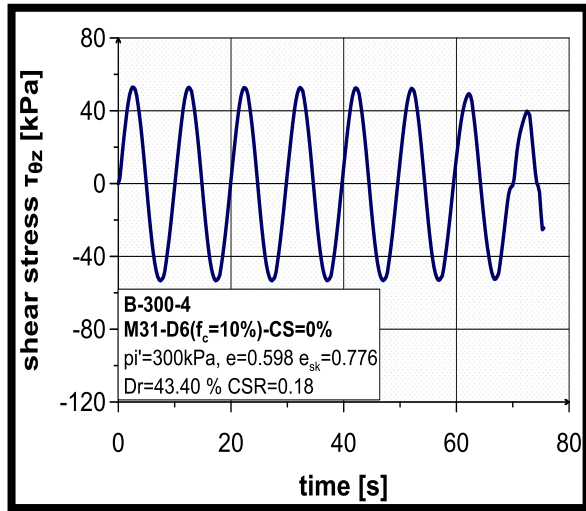
Σχήμα Π-4.10. Δοκιμή -B-300-1



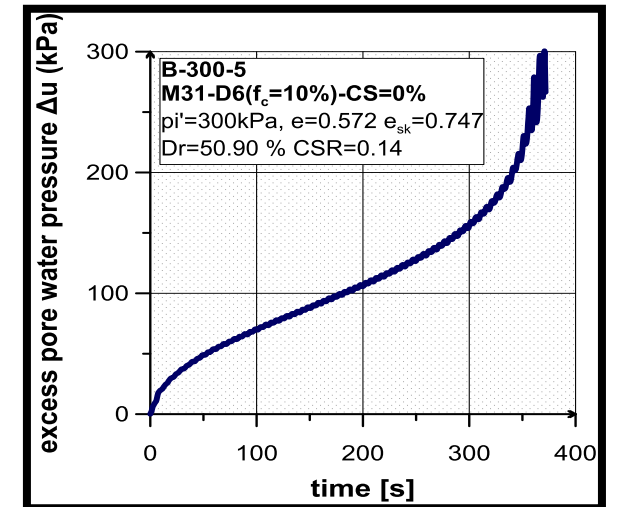
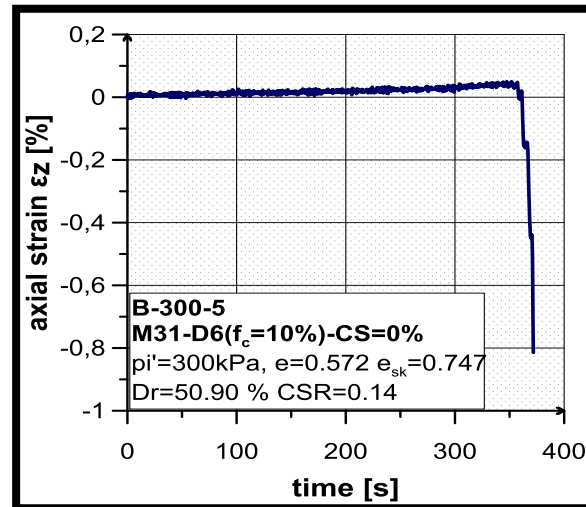
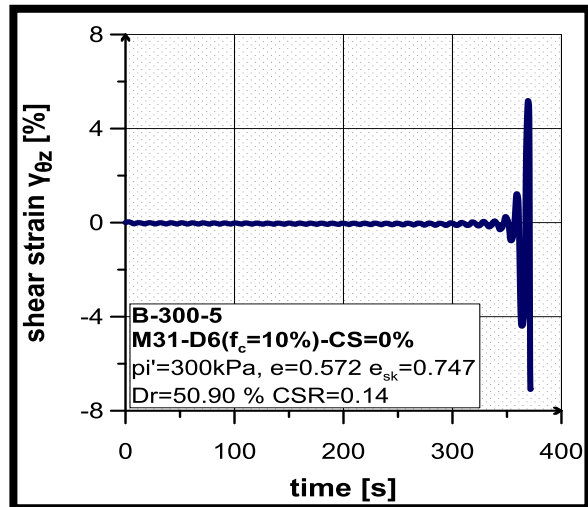
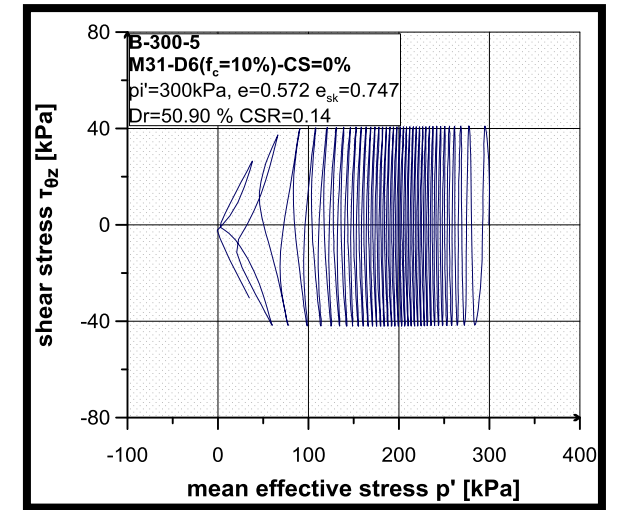
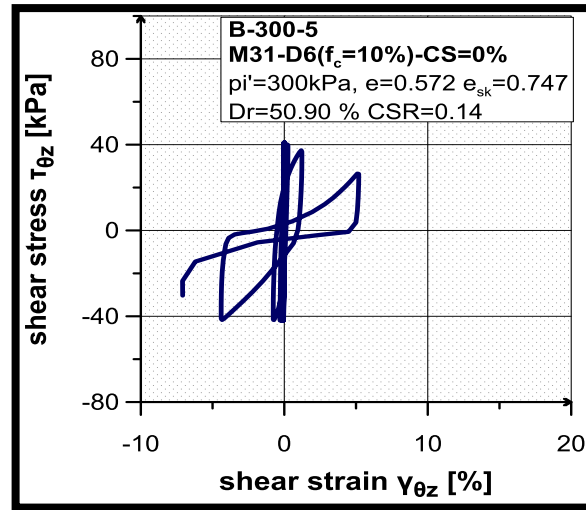
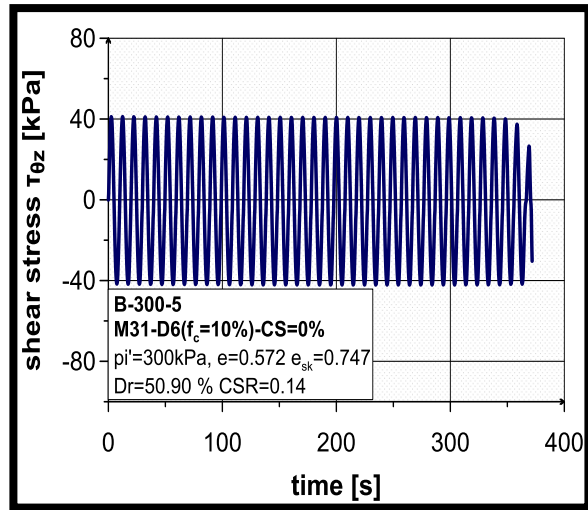
Σχήμα Π-4.11. Δοκιμή -B-300-2



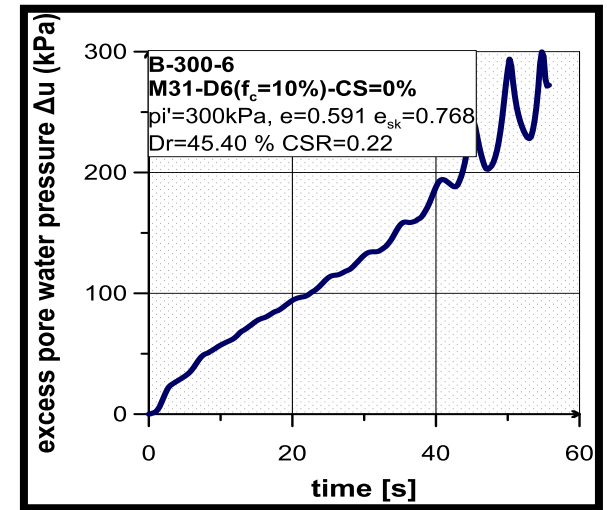
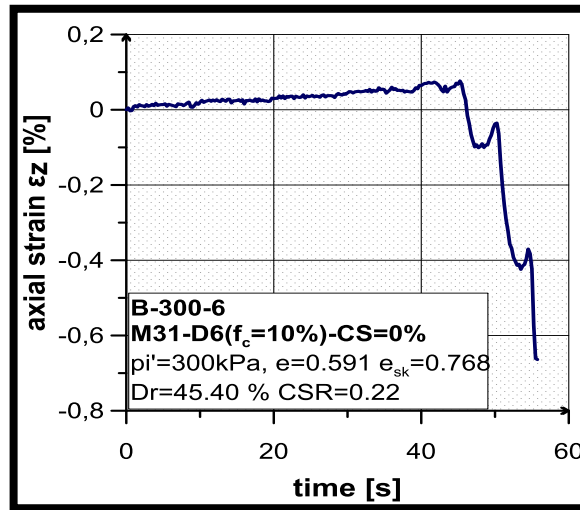
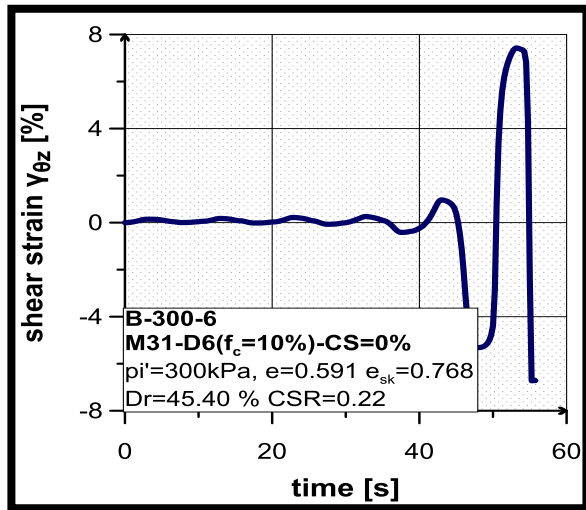
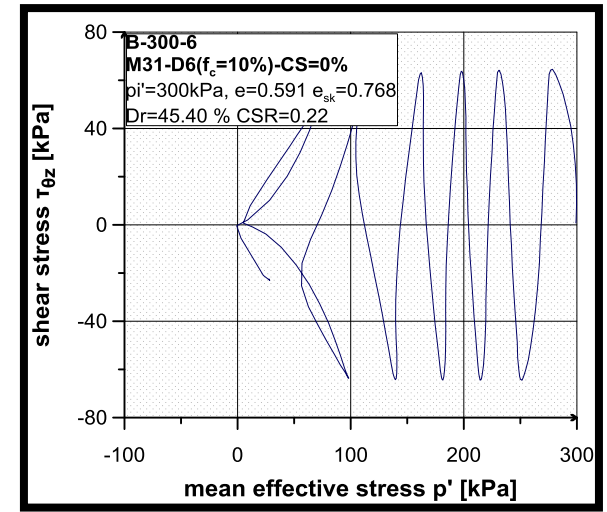
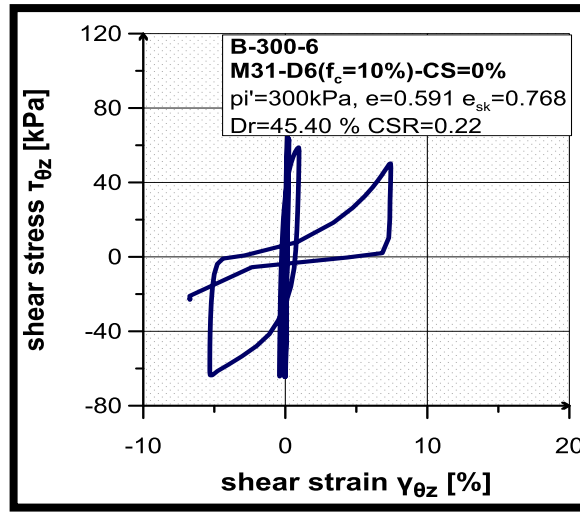
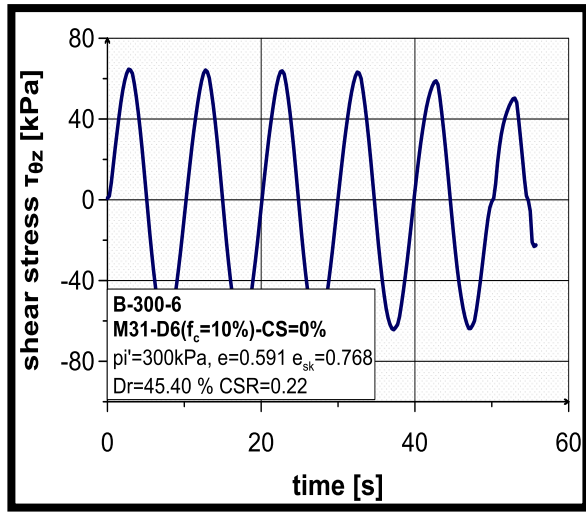
Σχήμα Π-4.12. Δοκιμή –B-300-3



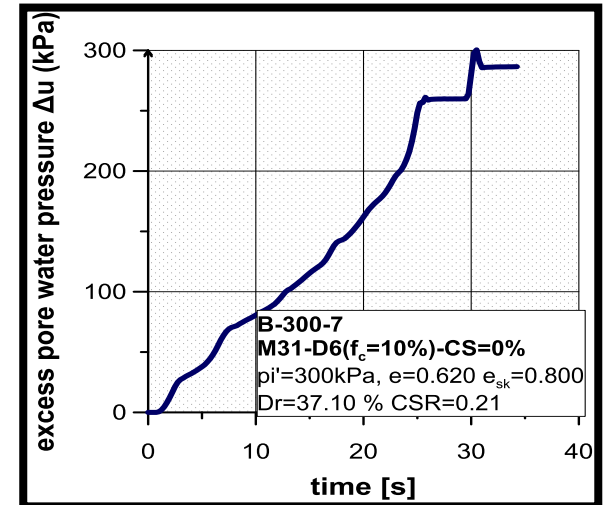
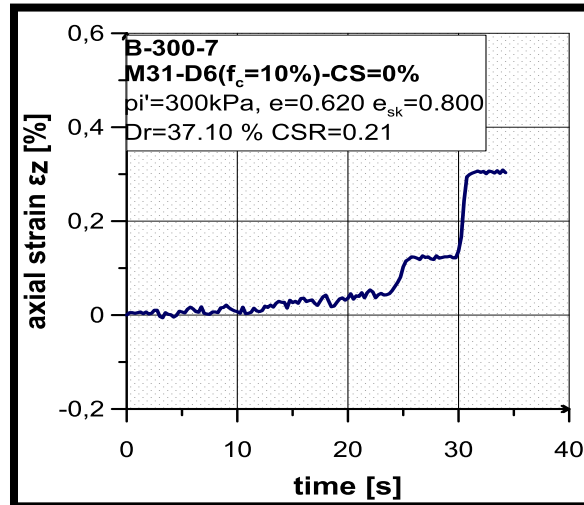
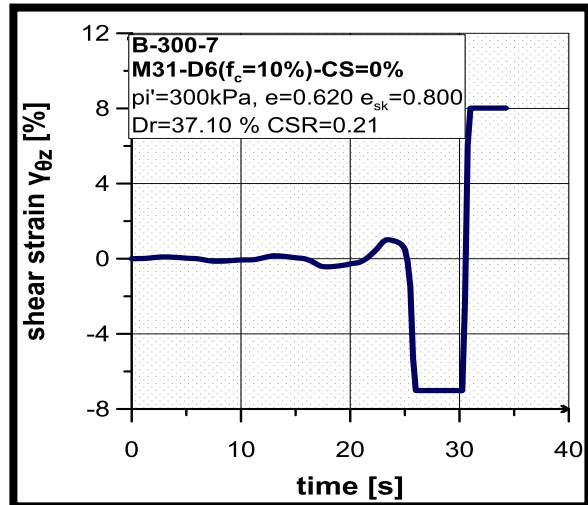
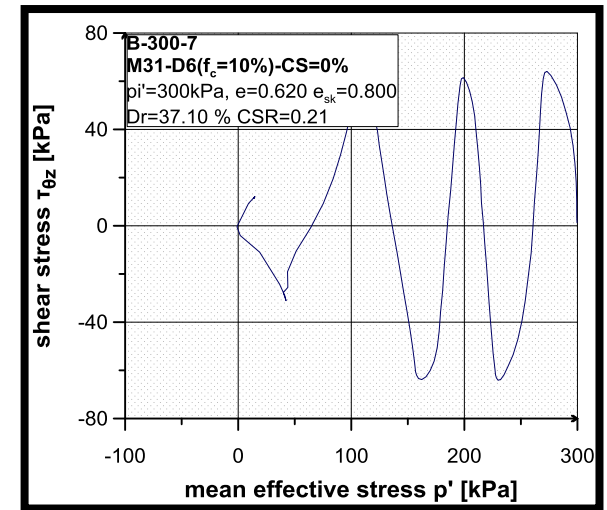
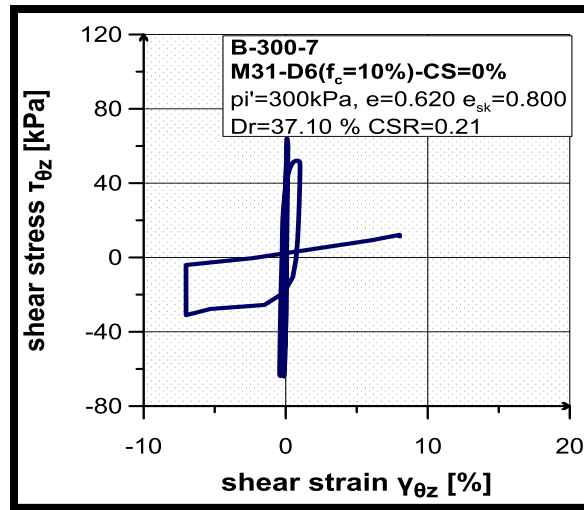
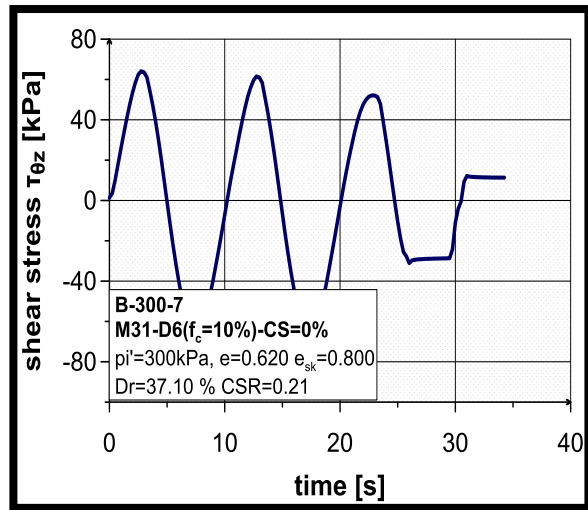
Σχήμα Π-4.13. Δοκιμή -B-300-4



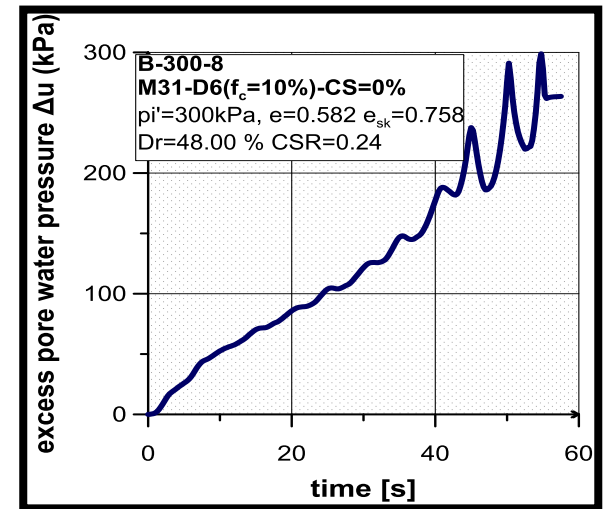
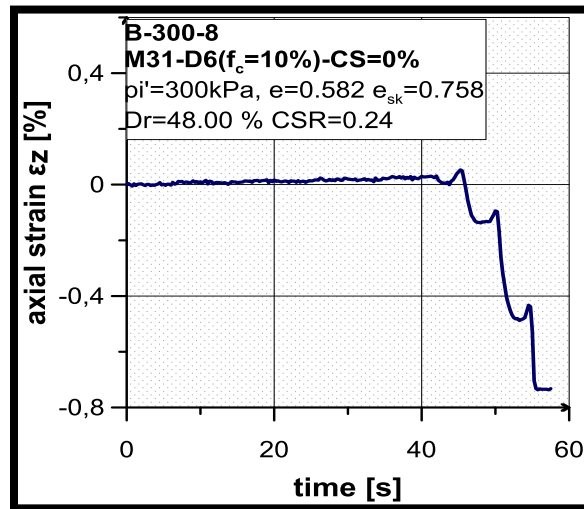
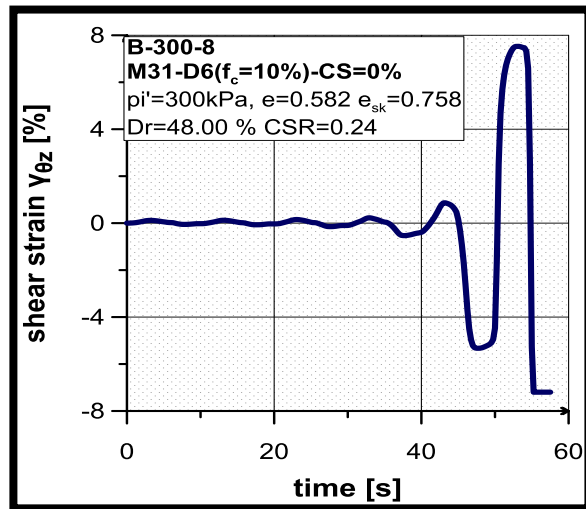
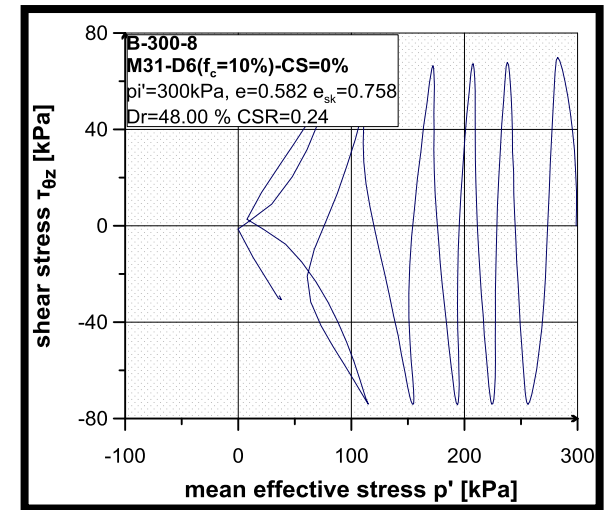
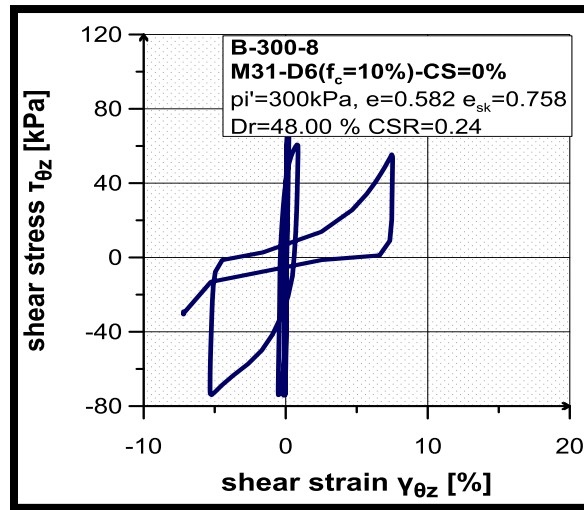
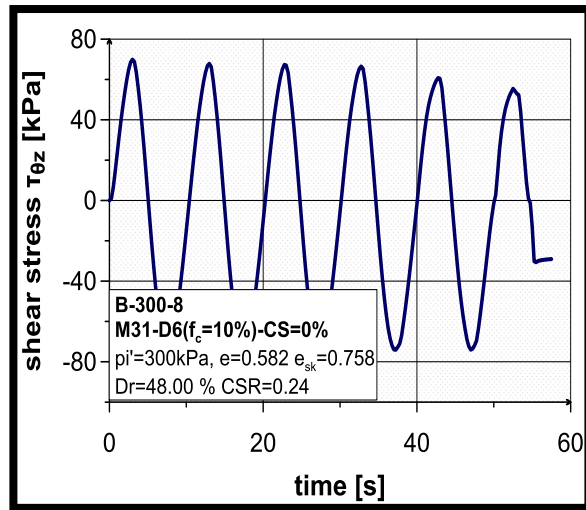
Σχήμα Π-4.14. Δοκιμή -B-300-5



Σχήμα Π-4.15. Δοκιμή -B-300-6

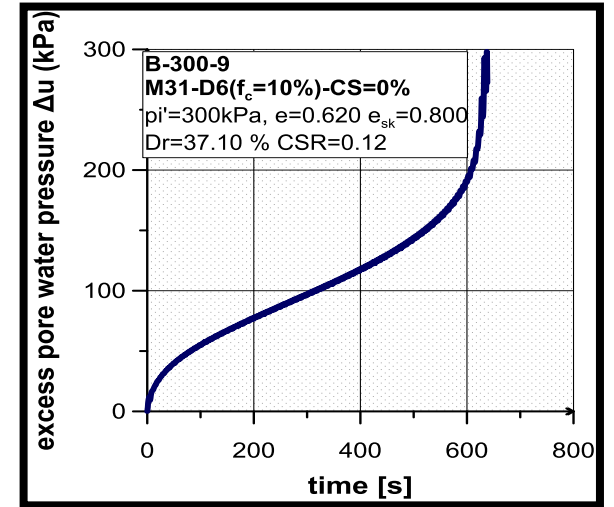
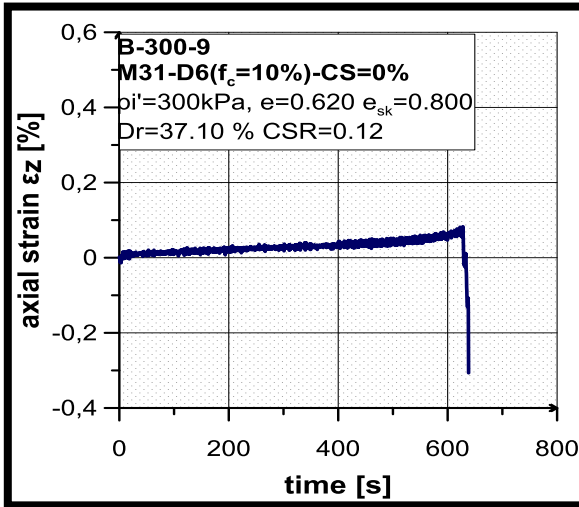
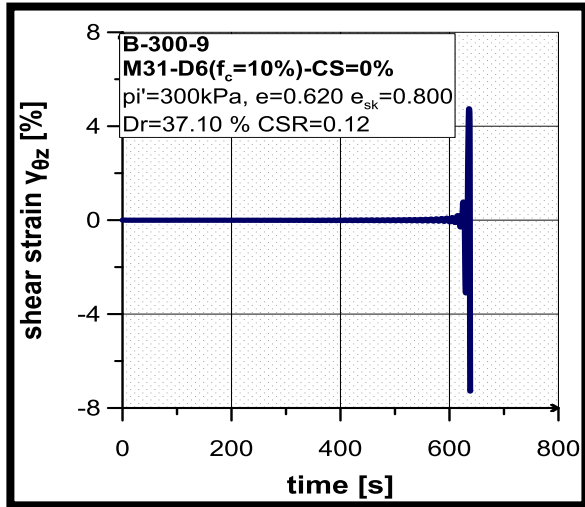
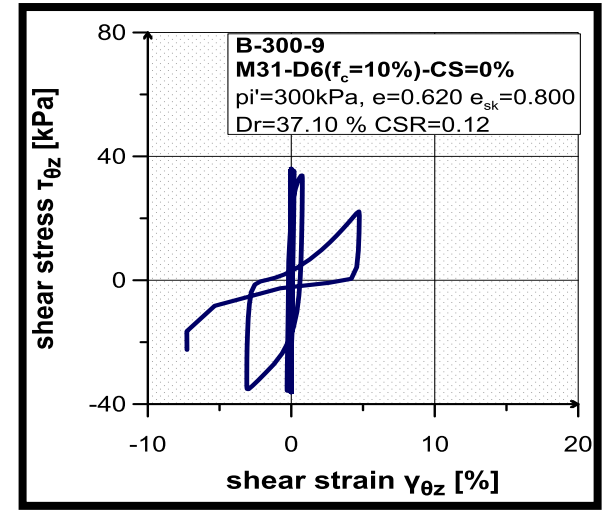
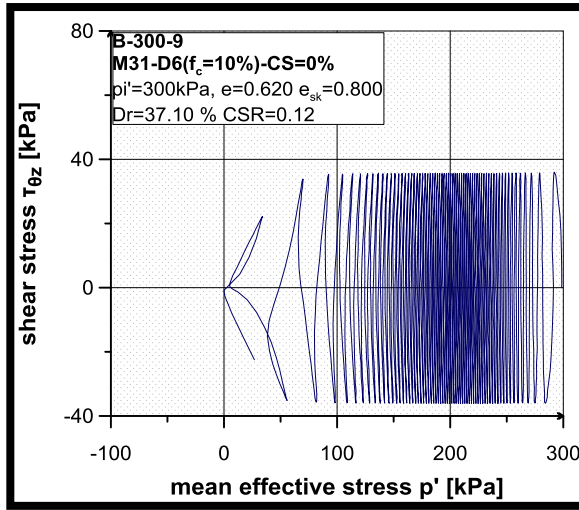
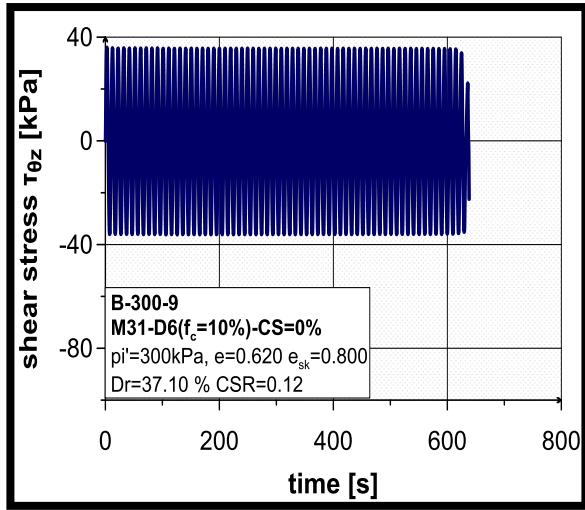


