

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΑΜΜΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ANISOTROPIC
BEHAVIOUR OF SAND STABILIZED WITH COLLOIDAL SILICA**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΕΛΕΝΗΣ-ΜΑΡΙΑΣ Ε. ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ

*Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός
Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
M.Sc. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

DOCTORAL THESIS

of

ELENI-MARIA E. PAVLOPOULOU

*Diploma of Civil Engineering,
National Technical University of Athens
M.Sc. National Technical University of Athens*

Επιβλέπουσα:

Βασιλική Ν. Γεωργιάννου Καθηγήτρια,
Ε.Μ.Π.

Supervisor:

Vasiliki N. Georgiannou
Professor, NTUA

Αθήνα, Ιούνιος 2023

Athens, June 2023



**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΑΜΜΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΕΛΕΝΗΣ-ΜΑΡΙΑΣ Ε. ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc. Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

*Η διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου προς
εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου της Διδάκτορος Μηχανικού.*

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Β. Γεωργιάννου,
Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)
2. Γ. Τσιαμπάος,
Ομότιμος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
3. Αχ. Παπαδημητρίου,
Αναπλ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Β. Γεωργιάννου,
Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)
2. Γ. Τσιαμπάος,
Ομότιμος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
3. Αχ. Παπαδημητρίου,
Αναπλ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
4. Γ. Μπουκοβάλας,
Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
5. Ν. Γερόλυμος,
Αναπλ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.
6. Θ. Τίκα,
Καθηγήτρια, Α.Π.Θ.
7. Ι. Μάρκου,
Καθηγητής, Δ.Π.Θ.

Copyright © Ελένη-Μαρία Ε. Παυλοπούλου, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η διανομή, η αναπαραγωγή, η μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διδακτορική Διατριβή της Ελένης-Μαρίας Παυλοπούλου

**«Πειραματική Διερεύνηση της Ανισότροπης Συμπεριφοράς Άμμου
Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία»**

Επιβλέπουσα: Βασιλική Ν. Γεωργιάννου Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π

Περίληψη

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στην ανωδομή, έως και την πλήρη αστοχία. Η αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών μπορεί να επιτευχθεί με μία σειρά από καθιερωμένες μεθοδολογίες βελτίωσης του εδάφους πριν την κατασκευή του κτιρίου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Σε περιπτώσεις που η βελτίωση του εδάφους εφαρμόζεται σε περιοχές με υφιστάμενες κατασκευές, οι κατάλληλες μέθοδοι είναι λίγες και συνήθως συνοδεύονται από πολλά μειονεκτήματα (βελτίωση του εδάφους σε μικρό τμήμα της κάτοψης, πρόκληση προβλημάτων στη θεμελίωση λόγω της εισπίεσης ενεμάτων υπό υψηλή πίεση κλπ.). Οι ανωτέρω συνθήκες οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου βελτίωσης εδαφών, της παθητικής σταθεροποίησης (passive site stabilization) (Gallagher, 2000). Πρόκειται για την εισπίεση με χαμηλή υδραυλική κλίση ενός σταθεροποιητή (stabiliser), δηλαδή ενός υλικού που αποτελείται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανο-σωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της κάτοψης μιας υφιστάμενης κατασκευής. Η διήθηση του σταθεροποιητή μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της φυσικής ροής κατασκευάζοντας ένα φρέαρ με τον σταθεροποιητή ανάντη της κατασκευής, είτε επιβάλλοντας συνθήκες ροής κατασκευάζοντας φρέατα παροχής και άντλησης με χαμηλή υδραυλική κλίση.

Η κολλοειδής πυριτία Ludox-SM[®] που επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής στην παρούσα διατριβή αρχικά έχει τη μορφή υγρού υαλομάζας και με την πάροδο του χρόνου υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη, με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του. Ρυθμίζοντας τους κατάλληλους παράγοντες (pH, περιεκτικότητα σε αλάτι, θερμοκρασία) η μετατροπή γίνεται σε συγκεκριμένο χρόνο ώστε να έχει ολοκληρωθεί η διοχέτευση ομοιόμορφα σε όλη την περιοχή της κάτοψης. Μέσω του εμπλουτισμού του υγρού των πόρων με τον σταθεροποιητή αλλάζει η μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού - υγρού των πόρων και επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή, αυξημένη διαστολικότητα και αντίσταση σε ρευστοποίηση (Gallagher & Mitchell, 2002; Kodaka et al., 2005; Díaz-Rodríguez et al., 2008; Porcino et al., 2011, 2012; Vranna & Tika, 2015). Παρόλο που οι προαναφερθείσες εργαστηριακές μελέτες έχουν δώσει απαντήσεις σε αρκετά ζητήματα που αφορούν αυτή τη νέα ελκυστική μέθοδο σταθεροποίησης άμμων, τα αποτελέσματά τους βασίζονται στις κλασικές δοκιμές μέτρησης της αντίστασης σε ρευστοποίηση στην τριαξονική συσκευή ή τη συσκευή απλής διάτμησης οι οποίες δεν έχουν τη δυνατότητα διερεύνησης της ανισότροπης συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων άμμων.

Ο όρος της ανισοτροπίας των εδαφικών υλικών αναφέρεται στην εξάρτηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς (αντοχή, διαστολικότητα, δυσμησία) από τη διεύθυνση της φόρτισης λόγω της ανισότροπης δομής τους. Η προσανατολισμένη εσωτερική διάταξη των κόκκων και των κενών, δηλαδή η διάταξη των κόκκων, ο προσανατολισμός των διανυσμάτων που είναι κάθετα στις μεταξύ τους επαφές, η κατανομή και ο προσανατολισμός των κενών ορίζουν τη δομή (fabric) του υλικού (Mitchell & Kenichi, 1976).

Για την εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στην πράξη απαιτείται η ολοκληρωμένη γνώση της απόκρισης του σταθεροποιημένου εδάφους υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Στο πλαίσιο της διατριβής διερευνάται πειραματικά η αποτελεσματικότητα της «νέας» μεθόδου βελτίωσης μη συνεκτικών εδαφών μέσω δοκιμών μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης εξετάζοντας την επίδραση του σχήματος των κόκκων, των συνθηκών στράγγισης και της ενεργού τάσης μέσω κλασικών δοκιμών αλλά και υπό συνθήκες γενικευμένης φόρτισης μέσω εξειδικευμένων δοκιμών στη Συσκευή Στρέψης Κοίλου Κυλινδρικού Δοκιμίου.

Η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη ενδοσιμότητα κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση διευκολύνοντας την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων (πλαστικές παραμορφώσεις), ενώ κατά την αποφόρτιση δε φαίνεται να επηρεάζει την ανάπτυξη των οιονεί ελαστικών παραμορφώσεων. Υπό τριαξονική θλίψη η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη διαστολικότητα σε σχέση με την άμμο που οδηγεί σε υψηλότερη μέγιστη αντοχή. Η βελτιωμένη αντοχή της άμμου και η έντονη τάση για διαστολή, μετά τη σταθεροποίησή της με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας CS=10%, μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της τάσης και τη συσσώρευση της διατμητικής παραμόρφωσης. Στην τελική κρίσιμη κατάσταση ο λόγος

τάσεων των σταθεροποιημένων δοκιμίων προσομοιάζει τον λόγο των δοκιμίων άμμου όταν πλέον κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά τριβής στις επαφές των κόκκων.

Κατά την ανακυκλική φόρτιση της χαλαρής άμμου εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων με ταυτόχρονη ανάπτυξη μεγάλης αξονικής παραμόρφωσης όταν η τασική διαδρομή κατά την ανακυκλική φόρτιση φτάσει την οριακή γραμμή αστάθειας και το δοκίμιο οδηγείται στη ρευστοποίηση. Στη σταθεροποιημένη άμμο η αξονική παραμόρφωση συσσωρεύεται σταδιακά από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και παρά τον μηδενισμό της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση), το δοκίμιο δεν ρευστοποιείται. Ενώ το αρχικό μέτρο δυστημσίας της φυσικής άμμου είναι ίσο ή μεγαλύτερο από εκείνο της σταθεροποιημένης άμμου, κατά την αρχική ρευστοποίηση μειώνεται ραγδαία και πρακτικά μηδενίζεται, ενώ η δυστημσία της σταθεροποιημένης άμμου απομειώνεται σταδιακά.

Ωστόσο, επειδή στα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα οι αρχικές εντατικές καταστάσεις και οι συνθήκες φόρτισης είναι σύνθετες περιλαμβάνοντας αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) όσο και στη διεύθυνσή τους, η μελέτη της απόκρισης του εδάφους υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης είναι αναγκαία. Γι' αυτό το σκοπό, για πρώτη φορά μελετάται η επίδραση της μεταβολής της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου μέσω δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και εξειδικευμένων πειραμάτων στη συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Κυλινδρικού Δοκιμίου. Αρχικά προσδιορίστηκε ένα πλαίσιο που περιγράφει την ανισότροπη απόκριση της άμμου και στη συνέχεια το πλαίσιο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως βάση αναφοράς για την ανάδειξη της βελτιωμένης συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου.

Σε δοκιμές μονοτονικής φόρτισης υπό σταθερή γωνία α στην άμμο, η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η μέγιστη κύρια τάση είναι κάθετη στο επίπεδο διαστρωμάτωσης ($\alpha=0^\circ$). Η απόκριση της άμμου γίνεται πιο συστολική όσο ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή της να μειώνεται με τη γωνία α . Για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) οδηγεί σε σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής και αύξηση της συστολικότητας. Η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει έντονα ανισότροπη συμπεριφορά όπως η άμμος. Όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο η αντοχή της μειώνεται σημαντικά και η συστολή αυξάνεται. Η μικρότερη αντοχή παρατηρείται όταν $\alpha=60^\circ$ όπως και στην περίπτωση της πυκνής άμμου M31. Ανεξάρτητα της γωνίας α η μέγιστη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου είναι μεγαλύτερη και από αυτή της πυκνής άμμου M31. Επιπρόσθετα, η προσθήκη σταθεροποιητή μειώνει τη συστολή και αυξάνει τη διαστολικότητα. Ωστόσο, για $\alpha \geq 45^\circ$ η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει ασθενέστερη απόκριση από την άμμο σε χαμηλό λόγο τάσεων, με τη συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης υπό σταθερό όγκο. Όταν η επιβολή της φόρτισης γίνεται μέσω ελέγχου της τάσης και η στράγγιση είτε είναι εμποδιζόμενη είτε ελεύθερη, η δεύτερη είναι εφικτή πριν και μετά την ασταθή απόκριση, η σταθεροποιημένη χαλαρή άμμος εμφανίζει ασταθή

συμπεριφορά, όπως θα έκανε και η χαλαρή άμμος υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στη συνέχεια της φόρτισης, όταν αρχίζει η διαστολική συμπεριφορά, η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή και από την πυκνότερη άμμο.

Στις δοκιμές συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης q , μέσης ενεργού τάσης p' και παραμέτρου b , η απόκριση του δοκιμίου λόγω της περιστροφής των αξόνων αντανακλά αποκλειστικά την διαφορετική δομή στην αρχή της δοκιμής. Κατά τη στροφή των αξόνων συσσωρεύεται συστολική ογκομετρική παραμόρφωση και αναπτύσσονται πλαστικές επιμέρους παραμορφώσεις. Το μέγεθος των παραμορφώσεων εξαρτάται από την πυκνότητα της άμμου, την τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης και του επιβαλλόμενου λόγου τάσεων. Η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό υψηλό λόγο τάσεων οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων και σε αστοχία των δοκιμίων.

Απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμικότητα) παρατηρείται στη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο υπό δοκιμές μονοτονικής φόρτισης ειδικά όταν $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$. Η απόκλιση είναι ιδιαίτερα σημαντική στο αρχικό στάδιο της φόρτισης. Σε σχέση με τη φόρτιση υπό σταθερή γωνία α , η μη συγγραμικότητα της άμμου είναι πιο έντονη υπό συνεχή μεταβολή της γωνίας α . Η γωνία μη ομοαξονικότητας μειώνεται όταν η στροφή πραγματοποιείται υπό μεγαλύτερο λόγο τάσεων και όταν αυξάνεται η παράμετρος b . Γενικά, η συμπεριφορά της άμμου γίνεται πρακτικά ομοαξονική με τη συσσώρευση διατμητικής παραμόρφωσης κατά την όδευση προς την αστοχία.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

Doctoral Thesis of Eleni-Maria E. Pavlopoulou

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ANISOTROPIC BEHAVIOUR OF SAND STABILIZED WITH COLLOIDAL SILICA

Supervisor: Vasiliki N. Georgiannou, Professor, NTUA

Extended Summary and Conclusions

1. Introduction

Soil improvement techniques have traditionally been implemented in liquefiable soils (Seed and Lee, 1966) to increase their liquefaction resistance and limit deformations. Dynamic compaction, vibrocompaction, vibroflotation and pressure grouting of cement, clay, or other chemical solutions through a network of boreholes have been successfully applied in the field (D'Appolonia et al., 1955; Donovan et al., 1984; Maher et al., 1994; Mayne et al., 1984). The first three methods provide direct control of the density of a sand deposit but may not be feasible in developed sites where methods based on grouting may be more suitable. In recent years, a new '**passive site stabilization**' method has been proposed for the remediation of liquefaction potential in developed sites under the least disturbance (Gallagher and Mitchell, 2002).

Dilute colloidal silica or sodium silicate hydrosol (Iler, 1979; Brinker & Scherer, 1990) is slowly injected into the ground and transported through the saturated soil mass utilizing natural or enhanced groundwater flow (**Figure 1**) (Gallagher et al., 2007; Jurinak et al. 1989), or by electro-osmosis (Thevanayagam & Jia, 2003). The silica hydrosol has low viscosity during the injection phase and thickens in a controllable manner to form a stable, non-toxic gel; the gel fills the pore space, retains the pore water, and supports the grain structure. The feasibility of this method has been examined in field tests reported by Gallagher et al. (2007).

In the laboratory, a number of studies were undertaken to investigate the behavior of stabilized sands. A review of the literature suggested that sand stabilized with silica gel shows enhanced strength associated with extreme dilation (Kodaka et al. 2005; Porcino et al. 2012; Porcino and Marciànò 2017; Georgiannou et al. 2017), as well as liquefaction resistance (Gallagher and Mitchell 2002; Diaz-Rodriguez et al. 2008; Porcino et al. 2011, 2015), compared with untreated sand. Conlee et al. (2012) performed centrifuge model tests on loose sand slopes stabilized with colloidal silica and found that the stabilization prevented the lateral spreading of the slopes. However, a paradox exists at the heart of treated sand behavior. Despite its enhanced dilatancy, treated sand produces a more counterintuitive response to shearing and normal compression because it is softer compared with untreated sand. For treated sand, Spencer et al. (2007) reported a 50% lower shear modulus compared with untreated sand samples in resonant column tests. Moreover, Kodaka et al. (2005) observed higher strain rates and excess pore-water pressure accumulation under cyclic loading. Porcino et al. (2011, 2015) also observed that untreated samples developed limited shear strains before the onset of liquefaction, whereas shear strains of grouted specimens increased gradually with loading cycles in cyclic simple shear tests. Georgiannou et al. (2017) and Ciardi et al. (2020) reported higher volumetric changes under normal compression for the treated sand.

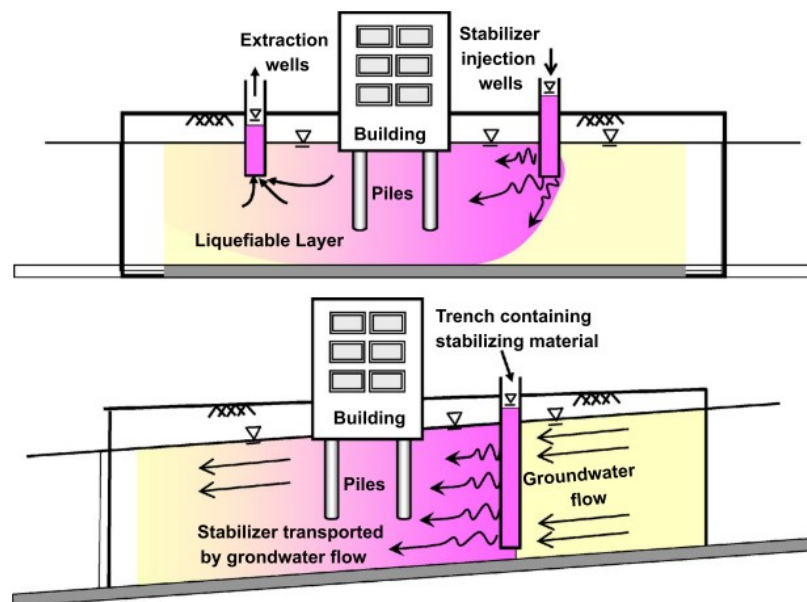


Figure 1: Concept of passive site stabilization: (a) augmented (induced); (b) natural groundwater flow (Pamuk et al., 2007)

Researchers have characterized the treated sand as sand with “cohesive” properties (Kodaka et al. 2005), as “dense” sand (Porcino et al. 2012), or as “structured” sand (Georgiannou et al. 2020). Mitchell (1976) defined ‘structure’ as the combination of fabric and interparticle bonding. Natural soil’s deposition process creates a preferred particle orientation parallel to the horizontal plane, causing a loading direction dependency (Oda. 1972, Oda et al., 1978). The primary orientation and shape of the particles, the normal

contact vectors, and the distribution of the voids can be defined as fabric. After sedimentation, fabric keeps changing during loading-unloading process, developing an induced soil anisotropy (Casagrande and Carrllo,1944, Arthur 1972, Oda 1972, Wong and Arthur 1985). The effect of fabric anisotropy on clean sand behavior has long been recognized by Bishop (1971) and studied by several researchers. However, no attention has been paid to the characterization and modeling of fabric anisotropy in stabilized sand since the laboratory tests in the literature are limited to compression tests or cyclic simple shear and triaxial tests.

Assessing soil's anisotropy is essential since most geotechnical problems involve complex loading conditions, including changes in the magnitude and direction of principal stresses ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). The angle of the σ_1 -axis to the vertical, where σ_1 is the major principal stress, is expressed as α . Rotation of the stress principal axis (PA) in varying amounts (from $\alpha=0^\circ$ to 90°) in concurrence with increasing shear stress loading is commonly encountered in soil structures such as foundations, embankments (**Figure 2**), underwater slopes, etc., (Ishihara & Towhata, 1983; Zdravković et al., 2002; Wijewickreme & Vaid, 2008).

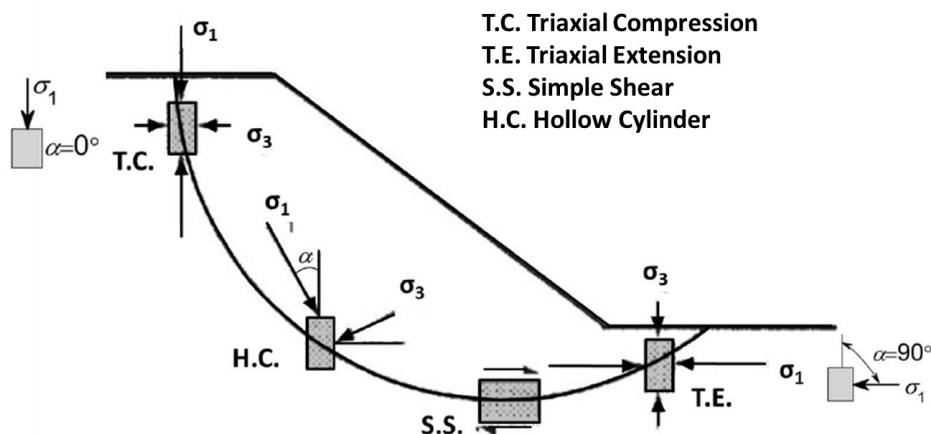


Figure 2: Limit equilibrium stress state beneath an embankment

To assess the influence of clean sand's anisotropy, triaxial tests were usually employed to evaluate the mechanical response of sands. Lower strength in extension than in compression loading mode was repeatably observed (Miura and Toki, 1984, Vaid et al., 1990, De Gennaro et al., 2004, Georgiannou, 2006). In conventional triaxial testing, the state of the stress is axisymmetric. In compression mode, the intermediate principal stress (σ_2) is equal to the minor principal stress (σ_3); thus, the intermediate principal stress parameter is equal to zero ($b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 0$), and the direction of the major principal stress is parallel to the vertical axis ($\alpha=0^\circ$). On the contrary, in extension mode, the intermediate principal stress (σ_2) is equal to the major principal stress (σ_1); thus, $b=1$, and the direction of the major principal stress is normal to the vertical axis ($\alpha=90^\circ$).

To investigate soil anisotropy without advanced equipment, some researchers prepared specimens with different angles of the bedding plane (Oda 1972, Arthur and Menzies 1972,

Guo 2008, Tong et al. 2014, Farhadi et al. 2017). Their results indicate that the soil strength depends strongly on the primary bedding plane orientation. Utilizing the Hollow Cylinder Apparatus (HCA) that enables independent control not only of the magnitude of the three principal stresses ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) but also of the inclination of the major–minor principal stress axes (α) a number of studies were conducted focusing on undrained loading at various fixed principal stress directions (in the range $\alpha=0^\circ$ to $\alpha=90^\circ$) (M. Yoshimine et al., 1998; Nakata et al., 1998; Shibuya et al., 2003a; Georgiannou et al., 2018; P. K. Triantafyllos et al., 2021). In general, as the direction of the major principal stress declines from the vertical direction, sands exhibit brittleness, the strain response becomes softer, and the stress ratios at peak state diminish due to the alignment of the major principal stress direction toward the weak horizontal bedding or parallel to the bedding plane.

Earthquakes, sea waves, or traffic loading induce continuous rotation of principal stress axes, also known as rotational shear (Ishihara & Towhata, 1983; Zdravković et al., 2002; Wijewickreme & Vaid, 2008). Rotational shear tests can be performed in a Hollow cylinder apparatus. During these tests, the principal stress direction changes while the principal stress values remain constant. Stress rotation is applied continuously, initiating at $\alpha=0^\circ$, and the stress path in $q - p'$ space is a stationary point. Stress paths are also plotted on the deviatoric stress plane introduced by Towhata and Ishihara, 1985, which is meaningful for HC tests since the vertical axis plots the shear stress $Y = 2\tau_{z\theta}$, which is related to the torsional mode of shearing, and the horizontal axis plots the shear stress $X = (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$, which is associated with the deviatoric compression mode of shearing (i.e., triaxial mode). The stress path is a circle, centered at the origin of the stress space, with radius equal to deviatoric stress, $q = \sigma_1 - \sigma_3$, as indicated in **Figure 3**. Under undrained conditions, even though the magnitude of applied shear stress is kept unchanged, the rotation of the principal stress axes always results in plastic deformation, pore pressure build-up, and can eventually lead to liquefaction (Ishihara & Towhata, 1983; Shibuya & Hight, 1987; Nakata et al., 1998; Yang et al., 2007). Under drained conditions, the stress-strain relationship and deformation mechanism can be better established since the effective stress paths can be fully controlled. Despite the values of the magnitudes of effective principal stresses kept constant, accumulation of volumetric contraction and shear deformation can be induced by the rotation of principal stress axes alone, mainly during the first 20 cycles (K. Miura, Miura, et al., 1986; Symes et al., 1988; Tong et al., 2010). Noncoaxiality, defined as the no coincidence of the principal stress direction and the corresponding strain increment direction, is induced when granular soils are subjected to loading paths involving principal stress rotations; indicating strong anisotropy. Noncoaxiality is stronger during continuous rotation compared to monotonic loading with fixed principal stress direction and diminishes gradually with increasing shear strains (Cai et al. 2013, Yang et al. 2015, Triantafyllos et al. 2020).

The effect of the intermediate stress parameter, b , on the response of sands has also been investigated in the past few decades (M. Yoshimine et al., 1998; Shibuya et al., 2003b;

defined as the time needed for the viscosity to rise above 100 cP, which is a threshold for a further exponential increase in viscosity. The gel time was calculated to be ten h for the 10% CS, 0.03 N, and pH = 6 hydrosol (Agapoulaki & Papadimitriou, 2018). A photo of the hydrosol with CS concentration of 10% by weight is presented in **Figure 5(a)** and after the gel formation in **Figure 5(b)**. **Figure 5(c)** shows an optical micrograph of the hydrogel.

Table 1: Properties of M31 and Longstone sands

Sand	Gs	e_{\max}	e_{\min}	D ₅₀ :mm
M31	2.66	0.870	0.528	0.3
Longstone	2.64	0.995	0.614	0.15

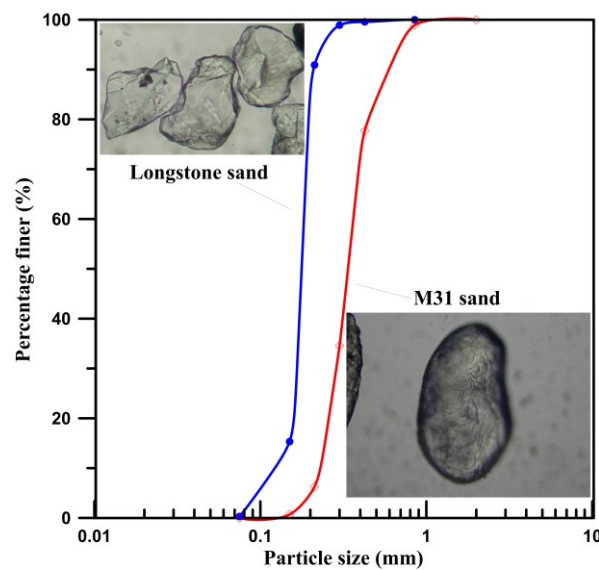


Figure 4: Grain-size distribution curves and micrographs of optical microscope images of sand grains

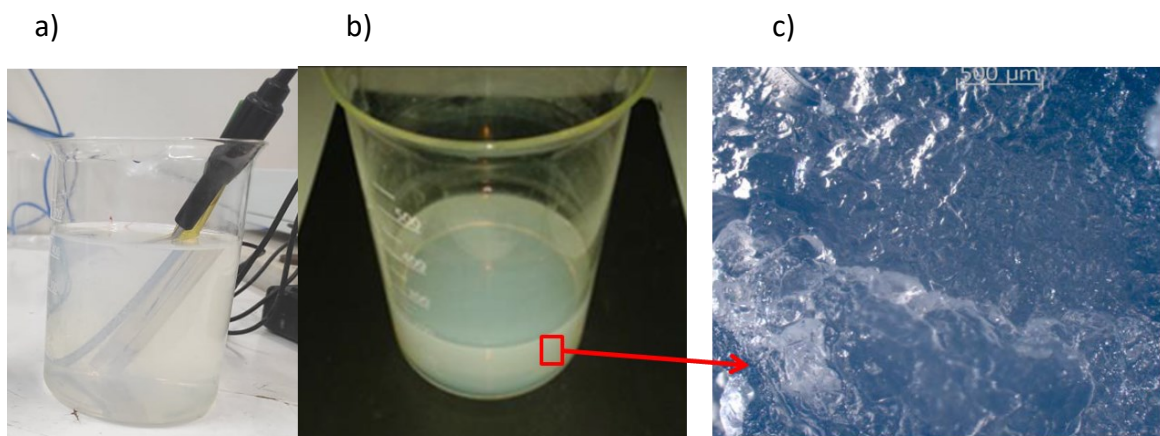


Figure 5: Photos of Hydrosol CS=10%: a) when first prepared b) after gel time and c) optical microscope image of colloidal silica gel

The water sedimentation method is used to prepare the sand specimens; this method yields uniform and repeatable samples with a fabric similar to that of natural deposits (Vaid et al., 1999) and with more pronounced inherent fabric anisotropy (Kodicherla et al., 2018). Denser specimens were obtained by tapping the outer sides of the mold after the sand had settled through the water. Treated sand specimens are formed by the sedimentation of the dry sand through the hydrosol. A curing time of 50 h at room temperature, while air-drying was prevented, was adopted for specimen preparation. After the formation of the gel, the specimens can be handled without the need for suction application, as is the case with sands.

In triaxial tests, the treated specimens are formed at the target density, similar to untreated sand, in split molds of 50 mm diameter and 100 mm height (height-to-diameter ratio of 2) and split molds of 38 mm diameter and 76 mm height. The former indicated no apparent specimen size effect. In Hollow cylinder tests, the model specimen has an initial inner radius, R_i , of 20 mm, outer radius, R_o , of 35 mm, and height, H , of 140 mm, occupying an initial volume of $V = 363$ cc. Specimens for direct shear tests are formed in molds 60 mm in diameter and approximately 24 mm in height. Specimens for oedometer tests are formed within the apparatus by filling the oedometer ring with hydrosol, followed by sand sedimentation. **Figure 6** shows optical micrographs of the treated sand specimen. The presence of hydrogel at interparticle contacts may be inferred, as it covers the space between the sand particles at the bottom (A) and top (B) of the micrograph.

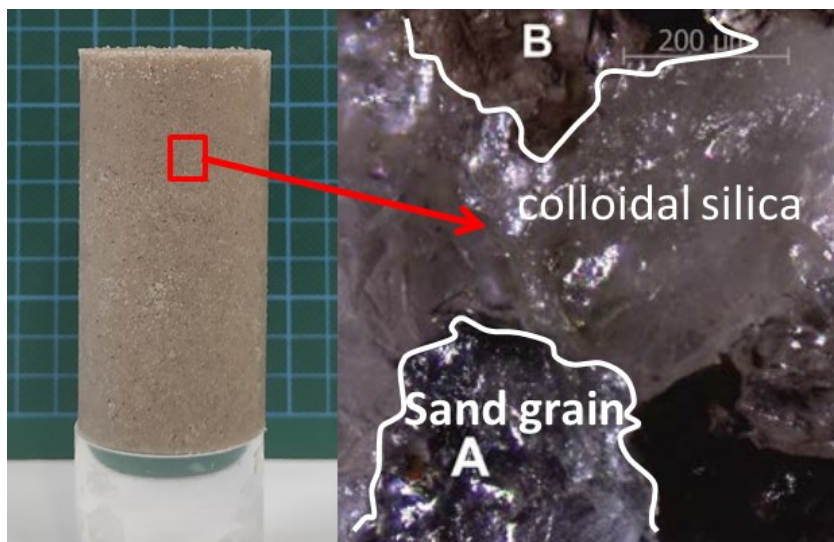


Figure 6: Optical micrographs showing treated sand specimen

Triaxial tests were carried out in computer-controlled Bishop and Wesley (1975) triaxial stress path cells with an accuracy of ± 0.5 kPa in pressure and ± 0.1 N in load measurements. Triaxial tests were also performed on a high-pressure triaxial cell with maximum cell pressure of 7 MPa and a maximum axial load of 50 kN. The system's overall stability in

terms of pressure measurements is 0.1 kPa for cell pressures of up to 4 MPa and 0.5 kPa for higher pressures. Submersible linear variable differential transducers (LVDTs) were mounted diametrically opposite over a central axial gauge length of the specimens to measure axial displacements in the range from 0.005% to 1% having a resolution of 1μ .

Hollow cylinder tests were performed in a hollow cylinder apparatus (HCA), custom-built at the National Technical University of Athens, on a frame manufactured by Seiken initially described by Georgiannou et al. (2008). A general view of the apparatus is given in **Figure 7**. The hollow-cylinder apparatus (HCA) has been upgraded to provide independent control of vertical load F , outer cell pressure p_o , inner cell pressure p_i , and torque, T to generate stresses σ_z , σ_r , σ_θ , and $\sigma_{z\theta}$ in the wall of the specimen, as shown in **Figure 7**. Pore pressure is measured using an external pore pressure transducer connected to the base pedestal. Vertical displacement is measured using a dial gauge, and the torsional angle utilizing a potentiometer. Changes in the specimen's volume are measured by a burette equipped with a differential pressure transducer. Moreover, the installation of another burette equipped with a differential pressure transducer connected to the inner chamber enables the measurement of the inner and outer radius changes. These upgrades allow for the first time the computation of all the strain components independently (vertical ε_z , circumferential ε_θ , and radial ε_r strain). The equations used to calculate the stress and strain components are presented in **Table 2** (Hight et al., 1983; Yoshimine et al., 1999; Georgiannou & Tsomokos, 2008).

It is well accepted that colloidal gels can undergo swelling, drying, liquid migration within the gel, and phase transition from solid-like to a viscoelastic liquid upon application of shear. Consistent volume changes have been measured in treated sands under normal compression, depending on density and normal stress. Moreover, under isotropic compression of treated sand at the same density and confinement, similar volume changes were observed whether confinement increased at a slow rate or at a fast rate followed by a rest period, indicating a unique reaction to effective stress changes (Triantafyllos et al. 2021). Consequently, when testing treated sand with the pore space filled with colloidal gel, volume change, and pore-water pressure measurement is paramount and feasible (Porcino et al. 2011, 2012; Georgiannou et al. 2017; Kodaka et al. 2005; Triantafyllos et al. 2021). All triaxial and hollow cylinder specimens of treated and untreated sand were first saturated by applying relatively high initial values of back pressure (300–700 kPa). All specimens are saturated with B values greater than 0.97. Drained loading of similar treated sand specimens yielded repeatable results when the back pressure was varied in the range of 300 to 700 kPa, indicating that increasing the pore-water pressure within this range does not induce any measurable damage to the gel.

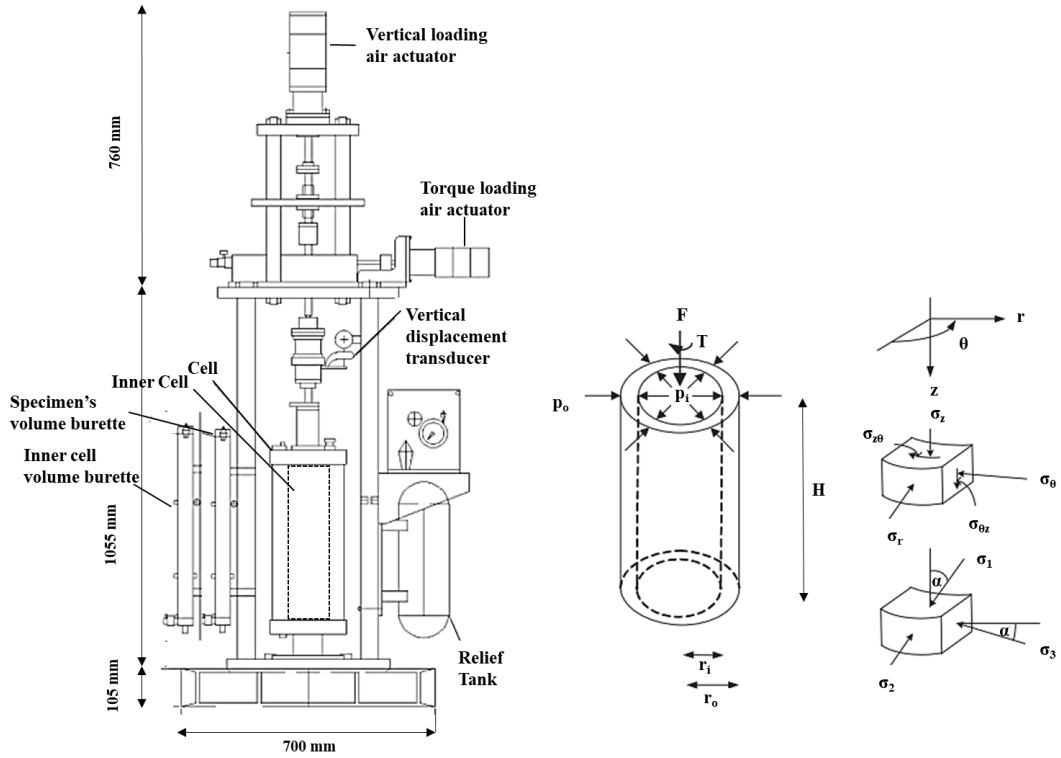


Figure 7: Hollow cylinder apparatus, applied loading to the specimen and principal stresses on an element component

Table 2: List of equations

Direction HC	Stress
Vertical	$\sigma_{zz} = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$
Circumferential	$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i}$
Radial	$\sigma_{rr} = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i}$
Rotational	$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}$
Principal	Stress
Major	$\sigma_1 = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2}$
Intermediate	$\sigma_2 = \sigma_{rr}$
Minor	$\sigma_3 = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta}}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2}$
Parameters	Stress
Deviatoric stress	$q = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$

Mean effective stress	$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u$
Difference	$q = \sigma_1 - \sigma_3$
	$X = \sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta}$
	$Y = 2\tau_{z\theta}$
Intermediate principal stress ratio	$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$
principal strain increment angle	$\tan 2\alpha_{d\varepsilon} = \frac{d\gamma_{z\theta}}{d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta}$

3. Test Results

3.1 Normal Compression Tests

In order to investigate the compressibility of treated sand normal compression tests were carried out in the oedometer on the subrounded M31 and the subangular LS sands with and without treatment with the CS=10% aqueous gel. A range of densities was examined for M31 and LS sands, the latter attaining looser states at deposition due to its angularity. The normal compression curves are presented in **Figure 8** and **Figure 9** for M31 and LS sand, respectively. The results confirm that normal compression loading induces higher volume changes in the treated compared with untreated sand. Moreover, this response of the treated sand is repeatedly observed at low and high densities and applies to both subangular and angular sands. When rapidly compressed under drained conditions in the oedometer, the compression curves of the treated sands show curvature as they depart from the corresponding curves of the untreated sands with increasing stress level; a sign of structural breakdown. It has been reported in the literature that the percolated network forming the structure of the aqueous gel can be easily damaged and the gel transitions to a liquid state. It can thus be inferred that during normal compression, the gel is being damaged, and free water is pushed out of the pores inducing structural changes in the treated sand until yielding has fully developed at a high-stress level and the treated sand has attained its densest state.

Ciardi et al. (2020) conducted 1D-compression tests and found similar results. Treated sand with a 2-13% CS content appeared more compressible than the untreated one. This observation was made in all tests performed under different initial and boundary testing conditions. However, the compressibility of samples treated with CS > 5% grouts was comparable with that of sand treated with CS = 5%, suggesting that this negative effect does not significantly increase as the silica solids percentage rises above a given threshold.

Figure 10 and **Figure 11** present the results from the loading and unloading curves of the normal compression tests for M31 and LS sand, respectively. The unloading curves from treated specimens are less steep compared to the loading curves, as in the case of the untreated sand. Under unloading, the volumetric changes of the treated specimens

are similar to those of the untreated ones for both sands. Under normal compression, the treated sand shows significantly higher volumetric changes than untreated sand, for a wide range of density, but the elastic deformation of treated and untreated sands is the same.

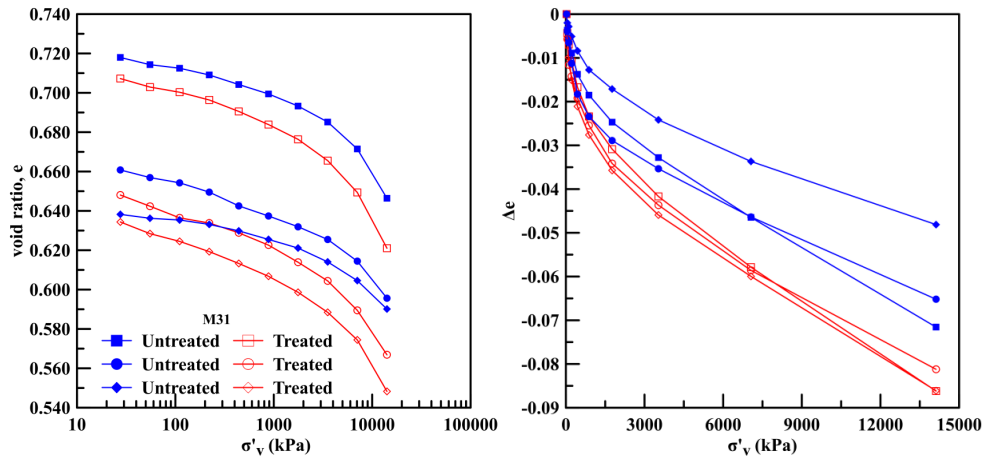


Figure 8: One-dimensional compression tests on M31 sands

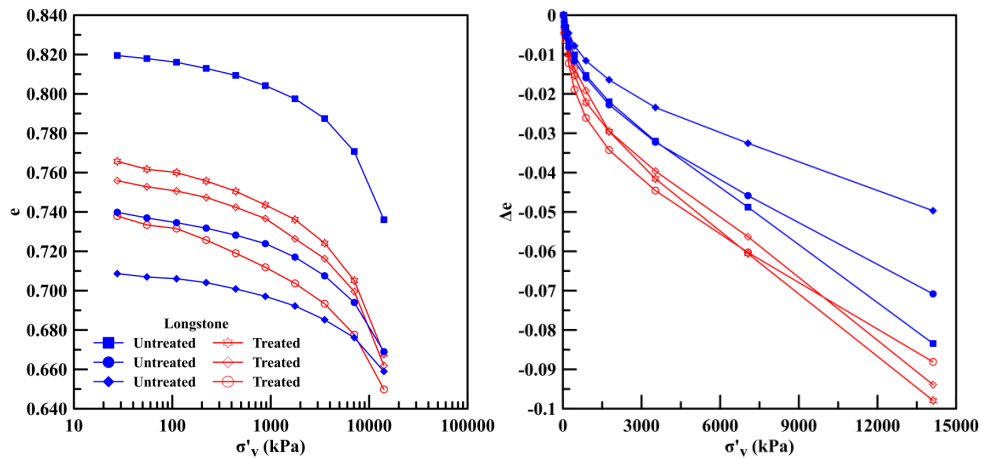


Figure 9: One-dimensional compression tests on Longstone sands

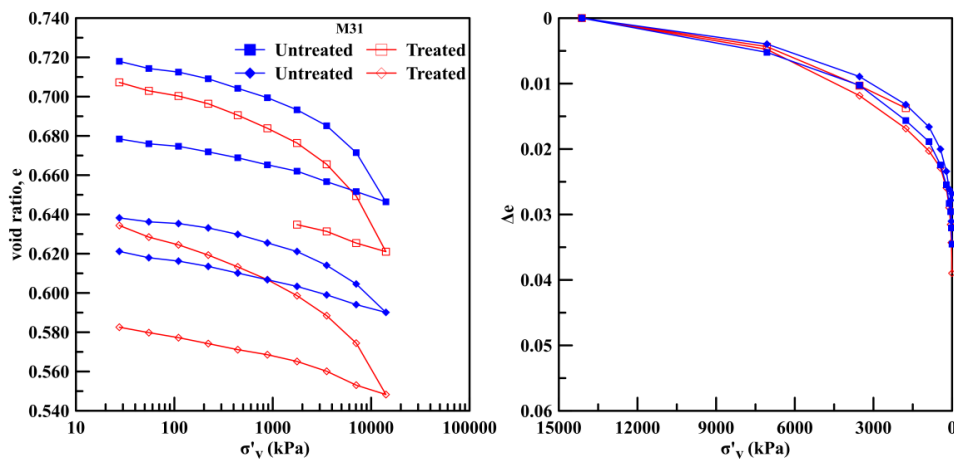


Figure 10: One-dimensional compression tests on M31 sands (Unloading)

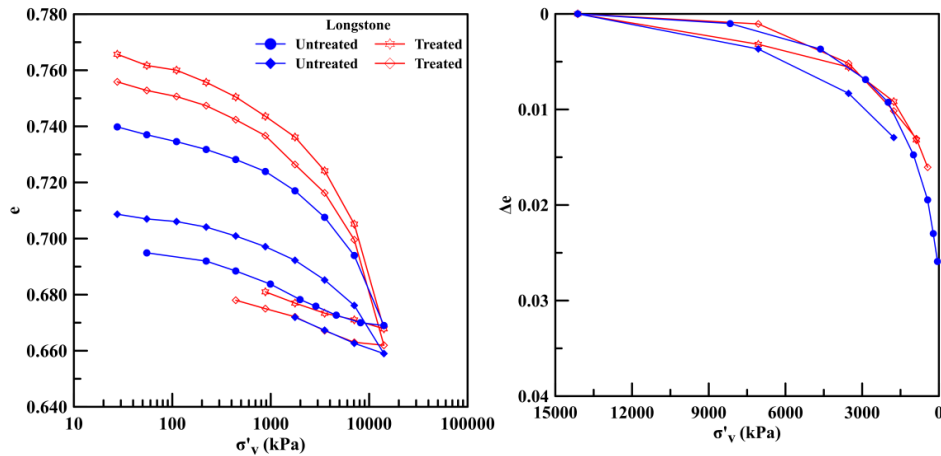


Figure 11: One-dimensional compression tests on Longstone sands (Unloading)

3.2 Direct shear tests

The testing program included direct shear tests on M31 and LS sands in their treated and untreated states for normal stresses, $\sigma'_v = 100\text{--}550$ kPa, and relative densities $D_r = 43\%\text{--}93\%$. Test details are described in **Table 3**. In the shear box, strain rates of 0.005 mm/min and 0.5 mm/min were applied on the treated and the untreated specimens, respectively. Typical test results are illustrated in **Figure 12**. The results are depicted as stress ratio τ/σ'_v against horizontal displacement and vertical displacement against horizontal displacement curves. The results of direct shear box tests show a significant increase in the angle of shearing resistance observed at lower stress levels that diminishes with increasing stress level. The stress ratio at peak strength τ/σ'_v is significantly higher for the treated sand at medium density than the untreated sand at the same density; meanwhile, stress ratios at ultimate strength coincide for treated and untreated sand. The stress ratio at peak strength is stress-level dependent only for the treated sand, a characteristic associated with destructuration.

Table 3: Direct shear test details

Test	Void ratio, e_i	Normal effective stress, σ'_{vo} (kPa)	Sand	Treated
M-1	0.641	125	M31	-
M-2	0.656	555	M31	-
M-3	0.696	125	M31	-
M-4	0.535	125	M31	-
M-5	0.651	232	M31	-
M-6	0.661	232	M31	-
M-7	0.528	232	M31	-
M-8	0.626	232	M31	-
M-9	0.658	340	M31	-
M-10	0.550	125	M31	-

Extended Summary and Conclusions

M-11	0.554	555	M31	-
SM-1	0.639	125	M31	T
SM-2	0.632	555	M31	T
SM-3	0.637	196	M31	T
SM-4	0.647	232	M31	T
SM-5	0.612	232	M31	T
SM-6	0.643	268	M31	T
SM-7	0.646	340	M31	T
SM-8	0.681	340	M31	T
SM-9	0.655	53	M31	T
L-1	0.753	340	Longstone	-
L-2	0.737	555	Longstone	-
L-3	0.681	340	Longstone	-
L-4	0.765	53	Longstone	-
L-5	0.760	125	Longstone	-
L-6	0.759	232	Longstone	-
SL-1	0.735	340	Longstone	T
SL-2	0.760	555	Longstone	T
SL-3	0.654	340	Longstone	T
SL-4	0.766	53	Longstone	T
SL-5	0.765	125	Longstone	T
SL-6	0.757	232	Longstone	T

Note: e_i , initial void ratio after consolidation,
 σ'_{vo} , Normal effective stress after consolidation,
T, Treated specimen

Figure 12(b) presents the volume change characteristics of treated sand, which shows initial contraction at comparable levels with the untreated sand, followed by extremely high dilatancy rates at peak strength. Continuous dilation up to the ultimate strength results in vertical displacement four times higher compared with that of the untreated sand. This enhanced dilation has been consistently observed in the literature, where treated loose sand is considered equivalent to dense untreated sand (Porcino et al. 2012). A dense sand specimen, shown as a broken line, exhibits a lower rate of dilatancy and final volume change than the treated specimen despite the lower initial contraction of the latter due to its lower density. The ultimate vertical displacement of the treated sand is significantly higher than the mean grain size, which sets the limit for the vertical displacement observed in dense sand. As a result, the ultimate void ratio of loose and medium-density treated sand is significantly higher than that of sand at the same density despite both being sheared at the same ultimate stress ratio. This indicates that their grain structures inside the shear band differ significantly. With structure defined by Mitchell, 1976, as the combination of interparticle bonding and fabric, the behaviour of treated sand is dictated by a strong dilating fabric. It is worth noting that the peak stress ratio concurs with maximum dilatancy for treated and untreated sand, indicating weak inter-particle bonding (Cuccovillo & Coop, 1999).

The aforementioned behavioral patterns are also observed for the angular LS treated and untreated sand, shown in **Figure 13**. Treated LS sand shows stress-level dependency

and ultimate vertical displacements two to four times the limiting displacement value of the mean grain diameter approached by the untreated dense sand shown in a broken line. The response similarity between the two sands indicates that sand angularity does not weaken or fluidize the gel, as may have been postulated.

The strength envelopes at peak (solid symbols) and ultimate (hollow symbols) state for treated (red lines) and untreated (blue lines) M31 sand are presented in **Figure 14(a)**. Treated sand shows a negligible apparent cohesion intercept, and the angle of shearing resistance is stress-level dependent with a value of $\phi_p=41.3^\circ$ at $\sigma'_v < 125$ kPa and $\phi_p=35^\circ$ at higher stress levels compared with $\phi_p=32.5^\circ$ observed for untreated sand. The data fit a power function, $\tau = 2.07 \times \sigma'_v{}^{0.83}$, with an R^2 value of 0.998 in the range up to 600 kPa. At peak strength conditions, the frictional characteristics of the treated sand tend to those of the untreated sand as stress and strain level increases, whereas, comparatively, at ultimate strength, they coincide, indicating weak bonding. **Figure 14(b)** shows the corresponding strength envelopes for LS sand. The peak strength envelope for treated LS sand is curvilinear, reflecting the stress-level dependency of strength, especially at low stresses, as was the case for treated M31 sand. A power function, $\tau = 1.33 \times \sigma'_v{}^{0.895}$, best fits the treated sand data for the examined normal stresses (up to 600 kPa) with an R^2 value of 0.999, and a linear curve fitting ($R^2 = 0.999$) is presented for clean LS sand. Both sands show a tendency for a common ultimate strength for treated and untreated specimens.

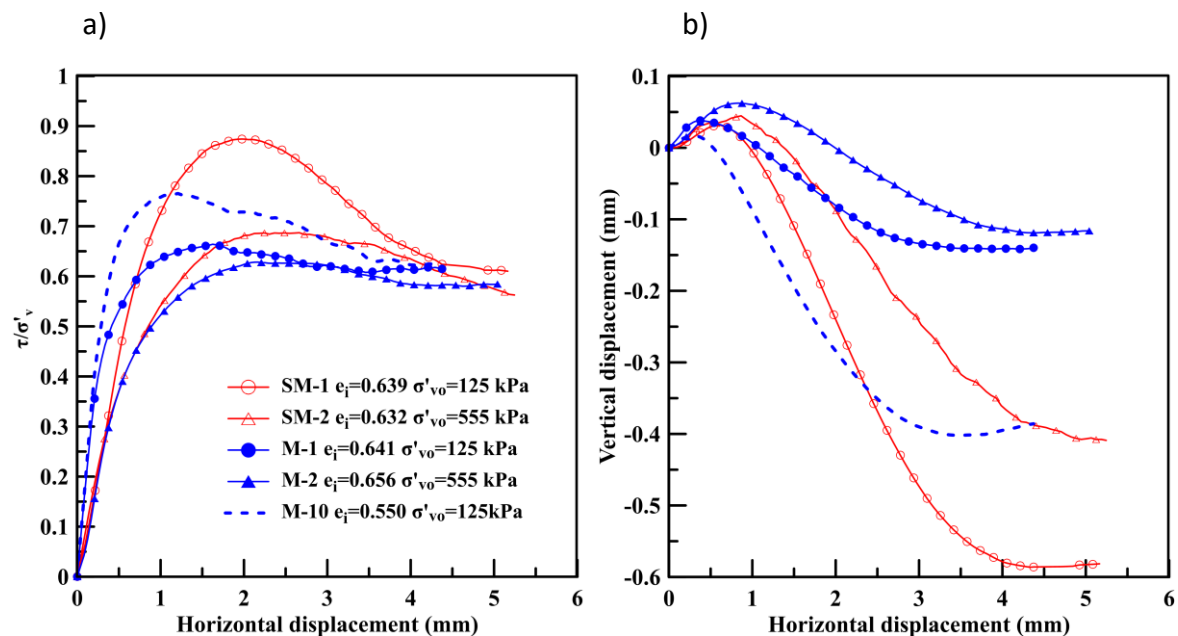


Figure 12: Direct shear tests on treated and untreated M31 sands: (a) stress ratio τ/σ'_v against horizontal displacement curves; and (b) vertical against horizontal displacement curves.

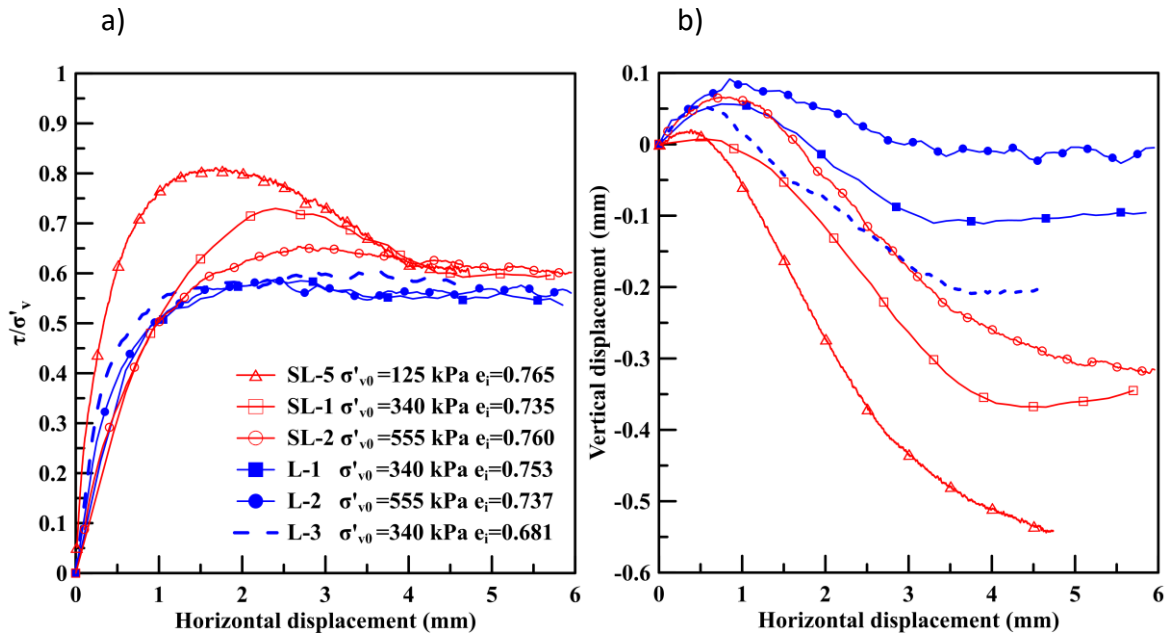


Figure 13: Direct shear tests on treated and untreated Longstone sands: (a) stress ratio τ/σ'_v against horizontal displacement curves; and (b) vertical against horizontal displacement curves.

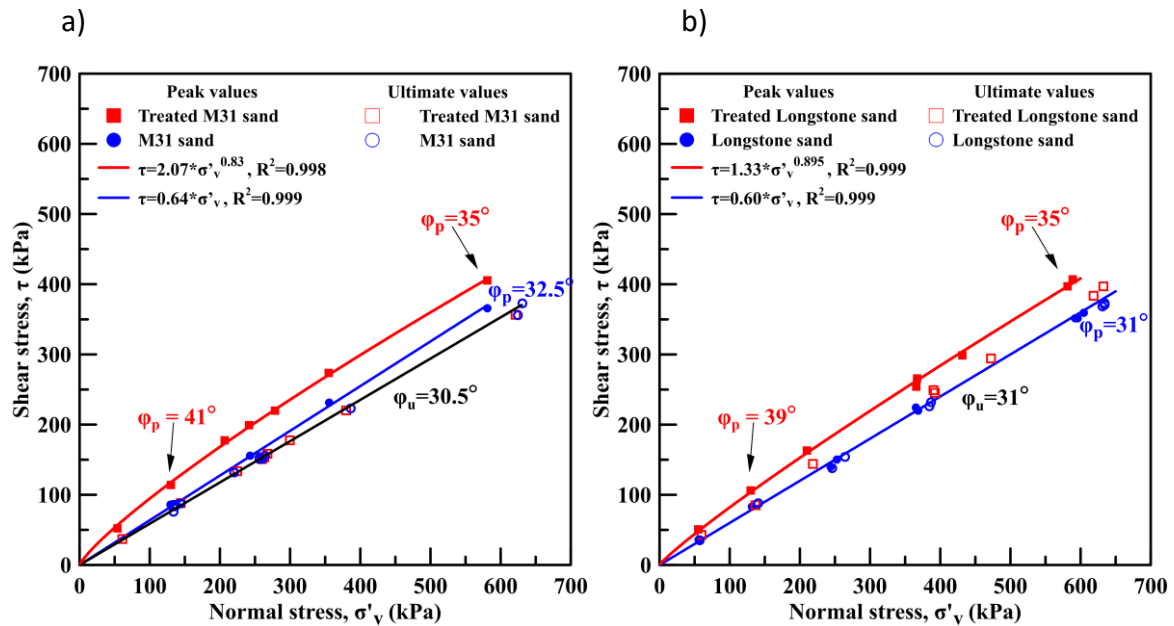


Figure 14: Peak and ultimate strength envelopes for treated and untreated a) M31 and b) Longstone sands in direct shear tests

3.3 Monotonic Triaxial tests

Treated sand is systematically studied using undrained and drained triaxial tests to verify the above observations and propose a framework to describe its behavior. Tests' characteristics are included in **Table 4**.

Table 4: Triaxial tests

Test	Void ratio, e_i	Mean effective stress, p'_i (kPa)	Treated	Loading	Drainage
MD-1	0.710	200	-	C, strain-controlled	D
MD-2	0.717	300	-	C, strain-controlled	D
MD-3	0.691	500	-	C, strain-controlled	D
MD-4	0.676	700	-	C, strain-controlled	D
CD-1	0.748	200	-	C, strain-controlled	D
ED-1	0.737	200	-	E, strain-controlled	D
SMD-1	0.744	100	T	C, strain-controlled	D
SMD-2	0.751	200	T	C, strain-controlled	D
SMD-3	0.721	300	T	C, strain-controlled	D
SMD-4	0.722	500	T	C, strain-controlled	D
SMD-5	0.711	700	T	C, strain-controlled	D
SMD-6	0.685	1000	T	C, strain-controlled	D
SMD-7	0.673	2000	T	C, strain-controlled	D
SCD-1	0.751	200	T	C, strain-controlled	D
SED-1	0.742	200	T	E, strain-controlled	D
SED-2	0.740	200	T	E, stress-controlled	D
MU-1	0.708	300	-	C, strain-controlled	U
MU-2	0.681	1000	-	C, strain-controlled	U
MU-3	0.662	2000	-	C, strain-controlled	U
MU-4	0.663	300	-	C, strain-controlled	U
MU-5	0.670	500	-	C, strain-controlled	U
CU-1	0.738	200	-	C, strain-controlled	U
EU-1	0.744	200	-	E, strain-controlled	U
EU-2	0.741	200	-	E, stress-controlled	U
SMU-1	0.732	100	T	C, strain-controlled	U
SMU-2	0.752	200	T	C, strain-controlled	U
SMU-3	0.735	300	T	C, strain-controlled	U
SMU-4	0.722	1000	T	C, strain-controlled	U
SMU-5	0.667	2000	T	C, strain-controlled	U
SCU-1	0.752	200	T	C, strain-controlled	U
SEU-1	0.760	200	T	E, strain-controlled	U
SEU-2	0.766	200	T	E, stress-controlled	U

Note: e_i , void ratio after consolidation,
 p'_i , mean effective stress after consolidation,
T, treated specimen
C, Triaxial Compression
E, Triaxial Extension
D, Drained triaxial test,
U, Undrained triaxial test

The results of drained tests on treated (shown as broken lines) and untreated M31 sand (shown as solid lines) are shown in **Figure 15**. At peak strength, untreated sand is not sensitive to stress changes within the range of 200-2000kPa, contrary to treated sand which shows strong stress level dependency within the same range. It is well known that sand behavior at very low stresses (<100kPa) is also stress level dependent and governed by the same underline mechanism, namely, dilation. However, in treated sand, this mechanism prevails for stresses up to 2000kPa, pointing to a different fabric due to the interaction of the granular phase with the gel and the changes in the gel structure upon shear. The same

ultimate strength is mobilized at large strains by both treated and untreated sands tested at the same initial mean effective stress, as shown in the stress-strain curves (q - ϵ_z) shown in **Figure 15(b)**. At the ultimate state, severe damage and/or fluidization of the gel, as reported by (Santos et al. 2017), limits resistance against shearing to that of mineral-to-mineral friction. Similar to direct shear tests' results, the peak stress ratio is found to concur with maximum dilatancy for treated and untreated sands. The peak dilatancy ratio is plotted against the mean effective stress for the drained triaxial tests in **Figure 16**. For a wide stress range, the ratio remains higher for treated sand but decreases with stress level toward the nearly-constant value observed for the untreated sand.

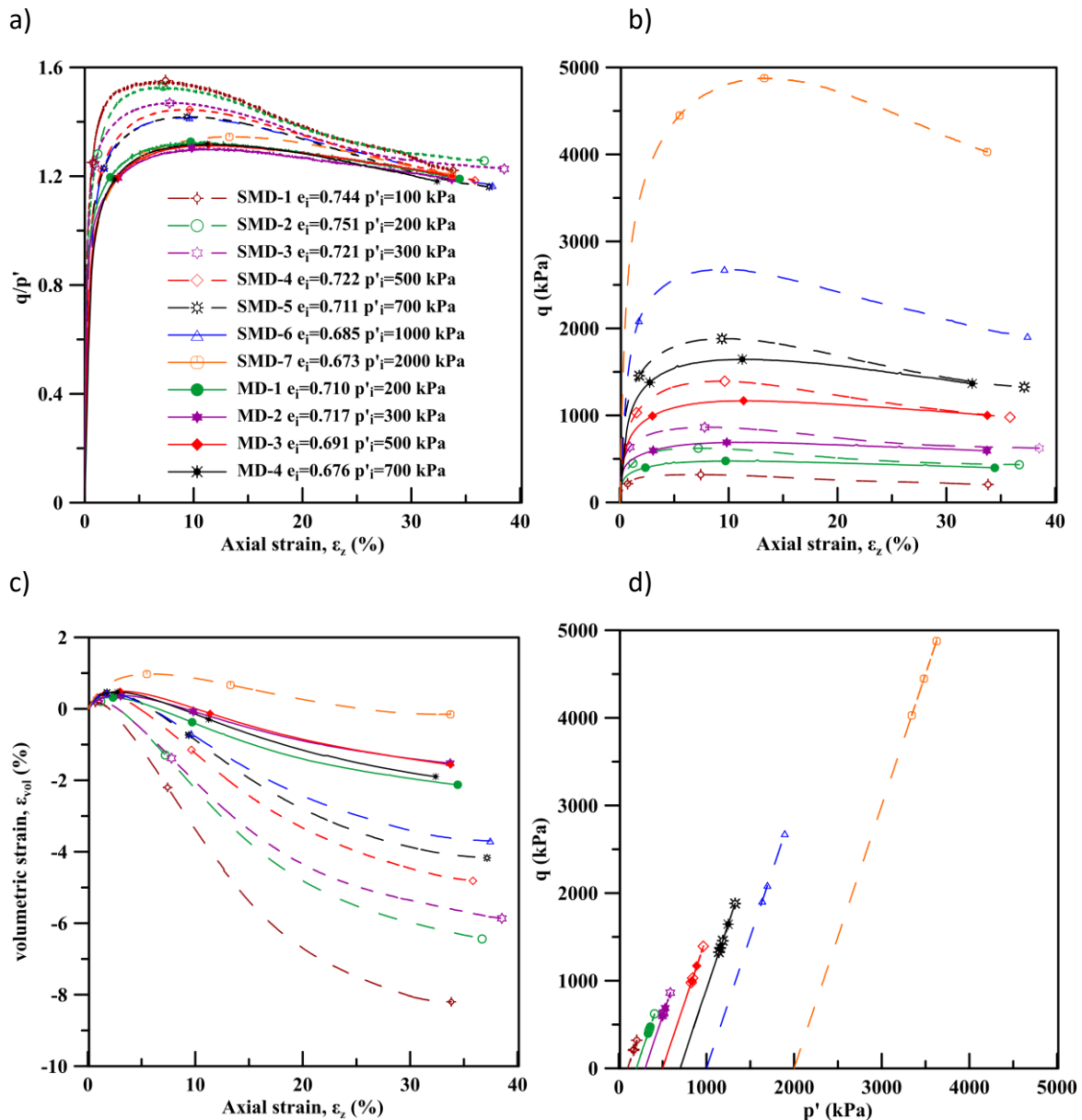


Figure 15: Drained triaxial tests on treated and untreated M31 sands: (a) stress ratio, q/p' , against axial strain curves; (b) stress-strain curves; and (c) volumetric strain against axial strain curves; and (d) effective stress paths

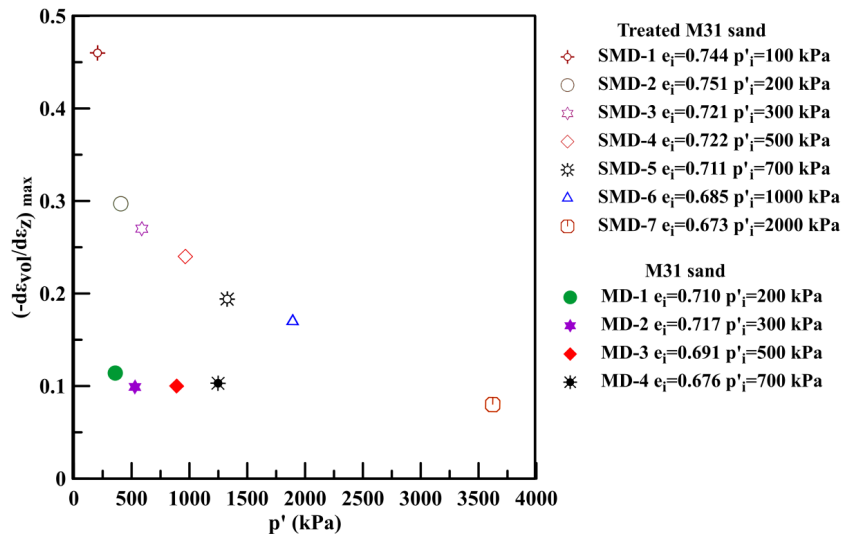
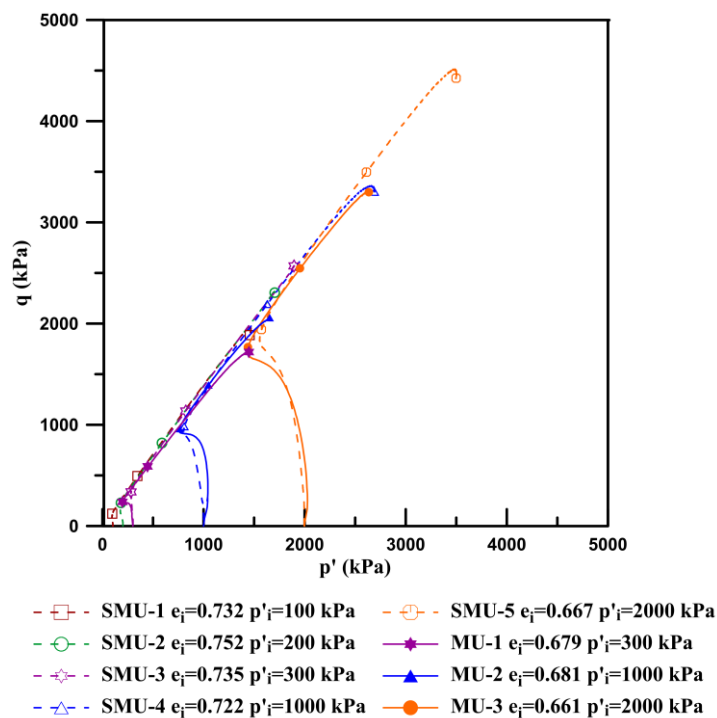


Figure 16: Peak dilatancy ratio against mean effective stress level for treated and untreated M31 sand

The results of undrained triaxial tests are shown in **Figure 17** in terms of effective stress paths in the q - p' plane [Fig. 18(a)], stress-strain curves in the q - ϵ_z plane [Fig. 18(b)], and plots of excess pore-water pressure ratio $\Delta u/p'_i$ against ϵ_z [Fig. 18(c)]. Solid and open symbols and solid and broken lines are used for the untreated and treated sand, respectively. The dotted lines show that the effective stress paths of treated sand at low stresses turn to the right and climb the failure envelope due to strong dilative tendencies. Compressive tendencies force the effective stress paths to the left at high stresses before they climb the failure envelope after phase transformation. Phase transformation, peak stress ratio, $q/p'_{(max)}$, and ultimate state are marked by a different symbol for each test.

a)



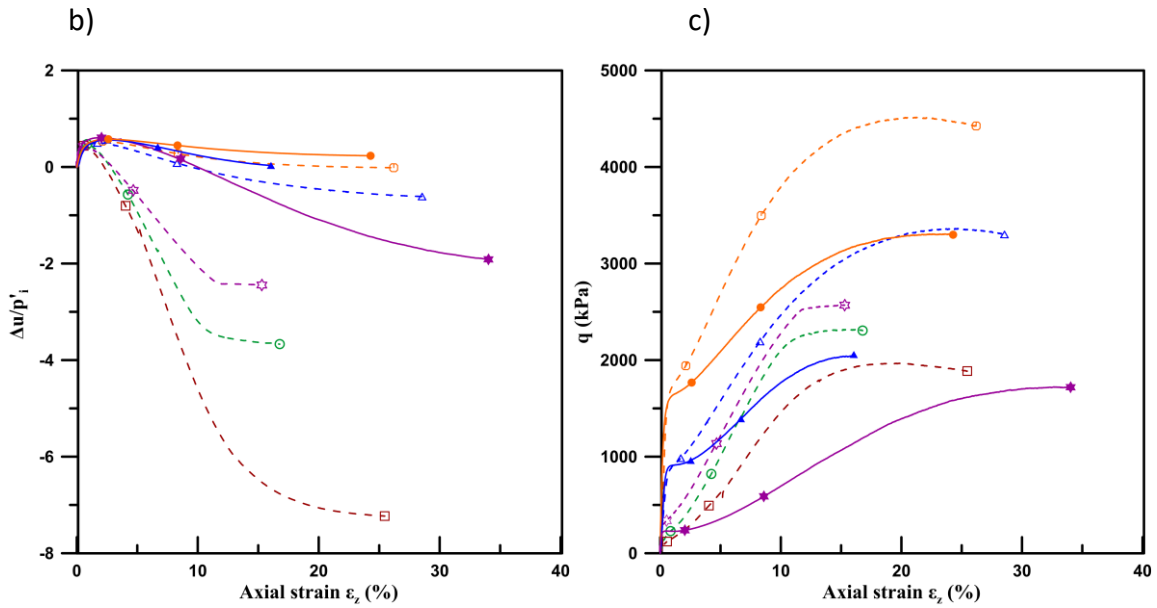


Figure 17: Undrained triaxial tests on treated and untreated M31 sands: (a) effective stress paths; (b) stress-strain curves; and (c) excess pore-water pressure ratio against axial strain curves

Treated sand shows strong dilative tendencies, which resulted in cavitation despite the high value (700 kPa) of initial pore-water pressure. Hence, tests SMU1, SMU2, and SMU3 did not reach their ultimate strength. The differences in the tendency for dilation, reflected by the evolution of $\Delta u/p'_i$ in Fig. 18(c), are more pronounced at low stresses, yet, they still exist at stresses as high as 2,000 kPa. Interestingly, even at lower stresses where treated sand shows strong dilation tendencies, excess pore water pressures are similar to sand's. The stress ratio at phase transformation is the same for treated and untreated sand at comparable densities, although this is not the case for peak strength conditions due to dilation. In **Figure 18**, sand attains a nearly constant peak stress ratio q/p' (max) against effective stress irrespective of drainage conditions. For treated sand, the peak stress ratio is stress level dependent for stresses lower than 2000kPa. However, the peak stress ratio values and their variation are significantly higher in drained tests, showing the contribution of dilation to shearing resistance versus constant volume remolding.

Figure 19 (a) shows the critical states of untreated and treated M31 sand in the state diagram $e-p'$, determined from both drained and undrained triaxial tests. The position of the critical state line for the treated sand reflects the extreme dilation associated with the structure of the treated sand, which is rearranged to a looser state with shearing up to the ultimate state. At high stresses, dilation is suppressed, and the two lines converge in the state diagram. Despite the difference in the critical void ratio, a common ultimate stress ratio $M = 1.22$ ($\phi_u=30^\circ$) is attained by treated and untreated sand in **Figure 19** (b). Reference to a common ultimate state stress ratio is the essence of the elastoplastic behavior of soils described by Wroth and Bassett (1965), indicating that stabilization does not enhance ultimate shear resistance above that of mineral-to-mineral friction and constant-volume remolding (Rowe 1962).

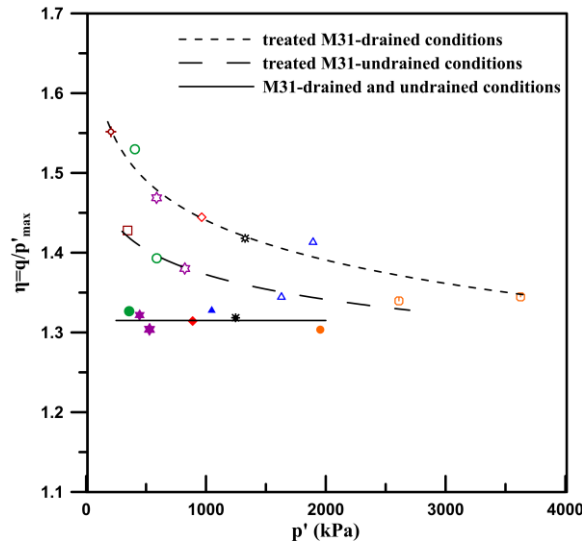


Figure 18: Drained and undrained triaxial tests on treated and untreated M31 sands: peak stress ratio points against mean effective stress

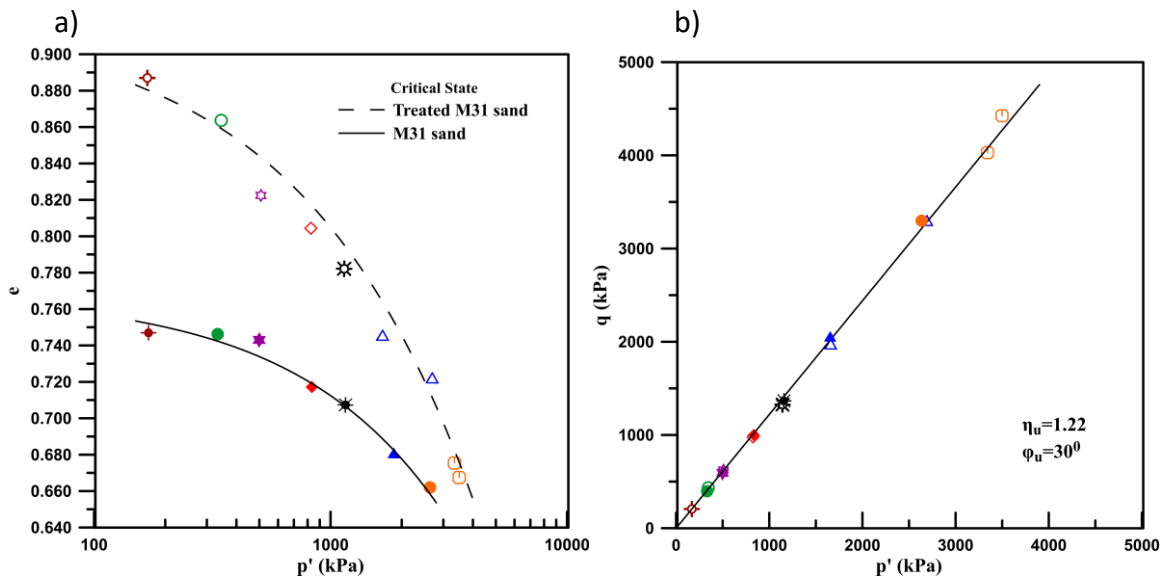


Figure 19: Critical state points for treated and untreated M31 sands: (a) void ratio against mean effective stress; and (b) deviatoric stress against mean effective stress.

To study the strength anisotropy of treated sand, initially the responses of treated sand is compared to that of sand under triaxial undrained extension in **Figure 20**. Tests are performed at an initial mean effective stress of 200kPa. Compression tests are also included for completion and are in agreement with the compression tests shown in **Figure 17**, i.e., the tendency for dilation in treated sand yields a non-brittle effective stress path shown in the solid red line (Figure 20 (a)) compared to the slightly brittle response of the sand, shown in solid black line. In typical anisotropic sand response, the transient peak in compression is more than double its value in extension for the sand specimens. Moreover, significant brittleness (reduction in deviatoric stress, q , with strain) is observed in extension arrested at phase transformation. This is associated with higher excess pore water pressure

accumulation compared to compression loading, as shown in Figure 20(b). Under both loading conditions, the effective stress paths climb the failure line due to dilative tendencies after phase transformation. In Figure 20(a), treated sand, shown in solid red lines, maintains its tendency for dilation under extension loading and effectively eliminates the brittleness observed in sand. However, in echoes of sand behavior, the excess pore pressure is higher, and the tendency for dilation significantly decreases under extension loading in Figure 20(c). Additionally, strength anisotropy at phase transformation and failure at comparable levels to sand is observed for treated sand in Figure 20(d), where the peak stress ratio is plotted against axial strain. It is also worth noting that significantly higher axial strains are observed in extension than in compression at the same pre-peak stress ratio, reflecting the sand's weak structure along the deposition plane. This is also the case for the treated sand.

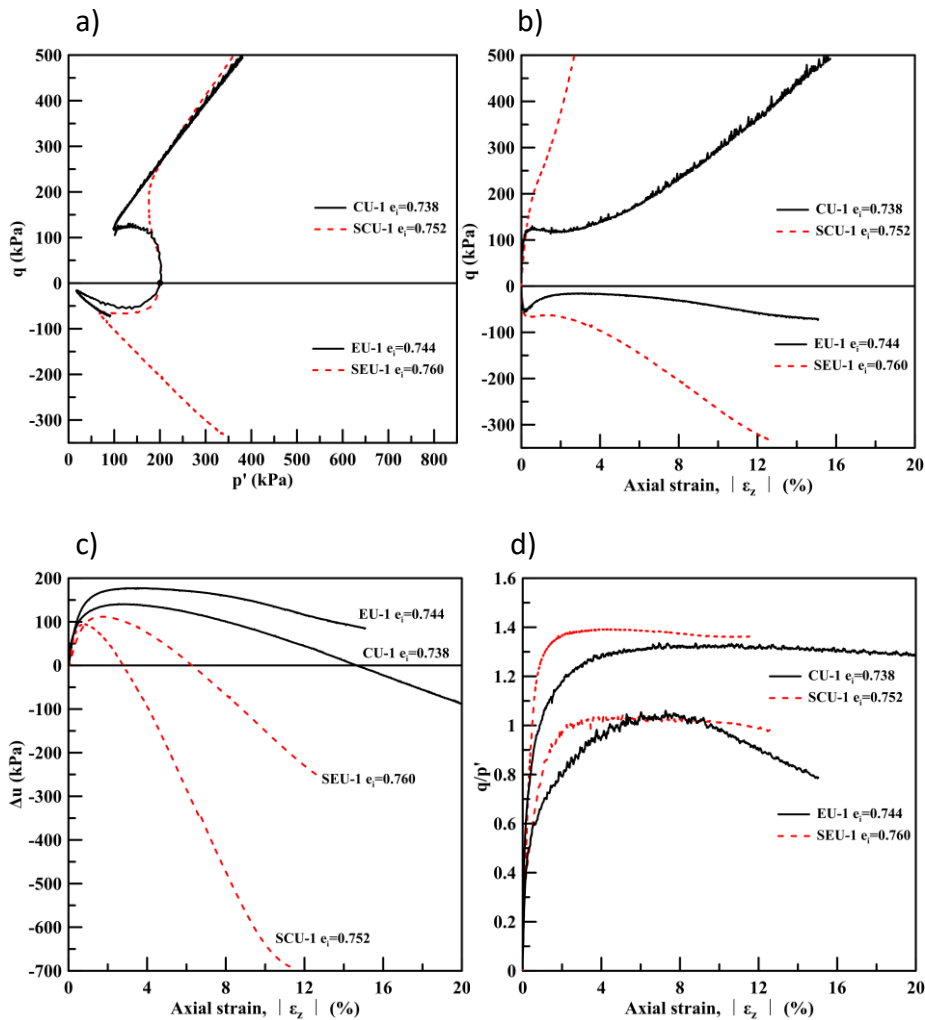


Figure 20: Undrained triaxial compression and extension tests on treated (in red color) and untreated (in black color) M31 sands: (a) effective stress paths; (b) stress-strain curves; (c) excess pore water pressure against axial strain curves; (d) stress ratio, q/p' , against axial strain curves

Strain non-uniformities in extension have resulted in specimen necking observed by the naked eye in a range of strains between 7% to 9% for sand and at around 9% for treated sand. Photos of treated specimens after compression and extension tests are provided in **Figure 21**. The weak nature of sands under triaxial extension has been repeatably observed in triaxial tests indicating that the fabric of deposited sand is anisotropic (Vaid & Chern, 1983; Miura & Toki, 1984; Vaid et al., 1990; Hight & Georgiannou, 1995; De Gennaro et al., 2004; Georgiannou, 2006; Georgiannou & Konstadinou, 2014)

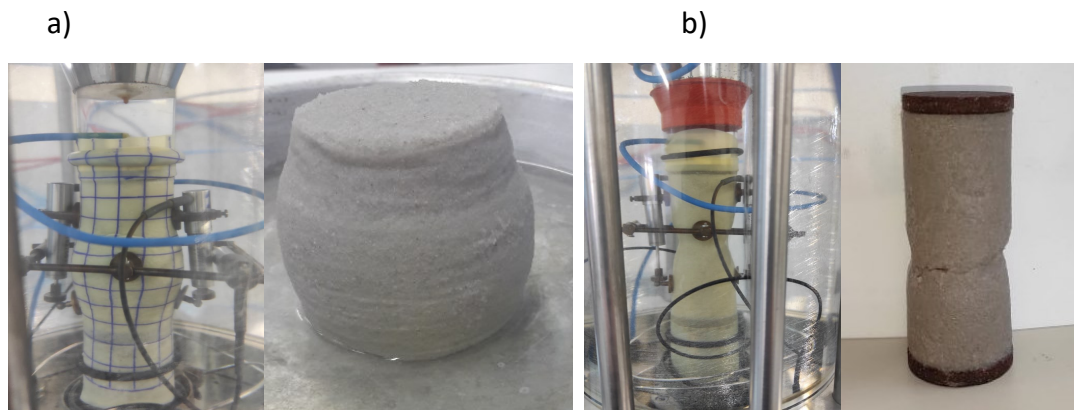


Figure 21: Photos of treated specimens: a) after compression and b) after extension test

Similar conclusions can be drawn from the comparison of the behavior of treated (in red color) and untreated (in blue color) sand under drained loading conditions in **Figure 22** i.e. higher peak strength for the treated sand in Figs 22(a) and (b) and same ultimate strength as sand; treated sand is substantially less contractant and more dilatant than the sand before and after phase transformation respectively in **Figure 22(c)** and reaches this phase at smaller axial strains compared to the sand. **Figure 22(d)** shows the stress ratio versus axial strain curves, where a similar increase of about 15% at peak strength ratios is observed in both triaxial compression and extension drained tests for treated compared to untreated sand. Higher stress ratios are observed for treated sand in drained compared to undrained tests in compression and extension (Fig. 22(d) cf. Fig. 20(d)). As discussed earlier regarding the compression tests on treated sand shown in **Figure 18**, dilation contributes more to shearing resistance than dilative tendencies. This is also reflected by the volumetric changes in Fig. 22(c) being approximately half the values observed in the sand in both compression and extension, albeit the smaller differences observed with respect to excess pore water pressures in undrained tests in Fig. 20(c).

In conclusion, dilation in treated sand is evident in both compression and extension tests. Extension tests are also the key to interpreting treated sand behavior characterized by similar or higher strength anisotropy than sand in drained and undrained tests, thus indicating the dominance of the anisotropic fabric of the sand within the sand-gel binary system.

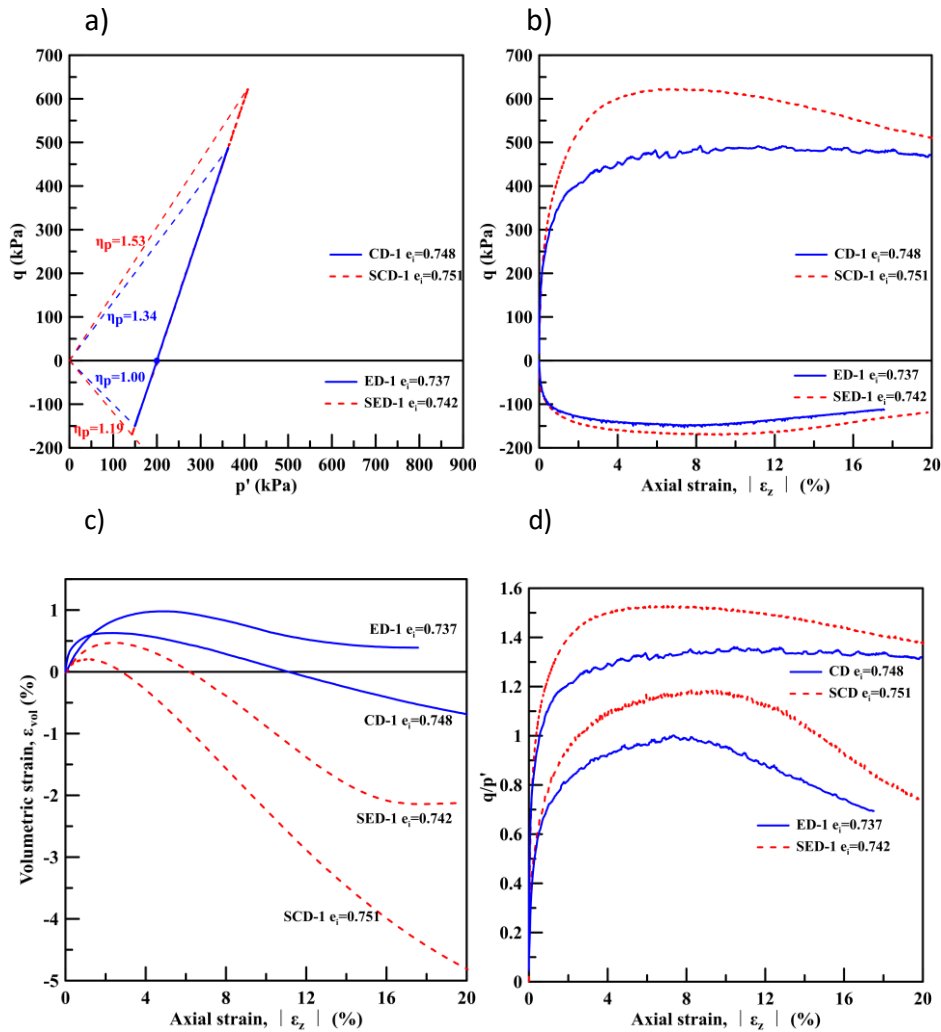


Figure 22: Drained triaxial compression and extension tests on treated (in red color) and untreated (in blue color) M31 sands: (a) effective stress paths; (b) stress-strain curves; (c) volumetric strain against axial strain curves; (d) stress ratio, q/p' , against axial strain curves

The stiffness characteristics of treated (red lines) and untreated sand (blue lines) in triaxial compression (C) and extension (E) are examined in **Figure 23** under drained (solid lines) and undrained (dotted lines) loading conditions. In drained triaxial compression, the sand shows substantially higher stiffness than the corresponding stiffness in extension, e.g., a three-fold increase at 0.1% axial strain. Compared to sand in compression, treated sand shows lower stiffness by about 30% at 0.1% axial strain, with the difference further increasing at lower strain levels. Interestingly, despite its higher strength due to dilative tendencies, treated sand is less stiff than untreated sand in the initial stage of compression before phase transformation. It can be speculated that the soft nature of the gel reduces the stiffness of the sand-grain skeleton before dilative tendencies take over and increase the strength of treated sand. In comparing treated and untreated sand, the effect of the gel in extension is beneficial, i.e., lower volume reduction than sand, and, contrary to

compression, this is also reflected in stiffness. Under undrained loading, stiffness is also lower in extension for treated and untreated sand. In comparing drained and undrained loading, undrained stiffness is lower, with the difference being higher in compression than in extension loading.

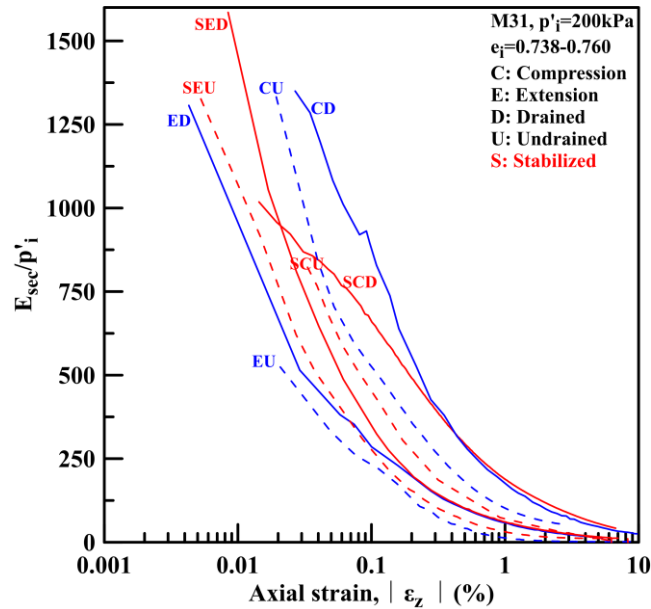


Figure 23: Stiffness characteristics of treated (in red color) and untreated M31 sands in triaxial compression (C) and extension (E) tests under drained (D) and Undrained (U) loading conditions

3.4 Cyclic Tests

In order to investigate the effectiveness of CS treatment for the mitigation of liquefaction risk, cyclic triaxial tests were performed in treated and untreated loose M31 sand under undrained conditions. Specimens prepared in a loose state ($e_i=0.710-0.748$) were isotropically consolidated to $p'_i=200$ kPa and subjected to a cyclic stress ratio of $CSR=q/(2/p'_i)=0.12-0.20$, and a cycle period $T = 2.5$ and/or 5 min. Test details are provided in **Table 5**.

Figure 24 illustrates the results of a typical cyclic triaxial test on an isotropically consolidated (IC) loose M31 sand under $CSR=0.16$. Instability lines (IL) (Lade, 1993) and failure lines (FL) that were defined under triaxial compression and extension loading for loose IC M31 sand are also presented. It should be noted that the results from undrained tests on loose IC M31 sand at fixed stress directions indicate that the slope of the instability line is affected by the direction of principal stress, angle α (Triantafyllos et al., 2020). The cyclic stress path follows the monotonic stress path (points 1 to 2) and then moves to the left due to excess pore water pressure accumulation during the first cycle (points 1 to 3). After the first cycle, excess pore water pressure accumulates at a nearly constant rate (points 3 to 4). The unstable sand response initiates in the vicinity of the instability line for triaxial extension (point 4). The evolution of excess pore water pressure and the axial strain

against the number of cycles are presented in **Figure 24(b)** and **Figure 24(c)**, respectively. A sudden increase in excess pore water pressure accumulation and axial strain is observed when the cyclic stress path reaches the relevant boundary (point 4). After point 4, the cyclic stress path follows the monotonic extension stress path where contraction tendency is observed (points 4 to 5) and then moves along the extension failure line, while dilative tendency is developed (points 5 to 6). Finally, the specimen liquefies under high extension axial strain (point 7). Konstadinou & Georgiannou, (2014) performed undrained torsional shear cyclic tests on various sands and concluded that the cyclic response of sands exhibiting brittle behavior under monotonic loading would be bounded by the instability line, while the cyclic response of sands exhibiting stable behavior under monotonic loading, by the phase transformation line.

Table 5: Cyclic Tests

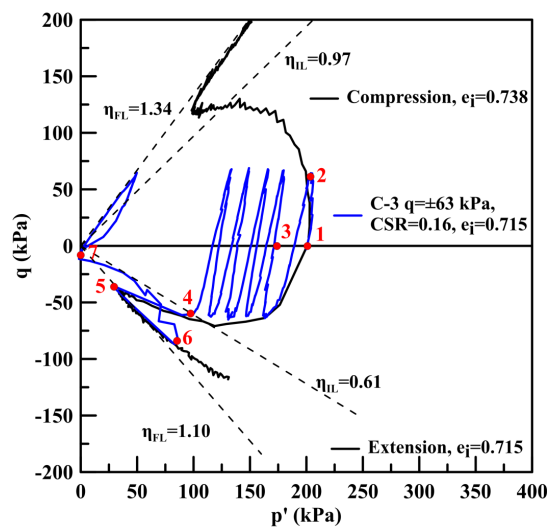
Test	Void ratio, e_i	Mean effective stress, p'_i (kPa)	CSR	Period (min)	Treatment
C-1	0.722	200	0.20	5	-
C-2	0.717	200	0.19	5	-
C-3	0.715	200	0.16	5	-
C-4	0.720	200	0.13	5	-
C-5	0.724	200	0.12	2.5	-
C-6	0.710	200	0.11	2.5	-
SC-1	0.720	200	0.20	5	T
SC-2	0.728	200	0.18	5	T
SC-3	0.717	200	0.16	5	T
SC-4	0.734	200	0.14	5	T
SC-5	0.748	200	0.12	5	T

Note: e_i , void ratio after consolidation,
 p'_i , mean effective stress after consolidation,
CSR, Cyclic stress ratio ($q/(2*p'_i)$)
T, Treated specimen

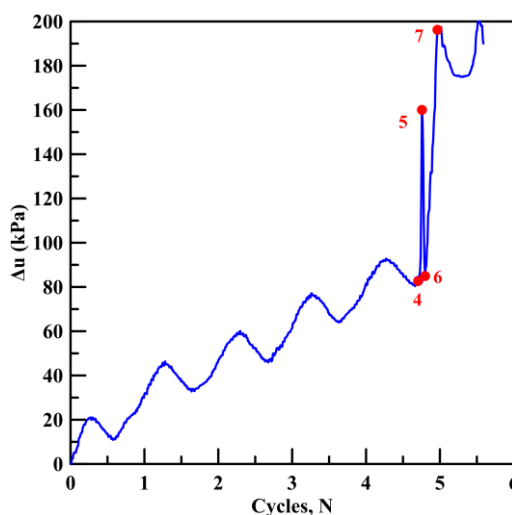
Figure 25 shows typical cyclic triaxial tests on specimens of treated and untreated M31 sand in a loose state, $e_i=0.717$ and 0.715 , consolidated to $p'_i= 200$ kPa and subjected to a cyclic stress ratio $CSR=q/(2*p'_i)=0.16$, and a cycle period $T = 5$ min. Initially, the first cycle induces a significant rise in excess pore water pressure for both specimens, and the stress paths move quickly to the left (**Figure 25 (a)**). A nearly constant rate of excess pore water pressure accumulation with cycles is developed in subsequent cycles (**Figure 25 (d)**), while minimal axial strains (**Figure 25(b)**) are observed in the first 4 cycles for both treated and untreated sand. During these cycles, the measured pore-water pressure changes are in phase for treated and untreated dense sands. It is thus demonstrated not only that pore pressure undergoes changes within the gel, but these changes also correspond fully to the loading variations, as in sand. After a critical point (point 4, **Figure 24**), the excess pore

pressure of sand increases rapidly, the excess pore water pressure ratio, $R_u = \Delta u/p'_i$, approaches 1 while axial strain increases simultaneously (**Figure 25 (c)**). The specimen liquefies and collapses under high extension strain during that same cycle. The response of the treated sand after that point differs from the untreated sand's response since although the treated sand specimen accumulates strain steadily it does not collapse even after $R_u=1$ is reached, and it sustains considerable axial strain variation in the subsequent 20 cycles. During cyclic loading, strain builds up in the stress space's extension side for treated sand, like untreated sand. This is expected from the observed very weak response of treated sand under monotonic extension loading, i.e., slight brittleness in extension against the continuous increase in deviatoric stress, q , in compression.

a)



b)



c)

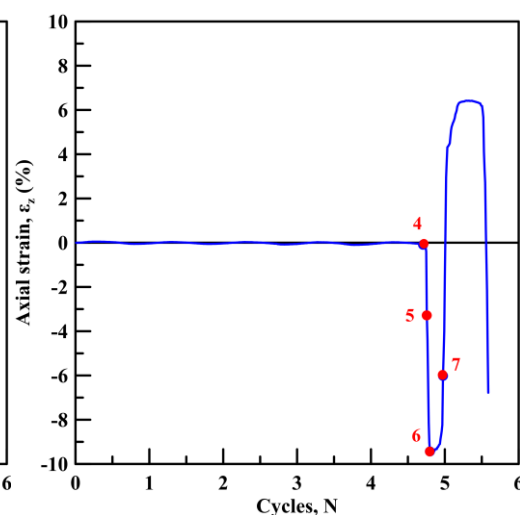


Figure 24: Undrained cyclic triaxial test on M31 sand: (a) effective stress paths, (b) excess pore water pressure generation against number of cycles and (c) axial strain against number of cycles

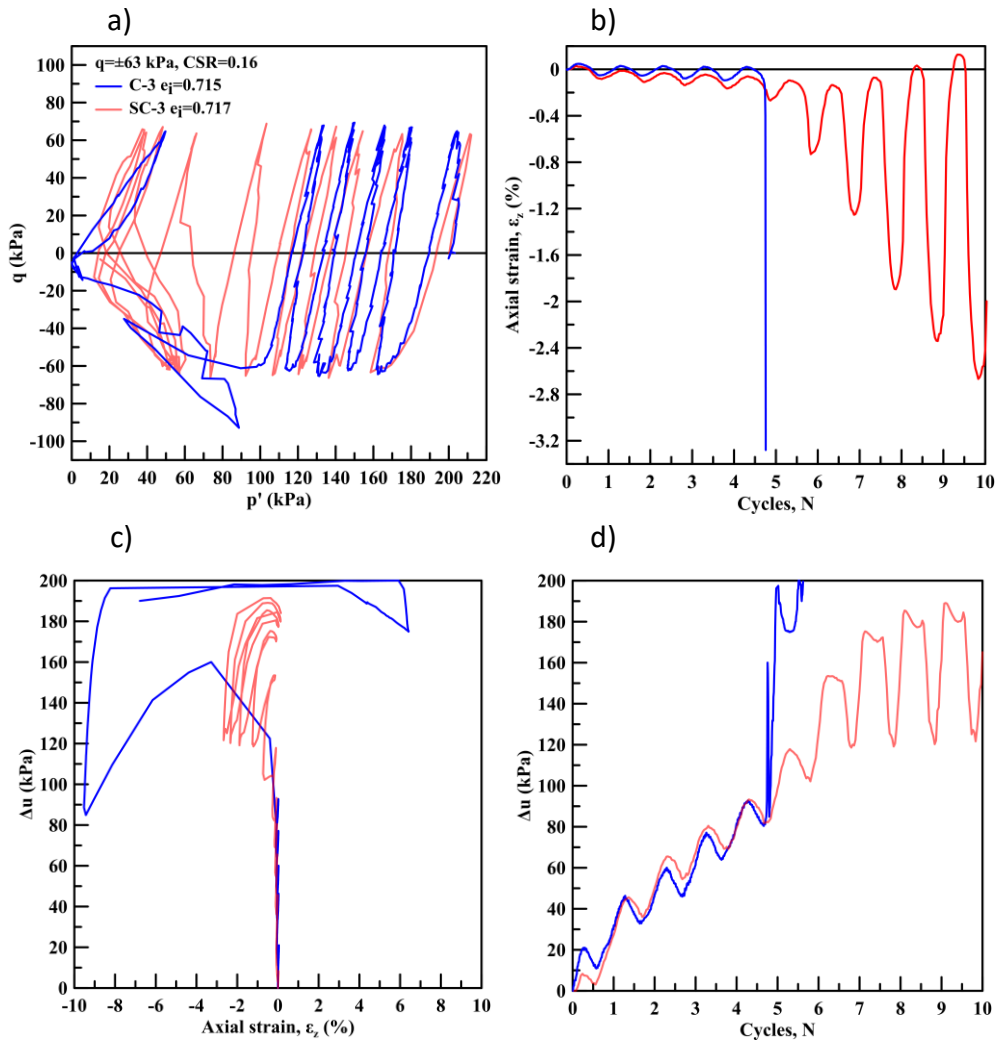


Figure 25: Cyclic triaxial tests on treated and untreated M31 sands in a loose state under $\text{CSR} = 0.16$: (a) effective stress paths, (b) axial strain against number of cycles; and (c & d) excess pore-water against axial strain and number of cycles

Stiffness measurements for treated (red lines) and untreated (blue lines) sand during cyclic loading are compared in **Figure 26**. The secant stiffness has been calculated for each cycle, $E = q_{\text{cyc}} / \epsilon_{\text{cyc}}$, where q_{cyc} is the double amplitude cyclic deviatoric stress and ϵ_{cyc} is the double amplitude cyclic axial strain. In the initial cycles, treated sand matches the stiffness of the untreated sands with the exception of cyclic loading under $q = 79 \text{ kPa}$, where sand shows substantially higher stiffness than treated sand. However, in the following cycles sand stiffness decreases rapidly to zero, while in treated sand stiffness decreases gradually to a small value ($\sim 1000 \text{ kPa}$).

Figure 27 presents the cyclic resistance for loose treated (red symbols) and untreated (blue symbols) M31 sand in terms of cyclic stress ratio ($\text{CSR} = q / (2 \cdot p'_i)$) versus the number of cycles required for liquefaction. **Figure 27(a)** presents the cycles needed for initial liquefaction N_{IL} ($\Delta u = p'_i$), whereas **Figure 27(b)** presents the cycles required to develop double amplitude (DA) cyclic strain $\epsilon_{\text{cyc}} = 5\%$. These results indicate that treatment with a colloidal silica concentration of 10% increases the liquefaction resistance of loose sand

since under the same CSR more cycles are required to meet both liquefaction criteria. The improvement factor $I_f = CSR_{treated} / CSR_{untreated}$ correlated with the number of cycles (N) reduces while N increases since the curves tend to converge. The improvement factor for initial liquefaction is approximately 17%, while for reaching cyclic strain, $\epsilon_{cyc}=5\%$ is 36%. Consequently, this stabilization method delays initial liquefaction to an extent but mainly hinders the development of large strains and specimen collapse.

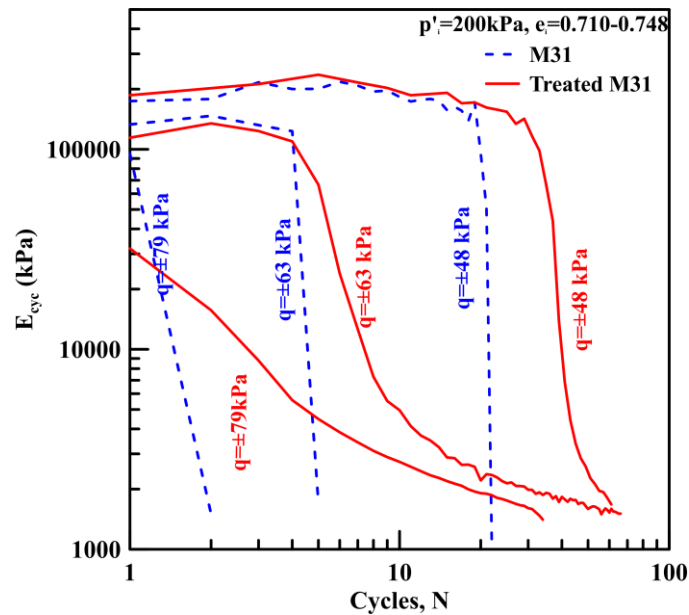


Figure 26: Stiffness characteristics of treated and untreated M31 sands from cyclic triaxial tests

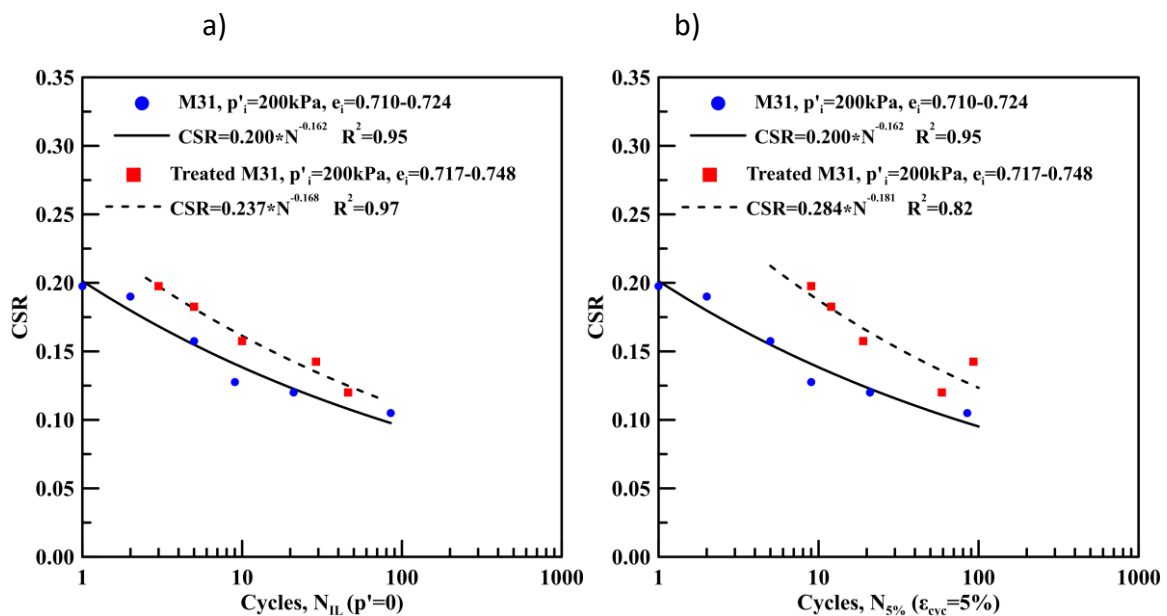


Figure 27: Cyclic resistance curves for treated and untreated loose M31 sand: a) Number of cycles to reach Initial liquefaction (N_{IL}) and b) Number of cycles to develop cyclic strain $\epsilon_{cyc}=5\%$ ($N_{5\%}$)

3.5 Hollow cylinder tests at various fixed loading directions

The effect of fabric anisotropy on the response of sands under undrained loading at various fixed principal stress directions (in the range $\alpha=0^\circ$ to $\alpha=90^\circ$) has been studied in the literature (M. Yoshimine et al., 1998; Nakata et al., 1998; Shibuya et al., 2003a; Georgiannou et al., 2018; P. K. Triantafyllos et al., 2021). In general, as the direction of the major principal stress departs from the vertical direction, sands exhibit brittleness, and the strain response becomes softer. However, no experiments in the literature focus on treated sand's anisotropic behavior, even though bonding and fabric anisotropy contribute to stabilized sand's strength and deformation characteristics.

In fact, under undrained triaxial cyclic loading of treated sand, it was noted that axial strains build up on the extension side (Porcino et al., 2011; Pavlopoulou & Georgiannou, 2021). Moreover, the triaxial extension tests of this thesis indicate that sand treated with nano-silica gel maintains the characteristics of untreated sand behavior, i.e., response much weaker in terms of peak strength and more contractive pre-peak in extension than in compression, reflecting the hosting sand's anisotropic structure. To examine further the anisotropic behavior of treated sand, a comprehensive and systematic database on the response of M31 sand under generalized loading was first produced. Tests were conducted under fixed principal stress directions in the hollow cylinder apparatus. Drained conditions were selected in order to establish the stress-strain relationships under fully controlled effective stress paths, where volumetric strain is related to the potential for pore water pressure generation (Symes et al., 1988, Wijewickreme and Vaid, 1993). Special attention in the investigation is focused on the significant role of the intermediate principal stress parameter, b , on the stress-strain and volume change behavior, deformation characteristics and non-coaxiality of the sand under generalized stress conditions.

The drained monotonic shear tests were performed on loose and dense M31 sand under fixed major principal stress directions (α). The values of mean effective stress, p' , and the intermediate principal stress parameter, b , were kept constant. **Figure 28** presents the stress paths followed in q - p' stress space (**Figure 28(a)**) and in X - Y stress space (**Figure 28 (b)**). The samples were isotopically consolidated from the mean effective stress of $p'_i=30\text{kPa}$ (point A) to $p'_i=200\text{ kPa}$ (point B) by increasing simultaneously the outer and inner cell pressures, while keeping the back pressure constant. After a resting period of 2 hours, monotonic shear was applied at varying initial major principal stress directions, α , until failure under drained conditions (point C). The test characteristics are included in **Table 6**.

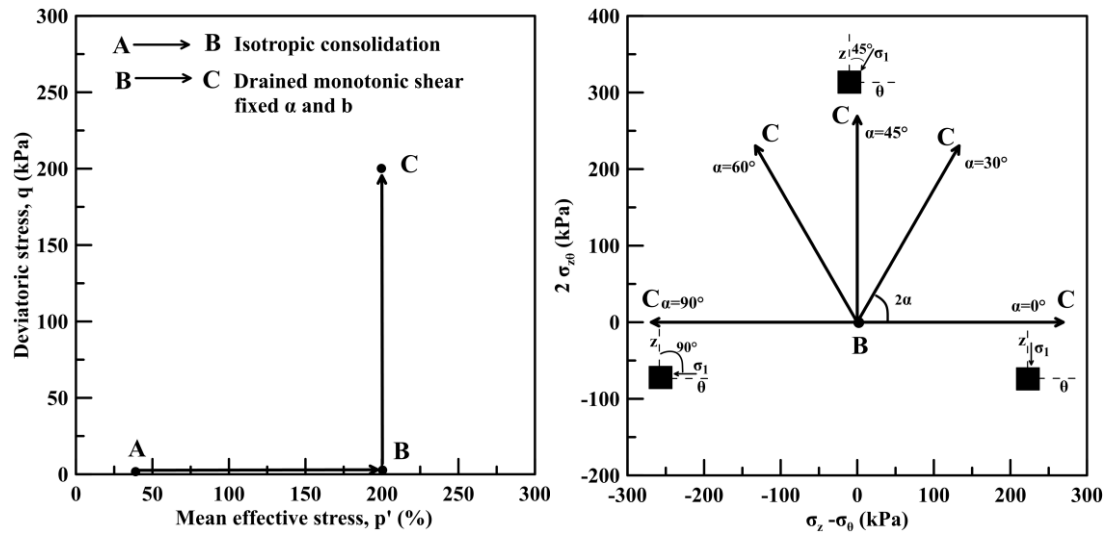


Figure 28: Stress paths under fixed α ($^\circ$) loading: (a) q/p' space and (b) X-Y space

Table 6: Details of Hollow Cylinder tests under fixed α and b parameters

Πείραμα	e_i	p'_i (kPa)	α ($^\circ$)	b	Σταθεροποίηση
FA-1	0.718	200	0	0	-
FA-2	0.711	200	30	0	-
FA-3	0.708	200	45	0	-
FA-4	0.719	200	60	0	-
FA-5	0.709	200	90	0	-
FA-6	0.553	200	0	0	-
FA-7	0.559	200	30	0	-
FA-8	0.565	200	45	0	-
FA-9	0.560	200	60	0	-
FA-10	0.565	200	90	0	-
FA-11	0.715	200	0	0.5	-
FA-12	0.720	200	30	0.5	-
FA-13	0.718	200	45	0.5	-
FA-14	0.716	200	60	0.5	-
FA-15	0.721	200	90	0.5	-
FA-16	0.565	200	0	0.5	-
FA-17	0.557	200	30	0.5	-
FA-18	0.563	200	45	0.5	-
FA-19	0.557	200	60	0.5	-
FA-20	0.559	200	90	0.5	-
FA-21	0.700	200	0	1	-
FA-22	0.701	200	30	1	-
FA-23	0.701	200	45	1	-
FA-24	0.708	200	60	1	-
FA-25	0.709	200	90	1	-
FA-26	0.568	200	0	1	-
FA-27	0.570	200	30	1	-
FA-28	0.570	200	45	1	-

Extended Summary and Conclusions

FA-29	0.572	200	60	1	-
FA-30	0.569	200	90	1	-
SFA-1	0.713	200	0	0.5	T
SFA-2	0.716	200	45	0.5	T
SFA-3	0.720	200	60	0.5	T
SFA-4	0.721	200	90	0.5	T
SFA-5	0.710	200	0	0	T
SFA-6	0.720	200	90	1	T

Note: e_i , void ratio after consolidation,
 p'_i , mean effective stress after consolidation,
 α , principal stress direction
 b , intermediate stress parameter
T, treated specimen

To investigate the effects of material density on the anisotropic behavior of sand, monotonic loading tests were conducted under various fixed major principal stress inclinations ($\alpha=0, 30, 45, 60,$ and 90°), measured in the vertical loading direction on loose and dense M31 sand. The response of isotopically consolidated sand to drained loading with fixed stress principal axes under constant mean effective stress $p'=200$ kPa and constant $b=0$ is presented in **Figure 29** in terms of stress ratio–deviatoric strain (**Figure 29(a)**) and volumetric-deviatoric strain (**Figure 29(b)**) for dense (left) and loose (right) specimens.

The effect of the material density is significant as no matter what the major principal stress direction is, loose sand exhibits a softer response in terms of stress-strain, lower shear strength, and larger contractive volumetric strain than dense sand. Dense sand under these loading conditions shows no contraction but dilates directly. Moreover, higher deviatoric strain is required for the loose sand to reach the peak in the stress-strain curves. As the density decreases, the interlocking between the particles weakens, resulting in a softer response, lower shear resistance, and increased compressibility.

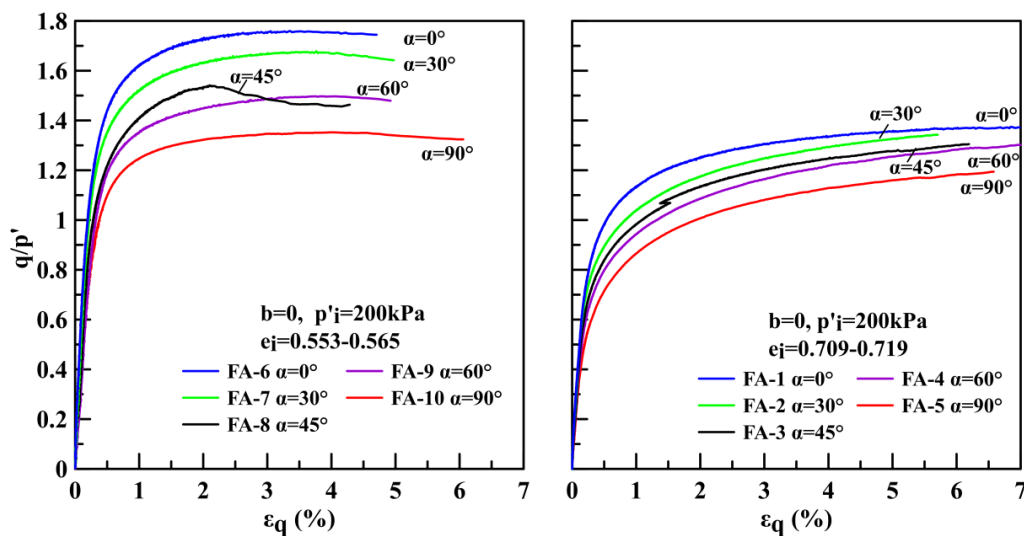
Regardless of density, M31 sand shows clear anisotropic characteristics. The shear strength of the sands reduces with increasing values of α . The highest peak stress ratio was obtained when the major principal stress direction was parallel to the deposition direction ($\alpha = 0^\circ$), and the lowest value was obtained at $\alpha=90^\circ$. At the same density, the peak stress ratio is achieved at higher deviatoric strains as α increases. For dense sand under $\alpha \geq 45^\circ$, dilatancy reduces compared to loading under $\alpha=0$ and 30° . For loose sand, an increase in angle, α , impacts its volumetric response and compressibility increases significantly. The results indicate that the initial fabric anisotropy affects the subsequent behavior of loose and dense sand.

The influence of the relative magnitude of the intermediate principal stress, σ_2 , characterized by the different b -values, on sand response, is investigated by conducting monotonic shear tests on M31 sand for three b values ($b = 0, 0.5$ and 1.0) under various

fixed loading directions. **Figure 30** presents the results for dense M31 sand in terms of stress ratio-deviatoric strain and volumetric-deviatoric strain.

The influence of intermediate principal stress parameter b is apparent in stress-strain behavior. For every loading direction, the stiffest response and the highest peak are observed when $b=0$. Sand's response becomes softer as b increases. The decrease in strength is more significant when b is increased to $b=0.5$ and less pronounced when it is further increased to $b=1$. The volumetric response also shows a similar pattern; as b increases, the volumetric compressibility of sand increases, and dilatancy decreases.

a)



b)

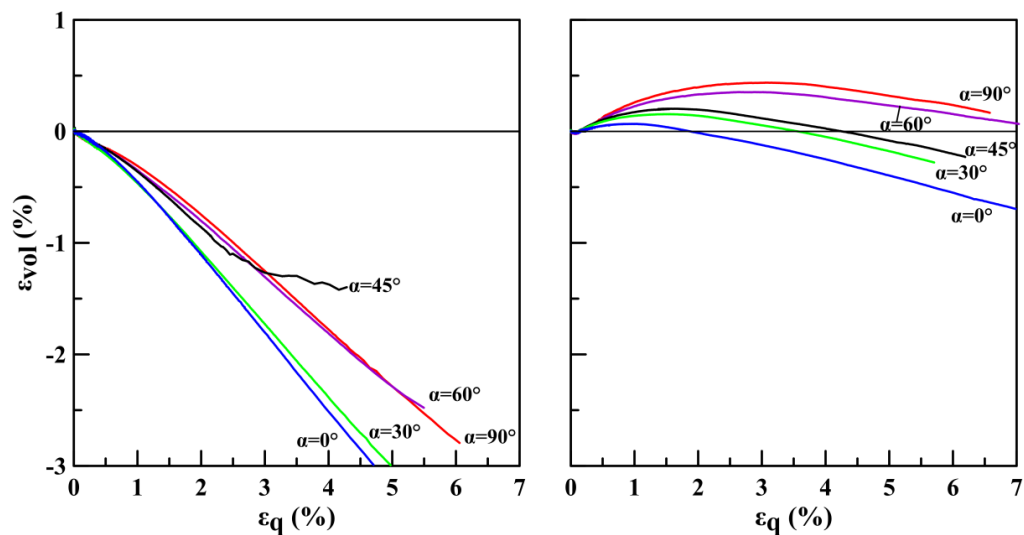


Figure 29: Results of monotonic drained loading with fixed α and $b=0$ on dense (left side) and loose (right side) M31 sand: (a) stress ratio – deviatoric strain and (b) volumetric – deviatoric strain curves

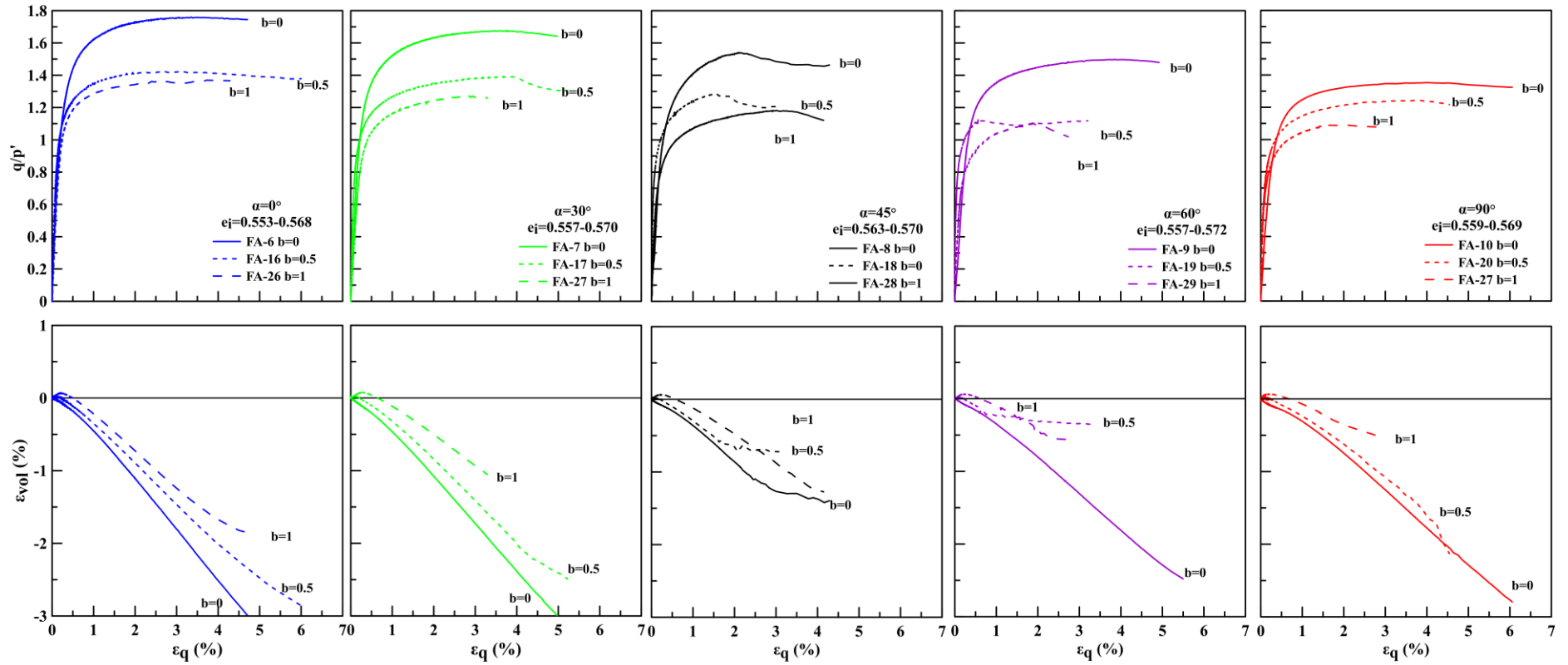


Figure 30: Response of isotopically consolidated dense M31 sand to drained loading with fixed principal stress axes. Effect of intermediate principal stress parameter

The installation of a new burette equipped with a high accuracy differential pressure transducer connected to the inner chamber allowed the measurement of the inner and outer radius changes. These measurements allowed for the first time the computation of all the strain components. **Figure 31** presents the development of vertical (ϵ_z), circumferential (ϵ_θ), radial (ϵ_r) strain, and shear ($\gamma_{\theta z}$) strain against deviatoric stress (ϵ_q) for monotonic tests on dense M31 sand under various fixed loading directions for the three b-values (b=0, 0.5 and 1). For the three normal strain components, positive values represent contraction, while negative expansion.

The change in loading direction significantly affects axial deformation since axial strain changes from contractive for $\alpha < 45^\circ$ to expansive for $\alpha > 45^\circ$. Under $\alpha = 45^\circ$, where the change in vertical stress is minimum axial strain is practically zero. The opposite trend is observed for circumferential strain. Comparing the results from different b-values, the increase in b results in more expansive axial and circumferential strains for every loading direction. The shear strain seems less prone to change with b-values and is affected only by the magnitude of the applied shear stress.

The radial strain seems sensitive to changes in loading directions. However, it is significantly affected by the relative magnitude of the intermediate stress parameters. Radial strain changes from expansion to contraction as b increases from 0 to 0.5, and the contractive radial strain increases even more when b rises to 1. It can be derived that plane strain conditions ($\epsilon_r = 0$) could be achieved at b between 0 and 0.5 in agreement with the value $b \approx 0.25-0.3$ recommended by M. M. Yoshimine et al., 1999. Moreover, the independent measurement of all strains proves that the assumption of $\epsilon_{rr} = \epsilon_{\theta\theta}$ often adopted in the literature (Triantafyllos et al., 2020) is not accurate.

The variation of the stress ratio at phase transformation, $(q/p')_{p.t.}$, with the major principal stress direction, α , for loose and dense M31 sand is shown in **Figure 32**. Phase transformation points from triaxial compression ($\alpha = 0^\circ$ and b=0) and triaxial extension ($\alpha = 90^\circ$ and b=1) under drained conditions for loose M31 sand are also included and marked with red symbols. Triaxial tests seem to agree with the corresponding HC tests. For loose sand under the same b value, the change in loading direction doesn't significantly affect the stress ratio at phase transformation. Georgiannou et al., 2018 conducted undrained shear tests under different loading directions and reached the same conclusion. However, the intermediate stress parameter has a stronger effect on $(q/p')_{p.t.}$, which decreases by approximately 16% when b increases from 0 to 1. Dense sand under b=0 doesn't contract under any loading direction. Under b=0.5 and 1, the increase in α and b results in a slight decrease in $(q/p')_{p.t.}$. At any loading direction the increase in density significantly reduces the stress ratio at P.T., accelerating the onset of dilative behavior.

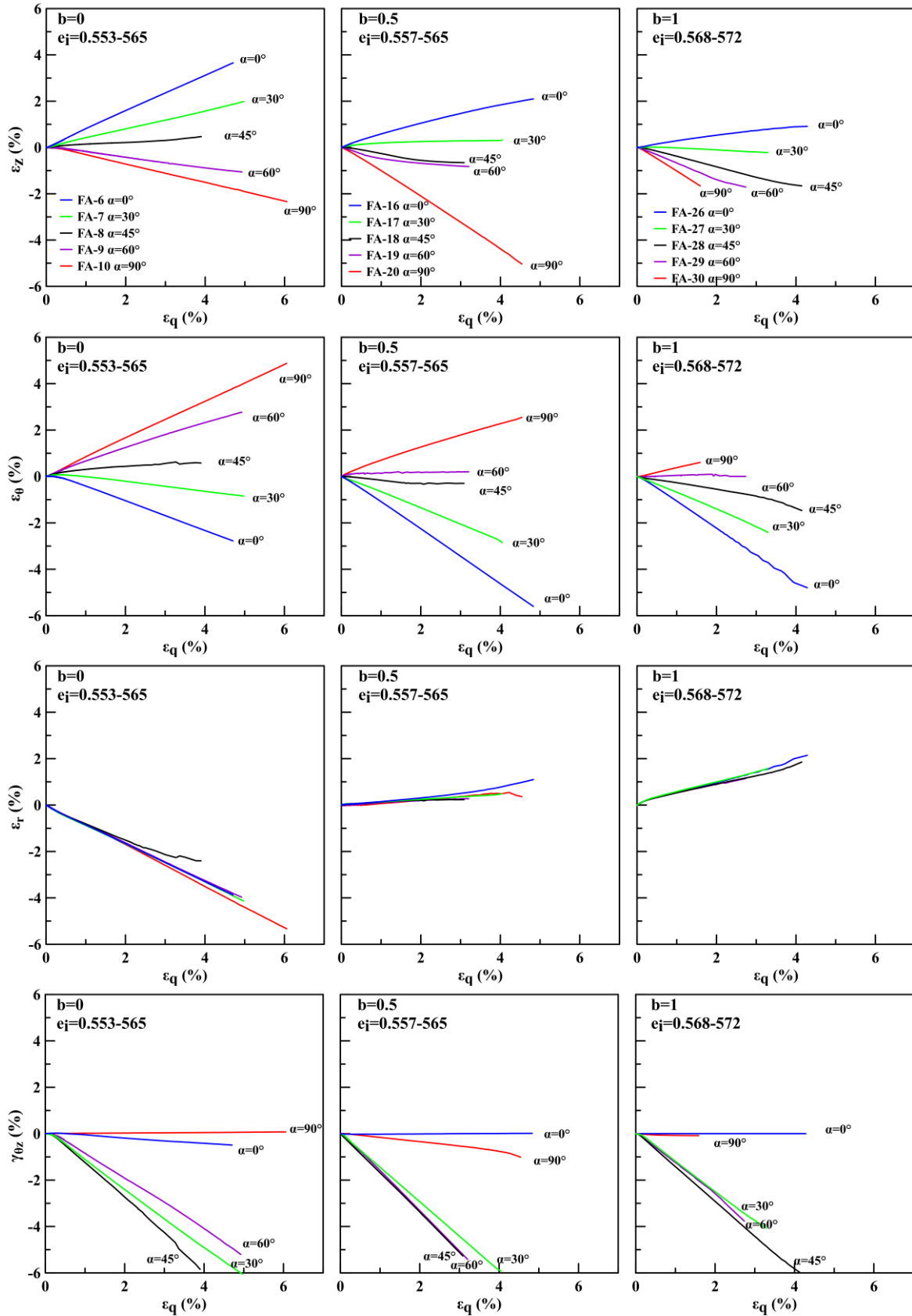


Figure 31: Drained monotonic shearing on dense M31 sand. Effect of α and b on the development of strain components.

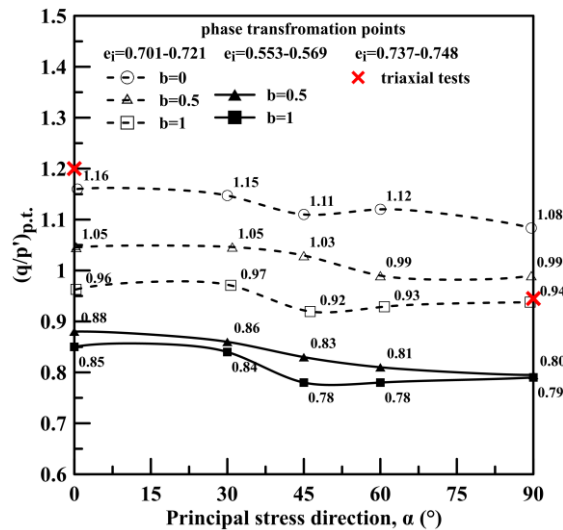


Figure 32: Stress ratio at phase transformation at different major principal stress directions and b-values for loose and dense M31 sand

The variation of measured peak stress ratio, q/p'_{max} , with major principal stress direction, α , for loose and dense M31 sand is shown in **Figure 33**. Peak points from triaxial compression ($\alpha=0^\circ$ and $b=0$) and triaxial extension ($\alpha=90^\circ$ and $b=1$) under drained conditions for loose M31 sand are also included and marked with red symbols (**Figure 33(a)**). The results from triaxial tests match the corresponding HC tests and define the upper and lower strength limit for loose sand. It is apparent that the loading direction substantially impacts the shearing resistance of the sand.

Regardless of the sand's density, the highest strength is achieved at $\alpha=0^\circ$ and $b=0$ and the lowest when $\alpha=90^\circ$ and $b=1$. Generally, as the major principal stress direction deviates from the vertical axis and the relative magnitude of the intermediate stress increases, the peak strength reduces. When $b=0$, both sand densities exhibit a continuous decrease in peak strength as α increases. Under $b=0.5$ and 1 peak strength at $\alpha=60$ and 90° have similar values. However, the dense sand under $b=0.5$ shows smaller peak strength at $\alpha=60^\circ$ compared to $\alpha=90^\circ$. This is accompanied by the early development of strain uniformities. Test results for dense sand at $\alpha=60^\circ$ (**Figure 30**) repeatedly show that under $b=0.5$ shear banding interrupted the evolution of strength and dilation and didn't allow the specimen to reach its peak strength value. Finally, for both sands, when b increases from 0 to 0.5, strength reduces significantly; however, a further increase to $b=1$ results in a minor reduction of peak strength.

Comparing the two densities, at each b-value, it is observed that the changes in strength with the angle α have a similar trend, although, in dense sand, the changes are more pronounced. When $b=0$ and $\alpha=0^\circ$, the peak strength of dense sand is 22% higher than loose sand, while this percentage decreases as α and b increase. As the loading approaches the extension mode, the differences in peak strength between loose and dense sand diminish.

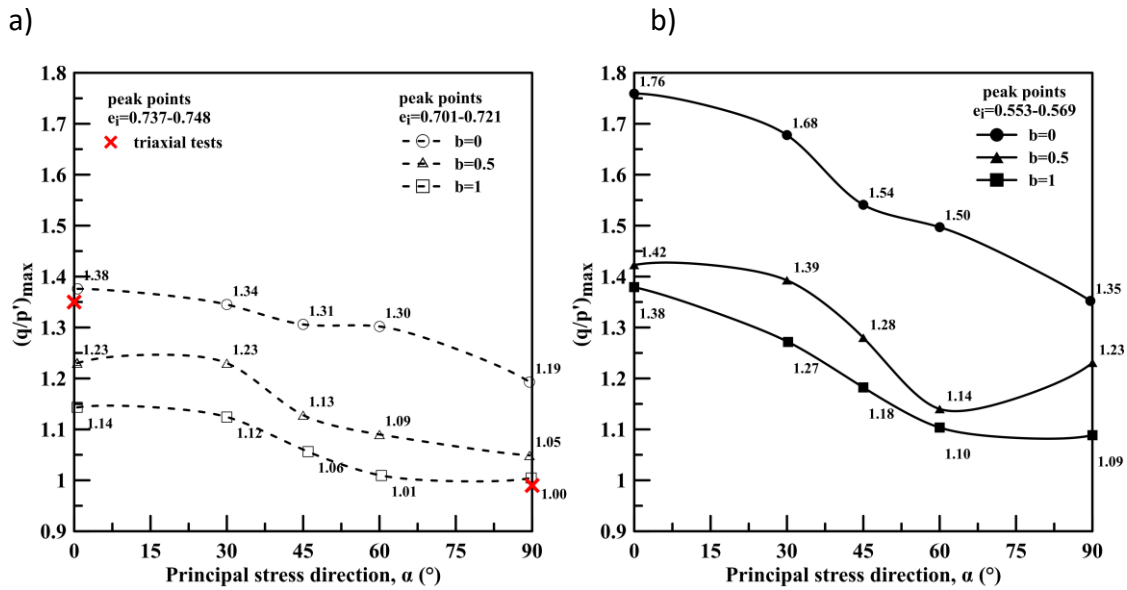


Figure 33: Peak stress ratio at different major principal stress directions and b-values for (a) loose and (b) dense M31 sand

This thesis also examines the noncoaxial behavior of M31 sand, i.e., the difference between the principal stress and principal strain increment direction, under various stress paths. The influence of sand’s density and b-value is examined. Indicative results of the fixed- α tests carried out on dense M31 sand at b=0 are plotted in the X-Y stress space in **Figure 34**. The stress paths are plotted as solid lines from the stress space origin to the failure envelope, plotted as a dashed line. The unit strain increments are displayed in the form of vectors. The strain increment vector in this space makes an angle to the horizontal axis that is twice the angle of the strain increment axis relative to the vertical direction ($2\alpha_{de}$). Sand behaves almost coaxially at $\alpha = 0^\circ$ and 90° since the strain vectors are practically parallel to the stress paths. However, for the rest of the tests, noncoaxiality was observed with the principal strain increment angle deviating from principal stress direction angle. Strain vectors seem to be normal to the failure line, pointing to the weakest, in terms of strength, part of the plane. Vectors tend to align with stress paths as shearing continues and failure is approached.

The effect of the intermediate stress parameter on the noncoaxial behavior of dense sand is illustrated in **Figure 35**, where the stress ratio, q/p' , is plotted against the principal stress direction, α (lines), and strain increment direction, α_{de} (symbols). Irrespective of the b-value at $\alpha=0^\circ$ and 90° the sand’s response is almost coaxial, with the maximum deviation between α_{de} and α being 4° . For the other tests ($\alpha=30, 45,$ and 60°), the deviation is high approaching $\alpha_{de}-\alpha = 15^\circ$ at the initial stage of shearing. As the stress ratio increases and higher strain accumulates, the deviation constantly reduces, and eventually the sand’s behavior becomes coaxial. Comparing the results from different b-values, non-coaxiality is more significant at b=0. For each loading direction when b=0, the deviation between strain and stress angle, $\alpha_{de}-\alpha$, is higher and diminishes at a higher stress ratio compared with tests at b=0.5 and b=1.

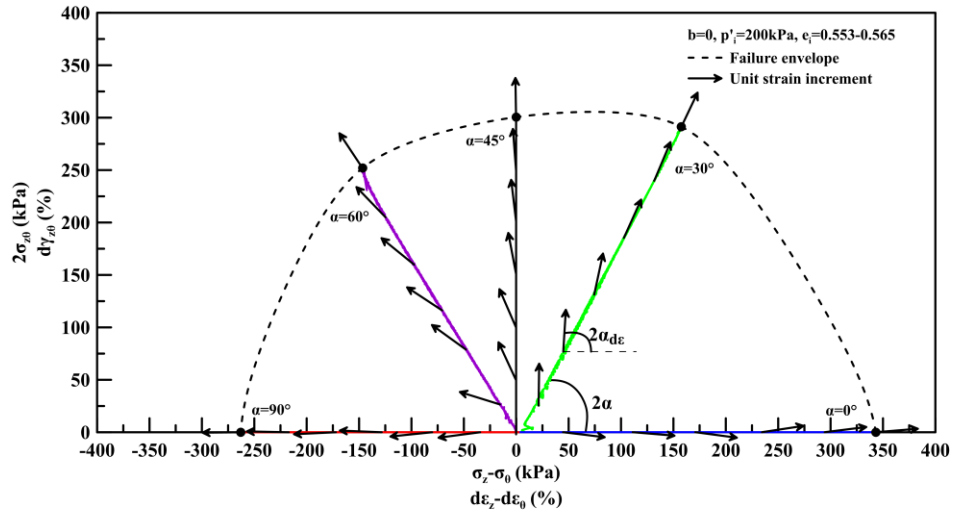


Figure 34: Directions of principal strain increments from fixed- α tests for dense M31 sand at $b=0$

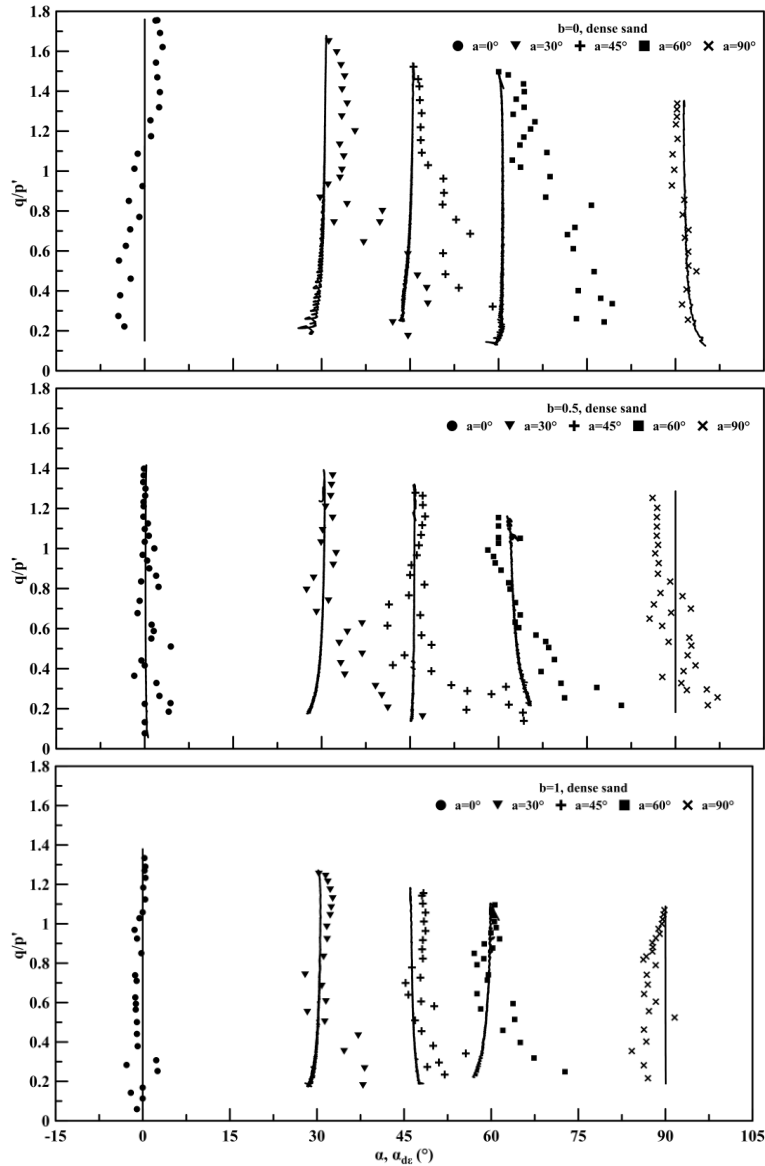


Figure 35: Effect of b on the noncoaxial behavior of dense M13 sand under fixed- α tests

To study the strength anisotropy of treated sand and its compatibility with sand-like behavior, monotonic shear tests were conducted under various fixed major principal stress inclinations on treated M31 sand. Treated loose specimens were isotropically consolidated to $p'_i=200$ kPa and subjected to drained loading at fixed α ($\alpha=0, 45, 60, \text{ and } 90^\circ$) and constant b in the hollow cylinder apparatus. The response of treated sand (red lines) to drained loading with fixed principal stress axes under constant mean effective stress and $b=0.5$ is presented in **Figure 36** in terms of stress ratio against deviatoric strain and volumetric against deviatoric strain. For comparison, results from loose sand (blue dotted lines) and dense sand (blue solid lines) specimens tested under the same conditions are included.

Treated sand shows evident anisotropic characteristics. The highest peak stress ratio was obtained when the major principal stress direction was parallel to the deposition direction ($\alpha = 0^\circ$), and the lowest value was obtained at $\alpha=60^\circ$. Strength drops significantly from $\alpha=0$ to 45° . Generally, shear strength reduces with increasing values of α , and dilatancy reduces. For each loading direction, treatment with colloidal silica increases the sand's strength since loose treated sand reaches higher stress ratios than dense sand. Moreover, dilation is enhanced since volumetric against deviatoric strain curves from treated sand lie between those for loose and dense M31 sand. Treatment with colloidal silica seems to enhance sand behavior more at $\alpha=0^\circ$ rather than $\alpha \geq 45^\circ$ due to extreme dilation and suppressed contraction.

It should be noted that although dilation increases the peak stress ratio in treated sand, at lower stress ratios of about 0.3 treated sand suddenly accumulates deviatoric strains of about 1.5% and becomes much softer than untreated sand at $\alpha \geq 45^\circ$. In this strain range, volumetric strains remain practically zero indicating that yielding takes place under constant volume conditions. This transient state is followed by dilative volumetric changes associated with increasing stress ratios. The mentioned hollow cylinder tests were conducted under stress-controlled conditions. However, when treated sand was tested at $\alpha=90^\circ$ in triaxial extension tests conducted under strain-controlled conditions no transient state was observed (**Figure 22**). Given that in strain-controlled tests the loading rate is kept low to allow drainage in treated sand, it can be deduced that the fast shearing rate under stress control in the hollow cylinder hinders drainage, once unstable response is initiated at a stress ratio of around 0.3.