Σχήμα Π-4.16. Δοκιμή -B-300-7

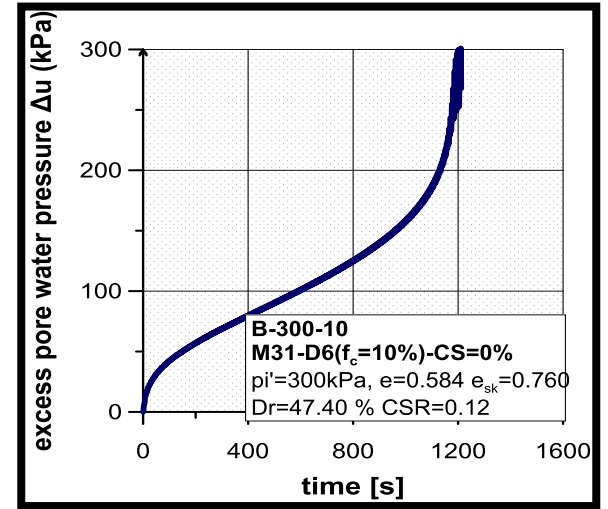
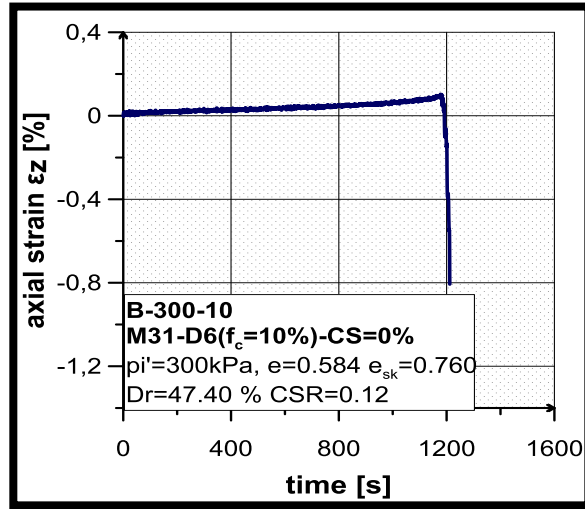
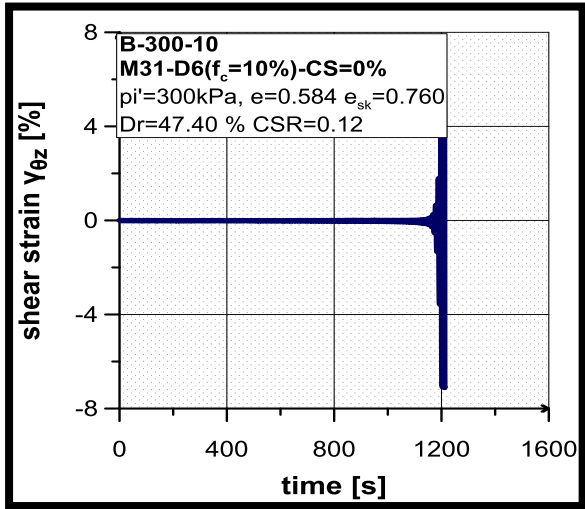
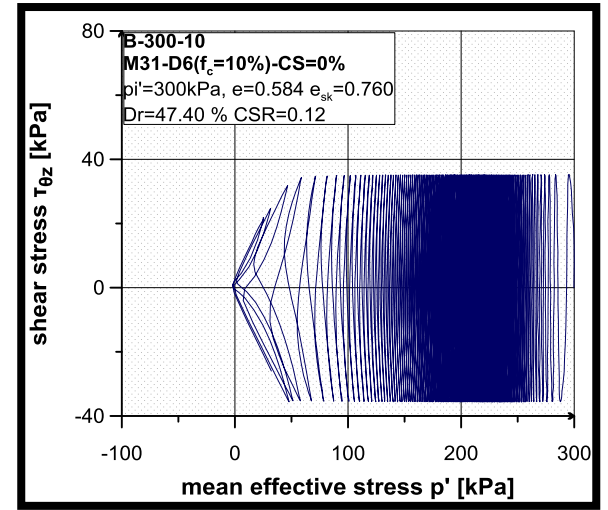
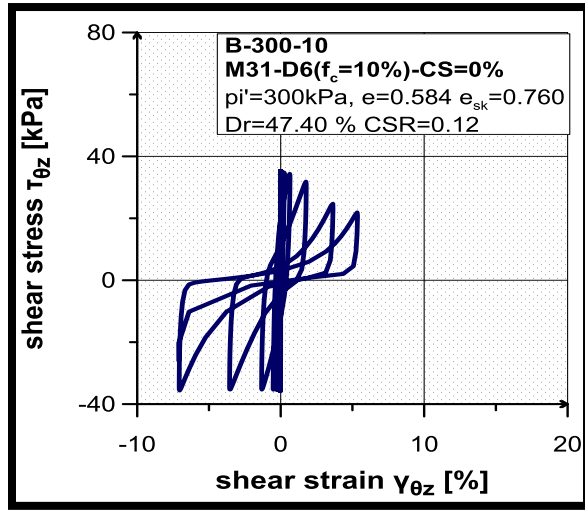
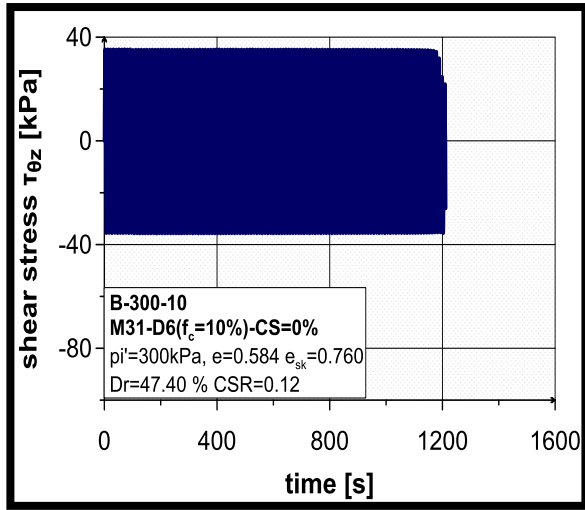


Σχήμα Π-4.17. Δοκιμή -B-300-8

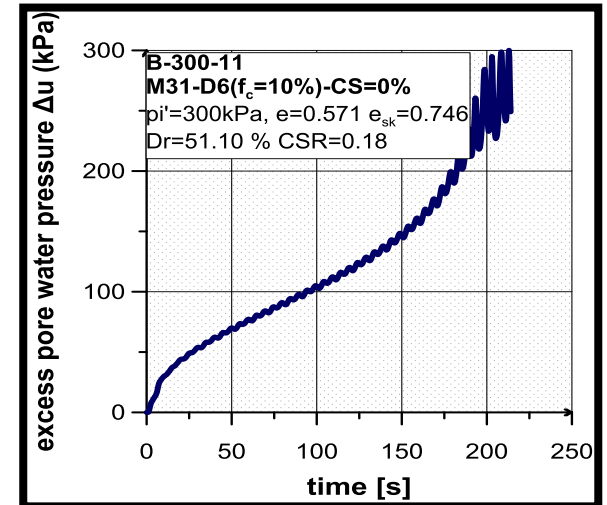
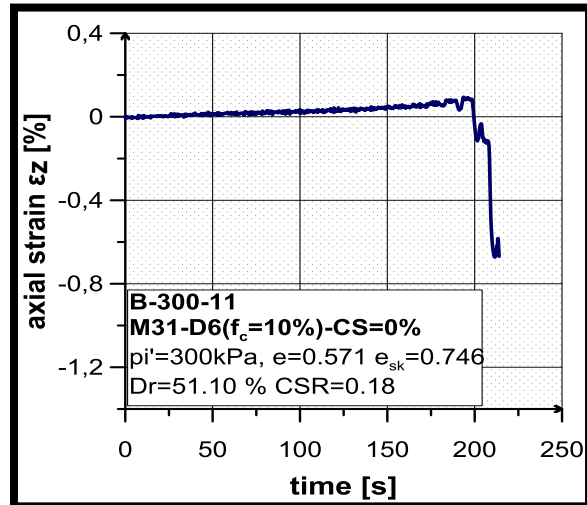
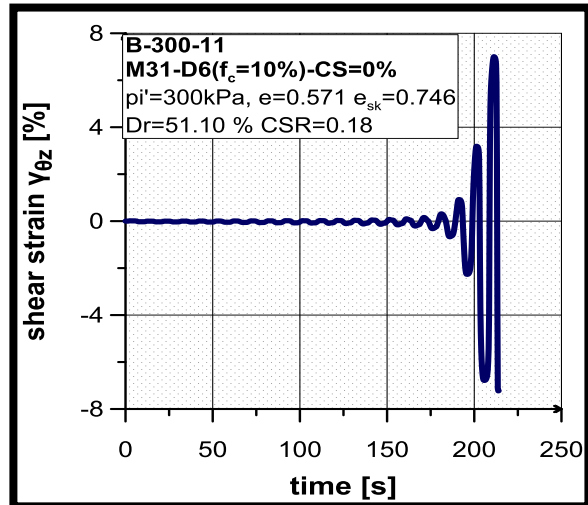
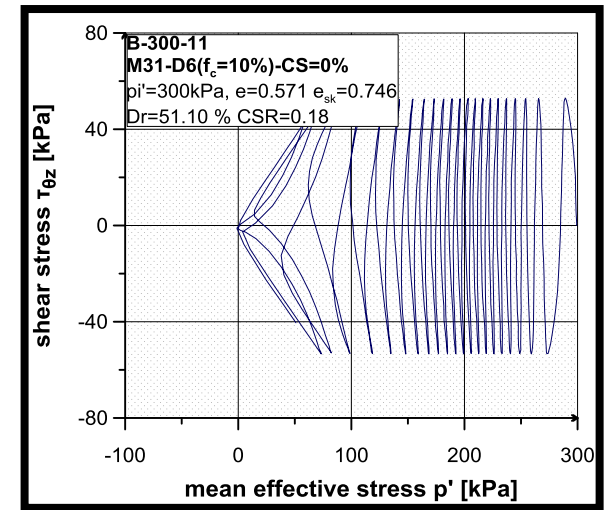
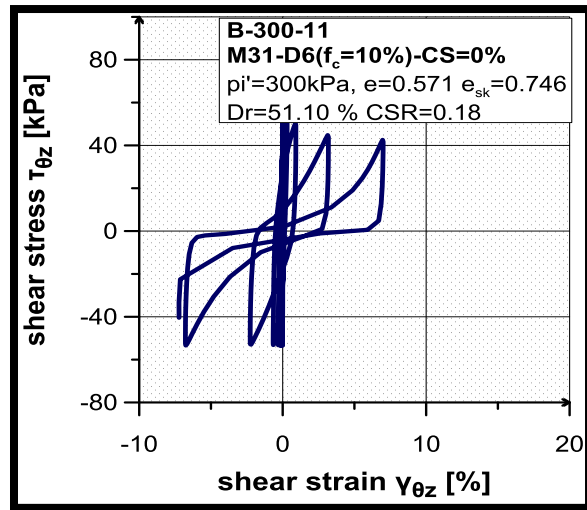
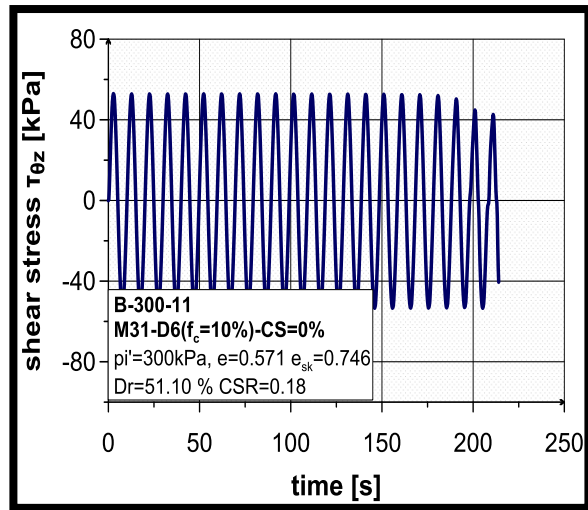




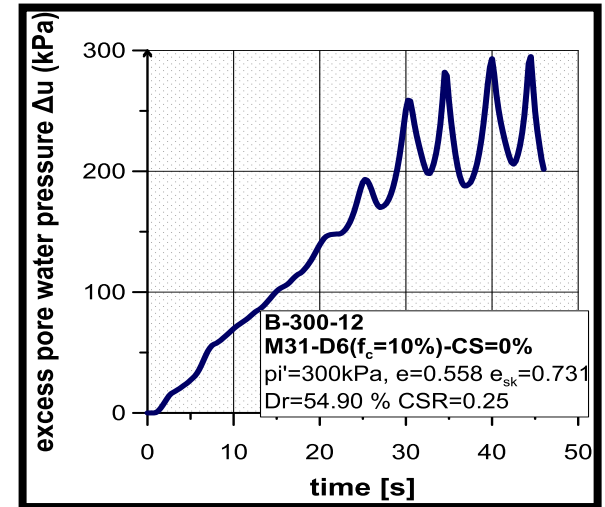
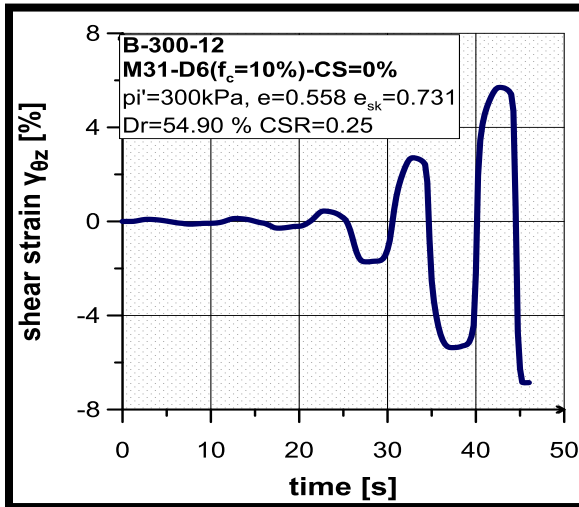
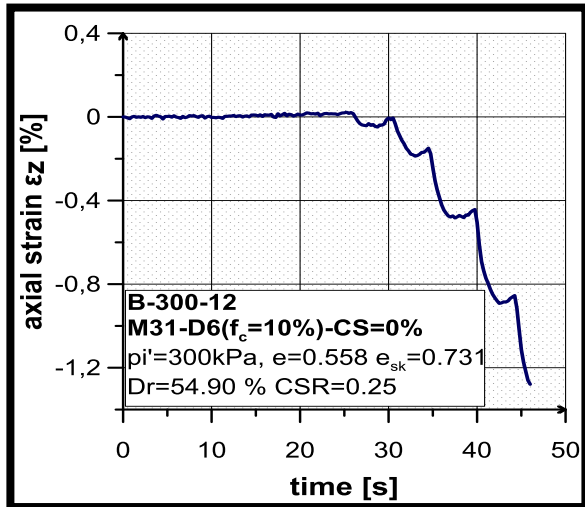
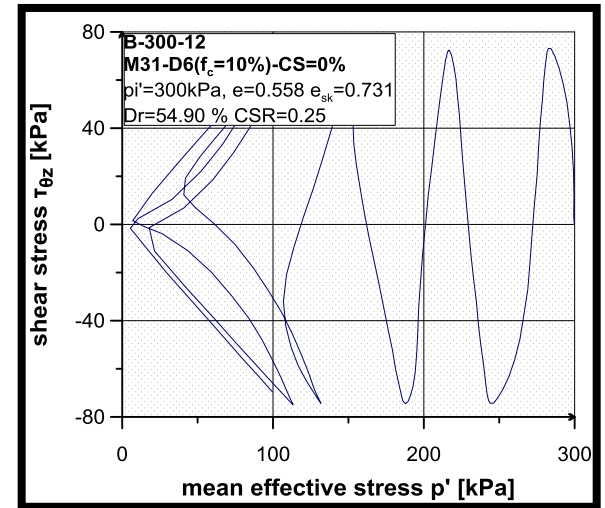
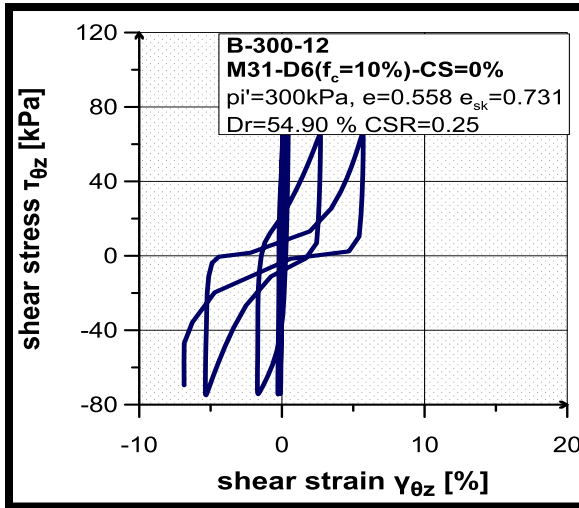
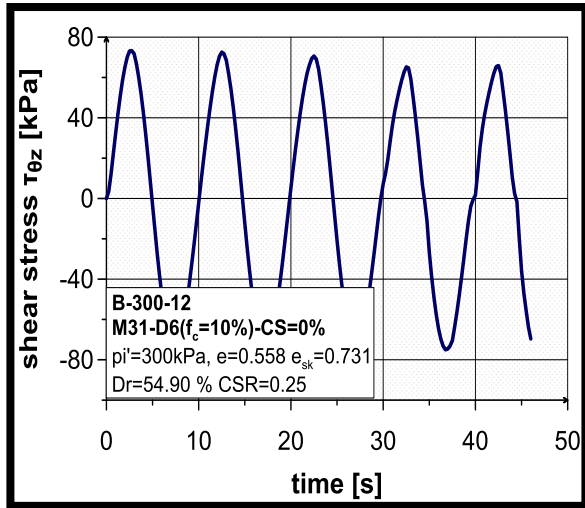
Σχήμα Π-4.18. Δοκιμή -B-300-9



Σχήμα Π-4.19. Δοκιμή -B-300-10



Σχήμα Π-4.20. Δοκιμή –B-300-11



Σχήμα Π-4.21. Δοκιμή –B-300-12

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-5

218

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CU ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ  
ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

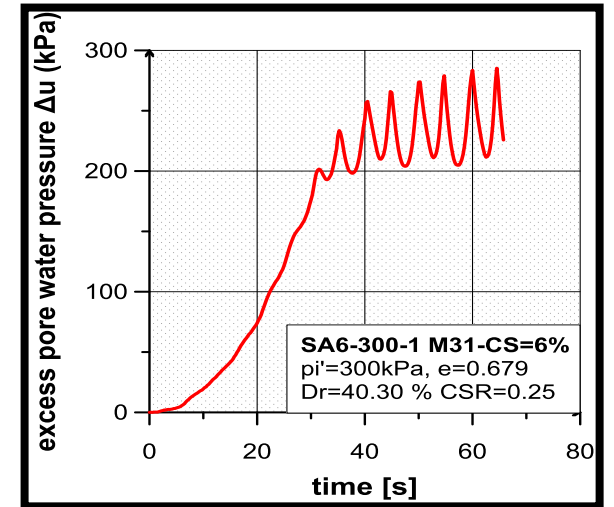
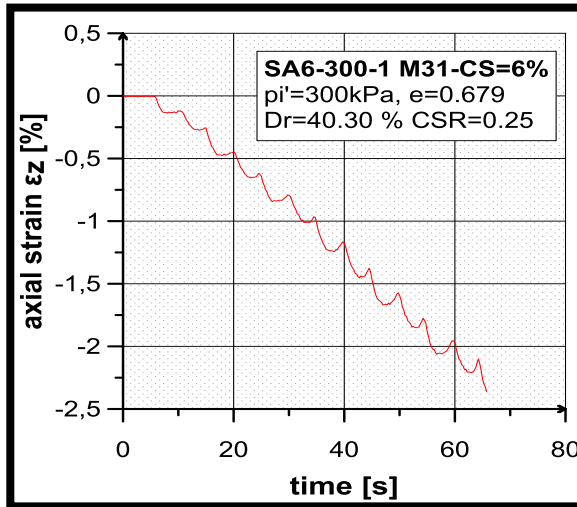
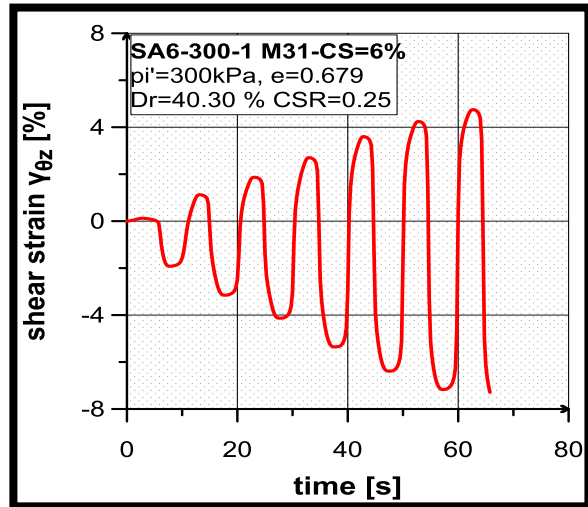
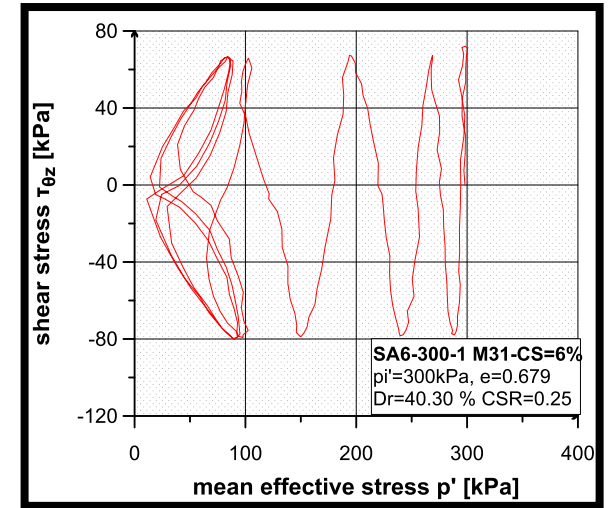
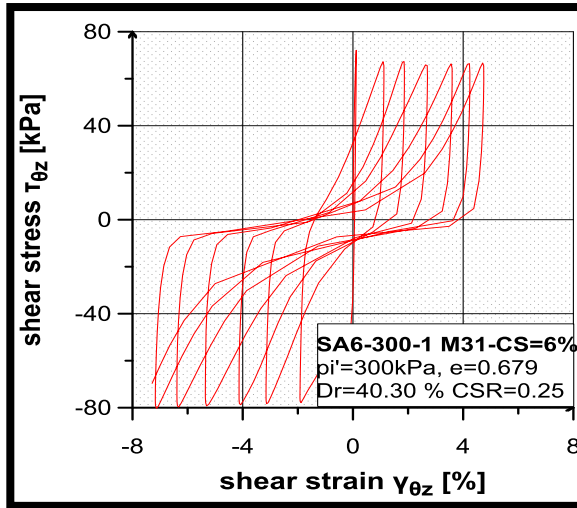
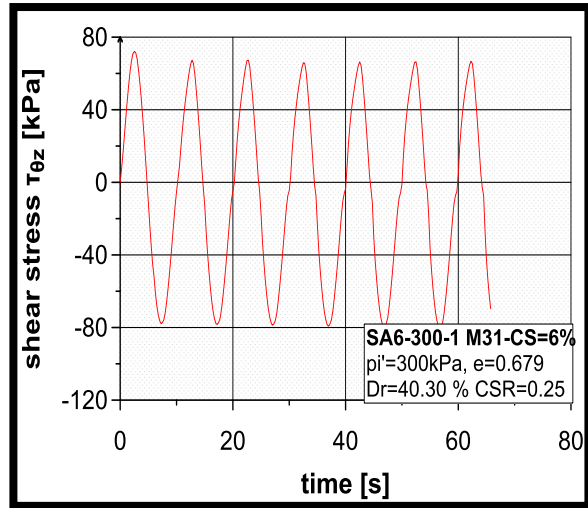
**Πίνακας Κατάταξης Παιραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης**

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ M31 CS=6%  $f_c=0\%$**

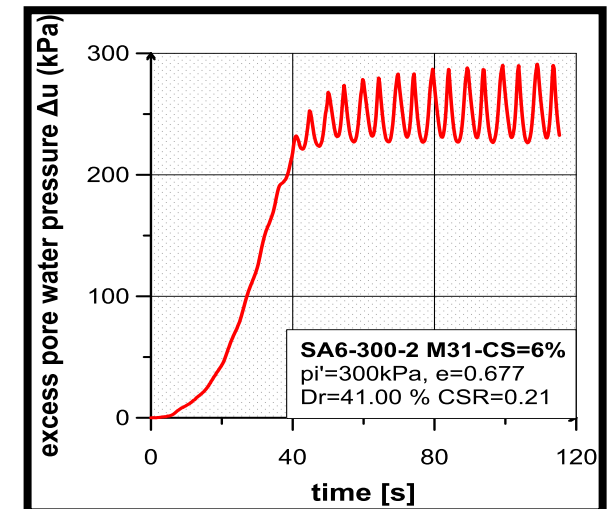
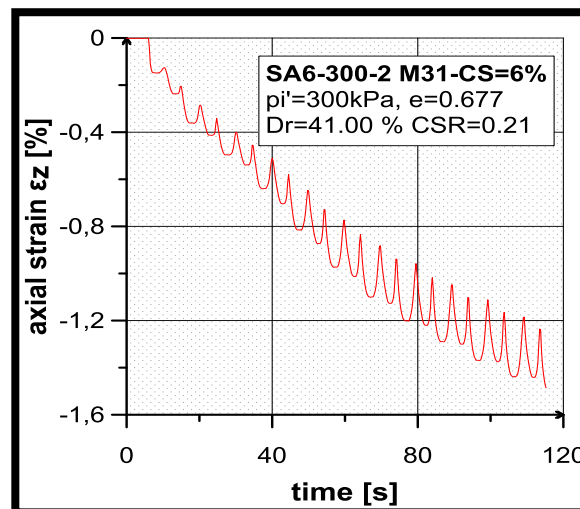
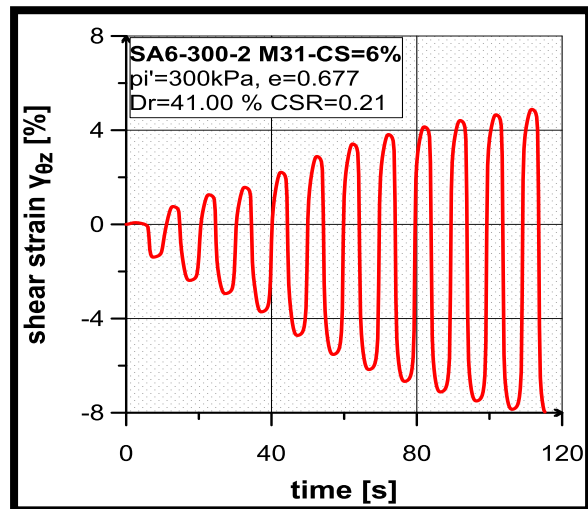
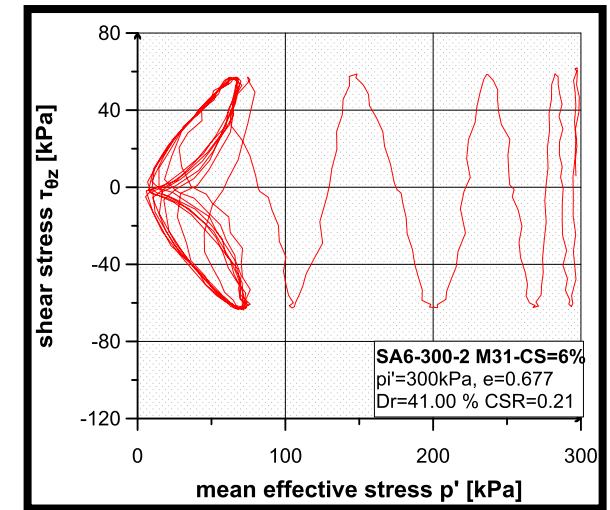
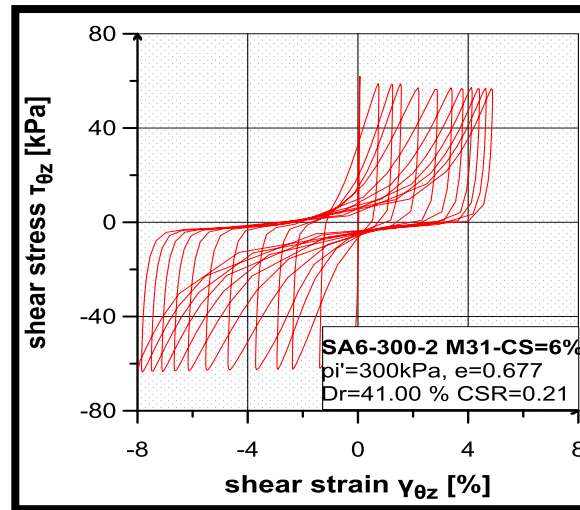
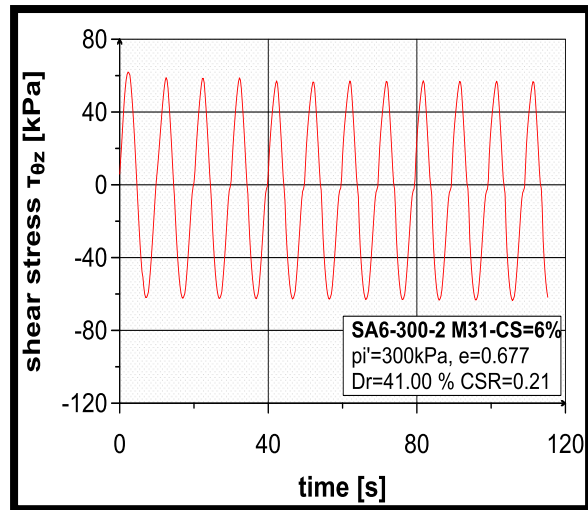
Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων	Τάση Στερεοποίησης	CSR	N <sub>tot</sub>	N <sub>1%</sub>	N <sub>2.5%</sub>	N <sub>5%</sub>
SA6-300-1	Dr=40,3%	e=0,679	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,25	6,6	0,6	1,2	2,3
SA6-300-2	Dr=41,0%	e=0,677	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,21	11,5	0,7	1,6	3,6
SA6-300-3	Dr=35,6%	e=0,693	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	182	155	157	159
SA6-300-4	Dr=43,3%	e=0,670	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	199			
SA6-300-5	Dr=55,7%	e=0,633	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,25	19,6	2,2	4,7	7,6

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟΣ M31 CS=10%  $f_c=0\%$**

Κωδικός Δοκιμής	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων	Τάση Στερεοποίησης	CSR	N <sub>tot</sub>	N <sub>1%</sub>	N <sub>2.5%</sub>	N <sub>5%</sub>
SA10-300-1	Dr=11,3%	e=0,766	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,08	152	13,5	37,2	81,4
SA10-300-2	Dr=9,3%	e=0,772	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,10	43	0,6	1,2	3,7
SA10-300-3	Dr=15,7%	e=0,753	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,12	51	0,6	1,7	40,1
SA10-300-4	Dr=16,7%	e=0,750	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	26	1,1	2,2	5,7
SA10-300-5	Dr=8,7%	e=0,774	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,15	15	0,2	0,6	1,3
SA10-300-6	Dr=22,0%	e=0,734	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,15	150	13,6	35,2	66,7
SA10-300-7	Dr=27,3%	e=0,718	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,16	150	2,2	5,2	45,6
SA10-300-8	Dr=12,3%	e=0,763	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,17	2,7	0,2	0,3	0,6
SA10-300-9	Dr=28,0%	e=0,716	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	150	1,7	5,7	49,9
SA10-300-10	Dr=25,3%	e=0,724	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,12	120	5,7	43,6	
SA10-300-11	Dr=25,0%	e=0,725	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,21	41	1,3	2,6	7,2
SA10-300-12	Dr=27,0%	e=0,719	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,24	45	0,6	1,2	3,7
SA10-300-13	Dr=28,3%	e=0,715	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,21	20	0,6	1,3	4,2
SA10-300-14	Dr=38,0%	e=0,686	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,25	22	0,6	1,2	2,7
SA10-300-15	Dr=60,1%	e=0,620	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,22	138	4,3	9,2	24,9
SA10-300-16	Dr=36,7%	e=0,690	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,23	21	0,7	1,6	3,6
SA10-300-17	Dr=41,7%	e=0,675	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,18	53	2,3	3,7	9,6
SA10-300-18	Dr=33,3%	e=0,700	p <sub>i</sub> '=300 kPa	0,14	50	6,2	13,5	49,5

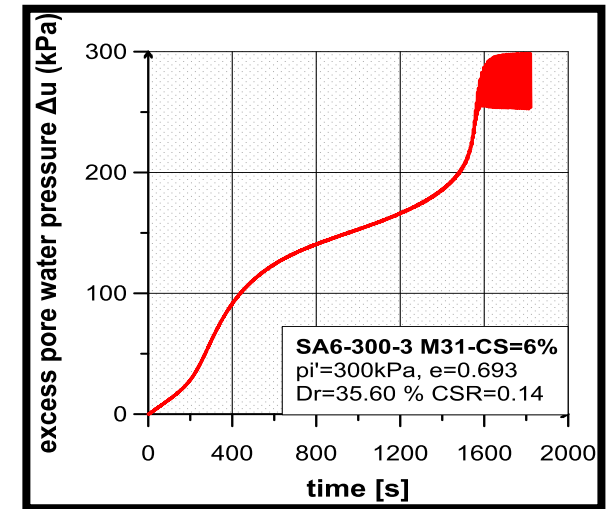
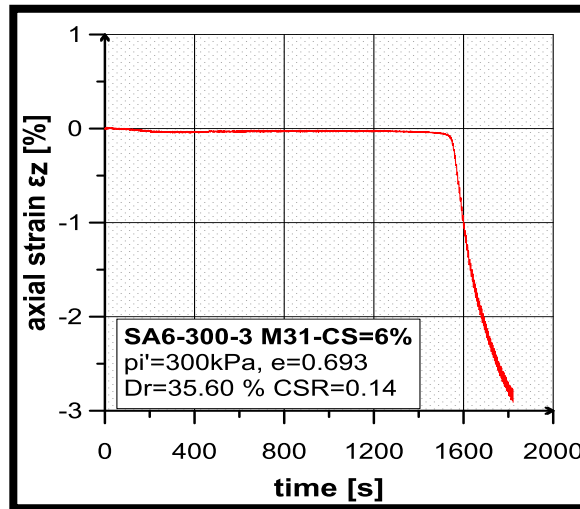
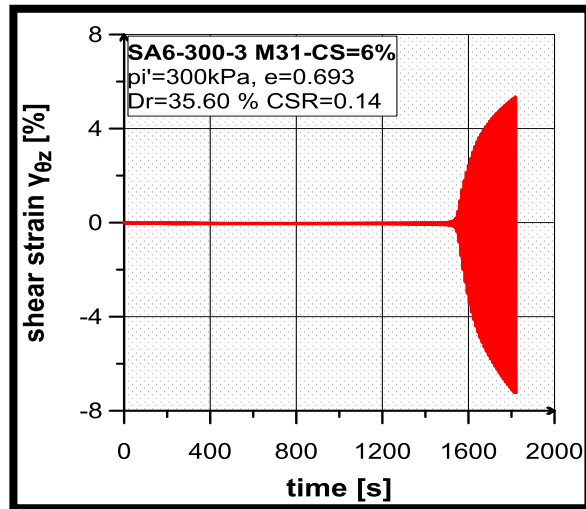
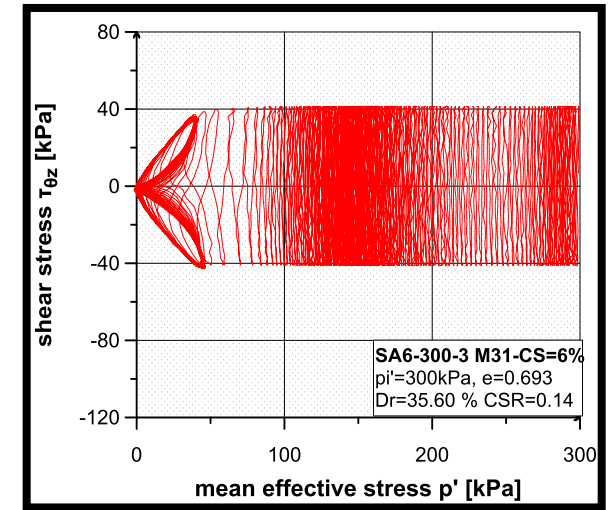
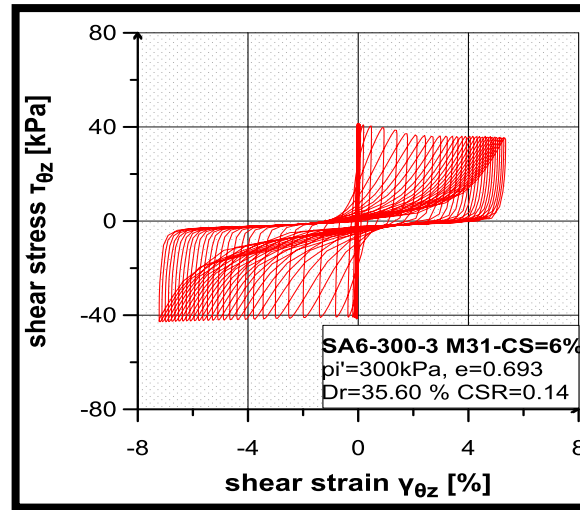
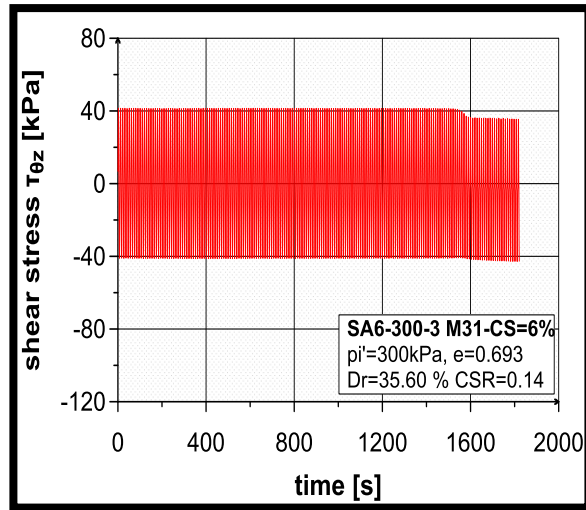


Σχήμα Π-5.1. Δοκμή -SA6-300-1

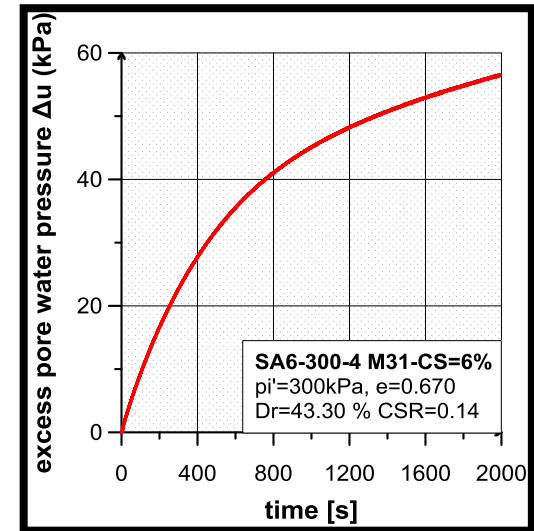
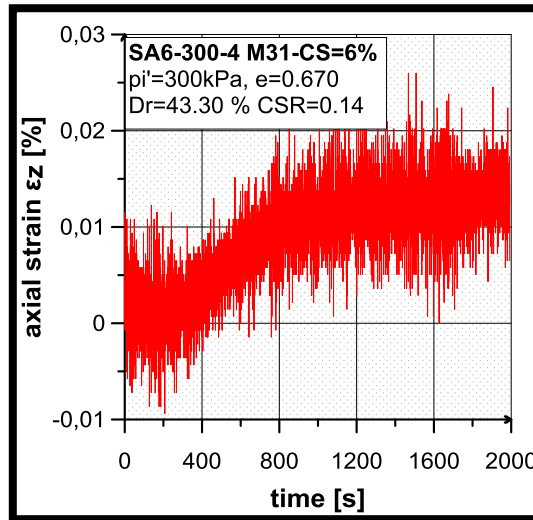
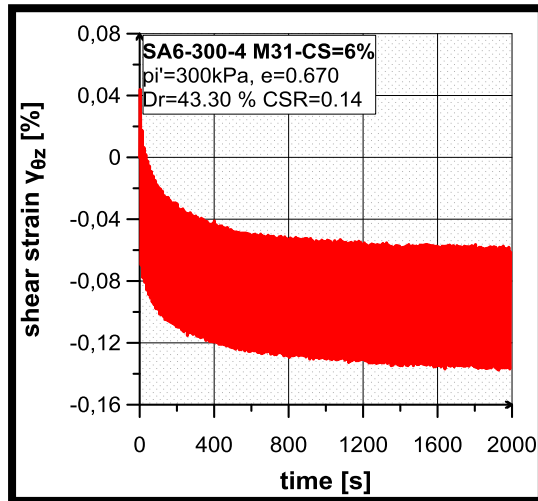
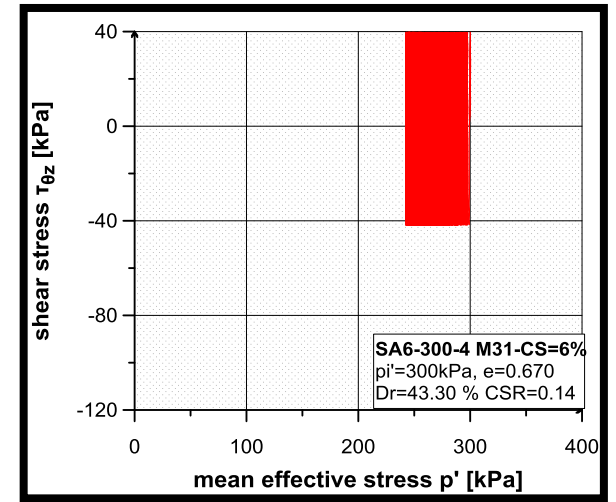
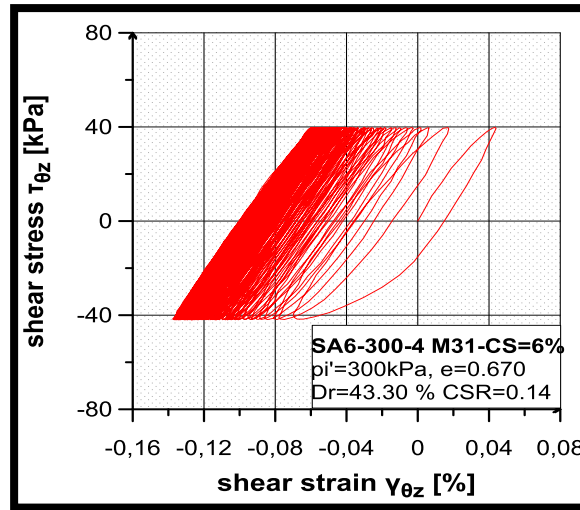
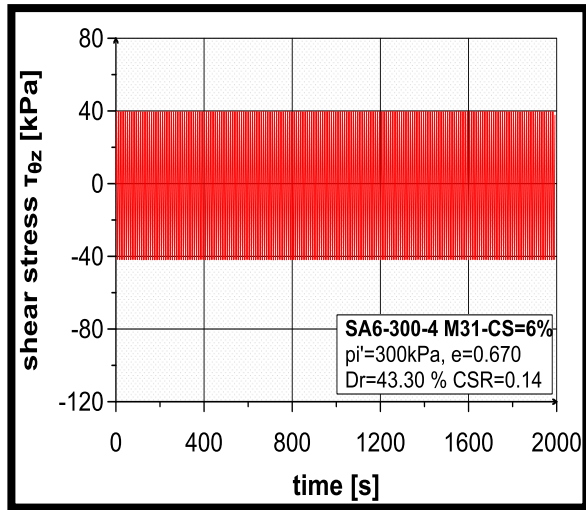


Σχήμα Π-5.2. Δοκμή -SA6-300-2

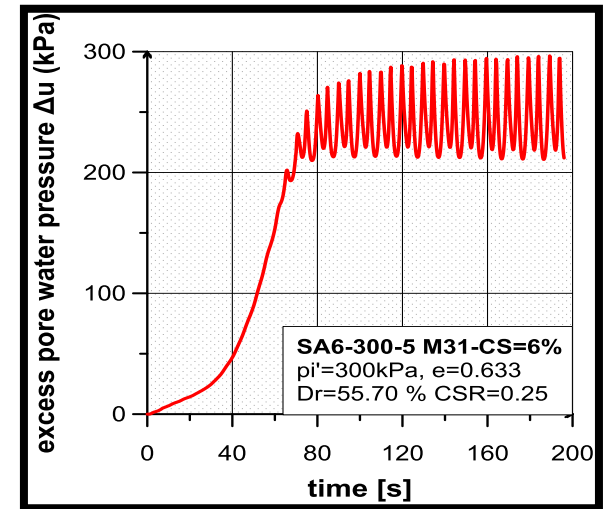
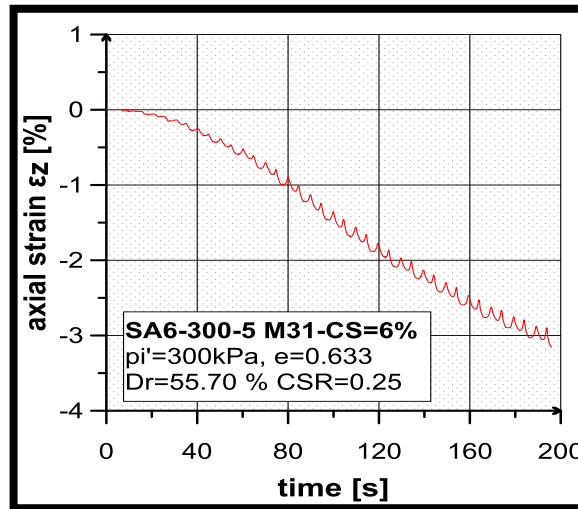
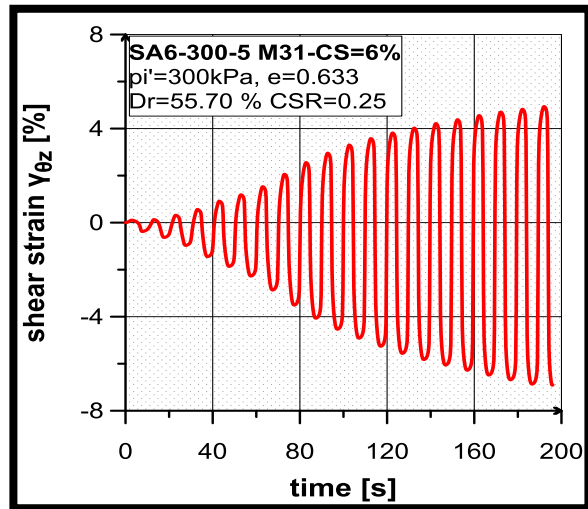
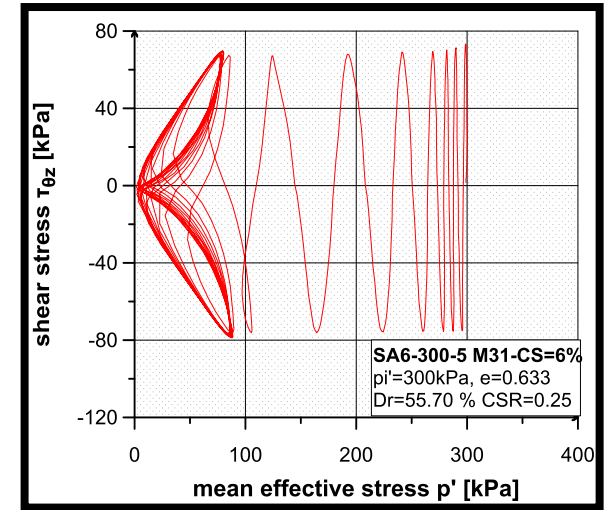
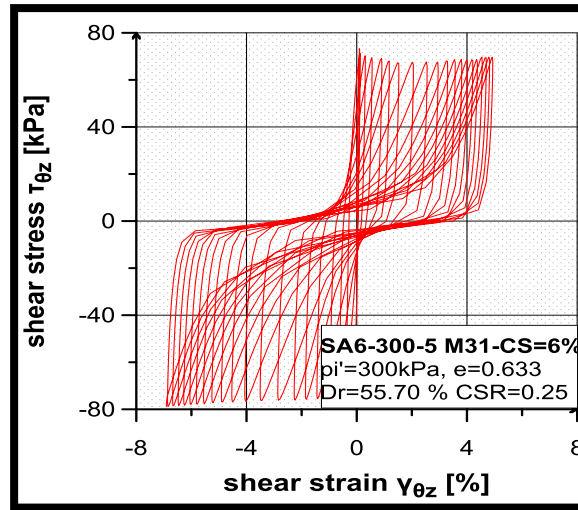
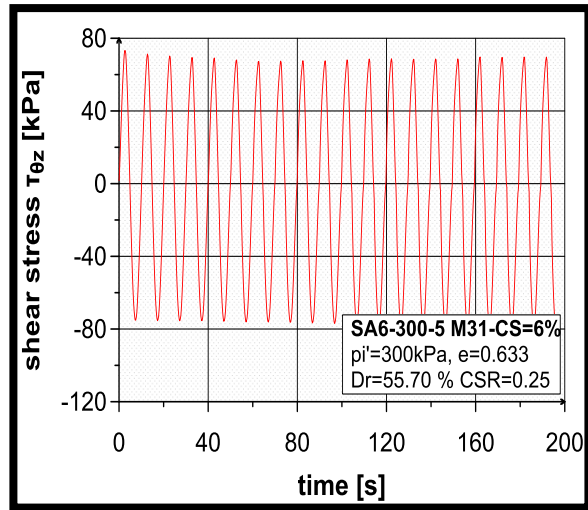




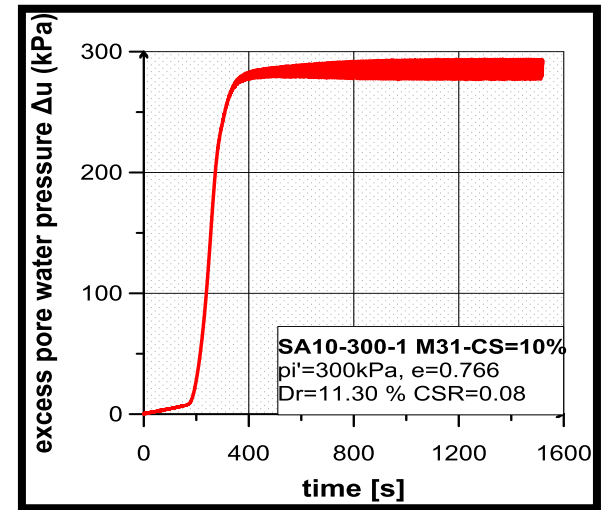
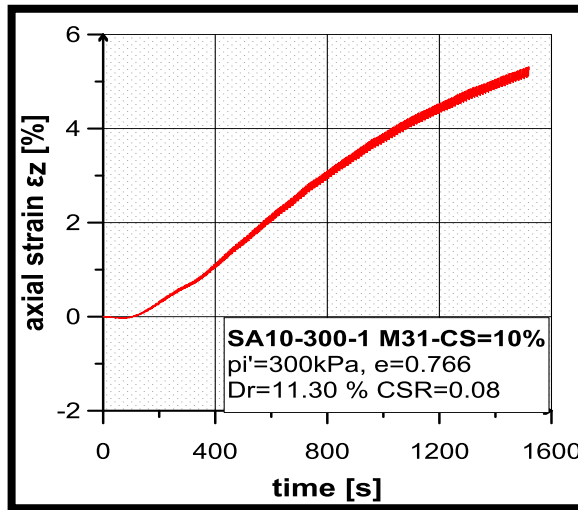
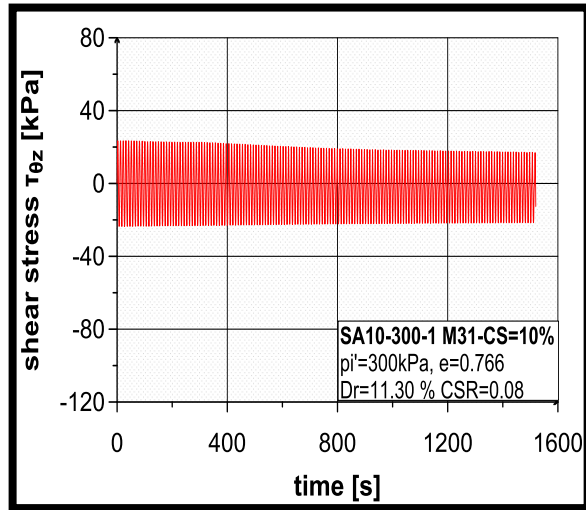
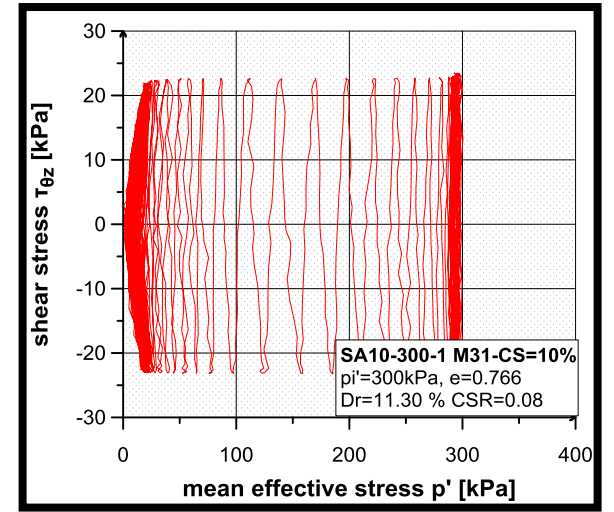
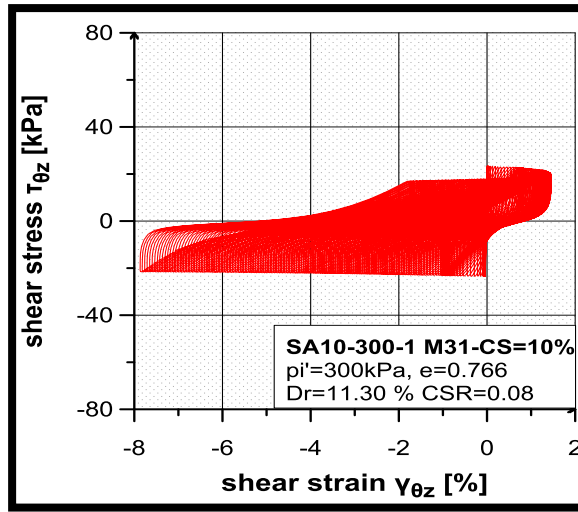
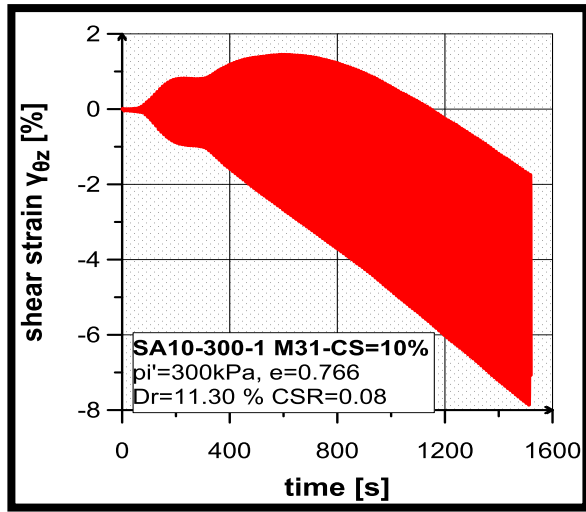
Σχήμα Π-5.3. Δοκιμή -SA6-300-3