To further investigate the effect of loading conditions on treated sand behavior, stress-controlled and strain-controlled triaxial extension tests were performed on loose treated sand under drained conditions. The results of both triaxial extension tests and a hollow cylinder (HC) test conducted at $\alpha=90^\circ$ and $b=1$ on loose ($e_i=0.720-0.742$) treated M31 sand are presented in **Figure 37** in terms of stress ratio against deviatoric strain ($q/p'-\epsilon_q$) (**Figure 37(a)**) and volumetric against deviatoric strain ($\epsilon_{vol}-\epsilon_q$) (**Figure 37(b)**).

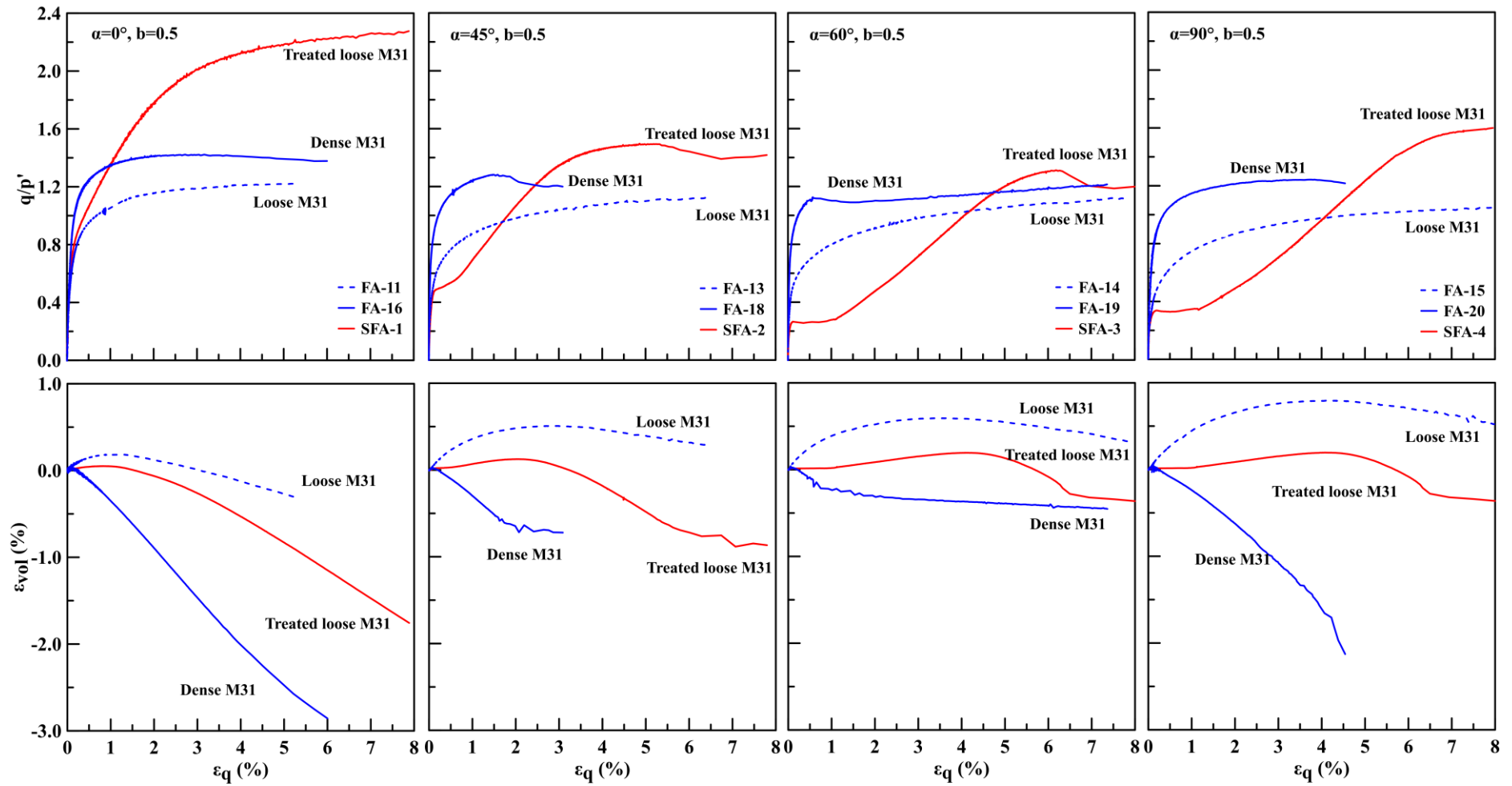


Figure 36: Response of treated loose sand and untreated loose and dense M13 sand under drained monotonic loading at fixed stress directions and at $b=0.5$

Under strain control (0.025mm/min) stress ratio continuously increases, as shown by the dotted line. Under stress control (3 kPa/min), a yielding phase is observed at a stress ratio of about 0.4 and strains up to 2%. Subsequently, the stress ratio of the stress-controlled triaxial tests practically coincides with that of the strain-controlled test. The peak stress ratio of the HC test is a little higher than the triaxial test due to the specimen's higher density. This unstable behavior occurs in the contractant loading stage, as defined by the volume against the deviatoric strain curve of the strain-controlled test (**Figure 37(b)**). During the yielding phase, volumetric strains are nearly zero for the triaxial and the HC tests. Overall volumetric changes are similar in strain and stress-controlled tests at phase transformation and subsequently during dilation.

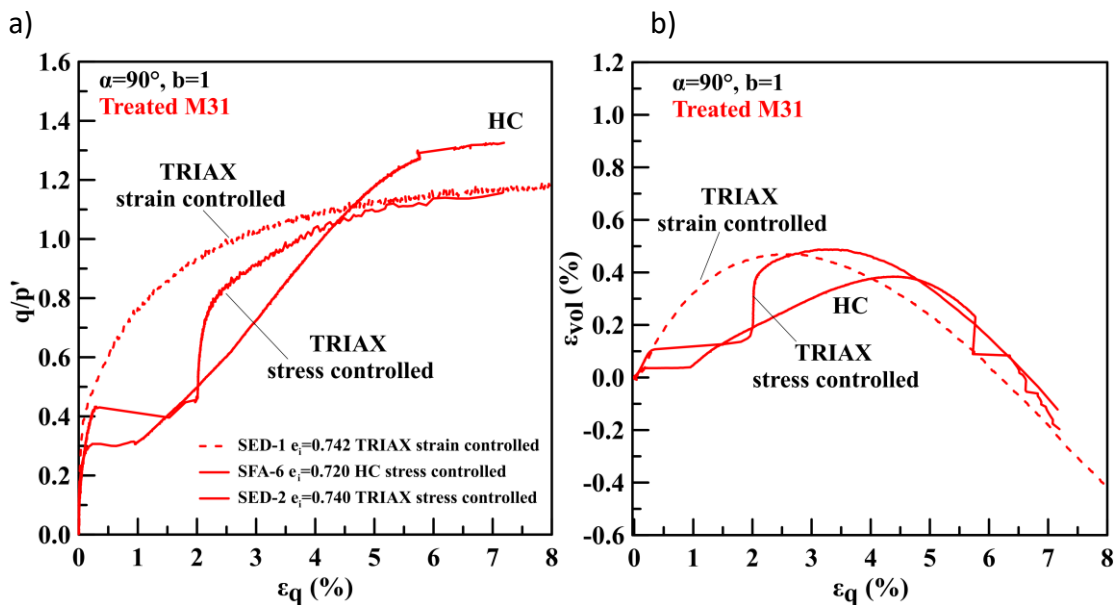


Figure 37: Drained extension tests on treated M31 sand under stress and strain control: (a) stress ratio-deviatoric strain and (b) volumetric – deviatoric strain curves

Since yielding occurs under practically undrained conditions, undrained triaxial extension tests are performed on treated sand under stress control. The results are compared to those obtained from the strain-controlled extension test (dotted line) in **Figure 38**. Under undrained stress-controlled loading, pore pressure equalization is faster than volume change; however, even the undrained extension test yields at about $q/p'=0.5$, marked as a black circle in the diagrams. At that point, an unstable behavior initiates. Under almost constant deviatoric stress, shear strain accumulates rapidly; thus, the testing system could not correctly record the stress- strain response. After that phase, stress increases, and the curves tend to match those of the strain- controlled tests. A tendency for dilation at the same rate as the strain-controlled test and a common peak stress ratio is observed.

The treated sand's transient peak (black circle) practically coincides with the instability point (Lade, 2003). When the loading takes place under stress control, the drainage is either prohibited (undrained conditions) or not feasible during yielding at partially drained conditions. Treated sand shows an unstable behavior, like loose sand does, under undrained

conditions. Loose M31 sand develops an unstable behavior at loading directions $\alpha \geq 45^\circ$ and $b=0.5$, with the stress ratio at the instability point reducing as α increases (Triantafyllos et al., 2020). This implies that in very loose deposits of treated sand with an inherent tendency for initial contraction, excessive strains may accumulate under monotonic drained loading at relatively low stress ratios because under stress control the behaviour of treated sand becomes partially drained. The limiting stress ratio is the instability stress ratio under undrained loading. This is a weak point for treated sand in which contrary to sand drainage is hindered under stress control. However, higher stress ratios can be attained as dilative tendencies take over.

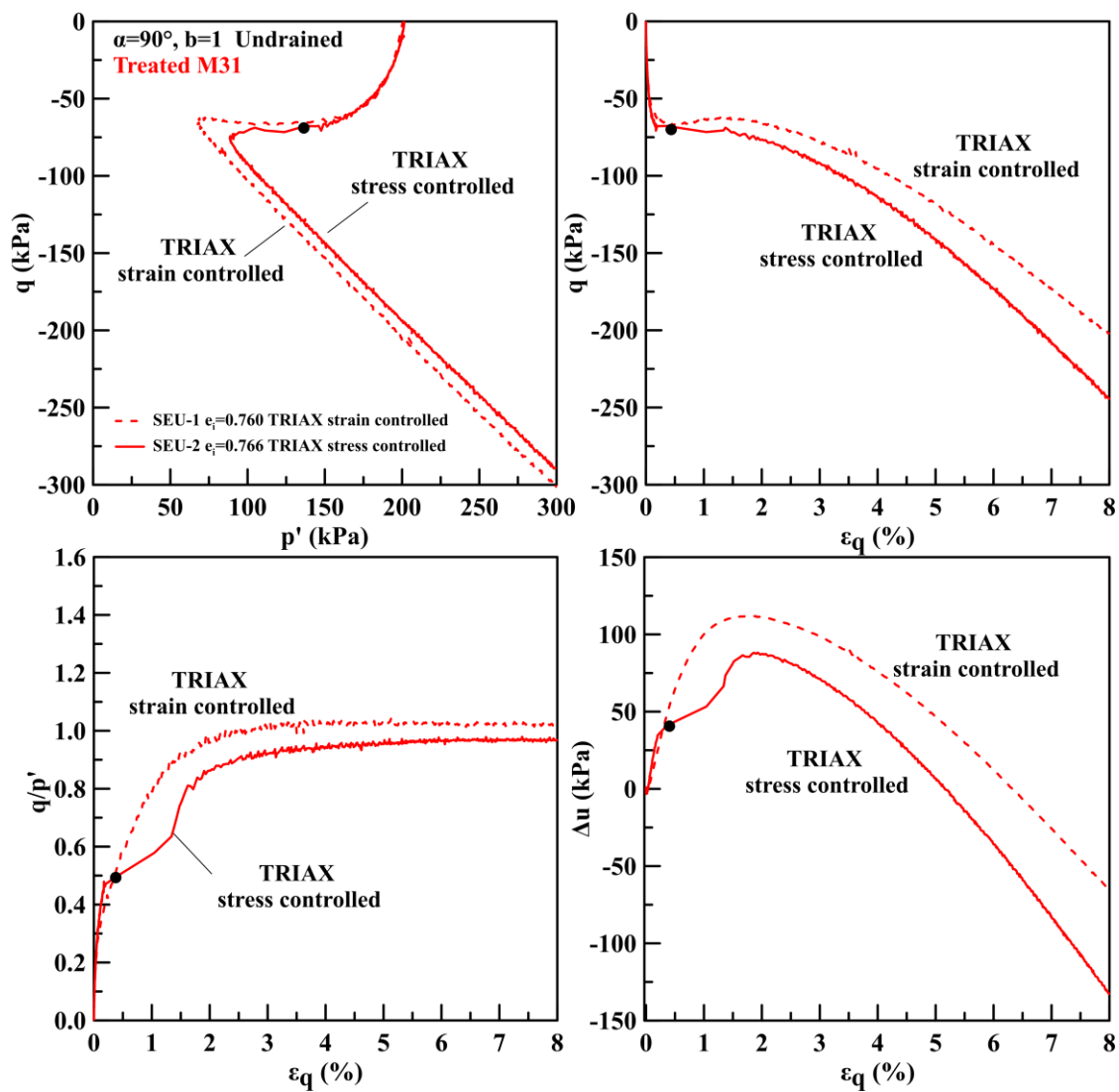


Figure 38: Undrained extension tests on treated M31 sand under stress and strain control

3.6 Drained Principal Stress Rotation tests on M31 sand

Drained rotational shear tests at different effective stress ratios have been carried out on M31 sand to examine the sand's stress-strain response, volumetric behavior, and non-coaxiality under continuous principal stress rotation. The effect of sand's density and the relative magnitude of the intermediate stress are also examined. The imposed stress paths are presented in **Figure 39** in q - p' and Y - X stress space. All specimens after saturation were isotropically consolidated to mean effective stress $p'_i=200\text{kPa}$ ($A \rightarrow B$). Next, specimens were subjected to drained monotonic shear under constant $p'_i=200\text{kPa}$, at fixed $\alpha=0^\circ$ and $b=0$ or 0.5 until they reached a specific stress ratio ($B \rightarrow C$). After that, the stress ratio and b -value are kept constant while the principal stress axes are rotated counterclockwise from $\alpha=0$ to 180° ($C \rightarrow D$). Each full α -rotation is counted as one cycle (N). The magnitude of each principal stress is kept constant during each cycle. To ensure fully drained conditions, the major principal stress direction changed at a rate of $\approx 3^\circ/\text{min}$. Test details are summarized in **Table 7**.

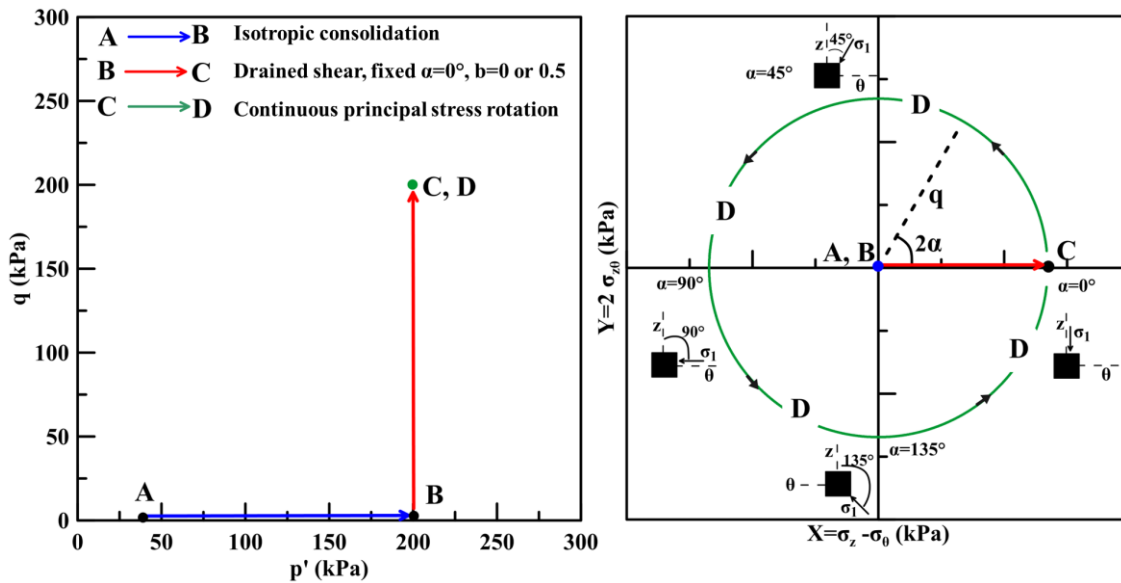


Figure 39: Stress paths in q - p' and X - Y stress space for rotational shear test

Table 7: Details of Drained Principal Stress Rotation tests

Test	Monotonic shear $\alpha=0^\circ$			Continuous principal stress rotation $\alpha=0^\circ \rightarrow 180^\circ$		
	e_i	p'_i (kPa)	b	e_r	q/p'	b
R-5	0.690	200	0.5	0.690	0.69	0.5
R-8	0.689	200	0.5	0.689	0.87	0.5
R-7	0.681	200	0.5	0.681	1.04	0.5
R-6	0.562	200	0.5	0.562	0.98	0.5

R-1	0.565	200	0.5	0.565	1.02	0.5
R-4	0.560	200	0.5	0.560	1.10	0.5
R-9	0.564	200	0	0.564	0.84	0
R-10	0.560	200	0	0.560	0.98	0

Note: e_i , void ratio after consolidation,
 p'_i , mean effective stress after consolidation,
 α , principal stress direction
 b , intermediate stress parameter
 e_r , void ratio after monotonic shear
 q/p' , stress ratio under principal stress rotation

Figure 40 presents the evolution of the imposed stress components (σ_z , σ_θ , σ_r , and $\tau_{\theta z}$) with the number of cycles (N) and the development of the corresponding strain components (ε_z , ε_θ , ε_r , and $\gamma_{\theta z}$) for medium dense ($e_i=0.681-0.690$) M31 sand under drained stress rotation. In these figures, a positive value along the vertical axis indicates contraction, and a negative indicates dilation. Three different stress ratios are examined while the mean effective stress, $p'=200$ kPa, and the intermediate stress parameter, $b=0.5$, are maintained constant. The stress components σ_z , σ_θ , σ_r , and $\tau_{\theta z}$ fluctuate sinusoidally with constant amplitude proportionate to the stress ratio. The radial stress is constant and is equal to the intermediate principal stress ($\sigma_r=\sigma_2$). It is observed that plastic strains accumulate despite the magnitudes of principal stresses being kept constant.

In stress rotation tests under $q/p'=0.69$ and 0.87 , most strains were induced in the first cycle, while the amplitude of the strain components tends to stabilize in the following cycles until the sand reached a new stable state. When the stress ratio increases, the magnitude of the strains is higher, and the oscillation is more pronounced. The axial strain accumulates on the extension side, while the radial and the circumferential on the compression side. Because of the sand's vertical deposition and initial loading in the vertical direction ($\alpha=0^\circ$), the anisotropic fabric has lower compressibility and higher dilatancy along the z-axis compared to the r and θ axes. Moreover, when rotation is initiated, the vertical stress reduces, and the circumferential stress increases, resulting in contractive and expansive vertical and circumferential strain, respectively. The stresses and the strains oscillate in the following cycles, but the strains accumulated in the first cycle dominate. The radial stress is contractive in agreement with the results of monotonic shear under $b=0.5$ (**Figure 31**). When principal stress rotation takes place under higher stress ratio ($q/p'=1.04$), large strains are induced, and the specimen fails at $\alpha=125^\circ$ during the 2nd cycle.

The evolution of the volumetric strain, ε_v , with the number of cycles is presented in **Figure 41**. Although the magnitudes of principal stresses were maintained constant during each test, contractive volumetric strain was accumulated due to the rotation of principal stress directions. Under stress ratios $q/p'=0.69$ and 0.87 , most of the volumetric strain occurs during the first cycle. The higher the stress ratio, the more contractive sand is. The

test R-7 during monotonic shearing was on the onset of dilation when rotation began under $q/p'=1.04$. After slight dilation, the specimen accumulates contractive volumetric strain until it fails during the second cycle.

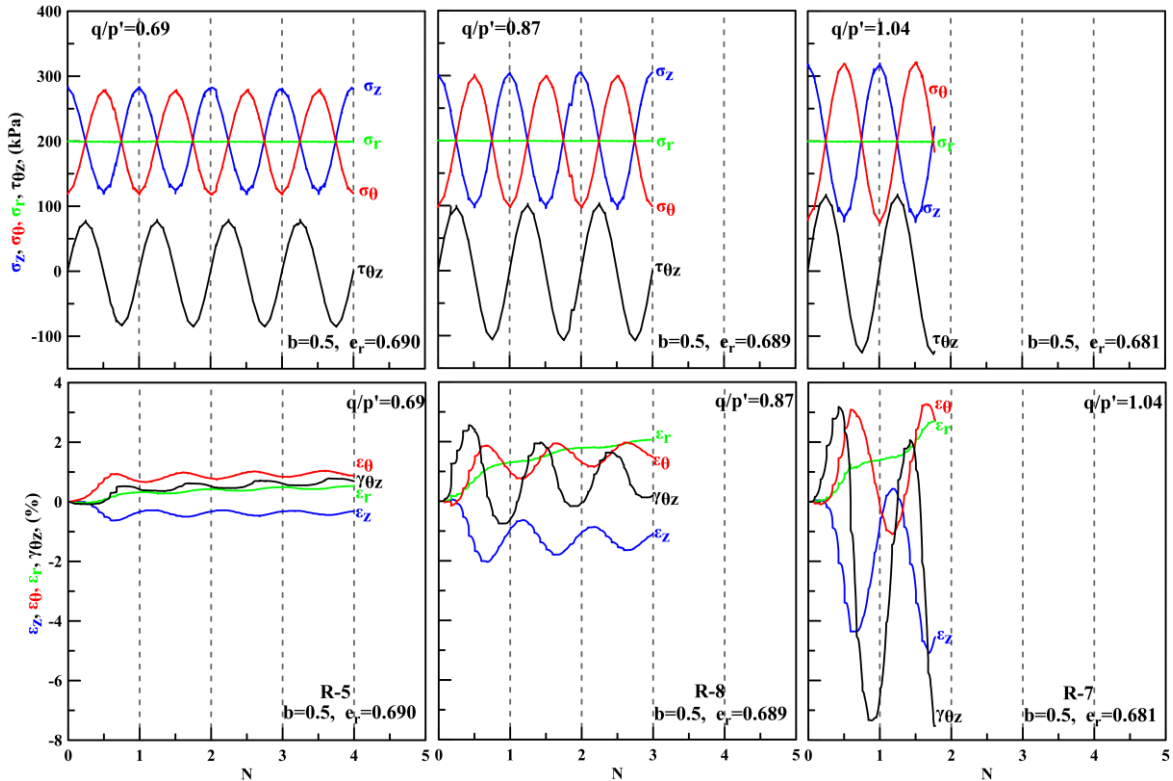


Figure 40: Evolution of stress and strain components under drained rotational shear on medium-dense sand under $b=0.5$. Effect of stress ratio

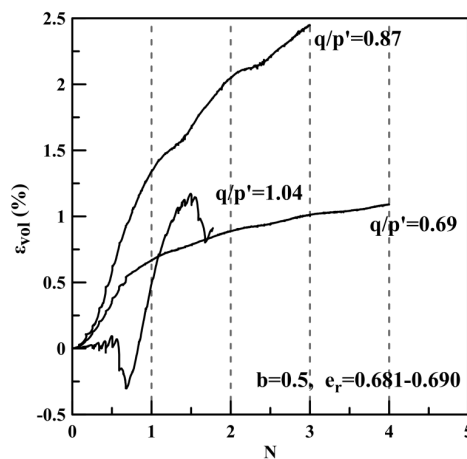


Figure 41: Evolution of volumetric strain with cycles under drained rotation shear on medium-dense sand under $b=0.5$. Effect of stress ratio

To study further the sand's behavior when stress rotation initiates during the dilatant phase of the monotonic loading, stress rotation tests were performed on dense sand specimens after they reached the phase transformation point. The results of tests R-6, R-1, and R-4 (red lines) during monotonic loading at $\alpha=0^\circ$ and $b=0.5$ on dense sand before stress rotation begins are presented in **Figure 42** in terms of stress ratio against deviatoric strain and volumetric against deviatoric strain curves. The results of the FA-16 (blue dotted lines) specimen, which was sheared at $\alpha=0^\circ$ and $b=0.5$ until failure, are also presented for comparison. Under monotonic loading of dense M31 sand at $\alpha=0^\circ$ and $b=0.5$, the stress ratio at phase transformation is $(q/p')_{p.t.0^\circ}=0.88$. Moreover, under $b=0.5$, the minimum peak stress ratio is observed at $\alpha=60^\circ$, $(q/p')_{\max,60^\circ}=1.14$. Thus, stress rotation begins when specimens are in the dilatant phase at a stress ratio of $0.88 < q/p' < 1.14$.

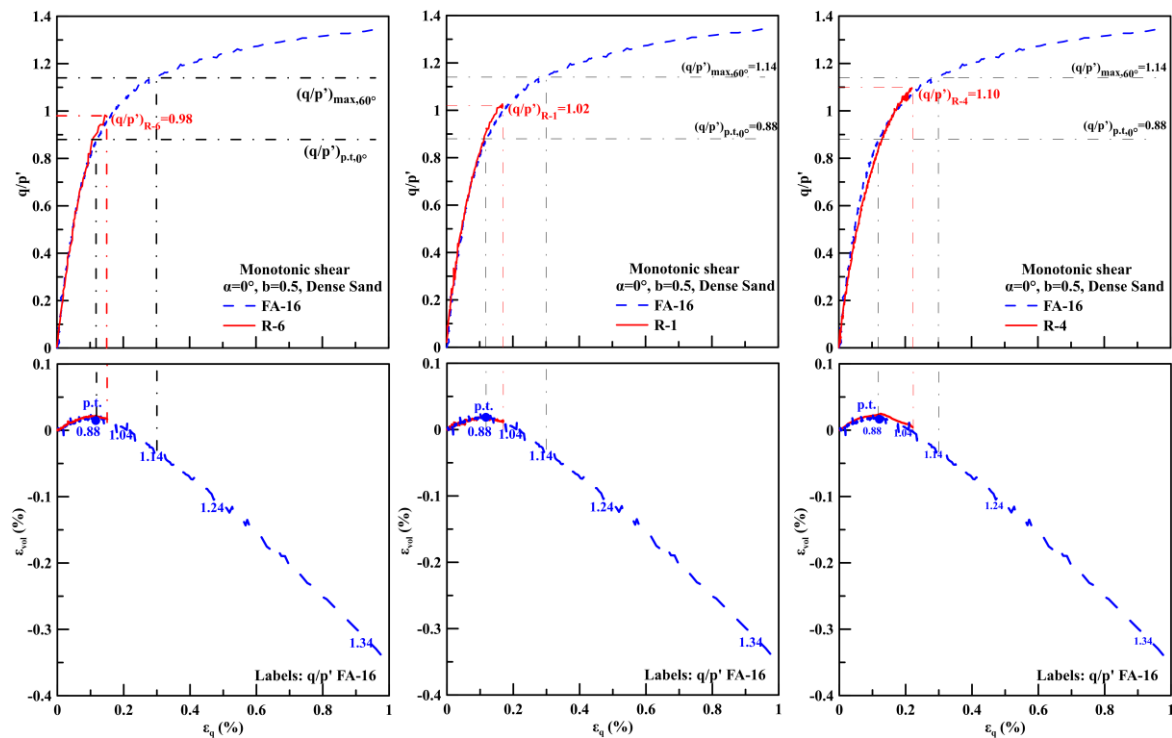


Figure 42: Results of drained monotonic shear under $\alpha=0^\circ$ and $b=0.5$ for dense sand before stress rotation

The evolution of the volumetric strain, ϵ_v , with the number of cycles is presented in **Figure 43**. For tests R-6 and R-1, which did not fail during stress rotation, contractant volumetric strain is accumulated with oscillation characteristics. Since the specimens were dilating before rotation and neither the magnitude of the principal stresses nor the density change, the observed contraction is attributed only to the rotation of the principal stresses. For both tests, volumetric strain develops gradually and tends to stabilize with increasing cycles. The magnitude of the volumetric strain increases when the stress ratio is higher. Compared to looser sand (**Figure 41**), volumetric strain is lower, and the oscillation characteristics are more pronounced. The lack of oscillation in loose sand,

meaning that the specimens don't dilate, may be explained as the rotation of R-5 and R-8 initiated before phase transformation. In dense sand, when the imposed stress ratio is high (R-4, $q/p=1.10$), the specimen's behavior is unstable and failure is induced at $\alpha=122^\circ$ during the 2nd cycle like the corresponding loose specimen. Although stress rotation is performed below the failure envelope, $q/p'=1.10 < (q/p')_{\max,60^\circ}=1.14$, the specimen develops large strains, and it fails, indicating that the rotation of the principal stress axes weakens the shear strength of sand.

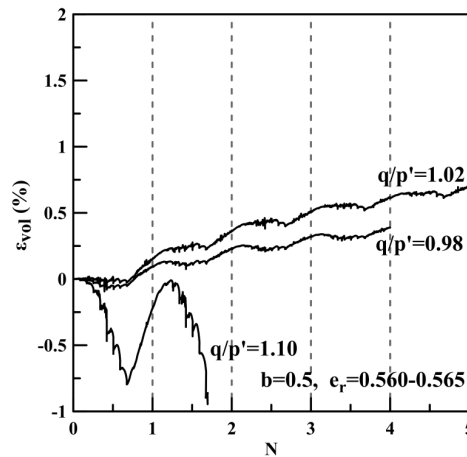


Figure 43: Evolution of volumetric strain with cycles under drained rotation shear for dense sand under $b=0.5$. Effect of stress ratio

The effect of the intermediate stress parameter on sand's behavior is examined by conducting stress rotation tests at specimens with the same density and under common stress ratio. R-10 and R-6 specimens were sheared at $\alpha=0^\circ$ and different b -value ($b=0.5$ and 0) until a common stress ratio, $q/p'=0.98$, when specimens were both at the dilatant phase and then subjected to drained principal stress rotation. The evolution of the imposed stress components (σ_z , σ_θ , σ_r , and $\tau_{\theta z}$) with the number of cycles (N) and the development of the corresponding strain components (ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r , and $\gamma_{\theta z}$) of dense sand under stress rotation with $b=0.5$ and 0 is presented in **Figure 44**. Under $b=0$, the magnitude of all stress components is significantly lower, and the amplitude of the oscillation remains constant after the 1st cycle. Moreover, the b -value drastically affects the evolution of the radial strain since it changes from contraction to expansion. The effect of b on the evolution of radial strain is verified by the monotonic tests on dense sand (**Figure 31**), where $\epsilon_r > 0$ at $b=0.5$ and $\epsilon_r < 0$ at $b=0$. It can be derived that plane strain conditions ($\epsilon_r=0$) under principal stress rotation could be achieved at $0 < b < 0.5$.

The evolution of the volumetric strain ϵ_v with the number of cycles under rotational shear tests with different b -values is shown in **Figure 45**. Although the magnitudes of principal stresses were maintained constant, contractive volumetric strain develops under $b=0$ and 0.5 . Under $b=0$, the evolution of volumetric strain stabilizes faster, and the total volumetric strain at each cycle is significantly lower compared with rotational shear tests under $b=0.5$.

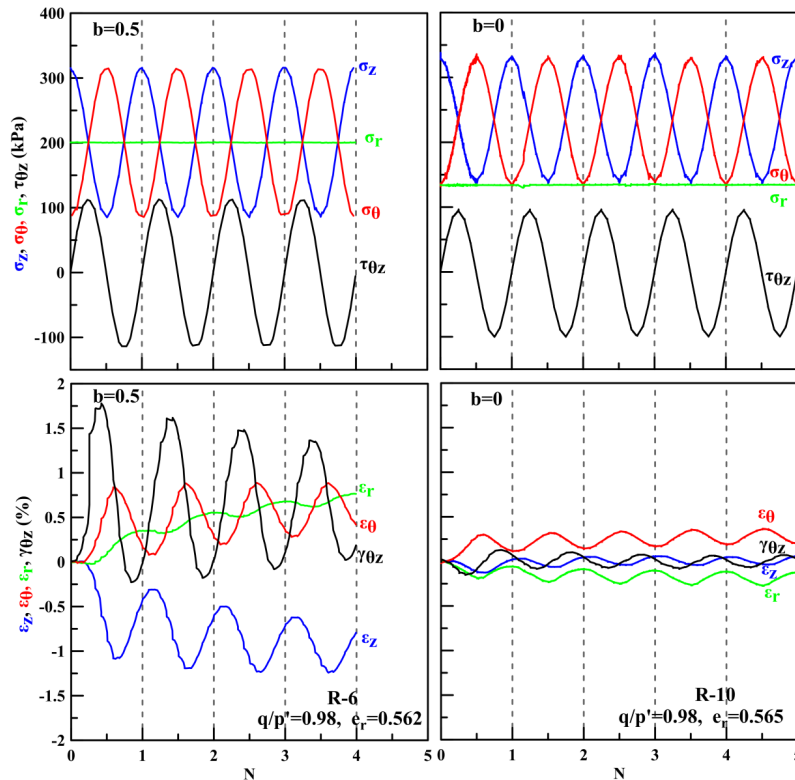


Figure 44: Evolution of stress and strain components under drained rotational shear on sand under $b=0.5$. Effect of stress ratio

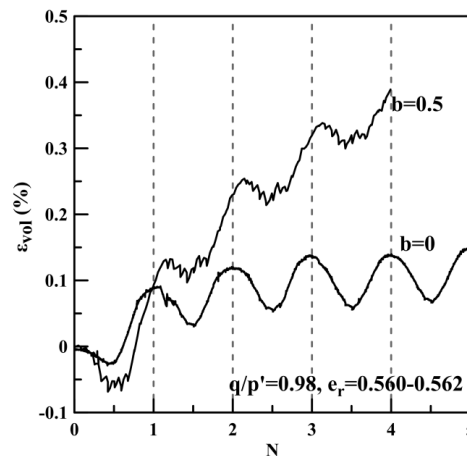


Figure 45: Evolution of volumetric strain under drained rotational shear on dense sand under constant stress ratio q/p' . Effect of intermediate stress parameter

Next, the sand's non-coaxiality, i.e., non-coincidence between the directions of principal stress and plastic strain increment, under drained principal stress rotation is investigated. The effect of stress ratio, material density, and intermediate stress parameter are examined. Considering the difficulty of separating the elastic strain increment from the total strain and the fact that it takes much less proportion of the total strain than the plastic

strain (Gutierrez et al., 1991), in this thesis, total strain is used to calculate the plastic strain increment.

In **Figure 46**, the strain increment is presented as a unit vector (blue vector) in the $dy_{z\theta}$ - $(d\varepsilon_z-d\varepsilon_\theta)$ strain space superimposed on the $2\sigma_{z\theta}$ - $(\sigma_z-\sigma_\theta)$ stress path (green circle). The vector of principal stress (black vector) is always perpendicular to the stress path, and the stress increment vector (green vector) is tangent to the stress path. The non-coaxiality angle, β , indicates the deviation between the principal directions of incremental strain and stress ($\beta=2\alpha_{d\varepsilon}-2\alpha$).

α , major principal stress direction, $\alpha_{d\varepsilon}$, major principal incremental strain direction
 $\alpha_{d\sigma}$, major principal incremental stress direction, $\beta=2\alpha_{d\varepsilon}-2\alpha$, degree of non-coaxiality

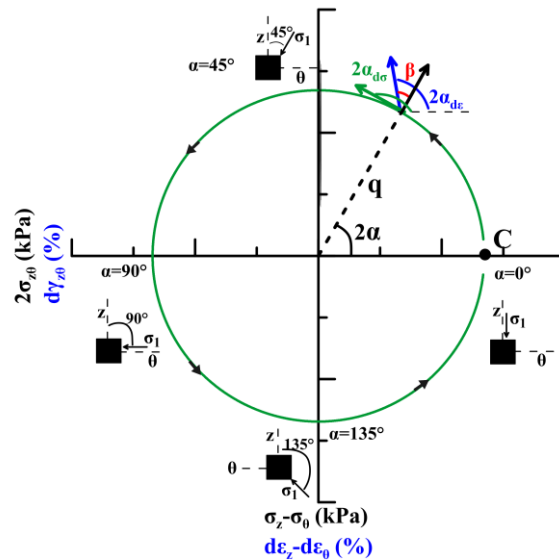


Figure 46: Stress path and principal directions of stress, incremental stress, and incremental strain in the $2\sigma_{z\theta}$ - $(\sigma_z-\sigma_\theta)$ plane and in the $dy_{z\theta}$ - $(d\varepsilon_z-d\varepsilon_\theta)$ plane

In **Figure 47**, the effect of the stress ratio on the measured unit strain increments during the 1st cycle of stress rotation under $b=0.5$ on medium-dense sand is examined. For both tests, clear non-coaxiality between the directions of the strain increment and stress is observed. When the stress ratio is low ($q/p'=0.69$), strain increments are almost coaxial with the stress increment vector (tangent to the stress path), however when the stress ratio increases non-coaxiality decreases since strain increments tend to align with the principal stress vectors (normal to the stress path). When the stress ratio is low, the strain increment direction becomes closer to the stress increment direction (e.g., $\beta = 45^\circ$), and higher degrees of noncoaxiality are observed. As the stress ratio increases, β decreases.

The effect of the intermediate stress parameter on sand's non-coaxiality is evident in **Figure 48**. Dense sand specimens were subjected to drained rotational shear under common stress ratio $q/p'=0.98$. The difference between principal stress and total strain increment directions is more pronounced under $b=0$ since the strain vectors are almost tangential to the stress path.

The degree of non-coaxiality decreases as the stress ratio and the intermediate stress parameter increase because sand accumulates larger strains under higher q/p' and higher b (Figure 40 and Figure 44). This is also the case with monotonic loading, where sand becomes coaxial, approaching failure under large strains (Figure 34). However, the measured non-coaxiality is more significant at rotational shear tests under low stress ratio compared to monotonic fixed- α tests, as the deviation between the principal plastic strain increment and the principal stress directions is higher.

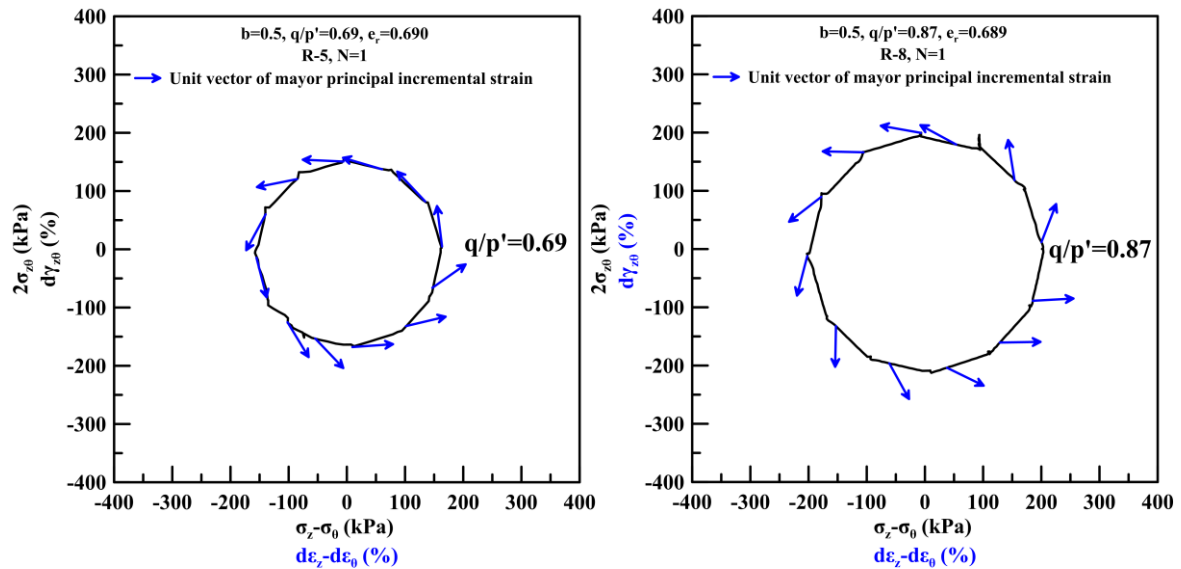


Figure 47: Stress paths and strain increments from rotational shear tests on medium-dense M31 sand under $b=0.5$ at $N=1$. Effect of stress ratio

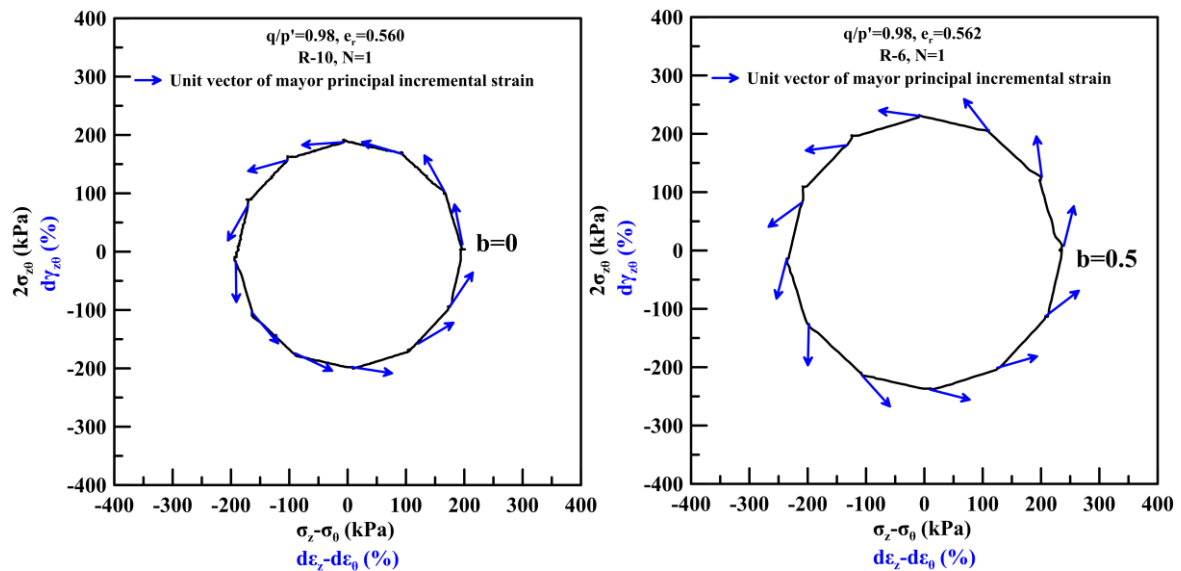


Figure 48: Stress paths and strain increments from rotational shear tests on dense M31 sand under $q/p'=0.98$ at $N=1$. Effect of intermediate stress parameter

4. Conclusions

A wide range of laboratory experiments have been performed to study the impact of stabilization with colloidal silica aqueous gel on sand's monotonic and cyclic behavior. A comprehensive experimental investigation of untreated sand's anisotropy, including innovative highly controlled Hollow Cylinder tests, was completed to propose a framework of anisotropic sand behavior and to subsequently use the sand's behaviour as a reference to interpret the behavior of the treated sand. Treated sand was tested for the first time under generalized loading. The experiments led to the following main conclusions:

- Under normal compression, the treated sand shows significantly higher volumetric changes compared with untreated sand, irrespective of density and particle shape.
- Direct shear tests on two sands, one rounded and one angular, indicate that treated sand at a loose state shows extreme dilation, roughly comparable with very dense sand for both particle shapes. The strength of treated sand significantly increases with decreasing stress level, resulting in curved strength envelopes that pass through the origin, indicating zero cohesion. Treated sands' strength envelopes lie above those of untreated sands, but at ultimate state, the envelopes coincide.
- Triaxial compression tests performed on a wide range of effective stresses under drained and undrained conditions show that peak strength is higher for treated sand. However, its stress-level dependency indicates structural breakdown. The ultimate stress ratio at the critical state is the same for treated and untreated sand, indicating a lack of cementation bonding. The extremely high dilation/dilative tendency also depends on stress level. The critical state line applying to the treated sand lies substantially above that manifested by untreated sand. The two lines converge as the stress level increases to around 2,000 kPa.
- Sand stabilized with colloidal silica gel holds on to characteristic anisotropic sand behavior, i.e., showing in extension weaker response in terms of strength, higher contraction, and significantly lower initial stiffness than in compression. However, compared with sand, treated sand is less contractive and significantly more dilative than sand, while its small strain stiffness is similar to sand's.
- Loose treated sand accumulates strain and excess pore-water pressure similarly to loose sand under cyclic loading until the sand's stress path reaches the instability point defined by undrained extension loading. After that point, sand's excess pore water pressure increases rapidly, and the specimen liquefies and collapses under high extension strain. On the contrary, treated sand does not collapse because strain builds up in a controllable manner, even after the pore pressure ratio attains a value of 1.
- The effect of sand's inherent anisotropy is significant on the response of loose and dense sand under drained monotonic loading. The shear strength of the sand

reduces, and contraction is enhanced as the major principal stress direction (α) deviates from the vertical deposition direction. For a given loading direction, sand's response weakens as the intermediate principal stress parameter (b) increases. This parameter mainly affects the development of radial strain. The results indicated that plane strain conditions occur under $b \approx 0.3$ irrespectively of principal stress direction.

- Treated sand also shows evident anisotropic characteristics. The highest peak stress ratio was obtained when the major principal stress direction was parallel to the deposition direction ($\alpha = 0^\circ$), and the lowest value was obtained at $\alpha = 60^\circ$. For every loading direction, treated loose sand exhibits higher peak strength than dense sand. However, treated sand becomes much softer at lower stress ratios than untreated sand when loaded at $\alpha \geq 45^\circ$. Treated sand shows an unstable behavior (reduction in q/p'), like loose sand does, under undrained conditions at loading directions $\alpha \geq 45^\circ$. This is not observed in drained tests under slow rates where the transition from contraction to dilation is gradual with continuously increasing q/p' , like in sands. However, when loaded under stress control, even under drained loading conditions, drainage is hindered; as a result unstable behaviour is introduced under constant volume at the instability stress ratio observed in undrained tests. However, volumetric changes re-establish as the stress ratio increases and dilation is introduced. This implies that very loose deposits of treated sand with an inherent tendency for initial contraction, depending on the loading direction, are prone to unstable behavior with excessive strains accumulating under monotonic loading at relatively low stress ratios.
- Non-coincidence of principal directions of stress and strain increment was observed for treated and untreated sand under monotonic shear. The degree of non-coaxiality is more significant when $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ and gradually reduces as stress ratios increase and strains accumulate approaching failure.
- Under drained rotational shear, although the magnitudes of the principal stresses remain constant, strain components accumulate, and contractant volumetric strain is induced. Even if sand was at the dilatant phase of shearing when stress rotation initiates, sand accumulates contractive strain. Most of the contractive volumetric strain occurred during the first cycle and its accumulation rate tended to decrease in the following cycles. Under $b=0$, the strains are lower and stabilize quicker compared to $b=0.5$. The accumulated volumetric strain and the shear components increase under higher stress ratios and at looser densities. Rotation under high stress ratios leads to specimens' failure.
- The mechanical behavior of sand under rotational shear was generally noncoaxial. The degree of non-coaxiality decreases when rotation occurs at a higher stress ratio or higher b -value. Non-coaxiality is more significant in rotational shear tests than in monotonic at fixed- α tests. Generally, the degree of noncoaxiality reduces with increasing shear strains, becoming almost coaxial as failure is approached.

References

- Agapoulaki, G. I., & Papadimitriou, A. G. (2018). Rheological Properties of Colloidal Silica Grout for Passive Stabilization Against Liquefaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018251.
- Ciardi, G., Bardotti, R., Vannucchi, G., & Madiari, C. (2020). Effects of high-diluted colloidal silica grouting on the behaviour of a liquefiable sand. *Geotechnical Research*, 7(4), 193–208.
- Cuccovillo, T., & Coop, M. R. (1999). On the mechanics of structured sands. *Géotechnique*, 49(6), 741–760.
- De Gennaro, V., Canou, J., Dupla, J. C., & Benahmed, N. (2004). Influence of loading path on the undrained behaviour of a medium loose sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1), 166–180.
- Georgiannou, V. N. (2006). The undrained response of sands with additions of particles of various shapes and sizes. *Geotechnique*, 56(9), 639–649.
- Georgiannou, V. N., & Konstadinou, M. (2014). Torsional Shear Behavior of Anisotropically Consolidated Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013017.
- Georgiannou, V. N., Konstadinou, M., & Triantafyllos, P. K. (2018). Sand Behavior under Stress States Involving Principal Stress Rotation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(6), 04018028.
- Georgiannou, V. N., & Tsomokos, A. (2008). Comparison of two fine sands under torsional loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(12), 1659–1672.
- Gutierrez, M., Ishihara, K., & Towhata, I. (1991). Flow Theory for Sand During Rotation of Principal Stress Direction. *Soils and Foundations*, 31(4), 121–132.
- Hight, D. W., Gens, A., & Symes, M. J. (1983). The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. *Géotechnique*, 33(4), 355–383.
- Hight, D. W., & Georgiannou, V. N. (1995). Effects of sampling on the undrained behaviour of clayey sands. *Geotechnique*, 45(2), 237–247.
- Ishihara, K., & Towhata, I. (1983). Sand Response to Cyclic Rotation of Principal Stress Directions as Induced by Wave Loads. *Soils and Foundations*, 23(4), 11–26.
- Konstadinou, M., & Georgiannou, V. N. (2014). Prediction of pore water pressure generation leading to liquefaction under torsional cyclic loading. *Soils and Foundations*, 54(5), 993–1005. Elsevier.
- Lade, P. V. (1993). Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 895–904.
- Lade, P. V. (2003). Analysis and Prediction of Shear Banding Under 3D Conditions in

- Granular Materials. *Soils and Foundations*, 43(4), 161–172.
- Miura, S., & Toki, S. (1984). Anisotropy in Mechanical Properties and its Simulation of Sands Sampled from Natural Deposits. *Soils and Foundations*, 24(3), 69–84.
- Nakata, Y., Hyodo, M., Murata, H., & Yasufuku, N. (1998). Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation. *Soils and Foundations*, 38(2), 115–128. Japanese Geotechnical Society.
- Pamuk, A., Gallagher, P. M., & Zimmie, T. F. (2007). Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(9), 864–874.
- Pavlopoulou, E.-M. E., & Georgiannou, V. N. (2021). Effect of Colloidal Silica Aqueous Gel on the Monotonic and Cyclic Response of Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11), 1–18. American Society of Civil Engineers.
- Porcino, D., Marciandò, V., & Granata, R. (2011). Undrained cyclic response of a silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes. *Geomechanics and Geoengineering*, 6(3), 155–170.
- Shibuya, S., & Hight, D. W. (1987). A Bounding Surface for Granular Materials. *Soils and Foundations*, 27(4), 123–136.
- Triantafyllos, P. K., Georgiannou, V. N., Dafalias, Y. F., & Georgopoulos, I. O. (2020). New findings on the evolution of the instability surface of loose sand. *Acta Geotechnica*, 15(1), 197–221. Springer Berlin Heidelberg.
- Vaid, Y. P., & Chern, J. C. (1983). Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction. *Soils and Foundations*, 23(1), 47–60.
- Vaid, Y. P., Sayao, A., Enhuang Hou, & Negussey, D. (1990). Generalized stress-path-dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(5), 601–616.
- Wijewickreme, D., & Vaid, Y. P. (2008). Experimental observations on the response of loose sand under simultaneous increase in stress ratio and rotation of principal stresses. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(5), 597–610.
- Yang, Z. X., Li, X. S., & Yang, J. (2007). Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil. *Geotechnique*, 57(4), 371–384.
- Yoshimine, M. M., Özay, R., Sezen, A., & Ansal, A. (1999). Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus. *Soils and Foundations*, 39(2), 131–136.
- Zdravković, L., Potts, D. M., & Hight, D. W. (2002). The effect of strength anisotropy on the behaviour of embankments on soft ground. *Géotechnique*, 52(6), 447–457.

Περιεχόμενα

Περίληψη	a
Extended Summary and Conclusions	I
1. Introduction	I
2. Materials and Test Methods	V
3. Test Results	X
3.1 Normal Compression Tests.....	X
3.2 Direct shear tests.....	XII
3.3 Monotonic Triaxial tests	XV
3.4 Cyclic Tests	XXIV
3.5 Hollow cylinder tests at various fixed loading directions	XXIX
3.6 Drained Principal Stress Rotation tests on M31 sand	XLIII
4. Conclusions	LI
References.....	LIII
Κατάλογος Σχημάτων	V
Κατάλογος Πινάκων	xxix
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος	1
1.2 Σκοπός της Διδακτορικής Διατριβής	4
1.3 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής	6
Κεφάλαιο 2 : Βιβλιογραφική Επισκόπηση	9
2.1 Εισαγωγή στην Ανισότροπη Συμπεριφορά Άμμων.....	9
2.1.1 Εισαγωγή	9
2.1.2 Εγγενής Ανισοτροπία.....	10
2.1.3 Εξελισσόμενη Ανισοτροπία	13
2.1.4 Μη Συγγραμική Συμπεριφορά (non-coaxiality).....	14
2.2 Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Δοκιμίου (HCA).....	18
2.2.1 Εισαγωγή	18
2.2.2 Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων	20
2.2.3 Ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια	28
2.2.4 Επίδραση της διείσδυσης της περιβάλλουσας μεμβράνης στις μετρήσεις τάσεων και παραμορφώσεων.....	30
2.3 Επίδραση της Παραμέτρου α : Μονοτονική Φόρτιση υπό Σταθερή Διεύθυνση των Κυρίων Αξόνων Τάσεως.....	35
2.3.1 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης	35
2.3.2 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης	45
2.4 Επίδραση της Παραμέτρου α : Συνεχής στροφή της Διεύθυνσης των Κυρίων Αξόνων Τάσεως	56

2.4.1 Εισαγωγή	56
2.4.2 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης	56
2.4.3 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης	61
2.5 Επίδραση της Ενδιάμεσης κύριας Τάσης.....	69
2.5.1 Ακτινική Φόρτιση.....	69
2.5.2 Συνεχής στροφή των αξόνων.....	74
2.6 Εισαγωγή στις Μεθόδους Βελτίωσης Εδαφών	80
2.6.1. Εισαγωγή	80
2.6.2 Η Μέθοδος της Παθητικής Σταθεροποίησης	81
2.7 Η Κολλοειδής Πυριτία ως Σταθεροποιητής	84
2.7.1 Εισαγωγή	84
2.7.2 Η Κολλοειδής Κλίμακα Μεγεθών	85
2.7.3 Η Ορολογία των Χημικών Όρων	86
2.7.4 Το Υγρόλυμα (Aquasol) Κολλοειδούς Πυριτίας Ludox-Sm	86
2.7.5 Φυσικοχημικές Διαδικασίες των Υγρολυμάτων και των Γελών Πυριτίας που Αφορούν την Παθητική Σταθεροποίηση.....	88
2.8 Μηχανική συμπεριφορά της κολλοειδούς πυριτίας.....	96
2.9 Μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων εδαφών	102
2.9.1 Εισαγωγή	102
2.9.2 Μονοτονική Συμπεριφορά	102
2.9.3 Ανακυκλική και Δυναμική Συμπεριφορά	124
2.9.4 Δοκιμές φυγοκεντρική και εφαρμογές στο πεδίο	139
Κεφάλαιο 3 : Εργαστηριακές Μέθοδοι, Συσκευές και Εξεταζόμενα Υλικά.....	143
3.1 Εισαγωγή.....	143
3.2 Τριαξονικές συσκευές του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής	143
3.3 Συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής	147
3.4 Εξεταζόμενα υλικά.....	153
3.4.1 Φυσικά εδαφικά υλικά.....	153
3.4.2 Εδαφικά υλικά σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία	154
3.5 Πρόγραμμα Εργαστηριακών Δοκιμών	157
Κεφάλαιο 4 : Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων	165
4.1 Εισαγωγή.....	165
4.2 Αποτελέσματα Δοκιμών Μονοδιάστατης Στερεοποίησης.....	166
4.2.1 Άμμος M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία	166
4.2.2 Άμμος Longstone πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία	169
4.3 Αποτελέσματα Δοκιμών Απευθείας Διάτμησης	172
4.3.1 Άμμος M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία	172
4.3.2 Άμμος Longstone πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία	177

4.4 Αποτελέσματα Δοκιμών Τριαξονικής Θλίψης στην Άμμο M31 Πριν και Μετά τη σταθεροποίησή της με Κολλοειδή Πυριτία.....	181
4.4.1 Επίδραση του ρυθμού στερεοποίησης	181
4.4.2 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης.....	184
4.4.3 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης	191
4.4.4 Μέγιστη αντοχή και κρίσιμη κατάσταση της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της	198
4.5 Αποτελέσματα Δοκιμών Τριαξονικού Εφελκυσμού στην Άμμο M31 Πριν και Μετά τη σταθεροποίησή της με Κολλοειδή Πυριτία.....	205
4.5.1 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης.....	206
4.5.2 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης	212
4.6 Προσδιορισμός τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυσστησίας (E_{sec}) της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία.....	218
Κεφάλαιο 5 : Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων	223
5.1 Εισαγωγή.....	223
5.2 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης.....	225
5.3 Μηχανισμός ανάπτυξης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση άμμου M31	234
5.4 Καμπύλες ρευστοποίησης της άμμου M31	243
5.5 Σύγκριση μεταξύ μονοτονικής και ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο M31.....	246
5.6 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμου M31 σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης.....	252
5.7 Σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31	270
Κεφάλαιο 6 : Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης.....	289
6.1 Εισαγωγή.....	289
6.2 Περιγραφή των δοκιμών ακτινικής φόρτισης	290
6.3 Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη σχετικά χαλαρή άμμο M31	293
6.4 Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη σχετικά πυκνή άμμο M31	314
6.5 Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου b στο σημείο αλλαγής φάσης και στη μέγιστη διατμητική αντοχή της άμμου M31	330
6.6 Μη συγγραμική συμπεριφορά της άμμου M31 υπό δοκιμές ακτινικής φόρτισης	338
6.7 Επίδραση της διεύθυνσης των αξόνων στην απόκριση της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου M31.....	345

6.7.1 Επίδραση των συνθηκών φόρτισης στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου M31	357
Κεφάλαιο 7 : Δοκιμές Πλήρους Στροφής των Κύριων Αξόνων των Τάσεων στην Άμμο M31	361
7.1 Εισαγωγή.....	361
7.2 Περιγραφή των δοκιμών συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων	362
7.3 Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' στην απόκριση της άμμου M31 κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων	366
7.3.1 Επίδραση της πυκνότητας της άμμου M31.....	371
7.3.2 Επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b	380
7.4 Μη συγγραμική συμπεριφορά της άμμου M31 υπό δοκιμές συνεχούς στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων	388
Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	393
8.1 Σύνοψη.....	393
8.2 Συμπεράσματα	394
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	398
Βιβλιογραφία.....	400

Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 2.1:** Μηχανισμός αστοχίας σε επίχωμα..... 10
- Σχήμα 2.2:** Απεικόνισή της εγγενούς ανισοτροπίας της δομής της άμμου Toyoura με χρήση σαρωτικού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μετά από κατακόρυφες τομές σε δοκίμια που παρασκευάστηκαν με μέθοδο της ξηρής απόθεσης άμμου (dry deposition) και με τη μέθοδο της συμπύκνωση υγρής άμμου σε διαδοχικές στρώσεις, (Moist Tamping) (Z. X. Yang et al., 2008)..... 12
- Σχήμα 2.3:** Προσανατολισμός των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής των κόκκων (X. Li & Yu, 2009)..... 13
- Σχήμα 2.4:** Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο $Y-X$ επίπεδο:Ακτινική φόρτιση (Gutierrez et al., 1991) 17
- Σχήμα 2.5:** Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο $Y - X$ επίπεδο: Στροφή των κύριων αξόνων τάσεων (Gutierrez et al., 1991) 17
- Σχήμα 2.6:** Αποτελέσματα μονοτονικής φόρτισης υπό διάφορες γωνίες επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε προφορτισμένα δοκίμια: Κατευθύνσεις προσαυξητικής τάσης και παραμόρφωσης σε σχέση με το λόγο τάσεων, η (X. Li & Yu, 2009) 18
- Σχήμα 2.7:** Συνθήκες φόρτισης κοίλου δοκιμίου και επιβαλλόμενες τάσεις σε κοίλο εδαφικό στοιχείο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου 23
- Σχήμα 2.8:** Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε κοίλο εδαφικό στοιχείο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης..... 25
- Σχήμα 2.9:** Παραμορφώσεις σε οριζόντια τομή κοίλου δοκιμίου 26
- Σχήμα 2.10:** Συνδυασμοί φόρτισης που οδηγούν σε μη αποδεκτή ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων (Naughton & O’Kelly, 2007) 30
- Σχήμα 2.11:** Μεταβολή της μορφής της μεμβράνης: α) στο τέλος της στερεοποίησης, β) κατά την αύξηση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης και γ) κατά την αύξηση της πλευρικής πίεσης σε συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (Kramer et al., 1990) 33

- Σχήμα 2.12:** Συσχέτιση του βαθμού διείδυσης της μεμβράνης σε σχέση με την πλευρική ενεργό τάση και του μεγέθους των κόκκων (Baldi & Nova, 1985) 34
- Σχήμα 2.13:** Παρασκευή δοκιμών μεταβάλλοντας τη διεύθυνση του επιπέδου διαστρωμάτωσης (Oda, 1972b) 39
- Σχήμα 2.14:** Επίδραση της διεύθυνσης του επιπέδου διαστρωμάτωσης (ϕ) στις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης - αξονικής παραμόρφωσης και στις καμπύλες ογκομετρικής - αξονικής παραμόρφωσης (Oda, 1972b) 39
- Σχήμα 2.15:** Επίδραση της διεύθυνσης του επιπέδου διαστρωμάτωσης (ϕ) στο τέμνον μέτρο ελαστικότητας στο 50% της μέγιστης αντοχής (E_{50}) (Oda, 1972b) 40
- Σχήμα 2.16:** Απόκριση πυκνής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Toyoura σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές α , b και ρ' παραμέτρους σε όρους λόγου τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης (K. Miura, Toki, et al., 1986) 40
- Σχήμα 2.17:** Απόκριση μέσης πυκνότητας, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Ham River σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές α , b και ρ' παραμέτρους: α) αποκλίνουσα τάση – διατμητική παραμόρφωση, β) αποκλίνουσα τάση – ογκομετρική παραμόρφωση (Symes et al., 1988).. 41
- Σχήμα 2.18:** Απόκριση πυκνής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Portway σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές α και ρ' παραμέτρους: α) αποκλίνουσα τάση – διατμητική παραμόρφωση, β) μέγιστη αποκλίνουσα τάση – γωνία α (Cai et al., 2013) 42
- Σχήμα 2.19:** Επίδραση της πυκνότητας στην απόκριση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Leighton Buzzard σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές παραμέτρους $b=0.5$ και $\rho'=200\text{kPa}$. Καμπύλες λόγου τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής-διατμητικής παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016) 43
- Σχήμα 2.20:** Επίδραση του σχήματος των κόκκων στην απόκριση ισότροπα στερεοποιημένου εδάφους σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές παραμέτρους $b=0.5$ και $\rho'=200\text{kPa}$. Καμπύλες λόγου τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής-διατμητικής παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016) 43
- Σχήμα 2.21:** Αποτελέσματα δοκιμών μονοτονικής φόρτισης, ελεύθερης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, πυκνής και μέσης πυκνότητας άμμου Leighton Buzzard και γυάλινων σφαιρικών κόκκων, με σταθερές παραμέτρους

$b=0.5$ και $p'=200\text{kPa}$. Μέγιστος λόγος τάσεων $\eta=q/p'$ σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο (γωνία α) (L.-T. Yang et al., 2016)44

- Σχήμα 2.22:** Τριαξονική θλίψη και τριαξονικός εφελκυσμός σε χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου Τογουρα υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: α) Διαδρομές ενεργών τάσεων και β) Αποκλίνουσα τάση- διατμητική παραμόρφωση (M. Yoshimine et al., 1998)..... 49
- Σχήμα 2.23:** Μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Τογουρα, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) Διαδρομές ενεργών τάσεων και β) Αποκλίνουσα τάση- διατμητική παραμόρφωση (M. Yoshimine et al., 1998) 50
- Σχήμα 2.24:** Μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Synccude, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) Διαδρομές ενεργών τάσεων και β) Αποκλίνουσα τάση- διατμητική παραμόρφωση (Uthayakumar & Vaid, 1998) 51
- Σχήμα 2.25:** Μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Τογουρα, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) $Dr=90\%$ β) $Dr=60\%$ και γ) $Dr=30\%$ (Nakata et al., 1998)..... 52
- Σχήμα 2.26:** Απόκριση χαλαρής ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε μονοτονική φόρτιση εμποδιζόμενης στράγγισης, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, και σταθερή ολική μέση ολική τάση $p=200\text{kPa}$ σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α)Ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q=p'$ και β) Καμπύλες οκταεδρικής διατμητικής τάσης – παραμόρφωσης ($\tau_{oct} - \gamma_{oct}$) (P. K. Triantafyllos et al., 2020)..... 53
- Σχήμα 2.27:** Επίδραση της γωνίας α στη διατμητική αντοχή στο σημείο αλλαγής φάσης (q_{PT}) και στο σημείο κρίσιμου λόγου τάσεων (q_{CSR}) σε μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Τογουρα, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης για $Dr=90\%$, 60% και 30% (Nakata et al., 1998)..... 54
- Σχήμα 2.28:** Χαρακτηριστική απόκριση άμμου υπό μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση. Κρίσιμος λόγος τάσης (CSR), σημείο αλλαγής φάσης (PT), σταθερή κατάσταση (steady state) (Vaid & Chern, 1985; Nakata et al., 1998)..... 54

- Σχήμα 2.29:** Επίδραση της γωνίας α στη διατμητική αντοχή στο σημείο αλλαγής φάσης (q_{PT}) σε μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Ham River, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης. Διαδρομές ενεργών τάσεων (Symes et al., 1984)..... 55
- Σχήμα 2.30:** Επίδραση της γωνίας α στη γωνία διατμητικής αντοχής στο σημείο σταθερής κατάστασης σε μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση άμμου Syncrude, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης για $Dr=30\%$. (Uthayakumar & Vaid, 1998) 55
- Σχήμα 2.31:** Συνεχής στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων. Διαδρομή τάσεων στο επίπεδο X-Y..... 57
- Σχήμα 2.32:** Μεταβολή της εντατικής κατάστασης κατά την κυματική φόρτιση σε υποθαλάσσιες αποθέσεις (Ishihara & Towhata, 1983) 57
- Σχήμα 2.33:** Δοκιμή στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων ($b=0.5$). Εξέλιξη των επιβαλλόμενων και των κύριων τάσεων συναρτήσει των κύκλων (Nakata et al., 1998)..... 59
- Σχήμα 2.34:** Δοκιμή στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων ($b=0.5$). Εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και των επιμέρους παραμορφώσεων συναρτήσει των κύκλων: α) $Dr=90\%$ και β) $Dr=30\%$ (Nakata et al., 1998) 60
- Σχήμα 2.35:** Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά τη στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων με φορά στροφής της γωνίας α) $\alpha=0 \rightarrow 45^\circ$ και β) $\alpha=45 \rightarrow 0^\circ$ (Symes et al., 1988). 62
- Σχήμα 2.36:** Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά την πλήρη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε άμμο Toyoura σχετικής πυκνότητας $Dr=82\%$ (K. Miura, Miura, et al., 1986) 63
- Σχήμα 2.37:** Εξέλιξη της προσαυξητικής παραμόρφωσης κατά την πλήρη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμιο άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $Dr=82\%$ (K. Miura, Miura, et al., 1986)..... 63
- Σχήμα 2.38:** Τασική όδευση των δοκιμών συνεχούς στροφής στο $q-p'$ επίπεδο και στο Y-X επίπεδο (J.-M. Zhang et al., 2008; Tong et al., 2010)..... 65
- Σχήμα 2.39:** Εξέλιξη των ορθών παραμορφώσεων κατά τη στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $Dr=70\%$ με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ και λόγο διατμητικής τάσης α) $q/p'=0.866$ και β) $q/p'=0.994$ (J.-M. Zhang et al., 2008) 66

- Σχήμα 2.40:** Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά τη στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$ με λόγο διατμητικής τάσης α) $q/p'=0.866$ και β) $q/p'=0.994$ (Tong et al., 2010) 67
- Σχήμα 2.41:** Αποτελέσματα στροφής των κύριων αξόνων των τάσεων, υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, με λόγο διατμητικής τάσης $q/p'=0.866$ και τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0.5$. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με τη γωνία των κύριων αξόνων των τάσεων, α , στον κύκλο $N=1, 8$ και 15 (Tong et al., 2010)..... 68
- Σχήμα 2.42:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της άμμου Toyoura σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης με σταθερή γωνία $\alpha=45^\circ$ υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: α) Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης και β) διαδρομές ενεργών τάσεων (M. Yoshimine et al., 1998)..... 71
- Σχήμα 2.43:** Συσχέτιση μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής, ϕ , με την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, b (Lade, 2008; Lade et al., 2008, 2009)..... 72
- Σχήμα 2.44:** Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου b στη μέγιστη αντοχή της άμμου Leighton Buzzard: α) μέγιστος λόγος τάσεων η - γωνία α και β) μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ_p -παράμετρος b (L.-T. Yang et al., 2016)... 73
- Σχήμα 2.45:** Εξέλιξη της υπερπίεσης του ύδατος των πόρων κατά τη συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση $q=34.65\text{kPa}$ σε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης: α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ (Z. X. Yang et al., 2007) 76
- Σχήμα 2.46:** Εξέλιξη της διατμητικής ($\varepsilon_{z\theta}$) και της ακτινικής (ε_r) παραμόρφωσης κατά τη συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, σταθερή αποκλίνουσα τάση $q=34.65\text{kPa}$ και τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης: α) $b=0$, $b=0.5$ και γ) $b=1$ (Z. X. Yang et al., 2007) 77
- Σχήμα 2.47:** Εξέλιξη των ορθών παραμορφώσεων άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$ σε δοκιμές συνεχούς στροφής υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης με λόγο τάσεων $q/p'=0.866$ και με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης: α) $b=0.1$ β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ (Tong et al., 2010) 79
- Σχήμα 2.48:** Εξέλιξη του μέτρου διάτμησης της άμμου Toyoura, σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ σε δοκιμές συνεχούς στροφής, υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης,

με λόγο τάσεων $q/p'=0.693$ και με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.1, 0.5$ και 1 (Tong et al., 2010).....	79
Σχήμα 2.49: Η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης (Gallagher & Mitchell, 2002)	83
Σχήμα 2.50: Διήθηση του σταθεροποιητή μέσω: (α) εισπίεσης-άντλησης, (β) φυσικής ροής (Pamuk et al., 2007).....	84
Σχήμα 2.51: Κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής τετραεδρικής ιοντικής μονάδας $[SiO_4]^{-4}$ (Bergna & Roberts, 2005).....	86
Σχήμα 2.52: Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας (Bergna, 1994)	88
Σχήμα 2.53: Σύνδεση δύο σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά τη γελοποίηση (Gallagher, 2000)	88
Σχήμα 2.54: Επίδραση της τιμής pH στις καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 5% κ.β., κανονικότητας 0.1 N και θερμοκρασίας $T=25^{\circ}C$ (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018)	91
Σχήμα 2.55: Καμπύλες χρόνου γέλης – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 5% κ.β., κανονικότητας 0.1 N και θερμοκρασίας $T=25^{\circ}C$ (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018)	91
Σχήμα 2.56: Επίδραση της τιμής κανονικότητας, N, στις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% κ.β., (Gallagher, 2000)	92
Σχήμα 2.57: Επίδραση της θερμοκρασίας T στις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% κ.β. και κανονικότητας 0.03N (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018).....	92
Σχήμα 2.58: Επίδραση της περιεκτικότητας πυριτίας (%) κ.β. στις καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας με $pH=6$, κανονικότητας 0.1 N και θερμοκρασία $T=25^{\circ}C$ (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018).....	93
Σχήμα 2.59: Φωτογραφίες ανεμπόδιστης θλίψης δοκιμίου καθαρής πυριτίας $CS=6.5\%$: (α) πριν; και (β) μετά τη δοκιμή (Towhata, 2007)	97
Σχήμα 2.60: Αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης δοκιμίου καθαρής πυριτίας $CS=6.5\%$: (α) αποκλίνουσα τάση-αξονική παραμόρφωση; και (β) εγκάρσια-αξονική παραμόρφωση (Towhata, 2007).....	98

Σχήμα 2.61: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσομέτρου για δοκίμια πυριτίας Meycor MP320 για διάφορους χρόνους ωρίμανσης (C. Wong et al., 2018).....	99
Σχήμα 2.62: Θλιπτική αντοχή της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας (Axelsson, 2006).....	100
Σχήμα 2.63: Μέτρο Ελαστικότητας της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας (Axelsson, 2006).....	101
Σχήμα 2.64: Διατμητική αντοχή της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας (Axelsson, 2006).....	101
Σχήμα 2.65: Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη και διαπερατότητα σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου Monterey σε σχέση με το ποσοστό πυριτίας (%) κ.β. (Persoff et al., 1999).....	104
Σχήμα 2.66: Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου Monterey σε σχέση με το ποσοστό πυριτίας (%) κ.β. (Gallagher & Mitchell, 2002).....	106
Σχήμα 2.67: Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου Monterey σε σχέση με το μέγεθος της παραμόρφωσης που αναπτύχθηκε μετά από ανακυκλική φόρτιση (Gallagher & Mitchell, 2002)	106
Σχήμα 2.68: Αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης σταθεροποιημένων δοκιμών Άμμου M31 (Georgiannou et al., 2017)	107
Σχήμα 2.69: Αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης σταθεροποιημένων δοκιμών Άμμου M31 (Antigoni Vranna et al., 2020)	108
Σχήμα 2.70: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσομέτρου για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου M31 (Pavloroulou & Georgiannou, 2021).....	110
Σχήμα 2.71: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσομέτρου για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου Longstone (Pavloroulou & Georgiannou, 2021).....	111
Σχήμα 2.72: Κοκκομετρική διαβάθμιση των άμμων S3, Monterey 0/30, Ticino, M31, Ottawa 20/30 (Ciardi et al., 2020).....	113
Σχήμα 2.73: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσομέτρου για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου S3 (Ciardi et al., 2020)	113

- Σχήμα 2.74:** Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Leighton Buzzard: (α) Στην κατάσταση μέγιστης αντοχής; και (β) στην κρίσιμη κατάσταση (C. Wong et al., 2018) 114
- Σχήμα 2.75:** Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο S3: (α) διατμητική τάση - οριζόντια μετακίνηση και (β) κατακόρυφη μετακίνηση - οριζόντια μετακίνηση (Ciardi et al., 2020) . 116
- Σχήμα 2.76:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό ελεύθερη στράγγιση σε όρους διατμητικών τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων και ογκομετρικών - αξονικών παραμορφώσεων: (α) σταθεροποιημένη άμμος και (β) φυσική άμμος (Porcino et al., 2012) 118
- Σχήμα 2.77:** Επίδραση τάσης στερεοποίησης, p'_c , στο μέγιστου λόγου τάσεων, q/p' , για σταθεροποιημένη και φυσική άμμο TS σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση (Porcino et al., 2012) 119
- Σχήμα 2.78:** Περιβάλλουσες φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου TS στο χώρο αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεγού τάσης p' : (α) στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και (β) στην κρίσιμη κατάσταση (Porcino et al., 2012)..... 120
- Σχήμα 2.79:** Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31: (α) Καμπύλες λόγου τάσεων q/p' -αξονικής παραμόρφωσης ε_a και (β) καμπύλες ογκομετρικής ε_{vol} -αξονικής παραμόρφωσης ε_a (Georgiannou et al., 2017) 121
- Σχήμα 2.80:** Επίδραση της επιβολής αντιπίεσης (back pressure) στα δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία σε όρους αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης και σε όρους υπερπίεσης υγρού των πόρων Δu - αξονικής παραμόρφωσης (Antigoni Vranna et al., 2020) 123
- Σχήμα 2.81:** Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε άμμο Monterey Dr=22%, (α) φυσική άμμος υπό CSR=0.27, (β) σταθεροποιημένη άμμος με ποσοστό CS=10% κ.β. υπό CSR=0.27 και (γ) σταθεροποιημένη άμμος με CS=6% υπό CSR=0.24 (Gallagher & Mitchell, 2002) 126
- Σχήμα 2.82:** Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο σχετικής πυκνότητας: (α) Dr=40% και (β) Dr=60%..... 129

Σχήμα 2.83: Αποτελέσματα αστράγγιστων ανακυκλικών δοκιμών σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου S3 σε όρους αξονικής παραμόρφωσης εα-αριθμού κύκλων φόρτισης N (Ciardi et al., 2020).....	130
Σχήμα 2.84: Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο S3 (Ciardi et al., 2020).....	131
Σχήμα 2.85: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 με ποσοστό σταθεροποιητή CS=6% και 10%: (α) Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση και (β) λόγος ανακυκλικής αντίστασης συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας (Vranna et al., 2020))	131
Σχήμα 2.86: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης για α) άμμο Τογουρα και β) σταθεροποιημένη άμμο Τογουρα με CS=4% (Kodaka et al., 2005).....	132
Σχήμα 2.87: Αποτελέσματα ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (αριστερά) σε φυσικό δοκίμιο άμμου, (δεξιά) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (Porcino et al., 2011).....	135
Σχήμα 2.88: Επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης στην αντίσταση στην αντίσταση στη ρευστοποίηση της σταθεροποιημένης άμμου (Porcino et al., 2012).....	136
Σχήμα 2.89: Ρυθμός ανάπτυξης του λόγου υπερπιέσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου, υπό φόρτιση τριαξονική και απλής διάτμησης (Porcino et al., 2011).....	136
Σχήμα 2.90: Αποτελέσματα ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (αριστερά) σε φυσικό δοκίμιο άμμου, (δεξιά) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (Salvatore et al., 2020).....	138
Σχήμα 2.91: Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση σε (α) σχετικά πυκνά και (β) σχετικά χαλαρά δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου (Salvatore et al., 2020)	138
Σχήμα 3.1: Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ	144
Σχήμα 3.2: Τριαξονική συσκευή του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ	144

Σχήμα 3.3: Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs)	145
Σχήμα 3.4: Τριαξονική συσκευή (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ	146
Σχήμα 3.5: Σύνδεση δοκιμίου με το αξονικό έμβολο για την επιβολή εφελκυστικής/ανακυκλικής φόρτισης. Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs) και τοπικού μετρητή πλευρικής παραμόρφωσης (radial strain belt).....	146
Σχήμα 3.6: Συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ	147
Σχήμα 3.7: Τριαξονική κυψέλη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ	148
Σχήμα 3.8: Σύστημα παροχής απαερωμένου νερού, δεξαμενή αντιπίεσης (back pressure tank) και προχοΐδα μέτρησης των μεταβολών όγκου (volume change burette)	149
Σχήμα 3.9: Δεξαμενή πίεσης εσωτερικής κυψέλης (inner pressure tank) και προχοΐδα μέτρησης των μεταβολών όγκου της εσωτερικής κυψέλης (inner volume change burette)	150
Σχήμα 3.10: Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (electric measuring and controlling unit)	151
Σχήμα 3.11: Μονάδα παροχής αέρα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ	152
Σχήμα 3.12: Κοκκομετρικές καμπύλες και φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των κόκκων της άμμου M31 και Longstone (Pavlopoulou & Georgiannou, 2021).....	153
Σχήμα 3.13: Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας CS=10% κ.β. α) τη στιγμή που παρασκευάζεται, β) μετά τη μετατροπή του σε ελαστική γέλη με απεικόνιση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	155
Σχήμα 3.14: Υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας πριν τοποθετηθεί στο ειδικά διαμορφωμένο καλούπι για την παρασκευή του σταθεροποιημένου δοκιμίου	156
Σχήμα 3.15: Σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου M31 φωτογραφία και απεικόνιση ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	156

Σχήμα 3.16: Φωτογραφία και απεικόνιση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σταθεροποιημένου δοκιμίου μετά από ξήρανση.....	157
Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσομέτρου για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου M31.....	168
Σχήμα 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσομέτρου για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31 (καμπύλες αποφόρτισης)	169
Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσομέτρου για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου Longstone	171
Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσομέτρου για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου Longstone (καμπύλες αποφόρτισης).....	171
Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο M31: (α) διατμητική τάση - οριζόντια μετατόπιση και (β) κατακόρυφη μετατόπιση - οριζόντια μετατόπιση	175
Σχήμα 4.6: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31: (α) στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και (β) στην κρίσιμη κατάσταση.....	176
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο Longstone: (α) διατμητική τάση-οριζόντια μετατόπιση και (β) κατακόρυφη μετατόπιση-οριζόντια μετατόπιση.....	179
Σχήμα 4.8: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Longstone: (α) Στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και (β) στην κρίσιμη κατάσταση	180
Σχήμα 4.9: Αποτελέσματα ισότροπης στερεοποίησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο M31: (α) δείκτης πόρων - μέση ενεργός τάση και (β) ογκομετρική παραμόρφωση- μέση ενεργός τάση.....	183
Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική (συνεχείς καμπύλες) και σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) άμμο M31: (α) λόγος τάσεων-αξονική παραμόρφωση, (β) αποκλίνουσα τάση- αξονική παραμόρφωση, (γ) ογκομετρική-αξονική παραμόρφωση και (δ) ενεργές τασικές οδεύσεις.....	188
Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 στο σημείο αλλαγής φάσης (p.t): (α) ογκομετρική παραμόρφωση στο σημείο αλλαγής φάσης -	

- αρχική ενεργός τάση και (β) αποκλίνουσα -μέση ενεργός τάση στο σημείο αλλαγής φάσης..... 189
- Σχήμα 4.12:** Καμπύλες λόγου τάσεων-διαστολικότητας για σταθεροποιημένα (σύμβολα με κόκκινο περίγραμμα) και φυσικά δοκίμια (χρωματιστά σύμβολα) άμμου M31 με αρχική μέση ενεργό τάση: (α) $p'_i=200\text{kPa}$, (β) $p'_i=700\text{kPa}$ 190
- Σχήμα 4.13:** Σχέση μέγιστης διαστολικότητας-μέσης ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα (σύμβολα με έγχρωμο περίγραμμα) και φυσικά δοκίμια (αντίστοιχα χρωματισμένα σύμβολα) άμμου M31 191
- Σχήμα 4.14:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική (συνεχείς καμπύλες) και σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) άμμο M31:(α) ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο $q-p'$, (β) αποκλίνουσα τάση-αξονική παραμόρφωση, (γ) υπερπίεση του υγρού των πόρων-αξονική παραμόρφωση (δ) κανονικοποιημένη υπερπίεση του υγρού των πόρων-αξονική παραμόρφωση 196
- Σχήμα 4.15:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 στο σημείο αλλαγής φάσης (p.t): (α) υπερπίεση του υγρού των πόρων στο σημείο αλλαγής φάσης -αρχική ενεργός τάση και (β) αποκλίνουσα -μέση ενεργός τάση στο σημείο αλλαγής φάσης..... 197
- Σχήμα 4.16:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 στην κατάσταση μέγιστης αντοχής (peak): (α) $(q/p')_{\max-p'}$ και (β) $\phi_{\text{peak}-p'}$ 203
- Σχήμα 4.17:** Κρίσιμη κατάσταση της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία: (α) $e-p'$ και (β) $q-p'$ 204
- Σχήμα 4.18:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική (συνεχείς καμπύλες) και σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) άμμο M31: (α) ενεργές τασικές οδεύσεις, (β) αποκλίνουσα τάση- αξονική παραμόρφωση, (γ) ογκομετρική-αξονική παραμόρφωση και α) λόγος τάσεων-αξονική παραμόρφωση. 209
- Σχήμα 4.19:** Φωτογραφίες σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου M31: α) πριν την φόρτιση, β) μετά από τριαξονική θλίψη και γ) μετά από τριαξονικό εφελκυσμό..... 211
- Σχήμα 4.20:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31:(α)ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο $q-p'$, (β) αποκλίνουσα τάση-

αξονική παραμόρφωση, (γ) λόγος τάσεων-αξονική παραμόρφωση (δ) υπερπίεση του υγρού των πόρων-αξονική παραμόρφωση	216
Σχήμα 4.21: Επίδραση των συνθηκών στράγγισης. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε (α) φυσική και (β)σταθεροποιημένη άμμο M31. Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q - p'	217
Σχήμα 4.22: Επίδραση των συνθηκών στράγγισης. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού σε (α) φυσική και (β)σταθεροποιημένη άμμο M31. Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q - p'	217
Σχήμα 4.23: Χαρακτηριστικά δυσμησίας συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (συνεχείς γραμμές) και εμποδιζόμενης στράγγισης (διακεκομμένες γραμμές)	221
Σχήμα 4.24: Χαρακτηριστικά δυσμησίας συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού στην ίδια αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης ($p'_i=200\text{kPa}$)	222
Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 76\text{kPa}$	227
Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 63\text{kPa}$	229
Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 48\text{kPa}$	231
Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 42\text{kPa}$	233
Σχήμα 5.5: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου M31	234
Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών: Κανονικοποιημένες καμπύλες $\Delta u/p'_i - N/N_{iL}$ άμμου M31, με $p'_i=200\text{kPa}$, $e_i=0.711-0.731$ και $q=\pm 42-79\text{ kPa}$	236
Σχήμα 5.7: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη $\Delta u - N$ δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 76\text{ kPa}$	240
Σχήμα 5.8: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη $\Delta u - N$ δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 63\text{ kPa}$	240

Σχήμα 5.9: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη $\Delta u-N$ δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 48$ kPa	241
Σχήμα 5.10: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη $\Delta u-N$ δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 42$ kPa	241
Σχήμα 5.11: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής δοκιμής υπό εμποδιζόμενη στράγγιση: Τυπικά στάδια της εξέλιξης της κανονικοποιημένης υπερπίεσης του υγρού των πόρων με τους κύκλους φόρτισης	242
Σχήμα 5.12: Καμπύλη ρευστοποίησης χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31.....	244
Σχήμα 5.13: Φωτογραφίες δοκιμίου άμμου M31: α) πριν την φόρτιση, β) μετά από τριαξονική, ανακυκλική φόρτιση υπό εμποδιζόμενη στράγγιση	245
Σχήμα 5.14: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 42$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	247
Σχήμα 5.15: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 48$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	248
Σχήμα 5.16: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 63$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	249
Σχήμα 5.17: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 76$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	250
Σχήμα 5.18: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 79$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	251
Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 79$ kPa	257

Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 79$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης	258
Σχήμα 5.21: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 74$ kPa	259
Σχήμα 5.22: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 74$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης	260
Σχήμα 5.23: Διακύμανση α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής παραμόρφωσης στη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης	261
Σχήμα 5.24: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa	262
Σχήμα 5.25: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης	263
Σχήμα 5.26: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 57$ kPa	264
Σχήμα 5.27: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 57$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης	265
Σχήμα 5.28: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 48$ kPa	266
Σχήμα 5.29: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 48$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης	267
Σχήμα 5.30: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής ανακυκλικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31.....	269
Σχήμα 5.31: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 79$ kPa	273
Σχήμα 5.32: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 79$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης.....	274
Σχήμα 5.33: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa	275

- Σχήμα 5.34:** Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης..... 276
- Σχήμα 5.35:** Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 48$ kPa 277
- Σχήμα 5.36:** Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 48$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης..... 278
- Σχήμα 5.37:** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31. 282
- Σχήμα 5.38:** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{1\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=1\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31. 282
- Σχήμα 5.39:** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{2.5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=2.5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31. 283
- Σχήμα 5.40:** Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31. 283
- Σχήμα 5.41:** Εξέλιξη του δείκτη βελτίωσης (I_f) της ανακυκλικής αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη φυσική άμμο M31 για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL , $\varepsilon_{cyc}= 1, 2.5$ και 5%) 284
- Σχήμα 5.42:** Σχηματικός υπολογισμός του τέμνοντος μέτρου δυσστησίας (E) υπό ανακυκλική φόρτιση (Κύκλος $N=10$ και $N=30$) 286
- Σχήμα 5.43:** Μέτρο δυσστησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q 287
- Σχήμα 5.44:** Μέτρο δυσστησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q 287

- Σχήμα 5.45:** Επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο δυσστησιότητας της χαλαρής άμμου M31 υπό ανακυκλική φόρτιση..... 288
- Σχήμα 6.1:** Δοκιμή ακτινικής φόρτισης. Διαδρομές τάσεων (α) στο επίπεδο $q-p'$ και (β) στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$ 292
- Σχήμα 6.2:** Εξέλιξη των κύριων τάσεων με το χρόνο σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0$ 293
- Σχήμα 6.3:** Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. Διαδρομές τάσεων στα επίπεδα α) $q-p'$ και β) X-Y 294
- Σχήμα 6.4:** Απόκριση χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε ακτινική φόρτιση με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης 296
- Σχήμα 6.5:** Εξέλιξη των κύριων τάσεων με το χρόνο σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0.5$ 297
- Σχήμα 6.6:** Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) X-Y..... 298
- Σχήμα 6.7:** Απόκριση χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε ακτινική φόρτιση με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης 300
- Σχήμα 6.8:** Εξέλιξη των κύριων τάσεων με το χρόνο σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=1$ 301
- Σχήμα 6.9:** Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) X-Y 302
- Σχήμα 6.10:** Απόκριση χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε ακτινική φόρτιση με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης 304

- Σχήμα 6.11:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=0^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 307
- Σχήμα 6.12:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=30^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 308
- Σχήμα 6.13:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=45^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 309
- Σχήμα 6.14:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=60^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 310
- Σχήμα 6.15:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=90^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 311
- Σχήμα 6.16:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 312
- Σχήμα 6.17:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της εφαπτομενικής παραμόρφωσης (ϵ_θ) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$... 312
- Σχήμα 6.18:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της ακτινικής παραμόρφωσης (ϵ_r) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 312
- Σχήμα 6.19:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης ($\gamma_{\theta z}$) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 313
- Σχήμα 6.20:** Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$ 315
- Σχήμα 6.21:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης στην πυκνή (αριστερά) και στη χαλαρή (δεξιά) άμμο M31 317

- Σχήμα 6.22:** Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$ 319
- Σχήμα 6.23:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης στην πυκνή (αριστερά) και στη χαλαρή (δεξιά) άμμο M31 321
- Σχήμα 6.24:** Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$ 323
- Σχήμα 6.25:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης στην πυκνή (αριστερά) και στη χαλαρή (δεξιά) άμμο M31 325
- Σχήμα 6.26:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της πυκνής άμμου M31 υπό γωνία α) $\alpha=0^\circ$, β) $\alpha=30^\circ$, γ) $\alpha=45^\circ$, δ) $\alpha=60^\circ$ και ε) $\alpha=90^\circ$ 326
- Σχήμα 6.27:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 329
- Σχήμα 6.28:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της εφαπτομενικής παραμόρφωσης (ϵ_θ) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 329
- Σχήμα 6.29:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της ακτινικής παραμόρφωσης (ϵ_r) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 329
- Σχήμα 6.30:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης ($\gamma_{z\theta}$) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ 330
- Σχήμα 6.31:** Δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης και στην τριαξονική συσκευή στη χαλαρή άμμο M31: α) Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο $q-p'$ και β) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 331
- Σχήμα 6.32:** Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) στο λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης $(q/p')_{p.t.}$ της σχετικά χαλαρής άμμου M31..... 333

- Σχήμα 6.33:** Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) στο μέγιστο λόγο τάσεων $(q/p')_{\max}$ της σχετικά χαλαρής άμμου M31 .. 335
- Σχήμα 6.34:** Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) στο μέγιστο λόγο τάσεων $(q/p')_{\max}$ της σχετικά πυκνής άμμου M31..... 335
- Σχήμα 6.35:** Επίδραση της πυκνότητας της άμμου στο μέγιστο λόγο τάσεων q/p'_{\max} της άμμου M31 σε δοκιμές ακτινικής φόρτισης..... 337
- Σχήμα 6.36:** Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y–X επίπεδο. Ακτινική φόρτιση υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$ για τη α) χαλαρή και β) την πυκνή άμμο M31 339
- Σχήμα 6.37:** Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y–X επίπεδο. Ακτινική φόρτιση υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ για τη α) χαλαρή και β) την πυκνή άμμο M31 340
- Σχήμα 6.38:** Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y–X επίπεδο. Ακτινική φόρτιση υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$ για τη α) χαλαρή και β) την πυκνή άμμο M31 341
- Σχήμα 6.39:** Εξέλιξη της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνσης τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τις 3 τιμές της παραμέτρου b για τη χαλαρή άμμο M31..... 343
- Σχήμα 6.40:** Εξέλιξη της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνση τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τις 3 τιμές της παραμέτρου b για την πυκνή άμμο M31344
- Σχήμα 6.41:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 347
- Σχήμα 6.42:** Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου M31. Μονοτονική φόρτιση υπό γωνία α) $\alpha=0^\circ$ και β) $\alpha=90^\circ$ 348
- Σχήμα 6.43:** Εξέλιξη της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνση τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τη σταθεροποιημένη άμμο M31..... 349

- Σχήμα 6.44:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=0^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 351
- Σχήμα 6.45:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=45^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 352
- Σχήμα 6.46:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=60^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 353
- Σχήμα 6.47:** Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=90^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης..... 354
- Σχήμα 6.48:** Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής, ακτινικής, εφαπτομενικής και διατμητικής παραμόρφωσης στη σταθεροποιημένη, και στη φυσική πυκνή και χαλαρή άμμο M31 υπό ακτινική φόρτιση με $b=0.5356$
- Σχήμα 6.49:** Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών, ελεύθερης στράγγισης στην τριαξονική συσκευή (TRIAx) και στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (HC). Επίδραση των συνθηκών φόρτισης στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου (αριστερά) και της φυσικής άμμου M31 (δεξιά). Καμπύλες λόγου τάσεων αποκλίνουσας παραμόρφωσης $q/p'-\varepsilon_q$ (πάνω) και ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης $\varepsilon_{vol}-\varepsilon_q$ (κάτω) 359
- Σχήμα 6.50:** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού στη σταθεροποιημένη χαλαρή άμμο M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Επίδραση συνθηκών φόρτισης: Συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης (TRIAx strain controlled) (διακεκομμένες γραμμές) και συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (TRIAx stress controlled) (συνεχείς γραμμές) 360
- Σχήμα 7.1:** Στάδια δοκιμής συνεχούς στροφής των αξόνων κυρίων τάσεων. Διαδρομές τάσεων (α) στο επίπεδο $q-p'$ (α) και (β) στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$ 364

- Σχήμα 7.2:** Εξέλιξη των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) σε μια πλήρη στροφή των αξόνων κύριων τάσεων υπό α) $q/p'=1.01$ και $b=0.5$ και β) $q/p'=0.96$ και $b=0$... 364
- Σχήμα 7.3:** Διακύμανση των επιμέρους τάσεων ($\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{z\theta}$) και των επιβαλλόμενων πιέσεων (p_o, p_i) και φορτίων (F, T) σε μια πλήρη στροφή των αξόνων κύριων τάσεων υπό α) $q/p'=1.01$ και $b=0.5$ και β) $q/p'=0.96$ και $b=0$ 365
- Σχήμα 7.4:** Στάδια δοκιμής R-8. Ισότροπη στερεοποίηση, ακτινική φόρτιση και στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $b=0.5$ και $q/p'=0.87$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q-p'$ (α) και (β) στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$, γ) καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης $q/p' - \epsilon_q$ και δ) καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης $\epsilon_{vol} - \epsilon_q$ 367
- Σχήμα 7.5:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$, 368
- Σχήμα 7.6:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των κυρίων αξόνων σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N .. 369
- Σχήμα 7.7:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο στροφής N 370
- Σχήμα 7.8:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, 372
- Σχήμα 7.9:** Επίδραση της γωνίας α στον λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης $(q/p')_{p,t}$ και στη μέγιστη αντοχή $(q/p')_{max}$ α) στη χαλαρή και β) στην πυκνή άμμο M31 373
- Σχήμα 7.10:** Ακτινική φόρτιση υπό $\alpha=0^\circ$ και $b=0.5$ των δοκιμών R-6, R-1, R-4 και FA-16. Καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($q/p' - \epsilon_q$) και καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($\epsilon_{vol} - \epsilon_q$) 374
- Σχήμα 7.11:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$ 375
- Σχήμα 7.12:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N 376

- Σχήμα 7.13:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0.5$ της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο περιστροφής, N 377
- Σχήμα 7.14:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0.5$ της πυκνής άμμου M31. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N 379
- Σχήμα 7.15:** Ακτινική φόρτιση υπό $\alpha=0^\circ$ και $b=0$ των δοκιμών R-9, R-10 και FA-6. Καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($q/p'-\epsilon_q$) και καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($\epsilon_{vol}-\epsilon_q$) 381
- Σχήμα 7.16:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή υπό $b=0$ της πυκνής άμμου M31. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$ 382
- Σχήμα 7.17:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N 382
- Σχήμα 7.18:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή υπό $b=0$ της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο στροφής, N 383
- Σχήμα 7.19:** Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0$ της πυκνής άμμου M31. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N 384
- Σχήμα 7.20:** Συσχέτιση του λόγου τάσεων των δοκιμών στροφής με τις περιβάλλουσες αστοχίας ακτινικής φόρτισης της πυκνής άμμου υπό $b=0$ και 0.5..... 385
- Σχήμα 7.21:** Επίδραση της παραμέτρου b κατά τη στροφή των αξόνων της πυκνής άμμου M31. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N 386
- Σχήμα 7.22:** Επίδραση της παραμέτρου b κατά τη στροφή των αξόνων της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N 387
- Σχήμα 7.23:** Επίδραση της παραμέτρου b κατά τη στροφή των αξόνων της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο στροφής, N 387

- Σχήμα 7.24:** Σχηματική απεικόνιση των διανυσμάτων προσαυξητικής τάσης και παραμόρφωσης κατά τη στροφή των αξόνων της κύριων τάσεων στο χώρο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$ και $d\gamma_{z\theta} - (d_{\varepsilon z} - d_{\varepsilon\theta})$ αντίστοιχα..... 389
- Σχήμα 7.25:** Μοναδιαία διανύσματα προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y-X επίπεδο. Στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $b=0.5$ και λόγο τάσεων α) $q/p'=0.87$ β) $q/p'=0.69$ 391
- Σχήμα 7.26:** Επίδραση του λόγου τάσεων, q/p' , στη γωνία μη ομοαξονικότητας, β , της άμμου M31 κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $b=0.5391$
- Σχήμα 7.27:** Μοναδιαία διανύσματα προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y-X επίπεδο. Στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε πυκνά δοκίμια άμμου M31 υπό λόγο τάσεων $q/p'=0.98$ και παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης α) $b=0.5$ και β) $b=0$ 392
- Σχήμα 7.28:** Επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , στη γωνία μη ομοαξονικότητας, β , της πυκνής άμμου M31 κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $q/p'=0.98$ 392

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 3.1:** Χαρακτηριστικά των άμμων M31 και Longstone..... 153
- Πίνακας 3.2:** Χαρακτηριστικά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 και Longstone 160
- Πίνακας 3.3:** Χαρακτηριστικά δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 και Longstone 160
- Πίνακας 3.4:** Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 161
- Πίνακας 3.5:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% δοκίμια άμμου M31 162
- Πίνακας 3.6:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης..... 163
- Πίνακας 3.7:** Χαρακτηριστικά δοκιμών στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στην άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης..... 164
- Πίνακας 4.1:** Χαρακτηριστικά δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31..... 174
- Πίνακας 4.2:** Χαρακτηριστικά δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου Longstone 178
- Πίνακας 4.3:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31..... 184
- Πίνακας 4.4:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31..... 192

- Πίνακας 4.5:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 στην κατάσταση μέγιστης αντοχής..... 201
- Πίνακας 4.6:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 στην κρίσιμη κατάσταση 202
- Πίνακας 4.7:** Παράμετροι κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10%.... 202
- Πίνακας 4.8:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 207
- Πίνακας 4.9:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 214
- Πίνακας 4.10:** Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 220
- Πίνακας 5.1:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά δοκίμια άμμου M31. 225
- Πίνακας 5.2:** Εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Τιμές παραμέτρων για τις άμμους Ham River, Fontainebleau, M31 και Ottawa (Konstadinou & Georgiannou, 2014) 239
- Πίνακας 5.3:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας σταθεροποιητή 10% κ.β. 253
- Πίνακας 5.4:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% δοκίμια άμμου M31..... 270
- Πίνακας 5.5:** Ποσοστά βελτίωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR της σταθεροποιημένης άμμου έναντι της φυσικής για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης..... 281

- Πίνακας 5.6:** Τιμές του λόγου ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης..... 281
- Πίνακας 6.1:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης. 291
- Πίνακας 6.2:** Χαρακτηριστικά δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης..... 346
- Πίνακας 6.3:** Χαρακτηριστικά δοκιμών εφελκυσμού ($\alpha=0^\circ$, $b=1$) στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο M31 στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης και στην τριαξονική συσκευή 358
- Πίνακας 7.1:** Χαρακτηριστικά δοκιμών στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στην άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης..... 363

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχαλικών, άμμων, μιγμάτων αμμοϊλύων, μη-πλασιμων ιλύων) κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στην ανωδομή, έως και την πλήρη αστοχία. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται όταν επιβάλλονται δυναμικές φορτίσεις υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, όπως οι σεισμικές διεγέρσεις, σε κορεσμένους μη συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς προκαλώντας τη ραγδαία αύξηση της πίεσης του υγρού των πόρων που οδηγεί σε συσσώρευση παραμορφώσεων και σε μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Η αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών μπορεί να επιτευχθεί με μία σειρά από καθιερωμένες μεθοδολογίες βελτίωσης του εδάφους (Seed & Lee, 1966) πριν την κατασκευή του κτιρίου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ρευστοποιήσιμου εδάφους (Idriss & Boulanger, 2008). Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται συνήθως στη συμπίκνωση (π.χ. δυναμική συμπίκνωση, βαθιά δονητική συμπίκνωση), στην αύξηση της ενεργού τάσης μέσω της προφόρτισης, στη σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) ή την αποτόνωση των σεισμικών υπερπίεσεων πόρων (π.χ. χαλικο-στραγγιστήρια) και έχουν εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο (Donovan et al., 1984; Mayne et al., 1984; Maher et al., 1994).

Σε περιπτώσεις που η βελτίωση του εδάφους εφαρμόζεται σε περιοχές με υφιστάμενες κατασκευές, οι κατάλληλες μέθοδοι είναι λίγες και συνήθως συνοδεύονται από πολλά μειονεκτήματα (βελτίωση του εδάφους σε μικρό τμήμα της κάτοψης, πρόκληση προβλημάτων στη θεμελίωση λόγω της εισπίεσης ενεμάτων υπό υψηλή πίεση κλπ.). Οι ανωτέρω συνθήκες οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου βελτίωσης εδαφών, της παθητικής σταθεροποίησης (passive site stabilization) (Gallagher, 2000). Πρόκειται για την εισπίεση με χαμηλή υδραυλική κλίση ενός σταθεροποιητή (stabiliser), δηλαδή ενός υλικού που αποτελείται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανο-σωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της κάτοψης μιας υφιστάμενης κατασκευής. Η διήθηση του σταθεροποιητή μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της φυσικής ροής κατασκευάζοντας ένα φρέαρ με τον σταθεροποιητή ανάντη της κατασκευής, είτε επιβάλλοντας συνθήκες ροής κατασκευάζοντας φρέατα παροχής και άντλησης με χαμηλή υδραυλική κλίση (Pamuk et al., 2007).

Η κολλοειδής πυριτία που επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής στην παρούσα διατριβή αρχικά έχει τη μορφή υγρολύματος και με την πάροδο του χρόνου υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη, με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του. Ρυθμίζοντας τους κατάλληλους παράγοντες (pH, περιεκτικότητα σε αλάτι, θερμοκρασία) η μετατροπή

γίνεται σε συγκεκριμένο χρόνο ώστε να έχει ολοκληρωθεί η διοχέτευση ομοιόμορφα σε όλη την περιοχή της κάτοψης. Επιπλέον, δεν χρειάζεται ιδιαίτερος εξοπλισμός κατά τη διοχέτευσή του για αυτό και θεωρείται μια λύση οικονομικά ελκυστική. Επιπρόσθετα, η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη και μη εύφλεκτη (Gallagher, 2000).

Μέσω του εμπλουτισμού του υγρού των πόρων με τον σταθεροποιητή αλλάζει η μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού - υγρού των πόρων και επιτυγχάνεται ο περιορισμός της συσσώρευσης παραμορφώσεων κατά τη σεισμική διέγερση. Αν και οι δεσμοί ανάμεσα στους κόκκους της σταθεροποιημένης άμμου είναι ασθενείς η άμμος εμφανίζει υψηλότερη αντοχή, διαστολικότητα και αντίσταση σε ρευστοποίηση (Gallagher & Mitchell, 2002; Kodaka et al., 2005; Díaz-Rodríguez et al., 2008; Porcino et al., 2011, 2012; Vranna & Tika, 2015). Παρόλο που οι προαναφερθείσες εργαστηριακές μελέτες έχουν δώσει απαντήσεις σε αρκετά ζητήματα που αφορούν αυτή τη νέα ελκυστική μέθοδο σταθεροποίησης άμμων, τα αποτελέσματά τους βασίζονται στις κλασικές δοκιμές μέτρησης της αντίστασης σε ρευστοποίηση στην τριαξονική συσκευή ή τη συσκευή απλής διάτμησης οι οποίες δεν έχουν τη δυνατότητα διερεύνησης της ανισότροπης συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων άμμων.

Ο όρος της ανισοτροπίας των εδαφικών υλικών αναφέρεται στην εξάρτηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς (αντοχή, διαστολικότητα, δυσμησία) από τη διεύθυνση της φόρτισης λόγω της ανισότροπης δομής τους. Η προσανατολισμένη εσωτερική διάταξη των κόκκων και των κενών, δηλαδή η διάταξη των κόκκων, ο προσανατολισμός των διανυσμάτων που είναι κάθετα στις μεταξύ τους επαφές, η κατανομή και ο προσανατολισμός των κενών ορίζουν τη δομή (fabric) του υλικού (Mitchell & Kenichi, 1976).

Επειδή στα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα οι αρχικές εντατικές καταστάσεις και οι συνθήκες φόρτισης είναι σύνθετες περιλαμβάνοντας αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) όσο και στη διεύθυνσή τους, π.χ. απόκλιση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης κατά γωνία α από την κατακόρυφο (από $\alpha=0^\circ$ σε 90°), με τυπικά παραδείγματα τις θεμελιώσεις και τα επιχώματα, (Ishihara & Towhata, 1983; Zdravković et al., 2002; Wijewickreme & Vaid, 2008) η μελέτη της απόκρισης του εδάφους υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης κρίνεται απαραίτητη. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται έρευνες που επικεντρώνονται στην εδαφική ανισοτροπία και περιλαμβάνουν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης κυρίως υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, υπό σταθερές αλλά διαφορετικές διευθύνσεις των κύριων τάσεων (με εύρος από $\alpha=0^\circ$ έως $\alpha=90^\circ$) με έμφαση στην επίδραση της ανισοτροπίας στην μέγιστη και ελάχιστη διατμητική αντοχή των άμμων, στις παραμορφώσεις και την ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων κατά την αστοχία (Nakata et al., 1998; Yoshimine et al., 1998; Shibuya et al., 2003a; Georgiannou et al., 2018; Triantafyllos et al., 2021). Παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της γωνίας α είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς όσο η διεύθυνση της κύριας τάσης σ_1 πλησιάζει το οριζόντιο

επίπεδο διαστρωμάτωσης η απόκριση της άμμου γίνεται πιο ψαθυρή, πιο συστολική και παρατηρείται μείωση της αντοχής.

Επιπρόσθετα, οι συνθήκες φόρτισης σε διάφορα γεωτεχνικά προβλήματα μπορεί να περιλαμβάνουν και συνεχείς αλλαγές στη διεύθυνση των κύριων τάσεων, με τυπικά παραδείγματα την κυματική φόρτιση, κυκλοφοριακά φορτία και τον σεισμό (Ishihara & Towhata, 1983; Zdravković et al., 2002; Wijewickreme & Vaid, 2008). Επομένως για τη μελέτη της επίδρασης της γωνίας α στην ανισότροπη απόκριση άμμων είναι απαραίτητες οι δοκιμές που περιλαμβάνουν συνεχή στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων (continuous rotation of principal stress axes) υπό σταθερή διατμητική τάση. Κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων μεταβάλλεται μόνο η διεύθυνση των αξόνων των κυρίων τάσεων ενώ η διαδρομή τάσεων στο επίπεδο $q - p$ είναι ένα σταθερό σημείο. Στις δοκιμές στροφής υπό εμποδιζόμενη στράγγιση παρατηρήθηκε ότι για σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης, παραμέτρου ενδιάμεσης τάσης, και πυκνότητας η στροφή της γωνίας α οδηγεί σε ανάπτυξη υπερπίεσης του υγρού των πόρων, συσσώρευση των παραμορφώσεων και τελικά ρευστοποίηση σε κάποιες περιπτώσεις (Ishihara & Towhata, 1983; Shibuya & Hight, 1987; Nakata et al., 1998; Yang et al., 2007).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στροφής των αξόνων υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι βέβαια πολύ σημαντικά για την κατανόηση του ρόλου της ανισοτροπίας και την ανάγκη ένταξής της στις αναλύσεις, αλλά χωρίς τον έλεγχο της ενεργού τάσης δεν μπορεί να αποδοθεί η παρατηρούμενη ανισότροπη συμπεριφορά αποκλειστικά στην αλλαγή της δομής του δοκιμίου. Αντίθετα, στις δοκιμές που διεξάγονται υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης υπάρχει η δυνατότητα επιβολής συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης q , μέσης ενεργού τάσης p' και παραμέτρου ($b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$) που εκφράζει την επίδραση του σχετικού μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Συνεπώς διαφορετικές παραμορφώσεις του δοκιμίου λόγω περιστροφής των αξόνων αντανακλούν διαφορετική δομή στην αρχή της δοκιμής ανάλογα με τον συνδυασμό q , p' , b . Η στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου έχει παρατηρηθεί ότι προκαλεί συστολή των δοκιμών, ακόμη και όταν το μέγεθος των κύριων τάσεων παραμένει σταθερό (K. Miura et al., 1986; Symes et al., 1988; Tong et al., 2010).

Εκτός από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α), σημαντική είναι και η επίδραση του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , στην εδαφική ανισοτροπία όπως έχει αναγνωριστεί από τον Bishop, (1966) και μελετήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία (Yoshimine et al., 1998; Shibuya et al., 2003b; Yang et al., 2007; Tong et al., 2010) μέσω δοκιμών στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο και των τριών κυρίων τάσεων. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί σε πτώση της μέγιστης αντοχής σε φόρτιση υπό σταθερή γωνία α

και σε αύξηση της συστολικής συμπεριφοράς υπό συνεχή στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η εγγενής ανισοτροπία της δομής αλλά και οι συνεχείς αλλαγές της αρχικής δομής κατά τη διάρκεια των εντατικών καταπονήσεων των αμμωδών αποθέσεων επιδρούν σημαντικά στη αντοχή, τη διαστολικότητα και την εξέλιξη των παραμορφώσεων της άμμου. Όμως, παρά τα αποτελέσματα των πειραματικών ερευνών σε εξειδικευμένα ερευνητικά κέντρα που διαθέτουν τη συσκευή (HC) και επιβεβαιώνουν την ανισότροπη συμπεριφορά των άμμων αυτή αγνοείται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές όπως κατά την μελέτη του κινδύνου ρευστοποίησης, όπου συνήθως θεωρείται ότι η αντοχή της άμμου εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητά της. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι στη βιβλιογραφία δεν εντοπίζονται αντίστοιχες μελέτες σε σταθεροποιημένες άμμους.

1.2 Σκοπός της Διδακτορικής Διατριβής

Στο πλαίσιο της διατριβής διερευνάται πειραματικά η αποτελεσματικότητα της «νέας» μεθόδου βελτίωσης μη συνεκτικών εδαφών μέσω δοκιμών μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης. Επιπλέον, για πρώτη φορά θα μελετηθεί επίδραση της μεταβολής της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου μέσω καινοτόμων και εξειδικευμένων πειραμάτων, στη συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Κυλινδρικού Δοκιμίου. Για την εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στην πράξη απαιτείται η ολοκληρωμένη γνώση της απόκρισης του σταθεροποιημένου εδάφους υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μόνο αποσπασματικά δεδομένα γι' αυτό στόχος της διατριβής είναι να εξασφαλίσει μια ολοκληρωμένη και συστηματική πειραματική βάση δεδομένων που θα παρέχει τις απαιτούμενες παραμέτρους για την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς άμμων με και χωρίς σταθεροποίηση.

Η καινοτομία στην παρούσα έρευνα έγκειται στο γεγονός ότι προς το παρόν η περιγραφή της συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα τα οποία προέρχονται κυρίως από τριαξονικές δοκιμές θλίψης και μονοτονικής φόρτισης (Gallagher & Mitchell, 2002; Kodaka et al., 2005; Díaz-Rodríguez et al., 2008; Porcino et al., 2011, 2012; Vranna & Tika, 2015), ενώ στην παρούσα εργασία μελετάται η ανισότροπη συμπεριφορά σταθεροποιημένης άμμου υπό γενικευμένη φόρτιση. Συγκεκριμένα, επιχειρείται μέσα από ένα σημαντικό αριθμό διαφορετικών δοκιμών σε βελτιωμένη και μη άμμο να μελετηθεί η μέθοδος της σταθεροποίησης υπό διαφορικές συνθήκες φόρτισης που θα καλύπτουν ένα εύρος εφαρμογών.

Στόχος της έρευνας είναι ο προσδιορισμός ενός πλαισίου που να περιγράφει την ανισότροπη απόκριση της άμμου αρχικά και στη συνέχεια το πλαίσιο αυτό να

χρησιμοποιηθεί σαν βάση αναφοράς για την ανάδειξη της βελτιωμένης συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου.

Προκειμένου να διευκρινισθεί εάν το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων μελετάται μία άμμος με γωνιώδεις (άμμος Longstone) και μία με στρογγυλεμένους κόκκους (άμμος M31) ώστε να καθοριστεί η επίδραση του σχήματος των κόκκων στην απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Εκτελέστηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης (συμπιεσομέτρου) σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM® με ποσοστό σταθεροποιητή CS=10% κ.β άμμο, σε ένα εύρος πυκνοτήτων ώστε να εξεταστεί η επίδραση κολλοειδούς πυριτίας στη συμπίεστικότητα του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επιπλέον εκτελέστηκαν **δοκιμές απευθείας διάτμησης** υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης για να εξεταστεί η επίδραση της πυκνότητας και της αρχικής ενεργού τάσης στη διαστολικότητα, στη μέγιστη διατμητική αντοχή και στην παραμένουσα αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου.

Για τη μελέτη της ανισοτροπίας πραγματοποιήθηκαν μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης με την κύρια τάση κατακόρυφη ($\alpha=0^\circ$) και εφελκυσμού ($\alpha=90^\circ$) υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης στη λεπτόκοκκη, επιρρεπή σε ρευστοποίηση άμμο M31. Διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο ελαστικότητας, στην κατάσταση αλλαγής φάσης (phase transformation) στη μέγιστη διατμητική αντοχή, στη διαστολικότητα και στις παραμέτρους κρίσιμης κατάστασης (critical state). Επιπλέον, εκτελέστηκαν ανακυκλικές δοκιμές στην τριαξονική συσκευή με εμποδιζόμενη στράγγιση για τη μέτρηση των παραμέτρων ρευστοποίησης. Πέραν των δύο ακραίων καταστάσεων (τριαξονική θλίψη και τριαξονικός εφελκυσμός), εκτελέστηκαν δοκιμές ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Κυλινδρικού Δοκιμίου υπό ενδιάμεσες προκαθορισμένες κλίσεις της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο: $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Σημειώνεται ότι ενώ στη βιβλιογραφία εντοπίζονται μελέτες με σύνθετες εντατικές φορτίσεις σε άμμους, δεν αναφέρονται αντίστοιχες μελέτες σε σταθεροποιημένες άμμους. Ο καθορισμός της καταστατικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων υπό γενικευμένη φόρτιση εξετάζεται για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Τα πειράματα αυτά θα έχουν άμεση πρακτική εφαρμογή σε μία νέα, πολλά υποσχόμενη μέθοδο επιτόπου «παθητικής σταθεροποίησης» ρευστοποιήσιμων άμμων με κολλοειδή πυριτία, η οποία βασίζεται στα αποτελέσματα κλασικών εργαστηριακών δοκιμών της τελευταίας δεκαετίας που αγνοούν την ανισοτροπία του υλικού. Τελικά, η δημιουργία μίας εκτενούς και συστηματικής βάσης δεδομένων για σύνθετες γενικευμένες συνθήκες φόρτισης άμμων και σταθεροποιημένων άμμων συνεισφέρει στην υπάρχουσα επιστημονική γνώση και εξυπηρετεί την ανάγκη ανάπτυξης καταστατικών προσομοιωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις γεωτεχνικών προβλημάτων μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

1.3 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής

Η διδακτορική διατριβή αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο ακολουθείται από:

- **Το Κεφάλαιο 2** όπου αρχικά μελετάται η ανισότροπη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών. Συγκεκριμένα, αναλύεται το φαινόμενο της εγγενούς και της εξελισσόμενης ανισοτροπίας καθώς και της μη συγγραμμικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών. Παρουσιάζονται σημαντικά αποτελέσματα και συμπεράσματα πειραματικών ερευνών της βιβλιογραφίας με έμφαση στην επίδραση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης και του σχετικού μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην απόκριση άμμων. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των τάσεων και των παραμορφώσεων στη συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Δοκιμίου, την πλέον κατάλληλη συσκευή για τη μελέτη της εδαφικής ανισοτροπίας. Στη συνέχεια αναφέρονται οι τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης. Ακολούθως, πραγματοποιείται μια περιγραφή των ιδιοτήτων της κολλοειδούς πυριτίας που επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής στη διατριβή. Τέλος, γίνεται διερεύνηση της υπάρχουσας σχετικής βιβλιογραφίας, δίνοντας έμφαση στη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους.
- **Το Κεφάλαιο 3** όπου γίνεται η περιγραφή των τριαξονικών συσκευών και της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές της διατριβής. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμών. Τέλος παρουσιάζεται αναλυτικά το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών της διατριβής.
- **Το Κεφάλαιο 4** περιλαμβάνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων των μονοτονικών δοκιμών στα φυσικά και σταθεροποιημένα εδάφη. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τις **δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης** (συμπιεσομέτρου) σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM® άμμο M31 και άμμο Longstone σε ένα εύρος πυκνοτήτων ώστε να εξεταστεί η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στη συμπίεστικότητα του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των **δοκιμών απευθείας διάτμησης** υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμων M31 και Longstone πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία με ποσοστό σταθεροποιητή CS=10% κ.β.. Μελετάται η επίδραση της πυκνότητας και της αρχικής ενεργού τάσης στη διαστολικότητα, στη μέγιστη διατμητική αντοχή και στην παραμένουσα αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών **τριαξονικής θλίψης** φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε ένα ευρύ φάσμα αρχικών ενεργών τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης. Διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο ελαστικότητας, στην κατάσταση αλλαγής φάσης (phase

transformation) στη μέγιστη διατμητική αντοχή, στη διαστολικότητα και στις παραμέτρους κρίσιμης κατάστασης (critical state). Για να διερευνηθεί η επίδραση της ανισοτροπίας στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου εκτελέστηκαν δοκιμές **τριαξονικού εφελκυσμού** υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης.

➤ Το **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνει **ανακυκλικές, τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης** στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο M31. Επιλέχθηκε η άμμος M31 γιατί είναι λεπτόκοκκη, επιρρεπής σε ρευστοποίηση και εμφάνισε ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη μονοτονική φόρτιση. Μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας με περιεκτικότητα σταθεροποιητή 10% κ.β. στην εξέλιξη της πίεσης του υγρού των πόρων, στη συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης, στην αντίσταση σε ρευστοποίηση και στο μέτρο εδαφικής δυσμησίας της άμμου.

➤ Το **Κεφάλαιο 6** επικεντρώνεται στα αποτελέσματα της ακτινικής φόρτισης (διάτμηση υπό σταθερή γωνία α) σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31 με και χωρίς κολλοειδή πυριτία υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Μελετάται η επίδραση της γωνίας α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°) στην εξέλιξη της διατμητικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης, στον λόγο τάσεων $\eta=q/p'$, στο σημείο αλλαγής φάσης και στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμικότητα). Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , στην εδαφική ανισοτροπία της άμμου διατηρώντας κατά τη φόρτιση σταθερή την διεύθυνση των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό γωνία α για διάφορες τιμές της παραμέτρου b ($b=0, 0.5$, και 1). Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται η επιρροή της πυκνότητας του εδάφους στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά, μέσω δοκιμών ακτινικής φόρτισης σε σχετικά πυκνά και σε σχετικά χαλαρά δοκίμια άμμου M31. Στη συνέχεια μελετάται, σε αντιστοιχία με την άμμο, η εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία. Εξετάζεται η εξάρτηση της αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμών από τη διεύθυνση φόρτισης α , την τιμή της ενδιάμεσης κύριας τάσης b και από τις συνθήκες επιβολής της φόρτισης (έλεγχος της τάσης-έλεγχος της παραμόρφωσης).

➤ Το **Κεφάλαιο 7** όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων. Μελετάται η επίδραση της συνεχούς μεταβολής της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων στην συμπεριφορά της άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Μελετάται η επίδραση της στροφής στην εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης και των επιμέρους παραμορφώσεων ($\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_\theta, \gamma_{\theta z}$) και στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμικότητα). Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση του μεγέθους του λόγου τάσεων q/p' και της παραμέτρου b ($b=0$ και $0,5$), που διατηρούνται σταθερά κατά την περιστροφή, για διαφορετικές πυκνότητες του εδάφους.

- Το **Κεφάλαιο 8** όπου αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2 : Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Εισαγωγή στην Ανισότροπη Συμπεριφορά Άμμου

2.1.1 Εισαγωγή

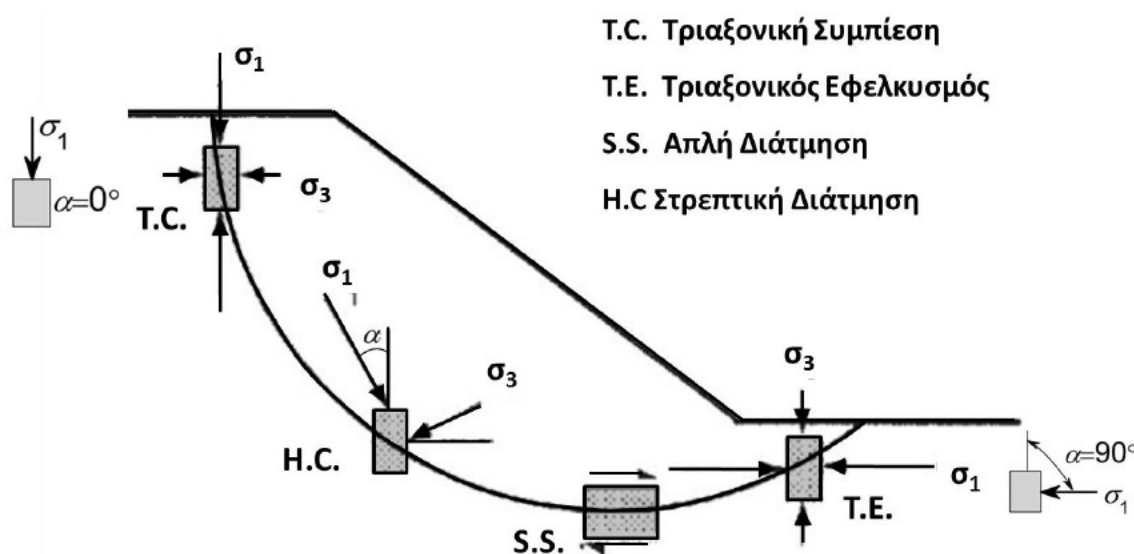
Ο όρος της ανισοτροπίας των εδαφικών υλικών αναφέρεται στην εξάρτηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς (αντοχή, διαστολικότητα, δυσμησία) από την διεύθυνση της φόρτισης λόγω της ανισότροπης δομής τους. Η προσανατολισμένη εσωτερική διάταξη των κόκκων και των κενών, δηλαδή η διάταξη των κόκκων, ο προσανατολισμός των διανυσμάτων που είναι κάθετα στις μεταξύ τους επαφές, η κατανομή και ο προσανατολισμός των κενών ορίζουν τη δομή (fabric) του υλικού (J. Mitchell & Kenichi, 1976).

Η εδαφική ανισοτροπία διαχωρίζεται στην εγγενή ανισοτροπία (inherent anisotropy), που είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση των επιβαλλόμενων φορτίσεων/παραμορφώσεων και αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό του εδαφικού υλικού εξαρτώμενο από τον τρόπο απόθεσης και στην ανισοτροπία που προκαλείται (induced anisotropy) στο υλικό από τις επιβαλλόμενες τάσεις/παραμορφώσεις (Casagrande & Carillo, 1944). Η ανισότροπη συμπεριφορά ενός εδαφικού στοιχείου που έχει υποβληθεί σε κάποιου είδους φόρτιση κατά το παρελθόν είναι συνδυασμός των παραπάνω και ονομάζεται αρχική ανισοτροπία (initial anisotropy).

Η ανισότροπη συμπεριφορά της άμμου μελετήθηκε αρχικά στη διεθνή βιβλιογραφία μέσω τριαξονικών δοκιμών (Kuerbis & Vaid, 1988; De Gennaro et al., 2004; Georgiannou, 2006), όπου παρατηρήθηκε επανειλημμένως ασθενέστερη αντοχή υπό εφελκυστική έναντι θλιπτικής φόρτισης. Υπό τριαξονικές συνθήκες επικρατεί τασική αξονοσυμμετρία. Υπό θλιπτική φόρτιση, η κατακόρυφη τάση (σ_z) είναι η μέγιστη κύρια τάση (σ_1), ($\sigma_z = \sigma_1$) και η ελάχιστη κύρια τάση (σ_3) που ισούται με την ενδιάμεση κύρια τάση (σ_2) είναι οι ακτινικές (οριζόντιες τάσεις) ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$). Επομένως, η γωνία της μέγιστης κύριας τάσης με την κατακόρυφο, γωνία α , ισούται με $\alpha = 0^\circ$ στη θλίψη και $\alpha = 90^\circ$ στον εφελκυσμό και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$ ισούται με $b = 0$ στη θλιπτική και $b = 1$ στην εφελκυστική φόρτιση.

Επειδή στα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα οι αρχικές εντατικές καταστάσεις και οι συνθήκες φόρτισης είναι σύνθετες περιλαμβάνοντας αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) όσο και στη διεύθυνσή τους, π.χ. απόκλιση κατά γωνία α από την κατακόρυφο (από $\alpha = 0^\circ$ σε 90°), με τυπικά παραδείγματα τις θεμελιώσεις, τα επιχώματα, τα φυσικά και τεχνητά υποθαλάσσια πρανή **Σχήμα 2.1**, την κυματική φόρτιση και τον σεισμό (Ishihara & Towhata, 1983; Zdravković et al., 2002; Wijewickreme & Vaid, 2008) η μελέτη της απόκρισης του εδάφους υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης κρίνεται απαραίτητη. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η εγγενής ανισοτροπία της δομής

αλλά και οι συνεχείς αλλαγές της αρχικής δομής κατά τη διάρκεια των εντατικών καταπονήσεων των αμμωδών αποθέσεων επιδρούν σημαντικά στη αντοχή, τη διαστολικότητα και την εξέλιξη των παραμορφώσεων της άμμου όπως παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες. Επισημαίνεται ότι στη βιβλιογραφία δεν εντοπίζονται αντίστοιχες μελέτες σε σταθεροποιημένες άμμους.



Σχήμα 2.1: Μηχανισμός αστοχίας σε επίχωμα

2.1.2 Εγγενής Ανισοτροπία

Η εγγενής ανισοτροπία (inherent anisotropy) ενός εδαφικού υλικού είναι ένα χαρακτηριστικό έμφυτο που δεν εξαρτάται από τις μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων (Casagrande & Carillo, 1944). Αντιθέτως, σχετίζεται με τον τρόπο απόθεσης και την αρχική διάταξη των κόκκων, των κενών και τον προσανατολισμό τους. Στις μεγάλες ιζηματογενείς αποθέσεις οι κόκκοι, που κυρίως δεν είναι σφαιρικοί, συνήθως διατάσσονται με τον μεγάλο τους άξονα κάθετο στη διεύθυνση της απόθεσης με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία εγγενώς ανισότροπη δομή εδαφικού υλικού (inherently anisotropic fabric) (Oda, 1972a, 1972b). Σημειώνεται ότι κατά την απόθεση της άμμου υπό την επίδραση της βαρύτητας δημιουργούνται οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης (bedding planes) πάνω στα οποία προσανατολίζονται επιλεκτικά οι μεγάλοι άξονες των μη σφαιρικών κόκκων. Επομένως, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς τα οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου.

Ωστόσο, ακόμα και οι σφαιρικοί κόκκοι μπορούν να αναπτύξουν ανισότροπη δομή, ενώ οι κάθετες επί των επιπέδων που εφάπτονται στα σημεία επαφής των κόκκων προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση της απόθεσης (Oda, 1972b). Σε αντίστοιχα

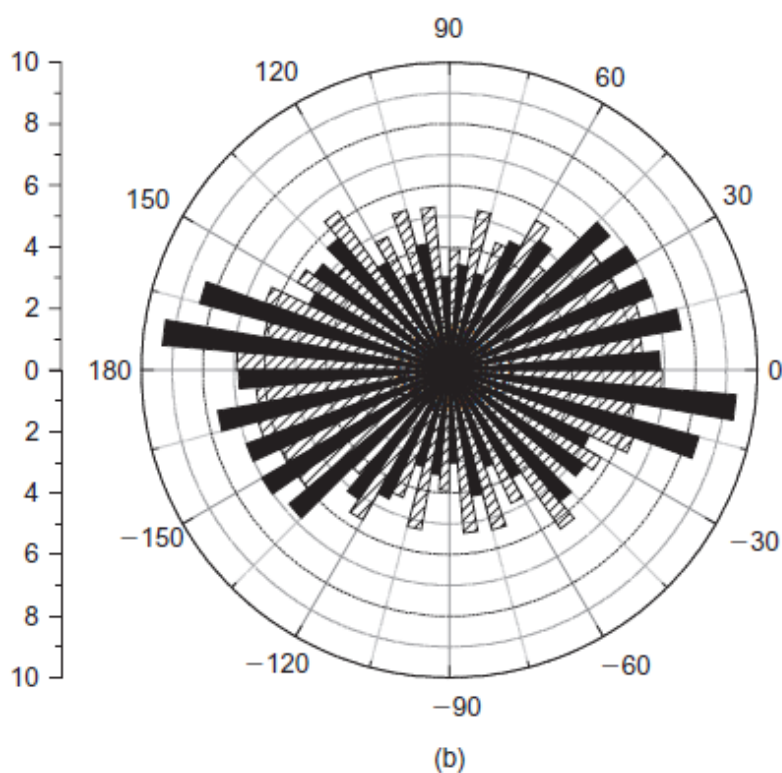
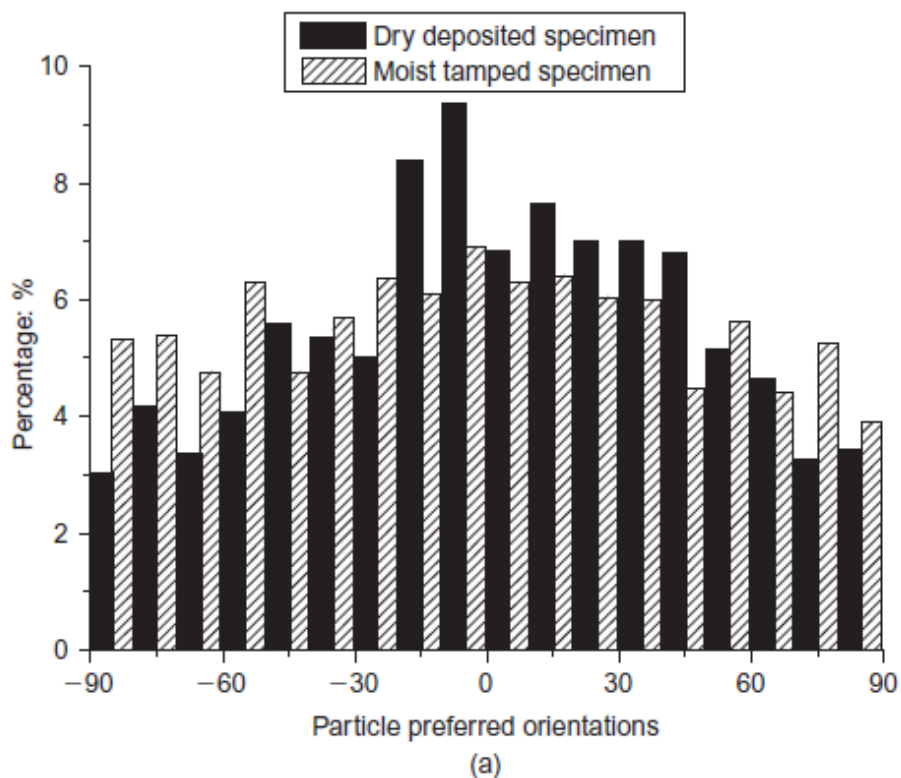
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

συμπεράσματα κατέληξε και ο Oda, (1981) εκτελώντας πειράματα σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) σε ομοιόμορφα-ανισότροπα και σε ομοιόμορφα-φαινομενικά ισότροπα δείγματα, επισημαίνοντας ότι παρατηρείται ανισότροπη συμπεριφορά σε όρους αντοχής ακόμη και σε δείγματα αποτελούμενα από ομοιόμορφες σφαίρες. Πιο πρόσφατα, οι Yang et al., (2016) εκτέλεσαν δοκιμές σφαιρικούς κόκκους από γυαλί (glass ballotini) διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου παρατηρώντας μικρότερη αντοχή για γωνία $\alpha=60^\circ$. Αξίζει να επισημανθεί ότι η ανισότροπη εσωτερική δομή παράγεται όχι μόνο εξαιτίας του επιλεκτικού προσανατολισμού των μεγάλων αξόνων των μη σφαιρικών κόκκων αλλά και εξαιτίας του επιλεκτικού προσανατολισμού των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής (contact normal vectors) των κόκκων (σφαιρικών ή μη) και των μεγάλων αξόνων των κενών μεταξύ των κόκκων (Oda & Iwashita, 1999). Επομένως, η ανισότροπη συμπεριφορά σε όρους τάσεων - παραμορφώσεων των σφαιρικών σωματιδίων οφείλεται κυρίως από στην ανισότροπη κατανομή των κάθετων διεπαφών που δημιουργούνται κατά την απόθεση.

Η ανισότροπη συμπεριφορά της άμμου που πηγάζει από την αρχική δομή της έχει παρατηρηθεί με τη βοήθεια διάφορων οπτικών-μη καταστροφικών μεθόδων. Οι Oda & Konishi, (1974a, 1974b) χρησιμοποίησαν τη «photo-elasticity» για να ποσοτικοποιήσουν τις διεπαφές και τον προσανατολισμό των κόκκων. Επιπλέον, με τη βοήθεια σαρωτικού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM, scanning electron microscope) οι Yang et al., (2008) μέτρησαν οπτικά την ανισότροπη δομή δοκιμίων με διαφορετικές μεθόδους παρασκευής. Παρατήρησαν ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης άμμου (dry deposition) εμφάνισαν πιο ανισότροπη μικροδομή σε σχέση με τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της συμπύκνωση υγρής άμμου σε διαδοχικές στρώσεις, (Moist Tamping). Στο **Σχήμα 2.2** αποτυπώνεται μέσω κατακόρυφων τομών στα δοκίμια, η προτιμώμενη διάταξη των κόκκων, που είναι εμφανέστατα στην οριζόντια διεύθυνση.

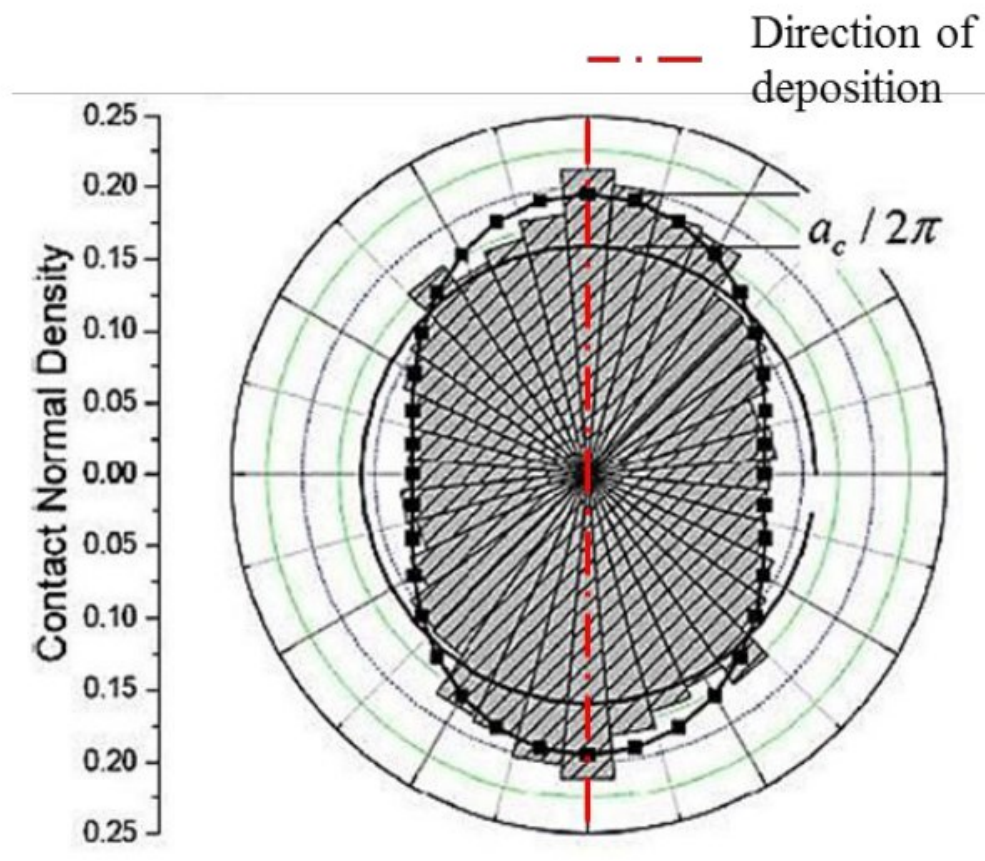
Τις τελευταίες δεκαετίες για τη μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς άμμων χρησιμοποιείται η Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (DEM), με την οποία μπορεί να προσομοιωθεί ένα κοκκώδες υλικό στην διακριτή του φύση. Οι Li και Yu, (2009) μέσω 2D DEM αναλύσεων προσομοίωσαν την ανισότροπη εσωτερική δομή που δημιουργείται στο εργαστήριο κατά τη μέθοδο παρασκευής δοκιμίων μέσω της ξηρής απόθεσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας επιβεβαιώνουν την ανισότροπη εσωτερική δομή που παράγεται κατά την απόθεση, με τον επιλεκτικό προσανατολισμό των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής (contact normal vectors) των κόκκων να ταυτίζεται με τη διεύθυνση της απόθεσης (direction of deposition) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.3**. Επιπρόσθετα, προσομοιώσεις φόρτισης κοκκωδών υλικών με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων (DEM) έχουν δείξει ότι η διατμητική αντοχή και η εξέλιξη των παραμορφώσεων επηρεάζονται από την αρχική ανισότροπη δομή τους, δηλαδή η απόκριση του εδάφους

σχετίζεται άμεσα με τη διεύθυνση της φόρτισης σε σχέση με τη διεύθυνση των επιπέδων διαστρωμάτωσης (X. Li & Yu, 2009; Mahmood & Iwashita, 2010; Seyedi Hosseininia, 2012)



Σχήμα 2.2: Απεικόνισή της εγγενούς ανισοτροπίας της δομής της άμμου Τογουρα με χρήση σαρωτικού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μετά από κατακόρυφες τομές σε δοκίμια που παρασκευάστηκαν με μέθοδο της ξηρής απόθεσης άμμου (dry

deposition) και με τη μέθοδο της συμπύκνωση υγρής άμμου σε διαδοχικές στρώσεις, (Moist Tamping) (Z. X. Yang et al., 2008)



Σχήμα 2.3: Προσανατολισμός των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής των κόκκων (X. Li & Yu, 2009)

2.1.3 Εξελισσόμενη Ανισοτροπία

Μετά την απόθεση της άμμου, οι κόκκοι μετακινούνται κατά τη φόρτιση για να σχηματίσουν μια πιο σταθερή δομή, αναπτύσσοντας την εξελισσόμενη ανισοτροπία (induced anisotropy). Ανεξάρτητα της αρχικής δομής, η εξελισσόμενη ανισοτροπία σχετίζεται αποκλειστικά με την ανακατανομή και την αλλαγή προσανατολισμού των κόκκων, των κενών και των διεπαφών κατά τη διάτμηση και την ανάπτυξη των πλαστικών παραμορφώσεων. Η εξελισσόμενη ανισοτροπία μπορεί να εμφανιστεί σε ένα αρχικά ισότροπο υλικό ή να επιφέρει αλλαγές στην αρχική ανισότροπη δομή.

Αρκετές μελέτες της βιβλιογραφίας, βασιζόμενες σε εργαστηριακές δοκιμές, αναφέρουν ότι δοκίμια με αρχικά ανισότροπη, αλλά και ισότροπη εσωτερική δομή, εμφανίζουν εξελισσόμενη ανισοτροπία προκαλούμενη από αλλαγές στις επιβαλλόμενες

τάσεις, κατά τη φόρτιση, την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση (Arthur & Menzies, 1972; Arthur et al., 1977; R. K. S. Wong & Arthur, 1985; R. C. K. Wong, 2003).