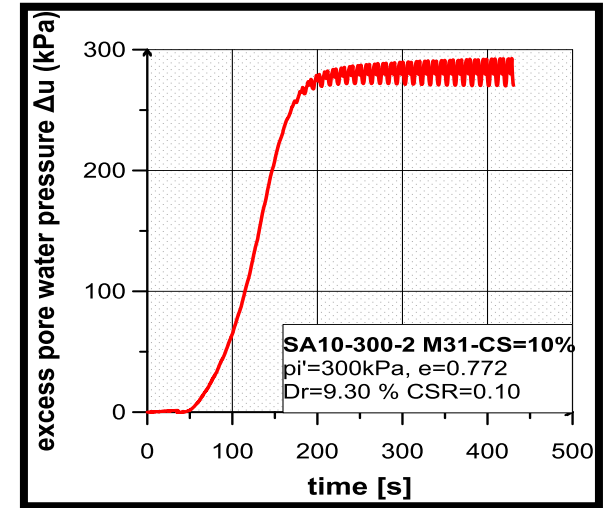
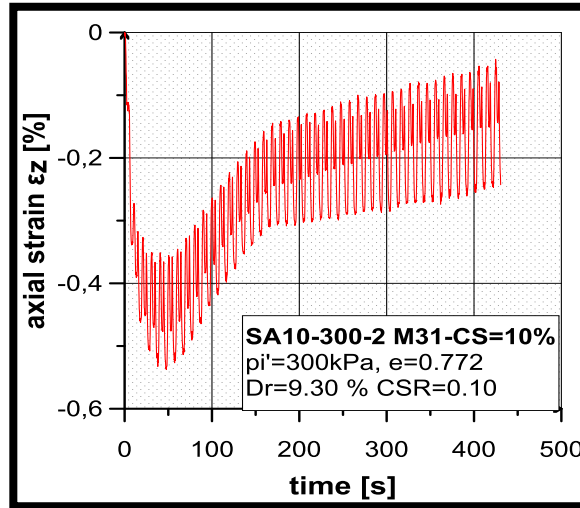
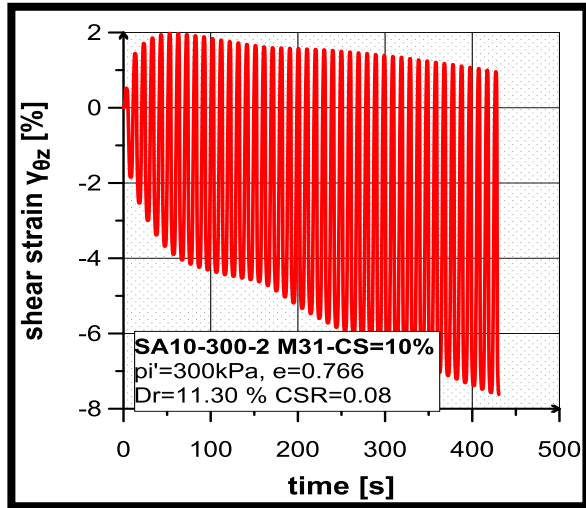
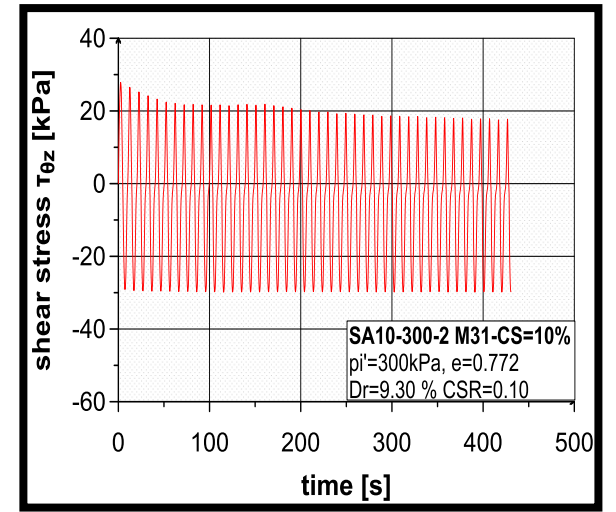
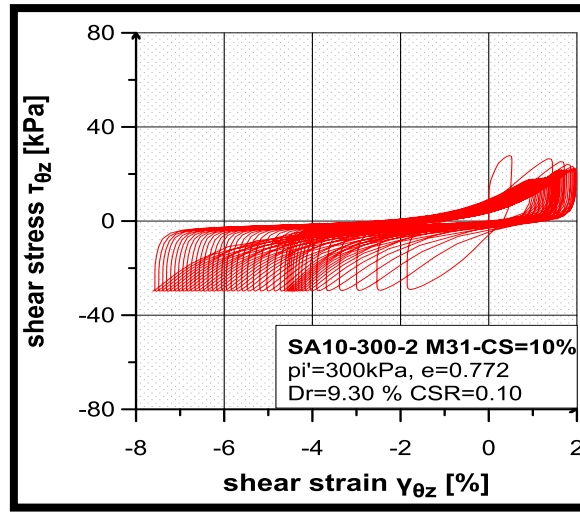
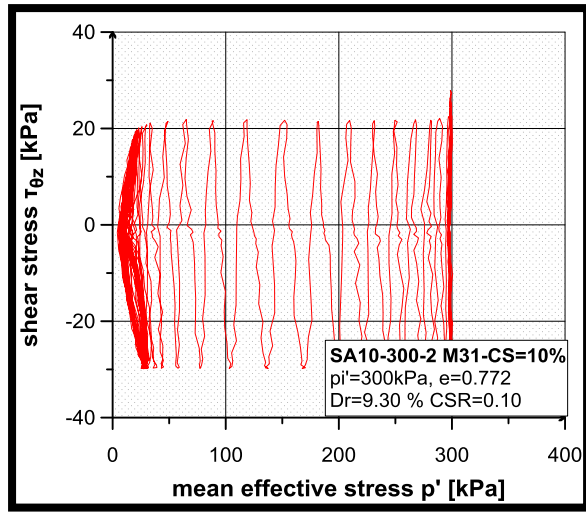
Σχήμα Π-5.4. Δοκιμή –SA6-300-4



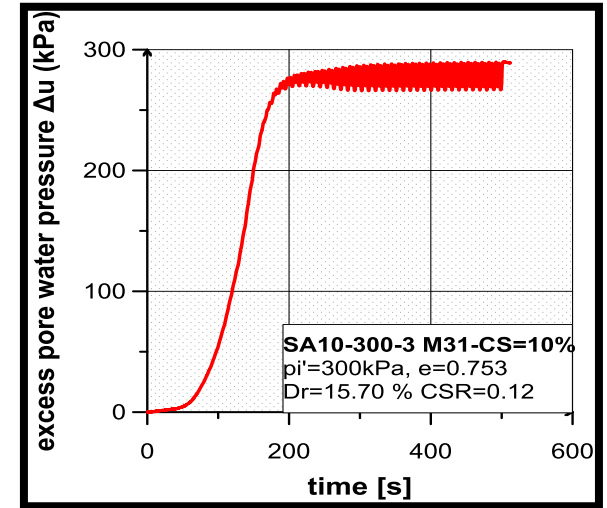
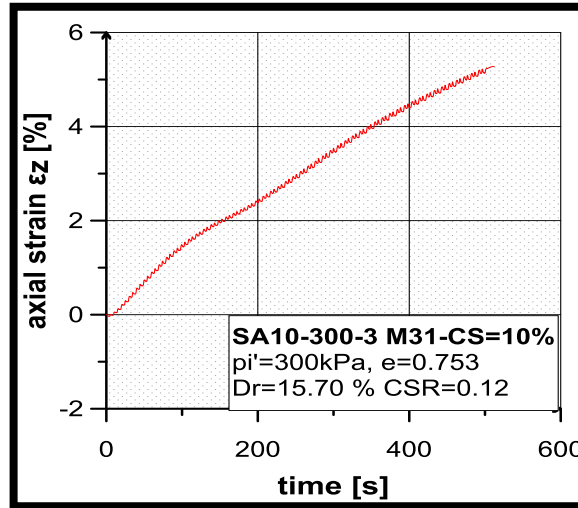
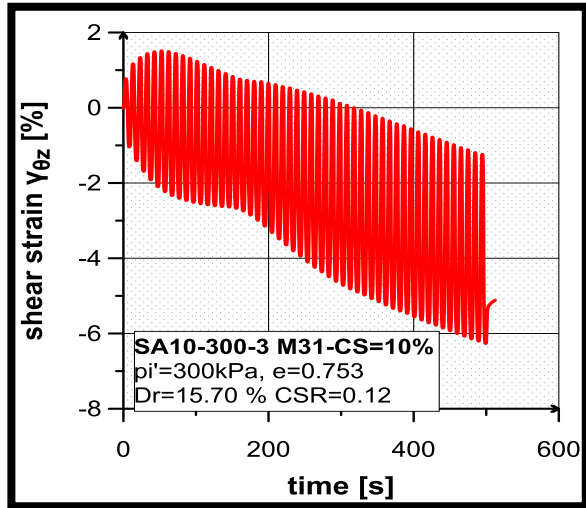
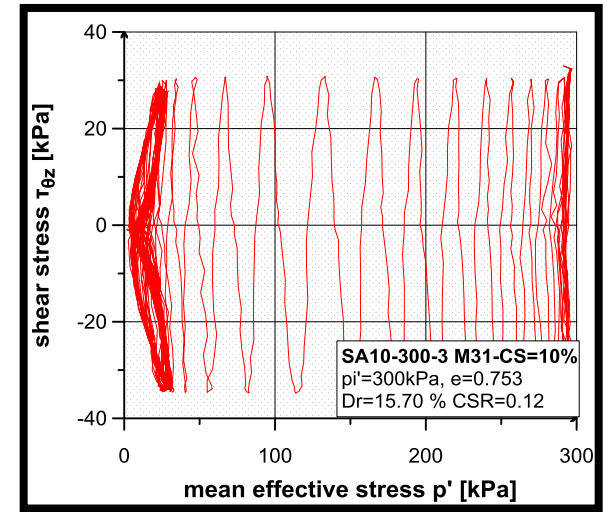
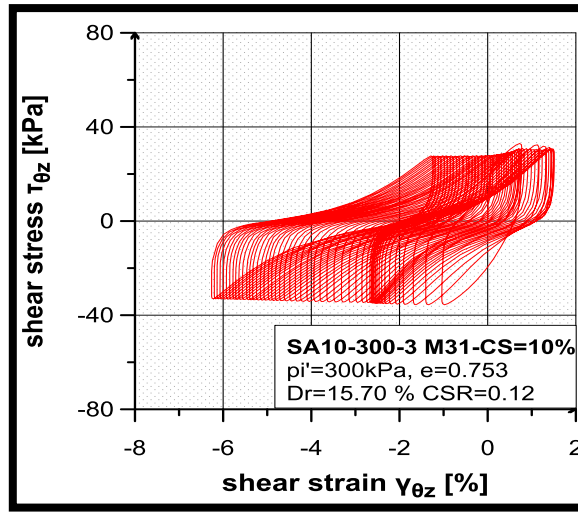
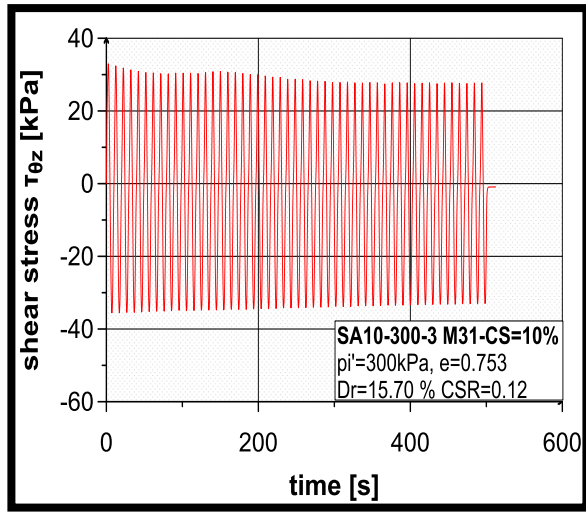
Σχήμα Π-5.5. Δοκμή -SA6-300-5



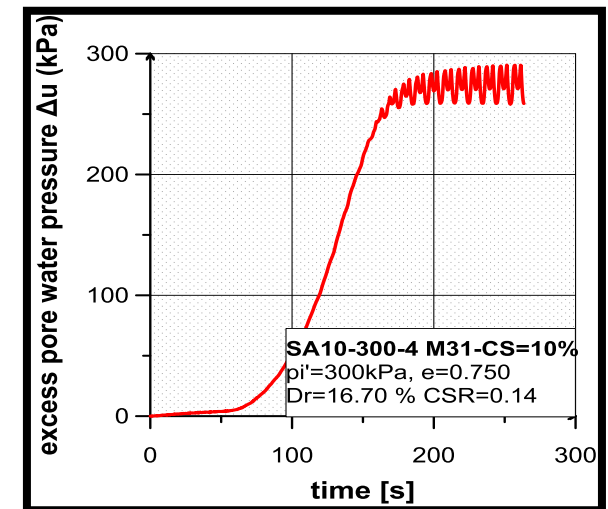
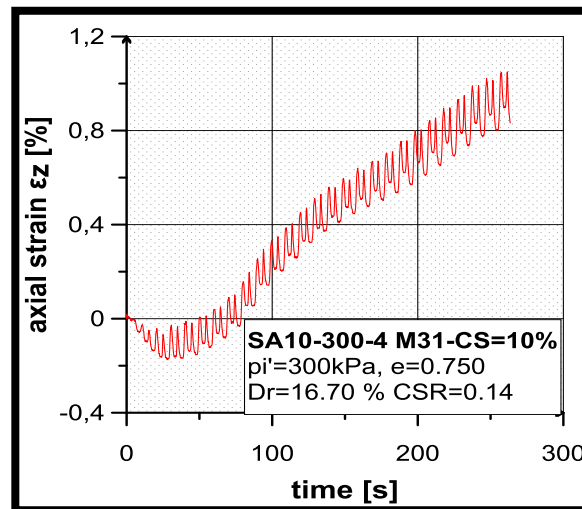
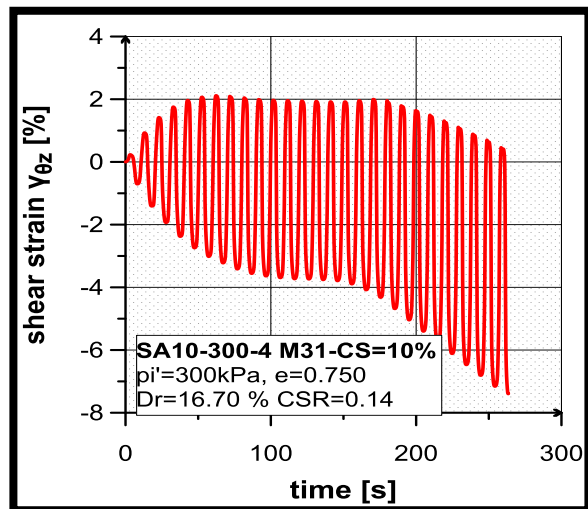
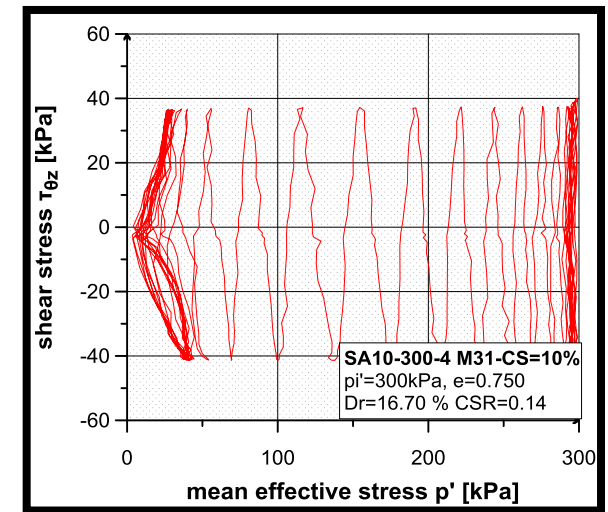
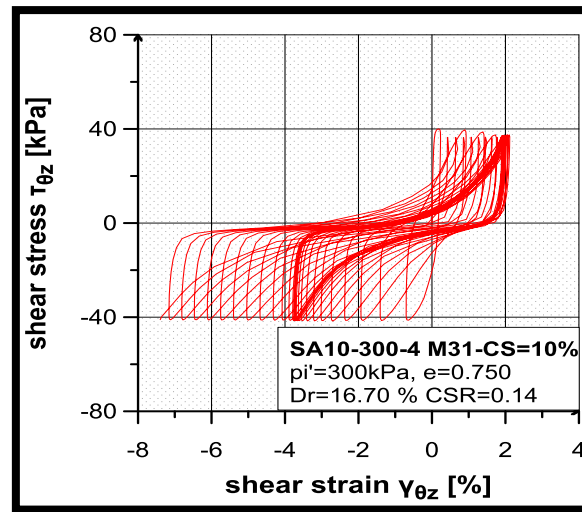
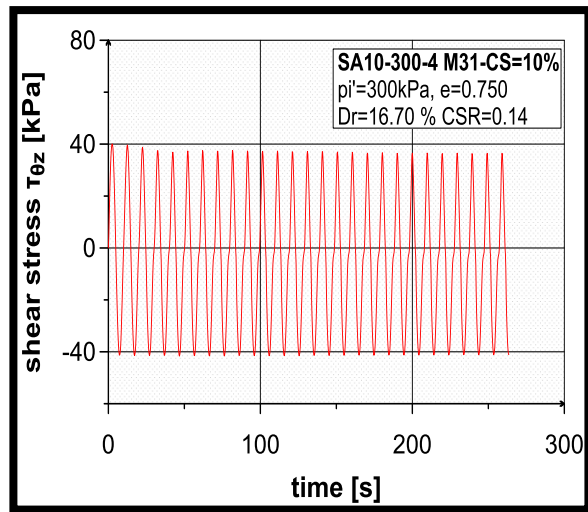
Σχήμα Π-5.6. Δοκιμή -SA10-300-1



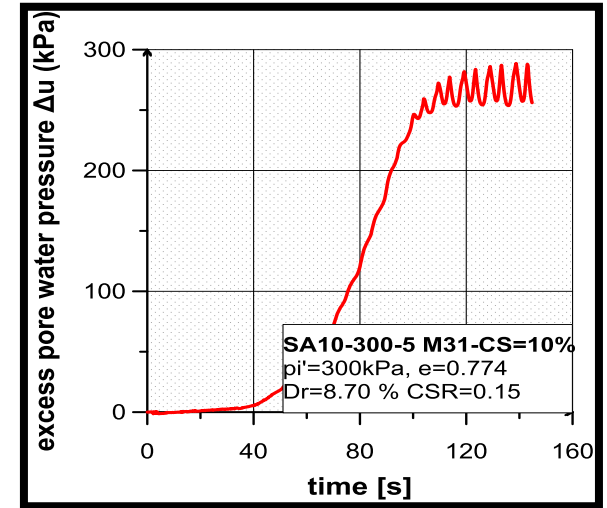
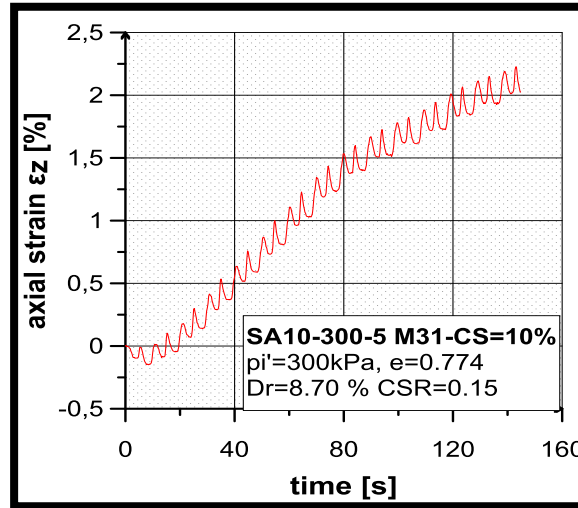
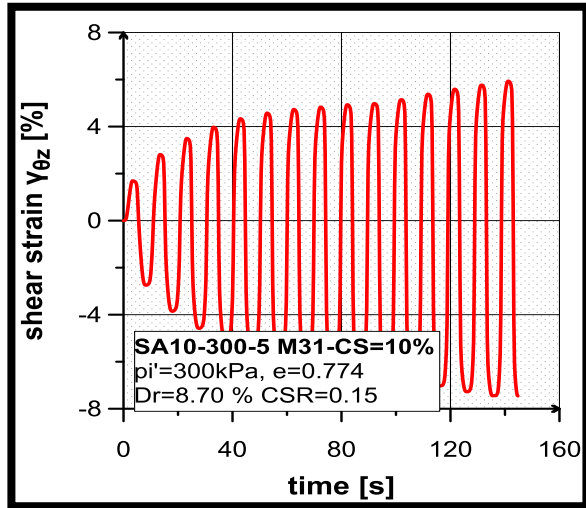
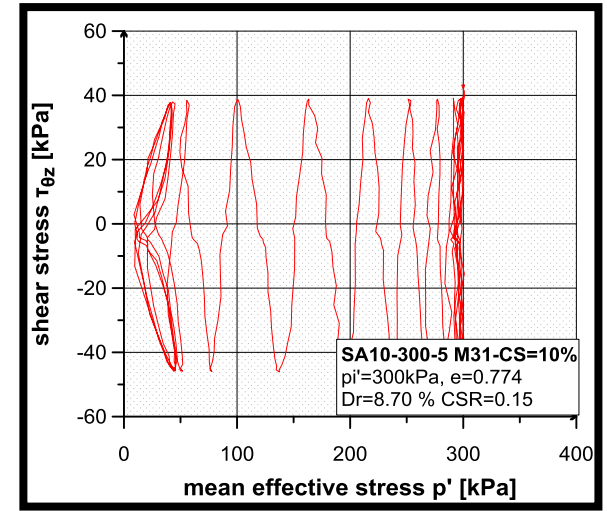
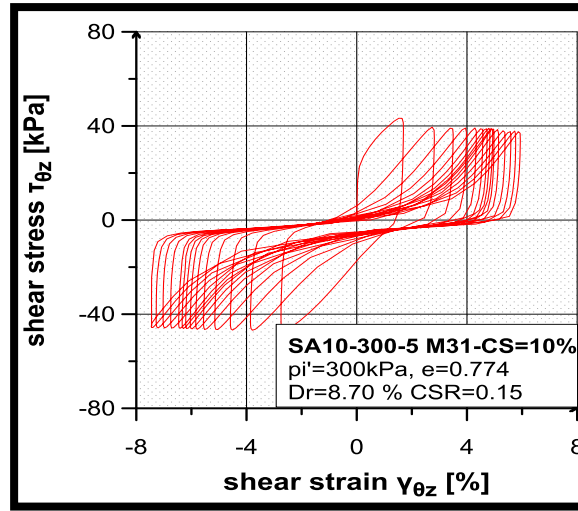
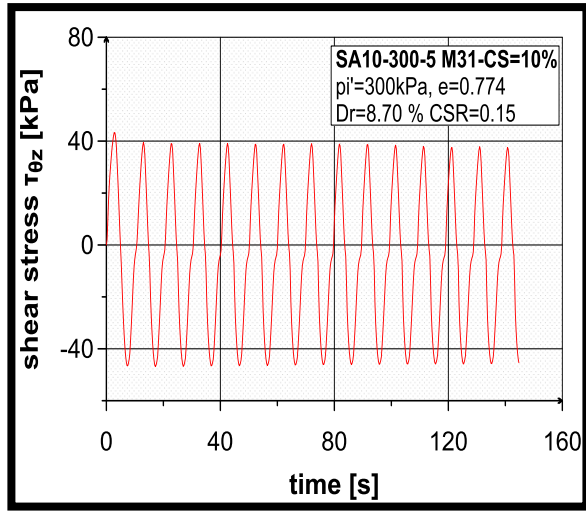
Σχήμα Π-5.7. Δοκιμή -SA10-300-2



Σχήμα Π-5.8. Δοκιμή -SA10-300-3

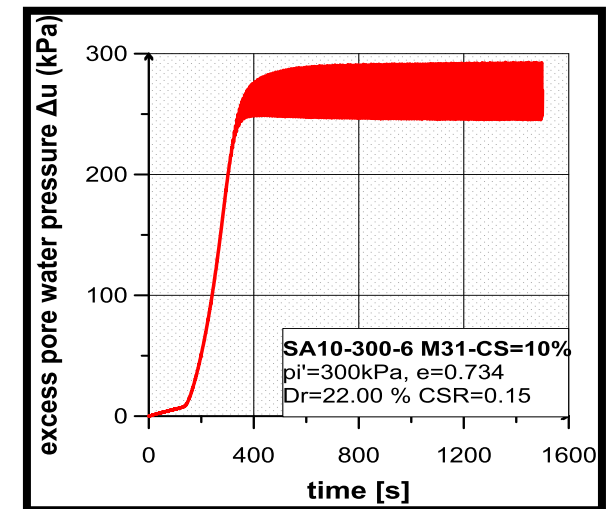
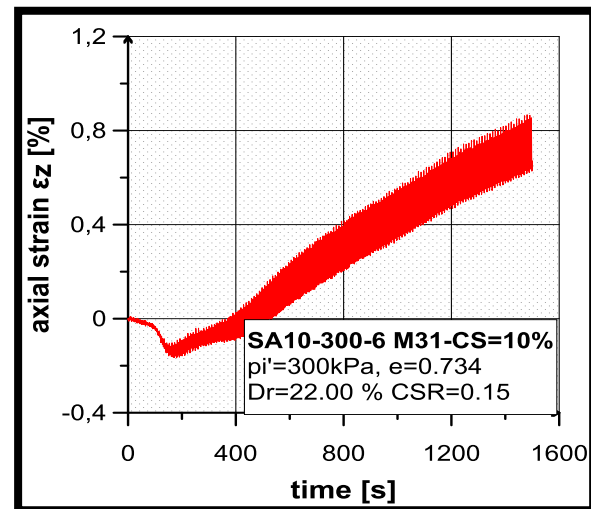
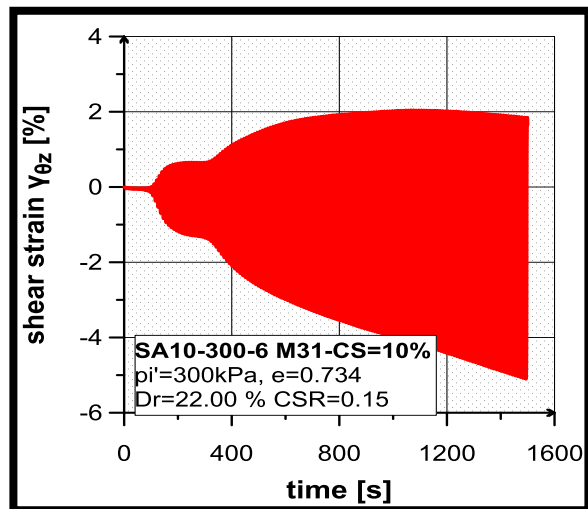
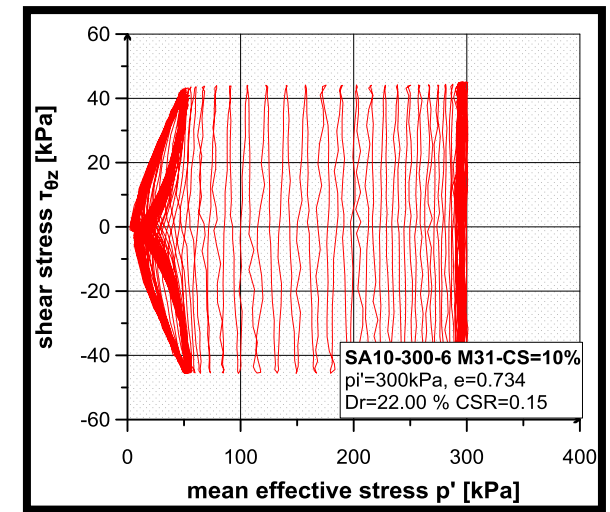
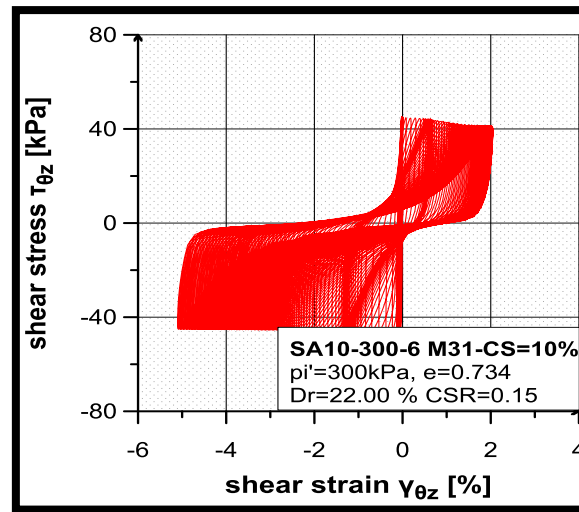
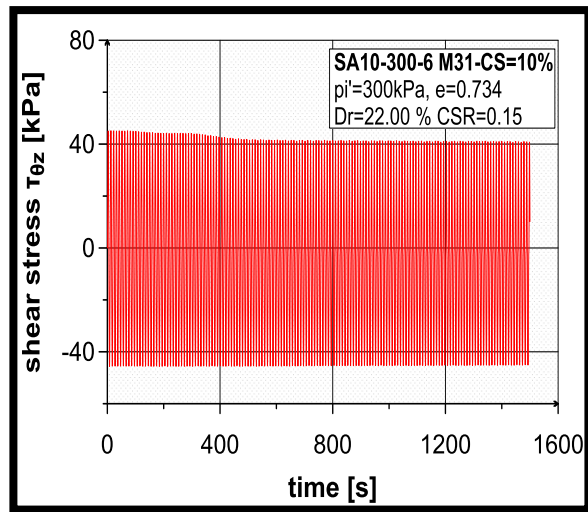