Οι Wong & Arthur, (1985) για να μελετήσουν την επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου Leighton Buzzard προσπάθησαν να εξαλείψουν την εγγενή ανισότροπη δομή κατά την παρασκευή των δοκιμών αποθέτοντας την άμμο κάθετα με το επίπεδο διάτμησης. Απέδειξαν πειραματικά ότι σε αυτό το αρχικά ισότροπο επίπεδο δεν υπήρχε εξάρτηση της απόκρισης από την κατεύθυνση φόρτισης. Ωστόσο, μετά την επιβολή διατμητικής φόρτισης, αποφόρτισης και επαναφόρτισης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες παρατηρήθηκε ότι η εξέλιξη των παραμορφώσεων επηρεαζόταν από τη διεύθυνση φόρτισης. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι, όταν η κατεύθυνση της επαναφόρτισης απομακρύνεται από την κατεύθυνση της προφόρτισης αυξάνεται η συστολικότητα και μειώνεται η δυσμησία των δοκιμών. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της φόρτισης σε αρχικά ισότροπα επίπεδα με αυτά της φόρτισης σε επίπεδα με εγγενή ανισοτροπία, οι ερευνητές αναφέρουν ότι η επίδραση της εξελισσόμενης ανισοτροπίας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή της εγγενούς ανισοτροπίας και γι' αυτό δεν πρέπει να αγνοείται.

2.1.4 Μη Συγγραμική Συμπεριφορά (non-coaxiality)

Η μη συγγραμικότητα /μη ομοαξονικότητα (non-coaxiality) είναι σημαντικός όρος στη μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς άμμων και αναφέρεται στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης. Η παραδοχή της συγγραμικότητας σε πολλά μοντέλα της γεωτεχνικής μηχανικής που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα, μπορεί να οδηγήσει σε επισφαλή σχεδιασμό και έρχεται σε αντίθεση με έρευνες της βιβλιογραφίας που μέσω εργαστηριακών δοκιμών έχουν αποδείξει τη μη-συγγραμική συμπεριφορά του εδάφους (Arthur et al., 1977; K. Miura, Toki, et al., 1986; Symes et al., 1988; Tong et al., 2010; L.-T. Yang et al., 2016). Το ελαστικό τμήμα της ολικής παραμόρφωσης θεωρείται αμελητέο σε σχέση με το πλαστικό τμήμα (Gutierrez et al., 1991) γι' αυτό και σε πολλές έρευνες για τον υπολογισμό της συγγραμικότητας χρησιμοποιείται η κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής ολικής (ελαστική και πλαστική) παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016; P. K. Triantafyllos et al., 2021)

Τα αποτελέσματα των δοκιμών απλής διάτμησης του Roscoe, (1970) αποτελούν ίσως την πρώτη απόδειξη μη συγγραμικής συμπεριφοράς των κοκκωδών εδαφών. Η μη συγγραμικότητα παρατηρείται κυρίως στο αρχικό στάδιο της φόρτισης, όπου η διατμητική παραμόρφωση είναι μικρή, ενώ στο τελικό στάδιο της διάτμησης, όπου η διατμητική παραμόρφωση είναι μεγάλη, η απόκριση του εδάφους είναι πλέον συγγραμική. Τα συμπεράσματα της έρευνας επιβεβαιώνονται από προσομοίωσης φόρτισης απευθείας διάτμησης χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Διακριτών Στοιχείων (DEM) (L. Zhang & Thornton, 2007).

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Οι Wong & Arthur, (1985) πραγματοποίησαν δοκιμές διάτμησης σε ένα αρχικά ισότροπο επίπεδο σε δύο στάδια φόρτισης (προφόρτιση – αποφόρτιση - επαναφόρτιση) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Παρατήρησαν ότι όταν η κατεύθυνση της επαναφόρτισης συμπίπτει ($\Delta\psi=0^\circ$) ή είναι κάθετη ($\Delta\psi=90^\circ$) στην κατεύθυνση της προφόρτισης η άμμος συμπεριφέρεται συγγραμικά, ενώ για ενδιάμεσες περιπτώσεις ($\Delta\psi=40^\circ$ και 70°) η μη συγγραμική συμπεριφορά είναι σημαντική. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός μη συγγραμικότητας μειώνεται με την αύξηση του λόγου τάσεων (σ'_1/σ'_3) και εξαλείφεται εντελώς κατά την αστοχία.

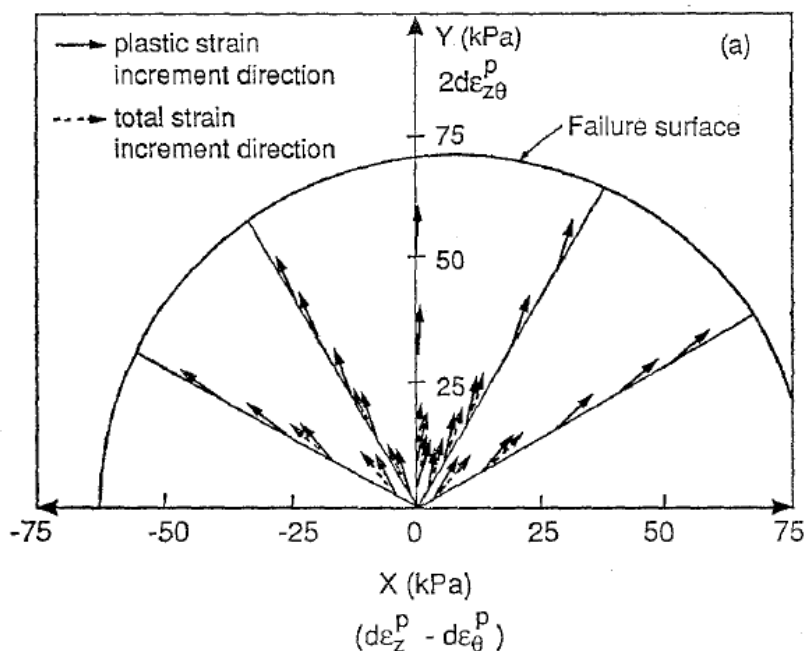
Η μη συγγραμική συμπεριφορά της άμμου έχει παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία και σε πειράματα στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (Hollow Cylinder Apparatus, HCA) (Symes et al., 1984; K. Miura, Toki, et al., 1986; Gutierrez et al., 1991; Cai et al., 2013; Yu et al., 2016; P. K. Triantafyllos et al., 2021).

Για τη διερεύνηση της μη συγγραμικής συμπεριφοράς της άμμου οι Gutierrez et al., (1991) εκτέλεσαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία, διατηρώντας παράλληλα σταθερή κύρια κατεύθυνση τάσεως (ακτινική φόρτιση), για διάφορες τιμές της γωνίας της μέγιστης κύριας τάσης με την κατακόρυφο ($\alpha=15, 30, 45, 60$ και 75°). Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.4**, όπου οι διαδρομές τάσεων και τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα της προσαυξητικής (incremental) πλαστικής και ολικής παραμόρφωσης για την κάθε τασική όδευση απεικονίζονται στο επίπεδο X-Y που εισήγαγαν οι (Ishihara & Towhata, 1983). Ο χώρος X-Y είναι κατάλληλος για τα πειράματα στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου, καθώς στον κάθετο άξονα σημειώνεται η τάση $Y=2\tau_{z\theta}$, που εκφράζει το στρεπτικό τμήμα της διάτμησης και στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η τάση $X=(\sigma'_{zz}-\sigma'_{\theta\theta})$, που εκφράζει τον όρο της αποκλίνουσας τάσης (q) που αντιστοιχεί σε τριαξονικές συνθήκες φόρτισης ενώ σε όρους παραμορφώσεων, ο κάθετος άξονας αντιστοιχεί σε $Y=2d\varepsilon_{z\theta}$ και ο οριζόντιος άξονας σε $X=(d\varepsilon_z-d\varepsilon_\theta)$. Η συμπεριφορά του εδάφους εμφανίζεται μη συγγραμική με τα μοναδιαία διανύσματα της προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης να αποκλίνουν από τις ακτινικές διαδρομές τάσεων κυρίως στην αρχή της φόρτισης, για χαμηλές διατρητικές τάσεις. Αντιθέτως, τα διανύσματα φαίνεται να συγκλίνουν στις ακτινικές διαδρομές πλησιάζοντας την επιφάνεια αστοχίας (failure surface). Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι το ελαστικό τμήμα αποτελεί πολύ μικρότερο ποσοστό της ολικής παραμόρφωσης σε σχέση με το πλαστικό τμήμα.

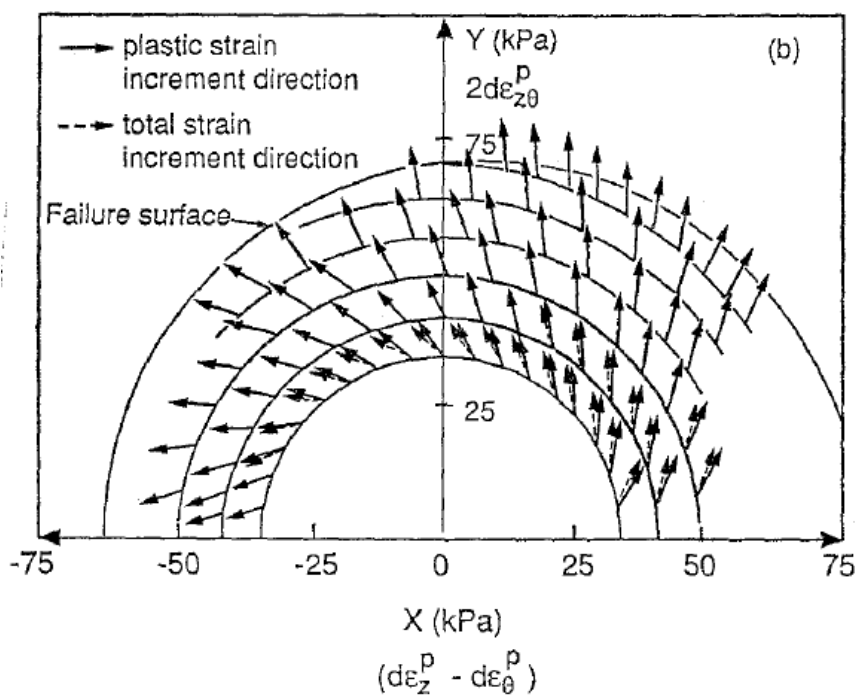
Στην ίδια έρευνα εκτελέστηκαν δοκιμές στροφής των κύριων αξόνων τάσεως (rotation of principal stress directions) υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης σε διάφορες τιμές της αποκλίνουσας τάσεις, q . Η διαδρομή τάσεων στο επίπεδο X-Y είναι κύκλος, με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα ίση με την αποκλίνουσα τάση $q=\sigma_1-\sigma_3$. Η γωνία της μέγιστης κύριας τάσης με την κατακόρυφο, α , αλλάζει συνεχώς ($\alpha=0-90^\circ$). Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.5**, όπου οι διαδρομές τάσεων και τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα της

προσαυξητικής (incremental) πλαστικής και ολικής παραμόρφωσης για την κάθε τασική όδευση (ημικύκλια) απεικονίζονται στο επίπεδο Χ-Υ. Η συμπεριφορά του εδάφους εμφανίζεται έντονα μη συγγραμική με τα μοναδιαία διανύσματα της προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης να αποκλίνουν από τις διαδρομές τάσεων. Συγκρίνοντας τη φόρτιση υπό σταθερή γωνία α (ακτινική, **Σχήμα 2.4**) και τη φόρτιση υπό συνεχή στροφή (**Σχήμα 2.5**) παρατηρούμε ότι η μη συγγραμική συμπεριφορά είναι πιο έντονη υπό τη στροφή των κύριων αξόνων τάσεως.

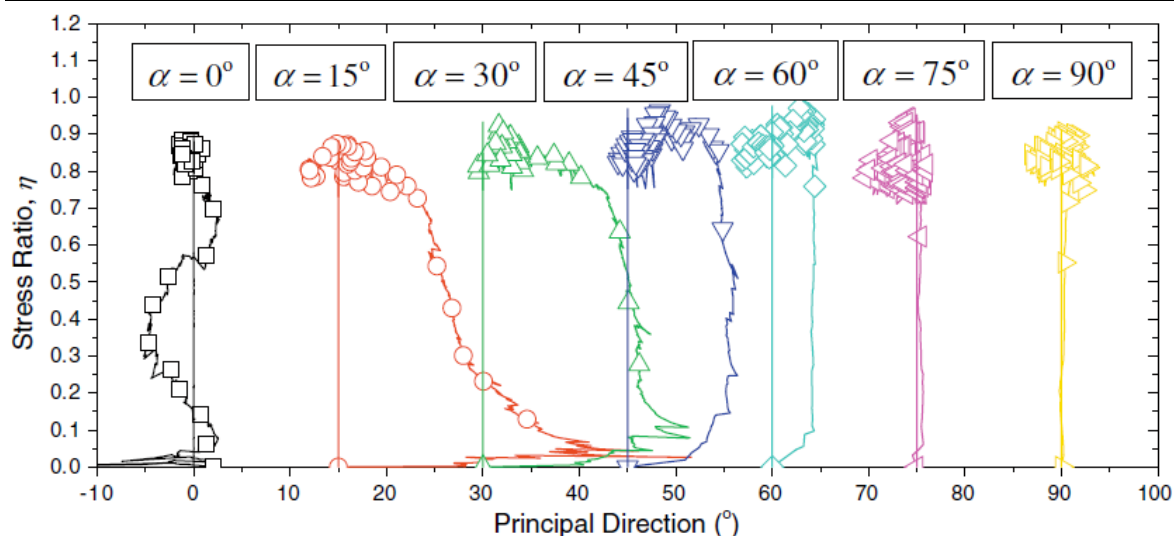
Πιο πρόσφατα, ορισμένοι ερευνητές μελέτησαν της μη συγγραμική συμπεριφοράς των κοκκωδών εδαφών χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Διακριτών Στοιχείων (DEM) (L. Zhang & Thornton, 2007; X. Li & Yu, 2009, 2015). Οι Li και Yu, (2009) εκτέλεσαν προσομοιώσεις μονοτονική φόρτισης με 2D DEM σε προφορτισμένα δοκίμια επιβάλλοντας παραμόρφωση υπό διάφορες γωνίες ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια προφορτίστηκαν στην κατακόρυφη διεύθυνση, αποφορτίστηκαν σε ισότροπη τάση και στη συνέχεια φορτίστηκαν σε διάφορες, κατευθύνσεις της επιβαλλόμενης κύριας παραμόρφωσης από την κατακόρυφη ($\alpha=90^\circ$) έως την οριζόντια ($\alpha=0^\circ$) κατεύθυνση. Οι τιμές των κατευθύνσεων προσαυξητικής τάσης (συνεχείς γραμμές) και παραμόρφωσης (κοίλα σύμβολα) σε σχέση με το λόγο τάσεων, η , παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.6** για τις διάφορες γωνίες α . Οι ερευνητές αναφέρουν ότι οι αποκλίσεις της προσαυξητικής παραμόρφωσης από τις τιμές της προσαυξητικής τάσης είναι πιο έντονες όταν η κατεύθυνση φόρτισης απομακρύνεται από την κατεύθυνση της προφόρτισης, εκτός από τη δοκιμή με γωνία α που αν και ο συμμετρικός άξονας του δοκιμίου συμπίπτει με τον άξονα της της κατεύθυνσης προφόρτισης, εμφανίζεται μη συγγραμικότητα. Επιπρόσθετα, σε όλες τις δοκιμές η μη συγγραμικότητα εξασθενεί σταδιακά με την αύξηση του λόγου τάσεων η και της παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας με χρήση DEM συμφωνούν με τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών της βιβλιογραφίας όπου επιβάλλεται επιβαλλόμενη σταθερή κατεύθυνση τάσης (Arthur & Menzies, 1972; R. K. S. Wong & Arthur, 1985; Symes et al., 1988)



Σχήμα 2.4: Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο $Y-X$ επίπεδο: Ακτινική φόρτιση (Gutierrez et al., 1991)



Σχήμα 2.5: Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο $Y - X$ επίπεδο: Στροφή των κύριων αξόνων τάσεων (Gutierrez et al., 1991)



Σχήμα 2.6: Αποτελέσματα μονοτονικής φόρτισης υπό διάφορες γωνίες επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε προφορτισμένα δοκίμια: Κατευθύνσεις προσαυξητικής τάσης και παραμόρφωσης σε σχέση με το λόγο τάσεων, η (X. Li & Yu, 2009)

2.2 Συσσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κόιλου Δοκιμίου (HCA)

2.2.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα αναφέρονται σε εντατικές καταστάσεις και συνθήκες φόρτισης οι οποίες είναι σύνθετες και περιλαμβάνουν αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κυρίων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) όσο και στη διεύθυνση τους. Συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη πραγματοποίησης πειραμάτων στο εργαστήριο που θα προσομοιώνουν όσο το δυνατόν καλύτερα πολύπλοκες διαδρομές τάσεων, ώστε να προκύψουν οι εδαφικές παράμετροι που απαιτούνται για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος.

Για να μπορέσει να μελετηθεί πειραματικά η ανισότροπη συμπεριφορά του εδάφους είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μία συσκευή που να μπορεί να ελέγξει όχι μόνο το μέγεθος, αλλά και την κατεύθυνση των τάσεων. Ιστορικά, έχουν αναπτυχθεί διάφορες πειραματικές συσκευές για μελέτη της ανισότροπης συμπεριφορά του εδάφους (τριαξονική συσκευή, τριαξονική συσκευή στρεπτικής διάτμησης, συσκευή απλής διάτμησης, συσκευή άμεσης διάτμησης, πραγματική τριαξονική συσκευή κ.α.), αλλά αδυνατούν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά τις γενικευμένες εντατικές καταστάσεις.

Η Τριαξονική Συσσκευή (Triaxial Cell) είναι μία από τις πλέον διαδεδομένες πειραματικές συσκευές διαθέτοντας ως κυριότερα πλεονεκτήματα την απλότητα στη χρήση και την επίτευξη μεγάλων παραμορφώσεων. Με κατάλληλους μετρητές επί του δοκιμίου η

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

τριαξονική συσκευή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση πολύ μικρών παραμορφώσεων (της τάξης του 0.0001%) και τη μελέτη των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της συσκευής είναι ότι η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 μπορεί να είναι είτε κατακόρυφη ($\alpha=0^\circ$, θλίψη) είτε οριζόντια ($\alpha=90^\circ$, εφελκυσμός), επομένως η γωνία α που εκφράζει την κατεύθυνση της κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο, δεν μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 0 και 90. Επιπρόσθετα, δεν μπορεί να μελετηθεί η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , καθώς είναι ίση είτε με την ελάχιστη κύρια τάση, ($\sigma_2=\sigma_3$) είτε με την μέγιστη κύρια τάση $\sigma_2=\sigma_1$ στη θλίψη και στον εφελκυσμό αντίστοιχα.

Η Πραγματική Τριαξονική Συσκευή (True Triaxial Apparatus) (Arthur & Menzies, 1972; Yamada & Ishihara, 1979; Rodriguez & Lade, 2013) χρησιμοποιεί πρισματικά δοκίμια που υπόκεινται σε τρεις ανεξάρτητες κύριες τάσεις είτε μέσω άκαμπτων επίπεδων πλακών είτε μέσω εύκαμπτων μεμβρανών είτε μέσω συνδυασμού και των δύο. Η συσκευή και η λειτουργία της είναι πολύπλοκες, μερικές υλοποιήσεις της συσκευής επιτρέπουν την πραγματοποίηση πειραμάτων που ακολουθούν ένα περιορισμένο σύνολο διαδρομών τάσεων, ενώ η εγκατάσταση οργάνων για την μέτρηση της πίεσης της κυψέλης και της πίεσης του νερού των πόρων δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την μελέτη της επιρροής της ενδιάμεσης κύριας τάσης, αλλά η περιστροφή των κυρίων τάσεων δεν είναι δυνατή, με τις κύριες τάσεις να δρουν είτε κατακόρυφα είτε οριζόντια.

Η Συσκευή απλής διάτμησής (Simple Shear device, SS) έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία γιατί επιτρέπει την συνεχή στροφή των κυρίων αξόνων τάσεως υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Μειονεκτήματα της συσκευής είναι η αδυναμία υπολογισμού και ελέγχου των παραμέτρων α και b , η επιβολή μη πραγματικών συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης και η μεγάλη ανομοιομορφία των τάσεων που καθιστά την εκτέλεση των πειραμάτων σε άμμους δυσχερή.

Η Συσκευή άμεσης διάτμησης (Directional Shear Cell, DSC) αναπτύχθηκε για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της συσκευής απλής διάτμησης (Arthur et al., 1977; R. K. S. Wong & Arthur, 1985). Στη συσκευή άμεσης διάτμησης το δοκίμιο είναι περίπου κυβικό και βρίσκεται περιορισμένο μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Οι ορθές τάσεις επιβάλλονται στο δοκίμιο μέσω ελαστικών μεμβρανών. Μεταβάλλοντας τις ορθές και τις διατμητικές τάσεις ανεξάρτητα, επιτυγχάνεται η συνεχής αλλαγή στη διεύθυνση των κυρίων τάσεων (γωνία α). Συνεπώς, η συσκευή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη διερεύνηση της ανισότροπης συμπεριφοράς εδαφών, αφού ελέγχεται το μέγεθος και η γωνία κλίσης των κυρίων τάσεων. Ωστόσο, η αντοχή των μεμβρανών περιορίζει το εύρος των επιβαλλόμενων τάσεων με συνέπεια την ανάπτυξη έντονης διαστολικότητας και μεγάλης γωνία τριβής σε αυτό το εύρος. Επιπρόσθετα, η ακριβής μέτρηση των παραμορφώσεων δυσχεραίνεται από τα εύκαμπτα όρια της συσκευής.

Γενικά, στις συσκευές απλής και άμεσης διάτμησης και στην πραγματική τριαξονική συσκευή δεν πραγματοποιείται έλεγχος των συνθηκών στράγγισης και η μέτρηση της

πίεσης του υγρού των πόρων είναι δύσκολη έως αδύνατη. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται υπό συνθήκες ξηρές ή με ελεύθερη στράγγιση, ενώ οι ερευνητές προκειμένου να προσομοιώσουν τις συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης καταφεύγουν στη ραγδαία επιβολή φορτίου ή στην παραδοχή σταθερού όγκου.

Η πιο κατάλληλη συσκευή για τη μελέτη της εδαφικής ανισοτροπίας είναι η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (Hollow Cylinder Apparatus, HCA), διότι μπορεί να επιβάλει γενικευμένες εντατικές καταστάσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες εργαστηριακές συσκευές και συνεπώς επιτυγχάνει καλύτερη κατανόηση και κατ' επέκταση δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών στη φύση. Επιπρόσθετα, προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 , και των συνθηκών στράγγισης. Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται αναλυτικά η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας και τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού της συσκευής, αναφέρονται οι υποθέσεις που γίνονται όσον αφορά την κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων σε κούλο δοκίμιο και πραγματοποιείται ειδική αναφορά σε θέματα όπως η επίδραση της γεωμετρίας και των ελαστικών μεμβρανών που περιβάλλουν το δοκίμιο.

2.2.2 Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus, HC) επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο των τριών κύριων τάσεων και της κατεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης. Κατά συνέπεια, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της γωνίας α (κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σε σχέση με την κατακόρυφο) και του μεγέθους της παραμέτρου της ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$. Επιπρόσθετα, είναι εφικτός ο έλεγχος ή η μέτρηση της πίεσης πόρων και η επιβολή αντιπίεσης (back pressure) ώστε να εκτελούνται πειράματα υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης. Η δυνατότητα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης να επιβάλλει γενικευμένες και σύνθετες συνθήκες φόρτισης, την καθιστά την πλέον κατάλληλη για την μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς εδαφών και την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς τους στη φύση. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση ενός πλαισίου συμπεριφοράς κοκκωδών υλικών για χρήση στις αναλυτικές μελέτες με βάση το οποίο θα είναι δυνατή η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών των αποθέσεων στη φύση.

Οι Hight et al., (1983), παρουσίασαν τον τρόπο και τις αρχές λειτουργίας της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus, HC). Τέσσερις όροι του τανυστή των τάσεων, η σ_z κατακόρυφη τάση, σ_r ακτινική τάση, σ_θ εφαπτομενική τάση και $\tau_{z\theta}$ διατμητική τάση, προσδιορίζονται με τον έλεγχο του αξονικού F και του στρεπτικού φορτίου, T, της εσωτερικής πίεσης p_i και της εξωτερικής πίεσης p_o . Τα δοκίμια είναι κούλα,

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

κυλινδρικής μορφής για τα οποία ισχύει ότι το ύψος τους είναι μεγαλύτερο από την εξωτερική τους διάμετρο. Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 2 ώστε να μην επηρεάζεται η κατανομή των τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου από τα άκαμπτα άκρα του. Ακόμη, το πάχος του τοιχώματος του δοκιμίου πρέπει να είναι μικρότερο από την εσωτερική του διάμετρο. Στο **Σχήμα 2.7** παρουσιάζονται οι συνθήκες φόρτισης που επικρατούν στο δοκίμιο και οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα αντιπροσωπευτικό εδαφικό στοιχείο.

Η κατανομή των τάσεων κατά μήκος των τοιχωμάτων του κοίλου κυλινδρικού στοιχείου δεν είναι ομοιόμορφη, ειδικά όταν οι εσωτερική και η εξωτερική πίεση διαφέρουν, (Hight et al., 1983; Saada et al., 1983) επομένως, είναι απαραίτητο να υπολογίζονται οι μέσες τιμές των τάσεων σ_z , σ_θ , σ_r και $\tau_{z\theta}$ σύμφωνα με τις εξισώσεις (2-1),(2-2),(2-3),(2-4), (Hight et al., 1983)

Μέση αξονική κατακόρυφη τάση:

$$\overline{\sigma_z} = \frac{F}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2-1)$$

Μέση ακτινική τάση:

$$\overline{\sigma_r} = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (2-2)$$

Μέση εφαπτομενική τάση:

$$\overline{\sigma_\theta} = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \quad (2-3)$$

Μέση διατμητική τάση:

$$\overline{\tau_{z\theta}} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (2-4)$$

Όπου: r_o και r_i η είναι η εξωτερική (outer) και η εσωτερική (inner) ακτίνα του κοίλου δοκιμίου αντίστοιχα.

Επισημαίνεται ότι η εξίσωση (2-4) προέκυψε με παραδοχή πλαστικής κατανομής διατμητικών τάσεων. Άλλωστε οι διαφορές μεταξύ ελαστικής και πλαστικής κατανομής

δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές, ενώ αυξανόμενης της διατμητικής παραμόρφωσης η συμπεριφορά του υλικού μεταβάλλεται γρήγορα από γραμμική σε έντονα μη-γραμμική. Στη συνέχεια της διατριβής για λόγους συντομίας θα παραλείπεται ο όρος της «μέσης» τάσης και ο αντίστοιχος συμβολισμός (βλέπε: σ_z , σ_r , σ_θ , και $\tau_{z\theta}$).

Στην περίπτωση που η εξωτερική πίεση ισούται με την εσωτερική, $p_o = p_i$, τότε προκύπτουν οι απλοποιημένες εξισώσεις (2-5), (2-6).

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + p_o \quad (2-5)$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta = p_o = p_i \quad (2-6)$$

Η εσωτερική πίεση p_i και η εξωτερική πίεση p_o ασκούνται στο κοίλο δοκίμιο μέσω εύκαμπτων μεμβρανών με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις σε ακτινικά ή περιμετρικά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό η ακτινική τάση σ_r είναι κύρια τάση, ενώ οι τάσεις σ_z και σ_θ είναι κύριες μόνο όταν η διατμητική τάση $\tau_{z\theta}$ είναι μηδενική. Η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση εξαρτώνται από το μέγεθος του αξονικού και στρεπτικού φορτίου και από την εσωτερική και εξωτερική πίεση όπως φαίνεται στις εξισώσεις υπολογισμού των μεγεθών (2-7), (2-8) και (2-9).

Μέγιστη κύρια τάση:

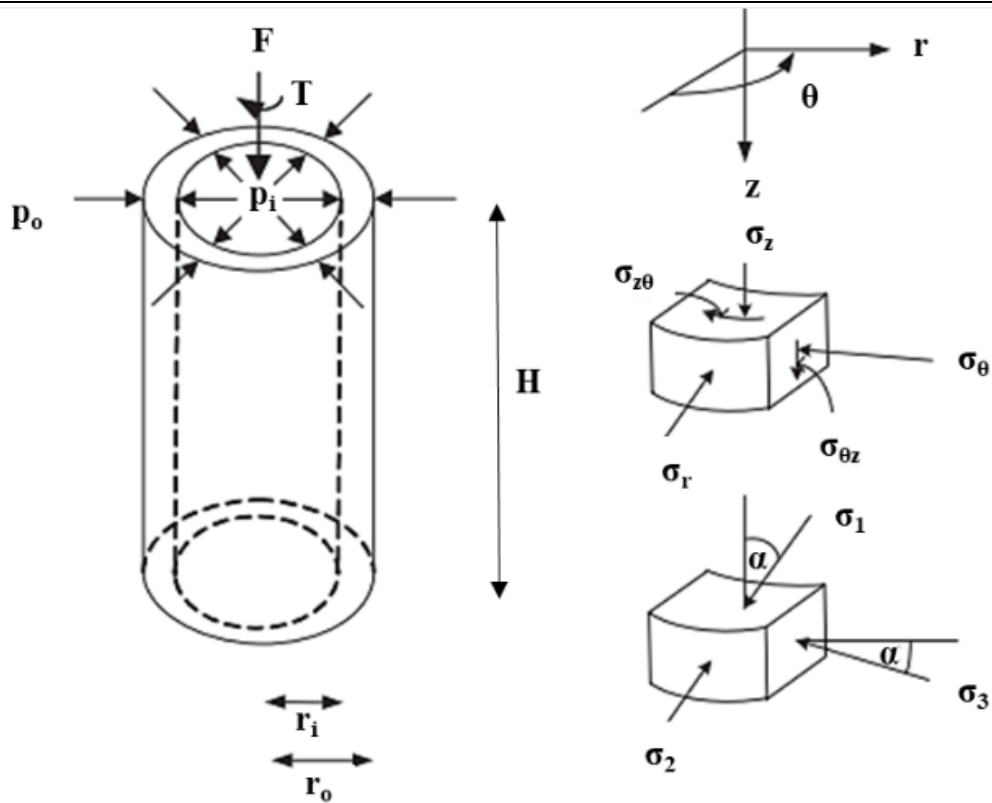
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (2-7)$$

Ενδιάμεση κύρια τάση:

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (2-8)$$

Ελάχιστη κύρια τάση:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (2-9)$$



Σχήμα 2.7: Συνθήκες φόρτισης κοίλου δοκιμίου και επιβαλλόμενες τάσεις σε κοίλο εδαφικό στοιχείο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

Εναλλακτικά, η εντατική κατάσταση των δοκιμίων στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης μπορεί να εκφραστεί από τις παραμέτρους αποκλίνουσας τάσης, q , μέσης τάσης, p , κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο, γωνία α , που λαμβάνει τιμές από 0° έως 90° και την τιμή της παραμέτρου της ενδιάμεσης κύριας τάσης, b που λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Οι παράμετροι υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2-10), (2-11), (2-12) και (2-13).

Αποκλίνουσα τάση:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\}}$$

(2-10)

Μέση τάση:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

(2-11)

Κλίση της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο, γωνία α :

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \right) \quad (2-12)$$

Παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης:

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2-13)$$

Οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε ένα κοίλο εδαφικό στοιχείο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης είναι η μέση αξονική παραμόρφωση, $\overline{\varepsilon_z}$, η μέση ακτινική παραμόρφωση, $\overline{\varepsilon_r}$, η μέση εφαπτομενική παραμόρφωση, $\overline{\varepsilon_\theta}$ και η μέση διατμητική παραμόρφωση, $\overline{\gamma_{z\theta}}$.

Οι συνιστώσες της παραμόρφωσης που αναπτύσσονται παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.8** και σε τομή στο **Σχήμα 2.9**, ενώ υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2-14), (2-15), (2-16) και (2-17). Για λόγους απλούστευσης οι μέσες παραμορφώσεις αναφέρονται στη συνέχεια ως παραμορφώσεις (βλέπε: ε_z , ε_r , ε_θ , και $\gamma_{z\theta}$).

Αξονική, κατακόρυφη παραμόρφωση:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta h}{H_0} \quad (2-14)$$

Ακτινική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_r = \frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} \quad (2-15)$$

Εφαπτομενική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_o + u_i}{r_o + r_i} \quad (2-16)$$

Διατμητική παραμόρφωση:

$$\gamma_{\theta z} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H_0(r_o^2 - r_i^2)} \quad (2-17)$$

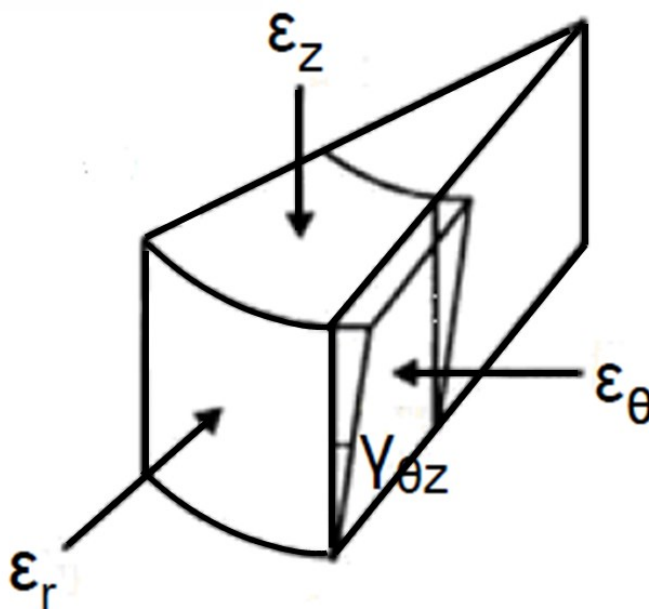
Όπου: Δh είναι η κατακόρυφη μετακίνηση σε σχέση με το αρχικό ύψος του δοκιμίου, H₀.

θ είναι η περιμετρική γωνιακή μετακίνηση (μετρούμενη σε ακτίνια),

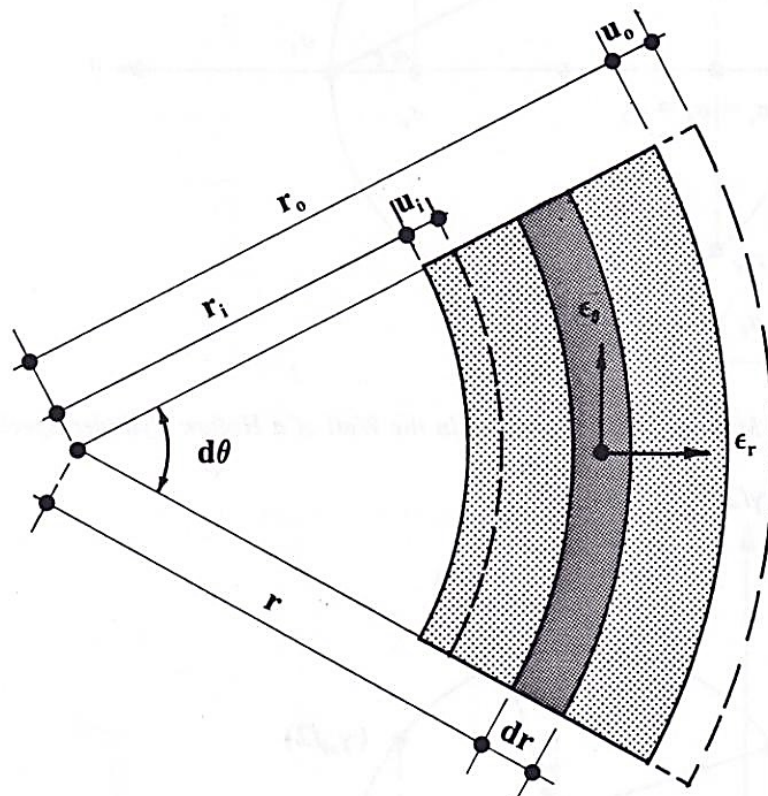
u_o, και u_i είναι οι ακτινικές παραμορφώσεις της εξωτερικής (r_o) και της εσωτερικής (r_i) ακτίνας του δοκιμίου αντίστοιχα (Σχήμα 2.9).

Η ογκομετρική παραμόρφωση, ε_v, του δοκιμίου υπολογίζεται από την εξίσωση (2-18).

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta \quad (2-18)$$



Σχήμα 2.8: Παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε κοίλο εδαφικό στοιχείο στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης



Σχήμα 2.9: Παραμορφώσεις σε οριζόντια τομή κοίλου δοκιμίου

Στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου η μέση ακτινική παραμόρφωση, ϵ_r , είναι ίση με την ενδιάμεση κύρια παραμόρφωση, ϵ_2 (2-20). Οι μέγιστη και η ελάχιστη κύρια παραμόρφωση εξαρτώνται από τις μέσες τιμές των ϵ_z , ϵ_θ και $\gamma_{\theta z}$ και υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2-19) και (2-21).

Μέγιστη κύρια παραμόρφωση:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \quad (2-19)$$

Ενδιάμεση κύρια παραμόρφωση:

$$\epsilon_2 = \epsilon_r \quad (2-20)$$

Ελάχιστη κύρια παραμόρφωση:

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \quad (2-21)$$

Έχοντας υπολογίσει τις κύριες παραμορφώσεις του δοκιμίου μπορεί να υπολογιστεί η γενικευμένη διατμητική παραμόρφωση, γ_{oct} , και η γενικευμένη αποκλίνουσα διατμητική παραμόρφωση, ε_q , σύμφωνα με τις εξισώσεις (2-22) και (2-23) αντίστοιχα.

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3} * \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2-22)$$

$$\varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2-23)$$

Η γωνία της προσαυξητικής κύριας παραμόρφωσης, $\alpha_{d\varepsilon}$ υπολογίζεται από τις συνιστώσες των προσαυξητικών παραμορφώσεων σύμφωνα με τη την εξίσωση (2-24).

$$\alpha_{d\varepsilon} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{d\gamma_{z\theta}}{d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta} \right) \quad (2-24)$$

Η γωνία μη ομοαξονικότητας (non-coaxiality angle), β , η οποία υποδεικνύει την απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμορφώσεως από την κύρια κατεύθυνση τάσεως προσδιορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2-25). Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις για τον προσδιορισμό του β .

$$\beta = \alpha_{d\varepsilon} - \alpha \quad (2-25)$$

2.2.3 Ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης θεωρείται η πλέον κατάλληλη για τη μελέτη της εδαφικής ανισοτροπίας, διότι μπορεί να επιβάλει γενικευμένες εντατικές καταστάσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες εργαστηριακές συσκευές και συνεπώς επιτυγχάνει καλύτερη κατανόηση και κατ' επέκταση δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών στη φύση. Γενικευμένες εντατικές φορτίσεις υπό διαφορετικές διευθύνσεις των κυρίων τάσεων αλλά και υπό συνεχή στροφή των κυρίων τάσεων με σταθερό ή μεταβαλλόμενο μέγεθος θα χρησιμοποιηθούν για να διερευνηθεί η ανισότροπη συμπεριφορά άμμων και να προσδιοριστούν οι καταστατικές σχέσεις που την περιγράφουν. Ωστόσο, όπως και άλλες συσκευές διάτμησης, έχει επικριθεί για την ανάπτυξη ανομοιόμορφης κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια (Saada et al., 1983; Vaid et al., 1990).

Όταν ένα δοκίμιο υποβάλλεται σε στρέψη παρατηρούνται αποκλίσεις στις τιμές των μεγεθών $\tau_{\theta z}$ και $\gamma_{\theta z}$ εγκάρσια των τοιχωμάτων του κυλίνδρου. Οι ανομοιομορφίες είναι αποτέλεσμα της γεωμετρίας του δοκιμίου, των άκαμπτων πορωδών δίσκων στα άκρα του δοκιμίου της επιβαλλόμενης στρεπτικής ροπής, T , και της διαφοράς μεταξύ της εξωτερικής, r_o , και της εσωτερικής, r_i , πίεσης.

Η στην ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, γραμμικώς και μη γραμμικώς ελαστικών μοντέλων (Hight et al., 1983; Saada et al., 1983; Vaid et al., 1990; Sayao & Vaid, 1991; Wijewickreme & Vaid, 1991, 2008). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι όσο η επιφάνεια του δοκιμίου μειώνεται, δηλαδή όσο η εσωτερική ακτίνα, r_i , αυξάνεται η κατανομή των τάσεων γίνεται πιο ομοιόμορφη. Επομένως, οι εξισώσεις που προτείνονται όσον αφορά στο μέγεθος της εσωτερικής ακτίνας, r_i είναι οι (2-26) και (2-27).

Πάχος του τοιχώματος:

$$r_o - r_i = 20 - 60 \text{ mm} \quad (\text{Sayao \& Vaid, 1991}) \quad (2-26)$$

Εσωτερική ακτίνα δοκιμίου:

$$\frac{r_i}{r_o} \geq 0.65 \quad (\text{Saada et al., 1983}) \quad (2-27)$$

$$0.65 \leq \frac{r_i}{r_o} \leq 0.82 \quad (\text{Sayao \& Vaid, 1991}) \quad (2-28)$$

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Επιπρόσθετα επισημαίνεται στη βιβλιογραφία, ότι τα άκρα του δοκιμίου δε λιπαίνονται για να αναπτυχθεί η απαραίτητη τριβής μεταξύ αυτών και του δοκιμίου ώστε να μεταδοθεί η στρέψη στο εσωτερικό του. Ωστόσο, με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ζώνες ανομοιομορφίας στο δοκίμιο που επηρεάζουν τις μετρήσεις των διατμητικών τάσεων. Οι Saada et al., (1983) μελέτησαν διεξοδικά το φαινόμενο και από τις αναλύσεις τους προέκυψε ότι το δοκίμιο πρέπει να έχει ένα ορισμένο ύψος H , ώστε να δημιουργείται μία επαρκής ζώνη απαλλαγμένη από την επίδραση των ανομοιομορφιών λόγω άκαμπτων άκρων προτείνοντας την εξίσωση (2-29). Αντίστοιχα, οι Sayao και Vaid, (1991) κατέληξαν ότι τα δοκίμια πρέπει να έχουν ένα ορισμένο ύψος ανάλογο με την εξωτερική ακτίνα r_o , σύμφωνα με την εξίσωση (2-30).

Ύψος δοκιμίου:

$$H \geq 5.44\sqrt{r_o^2 - r_i^2} \quad (\text{Saada et al., 1983})$$

(2-29)

$$1.8 \leq \frac{H}{2*r_o} \leq 2.2 \quad (\text{Sayao \& Vaid, 1991})$$

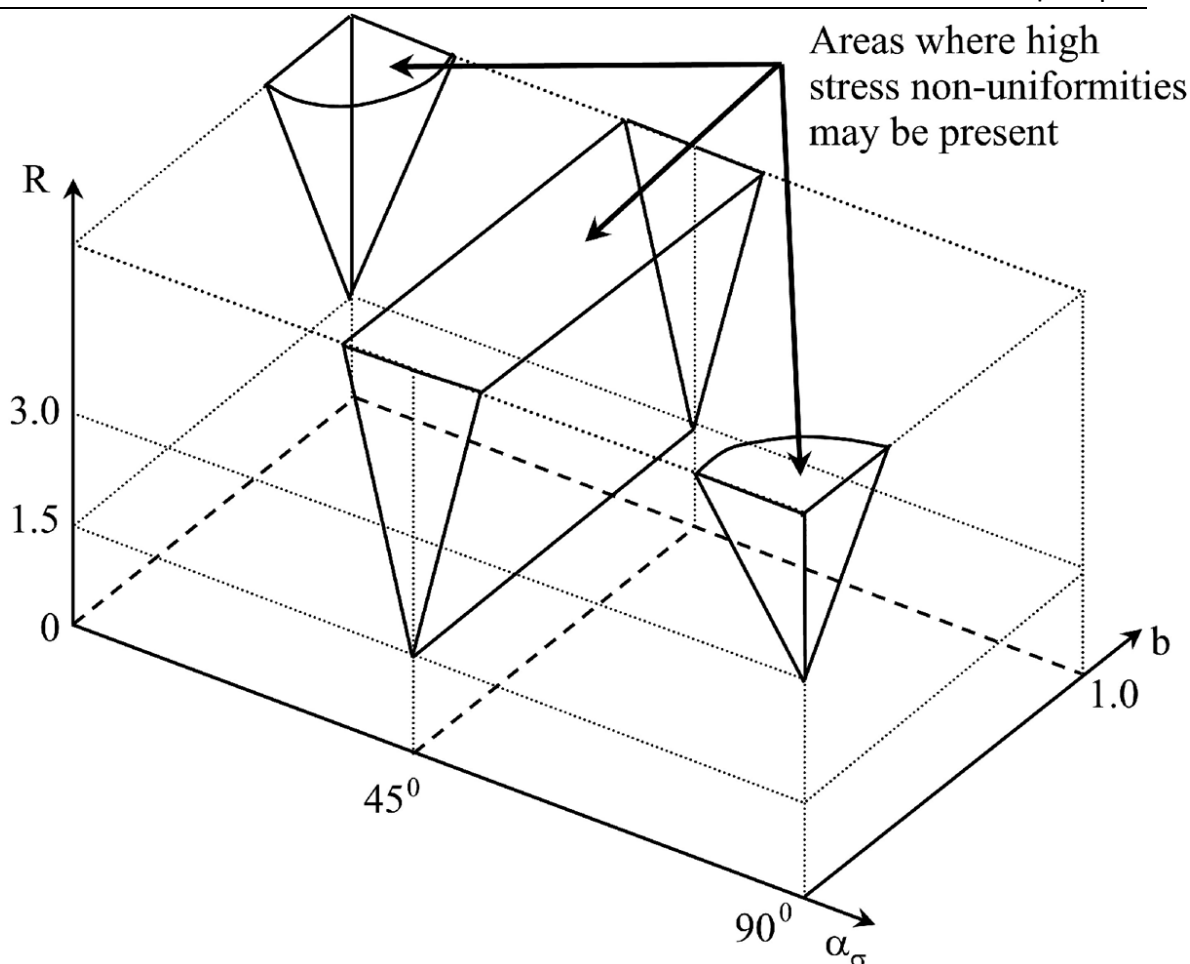
(2-30)

Εκτός από τη επιρροή της γεωμετρίας του δοκιμίου, η ανομοιομορφή κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων στα κοίλα κυλινδρικά δοκίμια ενισχύεται από τη διαφορά μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής επιβαλλόμενης πίεσης του δοκιμίου. Τα ανεκτά όρια του λόγος των πιέσεων σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αναφέρονται στην εξίσωση (2-31). Οι Naughton και O'Kelly, (2007) παρουσίασαν τους συνδυασμούς φόρτισης (γωνία α , παράμετρος b και λόγος τάσεων $R=\sigma_1/\sigma_3$) που οδηγούν σε συνθήκες έντονης ανάπτυξης ανομοιομορφίας (**Σχήμα 2.10**)

Αναλογία εξωτερικής, εσωτερικής πίεσης:

$$0.9 \leq \frac{p_o}{p_i} \leq 1.2 \quad (\text{Hight et al., 1983; Naughton \& O'Kelly, 2007})$$

(2-31)



Σχήμα 2.10: Συνδυασμοί φόρτισης που οδηγούν σε μη αποδεκτή ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων (Naughton & O’Kelly, 2007)

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή οι διαστάσεις των δοκιμών που εξετάστηκαν ήταν $d_i = 40 \text{ mm}$, $d_o = 70 \text{ mm}$ και $H = 140 \text{ mm}$ ($r_i / r_o = 0.57$) οπότε δεν ικανοποιούνται πλήρως οι περιορισμοί της βιβλιογραφίας. Ωστόσο οι αποκλίσεις από τα προτεινόμενα όρια είναι μικρές επομένως οι διαστάσεις κρίνονται αποδεκτές. Επιπρόσθετα, στα πειράματα της διατριβής ο επιβαλλόμενος λόγος πιέσεων p_i/p_o κυμαίνεται από 0.8 έως 1.30.

2.2.4 Επίδραση της διείδυσης της περιβάλλουσας μεμβράνης στις μετρήσεις τάσεων και παραμορφώσεων

Παρόλα τα πλεονεκτήματα της χρήσης κοίλων δοκιμών για την πραγματοποίηση πειραμάτων, υπάρχουν και ορισμένες δυσκολίες και μειονεκτήματα στη χρήση τους. Αυτά εστιάζονται στην παρασκευή των δοκιμών και κυρίως στις δοκιμές που απαιτούν αδιατάρακτα δοκίμια συνεκτικών εδαφών (όπου και ακολουθούνται ειδικές μέθοδοι παρασκευής), αλλά και στο φαινόμενο της διείδυσης της περιβάλλουσας μεμβράνης στα κενά των πόρων του δοκιμίου στην περίπτωση κοκκωδών υλικών. Ειδικά για την περίπτωση κοίλου δοκιμίου η επίδραση της μεμβράνης είναι σημαντική διότι η αναλογία της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με τη μεμβράνη ως προς το συνολικό όγκο του

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

δοκιμίου είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αναλογία σε ένα συμπαγές κυλινδρικό δοκίμιο.

Η διείσδυση της περιβάλλουσας μεμβράνης (membrane penetration) στα κενά των του δοκιμίου κοκκώδους εδάφους οφείλεται στην μικρής καμπτικής αντοχής της μεμβράνης και στη διαφορά της εξωτερικής πίεσης με την πίεση του υγρού των πόρων όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.11**. Η διείσδυση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στις μετρήσεις. Η αλλαγή της μορφής της μεμβράνης λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης προκαλώντας σφάλματα στην μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων (**Σχήμα 2.11(β)**) ανάλογα με το μέγεθος της ακτινικής τάσης. Αν η τάση μειωθεί (τάση για συστολή του δοκιμίου) η μεμβράνη απομακρύνεται από τα κενά οδηγώντας σε υποεκτίμηση της πίεσης του νερού των πόρων και υπερεκτίμηση της αντοχής, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν το δοκίμιο παρουσιάζει τάση για διαστολή. Αντίστοιχα, η διείσδυση της μεμβράνης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, (**Σχήμα 2.11(γ)**) επηρεάζει τις μετρήσεις στην αλλαγή του όγκου του δοκιμίου.

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση του κοίλου δοκιμίου οι ελαστικές μεμβράνες παραλαμβάνουν μέρος του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και της στρεπτικής ροπής, ενώ επηρεάζουν το μέγεθος των οριζόντιων ορθών τάσεων. Επίσης, εμποδίζουν την ελεύθερη κατακόρυφη μετακίνηση των κόκκων του υλικού στα σημεία επαφής τους με τις μεμβράνες και στην περίπτωση που το δοκίμιο διογκώνεται παρουσιάζονται ανομοιομορφίες στην αλλαγή της μέσης ενεργού τάσης.

Η επιρροή της διείσδυσης της μεμβράνης στις μετρήσεις τάσεων-παραμορφώσεων έχει αναγνωριστεί στη βιβλιογραφία μέσω πειραματικών και θεωρητικών μελετών και εντοπίζονται μέθοδοι με τις οποίες θα μπορούσαν να ελαχιστοποιηθούν ή να εξαλειφθούν τέτοια φαινόμενα (Newland & Allely, 1957, 1959; Molenkamp & Luger, 1981; Tatsuoka et al., 1986; Kramer et al., 1990; Ōhara & Yamamoto, 1991; Sivathayalan & Vaid, 1998; Naughton & O'Kelly, 2007). Σύμφωνα με τους ερευνητές το μέγεθος του κόκκου είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά το φαινόμενο της διείσδυσης, καθιστώντας τη διόρθωση των μετρήσεων απαραίτητη σε κοκκώδη εδάφη με μέση διάμετρο $D_{50} > 0.1$ mm. Επιπλέον, το φαινόμενο της διείσδυσης της μεμβράνης εξαρτάται σημαντικά από την τιμή της πλευρικής πίεσης, σ_3 , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.12**, όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες διείσδυσης σε σχέση με την πλευρική πίεση για τρία μεγέθη κόκκων. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες είναι κοίλες με το βαθμό διείσδυσης να αυξάνει έντονα για πλευρικές τάσεις $\sigma_3 < 100$ kPa και ότι με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων οι καμπύλες να μετατοπίζονται προς τα πάνω.

Επειδή η επιρροή της μεμβράνης είναι δύσκολο να εξαλειφθεί, συνήθως υιοθετούνται σχέσεις διόρθωσης των τάσεων και των παραμορφώσεων. Οι Sivathayalan & Vaid, (1998) εκτίμησαν το βαθμό διείσδυσης της μεμβράνης, ε_m (mm) σε ένα κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο υπό υδροστατική φόρτιση καταλήγωντας στην εξίσωση (2-32).

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta V - \Delta V_i * (\chi^2 - 1)}{\chi * (A_{m,i} - A_{m,o})} \quad (2-32)$$

Όπου: ΔV και ΔV_i είναι οι μετρούμενες μεταβολές όγκου του δοκιμίου και της εσωτερικής κυψέλης αντίστοιχα,

$A_{m,o}$ και $A_{m,i}$ είναι οι επιφάνειες της εξωτερικής και της εσωτερικής μεμβράνης που καλύπτουν το δοκίμιο αντίστοιχα και

χ είναι ο λόγος της εξωτερικής (r_o) προς την εσωτερική (r_i) ακτίνα του δοκιμίου.

Οι Tatsuoka et al., (1986) θεώρησαν ότι οι μεμβράνες διατηρούν το σχήμα ενός λεπτότοιχου κυλινδρικού κελύφους κατά τη διάρκεια της στρεπτικής διάτμησης, πρότειναν σχέσεις διόρθωσης των τάσεων σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικότητας και δείκτη Poisson, $\nu=0.5$. Η διόρθωση της αξονικής $\Delta\sigma_\alpha$, της εφαπτομενικής, $\Delta\sigma_\theta$ της ακτινικής $\Delta\sigma_r$ και της διατμητικής $\Delta\tau_{z\theta}$ τάσης παρουσιάζονται στις εξισώσεις (2-33), (2-34), (2-35) και (2-36) αντίστοιχα.

$$\Delta\sigma_\alpha = -\frac{4}{3} * \frac{E_m * t_m}{r_o^2 - r_i^2} [r_o(2\varepsilon_{z,o} + \varepsilon_{\theta,o}) + r_i(2\varepsilon_{z,i} + \varepsilon_{\theta,i})] \quad (2-33)$$

$$\Delta\sigma_\theta = -\frac{2}{3} * \frac{E_m * t_m}{r_o - r_i} [(\varepsilon_{z,o} + 2\varepsilon_{\theta,o}) + (\varepsilon_{z,i} + 2\varepsilon_{\theta,i})] \quad (2-34)$$

$$\Delta\sigma_r = -\frac{2}{3} * \frac{E_m * t_m}{r_o + r_i} [(\varepsilon_{z,o} + 2\varepsilon_{\theta,o}) - (\varepsilon_{z,i} + 2\varepsilon_{\theta,i})] \quad (2-35)$$

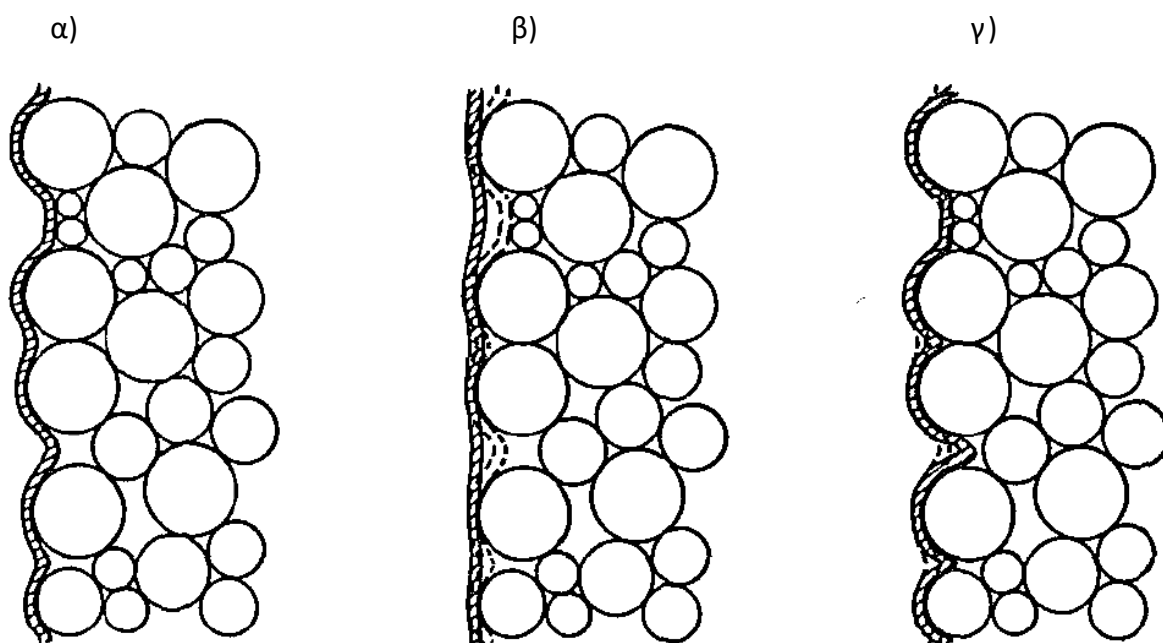
$$\Delta\tau_{z\theta} = -2 * E_m * t_m * \frac{r_o^3 + r_i^3}{(r_o^3 - r_i^3)(r_o + r_i)} * \gamma_{z\theta} \quad (2-36)$$

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

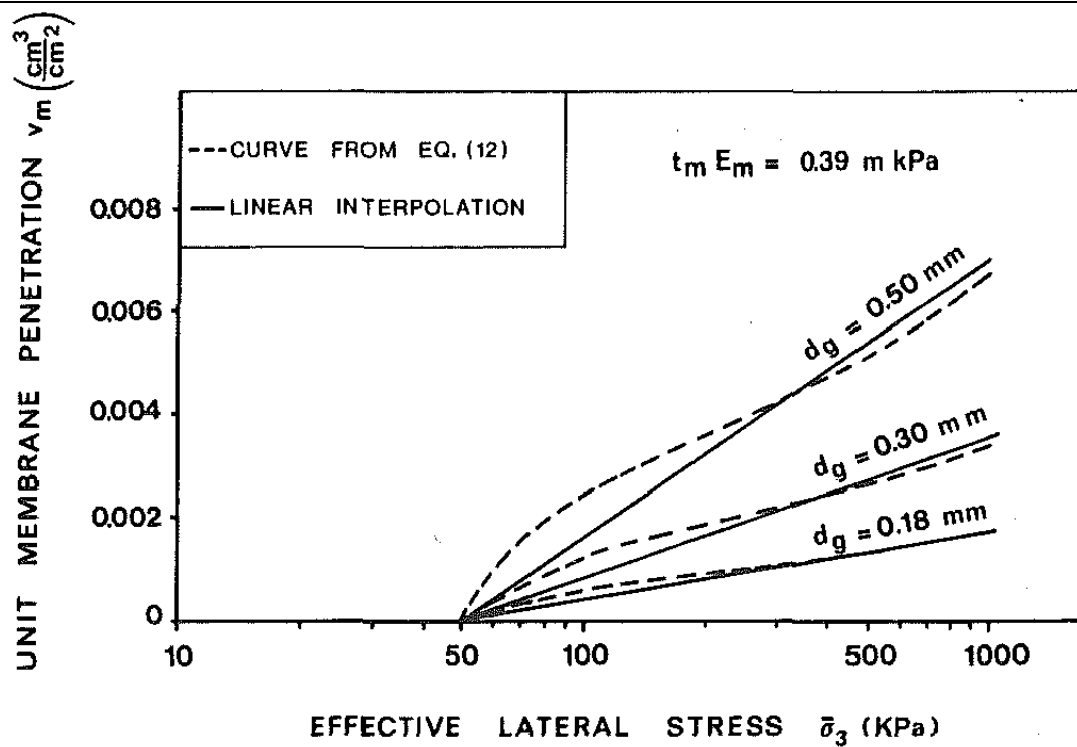
Όπου: E_m και t_m είναι το μέτρο ελαστικότητας Young και το μέσο πάχος της μεμβράνης αντίστοιχα,

$\epsilon_{z,o}$, και $\epsilon_{z,i}$ είναι οι αξονικές παραμορφώσεις της εξωτερικής και της εσωτερικής μεμβράνης του δοκιμίου αντίστοιχα και

$\epsilon_{\theta,o}$, και $\epsilon_{\theta,i}$ είναι οι εφαπτομενικές παραμορφώσεις της εξωτερικής και της εσωτερικής μεμβράνης του δοκιμίου αντίστοιχα.



Σχήμα 2.11: Μεταβολή της μορφής της μεμβράνης: α) στο τέλος της στερεοποίησης, β) κατά την αύξηση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης και γ) κατά την αύξηση της πλευρικής πίεσης σε συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (Kramer et al., 1990)



Σχήμα 2.12: Συσχέτιση του βαθμού διείσδυσης της μεμβράνης σε σχέση με την πλευρική ενεργό τάση και του μεγέθους των κόκκων (Baldi & Nova, 1985)

2.3 Επίδραση της Παραμέτρου α : Μονοτονική Φόρτιση υπό Σταθερή Διεύθυνση των Κυρίων Αξόνων Τάσεως

2.3.1 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης

Η εγγενής ανισοτροπία της δομής αλλά και οι συνεχείς αλλαγές της αρχικής δομής κατά τη διάρκεια των εντατικών καταπονήσεων των αμμωδών αποθέσεων έχουν αναγνωριστεί στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι η μεταβολή της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

Η επίδραση διεύθυνσης των κύριων τάσεων σε σχέση επίπεδο διαστρωμάτωσης (bedding plane) στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους μελετήθηκε αρχικά μέσω συσκευών που δεν επιτρέπουν τον έλεγχο της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων. Ο Oda (1972b) πραγματοποίησε τριαξονικές δοκιμές θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης μεταβάλλοντας τη γωνία (ϕ) που σχηματίζει το επίπεδο διαστρωμάτωσης του υλικού με τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης φόρτισης, ώστε να προσομοιωθεί η επίδραση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 στη συμπεριφορά ενός υλικού (**Σχήμα 2.13**). Επισημαίνεται ότι στις τριαξονικές δοκιμές θλίψης η μέγιστη κύρια τάση σ_1 ασκείται πάντα στο κατακόρυφο επίπεδο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, όσο διεύθυνση του επιπέδου διαστρωμάτωσης πλησιάζει τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (κατακόρυφο επίπεδο, $\phi=0^\circ$), η απόκριση του δοκιμίου είναι ασθενέστερη, εμφανίζοντας μειωμένη διαστολικότητα και αυξημένη παραμόρφωση κατά την αστοχία **Σχήμα 2.14**. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι σε δοκίμια ίδιας πυκνότητας το τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπολογισμένο στο 50% της μέγιστης αντοχής (E50) μειώνεται όσο μειώνεται η τιμή της γωνίας ϕ (**Σχήμα 2.15**). Δηλαδή, το δοκίμιο που παρασκευάστηκε με επίπεδο διαστρωμάτωσης παράλληλο στο οριζόντιο επίπεδο ($\phi=90^\circ$) και φορτίστηκε υπό τριαξονική θλίψη με τη μέγιστη κύρια τάση σ_1 παράλληλη με το κατακόρυφο επίπεδο, εμφάνισε τη βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά.

Ακολουθώντας παρόμοια τεχνική για να μελετήσουν την επίδραση της διεύθυνσης της κύριας τάσης ως προς το επίπεδο διαστρωμάτωσης οι Lam & Tatsuoka, (1988) παρασκεύασαν δοκίμια άμμου Toyoura με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης (air-pluviation) μεταβάλλοντας τη διεύθυνση απόθεσης του εδαφικού υλικού και τα υπέβαλαν σε τριαξονική θλίψη και τριαξονικό εφελκυσμό υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Εκτελώντας δοκιμές σε δοκίμια διαφόρων διαστάσεων παρατήρησαν ότι η επίδραση της εγγενούς ανισοτροπίας του υλικού είναι σημαντική ακόμη και στην περίπτωση των κοντών δοκιμίων και δεν εξαλείφεται ακόμη και σε μεγάλες παραμορφώσεις κατά την αστοχία. Γενικά η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη γωνία αντοχής, ϕ) παρατηρείται στην εντατική κατάσταση όπου ένα από τα επίπεδα στα οποία ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση γίνεται μέγιστος (maximum stress obliquity planes – επίπεδα οιονεί αστοχίας) τείνει να προσανατολιστεί με το επίπεδο διαστρωμάτωσης.

Η μελέτη της επίδρασης της δομής του εδάφους με τη μέθοδο της μεταβολής της γωνίας απόθεσης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία δοκιμών με έντονες ανομοιομορφίες τάσεων και παραμορφώσεων και προσφέρει περιορισμένες δυνατότητες προσομοίωσης συνθηκών φόρτισης. Επομένως, η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους σε γενικευμένες εντατικές καταστάσεις που περιλαμβάνουν αλλαγή στο μέγεθος και τη διεύθυνση των αξόνων των κύριων τάσεων είναι σημαντικές και απαραίτητες. Για αυτό το λόγο η αρχική ανισοτροπία ενός εγγενώς ανισότροπου εδαφικού υλικού μελετάται σε δοκίμια όπου οι επιβαλλόμενες κύριες τάσεις περιστρέφονται με ελεγχόμενο τρόπο. Συγκεκριμένα, εκτελούνται δοκιμές όπου μεταβάλλεται η γωνία α που σχηματίζει η μέγιστη κύρια τάση σ_1 με την κατακόρυφο. Η τεχνική αυτή, βέβαια, δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις πειραματικές συσκευές, καθώς συσκευές, όπως π.χ. η τριαξονική, δεν επιτρέπουν τη διαφοροποίηση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Επίσης, σε άλλες συσκευές (π.χ. συσκευή απλής διάτμησης) δεν δύναται να ελεγχθούν ικανοποιητικά οι συνθήκες στράγγισης με αποτέλεσμα οι μετρήσεις σε δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης να μην είναι ακριβείς. Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου μπορεί να προσομοιώσει γενικευμένες εντατικές καταστάσεις αφού επιτρέπει τη συνεχή περιστροφή των κυρίων τάσεων και τη μεταβολή της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 , ενώ δεν υφίσταται περιορισμούς όσον αφορά τις συνθήκες στράγγισης.

Οι Miura et al., (1986) μελέτησαν την επίδραση της ανισότροπης εσωτερικής δομής στη μηχανική συμπεριφορά της πυκνής άμμου Toyoura στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τα δοκίμια μετά από ισότροπη στερεοποίηση σε μέση ενεργό τάση $p'=98\text{kPa}$ υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία $F=2*\alpha$ ($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$). Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης διατηρείται σταθερή η ενεργός τάση, p' , και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 0.5$. Στο **Σχήμα 2.16** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας σε όρους λόγου τάσεων $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ -διατμητικής παραμόρφωσης. Εάν το εδαφικό υλικό ήταν ισότροπο, ο διαφορετικός προσανατολισμός των επιβαλλόμενων τάσεων δε θα επηρέαζε την απόκρισή του. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι η απόκριση εξαρτάται από την τιμή της γωνίας α αφού με την αύξησή της η απόκριση γίνεται ασθενέστερη, με τις τιμές του λόγου τάσεων στο σημείο μέγιστης αντοχής, αλλά και σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής, να μειώνονται. Επισημαίνεται ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται για $\alpha=0^\circ$, ενώ η ελάχιστη για $\alpha=60^\circ$ ($F 150^\circ$) όπου ένα από τα επίπεδα στα οποία ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση γίνεται μέγιστος τείνει να προσανατολιστεί με το επίπεδο διαστρωμάτωσης.

Οι Symes et al., (1988) εκτέλεσαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης σε δοκίμια μέσης πυκνότητας άμμου Ham River στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση κορεσμένης άμμου σε νερό επιτυγχάνοντας σημαντικά εγγενώς ανισότροπη δομή με τα επίπεδα διαστρωμάτωσης (bedding planes)

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

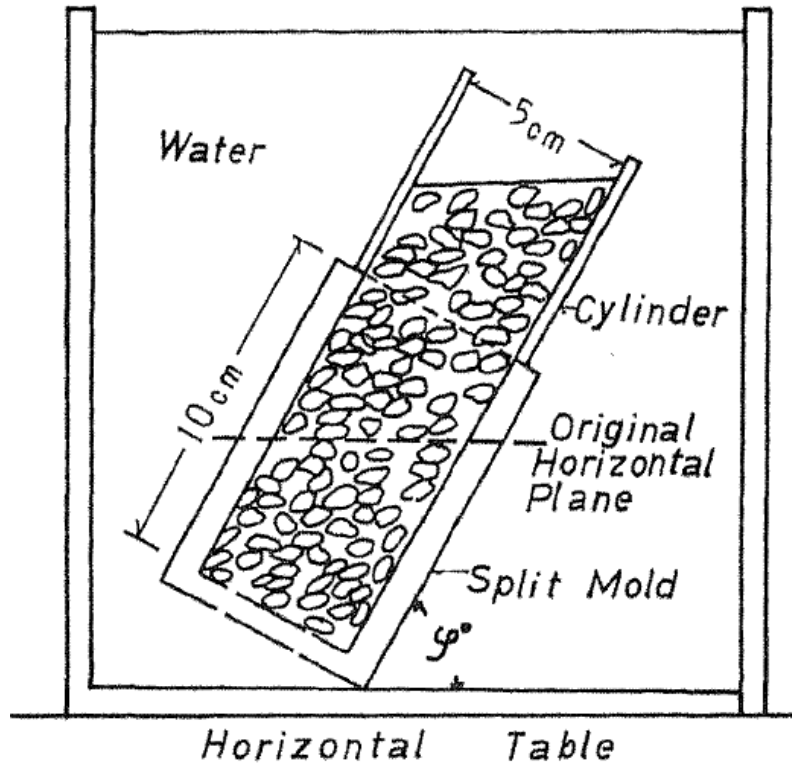
πάνω στα οποία προσανατολίζονται επιλεκτικά οι μεγάλοι άξονες των μη σφαιρικών κόκκων να είναι οριζόντια. Τα δοκίμια μετά από ισότροπη στερεοποίηση σε μέση ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α ($\alpha=0^\circ, 24.5^\circ$ και 45°). Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης διατηρείται σταθερή η ενεργός τάση, p' , και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 0.5$, ενώ αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση, $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, μέχρι την αστοχία. Στο **Σχήμα 2.17** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας σε όρους αποκλίνουσας τάσης, $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ – οκταεδρικής παραμόρφωσης (γ_{oct}) (**Σχήμα 2.17** (α)), και αποκλίνουσας τάσης - ογκομετρικής παραμόρφωσης (**Σχήμα 2.17** (β)). Όταν η μέγιστη κύρια τάση είναι κατακόρυφη το δοκίμιο εμφανίζει μεγαλύτερη δυσμησία, λιγότερη συστολή (μικρότερες ογκομετρικές παραμορφώσεις), και μεγαλύτερη διατμητική αντοχή. Γενικά, η απόκριση είναι ασθενέστερη όσο η μέγιστη κύρια τάση αποκλίνει από την κατακόρυφο.

Πιο πρόσφατα, οι Cai et al., (2013) εκτέλεσαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης σε πυκνά ($D_r=90\%$) δοκίμια άμμου Portaway στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση άμμου σε νερό, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α ($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$). Σε όλες τις δοκιμές της έρευνας η πίεση της εξωτερικής και της εσωτερικής κυψέλης ήταν ίσες ($p_o=p_i$), επομένως η παράμετρος της ενδιάμεσης τάσης δεν ελέγχεται ανεξάρτητα, αλλά προκύπτει από την εξίσωση (2-37). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης διατηρείται σταθερή η ενεργός τάση, p' , ενώ αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση, $q = \sigma_1 - \sigma_3$, μέχρι την αστοχία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοτονικής φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης- διατμητικής παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.18**(α) όπου είναι εμφανής η επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης στην απόκριση του εδάφους. Η μέγιστη αντοχή της πυκνής άμμου επιτυγχάνεται σε μικρές γενικά διατμητικές παραμορφώσεις, που κυμαίνονται από 2.5% (για $\alpha=75^\circ$) έως 7.5% (για $\alpha=30^\circ$), σε συμφωνία με άλλες μελέτες υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (K. Miura, Toki, et al., 1986; Lade et al., 2009). Στο **Σχήμα 2.18**(β) παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης αντοχής υπό μονοτονική φόρτιση σε σχέση με τη γωνία α . Η αντοχή είναι μέγιστη για τιμές της γωνίας $\alpha=0^\circ$ έως 30° , ενώ παρατηρείται μια σημαντική πτώση της μέγιστης αντοχής για $\alpha>45^\circ$ με την ελάχιστη αντοχή να εμφανίζεται για $\alpha=75^\circ$, ελαφρώς μικρότερη από την τιμή της αντοχής για $\alpha=90^\circ$.

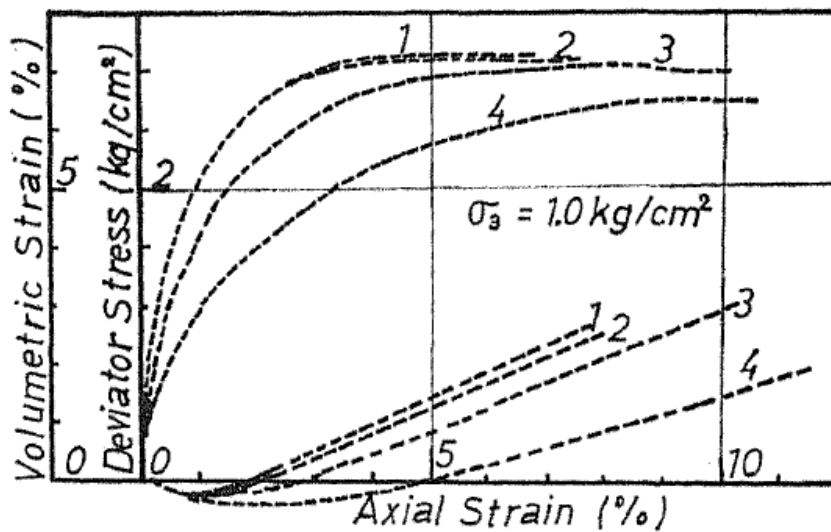
$$b = \sin^2 \alpha$$

(2-37)

Οι L.-T. Yang et al., (2016) μελέτησαν την επίδραση του σχήματος και της πυκνότητας του εδάφους στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά, μέσω δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου σε διάφορες τιμές της γωνίας α . Στο **Σχήμα 2.19** παρουσιάζονται οι καμπύλες λόγου τάσης ($\eta=q/p'$)- διατμητικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής- διατμητικής παραμόρφωσης των δοκιμών σε πυκνά και μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου Leighton Buzzard για τρεις ενδεικτικές τιμές της γωνίας α ($\alpha=0^\circ$, 30° και 90°), διατηρώντας σταθερή την παράμετρο ενδιάμεσης τάσης, $b=0.5$, και τη μέση ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$. Προκύπτει ότι ανεξαρτήτως πυκνότητας, όσο αυξάνεται η γωνία α η αντοχή μειώνεται και η συστολικότητα των δοκιμών αυξάνει. Συγκρίνοντας τις δύο κατηγορίες πυκνοτήτων, η μέσης πυκνότητας άμμος αναπτύσσει μικρότερη αντοχή και είναι πιο συστολική από την πυκνή άμμο και για τις τρεις τιμές της γωνίας α . Στην ίδια μελέτη για να εξεταστεί η επίδραση του σχήματος των κόκκων στην ανισότροπη δομή και απόκριση, χρησιμοποιήθηκαν πυκνά δοκίμια γυάλινων σφαιρικών κόκκων (Ballotini glass beads). Στο **Σχήμα 2.20** παρουσιάζονται οι καμπύλες λόγου τάσης ($\eta=q/p'$) - διατμητικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής- διατμητικής παραμόρφωσης των δοκιμών σε πυκνά δοκίμια άμμου Leighton Buzzard και γυάλινων σφαιρικών κόκκων Ballotini για τρεις ενδεικτικές τιμές της γωνίας α ($\alpha=0^\circ$, 30° και 90°), διατηρώντας σταθερή την παράμετρο ενδιάμεσης τάσης, $b=0.5$, και τη μέση ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$. Τα δοκίμια σφαιρικών γυάλινων κόκκων εμφανίζουν μικρότερη διατμητική αντοχή και πιο έντονη συστολή παρότι έχουν μεγαλύτερη αρχική πυκνότητα (90%) από την πυκνή άμμο (76%). Η επίδραση της αλλαγής της διεύθυνσης των αξόνων στην αντοχή των δοκιμών από γυάλινους κόκκους φαίνεται να είναι μικρότερη απ' ό,τι στην πυκνή γωνιώδη άμμο. Ωστόσο είναι εμφανής η επίδραση της γωνίας στις ογκομετρικές μεταβολές και για τα δύο υλικά. Στο **Σχήμα 2.21** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές της μέγιστης αντοχής για τη γωνιώδη άμμο Leighton Buzzard (πυκνή και μέσης πυκνότητας) και για τα δοκίμια γυάλινων σφαιρικών κόκκων (glass beads) σε κάθε διεύθυνση φόρτισης (γωνία α). Παρατηρούμε ότι οι τιμές της μέσης πυκνότητας άμμου είναι γενικά ελαφρώς μικρότερες από αυτές της πυκνής άμμου αλλά ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται περίπου σταθερές τιμές αντοχής για γωνία α από 0° έως 30° , στη συνέχεια μία έντονη πτώση στην ελάχιστη τιμή αντοχής για $\alpha=60^\circ$ και έπειτα μικρή αύξηση της τιμής και οριακά σταθεροποίησή της για $\alpha=75^\circ$ και 90° . Αντίθετα, τα πυκνά δοκίμια σφαιρικών κόκκων αναπτύσσουν πολύ μικρότερη αντοχή από την γωνιώδη άμμο με σχεδόν σταθερό μέγιστο δείκτη τάσεων $\eta=q/p' \approx 1$ για όλες τις τιμές της γωνίας α , με εξαίρεση τη σημαντική πτώση αντοχής στη δοκιμή με γωνία $\alpha=60^\circ$. Η ανισότροπη συμπεριφορά που παρατηρείται στην περίπτωση των δοκιμών από σφαιρικούς κόκκους αποδίδεται στον επιλεκτικό προσανατολισμό των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής των κόκκων που αναπτύχθηκαν κατά την Παρασκευή των δοκιμών με τη μέθοδο της εμβάπτισης σε νερό. Εξάλλου, η εσωτερική δομή παράγεται όχι μόνο εξαιτίας του επιλεκτικού προσανατολισμού των μεγάλων αξόνων των μη σφαιρικών κόκκων, αλλά και εξαιτίας του επιλεκτικού προσανατολισμού των κάθετων διανυσμάτων διεπαφής (contact normal vectors) των κόκκων (σφαιρικών ή μη) και των μεγάλων αξόνων των κενών μεταξύ των κόκκων (Oda et al., 1985).



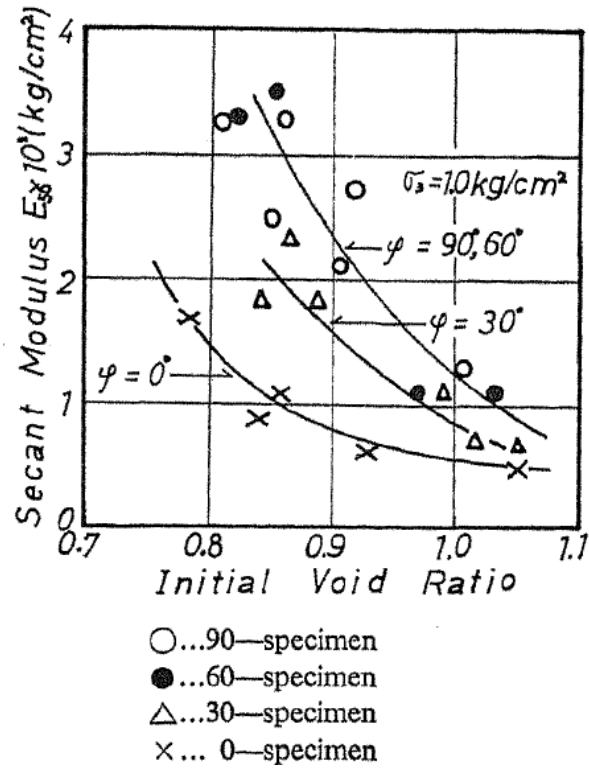
Σχήμα 2.13: Παρασκευή δοκιμίων μεταβάλλοντας τη διεύθυνση του επιπέδου διαστρωμάτωσης (Oda, 1972b)



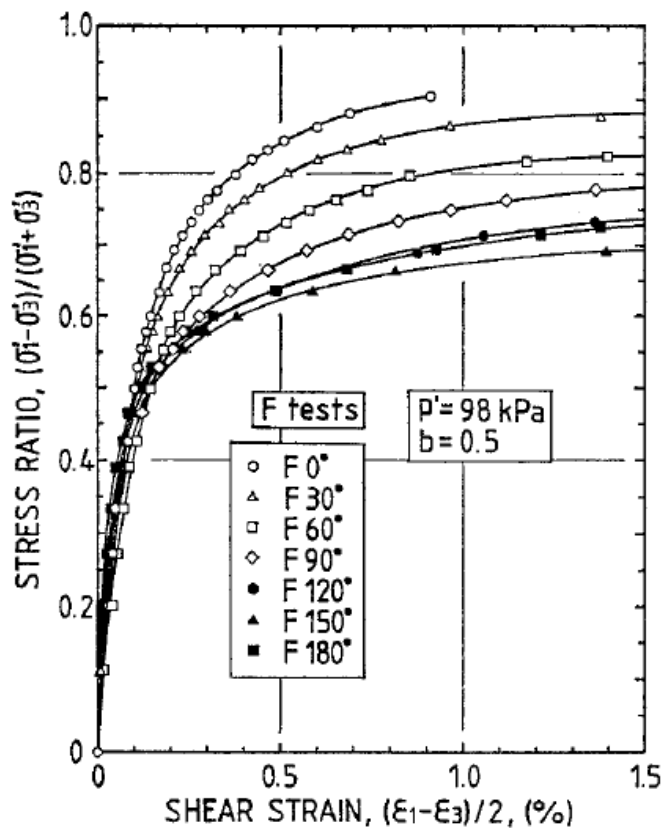
(2) Sand D

Specimen	Initial void Ratio	Angle φ°
(1)	0.861	90°
(2)	0.854	60°
(3)	0.867	30°
(4)	0.860	0°

Σχήμα 2.14: Επίδραση της διεύθυνσης του επιπέδου διαστρωμάτωσης (φ) στις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης - αξονικής παραμόρφωσης και στις καμπύλες ογκομετρικής - αξονικής παραμόρφωσης (Oda, 1972b)

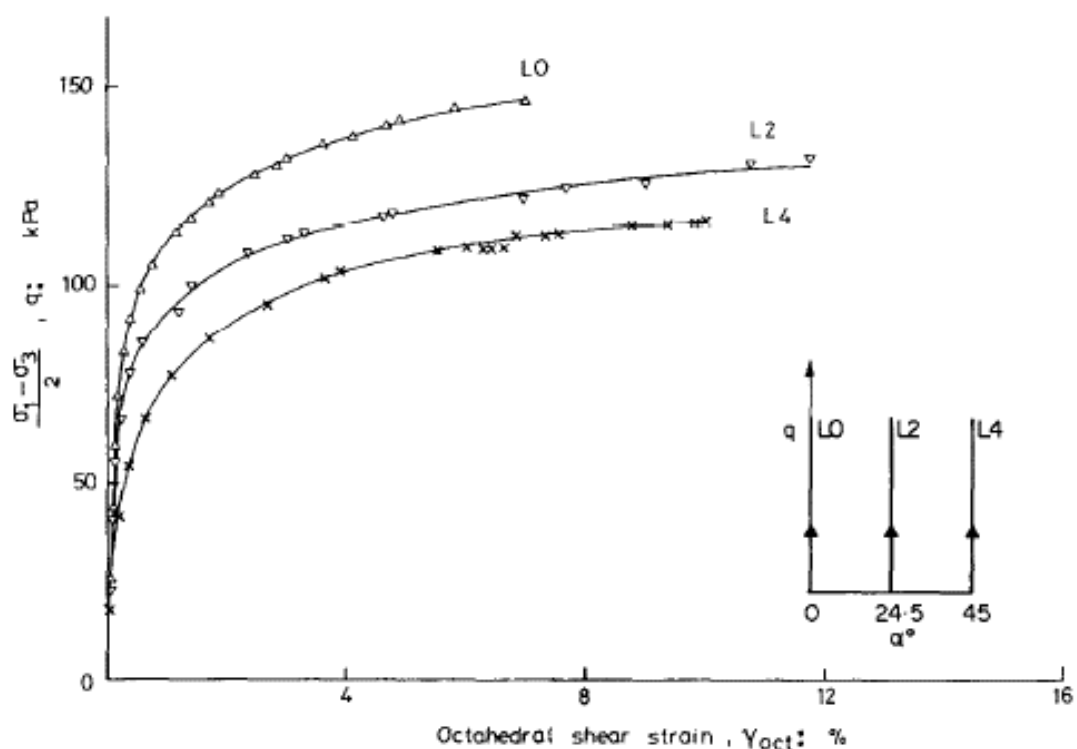


Σχήμα 2.15: Επίδραση της διεύθυνσης του επιπέδου διαστρωμάτωσης (ϕ) στο τέμνον μέτρο ελαστικότητας στο 50% της μέγιστης αντοχής (E_{50}) (Oda, 1972b)

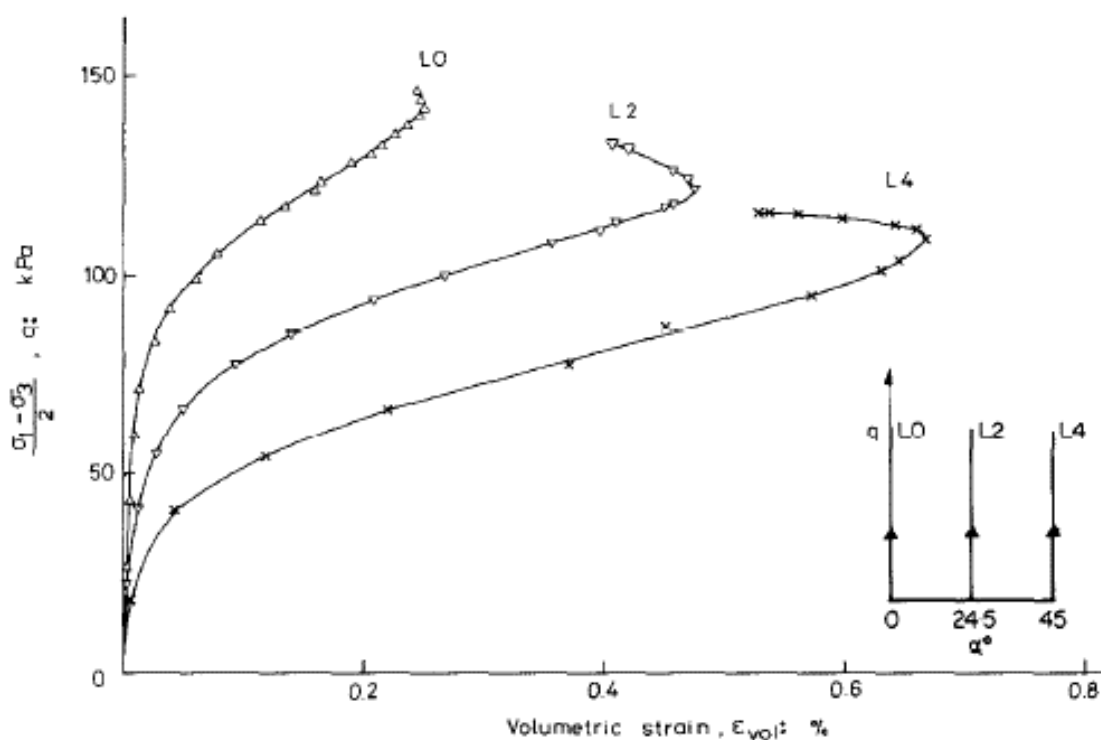


Σχήμα 2.16: Απόκριση πυκνής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Τογούρα σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές a , b και p' παραμέτρους σε όρους λόγου τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης (K. Miura, Toki, et al., 1986)

α)

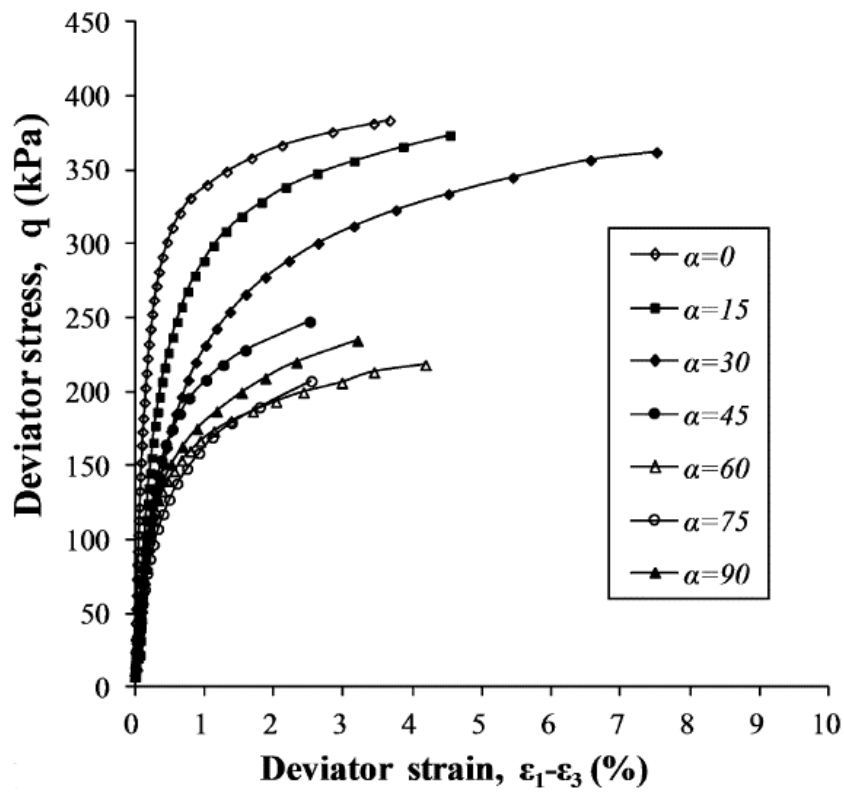


β)

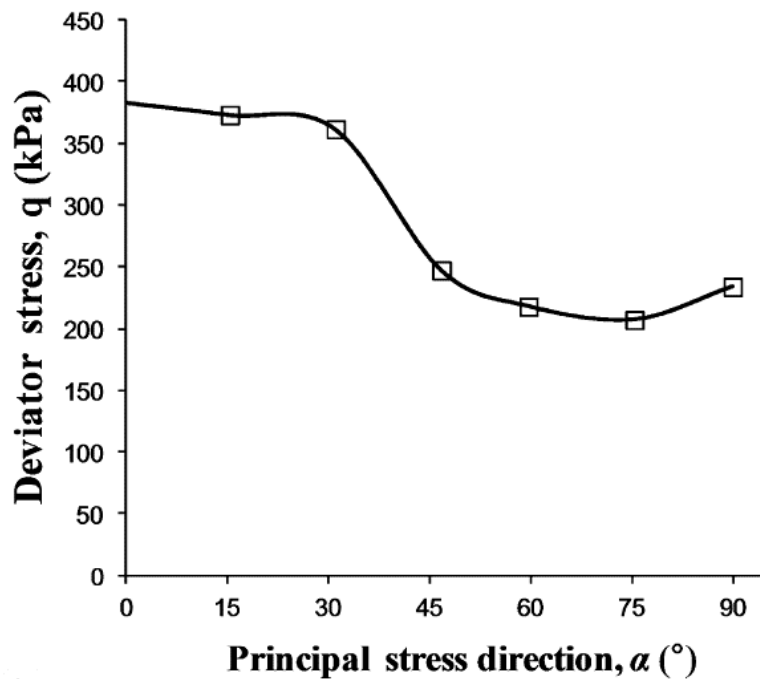


Σχήμα 2.17: Απόκριση μέσης πυκνότητας, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Ham River σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές α , b και ρ' παραμέτρους: α) αποκλίνουσα τάση – διατμητική παραμόρφωση, β) αποκλίνουσα τάση – ογκομετρική παραμόρφωση (Symes et al., 1988)

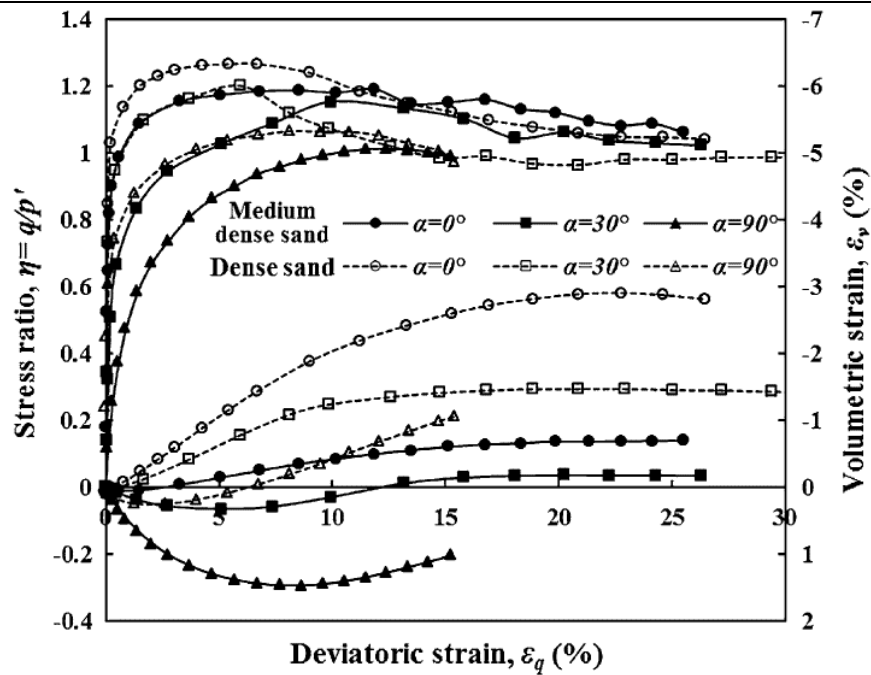
α)



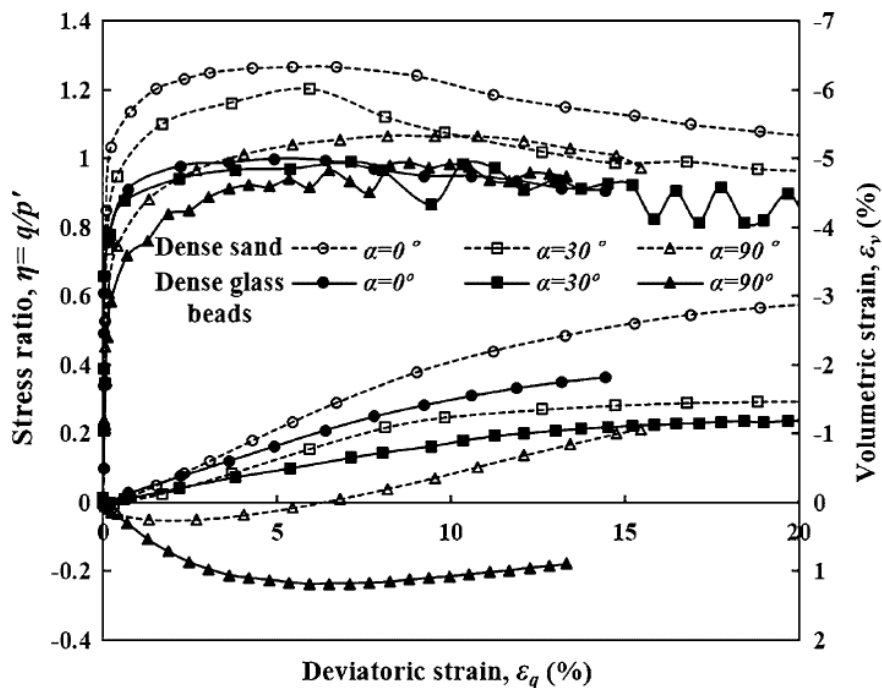
β)



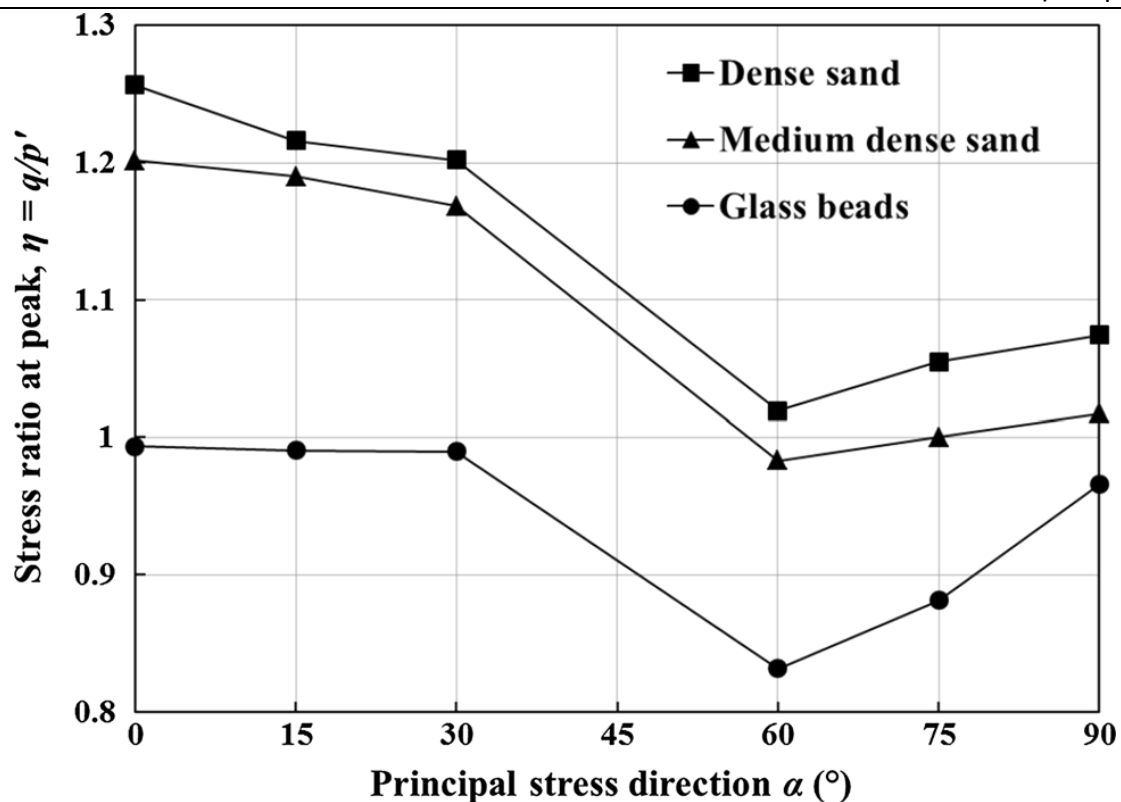
Σχήμα 2.18: Απόκριση πυκνής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Portway σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές α και p' παραμέτρους: α) αποκλίνουσα τάση – διατμητική παραμόρφωση, β) μέγιστη αποκλίνουσα τάση – γωνία α (Cai et al., 2013)



Σχήμα 2.19: Επίδραση της πυκνότητας στην απόκριση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Leighton Buzzard σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές παραμέτρους $b=0.5$ και $p'=200\text{kPa}$. Καμπύλες λόγου τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής-διατμητικής παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016)



Σχήμα 2.20: Επίδραση του σχήματος των κόκκων στην απόκριση ισότροπα στερεοποιημένου εδάφους σε μονοτονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης με σταθερές παραμέτρους $b=0.5$ και $p'=200\text{kPa}$. Καμπύλες λόγου τάσεων – διατμητικής παραμόρφωσης και ογκομετρικής-διατμητικής παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016)



Σχήμα 2.21: Αποτελέσματα δοκιμών μονοτονικής φόρτισης, ελεύθερης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, πυκνής και μέσης πυκνότητας άμμου Leighton Buzzard και γυάλινων σφαιρικών κόκκων, με σταθερές παραμέτρους $b=0.5$ και $p'=200\text{kPa}$. Μέγιστος λόγος τάσεων $\eta=q/p'$ σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο (γωνία α) (L.-T. Yang et al., 2016)

2.3.2 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ανισότροπης συμπεριφοράς της άμμου είναι η διαφορετική απόκριση σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης υπό τριαξονική θλίψη ($\alpha=0^\circ$, $b=0$) έναντι του τριαξονικού εφελκυσμού ($\alpha=90^\circ$, $b=1$) για δοκίμια ίδιας πυκνότητας. Τυπικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου Toyoura παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.22** (M. Yoshimine et al., 1998) σε όρους ενεργών διαδρομών τάσεων ($q-p'$), (**Σχήμα 2.22(α)**) και αποκλίνουσας τάσης- διατμητικής παραμόρφωσης (**Σχήμα 2.22(β)**). Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης και στερεοποιήθηκαν σε διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις. Οι δοκιμές εφελκυσμού παρουσιάζονται με διακεκομμένες γραμμές, ενώ οι δοκιμές θλίψης με συνεχείς γραμμές. Υπό θλιπτική φόρτιση, τα δοκίμια ανέπτυξαν μέγιστη υπερπίεση πόρων ως 50% της αρχικής ενεργού τάσης και μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής ενώ παρατηρείται μια μικρή πτώση της αντοχής, τελικώς κυριαρχεί η τάση για διαστολή στις μεγάλες παραμορφώσεις. Αντίθετα, υπό εφελκυστική φόρτιση μετά την επίτευξη του μεγίστου, η αντοχή μηδενίζεται εξαιτίας της έντονης ανάπτυξης της υπερπίεσης που εξισώνεται με την αρχική ενεργό τάση (static liquefaction).

Στις τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού, εκτός από την επίδραση της γωνίας α ($\alpha=0^\circ$ και 90°) υπάρχει και η επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης τάσης b ($b=0$ και 1) στην αστράγγιστη συμπεριφορά της άμμου. Γι' αυτό το λόγο, αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να απομονώσουν την επίδραση της γωνία α εκτελώντας δοκιμές με σταθερή την παράμετρο b στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου, όπου είναι εφικτός ο ανεξάρτητος έλεγχος των κύριων τάσεων (Shibuya & Hight, 1987; M. Yoshimine et al., 1998; Nakata et al., 1998; Sivathayalan & Vaid, 2002; Shibuya et al., 2003b, 2003a; P. K. Triantafyllos et al., 2021)

Τυπικά αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών, εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες τιμές της γωνία α με σταθερή την παράμετρο $b=0.5$ σε χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου Toyoura και άμμου Synchronde παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.23** (M. Yoshimine et al., 1998) και στο **Σχήμα 2.24** αντίστοιχα, σε όρους ενεργών διαδρομών τάσεων ($q-p'$), (α) και αποκλίνουσας τάσης- διατμητικής παραμόρφωσης (β). Τα δοκίμια της άμμου Toyoura παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης και της άμμου Synchronde με τη μέθοδο της εμβάπτισης σε νερό. Στα διαγράμματα παρατηρείται συμπεριφορά παροδικής μονότονης ρευστοποίησης (limited flow deformation) (Nakata et al. 1998) η οποία εκδηλώνεται με την πτώση της αντοχής, q , μετά το σημείο παροδικού μεγίστου (transient-peak state) και με ταυτόχρονη συσσώρευση μονότονης διατμητικής παραμόρφωσης και υπερπίεσης του υγρού των πόρων. Η επίδραση της γωνίας α είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς όσο η διεύθυνση της κύριας τάσης σ_1 πλησιάζει το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης η απόκριση της άμμου γίνεται πιο ψαθυρή, πιο συστολική και παρατηρείται μείωση της αντοχής. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι (Shibuya et al., 2003a) για την ισότροπα στερεοποιημένη άμμο Ham River που

παρατήρησαν επιπρόσθετα ότι υπάρχει μια Τοπική Οριακή Επιφάνεια (Local Boundary Surface) που περιβάλλει τα σημεία μέγιστης αντοχής για όλους τους συνδυασμούς της γωνίας α και της παραμέτρου b . Σύμφωνα με τους ερευνητές δεν είναι δυνατή κάποια εντατική κατάσταση έξω από αυτή την επιφάνεια, ενώ αν κάποια εντατική κατάσταση ανήκει σε αυτή την επιφάνεια, τότε η διαδρομή τάσεων της φόρτισης θα κινηθεί οριακά πάνω στην επιφάνεια. Επισημαίνεται ότι όταν η διαδρομή ενεργών τάσεων πλησιάζει την οριακή επιφάνεια και η φόρτιση πραγματοποιείται υπό συνθήκες εμποδιζόμενης τότε αναπτύσσονται σημαντικά μεγάλες υπερπίεσης του υγρού των πόρων.

Οι Nakata et al. (1998) εξέτασαν την επίδραση της πυκνότητας στην απόκριση δοκιμίων που υποβάλλονται σε μεταβολή των κυρίων τάσεων υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Για το σκοπό αυτό παρασκεύασαν δοκίμια άμμου Toyoura με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης, τα οποία στη συνέχεια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p_j' = 100 \text{ kPa}$ και υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό σταθερή ολική τάση $p = 100 \text{ kPa}$, σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης τάσης $b = 0.5$ σε διάφορες τιμές της γωνίας α ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 75°). Οι ενεργές διαδρομές τάσεις και οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.25(α)**, στο **Σχήμα 2.25(β)** και στο **Σχήμα 2.25(γ)** για τα δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r = 90, 60$ και 30% αντίστοιχα. Σε όλες τις δοκιμές η αύξηση της γωνίας α οδηγεί σε ασθενέστερη μηχανική συμπεριφορά. Ωστόσο, ανάλογα με το επίπεδο πυκνότητας (πυκνά, μέσης πυκνότητας και χαλαρά δοκίμια) η απόκριση είναι διαφορετική. Πιο αναλυτικά, κανένα πυκνό δοκίμιο για όλο το εύρος των τιμών της γωνία α δεν εμφάνισε μονότονη ρευστοποίηση (flow deformation), δηλαδή πτώση της διατμητικής αντοχής. Αυτή η συμπεριφορά δεν παρατηρήθηκε ούτε στα δοκίμια μέσης πυκνότητας για τιμές της γωνία $\alpha = 15^\circ$ και 30° . Αντίθετα, στα δοκίμια μέσης πυκνότητας με $\alpha \geq 45^\circ$ εμφανίζεται συμπεριφορά παροδικής μονότονης ρευστοποίησης (limited flow deformation), δηλαδή πτώση της αντοχής, μετά την επίτευξη του παροδικού μεγίστου, μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά, κατά την αστράγγιστη φόρτιση. Στην πράξη, η συμπεριφορά αυτή συνοδεύεται από μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις προκαλώντας σημαντικές ζημιές. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της γωνίας α , μεγαλώνει το διάστημα απομείωσης της αντοχής, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται περισσότερη διατμητική παραμόρφωση. Για παράδειγμα, στα δοκίμια μέσης πυκνότητας, το διάστημα παραμόρφωσης κατά την απομείωση της αντοχής για φόρτιση υπό γωνία $\alpha = 45^\circ$ είναι $\gamma = 0.2$ έως 1% , ενώ επιμηκύνεται σε $\gamma = 0.2$ έως 2% για τη γωνία $\alpha = 75^\circ$. Τα χαλαρότερα δοκίμια της έρευνας, πυκνότητας $D_r = 30\%$ εμφάνισαν ψαθυρή συμπεριφορά και την μικρότερη αντοχή. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο με τη μικρότερη γωνία $\alpha = 15^\circ$ ανέπτυξε συμπεριφορά παροδικής μονότονης ρευστοποίησης, ενώ τα δοκίμια μεγαλύτερης γωνία μονότονη ρευστοποίηση. Μάλιστα, τα δοκίμια με γωνία $\alpha \geq 45^\circ$ ρευστοποιήθηκαν πλήρως, υπό συνθήκες μονοτονικής φόρτισης.

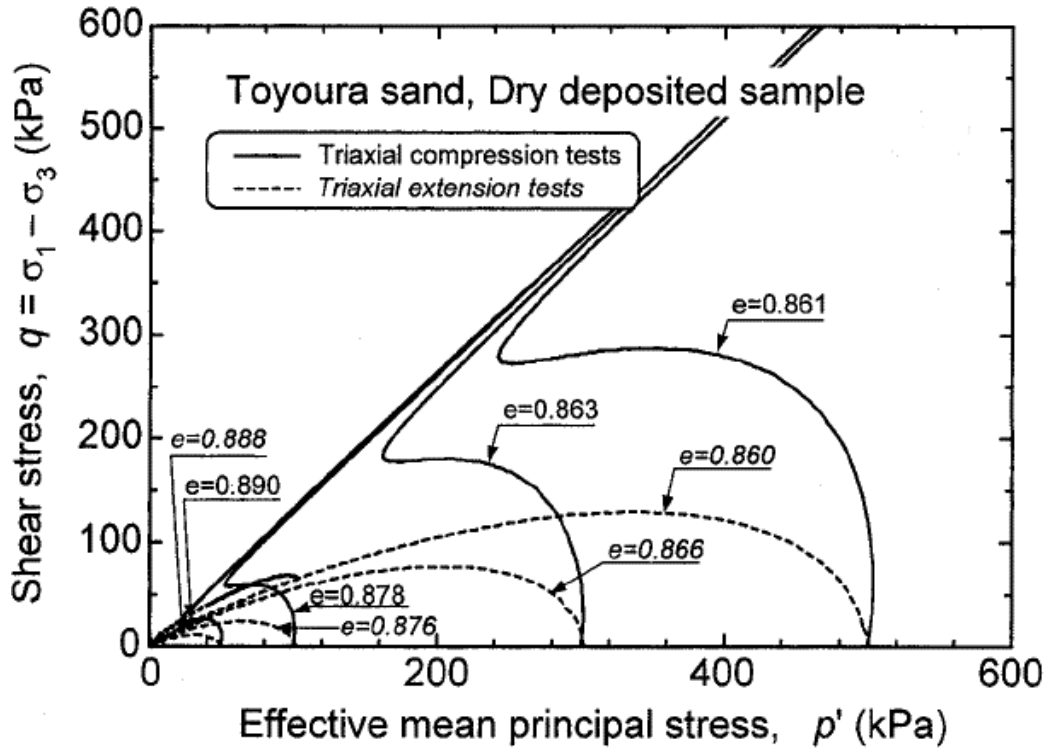
Σε μια πρόσφατη μελέτη οι Triantafyllou et al., (2020b) εκτέλεσαν μονοτονικές δοκιμές, εμποδιζόμενης στράγγισης σε διάφορες τιμές της γωνία α με σταθερή την παράμετρο $b = 0.5$ και τη μέση ολική τάση, $p = 200 \text{ kPa}$, σε χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια

άμμου M31, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Η χαλαρή άμμος επέδειξε εντόνως ανισότροπα μηχανικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.26** σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων στο επίπεδο q - p' (**Σχήμα 2.26(α)**) και οκταεδρικών διατμητικών τάσεων – παραμορφώσεων (τ_{oct} – γ_{oct}) (**Σχήμα 2.26(β)**). Στα διαγράμματα παρατηρείται η τυπική συμπεριφορά παροδικής μονότονης ρευστοποίησης για τη χαλαρή κορεσμένη άμμο, η οποία εκδηλώνεται με την πτώση της αντοχής, q_d , μετά το σημείο παροδικού μεγίστου με ταυτόχρονη συσσώρευση διατμητικής παραμόρφωσης και υπερπίεσης του ύδατος πόρων. Μετά το σημείο αστάθειας η πτώση της αντοχής συνεχίζεται μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης πέραν του οποίου ανακτάται η αντοχή και η ευστάθεια. Επισημαίνεται ότι η ασθενέστερη απόκριση εμφανίζεται όταν η γωνία α λαμβάνει τιμές μεταξύ 60° και 75° .

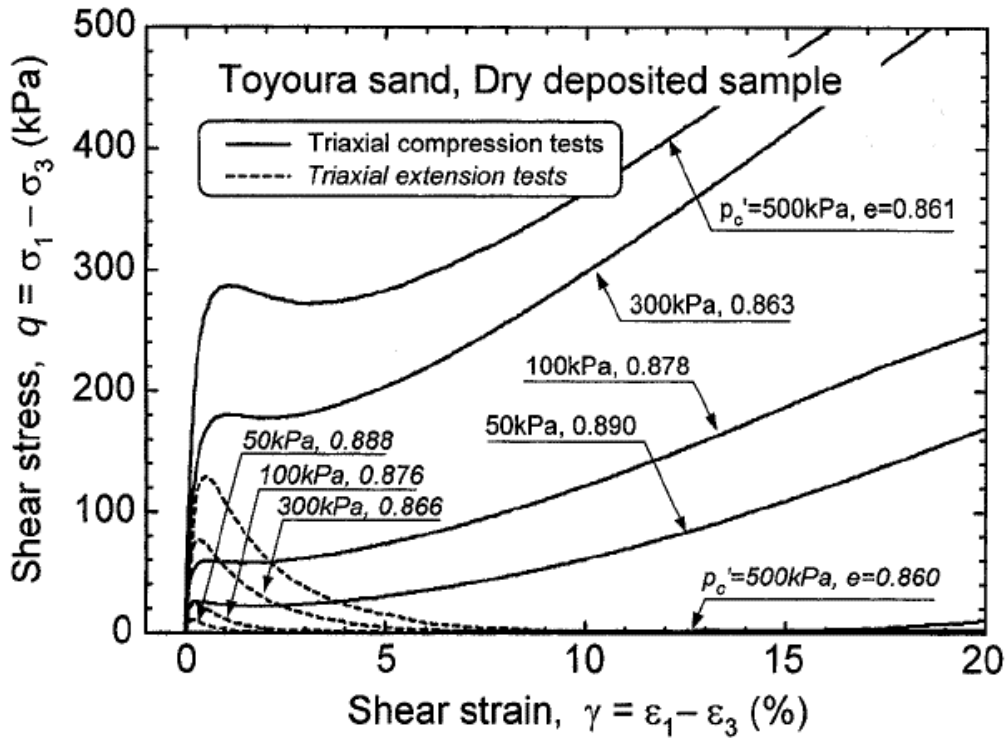
Η επίδραση της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων στη γωνία αλλαγής φάσης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης στη βιβλιογραφία. Επισημαίνεται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή στα σημεία αλλαγής φάσης και στη σταθερή κατάσταση δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την πυκνότητα των δοκιμίων, αλλά και από τη διεύθυνση φόρτισης των κύριων τάσεων (Nakata et al., 1998). Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουν και οι (Symes et al., 1984; Shibuya et al., 2003a). Αντίθετα, οι Uthayakumar & Vaid, (1998) κατέληξαν ότι σε δύο άμμους (άμμος Fraser και άμμος Syncrude) που εξέτασαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου οι γραμμές αλλαγής φάσης ή ψευδο- σταθερής κατάστασης, όπως την περιγράφουν, (συνεπώς και η αντίστοιχη γωνία διατμητικής αντοχής κατά την αλλαγή φάσης) είναι μοναδικές και ανεξάρτητες από τη διεύθυνση των κυρίων τάσεων και το μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης b . Στο **Σχήμα 2.27** παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας α στην τιμή της αποκλίνουσας τάσης q στο σημείο αλλαγής φάσης (q_{PT}) και στο σημείο κρίσιμου λόγου τάσεων (q_{CSR}) για τις τρεις κατηγορίες πυκνοτήτων (Nakata et al., 1998). Αναφέρεται ότι ο κρίσιμος λόγος τάσεων ορίζεται ως η τιμή της αποκλίνουσας προς τη μέση ενεργό τάση, q/p' , στο σημείο παροδικού μεγίστου αντοχής που σηματοδοτεί την έναρξη της αστάθειας στις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης **Σχήμα 2.28**. Παρατηρούμε ότι η τιμή της αποκλίνουσας τάσης στο σημείο αλλαγής φάσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α , όπως και η τιμή της αποκλίνουσας τάσης q στο σημείο κρίσιμου λόγου τάσεων στα χαλαρά δοκίμια. Επιπρόσθετα, στο **Σχήμα 2.29** παρουσιάζονται οι διαδρομές ενεργών τάσεων στην ισότροπα στερεοποιημένη άμμο Ham River σε δοκιμές μονοτονικής αστράγγιστης φόρτισης υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (Symes et al., 1984). Παρατηρείται τα σημεία αλλαγής φάσης για τις τρεις διαφορετικές γωνίες α δεν ανήκουν σε μία κοινή γραμμή, αποδεικνύοντας την επίδραση της διεύθυνσης της γωνίας των κύριων τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης της άμμου. Τα αντικρουόμενα αποτελέσματα της έρευνας των Uthayakumar & Vaid, (1998) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.30**. Η μελέτη περιλαμβάνει δοκιμές μονοτονικής, αστράγγιστης φόρτισης υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης στην άμμο Syncrude πυκνότητας

$D_r=30\%$. Παρατηρούμε ότι η γραμμή της ψευδοσταθερής κατάστασης (quasi steady state) είναι μοναδική και ανεξάρτητη της γωνίας α .

α)

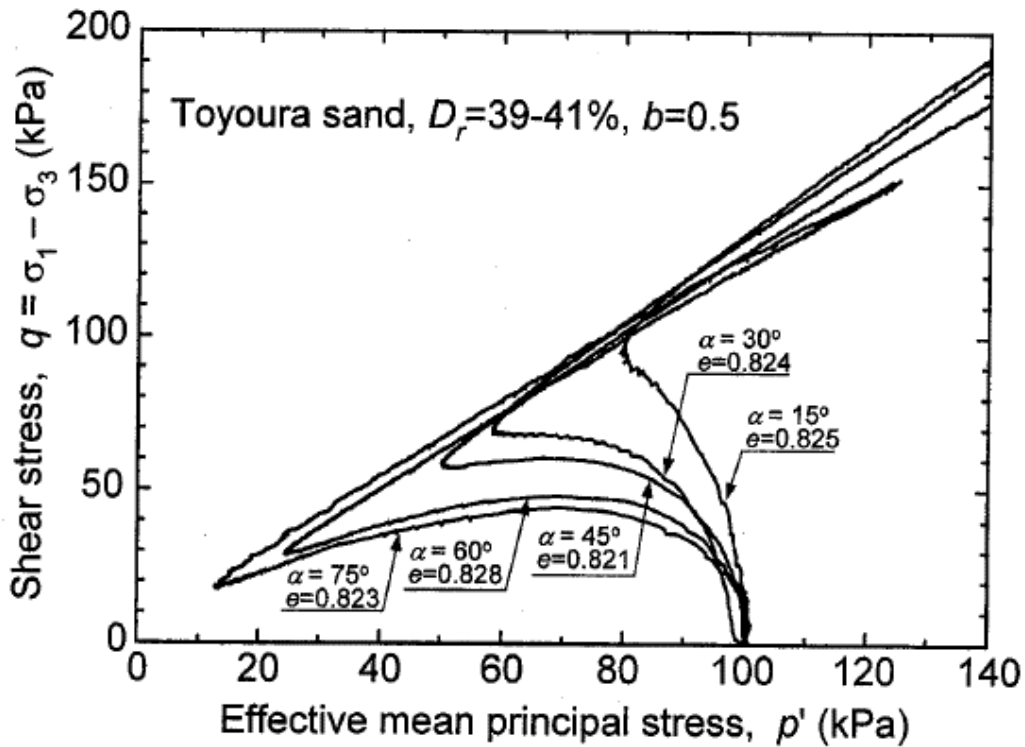


β)

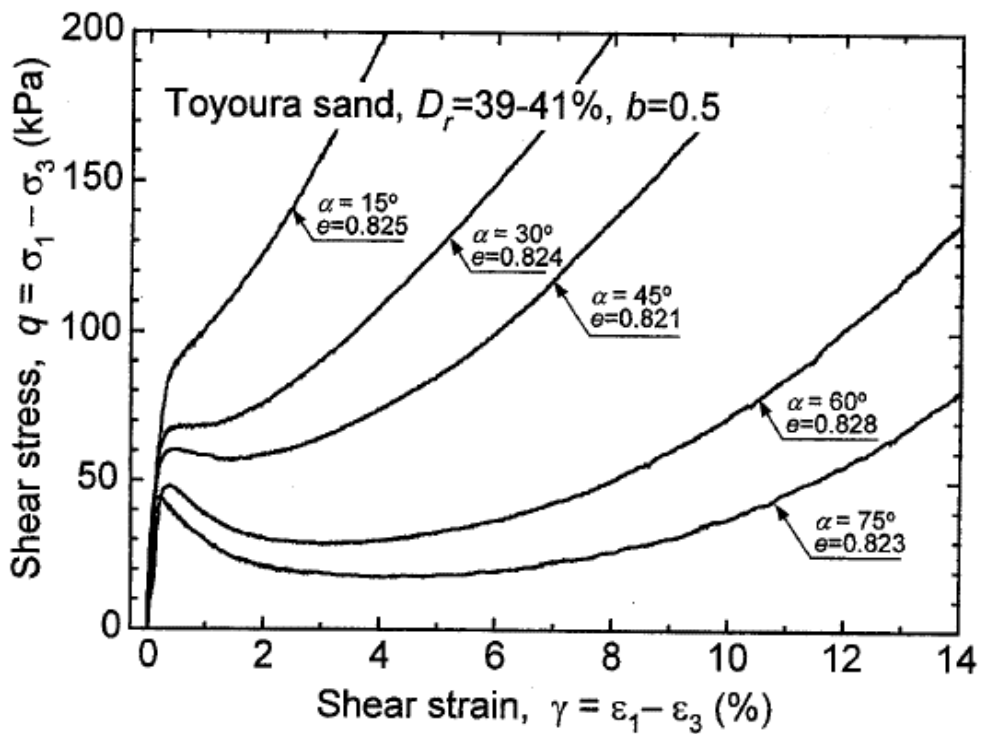


Σχήμα 2.22: Τριαξονική θλίψη και τριαξονικός εφελκυσμός σε χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου Τογούρα υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: α) Διαδρομές ενεργών τάσεων και β) Αποκλίνουσα τάση-διατμητική παραμόρφωση (M. Yoshimine et al., 1998)

α)

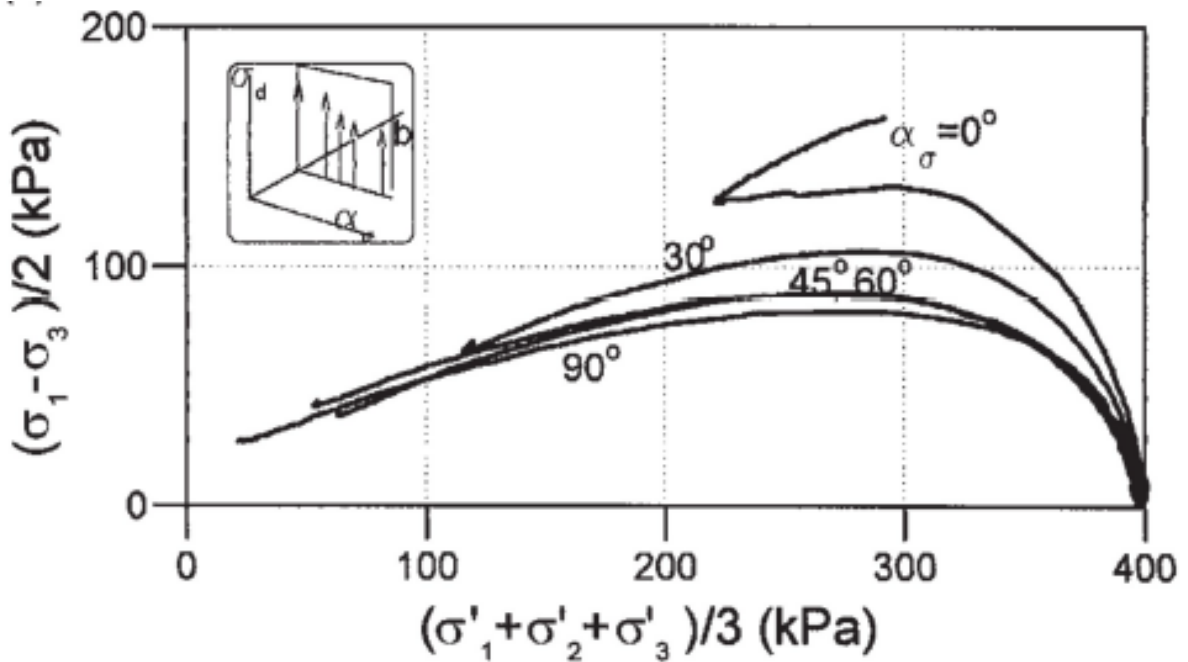


β)

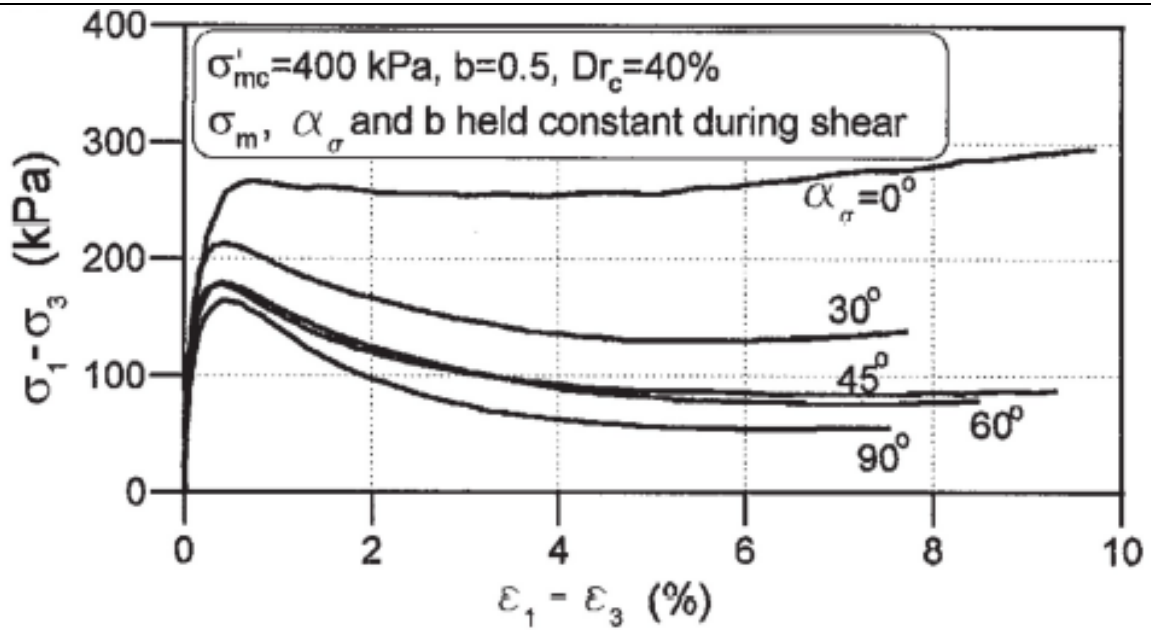


Σχήμα 2.23: Μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Τογούρα, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) Διαδρομές ενεργών τάσεων και β) Αποκλίνουσα τάση- διατμητική παραμόρφωση (M. Yoshimine et al., 1998)

α)

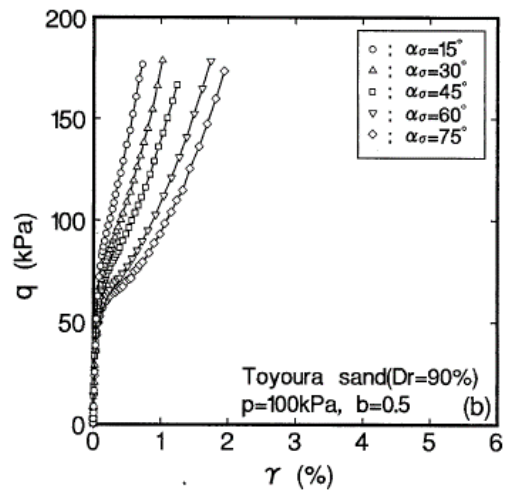
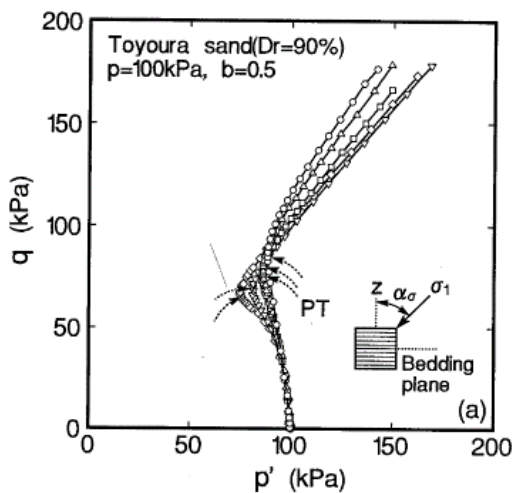


β)

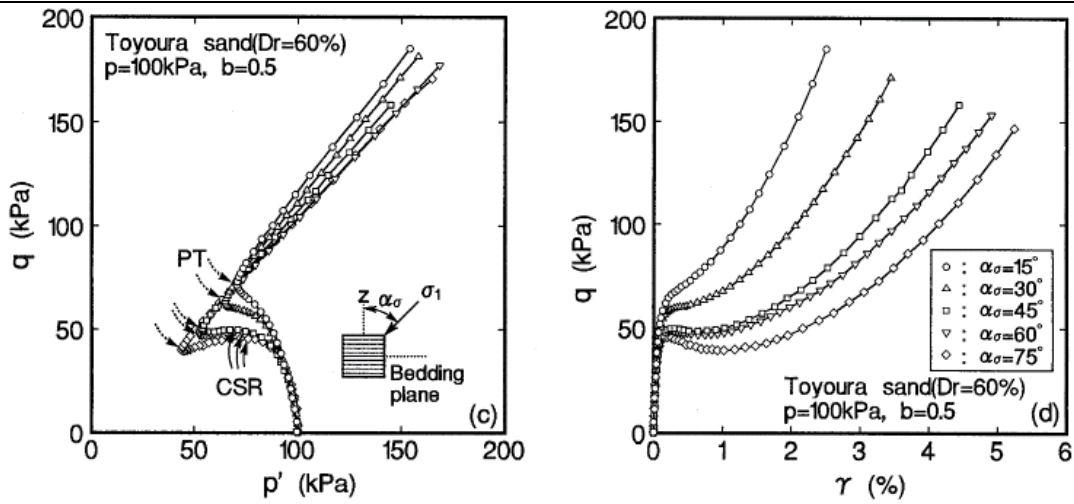


Σχήμα 2.24: Μονotonική, αστράγγιστη φόρτιση χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Syncrude, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) Διαδρομές ενεργών τάσεων και β) Αποκλίνουσα τάση- διατμητική παραμόρφωση (Uthayakumar & Vaid, 1998)

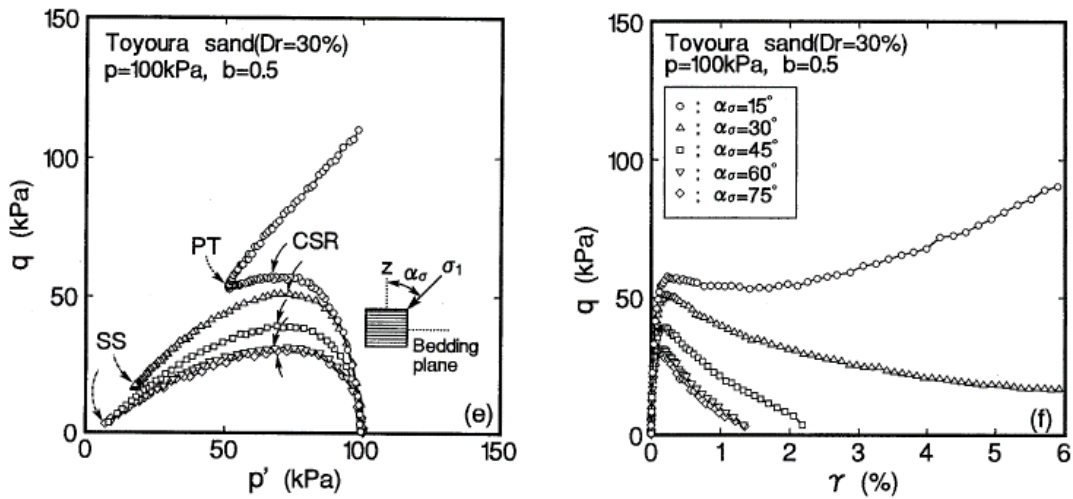
α)



β)

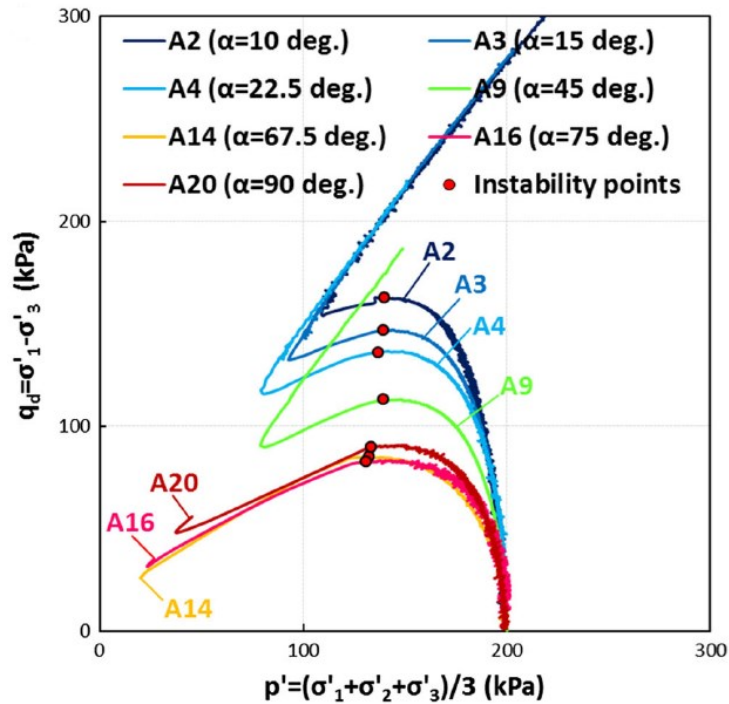


γ)

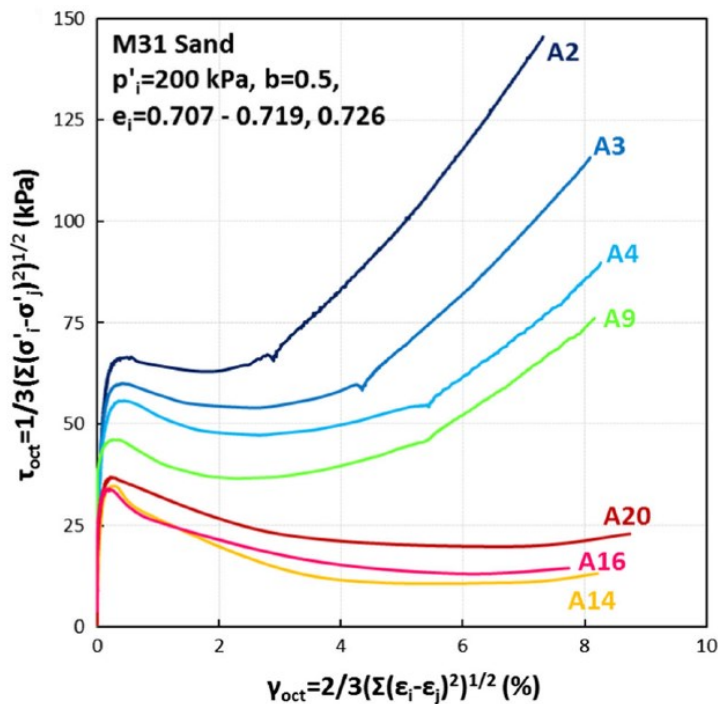


Σχήμα 2.25: Μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Toyoura, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) $Dr=90\%$ β) $Dr=60\%$ και γ) $Dr=30\%$ (Nakata et al., 1998)

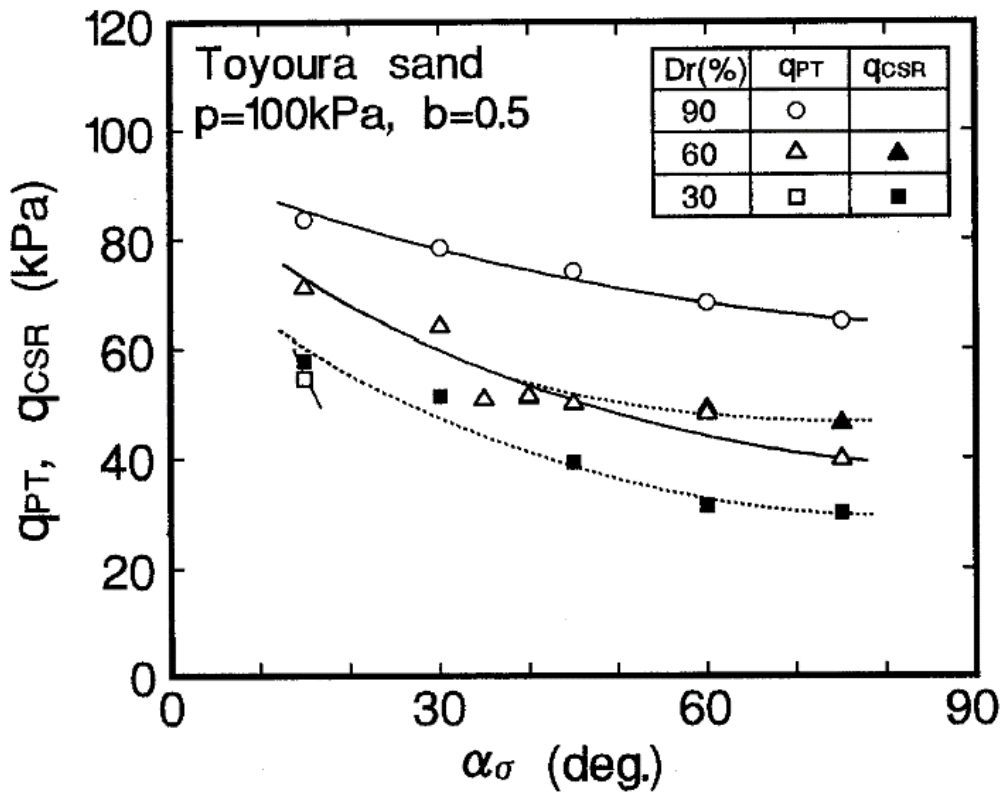
α)



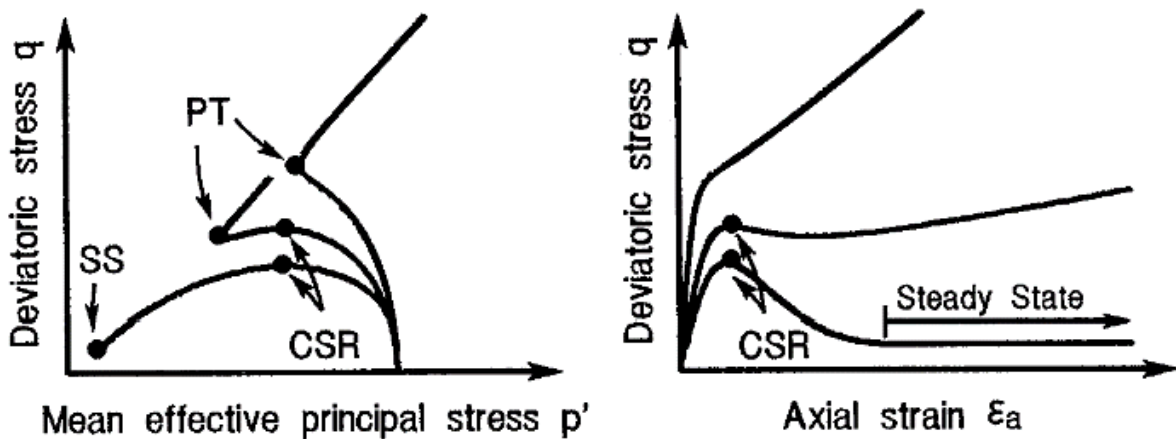
β)



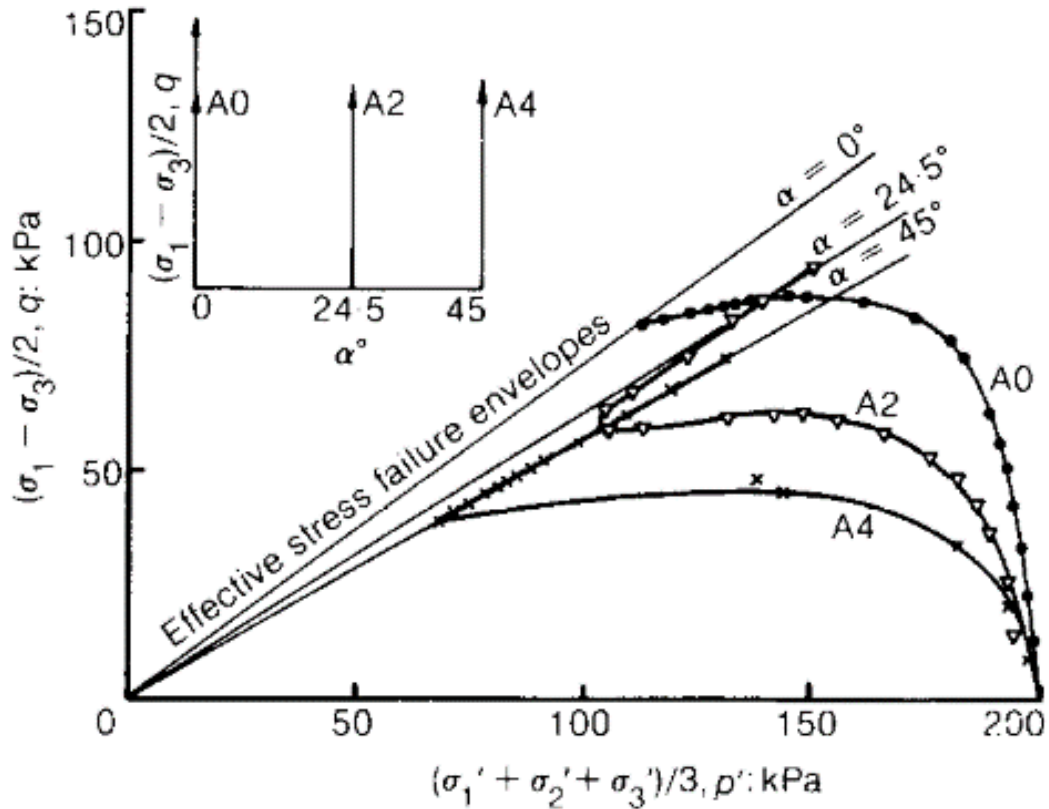
Σχήμα 2.26: Απόκριση χαλαρής ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε μονοτονική φόρτιση εμποδιζόμενης στράγγισης, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, και σταθερή ολική μέση ολική τάση $p=200\text{kPa}$ σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης: α) Ενεργές τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q=p'$ και β) Καμπύλες οκταεδρικής διατμητικής τάσης – παραμόρφωσης ($\tau_{oct} - \gamma_{oct}$) (P. K. Triantafyllos et al., 2020)



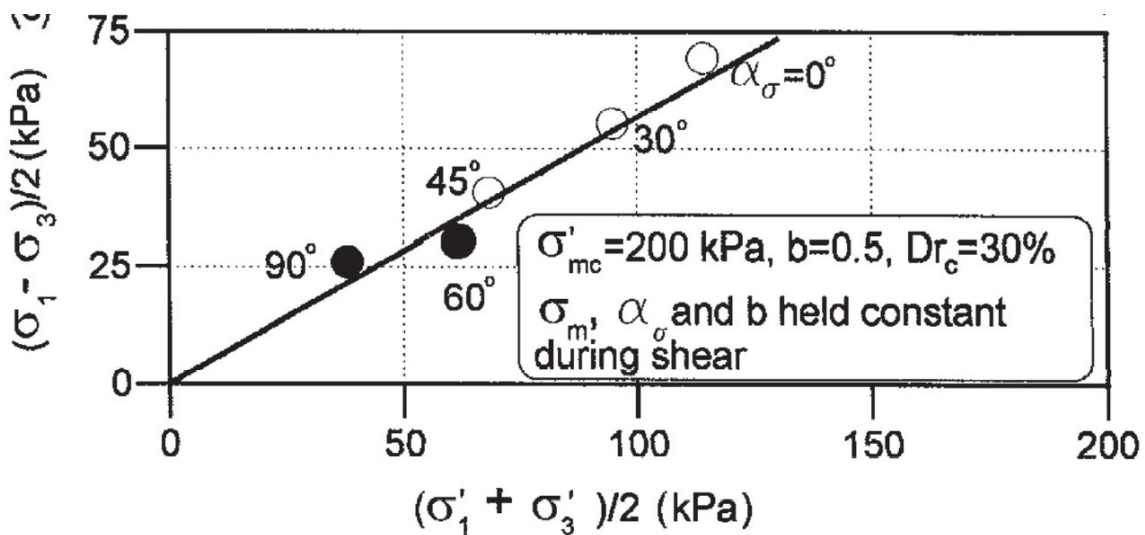
Σχήμα 2.27: Επίδραση της γωνίας α στη διατμητική αντοχή στο σημείο αλλαγής φάσης (q_{PT}) και στο σημείο κρίσιμου λόγου τάσεων (q_{CSR}) σε μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Τογούρα, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης για $D_r=90\%$, 60% και 30% (Nakata et al., 1998)



Σχήμα 2.28: Χαρακτηριστική απόκριση άμμου υπό μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση. Κρίσιμος λόγος τάσης (CSR), σημείο αλλαγής φάσης (PT), σταθερή κατάσταση (steady state) (Vaid & Chern, 1985; Nakata et al., 1998)



Σχήμα 2.29: Επίδραση της γωνίας α στη διατμητική αντοχή στο σημείο αλλαγής φάσης (q_{PT}) σε μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση ισότροπα στερεοποιημένης άμμου Ham River, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης. Διαδρομές ενεργών τάσεων (Symes et al., 1984)



Σχήμα 2.30: Επίδραση της γωνίας α στη γωνία διατμητικής αντοχής στο σημείο σταθερής κατάστασης σε μονοτονική, αστράγγιστη φόρτιση άμμου Syncrude, υπό σταθερή παράμετρο $b=0.5$, σε διάφορες γωνίες α στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης για $Dr=30\%$. (Uthayakumar & Vaid, 1998)

2.4 Επίδραση της Παραμέτρου α : Συνεχής στροφή της Διεύθυνσης των Κυρίων Αξόνων Τάσεως

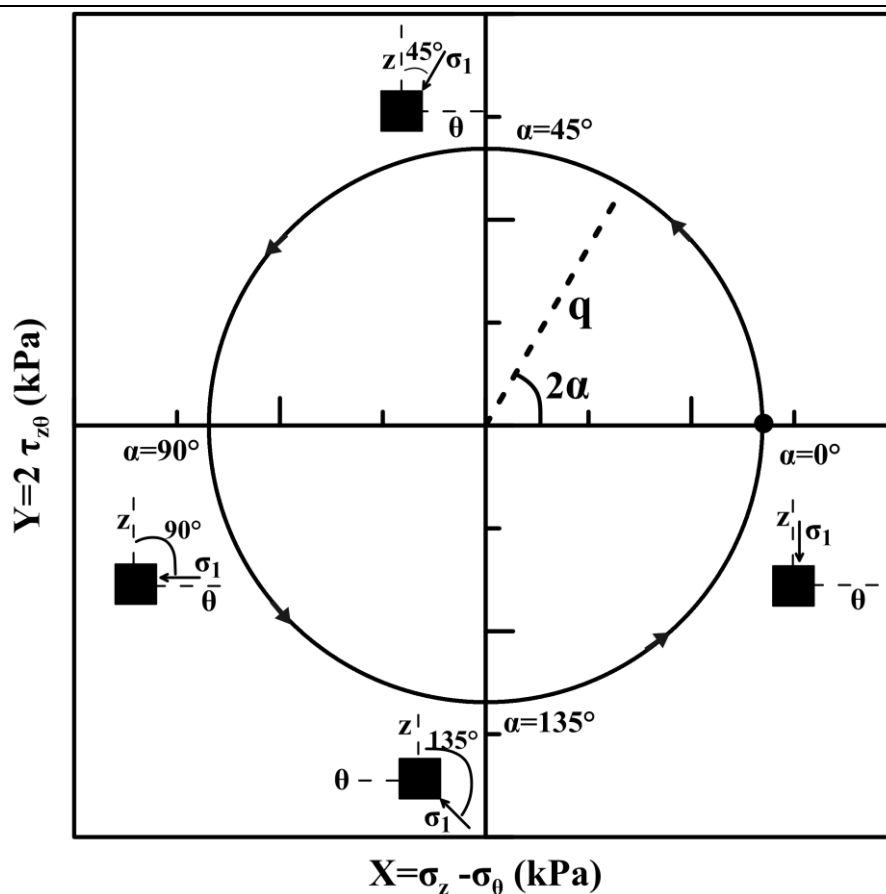
2.4.1 Εισαγωγή

Η εγγενής ανισοτροπία της αρχικής δομής των εδαφών των αμμωδών αποθέσεων που έχει αναγνωριστεί στη διεθνή βιβλιογραφία (ενότητα 2.1.2) επηρεάζει την απόκριση της άμμου υπό σύνθετες συνθήκες φόρτισης. Σε πολλά γεωτεχνικά προβλήματα οι συνθήκες φόρτισης είναι σύνθετες περιλαμβάνοντας συνεχείς αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) όσο και στη διεύθυνσή τους, π.χ. απόκλιση κατά γωνία α από την κατακόρυφο (από $\alpha=0^\circ$ σε 90°), με τυπικά παραδείγματα την κυματική φόρτιση, κυκλοφοριακά φορτία και τον σεισμό (Ishihara & Towhata, 1983; Zdravković et al., 2002; Wijewickreme & Vaid, 2008). Για τη μελέτη της επίδρασης της γωνία α στην ανισότροπη απόκριση άμμων είναι απαραίτητες οι δοκιμές που περιλαμβάνουν συνεχή στροφή των κύριων αξόνων τάσεων (continuous rotation of principal stress axes) υπό σταθερή διατμητική τάση. Η Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Δοκιμίου (HC) είναι η πλέον κατάλληλη συσκευή για την εκτέλεση αυτών των δοκιμών. Κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων μεταβάλλεται μόνο η διεύθυνση των αξόνων των κυρίων τάσεων. Η διαδρομή τάσεων στο επίπεδο $q - p$ είναι ένα σταθερό σημείο. Οι διαδρομές τάσεων απεικονίζονται συνήθως στο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης που εισήγαγαν οι Ishihara & Towhata, (1983), το οποίο είναι κατάλληλο για τα πειράματα στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου, καθώς στον κάθετο άξονα σημειώνεται η τάση $Y = 2\tau_{z\theta}$, που εκφράζει το στρεπτικό τμήμα της διάτμησης και στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η τάση $X = (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$, που εκφράζει τον όρο της αποκλίνουσας τάσης (q) που αντιστοιχεί σε τριαξονικές συνθήκες φόρτισης. Η διαδρομή τάσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι κύκλος, με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα ίση με την αποκλίνουσα τάση q , όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.31**.

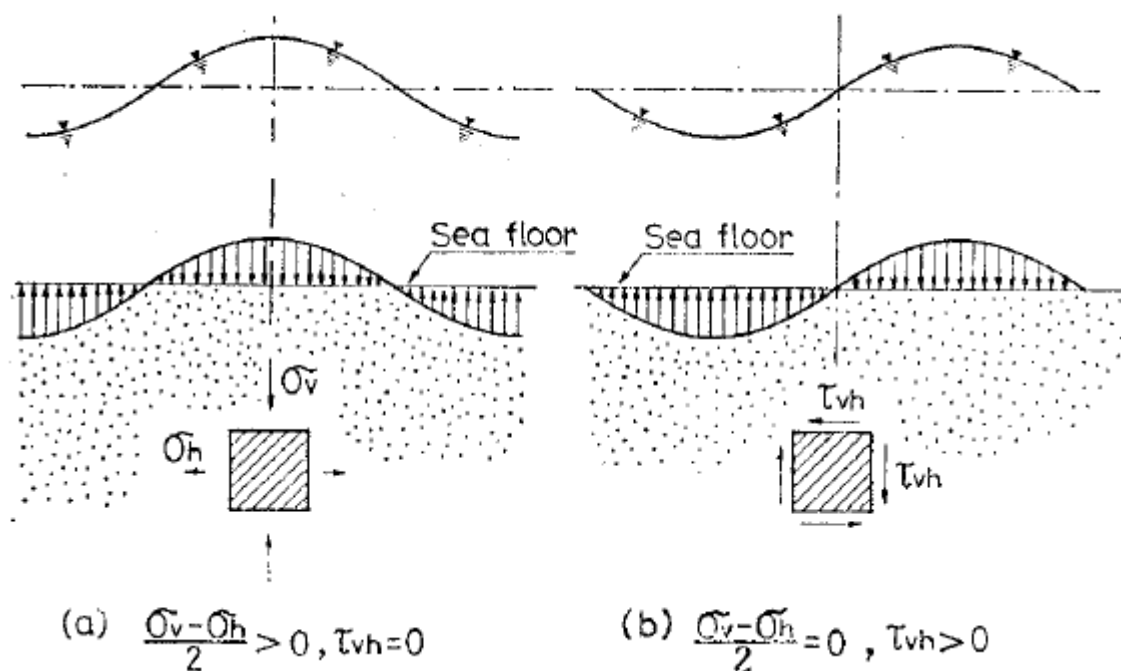
2.4.2 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης

Στις περισσότερες μελέτες της βιβλιογραφίας που περιλαμβάνουν στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων, η φόρτιση πραγματοποιείται υπό εμποδιζόμενη στράγγιση με έμφαση στην επίδραση της ανισοτροπίας στις παραμορφώσεις και την ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων κατά τη στροφή και την πρόκληση του φαινομένου της ρευστοποίησης.

Οι Ishihara & Towhata, (1983) ήταν οι πρώτοι που εξέτασαν συστηματικά την επίδραση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων στην αστράγγιστη συμπεριφορά της κορεσμένης άμμου με μία συσκευή που επέτρεπε την ανεξάρτητη εφαρμογή στρεπτικής διάτμησης από την κατακόρυφη και οριζόντια τάση σε ένα κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο. Σκοπός της έρευνας ήταν να προσομοιώσει την κυματική φόρτιση σε υποθαλάσσιες αποθέσεις (**Σχήμα 2.32**). Οι δοκιμές πλήρους στροφής ($\alpha=0^\circ-90^\circ$) εκτελέστηκαν σε άμμο



Σχήμα 2.31: Συνεχής στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων. Διαδρομή τάσεων στο επίπεδο X-Y



Σχήμα 2.32: Μεταβολή της εντατικής κατάστασης κατά την κυματική φόρτιση σε υποθαλάσσιες αποθέσεις (Ishihara & Towhata, 1983)

Τογουργα στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Παρατηρήθηκε συσσώρευση της πίεσης πόρων και σημαντική μείωση της αντοχής με την περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων παρόλο που η αποκλίνουσα τάση, q , παρέμενε σταθερή. Συνεπάγεται ότι αρκεί η μεταβολή της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων για να προκληθεί ρευστοποίηση.

Ωστόσο, η συσκευή στρεπτικής διάτμησης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα δεν προσέφερε ανεξάρτητο έλεγχο της εσωτερικής (p_i) και εξωτερικής (p_o) πίεσης του κοίλου δοκιμίου με αποτέλεσμα η παράμετρος $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, που αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , και η τιμή της μέσης ολικής τάσης, $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, να μεταβάλλονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Για την πληρέστερη μελέτη της επίδρασης της στροφής των αξόνων στην ανισότροπη συμπεριφορά της άμμου η αποκλίνουσα τάση, q , η μέση ολική τάση, p , και η παράμετρος, b , χρειάζεται να παραμένουν σταθερές ώστε να εξαλείφεται η επιρροή τους (Shibuya & Hight, 1987). Οι Symes et al. (1984) πέτυχαν στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων ($\alpha=0^\circ$ έως $\alpha=45^\circ$) διατηρώντας σταθερή την παράμετρο $b=0.5$ και τη μέση ολική τάση p σε χαλαρά και μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου. Τα δοκίμια κατά τη στροφή ανέπτυξαν υπερπίεση του υγρού των πόρων και διατμητικές παραμορφώσεις και τελικά οδηγήθηκαν στην αστοχία υπό σταθερή διατμητική τάση.

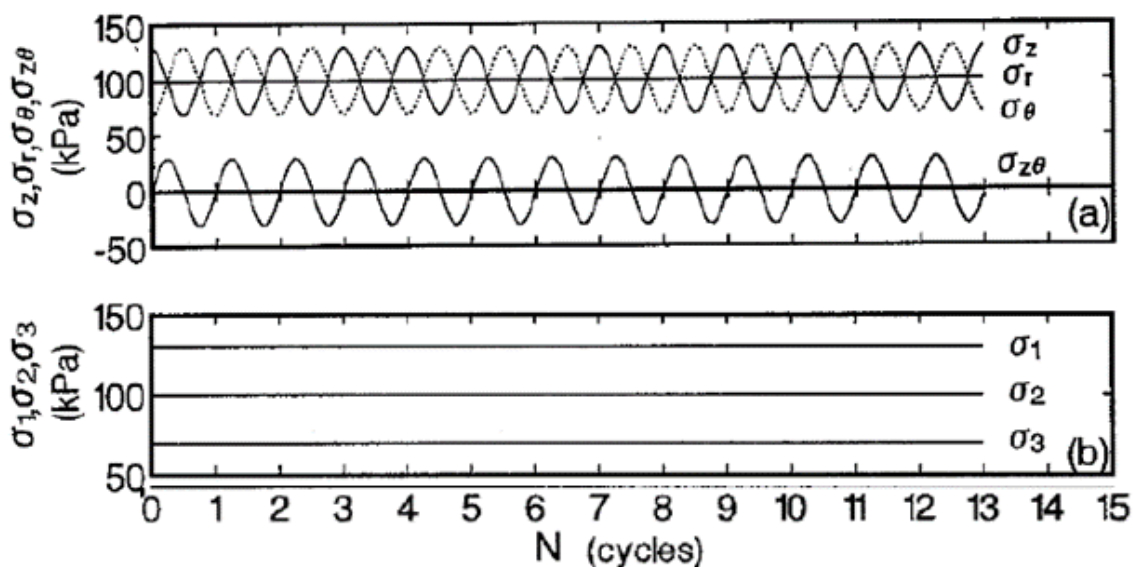
Δοκιμές πλήρους περιστροφής των αξόνων υπό αστράγγιστες συνθήκες διεξήγαγαν στη συνέχεια οι Nakata et al., (1998). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου στην άμμο Τογουργα διατηρώντας σταθερή την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$, τη μέση ολική τάση $p=100\text{kPa}$ και την αποκλίνουσα τάση q . Το μέγεθος των κύριων τάσεων διατηρείται σταθερό κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου, όπως και η ακτινική τάση ($\sigma_r=\sigma_2$), ενώ η κατακόρυφη, η εφαπτομενική και η διατμητική τάση ακολουθούν συνημιτονοειδείς και ημιτονοειδείς συναρτήσεις αντίστοιχα **Σχήμα 2.33**. Μολονότι η αποκλίνουσα τάση διατηρείται σταθερή, παρατηρείται συσσώρευση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και των επιμέρους παραμορφώσεων για τα πυκνά δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r=90\%$ (**Σχήμα 2.34 (α)**) και για τα χαλαρά δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r=30\%$ (**Σχήμα 2.34 (β)**). Στο πυκνό δοκίμιο ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του ύδατος πόρων μειώνεται μετά τον πρώτο κύκλο στροφής των κυρίων αξόνων τάσεως, ενώ οι επιμέρους παραμορφώσεις αυξάνονται σταδιακά. Το χαλαρό δοκίμιο αναπτύσσει επίσης σημαντική υπερπίεση από τον πρώτο κύκλο φόρτισης που αυξάνεται σταδιακά στους επόμενους κύκλους φόρτισης χωρίς να παρατηρείται σημαντική ανάπτυξη παραμορφώσεων, μέχρι τον 11^ο κύκλο που εμφανίζεται ασταθής συμπεριφορά. Οι παραμορφώσεις αυξάνονται ακαριαία, όπως και η υπερπίεση πόρων, έως τη ρευστοποίηση και την αστοχία του δοκιμίου.

Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν σε μια πρόσφατη μελέτη και οι Yang et al., (2007) εκτελώντας δοκιμές στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων υπό αστράγγιστες συνθήκες. Παρατήρησαν ότι για σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης, παραμέτρου ενδιάμεσης τάσης, αποκλίνουσας τάσης και πυκνότητας η στροφή της γωνία α οδηγεί σε

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

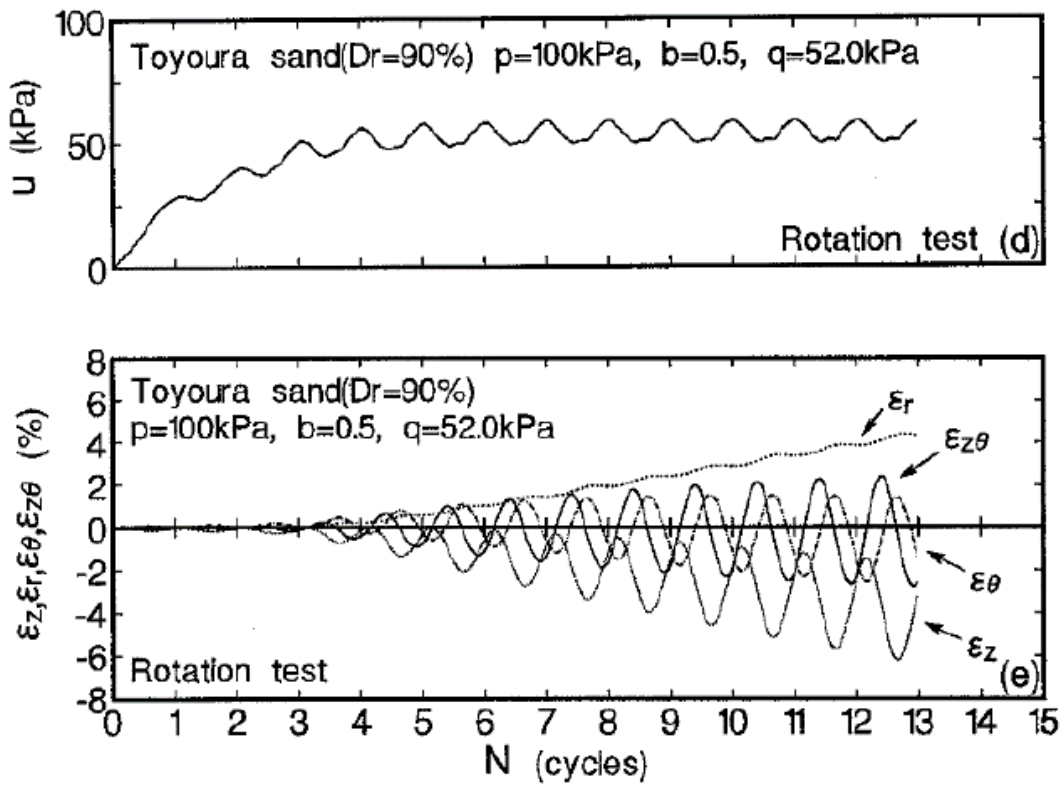
ανάπτυξη υπερπίεσης του υγρού των πόρων και συσσώρευση των παραμορφώσεων. Επισημαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της αποκλίνουσα τάσης κατά τη στροφή τόσο ασθενέστερη είναι η απόκριση του εδάφους. Συγκεκριμένα, η αύξηση της αρχικής αποκλίνουσας τάσης, που παραμένει σταθερή κατά τη στροφή, οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό συσσώρευσης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας του δοκιμίου.

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς αποδεικνύουν ότι η απόκριση της άμμου υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης δεν μπορεί να περιγραφεί από την κλασική θεωρία της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των κοκκωδών υλικών. Η επίδραση της ανισότροπης δομής στη μηχανική συμπεριφορά άμμου, που έχει αναγνωριστεί στη βιβλιογραφία, οδήγησε στην αναθεώρηση της κλασικής θεωρίας κρίσιμης κατάστασης (Roscoe et al., 1958) από τους Li & Dafalias, (2012) οι οποίοι εισήγαγαν τη Θεωρία Ανισοτροπικής Κρίσιμης Κατάστασης και τη δημιουργία νέου καταστατικού προσομοιώματος που θα λαμβάνει υπόψη την ανισότροπη δομή της άμμου υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης.

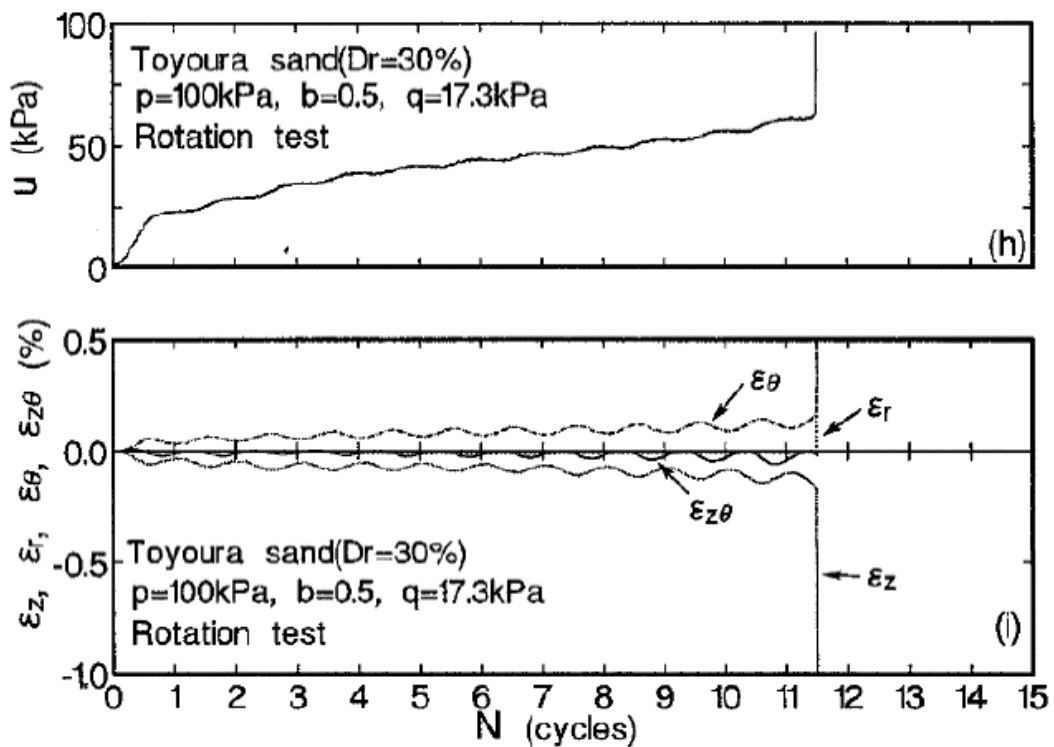


Σχήμα 2.33: Δοκιμή στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων ($b=0.5$). Εξέλιξη των επιβαλλόμενων και των κύριων τάσεων συναρτήσει των κύκλων (Nakata et al., 1998)

α)



β)



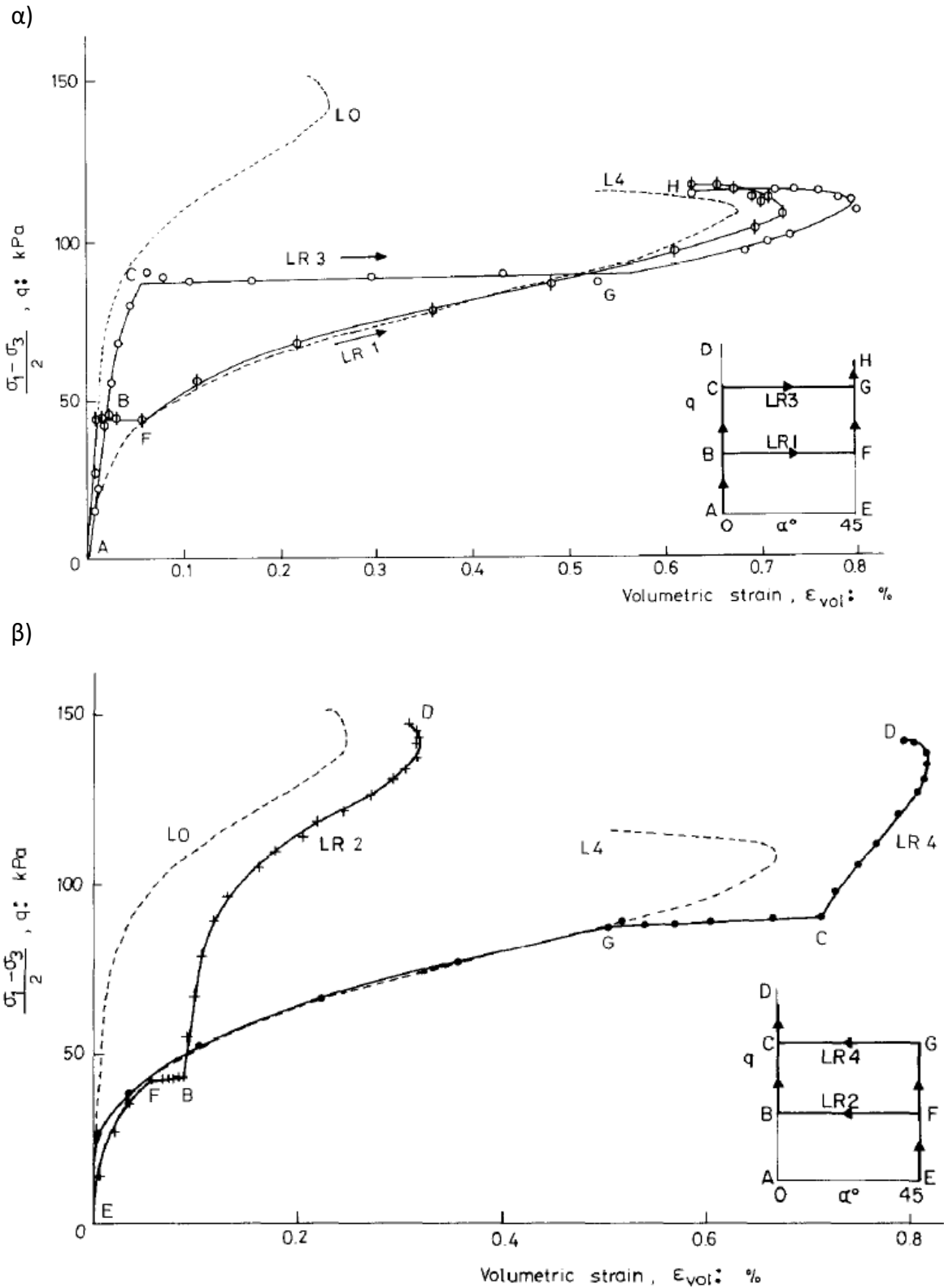
Σχήμα 2.34: Δοκιμή στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων ($b=0.5$). Εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και των επιμέρους παραμορφώσεων συναρτήσει των κύκλων: α) $D_r=90\%$ και β) $D_r=30\%$ (Nakata et al., 1998)

2.4.3 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης

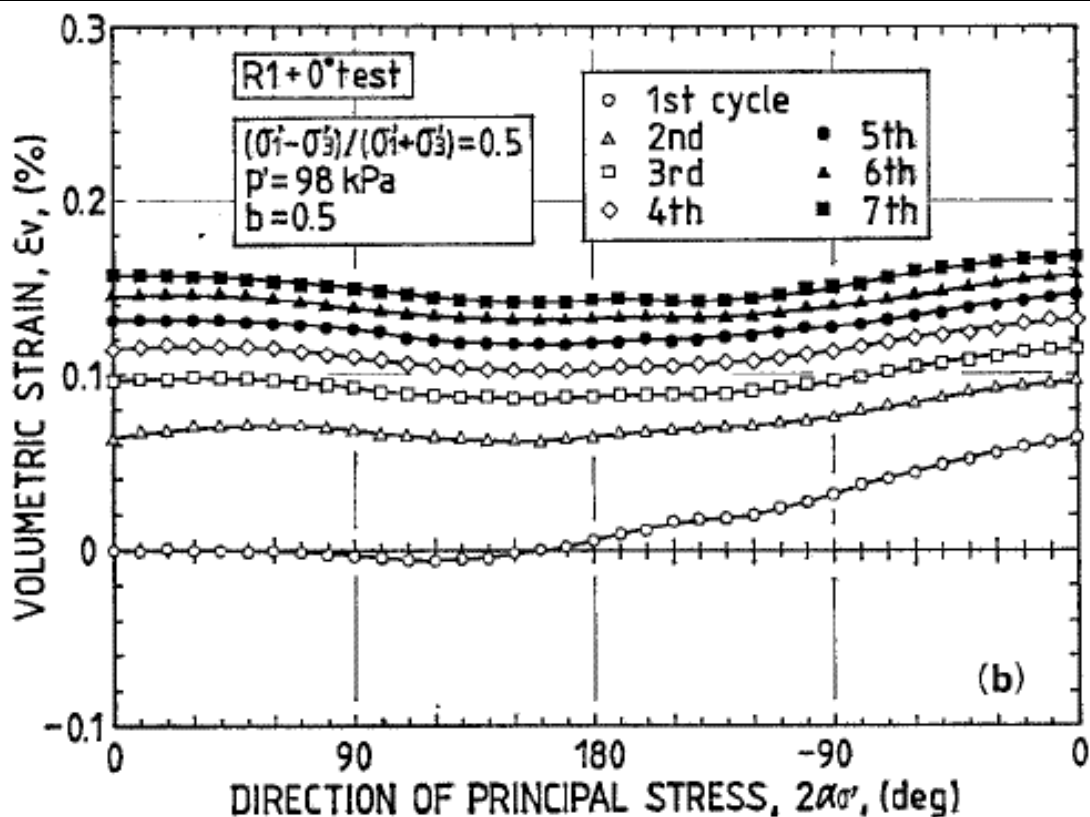
Τα αποτελέσματα των δοκιμών στροφής των αξόνων υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι βέβαια πολύ σημαντικά για την κατανόηση του ρόλου της ανισοτροπίας και την ανάγκη ένταξης της στις αναλύσεις, αλλά χωρίς τον έλεγχο της ενεργού τάσης δεν μπορεί να αποδοθεί η παρατηρούμενη ανισότροπη συμπεριφορά αποκλειστικά στην αλλαγή της δομής του δοκιμίου. Αντίθετα, στις δοκιμές που διεξάγονται υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης υπάρχει η δυνατότητα επιβολής συνεχούς στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης q , μέσης ενεργού τάσης p' και παραμέτρου b . Συνεπώς διαφορετικές παραμορφώσεις του δοκιμίου λόγω περιστροφής των αξόνων αντανακλούν διαφορετική δομή στην αρχή της δοκιμής ανάλογα με τον συνδυασμό q, p', b .

Η στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου έχει παρατηρηθεί ότι προκαλεί ανάπτυξη ογκομετρικών και διατμητικών παραμορφώσεων, ακόμη και όταν το μέγεθος των κύριων τάσεων παραμένει σταθερό (Symes et al., 1988; Vaid et al., 1990; Gutierrez et al., 1991; Wijewickreme & Vaid, 1993). Οι Symes et al., (1988) αναφέρουν ότι η μείωση του όγκου του δοκιμίου υπό σταθερή διατμητική τάση, που εμφανίζεται κατά τη στροφή, εξαρτάται από τη φορά της στροφής, με τη μεταβολή της γωνίας α από $0 \rightarrow 45^\circ$ (**Σχήμα 2.35(α)**) να προξενεί μεγαλύτερη συστολή από την περίπτωση της στροφής της γωνίας α από τις $45 \rightarrow 0^\circ$ (**Σχήμα 2.35(β)**).

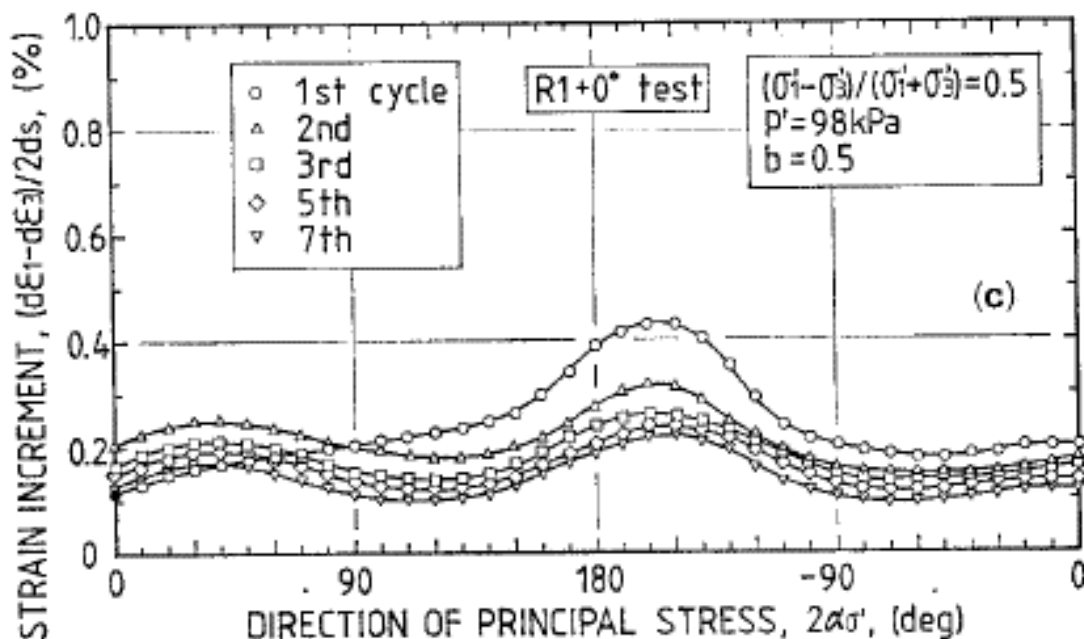
Οι Miura, Miura, et al., (1986) εκτέλεσαν πλήρεις στροφές των αξόνων των κύριων τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια πυκνής άμμου Τογουρα. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης στο νερό μέσω πολλαπλών κόσκινων (Multiple Sieving Pluviation) και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική μέση ενεργό τάση $p'=98\text{kPa}$. Στη συνέχεια, 7 πλήρεις στροφές πραγματοποιήθηκαν διατηρώντας σταθερή την παράμετρο μέσης τάσης $b=0.5$ και το λόγο διατμητικής τάσης σε 0.5 . Στο **Σχήμα 2.36** παρουσιάζεται η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης ενός πυκνού δοκιμίου κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων για 7 πλήρεις περιστροφές. Σε κάθε κύκλο παρατηρείται διακύμανση της τιμής της ογκομετρικής παραμόρφωσης με μείωση της τιμής (διαστολή) για στροφή της γωνίας α από $\alpha=90 \rightarrow 180^\circ$ και αύξηση (συστολή) για στροφή της γωνίας α από $\alpha=180 \rightarrow 0^\circ$. Γενικά παρατηρείται συσσώρευση συστολικής ογκομετρικής παραμόρφωσης σε κάθε κύκλο σε συμφωνία με τις υπόλοιπες έρευνες. Η σημαντικότερη ογκομετρική παραμόρφωση παρατηρείται στον πρώτο κύκλο φόρτισης, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός συσσώρευσης μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων. Στο **Σχήμα 2.37** παρουσιάζεται η εξέλιξη του μεγέθους της προσαυξητικής παραμόρφωσης σε σχέση με τη γωνία α κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων για ορισμένους από τους 7 κύκλους φόρτισης του πειράματος. Επισημαίνεται ότι υπάρχει έντονη μη συγγραμμικότητα των διανυσμάτων της προσαυξητικής παραμόρφωσης και της τάσης. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι το μοτίβο των καμπυλών είναι κοινό και για τους 7 κύκλους με την επίτευξη 2 μεγίστων με το μέγεθος ωστόσο, της προσαυξητικής παραμόρφωσης να μειώνεται με την αύξηση των κύκλων.



Σχήμα 2.35: Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά τη στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων με φορά στροφής της γωνίας α) $\alpha = 0 \rightarrow 45^\circ$ και β) $\alpha = 45 \rightarrow 0^\circ$ (Symes et al., 1988).



Σχήμα 2.36: Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά την πλήρη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε άμμο Τογούρα σχετικής πυκνότητας $Dr=82\%$ (K. Miura, Miura, et al., 1986)



Σχήμα 2.37: Εξέλιξη της προσαυξητικής παραμόρφωσης κατά την πλήρη περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμιο άμμου Τογούρα σχετικής πυκνότητας $Dr=82\%$ (K. Miura, Miura, et al., 1986)

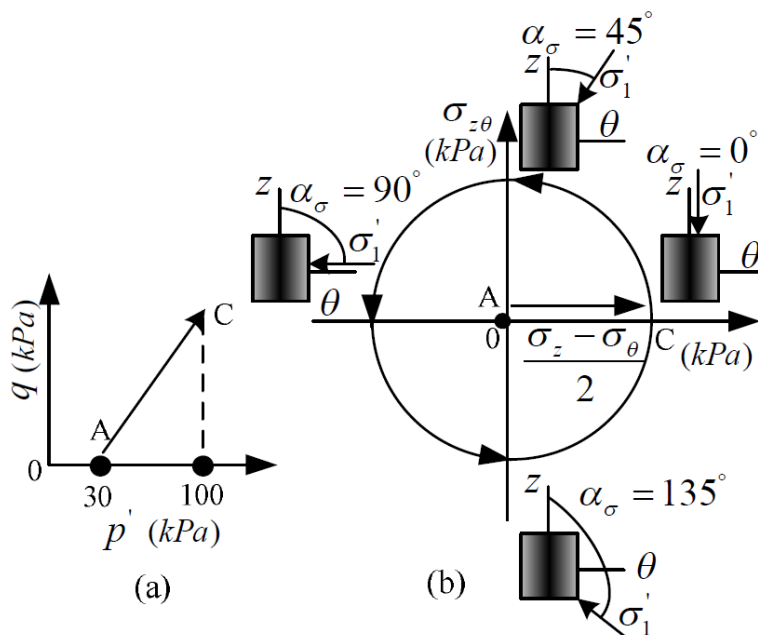
Ανάλογα αποτελέσματα σε δοκιμές στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου παρουσίασαν οι Vaid et al., 1990 σε πυκνά και χαλαρά δοκίμια άμμου Ottawa. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι η άμμος είναι εγγενώς ανισότροπη και επιπλέον τόνισαν ότι η συστολή κατά τη στροφή λαμβάνει χώρα ανεξάρτητα από την πυκνότητα των δοκιμίων. Επομένως, η αρχικά ανισότροπη δομή που δημιουργείται κατά την απόθεση της άμμου έχει σημαντική επιρροή στα μηχανικά της χαρακτηριστικά και δεν εξαλείφεται κατά την περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων.

Πιο πρόσφατα οι J.-M. Zhang et al., (2008) και οι Tong et al., (2010) διεξήγαγαν δοκιμές συνεχούς στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε μέτριας πυκνότητας και σε πυκνά δοκίμια άμμου Toyoura στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης σε νερό σε σχετική πυκνότητα $Dr=50$ και 70% και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση $p'=30\text{kPa}$ (Σημείο Α). Στη συνέχεια τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ανισότροπα σε προκαθορισμένο λόγο τάσεων q/p' (Σημείο Β). Οι δοκιμές στροφής εκτελέστηκαν με σταθερή ενεργό (p') και αποκλίνουσα τάση (q) σε διάφορες τιμές της παραμέτρου b ($b=0.1, 0.5$ και 1) και για σταθερό λόγο τάσεων $\eta=q/p'<1$ (σημεία C, D και E). Η τασική όδευση των δοκιμών παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.38** στο $q - p'$ επίπεδο και στο $Y - X$ επίπεδο.

Στο **Σχήμα 2.39** απεικονίζεται η εξέλιξη των ορθών παραμορφώσεων με τους κύκλους πλήρους στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων για τα δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $Dr=70\%$. Η παράμετρος μέσης τάσης $b=0.5$ διατηρείται σταθερή όπως και ο λόγος τάσεων $q/p'=0.866$ (**Σχήμα 2.39(α)**) και $q/p'=0.994$ (**Σχήμα 2.39(β)**). Παρόλο που το μέγεθος των κύριων τάσεων διατηρείται σταθερό αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της στροφής των αξόνων. Οι ορθές παραμορφώσεις (ϵ_z, ϵ_r και ϵ_θ) συσσωρεύονται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων, εμφανίζοντας διακύμανση στη διάρκεια κάθε κύκλου στροφής. Το μεγαλύτερο ποσοστό των παραμορφώσεων εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο, ενώ οριακά μετά τους 4 κύκλους φόρτισης φαίνεται να μην αυξάνονται περαιτέρω. Η ακτινική (ϵ_r) και η εφαπτομενική (ϵ_θ) παραμόρφωση συσσωρεύονται στις θετικές τιμές (συστολή) ενώ η κατακόρυφη (ϵ_z) στις αρνητικές τιμές (διαστολή). Αυτό οφείλεται στη διαδικασία απόθεσης της άμμου στο στάδιο παρασκευής των δοκιμίων και στην εφαρμογή της αρχικής κύριας τάσης στο κατακόρυφο (z) επίπεδο που ταυτίζεται με τη διεύθυνση της βαρύτητας. Πριν την εκκίνηση της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων η άμμος έχει μικρότερο περιθώριο συστολής και μεγαλύτερη δυνατότητα διαστολής κατά την κατακόρυφη (z) σε σχέση με την εφαπτομενική διεύθυνση θ). Με την εκκίνηση της στροφής η κατακόρυφη τάση σ_z μειώνεται ενώ αυξάνεται η εφαπτομενική τάση. Επομένως αναπτύσσεται μεγάλο ποσοστό διαστολικής κατακόρυφης παραμόρφωσης και συστολικής εφαπτομενικής παραμόρφωσης στην αρχή του πρώτου κύκλου φόρτισης. Η τιμή της ακτινικής παραμόρφωσης εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης όπως παρουσιάζεται στην επόμενη

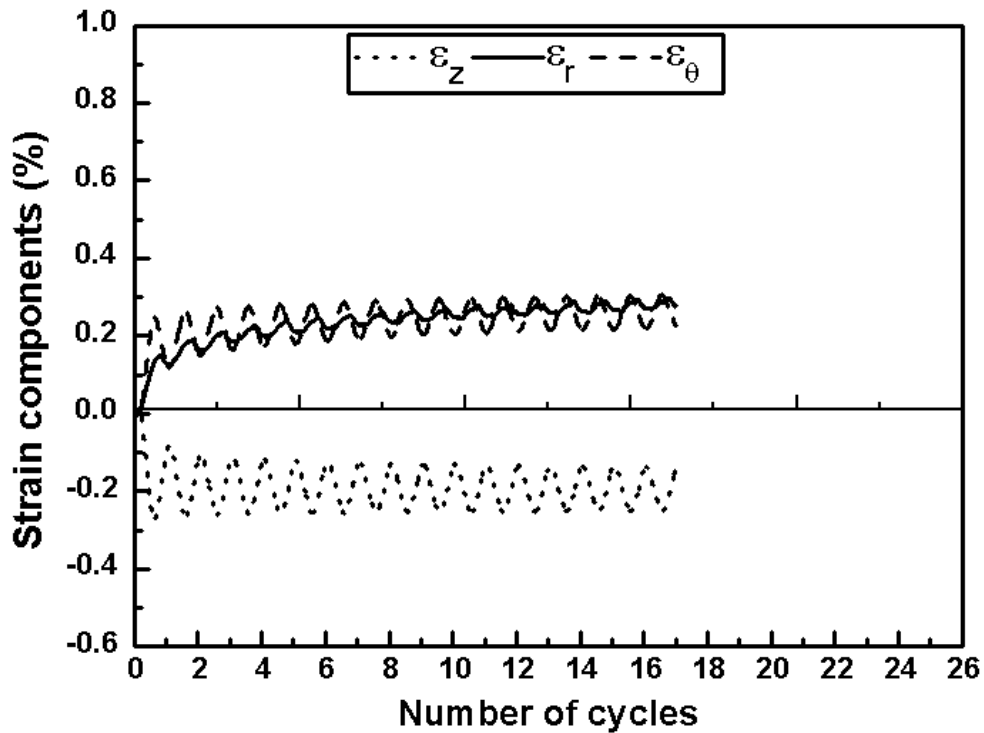
ενότητα. Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση των τιμών των ορθών παραμορφώσεων όταν αυξάνεται ο λόγος τάσεων από $q/p'=0.866$ σε 0.994 .

Η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης της άμμου Τογουρα, σχετικής πυκνότητας $Dr=70\%$, κατά τη στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.40** για διάφορες τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης τάσης, b , και για λόγο τάσεων $q/p'=0.866$ (**Σχήμα 2.40** (α)) και $q/p'=0.994$ (**Σχήμα 2.39** **Σχήμα 2.40** (β)). Επισημαίνεται από τους ερευνητές ότι συνολικά εμφανίζεται συστολή των δοκιμίων και δεν παρατηρείται εμφανής διαστολή σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των Miura, Miura, et al., (1986) και Symes et al., (1988). Η ογκομετρική παραμόρφωση συσσωρεύεται σταδιακά με την αύξηση του αριθμού των κύκλων, εμφανίζοντας μια διακύμανση (oscillation) κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου. Ωστόσο, ο ρυθμός συσσώρευσης ογκομετρικής παραμόρφωσης μειώνεται σε κάθε κύκλο με το μεγαλύτερο ποσοστό της να αναπτύσσεται στον πρώτο κύκλο φόρτισης ($N=1$). Πιο αναλυτικά, η συστολική ογκομετρική παραμόρφωση αυξάνεται σταθερά στον πρώτο κύκλο φόρτισης για αύξηση της γωνίας α από $0 \rightarrow 180^\circ$ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.41** για τη δοκιμή πλήρους στροφής στην άμμο Τογουρα, σχετικής πυκνότητας $Dr=70\%$, υπό λόγο τάσεων $q/p'=0.866$ και παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. Με την αύξηση του αριθμού των κύκλων, ενδεικτικά για $N=8$ και 15 , αρχικά αναπτύσσεται διαστολική ογκομετρική παραμόρφωση για αύξηση της γωνίας α από $0 \rightarrow 90^\circ$, ενώ στη συνέχεια η διαστολή μετατρέπεται σε συστολή. Επισημαίνεται ότι τελικά, η συνολική συστολική παραμόρφωση αυξάνεται στο τέλος κάθε κύκλου. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι ακόμη και μικρή αύξηση του λόγου τάσεων ($q/p'=0.866 \rightarrow 0.994$) οδηγεί σε σημαντική αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης ((**Σχήμα 2.40** (α)) και (**Σχήμα 2.39** **Σχήμα 2.40** (β))).

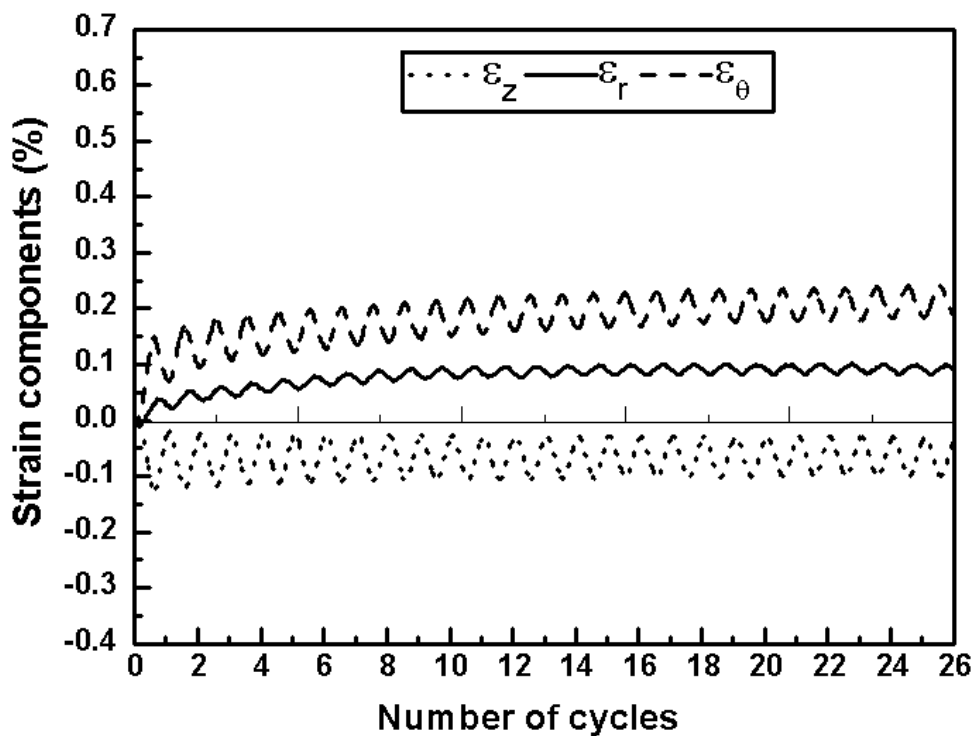


Σχήμα 2.38: Τασική όδευση των δοκιμών συνεχούς στροφής στο $q-p'$ επίπεδο και στο $Y-X$ επίπεδο (J.-M. Zhang et al., 2008; Tong et al., 2010)

α)

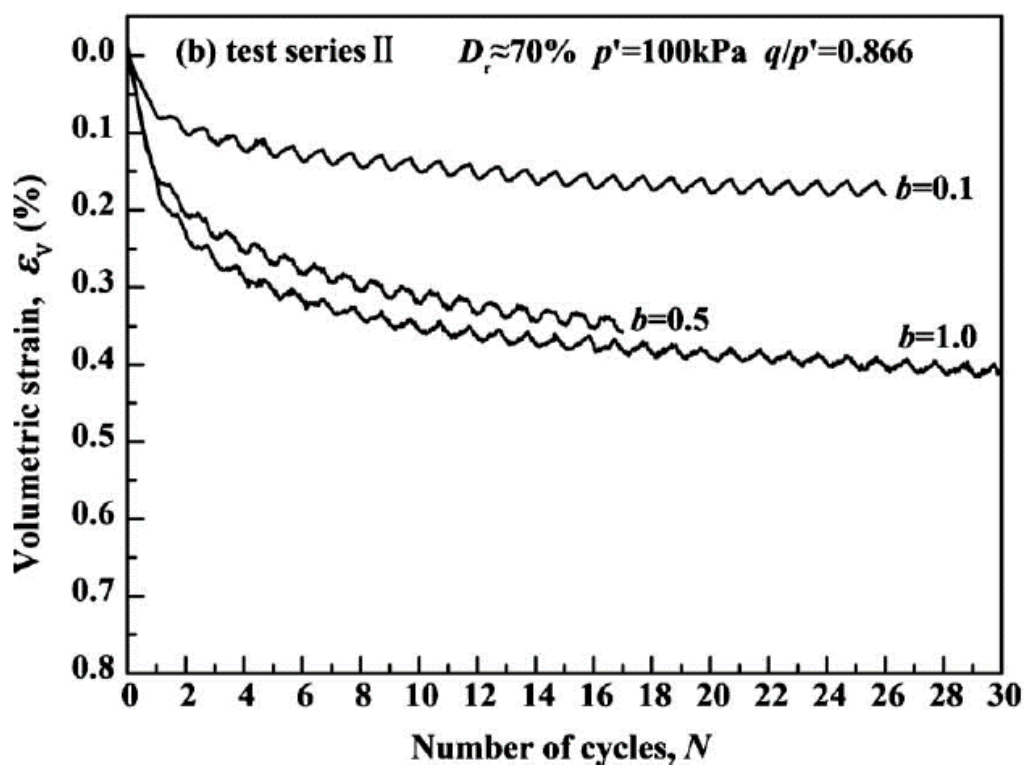


β)

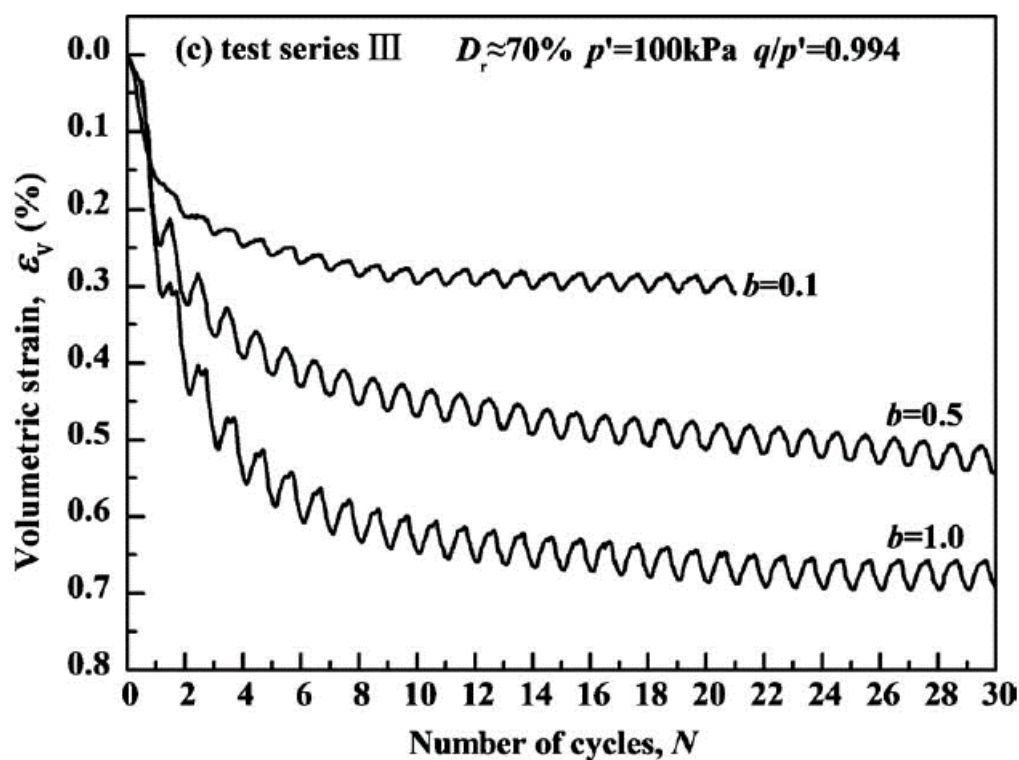


Σχήμα 2.39: Εξέλιξη των ορθών παραμορφώσεων κατά τη στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων σε δοκίμια άμμου Τογoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$ με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ και λόγο διατμητικής τάσης α) $q/p'=0.866$ και β) $q/p'=0.994$ (J.-M. Zhang et al., 2008)

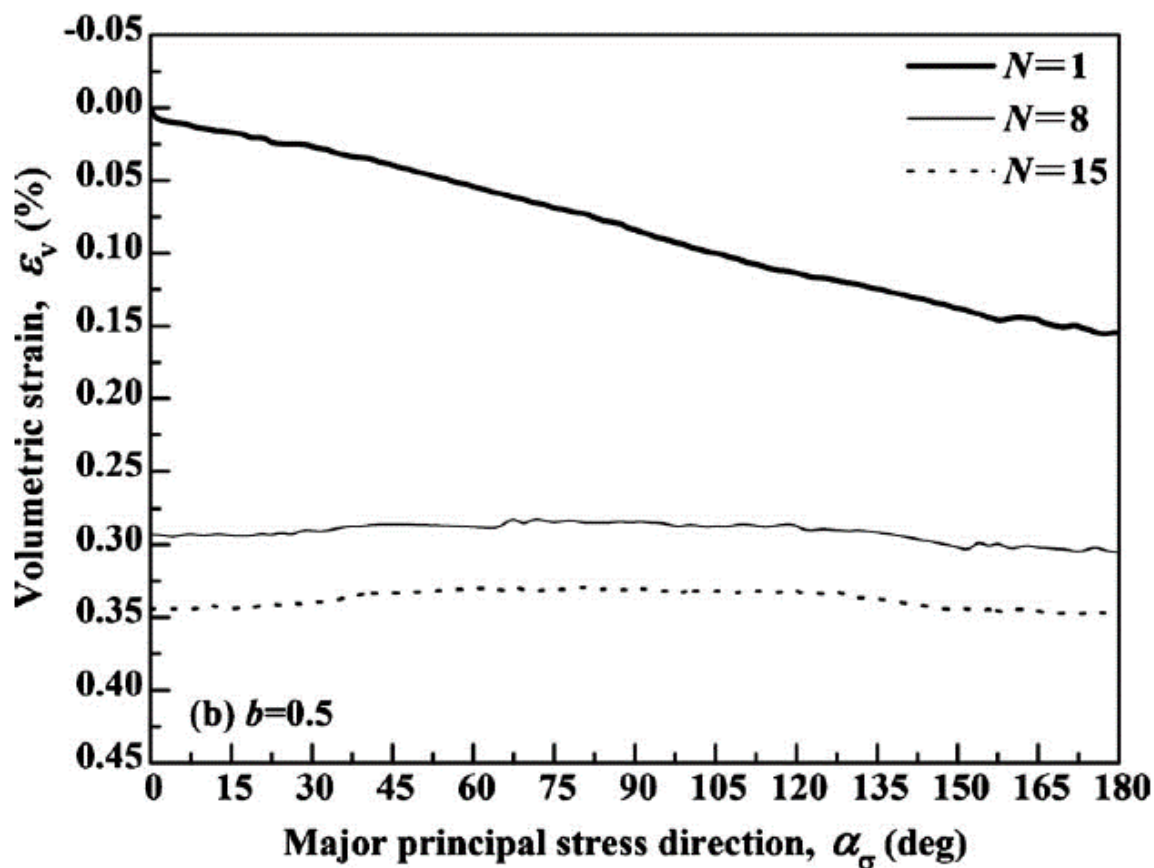
α)



β)



Σχήμα 2.40: Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά τη στροφή των κύριων αξόνων των τάσεων σε δοκίμια άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r = 70\%$ με λόγο διατμητικής τάσης α) $q/p' = 0.866$ και β) $q/p' = 0.994$ (Tong et al., 2010)



Σχήμα 2.41: Αποτελέσματα στροφής των κύριων αξόνων των τάσεων, υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, με λόγο διατμητικής τάσης $q/p'=0.866$ και τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0.5$. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με τη γωνία των κύριων αξόνων των τάσεων, α , στον κύκλο $N=1, 8$ και 15 (Tong et al., 2010)

2.5 Επίδραση της Ενδιάμεσης κύριας Τάσης

2.5.1 Ακτινική Φόρτιση

Η επίδραση του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , στην εδαφική ανισοτροπία έχει αναγνωρισθεί από τον Bishop, (1966) και μελετήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία (M. Yoshimine et al., 1998; Shibuya et al., 2003b; Z. X. Yang et al., 2007; Tong et al., 2010) μέσω δοκιμών στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο και των τριών κυρίων τάσεων. Η επίδραση του σχετικού μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, εκφράζεται από την τιμή της παραμέτρου, b ($b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$).

Οι Yoshimine et al., (1998) μελέτησαν την επίδραση της παραμέτρου b σε δοκιμές ακτινικής φόρτισης στην άμμο Toyoura, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης σε σχετική πυκνότητα $D_r=31-34\%$ και στη συνέχεια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=100\text{kPa}$. Η ακτινική φόρτιση πραγματοποιήθηκε διατηρώντας σταθερή την διεύθυνση των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό γωνία $\alpha=45^\circ$ σε διάφορες τιμές της παραμέτρου b ($b=0, 0.25, 0.5, 0.75$ και 1). Στο **Σχήμα 2.42** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε όρους αποκλίνουσας τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης (**Σχήμα 2.42(α)**) και αποκλίνουσας τάσης - μέσης ενεργού τάσης (**Σχήμα 2.42(β)**) όπου αποδεικνύεται η έντονη επίδραση του μεγέθους της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αστράγγιστη αντοχή της άμμου. Συγκεκριμένα, η αύξηση του μεγέθους της παραμέτρου b οδηγεί στην ασθενέστερη απόκριση της άμμου. Η μέγιστη αντοχή της άμμου όπως και η τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης στην οποία επιτυγχάνεται αυτή μειώνονται όσο η παράμετρος b προσεγγίζει τη μονάδα. Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση όπου ισχύει $b=1$, μετά το σημείο παροδικού μεγίστου παρατηρείται πτώση της αντοχής της άμμου με ταυτόχρονη συσσώρευση μονότονης διατμητικής παραμόρφωσης και υπερπίεσης του υγρού των πόρων έως πρακτικά το μηδενισμό της αντοχής (μονότονη ρευστοποίηση). Αντίστοιχα συμπεράσματα αναφέρουν και οι (Shibuya et al., 2003a) που μελέτησαν την επιρροή της παραμέτρου b στην ισότροπα στερεοποιημένη, χαλαρή άμμο Ham river υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου διατηρώντας σταθερή τη γωνία $\alpha=45^\circ$ σε τιμές της παραμέτρου $b=0, 0.5$ και 1 . Όπως παρατηρήθηκε και στις δοκιμές των Yoshimine et al. (1998) η αύξηση της παραμέτρου b για σταθερή γωνία α οδηγεί σε μείωση της αντοχής της άμμου. Ωστόσο, η επιρροή της παραμέτρου b είναι λιγότερο έντονη στην άμμο Ham river σε σχέση με την άμμο Toyoura.

Οι Lade, (2008), Lade et al., (2008 και 2009) διερεύνησαν την επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , στη γωνία μέγιστης διατμητικής αντοχής, ϕ . Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε άμμο Santa Monica σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$ στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Στο **Σχήμα 2.43** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών με συμπαγή σύμβολα και τα αποτελέσματα του κριτήριου αστοχίας για ανισότροπη άμμο (Lade, 2008) με συνεχή

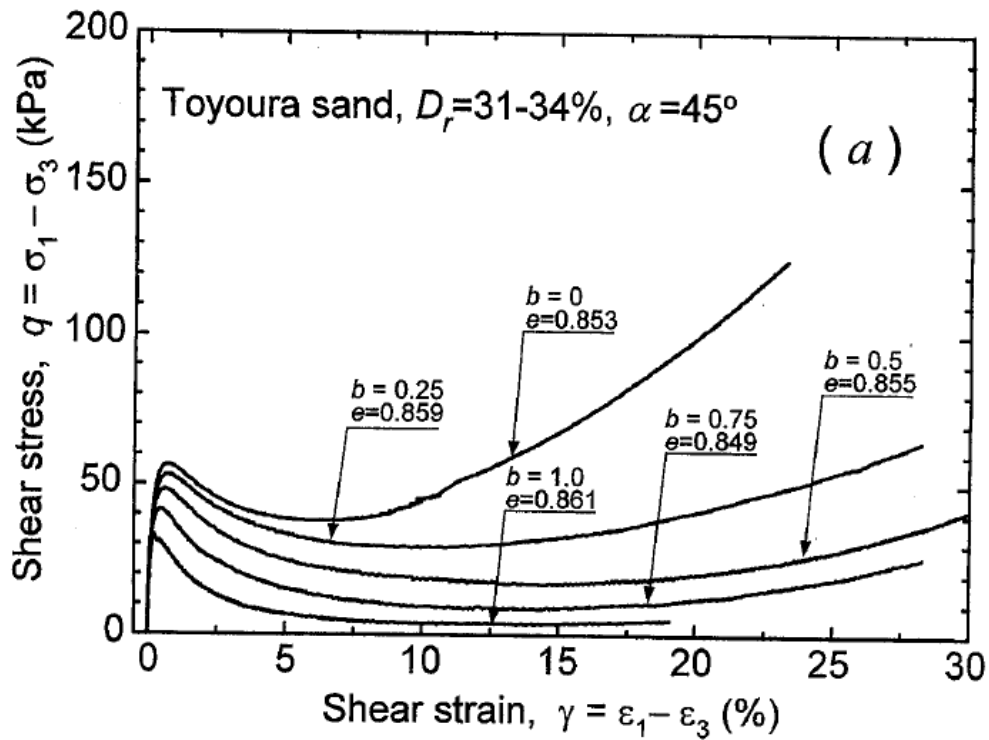
γραμμή. Παρατηρείται αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής από τις αξονοσυμμετρικές συνθήκες ($b=0$) ως της συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ($b=0.2-0.3$). Ωστόσο, τα αποτελέσματα των δοκιμών εμφανίζουν έντονη διακύμανση ειδικά σε υψηλότερες τιμές της παραμέτρου b . Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι οι δοκιμές της έρευνας δεν εκτελέστηκαν με ανεξάρτητο έλεγχο της εσωτερικής, ρ_i , και της εξωτερικής πίεσης, ρ_o , της κυψέλης. Για τη συνθήκη όπου $\rho_o=\rho_i$ η γωνία α και η παράμετρος b συνδέονται μοναδικά με τη σχέση (2-38).

$$b = \sin^2 \alpha$$

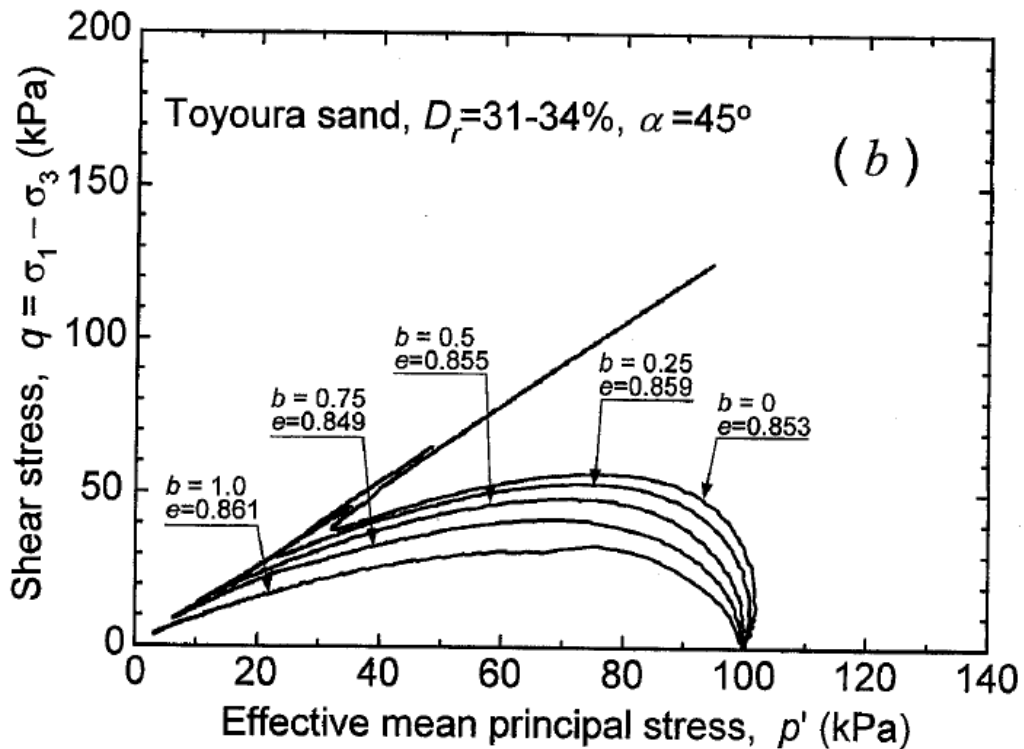
(2-38)

Πιο πρόσφατα οι L.-T. Yang et al., (2016) εκτέλεσαν δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια πυκνής άμμου Leighton Buzzard μελετώντας την επιρροή της γωνίας α και της παραμέτρου b στο μέγιστο λόγο τάσεων $\eta=q/p'$ και στη μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ . Παρατηρήθηκε ότι για οποιαδήποτε τιμή της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί σε πτώση του μέγιστου λόγου τάσεων $\eta=q/p'$. Αντίθετα, η γωνία ϕ αυξάνεται για τιμές της παραμέτρου $b=0 \rightarrow 0.5$, ενώ μειώνεται για τιμές της παραμέτρου $b=0.5 \rightarrow 1$.

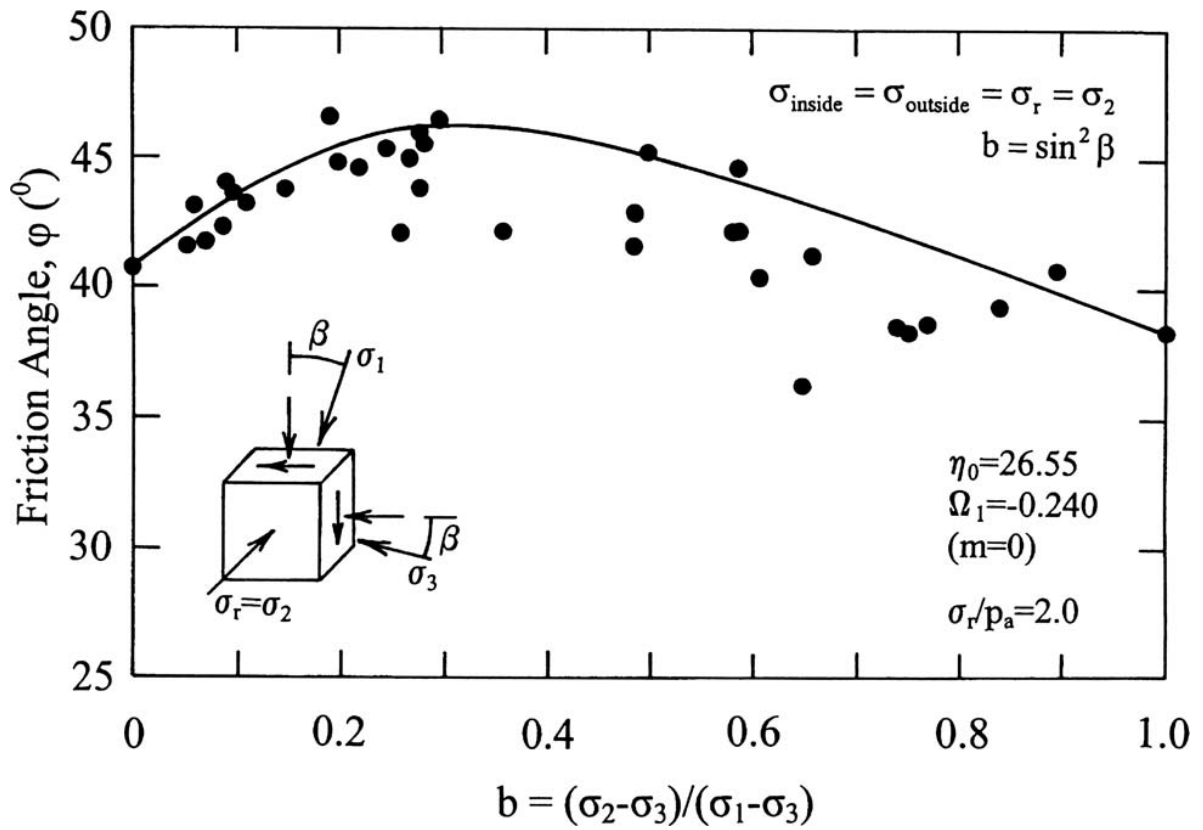
α)



β)

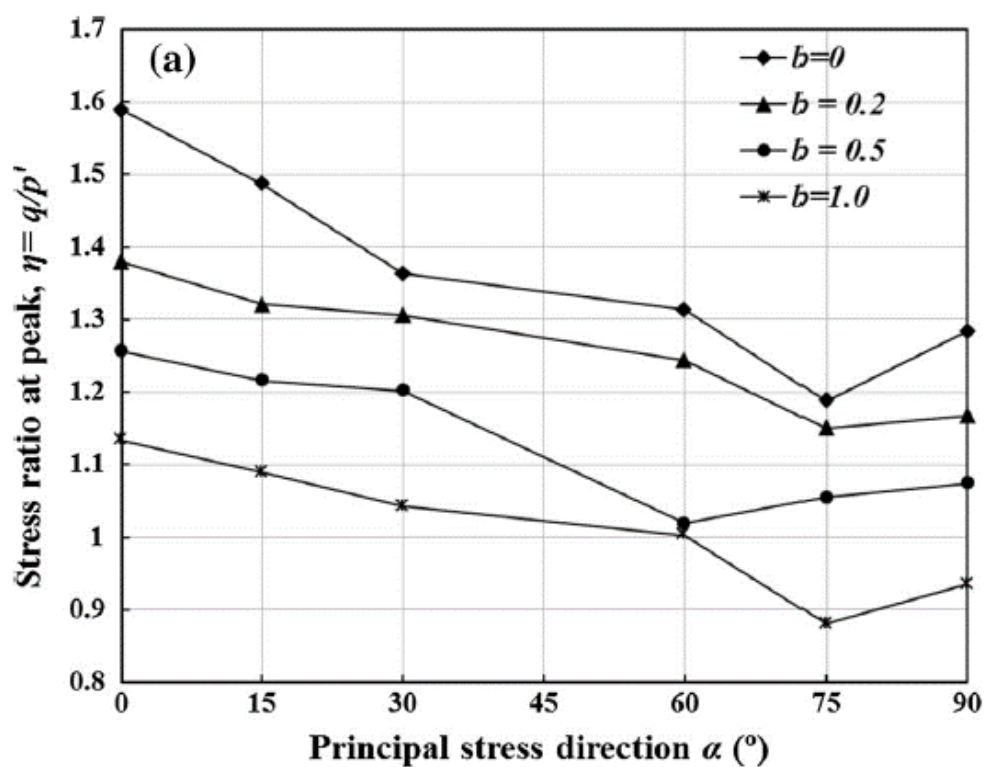


Σχήμα 2.42: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της άμμου Τογούρα σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης με σταθερή γωνία $\alpha = 45^\circ$ υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: α) Καμπύλες αποκλίνουσας τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης και β) διαδρομές ενεργών τάσεων (M. Yoshimine et al., 1998)

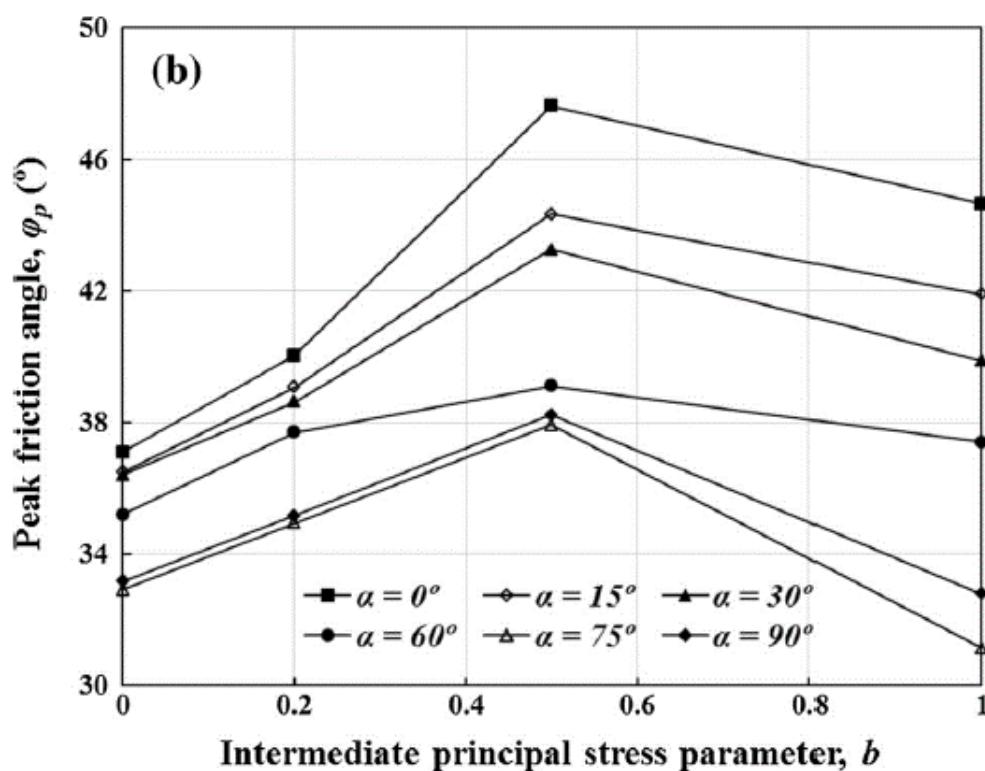


Σχήμα 2.43: Συσχέτιση μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής, ϕ , με την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, b (Lade, 2008; Lade et al., 2008, 2009)

α)



β)



Σχήμα 2.44: Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου b στη μέγιστη αντοχή της άμμου Leighton Buzzard: α) μέγιστος λόγος τάσεων η - γωνία α και β) μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ_p - παράμετρος b (L.-T. Yang et al., 2016)

2.5.2 Συνεχής στροφή των αξόνων

Οι λιγοστές έρευνες της βιβλιογραφίας που περιλαμβάνουν δοκιμές συνεχούς περιστροφής των αξόνων των κύριων τάσεων (stress principal axis rotation) υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, συνήθως εκτελούνται χωρίς ανεξάρτητο έλεγχο της παραμέτρου b (Ishihara & Towhata, 1983) ή διατηρώντας τη σταθερή σε μία μοναδική τιμή, $b=0.5$ (Symes et al., 1984; Nakata et al., 1998). Πιο πρόσφατα, οι Z. X. Yang et al., (2007) εξέτασαν την επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της άμμου Toyoura σε δοκιμές συνεχούς περιστροφής των αξόνων στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλίνδρου υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r=70$ και 90% στερεοποιήθηκαν ανισότροπα ($p'=100$ kPa, $q=34.65$ ή $51,96$ kPa) και υποβλήθηκαν σε συνεχή περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση q , μέση ολική τάση p και παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0, 0.5$ ή 1 . Για να περιορίσουν τις ανομοιομορφίες στην κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στα κοίλα δοκίμια, ειδικά όταν η εσωτερική και η εξωτερική πίεση της κυψέλης διαφέρουν ($p_o \approx p_i$), οι ερευνητές εκτέλεσαν τις δοκιμές υπό λόγο εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης στα αποδεκτά όρια $0.75 < p_o/p_i < 1.3$ (Gutierrez et al., 1991; Nakata et al., 1998). Κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση $q=34.65$ kPa, εμφανίζεται συσσώρευση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων, παρόλο που το μέγεθος των κύριων τάσεων διατηρείται σταθερό. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης επηρεάζει έντονα το ρυθμό ανάπτυξης της υπερπίεσης, με το μικρότερο ρυθμό συσσώρευσης να εντοπίζεται όταν $b=0$ (**Σχήμα 2.45**). Η αύξηση της παραμέτρου b επισπεύδει το ρυθμό ανάπτυξης της υπερπίεσης του νερού, μειώνει την αντοχή της άμμου και την οδηγεί στην αστοχία, υποδεικνύοντας το σημαντικό ρόλο της ενδιάμεσης κύριας τάσης, η οποία αγνοείται στις κλασικές δοκιμές. Η εξέλιξη της διατμητικής ($\varepsilon_{z\theta}$) και της ακτινικής (ε_r) παραμόρφωσης των παραπάνω δοκιμών άμμου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.46**. Στις περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκε αστοχία, $b=0.5$ (**Σχήμα 2.46** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 2.46** (γ)), οι παραμορφώσεις αυξάνονται ξαφνικά στον 33° και στον 37° κύκλο αντίστοιχα. Αντίθετα, στη δοκιμή όπου $b=0$ δεν εμφανίστηκε ραγδαία αύξηση των παραμορφώσεων, αλλά σταθερή διακύμανση κατά τη διάρκεια κάθε στροφής. Επομένως, η παράμετρος b που εκφράζει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης επηρεάζει έντονη την παραμορφωσιακή απόκριση της άμμου κατά τη στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης.

Στην έρευνα των Tong et al., (2010) μελετήθηκε η επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της άμμου Toyoura υπό συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων και συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Συγκρίνοντας δοκίμια ίδιας σχετικής πυκνότητας ($D_r=70\%$), παρατηρούμε ότι η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης με τον αριθμό των κύκλων επηρεάζεται έντονα από την τιμή της παραμέτρου b (**Σχήμα 2.40**).

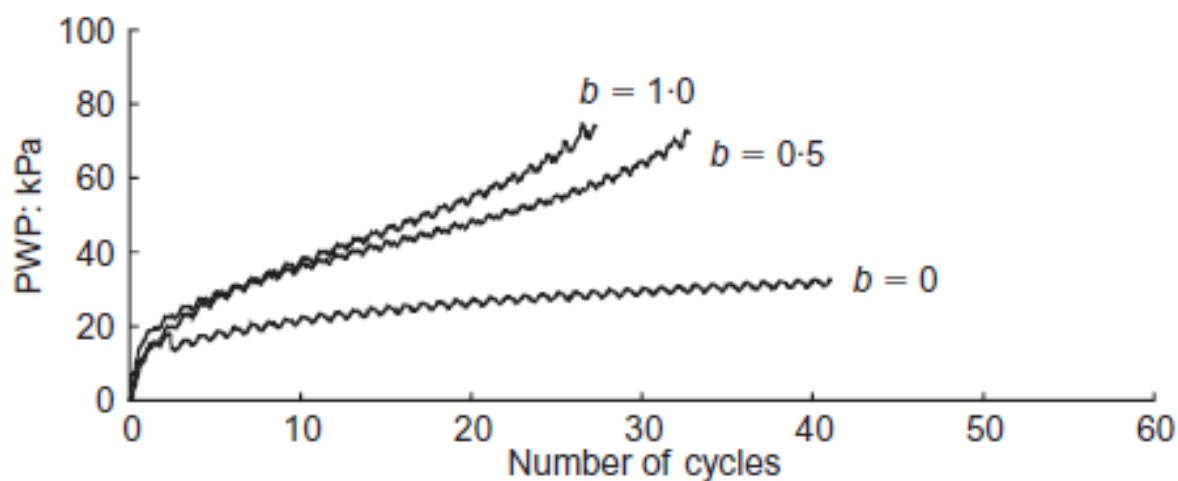
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Συγκεκριμένα, η ογκομετρική παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη στροφή αυξάνεται με την αύξηση της παραμέτρου b ενώ οι υπόλοιπες συνθήκες φόρτισης των δοκιμών είναι κοινές. Εφόσον η ογκομετρική παραμόρφωση στις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης συσχετίζεται με την εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων, τα αποτελέσματα της έρευνας είναι σύμφωνα με αυτά των δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (Z. X. Yang et al., 2007) όπου ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων εμφανίζεται πιο αγρός όταν ισχύει $b=0$ σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου $b=0.5$ και 1 . Επισημαίνεται ότι η επίδραση της παραμέτρου b στη μη συγγραμμική απόκριση δε φαίνεται σημαντική ειδικά με την αύξηση του αριθμού των κύκλων (N).

Στο **Σχήμα 2.47** παρουσιάζεται η εξέλιξη των ορθών παραμορφώσεων με τους κύκλους πλήρους στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων για τα δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $Dr=70\%$, υπό λόγο τάσεων $q/p'=0.866$ για τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.1$ (**Σχήμα 2.47(α)**), $b=0.50$ (**Σχήμα 2.47(β)**) και $b=1$ (**Σχήμα 2.47(γ)**). Παρόλο που το μέγεθος των κύριων τάσεων διατηρείται σταθερό αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της στροφής των αξόνων. Οι ορθές παραμορφώσεις (ϵ_z , ϵ_r και ϵ_θ) συσσωρεύονται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων, εμφανίζοντας διακύμανση στη διάρκεια κάθε κύκλου στροφής. Το μεγαλύτερο ποσοστό των παραμορφώσεων εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο, ενώ μετά τους 4-6 κύκλους φόρτισης φαίνεται να μην αυξάνονται περαιτέρω. Η επιρροή της παραμέτρου b είναι ιδιαίτερα σημαντική στην εξέλιξη των παραμορφώσεων. Συγκριμένα, η κατακόρυφη παραμόρφωση (ϵ_z) αναπτύσσεται στο διαστολικό τμήμα (αρνητικές τιμές) όταν $b=0.1, 0.5$ και 1 , με την απόλυτη τιμή της παραμόρφωσης να αυξάνεται με την αύξηση της παραμέτρου b . Η τιμή του διπλού πλάτους της κατακόρυφης παραμόρφωσης μειώνεται μετά του πρώτους κύκλους εξαιτίας της συμπύκνωσης του δοκιμίου. Αντίστοιχα, η εφαπτομενική παραμόρφωση αναπτύσσεται στο συστολικό τμήμα (θετικές τιμές) και στις τρεις περιπτώσεις, με το μικρότερο μέγεθος της να παρατηρείται όταν $b=1$. Επισημαίνεται ότι η ακτινική παραμόρφωση (ϵ_r) αναπτύσσεται στο διαστολικό τμήμα όταν $b=0.1$, ενώ για $b=0.5$ και $b=1$ στο συστολικό τμήμα. Επομένως, η κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης ($\epsilon_r=0$) θα επιτυγχανόταν για τιμή της παραμέτρου b στο εύρος $0.1 < b < 0.5$.

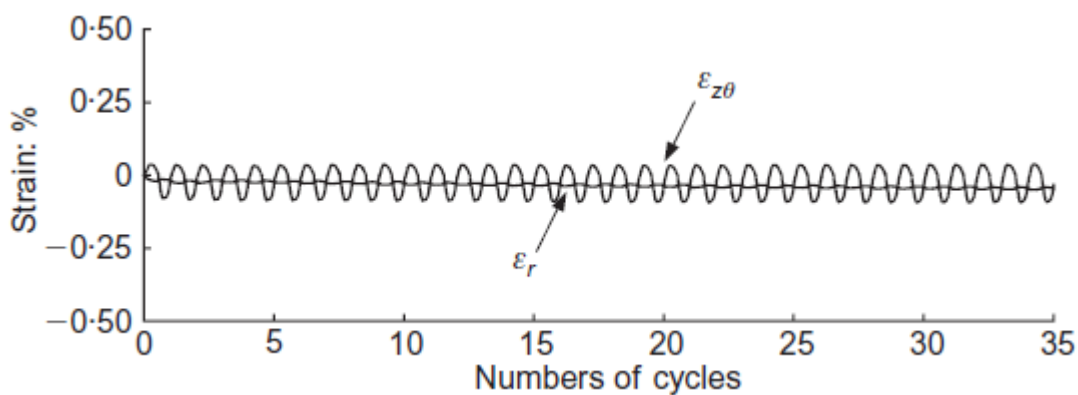
Στο **Σχήμα 2.48** παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου διάτμησης ως προς το αρχικό μετρό διάτμησης (G_j/G_1) της άμμου Toyoura υπό συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων και συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Το τέμνον μέτρο διάτμησης G_j υπολογίζεται ενώνοντάς τις μέγιστες τιμές αποκλίνουσας τάσης σε κάθε κύκλο όπως φαίνεται από το ένθετο διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης. Συγκρίνοντας δοκίμια ίδιας σχετικής πυκνότητας ($Dr=50\%$) υπό σταθερό λόγο τάσεων $q/p'=0.693$ και μέση ενεργό τάση $p'=100$ kPa, παρατηρούμε ότι η εξέλιξη του μέτρου διάτμησης με τον αριθμό των κύκλων επηρεάζεται έντονα από την τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b . Παρατηρούμε ότι ο λόγος του μέτρου διάτμησης (G_j/G_1) αυξάνεται σταδιακά με τον αριθμό των κύκλων, εξαιτίας της συμπύκνωσης που υφίσταται το δοκίμιο κατά τη

στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων, ενώ ο μέγιστος ρυθμός αύξησης του λόγου διάτμησης, G_j/G_1 , επιτυγχάνεται στον πρώτο κύκλο. Η επιρροή της παραμέτρου b είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η συσσωρευμένη τιμή του λόγου του μέτρου διάτμησης (G_j/G_1) αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους της παραμέτρου ενδιάμεσης τάσης b . Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στην μεγαλύτερη συστολική ογκομετρική παραμόρφωση και τελικά συμπύκνωση του δοκιμίου, που επιφέρει η αύξηση του μεγέθους της παραμέτρου b . Τέλος, οι ερευνητές αναφέρουν ότι η επίδραση της παραμέτρου b στη μη συγγραμμικότητα της άμμου δεν είναι τόσο σημαντική και μάλιστα εξασθενεί με το πέρασ των κύκλων.

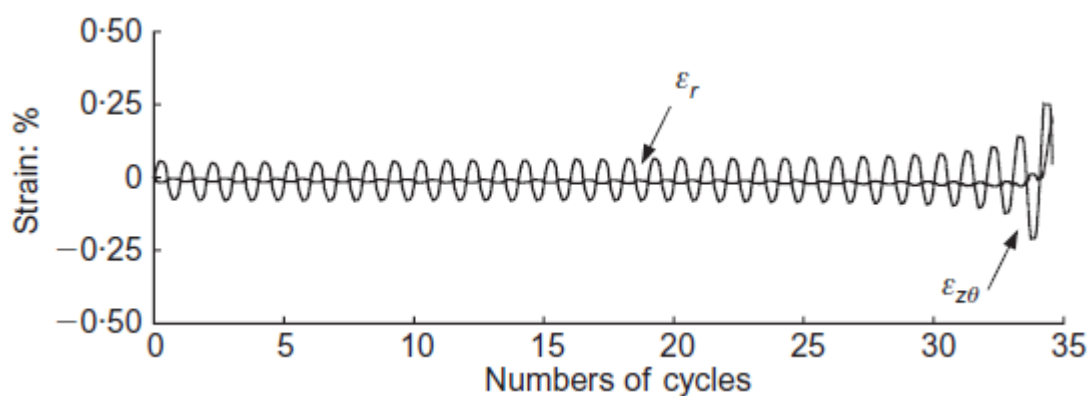


Σχήμα 2.45: Εξέλιξη της υπερπίεσης του ύδατος των πόρων κατά τη συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμια άμμου Toyoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση $q=34.65\text{kPa}$ σε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης: α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ (Z. X. Yang et al., 2007)

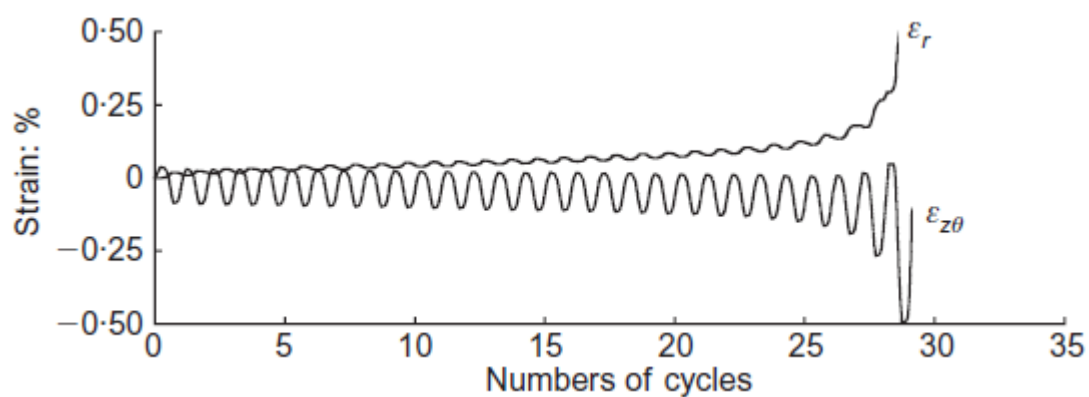
α)



β)



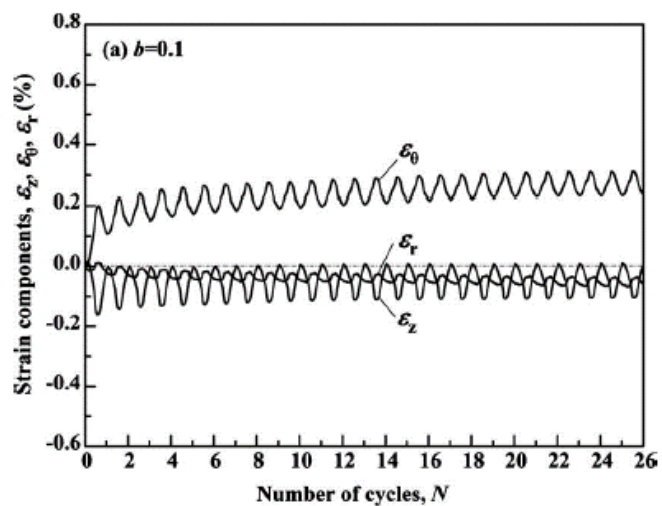
γ)



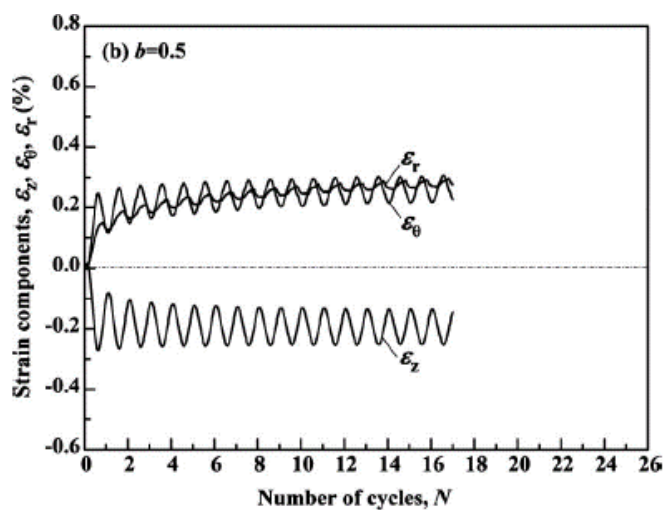
Σχήμα 2.46: Εξέλιξη της διατμητικής ($\epsilon_{z\theta}$) και της ακτινικής (ϵ_r) παραμόρφωσης κατά τη συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμια άμμου Τογoura σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης,

σταθερή αποκλίνουσα τάση $q=34.65\text{kPa}$ και τιμή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης: α) $b=0$, $b=0.5$ και γ) $b=1$ (Z. X. Yang et al., 2007)

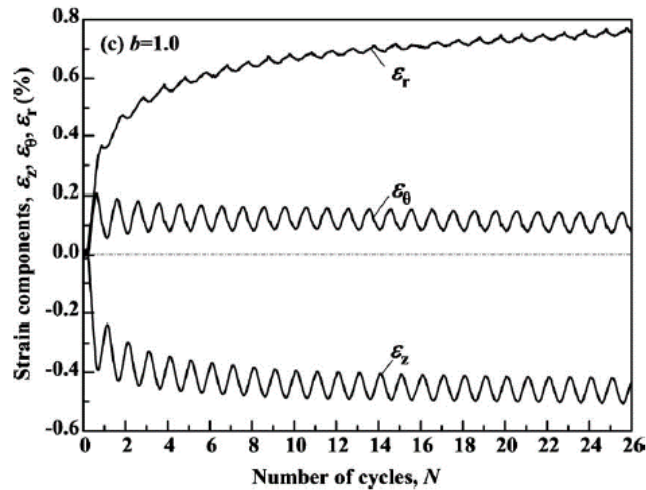
α)



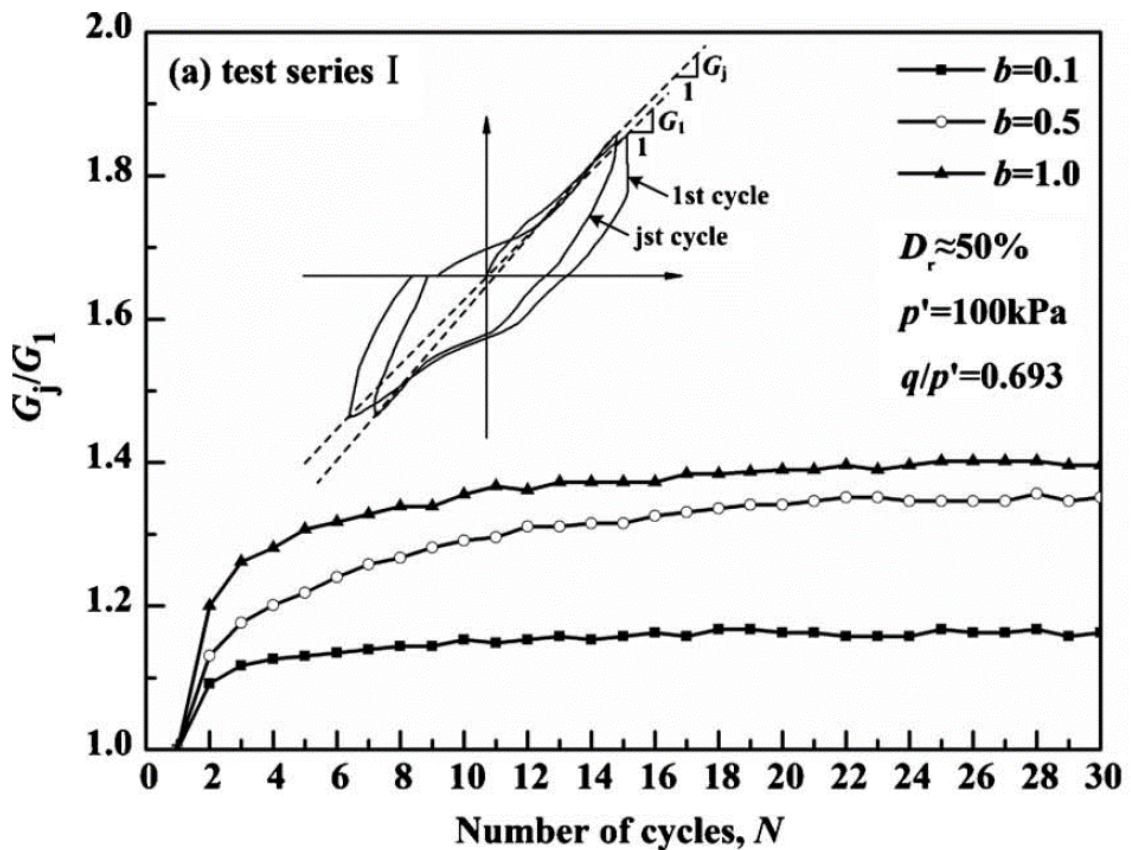
β)



γ)



Σχήμα 2.47: Εξέλιξη των ορθών παραμορφώσεων άμμου Τογουρα σχετικής πυκνότητας $D_r=70\%$ σε δοκιμές συνεχούς στροφής υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης με λόγο τάσεων $q/p'=0.866$ και με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης: α) $b=0.1$ β) $b=0.5$ και γ) $b=1$ (Tong et al., 2010)



Σχήμα 2.48: Εξέλιξη του μέτρου διάτμησης της άμμου Τογουρα, σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ σε δοκιμές συνεχούς στροφής, υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, με λόγο τάσεων $q/p'=0.693$ και με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.1$, 0.5 και 1 (Tong et al., 2010)

2.6 Εισαγωγή στις Μεθόδους Βελτίωσης Εδαφών

2.6.1. Εισαγωγή

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχαλίκων, άμμων, μιγμάτων αμμοϊλύων, μη-πλαστικών ιλύων) κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στην ανωδομή, έως και την πλήρη αστοχία. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται όταν επιβάλλονται δυναμικές φορτίσεις υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, όπως οι σεισμικές διεγέρσεις, σε κορεσμένους μη συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς προκαλώντας τη ραγδαία αύξηση της πίεσης του υγρού των πόρων που οδηγεί σε συσσώρευση παραμορφώσεων και σε μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Τα καταστροφικά αποτελέσματα του φαινομένου της ρευστοποίησης, υλικές ζημιές και απώλειες ανθρώπινης ζωής, έχουν καταγραφεί από ερευνητές σε παλιότερους αλλά και σε πιο πρόσφατους σεισμούς (π.χ. Niigata 1964, (H. Seed & Idriss, 1967), Kobe 1995 (Finn et al., 1996; Inagaki et al., 1996), Christchurch 2011 (Cubrinovski, 2011), Palu 2018 (Bradley et al., 2019) κ.ά.).

Η αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών μπορεί να επιτευχθεί με μία σειρά από καθιερωμένες μεθοδολογίες βελτίωσης του εδάφους (H. B. Seed & Lee, 1966) πριν την κατασκευή του κτιρίου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ρευστοποιήσιμου εδάφους (Idriss & Boulanger, 2008). Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται συνήθως στη συμπύκνωση (π.χ. δυναμική συμπύκνωση, βαθιά δονητική συμπύκνωση), στην αύξηση της ενεργού τάσης μέσω της προφόρτισης, στη σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) ή την αποτόνωση των σεισμικών υπερπιέσεων πόρων (π.χ. χαλικο-

στραγγιστήρια) και έχουν εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο (Donovan et al., 1984; Mayne et al., 1984; Maher et al., 1994).

Οι παραπάνω μέθοδοι προσφέρουν άμεσο έλεγχο της πυκνότητας του εδάφους, αλλά συνήθως δεν μπορούν να εφαρμοσθούν σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών. Η αδυναμία εφαρμογής τους συνίσταται είτε στην έλλειψη επαρκούς χώρου για την τοποθέτηση του απαιτούμενου εξοπλισμού (π.χ. σε συνεχή αστική δόμηση ή στο μέσο της κάτοψης του κτιρίου) ή σε πιθανές δομικές αστοχίες που μπορούν να προκληθούν στην κατασκευή από τη χρήση δονητικών ή δυναμικών μεθόδων βελτίωσης. Επιπλέον, το κόστος εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων είναι απαγορευτικό σε μεγάλης έκτασης περιοχές με υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης. Για αυτούς τους λόγους, σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών οι πλέον συνήθεις μεθοδολογίες βελτίωσης έναντι σεισμικής ρευστοποίησης είναι η τοποθέτηση μικροπασσάλων (underpinning ή micropiles), η εισπίεση ενεμάτων (grouting) υψηλού ιζώδους μέσω γειτονικών γεωτρήσεων και η έμπηξη πλαστικών στραγγιστηρίων (prefabricated drains) (J. M. Mitchell & Jardine, 2002). Οι παραπάνω μεθοδολογίες, ωστόσο, κρίνονται μερικώς αναποτελεσματικές, διότι δεν μπορούν να βελτιώσουν το έδαφος σε ολόκληρη την κάτοψη, ενώ ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα στην υφιστάμενη κατασκευή (π.χ. ανασήκωμα θεμελίου λόγω της εισπίεσης των ενεμάτων). Επιπλέον, σε κατασκευές μεγάλης έκτασης αποδεικνύονται κοστοβόρες και ενδέχεται να εμποδίσουν την ομαλή λειτουργία της κατασκευής κατά την εφαρμογή τους.

Συμπερασματικά, οι διάφορες τεχνικές βελτίωσης εδαφών χρησιμοποιούνται συχνά στα τεχνικά έργα για να αυξήσουν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους, να βελτιώσουν τη μηχανική συμπεριφορά του και να αποτρέψουν τον κίνδυνο ρευστοποίησης. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τη μορφολογία της περιοχής, το είδος του τεχνικού έργου και από τα φορτία που προβλέπεται να μεταφερθούν σε αυτό. Το κόστος, αλλά και ο χρόνος ζωής του έργου επηρεάζουν επίσης την επιλογή της μεθόδου. Σε περιπτώσεις που η βελτίωση του εδάφους εφαρμόζεται σε περιοχές με υφιστάμενες κατασκευές οι κατάλληλες μέθοδοι είναι λίγες και όπως αναφέρθηκε συνήθως συνοδεύονται από πολλά μειονεκτήματα. Οι ανώτερο συνθήκες οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου βελτίωσης εδαφών, της παθητικής σταθεροποίησης (passive site stabilization) (Gallagher, 2000). Πρόκειται για μία εναλλακτική μέθοδο χαμηλής διατάραξης που αποσκοπεί στον περιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης, σε περιοχές με υφιστάμενες υποδομές.

2.6.2 Η Μέθοδος της Παθητικής Σταθεροποίησης

Τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύσσεται μία εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης των μη συνεκτικών εδαφών, η παθητική σταθεροποίηση (Gallagher, 2000), που μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με υφιστάμενες κατασκευές χωρίς να εμφανίζει τα συνήθη μειονεκτήματα των γνωστών στη βιβλιογραφία μεθόδων. Πρόκειται για την εισπίεση με χαμηλή υδραυλική κλίση ενός σταθεροποιητή (stabiliser), δηλαδή ενός υλικού που

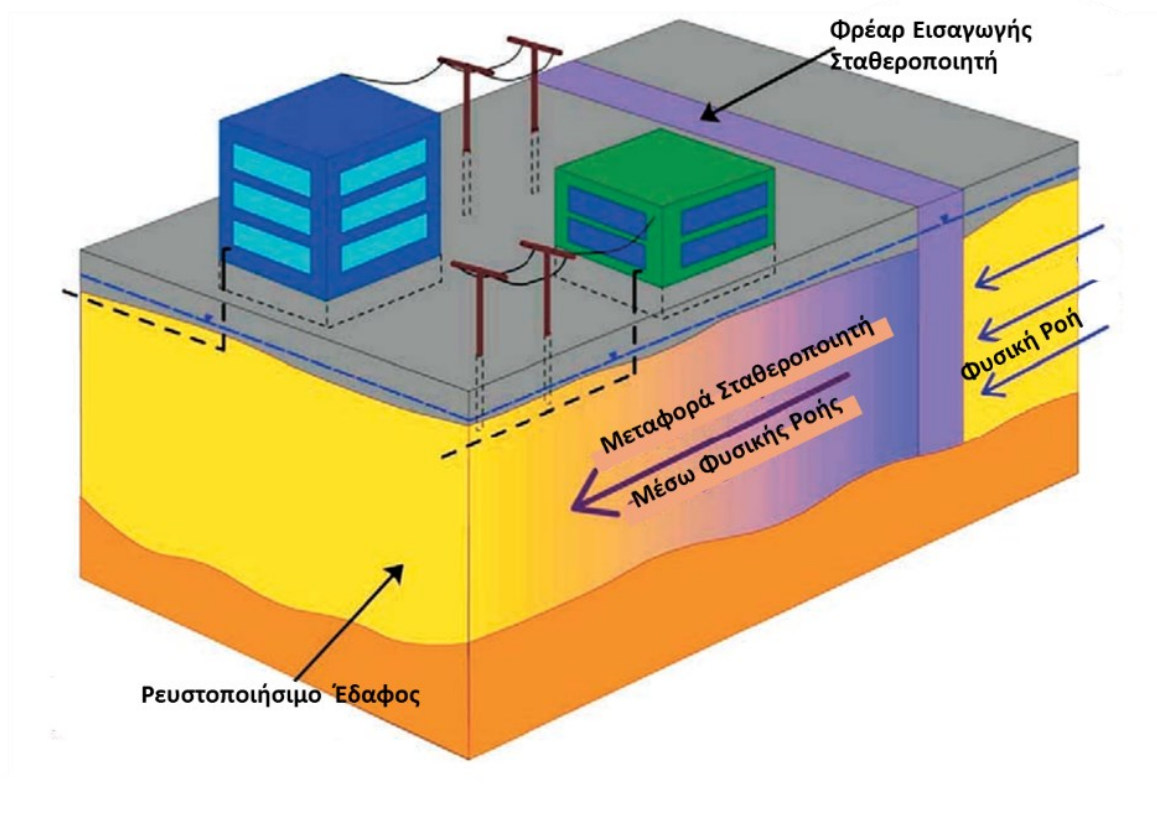
αποτελείται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανο-σωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της κάτοψης μιας υφιστάμενης κατασκευής. Στο **Σχήμα 2.49** παρουσιάζεται η τεχνική της παθητικής σταθεροποίησης των ρευστοποιήσιμων εδαφών, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές. Η διήθηση του σταθεροποιητή μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της φυσικής ροής κατασκευάζοντας ένα φρέαρ με το σταθεροποιητή ανάντη της κατασκευής (

Σχήμα 2.50(α)), είτε επιβάλλοντας συνθήκες ροής κατασκευάζοντας ένα φρέατα παροχής και άντλησης με χαμηλή υδραυλική κλίση (

Σχήμα 2.50(β)) (Pamuk et al., 2007).

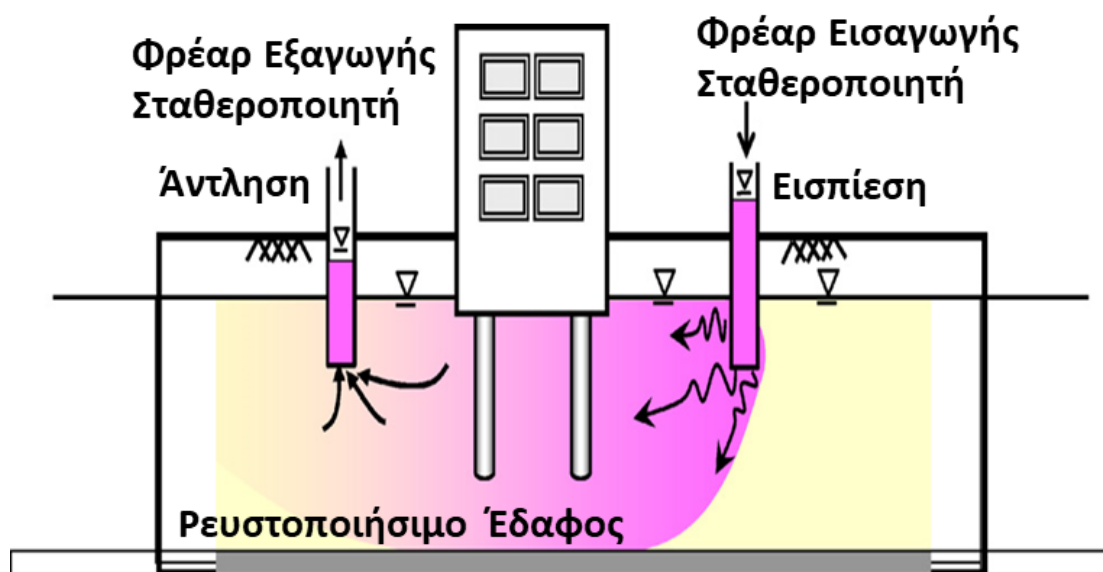
Ο σταθεροποιητής που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης αποτελείται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανο-σωματίδια (οξειδίο του πυριτίου, αργιλικά πλακίδια, μικρο-οργανισμοί, κ.α.) με απαραίτητο χαρακτηριστικό το αρχικά χαμηλό ιξώδες που διευκολύνει τη διοχέτευση του και ο ελεγχόμενος χρόνος μετατροπής του σε γέλη. Για την επιλογή του κατάλληλου σταθεροποιητή πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διάφορα χημικά ενέματα από τη Gallagher (2000) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (κολλοειδής πυριτία) πλησίαζε περισσότερο στα χαρακτηριστικά του ιδανικού σταθεροποιητή. Ο σταθεροποιητής που επιλέχθηκε αρχικά έχει τη μορφή υγρού υγρού και με την πάροδο του χρόνου υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη, με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του. Ρυθμίζοντας τους κατάλληλους παράγοντες (pH, περιεκτικότητα σε αλάτι, θερμοκρασία) η μετατροπή γίνεται σε συγκεκριμένο χρόνο ώστε να ολοκληρωθεί η διοχέτευση ομοιόμορφα σε όλη την περιοχή της κάτοψης. Επιπλέον, δε χρειάζεται ιδιαίτερος εξοπλισμός κατά τη διοχέτευσή του και θεωρείται μια λύση οικονομικά ελκυστική. Επιπρόσθετα, η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη και μη εύφλεκτη (Gallagher, 2000).

Μέσω του εμπλουτισμού του υγρού των πόρων με τον σταθεροποιητή αλλάζει η μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού - υγρού των πόρων και επιτυγχάνεται ο περιορισμός της συσσώρευσης παραμορφώσεων κατά τη σεισμική διέγερση. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται οι καταστροφικές συνέπειες της ρευστοποίησης για την κατασκευή. Οι Gallagher et al. (2007) διεξήγαγαν μεγάλης κλίμακας πειράματα στο πεδίο όπου εισπίασαν υγρόλυμα κολλοειδής πυριτίας 8% κ.β. σε βάθος 2 m ενός ρευστοποιήσιμου έδαφος πάχους 10 m και στη συνέχεια προκάλεσαν ρευστοποίηση με ανατινάξεις. Στο σταθεροποιημένο έδαφος αναπτύχθηκαν μικρότερες καθιζήσεις (0.3m) ενώ στο φυσικό γειτονικό έδαφος παρατηρήθηκαν καθιζήσεις περίπου 0.5 m. Στις επόμενες ενότητες διερευνώνται οι ιδιότητες της κολλοειδούς πυριτίας ως ο πλέον κατάλληλος σταθεροποιητής για την μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης ρευστοποιήσιμων εδαφών.

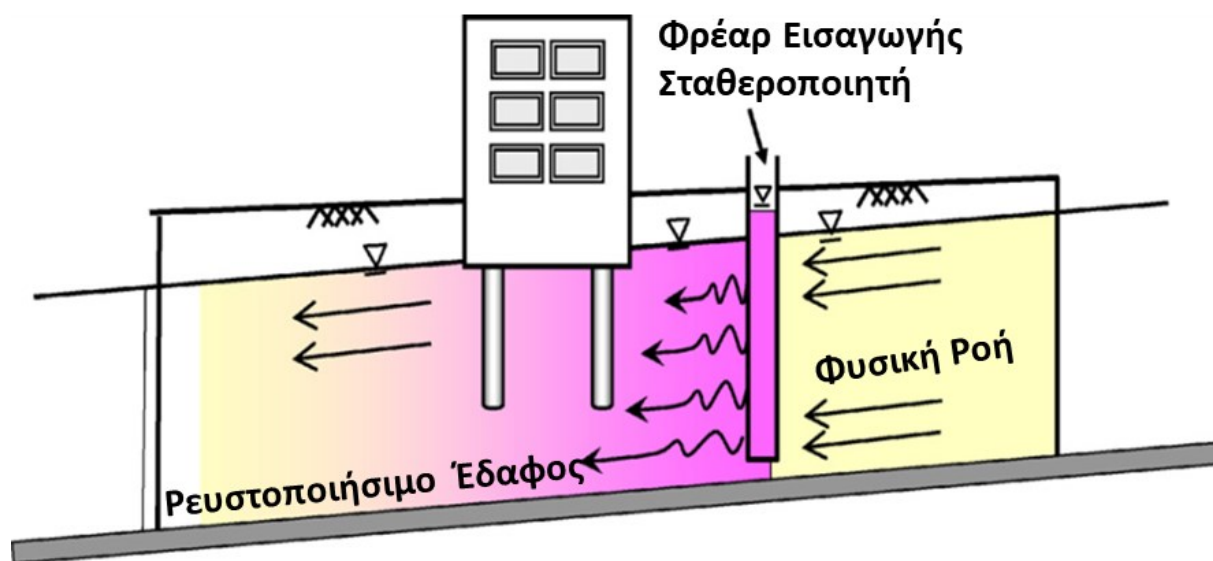


Σχήμα 2.49: Η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης (Gallagher & Mitchell, 2002)

α)



β)



Σχήμα 2.50: Διήθηση του σταθεροποιητή μέσω: (α) εισπίεσης-άντλησης, (β) φυσικής ροής (Pamuk et al., 2007)

2.7 Η Κολλοειδής Πυριτία ως Σταθεροποιητής

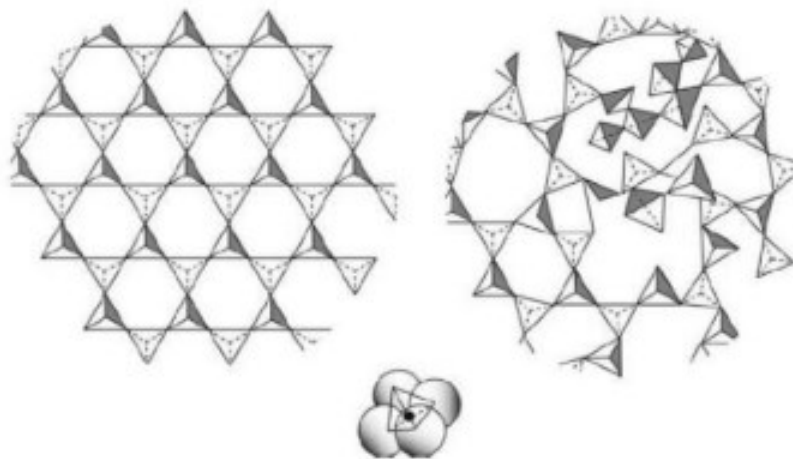
2.7.1 Εισαγωγή

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 εξηγείται η χρησιμοποιούμενη ορολογία και γίνονται οι απαραίτητες μεταφράσεις των όρων της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της πυριτίας Ludox-SM που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας εργασίας για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμίων. Η ενότητα περιλαμβάνει τη συνοπτική παρουσίαση του συνόλου των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρολυμάτων και των γελών (sol-gel processing) και αναπτύσσονται οι διαδικασίες που σχετίζονται άμεσα με τη σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών με κολλοειδή πυριτία.

2.7.2 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. Η διάταξη της δομής των ατόμων ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να είναι είτε κρυσταλλική είτε άμορφη. Τα άτομα ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να διατάσσονται σε κρυσταλλική ή σε άμορφη δομή, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.51** (Bergna & Roberts, 2005).

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των σωματιδίων της κολλοειδούς κατάστασης υποδηλώνουν τεράστιους λόγους επιφάνειας/όγκου ή επιφάνειας/μάζας. Συγκεκριμένα, η κολλοειδής πυριτία με εμπορική ονομασία Ludox-SM που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της εργασίας έχει λόγο επιφάνειας μάζας $345 \text{ m}^2/\text{g}$ και μέγεθος κόκκων 7 nm . Συμπεραίνουμε ότι αυτά τα σωματίδια αλληλοεπιδρούν 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.



Σχήμα 2.51: Κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής τετραεδρικής ιοντικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (Bergna & Roberts, 2005)

2.7.3 Η Ορολογία των Χημικών Όρων

Στην ενότητα αυτή αποσαφηνίζονται οι χημικοί όροι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. 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. Η στιγμή που δημιουργείται η γέλη ονομάζεται “gel point”. Με τον όρο σταθεροποιημένο υγρόλυμα εννοούμε ότι οι απωστικές δυνάμεις αποτρέπουν τη συσσώμωση των κολλοειδών σφαιριδίων και τη γελοποίηση, ενώ με τον όρο σταθεροποιημένο έδαφος εννοούμε το έδαφος που έχει στους πόρους του γέλη πυριτίας.

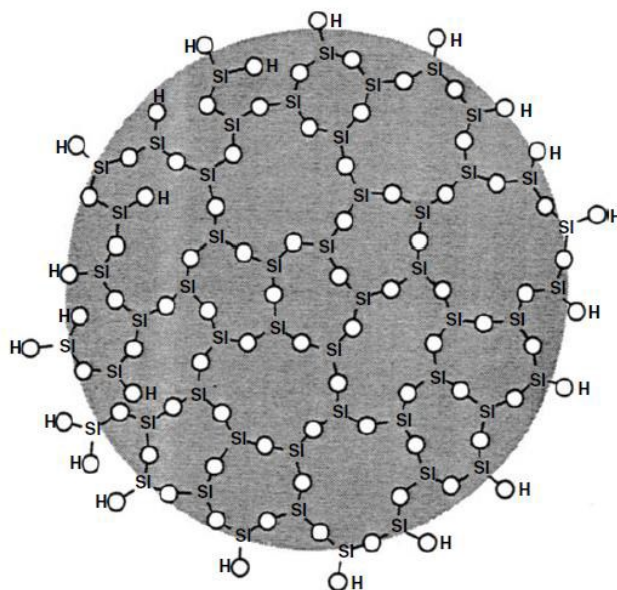
2.7.4 Το Υγρόλυμα (Aquasol) Κολλοειδούς Πυριτίας Ludox-Sm

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών της εργασίας έχει την εμπορική ονομασία Ludox-SM[®] (προϊόν της Sigma - Aldrich[®]). Σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι μια υδάτινη διασπορά (aquasol) διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας με μέγεθος στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους (7 nm) και η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων είναι 345 m²/g. Τα σωματίδια είναι συμπαγή (μη πορώδη) και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή. Επιπλέον, το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας, έχει αρχική συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO₂ 30% κατά βάρος (κ.β) και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10 με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na₂O. Το ιξώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP, ενώ του νερού είναι 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία (1 cP = 10⁻³ Pa·s = 1 mPa·s). Μετά την αραιώση του υγρολύματος με νερό,

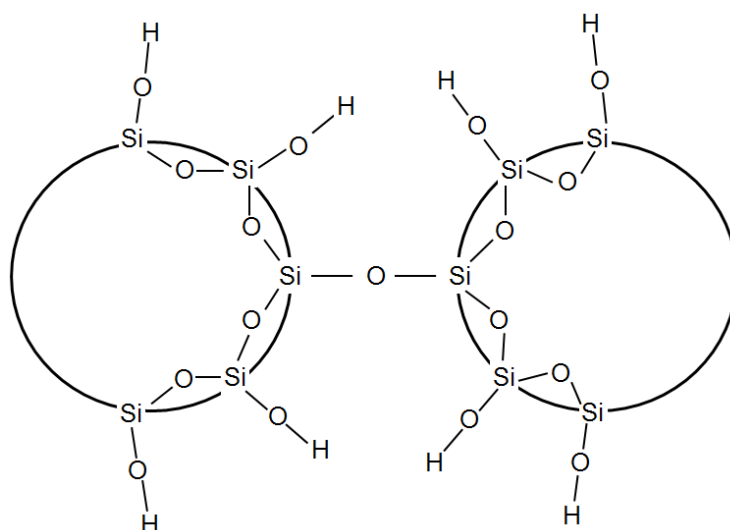
ώστε να επιτευχθεί μικρότερο ποσοστό κατά βάρος πυριτίας, το ιζώδες του μικραίνει ακόμα περισσότερο.

Το σωματίδιο της κolloειδούς πυριτίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.52. Έχει αναπτυχθεί στο μέγεθος των 7 nm ύστερα από διαδοχικό πολυμερισμό και συμπύκνωση (polymerization and condensation) της βασικής τετραεδρικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$, ώστε να προκύψει ένα μη κρυσταλλικό τρισδιάστατο δίκτυο διασυνδεδεμένων τετραέδρων. Στην άμορφη πυριτία η γωνία του δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si ποικίλει, η απόσταση όμως πυριτίου – οξυγόνου Si-O είναι σταθερή. Η επιφάνεια του σωματιδίου είναι πλήρως υδροξυλιωμένη και εμφανίζει μία αρνητικά φορτισμένη στρώση, όταν αποβάλλει πρωτόνια H^+ σε αλκαλικό περιβάλλον. Επίσης, εμφανίζει μία θετικά φορτισμένη στρώση, όταν προσλαμβάνει πρωτόνια H^+ από ένα έντονα όξινο περιβάλλον. Η αμοιβαία ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των επιφανειακών στρώσεων των σωματιδίων αποτρέπει τη συσσωμάτωση και τη γελοποίηση, δηλαδή σταθεροποιεί το υγρόλυμα (Brinker & Scherer, 1990; Bergna, 1994; Bergna & Roberts, 2005).

Τα σωματίδια της κolloειδούς 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 υγρούλυματος 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 (Σχήμα 2.53). Η σταθεροποίηση του υγρούλυματος πραγματοποιείται με χρήση του αλκαλικού παράγοντα NaOH (υδροξείδιο νατρίου). Ο αλκαλικός παράγοντας αντιδρά με ένα ποσοστό από τις ασθενώς όξινες ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, σχηματίζοντας ένα μόριο νερού και αφήνοντας πίσω μία φορτισμένη περιοχή. Το ιόν υδροξυλίου έχει διττό ρόλο. Σε υψηλές τιμές pH βοηθά να εμφανιστούν αρνητικά φορτισμένες περιοχές στην επιφάνεια των κolloειδών σωματιδίων και αποτρέπει τον σχηματισμό γέλης. Σε ενδιάμεσες τιμές pH το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως καταλύτης στην αντίδραση της συμπύκνωσης και προάγει τον σχηματισμό γέλης. Η κolloειδής 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 (Whang, 1995).



Σχήμα 2.52: Δισδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας (Bergna, 1994)



Σχήμα 2.53: Σύνδεση δύο σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά τη γελοποίηση (Gallagher, 2000)

2.7.5 Φυσικοχημικές Διαδικασίες των Υγρολυμάτων και των Γελών Πυριτίας που Αφορούν την Παθητική Σταθεροποίηση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποιες από τις φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών που σχετίζονται άμεσα με την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών, η οποία επιτυγχάνεται μέσω διοχέτευσης κολλοειδούς πυριτίας στους εδαφικούς πόρους.

Γελοποίηση (Gelation)

Οι Brinker & Scherer (1990) 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 (gel time) το ιξώδες αυξάνεται απότομα και η γέλη αρχίζει να αποκρίνεται ελαστικά στην τάση.

Η μεταβολή του ιξώδους του υγρολύματος με το χρόνο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως καμπύλη χρόνου γέλης (gel time curve). Χαρακτηρίζεται από μια αρχική περίοδο όπου το ιξώδες παραμένει χαμηλό και ακολουθεί μια ραγδαία αύξηση του ιξώδους που σηματοδοτεί την μετατροπή σε γέλη. Οι χρόνοι γέλης κυμαίνονται από μερικά λεπτά ως πολλούς μήνες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο χρόνος γέλης της κολλοειδούς πυριτίας ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ιξώδες σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες των 100cP (0,1 Pa*s), καθώς από τη στιγμή αυτή και μετά, ο χρόνος για τη δημιουργία μιας σταθερής γέλης είναι πρακτικώς αμελητέος (Gallagher, Pamuk, et al., 2007; Agaroulaki & Papadimitriou, 2018).

Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετατροπή του υγρολύματος σε γέλη εξαρτάται από την τιμή του pH, τη συγκέντρωση πυριτίας, CS(%), τη συγκέντρωση αλάτων (NaCl) και τη θερμοκρασία του υγρολύματος (Gallagher, Pamuk, et al., 2007; Agaroulaki & Papadimitriou, 2018).

Η επίδραση της τιμής του pH του υγρολύματος επιδρά σημαντικά στο ιξώδες του και κατ' επέκταση στο χρόνο γέλης. Επισημαίνεται ότι η σχέση pH και χρόνου γέλης δεν είναι ανάλογη. Στο **Σχήμα 2.54** παρουσιάζονται οι καμπύλες ιξώδους με το χρόνο για διάφορες τιμές pH. Παρατηρούμε ότι για όλες τις τιμές pH που παρουσιάζονται, το ιξώδες αρχικά είναι μικρό και περίπου σταθερό ενώ στη συνέχεια αυξάνεται ραγδαία. Επιπλέον, για τις τιμές pH 6 και 5 το ιξώδες αυξάνεται πιο γρήγορα ενώ για τιμές pH 4.23 και 6.53 πιο αργά αποδεικνύοντας ότι η επίδραση του pH στο ιξώδες δεν είναι μονοτονική. Στο **Σχήμα 2.55** εμφανίζονται οι καμπύλες χρόνου γέλης (t_g) – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 5% κ.β., κανονικότητας 0,1N από πειράματα της βιβλιογραφίας (Gallagher, 2000; Lin, 2006; Agaroulaki & Papadimitriou, 2018). Παρατηρείται ότι ο ελάχιστος χρόνος γέλης (t_{gmin}) εμφανίζεται για τιμή pH=6, ενώ για μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές pH ο χρόνος αυξάνεται. Επισημαίνεται ότι οι καμπύλες χρόνου γέλης-

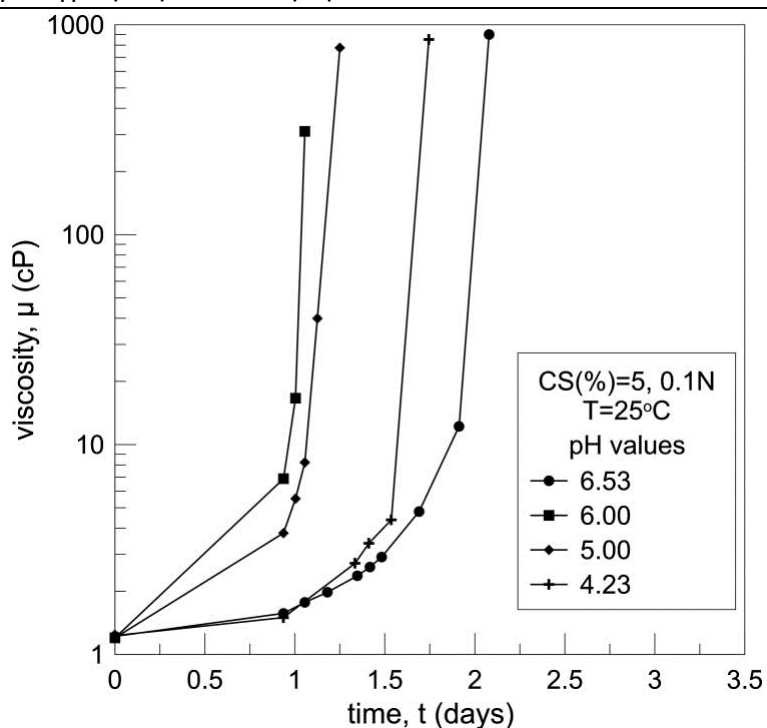
pH παρουσιάζουν μορφή ανεστραμμένης καμπάνας με ακρότατο τον ελάχιστο χρόνο γέλης t_{gmin} για τη βέλτιστη τιμή pH. 6

Η προσθήκη άλατος σε ένα υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας μειώνει το χρόνο γέλης γιατί οδηγεί στη μείωση της διπλής στοιβάδας γύρω από τα σωματίδια πυριτίας αυξάνοντας την πιθανότητα συγκρούσεων μεταξύ τους. Η επίδραση της προσθήκης άλατος στο χρόνο γέλης του υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM με περιεκτικότητα πυριτίας 10% φαίνεται στο **Σχήμα 2.56** που συγκρίνονται οι χρόνοι γέλης για τέσσερις τιμές κανονικότητας (NaCl) 0,1N, 0,03N, 0,01N και 0N σε εύρος pH από 4-9 (Gallagher, 2000). 1 N αντιστοιχεί σε 58,5 gr άλατος σε 1 λίτρο νερό. Παρατηρούμε ότι για κάθε τιμή pH, υψηλότερες τιμές κανονικότητας (περισσότερο άλας) οδηγούν σε μικρότερο χρόνο γέλης.

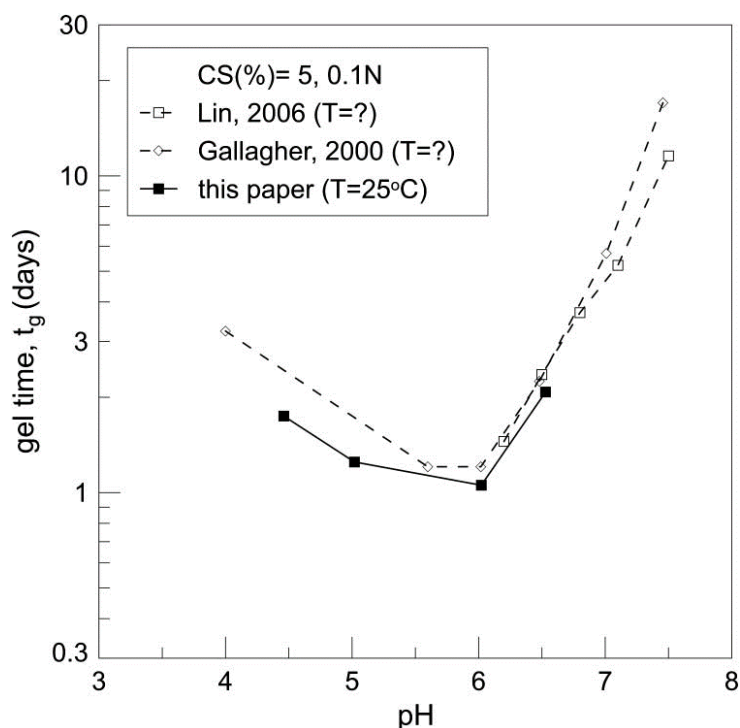
Μια άλλη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το χρόνο γέλης είναι η **συγκέντρωση πυριτίας, CS(%)**. Το Σχήμα 2.58 παρουσιάζει την επίδραση της περιεκτικότητας της κολλοειδούς πυριτίας, CS (%) στις καμπύλες ιξώδους σε σχέση με το χρόνο για pH = 6.00 και κανονικότητα 0.10N (Agaroulaki & Paradimitriou, 2018). Παρατηρούμε ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε πυριτία οδηγεί σε πιο γρήγορη αύξηση του ιξώδους και κατ'επέκταση σε μικρότερο χρόνο γέλης. Η συγκέντρωση της πυριτίας επηρεάζει άμεσα κόστος της παθητικής σταθεροποίησης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία τιμές συγκέντρωσης από 5-10% είναι αρκετές για να αποτρέψουν τη ρευστοποίηση (Gallagher & Mitchell, 2002).

Η θερμοκρασία T του υγρολύματος επίσης επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία σχηματισμού της γέλης. Στο **Σχήμα 2.57** οι καμπύλες χρόνου γέλης - pH για την κολλοειδή πυριτία Ludox- SM, περιεκτικότητας CS = 10%, κανονικότητας 0.03 N σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες T = 15, 20, 25 ° C. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται ο χρόνος γέλης στο εύρος pH που εξετάστηκε (Agaroulaki & Paradimitriou, 2018).

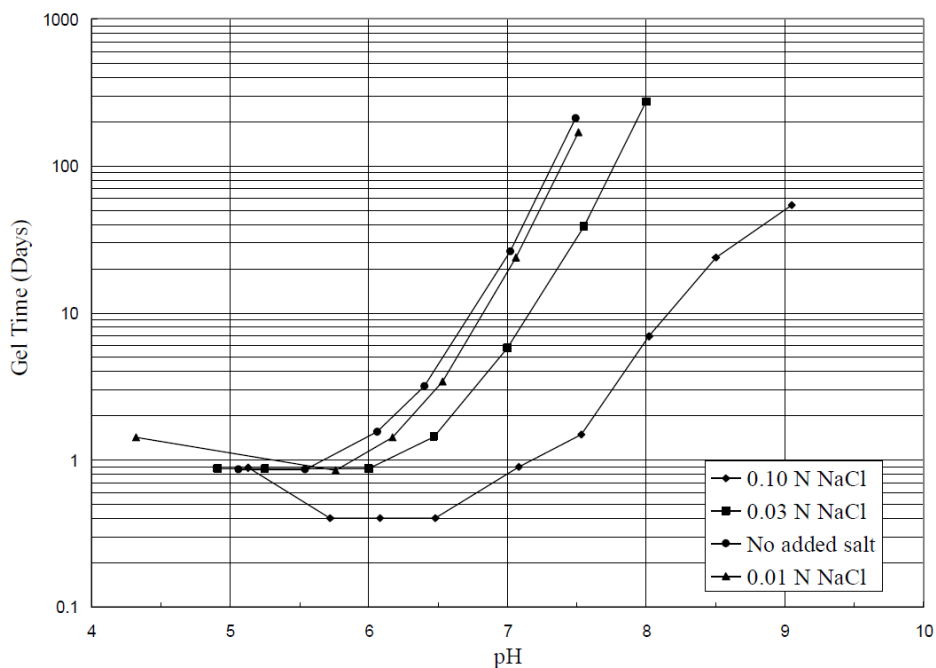
Η πυριτία μπορεί να διοχετεύεται στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών υπό χαμηλή υδραυλική κλίση λόγω του χαμηλού αρχικά ιξώδους της. Στη συνέχεια είναι εφικτός ο ταχύς σχηματισμός γέλης όταν έχει προηγηθεί κατάλληλη ρύθμιση του pH και της περιεκτικότητας αλάτων. Η ταχεία αυτή γελοποίηση εξασφαλίζει 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. 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.



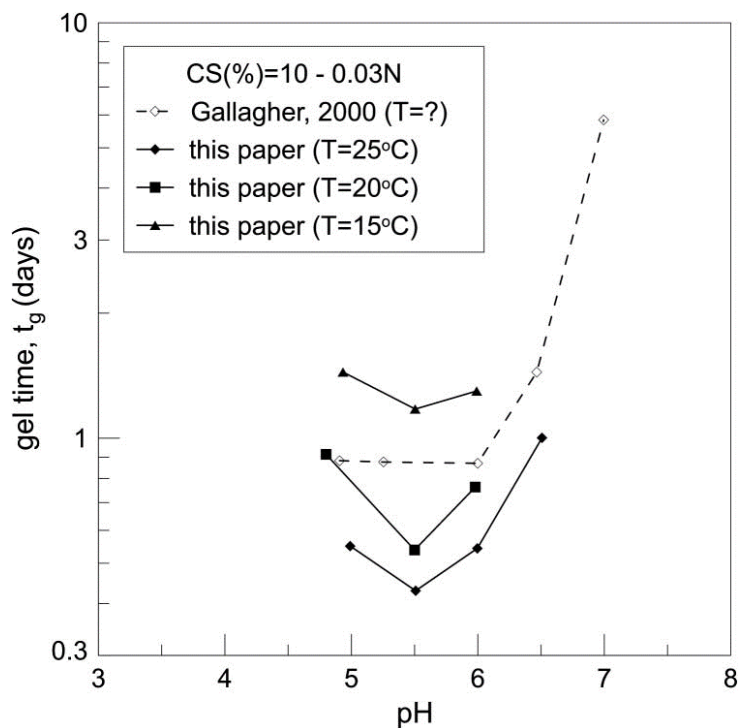
Σχήμα 2.54: Επίδραση της τιμής pH στις καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 5% κ.β., κανονικότητας 0.1 N και θερμοκρασίας $T=25^{\circ}\text{C}$ (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018)



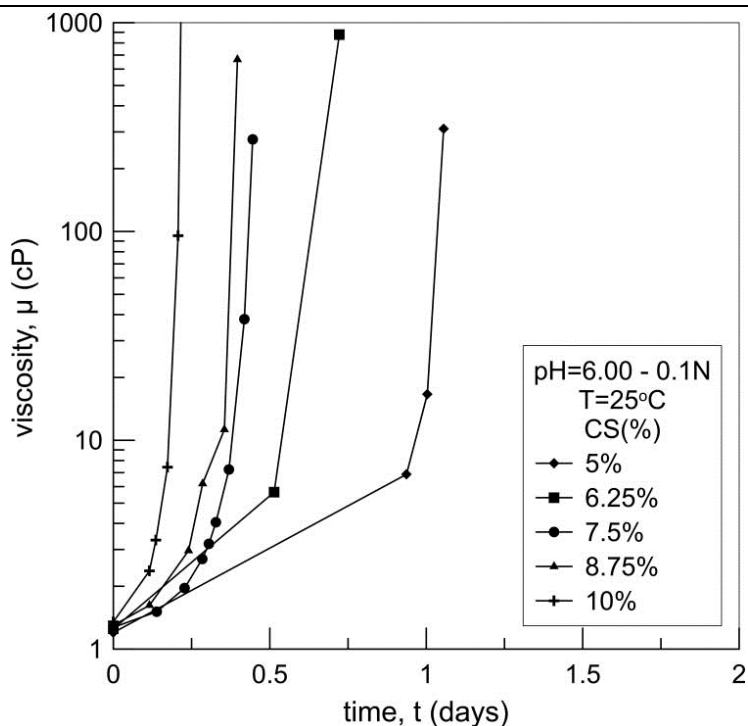
Σχήμα 2.55: Καμπύλες χρόνου γέλης – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 5% κ.β., κανονικότητας 0.1 N και θερμοκρασίας $T=25^{\circ}\text{C}$ (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018)



Σχήμα 2.56: Επίδραση της τιμής κανονικότητας, N, στις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% κ.β., (Gallagher, 2000)



Σχήμα 2.57: Επίδραση της θερμοκρασίας T στις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% κ.β. και κανονικότητας 0.03N (Agaroulaki & Paradimitriou, 2018).



Σχήμα 2.58: Επίδραση της περιεκτικότητας πυριτίας (%) κ.β. στις καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας με pH=6, κανονικότητας 0.1 N και θερμοκρασία T=25°C (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018)

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή για τη σταθεροποίηση των δοκιμίων παρασκευάστηκε το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας με περιεκτικότητα CS=10%, τιμή pH=6, κανονικότητα 0,03N σε θερμοκρασία 25 °C. Ο χρόνος γέλης γι’ αυτές τις συνθήκες αναφέρεται ότι είναι $t_g=10$ ώρες (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018).

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.

Στη βιβλιογραφία διατυπώνεται ότι η ωρίμανση της γέλης για παρατεταμένο χρονικό διάστημα οδηγεί σε περισσότερο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή (C. Wong et al., 2018). 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.

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

Μηχανισμός Αυτό-ΐασης Του Σταθεροποιημένου Εδάφους (Self-Healing Mechanism)

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα της γέλης είναι ότι μπορεί να εμφανίσει αυτό-ΐαση (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

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε ένα σταθεροποιημένο έδαφος είναι πιθανό να υφίσταται μια συνεχής διαδικασία καταστροφής και δημιουργίας δεσμών στον στερεό σκελετό της γέλης. Είναι εμφανές ότι αυτή η συμπεριφορά έχει καίρια σημασία για τις εφαρμογές της γεωτεχνικής.