Σχήμα Π-5.9. Δοκμή -SA10-300-4

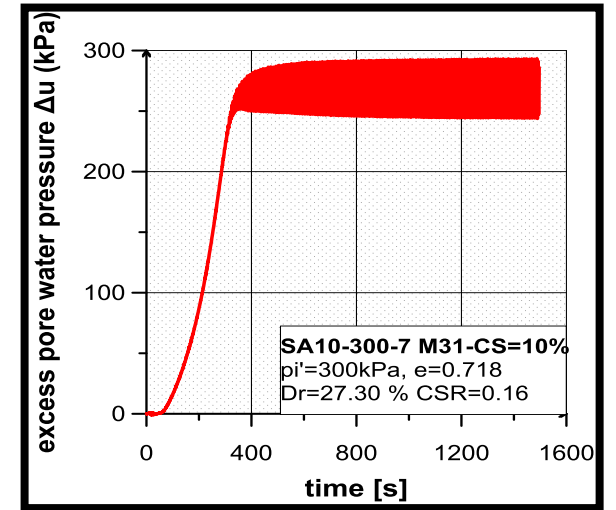
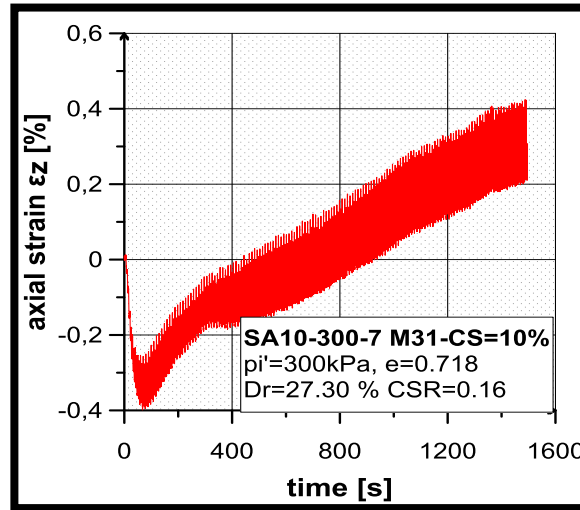
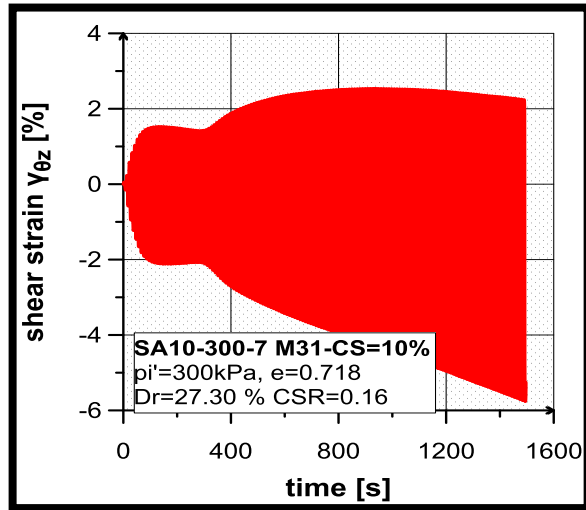
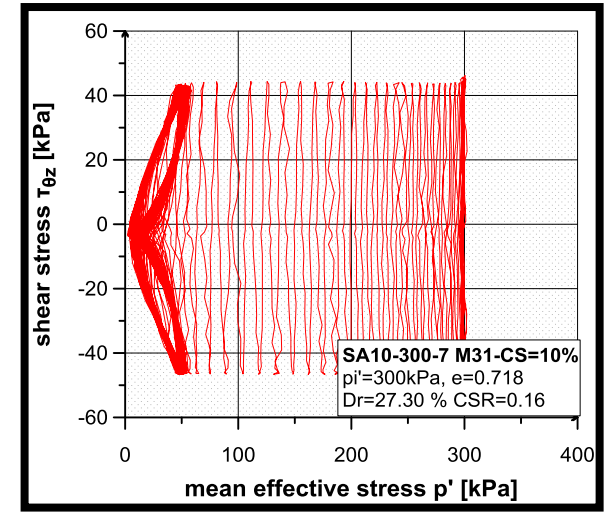
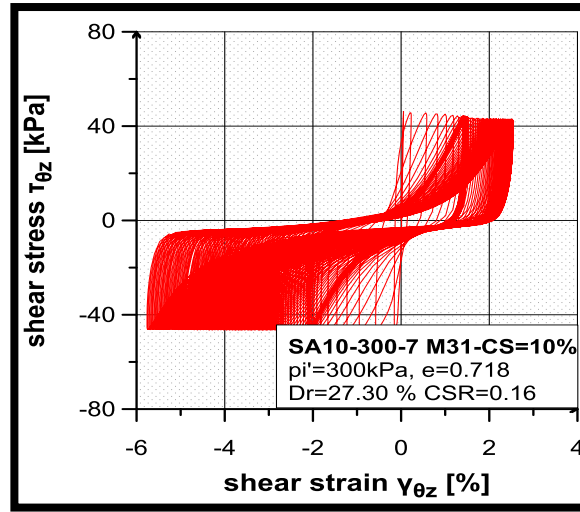
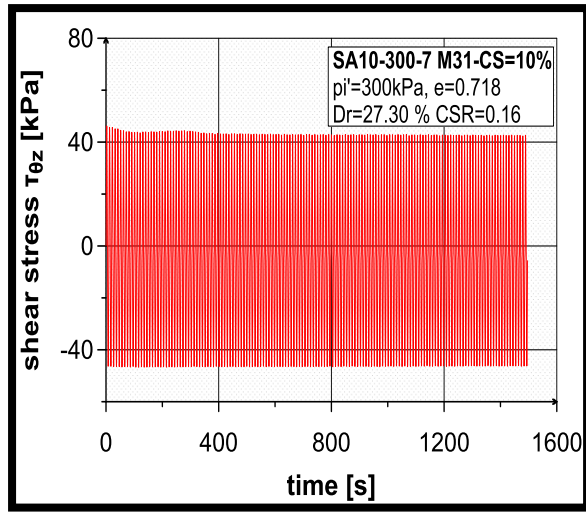


Σχήμα Π-5.10. Δοκιμή -SA10-300-5

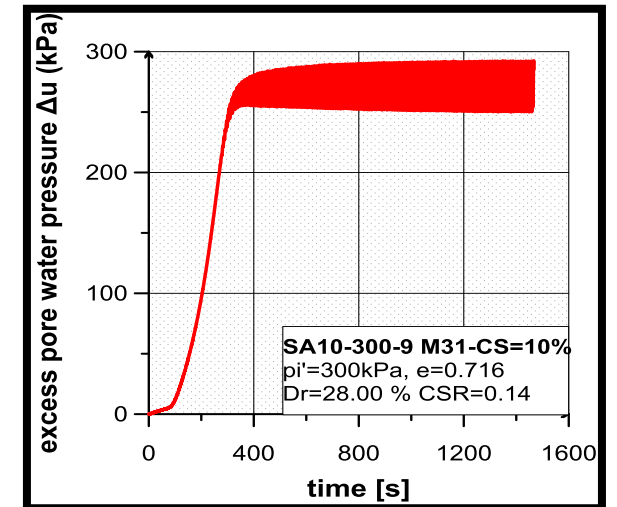
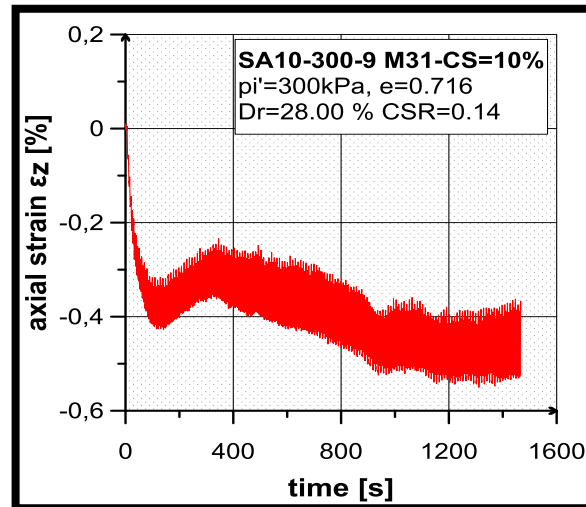
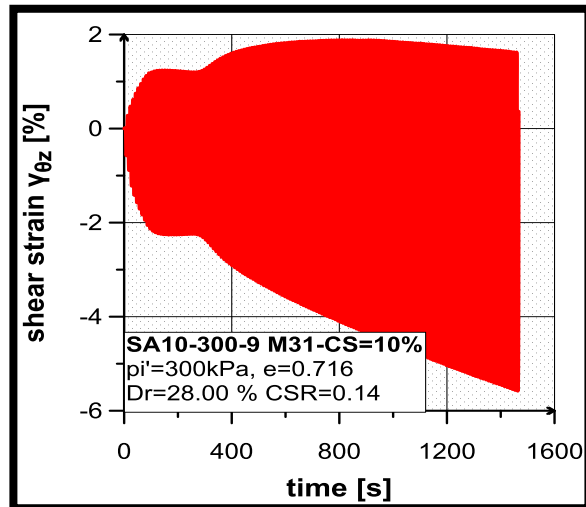
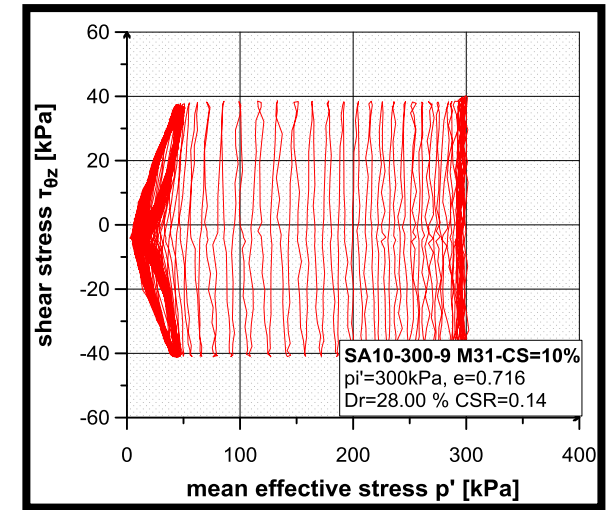
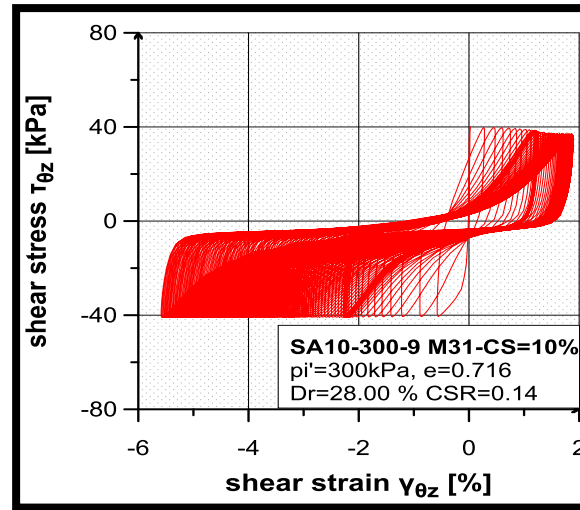
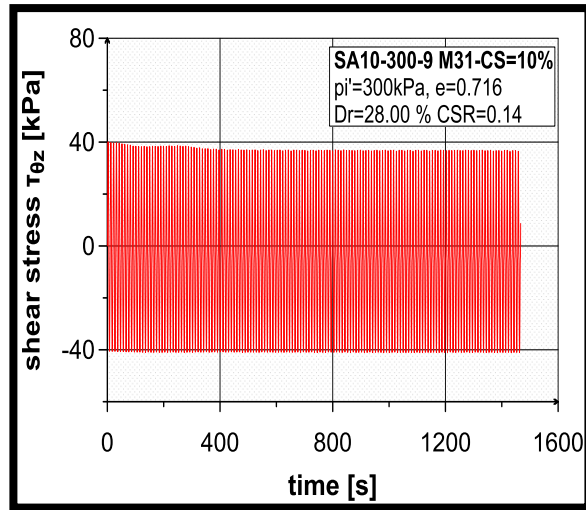




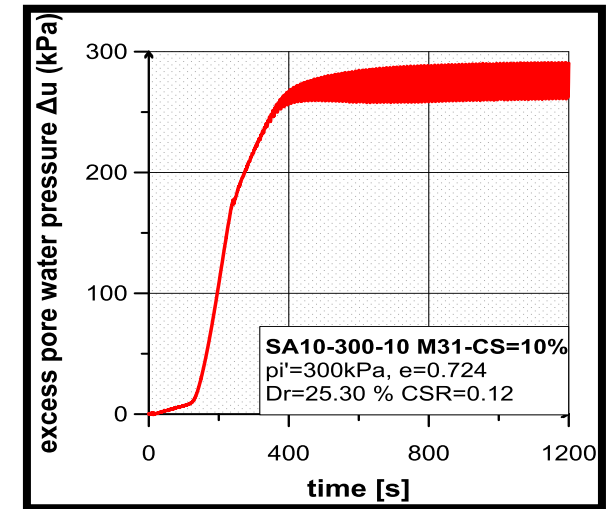
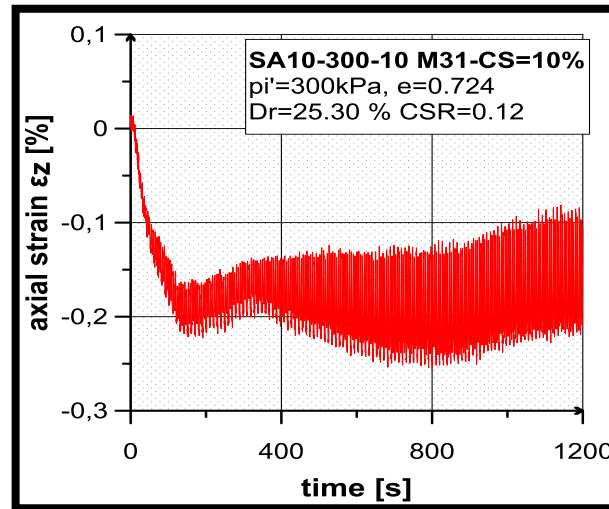
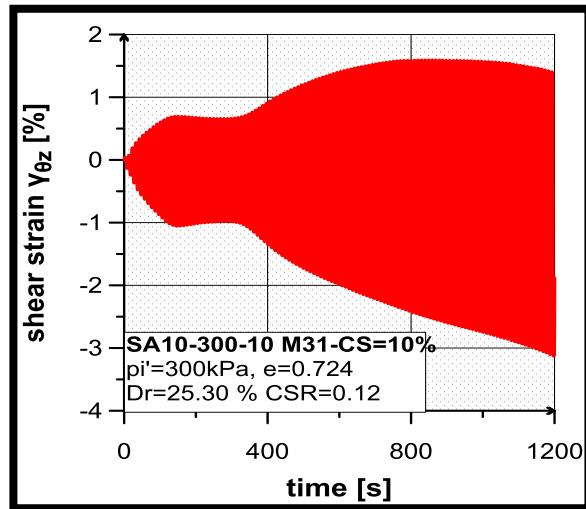
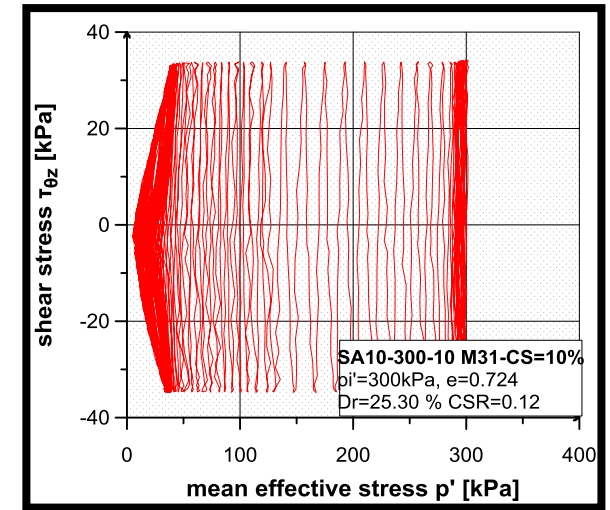
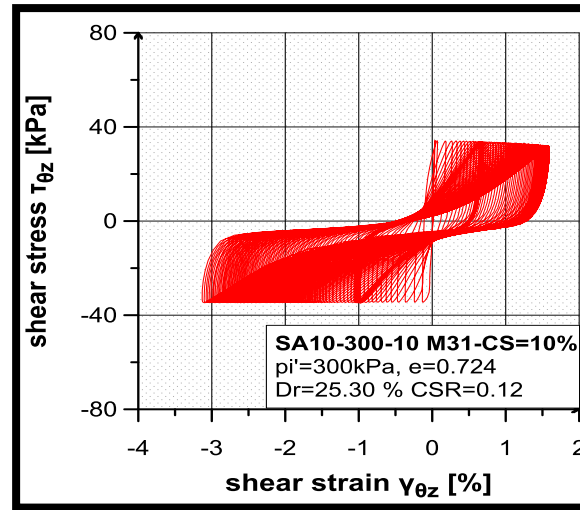
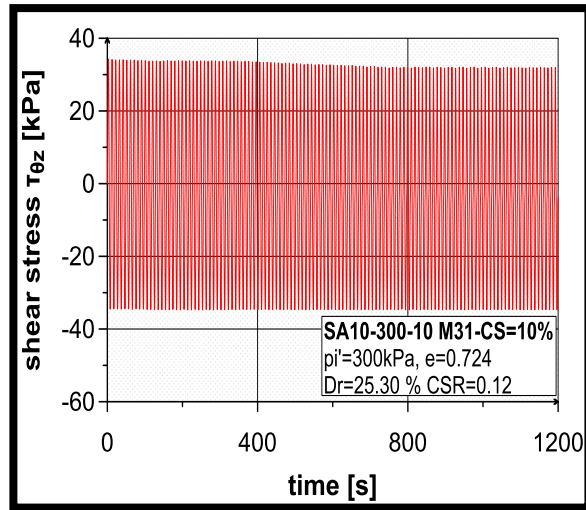
Σχήμα Π-5.11. Δοκιμή -SA10-300-6



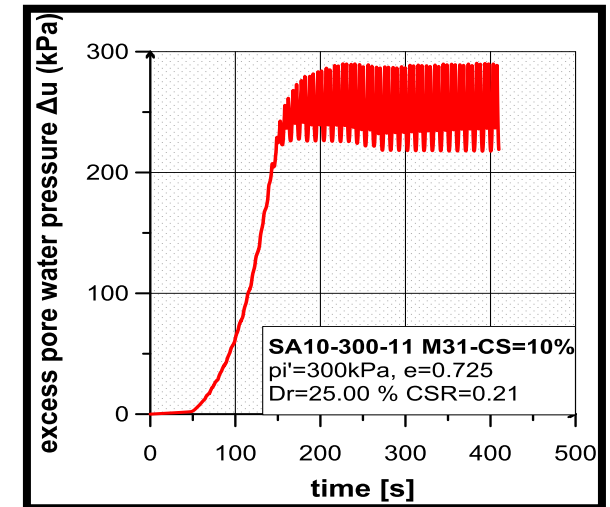
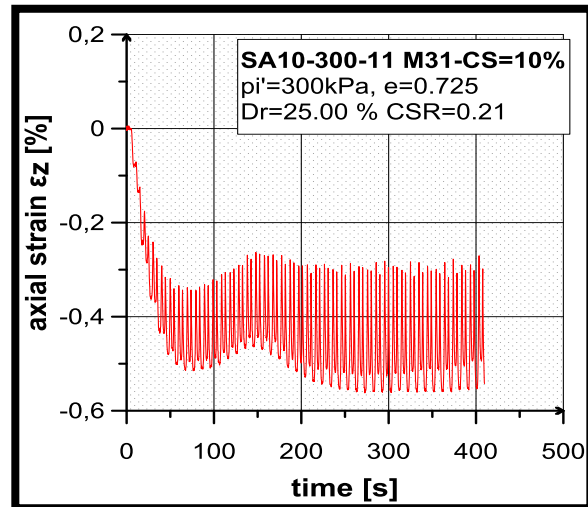
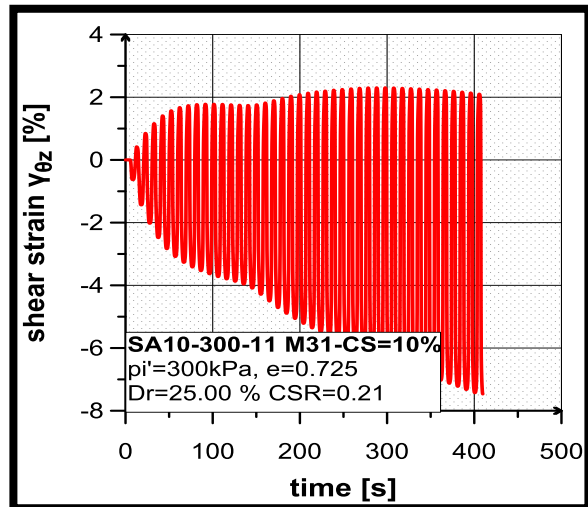
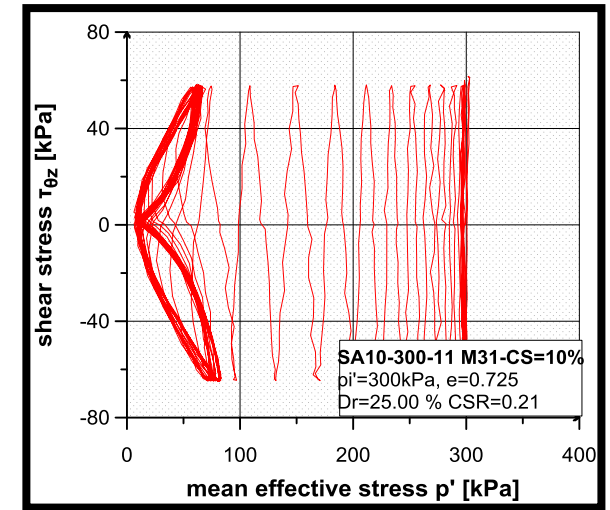
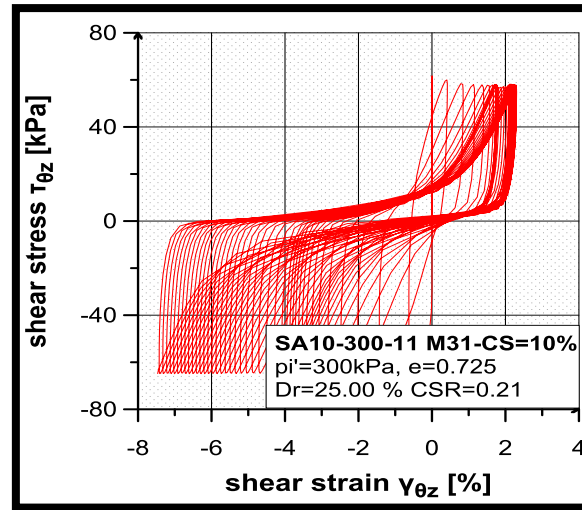
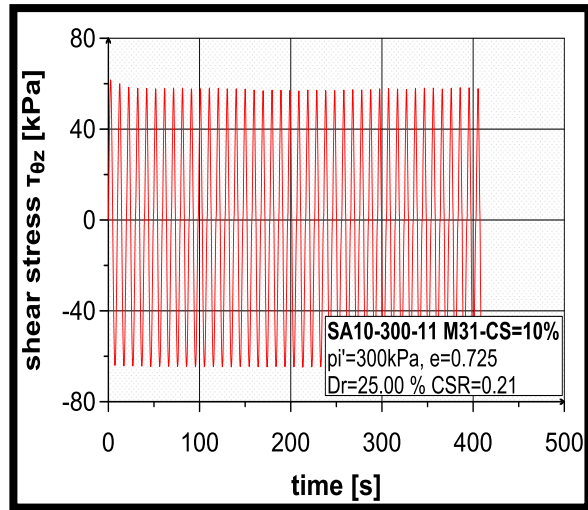
Σχήμα Π-5.12. Δοκιμή –SA10-300-7



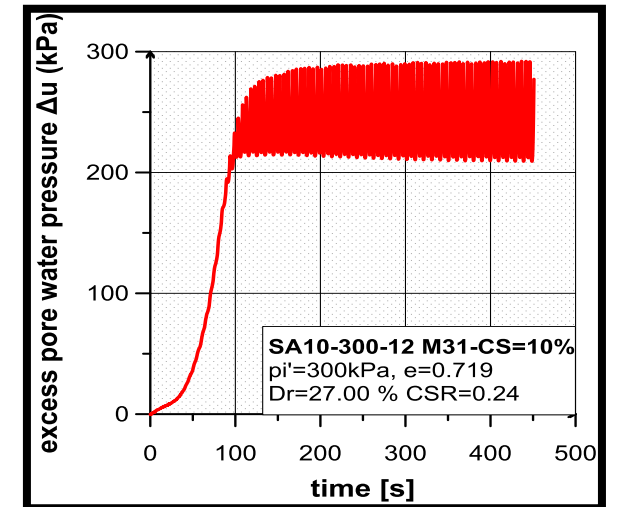
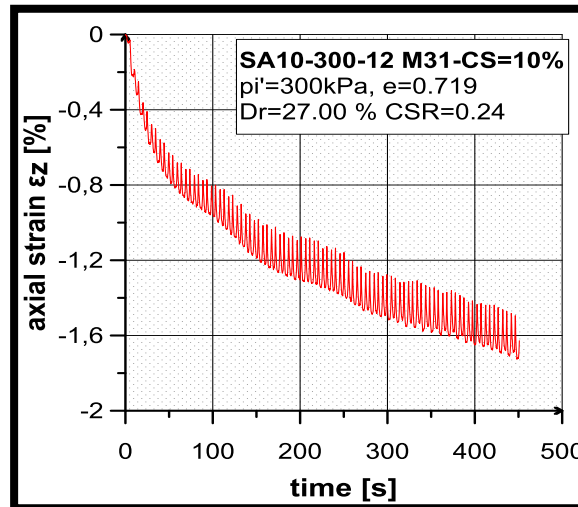
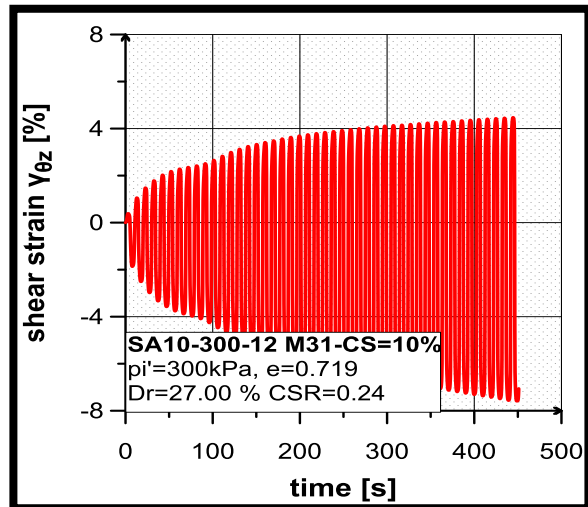
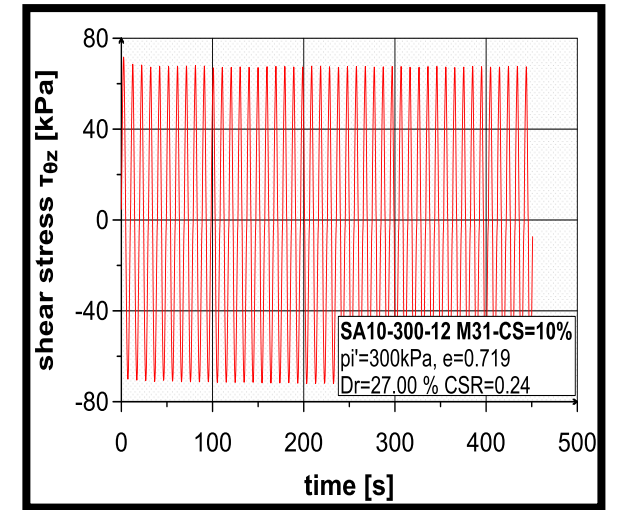
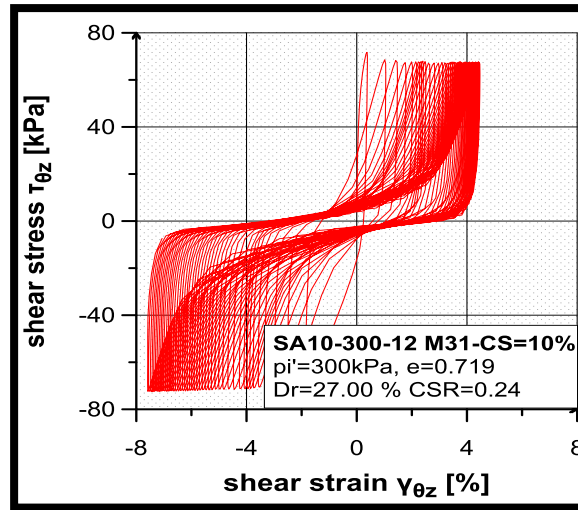
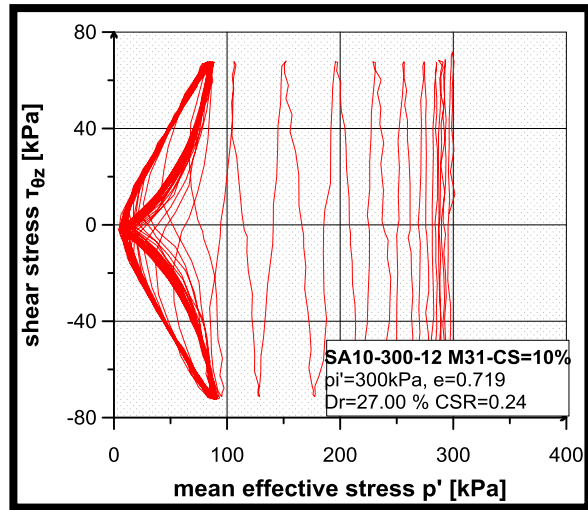
Σχήμα Π-5.13. Δοκιμή -SA10-300-9