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

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

Η κατανόηση των μηχανισμών γελοποίησης, ωρίμανσης, ξήρανσης και αυτό-ίσης μέσω της βιβλιογραφίας και της εμπειρικής παρατήρησης στο εργαστήριο μας οδηγεί στο να θέσουμε υπό αμφισβήτηση ορισμένες τοποθετήσεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Για παράδειγμα, αναφέρουμε την τοποθέτηση ότι «τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν εμφανίζουν πίεση πόρων και γι' αυτό δεν την μετράμε στα πειράματα, αφού μέσα στους εδαφικούς πόρους η γέλη έχει μετατραπεί σε στερεό». Χρησιμοποιείται μάλιστα ο λανθασμένος όρος «στερεοποίηση της πυριτίας» ο οποίος συγχέεται με τη διαδικασία της γελοποίησης. Η γέλη είναι ένα 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 δεν 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 & Scherer (1990) αναφέρουν ότι σε μια γέλη είναι απαραίτητο να διαχωρίζουμε τις ιδιότητες του στερεού σκελετικού δικτύου, το οποίο αποκαλύπτεται αν απομακρυνθεί η υγρή φάση, από τις ιδιότητες της γέλης που έχει πόρους γεμάτους υγρό. Αν η γέλη υποβληθεί σε υδροστατική πίεση τότε θα προκύψει αμελητέα παραμόρφωση, καθώς η υγρή φάση είναι πρακτικώς ασυμπίεστη και παραλαμβάνει όλο το φορτίο. Ωστόσο, το μέτρο συμπίεσης του σκελετικού δικτύου αν δεν υπήρχε το υγρό θα ήταν ιδιαίτερα μικρό. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η στερεά φάση καταλαμβάνει ένα μικρό κλάσμα από το συνολικό όγκο της γέλης. Η συμπίεστικότητα μιας κορεσμένης γέλης νοείται μόνο αν επιτραπεί η στράγγιση του υγρού των πόρων. Γίνεται σαφές ότι δε μπορούμε να ισχυριστούμε πως ένα σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία έδαφος, σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, αναπτύσσει μικρότερη πίεση πόρων όταν διατέμνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε σχέση με την περίπτωση που το υγρό πόρων είναι καθαρό νερό.

2.8 Μηχανική συμπεριφορά της κολλοειδούς πυριτίας

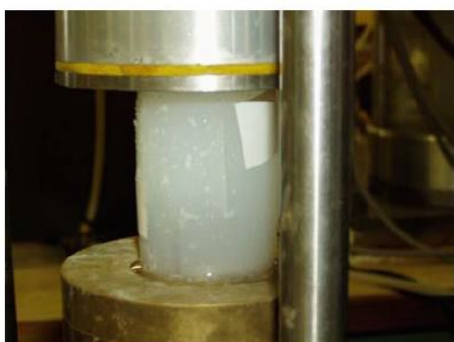
Η καθαρή κολλοειδής πυριτία μετά τη γελοποίηση και την ωρίμανσή της είναι μία πολύ μαλακή, ελαστική, υδαρής μάζα, η οποία παρουσιάζει αμελητέα αντίσταση σε διάτμηση. Γεννιέται λοιπόν εύλογα η απορία πώς η προσθήκη της ασθενούς πυριτίας στους πόρους

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

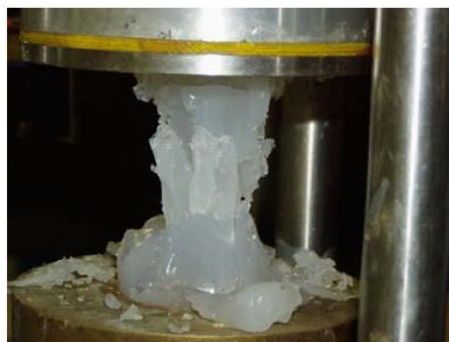
του εδάφους αυξάνει την αντοχή της σταθεροποιημένης μάζας. Προκειμένου να διερευνηθούν και να κατανοηθούν πλήρως οι ιδιότητες της, τις τελευταίες δεκαετίες οι ερευνητές έχουν εκτελέσει πειράματα στην κολλοειδή πυριτία χωρίς την παρουσία εδαφικού υλικού.

Ο Towhata (2007) εκτέλεσε δοκιμές ανεμπόδιας θλίψης σε δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας CS=6.5% (χωρίς την παρουσία εδάφους) ύστερα από ωρίμανση 30 ημερών μέσα σε νερό για να αποτραπεί η ξήρανση. Τα δοκίμια είχαν ύψος 7cm, διάμετρο 4,7cm και μάζα 129gr. Ταινίες τοποθετήθηκαν στο 1/3 και στα 2/3 του ύψους του δοκιμίου, ώστε να μετράται η εγκάρσια παραμόρφωση του δοκιμίου με αισθητήρα ακτινών laser (Σχήμα 2.59). Στο Σχήμα 2.60 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα της δοκιμής σε όρους αποκλίνουσας τάσης ($q=\sigma_1-\sigma_3$)-αξονικής παραμόρφωσης (Σχήμα 2.60(α)) και στο σε όρους εγκάρσιας-αξονικής παραμόρφωσης (Σχήμα 2.60(β)). Παρατηρούμε ότι η αντοχή της πυριτίας σε ανεμπόδια θλίψη είναι αμελητέα ~5 kPa άρα δεν είναι αυτός ο μηχανισμός που εξηγεί τη βελτιωμένη συμπεριφορά εδαφών. Επιπλέον, ο λόγος του Poisson, ν , για την πυριτία μετρήθηκε περίπου ίσος με 0,3 με τον ερευνητή να συμπεραίνει ότι η απόκλιση από την τιμή $\nu=0.50$ (θεωρητικά ασυμπίεστο) αποδεικνύει ότι το υλικό είναι συμπιεστό υποδηλώνοντας ότι αυτός είναι ο μηχανισμός που προσδίδει αυτή τη βελτίωση στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών.

α)

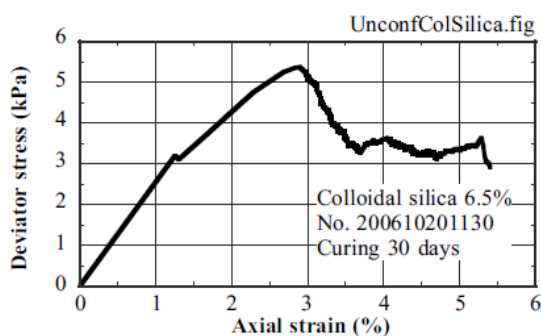


β)

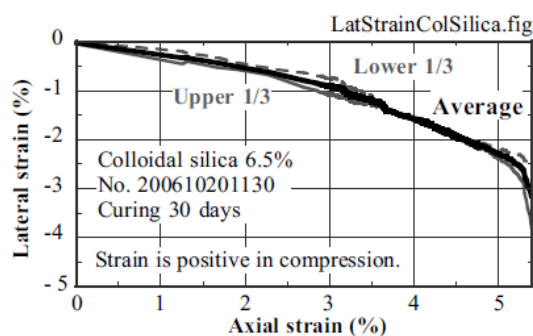


Σχήμα 2.59: Φωτογραφίες ανεμπόδιας θλίψης δοκιμίου καθαρής πυριτίας CS=6.5%: (α) πριν; και (β) μετά τη δοκιμή (Towhata, 2007)

α)



β)



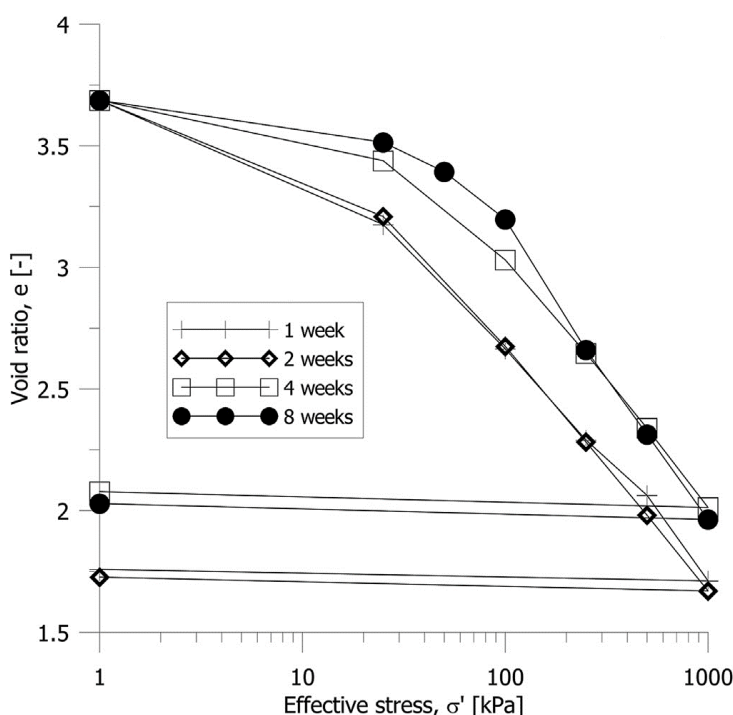
Σχήμα 2.60: Αποτελέσματα ανεμπόδιαστης θλίψης δοκιμίου καθαρής πυριτίας CS=6.5%: (α) αποκλίνουσα τάση-αξονική παραμόρφωση; και (β) εγκάρσια-αξονική παραμόρφωση (Towhata, 2007)

Σχετικά με τον παραπάνω ισχυρισμό επισημαίνεται, αρχικώς, ότι η γέλη πυριτίας αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό (π.χ. $\geq 90\%$ κ.β.) από νερό. Το νερό συγκρατείται από τον αραιό στερεό σκελετό της γέλης με τριχοειδείς δυνάμεις (Bergna & Roberts, 2005) και με απορροφητική - προσροφητική δράση. Η δομή της πυριτικής γέλης μοιάζει με αυτήν των ελαστομερών γελών με τη διαφορά ότι ο σκελετός της πυριτίας είναι πολύ πιο αραιός. Ο σκελετός αυτός έχει σχηματιστεί από τη συνένωση σωματιδίων με ομοιοπολικούς δεσμούς σιλοξάνης (Si-O-Si). Η γέλη είναι, δηλαδή, ένα διφασικό υλικό στο οποίο υπερισχύει ποσοτικά (κατά βάρος και κατ' όγκο) η υγρή φάση. Στο σύστημα αυτό υπάρχουν διαφορετικά είδη δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο φάσεων. Μία πρώτη λογική σκέψη είναι να θεωρηθεί το υλικό ως πρακτικά ασυμπιέστο υγρό νερό και όχι ως στερεό με χαμηλά μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης. Στην περίπτωση των διφασικών υλικών, που αποτελούνται από έναν στερεό σκελετό με υγρό μέσα στους πόρους, είναι απαραίτητο να ορίσουμε το μέτρο συμπίεσης υπό αστράγγιστες και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Το ίδιο ισχύει και για τον λόγο του Poisson. Στην παραπάνω δοκιμή ανεμπόδιαστης θλίψης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.59** δεν εμποδίζεται η στράγγιση. Είναι προφανές ότι, σε θεωρητικό επίπεδο, η γέλη με πόρους πλήρως κορεσμένους με νερό (διφασικό υλικό) είναι πρακτικά ασυμπιέστη αν αποτραπεί η στράγγιση του υγρού από τους πόρους. Η συμπεριφορά είναι εντελώς ανάλογη με αυτήν του πλήρως κορεσμένου εδάφους που φορτίζεται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Επομένως, η συμπίεστικότητα μίας κορεσμένης γέλης νοείται μόνο αν επιτραπεί η στράγγιση του υγρού των πόρων.

Σύμφωνα με τους Brinker & Scherer (1990) σε μία 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 ασυμπιέστη και παραλαμβάνει όλο το φορτίο. Ωστόσο, το μέτρο συμπίεσης (bulk modulus) 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 τον συνολικό όγκο της γέλης.

Οι Wong et al. (2018) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά της καθαρής κολλοειδούς πυριτίας μέσω δοκιμών συμπίεσομέτρου. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η κολλοειδής πυριτία Meyco MP320 περιεκτικότητας 40% κ.β. silica weight concentration, με μέγεθος κόκκου 15 nm. Ο χρόνος γέλης αναφέρεται ότι είναι 1 h για υγρόλυμα κανονικότητας 0.28N. Τα δοκίμια πυριτίας παρασκευάστηκαν στο δαχτυλίδι του συμπίεσομέτρου διαμέτρου 75mm και αφέθηκαν να ωριμάσουν σε θερμοκρασία 20 °C και 90% σχετική υγρασία για 1,2,4 και 8 εβδομάδες για να μελετηθεί η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης.

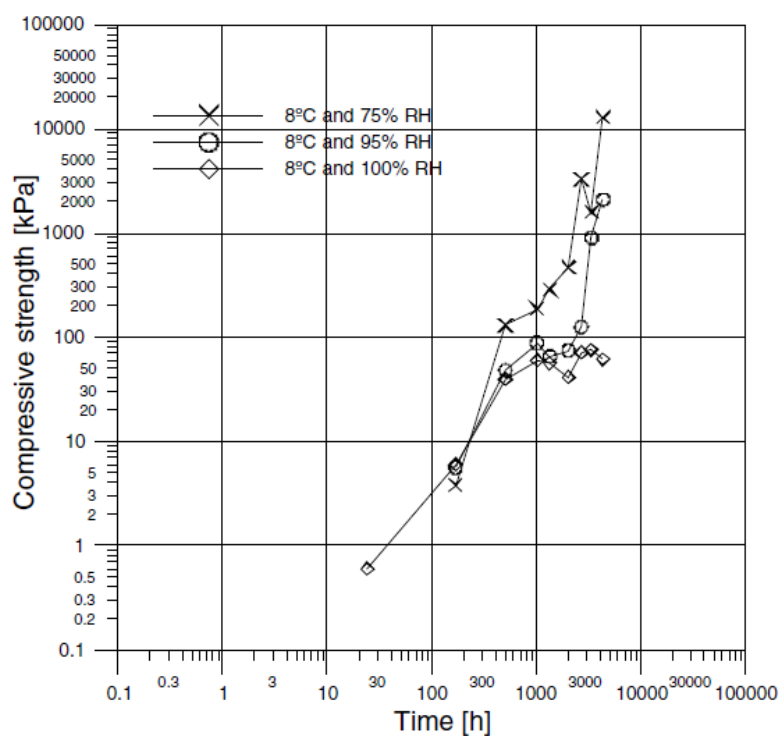
Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.61** σε όρους δείκτη πόρων, e , ενεργού τάσης. Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια που ωρίμασαν μία και δύο εβδομάδες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και τα δοκίμια με χρόνο ωρίμανσης τρεις και τέσσερις βδομάδες συγκλίνουν επίσης σε μία καμπύλη αλλά διαφορετική από την πρώτη. Επισημαίνεται ότι τα δοκίμια με το μεγαλύτερο χρόνο ωρίμανσης παρουσιάζουν μικρότερη ενδοσιμότητα στις μικρές τάσεις.



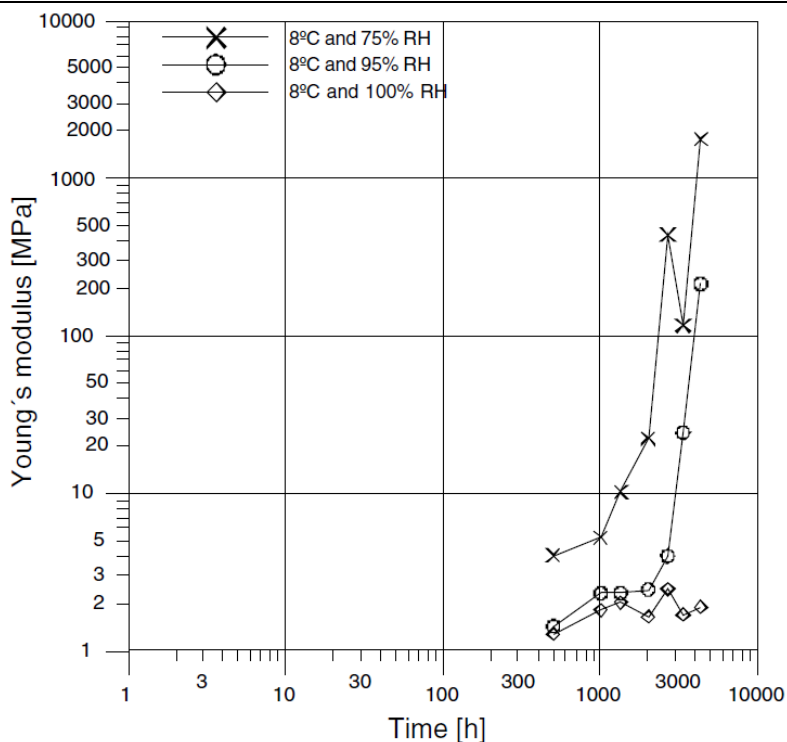
Σχήμα 2.61: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσομέτρου για δοκίμια πυριτίας Meyco MP320 για διάφορους χρόνους ωρίμανσης (C. Wong et al., 2018)

Η κολλοειδής πυριτία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ένεμα σε βραχώδεις σχηματισμούς, όπου το τσιμέντο δύσκολα διαπερνά, για να αποτρέψει την εισροή νερού όπως σε περιπτώσεις σήραγγων κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (Axelsson, 2006). Για να εξετάσει αν η κολλοειδής πυριτία είναι κατάλληλη για χρήση ως ένεμα σε ρηχές σήραγγες (σταθερές θερμοκρασίες 8-12°C) μέτρησε την αντοχή της σε θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας και τη διατμητική της αντοχή σε διάφορες τιμές υγρασίας. Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε κολλοειδής πυριτία περιεκτικότητας CS=30%, άλας CaCl₂=2.9% με pH=10. Τα δοκίμια ωρίμασαν σε χαμηλές θερμοκρασίες (~8°C) υπό τρεις διαφορετικές τιμές υγρασίας (RH=75%,95% and 100%) για χρονική περίοδο ως και 6 μήνες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και της διατμητικής αντοχής με το χρόνο για τις 3 διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης της πυριτίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.62**, **Σχήμα 2.63** και **Σχήμα 2.64** αντίστοιχα. Αναφέρεται ότι η αντοχή σε θλίψη της κολλοειδούς πυριτίας αυξάνεται

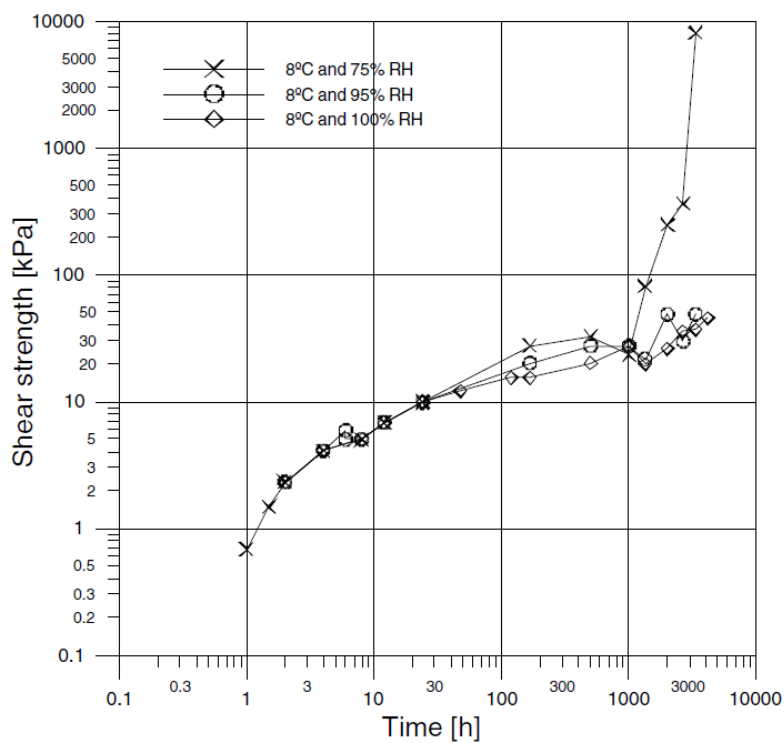
με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης και εξαρτάται από το την υγρασία. Η χαμηλότερη υγρασία οδηγεί σε ταχύτερη αύξηση της θλιπτικής αντοχής αλλά προκαλεί συρρίκνωση και πιο ψαθυρή αστοχία.



Σχήμα 2.62: Θλιπτική αντοχή της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας (Axelsson, 2006)



Σχήμα 2.63: Μέτρο Ελαστικότητας της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας (Axelsson, 2006)



Σχήμα 2.64: Διατμητική αντοχή της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας (Axelsson, 2006)

2.9 Μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων εδαφών

2.9.1 Εισαγωγή

Η παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization) είναι μία εναλλακτική μεθοδολογία βελτίωσης των ρευστοποιήσιμων 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 παθητική σταθεροποίηση βασίζεται στη γενική ιδέα της αργής εισπίεσης του σταθεροποιητικού παράγοντα(π.χ. υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας) μέσα στο έδαφος. 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 είναι ένας ελκυστικός σταθεροποιητής γιατί 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.

Ο τύπος της κολλοειδής πυριτίας Ludox-SM[®] είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος κολλοειδούς πυριτίας στη βιβλιογραφία και αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής. Εξαιτίας της μεγάλης ειδικής επιφάνειας 345m²/g και του μικρού μεγέθους σωματιδίων (7nm) της απαιτούνται μικρότεροι χρόνοι γέλης σε σχέση με άλλους τύπους πυριτίας και κατ' επέκταση μικρότερες ποσότητες πυριτίας καθιστώντας τη την πλέον οικονομική επιλογή (Gallagher, 2000)

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφορά των σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία εδαφών έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των ερευνητών τις τελευταίες δεκαετίες. Οι εργαστηριακές μελέτες αναφέρουν ότι τα σταθεροποιημένα εδάφη εμφανίζουν μεγαλύτερη διαστολικότητα (Kodaka et al., 2005; Porcino et al., 2012; Georgiannou et al., 2017; Porcino & Marciano, 2017) και αυξημένη αντίσταση στη ρευστοποίηση (Gallagher & Mitchell, 2002; Díaz-Rodríguez et al., 2008; Porcino et al., 2011, 2015). Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται κάποιες από τις εργαστηριακές μελέτες που εστιάζουν στη μονοτονική, στη ανακυκλική και δυναμική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών, σε δοκιμές φυγοκεντριστή και σε εφαρμογές στο πεδίο της νέας αυτής μεθόδου σταθεροποίησης.

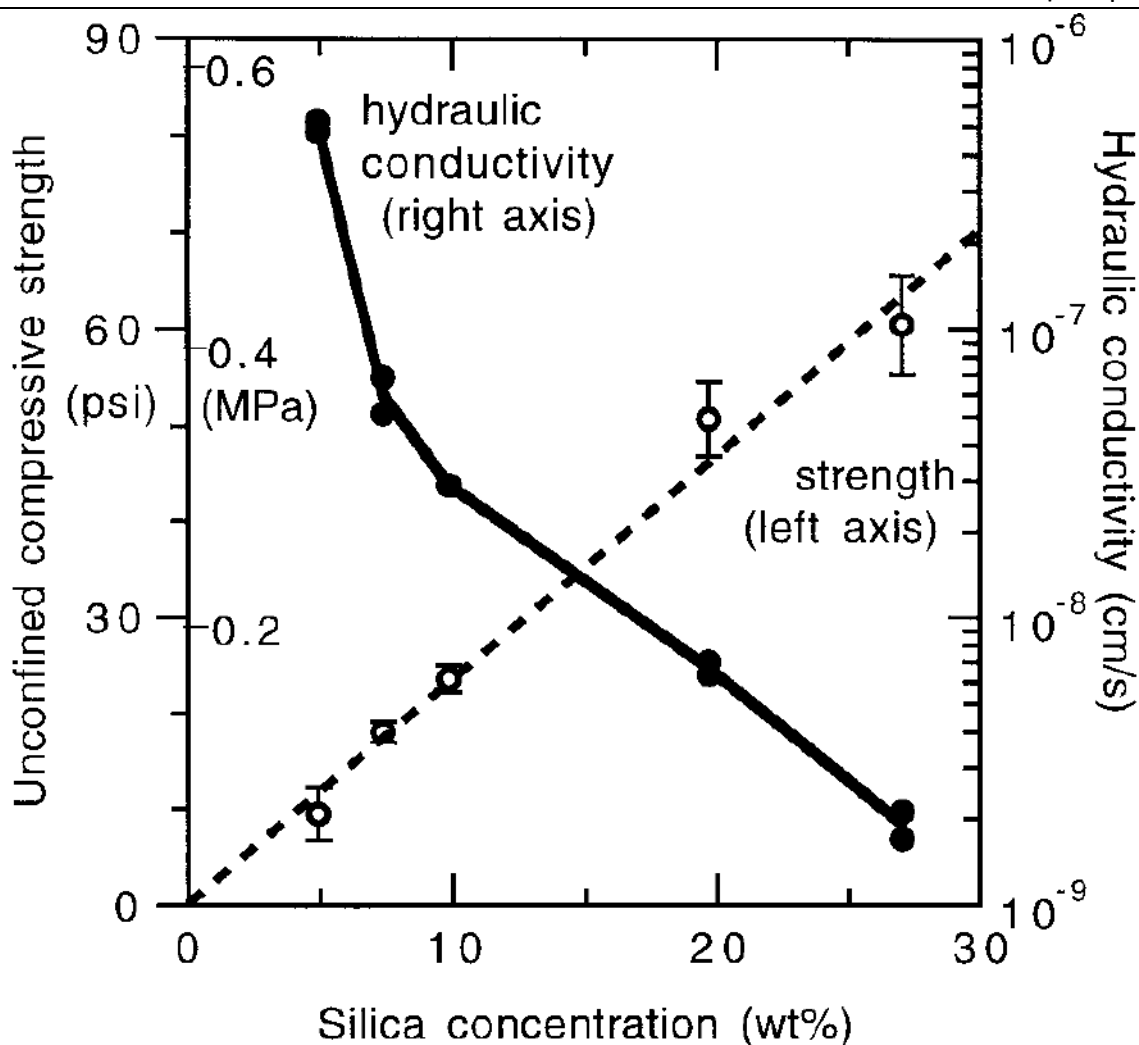
2.9.2 Μονοτονική Συμπεριφορά

Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας στη μονοτονική συμπεριφορά της άμμου έχουν διεξαχθεί εργαστηριακές μελέτες που περιλαμβάνουν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, συμπίεσομέτρου, τριαξονικής θλίψης και στρεπτικής διάτμησης.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Δοκιμές Ανεμπόδισης Θλίψης

Οι Persoff et al. (1999) εκτέλεσαν δοκιμές ανεμπόδισης θλίψης σε δοκίμια άμμου Monterey 0/30 σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με κολλοειδή πυριτία Ludox SM® σε συγκεντρώσεις 5-27% CS και αφήθηκαν να ωριμάσουν για 7 ημέρες σε σχετική υγρασία 100%. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδισης θλίψης (αριστερός άξονας) και της διαπερατότητας (δεξιάς άξονας) σε σχέση με το ποσοστό πυριτίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.65**. Η αύξηση του ποσοστού πυριτίας οδηγεί σε ανάλογη αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη έως και 400 kPa για 27% CS. Αναφέρεται ότι σωματίδια της πυριτίας αναπτύσσουν δεσμούς όχι μόνο μεταξύ τους αλλά και με τους κόκκους της άμμου αυξάνοντας την αντοχή της. Επιπρόσθετα, η υδραυλική διαπερατότητα του σταθεροποιημένου εδάφους μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού πυριτίας έως $1.9 \cdot 10^{-9}$ cm/s για 27% CS. Επιπρόσθετα, η υδραυλική διαπερατότητα του σταθεροποιημένου εδάφους μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού πυριτίας έως $1.9 \cdot 10^{-9}$ cm/s για 27% CS



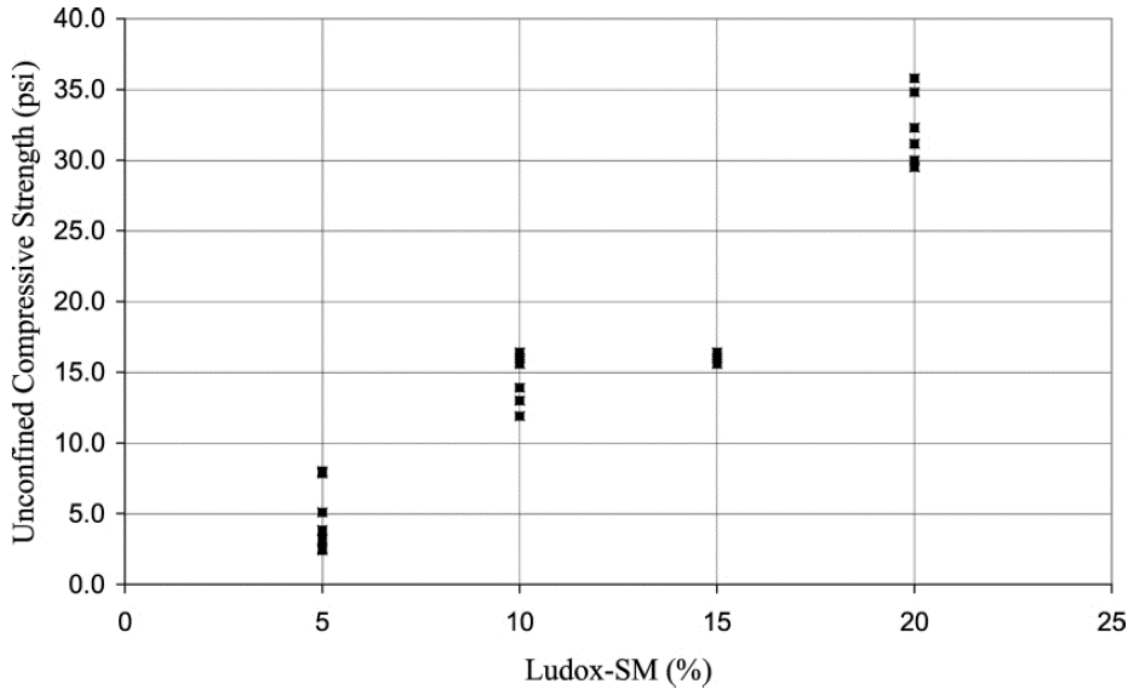
Σχήμα 2.65: Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και διαπερατότητα σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου Monterey σε σχέση με το ποσοστό πυριτίας (%) κ.β. (Persoff et al., 1999)

Οι Gallagher & Mitchell (2002) εκτέλεσαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε χαλαρά σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Monterey 0/30 εξετάζοντας την επίδραση του ποσοστού πυριτίας. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση της άμμου σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox SM[®] για να διασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη των κενών με το σταθεροποιητή. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν σε συγκεντρώσεις πυριτίας 5,10,15 και 20% κ.β. και αφέθηκαν να ωριμάσουν από 4 έως 56 μέρες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε σχέση με τη συγκέντρωση της πυριτίας (% CS) απεικονίζονται στο Σχήμα 2.66. Η μέση αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των δοκιμίων με 5% CS ήταν 32kPa ενώ για τα δοκίμια με 15% CS ήταν 110kPa. Ενώ η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ποιοτικά αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού πυριτίας όπως και στην έρευνα των Persoff et al. (1999), το μέγεθος της αντοχής είναι περίπου μισό. Οι ερευνητές συμπεραίνουν ότι τα δοκίμια τους ήταν πιο χαλαρά (σχετική πυκνότητα,

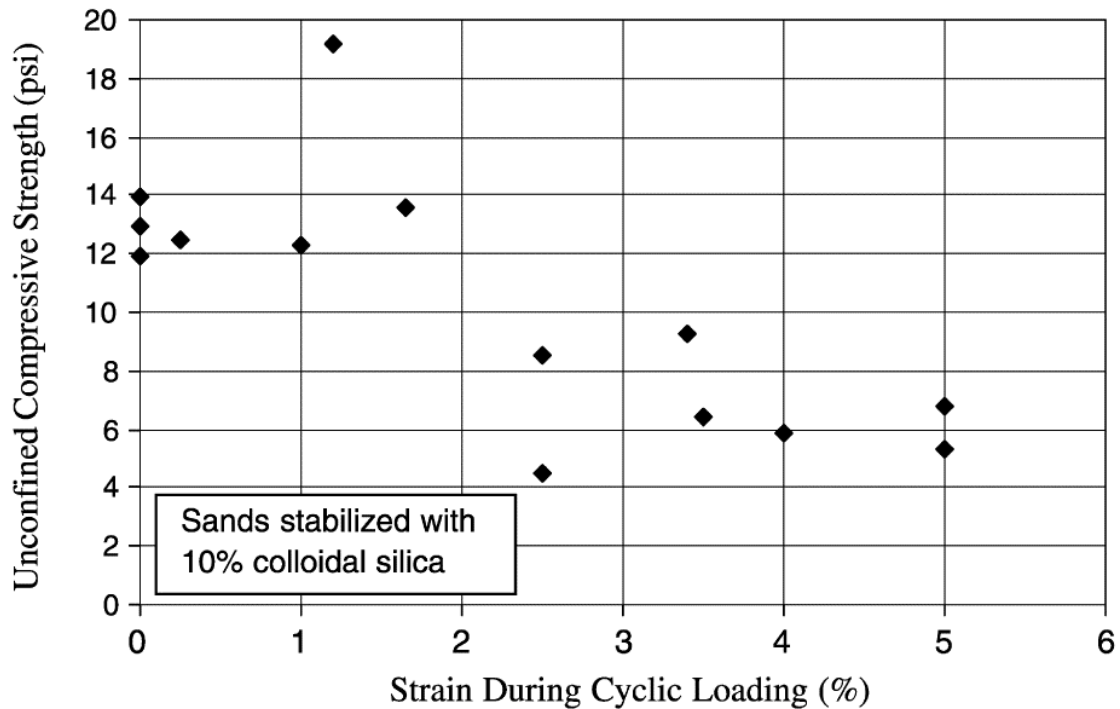
Dr=22%) από τα δοκίμια των Persoff et al. (1999). Επιπρόσθετα, οι Gallagher & Mitchell (2002) εκτέλεσαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια μετά από ανακυκλική φόρτιση. Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη επηρεάζεται από το μέγεθος της παραμόρφωσης που είχε αναπτυχθεί κατά την ανακυκλική φόρτιση (Σχήμα 2.67). Συγκεκριμένα, τα δοκίμια με συγκέντρωση πυριτίας 10% που υποβλήθηκαν σε ανακυκλική φόρτιση και ανέπτυξαν λιγότερο από 2% παραμόρφωση εμφάνισαν ελαφρώς μικρότερη αντοχή από τα δοκίμια που δεν υποβλήθηκαν σε ανακυκλική φόρτιση. Αντίθετα, τα δοκίμια που ανέπτυξαν παραμόρφωση μεγαλύτερη από 2% κατά την ανακυκλική φόρτιση εμφάνισαν πολύ μικρότερη αντοχή, έως και τη μισή αντοχή των δοκιμίων που υποβλήθηκαν απευθείας σε ανεμπόδιστη θλίψη. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι η απομείωση της αντοχής οφείλεται στην καταστροφή των δεσμών της πυριτίας από την ανάπτυξη παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης.

Οι Gallagher και Lin, 2009 εκτέλεσαν δοκιμές εισπίεσης του υγρολύματος σε εδαφικές στήλες άμμου υπό χαμηλές υδραυλικές κλίσεις για να μελετήσουν τους μηχανισμούς μεταφοράς των κολλοειδών σωματιδίων. Στη συνέχεια, εκτέλεσαν δοκιμές ανεμπόδιστη θλίψης σε δοκίμια που έλαβαν από τις σταθεροποιημένες εδαφικές στήλες. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι ένας απλός δείκτης του βαθμού επιτυχίας της σταθεροποίησης. Τα δοκίμια άμμου Nevada σταθεροποιημένα με ποσοστό πυριτίας Ludox-SM CS=5%, σχετικής πυκνότητας DR=41%, ανέπτυξαν αντοχή από 40 έως 60 kPa.

Η μηχανική συμπεριφορά της ιλυώδους άμμου μετά τη σταθεροποίηση της έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία μέσω δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (Moradi et al., 2015; Nozari et al., 2019). Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αναφέρεται ότι αυξάνεται με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε πυριτία. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι η αύξηση της αντοχής της ιλυώδους άμμου είναι μικρότερη από αυτήν της καθαρής άμμου, για την ίδια αύξηση στην περιεκτικότητα της πυριτίας. Επισημαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού ιλύος μέχρι 10% οδηγεί σε αύξηση της αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμίων, αλλά η περεταίρω αύξηση οδηγεί σε μείωση της αντοχής (Moradi et al., 2015; Nozari et al., 2019). Οι λεπτότεροι εδαφικοί κόκκοι ίσως προσελκύουν, μέσω ενός μηχανισμού πυρηνοποίησης, μία μεγάλη ποσότητα σωματιδίων πυριτίας, με αποτέλεσμα οι μεγαλύτεροι κόκκοι να απολαμβάνουν λιγότερο αποτελεσματική ενθυλάκωση.



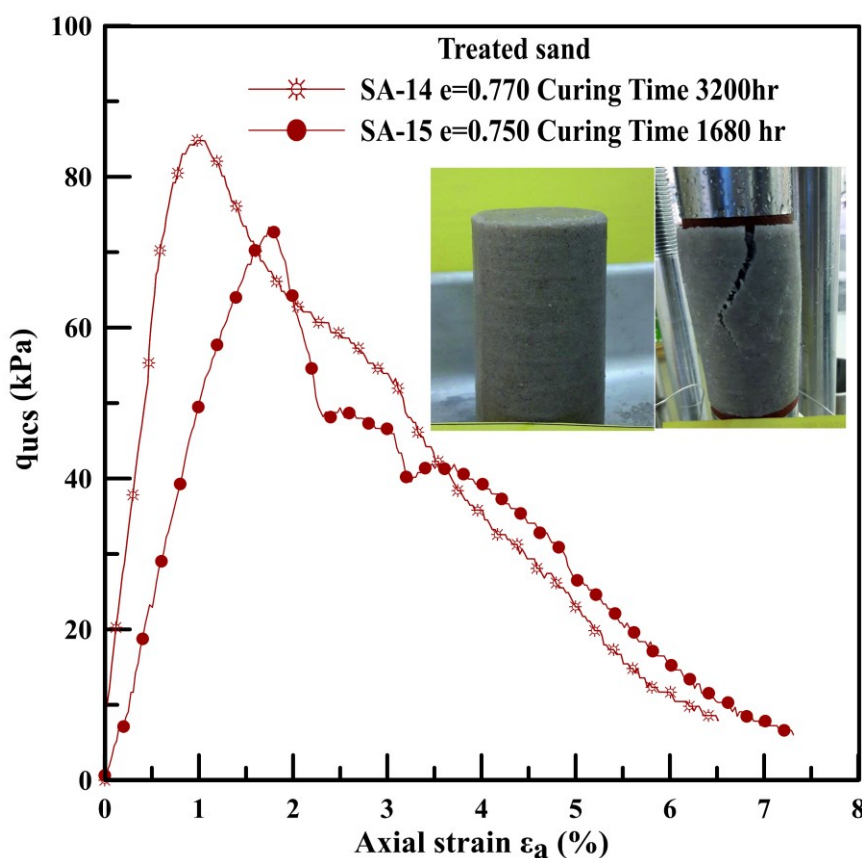
Σχήμα 2.66: Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου Monterey σε σχέση με το ποσοστό πυριτίας (%) κ.β. (Gallagher & Mitchell, 2002)



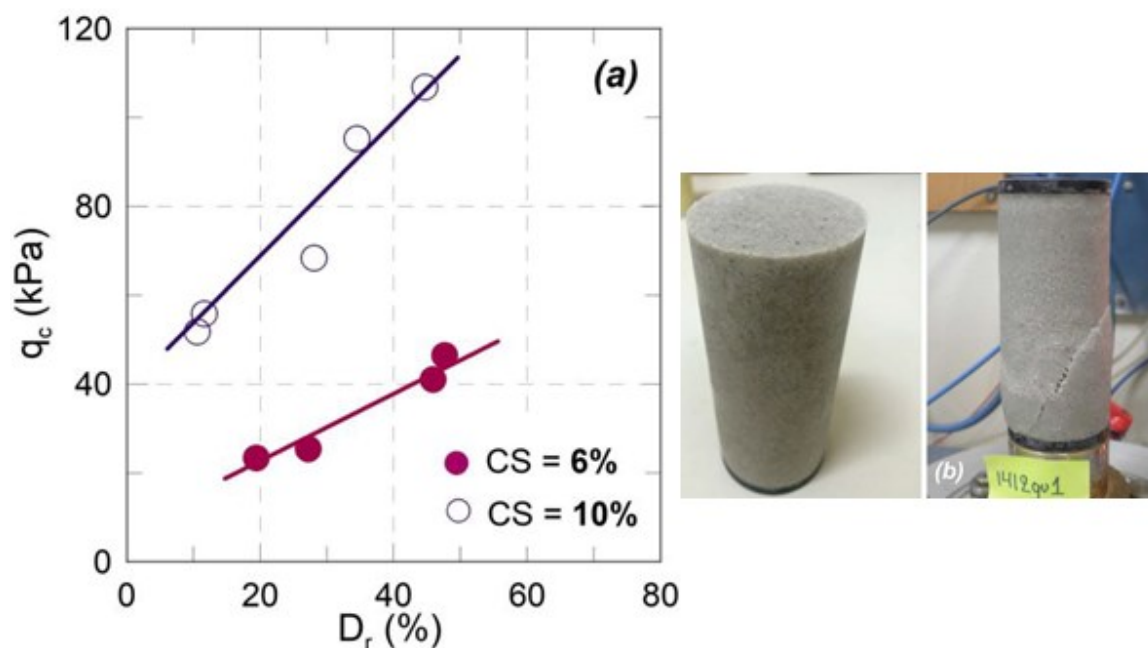
Σχήμα 2.67: Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου Monterey σε σχέση με το μέγεθος της παραμόρφωσης που αναπτύχθηκε μετά από ανακυκλική φόρτιση (Gallagher & Mitchell, 2002)

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στην άμμο M31 μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM εκτελέστηκαν από τους Georgiannou et al., 2017 και Vranna et al., 2020. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφάνισαν ψαθυρή συμπεριφορά ενώ αναπτύχθηκαν έντονα επίπεδα διάτμησης. Τα αποτελέσματα της έρευνας των Georgiannou et al., 2017 παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.68** σε όρους αντοχής και αξονικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι το σταθεροποιημένο χαλαρό δοκίμιο ($e=0.750$) με ποσοστό πυριτίας 10% και χρόνο ωρίμανσης 1680 hr (2 μηνών) ανέπτυξε αντοχή 70 kPa ενώ δοκίμιο παρόμοιας πυκνότητας με χρόνο ωρίμανσης 3200 hr (4 μηνών) εμφάνισε 15% μεγαλύτερη αντοχή (80 kPa). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με ρυθμό παραμόρφωσης 2%/min. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 σε ένα εύρος πυκνοτήτων της έρευνας των Vranna et al., 2020 παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.69**. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας και με την αύξηση του ποσοστού πυριτίας από $CS=6$ σε 10%. Ενδεικτικά, σταθεροποιημένο δοκίμιο ποσοστού $CS=6\%$ και σχετικής πυκνότητας $D_r=27\%$ ($e=0.738$) εμφανίζει αντοχή 25 kPa, ενώ σταθεροποιημένο δοκίμιο ποσοστού $CS=10\%$ και σχετικής πυκνότητας $D_r=28\%$ εμφανίζει αντοχή 68 kPa σε συμφωνία και με την προηγούμενη έρευνα.



Σχήμα 2.68: Αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης σταθεροποιημένων δοκιμών Άμμου M31 (Georgiannou et al., 2017)



Σχήμα 2.69: Αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης σταθεροποιημένων δοκιμίων Άμμου M31 (Antigoni Vranna et al., 2020)

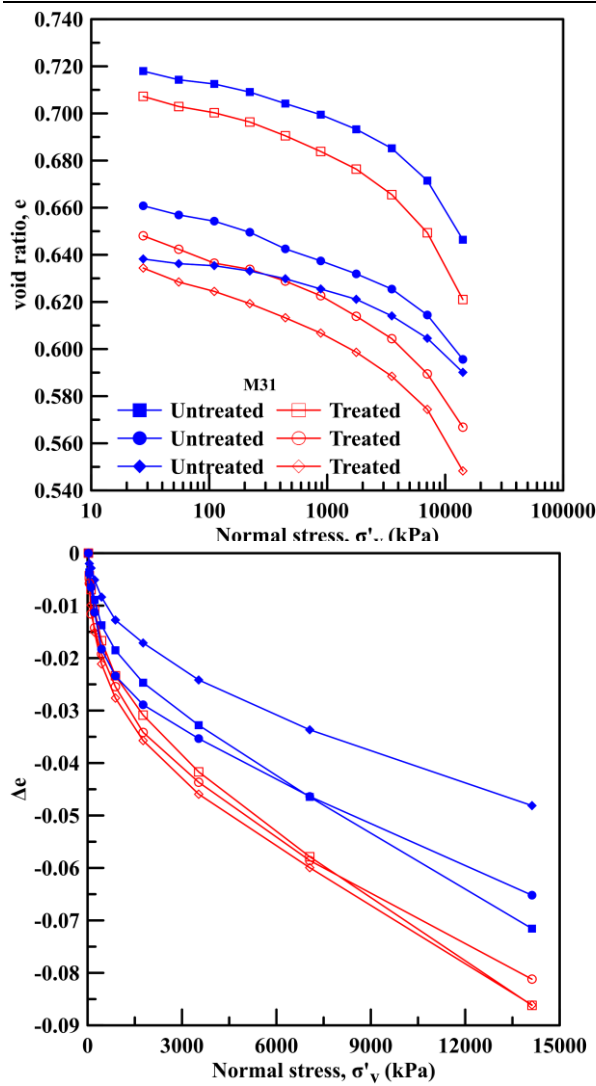
Δοκιμές Συμπιεσομέτρου

Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται ορισμένες εργαστηριακές μελέτες περιλαμβάνουν δοκιμές συμπιεσομέτρου σε σταθεροποιημένα δοκίμια ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στη συμπιεστότητα του εδάφους (Georgiannou et al., 2017; C. Wong et al., 2018; Ciardi et al., 2020; Pavloroulou & Georgiannou, 2021).

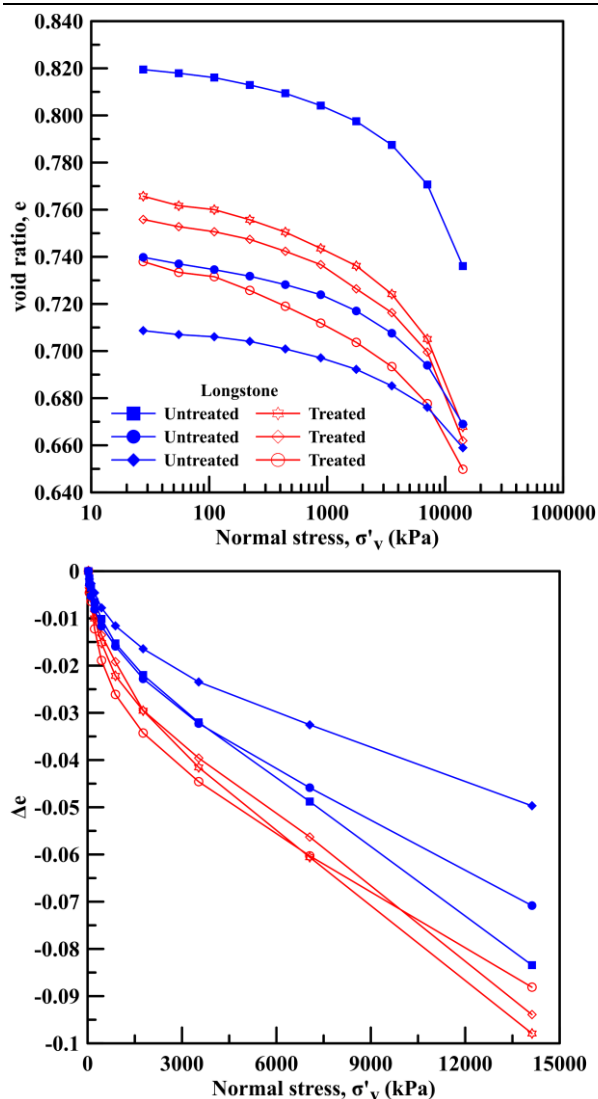
Οι Pavloroulou and Georgiannou 2021 εκτέλεσαν δοκιμές συμπιεσομέτρου σε άμμο M31 (στρογγυλεμένοι κόκκοι) και σε άμμο Longstone (γωνιώδεις κόκκοι) πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM περιεκτικότητας 10% κ.β.. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση του ξηρού εδαφικού υλικού στο υγρόλυμα της πυριτίας, σε ένα εύρος πυκνοτήτων, σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια και αφέθηκαν να ωριμάσουν για 50hr. Στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στην κυψέλη του συμπιεσομέτρου που είχε πληρωθεί με απιονισμένο νερό και τοποθετήθηκαν κορεσμένοι πορόλιθοι ώστε να επιτρέπεται η στράγγιση. Τα δοκίμια φορτίστηκαν ως και ορθή τάση, $\sigma'_v=14000$ kPa ενώ κάθε στάδιο φόρτισης διαρκούσε 24hr. Δοκιμές εκτελέστηκαν και στα αντίστοιχης πυκνότητας δοκίμια φυσικής άμμου. Τα αποτελέσματα της έρευνας για την άμμο M31 παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.70** και για την άμμο Longstone στο **Σχήμα 2.71** σε όρους δείκτη πόρων – ορθής τάσης. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση από τη φυσική για όλο το εύρος των πυκνοτήτων και για τις δύο άμμους. Όταν η σταθεροποιημένη άμμος συμπιέζεται ραγδαία υπό στραγγιζόμενες συνθήκες στο

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

συμπιεσόμετρο, η καμπύλη στερεοποίησης καμπυλώνει και απομακρύνεται από την καμπύλη της φυσικής άμμου με την αύξηση της ορθής τάσης ένδειξη αποδόμησης (structural breakdown). Επισημαίνεται στη βιβλιογραφία ότι το δίκτυο της πυριτίας μπορεί να τραυματιστεί εύκολα και η γέλη να μετατραπεί σε υγρή φάση. Κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης η γέλη τραυματίζεται απελευθερώνοντας νερό και το σκελετικό δίκτυο της σταθεροποιημένης άμμου αλλάζει υποχωρώντας στην πλέον πυκνή κατάσταση σε μεγάλες τάσεις. Αντίθετα, η φυσική άμμος δε φτάνει σε τόσο πυκνή κατάσταση ακόμη για ορθή τάση $\sigma'_v=14000\text{kPa}$.



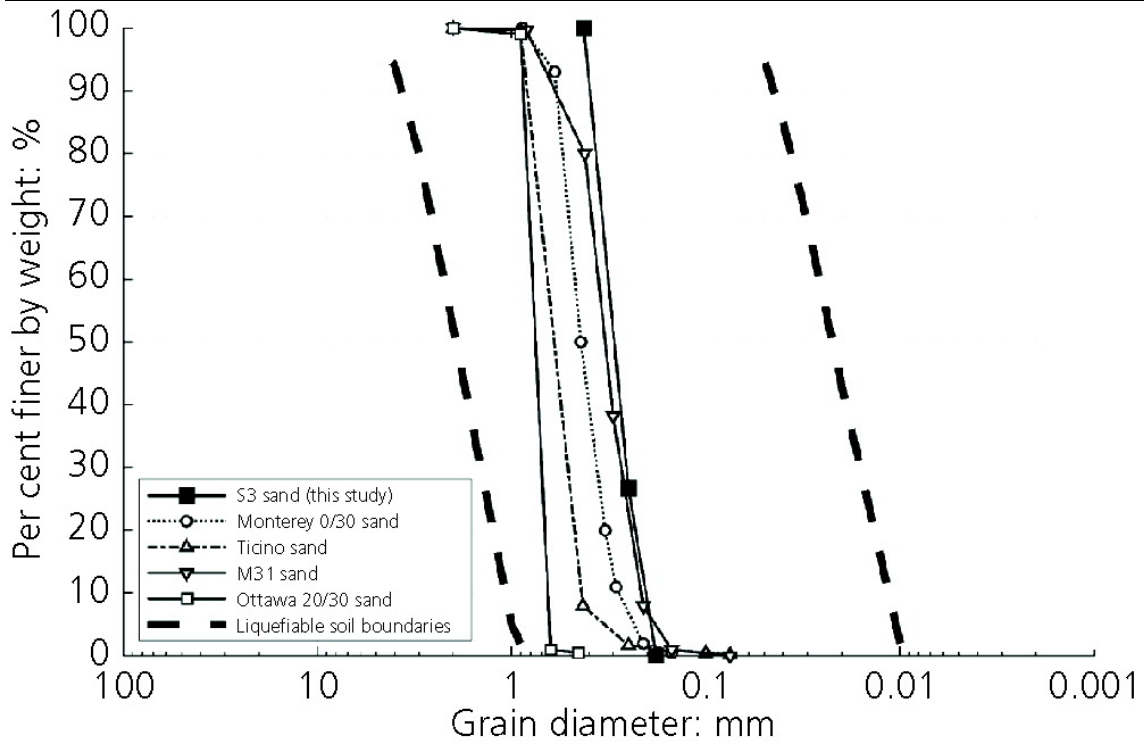
Σχήμα 2.70: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσμετρου για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου M31 (Ρανίωρουλου & Georgiannου, 2021)



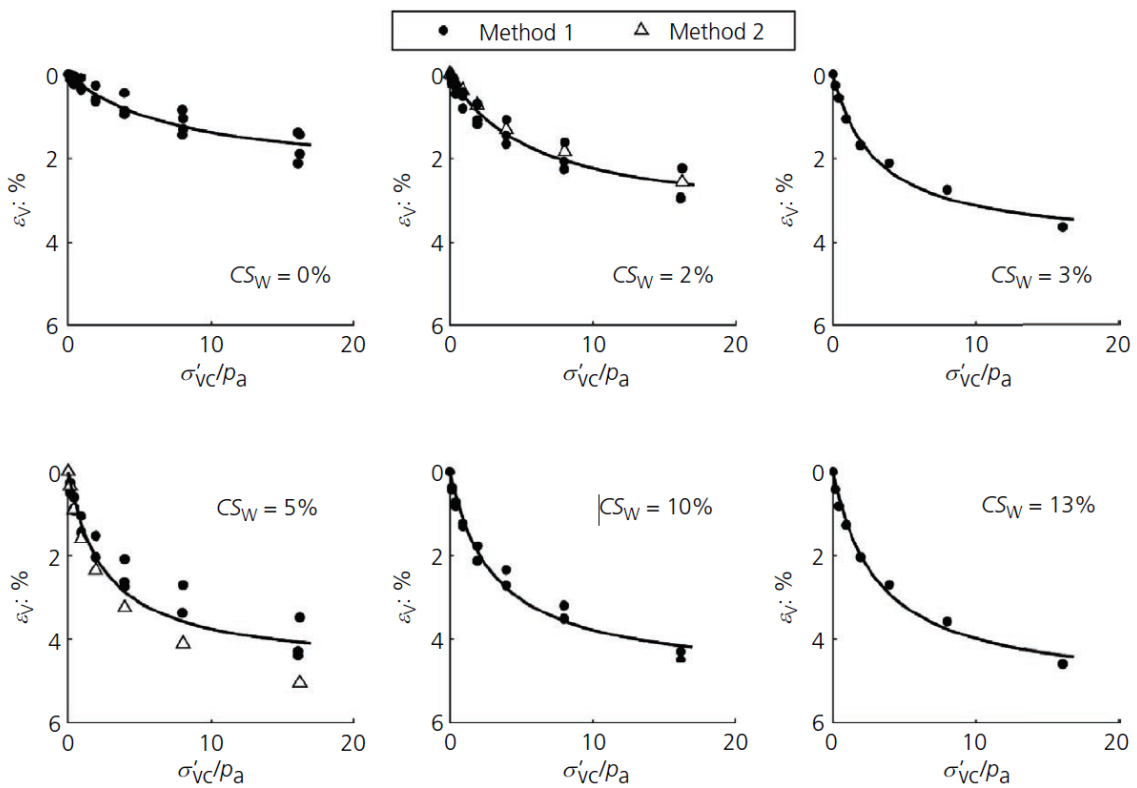
Σχήμα 2.71: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσμού για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου Longstone (Pavloroulou & Georgiannou, 2021)

Οι Ciardi et al., 2020 εκτέλεσαν δοκιμές συμπίεσμού στην άμμο S3, πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολοειδή πυριτία MasterRoc® MP 325 (BASF SE), εξετάζοντας διαφορετικά ποσοστά πυριτίας και τις δύο μεθόδους παρασκευής δοκιμών που είχαν αναφερθεί στη βιβλιογραφία (Georgiannou et al., 2017; C. Wong et al., 2018). Η άμμος S3 έχει παρόμοια κοκκομετρία (Σχήμα 2.72) και χαρακτηριστικά με την άμμο M31 των Georgiannou et al., 2017. Η πρώτη μέθοδος παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα, Method 1, ήταν η μέθοδος της εμφύσησης της άμμου στο υγρόλυμα πυριτίας (Georgiannou et al., 2017; Pavloroulou & Georgiannou, 2021) όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η δεύτερη μέθοδος παρασκευής, Method 2, ήταν η μέθοδος που ακολούθησαν οι Wong et al., 2018 στην οποία το υγρόλυμα της πυριτίας εισάγεται με σύριγγα στην ξηρή άμμο που βρίσκεται στο δαχτυλίδι του συμπίεσμού. Η εισαγωγή γίνεται από το πάνω μέρος του δοκιμίου και ο όγκος του σταθεροποιητή

ισούται με τον όγκο των κενών της άμμου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπίεστρο στην άμμο S3 με ποσοστά πυριτίας από 0 έως 13% παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.73** σε όρους ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_v (θετικά για συμπίεση) – ορθής τάσης κανονικοποιημένης ως προς την ατμοσφαιρική πίεση (σ'_{vc}/p_a). Παρατηρούμε ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις από τα δοκίμια της άμμου και για τις δύο μεθόδους παρασκευής. Η διαφορά ανάμεσα στη σταθεροποιημένη και τη φυσική άμμο αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού σταθεροποιητή. Ωστόσο η αύξηση του ποσοστού από CS>5% έως 13% δε φαίνεται να επηρεάζει περεταίρω την ενδοσιμότητα των σταθεροποιημένων δοκιμών. Τα αποτελέσματα των Ciardi et al., 2020 συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Georgiannou et al., 2017 και Pavloroulou and Georgiannou 2021 παρουσιάζοντας τη σταθεροποιημένη άμμο με ποσοστό πυριτίας CS=10% πιο ενδόσιμη από τη φυσική. Ωστόσο, τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των Wong et al., 2018 όπου η σταθεροποιημένη άμμος Leighton Buzzard εμφανίζει λιγότερη συμπίεστότητα από αυτή της φυσικής άμμου. Οι Ciardi et al., 2020 υποστηρίζουν ότι τα διαφορετικά αποτελέσματα των Wong et al., 2018 ίσως οφείλονται στο μεγάλο ποσοστό πυριτίας (CS>30%). Επισημαίνεται ωστόσο, ότι αν απαιτείται ένα τόσο μεγάλο ποσοστό πυριτίας για να περιοριστούν οι καθιζήσεις η αυξάνεται το κόστος της παθητικής σταθεροποίησης καθιστώντας τη μέθοδο λιγότερο ελκυστική.



Σχήμα 2.72: Κοκκομετρική διαβάθμιση των άμμων S3, Monterey 0/30, Ticino, M31, Ottawa 20/30 (Ciardi et al., 2020)

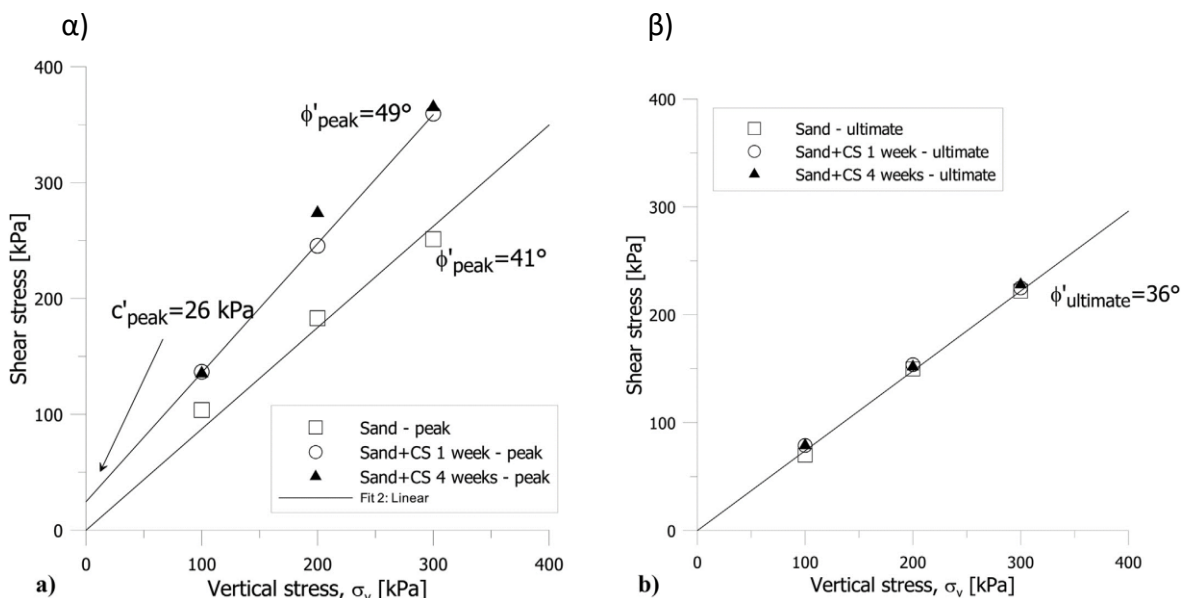


Σχήμα 2.73: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσομέτρου για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου S3 (Ciardi et al., 2020)

Δοκιμές Απευθείας Διάτμησης

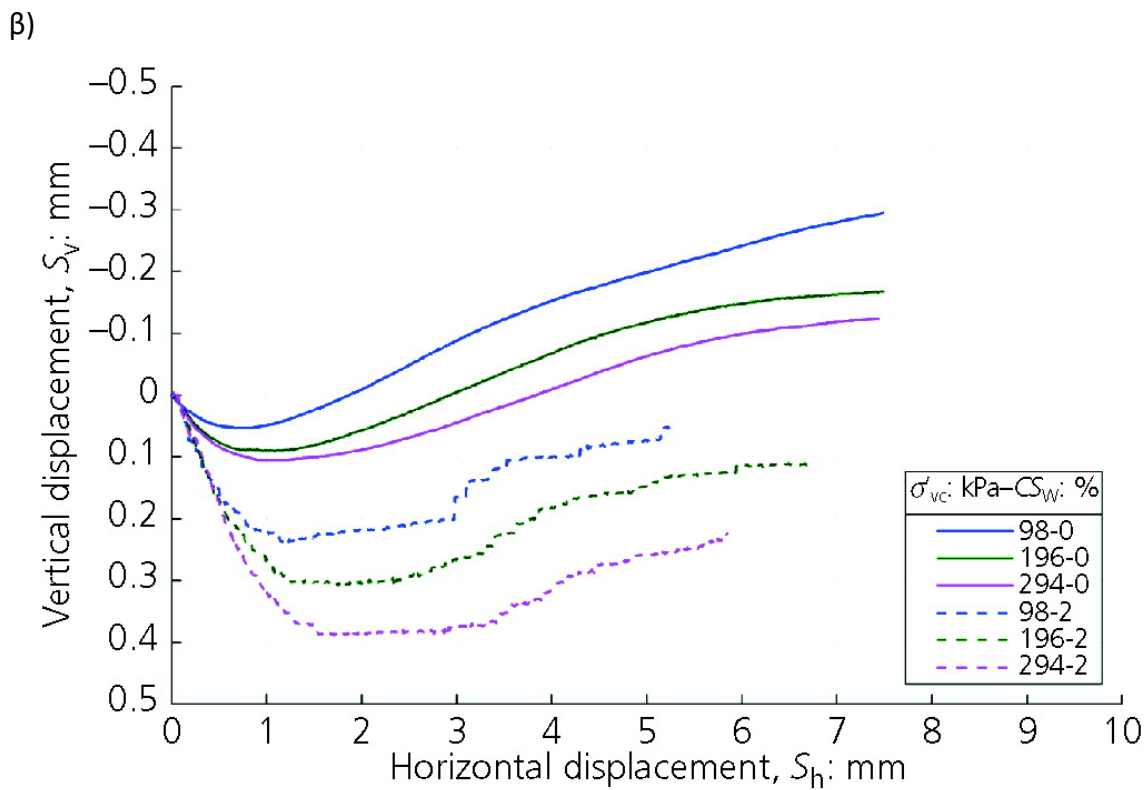
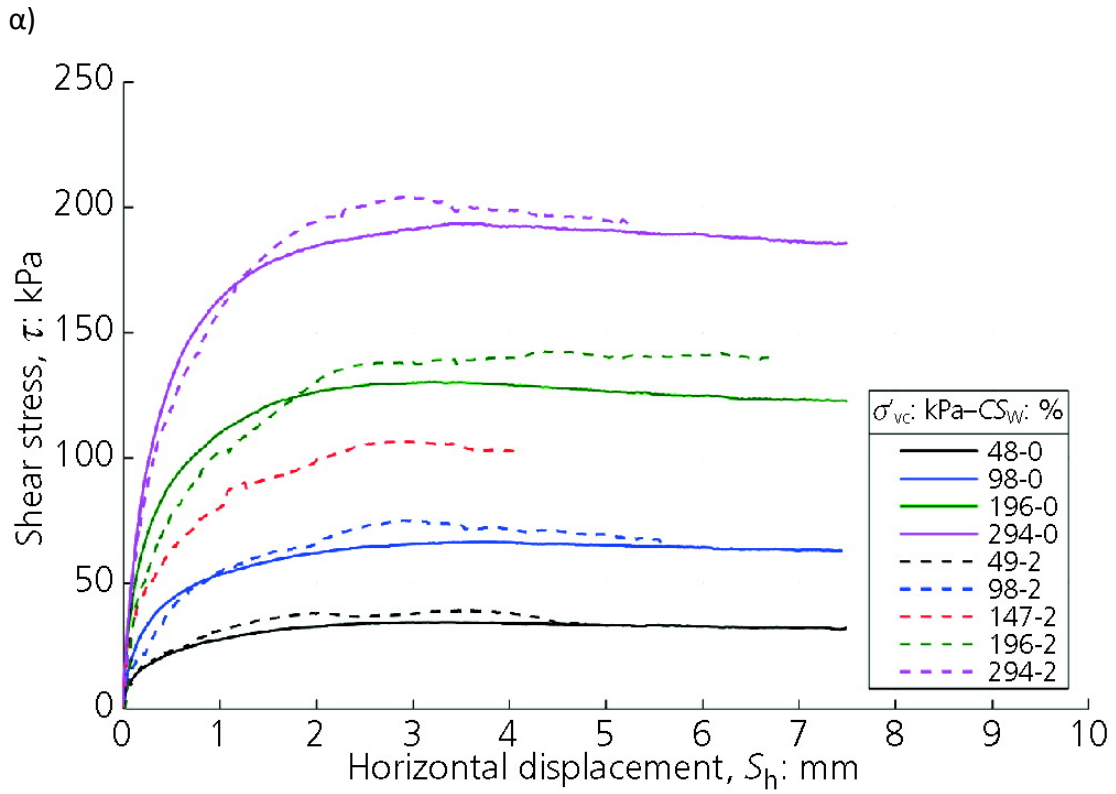
Για να μελετηθεί η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στις παραμέτρους αντοχής και στη διαστολικότητα της άμμου υπό μονοτονική φόρτιση εντοπίζονται στη βιβλιογραφία δοκιμές απευθείας διάτμησης σε σταθεροποιημένα δοκίμια. Οι δοκιμές στα σταθεροποιημένα δοκίμια εκτελούνται με πολύ αργό ρυθμό επιβαλλόμενης μετακίνησης ώστε να εξασφαλίζεται ελεύθερη στράγγιση και η αντοχή να εκφράζεται σε όρους ενεργών τάσεων.

Οι Wong et al., 2018 εκτέλεσαν δοκιμές απευθείας διάτμησης σε δοκίμια άμμου Leighton Buzzard πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία Meyco MP320 με ποσοστό CS=40%. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε κορεσμένα δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου μετά από ωρίμανση 1 και 4 εβδομάδων, υπό ενεργές τάσεις 100, 200 και 300 kPa. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη διαστολικότητα από τη φυσική άμμο που αυξάνει με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια με ενεργό τάση 100 kPa αναπτύσσουν μικρότερη αντοχή από την άμμο για μετακινήσεις <1mm ενώ στη συνέχεια εμφανίζουν μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή. Με την αύξηση την ενεργού τάσης τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν βελτιωμένη συμπεριφορά και για μετακινήσεις <1 mm. Η καμπύλη Mohr-Coulomb για την κατάσταση μέγιστης αντοχής (peak) (Σχήμα 2.74(α)) εμφανίζει συνοχή για τη σταθεροποιημένη άμμο $c'_{peak}=26\text{kPa}$ και μία αύξηση 8° στη μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής, ϕ'_{peak} , σε σχέση με αυτή της άμμου. Επιπρόσθετα, οι περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για την κρίσιμη/τελική κατάσταση (ultimate) της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου (Σχήμα 2.74(β)) ταυτίζονται παρουσιάζοντας μηδενική συνοχή και γωνία κρίσιμης κατάστασης $\phi'_{ultimate}=36^\circ$.



Σχήμα 2.74: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Leighton Buzzard: (α) Στην κατάσταση μέγιστης αντοχής; και (β) στην κρίσιμη κατάσταση (C. Wong et al., 2018)

Οι Ciardi et al., 2020 για να μελετήσουν την επίδραση ενός μικρού ποσοστού σταθεροποιητή στις παραμέτρους αντοχής της άμμου υπό μονοτονική φόρτιση, εκτέλεσαν δοκιμές απευθείας διάτμησης σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου S3 με ποσοστό CS=2%. Τα χαλαρά, σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση της ξηρής άμμου σε υγρόλυμα πυριτίας τύπου MasterRoc® MP 325 (BASF SE) σε ειδικά καλούπια. Μετά την ωρίμανσή τους τα τετραγωνικά δοκίμια (εμβαδού 60*60mm²) μεταφέρθηκαν στην κυψέλη της συσκευής που πληρώθηκε με νερό και στη συνέχεια στερεοποιήθηκαν με κατακόρυφη ορθή τάση από 48-294kPa για 24 ώρες. Ο ρυθμός διάτμησης ήταν 0.03mm/min και 0.015mm/min για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα δοκίμια αντίστοιχα ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη πίεσης του υγρού των πόρων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της άμμου (συνεχείς γραμμές) και της σταθεροποιημένης άμμου (διακεκομμένες γραμμές) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.75** σε όρους διατμητικής τάσης (τ) - οριζόντιας μετακίνησης (S_h) (**Σχήμα 2.75(α)**) και σε όρους κατακόρυφης μετακίνησης (S_v) - οριζόντιας μετακίνησης (S_h) (**Σχήμα 2.75(β)**) για διάφορες ενεργές τάσεις. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος για μετακινήσεις $S_h < 1\text{mm}$ εμφανίζει μικρότερη αντοχή ενώ η τιμή της μέγιστης αντοχής είναι ελάχιστα μεγαλύτερη σε σχέση με φυσική άμμο. Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει πιο έντονη συστολή (μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση) σε σχέση με τη φυσική άμμο στο αρχικό στάδιο φόρτισης επαληθεύοντας τα αποτελέσματα του συμπιεσομέτρου της ίδιας έρευνας. Ενώ η προσθήκη πυριτίας ποσοστού CS=2% εντείνει τη συστολή των δοκιμών, δε φαίνεται να επηρεάζει το διαστολικό κλάδο και τη μέγιστη διαστολικότητα τους. Αυτό το συμπέρασμα έρχεται σε αντίθεση με άλλους ερευνητές που παρατήρησαν πολύ έντονη διαστολική συμπεριφορά στα σταθεροποιημένα δοκίμια (Porcino et al., 2012; Georgiannou et al., 2017; Ρανίορουλου & Georgiannou, 2021). Αυτή η διαφορά ίσως οφείλεται στο μικρό ποσοστό σταθεροποιητή CS=2%, σε σχέση με το μεγαλύτερο ποσοστό CS=10% των άλλων ερευνητών. Μετά από γραμμική παλινδρόμηση των πειραματικών δεδομένων, υιοθετώντας το κριτήριο Mohr -Coulomb οι ερευνητές προσδιόρισαν τη μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου S3 $\phi \sim 33^\circ$ ενώ υπολόγισαν τη συνοχή της σταθεροποιημένης άμμου $c = 8 \text{ kPa}$.



Σχήμα 2.75: Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο S3: (α) διατμητική τάση - οριζόντια μετακίνηση και (β) κατακόρυφη μετακίνηση - οριζόντια μετακίνηση (Ciardi et al., 2020)

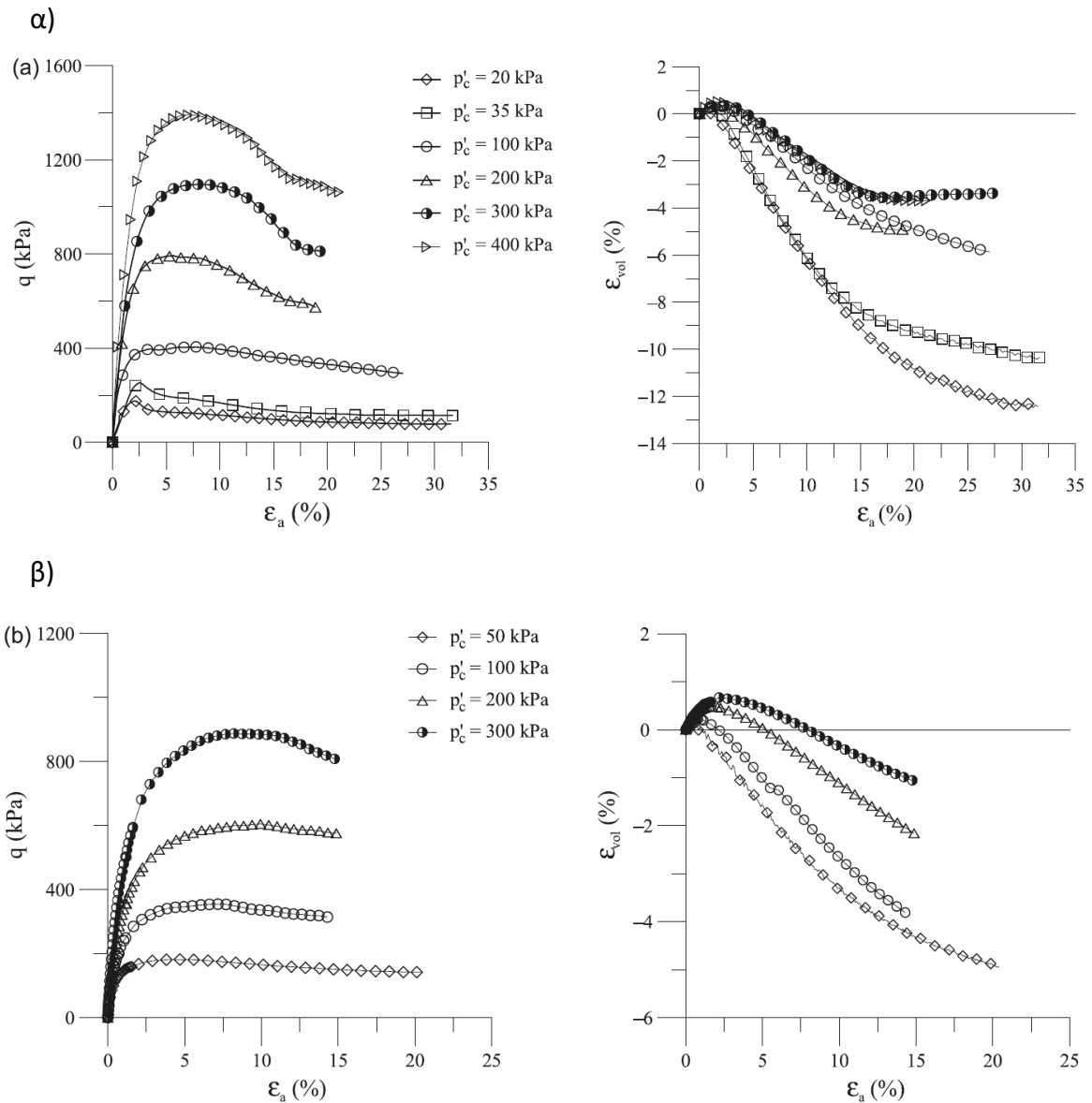
Δοκιμές Τριαξονικής Θλίψης

Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης, στη βιβλιογραφία εντοπίζονται λιγοστές μελέτες που περιλαμβάνουν τριαξονικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα δοκίμια (Porcino et al., 2012; Georgiannou et al., 2017; Antigoni Vranna et al., 2020). Οι έρευνες μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν μόνο δοκιμές τριαξονικής θλίψης ενώ δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα από τριαξονικό εφελκυσμό. Επιπρόσθετα, οι διαφορές στην παρασκευή των δοκιμών (τύπος και περιεκτικότητα πυριτίας) στον τρόπο εκτέλεσης των δοκιμών (επιβολή αντιπίεσης, μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων) στις υπάρχουσες έρευνες οδηγούν σε αποσπασματικά συμπεράσματα, αδυνατώντας να περιγράψουν ολοκληρωμένα την απόκρισή της σταθεροποιημένης άμμου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι (Porcino et al., 2012) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένης άμμου Ticino (TS) υπό μονοτονική φόρτιση, διεξάγοντας τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης. Για τη σταθεροποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε υγρόλυμα πυριτικού νατρίου (sodium-silicate) τύπου TSG περιεκτικότητας 10% κ.β.. Τα δοκίμια φυσικής άμμου παρασκευάστηκαν με ξηρή εμβάπτιση εδαφικού υλικού (dry air pluviation). Καθορισμένη ποσότητα ξηρής άμμου διοχετεύεται στο καλούπι από συγκεκριμένο ύψος επιτυγχάνοντας σχετική πυκνότητα $D_r = 45\%$, ενώ κατακόρυφη τάση 10 kPa ασκείται στο πάνω μέρος του δοκιμίου για να διατηρηθεί η ευστάθεια. Για την παρασκευή των σταθεροποιημένων δοκιμών στην καθορισμένη ποσότητα ξηρής άμμου σχετικής πυκνότητας $D_r = 45\%$ εισπνέζεται διοξείδιο του άνθρακα και απαερωμένο νερό για να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας. Στη συνέχεια, το υγρόλυμα πυριτίας 10% συγκέντρωσης κατά βάρος εισπνέζεται από το κάτω μέρος του καλουπιού ως το πάνω μέχρι να αντικατασταθεί όλο το νερό που βρίσκεται στους πόρους. Στο δοκίμιο εισπνέζεται τριπλάσιος όγκος υγρού από τον όγκο των κενών. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει για 24 ώρες ώστε να αναπτυχθούν οι δεσμοί του. Η έρευνα των Porcino et al., 2012 είναι από τις λίγες εργαστηριακές μελέτες που στα σταθεροποιημένα δοκίμια επιβάλλεται αντιπίεση και μετράται η εκροή/εισορή του νερού (ογκομετρική παραμόρφωση). Ο κορεσμός του δοκιμίου στην τριαξονική συσκευή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αντιπίεσης (back pressure) 300 kPa για 12 ώρες εξασφαλίζοντας τιμές $B > 0.96$. Στη συνέχεια, το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα σε ένα εύρος αρχικής μέσης ενεργού τάσης από $p'_c = 20$ έως 400 kPa και αφήνεται σε ηρεμία για 3 ώρες πριν τη διάτμηση. Αυτός ο χρόνος θεωρήθηκε από τους συγγραφείς αρκετός για την ολοκλήρωση της στράγγισης και την αποφυγή φαινομένων ερπυσμού.

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης ($q = \sigma_1 - \sigma_3$)- αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_a) και σε όρους ογκομετρικής (ϵ_{vol}) – αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_a) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.76(α)** και στο **Σχήμα 2.76(β)** για τη σταθεροποιημένη και για τη φυσική άμμο TS αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη

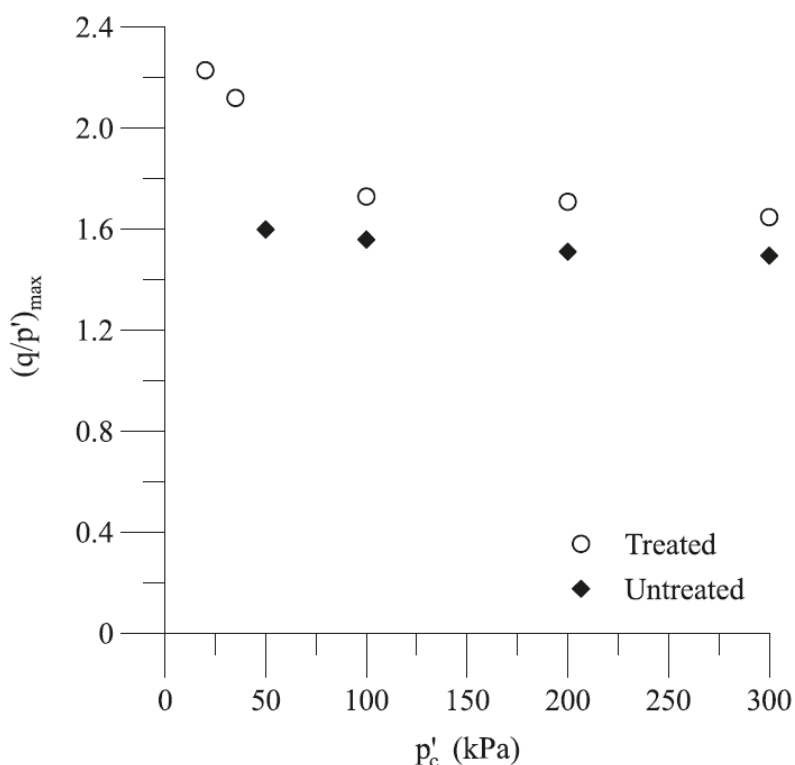
αποκλίνουσα τάση από τη φυσική για όλο το εύρος των ενεργών τάσεων. Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει πιο ψαθυρή (brittle) συμπεριφορά με τη διαφορά μέγιστης και τελικής αποκλίνουσας τάσης να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της φυσικής. Στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης άμμου μετά τη μέγιστη αντοχή ακολουθεί ένας κλάδος χαλάρωσης (strain softening) που συνοδεύεται από ανάπτυξη διατμητικών επιπέδων (shear bands). Επισημαίνεται ότι η άμμος μετά τη σταθεροποίησή της με την πυριτιά εμφανίζει έντονη διαστολικότητα μετά το σημείο αλλαγής φάσης (phase transformation) και καταλήγει σε μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις από τη φυσική με τους ερευνητές να τη χαρακτηρίζουν ως πυκνή άμμο.



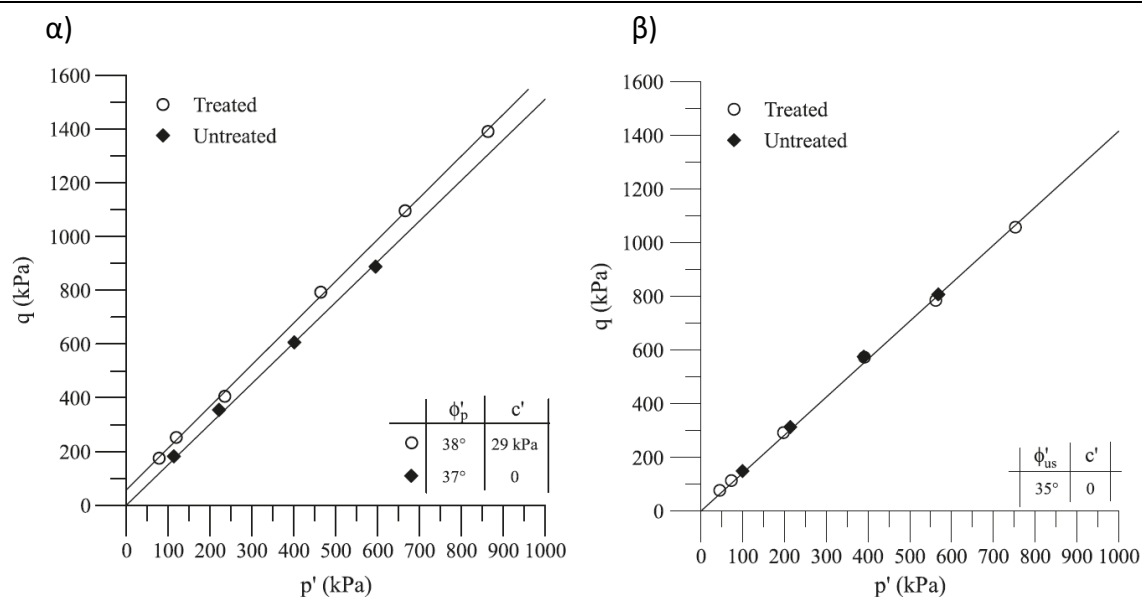
Σχήμα 2.76: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό ελεύθερη στράγγιση σε όρους διατμητικών τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων και ογκομετρικών - αξονικών παραμορφώσεων: (α) σταθεροποιημένη άμμος και (β) φυσική άμμος (Porcino et al., 2012)

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Η αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου αναφέρεται ότι επηρεάζεται από την αρχική ενεργό τάση. Στο **Σχήμα 2.77** όπου απεικονίζεται ο μέγιστος λόγος τάσεων, $(q/p')_{\max}$, σε σχέση με την αρχική μέση ενεργό τάση, p'_c , για τη σταθεροποιημένη άμμο (κενά σύμβολα) και για τη φυσική άμμο (γεμάτα σύμβολα), παρατηρούμε ότι η καμπύλη αντοχής καμπυλώνεται έντονα για ενεργές τάσεις $p'_c < 100 \text{ kPa}$, ενώ η καμπύλη της άμμου είναι γραμμική. Τελικά, οι ερευνητές σχεδίασαν γραμμικές περιβάλλουσες μεγίστης αντοχής για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο TS, πρακτικά παράλληλες μεταξύ τους, με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi = 37^\circ$ και $\phi = 38^\circ$ αντίστοιχα, ενώ υπολόγισαν ότι η συνοχή της σταθεροποιημένης άμμου είναι $c = 29 \text{ kPa}$ (**Σχήμα 2.78(α)**). Αντίθετα, η κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας στην Κρίσιμη Κατάσταση δεν δείχνει επηρεασμένη από την προσθήκη της πυριτίας, με τη γωνία κρίσιμης κατάστασης για την άμμο TS πριν και μετά τη σταθεροποίησή τα να προκύπτει $\phi = 35^\circ$ (**Σχήμα 2.78(β)**).



Σχήμα 2.77: Επίδραση τάσης στερεοποίησης, p'_c , στο μέγιστου λόγο τάσεων, q/p' , για σταθεροποιημένη και φυσική άμμο TS σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση (Porcino et al., 2012)

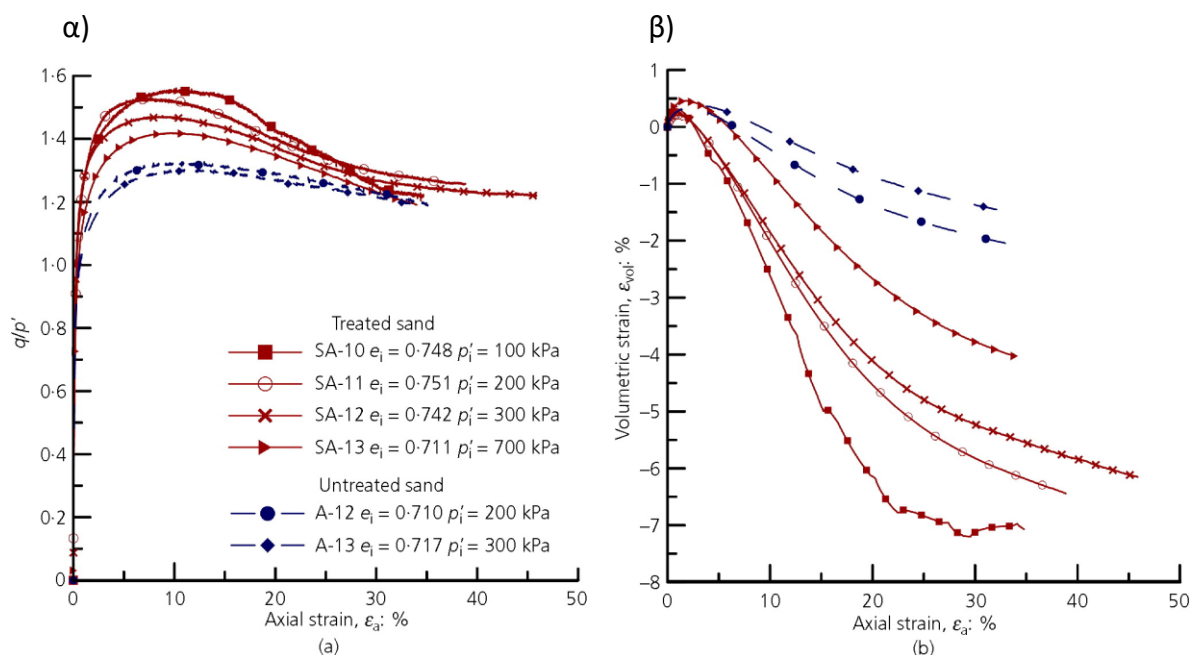


Σχήμα 2.78: Περιβάλλουσες φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου TS στο χώρο αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' : (α) στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και (β) στην κρίσιμη κατάσταση (Porcino et al., 2012)

Στην δημοσίευση των και Georgiannou et al., 2017 εξετάζεται η συμπεριφορά της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία (Ludox-SM) σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Για την παρασκευή των δοκιμών άμμου εφαρμόστηκε εμβάπτιση του εδαφικού ξηρού υλικού σε απιονισμένο νερό (water pluviation) και για την παρασκευή των σταθεροποιημένων δοκιμών εμβάπτιση σε υγρόλυμα πυριτίας με ποσοστό CS=10%. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την παρασκευή ομοιόμορφων δοκιμών με δομή που προσομοιάζει τη δομή των εδαφικών υλικών στη φύση (Vaid et al.1999).. Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε ποσοστό σταθεροποιητή κατά βάρος CS=10%. Ως χρόνος γέλης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την αύξηση του ιξώδους σε 100 cP και υπολογίστηκε ότι είναι 10 ώρες (Agaroulaki & Paradimitriou, 2018).

Οι τριαξονικές δοκιμές στην φυσική και σταθεροποιημένη άμμο εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) και μέτρηση εκροής/εισροής του νερού. Επισημαίνεται στο στάδιο του κορεσμού η επιβολή μεγάλης τιμής αντιπίεσης (back pressure) δε φαίνεται να καταστρέφει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται σε όρους λόγου τάσεων, q/p' (αποκλίνουσα τάση/ αρχική μέση ενεργός τάση)- αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_a) (Σχήμα 2.79(α)) και σε όρους ογκομετρικής (ϵ_{vol}) – αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_a) (Σχήμα 2.79(β)) για τη σταθεροποιημένη (κόκκινες συνεχείς καμπύλες) και για τη φυσική άμμο M31 (μπλε διακεκομμένες καμπύλες) σε ένα εύρος αρχικής μέσης ενεργού τάσης από $p'_i=100$ έως 700 kPa. Η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου λόγου των τάσεων q/p' από την αντίστοιχη πυκνότητας φυσική άμμο ενώ εμφανίζει συνολικά μια πιο ψαθυρή συμπεριφορά, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Porcino et al.,

2012. Ο λόγος τάσεων των σταθεροποιημένων δοκιμών μετά το μέγιστο μειώνεται προσεγγίζοντας σε μεγάλες παραμορφώσεις την τιμή της φυσικής άμμου. Επιπρόσθετα, μετά τη σταθεροποίηση της, η άμμος εμφανίζει έντονη διαστολικότητα και αναπτύσσει πολύ μεγάλες ογκομετρικές παραμορφώσεις. Αυτό το φαινόμενο εντείνεται με τη μείωση της αρχικής τάσης στερεοποίησης. Επισημαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της διαστολικότητας αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την επίτευξη του μέγιστου λόγου των τάσεων και στα σταθεροποιημένα και στα φυσικά δοκίμια άμμου M31, ένδειξη ότι δεν υπάρχει τιμεντοποίηση μετά τη σταθεροποίηση (Cuccovillo & Coop, 1999).

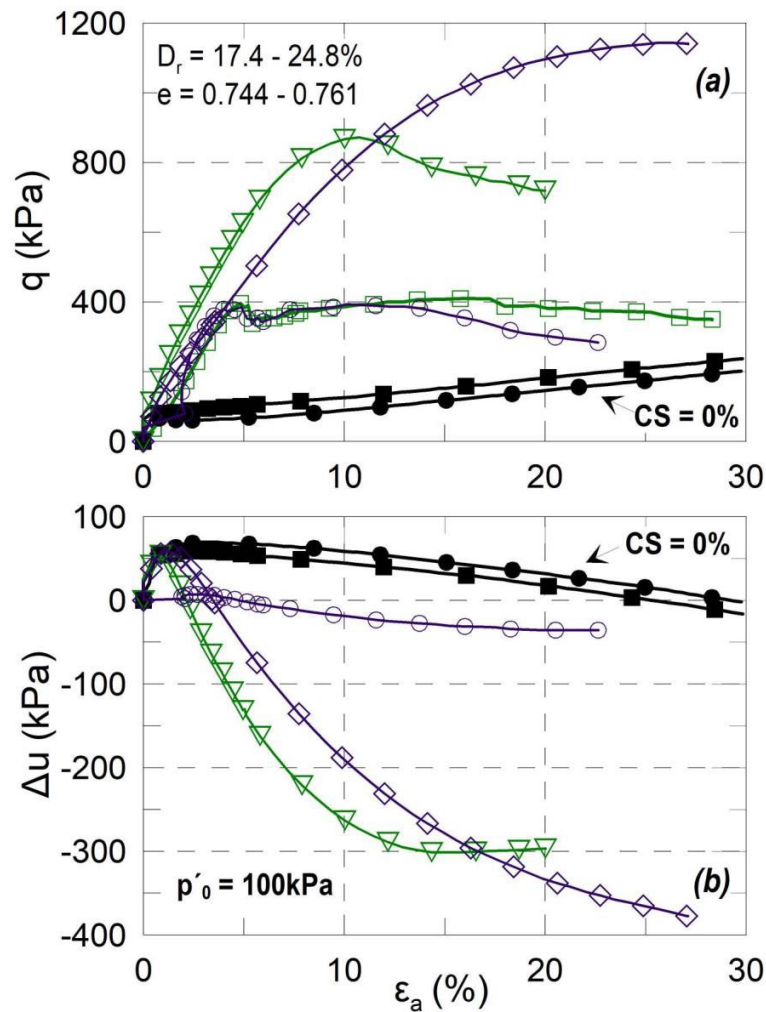


Σχήμα 2.79: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31: (α) Καμπύλες λόγου τάσεων q/p' -αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a και (β) καμπύλες ογκομετρικής ϵ_{vol} -αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a (Georgiannou et al., 2017)

Οι Vranna et al., (2020) εκτέλεσαν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κolloειδή πυριτία Ludox-SM υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στη βιβλιογραφία έχει επισημανθεί ότι ο κορεσμός των σταθεροποιημένων δοκιμών μέσω της επιβολής αντιπίεσης μετά την ωρίμανση και πριν τη φόρτιση, μπορεί να καταστρέψει τους δεσμούς και να διαταράξει τη δομή της σταθεροποιημένης άμμου (Gallagher & Mitchell, 2002; Mollamahmutoglu & Yilmaz, 2010; Antigoni Vranna et al., 2020). Οι Vranna et al., (2020) μελέτησαν την επίδραση της επιβολής αντιπίεσης (back pressure) στη μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου εκτελώντας δοκιμές με αντιπίεση $u_b=300$ kPa, $u_b<5$ και δοκιμές χωρίς καθόλου αντιπίεση. Όλα τα δοκίμια της φυσικής άμμου κορέστηκαν με αντιπίεση $u_b=300$ kPa. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.80** σε όρους αποκλίνουσας τάσης q -αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a και σε όρους υπερπίεσης υγρού πόρων Δu -αξονικής

παραμόρφωσης για τα φυσικά δοκίμια άμμου (μαύρες καμπύλες με γεμάτα σύμβολα) και για τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 με ποσοστό πυριτίας 10% (πράσινες και μωβ καμπύλες με κενά σύμβολα). Τα δοκίμια έχουν παρόμοιες πυκνότητες ($D_r = 17.4 - 24.8\%$) και έχουν στερεοποιηθεί υπό ενεργό τάση $p'_o=100\text{kPa}$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια που δεν είχαν αντιπίεση ή είχαν πρακτικά μηδενική ($u_b < 5$) εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά σε όρους αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης. Είναι αξιοσημείωτο ότι το σταθεροποιημένο δοκίμιο με $u_b < 5$ δε φαίνεται να μεταβάλλει καθόλου την πίεση του υγρού των πόρων, σε αντίθεση με τα δοκίμια της άμμου που εμφανίζουν αρχικά τάση για συστολή και στη συνέχεια για διαστολή. Αντίθετα, τα σταθεροποιημένα δοκίμια που έχουν κορεστεί με $u_b = 300\text{kPa}$ εμφανίζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν αρχικά τάση για συστολή με τιμές Δu παρόμοιες με αυτές της φυσικής άμμου και στη συνέχεια εμφανίζουν έντονη τάση για διαστολή που συνοδεύεται με αύξηση της αποκλίνουσας τάσης q . Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι οι αρχικά θετικές τιμές Δu οφείλονται στην καταστροφή του δικτύου της πυριτίας εξαιτίας της αύξησης της αντιπίεσης (back pressure) οδηγώντας σε συναίρεση (Enforced syneresis) και οι αρνητικές τιμές Δu στα συμπλέγματα (clusters) που ίσως έχουν δημιουργηθεί μετά την καταστροφή της αρχικής δομής. Συνεπώς, οι Vranna et al., (2020) δεν επέβαλλαν αντιπίεση στα σταθεροποιημένα δοκίμια τους και θεώρησαν ότι οι ενεργές τάσεις ισούνται με τις ολικές τάσεις στις μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές της εργασίας τους.

Ωστόσο, σε πρόσφατες μελέτες (Porcino et al., 2011, 2012; Georgiannou et al., 2017; Porcino & Marcianò, 2017; P. K. Triantafyllos et al., 2020; Pavlopoulou & Georgiannou, 2021) οι ερευνητές χρησιμοποίησαν υψηλές τιμές αντιπίεσης για τον κορεσμό των σταθεροποιημένων δοκιμίων και την ακριβή μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων αναδεικνύοντας μάλιστα την έντονη διαστολική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η έντονη διαστολική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμίων καθιστά αναγκαία την επιβολή αντιπίεσης στο στάδιο του κορεσμού για αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης (cavitation) στις αστράγγιστες δοκιμές (Georgiannou et al., 2017). Η σπηλαιώση συμβαίνει στα υγρά όταν η πίεση μέσα στον αγωγό (στους πόρους) είναι μικρότερη από την ταξινομημένη πίεση βρασμού. Όταν η στατική πίεση του υγρού πέφτει χαμηλότερα της πίεσης του ατμού τότε δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού και οι μέτρηση της πίεσης του υγρού δεν είναι πλέον εφικτή. Στο **Σχήμα 2.80** παρατηρούμε ότι το σταθεροποιημένο δοκίμιο με $u_b < 5$ kPa δεν εμφάνισε διαστολική συμπεριφορά γιατί προκλήθηκε άμεσα (σε μικρές παραμορφώσεις) το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Αντίστοιχα, το σταθεροποιημένο δοκίμιο με $u_b = 300\text{kPa}$ (πράσινη γραμμή) φαίνεται να «εξάντλησε» τη διαθέσιμη πίεση ($\Delta u = -300$ kPa και $u_b = 300\text{kPa}$) εμφανίζοντας σπηλαιώση, διακόπτοντας την τάση για διαστολή πριν τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση.



	CS (%)	e	D_r	u_b (kPa)
treated	○ 10	0.761	17.8%	<5 back-saturated*
	□ 10**	0.744	24.8%	0 not back-saturated
	◇ 10	0.762	17.4%	300
	▽ 10	0.750	20.2%	300
untreated	● 0	0.753	21.2%	300
	■ 0	0.741	25.8%	300

* under a very small gradient of about 5kPa

** pore water pressure not measured

Fig 04

Σχήμα 2.80: Επίδραση της επιβολής αντιπίεσης (back pressure) στα δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία σε όρους αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης και σε όρους υπερπίεσης υγρού των πόρων Δu - αξονικής παραμόρφωσης (Antigoni Vranna et al., 2020)

2.9.3 Ανακυκλική και Δυναμική Συμπεριφορά

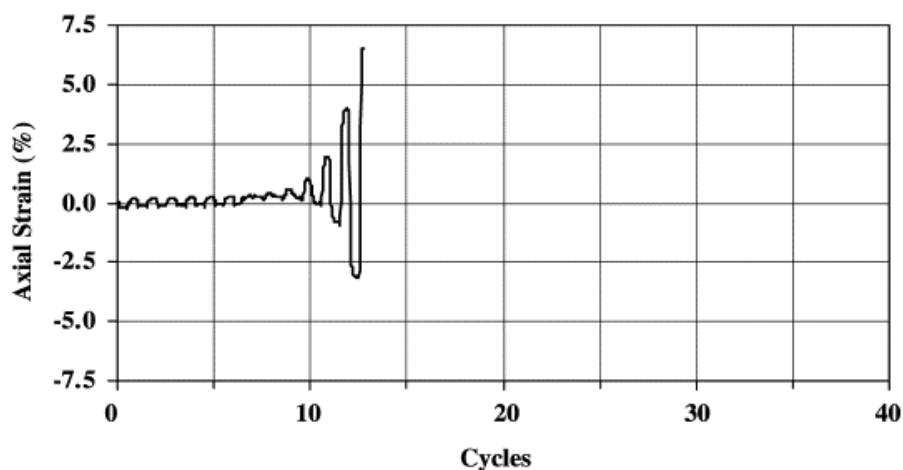
Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου υπό συνθήκες σεισμικής φόρτισης, έχουν διεξαχθεί διάφορες εργαστηριακές μελέτες που επικεντρώνονται σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστεί η αντίσταση του σταθεροποιημένου (με κολλοειδή πυριτία) εδάφους στην ρευστοποίηση. Ιστορικά, οι περισσότεροι ερευνητές υιοθέτησαν την άποψη της Gallagher, 2000 ότι η επιβολή αντιπίεσης στο σταθεροποιημένο δοκίμιο καταστρέφει τη δομή του, διεξάγοντας ανακυκλικές δοκιμές όπου η αντίσταση σε ρευστοποίηση καταγραφόταν χωρίς να γίνεται μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων (Gallagher & Mitchell, 2002; Antigoni Vranna et al., 2020; Ciardi et al., 2020). Επιπλέον, άλλοι ερευνητές επέλεξαν να διεξάγουν δοκιμές απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο ώστε να αποφύγουν την μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων στις αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές (Díaz-Rodríguez et al., 2008). Στις παραπάνω έρευνες, η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση ορίζεται από τους κύκλους ανακυκλικής φόρτισης συγκεκριμένου εύρους τάσεων που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους (DA) καθορισμένης τιμής (π.χ. 1.5 ή 5%). Για παράδειγμα, σε ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές ως DA ορίζεται η μέγιστη διαφορά σε παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου κύκλου θλίψης και εφελκυσμού. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Georgiannou et al., 2017 το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας έχει τη δυνατότητα να απορροφά και να αποβάλλει ελεύθερο νερό γι' αυτό και είναι πολύ σημαντικό να μετριέται η πίεση πόρων ώστε να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται ελάχιστες εργαστηριακές μελέτες που περιλαμβάνουν ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου με ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων (Kodaka et al., 2005; Porcino et al., 2012; Pavaloroulou & Georgiannou, 2021). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα και τα σημαντικότερα συμπεράσματα από τις εργαστηριακές μελέτες της βιβλιογραφίας.

Οι Gallagher και Mitchell (2002) διεξήγαγαν ιστορικά τις πρώτες σχετικές μελέτες σε σταθεροποιημένη άμμο με χρήση αστράγγιστων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια άμμου Monterey No. 0/30 με και χωρίς προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση της ξηρής άμμου στο υγρόλυμα πυριτίας από συγκεκριμένο ύψος για να εξασφαλιστεί ο κορεσμός σε πυριτία του δοκιμίου. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν σε σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ και με εύρος ποσοστού σταθεροποιητή 5-20% κατά βάρος. Στη συνέχεια, αφέθηκαν να ωριμάσουν για 4-56 μέρες. Το στάδιο του κορεσμού παραλείφθηκε για τα σταθεροποιημένα δοκίμια γιατί σύμφωνα με τους ερευνητές η επιβολή αντιπίεσης μπορεί να διαταράξει ή και να καταστρέψει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Όλα τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό μέση τάση $p'_i=100\text{kPa}$ πριν την ανακυκλική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η σταθεροποίηση οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση συγκριτικά με τα δοκίμια άμμου χωρίς

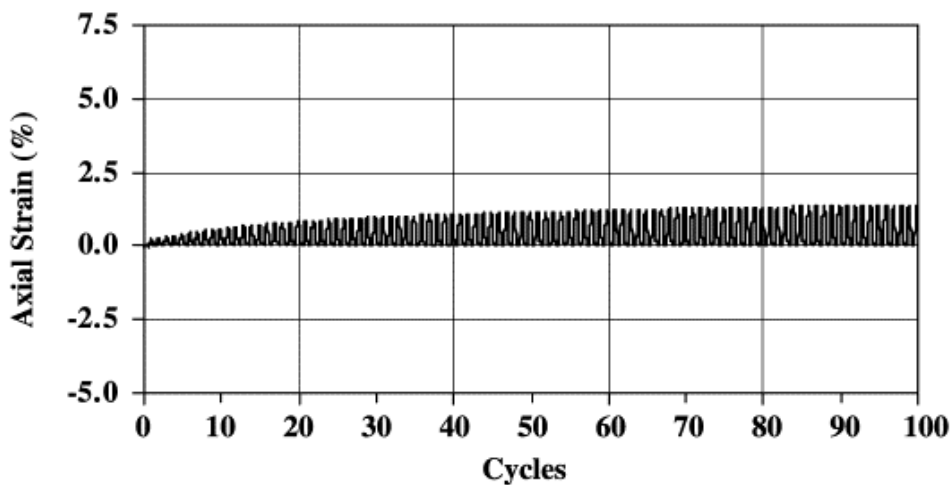
πυριτία. Στο **Σχήμα 2.81** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών δοκιμών σε όρους αξονικών παραμορφώσεων - κύκλων για τη φυσική άμμο σε λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.27$ (**Σχήμα 2.81(α)**), για τη σταθεροποιημένη άμμο με ποσοστό $CS=10\%$ κ.β. υπό $CSR=0.27$ (**Σχήμα 2.81(β)**) και για τη σταθεροποιημένη άμμο με ποσοστό $CS=6\%$ κ.β. υπό $CSR=0.24$ (**Σχήμα 2.81(γ)**). Ο λόγος CSR για τις τριαξονικές δοκιμές δίνεται ως ο λόγος $\Delta q/2r'_i$, με Δq το επιβαλλόμενο εύρος της αποκλίνουσας τάσης $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ και r'_i είναι η αρχική μέση ενεργός τάση $= (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ στην αρχή της δοκιμής.

Η φυσική άμμος Monterey ίδιας πυκνότητας ($Dr=22\%$) ανέπτυξε αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους (double amplitude) $DA=5\%$ σε 12 κύκλους φόρτισης και κατέρρευσε στους 13. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος με ποσοστό κατά βάρος πυριτίας $CS = 10\%$ ανέπτυξε από τους πρώτους κύκλους φόρτισης μικρές αξονικές παραμορφώσεις που συσσωρεύονταν κατά την διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, φτάνοντας την τιμή $DA=5\%$ έπειτα από 276 κύκλους χωρίς το δοκίμιο να οδηγηθεί σε κατάρρευση. Επισημαίνεται, ότι σε αυτή την έρευνα δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση του υγρού των πόρων στα σταθεροποιημένα δοκίμια γι' αυτό και η ρευστοποίηση καθορίζεται μόνο από την ανάπτυξη των αξονικών παραμορφώσεων. Η ανάπτυξη μεγαλύτερων αξονικών παραμορφώσεων στο σταθεροποιημένο δοκίμιο στους πρώτους κύκλους φόρτισης σε σχέση με το φυσικό δοκίμιο, παρατηρείται πιο έντονα στο δοκίμιο με ποσοστό $CS=6\%$ κ.β. (**Σχήμα 2.81(γ)**). Αν και ο λόγος ανακυκλικής τάσης $CSR=0.24$ είναι μικρότερος από το λόγο τάσης που εφαρμόστηκε στο φυσικό δοκίμιο, $CSR=0.27$, (**Σχήμα 2.81(α)**), το σταθεροποιημένο δοκίμιο αναπτύσσει αισθητά μεγαλύτερες αξονικές παραμορφώσεις σε σχέση με το φυσικό στους πρώτους 10 κύκλους. Ωστόσο, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν καταρρέουν παρά τον μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης και τη συσσώρευση των αξονικών παραμορφώσεων. Για να εξεταστεί η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε ρευστοποίηση εκτελέστηκαν ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα με δοκίμια άμμου ποσοστό $CS=10\%$ με χρόνο ωρίμανσης 21, 32 και 56 μέρες. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι αντοχή σε ρευστοποίηση αυξάνει με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσής. Τέλος, εκτελώντας δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στα σταθεροποιημένα δοκίμια μετά την ανακυκλική φόρτιση, διαπιστώθηκε ότι η αντοχή μειωνόταν όσο αυξανόταν η αξονική παραμόρφωση που είχε αναπτυχθεί κατά την ανακυκλική δοκιμή αποδεικνύοντας ότι οι δεσμοί της κολλοειδούς πυριτίας τραυματίζονται από τη συσσώρευση παραμορφώσεων κατά την ανακυκλική φόρτιση.

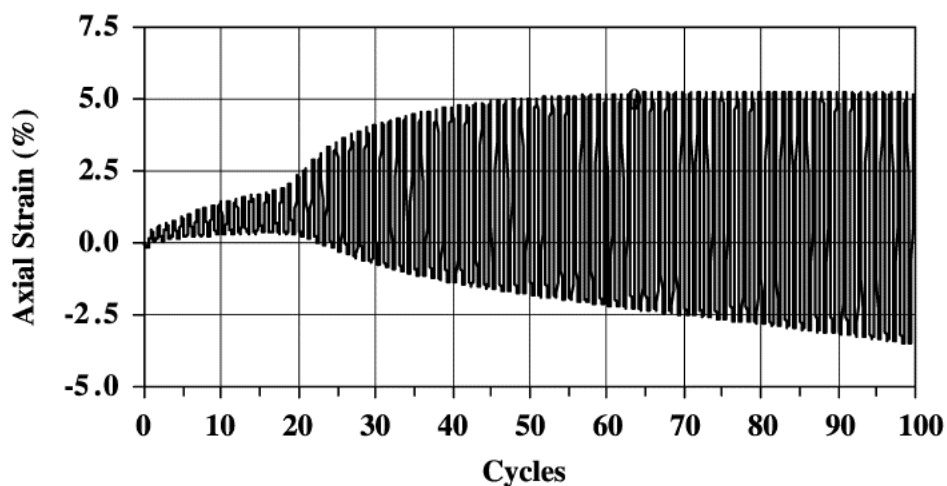
α)



β)



γ)



Σχήμα 2.81: Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε άμμο Monterey $D_r=22\%$, (α) φυσική άμμος υπό $CSR=0.27$, (β) σταθεροποιημένη άμμος με ποσοστό

CS=10% κ.β. υπό CSR=0.27 και (γ) σταθεροποιημένη άμμος με CS=6% υπό CSR=0.24 (Gallagher & Mitchell, 2002)

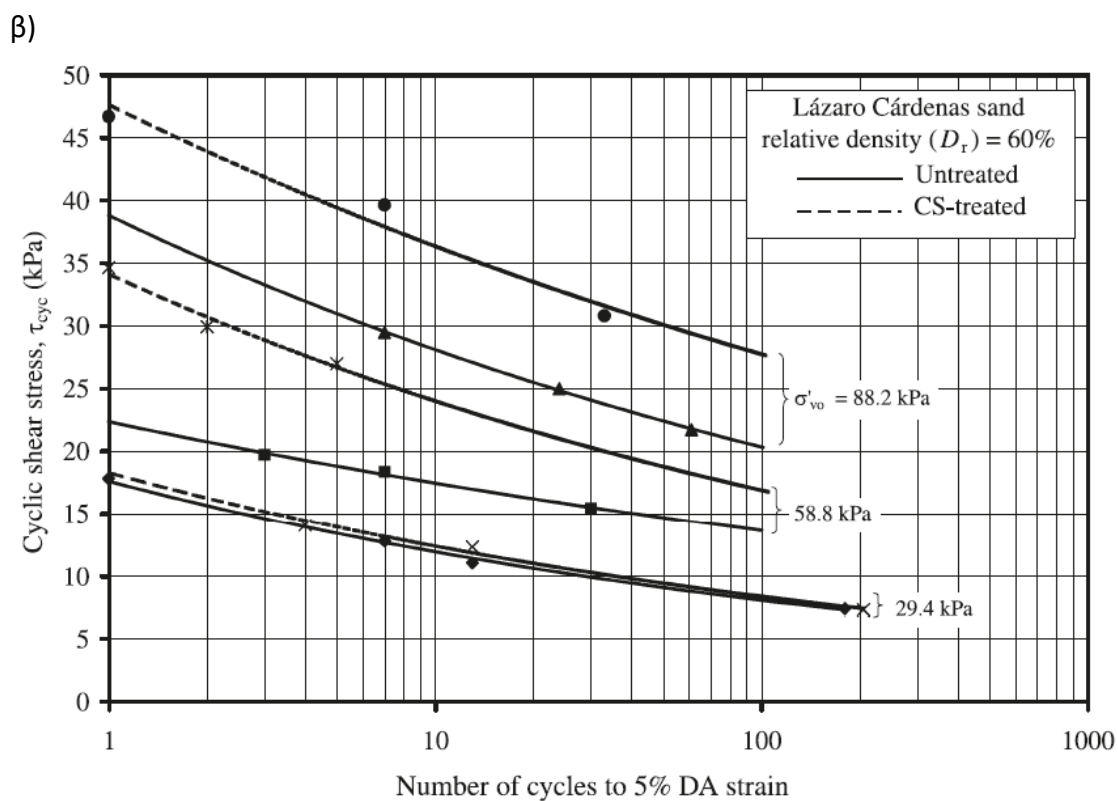
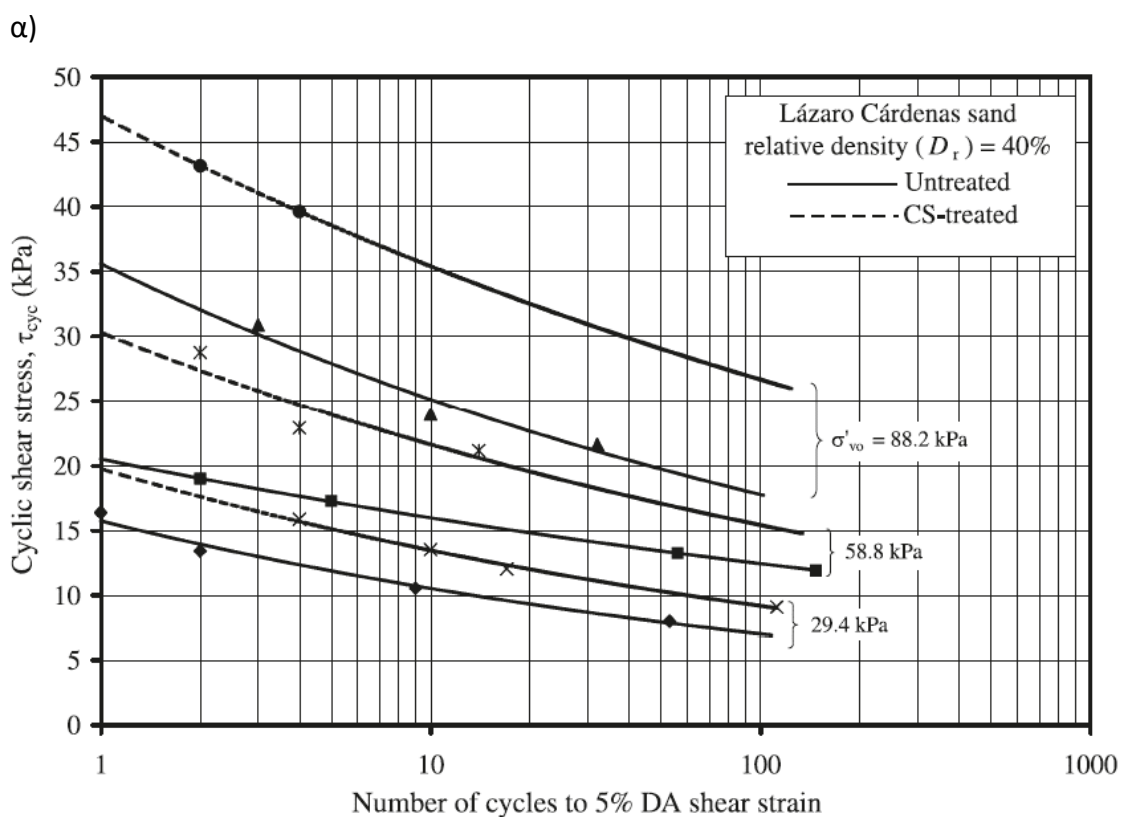
Οι Diaz-Rodriguez et al. (2008) διεξήγαγαν μια σειρά από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο για να αποφύγουν τα μειονεκτήματα της μέτρησης της πίεσης πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση. Στην εργαστηριακή μελέτη των Diaz-Rodriguez et al. (2008) χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια άμμου Lazaro Carenas και σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό κατά βάρος πυριτιάς στο σταθεροποιητή CS=14.5%, της οποίας ο τύπος δε διευκρινίζεται στη δημοσίευση. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι κακής διαβάθμισης, με 11.5% ποσοστό λεπτόκοκκων με $e_{max}=1.17$, $e_{min}=0.77$ και $D_{50}=0.17mm$. Τα δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου είχαν αρχικές ενεργές τάσεις $\sigma'_{v0}=29.4$ kPa, 58.8 kPa και 88.2 kPa. Ακόμη, για να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας των δοκιμών παρασκευάστηκαν δοκίμια σχετικής πυκνότητας $Dr=40\%$ και $Dr=60\%$. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.82** σε όρους ανακυκλικής τάσης (τ_{cyc}) και αριθμού κύκλων που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους $DA=5\%$. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών με σχετική πυκνότητα $Dr=40\%$ (**Σχήμα 2.82(α)**) προκύπτει σημαντική βελτίωση έναντι ρευστοποίησης του σταθεροποιημένου εδάφους σε σχέση με το φυσικό. Η βελτίωση αυτή εντείνεται με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης. Στα δοκίμια μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας, $Dr=60\%$, (**Σχήμα 2.82(β)**) η επίδραση της σταθεροποίησης είναι μικρότερη και παρατηρείται για αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{v0} > 58.8$ kPa. Συμπερασματικά, η βελτίωση της αντοχής έναντι ρευστοποίησης που προσφέρει η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία είναι πιο έντονη σε άμμους μικρότερης πυκνότητας και μεγαλύτερης αρχικής ενεργού τάσης.

Οι Ciardi et al. (2020) εκτέλεσαν ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε χαλαρά και πυκνά δοκίμια άμμου S3 και σε σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία MasterRoc® MP 325 χαλαρά δοκίμια άμμου S3. Επισημαίνεται ότι στα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση της πίεσης πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση γιατί δεν είχε πραγματοποιηθεί κορεσμός με επιβολή αντιπίεσης. Συνεπώς, ως κριτήριο ρευστοποίησης ορίστηκε η ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $DA=5\%$. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι η χρήση του λόγου υπερπίεσεων πόρων $r_u=1$ ($r_u=\Delta u/\sigma'_i$) ως κριτήριο της ρευστοποίησης της σταθεροποιημένης άμμου δεν μπορεί να εφαρμοστεί με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόζεται στη φυσική άμμο γιατί η πρώτη είναι πιο συμπιεστή από τη δεύτερη (Conlee et al., 2012; Ciardi et al., 2020).

Η επίδραση της κολλοειδούς πυριτιάς στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου S3 υπό ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζεται σε όρους αξονικής παραμόρφωσης εα- αριθμού κύκλων φόρτισης N στο **Σχήμα 2.83**. Για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.16-0.17$ ενώ το χαλαρό δοκίμιο άμμου αναπτύσσει απότομα αξονική παραμόρφωση και οδηγείται στην αστοχία, το σταθεροποιημένο δοκίμιο (CS=2%) αντίστοιχης πυκνότητας δεν αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση και δεν καταρρέει **Σχήμα 2.83 (α)**. Για μεγαλύτερο λόγο

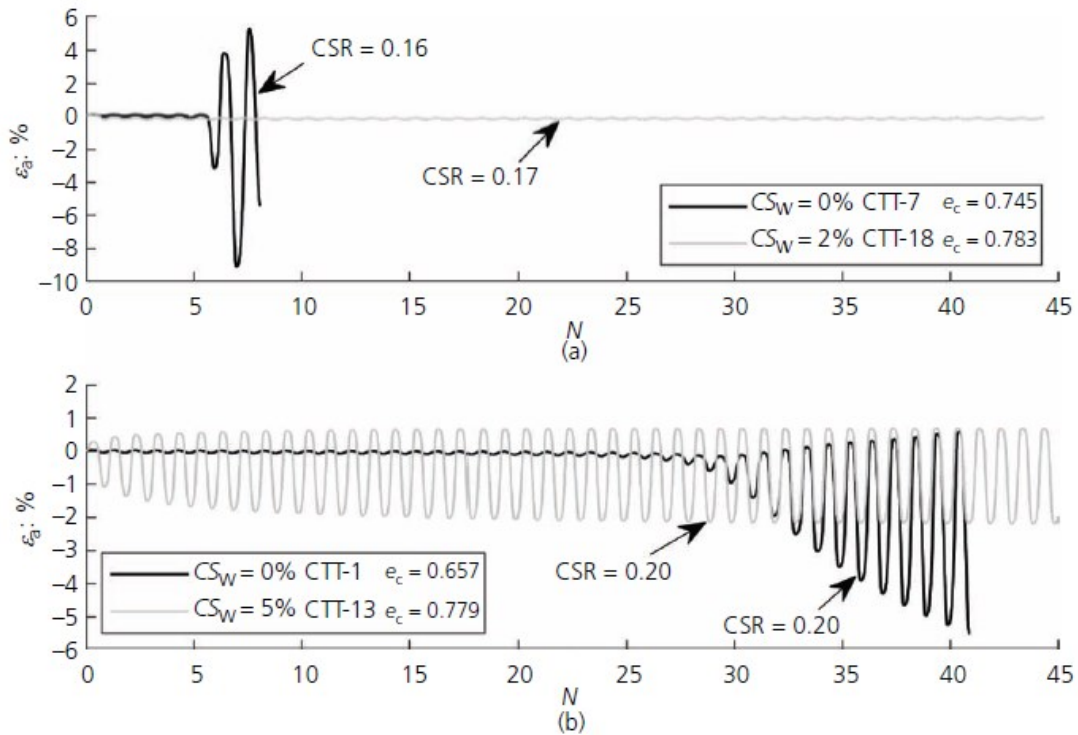
ανακυκλικής τάσης $CSR=0.20$ το πυκνό δοκίμιο άμμου **Σχήμα 2.83(β)** αναπτύσσει παραμόρφωση διπλού πλάτους $DA=5\%$ σε 37.5 κύκλους, ενώ το χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο ($CS=5\%$) συσσωρεύει παραμόρφωση χωρίς να φτάνει στην αστοχία. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι το σταθεροποιημένο δοκίμιο αναπτύσσει σημαντική αξονική παραμόρφωση από τους πρώτους κύκλους φόρτισης σε αντίθεση με το πυκνό φυσικό δοκίμιο. Η αξονική παραμόρφωση του σταθεροποιημένου δοκιμίου συγκεντρώνεται στον εφελκυστικό κλάδο σε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Gallagher & Mitchell, 2002; Porcino et al., 2011). Οι καμπύλες ρευστοποίησης των ανακυκλικών δοκιμών σε χαλαρά και πυκνά φυσικά και σε χαλαρά σταθεροποιημένα δοκίμια με ποσοστό σταθεροποιητή $CS=2$ και 5% παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.84**. Συμπεραίνεται ότι η αντίσταση σε ρευστοποίηση της χαλαρής σταθεροποιημένης άμμου αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού σταθεροποιητή, CS και ότι η καμπύλη ρευστοποίησης της σταθεροποιημένης άμμου με $CS=5\%$ συγκλίνει με την καμπύλη ρευστοποίησης της πυκνής άμμου $S3$.

Οι Vranna et al., (2020) εκτέλεσαν ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν επιβλήθηκε αντιπίεση στο στάδιο του κορεσμού και δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση. Κατά συνέπεια, η αντίσταση του σταθεροποιημένου εδάφους σε ρευστοποίηση ορίστηκε ως η στιγμή που το δοκίμιο αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $DA=5\%$. Τα αποτελέσματα των ανακυκλικών δοκιμών σε δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό πυριτίας στο σταθεροποιητή $CS=6\%$ και 10% παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.85** ως καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στα επίπεδα $CSR - N_1\%$ ($\epsilon_{DA}=5\%$) (**Σχήμα 2.85(α)**) και $CRR_{15} - Dr$ (**Σχήμα 2.85(β)**). Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως $CSR = \sigma_d / (2 * \sigma'_o)$, όπου σ'_o είναι η μέση ενεργός τάση στην έναρξη της διάτμησης. Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, $CRR_{15} = CSR Dr (N_5\% = 15)$, είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση σε 15 κύκλους φόρτισης. Παρατηρείται ότι η σταθεροποιημένη άμμος εμφάνισε περίπου δύο φορές μεγαλύτερη αντοχή σε ρευστοποίηση σε σχέση με την άμμο σε δοκιμές με αρχική ενεργό τάση $p'_o = 100$ kPa, ενώ αύξηση του ποσοστού πυριτίας στο σταθεροποιητή από $CS=6\%$ σε 10% δεν επηρέασε ιδιαίτερα την απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου σε ανακυκλική φόρτιση. Επιπρόσθετα, αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν στα σταθεροποιημένα δοκίμια μετά την ανακυκλική φόρτιση και παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη αστράγγιστη διατμητική αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου δεν επηρεάστηκε από την ανακυκλική φόρτιση και την ανάπτυξη αξονικών παραμορφώσεων ($\epsilon_{DA} \approx 5\%$). Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Mollamahmutoglu & Yilmaz, 2010.

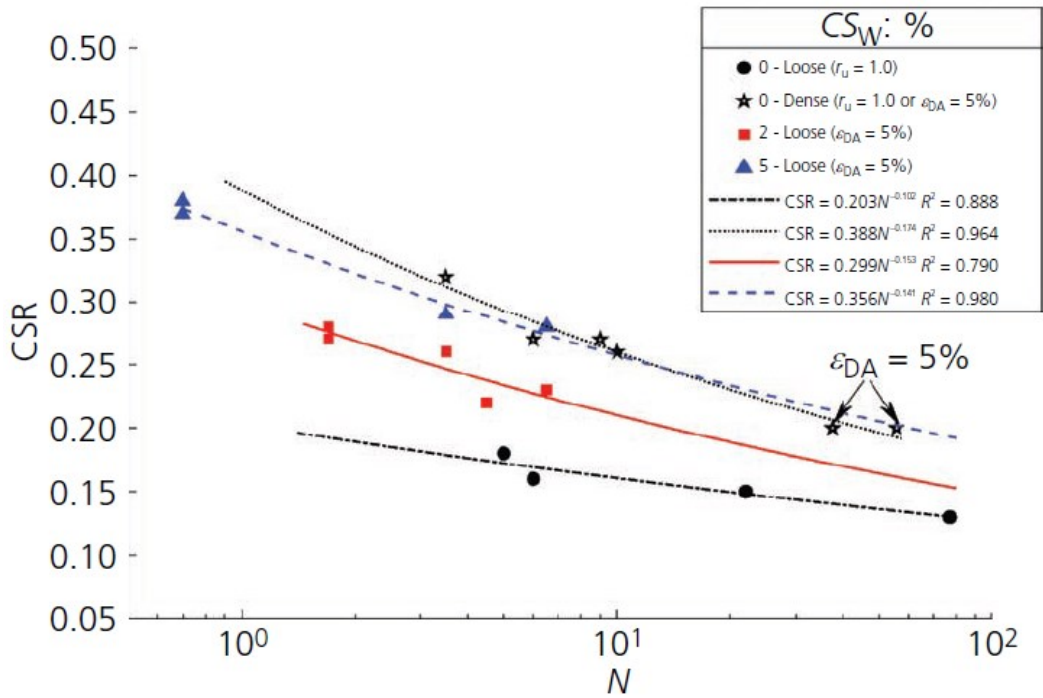


Σχήμα 2.82: Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους

5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο σχετικής πυκνότητας: (α) $Dr=40\%$ και (β) $Dr=60\%$



Σχήμα 2.83: Αποτελέσματα αστράγγιστων ανακυκλικών δοκιμών σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμο S3 σε όρους αξονικής παραμόρφωσης εα-αριθμού κύκλων φόρτισης N (Ciardi et al., 2020)



Σχήμα 2.84: Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο S3 (Ciardi et al., 2020)

α)

β)

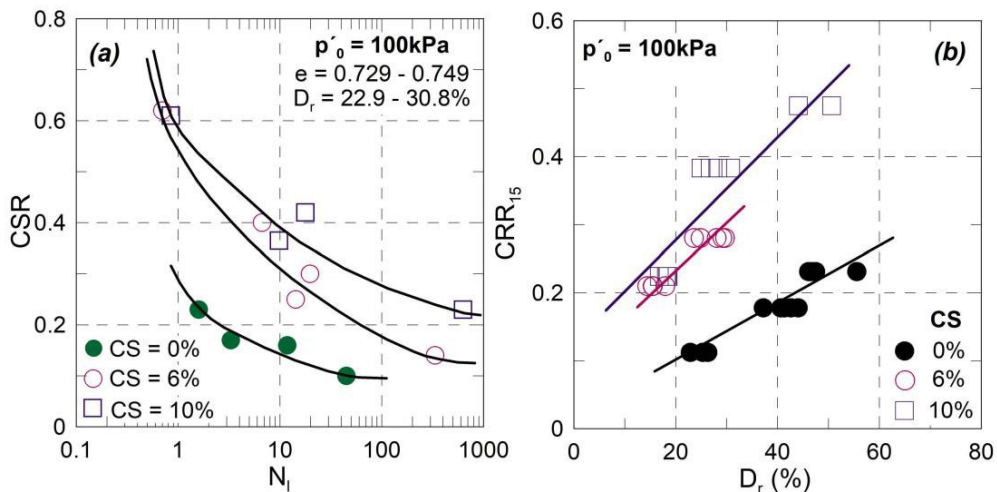
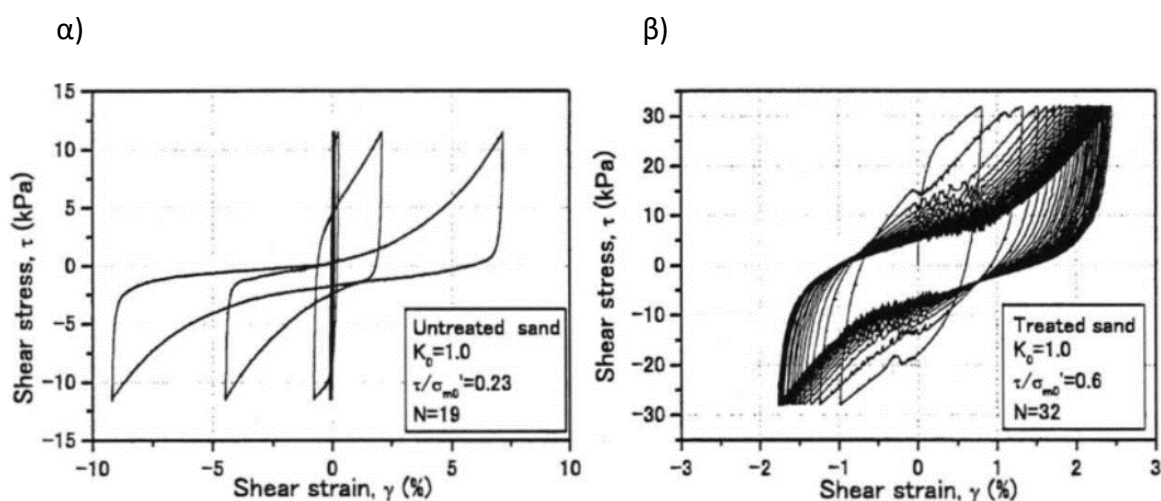


Fig 16

Σχήμα 2.85: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 με ποσοστό σταθεροποιητή CS=6% και 10%: (α) Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση και (β) λόγος ανακυκλικής αντίστασης συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας (Vranna et al., 2020))

Η πρώτη ιστορικά μελέτη που περιλαμβάνει ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου με ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων είναι αυτή των (Kodaka et al., 2005). Σε αυτή την έρευνα, εκτελέστηκαν τόσο μονοτονικές όσο και ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο Toyoura ($e_{max}=0.821$, $e_{min}=0.464$, $D_{50}=0.44mm$) στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου κυλινδρικού δοκιμίου. Τα δοκίμια σταθεροποιήθηκαν με ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας στο σταθεροποιητή $CS=4\%$ κατά βάρος και αφέθηκαν να ωριμάσουν και να στερεοποιηθούν για 4 βδομάδες. Ο κορεσμός του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε εισπνέζοντας αέριο CO_2 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 δοκιμών ανακυκλικής αστράγγιστης στρεπτικής διάτμησης σε σταθεροποιημένη και μη άμμο με σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.86**. Γίνεται φανερό ότι το δοκίμιο της καθαρής άμμου με λόγο ανακυκλικής τάσης $\tau/\sigma'_{m0}=0.23$ (**Σχήμα 2.86(α)**) ρευστοποιείται και καταρρέει από τους πρώτους κύκλους φόρτισης ενώ το δοκίμιο της σταθεροποιημένης άμμου με λόγο ανακυκλικής τάσης $\tau/\sigma'_{m0}=0.6$ (**Σχήμα 2.86(β)**) παρουσιάζει αυξημένη αντοχή και δεν καταρρέει. Επισημαίνεται ότι το σταθεροποιημένο έδαφος αναπτύσσει μεγάλες παραμορφώσεις από τους πρώτους κύκλους φόρτισης, οι οποίες ωστόσο δεν αυξάνουν σημαντικά στους επόμενους κύκλους, ούτε οδηγούν σε κατάρρευση ή ρευστοποίηση του δοκιμίου.



Σχήμα 2.86: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης για α) άμμο Toyoura και β) σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $CS=4\%$ (Kodaka et al., 2005)

Οι εργαστηριακές μελέτες των Porcino et al., (2011) και Porcino et al., (2012) επικεντρώθηκαν στην μέτρηση ή στον υπολογισμό της πίεσης του υγρού των πόρων στα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου. Για τη σταθεροποίηση της άμμου Ticino (TS) χρησιμοποιήθηκε υγρόλυμα πυριτικού νατρίου (sodium-silicate) τύπου TSG περιεκτικότητας 10% κ.β.. Λεπτομέρειες για την παρασκευή των δοκιμών έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Οι μελέτες περιλαμβάνουν αστράγγιστες

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

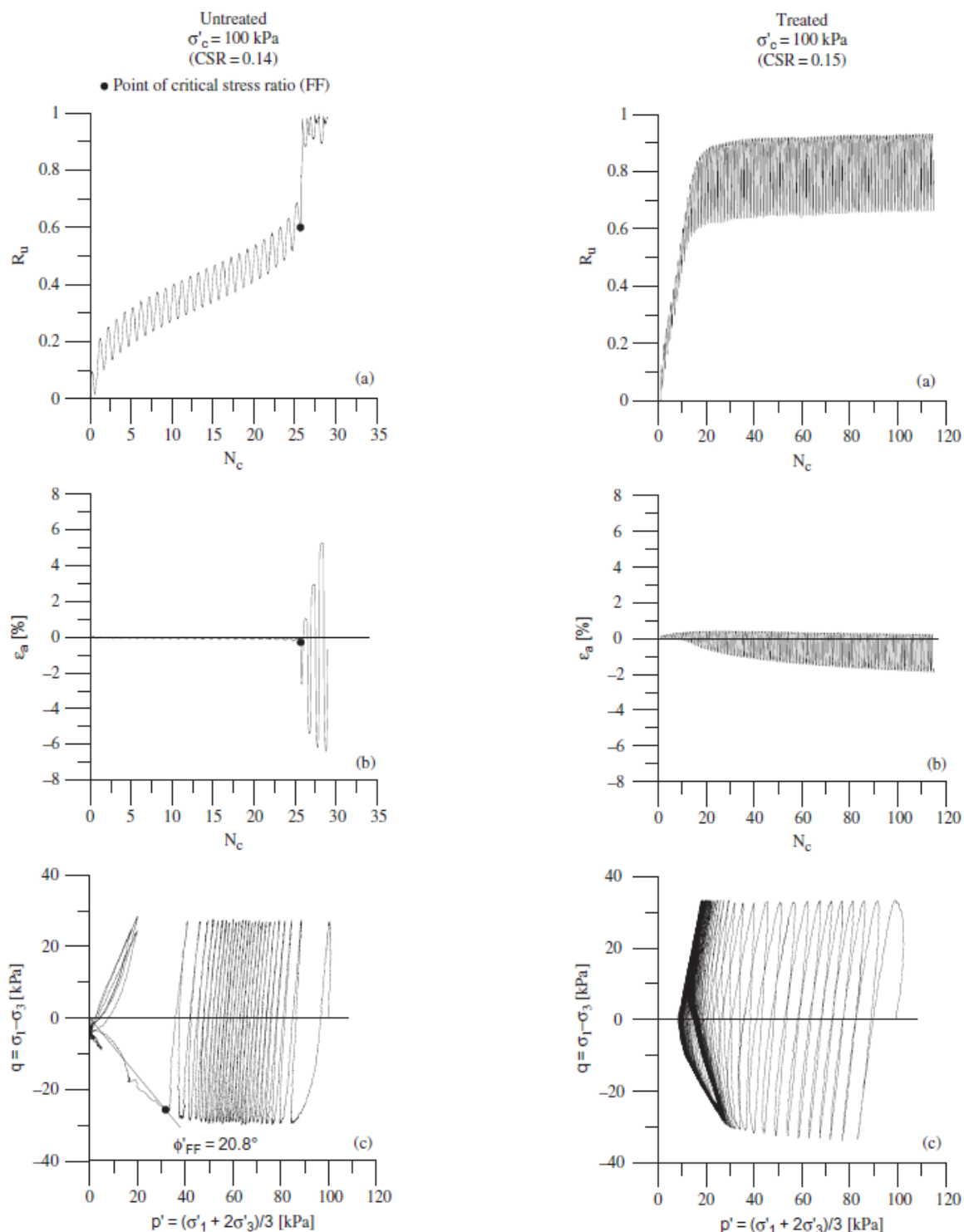
ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια με ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων και αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια με υπολογισμό της πίεσης του υγρού των πόρων μέσω εμπειρικών σχέσεων. Η επίδραση της σταθεροποίησης στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου υπό ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζεται

Στο **Σχήμα 2.87** παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από τις αστράγγιστες, ανακυκλικές, τριαξονικές δοκιμές. Παρατηρείται η σημαντική επίδραση της σταθεροποίησης στο ρυθμό ανάπτυξης υπερπίεσεων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης (άνω σχήματα), στη συσσώρευση παραμορφώσεων (μεσαία σχήματα) και στην ενεργό τασική όδευση (κάτω σχήματα). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν υπό κοινό λόγο ανακυκλικής τάσης, $CSR = \sigma_d / 2\sigma'_c \approx 0.15$ σε χαλαρά δοκίμια άμμου (αριστερά) και χαλαρά δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου (δεξιά). Η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει πιο γρήγορα τη μέγιστη τιμή υπερπίεσεων πόρων, R_u , μικρότερη της μονάδας ενώ στη συνέχεια αυτή η τιμή παρουσιάζει αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου με το πλάτος της διακύμανσης να διατηρείται σταθερό για τους επόμενους κύκλους φόρτισης. Αντίθετα, στη φυσική άμμο η τιμή R_u αυξάνεται σταδιακά έως μια τιμή ($R_u \approx 0.6$), στη συνέχεια ραγδαία αναπτύσσει τη μέγιστη τιμή $R_u \approx 1$ και ρευστοποιείται. Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει από τους πρώτους κύκλους αξονική παραμόρφωση η οποία σταδιακά συσσωρεύεται και συγκεντρώνεται στον εφελκυστικό κλάδο, χωρίς ωστόσο να ξεπερνάει μια μέγιστη τιμή διπλού πλάτους $\varepsilon_{DA} < 2,5\%$ ακόμη και μετά από 120 κύκλους. Αντίθετα, η φυσική άμμος εμφανίζει μηδενική αξονική παραμόρφωση στους πρώτους κύκλους φόρτισης, ενώ στη συνέχεια αναπτύσσει ραγδαία παραμορφώσεις και οδηγείται στην αστοχία σε 25 κύκλους φόρτισης. Στα σχήματα των τασικών οδεύσεων παρατηρούμε ότι μετά τη σταθεροποίηση δε μηδενίζεται η ενεργός τάση της άμμου και δεν υπάρχει κατάρρευση του δοκιμίου λόγω υπερβολικής συσσώρευσης παραμορφώσεων. Η απόκριση της χαλαρής σταθεροποιημένης άμμου υπό ανακυκλική φόρτιση θεωρείται από τους ερευνητές αντίστοιχη της συμπεριφοράς μιας πυκνής άμμου ($D_r = 75\%$) (Porcino et al., 2011, 2012).

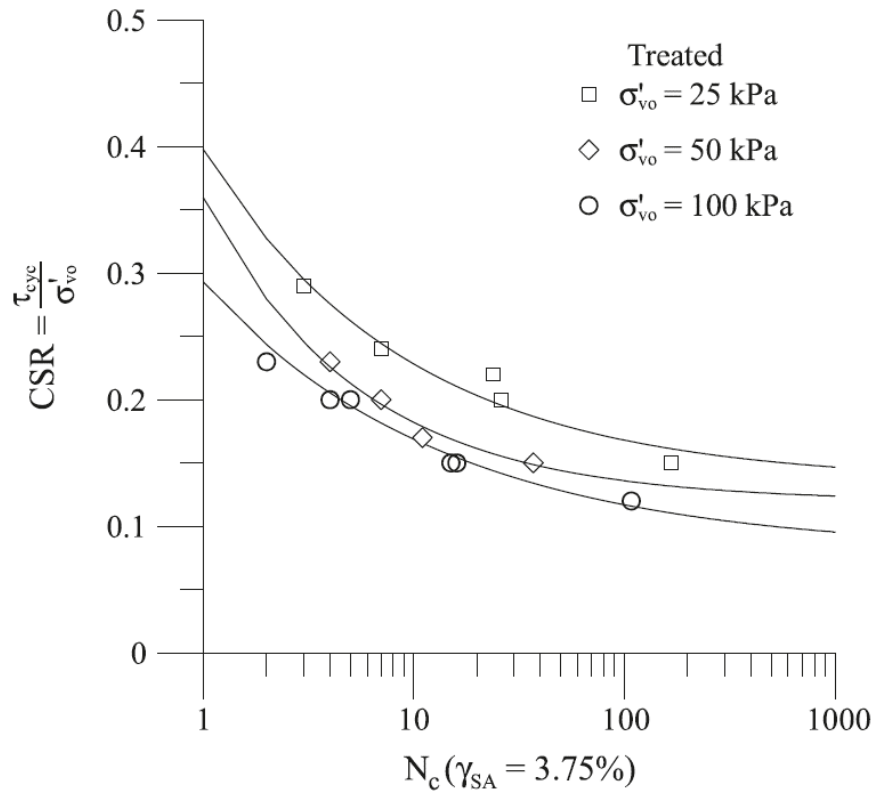
Επιπρόσθετα, οι ερευνητές μελέτησαν την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης (curing time), της συχνότητας φόρτισης και της ενεργού τάσης στη μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του χρόνου ωρίμανσης ως και 30 μέρες δε φαίνεται να επηρεάζει την αντίσταση σε ρευστοποίηση. Αντίθετα, η αύξηση της συχνότητας κατά την ανακυκλική φόρτιση από 0.05 Hz σε 0.30 Hz οδηγεί σε αυξημένη αντοχή σε ρευστοποίηση. Τέλος, η αντοχή σε ρευστοποίηση της σταθεροποιημένης άμμου επηρεάζεται από την αρχική ενεργό τάση αφού εμφανίζει βελτιωμένη συμπεριφορά υπό μικρότερες ενεργές τάσεις (μετατόπιση των καμπυλών ρευστοποίησης προς τα πάνω) (**Σχήμα 2.88**).

Οι ερευνητές συνέκριναν το ρυθμό ανάπτυξης της πίεσης του υγρού των πόρων στην άμμο πριν και μετά τη σταθεροποίησή της κατά την αστράγγιστη ανακυκλική φόρτιση στην τριαξονική συσκευή και στη συσκευή απλής διάτμησης (**Σχήμα 2.89**). Το $R_{u,max}$ ορίζεται ως η μέγιστη τιμή υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε κάθε κύκλο φόρτισης

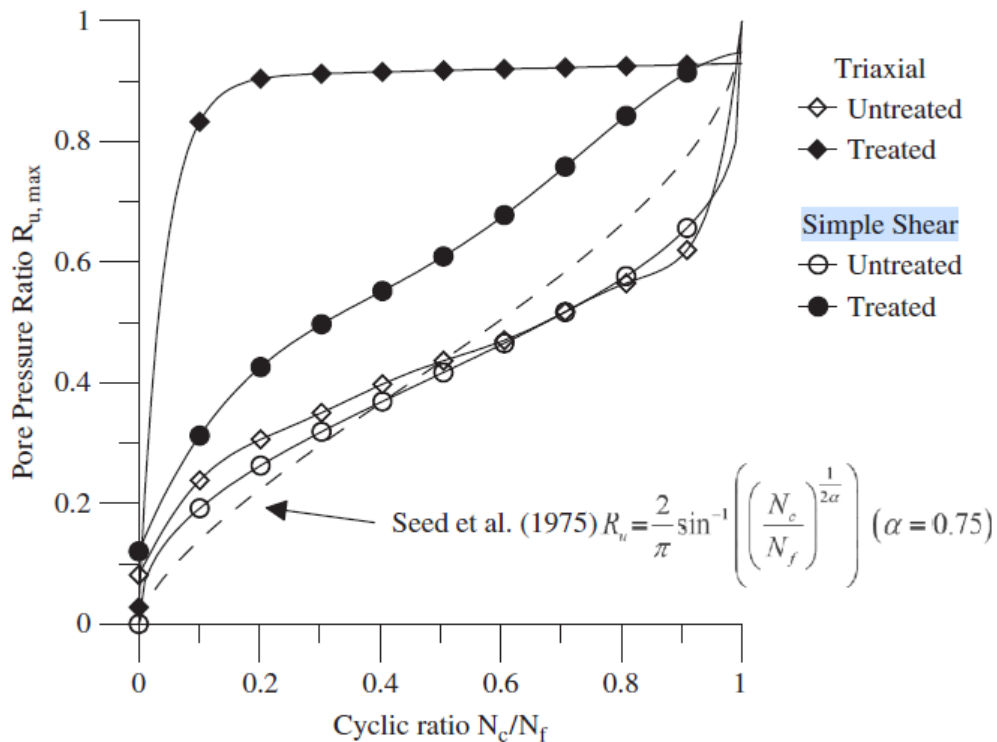
κανονικοποιημένη ως προς την αρχική ενεργό τάση και το N_f ορίζεται ως ο κύκλος που εμφανίστηκε η αστοχία δηλαδή αξονική παραμόρφωση $\epsilon_{DA}=25\%$ στην τριαξονική δοκιμή και μονού πλάτους διατμητική παραμόρφωση $\gamma=3,75\%$ στη δοκιμή απλής διάτμησης. Στις τριαξονικές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της πίεσης του υγρού των πόρων αναπτύσσεται στο αρχικό στάδιο της φόρτισης και μετά από αυτό ελάχιστη επιπρόσθετη πίεση αναπτύσσεται παρά την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Στις δοκιμές απλής διάτμησης το φαινόμενο αυτό είναι λιγότερο έντονο. Στα φυσικά δοκίμια ο ρυθμός ανάπτυξης των υπερπιέσεων πόρων είναι πιο αργός και ανεξάρτητος του είδους της δοκιμής. Επισημαίνεται ότι οι δοκιμές απλής διάτμησης πραγματοποιήθηκαν υπό σταθερό όγκο, περιορίζοντας την πλευρική και την αξονική παραμόρφωση. Η τάση του δοκιμίου για καθίζηση ή ανύψωση οδηγεί στην αυξομείωση της κατακόρυφης τάσης που θεωρείται ίση με την αυξομείωση της πίεσης υγρού των πόρων. Τέλος, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι οι εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν την ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων δεν είναι κατάλληλες για τα σταθεροποιημένα εδάφη.



Σχήμα 2.87: Αποτελέσματα ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (αριστερά) σε φυσικό δοκίμιο άμμου, (δεξιά) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (Porcino et al., 2011)



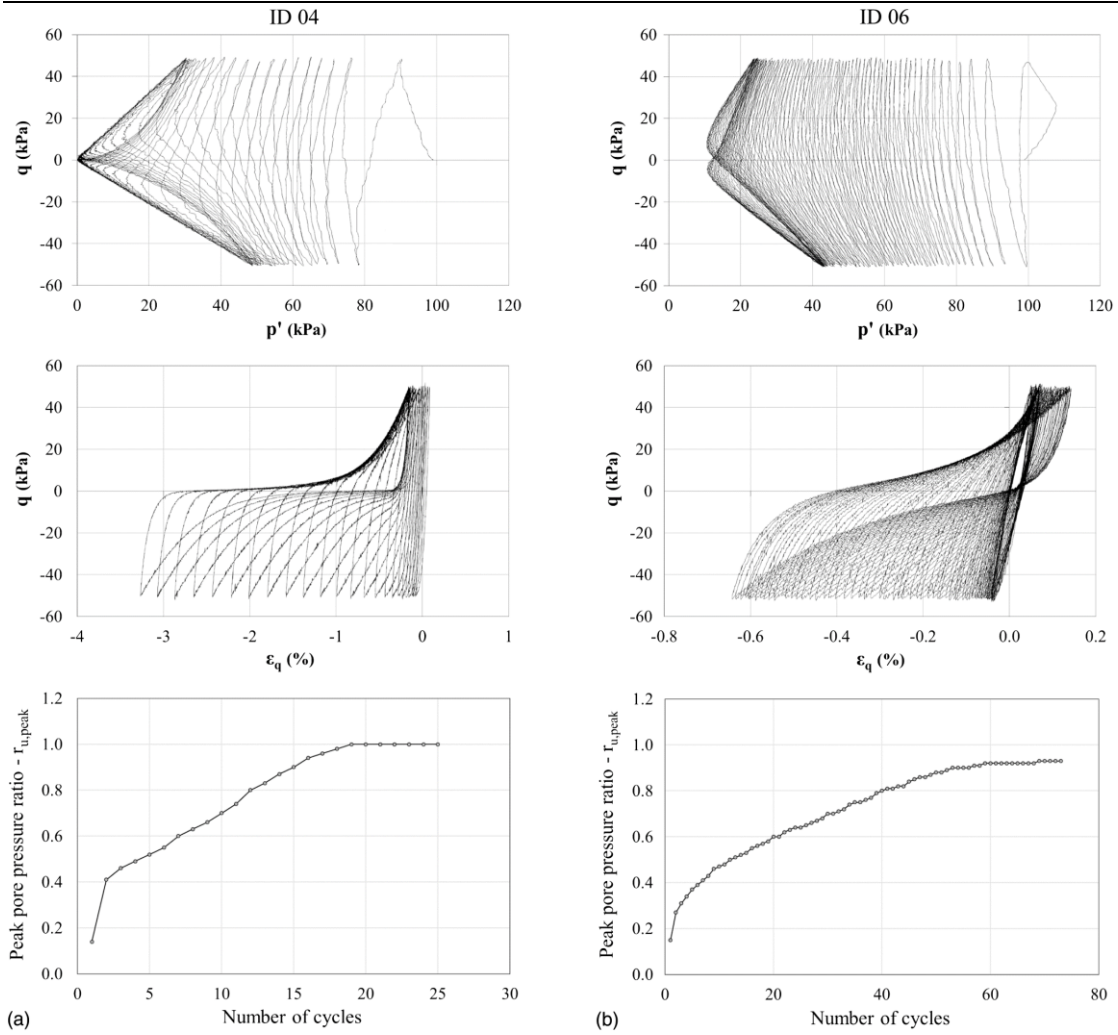
Σχήμα 2.88: Επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης στην αντίσταση στην αντίσταση στη ρευστοποίηση της σταθεροποιημένης άμμου (Porcino et al., 2012)



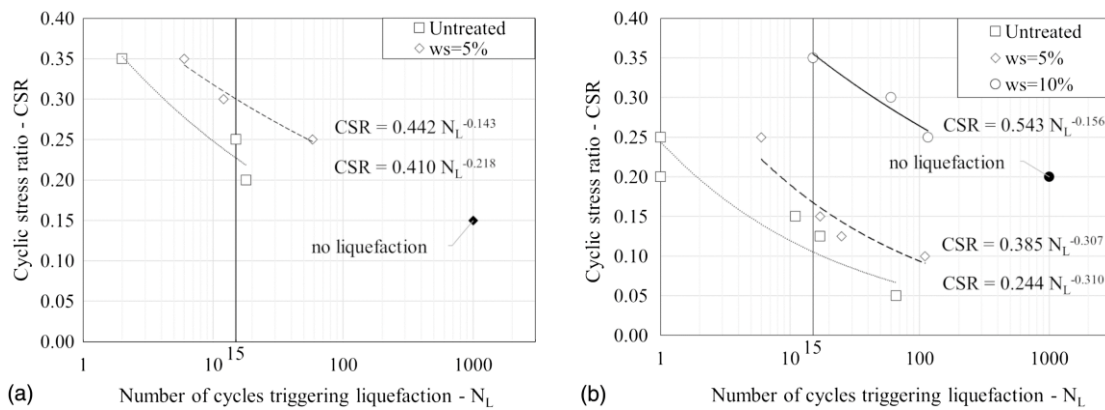
Σχήμα 2.89: Ρυθμός ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου, υπό φόρτιση τριαξονική και απλής διάτμησης (Porcino et al., 2011)

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Μία πρόσφατη εργαστηριακή μελέτη που περιλαμβάνει ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια, με ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων είναι αυτή των Salvatore et al., 2020. Οι ερευνητές εκτέλεσαν ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε μια ομοιόμορφη άμμο ($D_{50} = 0.303 \text{ mm}$, $C_u = 1.6$, $G_s = 2.65$) πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία MasterRoc MP 325 εξετάζοντας την επίδραση της πυκνότητας και του ποσοστού πυριτίας στο σταθεροποιητή. Τυπικά αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.90** για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR = q/2\sigma'_0 = 0.25$ και σχετική πυκνότητα εδάφους $D_r = 58\%$ για φυσική άμμο (αριστερά) και σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (δεξιά). Αναφέρεται ότι η προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας στους πόρους της άμμου περιορίζει την κινητικότητα των κόκκων καθυστερώντας τη συσσώρευση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων. Συγκεκριμένα, η φυσική άμμος αναπτύσσει $r_{u,peak} = \Delta u / \sigma'_0 = 0.9$ στον 15° κύκλο και στη συνέχεια ρευστοποιείται πλήρως, ενώ η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει $r_{u,peak} = 0.9$ στον 58° κύκλο διατηρώντας πάντα θετική μέση ενεργό τάση, $p' > 0$ στους επόμενους κύκλους. Επιπρόσθετα, στα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης ($q - \epsilon_q$) οι βρόγχοι της σταθεροποιημένης άμμου εμφανίζονται πιο «στιβαροί» και πιο στενοί. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ανακυκλικών δοκιμών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.91** σε όρους κανονικοποιημένης ανακυκλικής τάσης (CSR) συναρτήσεως του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση (N_L) όταν $r_{u,peak} = 0.9$ για σχετικά πυκνά δοκίμια (σχετική πυκνότητα $D_r = 50-60\%$) (**Σχήμα 2.91(α)**) και σχετικά χαλαρά δοκίμια (σχετική πυκνότητα $D_r = 20-40\%$) (**Σχήμα 2.91(β)**). Τα πυκνά δοκίμια φυσικής άμμου εμφάνισαν ικανοποιητική αντίσταση στη ρευστοποίηση που αυξήθηκε σημαντικά μετά τη σταθεροποίηση με ποσοστό κ.β. στερεάς πυριτίας στο σταθεροποιητή $ws = 5\%$, με την καμπύλη ρευστοποίησης της σταθεροποιημένης άμμου να μετατοπίζεται προς τα πάνω. Η χαλαρή άμμος εμφάνισε μικρή αντίσταση στη ρευστοποίηση, που αυξήθηκε ελάχιστα με την προσθήκη σταθεροποιητή με $ws = 5\%$. Ενώ, το ποσοστό $ws = 5\%$ κρίθηκε ανεπαρκές για τη βελτίωση της χαλαρής άμμου έναντι ρευστοποίησης, η χρήση μεγαλύτερου ποσοστού $ws = 10\%$ οδήγησε σε αρκετά βελτιωμένη αντοχή. Συνεπώς, για την κατάλληλη επιλογή του ποσοστού πυριτίας σε εφαρμογές στο πεδίο χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η πυκνότητα του εδάφους και τα προβλεπόμενα σεισμικά μεγέθη καθώς η αύξηση του ποσοστού επηρεάζει σημαντικά το κόστος της μεθόδου.



Σχήμα 2.90: Αποτελέσματα ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης: (αριστερά) σε φυσικό δοκίμιο άμμου, (δεξιά) σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (Salvatore et al., 2020)



Σχήμα 2.91: Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση σε (α) σχετικά πυκνά και (β) σχετικά χαλαρά δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου (Salvatore et al., 2020)

2.9.4 Δοκιμές φυγοκεντριστή και εφαρμογές στο πεδίο

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εδαφικού στοιχείου που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες περιγράφουν σε ένα σημαντικό βαθμό τη μηχανική συμπεριφορά της άμμου μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία. Ωστόσο, εφαρμογές συννοριακών τιμών επιτρέπουν τη μελέτη μεγαλύτερου όγκου εδάφους παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται ελάχιστες μελέτες σε προβλήματα συννοριακών τιμών με δυναμικές δοκιμές φυγοκέντρισης (Gallagher, Pamuk, et al., 2007; Pamuk et al., 2007; Conlee et al., 2012) και δοκιμές πεδίου (Gallagher, Conlee, et al., 2007). Στις δοκιμές φυγοκεντριστή επιβάλλεται αυξημένη επιτάχυνση βαρύτητας σε προσομοιώματα υπό κλίμακα ώστε επιτευχθούν πανομοιότυπες συνθήκες με το πρωτότυπο, επιτρέποντας την ανάπτυξη των εδαφικών τάσεων σε κανονική κλίμακα.

Οι Gallagher, Pamuk, et al., (2007) εκτέλεσαν δοκιμές φυγοκεντριστή για να μελετήσουν την επίδραση της προσθήκης σταθεροποιητή με ποσοστό κ.β. CS=6% Ludox-SM® σε μία στρώση άμμου Nevada No.120 πάχους 200 mm και σχετικής πυκνότητας $Dr=40\%$. Η στρώση αυτή προσομοιώνει ένα πάχος εδάφους 10 m υπό 50 g ($10m/50=200mm$). Ο σταθεροποιητής διοχετεύεται μέσα στους εδαφικούς πόρους επιβάλλοντας αναρρόφηση για 13 ώρες. Αφού παρήλθε ο χρόνος γέλης (56 ώρες) και ο χρόνος ωρίμανσης (240 ώρες), επιβλήθηκαν δύο διαδοχικοί σεισμικοί κραδασμοί 20 κύκλων φόρτισης 2 Hz, προσομοιώνοντας σεισμό πεδίου με επιταχύνσεις βάσης 0,2g και 0,25g. Επισημαίνεται ότι πραγματοποιήθηκε καταγραφή των επιταχύνσεων και των μετακινήσεων (όριζόντιων και κατακόρυφων) με τη χρήση επιταχυσιομέτρων και LVDT που είχαν τοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις του προσομοιώματος. Ωστόσο, δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων. Οι ερευνητές αναφέρουν ότι στο σταθεροποιημένο έδαφος προκύπτει ενίσχυση των επιταχύνσεων καθ' ύψος της εδαφικής στήλης, ενώ οι καθιζήσεις που προέκυψαν ήταν σημαντικά μειωμένες σε σχέση με αυτές του φυσικού συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με παρόμοια πειράματα σε φυσική άμμο Nevada (Taboada, 1995). Επιπρόσθετα, δεν παρατηρήθηκε ρευστοποίηση σε κανένα από τα δύο σεισμικά γεγονότα.

Οι Pamuk et al., (2007) μελέτησαν τη σεισμική απόκριση πασσαλομάδας σε πλευρικός εξαπλούμενο ρευστοποιήσιμο έδαφος πριν και μετά τη σταθεροποίησή του μέσω δοκιμών σε φυγοκεντριστή. Το εδαφικό προφίλ σε διαστάσεις πρωτοτύπου είχε κλίση 5° , επαρκής για την ανάπτυξη της πλευρικής εξάπλωσης και αποτελούνταν από (i) μία επιφανειακή στρώση ελαφρώς σιμεντοποιημένης άμμου Nevada πάχους 2m μη ρευστοποιήσιμη, (ii) μία μεσαία ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου Nevada σχετικής πυκνότητας $Dr=40\%$ πάχους 6m και (iii) από μία κατώτατη μη ρευστοποιήσιμη στρώση ελαφρώς σιμεντοποιημένης άμμου Nevada πάχους 2m στην οποία θεμελιωνόταν η πασσαλομάδα και από την οποία επιτρεπόταν η πλήρης στράγγιση. Επιπρόσθετα, σε διαστάσεις πρωτοτύπου, οι πάσσαλοι διαμέτρου $d=0.6m$, ακαμψίας $EI=8.000$ τοποθετήθηκαν σε απόσταση $3d$ ενώ ο κεφαλόδεσμός τους διαστάσεων $3m*3m*0,7m$

τοποθετήθηκε στην πάνω στρώση. Εκτελέστηκαν δύο δοκιμές υπό επιτάχυνση 50 g. Στην πρώτη, ελέγχθηκε η μεσαία ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου πριν τη σταθεροποίησή της, ενώ στη δεύτερη μετά τη σταθεροποίησή της με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM με κ.β. CS=5%. Εντοπίστηκε μείωση των ροπών και των μετακινήσεων της πασσαλομάδας μετά τη σταθεροποίηση της μεσαίας στρώσης, καθώς το σταθεροποιημένο έδαφος δεν ρευστοποιήθηκε, παρά το γεγονός ότι παρατηρήθηκε μια ενίσχυση της σεισμικής ταλάντωσης σε μικρά βάθη. Η πλευρική εξάπλωση στην επιφάνεια του εδάφους μετά τη σταθεροποίηση της μεσαίας ρευστοποιήσιμης στρώσης προέκυψε 5% της τιμής που αναπτύχθηκε στη δοκιμή με τη μη σταθεροποιημένη άμμο. Συμπερασματικά, η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας φαίνεται να μειώνει τον κίνδυνο βλαβών σε βαθιές θεμελιώσεις από τη ρευστοποίηση του εδάφους μετά από σεισμικό γεγονός.

Δοκιμές φυγοκεντριστή σε σταθεροποιημένη εδαφική στρώση υπό μικρή κλίση εκτέλεσαν οι Conlee et al., (2012) προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης στον περιορισμό ρευστοποίησης και της μετέπειτα πλευρικής εξάπλωσης. Το προσομοίωμα της έρευνας περιλαμβάνει 2 συμμετρικά πρανή με κλίση 3° ως προς ένα κεντρικό κανάλι πλάτους 3m. Το εδαφικό προφίλ σε διαστάσεις πρωτοτύπου αποτελείται από (i) μία επιφανειακή στρώση ιλυώδους αργίλου Yolo loam πάχους 1m, (ii) μία μεσαία, ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου Nevada πάχους 4.8m και από (iii) μία κατώτατη στρώση πυκνής άμμου Monterey 0/30. Εκτελέστηκαν συνολικά δύο δοκιμές. Στην πρώτη δοκιμή το αριστερό πρανές σταθεροποιήθηκε με κολλοειδή πυριτία Ludox®-SM περιεκτικότητας CS=9% κ.β. και το δεξί εδαφικό προφίλ παρέμεινε φυσικό ενώ στη δεύτερη δοκιμή το αριστερό πρανές σταθεροποιήθηκε με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=4% κ.β. και το δεξί με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=5% κ.β. Σε κάθε δοκιμή εφαρμόστηκαν 8 σεισμικές διεγέρσεις με διαφορετικές μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης υπό φυγοκεντρική επιτάχυνση 15g, ενώ κάθε διέγερση αποτελούνταν από 20 ημιτονοειδείς κύκλους συχνότητας 2Hz. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι οι καθιζήσεις που αναπτύχθηκαν ήταν σημαντικά μικρότερες μετά τη σταθεροποίηση σε σχέση με αυτές του φυσικού εδάφους, ενώ μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού CS στο σταθεροποιητή. Επιπρόσθετα, η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας οδήγησε σε σημαντική μείωση των οριζόντιων μετατοπίσεων του κεκλιμένου εδάφους.

Στη βιβλιογραφία εντοπίζεται μια έρευνα που περιλαμβάνει δοκιμές πεδίου σε ρευστοποιήσιμο έδαφος μετά τη σταθεροποίησή του με κολλοειδή πυριτία (Gallagher, Conlee, et al., 2007). Οι ερευνητές διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στη μείωση των καθιζήσεων λόγω ρευστοποίησης που προκαλείται μέσω μικρο-εκρήξεων. Για την ομοιόμορφη εισπίεση του σταθεροποιητή περιεκτικότητας CS=8% κ.β. στο ρευστοποιήσιμο έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν 8 φρεάτια εισπίεσης και ένα φρεάτιο άντλησης, ενώ ο ρυθμός εισπίεσης ήταν περίπου 13l/min. Αφού σταθεροποιήθηκαν τα ανώτερα 2 m μιας ρευστοποιήσιμης στρώσης συνολικού πάχους 10m, το έδαφος υποβλήθηκε σε δυναμική φόρτιση μέσω μικρο-εκρήξεων. Στη σταθεροποιημένη περιοχή παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των καθιζήσεων, παρότι οι μετρήσεις της πίεσης του

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

υγρού των πόρων δείχνουν ότι το έδαφος ρευστοποιήθηκε σύμφωνα με το κριτήριο ρευστοποίησης όπου ο λόγος πιέσεων πόρων ισούται με τη μονάδα ($R_u \approx 1$). Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί με τα αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών σε σταθεροποιημένα εδάφη της βιβλιογραφίας που αναφέρουν ότι ενώ η ενεργός τάση οριακά μηδενίζεται (λόγος πιέσεων πόρων, $R_u \approx 1$) το δοκίμιο δεν καταρρέει. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών πενετρομέτρησης (CPT) και τις μετρήσεις ταχύτητας σεισμικών κυμάτων (shear wave velocity profiles) το σταθεροποιημένο έδαφος δεν εμφανίζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Συμπερασματικά, ενώ η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας φαίνεται να περιορίζει τις καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης οι υπόλοιπες μετρήσεις της έρευνας είναι αντιφατικές. Προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο μηχανισμός βελτίωσης της μεθόδου για να καταστεί η παθητική σταθεροποίηση πρακτικώς εφαρμόσιμη, απαιτούνται περαιτέρω εργαστηριακές μελέτες και μελέτες πεδίου.

Κεφάλαιο 3 : Εργαστηριακές Μέθοδοι, Συσκευές και Εξεταζόμενα Υλικά

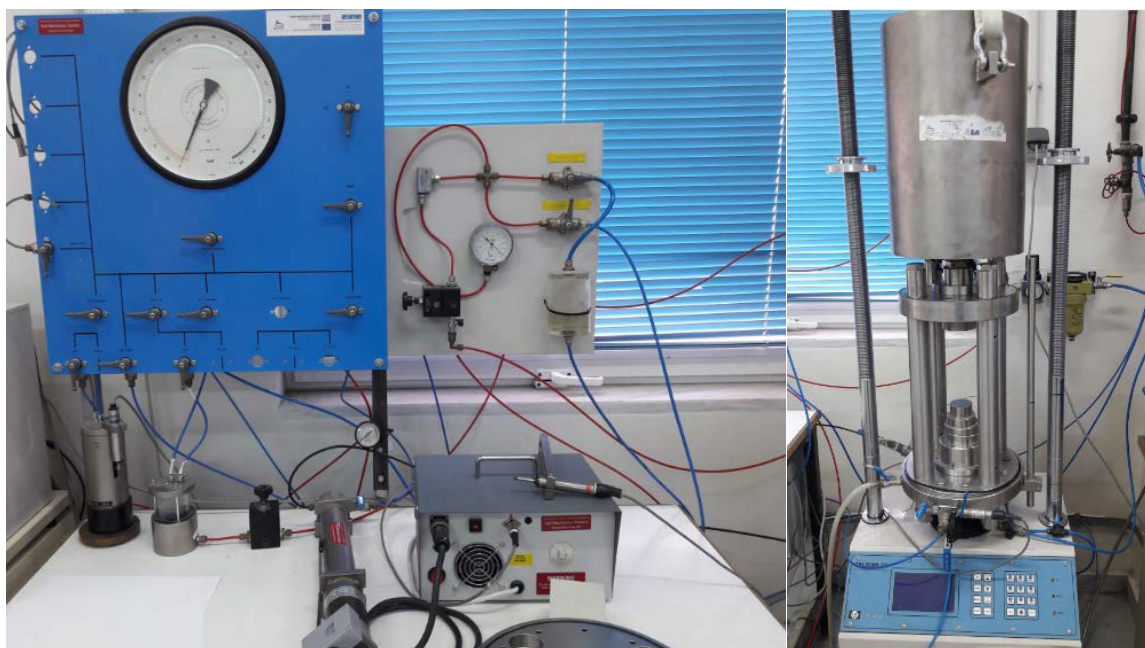
3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα υλικά και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι τριαξονικές συσκευές και η συσκευή Στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (HC) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δίνοντας έμφαση στην αναβάθμιση της συσκευής που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των άμμων M31 και Longstone και της κολλοειδούς πυριτίας LUDOX SM που επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής δοκιμών με και χωρίς σταθεροποιητή και τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας για κάθε δοκιμή. Τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι δοκιμές της παρούσας διατριβής που αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

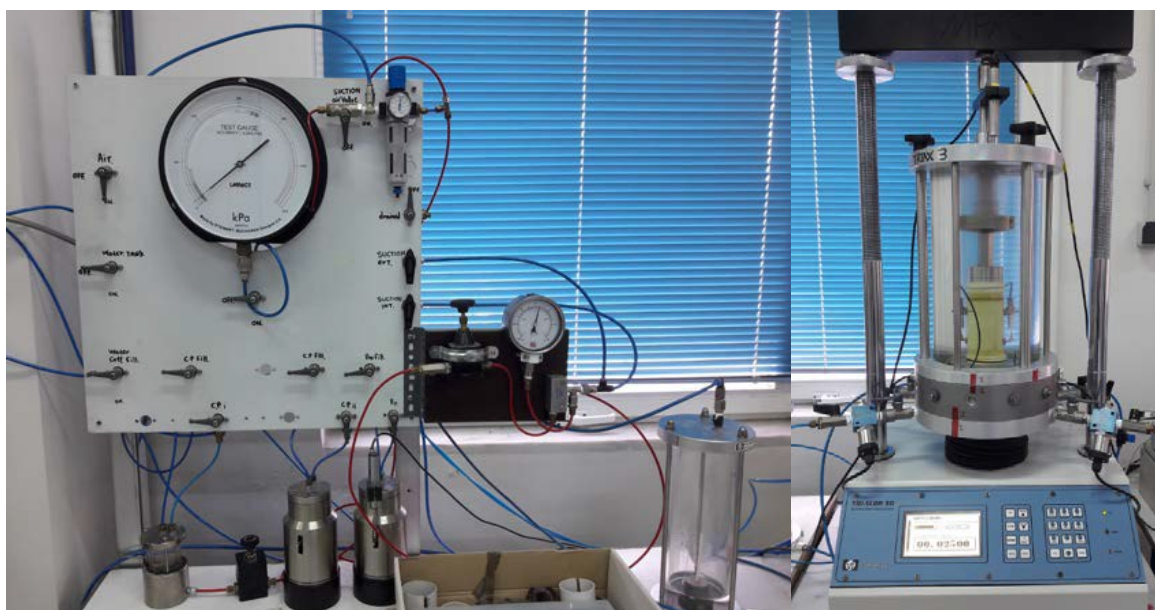
3.2 Τριαξονικές συσκευές του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής

Στην παρούσα εργασία, για τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών θλίψης χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων (high pressure triaxial apparatus) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (**Σχήμα 3.1**). Η συσκευή αυτή είναι κατάλληλη για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς στιφρών εδαφών με χρήση δοκιμών διαμέτρου 50, 75 και 100mm. Η μέγιστη πίεση κυψέλης είναι 7 MPa και μέγιστο το αξονικό φορτίο είναι 50 kN . Η διακριτότητα στη μέτρηση πιέσεων είναι 0.1 kPa (για πίεση κυψέλης έως 4 MPa) και 0.5 kPa για μεγαλύτερες πιέσεις. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μια κλασική τριαξονική συσκευή του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής (**Σχήμα 3.2**). Η μέγιστη πίεση κυψέλης είναι 1.7 MPa και το μέγιστο αξονικό φορτίο 8 kN. Η μεταβολή της αξονικής τάσης επιτυγχάνεται με επιβολή σχετικής μετακίνησης της βάσης του δοκιμίου με σταθερό ρυθμό (strain control) ενώ ο κατακόρυφος άξονας όπου είναι τοποθετημένος ο μετρητής δύναμης παραμένει ακλόνητος. Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με μετρητές αξονικών παραμορφώσεων επί του δοκιμίου, (LVDTs) για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων αποφεύγοντας τα λάθη που οφείλονται στην ευθυγράμμιση και το βαθμό επαφής των άκρων καθώς και στη συμπίεση του υλικού των άκρων, του μετρητή φορτίου και γενικά των τμημάτων της συσκευής που παρεμβάλλονται στη γραμμή μέτρησης της σχετικής μετακίνησης. Επιπλέον με τους εσωτερικούς μετρητές είναι δυνατή η μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου ακόμη και όταν δεν μεταβάλλεται η αξονική τάση με την

επιβολή της μετακίνησης, δηλαδή στο στάδιο του κορεσμού και της ισότροπης στερεοποίησης.



Σχήμα 3.1: Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ



Σχήμα 3.2: Τριαξονική συσκευή του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

Οι εσωτερικοί μετρητές επί του δοκιμίου απεικονίζονται στο **Σχήμα 3.3** πριν την έναρξη της δοκιμής. Η δεξαμενή αντιπίεσης (back pressure tank) πληρώνεται με απαερωμένο νερό και διαθέτει ελαστική φούσκα, η οποία δέχεται στο εσωτερικό της παροχή αέρα. Η παροχή αέρα και επομένως η πίεση στη δεξαμενή ελέγχεται πλήρως. Η δεξαμενή αντιπίεσης επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με το εσωτερικό περιβάλλον του δοκιμίου (εντός της μεμβράνης) και μ' αυτόν τον τρόπο

γίνεται αυτοματοποιημένα ο έλεγχος της πίεσης του ύδατος πόρων του δοκιμίου. Ο μετρητής πίεσης του νερού (pore pressure transducer) είναι τοποθετημένος έξω από την κυψέλη στη διαδρομή ανάμεσα στο δοκίμιο και τη δεξαμενή αντιπίεσης. Επιπλέον, μετράται η μεταβολή του όγκου του νερού μέσα στη δεξαμενή αντιπίεσης και άρα ο όγκος του νερού που εκρέει από ή εισρέει στο δοκίμιο.



Σχήμα 3.3: Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs)

Για την εκτέλεση των τριαξονικών δοκιμών εφελκυσμού καθώς και των ανακλικιών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή τριαξονική συσκευές ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975) του του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ (**Σχήμα 3.4**). Η εφελκυστική φόρτιση των δοκιμίων επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικού εξαρτήματος το οποίο εφαρμόζει στο άνω τμήμα (top-cap). Δημιουργώντας αναρρόφηση συνδέεται με το ακλόνητο αξονικό έμβολο και καθώς η βάση μετακινείται προς τα κάτω το δοκίμιο εφελκύεται (**Σχήμα 3.5**). Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με μετρητές αξονικών παραμορφώσεων επί του δοκιμίου, (LVDTs) και τοπικού μετρητή πλευρικής παραμόρφωσης (radial strain belt). Στην τριαξονική συσκευή Bishop & Wesley η αξονική τάση μεταβάλλεται είτε με μετακίνηση της βάσης του δοκιμίου (έλεγχος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης) είτε με επιβολή της αξονικής δύναμης (έλεγχος της επιβαλλόμενης τάσης). Επομένως, στη διατριβή ελέγχεται η επιρροή του τρόπου φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου M31 με και χωρίς κολλοειδή πυριτία.



Σχήμα 3.4: Τριαξονική συσκευή (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ



Σχήμα 3.5: Σύνδεση δοκιμίου με το αξονικό έμβολο για την επιβολή εφελκυστικής/ανακυκλικής φόρτισης. Μετρητές αξονικής παραμόρφωσης επί του δοκιμίου (LVDTs) και τοπικού μετρητή πλευρικής παραμόρφωσης (radial strain belt)

3.3 Συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus) βρίσκεται στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει κατασκευαστεί από την Ιαπωνική εταιρεία SEIKEN INC (Σχήμα 3.6). Η συσκευή δύναται να επιβάλλει μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση με έλεγχο της επιβαλλόμενης τάσης ή της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Ηλεκτροπνευματικές μονάδες ελέγχου συνδέονται με ειδικές βαλβίδες αέρα με σκοπό τον έλεγχο των επιβαλλόμενων πιέσεων μέσα και έξω από το δοκίμιο, ενώ η ακρίβεια στη μεταβολή των πιέσεων είναι της τάξεως του 0.5kPa. Τα δοκίμια που εξετάζονται είναι δυνατόν να είναι συμπαγή ή κούλα. Για τη δεύτερη περίπτωση, η οποία είναι και αυτή που αφορά την παρούσα διδακτορική διατριβή, τα κούλα δοκίμια έχουν εξωτερική διάμετρο 70mm, εσωτερική διάμετρο 40mm και ύψος 140mm.



Σχήμα 3.6: Συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

Το δοκίμιο εδράζεται σε βάση (pedestal) που διαθέτει δακτυλιωτό πορόλιθο με ενσωματωμένα μεταλλικά πτερύγια. Στην κορυφή του δοκιμίου τοποθετείται καπάκι (top cap) που διαθέτει δακτυλιωτό πορόλιθο με ενσωματωμένα μεταλλικά πτερύγια. Το καπάκι βιδώνεται στη συνέχεια σε κατακόρυφο άξονα που επιβάλλει τη στρεπτική ροπή ή/και το αξονικό φορτίο. Το αξονικό φορτίο του εμβόλου προκαλεί μία πρόσθετη αξονική

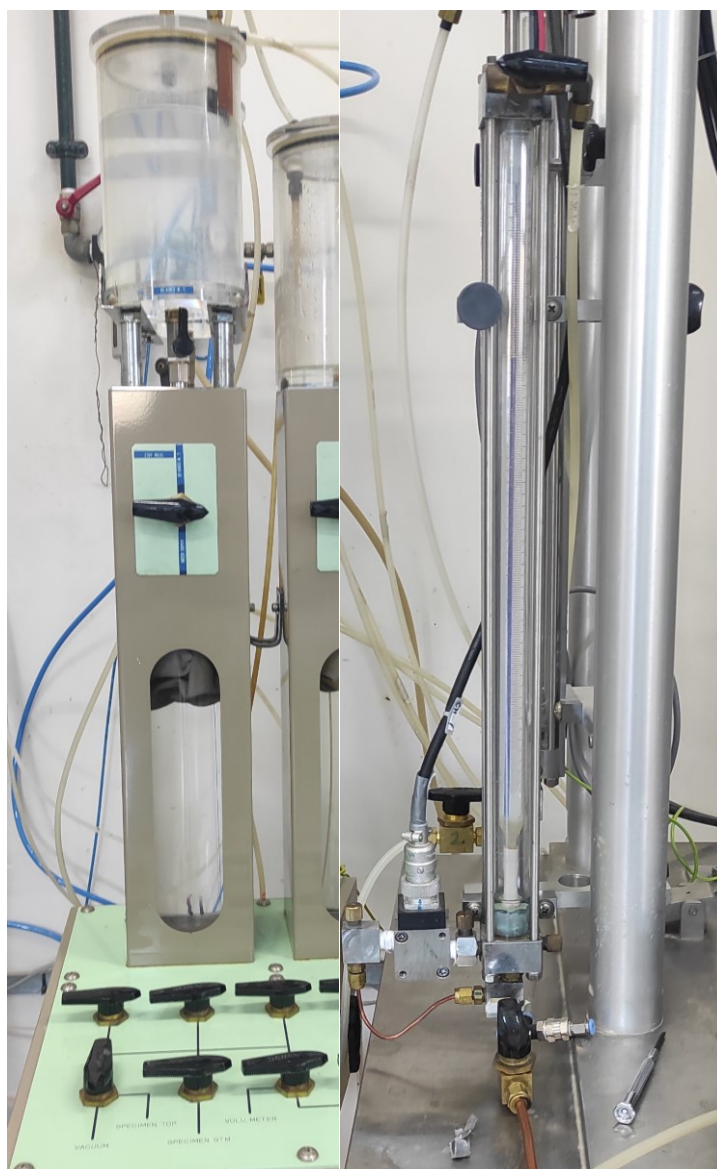
τάση. Ο άξονας έχει ενσωματωμένη κυψέλη μέτρησης της στρεπτικής ροπής και του αξονικού φορτίου (torque/load cell), που βρίσκεται μέσα στην τριαξονική κυψέλη (triaxial cell), ακριβώς πάνω από το καπάκι. Ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο έκκεντρο έμβολο είναι συνδεδεμένα με τον κατακόρυφο άξονα και του επιβάλλουν, μέσω ηλεκτροπνευματικού μηχανισμού, το αξονικό φορτίο και τη ροπή στρέψης. Οι σερβοελεγκτές καθορίζουν το επίπεδο φόρτισης μέσω σερβοβαλβίδων και υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των τάσεων ή των παραμορφώσεων. Η τριαξονική κυψέλη (Σχήμα 3.7) πληρώνεται μέχρι ενός σημείου με νερό και δέχεται στο επάνω μέρος παροχή αέρα μέσω ηλεκτροπνευματικού μηχανισμού με σερβοβαλβίδα. Ένας σερβοελεγκτής καθορίζει το επίπεδο της πίεσης της εξωτερικής κυψέλης (outer cell pressure).



Σχήμα 3.7: Τριαξονική κυψέλη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

Η δεξαμενή αντιπίεσης (back pressure tank) πληρώνεται με απαερωμένο νερό και διαθέτει ελαστική φούσκα, η οποία δέχεται στο εσωτερικό της παροχή αέρα. Η παροχή αέρα και επομένως η πίεση στη δεξαμενή, καθορίζεται μέσω σερβοελεγκτή και σερβοβαλβίδας. Η δεξαμενή αντιπίεσης επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με το εσωτερικό περιβάλλον του δοκιμίου (εντός των μεμβρανών) και μ' αυτόν τον τρόπο γίνεται αυτοματοποιημένα ο έλεγχος της πίεσης του ύδατος πόρων του δοκιμίου. Η παροχή πεπιεσμένου αέρα που καταλήγει στη φούσκα της δεξαμενής αντιπίεσης διοχετεύεται επίσης και στην κορυφή της προχοΐδας μέτρησης των μεταβολών όγκου (volume change burette) (Σχήμα 3.8). 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, που μετράται με διαφορικό αισθητήρα πίεσης (differential pressure transducer). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο όγκος του νερού που εκρέει από ή εισρέει στο δοκίμιο. Λεπτομερής παρουσίαση των χαρακτηριστικών της συσκευής στρεπτικής διάτμησης του

εργαστηρίου Εδαφομηχανικής πραγματοποιείται στη διδακτορική διατριβή του Δρ. Α. Ι. Τσομώκου (2005).



Σχήμα 3.8: Σύστημα παροχής απαερωμένου νερού, δεξαμενή αντιπίεσης (back pressure tank) και προχοΐδα μέτρησης των μεταβολών όγκου (volume change burette)

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή η πίεση εντός του κυλίνδρου (inner cell pressure) και εκτός του κυλίνδρου (outer cell pressure) ελέγχονται ανεξάρτητα. Μία δεξαμενή πίεσης (inner pressure tank) πληρώνεται με απαερωμένο νερό και διαθέτει ελαστική φούσκα, η οποία δέχεται στο εσωτερικό της παροχή αέρα. Η παροχή αέρα και επομένως η πίεση στη δεξαμενή, καθορίζεται μέσω σερβοελεγκτή και σερβοβαλβίδας. Η δεξαμενή αντιπίεσης επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με την εσωτερική κυψέλη εκτός του δοκιμίου που είναι πληρωμένη με απαερωμένο νερό (εκτός των μεμβρανών) και μ' αυτόν τον τρόπο γίνεται αυτοματοποιημένα ο έλεγχος της εσωτερικής πίεσης της κυψέλης, p_i . Για τη μέτρηση της μεταβολής του όγκου του νερού της εσωτερικής κυψέλης τοποθετήθηκε μια

ακόμη προχοΐδα μέτρησης των μεταβολών όγκου (inner volume change burette). (**Σχήμα 3.9**). Η προχοΐδα είναι γεμάτη με νερό μέχρι ενός σημείου και στη βάση της επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με την εσωτερική κυψέλη του δοκιμίου. Το νερό στη βάση της προχοΐδας και το νερό της κυψέλης του δοκιμίου έχουν μία διαφορά υδροστατικής πίεσης, η οποία μετريέται με διαφορικό αισθητήρα πίεσης (differential pressure transducer). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου του νερού μέσα στην προχοΐδα και άρα ο όγκος του νερού που εκρέει ή εισρέει από την εσωτερική κυψέλη.



Σχήμα 3.9: Δεξαμενή πίεσης εσωτερικής κυψέλης (inner pressure tank) και προχοΐδα μέτρησης των μεταβολών όγκου της εσωτερικής κυψέλης (inner volume change burette)

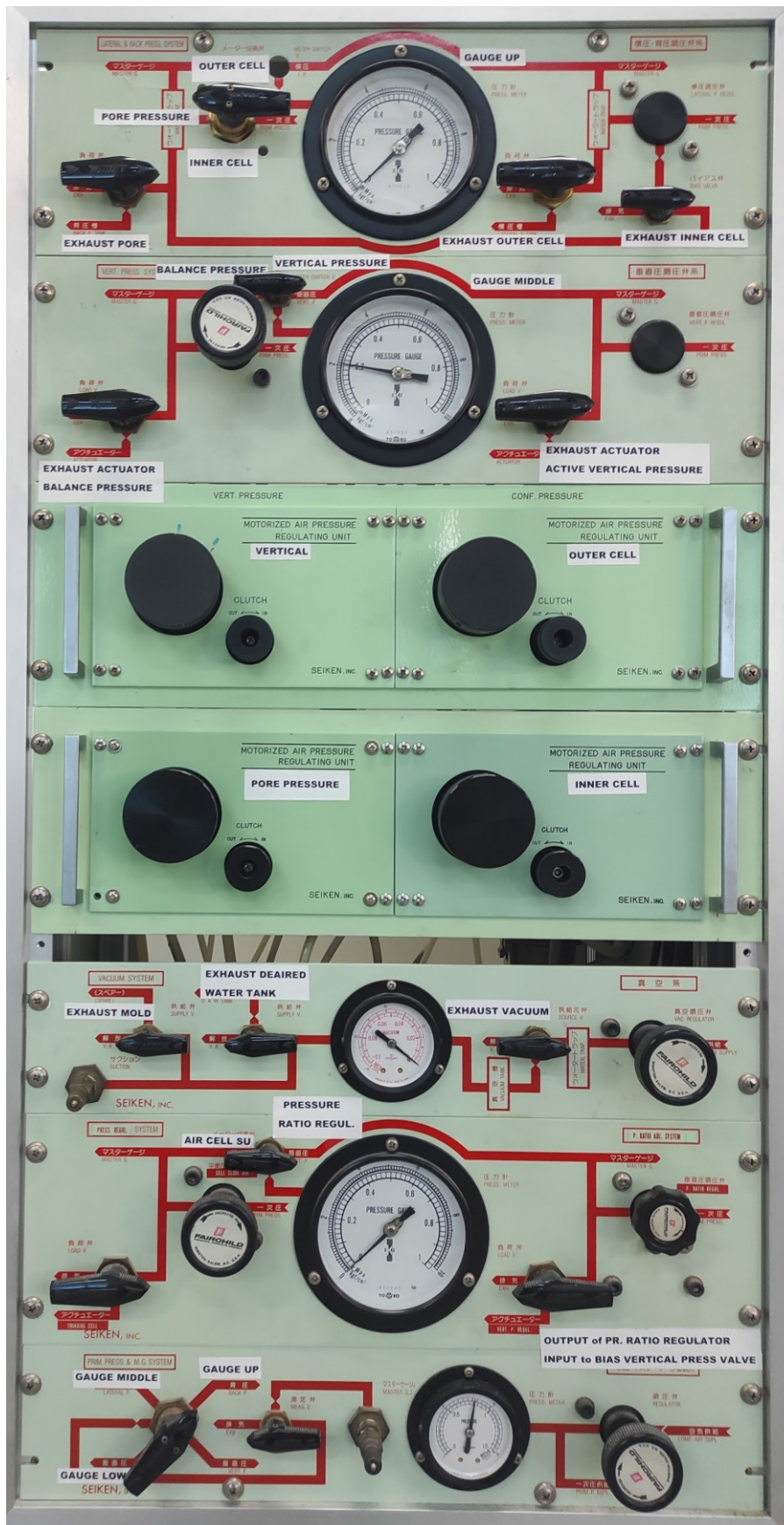
Η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου επιβάλλει τον έλεγχο της φόρτισης επικοινωνώντας με ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιώντας κατάλληλο προγραμματιστικό περιβάλλον (Labview) (**Σχήμα 3.10**). Η παροχή αέρα στα υποσυστήματα της συσκευής πραγματοποιείται μέσω της κεντρική μονάδας παροχής αέρα (**Σχήμα 3.11**). Η συσκευή επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο του αξονικού (F) και του στρεπτικού (T) φορτίου, της εσωτερικής (p_i) και της εξωτερικής πίεσης (p_o) της κυψέλης. Επομένως, τα πειράματα διεξάγονται ελέγχοντας τη γωνία α και την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης b .

Κεφάλαιο 3 : Εργαστηριακές Μέθοδοι, Συσκευές και Εξεταζόμενα Υλικά

Η μέτρηση της αξονικής μετατόπισης γίνεται με εξωτερικό αισθητήρα(dial gauge) και η μέτρηση της στροφής της κορυφής του δοκιμίου σε σχέση με τη βάση γίνεται με εσωτερικό αισθητήρα, που διαθέτει έναν κυκλικό δίσκο σε επαφή στατικής τριβής με το καπάκι του δοκιμίου. Όλοι οι αισθητήρες (transducers) βαθμονομήθηκαν στο εύρος των επιβαλλόμενων φυσικών μεγεθών. Για πρώτη φορά η εγκατάσταση του νέου οργάνου μέτρησης της ογκομετρικής παραμόρφωσης που περιλαμβάνει προχοΐδα (burette) και διαφορικό μετρητή πίεσης για τη μέτρηση των μεταβολών του όγκου της εσωτερικής κυψέλης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ σε συνδυασμό με τους υπάρχοντες μετρητές παραμόρφωσης, επέτρεψε την ακριβή μέτρηση όλων των επιμέρους παραμορφώσεων (ϵ_{vol} , ϵ_z , ϵ_r , ϵ_{θ} και $\gamma_{\theta z}$) στα πειράματα της διατριβής.



Σχήμα 3.10: Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (electric measuring and controlling unit)



Σχήμα 3.11: Μονάδα παροχής αέρα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

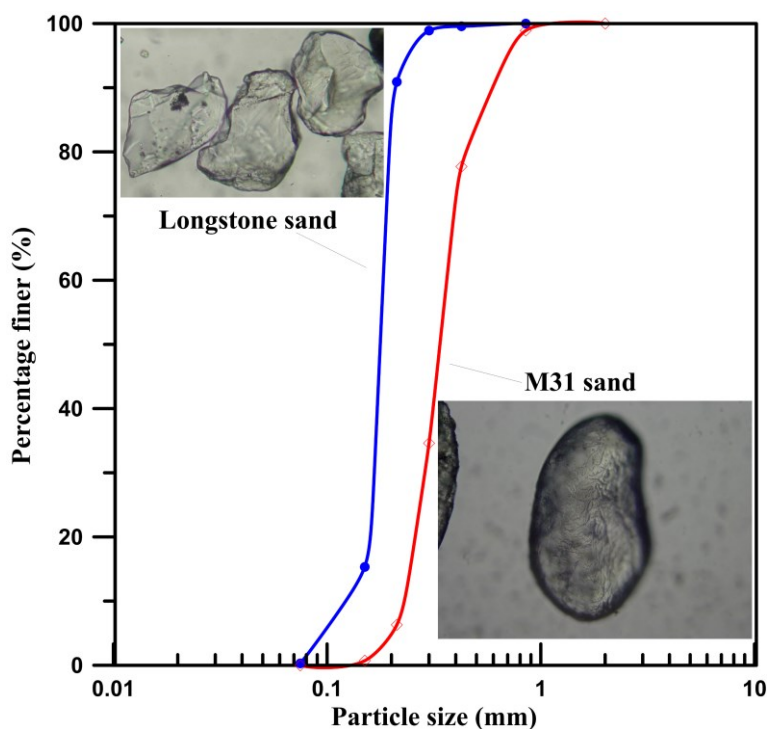
3.4 Εξεταζόμενα υλικά

3.4.1 Φυσικά εδαφικά υλικά

Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αυτής της διατριβής είναι η άμμος M31. Η ανάλυση στο μικροσκόπιο έδειξε ότι η άμμος M31 πρόκειται για καθαρή άμμο, με σχετικά ομοιόμορφα σιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα. Η στίλβωση αποτελεί ένδειξη προέλευσης από υδάτινο περιβάλλον. Οι κόκκοι στην πλειονότητά τους είναι διαυγείς, ενώ ένα ποσοστό 5-10% είναι γαλακτόχρωμοι (ημιδιαφανείς). Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του σχήματος των κόκκων στην απόκριση της άμμου με και χωρίς σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία χρησιμοποιήθηκε σε ορισμένες δοκιμές και η γωνιώδης άμμος Longstone. Πρόκειται για μια λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμο με γωνιώδεις κόκκους βιομηχανικής παραγωγής. Οι κοκκομετρικές καμπύλες καθώς και φωτογραφίες των κόκκων των 2 άμμων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.12**. Τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.1**.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των άμμων M31 και Longstone

Άμμος	G _s	e _{max}	e _{min}	D ₅₀ :mm
M31	2.66	0.870	0.528	0.3
Longstone	2.64	0.995	0.614	0.15



Σχήμα 3.12: Κοκκομετρικές καμπύλες και φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των κόκκων της άμμου M31 και Longstone (Pavlopoulou & Georgiannou, 2021)

Τα δοκίμια άμμου παρασκευάζονται με εμβάπτιση του ξηρού εδαφικού υλικού σε απαερωμένο νερό (water pluviation). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την παρασκευή ομοιόμορφων δοκιμών με δομή που προσομοιώνει τη δομή των εδαφικών υλικών στη φύση (Vaid et al., 1999). Οι Oda et al. (1978) επισήμαναν ότι η μέθοδος της εμβάπτισης σε νερό μιμείται τη δομή των αλλουβιακών αποθέσεων άμμου και οι Prashanth et al., (2018) συμπέραναν ότι με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός εγγενούς ανισοτροπίας στα εδαφικά δοκίμια

3.4.2 Εδαφικά υλικά σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία

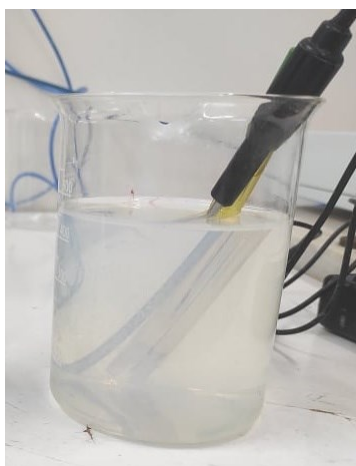
Για τη βελτίωση της άμμου με τη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής η κολλοειδής πυριτία. Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών της εργασίας έχει την εμπορική ονομασία Ludox-SM® (προϊόν της Sigma - Aldrich®). Σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι μια υδάτινη διασπορά (aqua-sol) διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας με μέγεθος στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους (7 nm) και η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων είναι 345 m²/g. Τα σωματίδια είναι συμπαγή (μη πορώδη) και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή. Επιπλέον, το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας, έχει αρχική συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO₂ 30% κατά βάρος (κ.β) και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10 με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na₂O. Το ιξώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP, ενώ του νερού είναι 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία (1 cP = 10⁻³ Pa·s = 1 mPa·s). Μετά την αραιώση του υγρολύματος με απιονισμένο νερό, επιτυγχάνεται μικρότερο ποσοστό κατά βάρος πυριτίας και το ιξώδες του μικραίνει ακόμα περισσότερο (~2cP).

Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή παρασκευάζεται μέσα σε καθαρό, γυάλινο δοχείο αναμειγνύοντας απιονισμένο νερό με κολλοειδή πυριτία (Ludox-SM®) και καθαρό χλωριούχο νάτριο (NaCl), ενώ η τιμή του pH προσαρμόστηκε προσθέτοντας μικρές ποσότητες υδροχλωρικού οξέος (HCl). Ο χρόνος γέλης του υγρολύματος κολλοειδής πυριτίας CS=10% κ.β., κανονικότητας 0.03N, με pH=6 σε θερμοκρασία T=25°C προσδιορίστηκε στις 10 ώρες (Agaroulaki & Papadimitriou, 2018). Ο χρόνος γέλης της κολλοειδούς πυριτίας ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ιξώδες σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες των 100cP (0,1 Pa*s).

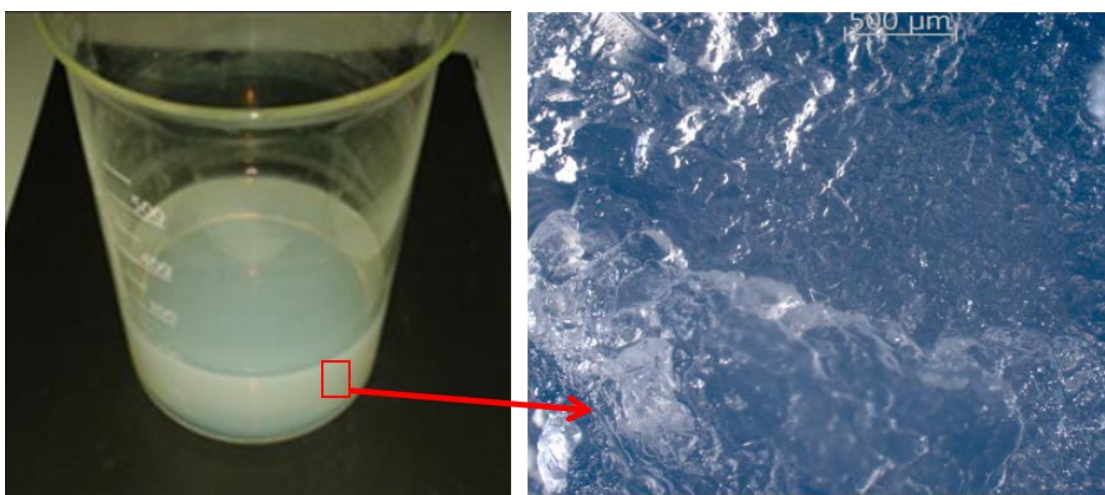
Στο **Σχήμα 3.13** παρουσιάζεται το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας (CS=10%) στην αρχική του κατάσταση και μετά από 10 ώρες όπου έχει σχηματιστεί η γέλη. Επιπλέον παρατίθεται φωτογραφία του υγρολύματος (hydrogel) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Μετά την παρασκευή του το υγρόλυμα διοχετεύεται σε ειδικά διαμορφωμένο καλούπι (**Σχήμα 3.14**). Το εδαφικό υλικό εμβαπτίζεται στο καλούπι με το υγρόλυμα πυριτίας. Στη συνέχεια το καλούπι σφραγίζεται και το δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει διατηρώντας την υγρασία του. Ο σχηματισμός της γέλης μέσα στο πορώδες του δοκιμίου γίνεται, επομένως, με τον εδαφικό σκελετό να βρίσκεται υπό μηδενική πρακτικά ενεργό τάση. Τα σωματίδια της πυριτίας συγκρούονται και ακυρώνονται στους εδαφικούς κόκκους. Τα

δοκίμια αφήνονται να ωριμάσουν στα καλούπια υπό αεροστεγείς συνθήκες σε θερμοκρασία δωματίου για χρονικό διάστημα πενταπλάσιο του χρόνου γέλης, δηλαδή περίπου 50 ώρες. Αφού επέλθει αυτό το χρονικό διάστημα αφαιρείται το καλούπι και η μεμβράνη που περιβάλλει το δοκίμιο και μετρούνται οι διαστάσεις του. Στο **Σχήμα 3.15** παρουσιάζεται ένα σταθεροποιημένο δοκίμιο σε φωτογραφία και σε απεικόνιση από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Παρατηρούμε ότι η κολλοειδής πυριτία βρίσκεται ανάμεσα στους κόκκους της άμμου (σημεία A και B). Στο **Σχήμα 3.16** παρουσιάζεται το σταθεροποιημένο δοκίμιο μετά από ξήρανση (drying) όπου η γέλη έχει μετατραπεί σε ξηρό - γέλη(xerogel). Με την απεικόνιση από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διαπιστώνουμε ότι οι κόκκοι του εδάφους έχουν καλυφθεί σε όλη τους την έκταση από κολλοειδή πυριτία. Το σταθεροποιημένο έδαφος με ξηραμένη πυριτία στους πόρους του είναι ιδιαίτερα ψαθυρό, τρίβεται και χάνει τη μορφή του πολύ εύκολα, ενώ διαλύεται όταν βυθιστεί στο νερό

α)



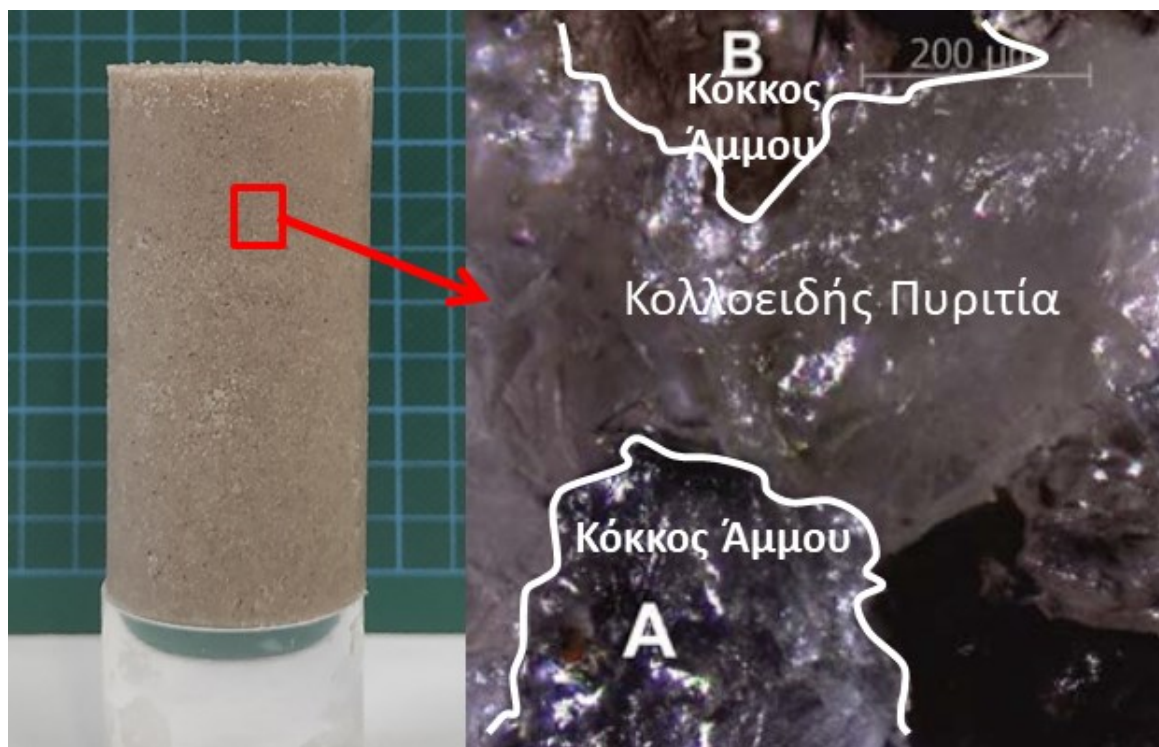
β)



Σχήμα 3.13: Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας CS=10% κ.β. α) τη στιγμή που παρασκευάζεται, β) μετά τη μετατροπή του σε ελαστική γέλη με απεικόνιση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο



Σχήμα 3.14: Υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας πριν τοποθετηθεί στο ειδικά διαμορφωμένο καλούπι για την παρασκευή του σταθεροποιημένου δοκιμίου



Σχήμα 3.15: Σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου M31 φωτογραφία και απεικόνιση ηλεκτρονικό μικροσκόπιο



Σχήμα 3.16: Φωτογραφία και απεικόνιση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σταθεροποιημένου δοκιμίου μετά από ξήρανση

3.5 Πρόγραμμα Εργαστηριακών Δοκιμών

Αντικείμενο της διατριβής είναι η πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμων, χωρίς και με σταθεροποίηση με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Το πρόγραμμα πειραμάτων περιλαμβάνει δοκιμές μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης ώστε να δημιουργηθεί μια πειραματική βάση δεδομένων και να καθοριστεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο συμπεριφοράς σταθεροποιημένων άμμων υπό μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση.

Αρχικά εκτελέστηκαν **δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης** (συμπιεσομέτρου) σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM® άμμο σε ένα εύρος πυκνοτήτων ώστε να εξεταστεί η επίδραση κολλοειδούς πυριτίας στη συμπιεστότητα του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Προκειμένου να διευκρινισθεί εάν το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων μελετάται μία άμμος με γωνιώδεις (άμμος Longstone) και μία με στρογγυλεμένους κόκκους (άμμος M31) ώστε να καθοριστεί η επίδραση του σχήματος των κόκκων στην απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Στον **Πίνακα 3.2** συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης ενώ τα αποτελέσματα αναλύονται στο **Κεφάλαιο 4**.

Στη συνέχεια εκτελέστηκαν **δοκιμές απευθείας διάτμησης** υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία με ποσοστό σταθεροποιητή CS=10% κ.β.. Μελετάται η επίδραση της πυκνότητας και της αρχικής ενεργού τάσης στη διαστολικότητα, στη μέγιστη διατμητική αντοχή και στην παραμένουσα αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου. Στις δοκιμές της απευθείας διάτμησης μελετήθηκαν δύο άμμοι (M31 και Longstone) ώστε να διευκρινισθεί εάν το

σχήμα και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών περιγράφονται στα σχήματα του **Κεφαλαίου 4** ενώ τα χαρακτηριστικά των μονοτονικών δοκιμών διακρίνονται στον **Πίνακα 3.3**.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών **τριαξονικής θλίψης** φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε ένα ευρύ φάσμα αρχικών ενεργών τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης. Διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο ελαστικότητας, στην κατάσταση αλλαγής φάσης (phase transformation) στη μέγιστη διατμητική αντοχή, στη διαστολικότητα και στις παραμέτρους κρίσιμης κατάστασης (critical state). Για να διερευνηθεί η επίδραση της ανισοτροπίας στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου εκτελέστηκαν δοκιμές **τριαξονικού εφελκυσμού** υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 με και χωρίς σταθεροποίηση. Τα δοκίμια αυτά μετά το στάδιο το κορεσμού, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στα σχήματα του **Κεφαλαίου 4** ενώ τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.4**.

Προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου της παθητικής σταθεροποίησης στον περιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης της άμμου εκτελέστηκαν **ανακυκλικές, τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης** στη σταθεροποιημένη άμμο M31. Επιλέχθηκε η άμμος M31 γιατί είναι λεπτόκοκκη, επιρρεπής σε ρευστοποίηση και εμφάνισε ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη μονοτονική φόρτιση. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης της ξηρής άμμου σε νερό ή σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας σε χαλαρή πυκνότητα και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$. Οι ανακυκλικές δοκιμές εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress control tests) σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης (Cyclic stress Ratio), $CSR=q/2p'_i=0.11-0.20$. Στον **Πίνακα 3.5** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμών ενώ τα αποτελέσματα αναλύονται στο **Κεφάλαιο 5**. Μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας με περιεκτικότητα σταθεροποιητή 10% κ.β. στην εξέλιξη της πίεσης του υγρού των πόρων, στη συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης, στην αντίσταση στη ρευστοποίηση και στο μέτρο εδαφικής δυσστησίας

Στόχος της διατριβής είναι ο προσδιορισμός ενός πλαισίου που να περιγράφει την ανισότροπη απόκριση της άμμου αρχικά και στη συνέχεια το πλαίσιο αυτό να χρησιμοποιηθεί σαν βάση αναφοράς για την ανάδειξη της βελτιωμένης συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου. Για τη μελέτη της ανισοτροπίας πέραν των δύο ακραίων καταστάσεων (τριαξονική θλίψη και τριαξονικός εφελκυσμός), εκτελέστηκαν δοκιμές ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Κυλινδρικού Δοκιμίου υπό ενδιάμεσες προκαθορισμένες κλίσεις της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο: $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Οι **δοκιμές ακτινικής φόρτισης** (διάτμηση υπό σταθερή γωνία α) εκτελέστηκαν σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Μελετάται η επίδραση της γωνίας α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°)

στην εξέλιξη της διατμητικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης, στο λόγο τάσεων $\eta=q/p'$ στο σημείο αλλαγής φάσης και στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμμικότητα). Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , στην εδαφική ανισοτροπία της άμμου μέσω δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31, υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Η ακτινική φόρτιση πραγματοποιήθηκε διατηρώντας σταθερή την διεύθυνση των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό γωνία α σε διάφορες τιμές της παραμέτρου b ($b=0, 0.5$, και 1). Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται η επιρροή της πυκνότητας του εδάφους στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά, μέσω δοκιμών ακτινικής φόρτισης σε σχετικά πυκνά και σε σχετικά χαλαρά δοκίμια άμμου M31 υπό διάφορες σταθερές τιμές της γωνίας α και της παραμέτρου b . Στη συνέχεια, για πρώτη φορά μελετάται, σε αντιστοιχία με την άμμο, η εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία. Εξετάζεται η εξάρτηση της αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμών από τη διεύθυνση φόρτισης α , την τιμή της ενδιάμεσης κύριας τάσης b και από τις συνθήκες επιβολής της φόρτισης (έλεγχος της τάσης-έλεγχος της παραμόρφωσης). Οι δοκιμές ακτινικής φόρτισης που εκτελέστηκαν στην άμμο M31 και στη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.6** και περιγράφονται αναλυτικά στο **Κεφάλαιο 6**.

Η επίδραση της συνεχούς μεταβολής της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων στην συμπεριφορά της άμμου M31 μελετήθηκε μέσω **δοκιμών περιστροφής των κυρίων τάσεων** υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιούνται ισότροπα σε μέση αρχική ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$. Στη συνέχεια υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας σταθερή τη γωνία α ($\alpha=0^\circ$) και την παράμετρο b ($b=0$ ή $b=0.5$) μέχρι ένα συγκεκριμένο λόγο τάσεων $\eta=q/p'$. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης η εσωτερική (p_i) και η εξωτερική (p_o) πίεση ελέγχονται ανεξάρτητα ώστε να διατηρείται σταθερή η μέση ενεργός τάση, p' , και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, ενώ αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση, $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$. Η φόρτιση επιβάλλεται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress controlled tests). Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερό τον λόγο τάσεων q/p' και την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης b εκτελούνται περιστροφές των αξόνων των κύριων τάσεων ($\alpha=0 \rightarrow 180^\circ$) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Τα στοιχεία των δοκιμών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.7** ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών αναλύονται στο Κεφάλαιο 7. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της στρόφης στην εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης και των επιμέρους παραμορφώσεων ($\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_\theta, \gamma_{\theta z}$) και στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμμικότητα). Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση του μεγέθους του λόγου τάσεων q/p' και της παραμέτρου b ($b=0$ και $0,5$), που διατηρούνται σταθερά κατά την περιστροφή, για διαφορετικές πυκνότητες του εδάφους.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 και Longstone

Πείραμα	Αρχικός Δείκτης πόρων, e	Άμμος	Σταθεροποίηση
OM-1	0.718	M31	-
OM-2	0.661	M31	-
OM-3	0.639	M31	-
OSM-1	0.708	M31	T
OSM-2	0.648	M31	T
OSM-3	0.635	M31	T
OL-1	0.819	Longstone	-
OL-2	0.740	Longstone	-
OL-3	0.709	Longstone	-
OSL-1	0.766	Longstone	T
OSL-2	0.756	Longstone	T
OSL-3	0.738	Longstone	T

Όπου: T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 και Longstone

Πείραμα	Δείκτης πόρων, e_i	Κατακόρυφη ενεργός τάση, σ'vo (kPa)	Άμμος	Σταθεροποίηση
M-1	0.641	125	M31	-
M-2	0.656	555	M31	-
M-3	0.696	125	M31	-
M-4	0.535	125	M31	-
M-5	0.651	232	M31	-
M-6	0.661	232	M31	-
M-7	0.528	232	M31	-
M-8	0.626	232	M31	-
M-9	0.658	340	M31	-
M-10	0.550	125	M31	-
M-11	0.554	555	M31	-
SM-1	0.639	125	M31	T
SM-2	0.632	555	M31	T
SM-3	0.637	196	M31	T
SM-4	0.647	232	M31	T
SM-5	0.612	232	M31	T
SM-6	0.643	268	M31	T
SM-7	0.646	340	M31	T
SM-8	0.681	340	M31	T
SM-9	0.655	53	M31	T
L-1	0.753	340	Longstone	-
L-2	0.737	555	Longstone	-

Κεφάλαιο 3 : Εργαστηριακές Μέθοδοι, Συσκευές και Εξεταζόμενα Υλικά

L-3	0.681	340	Longstone	-
L-4	0.765	53	Longstone	-
L-5	0.760	125	Longstone	-
L-6	0.759	232	Longstone	-
SL-1	0.735	340	Longstone	T
SL-2	0.760	555	Longstone	T
SL-3	0.654	340	Longstone	T
SL-4	0.766	53	Longstone	T
SL-5	0.765	125	Longstone	T
SL-6	0.757	232	Longstone	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 σ'_{vo} , κατακόρυφη ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31

Πείραμα	Δείκτης πόρων, e_i	Ενεργός τάση, p'_i (kPa)	Σταθεροποίηση	Φόρτιση	Στράγγιση
MD-1	0.710	200	-	C	D
MD-2	0.717	300	-	C	D
MD-3	0.691	500	-	C	D
MD-4	0.676	700	-	C	D
CD-1	0.748	200	-	C	D
ED-1	0.737	200	-	E	D
SMD-1	0.744	100	T	C	D
SMD-2	0.751	200	T	C	D
SMD-3	0.721	300	T	C	D
SMD-4	0.722	500	T	C	D
SMD-5	0.711	700	T	C	D
SMD-6	0.685	1000	T	C	D
SMD-7	0.673	2000	T	C	D
SCD-1	0.751	200	T	C	D
SED-1	0.742	200	T	E	D
MU-1	0.708	300	-	C	U
MU-2	0.681	1000	-	C	U
MU-3	0.662	2000	-	C	U
MU-4	0.663	300	-	C	U
MU-5	0.670	500	-	C	U
CU-1	0.738	200	-	C	U
EU-1	0.744	200	-	E	U
SMU-1	0.732	100	T	C	U
SMU-2	0.752	200	T	C	U
SMU-3	0.735	300	T	C	U
SMU-4	0.722	1000	T	C	U

SMU-5	0.667	2000	T	C	U
SCU-1	0.752	200	T	C	U
SEU-1	0.760	200	T	E	U

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία
C, Τριαξονική Θλίψη
E, Τριαξονικός Εφελκυσμός
D, Ελεύθερη Στράγγιση
U, Εμποδιζόμενη Στράγγιση

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% δοκίμια άμμου M31

Πείραμα	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)
C-1	0.722	200	0.20	5
C-2	0.717	200	0.19	5
C-3	0.715	200	0.16	5
C-4	0.720	200	0.13	5
C-5	0.724	200	0.12	2.5
C-6	0.710	200	0.11	2.5
SC-1	0.720	200	0.20	5
SC-2	0.728	200	0.18	5
SC-3	0.717	200	0.16	5
SC-4	0.734	200	0.14	5
SC-5	0.748	200	0.12	5

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης

Πείραμα	e_i	p'_i (kPa)	α (°)	b	Σταθεροποίηση
FA-1	0.718	200	0	0	-
FA-2	0.711	200	30	0	-
FA-3	0.708	200	45	0	-
FA-4	0.719	200	60	0	-
FA-5	0.709	200	90	0	-
FA-6	0.553	200	0	0	-
FA-7	0.559	200	30	0	-
FA-8	0.565	200	45	0	-
FA-9	0.560	200	60	0	-
FA-10	0.565	200	90	0	-
FA-11	0.715	200	0	0.5	-
FA-12	0.720	200	30	0.5	-
FA-13	0.718	200	45	0.5	-
FA-14	0.716	200	60	0.5	-
FA-15	0.721	200	90	0.5	-
FA-16	0.565	200	0	0.5	-
FA-17	0.557	200	30	0.5	-
FA-18	0.563	200	45	0.5	-
FA-19	0.557	200	60	0.5	-
FA-20	0.559	200	90	0.5	-
FA-21	0.700	200	0	1	-
FA-22	0.701	200	30	1	-
FA-23	0.701	200	45	1	-
FA-24	0.708	200	60	1	-
FA-25	0.709	200	90	1	-
FA-26	0.568	200	0	1	-
FA-27	0.570	200	30	1	-
FA-28	0.570	200	45	1	-
FA-29	0.572	200	60	1	-
FA-30	0.569	200	90	1	-
SFA-1	0.713	200	0	0.5	T
SFA-2	0.716	200	45	0.5	T
SFA-3	0.720	200	60	0.5	T
SFA-4	0.721	200	90	0.5	T
SFA-5	0.710	200	0	0	T
SFA-6	0.720	200	90	1	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,
 α , διεύθυνση του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , ως προς την κατακόρυφο
 b , παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2)
 T , δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

Πίνακας 3.7: Χαρακτηριστικά δοκιμών στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στην άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης

Πείραμα	Ακτινική Φόρτιση $\alpha=0^\circ$			Στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων $\alpha=0^\circ \rightarrow 180^\circ$		
	e_i	p'_i (kPa)	b	e_r	q/p'	b
R-5	0.690	200	0.5	0.690	0.69	0.5
R-8	0.689	200	0.5	0.689	0.87	0.5
R-7	0.681	200	0.5	0.681	1.04	0.5
R-6	0.562	200	0.5	0.562	0.98	0.5
R-1	0.565	200	0.5	0.565	1.02	0.5
R-4	0.560	200	0.5	0.560	1.10	0.5
R-9	0.564	200	0	0.564	0.84	0
R-10	0.560	200	0	0.560	0.98	0

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης/αρχή ακτινικής φόρτισης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,
 α , διεύθυνση του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , ως προς το κατακόρυφο επίπεδο,
 b , παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2),
 e_r , δείκτης πόρων στο τέλος της ακτινικής φόρτισης/ αρχή της περιστροφής,
 q/p' λόγος τάσεων σταθερός κατά την περιστροφή των αξόνων,
 N_f Αριθμός περιστροφών, *Αστ.=Αστοχία του δοκιμίου

Κεφάλαιο 4 : Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων

4.1 Εισαγωγή

Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας που αφορούν στη μονοτονική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 υποδεικνύουν γενικά μια βελτιωμένη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους σε σχέση με το φυσικό. Ωστόσο, επειδή η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης έχει εισαχθεί πρόσφατα (Gallagher, Pamuk, et al., 2007) ο αριθμός των σχετικών μελετών είναι ακόμη μικρός και τα αποτελέσματα είναι αποσπασματικά καθώς αναφέρονται σε διαφορετικά υλικά και τεχνικές εφαρμογής. Για την εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στην πράξη χρειάζεται αρχικά να μελετηθεί ενδελεχώς η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική απόκριση των εδαφών μέσω εργαστηριακών δοκιμών, ώστε να καθοριστεί η καταστατική συμπεριφορά σταθεροποιημένων άμμων υπό μονοτονική φόρτιση.

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται μια εκτενής διερεύνηση της μονοτονικής συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία ρευστοποιήσιμων άμμων εφαρμόζοντας ένα ευρύ φάσμα συνθηκών φόρτισης, ώστε να παραχθεί μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για τις διάφορες εντατικές καταστάσεις σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο που εντοπίζονται στις γεωτεχνικές εφαρμογές.

Αρχικά, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης (συμπιεσομέτρου) σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM[®] άμμο σε ένα εύρος πυκνοτήτων ώστε να εξεταστεί η επίδραση κολλοειδούς πυριτίας στη συμπίεστικότητα του εδάφους υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης σε δοκίμια άμμου πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία. Μελετάται η επίδραση της πυκνότητας και της αρχικής ενεργού τάσης στη διαστολικότητα, στη μέγιστη διατμητική αντοχή και στην παραμένουσα αντοχή της άμμου με και χωρίς κολλοειδή πυριτία. Στις δοκιμές του συμπιεσομέτρου και της απευθείας διάτμησης μελετήθηκαν δύο άμμοι (M31 και Longstone) ώστε να διευκρινισθεί εάν το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε ένα ευρύ φάσμα αρχικών ενεργών τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης. Διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο ελαστικότητας, στην κατάσταση αλλαγής φάσης

(phase transformation) στη μέγιστη διατμητική αντοχή, στη διαστολικότητα και στις παραμέτρους κρίσιμης κατάστασης (critical state).

Τέλος, για να διερευνηθεί η επίδραση της ανισοτροπίας στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου εκτελέστηκαν δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους.

4.2 Αποτελέσματα Δοκιμών Μονοδιάστατης Στερεοποίησης

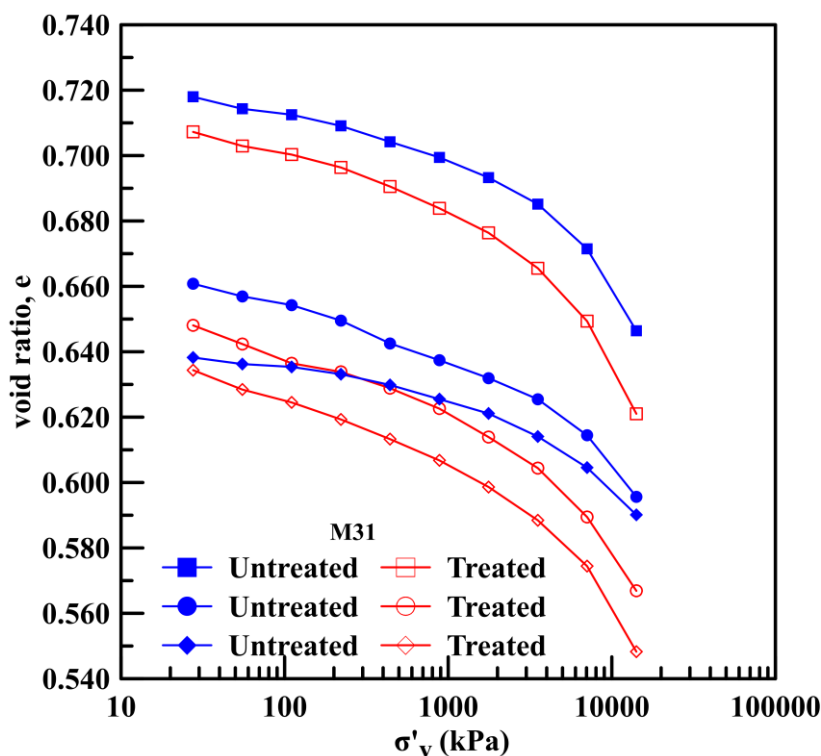
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 και Longstone που εκτελέστηκαν στη συσκευή συμπιεσομέτρου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Η παρασκευή των δοκιμών άμμου γίνεται απευθείας στην κυψέλη του συμπιεσομέτρου με εναπόθεση της ξηρής άμμου στο δαχτυλίδι του συμπιεσομέτρου ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάζονται με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας CS=10% κ.β. στο εσωτερικό του δαχτυλιδιού και αφού παρέλθει ο χρόνος ωρίμανσης (50hr) μεταφέρονται στη συσκευή. Η κυψέλη πληρώνεται με απιονισμένο νερό και τοποθετούνται πορόλιθοι στο πάνω και στο κάτω μέρος του δοκιμίου ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη εισροή και η εκροή νερού. Η συσκευή και η πειραματική διαδικασία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

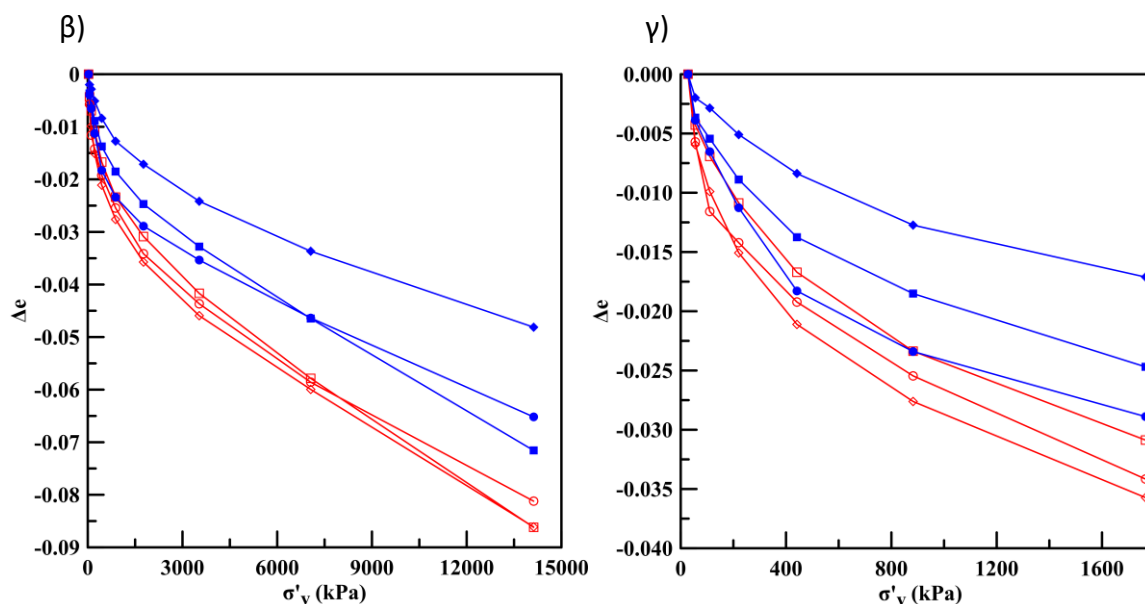
4.2.1 Άμμος M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία

Τα δοκίμια φυσικής άμμου M31 παρασκευάστηκαν σε ένα εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e = 0.639-0.718$ και φορτίστηκαν με κατακόρυφη ενεργό τάση έως $\sigma'_v = 14 \text{ MPa}$. Το κάθε βήμα φόρτισης διαρκεί 1 ώρα. Τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 παρασκευάστηκαν σε ένα εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e = 0.634-0.707$ και φορτίστηκαν με κατακόρυφη ενεργό τάση έως $\sigma'_v = 14 \text{ MPa}$. Το κάθε βήμα φόρτισης διαρκεί 24 ώρες ώστε να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση. Για ύψος σταθεροποιημένου δοκιμίου $h = 17.60 \text{ mm}$ υπολογίστηκε ότι το 90% της στερεοποίησης ολοκληρώνεται σε 1 ώρα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπιεσομέτρου για τη φυσική (μπλε χρώμα, χρωματιστά σύμβολα) άμμο M31 και για τη σταθεροποιημένη άμμο M31 (σύμβολα με κόκκινο περίγραμμα) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.1**, σε όρους δείκτη πόρων (e) -κατακόρυφης ενεργού τάσης (σ'_v) σε λογαριθμική κλίμακα (**Σχήμα 4.1(α)**), σε όρους μεταβολής δείκτη πόρων (Δe) -κατακόρυφης ενεργού τάσης (σ'_v) (**Σχήμα 4.1(β)**) ενώ το (**Σχήμα 4.1(γ)**) εστιάζεται στα πρώτα στάδια της φόρτισης. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση από τη φυσική για όλο το εύρος των πυκνοτήτων από την αρχή της φόρτισης, με αποτέλεσμα όταν η σταθεροποιημένη άμμος συμπιέζεται υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στο συμπιεσομέτρο, η καμπύλη

στερεοποίησης να καμπυλώνει και να απομακρύνεται από την καμπύλη συμπίεσης της φυσικής άμμου με την αύξηση της ορθής τάσης, γεγονός που υποδεικνύει αποδόμηση της αρχικής δομής της (structural breakdown). Όπως επισημαίνεται και στη βιβλιογραφία το δίκτυο της πυριτίας μπορεί να τραυματιστεί εύκολα και η γέλη να μετατραπεί σε υγρή φάση κατά τη φόρτιση. Φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης η γέλη τραυματίζεται απελευθερώνοντας νερό και το σκελετικό δίκτυο της σταθεροποιημένης άμμου αλλάζει υποχωρώντας στην πλέον πυκνή κατάσταση σε μεγάλες τάσεις. Αντίθετα, η φυσική άμμος δε φτάνει σε τόσο πυκνή κατάσταση ακόμη και για ορθή τάση $\sigma'_v=14000\text{kPa}$, τόσο για αρχικά χαλαρή όσο και για πυκνότερη δομή. Τα Σχήματα 4.1(β) και (γ) δείχνουν τη μεταβολή του δείκτη πόρων, από την αρχική τιμή η οποία είναι παρόμοια για σταθεροποιημένα και μη δοκίμια, κατά τη διάρκεια της συμπίεσης που είναι μεγαλύτερη για τα σταθεροποιημένα δοκίμια καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης περιλαμβανομένων και των αρχικών σταδίων φόρτισης (Σχήμα 4.1(γ)).

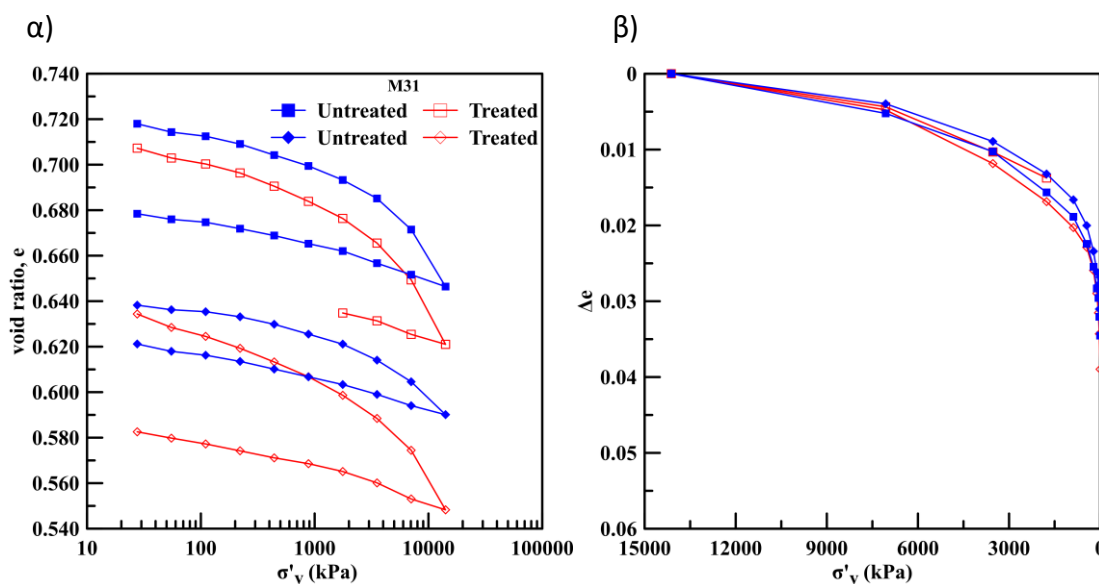
α)





Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσμού για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου M31

Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποφόρτισης για τα πλέον χαλαρά και τα πλέον πυκνά φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31. Στο **Σχήμα 4.2(α)** παρουσιάζονται οι καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης και παρατηρούμε ότι οι καμπύλες αποφόρτισης του σταθεροποιημένου εδάφους έχουν πιο μικρή κλίση από τις αντίστοιχες καμπύλες φόρτισης και μάλιστα φαίνεται να προσεγγίζουν αυτές της φυσικής άμμου. Συγκεκριμένα στο **Σχήμα 4.2(β)** όπου υπολογίζονται οι διαφορές του δείκτη πόρων μόνο για τον κλάδο της αποφόρτισης είναι εμφανές ότι οι ογκομετρικές παραμορφώσεις σταθεροποιημένου και φυσικού εδάφους είναι ταυτόσημες, δηλαδή, οι ελαστικές παραμορφώσεις του εδάφους είναι κοινές. Συμπερασματικά, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτίδα φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη ενδοσιμότητα κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση διευκολύνοντας την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων (πλαστικές παραμορφώσεις), ενώ κατά την αποφόρτιση δε φαίνεται να επηρεάζει την ανάπτυξη των οιονεί ελαστικών παραμορφώσεων.



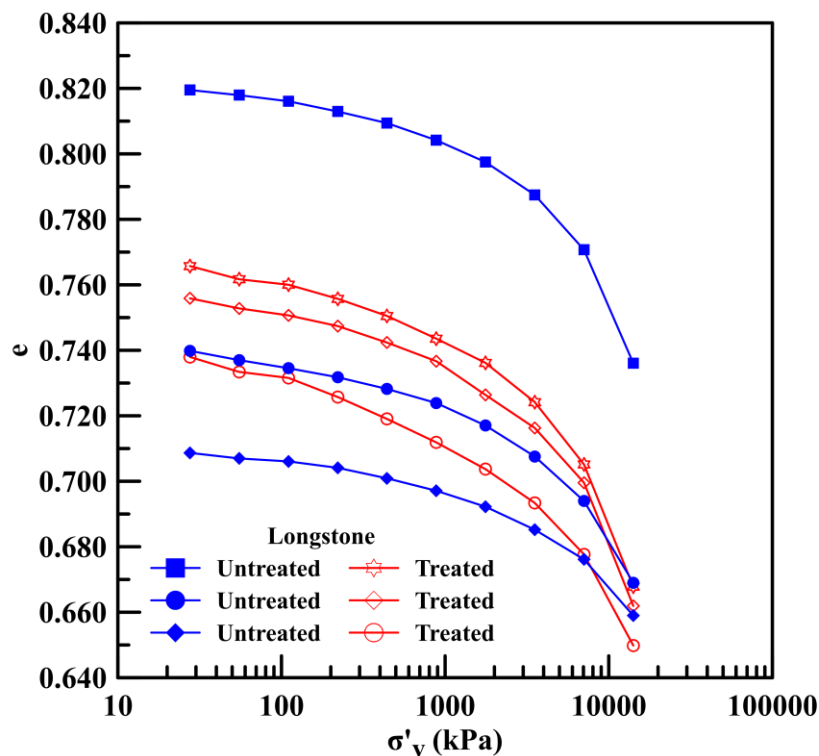
Σχήμα 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεστρού για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου M31 (καμπύλες αποφόρτισης)

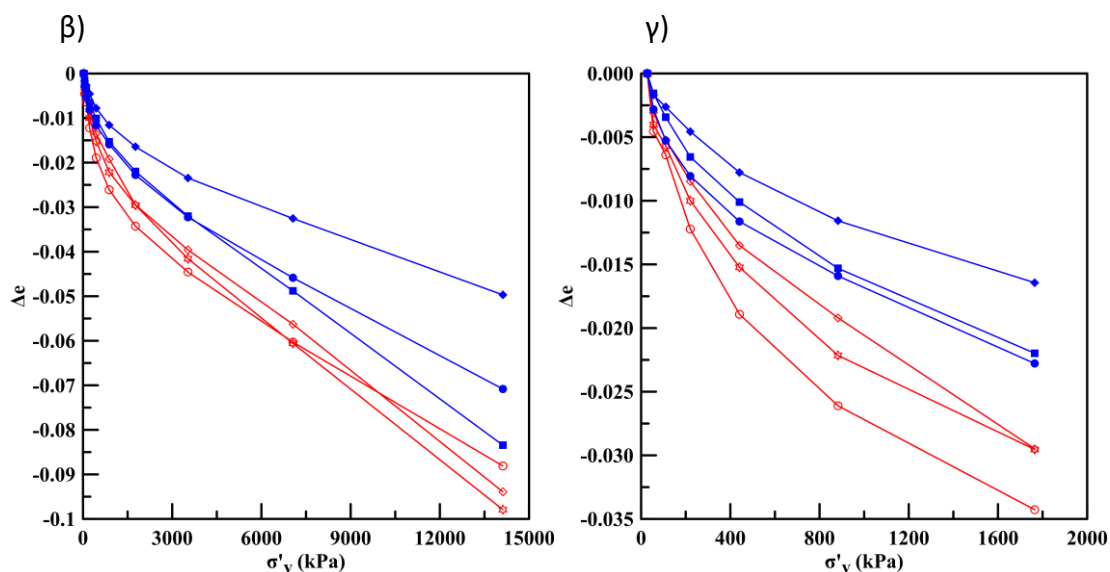
4.2.2 Άμμος Longstone πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία

Τα δοκίμια φυσικής άμμου Longstone παρασκευάστηκαν σε ένα εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e=0.708-0.820$ και φορτίστηκαν με κατακόρυφη ενεργό τάση έως $\sigma'_v=14\text{MPa}$. Το κάθε βήμα φόρτισης διαρκεί 1 ώρα. Τα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου παρασκευάστηκαν σε ένα εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e=0.738-0.766$ και φορτίστηκαν με κατακόρυφη ενεργό τάση έως $\sigma'_v=14\text{MPa}$. Το κάθε βήμα φόρτισης διαρκεί 24 ώρες ώστε να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση καθώς η υδραυλική διαπερατότητα της σταθεροποιημένης άμμου είναι μικρότερη από αυτή της φυσικής άμμου (Antigoni Vranna et al., 2020; Ciardi et al., 2020). Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπίεστρού για τη φυσική (μπλε χρώμα, καμπύλη και σύμβολα) άμμο Longstone και για τη σταθεροποιημένη άμμο Longstone (κόκκινο χρώμα καμπύλη και περίγραμμα συμβόλων) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.3** σε όρους δείκτη πόρων (e) - κατακόρυφης ενεργού τάσης (σ'_v) σε λογαριθμική άξονα (**Σχήμα 4.3** (α)), σε όρους διαφοράς δείκτη πόρων (Δe) - κατακόρυφης ενεργού τάσης (σ'_v) (**Σχήμα 4.3** (β)) ενώ το **Σχήμα 4.3** (γ) εστιάζει στα πρώτα στάδια της φόρτισης. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος Longstone αναπτύσσει μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση από τη φυσική για όλο το εύρος των πυκνοτήτων από την αρχή της φόρτισης. Συμπερασματικά, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM περιεκτικότητας 10% κ.β. οδηγεί σε μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις υπό μονοδιάστατη συμπίεση ανεξάρτητα από το σχήμα των κόκκων της άμμου (άμμος M31 (στρογγυλεμένοι κόκκοι), άμμος Longstone (γωνιώδεις κόκκοι)).

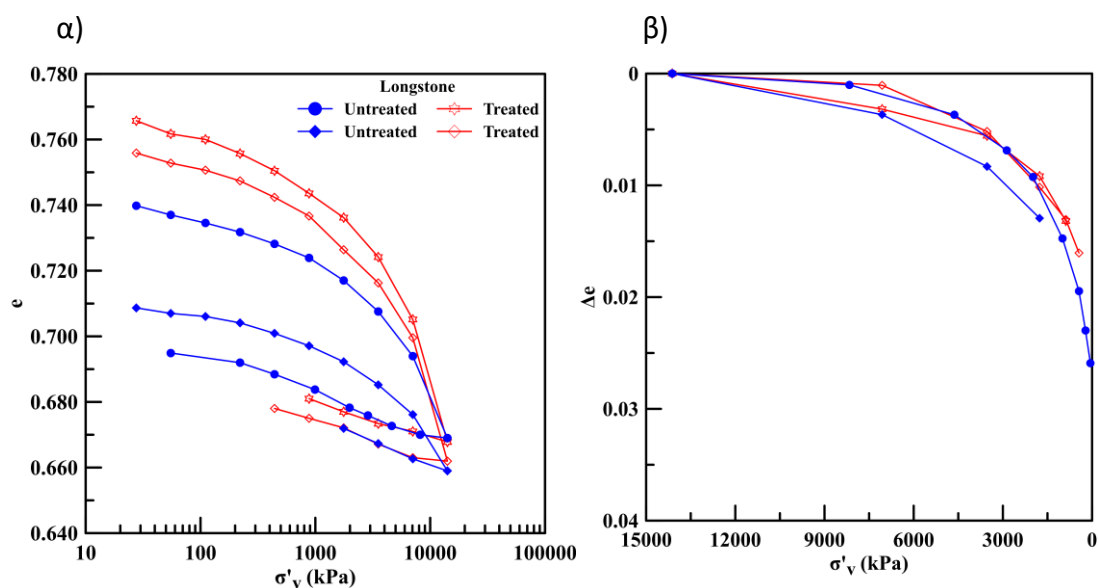
Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα αποφόρτισης υπό μονοδιάστατη συμπίεση για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone. Στο **Σχήμα 4.4(α)** παρουσιάζονται οι καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης και παρατηρούμε ότι οι καμπύλες αποφόρτισης του σταθεροποιημένου εδάφους έχουν τυπικά πολύ μικρότερη κλίση από τις αντίστοιχες καμπύλες φόρτισης και σε σχέση με τη φυσική άμμο φαίνεται να είναι ταυτόσημες με τις αντίστοιχες καμπύλες αποφόρτισης. Συγκριμένα στο **Σχήμα 4.4 (β)** όπου υπολογίζονται οι διαφορές του δείκτη πόρων μόνο για τον κλάδο της αποφόρτισης είναι εμφανές ότι οι ογκομετρικές παραμορφώσεις σταθεροποιημένου και φυσικού εδάφους είναι ταυτόσημες, δηλαδή, οι ελαστικές παραμορφώσεις του εδάφους είναι κοινές και μάλιστα με την πυκνότερη άμμο που είναι συγκρίσιμη με την πυκνότητα της σταθεροποιημένης άμμου. Συμπερασματικά, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη ενδοσιμότητα κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση διευκολύνοντας την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων (πλαστικές παραμορφώσεις) και στη γωνιώδη άμμο Longstone, ενώ κατά την αποφόρτιση δε φαίνεται να επηρεάζει τις οιονεί ελαστικές παραμορφώσεις.

α)





Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσμού για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου Longstone



Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσμού για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου Longstone (καμπύλες αποφόρτισης)

4.3 Αποτελέσματα Δοκιμών Απευθείας Διάτμησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 και Longstone που εκτελέστηκαν στη απευθείας διάτμησης του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Η παρασκευή των δοκιμών άμμου γίνεται απευθείας στην κυψέλη της συσκευής με εναπόθεση της ξηρής άμμου στο δαχτυλίδι ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάζονται με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας CS=10% κ.β. στο εσωτερικό του δαχτυλιδιού και αφού παρέλθει ο χρόνος ωρίμανσης (50hr) μεταφέρονται στη συσκευή. Η κυψέλη πληρώνεται με απιονισμένο νερό και τοποθετούνται πορόλιθοι στο πάνω και στο κάτω μέρος του δοκιμίου ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη εισροή και η εκροή νερού. Η συσκευή και η πειραματική διαδικασία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε χαλαρά και πυκνά δοκίμια πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους, σε αρχικές ενεργές τάσεις, $\sigma'_{vo}=53-555$ kPa ώστε να υπολογιστούν οι περιβάλλουσες αστοχίας Mohr-Coulomb.

4.3.1 Άμμος M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία

Τα δοκίμια φυσικής άμμου M31 στερεοποιήθηκαν υπό αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{vo}=125-555$ kPa, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i=0.528-0.696$. Η στερεοποίηση διαρκεί 1 ώρα και η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε 0,5mm/min. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν υπό αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση από $\sigma'_{vo}=55-555$ kPa, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i=0.612-0.681$. Η στερεοποίηση διαρκεί 24 ώρες και η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε 0,005mm/min εξαιτίας της μικρότερης υδραυλικής διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.1**.

Ενδεικτικά αποτελέσματα από τις δοκιμές απευθείας διάτμησης για τα δοκίμια μέσης πυκνότητας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.5** για τη φυσική (μπλε χρώμα καμπύλη και σύμβολα) άμμο M31 και για τη σταθεροποιημένη άμμο M31 (κόκκινο χρώμα καμπύλη και περίγραμμα συμβόλων) σε όρους λόγου τάσεων, τ/σ'_v , (τ : διατμητική τάση, σ'_v : κατακόρυφη ενεργός τάση) – οριζόντιας μετατόπισης (**Σχήμα 4.5(α)**) και σε όρους κατακόρυφης-οριζόντιας μετατόπισης (**Σχήμα 4.5(β)**). Επιπρόσθετα, με διακεκομμένη μπλε γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας πυκνής άμμου M31 για σύγκριση. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος M31 μέσης πυκνότητας εμφανίζει αυξημένη διατμητική αντοχή σε σχέση με την άμμο M31, αντίστοιχης ενεργού τάσης και πυκνότητας, που μειώνεται με την αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης, προσεγγίζοντας την τιμή της αντοχής της άμμου στην κρίσιμη κατάσταση. Η μέγιστη τιμή του λόγου

τάσεων στο σταθεροποιημένο έδαφος φαίνεται να επηρεάζεται από την αρχική ενεργό τάση καθώς μειώνεται αισθητά με την αύξηση της ενεργού τάσης. Αντίθετα, η μέγιστη αντοχή της άμμου M31 ($\tau/\sigma'_{v, max}$) δεν φαίνεται να επηρεάζεται έντονα από την αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης στο εύρος $\sigma'_{vo} = 125 - 555 \text{ kPa}$. Επισημαίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος μέσης πυκνότητας με αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{vo} = 125 \text{ kPa}$, εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή ακόμη και από την πυκνή άμμο M31 στην ίδια κατακόρυφη τάση (διακεκομμένη γραμμή), ενώ στην κρίσιμη κατάσταση καταλήγουν στον ίδιο λόγο τάσεων (**Σχήμα 4.5(α)**).

Ενώ η σταθεροποιημένη άμμος M31 εμφανίζει αρχικά συστολή παρόμοια με αυτή της άμμου, στη συνέχεια αναπτύσσει πολύ έντονη διαστολικότητα με μέγιστο ρυθμό ταυτόχρονα με τη μέγιστη αντοχή. Η διαστολή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η κρίσιμη κατάσταση οδηγώντας σε τιμές τελικής κατακόρυφης μετατόπισης έως και 4 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άμμου. Επιπρόσθετα, η πυκνή άμμος εμφανίζει αρχικά μικρότερη συστολή από τη χαλαρότερη σταθεροποιημένη άμμο, ίδιας αρχικής ενεργού τάσης ($\sigma'_{vo} = 125 \text{ kPa}$), αλλά αναπτύσσει μικρότερο ρυθμό διαστολικότητας και μικρότερη τελική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης. Επισημαίνεται ότι, ενώ η πυκνή άμμος αναπτύσσει τελική τιμή μετατόπισης περίπου ίση με την τιμή της μέσης διαμέτρου της άμμου M31 ($D_{50} = 0,3 \text{ mm}$) η σταθεροποιημένη άμμος μέσης πυκνότητας εμφανίζει σχεδόν τη διπλάσια τιμή υποδεικνύοντας τον διαφορετικό κινηματικό μηχανισμό του σκελετικού δικτύου του σταθεροποιημένου εδάφους (**Σχήμα 4.5(β)**).

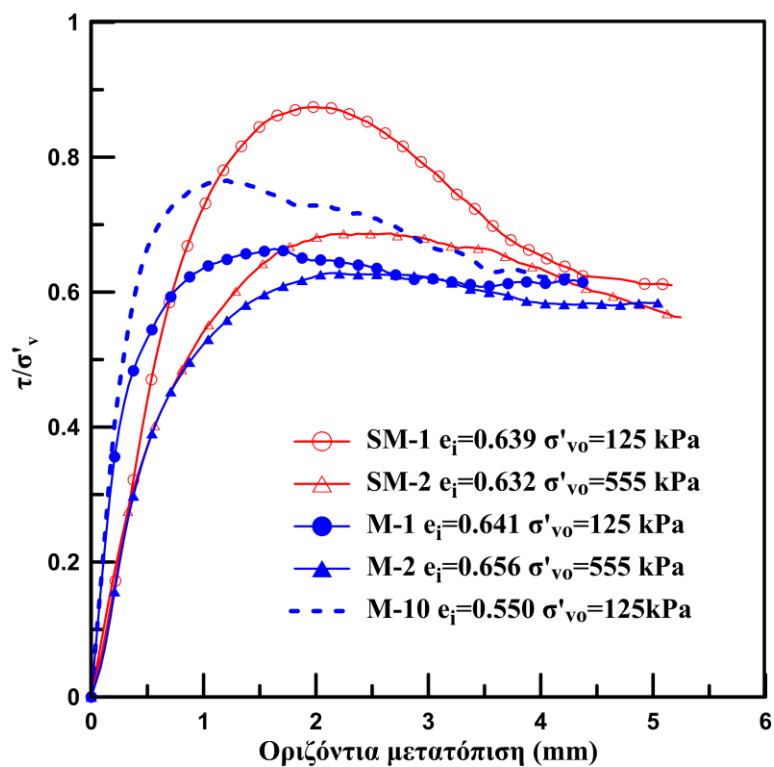
Οι περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για τη σταθεροποιημένη και τη φυσική άμμο M31 μέσης πυκνότητας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.6** στην κατάσταση μέγιστης αντοχής (**Σχήμα 4.6(α)**) και στην κρίσιμη κατάσταση (**Σχήμα 4.6(β)**). Η σταθεροποιημένη άμμος M31 εμφανίζει μία αμελητέα συνοχή, ενώ η μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής, ϕ_p , εξαρτάται από την αρχική ενεργό τάση, αφού $\phi_p = 41,3^\circ$ για $\sigma'_{vo} < 125 \text{ kPa}$ και $\phi_p = 35^\circ$ για υψηλότερες αρχικές ενεργές τάσεις. Η άμμος M31 εμφανίζει μικρότερη και σταθερή γωνία διατμητικής αντοχής $\phi_p = 32,5^\circ$ για εύρος $\sigma'_{vo} = 125 - 555 \text{ kPa}$. Τα αποτελέσματα της σταθεροποιημένης άμμου περιγράφονται καλύτερα από μία συνάρτηση δύναμης: $\tau = 2,07 \cdot \sigma'_{v, 0,83}$, με $R^2 = 0,998$ για ενεργό τάση έως $\sigma'_{v, 600 \text{ kPa}}$. Παρατηρείται ότι η περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου είναι πάνω από αυτή της φυσικής άμμου M31, αλλά τείνει να την πλησιάσει με την αύξηση της ενεργού τάσης. Τέλος, επισημαίνεται ότι στην κρίσιμη κατάσταση τα αποτελέσματα της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου περιγράφονται από μια κοινή ευθεία με γωνία $\phi_u = 30,5^\circ$ υποδεικνύοντας την έλλειψη δεσμών σιμέντωσης.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31

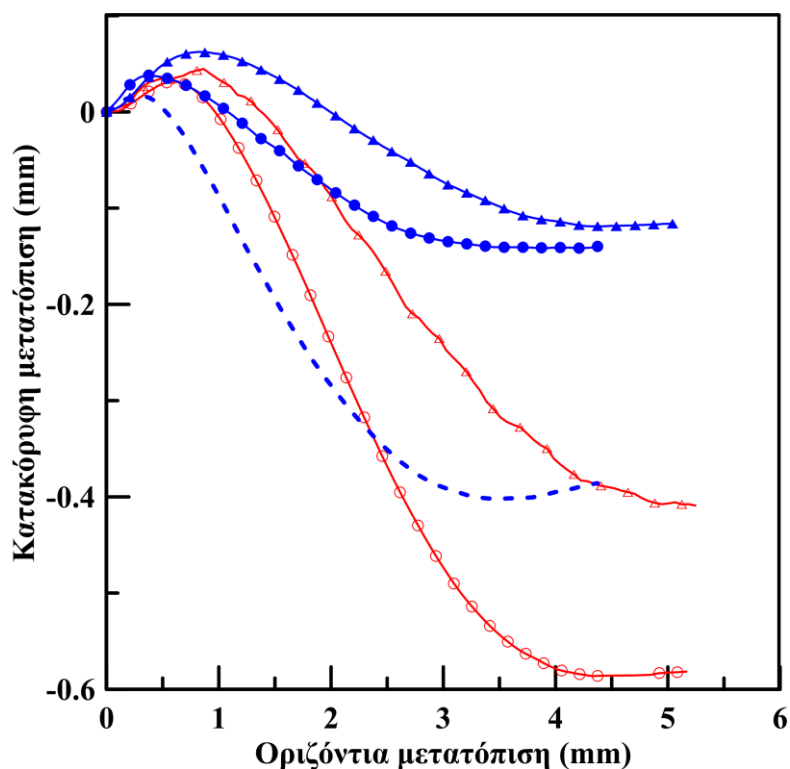
Πείραμα	Δείκτης πόρων, e_i	Κατακόρυφη ενεργός τάση, σ'_{vo} (kPa)	Σταθεροποίηση
M-1	0.641	125	-
M-2	0.656	555	-
M-3	0.696	125	-
M-4	0.535	125	-
M-5	0.651	232	-
M-6	0.661	232	-
M-7	0.528	232	-
M-8	0.626	232	-
M-9	0.658	340	-
M-10	0.550	125	-
M-11	0.554	555	-
SM-1	0.639	125	T
SM-2	0.632	555	T
SM-3	0.637	196	T
SM-4	0.647	232	T
SM-5	0.612	232	T
SM-6	0.643	268	T
SM-7	0.646	340	T
SM-8	0.681	340	T
SM-9	0.655	53	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 σ'_{vo} , κατακόρυφη ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

(α)

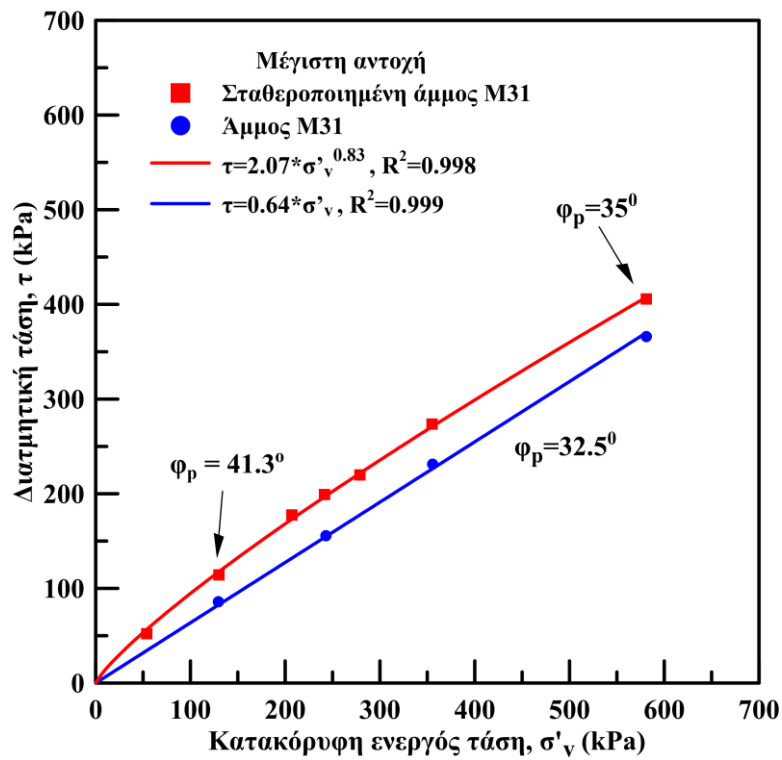


(β)

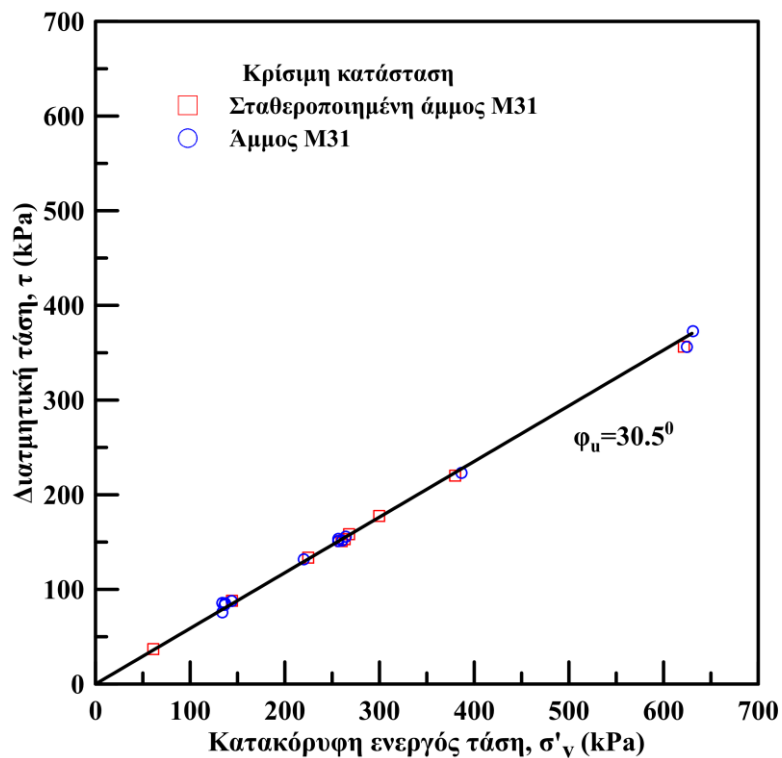


Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο M31: (α) διατμητική τάση - οριζόντια μετατόπιση και (β) κατακόρυφη μετατόπιση - οριζόντια μετατόπιση

(α)



(β)



Σχήμα 4.6: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31: (α) στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και (β) στην κρίσιμη κατάσταση

4.3.2 Άμμος Longstone πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία

Τα δοκίμια φυσικής άμμου Longstone στερεοποιήθηκαν υπό αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{vo} = 53 - 555 \text{ kPa}$, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i = 0.681 - 0.765$. Η στερεοποίηση διαρκεί 1 ώρα και η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε $0,5 \text{ mm/min}$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone στερεοποιήθηκαν υπό αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση από $\sigma'_{vo} = 53 - 555 \text{ kPa}$, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i = 0.654 - 0.766$. Η στερεοποίηση διαρκεί 24 ώρες και η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε $0,005 \text{ mm/min}$ εξαιτίας της μικρότερης υδραυλικής διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.2**.

Ενδεικτικά αποτελέσματα από τις δοκιμές απευθείας διάτμησης για τα δοκίμια μέσης πυκνότητας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.7** για τη φυσική (μπλε χρώμα καμπύλες και σύμβολα) άμμο Longstone και για τη σταθεροποιημένη άμμο Longstone (κόκκινο χρώμα καμπύλες και περίγραμμα συμβόλων) σε όρους λόγου τάσεων, τ/σ'_v , (τ : διατμητική τάση, σ'_v : κατακόρυφη ενεργός τάση) – οριζόντιας μετατόπισης (**Σχήμα 4.7(α)**) και σε όρους κατακόρυφης-οριζόντιας μετατόπισης (**Σχήμα 4.7(β)**). Επιπρόσθετα, με διακεκομμένη μπλε γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας πυκνής άμμου Longstone για σύγκριση. Παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη γωνιώδης άμμος Longstone μέσης πυκνότητας εμφανίζει αυξημένη διατμητική αντοχή σε σχέση με την φυσική άμμο, αντίστοιχης ενεργού τάσης και πυκνότητας, που μειώνεται με την αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης, προσεγγίζοντας την τιμή της άμμου στην κρίσιμη κατάσταση. Η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων στο σταθεροποιημένο έδαφος φαίνεται να επηρεάζεται από την αρχική ενεργό τάση καθώς μειώνεται αισθητά με την αύξηση της ενεργού τάσης. Αντίθετα, η μέγιστη αντοχή της άμμου Longstone ($\tau/\sigma'_{v, \max}$) δε φαίνεται να επηρεάζεται από την αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης στο εύρος $\sigma'_{vo} = 340 - 555 \text{ kPa}$. Επισημαίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος μέσης πυκνότητας με αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{vo} = 340 \text{ kPa}$, εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή ακόμη και από την πυκνή άμμο Longstone (διακεκομμένη γραμμή), ενώ στην κρίσιμη κατάσταση καταλήγουν στον ίδιο λόγο τάσεων (**Σχήμα 4.7(α)**).

Ενώ η σταθεροποιημένη άμμος Longstone εμφανίζει αρχικά συστολή παρόμοια με αυτή της άμμου, στη συνέχεια αναπτύσσει πολύ έντονη διαστολικότητα ταυτόχρονα με τη μέγιστη αντοχή. Η διαστολή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η κρίσιμη κατάσταση οδηγώντας σε τιμές τελικής κατακόρυφης μετατόπισης έως και 3 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άμμου. Επιπρόσθετα, η πυκνή άμμος εμφανίζει αρχικά μεγαλύτερη συστολή από τη χαλαρότερη σταθεροποιημένη άμμο, ίδιας αρχικής ενεργού τάσης ($\sigma'_{vo} = 340 \text{ kPa}$), αλλά αναπτύσσει μικρότερο ρυθμό διαστολικότητας και μικρότερη τελική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης. Επισημαίνεται ότι, ενώ η πυκνή άμμος αναπτύσσει τελική τιμή μετατόπισης περίπου όσο η τιμή της μέσης διαμέτρου της άμμου Longstone ($D_{50} = 0,15 \text{ mm}$), η σταθεροποιημένη άμμος μέσης πυκνότητας εμφανίζει διπλάσια τιμή,

υποδεικνύοντας το διαφορετικό κινηματικό μηχανισμό του σκελετικού δικτύου του σταθεροποιημένου εδάφους (**Σχήμα 4.7β**)).

Οι περιβάλλουσες Mohr-Coulomb για τη σταθεροποιημένη και τη φυσική άμμο Longstone μέσης πυκνότητας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.8** στην κατάσταση μέγιστης αντοχής (**Σχήμα 4.8(α)**) και στην κρίσιμη κατάσταση (**Σχήμα 4.8(β)**). Η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει μία αμελητέα συνοχή, ενώ η μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής, ϕ_p , εξαρτάται από την αρχική ενεργό τάση, αφού $\phi_p=39^\circ$ για $\sigma'_{vo}<125$ kPa και $\phi_p=35^\circ$ για υψηλότερες αρχικές ενεργές τάσεις. Η άμμος Longstone εμφανίζει μικρότερη και σταθερή γωνία διατμητικής αντοχής $\phi_p=31^\circ$ για εύρος $\sigma'_{vo}= 55-555$ kPa. Τα αποτελέσματα της σταθεροποιημένης άμμου περιγράφονται από μία συνάρτηση δύναμης: $\tau=1,33 * \sigma'_v^{0,895}$, με $R^2 \sim 1$ για ενεργό τάση έως $\sigma'_v=600$ kPa. Παρατηρείται ότι η περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου είναι πάνω από αυτή της φυσικής άμμου, αλλά τείνει να την πλησιάσει με την αύξηση της ενεργού τάσης. Στην κρίσιμη κατάσταση τα αποτελέσματα της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου περιγράφονται από μια κοινή ευθεία με γωνία $\phi_u=31^\circ$ υποδεικνύοντας την έλλειψη δεσμών σιμεντώσης.

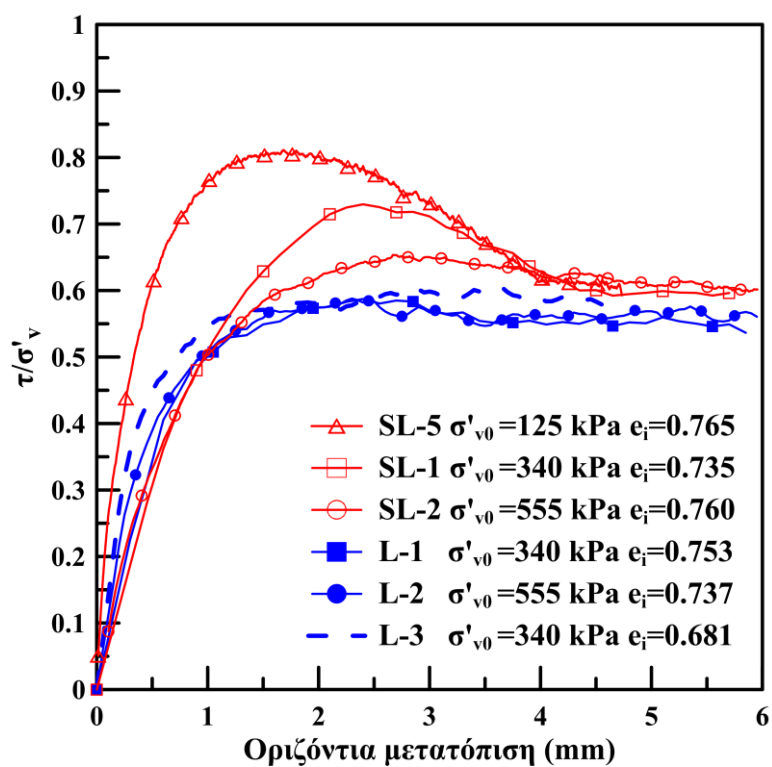
Τέλος, επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM περιεκτικότητας 10% κ.β. και στη φυσική άμμο Longstone (γωνιώδεις κόκκοι) συμφωνούν με τα αντίστοιχα για την άμμο M31 (στρογγυλεμένοι κόκκοι), υποδεικνύοντας ότι το γωνιώδες σχήμα δεν επηρεάζει την επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών απευθείας διάτμησης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου Longstone

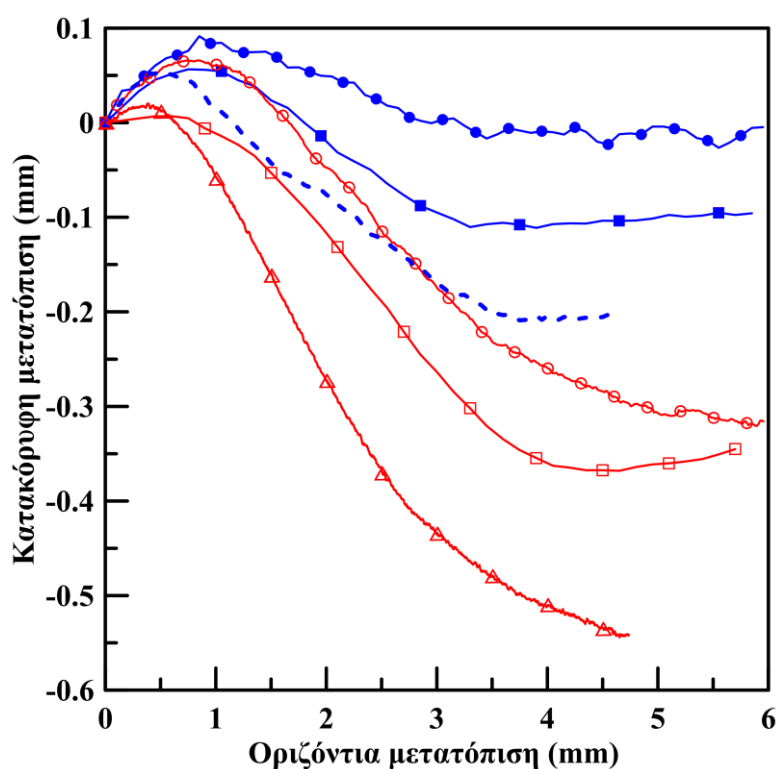
Πείραμα	Δείκτης πόρων, e_i	Κατακόρυφη ενεργός τάση, σ'_{vo} (kPa)	Σταθεροποίηση
L-1	0.753	340	-
L-2	0.737	555	-
L-3	0.681	340	-
L-4	0.765	53	-
L-5	0.760	125	-
L-6	0.759	232	-
SL-1	0.735	340	T
SL-2	0.760	555	T
SL-3	0.654	340	T
SL-4	0.766	53	T
SL-5	0.765	125	T
SL-6	0.757	232	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 σ'_{vo} , κατακόρυφη ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

(α)

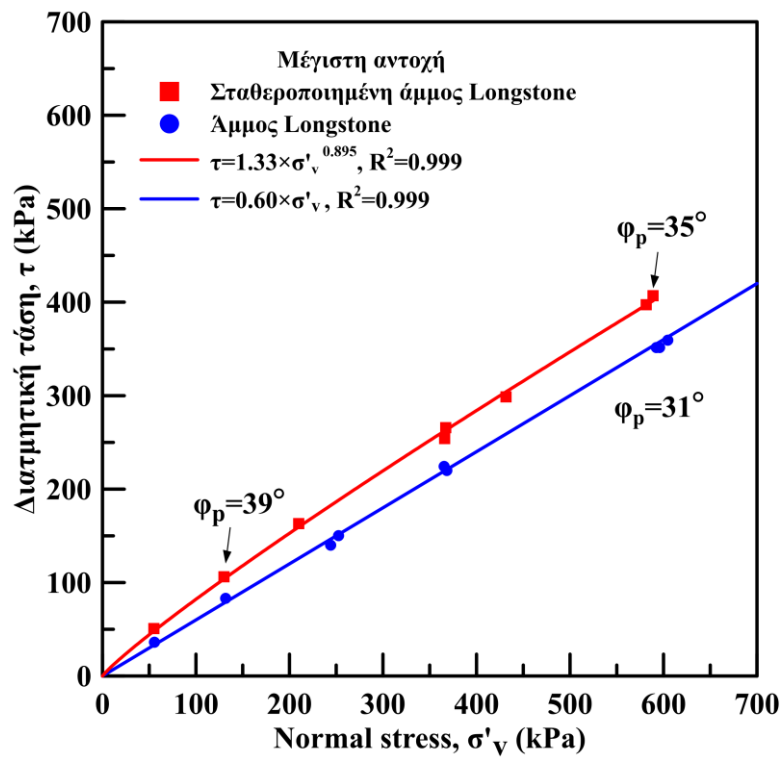


(β)

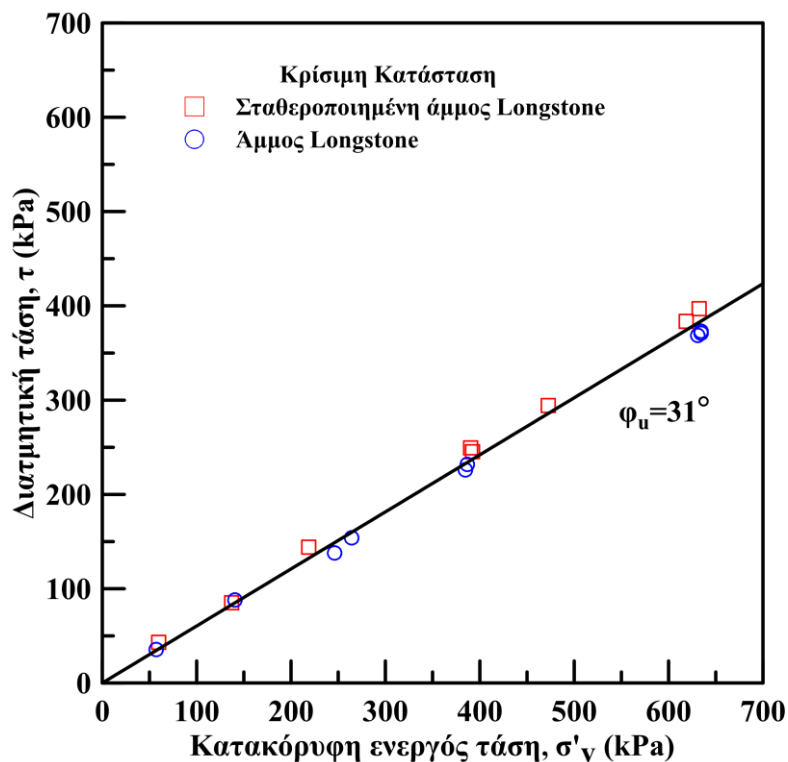


Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας διάτμησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο Longstone: (α) διατμητική τάση-οριζόντια μετατόπιση και (β) κατακόρυφη μετατόπιση-οριζόντια μετατόπιση

(α)



(β)



Σχήμα 4.8: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Longstone: (α) Στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και (β) στην κρίσιμη κατάσταση

4.4 Αποτελέσματα Δοκιμών Τριαξονικής Θλίψης στην Άμμο M31 Πριν και Μετά τη σταθεροποίησή της με Κολλοειδή Πυριτία

Για να διερευνηθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας στη μονοτονική συμπεριφορά των άμμων μία σειρά από δοκιμές τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης. Μελετήθηκε η επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο ελαστικότητας, στη διαστολικότητα, στη μέγιστη αντοχή και στις παραμέτρους κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31 σε ένα μεγάλο εύρος αρχικών ενεργών τάσεων $p'_i=100-2000\text{kPa}$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρής άμμου σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας $CS=10\%$. Στη συνέχεια, τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του άτονου εδαφικού σκελετού. Μετά το πέρας του χρόνου ωρίμανσης (50hr), τα δοκίμια μεταφέρονται στην τριαξονική συσκευή. Επισημαίνεται ότι όλες οι τριαξονικές δοκιμές στην φυσική και σταθεροποιημένη άμμο, εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) $u_o=700\text{kPa}$ και μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων ή της εκροής/εισροής του νερού. Οι υψηλές τιμές αντιπίεσης είναι απαραίτητες για να την ακρίβεια των μετρήσεων και για να αποφευχθεί η σπηλαίωση (cavitation) των σταθεροποιημένων δοκιμών στις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Η παράμετρος Skempton για όλα τα πειράματα μετρήθηκε $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμών.

Για τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή μέσω πιέσεων, η τριαξονική συσκευή διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975) και για τις δοκιμές υψηλών ενεργών τάσεων, η τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων (high pressure triaxial apparatus) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Όλες οι δοκιμές τριαξονικής θλίψης που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης (strain control tests). Οι συσκευές και η πειραματική διαδικασία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

4.4.1 Επίδραση του ρυθμού στερεοποίησης

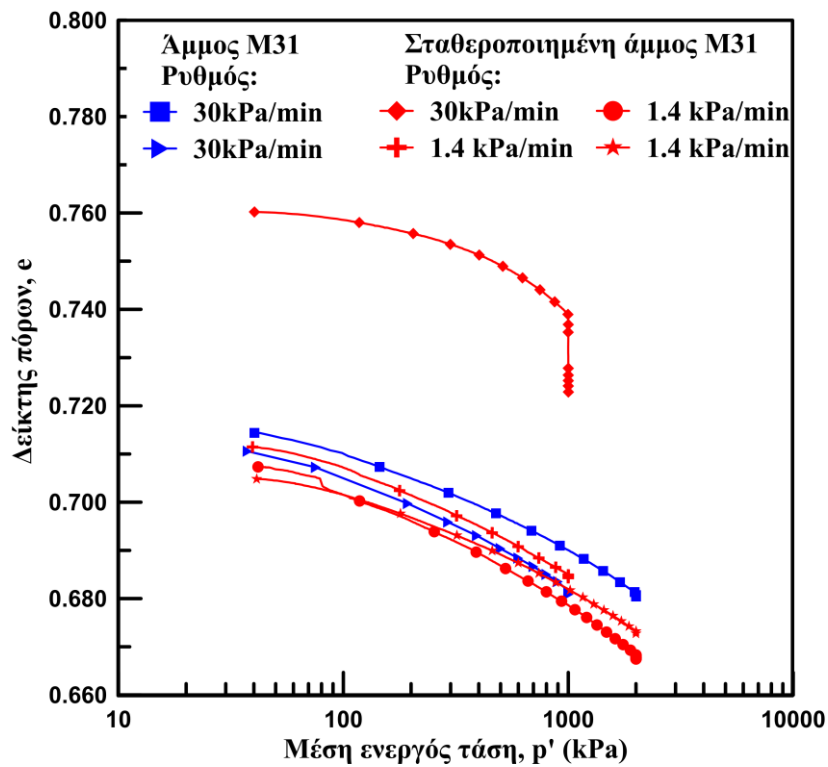
Για να μελετηθεί η επίδραση του ρυθμού στερεοποίησης, δηλαδή η αύξηση της ενεργού τάσης με το χρόνο (kPa/min), στην απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμών, εκτελέστηκαν δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 με διαφορετικές ταχύτητες στερεοποίησης και στη συνέχεια όλα τα δοκίμια αφέθηκαν σε ηρεμία για 24 ώρες. Τα αποτελέσματα της ισότροπης στερεοποίησης της άμμου M31 (μπλε καμπύλες) με ρυθμό αύξησης της ενεργού τάσης $30\text{kPa}/\text{min}$ και τα αποτελέσματα της ισότροπης στερεοποίησης της σταθεροποιημένης άμμου M31 (κόκκινες καμπύλες) με ρυθμό αύξησης της ενεργού τάσης ίδιο με την άμμο ($30\text{kPa}/\text{min}$) και με πιο αργό ρυθμό ($1,4\text{kPa}/\text{min}$) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.9** σε όρους δείκτη πόρων - μέσης ενεργού τάσης (**Σχήμα 4.9(α)**) και ογκομετρικής παραμόρφωσης - μέσης

ενεργού τάσης (**Σχήμα 4.9(β)**). Ο ρυθμός στερεοποίησης (30kPa/min) των δοκιμών άμμου φαίνεται να είναι κατάλληλος, αφού δεν αναπτύσσονται περεταίρω ογκομετρικές παραμορφώσεις μετά την επιβολή της επιθυμητής ενεργού τάσης και κατά τη διάρκεια του σταδίου ηρεμίας. Ωστόσο, για το σταθεροποιημένο δοκίμιο που στερεοποιήθηκε με ίδιο ρυθμό με την άμμο (30kPa/min), παρατηρούμε ότι ο ρυθμός δεν είναι κατάλληλος. Συγκεκριμένα, η καμπύλη $e-p'$ του σταθεροποιημένου δοκίμιου αρχικά παρουσιάζει μικρότερη κλίση από την αντίστοιχη καμπύλη της άμμου (**Σχήμα 4.9(α)**) και μετά υπό σταθερή μέση ενεργό τάση $p'_i=1000\text{kPa}$ εμφανίζει απότομη μείωση του δείκτη πόρων. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.9(β)** η ταχεία αύξηση της πλευρικής πίεσης στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, οδηγεί αρχικά σε μικρές τιμές ογκομετρικής παραμόρφωσης, ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται συσσωρευμένη ογκομετρική παραμόρφωση υπό σταθερή ενεργό τάση. Αυτή η συμπεριφορά θα μπορούσε συνδεθεί με φαινόμενα ερπυσμού, αλλά στην πραγματικότητα η συσσωρευμένη ογκομετρική παραμόρφωση οφείλεται σε στράγγιση που δεν είχε προλάβει να ολοκληρωθεί. Προς επίρρωση αυτού του συμπεράσματος, εκτελέστηκαν δοκιμές ισότροπης στερεοποίησης με αργό ρυθμό, 1,4 kPa/min, σε σταθεροποιημένα δοκίμια. Παρατηρούμε ότι η κλίση των καμπυλών $e-p'$ της σταθεροποιημένης άμμου, είναι παρόμοια με αυτή της φυσικής άμμου (**Σχήμα 4.9(α)**) και οι ογκομετρικές παραμορφώσεις των σταθεροποιημένων δοκιμών πρακτικά ταυτίζονται με αυτές των φυσικών δοκιμών (**Σχήμα 4.9(β)**). Επισημαίνεται ότι, κατά την περίοδο της ηρεμίας (24 ώρες), όπου η ενεργός τάση παραμένει σταθερή, τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν εμφανίζουν περεταίρω ογκομετρικές παραμορφώσεις αποδεικνύοντας ότι: (i) η στερεοποίηση έχει ολοκληρωθεί και (ii) ότι η σταθεροποιημένη, όπως και η φυσική άμμος, δεν εμφανίζει ερπυσμό. Τέλος, η μεγαλύτερη τελική ογκομετρική παραμόρφωση του σταθεροποιημένου, με γρήγορο ρυθμό φόρτισης δοκίμιου, σε σχέση με την άμμο, αλλά και με τα σταθεροποιημένα με αργό ρυθμό δοκίμια, ίσως οφείλεται στον πιθανό τραυματισμό των δεσμών εξαιτίας της ταχείας φόρτισης, αλλά και στον μεγαλύτερο αρχικό του δείκτη πόρων.

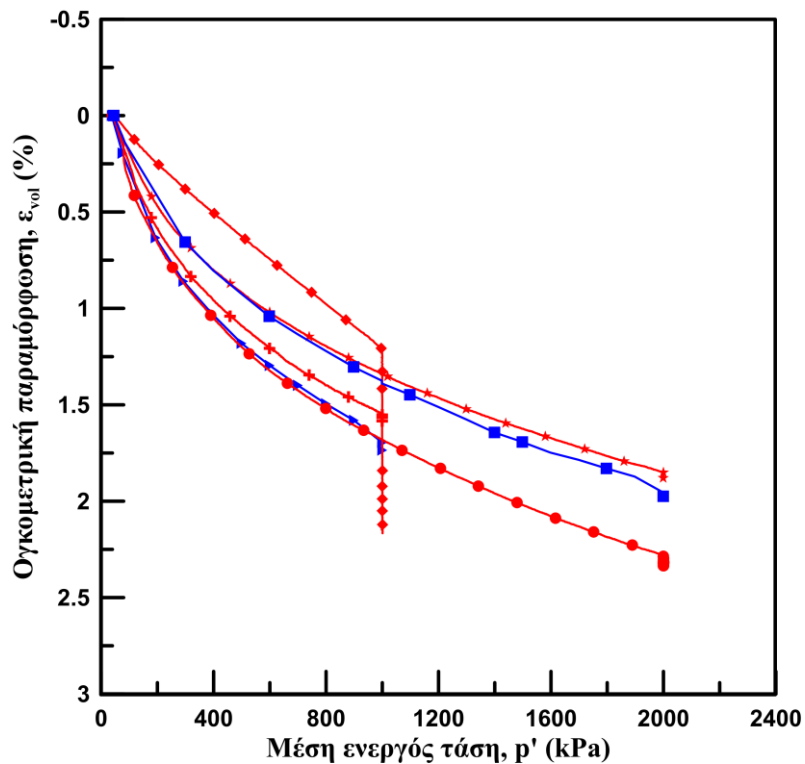
Συμπερασματικά, η στράγγιση του νερού μέσα από τους πόρους της πυριτίας είναι μια αργή διαδικασία και θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί όταν ο όγκος του δοκίμιου παραμένει σταθερός. Επισημαίνεται ότι, ενώ η φυσική άμμος αποβάλλει ταχύτατα το νερό από τους πόρους της, όταν αυξάνεται η πίεση περίσφιξης, η σταθεροποιημένη άμμος το αποβάλλει πιο αργά, αλλά μακροπρόθεσμα καταλήγει σε ογκομετρικές παραμορφώσεις αντίστοιχες της φυσικής άμμου. Η εκροή νερού μέσα από το σταθεροποιημένο δοκίμιο σημαίνει ότι η γέλη, ως διφασικό υλικό, αποβάλλει το νερό μέσα από τους πόρους της.

Στην παρούσα εργασία, τα δοκίμια φυσικής άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα με ρυθμό 30 kPa/min και αφέθηκαν σε ηρεμία για 2 ώρες, ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα με ρυθμό 1,4 kPa/min και αφέθηκαν σε ηρεμία για 24 ώρες ώστε ολοκληρωθεί η στερεοποίηση.