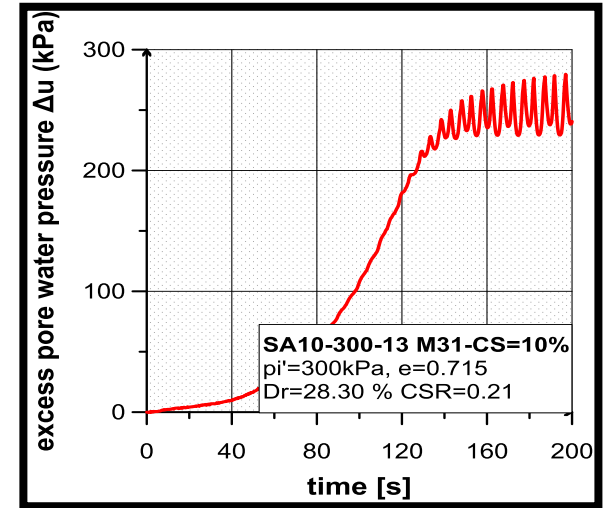
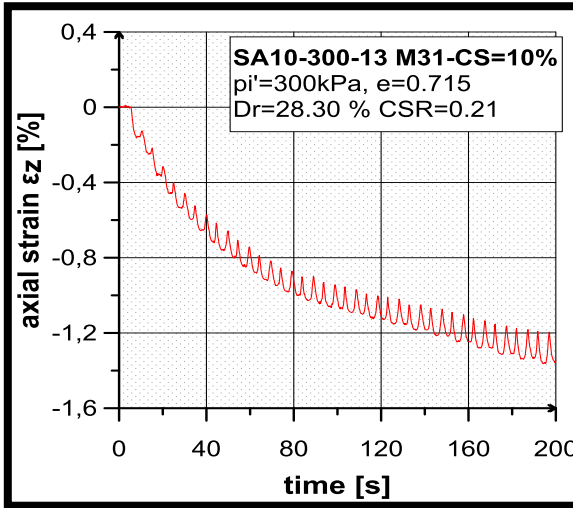
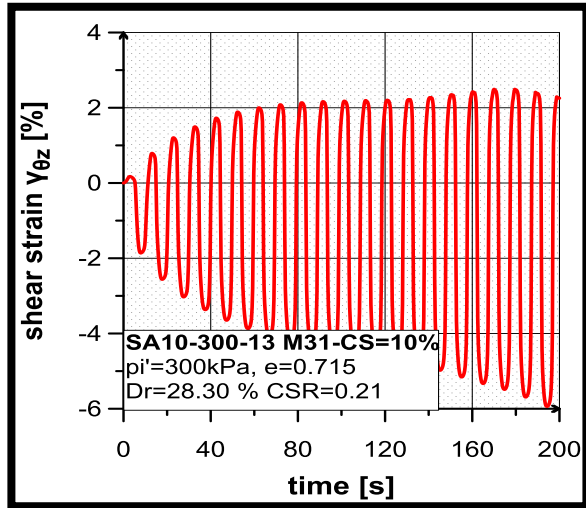
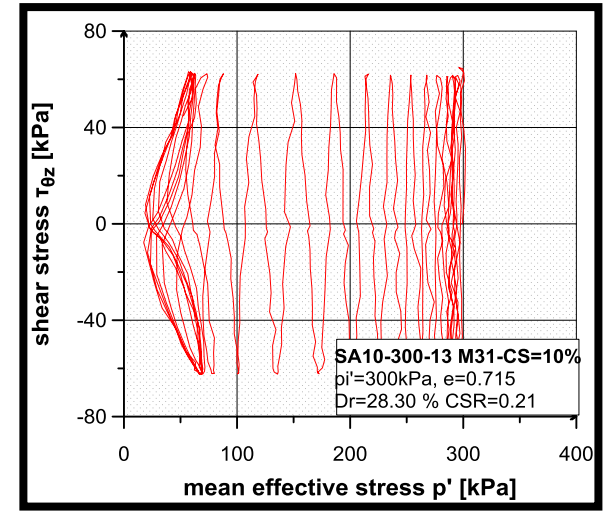
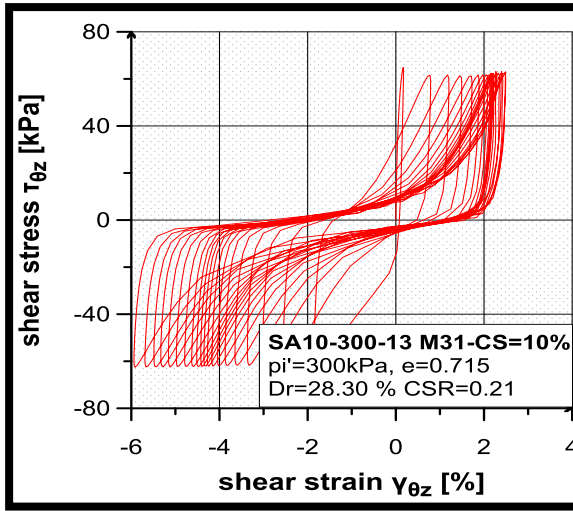
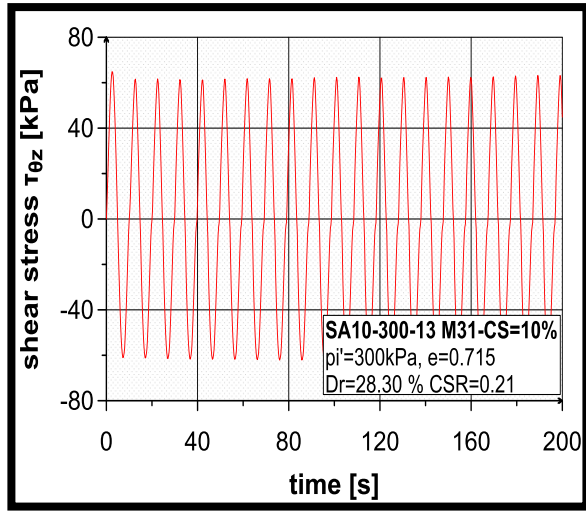
Σχήμα Π-5.14. Δοκιμή -SA10-300-10



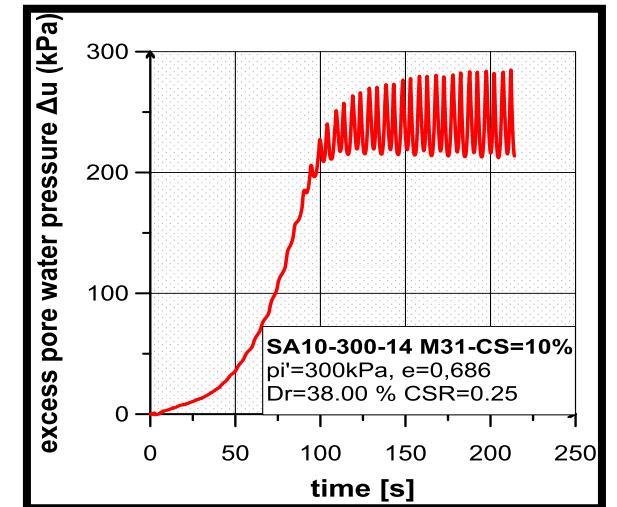
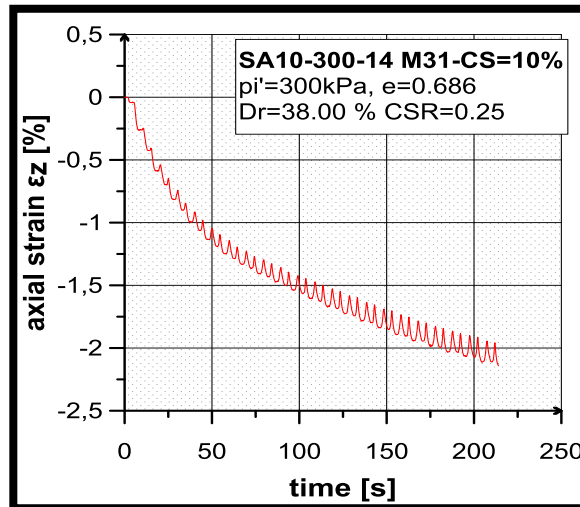
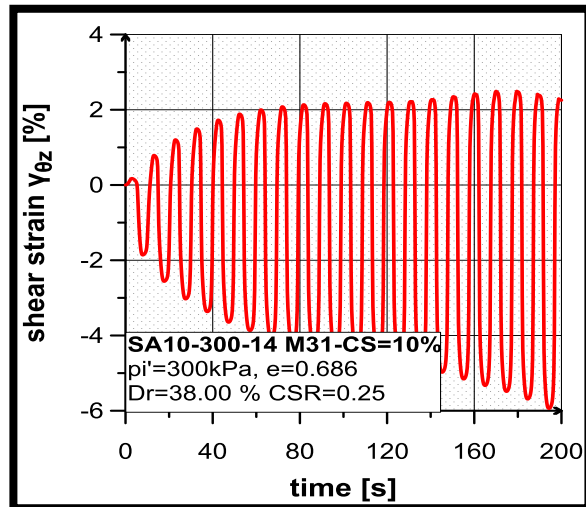
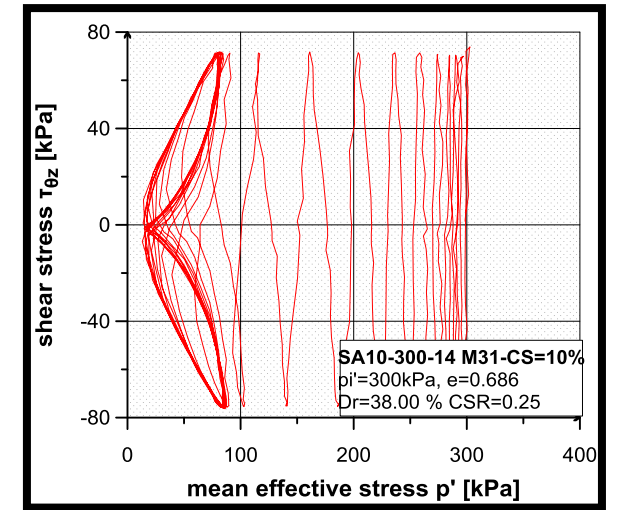
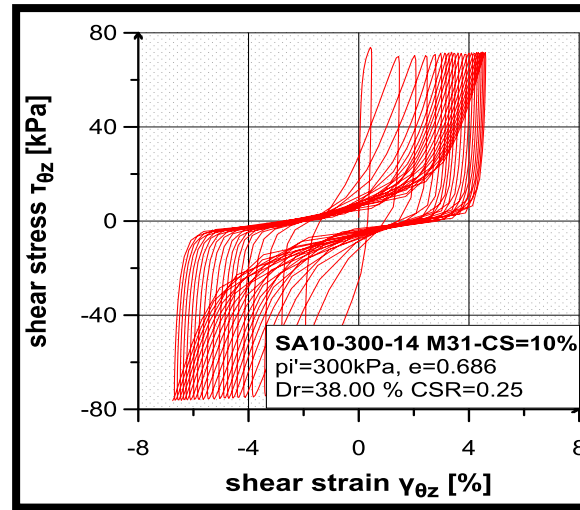
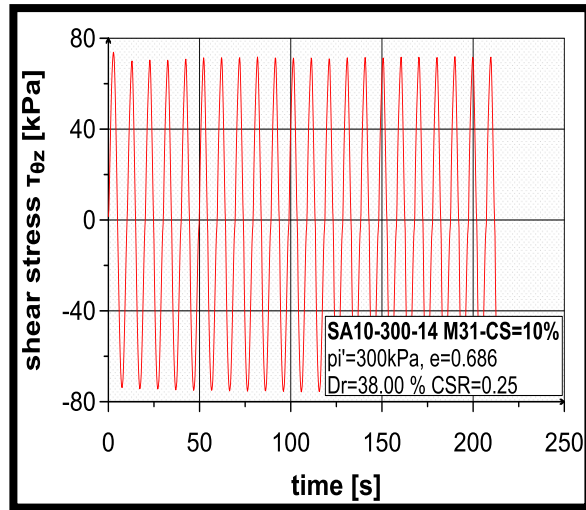
Σχήμα Π-5.15. Δοκιμή -SA10-300-11



Σχήμα Π-5.16. Δοκιμή -SA10-300-12

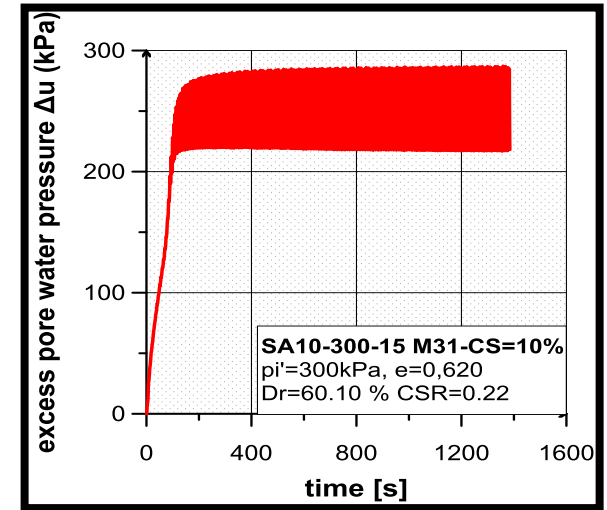
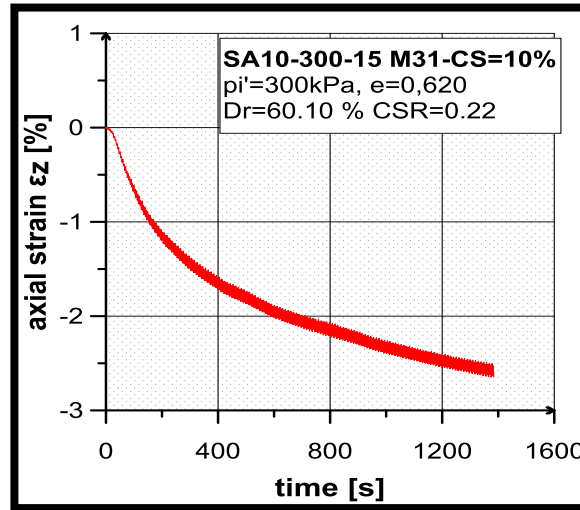
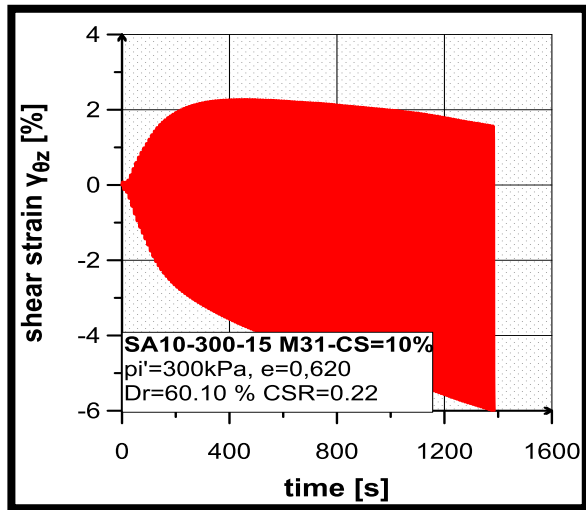
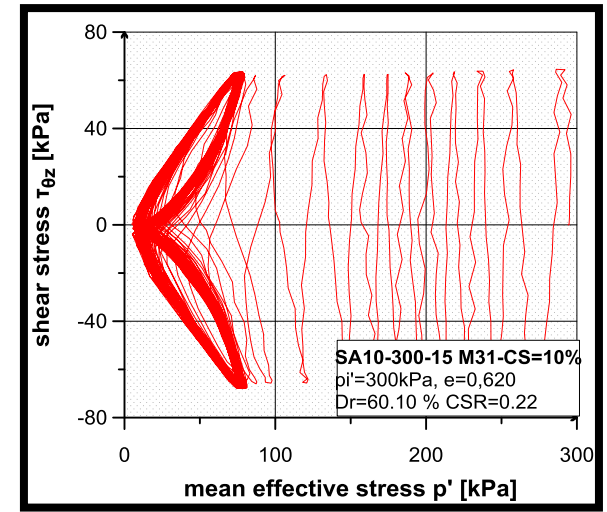
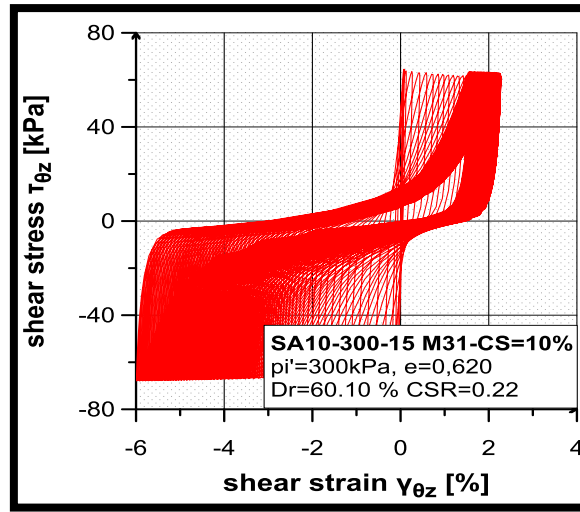
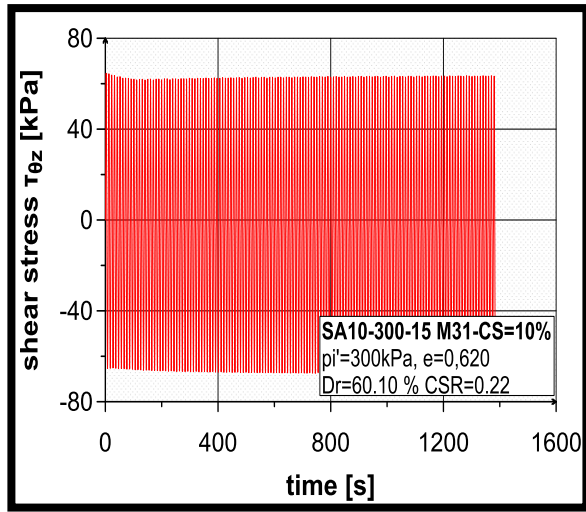


Σχήμα Π-5.17. Δοκιμή -SA10-300-13

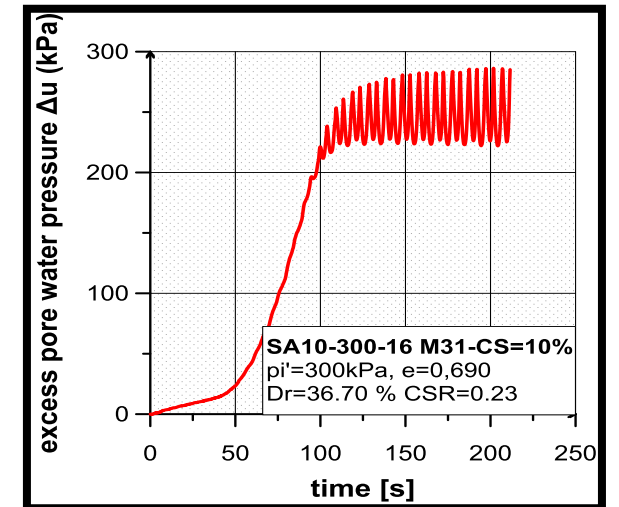
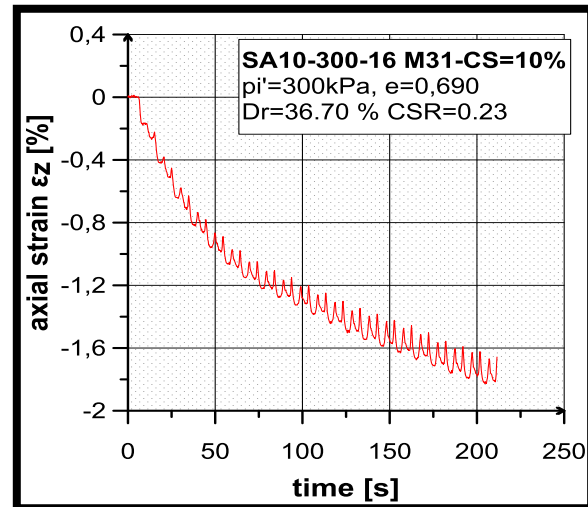
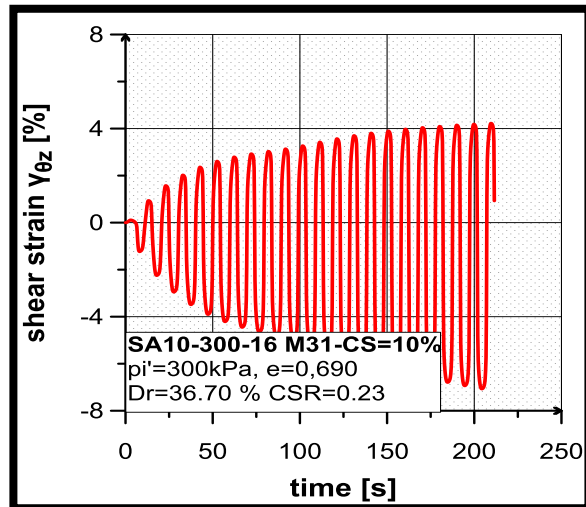
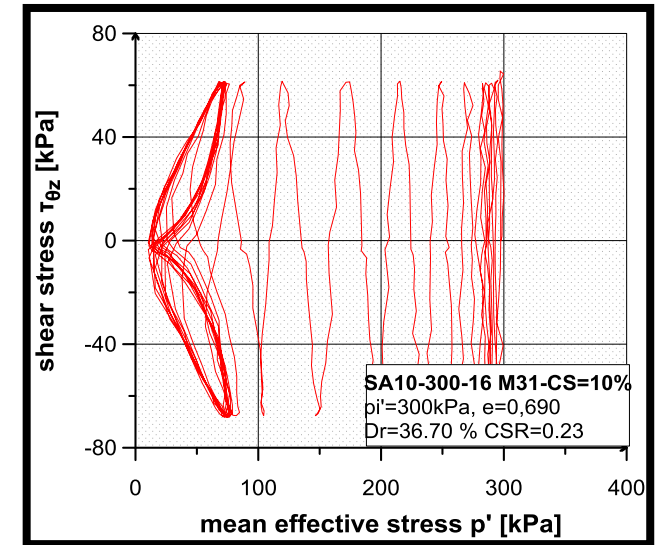
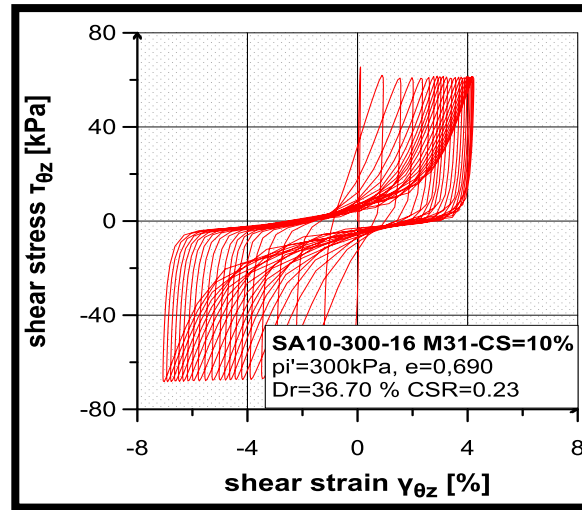
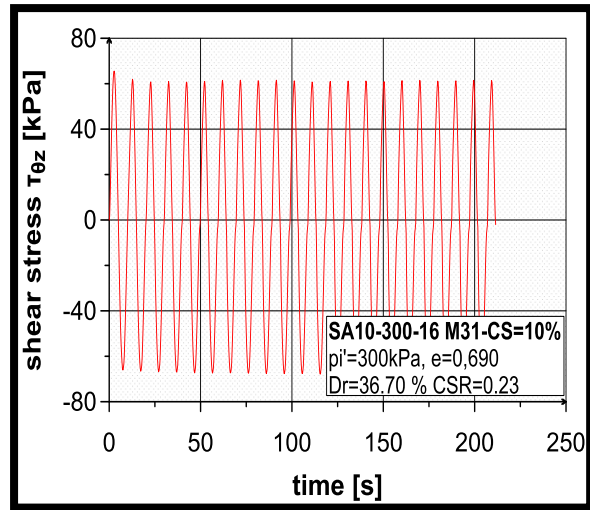


Σχήμα Π-5.18. Δοκιμή -SA10-300-14

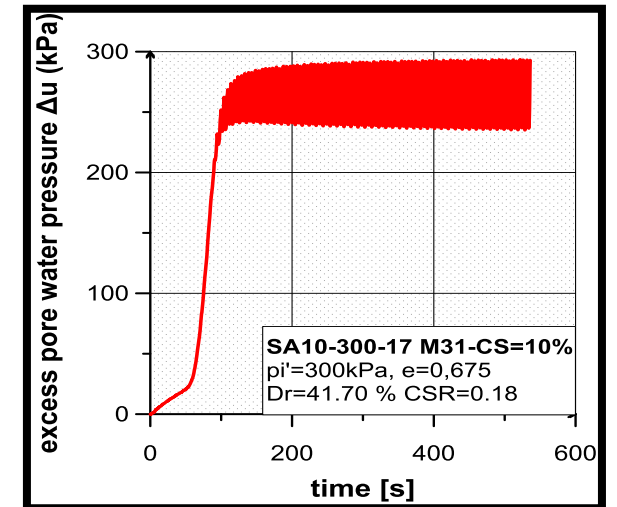
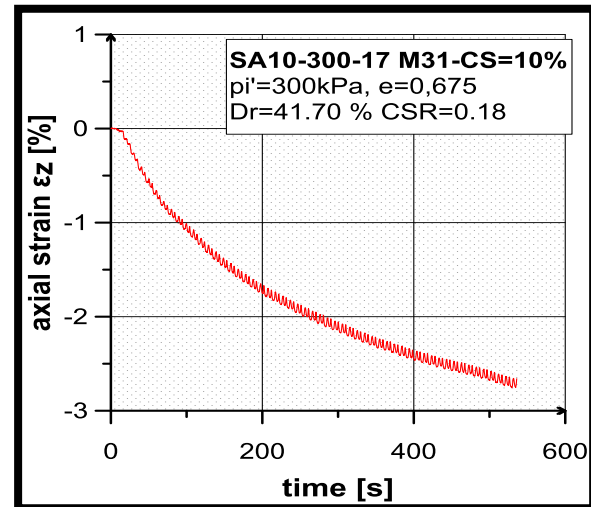
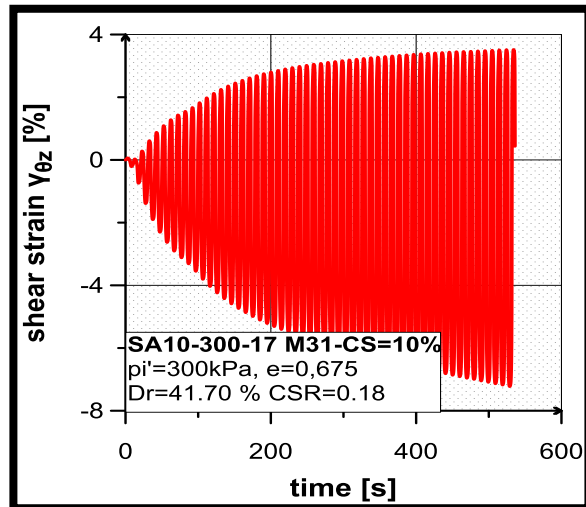
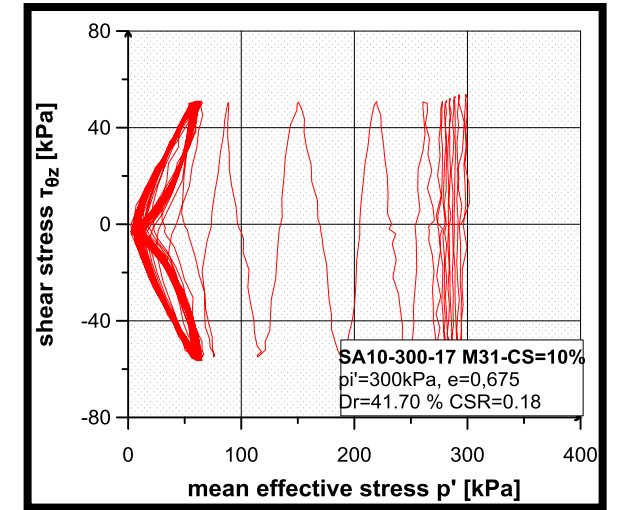
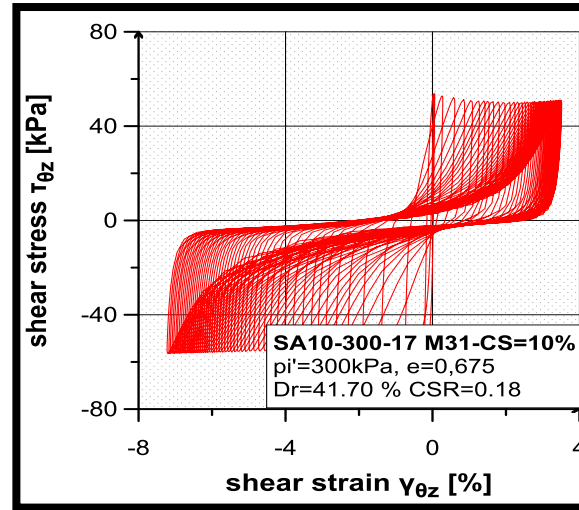
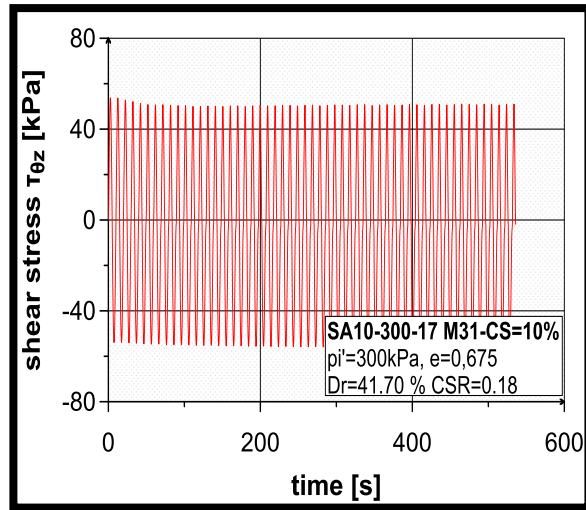