(α)



(β)



Σχήμα 4.9: Αποτελέσματα ισότροπης στερεοποίησης στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο M31: (α) δείκτης πόρων - μέση ενεργός τάση και (β) ογκομετρική παραμόρφωση- μέση ενεργός τάση

4.4.2 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης

Τα δοκίμια φυσικής άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε εύρος μέσης ενεργού τάσης $p'_i = 200 - 700 \text{ kPa}$, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i = 0.676 - 0.717$. Μετά τη στερεοποίηση, τα δοκίμια αφέθηκαν υπό σταθερή μέση ενεργό τάση για 2 ώρες και η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε $0,3 \text{ mm/min}$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ένα μεγάλο εύρος μέσης ενεργού τάσης, $p'_i = 100 - 2000 \text{ kPa}$, για να μελετηθεί η επίδραση της τάσης περίσφιξης, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i = 0.673 - 0.751$. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια επιβλήθηκε στερεοποίηση με αύξηση της ενεργού τάσης με ρυθμό $1,4 \text{ kPa/min}$, ενώ στη συνέχεια αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 24 ώρες. Η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε $0,025 \text{ mm/min}$ εξαιτίας της μικρότερης υδραυλικής διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.3**.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριττία δοκίμια άμμου M31

Πείραμα	Δείκτης πόρων, e_i	Μέση ενεργός τάση, p'_i (kPa)	Σταθεροποίηση
MD-1	0.710	200	-
MD-2	0.717	300	-
MD-3	0.691	500	-
MD-4	0.676	700	-
SMD-1	0.744	100	T
SMD-2	0.751	200	T
SMD-3	0.721	300	T
SMD-4	0.722	500	T
SMD-5	0.711	700	T
SMD-6	0.685	1000	T
SMD-7	0.673	2000	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριττία

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης για τη σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) και για τη φυσική άμμο (συνεχείς καμπύλες) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.10** σε όρους λόγου τάσεων q/p' (q : αποκλίνουσα τάση, p' : μέση ενεργός τάση), - αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.10(α)**), αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.10(β)**), ογκομετρικής ε_{vol} -

αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.10(γ)**) και αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' (**Σχήμα 4.10(δ)**) για διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις p'_i . Το σημείο αλλαγής φάσης (phase transformation), το σημείο μέγιστης αντοχής (peak) και το τέλος του πειράματος για κάθε δοκιμή απεικονίζονται στα διαγράμματα με κενά σύμβολα για τη σταθεροποιημένη άμμο και με αντίστοιχα χρωματιστά σύμβολα για τη φυσική άμμο M31.

Στα σταθεροποιημένα δοκίμια, ο μέγιστος λόγος τάσεων είναι άμεσα εξαρτημένος από την αρχική ενεργό τάση, αφού μειώνεται με την αύξησή της. Η άμμος M31 παρόμοιας πυκνότητας αναπτύσσει μια μικρότερη, πρακτικά σταθερή τιμή του λόγου τάσεων $q/p'=1.31$ για εύρος αρχικών ενεργών τάσεων από $p'_i=200-700\text{kPa}$. Στη σταθεροποιημένη άμμο, ο μέγιστος λόγος τάσεων είναι μεγαλύτερος από αυτόν της φυσικής για εύρος αρχικών ενεργών τάσεων από $p'_i=100-1000\text{kPa}$ και μόνο η καμπύλη της σταθεροποιημένης άμμου με αρχική ενεργό τάση $p'_i=2000\text{kPa}$ προσεγγίζει τις καμπύλες της φυσικής άμμου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του λόγου τάσεων για τη δοκιμή SMD-1 με αρχική ενεργό τάση $p'_i=100\text{ kPa}$ είναι $q/p'=1.55$ ενώ για τη δοκιμή SMD-7 με αρχική ενεργό τάση $p'_i=2000\text{ kPa}$ είναι $q/p'=1.35$. Επισημαίνεται ότι, ανεξαρτήτως τάσης στερεοποίησης, σε μεγάλες παραμορφώσεις σταθεροποιημένη και φυσική άμμος αναπτύσσουν τον ίδιο λόγο τάσεων (**Σχήμα 4.10(α)**).

Στο **Σχήμα 4.10(β)** οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου είναι ομοιόθετες υποδηλώνοντας σαφή και έντονη εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους από το επίπεδο της τάσης στερεοποίησης. Για όλο το εύρος των εξεταζόμενων τάσεων στερεοποίησης, η μέγιστη αποκλίνουσα τάση της σταθεροποιημένης άμμου είναι μεγαλύτερη από αυτή της φυσικής άμμου. Με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης η αποκλίνουσα τάση μειώνεται προς μία παραμένουσα τιμή. Επισημαίνεται ότι, η τιμή της τελικής αποκλίνουσας τάσης σε μεγάλες τιμές παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης άμμου είναι ίδια με αυτή της φυσικής άμμου αντίστοιχης τάσης στερεοποίησης. Αναφέρεται ότι, ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία δεν εμφάνισαν κάποιο εμφανές επίπεδο συγκέντρωσης παραμορφώσεων (shear band).

Στο **Σχήμα 4.10(γ)** διαφαίνεται η έντονα διαστολική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 που αναπτύσσει έως και πενταπλάσια διαστολή από αυτή της φυσικής άμμου M31. Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος φαίνεται να εμφανίζει μικρότερη συστολή σε σχέση με τη φυσική άμμο αντίστοιχης αρχικής ενεργού τάσης και πυκνότητας. Ο ρυθμός αύξησης της διαστολής (διαστολικότητα) μειώνεται με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης και τελικά η ογκομετρική παραμόρφωση σταθεροποιείται σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από αυτές της άμμου. Επισημαίνεται ότι η διαστολικότητα της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης, αλλά μειώνεται αισθητά μόνο για τη δοκιμή SMD-7 με αρχική ενεργό τάση $p'_i=2000\text{ kPa}$ που εμφανίζει παρατεταμένη συστολική συμπεριφορά, μέχρι την ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_z=6\%$ και στη συνέχεια διαστέλλεται με μικρότερο ρυθμό, μέχρι μία σταθερή ογκομετρική παραμόρφωση.

Η επίδραση της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτρία στο σημείο αλλαγής φάσης (phase transformation point) της άμμου διαφαινεται στο

Σχήμα 4.11 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 παρόμοιας πυκνότητας με τάσεις στερεοποίησης στο εύρος $p'_i=100-2000\text{kPa}$. Στο αρχικό στάδιο της φόρτισης, στο στάδιο της συστολής, παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει μικρότερες ογκομετρικές παραμορφώσεις μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης σε σχέση με τη φυσική άμμο παρόμοιας ή και μεγαλύτερης πυκνότητας. Επιπλέον, η μέγιστη συστολική ογκομετρική παραμόρφωση στο σημείο αλλαγής φάσης ($\varepsilon_{\text{vol,p.t.}}$), επιτυγχάνεται σε μικρότερη αξονική παραμόρφωση στη σταθεροποιημένη άμμο (ε_z : ένθετες τιμές στο **Σχήμα 4.11** (α) για όλες τις τάσεις στερεοποίησης. Ωστόσο, στο **Σχήμα 4.11** (β) τα αποτελέσματα των δοκιμών σε όρους $q-p'$ (αποκλίνουσας τάσης-μέση ενεργού τάσης) φαίνεται να περιγράφονται από μία ευθεία με κλίση $\eta_{\text{p.t.}}=q/p'_{\text{p.t.}}=1.25$ κοινή για τη σταθεροποιημένη και τη φυσική άμμο M31. Συμπερασματικά, η γωνία αλλαγής φάσης (angle at phase transformation) της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της προκύπτει $\phi_{\text{p.t.}}=31^\circ$ για εύρος ενεργών τάσεων $p_i=100-2000\text{kPa}$ και τιμές δείκτη πόρων $e_i=0.673-0.744$ μετά τη στερεοποίηση.

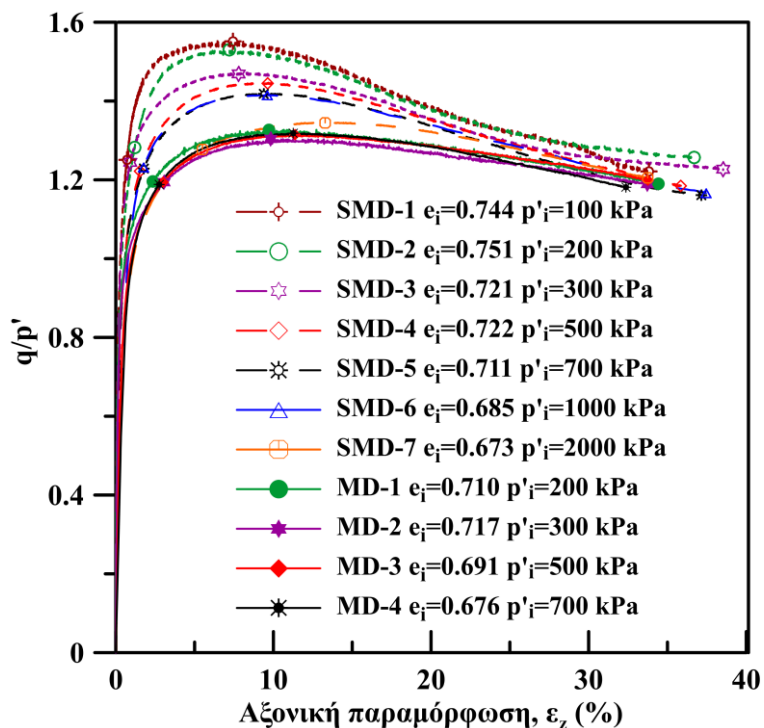
Για την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτρία στη διαστολικότητα της άμμου M31, παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες τάσεων-διαστολικότητας για σταθεροποιημένα (σύμβολα με κόκκινο περίγραμμα) και φυσικά δοκίμια (μπλε σύμβολα) άμμου M31 με αρχική μέση ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$ (**Σχήμα 4.12**(α)) και $p'_i=700\text{kPa}$ (**Σχήμα 4.12**(β)). Συγκεκριμένα, συσχετίζεται ο λόγος τάσεων q/p' με το ρυθμό διαστολικότητας $-d\varepsilon_{\text{vol}}/d\varepsilon_z$ των σταθεροποιημένων δοκιμών και των φυσικών δοκιμών ίδιας ενεργού τάσης και λίγο μεγαλύτερης πυκνότητας κατά τη διάρκεια της τριαξονικής θλίψης. Ο μέγιστος λόγος τάσεων αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την ανάπτυξη τη μέγιστης διαστολικότητας τόσο στα σταθεροποιημένα όσο και φυσικά δοκίμια άμμου και για τις δύο τιμές αρχικής ενεργού τάσης. Αυτό υποδηλώνει την έλλειψη δεσμών σιμέντωσης στα σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια (Cuccovillo & Coop, 1999). Η μέγιστη αυτή τιμή είναι μεγαλύτερη για τα σταθεροποιημένα δοκίμια, παρότι είναι χαλαρότερα. Η επίδραση της ενεργού τάσης στη μέγιστη διαστολικότητα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.13** για τα σταθεροποιημένα (σύμβολα με κόκκινο περίγραμμα) και φυσικά δοκίμια (μπλε σύμβολα) άμμου M31 για τάσεις στερεοποίησης από $p'_i=100-2000\text{kPa}$. Για ένα μεγάλο εύρος μέσης ενεργού τάσης η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης διαστολικότητας από τη φυσική άμμο M31. Η μέγιστη τιμή διαστολικότητας μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης πλησιάζοντας την σχεδόν σταθερή τιμή της άμμου M31.

Συμπερασματικά, η βελτιωμένη αντοχή της άμμου μετά τη σταθεροποίησή της με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτρίας περιεκτικότητας $CS=10\%$ μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της τάσης και τη συσσώρευση της διατμητικής παραμόρφωσης, προσεγγίζοντας τις χαρακτηριστικές, σχετιζόμενες με την τριβή ανάμεσα στους κόκκους, τιμές της άμμου

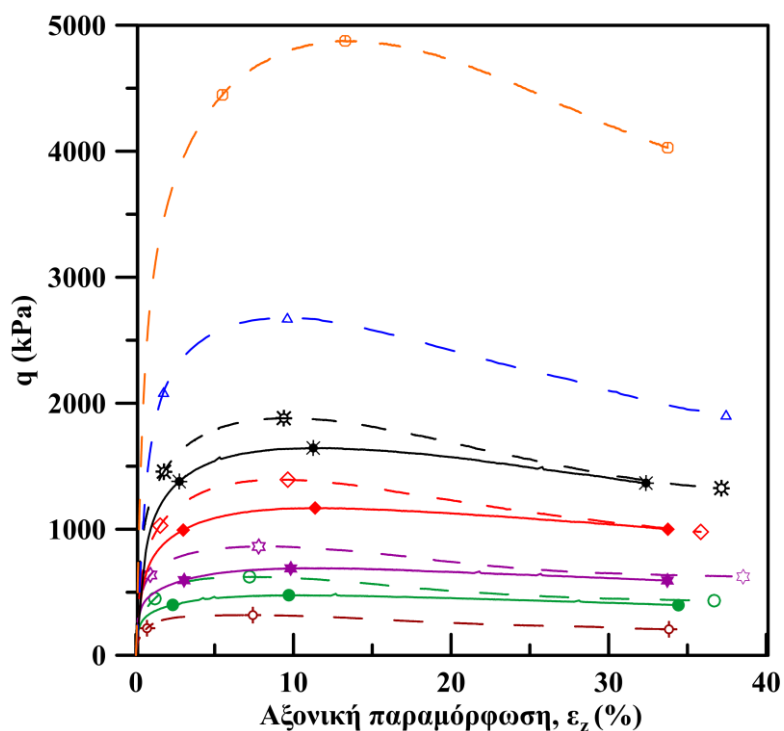
Κεφάλαιο 4: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων

που κυριαρχούν στην τελική κατάσταση. Ωστόσο, η κολλοειδής πυριτία φαίνεται να ενισχύει τη διαστολικότητα της άμμου, επιτρέποντας στους κόκκους της άμμου ή/και τα συσσωματώματα των κόκκων με τη γέλη, να αναδιαταχτούν σε μια πιο χαλαρή δομή αναλαμβάνοντας τα φορτία της διάτμησης ως και την τελική κατάσταση, τουλάχιστον για το εύρος των εξεταζόμενων τάσεων.

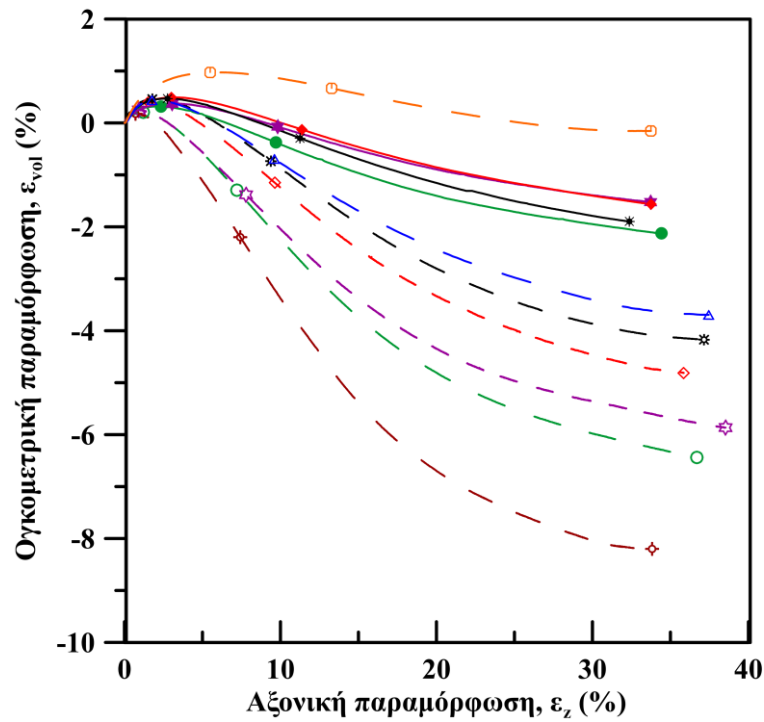
(α)



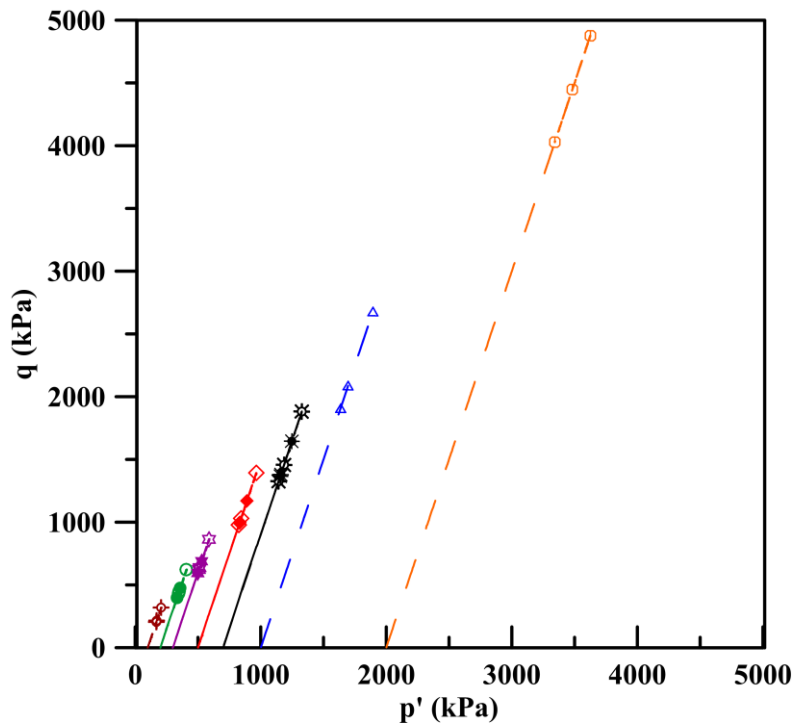
(β)



(γ)

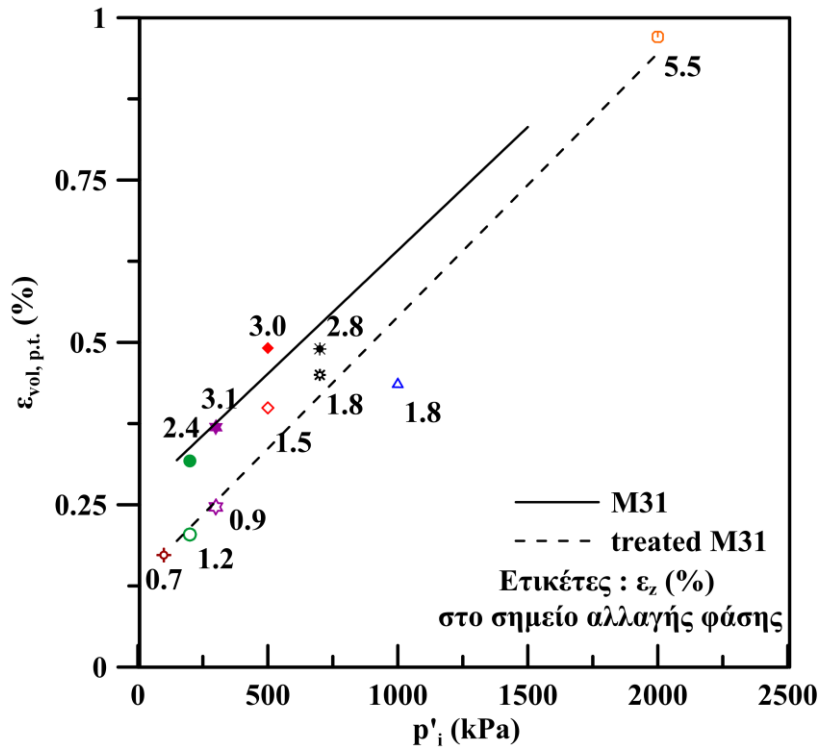


(δ)

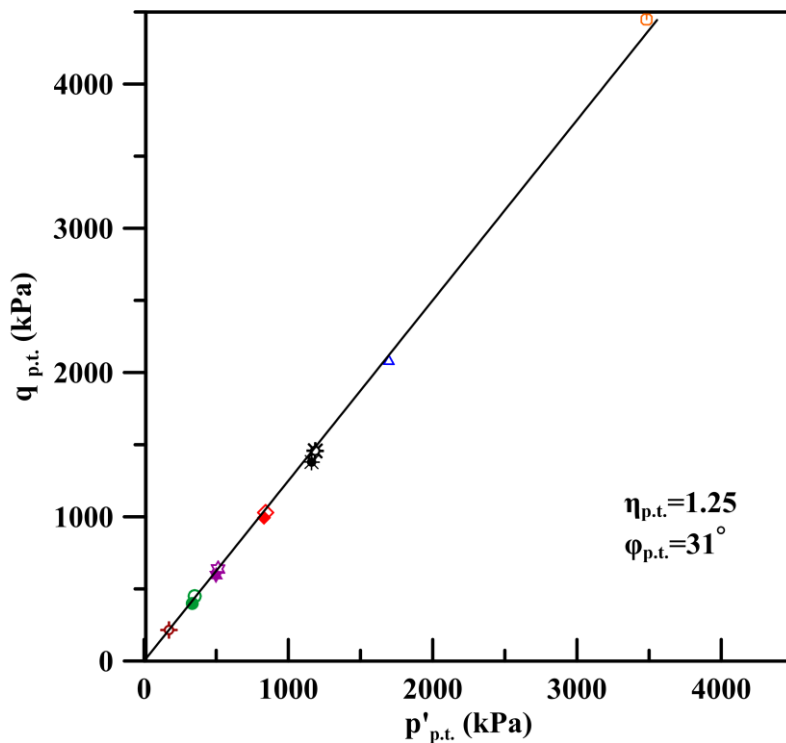


Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική (συνεχείς καμπύλες) και σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) άμμο M31: (α) λόγος τάσεων-αξονική παραμόρφωση, (β) αποκλίνουσα τάση- αξονική παραμόρφωση, (γ) ογκομετρική-αξονική παραμόρφωση και (δ) ενεργές τασικές οδεύσεις

(α)

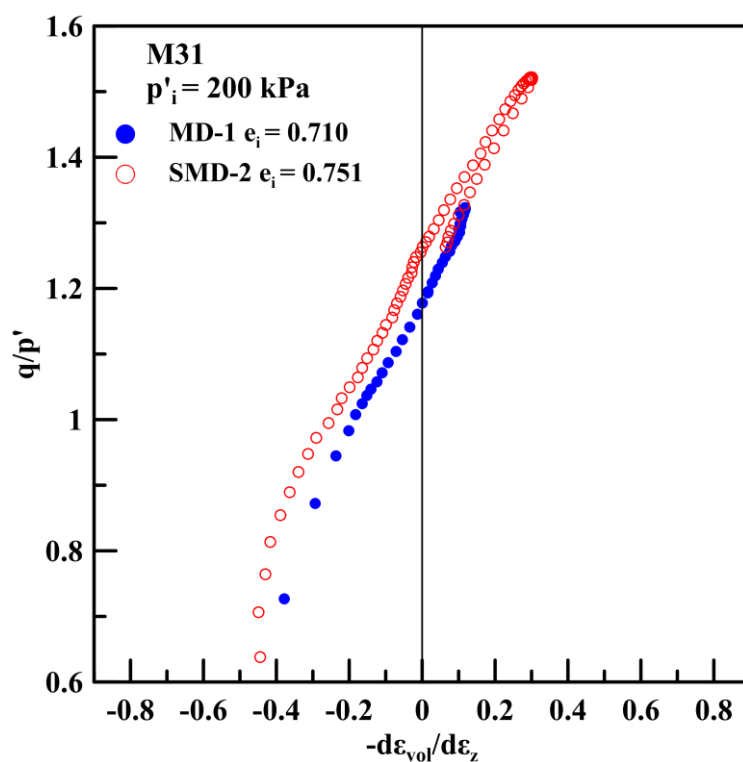


(β)

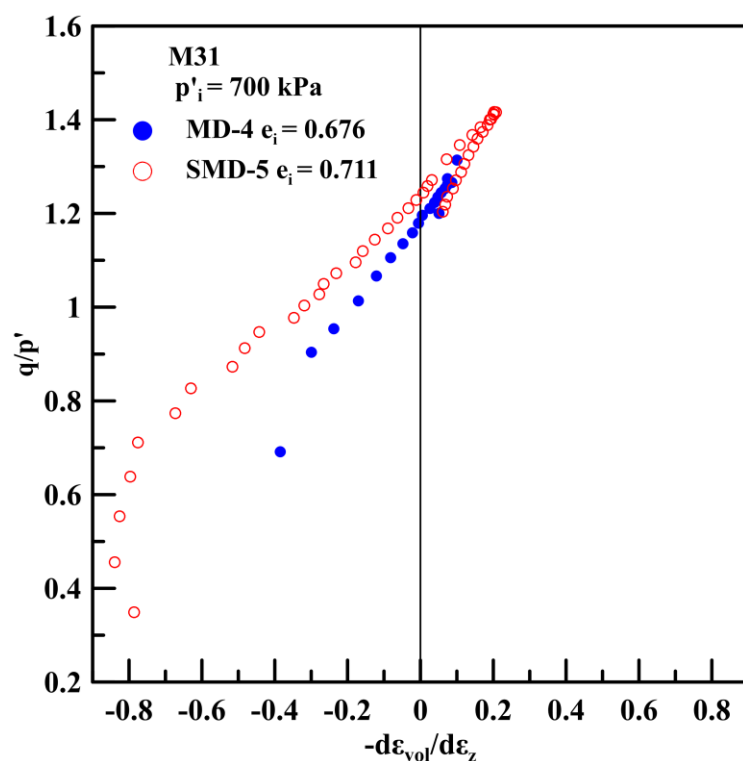


Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 στο σημείο αλλαγής φάσης (p.t): (α) ογκομετρική παραμόρφωση στο σημείο αλλαγής φάσης - αρχική ενεργός τάση και (β) αποκλίνοσα -μέση ενεργός τάση στο σημείο αλλαγής φάσης

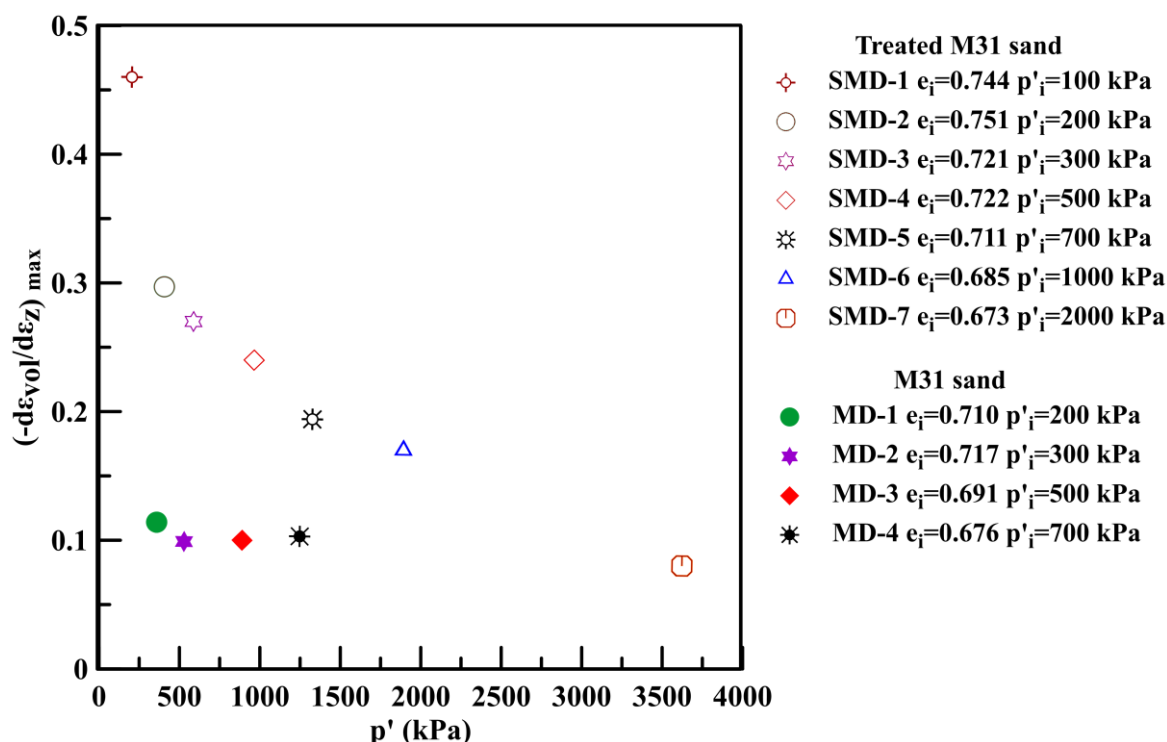
(α)



(β)



Σχήμα 4.12: Καμπύλες λόγου τάσεων-διαστολικότητας για σταθεροποιημένα (σύμβολα με κόκκινο περίγραμμα) και φυσικά δοκίμια (χρωματιστά σύμβολα) άμμου M31 με αρχική μέση ενεργό τάση: (α) $p'_i=200\text{kPa}$, (β) $p'_i=700 \text{ kPa}$.



Σχήμα 4.13: Σχέση μέγιστης διαστολικότητας–μέσης ενεργού τάσης για σταθεροποιημένα (σύμβολα με έγχρωμο περίγραμμα) και φυσικά δοκίμια (αντίστοιχα χρωματισμένα σύμβολα) άμμου M31

4.4.3 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης

Τα δοκίμια φυσικής άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε εύρος μέσης ενεργού τάσης $p'_i = 300 - 2000$ kPa, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , με εύρος $e_i = 0.662 - 0.708$. Μετά τη στερεοποίηση, τα δοκίμια αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 2 ώρες και στη συνέχεια η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε 0,3mm/min. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ένα μεγάλο εύρος μέσης ενεργού τάσης, $p'_i = 100 - 2000$ kPa, για να μελετηθεί η επίδραση της τάσης περίσφιξης, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, e_i , στο εύρος $e_i = 0.667 - 0.752$. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια επιβλήθηκε αύξηση της ενεργού τάσης με ρυθμό 1,4 kPa/min κατά τη στερεοποίηση, ενώ στη συνέχεια αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 24 ώρες. Η ταχύτητα διάτμησης ορίστηκε σε 0,025mm/min εξαιτίας της μικρότερης υδραυλικής διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.4**.

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31

Πείραμα	Δείκτης πόρων, e_i	Μέση ενεργός τάση, p'_i (kPa)	Σταθεροποίηση
MU-1	0.708	300	-
MU-2	0.681	1000	-
MU-3	0.662	2000	-
MU-4	0.663	300	-
MU-5	0.670	500	-
SMU-1	0.732	100	T
SMU-2	0.752	200	T
SMU-3	0.735	300	T
SMU-4	0.722	1000	T
SMU-5	0.667	2000	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης για τη σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) και για τη φυσική άμμο (συνεχείς καμπύλες) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.14** σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων στο χώρο q - p' (**Σχήμα 4.14(α)**), αποκλίνουσα τάσης - αξονικής παραμόρφωσης, q - ε_z , (**Σχήμα 4.14(β)**), υπερπίεσης του υγρού των πόρων - αξονικής παραμόρφωσης, Δu - ε_z (**Σχήμα 4.14(γ)**) και κανονικοποιημένης υπερπίεσης του υγρού των πόρων ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση-αξονικής παραμόρφωσης, $\Delta u/p'_i$ - ε_z (**Σχήμα 4.14(δ)**). Το σημείο αλλαγής φάσης (phase transformation), το σημείο μέγιστης αντοχής (peak) και το τέλος του πειράματος για κάθε δοκιμή απεικονίζονται κατά σειρά εμφάνισης στα διαγράμματα με έγχρωμα σύμβολα διαφορετικού περιγράμματος για τη σταθεροποιημένη άμμο και με αντίστοιχα έγχρωμα σύμβολα για τη φυσική άμμο M31.

Στο **Σχήμα 4.14(β)** οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου εμφανίζουν σαφή και έντονη εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους από το επίπεδο της τάσης στερεοποίησης. Για όλο το εύρος των εξεταζόμενων τάσεων στερεοποίησης, η μέγιστη αποκλίνουσα τάση της σταθεροποιημένης άμμου είναι μεγαλύτερη από αυτή της φυσικής άμμου. Με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης η αποκλίνουσα τάση μειώνεται προς μία παραμένουσα τιμή. Επισημαίνεται ότι, εξαιτίας της έντονης τάσης για διαστολή που εμφανίζει η σταθεροποιημένη άμμος, στις δοκιμές με ενεργό τάση $p'_i < 1000$ kPa (SMU-1, SMU-2 και SMU-3) το υγρό των πόρων υφίσταται σπηλαιώση (cavitation), αφού έχει

Κεφάλαιο 4: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων

μειώσεται την αρχική θετική πίεση πόρων που του είχε επιβληθεί, ($u=700$ kPa) και η αντοχή δεν έφτασε στην τελική της τιμή με αποτέλεσμα οι μετρήσεις για αξονικές παραμορφώσεις $\varepsilon_z > 10\%$ δεν είναι αξιόπιστες. Η αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου, q , υπό αστράγγιστες συνθήκες, είναι μεγαλύτερη από αυτή της φυσικής άμμου στο σημείο αλλαγής φάσης, στην κατάσταση μέγιστης αντοχής και στην τελική κατάσταση για δοκίμια με ίδια τάση στερεοποίησης και παρόμοια αρχική πυκνότητα.

Στο **Σχήμα 4.10(γ)** και **Σχήμα 4.10(δ)** διαφαίνεται η έντονη τάση για διαστολή της σταθεροποιημένης άμμου M31, έναντι αυτής της φυσικής άμμου M31. Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος φαίνεται να εμφανίζει λιγότερη τάση για συστολή σε σχέση με τη φυσική άμμο αντίστοιχης αρχικής ενεργού τάσης και πυκνότητας. Η τάση για διαστολή μειώνεται με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης και τελικά η υπερπίεση του υγρού των πόρων σταθεροποιείται σε τιμές μικρότερες από αυτές της άμμου. Επισημαίνεται ότι η διαστολικότητα της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης, ωστόσο είναι μεγαλύτερη από αυτή της άμμου ακόμη και για τη δοκιμή με αρχική ενεργό τάση $p'_i=2000$ kPa. Στις δοκιμές που εμφάνισαν σπηλαίωση, $\Delta u < -700$ kPa, (SMU-1, SMU-2 και SMU-3) οι καμπύλες σταθεροποιούνται απότομα, χωρίς τα δοκίμια να φτάσουν στην τελική/κρίσιμη κατάσταση και οι περεταίρω μετρήσεις δεν θεωρούνται αξιόπιστες.

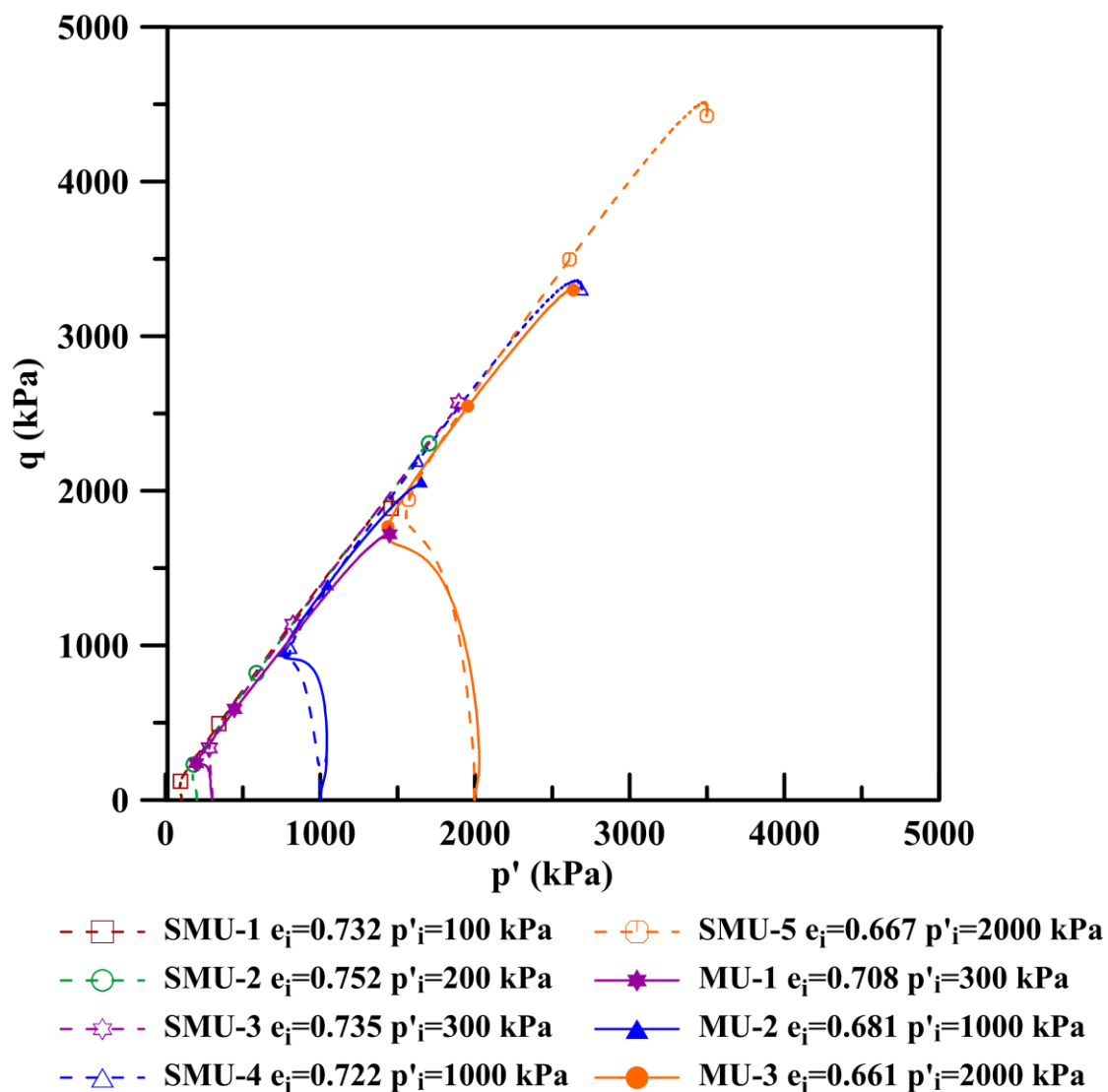
Η επίδραση της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία στο σημείο αλλαγής φάσης (phase transformation point) της άμμου διαφαίνεται στο **Σχήμα 4.15** όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 παρόμοιας πυκνότητας με τάσεις στερεοποίησης στο εύρος $p'_i=100-2000$ kPa. Στο αρχικό στάδιο της φόρτισης, παρατηρούμε ότι η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει λιγότερη τάση για συστολή και μικρότερες τιμές υπερπίεσης του υγρού των πόρων Δu στο σημείο αλλαγής φάσης σε σχέση με τη φυσική άμμο παρόμοιας ή και μεγαλύτερης πυκνότητας. Επιπλέον, το σημείο αλλαγής φάσης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά ($\Delta u_{p.t.}$), εμφανίζεται σε μικρότερη αξονική παραμόρφωση στη σταθεροποιημένη άμμο (ε_z : ένθετες τιμές στο **Σχήμα 4.15** (α)) για όλες τις τάσεις στερεοποίησης. Ωστόσο, στο **Σχήμα 4.15** (β) τα αποτελέσματα των δοκιμών σε όρους $q-p'$ (αποκλίνουσας τάσης-μέση ενεργού τάσης) φαίνεται να περιγράφονται από μία ευθεία με κλίση $\eta_{p.t.}=q/p'_{p.t.}=1.25$ κοινή για τη σταθεροποιημένη και τη φυσική άμμο M31. Συμπερασματικά, η γωνία αλλαγής φάσης (angle at phase transformation) της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της προκύπτει $\phi_{p.t.}=31^\circ$ για εύρος ενεργών τάσεων $p_i=100-2000$ kPa και τιμές δείκτη πόρων $e_i=0.662-0.752$ μετά τη στερεοποίηση. Η τιμή αυτή είναι κοινή και για τις τριαξονικές δοκιμές θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (

Σχήμα 4.11(β)).

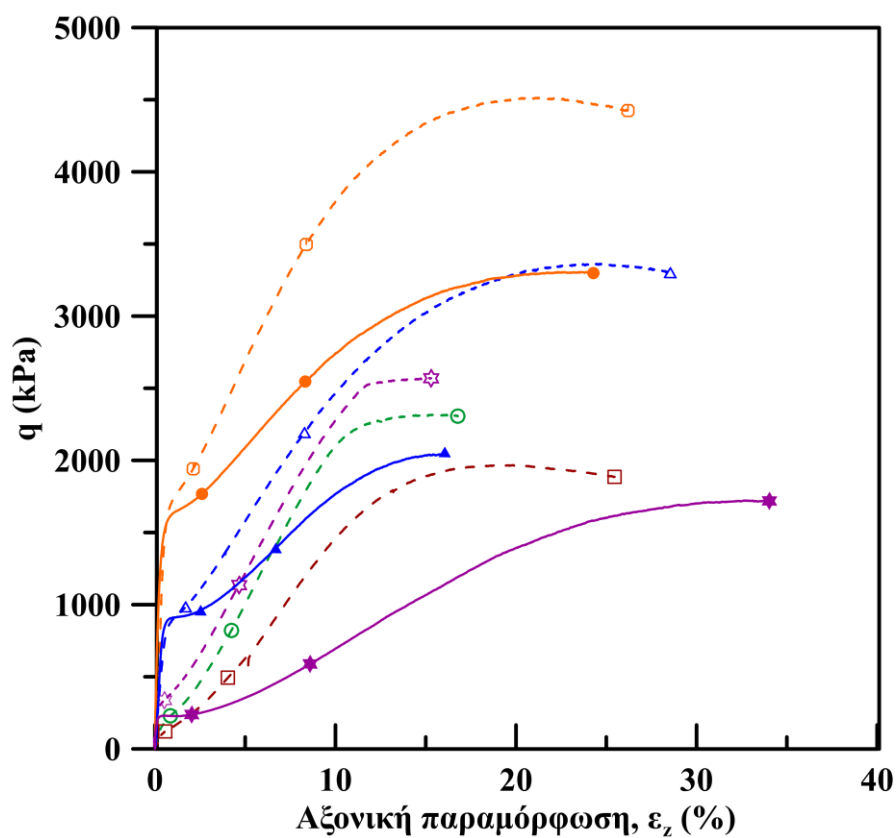
Συμπερασματικά, η βελτιωμένη αντοχή της άμμου και η έντονη τάση για διαστολή, μετά τη σταθεροποίησή της με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας $CS=10\%$, μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της τάσης και τη συσσώρευση της διατμητικής

παραμόρφωσης και υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, αλλά είναι εμφανής ακόμη και για τάση στερεοποίησης $p'_i=2000\text{kPa}$. Αντίστοιχη απομείωση της δράσης της πυριτίας παρατηρήθηκε στις τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης και στις δοκιμές απευθείας διάτμησης με ελεύθερη στράγγιση.

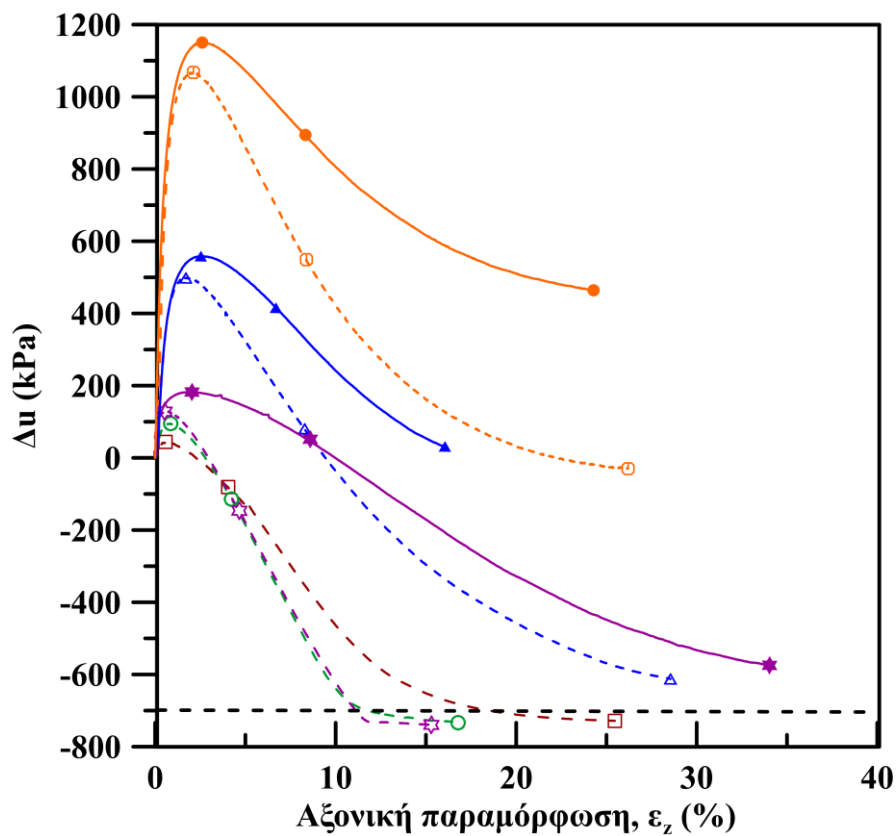
(α)



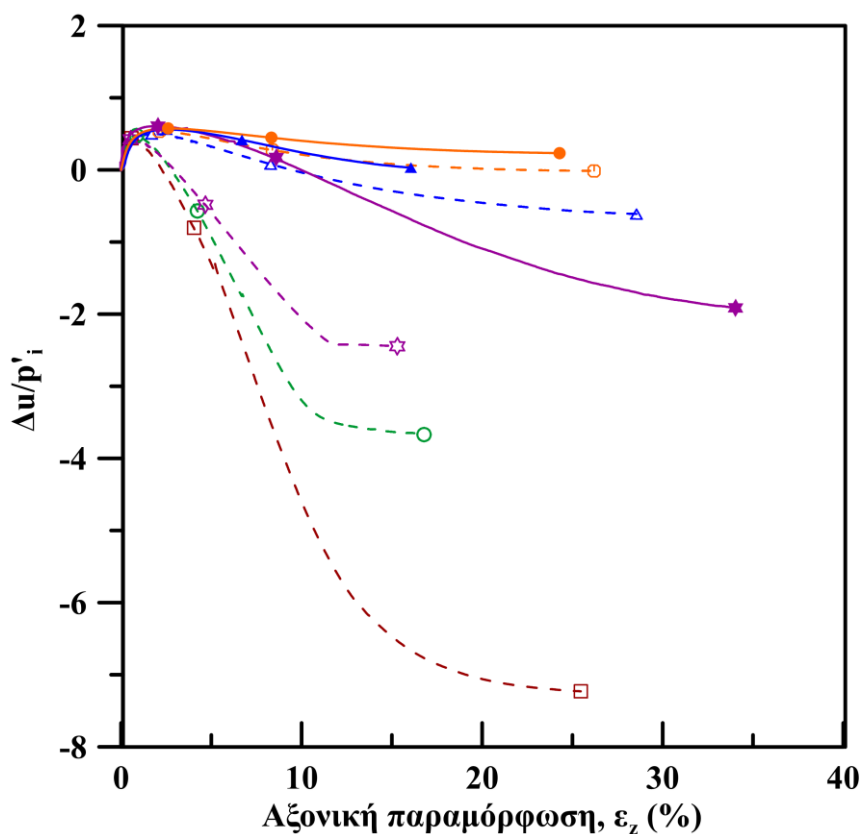
(β)



(γ)

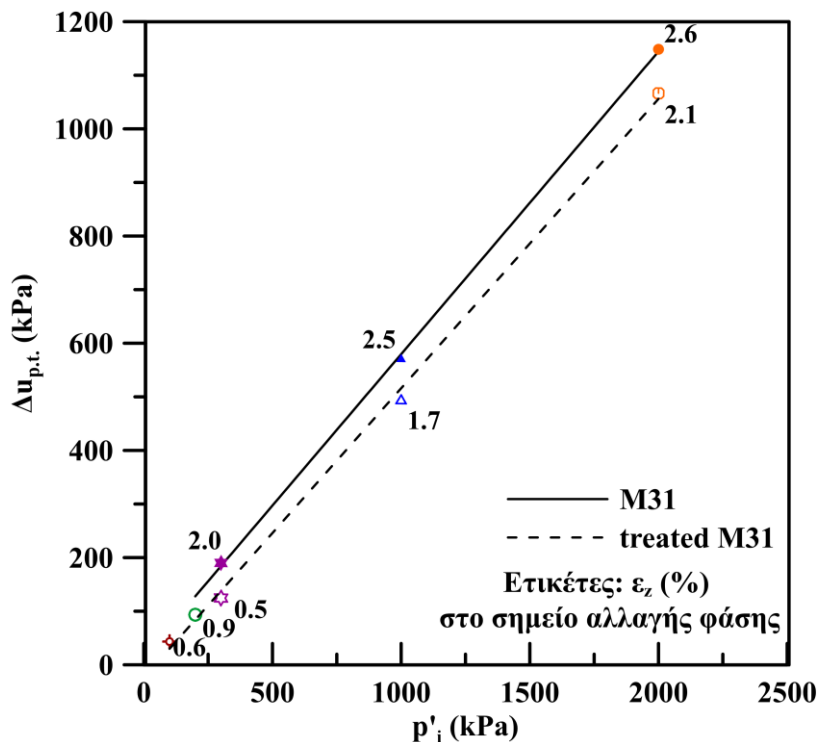


(δ)

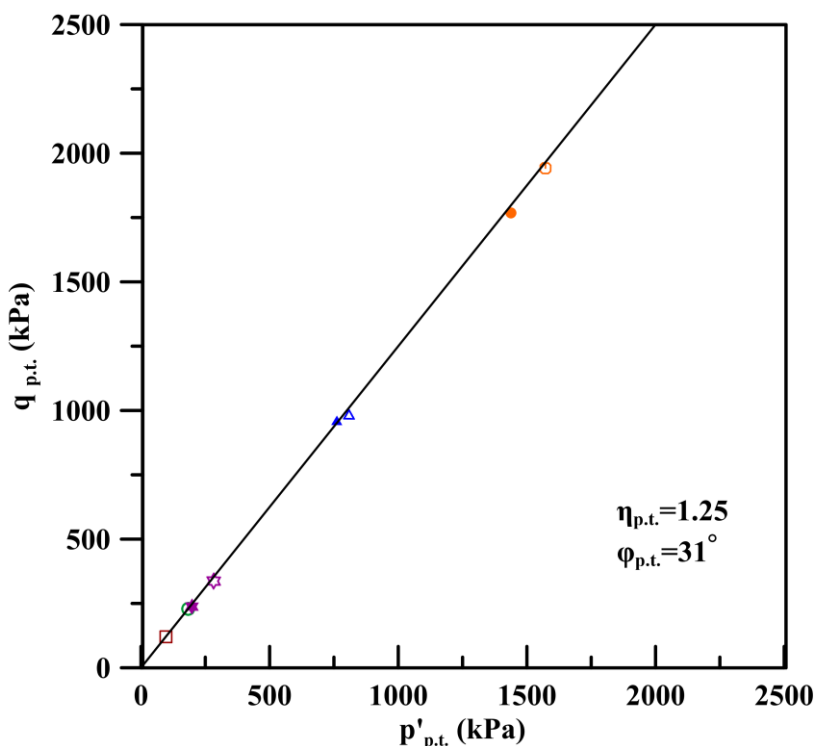


Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική (συνεχείς καμπύλες) και σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) άμμο M31:(α) ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q - p' , (β) αποκλίνουσα τάση-αξονική παραμόρφωση, (γ) υπερπίεση του υγρού των πόρων-αξονική παραμόρφωση (δ) κανονικοποιημένη υπερπίεση του υγρού των πόρων-αξονική παραμόρφωση

(α)



(β)



Σχήμα 4.15: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 στο σημείο αλλαγής φάσης (p.t): (α) υπερπίεση του υγρού των πόρων στο σημείο αλλαγής φάσης -αρχική ενεργός τάση και (β) αποκλίνουσα -μέση ενεργός τάση στο σημείο αλλαγής φάσης

4.4.4 Μέγιστη αντοχή και κρίσιμη κατάσταση της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της

Για τη μελέτη της επίδρασης της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% στη μέγιστη αντοχή της άμμου M31 χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονική θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης (ενότητα 4.4.2) και εμποδιζόμενης στράγγισης (ενότητα 5.4.3). Τα δοκίμια άμμου M31 παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο απόθεσης σε νερό και τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με απόθεση της ξηρής άμμου στο υγρόλυμα της πυριτίας. Στη συνέχεια τα δοκίμια κορέστηκαν με υψηλές τιμές αντιπίεσης $u=700\text{kPa}$, ώστε να επιτευχθούν τιμές της παραμέτρου Skempton $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση αρχική ενεργό τάση, p'_i , κυμαινόμενη από 100 έως 2000 kPa. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών στο τέλος της στερεοποίησης και στην κατάσταση μέγιστης αντοχής συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.5**.

Στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 στην κατάσταση μέγιστης αντοχής σε όρους μέγιστου λόγου τάσεων, $(q/p')_{\max}$ (αποκλίνουσα προς μέση ενεργός τάση) - μέσης ενεργού τάσης, p' (**Σχήμα 4.16(α)**) και μέγιστης διατμητικής αντοχής ϕ_{\max} - μέσης ενεργού τάσης, p' (**Σχήμα 4.16(β)**). Η άμμος M31 ανεξάρτητα από τις συνθήκες στράγγισης αναπτύσσει μέγιστο λόγο τάσεων $(q/p')_{\max} \approx 1.32$ και μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής $\phi_{\max} \approx 32.5^\circ$. Επισημαίνεται ότι η μέγιστη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου για τάσεις στερεοποίησης μικρότερες των 2000 kPa είναι υψηλότερη από αυτή της άμμου M31. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ενεργός τάση η μέγιστη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται και προσεγγίζει την τιμή της φυσικής άμμου εξαιτίας της καταστολής της διαστολικότητας. Σε αντίθεση με τη φυσική άμμο, η πολύ έντονη τάση για διαστολή στις χαμηλές ενεργές τάσεις έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε σχέση με τις συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, υποδεικνύοντας την ευεργετική δράση της διαστολής στη διατμητική αντοχή έναντι της διάτμησης υπό σταθερό όγκο. Η μείωση της μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής με την αύξηση της ενεργού τάσης, υποδηλώνει ότι η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb των σταθεροποιημένων δοκιμών θα είναι μια καμπύλη με τις τιμές της μέγιστης γωνίας διατμητικής αντοχής υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης να κυμαίνονται από $\phi_{\max}=38.1^\circ$ για $p'_i=100\text{kPa}$ έως $\phi_{\max}=33.2^\circ$ για $p'_i=2000\text{kPa}$ σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης (**Σχήμα 4.6(α)**). Επιπλέον, για την άμμο M31 προκύπτει ότι η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση $\phi_{\max}=32.5^\circ$ επίσης σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης (**Σχήμα 4.6(α)**)

Για τη μελέτη της επίδρασης της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% στην κρίσιμη κατάσταση της άμμου M31 χρησιμοποιήθηκαν τα

Κεφάλαιο 4: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων

αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονική θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης (ενότητα 5.4.2) και εμποδιζόμενης στράγγισης (ενότητα 5.4.3). Τα δοκίμια κορέστηκαν με υψηλές τιμές αντιπίεσης $u=700\text{kPa}$, ώστε να επιτευχθούν τιμές της παραμέτρου Skempton $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ και να αποφευχθεί η σπηλαιώση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση αρχική ενεργό τάση, p'_i , κυμαινόμενη από 100 έως 2000 kPa. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών στο τέλος της στερεοποίησης και στην κρίσιμη κατάσταση συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.6**. Σύμφωνα με τη θεωρία κρίσιμης κατάστασης οι δυο ικανές και αναγκαίες συνθήκες για την επίτευξη και διατήρησή της είναι το έδαφος να συσσωρεύει διατμητική παραμόρφωσή υπό σταθερό αποκλίνοντα λόγο τάσεων (q/p') και σταθερό δείκτη πόρων που είναι μοναδική συνάρτηση της μέσης ενεργού τάσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την ύπαρξη μίας μοναδικής γραμμής στους χώρους $e-p'$ και $q-p'$ όταν ο ρυθμός ανάπτυξης των τάσεων και των πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων της άμμου μηδενίζεται πρακτικώς ύστερα από εκτεταμένη παραμόρφωση (Roscoe et al., 1958; Been & Jefferies, 1985). Η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης για τη σταθεροποιημένη και φυσική άμμο M31 προσδιορίστηκε ανεξαρτήτως της αρχικής τιμής του δείκτη πόρων και της μέσης ενεργού τάσης και ανεξαρτήτως του τύπου της όδευσης φόρτισης (ελεύθερης ή εμποδιζόμενης στράγγισης). Επισημαίνεται ότι για τη σταθεροποιημένη άμμο για τιμές ενεργού τάσης $p'_i<1000$ kPa χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών ελεύθερης στράγγισης γιατί τα σταθεροποιημένα δοκίμια υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης εμφάνισαν σπηλαιώση (cavitation) και δεν προσέγγισαν την κρίσιμη κατάσταση.

Στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης για τα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 στην κρίσιμη κατάσταση σε όρους δείκτη πόρων e - μέσης ενεργού τάσης p' **Σχήμα 4.17(α)** και σε όρους αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' . Όπως φαίνεται γραφικά στο **Σχήμα 4.17(α)**, η προβολή της κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$ για τη σταθεροποιημένη άμμο είναι μια καμπύλη γραμμή που εναποτίθεται πάνω από αυτή της άμμου M31. Η θέση της καμπύλης εκφράζει την έντονη διαστολικότητα της σταθεροποιημένης άμμου που οδηγεί την άμμο σε χαλαρότερη δομή κατά τη διάτμηση μέχρι και την κρίσιμη κατάσταση. Παρά τις διαφορετικές τιμές του τελικού δείκτη πόρων στην κρίσιμη κατάσταση, η φυσική και η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζουν κοινό λόγο τάσεων $M=\eta_c=q_{cs}/p'_{cs}=1.22$ όπως φαίνεται γραφικά στο **Σχήμα 4.17(β)**, όπου η προβολή της κρίσιμης κατάστασης στο χώρο των τάσεων $q-p'$ ορίζεται ως μια ευθεία γραμμή κοινή για τη φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 που δίνεται από την εξίσωση (**4-1**).

$$q_{cs} = M_{cs} * p_{cs} \rightarrow q_{cs} = 1.22 * p_{cs}$$

(4-1)

Η γωνία διατμητικής αντοχής στην κρίσιμη κατάσταση προκύπτει για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο ανεξαρτήτως του τύπου της στράγγισης $\phi_{cs}=30^\circ$ σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης (**Σχήμα 4.6(β)**). Ο κοινός λόγος τάσεων στην τελική κρίσιμη κατάσταση είναι χαρακτηριστικός και η ουσία της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των εδαφών (Wroth & Bassett, 1965) υποδεικνύοντας ότι η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας $CS=10\%$ δεν αυξάνει την τελική διατμητική αντοχή πέρα από την αντοχή της τριβής της άμμου (Rowe, 1962). Επισημαίνεται ότι, στο τέλος της διάτμησης τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν κάποια αντοχή υπό μηδενική ενεργό τάση. Αυτό ίσως οφείλεται, όπως στις περισσότερες περιπτώσεις που το έδαφος εμφανίζει αντοχή υπό μηδενική ενεργό τάση χωρίς να έχει συνοχή/σιμεντωση, σε κάποιας μορφής υποπίεση π.χ. αρνητική πίεση του υγρού των πόρων - μύζηση (suction) όπως παρατηρείται σε αναζυμωμένα και φυσικά κορεσμένα εδάφη. Στον **Πίνακα 4.7** συνοψίζονται οι παράμετροι κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία (Panagiotis K. Triantafyllos et al., 2022) σύμφωνα με την εξίσωση (4-2), (X. S. Li & Wang, 1998).

$$e_{cs} = \Gamma_{cs} - \lambda_{cs} * \ln \left(\frac{p'_{cs}}{p_a} \right)^\xi$$

(4-2)

Όπου e_{cs} : ο δείκτης πόρων στην κρίσιμη κατάσταση για μέση ενεργό τάση p_{cs}

p_a : η ατμοσφαιρική πίεση (101kPa)

Γ_{cs} , λ_{cs} , και ξ : παράμετροι που προσδιορίζονται από τα πειραματικά δεδομένα

Συμπερασματικά, η αύξηση της τάσης και της παραμόρφωσης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της βελτίωσης που παρέχει η κολλοειδής πυριτίας στη δομή της άμμου με την παρουσία της στις επαφές των κόκκων, αλλά και στα μεταξύ τους κενά. Αυτή η υπόθεση ενισχύεται από το γεγονός ότι στην τελική κρίσιμη κατάσταση ο λόγος τάσεων των σταθεροποιημένων δοκιμών προσομοιάζει τον λόγο των δοκιμών άμμου όταν πλέον κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά τριβής στις επαφές των κόκκων. Ωστόσο, τονίζεται ότι η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας στη σταθεροποίηση της άμμου μειώνει τη συστολικότητα, επισπεύδει και ενισχύει τη διαστολικότητα και επιτρέπει την αναδιάταξη του σκελετού σε χαλαρότερες δομές παραλαμβάνοντας μεγαλύτερα διατμητικά φορτία από αυτά της φυσικής άμμου.

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 στην κατάσταση μέγιστης αντοχής

Πείραμα	Στράγγιση	Σταθεροποίηση	Τέλος της στερεοποίησης		Μέγιστη αντοχή	
			e_i	p'_i (kPa)	$(q/p')_{max}$	ϕ_{max} (°)
MU-1	U	-	0.708	300	1.32	32.8
MU-2	U	-	0.681	1000	1.32	32.7
MU-3	U	-	0.662	2000	1.30	32.3
SMU-1	U	T	0.732	100	1.43	35.2
SMU-2	U	T	0.752	200	1.39	34.4
SMU-3	U	T	0.735	300	1.38	34.1
SMU-4	U	T	0.722	1000	1.34	33.3
SMU-5	U	T	0.667	2000	1.34	33.2
MD-1	D	-	0.710	200	1.33	32.9
MD-2	D	-	0.717	300	1.30	32.4
MD-3	D	-	0.691	500	1.31	32.6
MD-4	D	-	0.676	700	1.32	32.7
SMD-1	D	T	0.744	100	1.55	38.1
SMD-2	D	T	0.751	200	1.53	37.6
SMD-3	D	T	0.721	300	1.47	36.2
SMD-4	D	T	0.722	500	1.44	35.6
SMD-5	D	T	0.711	700	1.42	35.0
SMD-6	D	T	0.685	1000	1.41	34.9
SMD-7	D	T	0.673	2000	1.34	33.2

Όπου: U, συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης
D, συνθήκες ελεύθερης στράγγισης
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία
 e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 $(q/p')_{max}$, μέγιστος λόγος αποκλίνουσας προς μέσης ενεργού τάσης,
 ϕ_{max} , μέγιστη γωνία διατμητικής αντοχής

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31 στην κρίσιμη κατάσταση

Πείραμα	Στράγγιση	Σταθεροποίηση	Τέλος της στερεοποίησης		Κρίσιμη Κατάσταση	
			e_i	p'_i (kPa)	e_{cs}	p'_{cs} (kPa)
MU-2	U	-	0.681	1000	0.681	1860
MU-3	U	-	0.662	2000	0.663	2640
SMU-4	U	T	0.722	1000	0.722	2708
SMU-5	U	T	0.667	2000	0.667	3500
MD-1	D	-	0.710	200	0.746	333
MD-2	D	-	0.717	300	0.743	500
MD-3	D	-	0.691	500	0.717	531
MD-4	D	-	0.676	700	0.708	1158
MD-5	D	-	0.675	100	0.747	170
SMD-1	D	T	0.744	100	0.886	168
SMD-2	D	T	0.751	200	0.864	348
SMD-3	D	T	0.721	300	0.822	507
SMD-4	D	T	0.722	500	0.804	823
SMD-5	D	T	0.711	700	0.782	1143
SMD-6	D	T	0.685	1000	0.744	1660
SMD-7	D	T	0.673	2000	0.675	3345

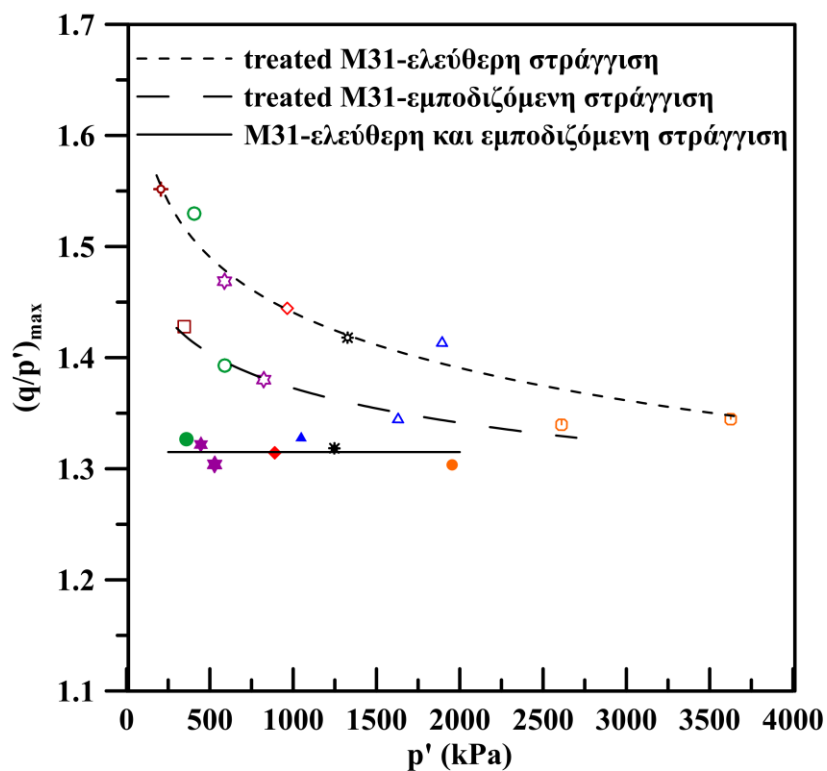
Όπου: U, συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης
D, συνθήκες ελεύθερης στράγγισης
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία
 e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 e_{cs} , δείκτης πόρων στην κρίσιμη κατάσταση,
 p'_{cs} , μέση ενεργός τάση στην κρίσιμη κατάσταση,

Πίνακας 4.7: Παράμετροι κρίσιμης κατάστασης της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10%

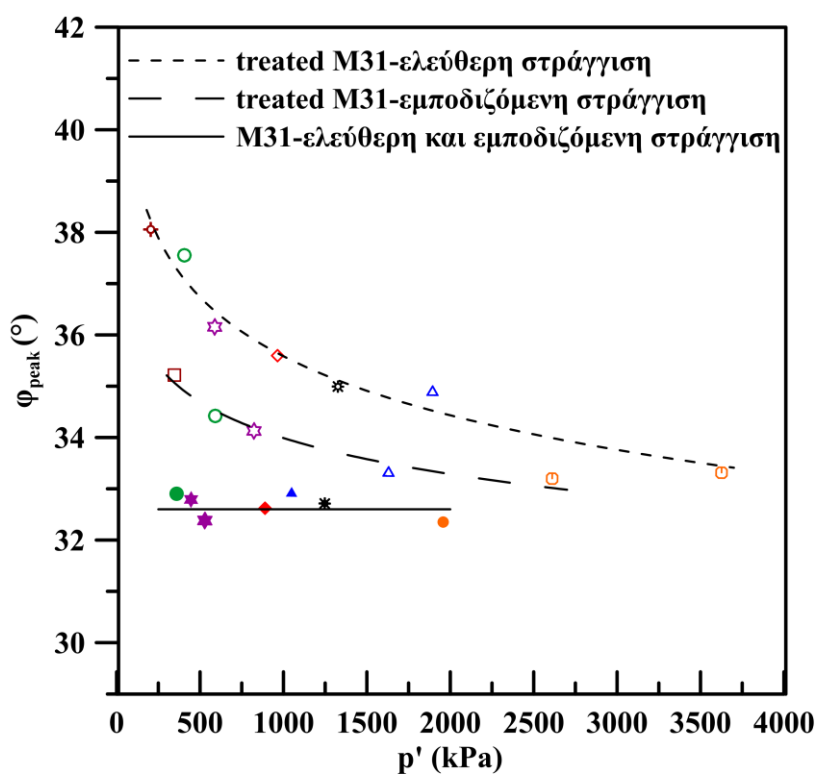
$$e_{cs} = \Gamma_{cs} - \lambda_{cs} * \ln \left(\frac{p'_{cs}}{p_a} \right)^\xi, p_a = 101kPa \quad (\text{X. S. Li \& Wang, 1998})$$

Εδαφικό υλικό	Γ_{cs}	λ_{cs}	ξ
M31	0.768	0.011	0.70
Σταθεροποιημένη M31 (CS=10%)	0.911	0.029	0.60

(α)

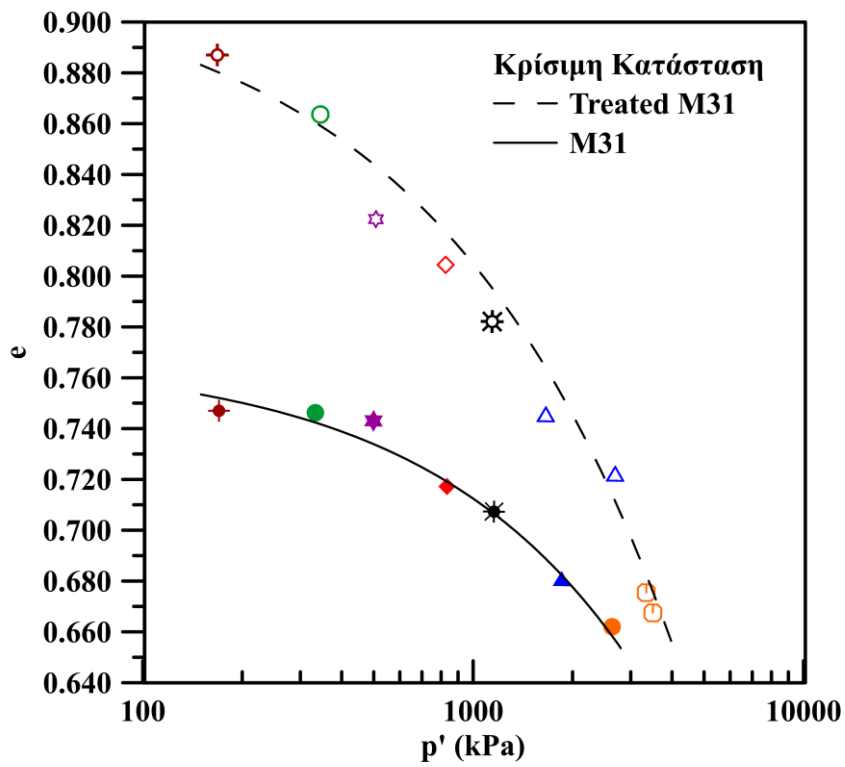


(β)

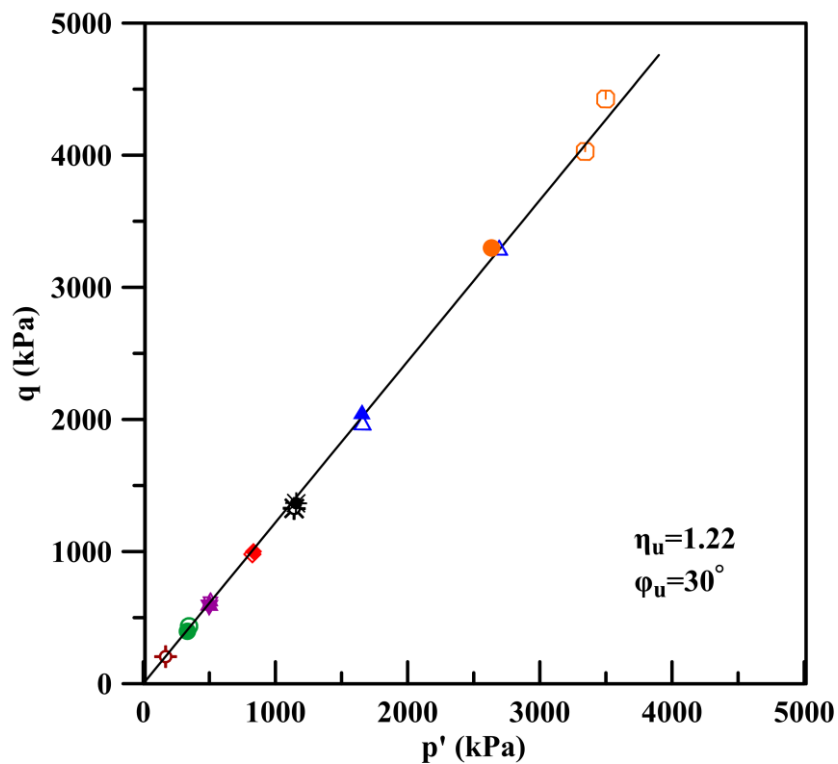


Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 στην κατάσταση μέγιστης αντοχής (peak): (α) $(q/p')_{max}$ - p' και (β) ϕ_{peak} - p'

(α)



(β)



Σχήμα 4.17: Κρίσιμη κατάσταση της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία: (α) $e-p'$ και (β) $q-p'$

4.5 Αποτελέσματα Δοκιμών Τριαξονικού Εφελκυσμού στην Άμμο M31 Πριν και Μετά τη σταθεροποίησή της με Κολλοειδή Πυριτία

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας και της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, η σταθεροποιημένη άμμος υπό τριαξονική θλίψη εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη αντοχή και πολύ έντονη διαστολικότητα που μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης, σε σχέση με τη φυσική άμμο. Ωστόσο, η επίδραση της ανισότροπης εσωτερικής δομής της φυσικής άμμου δε λαμβάνεται υπόψη και δεν έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία κατά την ανωτέρω σύγκριση. Ο όρος της ανισοτροπίας των εδαφικών υλικών αναφέρεται στην εξάρτηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς (αντοχή, διαστολικότητα, δυσμησία) από την διεύθυνση της φόρτισης λόγω της ανισότροπης δομής τους. Η προσανατολισμένη εσωτερική διάταξη των κόκκων και των κενών (fabric), δηλαδή η διάταξη των κόκκων, ο προσανατολισμός των διανυσμάτων που είναι κάθετα στις μεταξύ τους επιφάνειες επαφών, η κατανομή και ο προσανατολισμός των κενών σε συνδυασμό με τους δεσμούς σιμέντωσης μεταξύ των κόκκων (bonding) ορίζουν τη δομή του υλικού (J. Mitchell & Kenichi, 1976). Επομένως, κρίνεται χρήσιμο να διερευνηθεί η απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης και να μελετηθεί η επίδραση της ανισότροπης δομής της άμμου μέσω δύο ακραίων συνθηκών φόρτισης (τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης). Γι' αυτό το σκοπό, εκτελέστηκαν δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας CS=10%.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρής άμμου σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας CS=10%. Στη συνέχεια, τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του άτονου εδαφικού σκελετού. Μετά το πέρας του χρόνου ωρίμανσης (50hr), τα δοκίμια μεταφέρονται στην τριαξονική συσκευή. Επισημαίνεται ότι όλες οι τριαξονικές δοκιμές στην φυσική και σταθεροποιημένη άμμο, εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) $u_0=700$ kPa και μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων ή της εκροής/εισροής του νερού. Οι υψηλές τιμές αντιπίεσης είναι απαραίτητες για να αποφευχθεί η σπηλαίωση (cavitation) των σταθεροποιημένων δοκιμών στις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης. Η παράμετρος Skempton για όλα τα πειράματα μετρήθηκε $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμών. Για τη διεξαγωγή των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Οι δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης (strain control tests). Οι συσκευές και η πειραματική διαδικασία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

4.5.1 Συνθήκες Ελεύθερης Στράγγισης

Τα δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, $e_i = 0.737-0.742$. Μετά τη στερεοποίηση, τα δοκίμια άμμου αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 2 ώρες και η ταχύτητα φόρτισης ορίστηκε σε $0,3 \text{ mm/min}$. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια η αύξηση της ενεργού τάσης με επιβλήθηκε με ρυθμό $1,4 \text{ kPa/min}$ και στη συνέχεια αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 24 ώρες. Η ταχύτητα φόρτισης ορίστηκε σε $0,025 \text{ mm/min}$ εξαιτίας της μικρότερης υδραυλικής διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου. Για να μελετηθεί η επίδραση των συνθηκών φόρτισης παρουσιάζονται πλέον των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άμμου παρόμοιας πυκνότητας, πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία, σε μέση ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.8**.

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών εφελκυσμού και θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης για τη σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) και για τη φυσική άμμο (συνεχείς καμπύλες) με αρχική ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.18** σε όρους αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' (**Σχήμα 4.18 (α)**), αποκλίνουσας τάση- q - αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.18 (β)**), ογκομετρικής ε_{vol} - αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.18 (γ)**) και λόγου τάσεων q/p' (q : αποκλίνουσα τάση, p' : μέση ενεργός τάση)- αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.18 (δ)**).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου M31, παρατηρείται ότι η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή ενώ με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης προσεγγίζεται η αντοχή της άμμου στην τελική κατάσταση (**Σχήμα 4.18 (β)**). Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζεται πιο συστολική και στη συνέχεια σημαντικά πιο διαστολική από τη φυσική άμμο, πριν και μετά από το σημείο αλλαγής κατάστασης αντίστοιχα (**Σχήμα 4.18 (γ)**). Επισημαίνεται ότι το σημείο αλλαγής από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά (Phase Transformation point) στη σταθεροποιημένη άμμο επιτυγχάνεται σε μικρότερες αξονικές παραμορφώσεις από ότι στη φυσική άμμο M31. Επιπλέον, η χρήση κολλοειδούς πυριτίας επιφέρει αύξηση του λόγου τάσεων, q/p' , της άμμου έως και 19% στην κατάσταση μέγιστης αντοχής **Σχήμα 4.18 (δ)**.

Η επίδραση της ανισοτροπίας της εσωτερικής δομής της άμμου είναι εμφανής συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης. Υπό συνθήκες θλίψης, η φυσική άμμος εμφανίζει αυξημένη αντοχή με μέγιστη τιμή, $q_{max} = 500 \text{ kPa}$ έναντι της μέγιστης τιμής υπό εφελκυσμό, όπου $q_{max} = 150 \text{ kPa}$. Η ασθενέστερη απόκριση υπό εφελκυστική φόρτιση, συσχετίζεται με την αυξημένη συστολικότητα που εμφανίζεται, έως και 60% μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση

Κεφάλαιο 4: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων

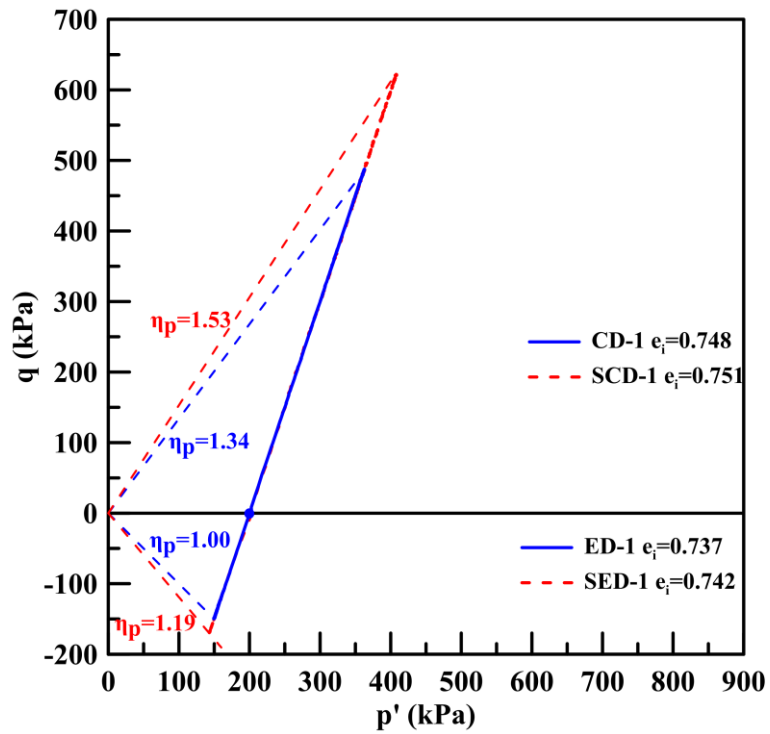
στο σημείο αλλαγής κατάστασης από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά σε σχέση με την τριαξονική θλίψη. Η ασθενέστερη απόκριση της άμμου υπό τριαξονικό εφελκυσμό έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία κυρίως βασιζόμενη σε τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (S. Miura & Toki, 1984; De Gennaro et al., 2004; Georgiannou, 2006). Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού στη σταθεροποιημένη άμμου αποδεικνύουν ότι η ανισότροπη δομή της άμμου κυριαρχεί και μετά τη σταθεροποίησή της, αφού η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει ασθενέστερη απόκριση υπό εφελκυστική φόρτιση. Συγκεκριμένα, η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μικρότερη αντοχή και είναι πιο συστολική υπό εφελκυστική φόρτιση σε σχέση με τη θλιπτική φόρτιση, όπως και η φυσική άμμος M31. Συγκριμένα ο μέγιστος λόγος τάσεων της σταθεροποιημένης άμμου M31 υπό θλιπτική φόρτιση είναι $q_{max}/p'=1.53$, ενώ μειώνεται αισθητά υπό εφελκυστική φόρτιση όπου αναπτύσσεται $q_{max}/p'=1.19$ (Σχήμα 4.18 (δ)).

Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31

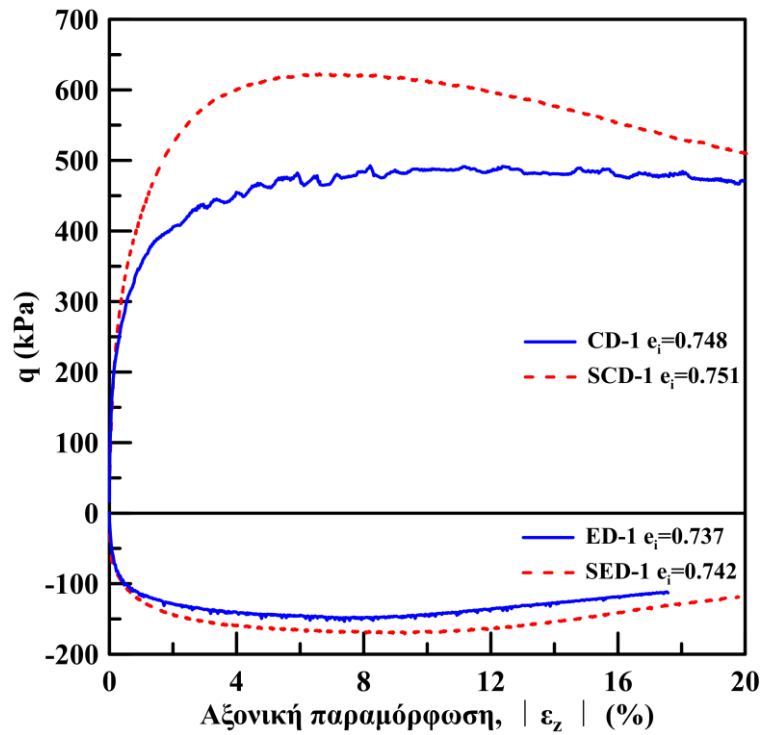
Πείραμα	Συνθήκες Φόρτισης	Δείκτης πόρων, e_i	Μέση ενεργός τάση, p'_i (kPa)	Σταθεροποίηση
ED-1	Εφελκυσμός	0.737	200	-
SED-1	Εφελκυσμός	0.742	200	T
CD-1	Θλίψη	0.748	200	-
SCD-1	Θλίψη	0.751	200	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

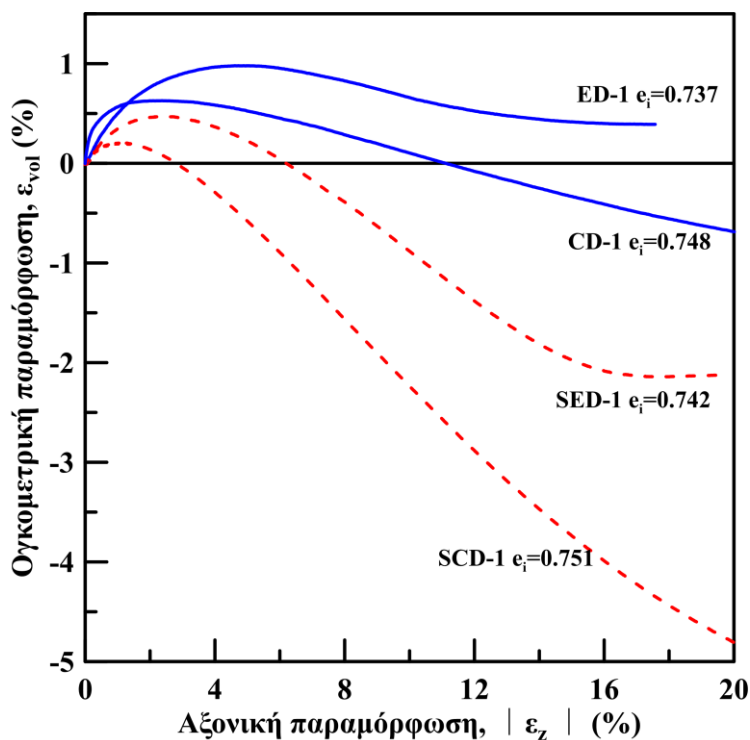
α)



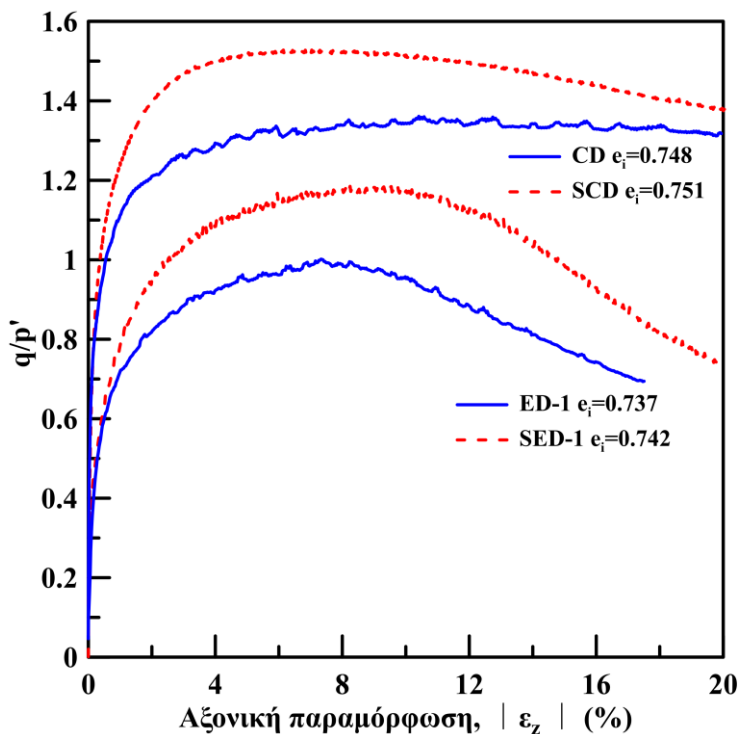
β)



γ)



δ)

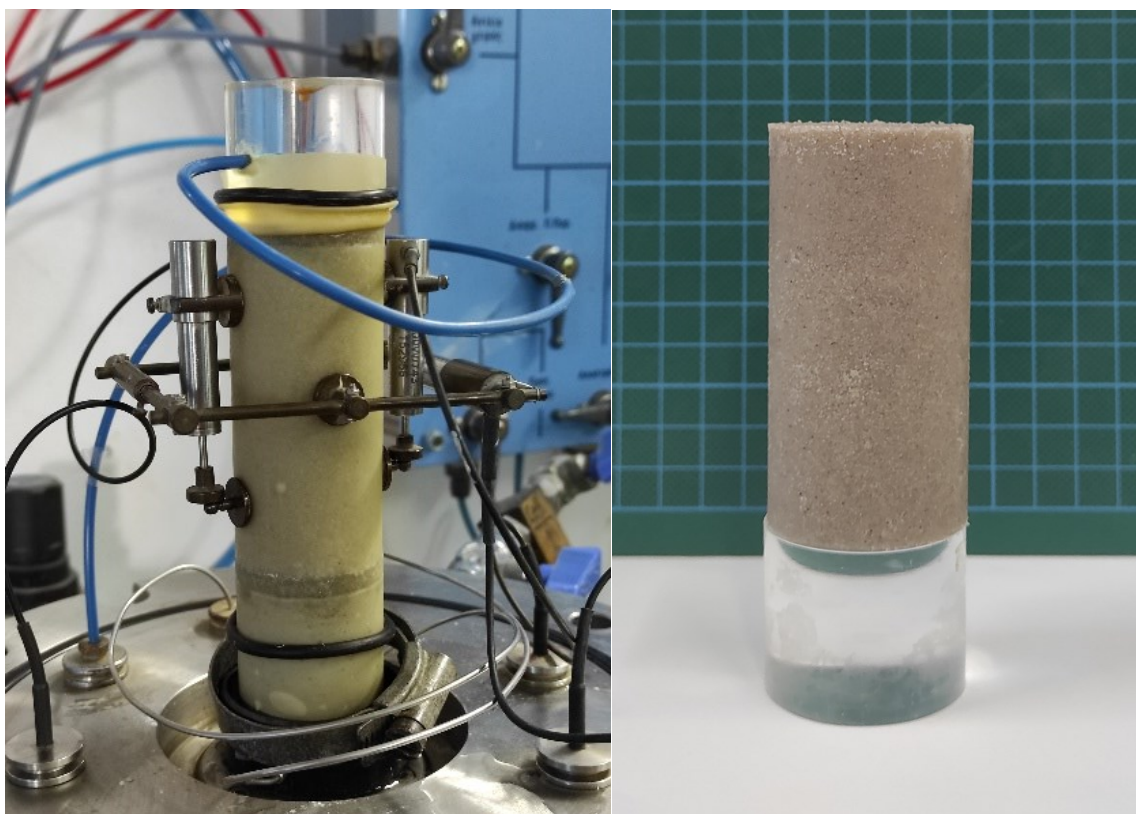


Σχήμα 4.18: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε φυσική (συνεχείς καμπύλες) και σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) άμμο M31: (α) ενεργές τασικές οδεύσεις, (β) αποκλίνουσα τάση- αξονική παραμόρφωση, (γ) ογκομετρική-αξονική παραμόρφωση και α) λόγος τάσεων-αξονική παραμόρφωση

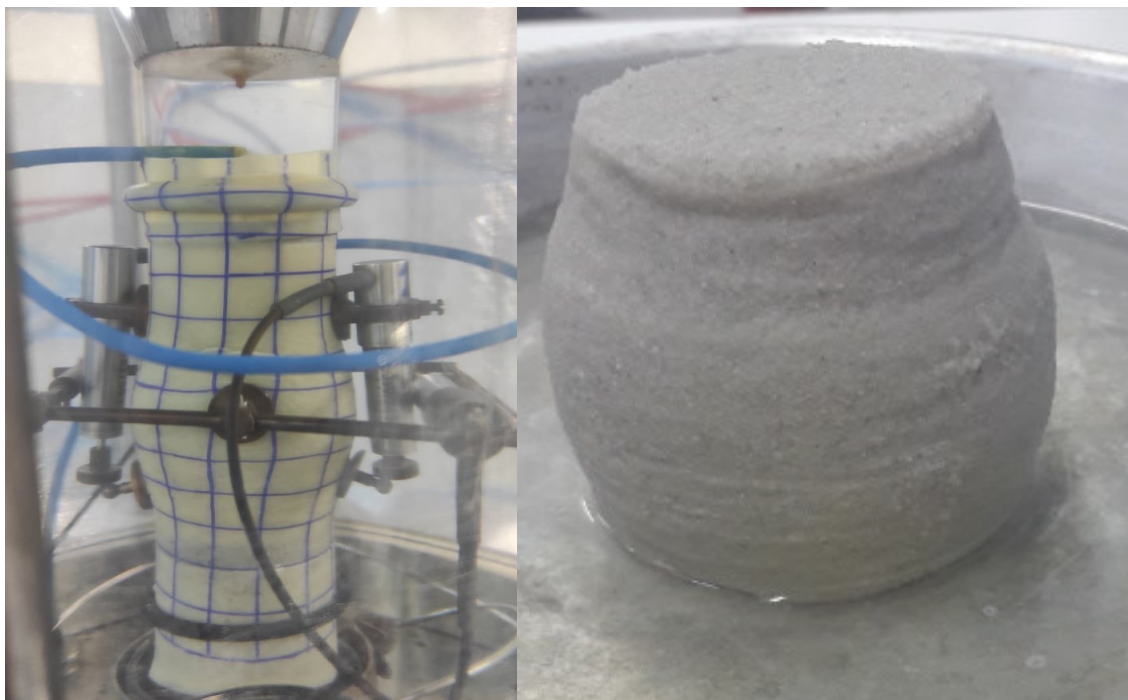
Μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής στα σταθεροποιημένα δοκίμια παρατηρείται ένας κλάδος χαλάρωσης (strain softening) που συνοδεύεται με την εμφάνιση διατμητικών επιπέδων (shear bands). Στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται φωτογραφίες σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία δοκιμίων άμμου M31, πριν την τριαξονική φόρτιση (**Σχήμα 4.19(α)**), μετά από αστοχία υπό τριαξονική θλίψη (**Σχήμα 4.19(β)**), και μετά από αστοχία υπό τριαξονικό εφελκυσμό (**Σχήμα 4.19(γ)**). Υπό τριαξονική θλίψη η αστοχία εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (bulging) που προσδίδει στο δοκίμιο μορφή βαρελιού όπως διαφαίνεται στη φωτογραφία στο τέλος του πειράματος σε αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z=35\%$ (**Σχήμα 4.19(β)**). Αντίθετα, υπό τριαξονικό εφελκυσμό η αστοχία εκδηλώθηκε με τη στένωση του δοκιμίου (necking) που προσδίδει στο δοκίμιο μορφή «λαιμού» όπως διαφαίνεται στη φωτογραφία στο τέλος του πειράματος σε αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z=25\%$ (**Σχήμα 4.19(γ)**). Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z < 20\%$ ώστε να περιοριστεί η επίδραση της ανομοιόμορφης κατανομής των παραμορφώσεων.

Συμπερασματικά, οι δοκιμές εφελκυσμού έχουν καθοριστική σημασία για την ερμηνεία της συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, εμφανίζοντας ένα βαθμό ανισοτροπίας παρόμοιο με αυτό της φυσικής άμμου. Συνεπώς, υποδεικνύεται ότι η ανισότροπη δομή της άμμου κυριαρχεί στο σύστημα άμμου-κολλοειδούς πυριτίας.

α)



β)



γ)



Σχήμα 4.19: Φωτογραφίες σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου M31: α) πριν την φόρτιση, β) μετά από τριαξονική θλίψη και γ) μετά από τριαξονικό εφελκυσμό

4.5.2 Συνθήκες Εμποδιζόμενης Στράγγισης

Τα δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$, με δείκτη πόρων στο τέλος της στερεοποίησης, $e_i = 0.744-0.760$. Μετά τη στερεοποίηση, τα δοκίμια άμμου αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 2 ώρες και η ταχύτητα φόρτισης ορίστηκε σε $0,3 \text{ mm/min}$. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια η αύξηση της ενεργού τάσης με επιβλήθηκε με ρυθμό $1,4 \text{ kPa/min}$ και στη συνέχεια αφέθηκαν υπό σταθερή ενεργό τάση για 24 ώρες. Η ταχύτητα φόρτισης ορίστηκε σε $0,025 \text{ mm/min}$ εξαιτίας της μικρότερης υδραυλικής διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου. Για να μελετηθεί η επίδραση των συνθηκών φόρτισης παρουσιάζονται και αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άμμου παρόμοιας πυκνότητας, πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία, σε μέση ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.9**.

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών εφελκυσμού και θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης για τη σταθεροποιημένη (διακεκομμένες καμπύλες) και για τη φυσική άμμο (συνεχείς καμπύλες) με αρχική ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.20** σε όρους αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' (**Σχήμα 4.20** (α)), αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.20** (β)), λόγου τάσεων q/p' (q :αποκλίνουσα τάση, p' : μέση ενεργός τάση)- αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.20** (γ)) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων Δu -αξονικής παραμόρφωσης ε_z (**Σχήμα 4.20** (δ)).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο φορτίσεων, η φυσική άμμος εμφανίζει τυπική ανισότροπη συμπεριφορά, αφού η εγγενής ανισοτροπία επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της. Συγκεκριμένα, η χαλαρή κορεσμένη άμμος υπό θλιπτική φόρτιση αναπτύσσει παροδικό μέγιστο (transient-peak state) δύο φορές μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό υπό εφελκυστική φόρτιση. Επιπρόσθετα, υπό εφελκυστική φόρτιση παρατηρείται έντονη ψαθυρή συμπεριφορά της άμμου, η οποία εκδηλώνεται με την πτώση της αντοχής, q , μετά το σημείο παροδικού μεγίστου (**Σχήμα 4.20** (β)) και με ταυτόχρονη συσσώρευση μονότονης διατμητικής παραμόρφωσης και υπερπίεσης του υγρού των πόρων (**Σχήμα 4.20** (δ)). Η πτώση της αντοχής οφείλεται στην εντονότερη ανάπτυξη της υπερπίεσης του ύδατος πόρων σε σχέση με τη θλιπτική φόρτιση. Ανεξάρτητα της φόρτισης, ο λόγος τάσεων, q / p' , αυξάνεται, δηλαδή το αμμώδες υλικό κρατύνεται με ταυτόχρονη μείωση των ενεργών τάσεων μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης πέραν του οποίου ανακτάται η αντοχή και οι καμπύλες στο διάγραμμα τασικών οδεύσεων προσεγγίζουν την περιβάλλουσα αστοχίας (**Σχήμα 4.20** (α)).

Η σταθεροποιημένη άμμος υπό θλιπτική φόρτιση λόγω της έντονης τάσης για διαστολή εμφανίζει λιγότερο ψαθυρή απόκριση συγκριτικά με την άμμο M31 παρόμοιας

πυκνότητας (**Σχήμα 4.20** (α)). Είναι αξιοσημείωτο ότι η σταθεροποιημένη άμμος διατηρεί την τάση της για διαστολή ακόμη και υπό εφελκυστική φόρτιση, εξαλείφοντας την ψαθυρή απόκριση. Επιπλέον, το σημείο αλλαγής από τη συστολική στη διαστολική συμπεριφορά επιτυγχάνεται σε μικρότερες αξονικές παραμορφώσεις από ότι στη φυσική άμμο M31 (**Σχήμα 4.20** (δ)). Ωστόσο, η ανισότροπη συμπεριφορά της άμμου διαφαίνεται και στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου, αφού αναπτύσσει υψηλότερες τιμές υπερπίεσης του υγρού των πόρων και λιγότερη τάση για διαστολή υπό εφελκυστική φόρτιση συγκριτικά με τη θλιπτική φόρτιση (**Σχήμα 4.20** (δ)). Επιπλέον, η ασθενέστερη απόκριση υπό εφελκυσμό διαφαίνεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά της σταθεροποιημένης άμμου, συγκεκριμένα στη χαμηλότερη αντοχή στο σημείο αλλαγής φάσης και στην κατάσταση κορυφαίας αστοχίας, όπως και στην περίπτωση της φυσικής άμμου (**Σχήμα 4.20** (γ)). Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον ίδιο λόγο τάσεων ως και την επίτευξη του μεγίστου, αναπτύσσονται σημαντικά μεγαλύτερες τιμές αξονικής παραμόρφωσης υπό εφελκυστική σε σχέση με τη θλιπτική φόρτιση. Η ασθενέστερη απόκριση παρατηρείται για τη φυσική και για τη σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό εφελκυσμό, διότι τότε ένα από τα επίπεδα στα οποία ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση γίνεται μέγιστος (maximum stress obliquity planes – επίπεδα οιονεί αστοχίας) τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης.

Η επίδραση των συνθηκών στράγγισης στη μηχανική απόκριση της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου εξετάζεται στο **Σχήμα 4.21** για συνθήκες τριαξονικής θλίψης και στο **Σχήμα 4.22** για συνθήκες τριαξονικού εφελκυσμού όπου παρουσιάζονται οι ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q - p' . Για τη φυσική άμμο παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα από τις συνθήκες στράγγισης αναπτύσσει μέγιστο λόγο τάσεων $\eta_p = (q/p')_{\max} \approx 1.34$ υπό θλιπτική φόρτιση (**Σχήμα 4.21**(α)) και $\eta_p = (q/p')_{\max} \approx 1.0$ υπό εφελκυστική φόρτιση (**Σχήμα 4.22**(α)). Σε αντίθεση με τη φυσική άμμο, η πολύ έντονη τάση για διαστολή της σταθεροποιημένης άμμου, έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε σχέση με τις συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Συγκεκριμένα, η σταθεροποιημένη άμμος M31 με αρχική ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$ που υποβλήθηκε σε τριαξονική θλίψη ανέπτυξε μέγιστο λόγο τάσεων $\eta_p \approx 1.53$ υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, ενώ υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης ανέπτυξε $\eta_p \approx 1.39$ (**Σχήμα 4.21**(β)). Ομοίως, η σταθεροποιημένη άμμος M31 με αρχική ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$ που υποβλήθηκε σε τριαξονικό εφελκυσμό ανέπτυξε μέγιστο λόγο τάσεων $\eta_p \approx 1.19$ υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, ενώ υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης ανέπτυξε $\eta_p \approx 1.03$ (**Σχήμα 4.22**(β)). Η διαστολή των δοκιμίων κατά την ελεύθερη στράγγιση φαίνεται να συνεισφέρει περισσότερο στη διατμητική αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου συγκριτικά με την τάση για διαστολή υπό αστράγγιστες συνθήκες. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μέγιστες τιμές των ογκομετρικών παραμορφώσεων της σταθεροποιημένης άμμου, που είναι προσεγγιστικά οι μισές από αυτές της φυσικής άμμου υπό θλιπτική και εφελκυστική φόρτιση (**Σχήμα 4.18**(γ)). Αντίθετα, οι διαφορές στις μέγιστες τιμές της υπερπίεσης του υγρού των πόρων της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου είναι μικρότερες υπό θλιπτική και

εφελκυστική φόρτιση (Σχήμα 4.20(δ)). Συνεπώς, υποδεικνύεται η ευεργετική δράση της διαστολής στη διατμητική αντοχή έναντι της τάσης για διαστολή στη διάτμηση υπό σταθερό όγκο υπό συνθήκες θλιπτικής και εφελκυστικής φόρτισης.

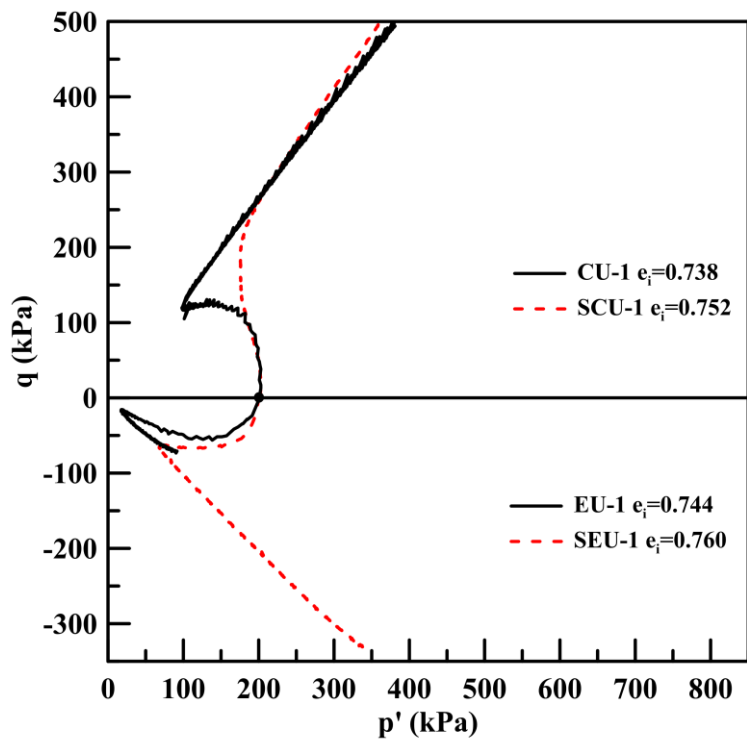
Συμπεραίνεται ότι οι δοκιμές εφελκυσμού έχουν καθοριστική σημασία για την ερμηνεία της συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου υπό συνθήκες ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης, υποδεικνύοντας ένα βαθμό ανισοτροπίας παρόμοιο με αυτό της φυσικής άμμου με την ανισότροπη δομή του αμμώδους σκελετού να κυριαρχεί στο σύστημα άμμου-κολλοειδούς πυριτίας. Η ασθενέστερη απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου υπό εφελκυσμό συμβάλλει στην ερμηνεία των δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης της βιβλιογραφίας σε σταθεροποιημένες άμμους. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία έχει παρατηρηθεί συσσώρευση αξονικών παραμορφώσεων στο εφελκυστικό τμήμα της ανακυκλικής φόρτισης (Porcino et al., 2012; Pavaloroulou & Georgiannou, 2021). Η ασθενέστερη απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου υπό εφελκυσμό, δηλαδή η ελαφρά πτώση της αντοχής υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, σε αντίθεση με τη συνεχή αύξηση της αποκλίνουσας τάσης, σ , υπό θλιπτική φόρτιση εξηγεί τα αποτελέσματα που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 4.9: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια άμμου M31

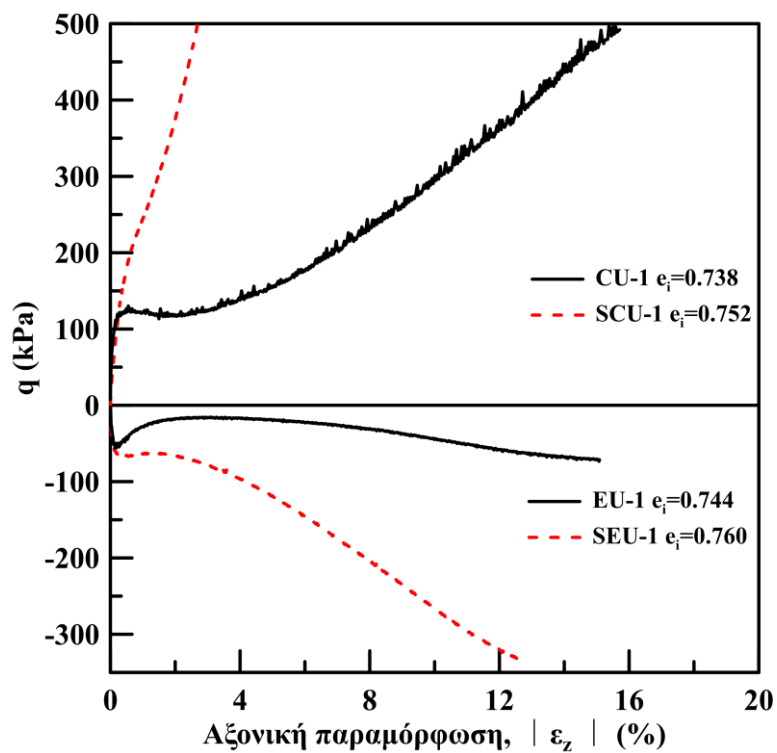
Πείραμα	Συνθήκες Φόρτισης	Δείκτης πόρων, e_i	Μέση ενεργός τάση, p'_i (kPa)	Σταθεροποίηση
EU-1	Εφελκυσμός	0.744	200	-
SEU-1	Εφελκυσμός	0.760	200	T
CU-1	Θλίψη	0.738	200	-
SCU-1	Θλίψη	0.752	200	T

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία

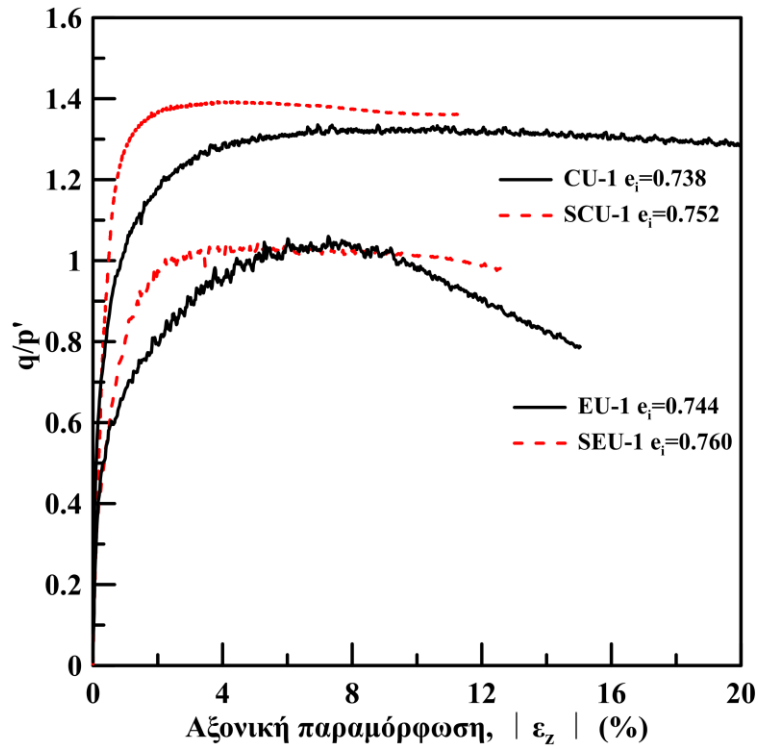
α)



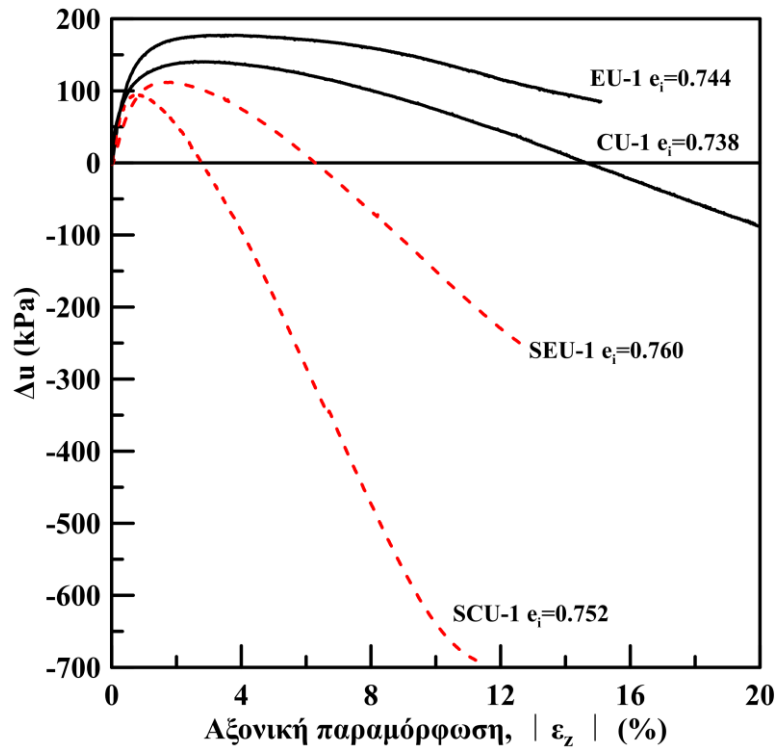
β)



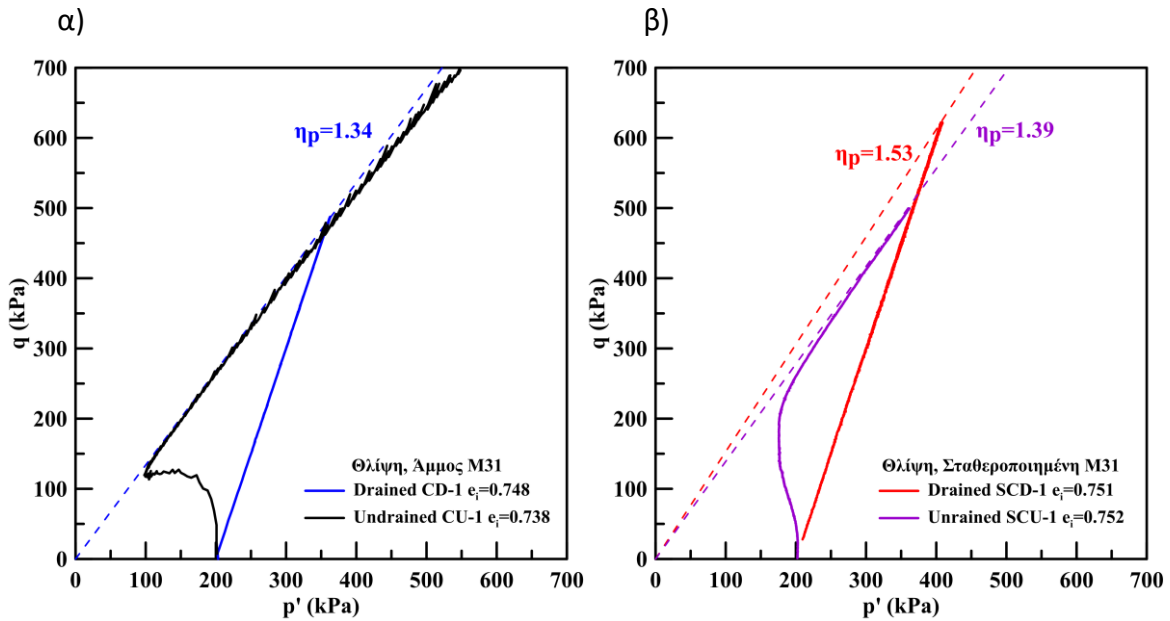
γ)



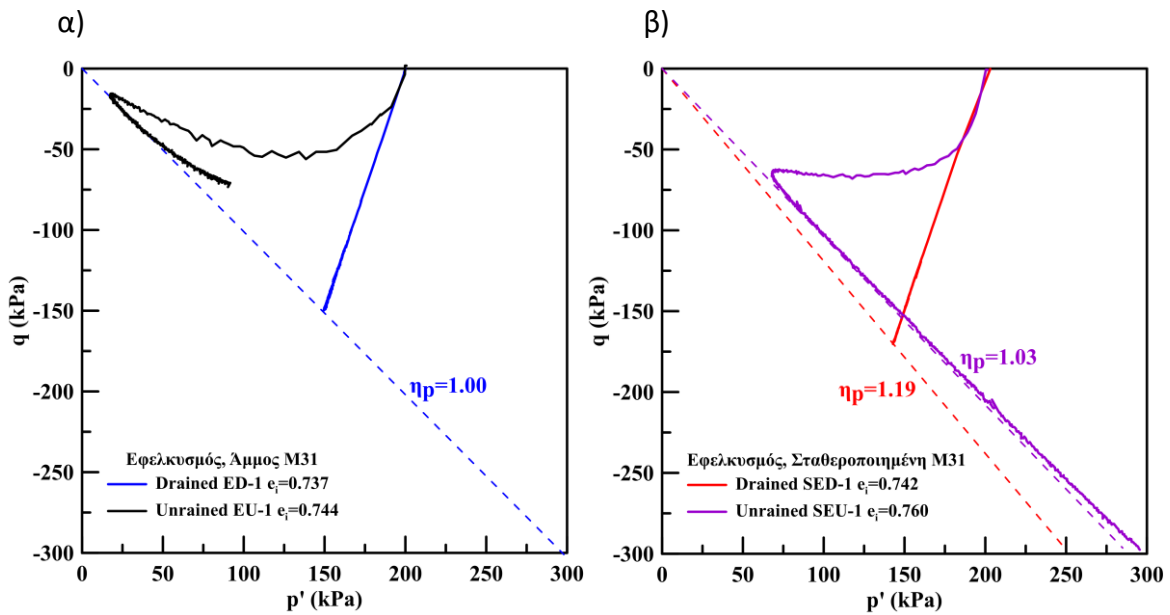
δ)



Σχήμα 4.20: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31:(α)ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q - p' , (β) αποκλίνουσα τάση-αξονική παραμόρφωση, (γ) λόγος τάσεων-αξονική παραμόρφωση (δ) υπερπίεση του υγρού των πόρων-αξονική παραμόρφωση



Σχήμα 4.21: Επίδραση των συνθηκών στράγγισης. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε (α) φυσική και (β)σταθεροποιημένη άμμο M31. Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q-p'



Σχήμα 4.22: Επίδραση των συνθηκών στράγγισης. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού σε (α) φυσική και (β)σταθεροποιημένη άμμο M31. Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q-p'

4.6 Προσδιορισμός τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυσστησίας (E_{sec}) της άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία

Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στην εδαφική δυσστησία, δηλαδή στην αντίσταση του εδάφους στην επιβαλλόμενη παραμόρφωση. Η άμμος παρουσιάζει έντονα μη γραμμική συμπεριφορά ακόμη, και για χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των τριαξονικών μονοτονικών δοκιμών για να υπολογιστεί το τέμνον μέτρο εδαφικής δυσστησίας (4-3).

$$E_{sec} = \frac{\Delta q}{\varepsilon_z}$$

(4-3)

Όπου, Δq : Η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης q

ε_z : η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβολή

Για τον υπολογισμό των αρχικών παραμορφώσεων στο εύρος $\varepsilon_z = 0,005-1\%$ κατά τη διάρκεια της μονοτονικής φόρτισης, τοπικοί μετρητές, LVDTs (linear variable displacement transducers), (RDP Electronics, Wolverhampton, UK), με διακριτότητα 1 μ τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά, στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Χρησιμοποιώντας τοπικούς μετρητές, τοποθετημένους πάνω στο δοκίμιο, αντί του εξωτερικού μετρητή, αποφεύγουμε σφάλματα στον υπολογισμό των παραμορφώσεων, που οφείλονται στην παραμορφωσιμότητα της ίδιας της συσκευής (π.χ. συμπίεση της μονάδας μέτρησης φορτίου, της κυψέλης, κλπ.), στην κλίση του δοκιμίου, στην ατελή επαφή δοκιμίου και άκρων και στην ανομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων λόγω των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλουν τα άκαμπτα και τραχέα άκρα. Για παραμορφώσεις $\varepsilon_z > 1\%$, όπου τα παραπάνω σφάλματα θεωρούνται αμελητέα στον υπολογισμό των αξονικών παραμορφώσεων, χρησιμοποιείται ο εξωτερικός μετρητής.

Το τέμνον μέτρο εδαφικής δυσστησίας υπολογίζεται από το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης, q , συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, ε_z , ως η κλίση της ευθείας που ενώνει την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων με την αρχή των αξόνων, για διάφορες τιμές αξονικής παραμόρφωσης. Έτσι, οι υπολογιζόμενες τιμές του μέτρου E_{sec} αποτελούν το λόγο της αποκλίνουσας τάσης προς την αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση.

Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση της σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας $CS=10\%$ στη δυσστησία της άμμου M31, μέσω μονοτονικών τριαξονικών δοκιμών θλίψης (ενότητα 5.4) και εφελκυσμού (ενότητα 5.5) υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του μέτρου δυσστησίας, E_{sec} , συνοψίζονται στον Πίνακα 4.10.

Στο **Σχήμα 4.23** φαίνεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσστησίας κανονικοποιημένου ως προς την τάση στερεοποίησης, E_{sec}/p'_i , συναρτήσει της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης ε_z , η οποία παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα, για τη φυσική (μπλε καμπύλες) και για σταθεροποιημένη (κόκκινες καμπύλες) άμμο M31, υπό συνθήκες ελεύθερης (συνεχείς καμπύλες) και εμποδιζόμενης (διακεκομμένες καμπύλες) στράγγισης όπως προέκυψε από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Η δυσστησία είναι έντονα μη γραμμική και άμεσα εξαρτημένη από την ενεργό τάση. Ωστόσο, η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης φαίνεται να απαλείφεται ικανοποιητικά μετά την κανονικοποίηση, αφού οι καμπύλες του κανονικοποιημένου ως προς την αρχική ενεργό τάση τέμνοντος μέτρου δυσστησίας για την άμμο M31, όπως και για τη σταθεροποιημένη άμμο M31, απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους. Είναι αξιοσημείωτο ότι η σταθεροποιημένη άμμος στην αρχή της διάτμησης, για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z < 0.1\%$, εμφανίζει μικρότερη δυσστησία σε σχέση με τη φυσική άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Συγκεκριμένα, για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z = 0.01\%$ παρατηρείται τιμή $E_{sec}/p'_i \approx 850$ για τη σταθεροποιημένη άμμο, ενώ για τη φυσική η τιμή είναι αυξημένη $E_{sec}/p'_i \approx 1430$. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αδύναμη γέλη του σταθεροποιητή φαίνεται να παρεμβαίνει στο μηχανισμό ανάληψης φορτίων του αμμώδους σκελετού κατά τη θλιπτική φόρτιση, μειώνοντας τη δυσστησία του υλικού. Η επίδραση της σταθεροποίησης στη μείωση της δυσστησίας της άμμου εξασθενεί με την αύξηση της παραμόρφωσης, αφού οι καμπύλες φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου συγκλίνουν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z > 0.1\%$ με τις τιμές δυσστησίας πρακτικά να ταυτίζονται. Υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, το κανονικοποιημένο τέμνον μέτρο δυσστησίας της σταθεροποιημένης άμμου είναι μικρότερο από αυτό της φυσικής άμμου M31. Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας της μετρήσεις δυσστησίας υπό διαφορετικές συνθήκες στράγγισης, παρατηρούμε ότι υπό εμποδιζόμενη στράγγιση οι τιμές του E_{sec}/p'_i είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης και για τη φυσική και για τη σταθεροποιημένη άμμο καθώς η φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι δυσμενέστερη.

Στο **Σχήμα 4.24** μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στη δυσστησία της χαλαρής άμμου M31 υπό μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης (C) και εφελκυσμού (E). Τα δοκίμια έχουν στερεοποιηθεί ισότροπα σε ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$ με εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e_i = 0.742 - 0.760$ και έχουν φορτιστεί υπό συνθήκες ελεύθερης (D, συνεχείς καμπύλες) και εμποδιζόμενης (U, διακεκομμένες καμπύλες) στράγγισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους τέμνοντος μέτρου δυσστησίας κανονικοποιημένου ως προς την τάση στερεοποίησης, E_{sec}/p'_i , και αξονικής παραμόρφωσης ε_z , η οποία παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Παρατηρούμε ότι η άμμος υπό θλιπτική φόρτιση και ελεύθερη στράγγιση (CD) εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερη δυσστησία σε σχέση με την εφελκυστική φόρτιση (ED) λόγω της ασθενέστερης δομής της στο οριζόντιο επίπεδο όπως προαναφέρθηκε και στα ανισότροπα χαρακτηριστικά αντοχής της. Όσον αφορά στη σταθεροποιημένη άμμο, σε σχέση με τη φυσική υπό τριαξονική θλίψη, η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει 30%

μικρότερη δυσμησία για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z=0.1\%$ με το ποσοστό να αυξάνει για μικρότερη παραμόρφωση. Υπό εφελκυστική φόρτιση, η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει μεγαλύτερο τέμνον μέτρο δυσμησίας από την άμμο για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z<0.1\%$, ενώ με την αύξηση της παραμόρφωσης οι καμπύλες φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου συγκλίνουν, όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση. Επιπρόσθετα, η σταθεροποιημένη άμμος υπό εφελκυστική φόρτιση εμφανίζει μικρότερη δυσμησία σε σχέση με αυτή υπό θλιπτική φόρτιση. Ενδεικτικά, 50% μικρότερη για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z=0.1\%$. Επομένως, η ανισότροπη δομή της άμμου κυριαρχεί πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με αποτέλεσμα την ασθενέστερη απόκρισή της ακόμη και στο αρχικό στάδιο της εφελκυστικής φόρτισης. Τέλος, υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης το τέμνον μέτρο δυσμησίας της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 είναι μικρότερο από την αντίστοιχη τιμή υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Η διαφορά των τιμών ανάμεσα στις δύο συνθήκες στράγγισης είναι πιο έντονη υπό θλιπτική φόρτιση.

Συμπερασματικά, όταν ο κοκκώδης σκελετός των χαλαρών δοκιμών έχει την τάση να συσταλεί στο αρχικό στάδιο της φόρτισης (πριν το σημείο αλλαγής φάσης), η παρουσία της γέλης δεν προσφέρει ιδιαίτερη βελτίωση των χαρακτηριστικών δυσμησίας του σταθεροποιημένου δοκιμίου, ενώ μπορεί να οδηγήσει και σε μικρότερη δυσμησία υπό θλιπτική φόρτιση. Γενικά στον εφελκυσμό σταθεροποιημένη και μη άμμος εμφανίζουν χαμηλότερη δυσμησία σε σχέση με την τριαξονική θλίψη με τη διαφορά σημαντικά μειωμένη στη σταθεροποιημένη άμμο όπου η παρουσία της γέλης φαίνεται να ενισχύει το ασθενές οριζόντιο επίπεδο απόθεσης των κόκκων της άμμου με τις ελειμματικές επαφές τους. Αντίθετα, κατά την τριαξονική θλίψη το δίκτυο επαφών των κόκκων στο ισχυρό κατακόρυφο επίπεδο φαίνεται να υπονομεύεται από την παρουσία της εύκολα τραυματιζόμενης γέλης.

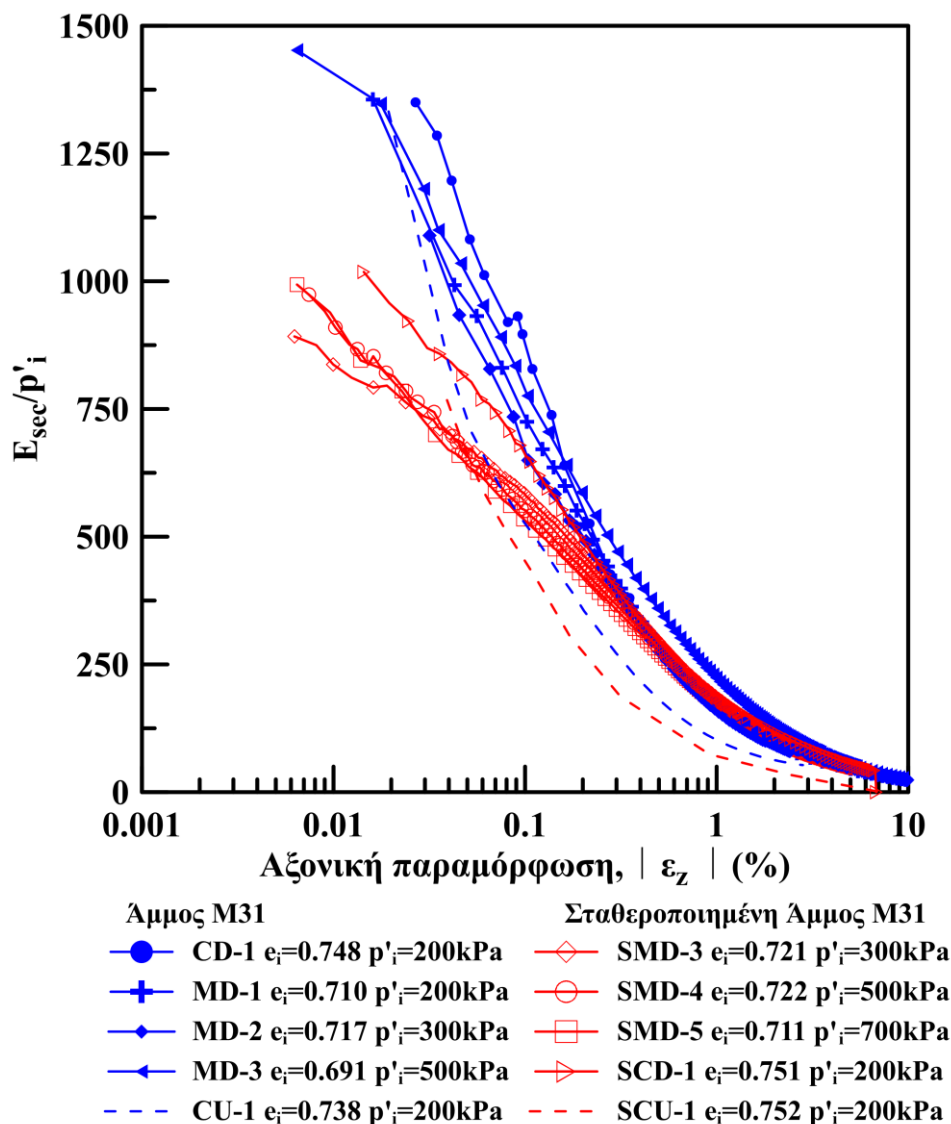
Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτρία δοκίμια άμμου M31

Πείραμα	Στράγγιση	Σταθεροποίηση	Συνθήκες Φόρτισης	e_i	p'_i (kPa)
CD-1	D	-	Θλίψη	0.748	200
MD-1	D	-	Θλίψη	0.710	200
MD-2	D	-	Θλίψη	0.717	300
MD-3	D	-	Θλίψη	0.691	500
CU-1	U	-	Θλίψη	0.738	200
SCD-1	D	T	Θλίψη	0.751	
SMD-3	D	T	Θλίψη	0.721	300
SMD-4	D	T	Θλίψη	0.722	500
SMD-5	D	T	Θλίψη	0.711	700
SCU-1	U	T	Θλίψη	0.752	200

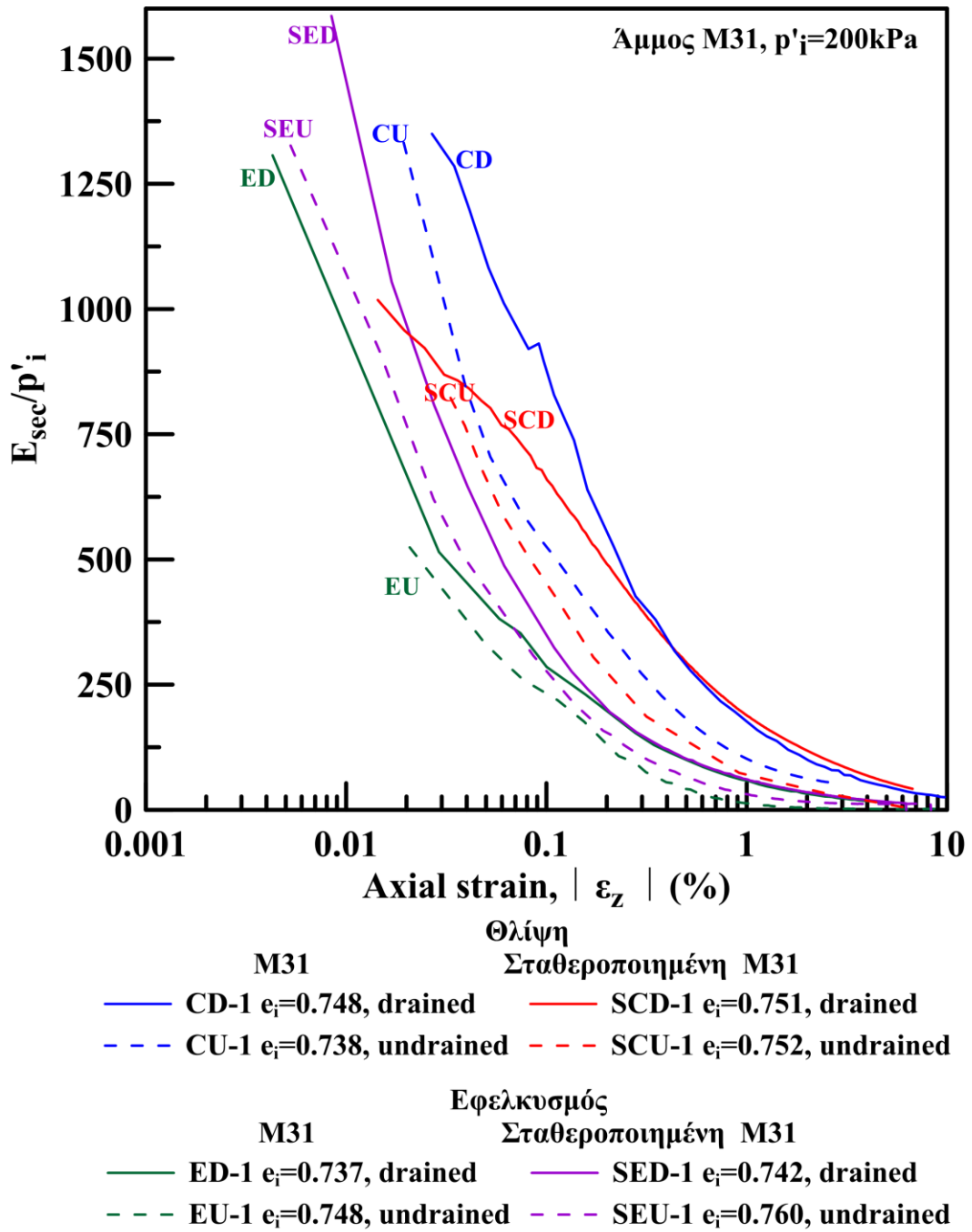
Κεφάλαιο 4: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στη Μονοτονική Συμπεριφορά Άμμων

ED-1	D	-	Εφελκυσμός	0.737	200
SED-1	D	T	Εφελκυσμός	0.742	200
EU-1	U	-	Εφελκυσμός	0.748	200
SEU-1	U	T	Εφελκυσμός	0.760	200

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 T, δοκίμιο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία



Σχήμα 4.23: Χαρακτηριστικά δυσμησίας συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (συνεχείς γραμμές) και εμποδιζόμενης στράγγισης (διακεκομμένες γραμμές)



Σχήμα 4.24: Χαρακτηριστικά δυσμησίας συναρτήσεως της αξονικής παραμόρφωσης της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού στην ίδια αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης ($p'_i=200\text{kPa}$)

Κεφάλαιο 5 : Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

5.1 Εισαγωγή

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στην ανωδομή, έως και την πλήρη αστοχία. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται όταν επιβάλλονται δυναμικές φορτίσεις υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, όπως οι σεισμικές διεγέρσεις, σε κορεσμένους μη συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς προκαλώντας τη ραγδαία αύξηση της πίεσης του υγρού των πόρων που οδηγεί σε συσσώρευση παραμορφώσεων και σε μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Τα καταστροφικά αποτελέσματα του φαινομένου της ρευστοποίησης, υλικές ζημιές και απώλειες ανθρώπινης ζωής, έχουν καταγραφεί από ερευνητές σε παλιότερους αλλά και σε πιο πρόσφατους σεισμούς (π.χ. Niigata 1964 (Seed & Idriss, 1967)), Kobe 1995 (Finn et al., 1996; Inagaki et al., 1996) Christchurch 2011 (Cubrinovski, 2011), Palu 2018 (Bradley et al., 2019) κ.λπ.).

Η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία που εισήχθη τις τελευταίες δεκαετίες (Gallagher, 2000) ως μέθοδος βελτίωσης του κοκκώδους εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών, βασίζεται στον εμπλουτισμό των πόρων του κορεσμένου εδάφους με το σταθεροποιητή αντικαθιστώντας το νερό, βελτιώνοντας τη μηχανική απόκριση του σταθεροποιημένου εδάφους, ώστε να περιορίσει τη συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων κατά τη ρευστοποίηση ή την «ανακυκλική κινητικότητα» (cyclic mobility) μετά από σεισμική φόρτιση.

Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές, ανακυκλικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες προκειμένου να προσδιοριστεί η αντίσταση του σταθεροποιημένου εδάφους, περιεκτικότητας CS=10%, στη ρευστοποίηση. Επειδή το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας έχει τη δυνατότητα να απορροφά και να αποβάλλει ελεύθερο νερό (Georgiannou et al., 2017), οι ανακυκλικές δοκιμές της διατριβής πραγματοποιήθηκαν με επιβολή υψηλής αντιπίεσης (back pressure) και ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων. Για να επιτευχθεί η ακριβής καταγραφή της μεταβολής της πίεσης του υγρού των πόρων, ιδιαίτερα στα σταθεροποιημένα δοκίμια που έχουν μικρότερη υδραυλική διαπερατότητα, επιλέχθηκαν δοκίμια ύψους 76mm, χρησιμοποιήθηκαν 2 μετρητές πίεσης συνδεδεμένοι με κορεσμένες σε νερό σωληνώσεις στο πάνω και στο κάτω μέρος του δοκιμίου και η περίοδος της ανακυκλικής φόρτισης ορίστηκε σε T=2.5 ή 5 min.

Κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, ο άξονας της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , αλλάζει κατεύθυνση ως προς την κατακόρυφο κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης. Συγκεκριμένα, η γωνία που σχηματίζει η κύρια τάση σ_1 ως προς την κατακόρυφο εναλλάσσεται μεταξύ των ακραίων τιμών $\alpha=0^\circ$ (θλίψη) και $\alpha=90^\circ$ (εφελκυσμός). Επιπρόσθετα, η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3)$, εναλλάσσεται μεταξύ των ακραίων τιμών $b=0$ (θλίψη) και $b=1$ (εφελκυσμός).

Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με έλεγχο της αξονικής τάσης. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται ο λόγος ανακυκλικής τάσης, CSR (Cyclic stress ratio), που ορίζεται ως ο λόγος της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης στο επίπεδο των 45° ($\pm q/2$) ως προς την τάση στερεοποίησης, p'_i (5-1).

$$CSR = \frac{q}{2 * p'_i} \quad (5-1)$$

Ο όρος ρευστοποίηση αναφέρεται στο μηδενισμό της ενεργού τάσης ($p'=0$), όταν αναπτύσσεται υπερπίεση πόρων ίση με την ολική τάση ($\Delta u=p$). Ο πρώτος στιγμιαίος μηδενισμός της ενεργού τάσης αναφέρεται ως “αρχική ρευστοποίηση” (initial liquefaction) της άμμου. Η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση ορίζεται είτε από τους κύκλους ανακυκλικής φόρτισης συγκεκριμένου εύρους τάσεων που απαιτούνται για την αρχική ρευστοποίηση, N_{il} , είτε από τους κύκλους ανακυκλικής φόρτισης συγκεκριμένου εύρους τάσεων που απαιτούνται για να αναπτυχθεί απόλυτη αξονική παραμόρφωση, $|e_{DA}|$, διπλού πλάτους (DA) καθορισμένης τιμής $N_{1\%}$ (για $|e_{DA}|=1.5\%$) ή $N_{2.5\%}$ (για $|e_{DA}|=2.5\%$). Ο όρος παραμόρφωση διπλού πλάτους αναφέρεται στη μέγιστη διαφορά σε παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου κύκλου φόρτισης (θλίψης και εφελκυσμού). Στην παρούσα διατριβή ορίζεται ως ανακυκλική παραμόρφωση e_{cyc} .

Στο κεφάλαιο αυτό υπολογίζεται ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης σε ρευστοποίηση, CRR_{15} (Cyclic Resistance Ratio), για την άμμο M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή της με κολλοειδή πυριτία. Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} , είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση του εδαφικού υλικού σε 15 κύκλους φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τυπικός αριθμός κύκλων σε πραγματικούς σεισμούς είναι $N=10-20$ για μέγεθος σεισμού M7.5 (Robertson & Wride, 1998). Επιπρόσθετα, αναλύεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων της άμμου M31 κατά την ανακυκλική φόρτιση και γίνεται προσπάθεια πρόβλεψής της μέσω θεωρητικών σχέσεων της βιβλιογραφίας.

Οι ανακυκλικές δοκιμές που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν σε χαλαρά, ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31, με και χωρίς τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας $CS=10\%$. Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων γίνεται προσπάθεια να καθοριστεί η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας με περιεκτικότητα σταθεροποιητή 10% κ.β. στην εξέλιξη της πίεσης

του υγρού των πόρων, στη συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης, στην αντίσταση στη ρευστοποίηση και στο μέτρο εδαφικής δυσμψιας.

5.2 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο M31. Επιλέχθηκαν αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης, γιατί η ανακυκλική φόρτιση της άμμου υπό εμποδιζόμενη στράγγιση είναι δυσμενέστερη, καθώς οδηγεί σε μείωση της ενεργού τάσης, σε αύξηση της ενδοσιμότητας και σε συσσώρευση παραμορφώσεων, ακόμη και για μικρή αύξηση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης της ξηρής άμμου σε νερό και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$ με εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e_i=0.710-0.724$. Επισημαίνεται ότι όλες οι τριαξονικές ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31, εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) $u_o=400\text{ kPa}$ και μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων. Η παράμετρος Skempton για όλα τα πειράματα μετρήθηκε $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμών. Για τη διεξαγωγή των τριαξονικών ανακυκλικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Οι ανακυκλικές δοκιμές που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress control tests).