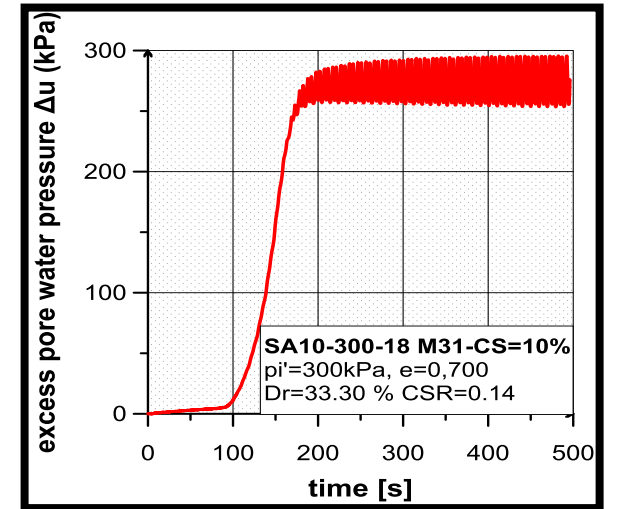
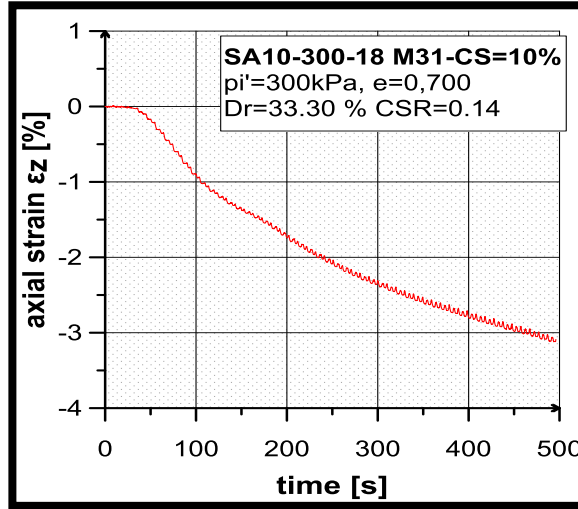
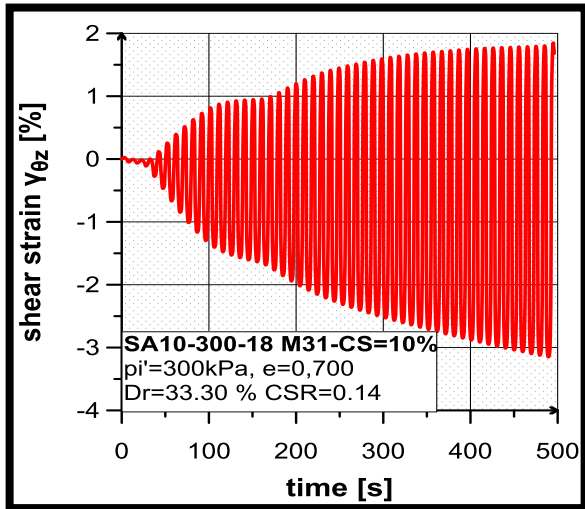
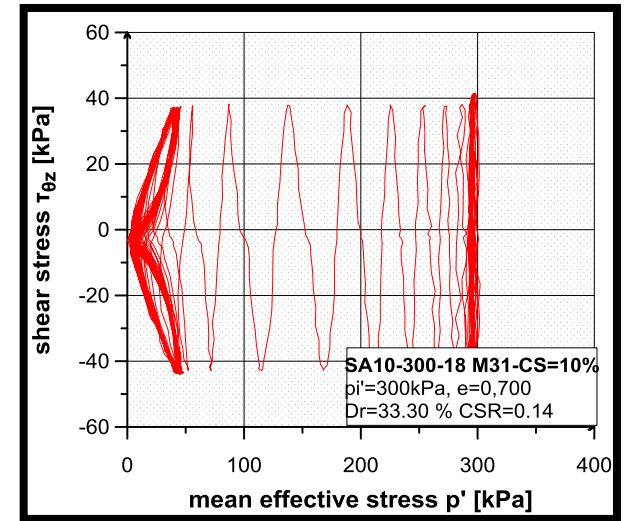
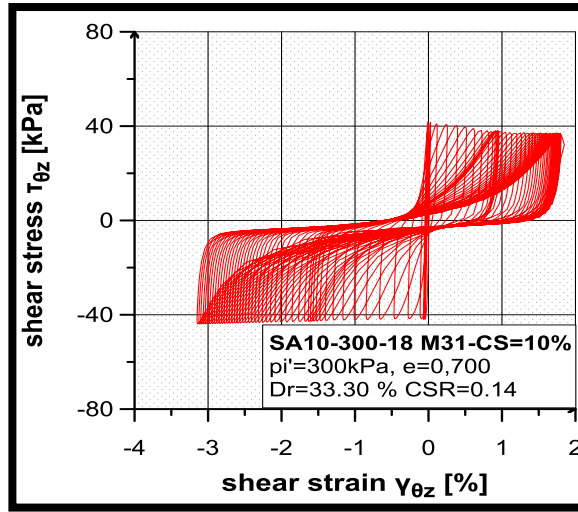
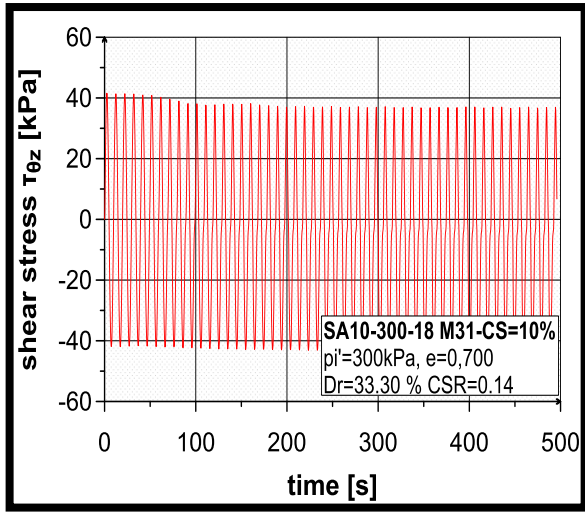
Σχήμα Π-5.19. Δοκιμή -SA10-300-15



Σχήμα Π-5.20. Δοκιμή –SA10-300-16



Σχήμα Π-5.21. Δοκμή -SA10-300-17



Σχήμα Π-5.22. Δοκιμή -SA10-300-18

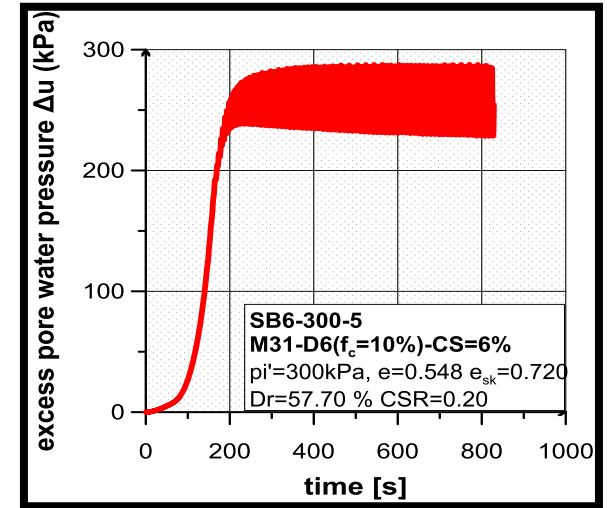
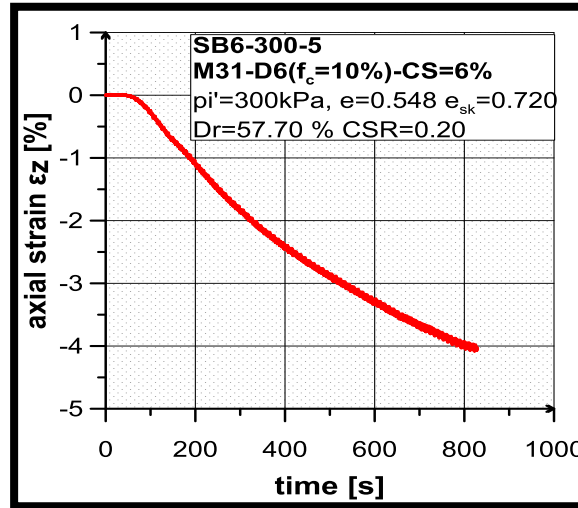
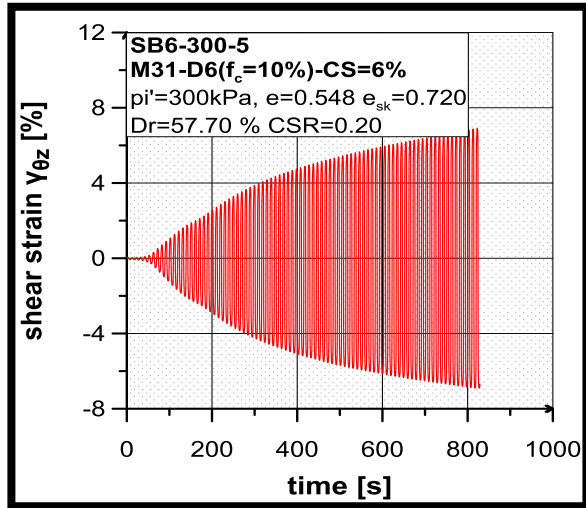
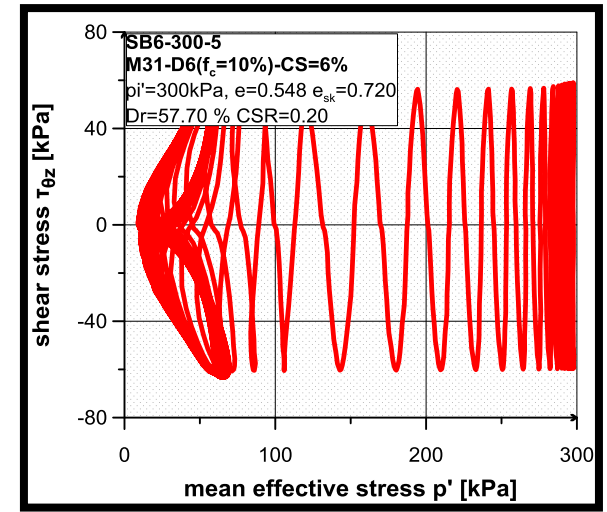
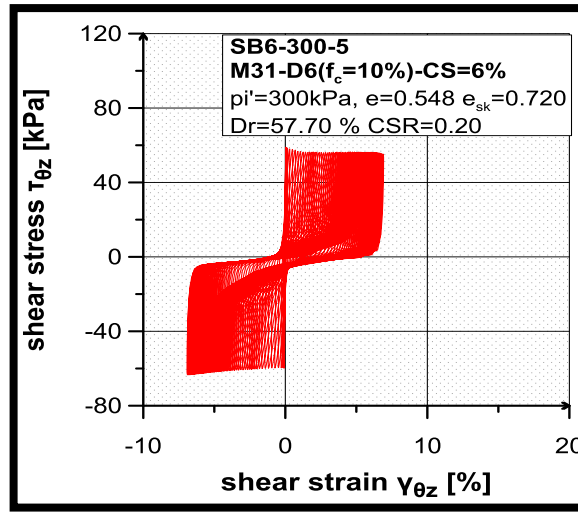
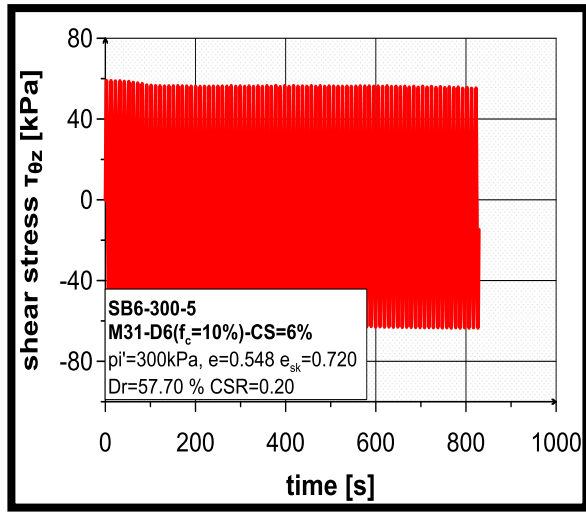
**Πίνακας Κατάταξης Πειραμάτων Ανακυκλικών Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης**

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ Μ31 & D6 CS=6%  $f_c=10\%$**

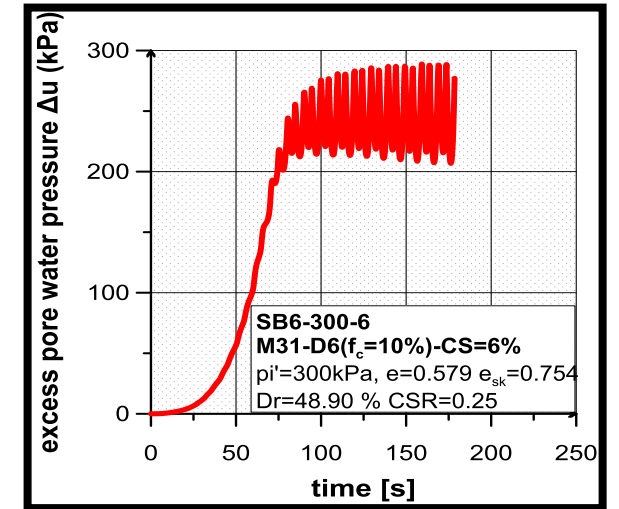
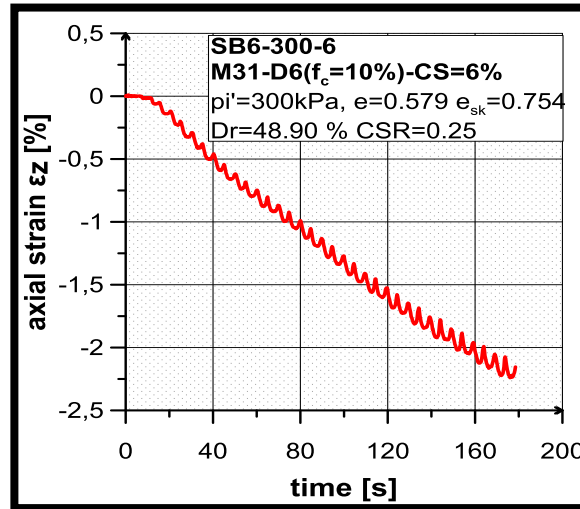
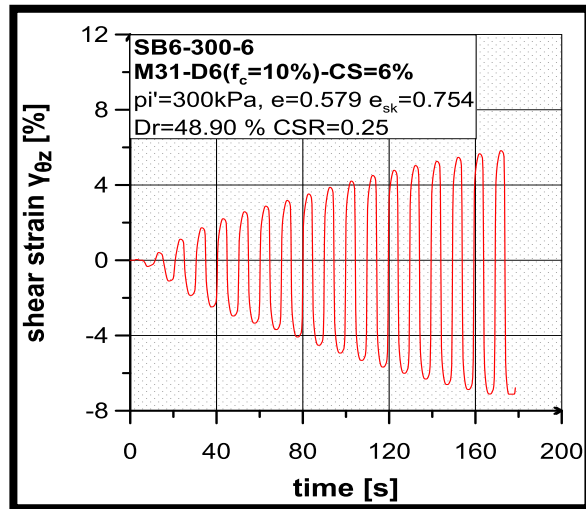
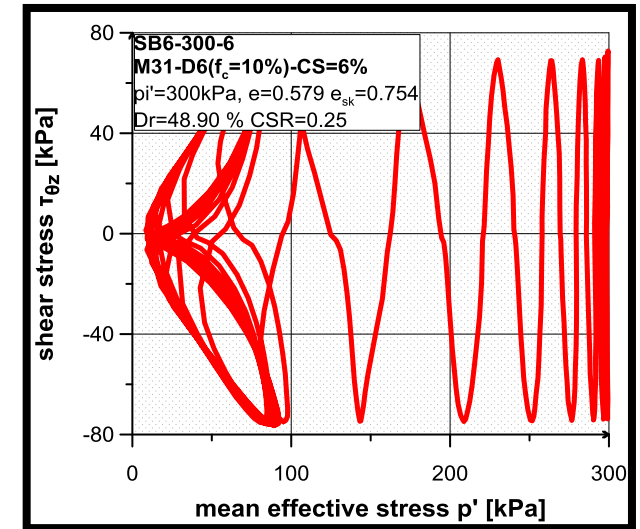
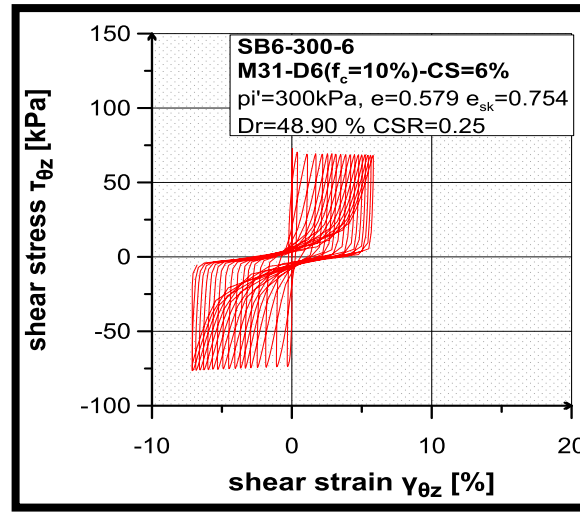
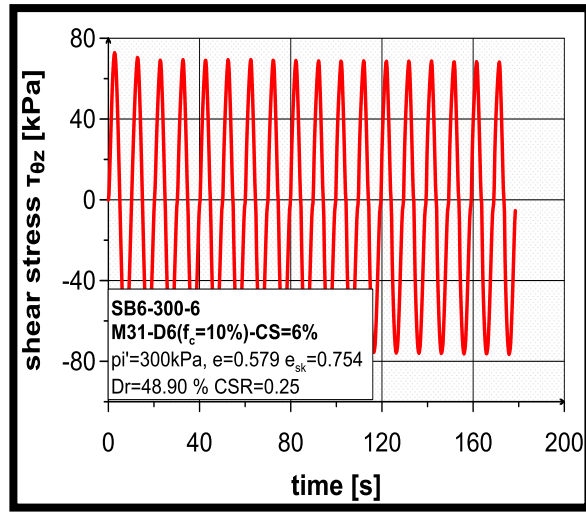
Κωδικός Δοκιμής	Έναρξη Στερεοποίησης (h)	Έναρξη Διάτμησης (h)	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων	Δείκτης Πόρων Σκελετού	Τάση Στερεοποίησης	CSR	$N_{tot}$	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
SB6-300-5	140	145	$D_r=57,8\%$	$e=0,548$	$e_{sk}=0,720$	$p_i'=300$ kPa	0,20	82,9	7,2	10,6	19,0
SB6-300-6	53	55	$D_r=48,7\%$	$e=0,579$	$e_{sk}=0,755$	$p_i'=300$ kPa	0,25	17,9	1,7	2,7	4,7
SB6-300-7	53	75	$D_r=53,9\%$	$e=0,561$	$e_{sk}=0,735$	$p_i'=300$ kPa	0,25	36,5	3,7	5,6	9,7
SB6-300-8	53	75	$D_r=61,3\%$	$e=0,536$	$e_{sk}=0,706$	$p_i'=300$ kPa	0,30	24,6	1,7	2,7	5,2

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ Μ31 & D6 CS=10%  $f_c=10\%$**

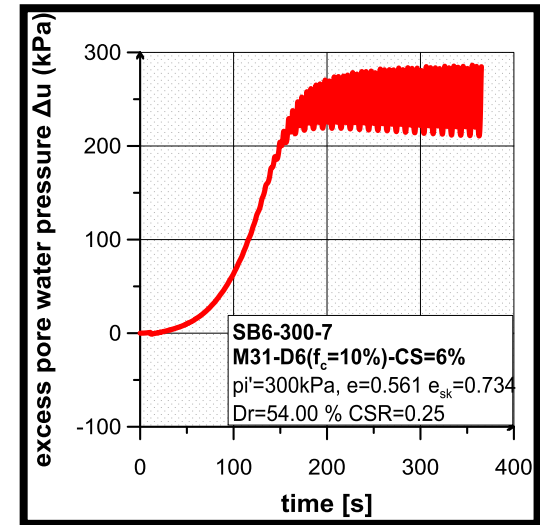
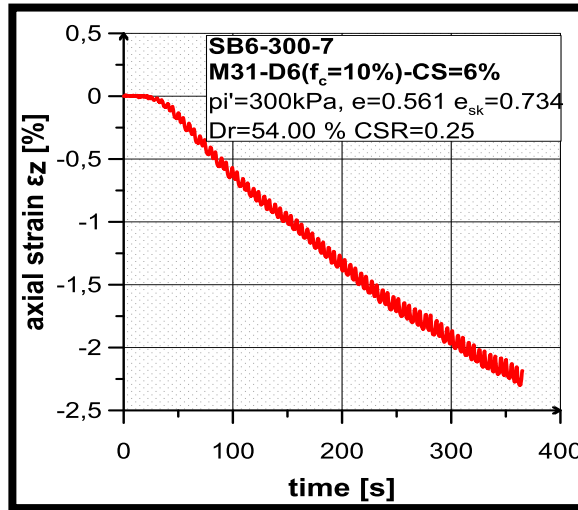
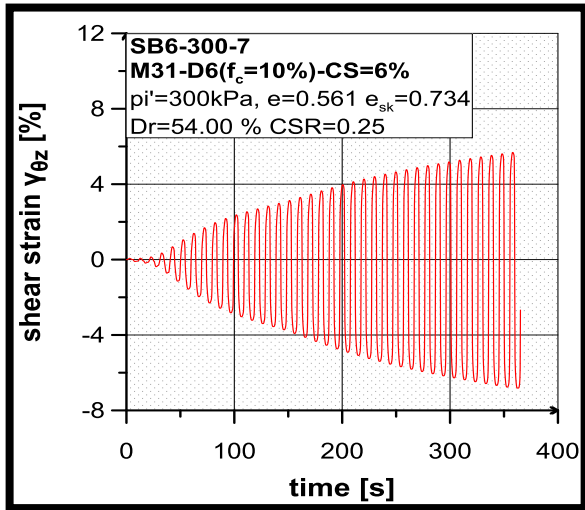
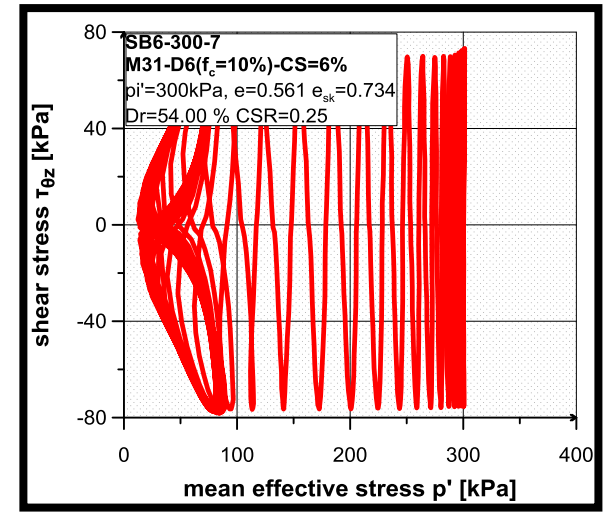
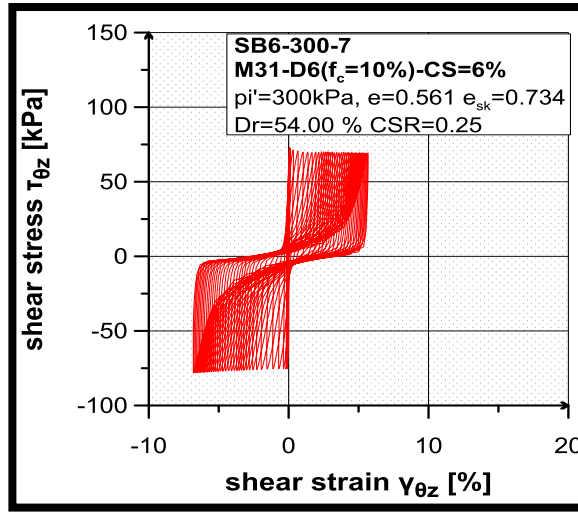
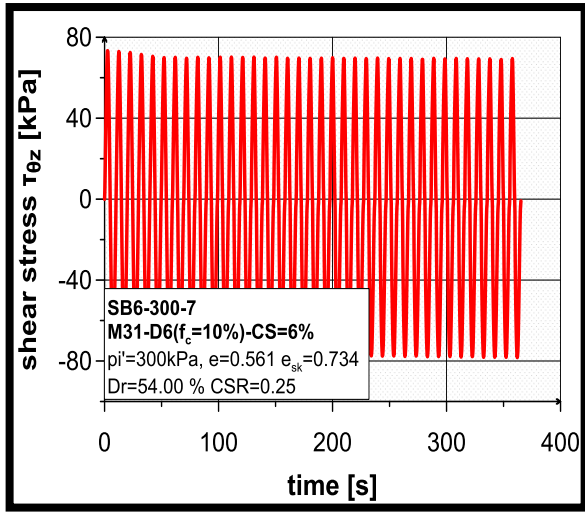
Κωδικός Δοκιμής	Έναρξη Στερεοποίησης (h)	Έναρξη Διάτμησης (h)	Σχετική Πυκνότητα	Δείκτης Πόρων	Δείκτης Πόρων Σκελετού	Τάση Στερεοποίησης	CSR	$N_{tot}$	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
SB10-300-1	50	75	$D_r=52,3\%$	$e=0,567$	$e_{sk}=0,741$	$p_i'=300$ kPa	0,18	150,0	21,0	39,4	115,0
SB10-300-2	50	70	$D_r=56,0\%$	$e=0,554$	$e_{sk}=0,727$	$p_i'=300$ kPa	0,30	31,3	2,7	5,6	13,6
SB10-300-3	50	75	$D_r=57,8\%$	$e=0,548$	$e_{sk}=0,720$	$p_i'=300$ kPa	0,35	41,4	1,2	2,2	4,7
SB10-300-4	50	65	$D_r=50,5\%$	$e=0,573$	$e_{sk}=0,748$	$p_i'=300$ kPa	0,25	54,3	2,6	4,2	8,1



Σχήμα Π-5.23. Δοκιμή -SB10-300-5

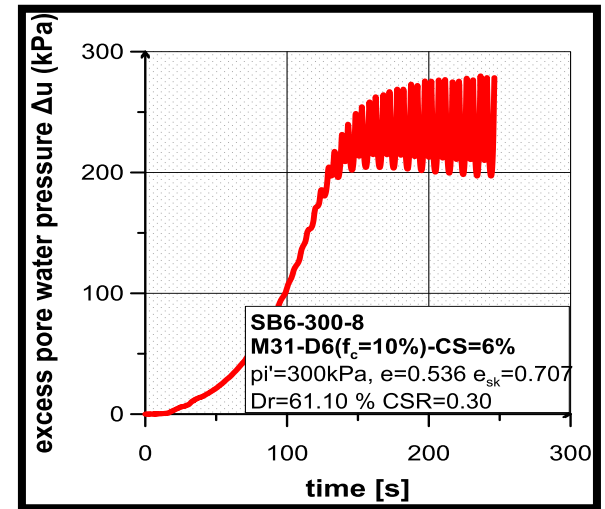
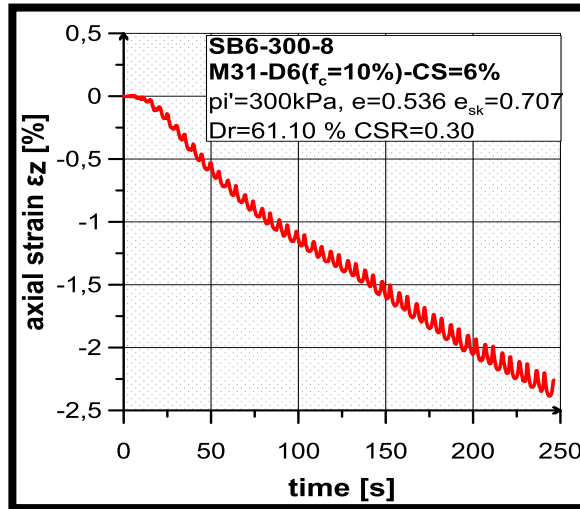
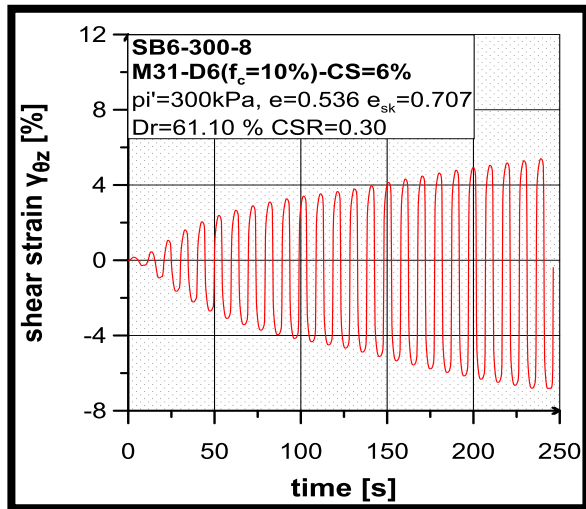
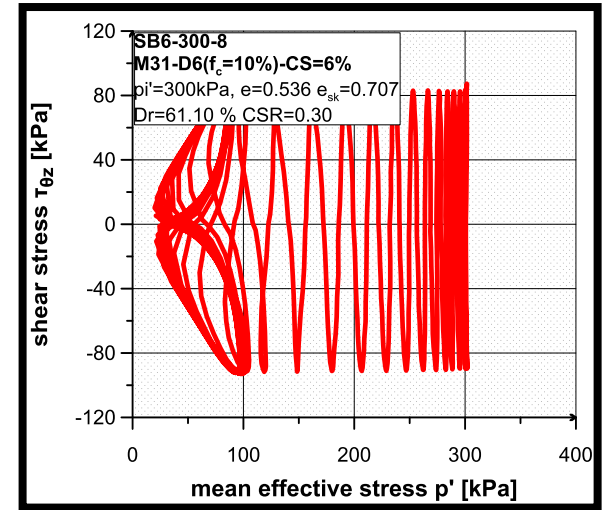
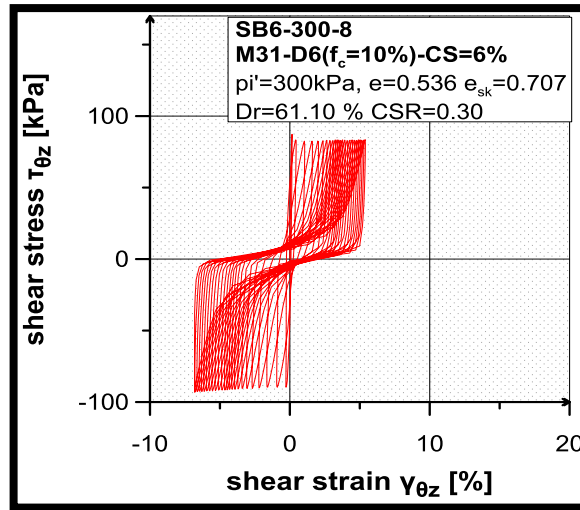
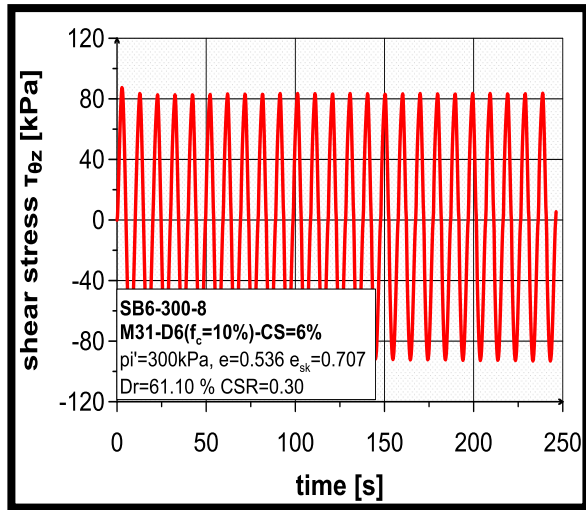


Σχήμα Π-5.24. Δοκιμή –SB10-300-6

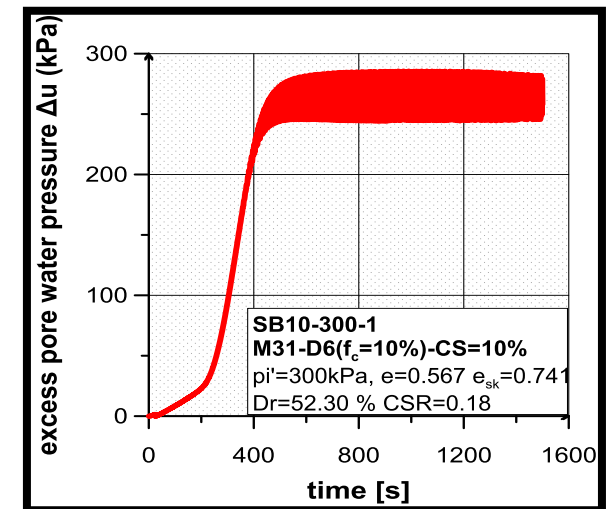
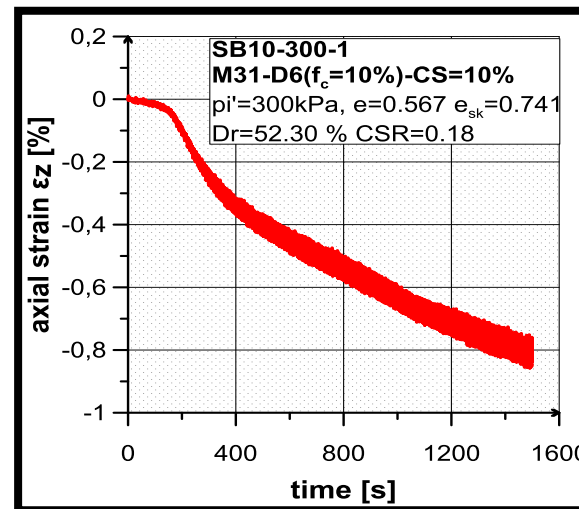
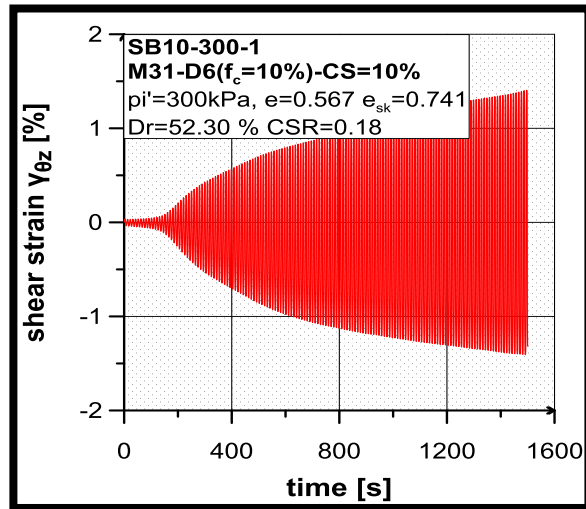
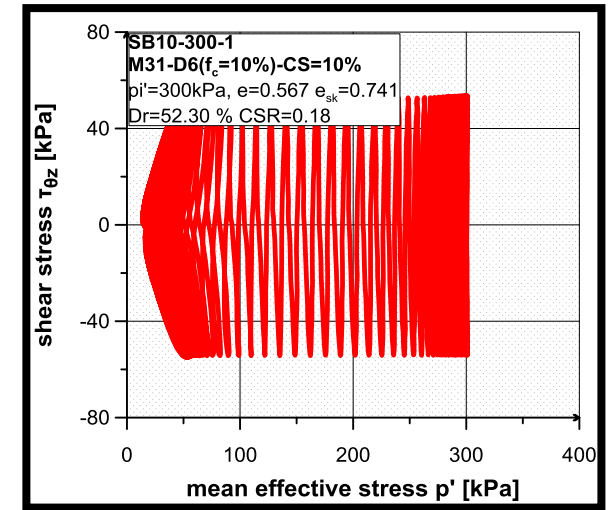
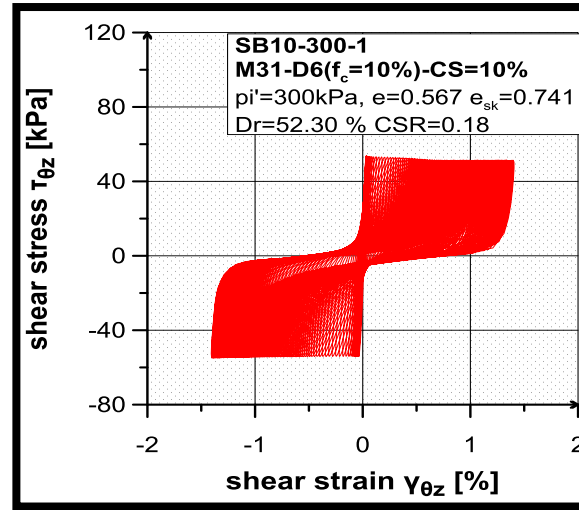
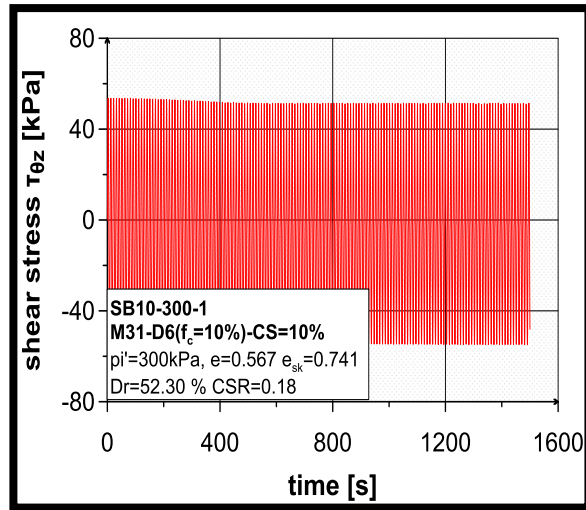


Σχήμα Π-5.25. Δοκιμή –SB10-300-7

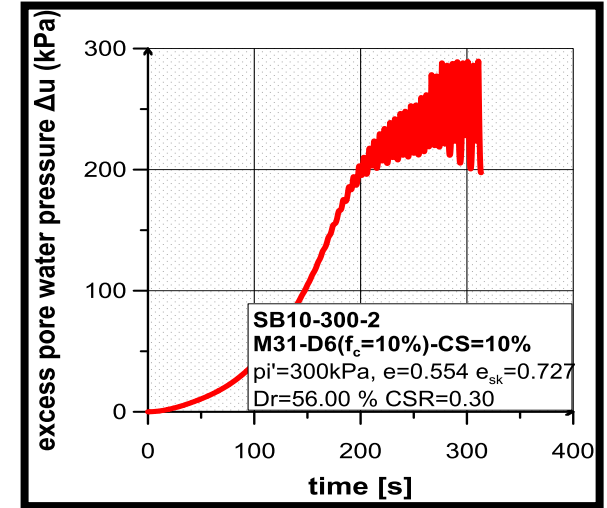
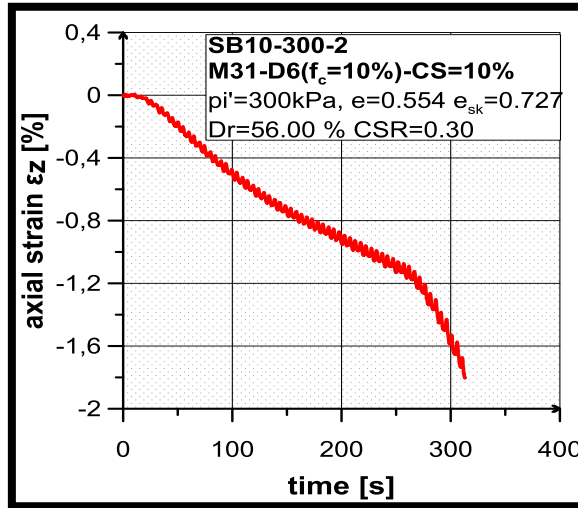
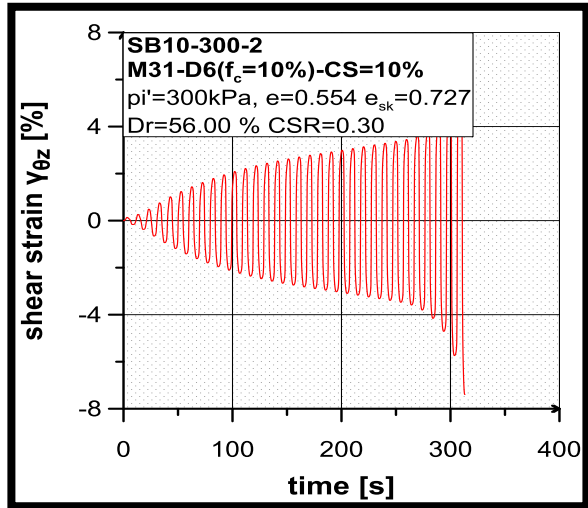
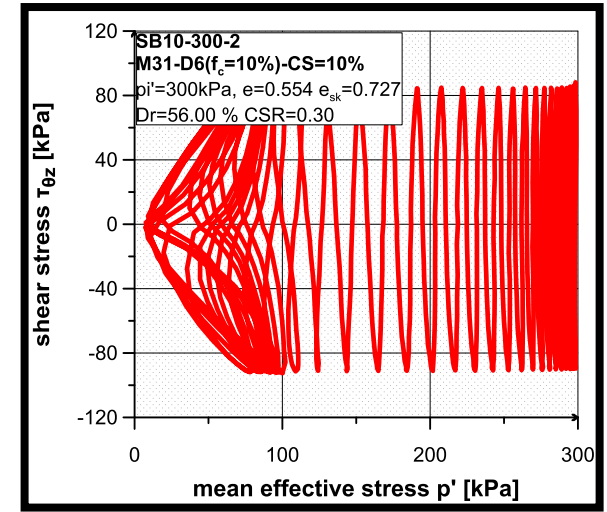
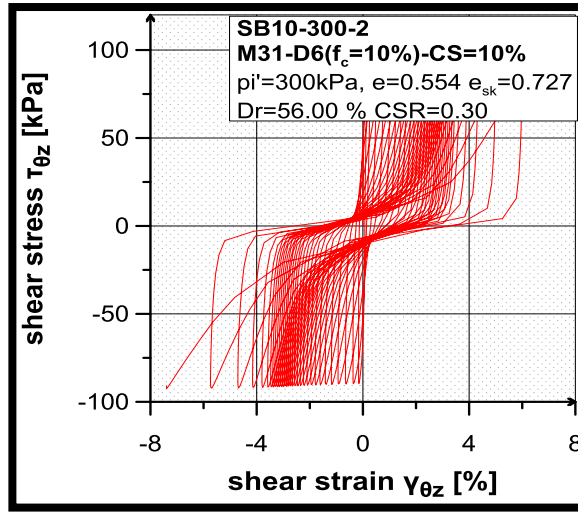
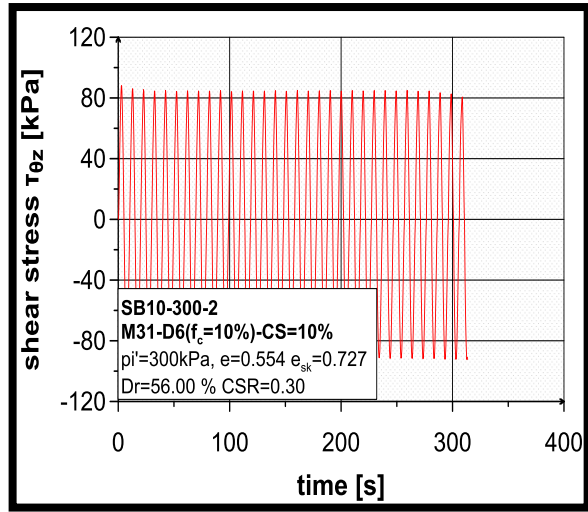




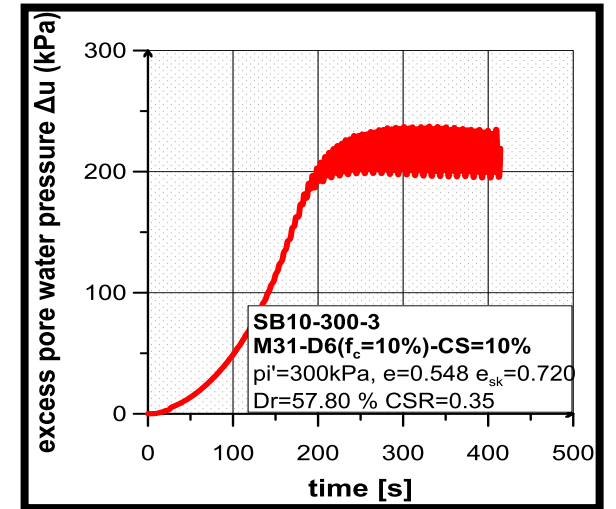
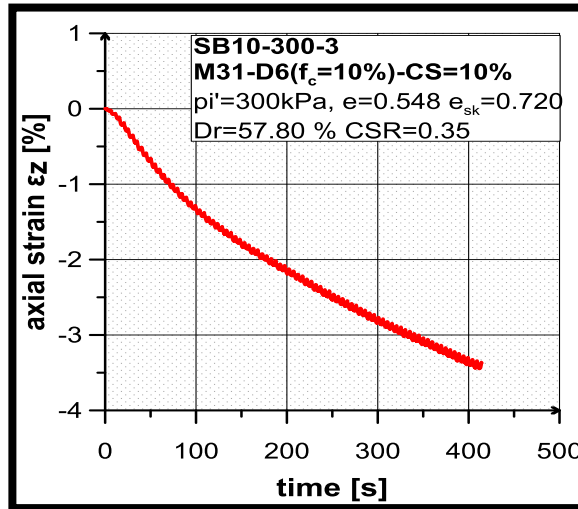
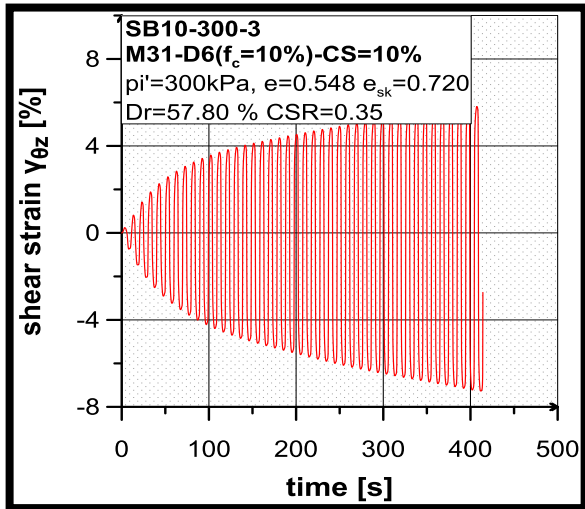
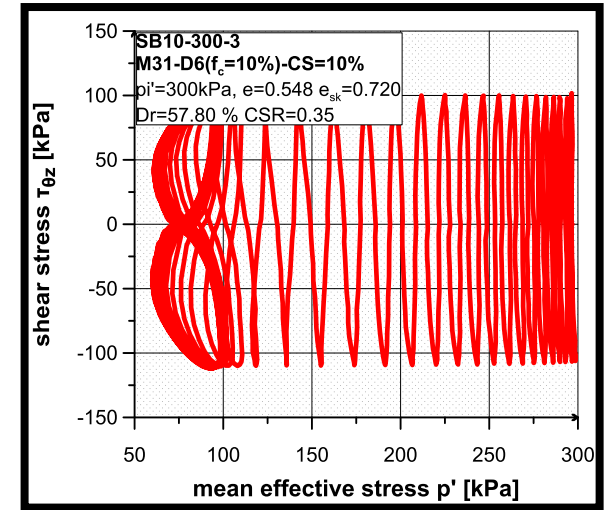
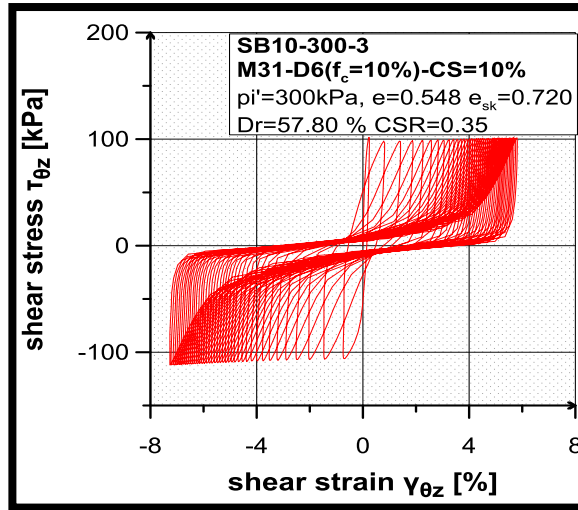
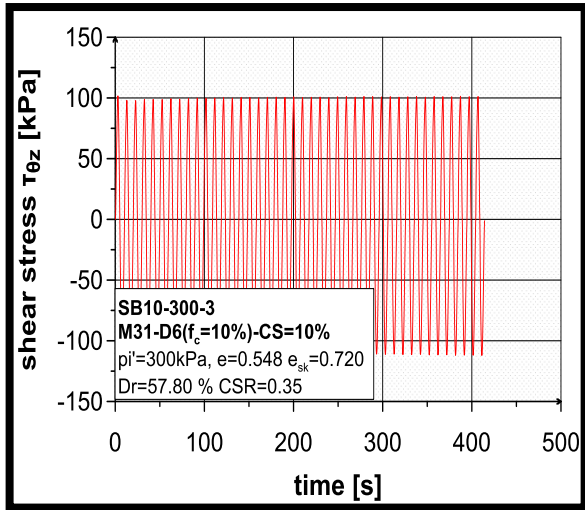
Σχήμα Π-5.26. Δοκιμή –SB10-300-8



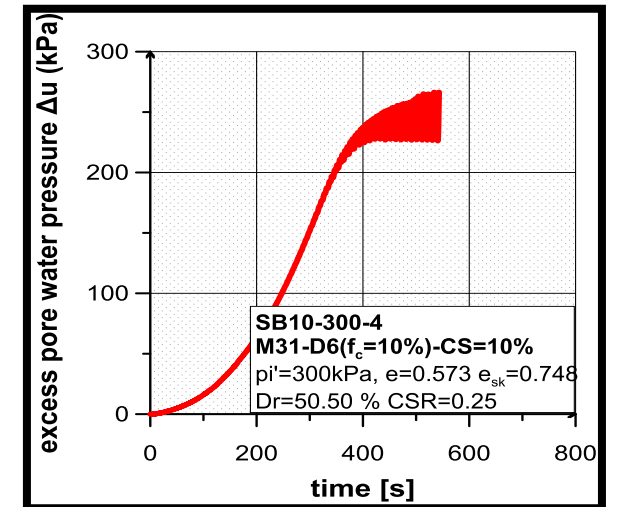
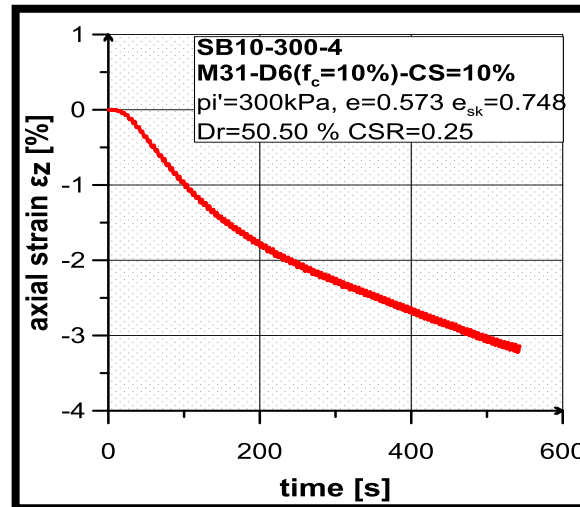
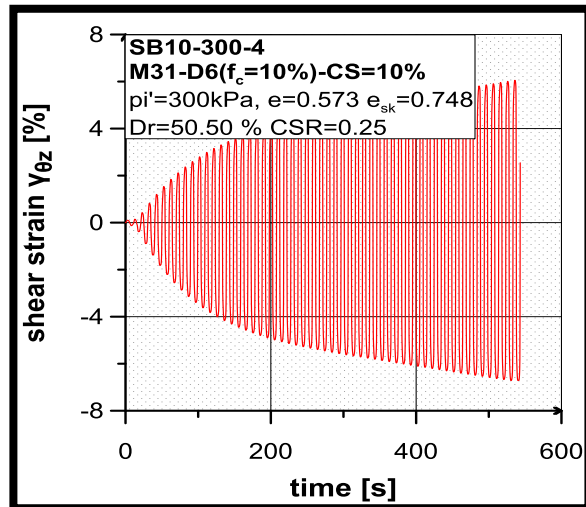
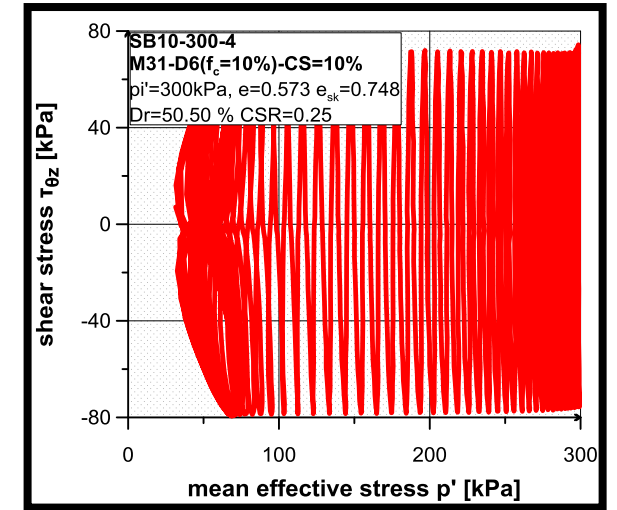
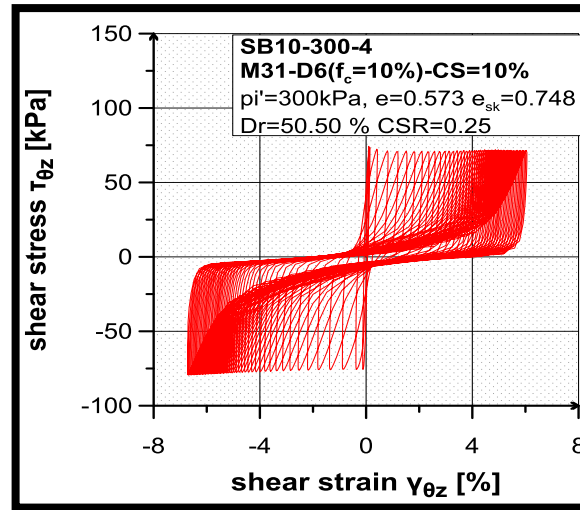
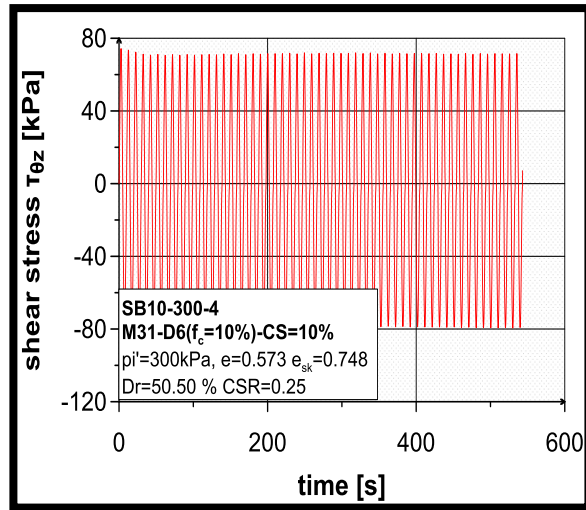
Σχήμα Π-5.27. Δοκιμή –SB10-300-1



Σχήμα Π-5.28. Δοκιμή –SB10-300-2



Σχήμα Π-5.29. Δοκιμή –SB10-300-3



Σχήμα Π-5.30. Δοκμή -SB10-300-4