Για να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης εκτελέστηκαν δοκιμές σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.11-0.20$. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.1**. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά κάποιες ενδεικτικές δοκιμές.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά δοκίμια άμμου M31

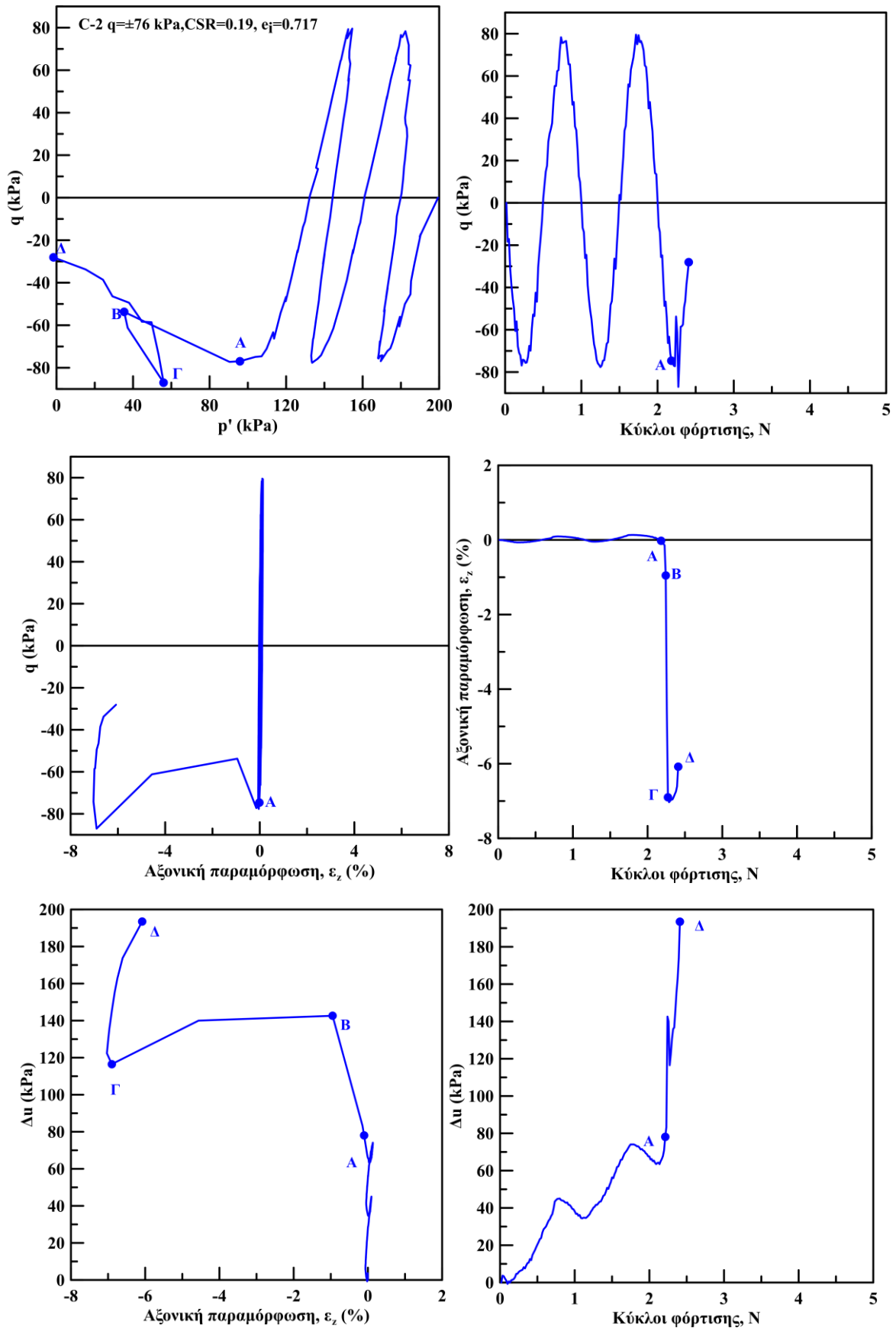
Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες					
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
C-1	0.722	200	0.20	5	1	1	1	1
C-2	0.717	200	0.19	5	2	2	2	2
C-3	0.715	200	0.16	5	5	5	5	5
C-4	0.720	200	0.13	5	9	9	9	9
C-5	0.724	200	0.12	2.5	21	21	21	21
C-6	0.710	200	0.11	2.5	85	85	85	85

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,
CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)
N_{IL}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για μηδενισμό ενεργού τάσης
N_{1%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=1\%$
N_{2.5%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=2.5\%$
N_{5%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=5\%$

Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στην άμμο M31 με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_i=0.717$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 76\text{ kPa}$ (C-2). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\epsilon_z -N$), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Παρατηρούμε ότι στους πρώτους 2 κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζει έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων. Κατά συνέπεια, η ενεργός τάση μειώνεται γρήγορα, με τη διαδρομή των ενεργών τάσεων να μετακινείται προς τα αριστερά. Ωστόσο, δραματική αλλαγή στην απόκριση της άμμου παρατηρείται στο 2^ο κύκλο φόρτισης, όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων που οδηγεί στο μηδενισμό της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση). Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται σημαντική αξονική παραμόρφωση και τελικά το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία. Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_z=1$ και 2.5% πραγματοποιούνται στον ίδιο κύκλο, δηλαδή $N_{IL}=N_{1\%}=N_{2.5\%}=2$. Συνεπώς, το δοκίμιο που φορτίζεται με μεγάλη ανακυκλική τάση ($q=\pm 76\text{ kPa}$), απαιτεί μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης για να αστοχήσει. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (αρχική ρευστοποίηση, επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_z=1\%$ και $\epsilon_z=2.5\%$) και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Μετά το σημείο A, όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, το δοκίμιο αρχικά παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος AB), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ) και τελικά οδηγείται στην αστοχία (κλάδος ΓΔ) με ταυτόχρονη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο A), αλλά και όταν τελικά το δοκίμιο ρευστοποιείται (σημείο Γ), η αποκλίνουσα τάση, q , αλλάζει κατεύθυνση από εφελκυσμό σε θλίψη. Η ασταθής συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης της φόρτισης υποδηλώνει την έντονα ανισότροπη συμπεριφοράς που οφείλεται στη δομή (fabric) του υλικού.

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

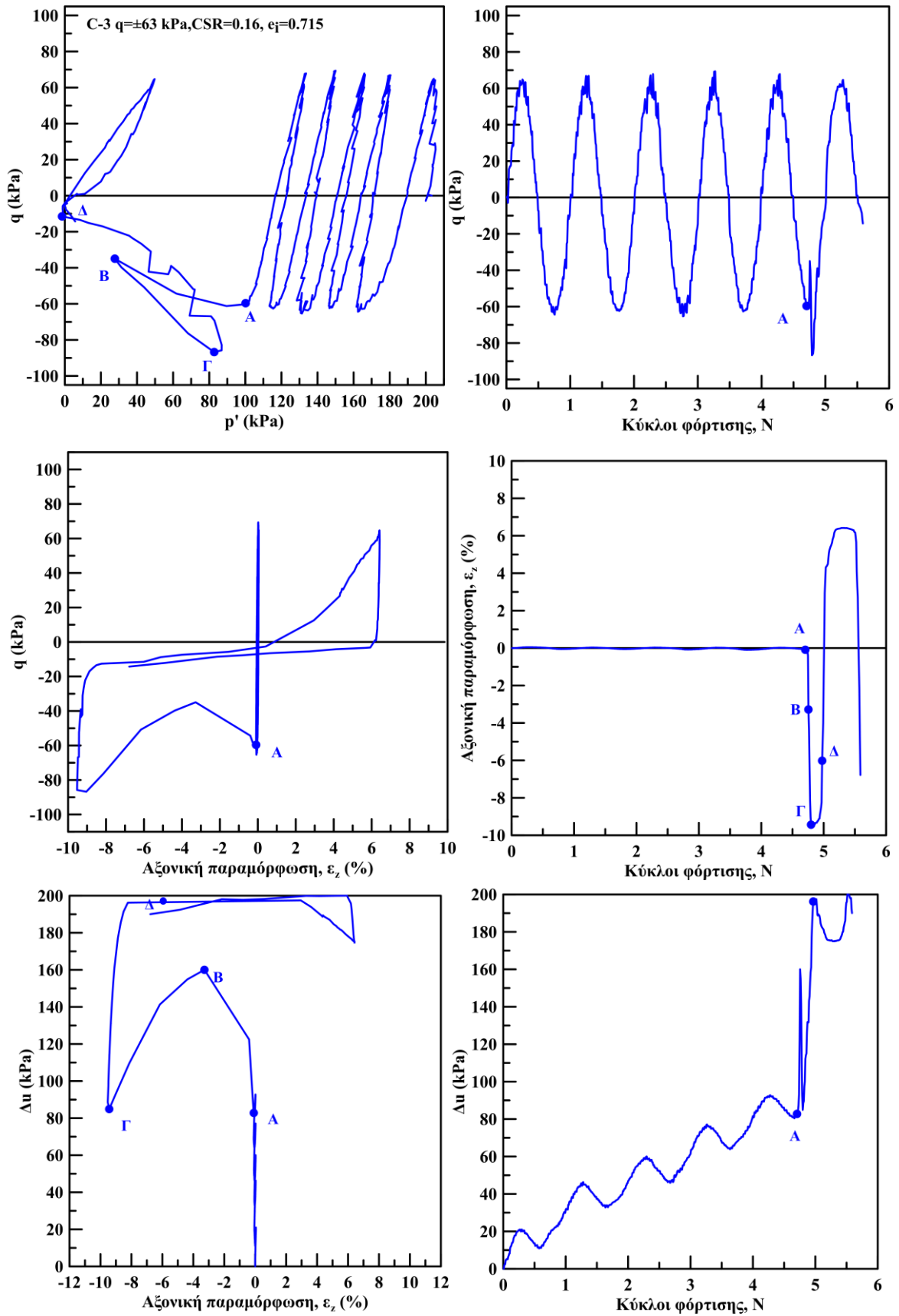


Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 76 \text{ kPa}$

Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στην άμμο M31 με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_i=0.715$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 63\text{ kPa}$ (δοκιμή C-3). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\varepsilon_z -N$), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Παρατηρούμε ότι στους πρώτους 4 κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζει έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων. Κατά συνέπεια, η ενεργός τάση μειώνεται γρήγορα, με τη διαδρομή των ενεργών τάσεων να μετακινείται προς τα αριστερά. Ωστόσο, δραματική αλλαγή στην απόκριση της άμμου παρατηρείται στο τέλος του 4^{ου} κύκλου όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων, από $R_u=0.4$ σε $R_u=1$ ($R_u=\Delta u/p'_i$), που οδηγεί στο μηδενισμό της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση). Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται σημαντική αξονική παραμόρφωση και τελικά το δοκίμιο αστοχεί. Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1$ και 2.5% πραγματοποιούνται σχεδόν ταυτόχρονα, δηλαδή $N_{1L}=N_{1\%}=N_{2.5\%}=5$. Συνεπώς, το δοκίμιο που φορτίζεται με σχετικά μεγάλη ανακυκλική τάση ($q=\pm 63\text{ kPa}$), απαιτεί μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης για να αστοχήσει. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (αρχική ρευστοποίηση, επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$) και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31 παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Μετά το σημείο A, όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, αρχικά το δοκίμιο παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος AB), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ) και τελικά οδηγείται στην αστοχία (κλάδος ΓΔ) με ταυτόχρονη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο A), αλλά και όταν τελικά το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία (σημείο Γ), η αποκλίνουσα τάση, q , αλλάζει κατεύθυνση από εφελκυσμό σε θλίψη. Η ασταθής συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης της φόρτισης υποδηλώνει την έντονα ανισότροπη συμπεριφοράς που οφείλεται στην ανισότροπη εσωτερική δομή του υλικού που είναι σημαντική και υπό ανακυκλική φόρτιση.

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

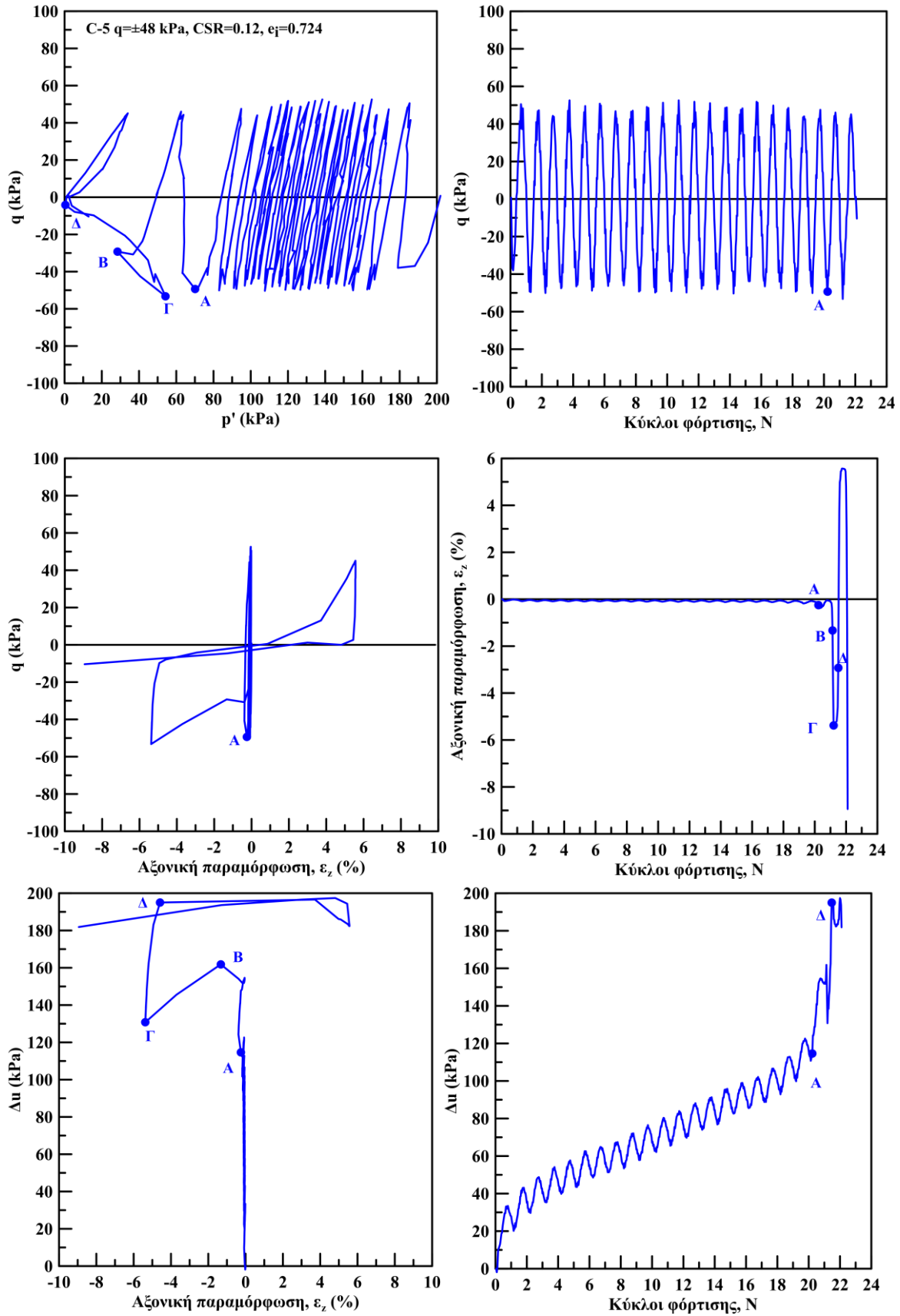


Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 63$ kPa

Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στην άμμο M31 με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_i=0.724$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 48\text{ kPa}$ (δοκιμή C-5). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (ε_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Παρατηρούμε ότι στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζει έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων. Κατά συνέπεια, η ενεργός τάση μειώνεται, με τη διαδρομή των ενεργών τάσεων να μετακινείται προς τα αριστερά. Ωστόσο, δραματική αλλαγή στην απόκριση της άμμου παρατηρείται στον 21^ο κύκλο, όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων, από $R_u=0.55$ σε $R_u=1$ ($R_u=\Delta u/p'_i$), δηλαδή μηδενισμός της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση). Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται σημαντική αξονική παραμόρφωση και τελικά το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία. Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$ πραγματοποιούνται στον ίδιο κύκλο, δηλαδή $N_{1\%} \approx N_{2.5\%} \approx 21$. Συνεπώς, το δοκίμιο που φορτίζεται με μικρότερη ανακυκλική τάση ($q=\pm 48\text{ kPa}$), απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης για να αστοχήσει. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (αρχική ρευστοποίηση, επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$) και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31 παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Μετά το σημείο A, όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, αρχικά το δοκίμιο παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος AB), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ), οδηγείται στην αρχική ρευστοποίηση (κλάδος ΓΔ) και με τη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης οδηγείται στην κατάρρευση. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο A), αλλά και όταν τελικά το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία (σημείο Γ), η αποκλίνουσα τάση, q , αλλάζει κατεύθυνση από εφελκυσμό σε θλίψη. Η ασταθής συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης της φόρτισης υποδηλώνει την έντονα ανισότροπη συμπεριφορά που οφείλεται στην ανισότροπη εσωτερική δομή του..

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

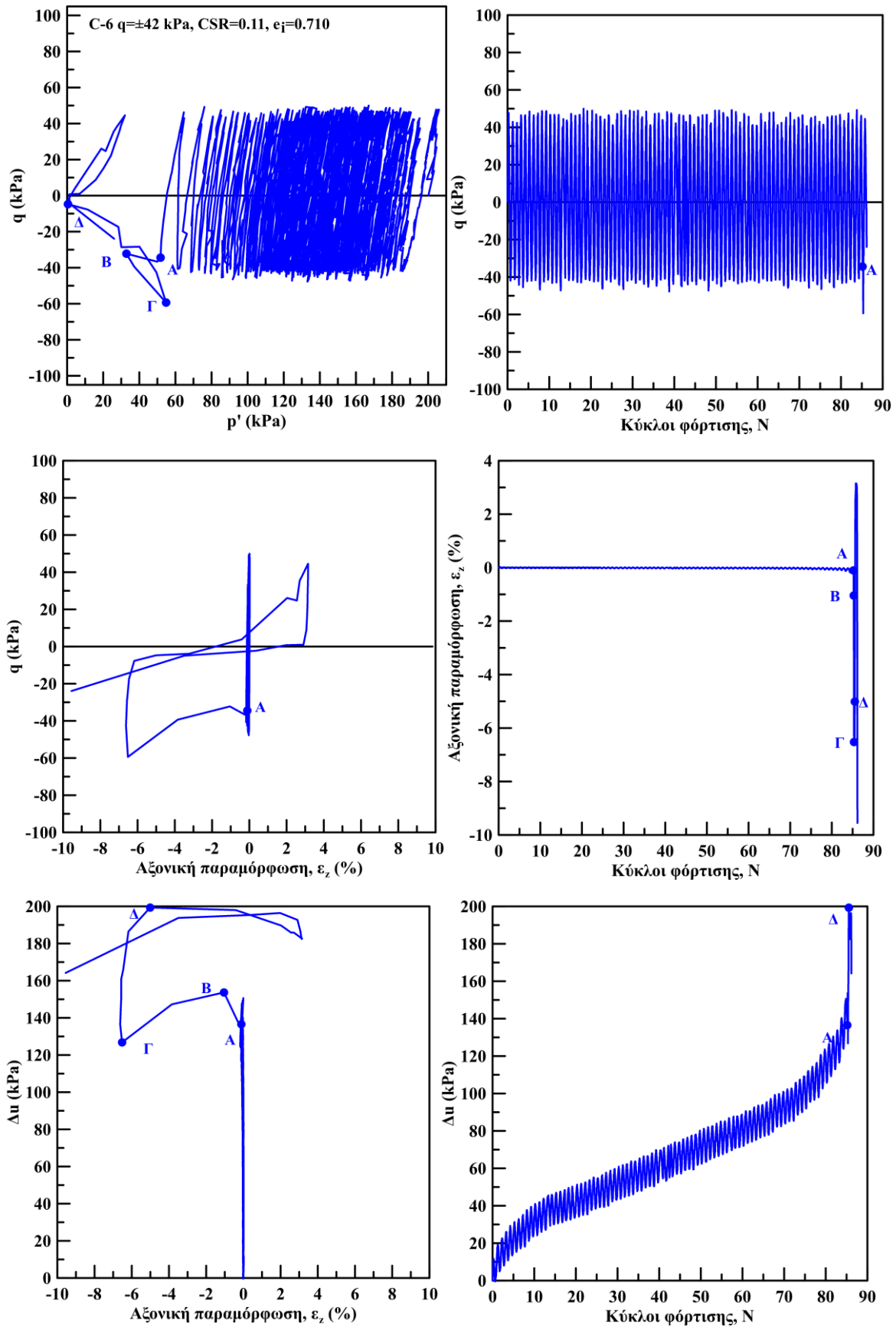


Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 48$ kPa

Στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στην άμμο M31 με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_i=0.710$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 42\text{ kPa}$ (δοκιμή C-6). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (ε_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Παρατηρούμε ότι στους πρώτους 84 κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζει έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων. Κατά συνέπεια, η ενεργός τάση μειώνεται σταδιακά, με τη διαδρομή των ενεργών τάσεων να μετακινείται προς τα αριστερά. Ωστόσο, δραματική αλλαγή στην απόκριση της άμμου παρατηρείται στον 85^ο κύκλο, όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων, από $R_u=0.68$ σε $R_u=1$ ($R_u=\Delta u/p'_i$), δηλαδή μηδενισμός της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση). Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται σημαντική αξονική παραμόρφωση και τελικά το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία. Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$ πραγματοποιούνται στον ίδιο κύκλο, δηλαδή $N_{1L} \approx N_{1\%} \approx N_{2.5\%} \approx 85$. Συνεπώς, το δοκίμιο που φορτίζεται με τη μικρότερη ανακυκλική τάση ($q=\pm 42\text{ kPa}$), απαιτεί μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης για να αναπτύξει σημαντική παραμόρφωση, να μηδενιστεί η ενεργός τάση του και να αστοχήσει. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31 παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Ομοίως με τις προηγούμενες δοκιμές με τις μεγαλύτερες επιβαλλόμενες ανακυκλικές τάσεις, μετά το σημείο A όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, αρχικά το δοκίμιο παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος AB), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ), οδηγείται στην αρχική ρευστοποίηση (κλάδος ΓΔ) και με τη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης οδηγείται στην κατάρρευση. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο A), αλλά και όταν τελικά το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία (σημείο Γ), η αποκλίνουσα τάση, q , αλλάζει κατεύθυνση από εφελκυσμό σε θλίψη. Η ασταθής συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης της φόρτισης υποδηλώνει την έντονα ανισότροπη συμπεριφοράς που οφείλεται στην ανισότροπη εσωτερική δομή του υλικού που είναι σημαντική και υπό ανακυκλική φόρτιση. Συμπερασματικά, όσο μειώνεται το πλάτος της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης q , ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την έναρξη της ασταθούς συμπεριφοράς και την ανάπτυξη των παραμορφώσεων αυξάνει (σημείο A). Ωστόσο, ανεξαρτήτου μεγέθους της ανακυκλικής τάσης, μετά το σημείο A, η χαλαρή άμμος M31 ακολουθεί το ίδιο μοτίβο συμπεριφοράς, δηλαδή, στον ίδιο κύκλο μηδενίζεται η ενεργός τάση, αναπτύσσεται αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z=1\%$ και 2.5% , και το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία.

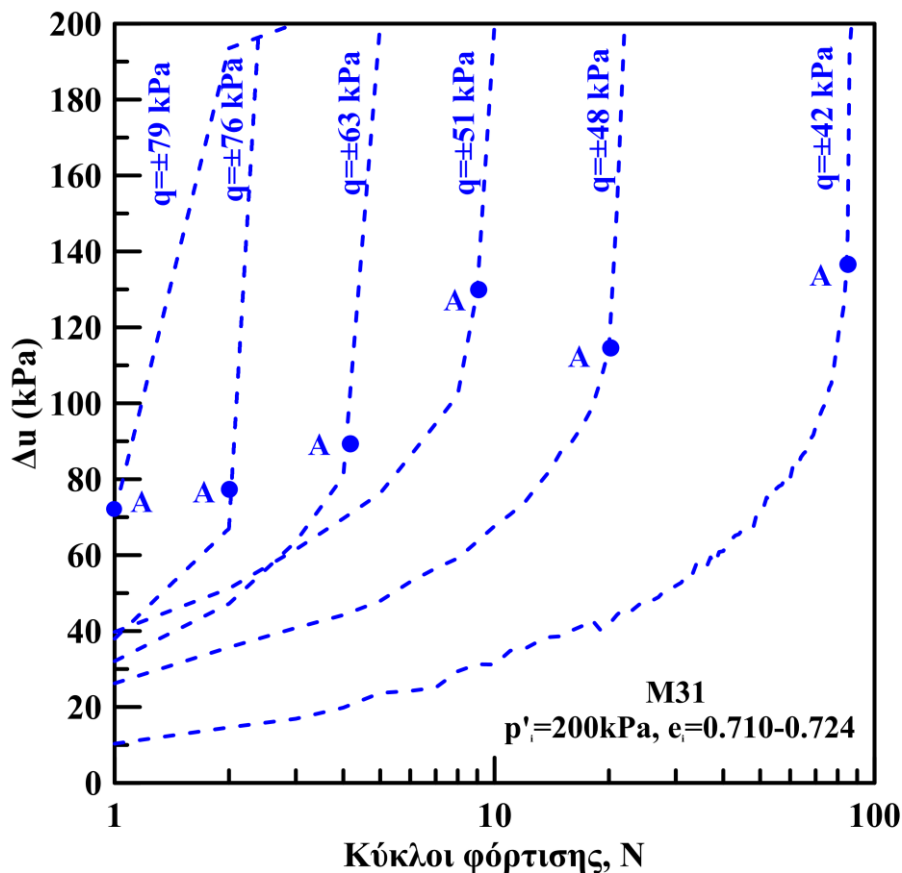
Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων



Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 42$ kPa

5.3 Μηχανισμός ανάπτυξης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση άμμου M31

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31. Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση q μηδενίζεται. Η υπερπίεση πόρων αυξάνεται σταδιακά, με σχετικά γρήγορο ρυθμό, έως το σημείο A, όπου εντοπίζεται ένα μεγάλο "άλμα". Στη συνέχεια, αλλάζει έντονα η συμπεριφορά των δοκιμών και αρχίζει η συσσώρευση της παραμόρφωσης, οπότε και ο μηχανισμός της εξέλιξης των υπερπίεσεων πόρων αλλάζει δραστικά. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων, πριν από την απότομη μεταβολή, αυξάνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q . Αναφέρεται ότι για τη δοκιμή C-1 με $q=\pm 79$ kPa το σημείο A εντοπίζεται στον 1^ο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια ρευστοποιείται. Επιπρόσθετα, όσο μειώνεται η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση, q , απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για την ανάπτυξη υπερπίεσης ίση με την αρχική ενεργό τάση ($\Delta u=p'_i=200$ kPa) και την «αρχική ρευστοποίηση».



Σχήμα 5.5: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου M31

Έχει παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία (DeAlba et al. 1975, Seed et al. 1976, Seed and Booker 1977, Polito et al., 2008) ότι η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσκει των κύκλων φόρτισης ως προς τους κύκλους που απαιτούνται για αρχική ρευστοποίηση, N/N_{IL} , στις ανακυκλικές δοκιμές άμμων είναι κοινή για ένα εύρος ανακυκλικής τάσης και πυκνότητας. Στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών δοκιμών, εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο M31 σε όρους κανονικοποιημένης υπερπίεσης πόρων ως προς την ενεργό τάση, $\Delta u/p'_i$, συναρτήσκει των κύκλων φόρτισης ως προς τους απαιτούμενους κύκλους για εκδήλωση αρχικής ρευστοποίησης, N/N_{IL} . Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση (q) μηδενίζεται. Τα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου, με αρχικό δείκτη πόρων $e_i=0.710-0.724$, φορτίστηκαν σε εύρος αποκλίνουσας τάσης $q=\pm 42-79$ kPa. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες ανεξαρτήτως επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης πρακτικά συμπίπτουν. Αρχικά, ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνεται σημαντικά, στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησης ελαττώνεται και τελικά παρουσιάζει ξανά σημαντική αύξηση κατά την έναρξη της ασταθούς συμπεριφοράς, όταν ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N πλησιάσει την οριακή τιμή N_{IL} (αρχική ρευστοποίηση). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνεται να προσομοιώνονται από μία καμπύλη με αρχικά κυρτό και στη συνέχεια κοίλο σχήμα, σχήμα «S».

Οι Seed et al. (1975) ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση για την πρόβλεψη του ρυθμού ανάπτυξης υδατικών υπερπίεσεων λόγω ανακυκλικής φόρτισης σε σχέση με τον τρέχοντα κύκλο φόρτισης κανονικοποιημένο προς το συνολικό αριθμό κύκλων για τη ρευστοποίηση, εξίσωση (5-2). Αργότερα, οι Booker et al. (1976) πρότειναν μια πιο απλουστευμένη εξίσωση (5-3). Η εξίσωση αυτή τροποποιήθηκε για τη βέλτιστη προσομοίωση των αποτελεσμάτων της άμμου M31 (5-4) και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.6**. Παρατηρούμε ότι η πρόβλεψη είναι αρκετά ικανοποιητική.

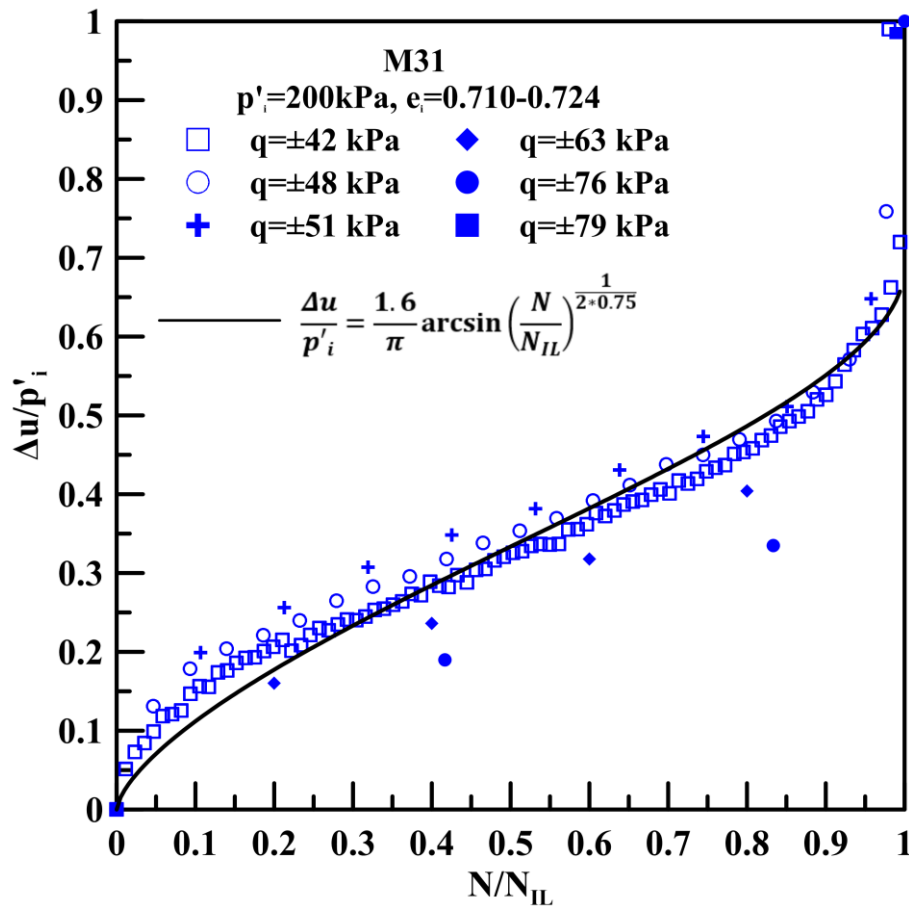
$$\frac{\Delta u}{p'_i} = 0.5 + \frac{1}{\pi} \arcsin\left(2 * \left(\frac{N}{N_{IL}}\right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1\right) \quad (5-2)$$

$$\frac{\Delta u}{p'_i} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_{IL}}\right)^{\frac{1}{2*\alpha}} \quad (5-3)$$

Όπου: Δu , υπερπίεση του υγρού των πόρων στο τέλος του κάθε κύκλου φόρτισης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 N , τρέχων κύκλος φόρτισης
 N_{IL} , αριθμός κύκλων φόρτισης για ανάπτυξη ρευστοποίησης
 α , εμπειρική παράμετρος

$$\frac{\Delta u}{p'_i} = \frac{1.6}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_{IL}} \right)^{\frac{1}{2 \cdot 0.75}}$$

(5-4)



Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών: Κανονικοποιημένες καμπύλες $\Delta u/p'_i$ - N/N_{IL} άμμου M31, με $p'_i=200\text{kPa}$, $e_i=0.711-0.731$ και $q=\pm 42-79\text{ kPa}$

Αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να προβλέψουν την εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση μη συνεκτικών εδαφών, καθώς η συσσώρευση υπερπίεσεων είναι ο μηχανισμός που οδηγεί το έδαφος στη ρευστοποίηση (Ishibashi et al., 1977; Polito et al., 2008; Konstadinou & Georgiannou, 2014). Η εξίσωση των Ishibashi et al. (1977) ξεχώρισε καθώς υιοθετήθηκε από πολλούς ερευνητές μετέπειτα (Krishnaswamy & Thomas I. N., 1995; Georgiannou & Tsomokos, 2008). Συγκεκριμένα οι Ishibashi et al. (1977), χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της υπερπίεσης

του υγρού των πόρων στο τέλος κάθε κύκλου ανακυκλικής φόρτισης δοκιμίων χαλαρής άμμου Ottawa, δημιούργησαν μια εξίσωση που προβλέπει την προσαύξηση της υπερπίεσης πόρων συναρτήσει της ιστορίας φόρτισης (H), του αριθμού των κύκλων (\bar{N}), και της εφαρμοζόμενης ανακυκλικής τάσης (I) (5-5),(5-6).

$$\Delta U_N^* = (1 - U_{N-1}^*) * \left(\frac{C_1 * N}{N^{C_2} - C_3} \right) * \left(\frac{\tau_N}{\sigma'_{N-1}} \right)^n \quad (5-5)$$

$$\rightarrow \Delta U_N^* = H * \bar{N} * I \quad (5-6)$$

Όπου: ΔU_N^* , η διαφορά μεταξύ της υπερπίεσης πόρων στο τέλος του (N) κύκλου φόρτισης με την υπερπίεση πόρων στο ($N-1$) κύκλο φόρτισης, κανονικοποιημένη ως προς την αρχική ενεργό τάση
 U_{N-1}^* , η υπερπίεση πόρων στο τέλος του ($N-1$) κύκλου φόρτισης, κανονικοποιημένη ως προς την αρχική ενεργό τάση
 N , τρέχων κύκλος φόρτισης
 τ_N , το ημι-εύρος της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο (N) κύκλο φόρτισης
 σ'_{N-1} , η ενεργός τάση στο ($N-1$) κύκλο φόρτισης
 C_1, C_2, C_3, n εμπειρικές παράμετροι

Οι Konstadinou & Georgiannou, (2014) για να εξετάσουν την επίδραση του σχήματος των κόκκων και της κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων υπό ανακυκλική φόρτιση, εκτέλεσαν ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό εμποδιαζόμενη στράγγιση σε δοκίμια τεσσάρων άμμων (Ham River, Fontainebleau, M31 και Ottawa) σε ένα εύρος πυκνοτήτων και ανακυκλικών τάσεων. Οι ερευνητές μετά από στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, τροποποίησαν τον όρο \bar{N} και πρότειναν την εισαγωγή δύο συντελεστών στην εξίσωση των Ishibashi et al. (1977) (5-5),(5-6), ώστε να συμπεριλάβουν την επίδραση της πυκνότητας (D) και της τάσης στερεοποίησης (C) στην ανάπτυξη των υπερπίεσεων του υγρού των πόρων. Η σχέση που πρότειναν οι Konstadinou & Georgiannou, (2014) παρουσιάζεται στην εξίσωση (5-7), ενώ τα επιμέρους στοιχεία της αναλύονται στις εξισώσεις (5-8), (5-9), (5-10), (5-11) και (5-12). Μετά από στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων, προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων για την άμμο M31 που συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.2**. Οι υψηλές τιμές της παραμέτρου C_1 εκφράζουν την έντονη ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων που εμφανίζεται σε άμμους με πιο ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη

μονοτονική φόρτιση (M31 και Fontainebleau). Αντίθετα, οι χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου C_1 εφαρμόζονται σε άμμους με μη-ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη μονοτονική φόρτιση (Ham River και Ottawa). Οι παράμετροι C_2, C_3, C_4 είναι ανεξάρτητες της άμμου καθώς η επίδραση της πυκνότητας και της τάσης στερεοποίησης έχει ληφθεί υπόψη στις εξισώσεις (5-9), και (5-11) συναρτήσεων των κύκλων φόρτισης.

Η εξίσωση (5-7), για $\tau_N=q/2$ και $C_1=64$, εφαρμόστηκε για τα στοιχεία των δοκιμών της διατριβής και παρουσιάζεται σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα σε όρους υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεων των κύκλων φόρτισης (**Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.8, Σχήμα 5.9** και **Σχήμα 5.10**). Τα δοκίμια άμμου M31 στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$, με δείκτες πόρων $e_i=0.710-0.724$ και φορτίστηκαν με συμμετρική ανακυκλική τάση $q=\pm 42-74\text{ kPa}$. Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων, Δu , λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση (q) μηδενίζεται.

Στους πρώτους κύκλους φόρτισης παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης για την άμμο M31 για όλο το εύρος των ανακυκλικών τάσεων. Στο **Σχήμα 5.9** όπου παρατίθενται τα αποτελέσματα της άμμου M31 με δείκτη πόρων $e_i=0.724$ και ανακυκλική τάση $q=\pm 48\text{ kPa}$ παρατηρούμε ότι η σχέση πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκε υποτιμά το μέγεθος της υπερπίεσης του υγρού των πόρων μετά από την επίτευξη υπερπίεσης πόρων 60kPa ($R_u=\Delta u/p'_i=0.3$). Γενικά, όπως επισημαίνεται και από τους ερευνητές (Konstadinou & Georgiannou, 2014) η σχέση (5-7) προβλέπει ικανοποιητικά την εξέλιξη της υπερπίεσης των πόρων έως την έναρξη της ασταθούς συμπεριφοράς του δοκιμίου (σημείο A), όπου η υπερπίεση πόρων συσσωρεύεται με πολύ μεγάλο ρυθμό και είναι δύσκολο να προβλεφθεί επακριβώς.

Η ανωτέρω σύγκριση δείχνει ότι στο αρχικό στάδιο φόρτισης η αναπτυσσόμενη υπερπίεση του νερού δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες φόρτισης π.χ. στρεπτικής διάτμησης και της παρούσας τριαξονικής φόρτισης. Φυσικά ο ρυθμός ανάπτυξης των υπερπίεσεων αναμένεται να είναι εντελώς διαφορετικός με την αλλαγή από $\alpha=0$ σε 90 κατά την τριαξονική φόρτιση σε σχέση με $\alpha=\pm 45$ κατά τη στρεπτική διάτμηση όταν αρχίσει η αποδόμηση του υλικού και συσσωρεύονται οι παραμορφώσεις/υπερπίεσεις.

Στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζονται τα στάδια της της εξέλιξης της κανονικοποιημένης υπερπίεσης του υγρού των πόρων με τους κύκλους φόρτισης υπό την ανακυκλική φόρτιση της ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31. Αρχικά, στον πρώτο κύκλο φόρτισης αναπτύσσεται σημαντική υπερπίεση. Στη συνέχεια, ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης μειώνεται (Στάδιο 1) ώσπου αναπτύσσεται ένας σταθερός, προσεγγιστικά ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Στάδιο 2). Τελικά, η κανονικοποιημένη υπερπίεση αρχίζει να αυξάνεται ραγδαία ως την αρχική ρευστοποίηση (Στάδιο 3). Συμπερασματικά, η σχέση (5-7) προβλέπει την εξέλιξή της υπερπίεσης του υγρού των πόρων με τους κύκλους φόρτισης έως το τέλος του Σταδίου 2.

$$\Delta U_N^* = H * \bar{N}' * I * D * C \quad (5-7)$$

$$\bar{N}' = \frac{C_1}{N^{C_2} + C_3 * N} + C_4 * C_1 \quad (5-8)$$

$$D = \left(\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \right)^d \quad (5-9)$$

$$d = 0.632 * \ln(N) - 3.87 \quad (5-10)$$

$$C = \left(\frac{p'_i}{p_a} \right)^c \quad (5-11)$$

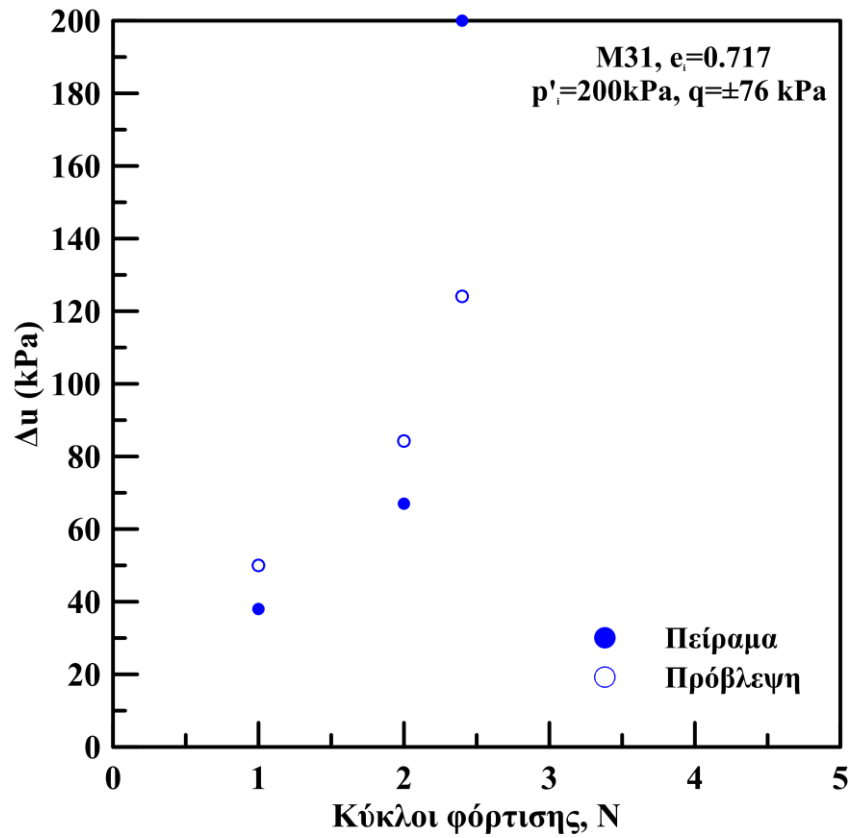
$$c = -0.034N + 0.68, \text{ για } N < 20$$

$$c = 0 \text{ για } N \geq 0$$

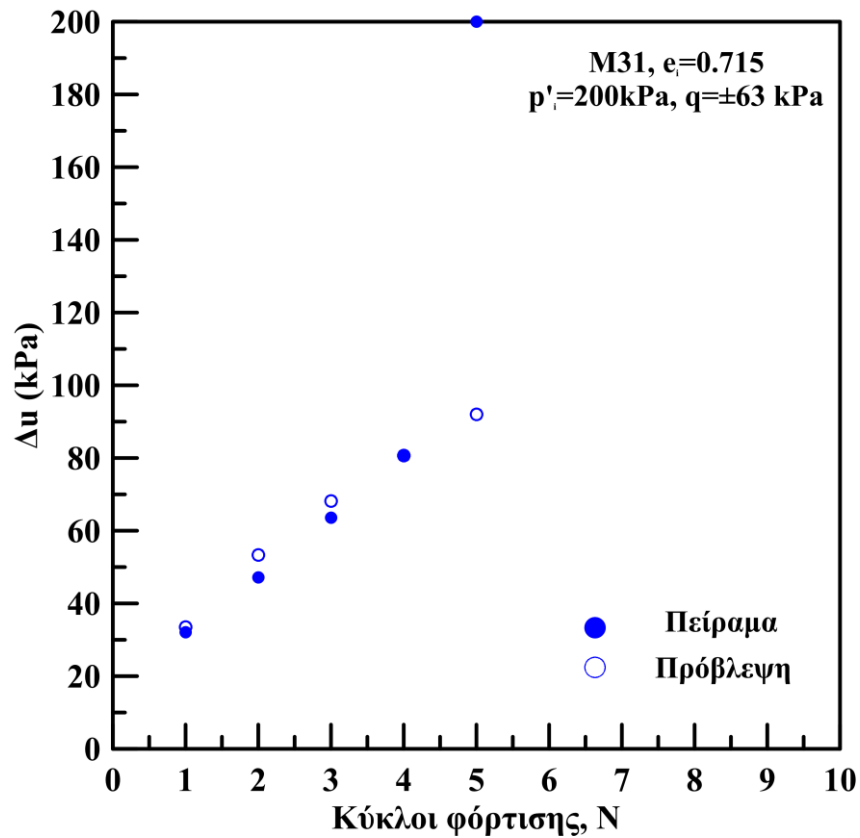
(5-12)

Πίνακας 5.2: Εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Τιμές παραμέτρων για τις άμμους Ham River, Fontainebleau, M31 και Ottawa (Konstadinou & Georgiannou, 2014)

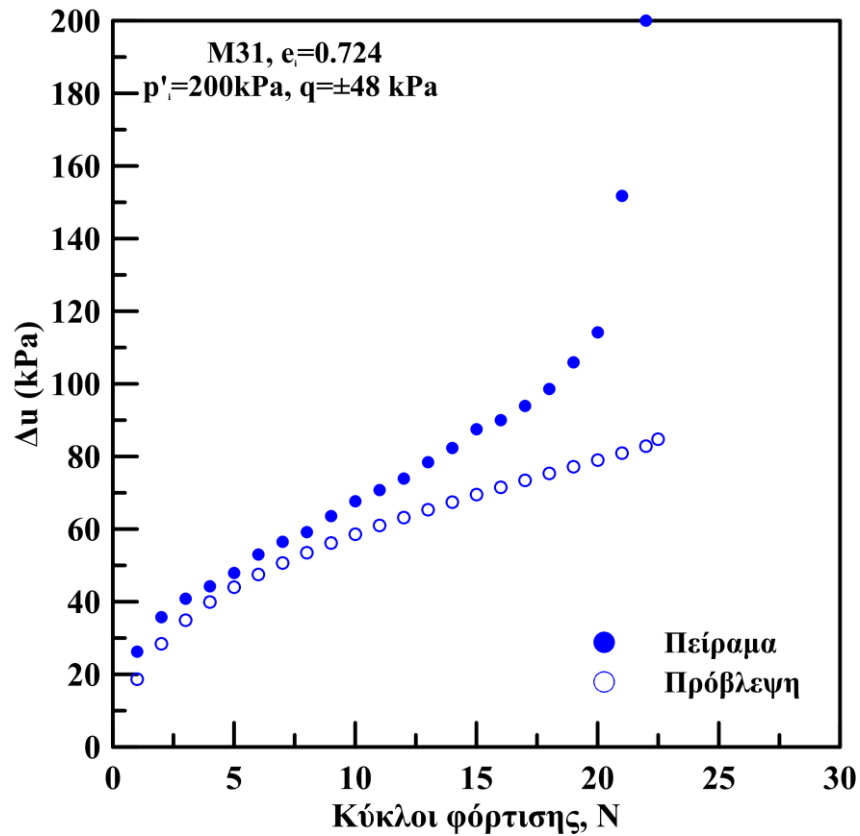
Ανακυκλική Φόρτιση, Αστράγγιστες συνθήκες						
Άμμος	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	n	p _a (kPa)
Ham River	19	1.8	2	0.015	2.4	101
Ottawa	19	1.8	2	0.015	2.4	101
Fontainebleau	29	1.8	2	0.015	2.4	101
M31	52	1.8	2	0.015	2.4	101
M31 (διατριβής)	59	1.8	2	0.015	2.4	101



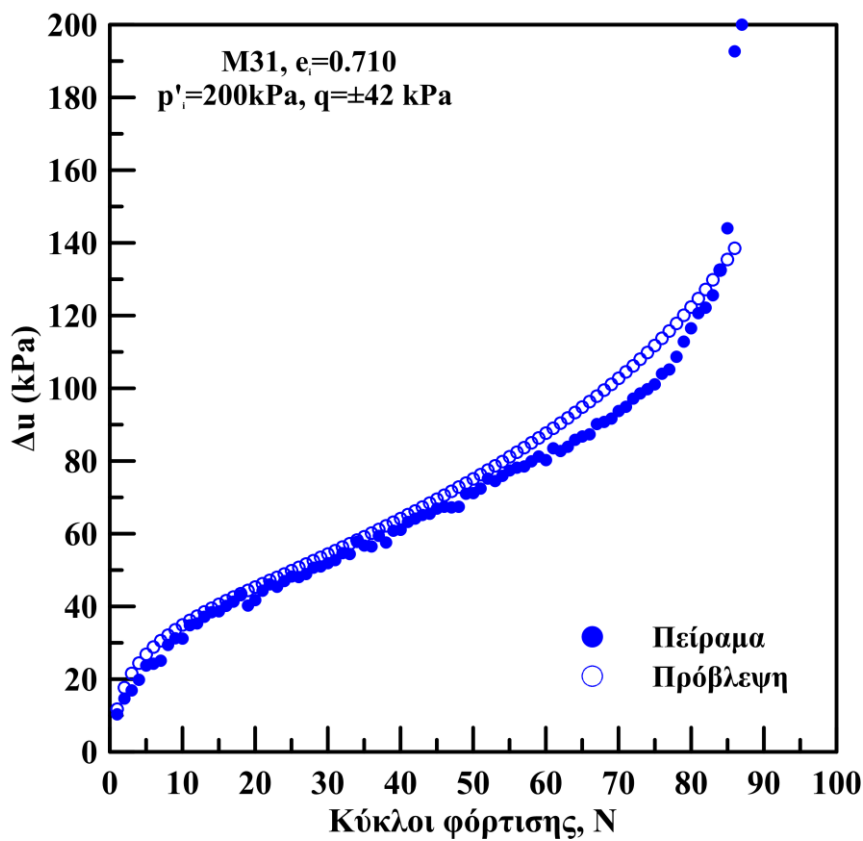
Σχήμα 5.7: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη Δu — N δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 76$ kPa



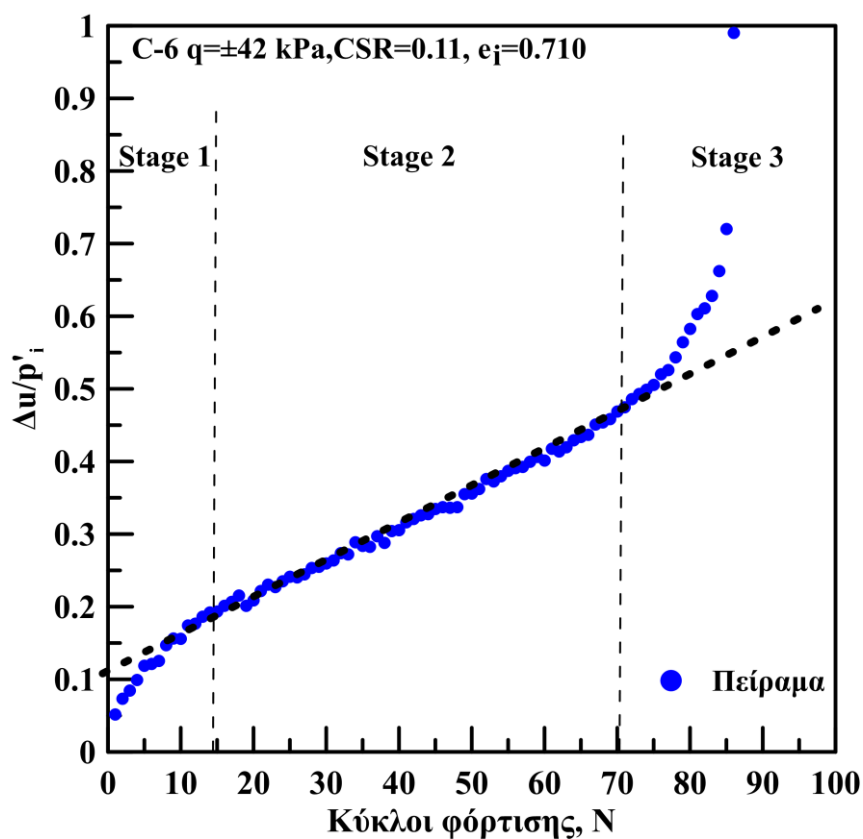
Σχήμα 5.8: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη Δu — N δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 63$ kPa



Σχήμα 5.9: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη Δu — N δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 48\text{ kPa}$



Σχήμα 5.10: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη Δu — N δοκιμίου άμμου M31, $q=\pm 42\text{ kPa}$



Σχήμα 5.11: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής δοκιμής υπό εμποδιζόμενη στράγγιση: Τυπικά στάδια της εξέλιξης της κανονικοποιημένης υπερπίεσης του υγρού των πόρων με τους κύκλους φόρτισης

5.4 Καμπύλες ρευστοποίησης της άμμου M31

Η ανάπτυξη μεγάλης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση οδηγεί σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης, δηλαδή η υπερπίεση εξισώνεται με την τάση στερεοποίησης ($\Delta u = p'_i$). Πειραματικά, το φαινόμενο της ρευστοποίησης προσομοιώνεται με ανακυκλικές δοκιμές υπό εμποδιζόμενη στράγγιση στην τριαξονική συσκευή, στη συσκευή απλής διάτμησης, στη συσκευή διάτμησης κούλου δοκιμίου και στη σεισμικά τράπεζα. Η αντίσταση σε ρευστοποίηση από εργαστηριακές δοκιμές εκφράζεται από το λόγο ανακυκλικών τάσεων, CSR (Cyclic Stress Ratio), σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται είτε μέχρι την αρχική ρευστοποίηση, N_{IL} , είτε μέχρι την ανάπτυξη ανακυκλικής παραμόρφωσης συγκεκριμένου μεγέθους ($\gamma_{cyc}=1, 2.5$ ή 5%) $N_{1\%}$, $N_{2.5\%}$ ή $N_{5\%}$. Ο λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ως προς την τάση στερεοποίησης, CSR, στην παρούσα διατριβή ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-13).

$$CSR = \frac{q}{2 * p'_i}$$

(5-13)

Τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, αστράγγιστων, τριαξονικών δοκιμών στα χαλαρά, κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα στο **Σχήμα 5.12** σε όρους CSR - κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση (N_{IL}). Παρατηρούμε ότι ο λόγος ανακυκλικών τάσεων, CSR, μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης, δηλαδή, όσο μειώνεται το μέγεθος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για την επίτευξη της ρευστοποίησης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα της διατριβής ανήκουν σε μια καμπύλη (καμπύλη ρευστοποίησης-liquefaction curve) που περιγράφεται από μια εξίσωση δύναμης (5-14), (Idriss & Boulanger, 2008) όπου $a = 0.200$ και $b = -0.162$.

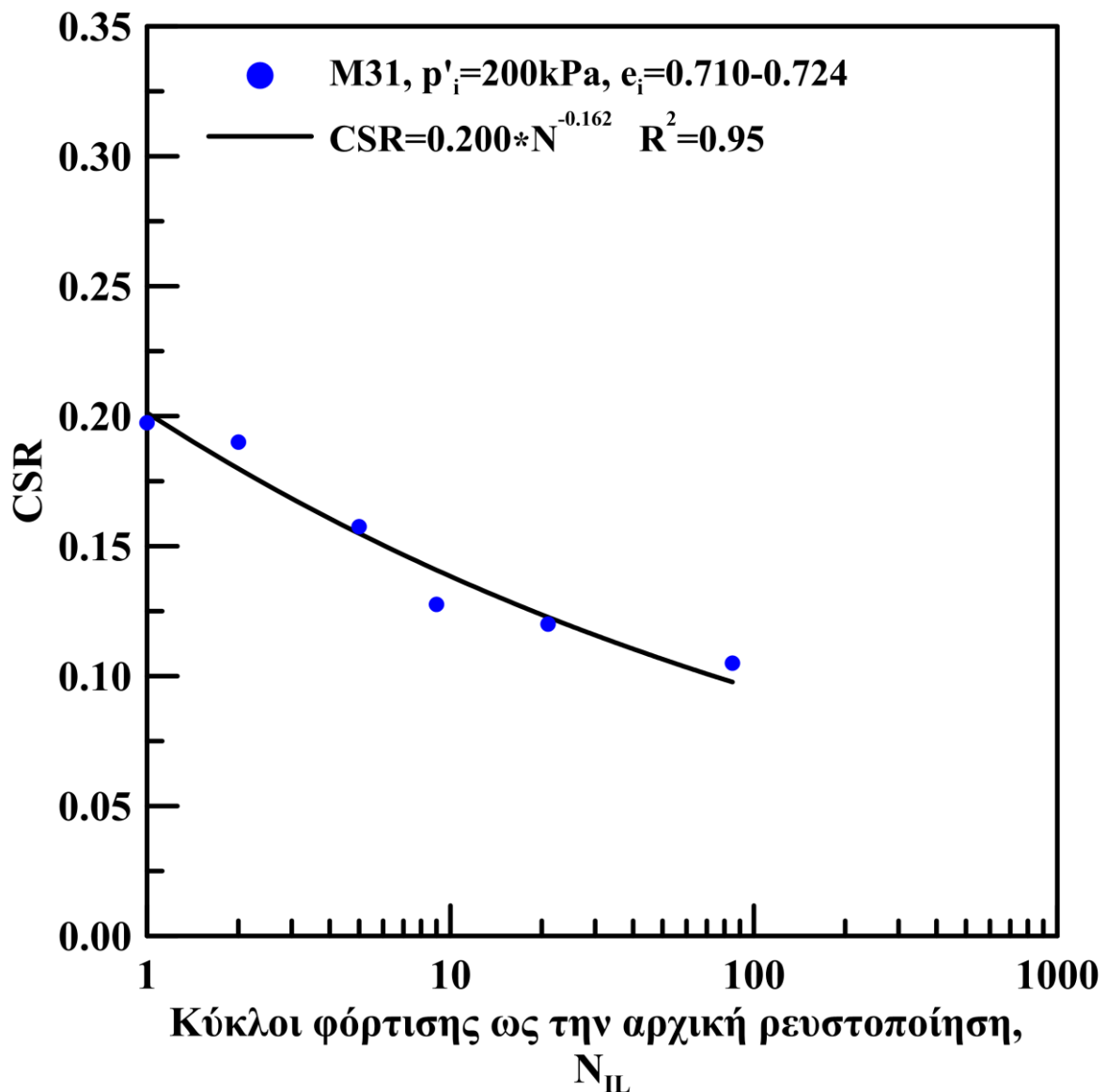
$$CSR = a * N^b$$

(5-14)

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την περίπτωση των χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών άμμου M31, για δεδομένη τιμή CSR, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $|\varepsilon_z|=1, 2.5$ και 5% πρακτικά ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει γιατί μετά το τέλος του Σταδίου 2 (**Σχήμα 5.11**), αρχίζει η ασταθής συμπεριφορά, δηλαδή ραγδαία

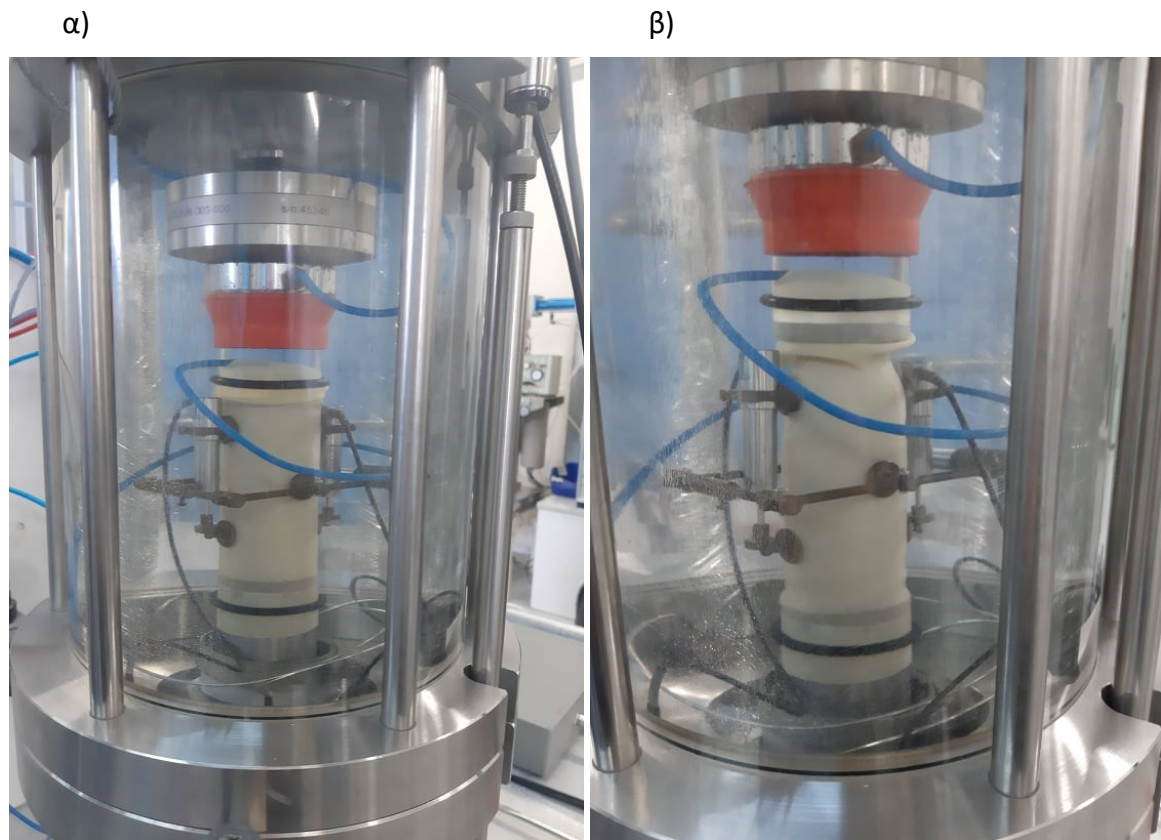
αύξηση της υπερπίεσης πόρων με ταυτόχρονη ανάπτυξη μεγάλης αξονικής παραμόρφωσης.

Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης σε ρευστοποίηση για τη χαλαρή άμμο M31 προκύπτει $CRR_{15}=0.13$ ($e_i=0.710-0.724$). Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} (Cyclic Resistance Ratio), είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση του εδαφικού υλικού σε 15 κύκλους φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τυπικός αριθμός κύκλων σε πραγματικούς σεισμούς είναι $N=10-20$ για μέγεθος σεισμού M7.5 (Robertson & Wride, 1998).



Σχήμα 5.12: Καμπύλη ρευστοποίησης χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31

Επιπλέον, επισημαίνεται ότι σε όλες τις ανακυκλικές δοκιμές η επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $|\varepsilon_z|=1\%$ και 2.5% εμφανίστηκε για πρώτη φορά στο εφελκυστικό τμήμα της ανακυκλικής φόρτισης, όπου και συσσωρεύονται οι αξονικές παραμορφώσεις, καταδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση υπό εφελκυστική φόρτιση λόγω της ανισορροπίας της εσωτερικής δομής ακόμη και μετά από ανακυκλική φόρτιση. Επιπρόσθετα, το σύνολο των δοκιμών αστόχησαν όπως στην περίπτωση του τριαξονικού εφελκυσμού, δηλαδή η αστοχία εκδηλώθηκε με τη στένωση του δοκιμίου (necking) που προσδίδει στο δοκίμιο μορφή «λαιμού» όπως διαφαίνεται στην ενδεικτική φωτογραφία στο τέλος του πειράματος της δοκιμής C-5 (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13: Φωτογραφίες δοκιμίου άμμου M31: α) πριν την φόρτιση, β) μετά από τριαξονική, ανακυκλική φόρτιση υπό εμποδιζόμενη στράγγιση

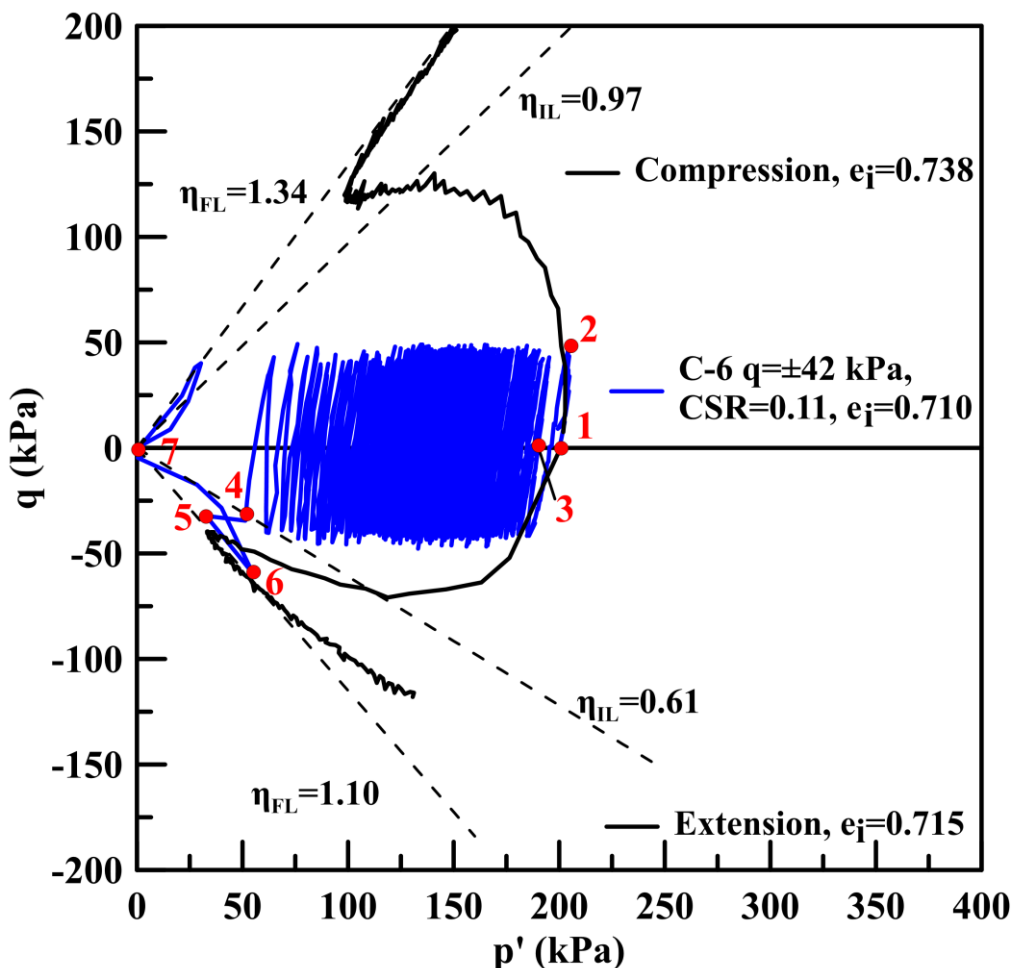
5.5 Σύγκριση μεταξύ μονοτονικής και ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο M31

Τα αποτελέσματα των χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών άμμου M31 που υποβλήθηκαν σε ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό εμποδιζόμενη στράγγιση παρουσιάζονται σε όρους ενεργών τάσεων, στο χώρο q - p' (Σχήμα 5.14, Σχήμα 5.15, Σχήμα 5.16, Σχήμα 5.17 και Σχήμα 5.18). Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης της ξηρής άμμου σε νερό, στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$, με εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e_i=0.710-0.724$ και φορτίστηκαν σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.11-0.20$. Στα σχήματα αυτά έχουν συμπεριληφθεί οι διαδρομές ενεργών τάσεων από δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης και τριαξονικού εφελκυσμού υπό εμποδιζόμενη στράγγιση. Τα δοκίμια αυτά παρασκευάστηκαν με την ίδια μέθοδο, στερεοποιήθηκαν ισότροπα στην ίδια τάση και έχουν παρόμοιο δείκτη πόρων με τα αντίστοιχα ανακυκλικά πειράματα. Επιπρόσθετα, έχουν σχεδιασθεί με διακεκομμένες γραμμές οι γραμμές αστοχίας (FL) με κλίση $\eta_{FL}=q/p'=1.34$ και $\eta_{FL}=1.0$, όπως προέκυψαν από τη θλιπτική και την εφελκυστική δοκιμή αντίστοιχα. Επειδή η χαλαρή άμμος M31 εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά υπό μονοτονική φόρτιση σχεδιάζονται και οι γραμμές αστάθειας (IL) (Lade, 1993) με κλίση $\eta_{IL}=q/p'=0.94$ και $\eta_{IL}=0.61$, όπως προέκυψαν από τη θλιπτική και την εφελκυστική δοκιμή αντίστοιχα. Στα σχήματα έχουν σημειωθεί με αριθμούς χαρακτηριστικά σημεία με βάση τα οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια η παρατηρούμενη συμπεριφορά.

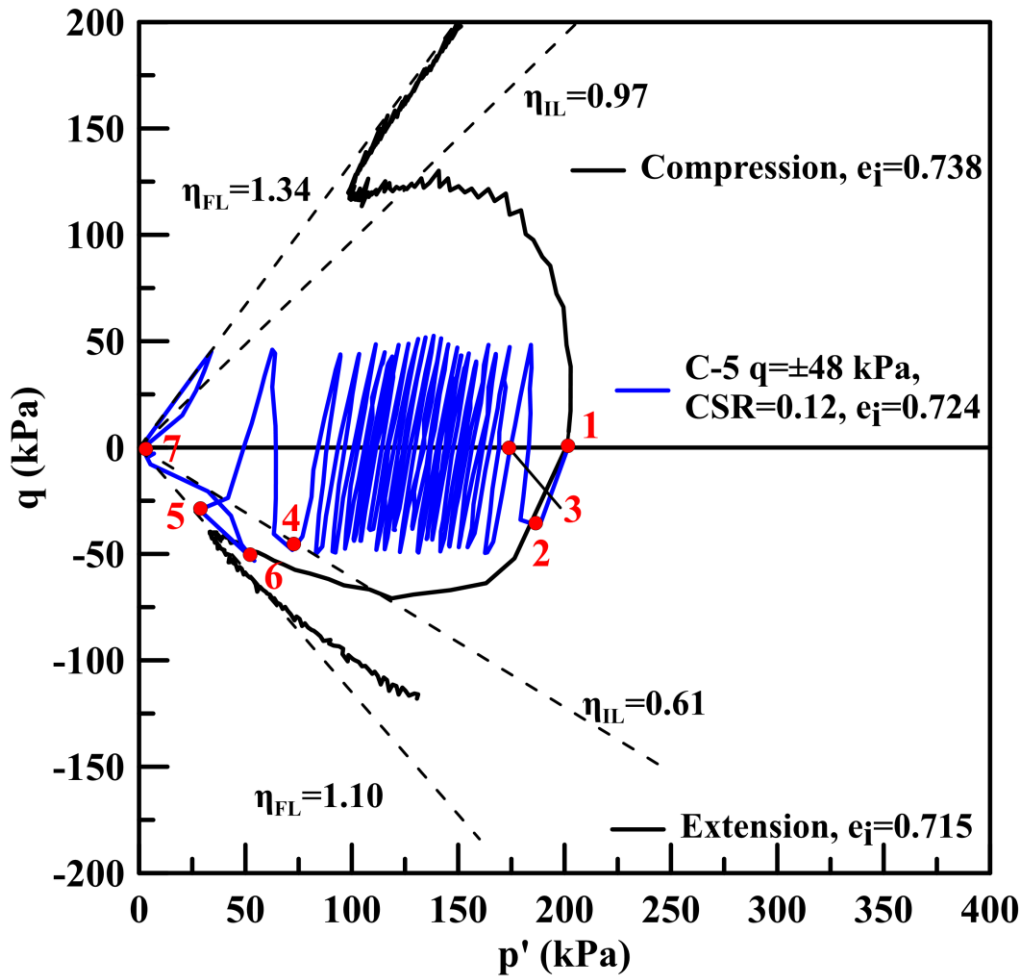
Αρχικά, στο πρώτο τέταρτο του 1^{ου} κύκλου φόρτισης (σημεία 1-2) οι διαδρομές ενεργών τάσεων της ανακυκλικής δοκιμής συμπίπτουν πρακτικά με αυτές της μονοτονικής δοκιμής (θλίψης ή εφελκυσμού). Συγκριμένα, στις δοκιμές που η ανακυκλική φόρτιση ξεκίνησε με θλίψη (+ q), (C-3 και C-6) η ανακυκλική διαδρομή ταυτίζεται με αυτή της θλίψης, ενώ στις δοκιμές που η ανακυκλική φόρτιση ξεκίνησε με εφελκυσμό (- q), (C-1, C-2 και C-5) η ανακυκλική διαδρομή ταυτίζεται με αυτή του εφελκυσμού. Επισημαίνεται ότι στον 1^ο κύκλο φόρτισης (σημεία 1-3) εμφανίζεται μεγάλη ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων σε σχέση με τους άλλους κύκλους, όπου ο ρυθμός αύξησης της πίεσης των πόρων μειώνεται και φαίνεται να σταθεροποιείται μέχρι η ενεργός τάση να πλησιάσει το σημείο 4. Το σημείο αυτό συνδέεται με την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς, δηλαδή ραγδαία αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης υπερπίεσεων, με ταυτόχρονη εμφάνιση μεγάλων αξονικών παραμορφώσεων. Η αλλαγή στην κατεύθυνση φόρτισης μετά το σημείο 4 (σημεία 4 προς 5 και 5 προς 6) οδηγεί σε μεγαλύτερη συσσώρευση υπερπίεσης πόρων και τελικά στο μηδενισμό της ενεργού τάσης (σημείο 7), αρχική ρευστοποίηση, με συνοδεία μεγάλων παραμορφώσεων και αστοχία του δοκιμίου.

Παρατηρούμε ότι το σημείο 4 σε όλες τις δοκιμές με εύρος $CSR=0.11-0.20$ ανήκει πάνω στη γραμμή αστάθειας των μονοτονικών πειραμάτων. Συγκεκριμένα, ανήκει στη γραμμή αστάθειας της δοκιμής τριαξονικού εφελκυσμού με κλίση $\eta_{IL}=0.61$. Η γραμμή αστάθειας και η γραμμή αστοχίας της άμμου M31 υπό θλιπτική φόρτιση βρίσκονται πάνω από τη

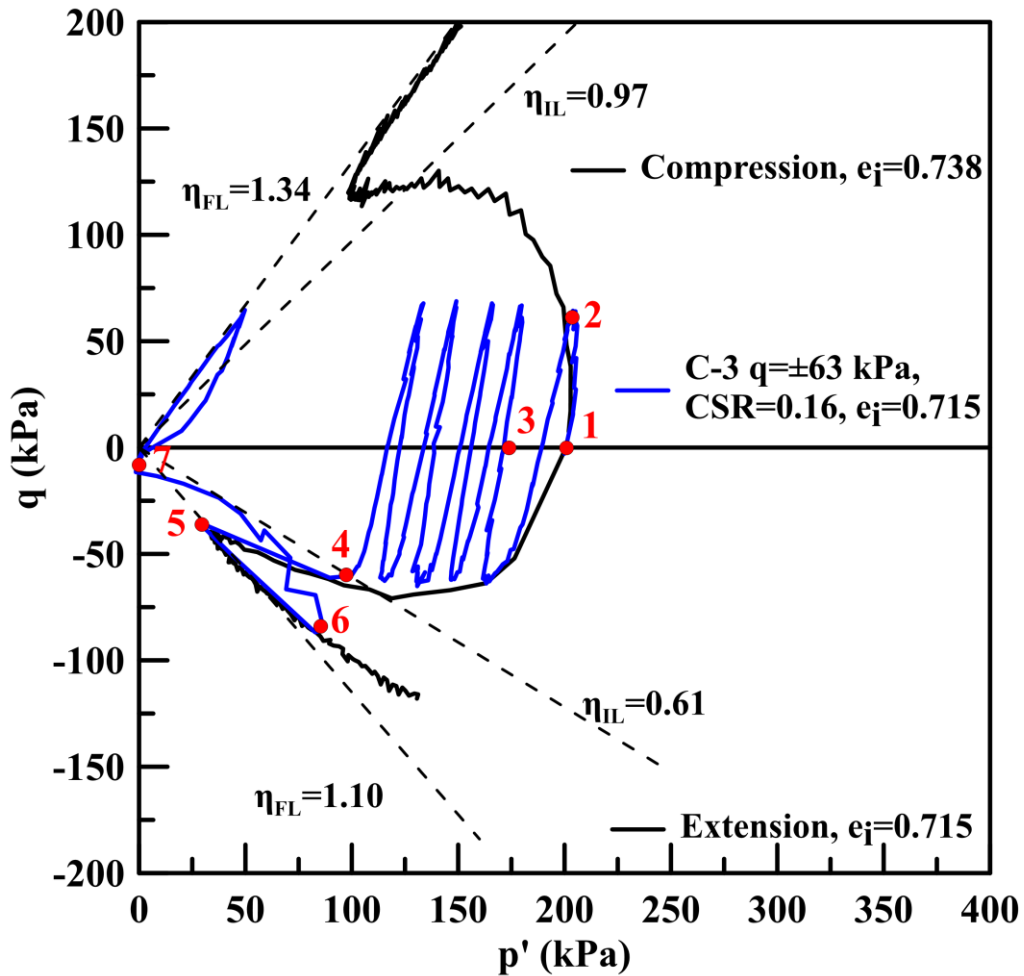
διαδρομή της ανακυκλικής φόρτισης μέχρι το σημείο 7 όπου και το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία, καταδεικνύοντάς την ασθενέστερη απόκριση υπό εφελκυστική φόρτιση. Συνεπώς, η γραμμή αστάθειας που ορίζουν οι δοκιμές εφελκυσμού αποτελούν το όριο μεταξύ σταθερής και ασταθούς απόκρισης της χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31. Οι Konstadinou & Georgiannou (2014) εκτελώντας ανακυκλικές και μονοτονικές δοκιμές στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κόιλου δοκιμίου σε 4 άμμους παρατήρησαν ότι η ασταθής συμπεριφορά της άμμου υπό ανακυκλική φόρτιση αρχίζει μόλις η διαδρομή τάσεων συναντήσει τη γραμμή αστάθειας όταν η άμμος έχει ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη μονοτονική φόρτιση ή μόλις συναντήσει τη γραμμή αλλαγής φάσης όταν η άμμος δεν εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά κατά την μονοτονική φόρτιση. Επισημαίνεται ότι η γραμμή αστάθειας (instability line, IL) δεν είναι μοναδική για κάθε άμμο αλλά εξαρτάται από τη διεύθυνση φόρτισης. Συγκεκριμένα ο λόγος τάσεων στο σημείο της αστάθειας, η_{IL} , αυξάνεται όσο μειώνεται η γωνία της μέγιστης κύριας τάσης, α , ως προς την κατακόρυφο (Nakata et al., 1998; P. K. Triantafyllos et al., 2020).



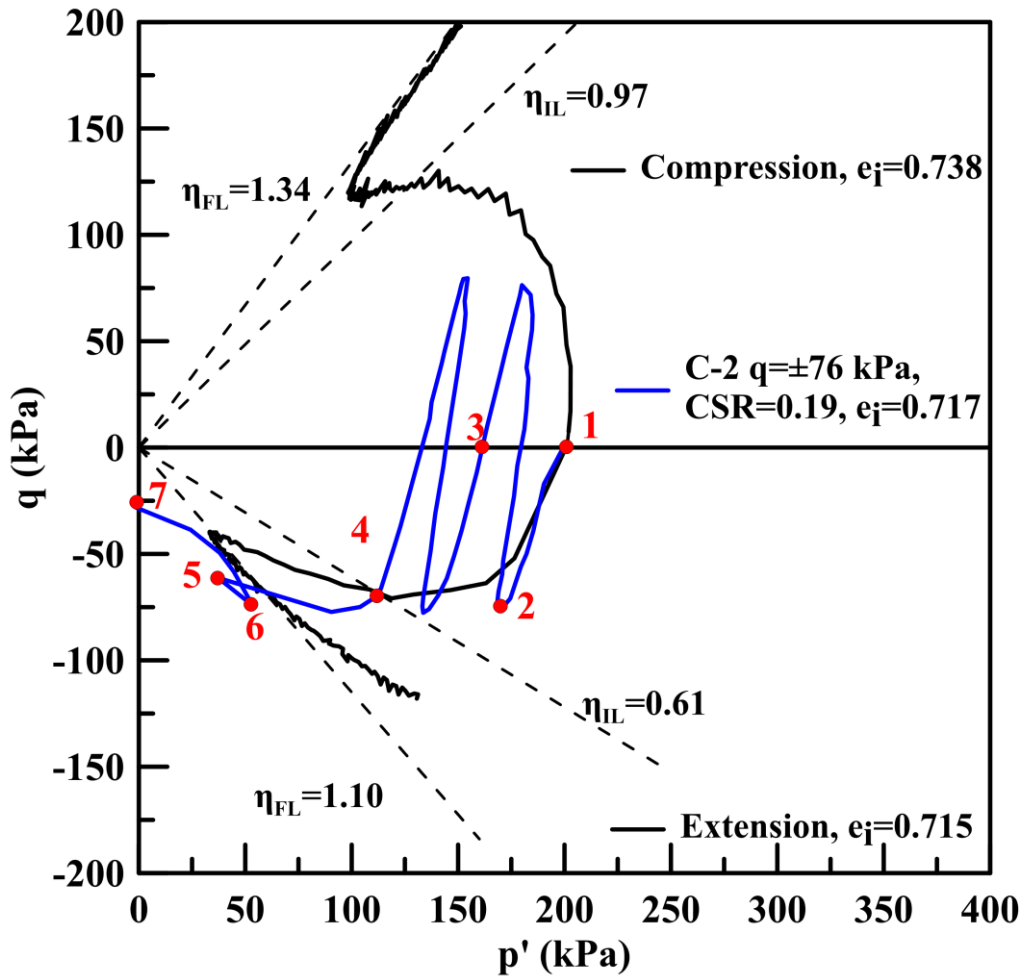
Σχήμα 5.14: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200\text{kPa}$: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 42\text{ kPa}$, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης



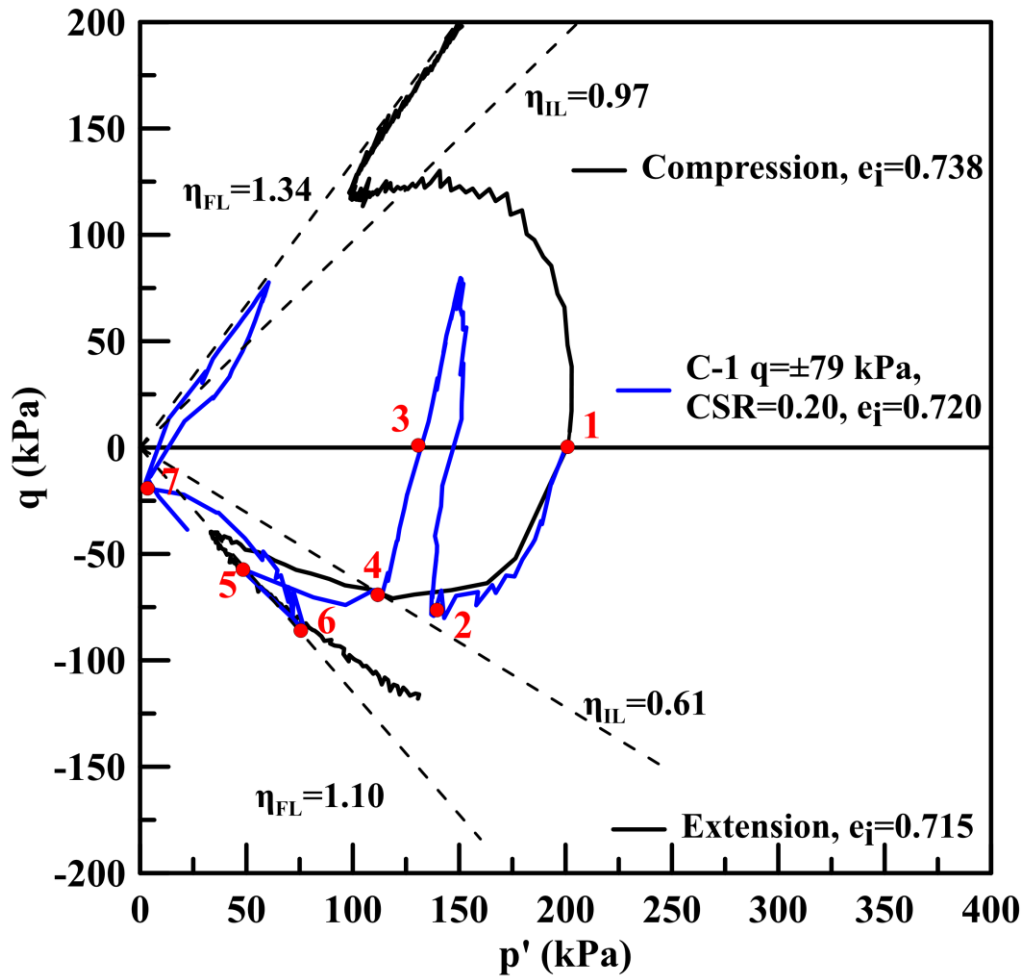
Σχήμα 5.15: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 48$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης



Σχήμα 5.16: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 63$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης



Σχήμα 5.17: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200$ kPa: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 76$ kPa, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης



Σχήμα 5.18: Διαδρομές ενεργών τάσεων χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31, με $p'_i=200\text{kPa}$: Ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό $q=\pm 79\text{ kPa}$, μονοτονική τριαξονική θλίψη και μονοτονικός τριαξονικός εφελκυσμός υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης

5.6 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμου M31 σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο M31 σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM[®], περιεκτικότητας CS=10%. Επιλέχθηκαν αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης, γιατί η ανακυκλική φόρτιση της άμμου υπό εμποδιζόμενη στράγγιση είναι δυσμενέστερη, καθώς οδηγεί σε μείωση της ενεργού τάσης σε αύξηση της ενδοσιμότητας και των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, ακόμη και για μικρή αύξηση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων. Η μέθοδος της σταθεροποίησης μη συνεκτικών εδαφών αναπτύχθηκε για να βελτιώσει το έδαφος κάτω από υφιστάμενες κατασκευές καθιστώντας το λιγότερο ευάλωτο σε συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων που σχετίζονται με τη ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη σεισμική διέγερση, και των καταστροφικών συνεπειών που επιφέρουν στην ανωδομή. Επομένως, οι ανακυκλικές δοκιμές υπό εμποδιζόμενη στράγγιση είναι απαραίτητες για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης και για να αναλυθεί λεπτομερώς η επίδραση του σταθεροποιητή στην ανακυκλική συμπεριφορά άμμων.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρής άμμου σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας CS=10%. Στη συνέχεια, τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του άτονου εδαφικού σκελετού. Μετά το πέρας του χρόνου ωρίμανσης (50hr), τα δοκίμια μεταφέρονται στην τριαξονική συσκευή. Επισημαίνεται ότι όλες οι τριαξονικές ανακυκλικές δοκιμές στην φυσική και σταθεροποιημένη άμμο, εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) $u_0=400$ kPa και μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων. Η παράμετρος Skempton για όλα τα πειράματα μετρήθηκε $B=\Delta u/\Delta \sigma > 0.97$ υποδεικνύοντας τον επαρκή κορεσμό των δοκιμών. Για τη διεξαγωγή των τριαξονικών ανακυκλικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Οι ανακυκλικές δοκιμές που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress control tests).

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa με εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e_i=0.717-0.748$. Για να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης εκτελέστηκαν δοκιμές σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.12-0.20$. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.3**. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας σταθεροποιητή 10% κ.β.

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες					
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
SC-1	0.720	200	0.20	5	3	3	5	9
SC-2	0.728	200	0.18	5	5	4	6	12
SC-3	0.717	200	0.16	5	10	7	11	19
SC-4	0.734	200	0.14	5	29	27	35	93
SC-5	0.748	200	0.12	5	46	41	46	59

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)
 N_{IL} , κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για μηδενισμό ενεργού τάσης
 $N_{1\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=1\%$
 $N_{2.5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=2.5\%$
 $N_{5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=5\%$

Στο **Σχήμα 5.19** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_i=0.720$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 79\text{kPa}$ (SC-1). Στο **Σχήμα 5.21** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη δοκιμή με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, δείκτη πόρων $e_i=0.728$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 74\text{kPa}$ (SC-2).

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Επιπρόσθετα, στο **Σχήμα 5.20** και στο **Σχήμα 5.22** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεϊς κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεϊς κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

Αρχικά παρατηρούμε ότι και για τις δύο δοκιμές, από τον πρώτο κύκλο φόρτισης αναπτύσσεται έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων με τη μέση ενεργό τάση να μειώνεται κατά 50%. Στους επόμενους κύκλους φόρτισης η υπερπίεση προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή της ($\Delta u=200$ kPa). Μετά από το μηδενισμό της ενεργού τάσης, παρατηρείται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης έντονη διακύμανση της υπερπίεσης Δu . Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή Δu επιτυγχάνεται όταν $q=0$, στη συνέχεια μειώνεται από $q=0$ έως $q=+max$, αυξάνεται από $q=+max$ έως $q=0$, μειώνεται από $q=0$ έως $q=-max$ και τέλος αυξάνεται από $q=-max$ έως $q=0$ (**Σχήμα 5.23 (α)**). Η τιμή της υπερπίεσης του υγρού των πόρων κυμαίνεται από $\Delta u=100$ kPa έως 200 kPa σε κάθε κύκλο φόρτισης με το πλάτος της διακύμανσης μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της υπερπίεσης του υγρού των πόρων να είναι προσεγγιστικά σταθερό. Το πλάτος της διακύμανσης της υπερπίεσης, Δu , είναι μεγαλύτερο στη δοκιμή με το μεγαλύτερο λόγο ανακυκλικής τάσης (SC1). Η αύξηση της παραμένουσας υπερπίεσης του υγρού των πόρων μέχρι την αρχική «ρευστοποίηση» επιφέρει τη μετακίνηση της διαδρομής των ενεργών τάσεων ($q-p'$) προς τα αριστερά. Μετά την εξίσωση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων με την αρχική ενεργό τάση, η εναλλαγή μεταξύ διαστολικής και συστολικής συμπεριφοράς σε κάθε κύκλο φόρτισης που εμφανίζεται, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κλειστών, επαναλαμβανόμενων βρόχων στη διαδρομή ενεργών τάσεων ($q-p'$) με τη μορφή «πεταλούδας» και την εμφάνιση «ανακυκλικής κινητικότητας» (cyclic mobility).

Από τις καμπύλες αξονικής παραμόρφωσης-κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N) παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη των αξονικών παραμορφώσεων αρχίζει από τους πρώτους κύκλους φόρτισης και συσσωρεύεται βαθμιαία κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης παρατηρείται σημαντική διακύμανση της αξονικής παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, η αλγεβρική τιμή της αξονικής παραμόρφωσης αυξάνεται οδεύοντας προς τις θετικές τιμές της αποκλίνουσας τάσης από $q=0$ -εως $+max$ (θλιπτικό τμήμα), μειώνεται ελάχιστα κατά την αποφόρτιση από $q=+max$ έως 0, στη συνέχεια μειώνεται έντονα οδεύοντας προς τις αρνητικές τιμές της αποκλίνουσας τάσης από $q=0$ έως $-max$ (εφελκυστικό τμήμα) και αυξάνεται κατά την αποφόρτιση από $q=-max$ έως 0 (**Σχήμα 5.23 (β)**). Ωστόσο, η συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζεται στο εφελκυστικό τμήμα υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου στον εφελκυσμό, όμοια με τη φυσική άμμο. Το πλάτος της διακύμανσης της αξονικής παραμόρφωσης, ϵ_z , είναι μεγαλύτερο στη δοκιμή με το μεγαλύτερο λόγο ανακυκλικής τάσης (SC1).

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα δοκίμια σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31 με $CSR=0.20$ και 0.18 δεν καταρρέουν μετά το μηδενισμό της ενεργού τάσης όπως τα δοκίμια της φυσικής χαλαρής άμμου. Ωστόσο, αναπτύσσουν αξονική παραμόρφωση από την έναρξη της φόρτισης, καταλήγοντας να «συντηρούν» αξονικές παραμορφώσεις διπλού πλάτους έως και 16%.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία

άμμο M31 με μικρότερους λόγους ανακυκλικής τάσης CSR. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα αποτελέσματα δοκιμής SC3 με δείκτη πόρων $e_i=0.717$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 63\text{kPa}$ (Σχήμα 5.24), της δοκιμής SC4 με δείκτη πόρων $e_i=0.734$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 57\text{kPa}$ (Σχήμα 5.26) και της δοκιμής SC-5 με δείκτη πόρων $e_i=0.748$ και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 48$ (Σχήμα 5.28). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ($q-e_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (e_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-e_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-e_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (e_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-e_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$), (Σχήμα 5.25, Σχήμα 5.27 και Σχήμα 5.29).

Αρχικά παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης (CSR), μειώνεται ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων, αλλά και ο ρυθμός συσσώρευσης της αξονικής παραμόρφωσης. Επισημαίνεται ότι η διακύμανση της αξονικής παραμόρφωσης συσχετίζεται άμεσα με την ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων αποδεικνύοντας τη σημασία της σωστής καταγραφής της υπερπίεσης στη σταθεροποιημένη άμμο. Η υπερπίεση του υγρού των πόρων συσσωρεύεται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης μετακινώντας την καμπύλη την ενεργού τασικής όδευσης προς τα αριστερά. Η ανάπτυξη της υπερπίεσης γίνεται σταδιακά, χωρίς να εμφανίζεται κάποια δραματική αλλαγή όπως συμβαίνει στην περίπτωση της χαλαρής, φυσικής άμμου.

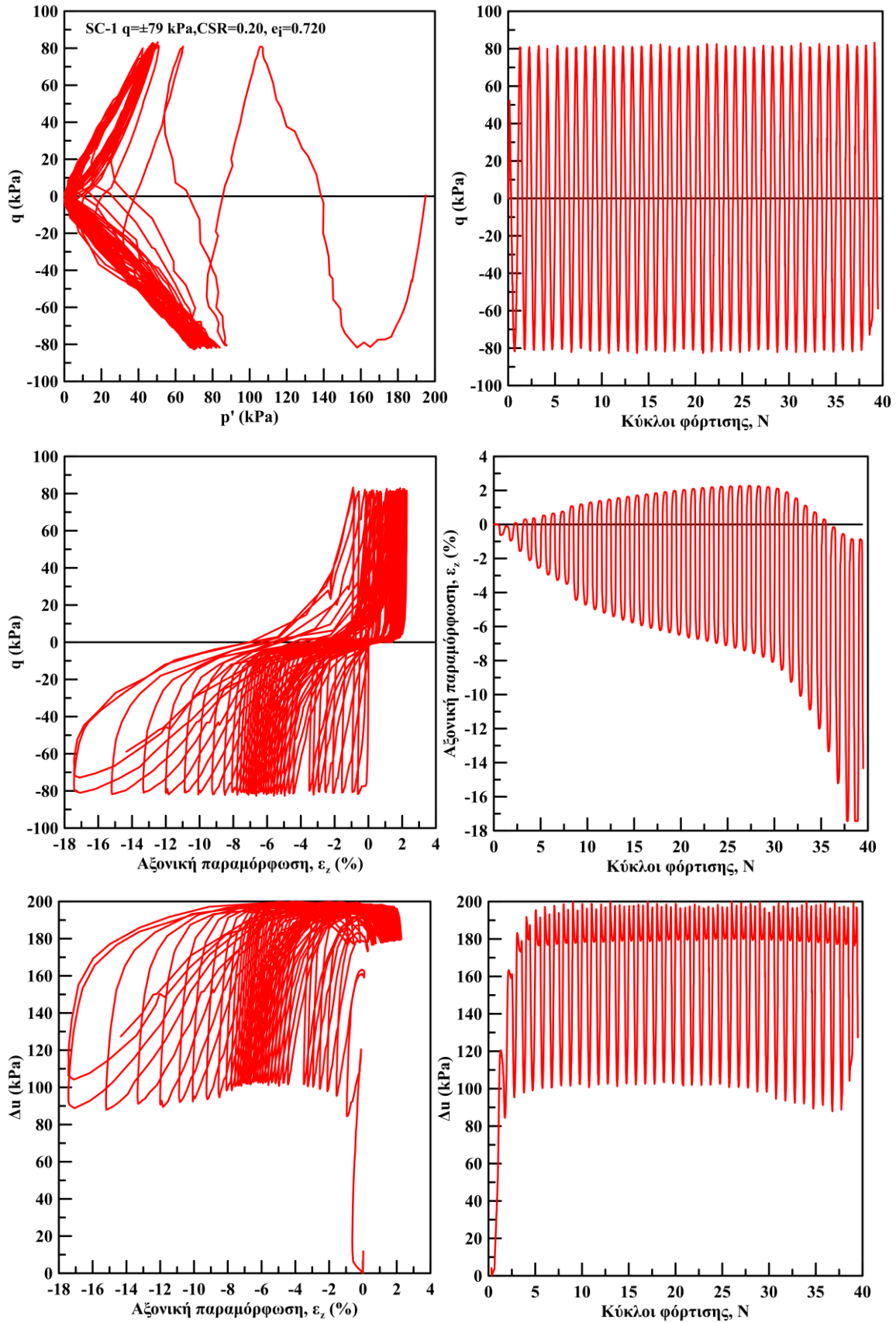
Από την αρχή της ανακυκλικής φόρτισης έως προσεγγιστικά την επίτευξη της μέγιστης τιμής Δu παρατηρείται διακύμανση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε κάθε κύκλο φόρτισης με την τάση για συστολική συμπεριφορά (αύξηση της πίεσης του νερού) να εμφανίζεται οδεύοντας προς τη μέγιστη θλιπτική αποκλίνουσα τάση ($q=-\max$ έως $q=+\max$) και την τάση για διαστολική συμπεριφορά οδεύοντας προς τη μέγιστη εφελκυστική αποκλίνουσα τάση ($q=+\max$ έως $q=-\max$). Το πλάτος της διακύμανσης αυξάνεται σταδιακά με τη συσσώρευση της υπερπίεσης σε κάθε κύκλο φόρτισης. Επιπλέον, το πλάτος σε κάθε δοκιμή αυξάνεται με την αύξηση του λόγου ανακυκλικής τάσης (CSR). Μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής Δu το πλάτος της διακύμανσης αυξάνεται και σταθεροποιείται μέχρι το τέλος της δοκιμής. Το σταθερό πλάτος της διακύμανσης της τιμής Δu κάθε δοκιμής αυξάνεται με την αύξηση του CSR. Μετά την επίτευξη της μέγιστης Δu , κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης παρατηρείται όμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες δοκιμές (SC1 και SC2) στην εξέλιξη της υπερπίεσης με τους κύκλους φόρτισης (Σχήμα 5.23 (α)). Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή Δu επιτυγχάνεται όταν $q=0$, στη συνέχεια μειώνεται από $q=0$ έως $q=+\max$, αυξάνεται από $q=+\max$ έως $q=0$, μειώνεται από $q=0$ έως $q=-\max$ και τέλος αυξάνεται από $q=-\max$ έως $q=0$.

Παρατηρούμε ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει σημαντική υπερπίεση του υγρού των πόρων εμφανίζει αξονική παραμόρφωση πολύ μικρού διπλού πλάτους. Ωστόσο, μετά από κάποιο κύκλο φόρτισης το πλάτος της αξονικής παραμόρφωσης αυξάνεται σημαντικά. Ο απαιτούμενος αριθμός των κύκλων φόρτισης για να εμφανιστεί αυτή η αλλαγή αυξάνεται με τη μείωση του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR. Μετά από αυτό το σημείο η αξονική παραμόρφωση αυξάνεται σταδιακά χωρίς να εμφανίζεται κάποια ραγδαία μεταβολή ακόμη και όταν η ενεργός τάση μηδενίζεται.

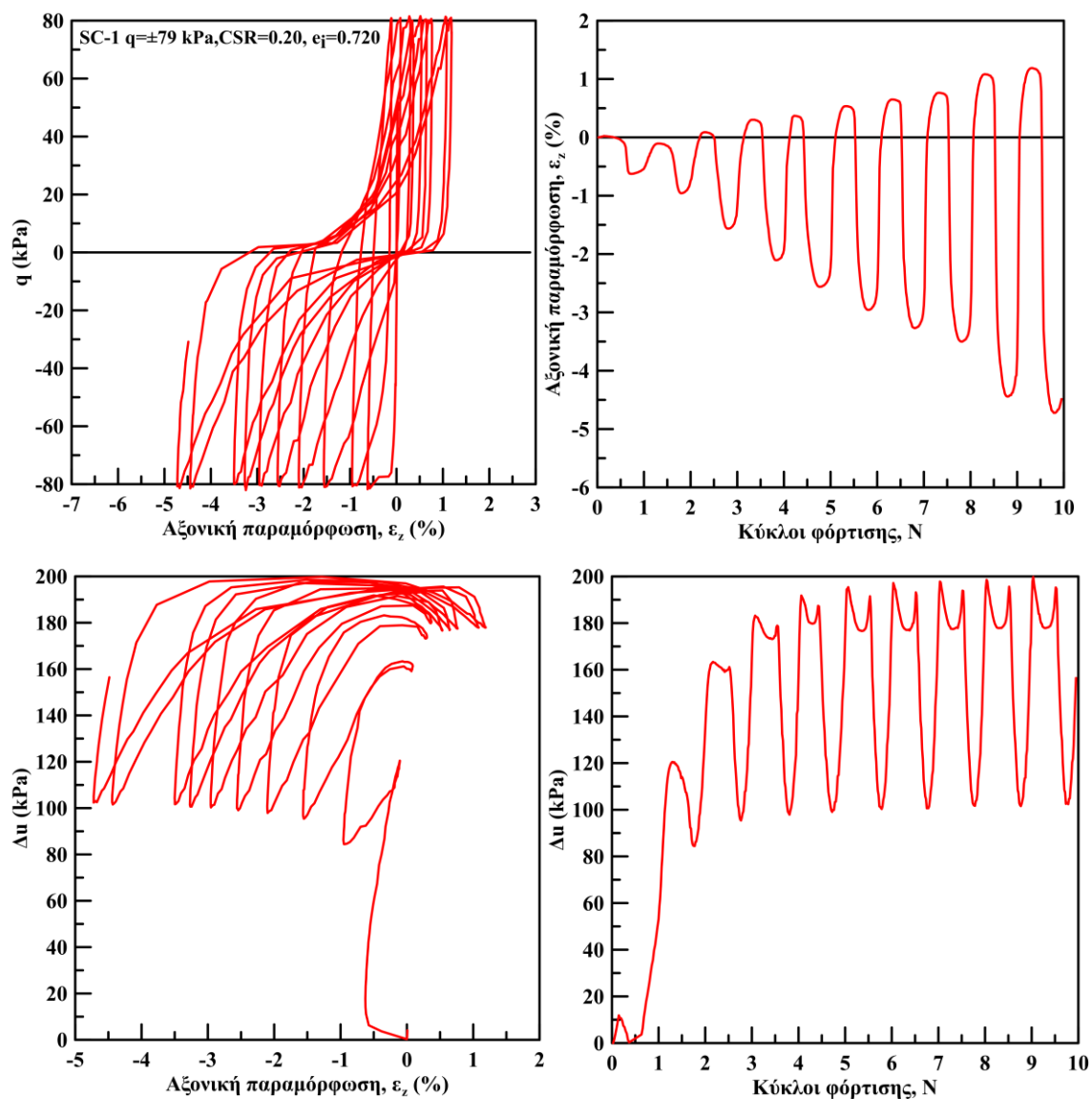
Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης παρατηρείται σημαντική διακύμανση της αξονικής παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, η αλγεβρική τιμή της αξονικής παραμόρφωσης αυξάνεται οδεύοντας προς τις θετικές τιμές της αποκλίνουσας τάσης από $q=0$ -έως $+max$ (θλιπτικό τμήμα), μειώνεται ελάχιστα κατά την αποφόρτιση από $q=+max$ έως 0 , στη συνέχεια μειώνεται έντονα οδεύοντας προς τις αρνητικές τιμές της αποκλίνουσας τάσης από $q=0$ έως $-max$ (εφελκυστικό τμήμα) και αυξάνεται κατά την αποφόρτιση από $q=-max$ έως 0 (Σχήμα 5.23 (β)). Ωστόσο, η συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζεται στο εφελκυστικό τμήμα υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτιά άμμου στον εφελκυσμό, όμοια με τη φυσική άμμο. Το πλάτος της διακύμανσης της αξονικής παραμόρφωσης, ε_z , αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων (N), ενώ μειώνεται με την αύξηση του λόγου ανακυκλικής τάσης (CSR).

Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $\varepsilon_z=1, 2.5$ και 5% πραγματοποιούνται σε διαφορετικούς κύκλους σε αντίθεση με τη φυσική άμμο M31. Όσο μειώνεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης CSR ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων για την επίτευξη αυτών των παραμορφώσεων αυξάνεται. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (αρχική ρευστοποίηση, επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1, 2.5$ και 5%) και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης CSR για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στη σταθεροποιημένη άμμο M31 παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

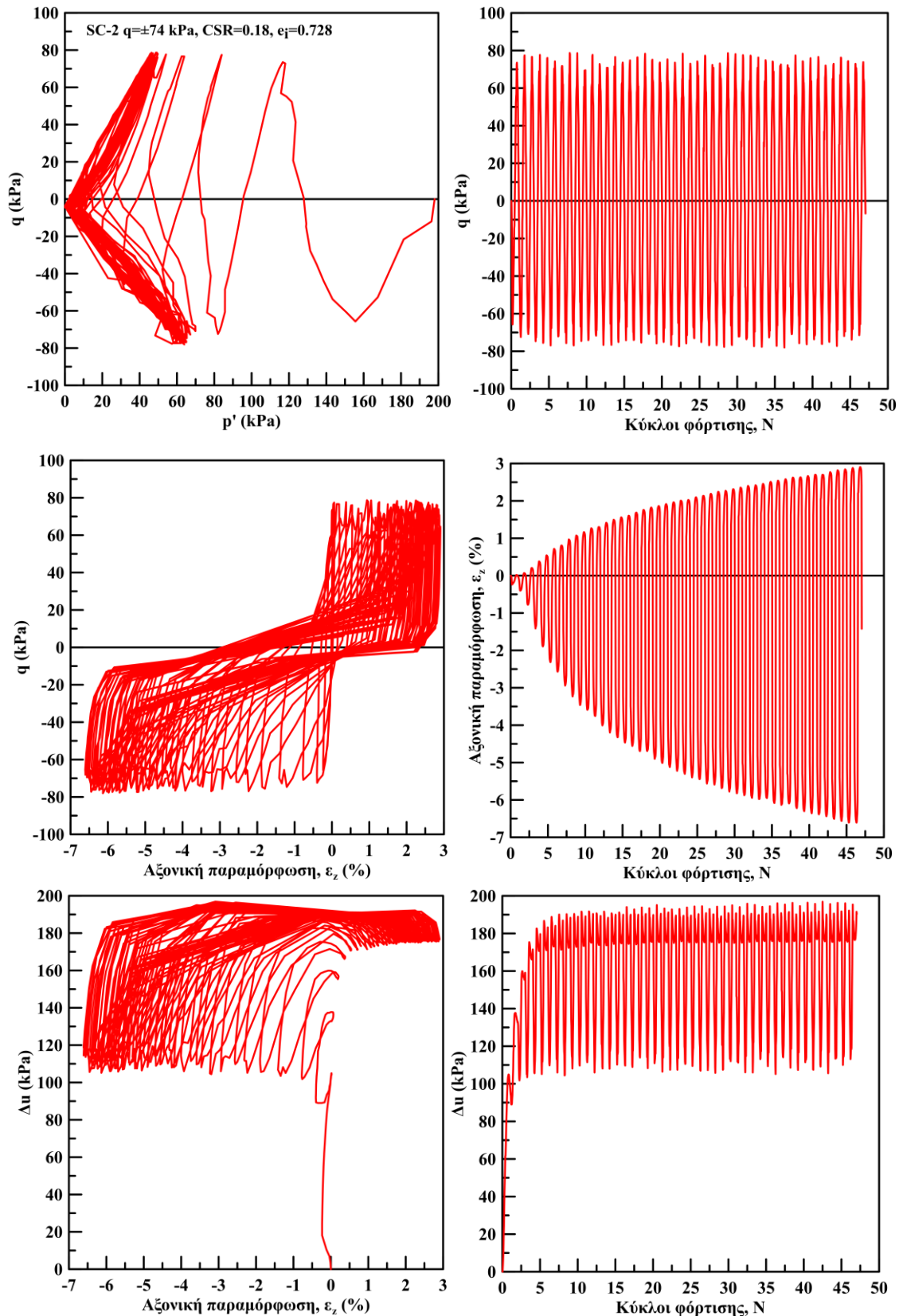


Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 79$ kPa

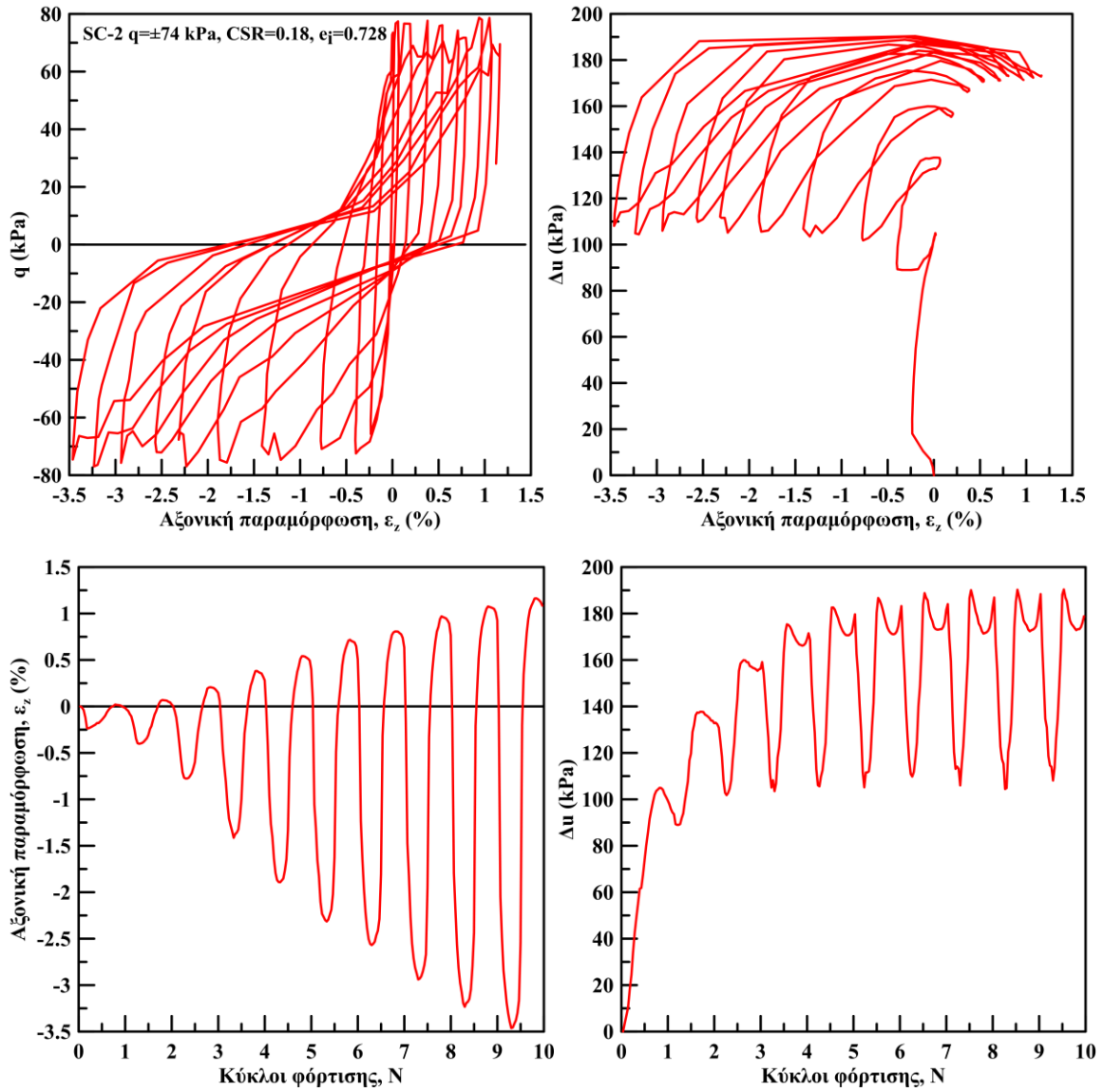


Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 79$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

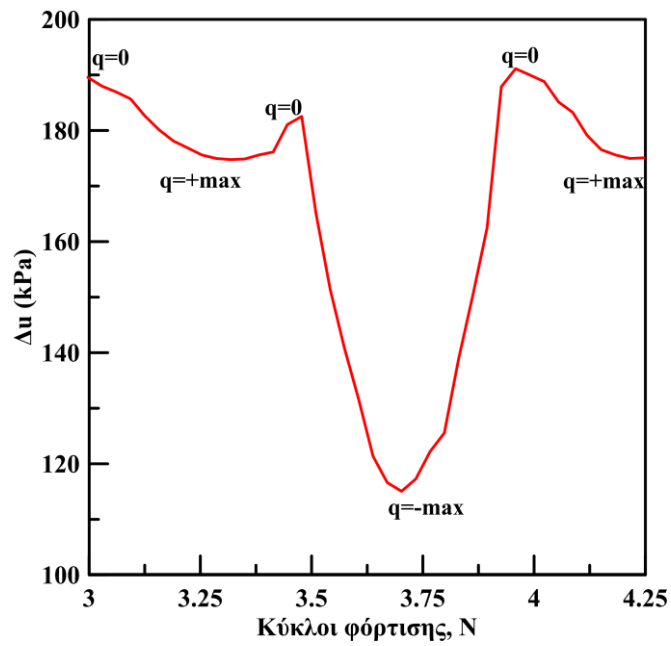


Σχήμα 5.21: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 74$ kPa

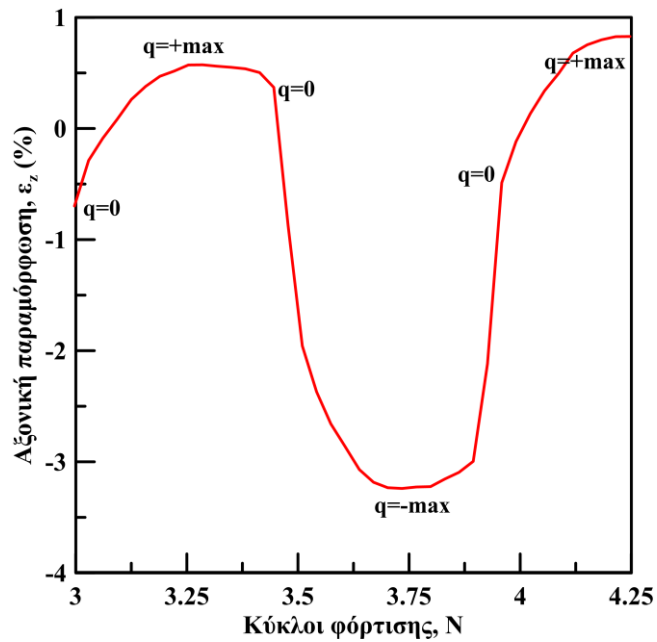


Σχήμα 5.22: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 74$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

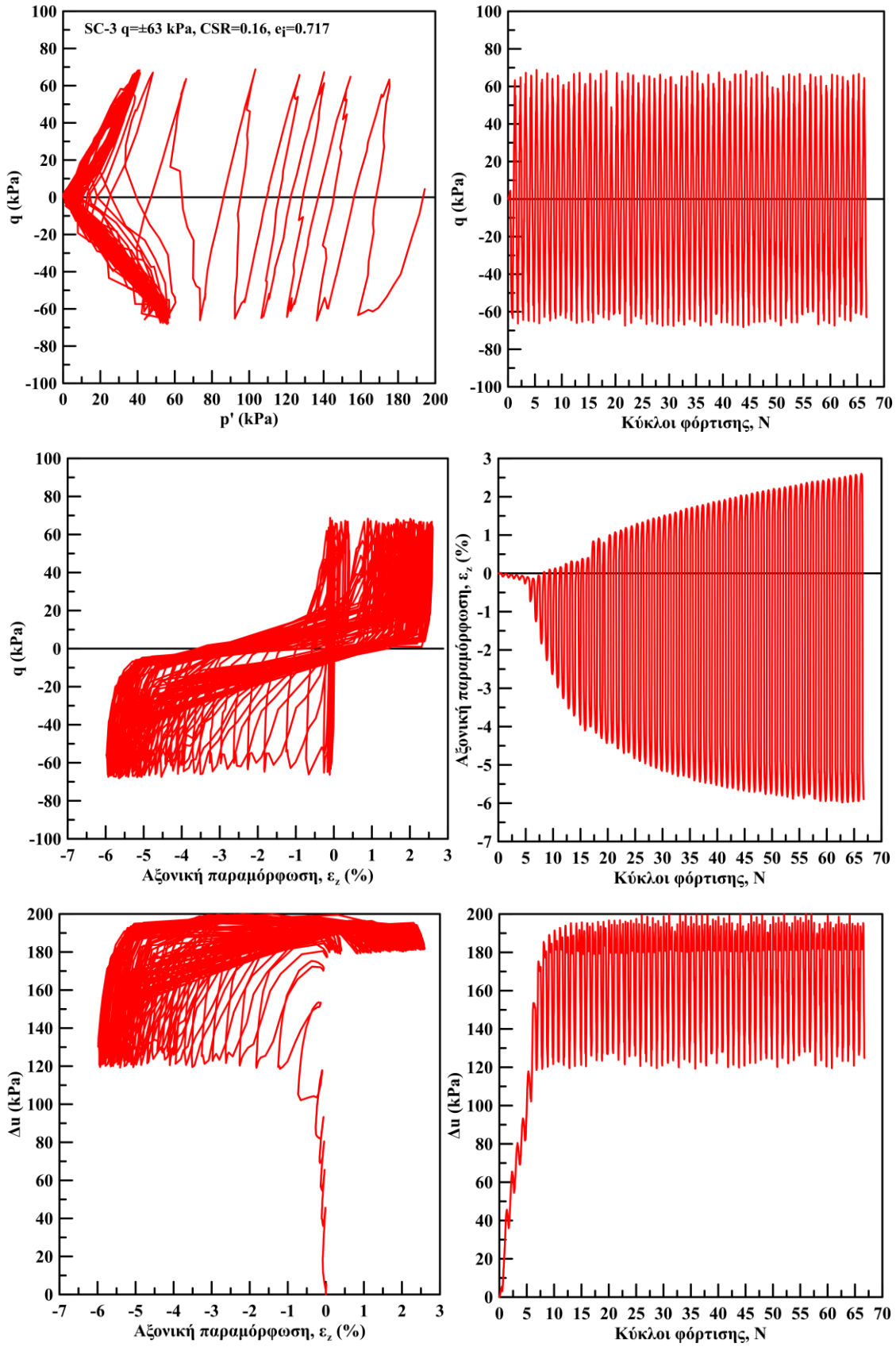
α)



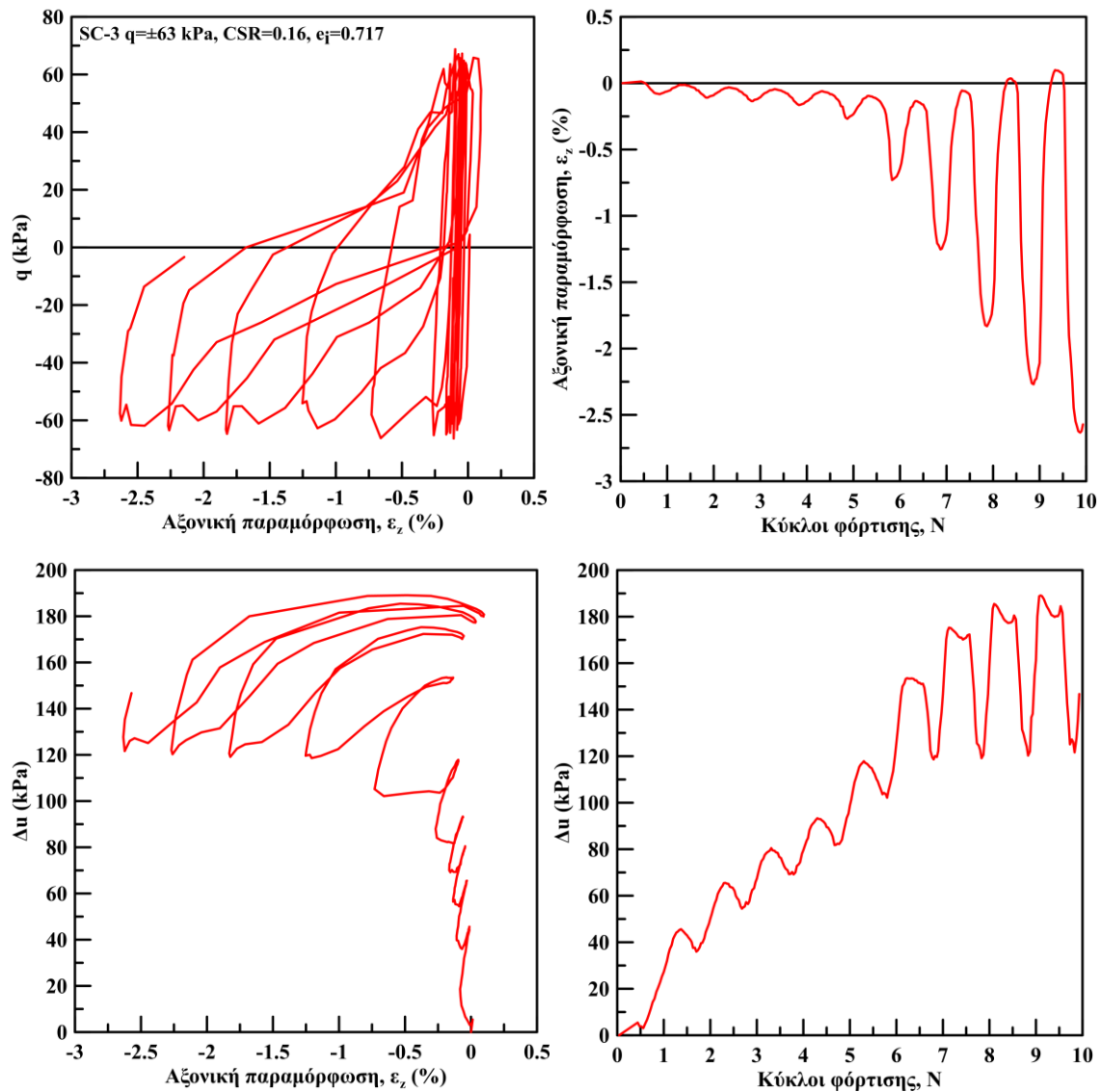
β)



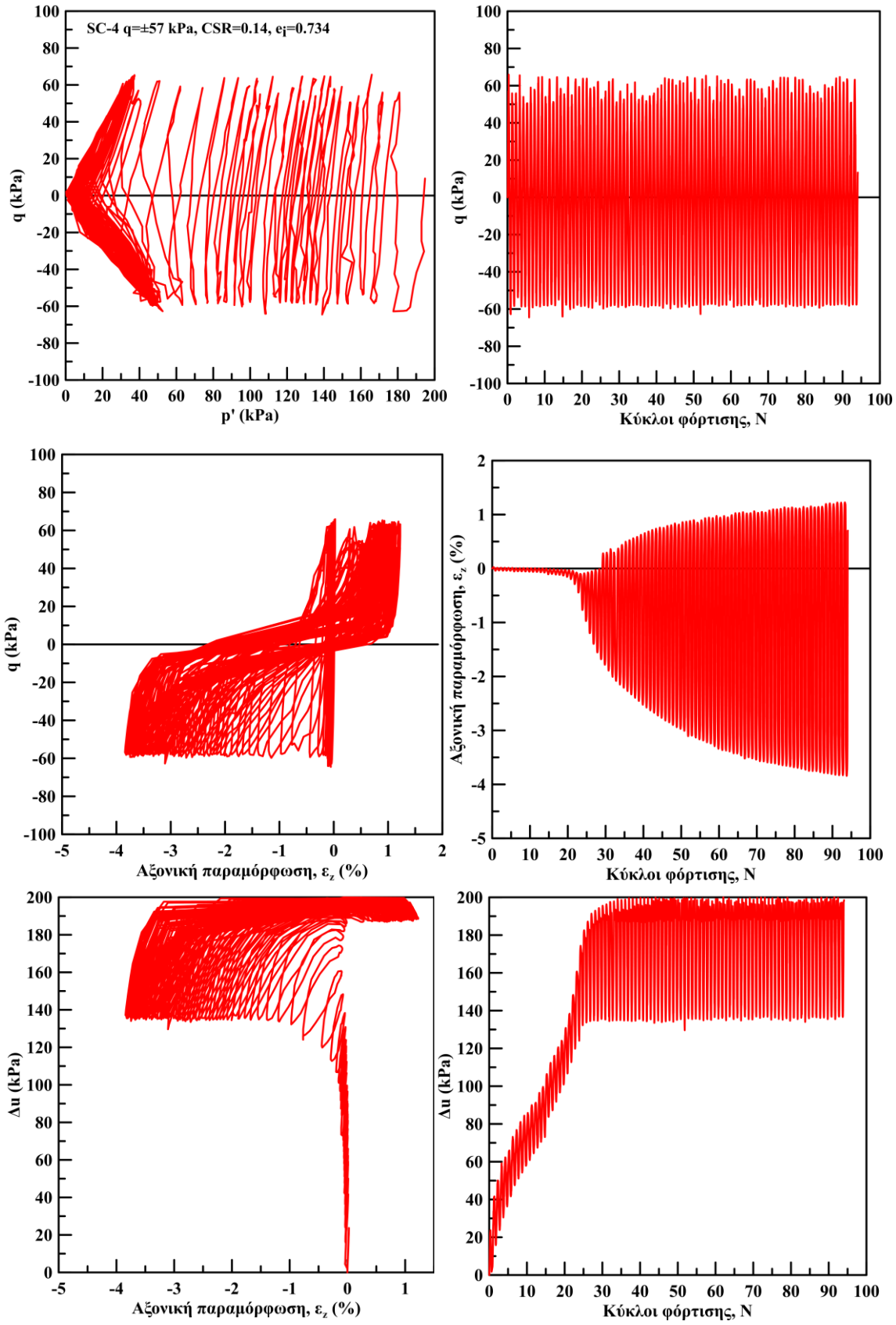
Σχήμα 5.23: Διακύμανση α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής παραμόρφωσης στη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης



Σχήμα 5.24: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 63 \text{ kPa}$

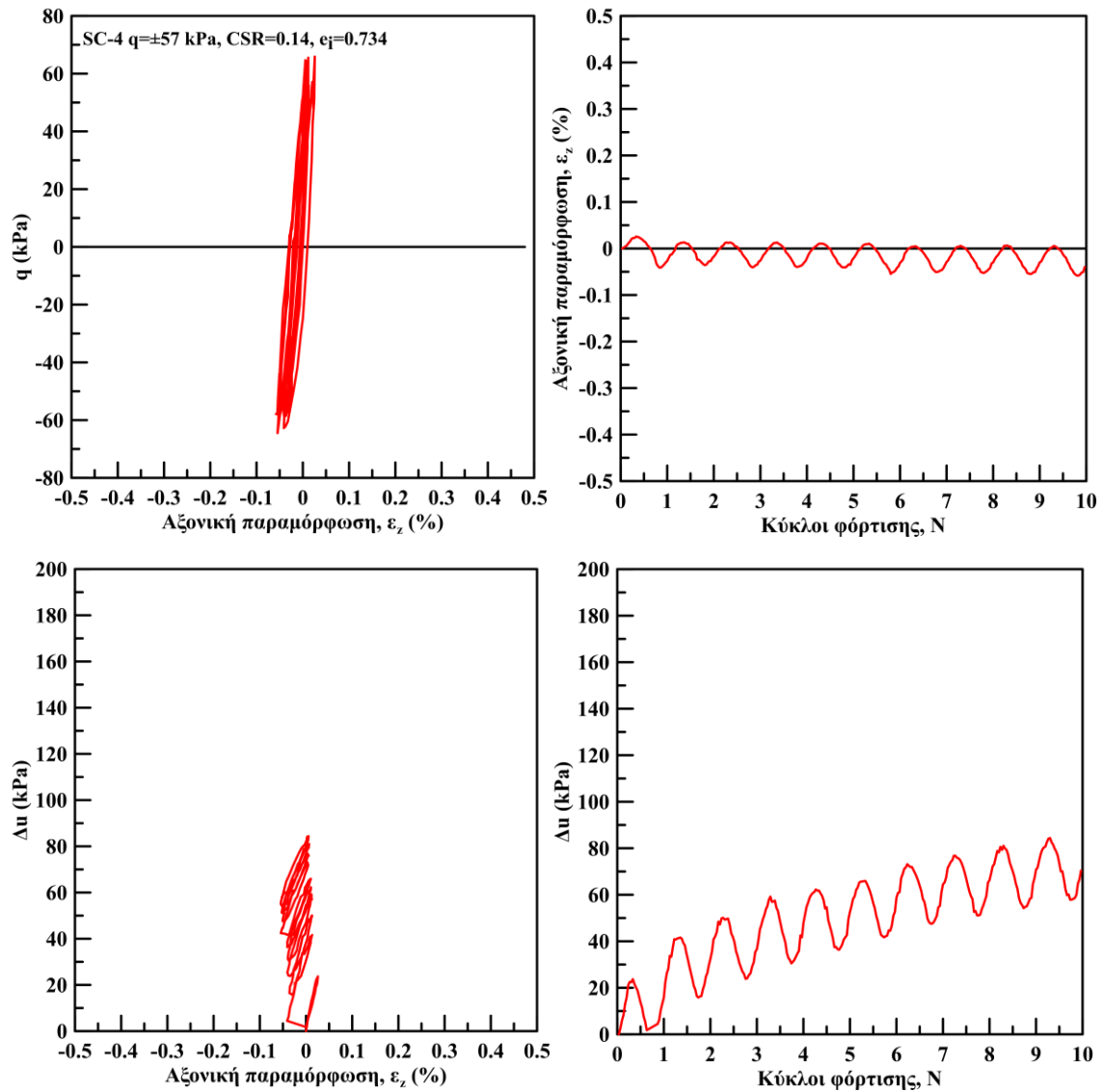


Σχήμα 5.25: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

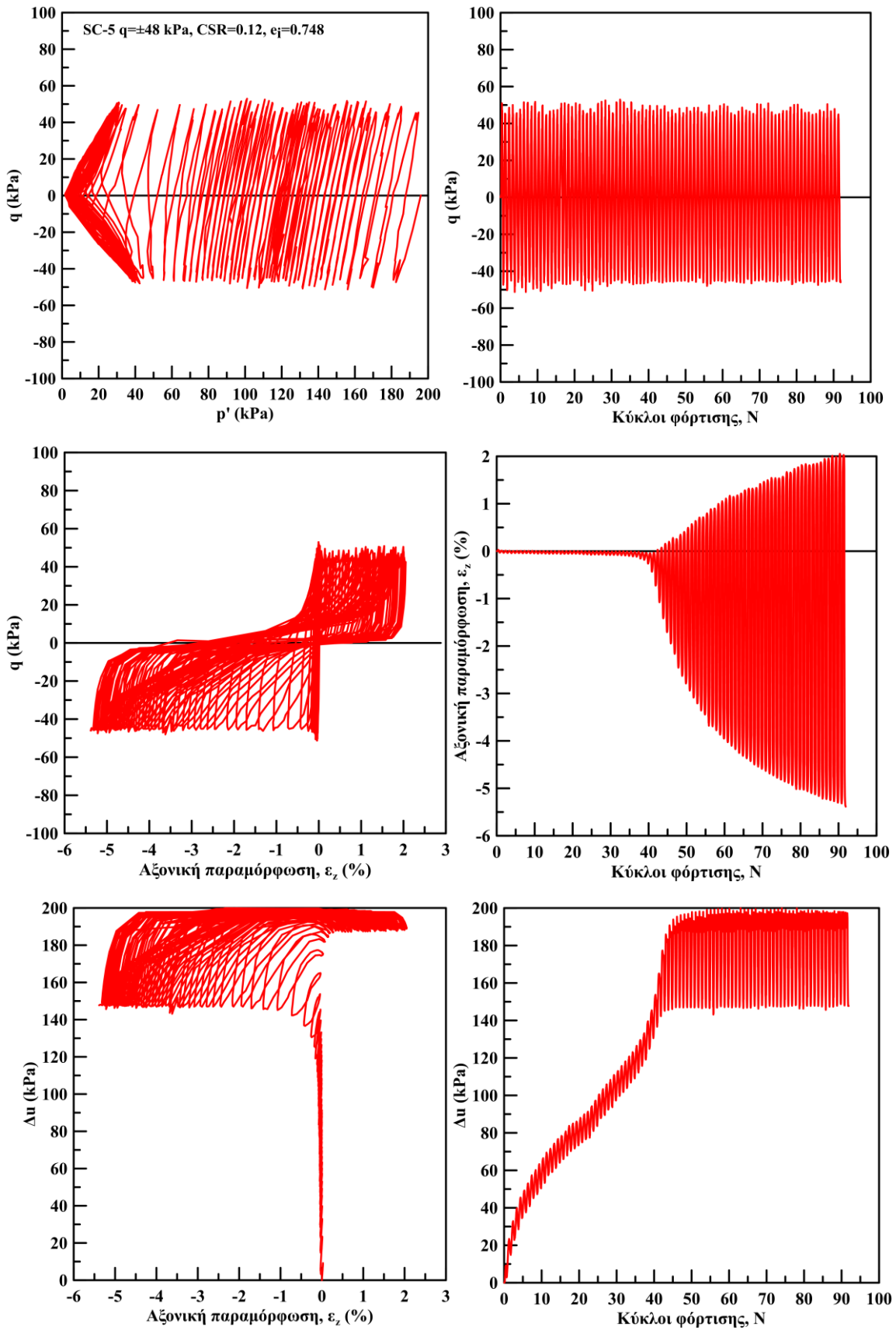


Σχήμα 5.26: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 57 \text{ kPa}$

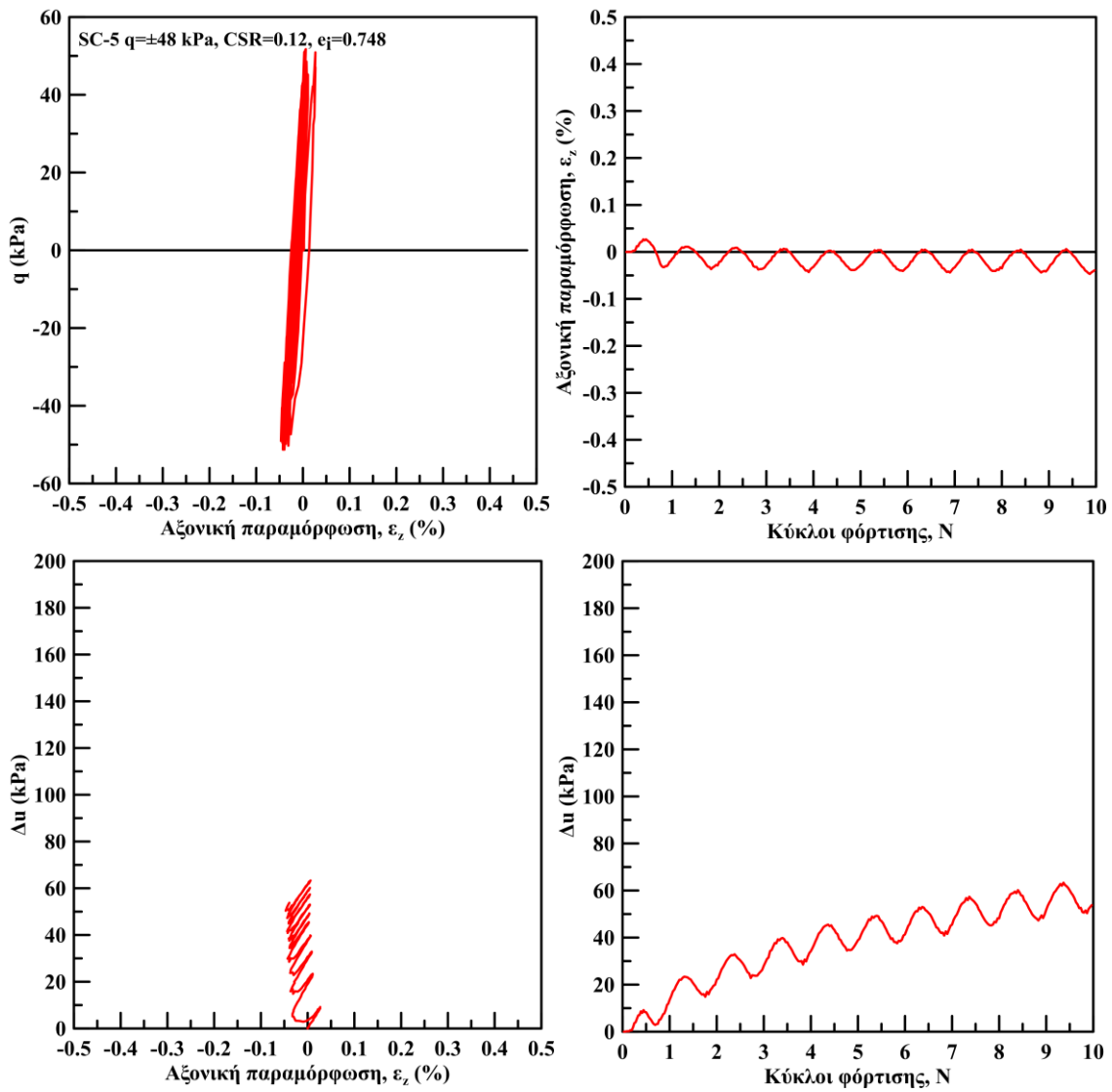
Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων



Σχήμα 5.27: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 57$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 5.28: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένο άμμο M31 υπό $q = \pm 48$ kPa



Σχήμα 5.29: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 48$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Στο **Σχήμα 5.30** συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των ανακυκλικών δοκιμών στη σταθεροποιημένη άμμο M31. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) **Σχήμα 5.30** (α) και της ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_{cyc}) **Σχήμα 5.30** (β) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης.

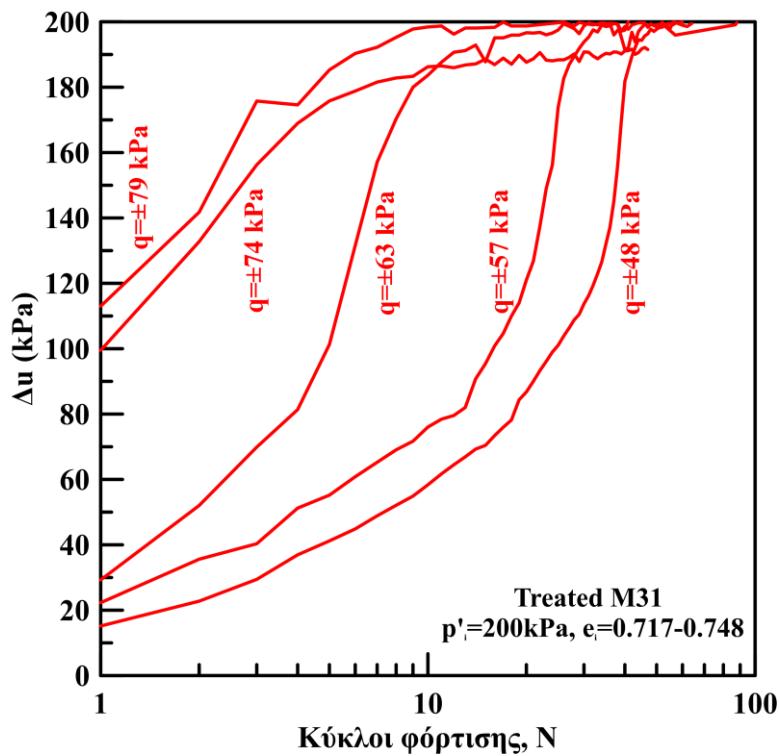
Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση q μηδενίζεται. Στις δοκιμές με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=79$ και 74 kPa η υπερπίεση του υγρού των πόρων αναπτύσσεται σε μεγάλο ποσοστό από τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Στη συνέχεια αυξάνεται γρήγορα μέχρι τη μέγιστη τιμή της όπου και σταθεροποιείται. Στις δοκιμές με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=63$, 57 και 48 kPa εμφανίζεται υπερπίεση του υγρού των πόρων από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια αυξάνεται περίπου σταθερά μέχρι ένα σημείο όπου ο ρυθμός αυξάνεται ώσπου η υπερπίεση (Δu) να μεγιστοποιηθεί.

Επισημαίνεται ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων αυξάνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q . Επιπρόσθετα, όσο μειώνεται η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση, q , απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για την ανάπτυξη υπερπίεσης ίσης με την αρχική ενεργό τάση ($\Delta u=p'_i=200$ kPa) και την «αρχική ρευστοποίηση».

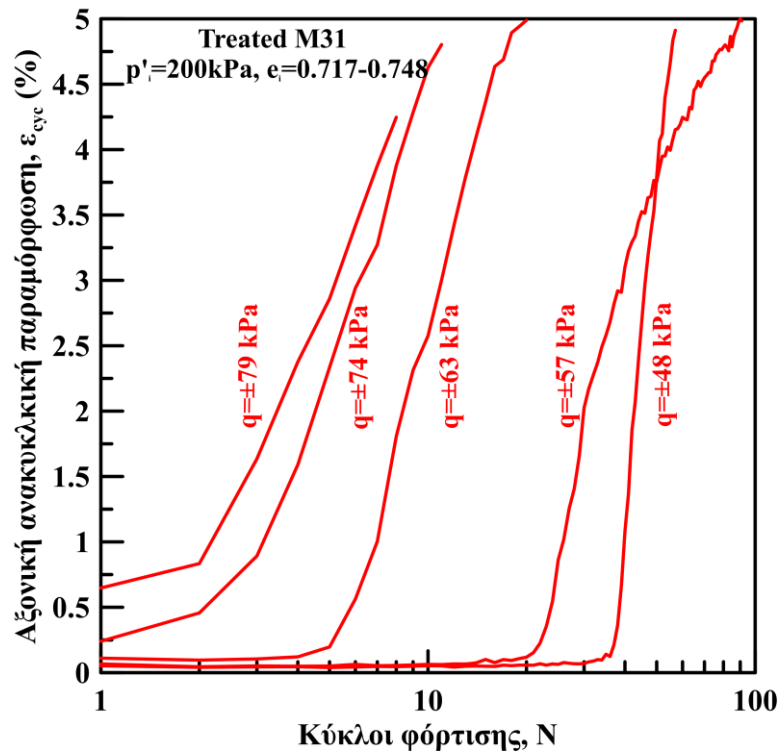
Στο **Σχήμα 5.30** (β) η αξονική ανακυκλική τάση (ϵ_{cyc}) δηλαδή η παραμόρφωση διπλού πλάτους σε κάθε κύκλο φόρτισης υπολογίζεται ως το απόλυτο μέγεθος της διαφοράς της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) που επιτυγχάνεται στην μέγιστη θλιπτική ($+q_{max}$) και στη μέγιστη εφελκυστική αποκλίνουσα τάση ($-q_{max}$) κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης.

Στις δοκιμές με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=79$ και 74 kPa αναπτύσσεται αξονική παραμόρφωση από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια αυξάνεται έντονα καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Στις δοκιμές με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=63$, 57 και 48 kPa στους πρώτους κύκλους φόρτισης η ανακυκλική αξονική παραμόρφωση είναι πρακτικά μηδενική, ενώ στη συνέχεια, η ανακυκλική παραμόρφωση αυξάνεται έντονα και συσσωρεύεται σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης.

α)



β)



Σχήμα 5.30: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής ανακυκλικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31

5.7 Σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, τριαξονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31. Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων γίνεται προσπάθεια να καθοριστεί η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας με περιεκτικότητα σταθεροποιητή 10% κ.β. στην εξέλιξη της πίεσης του υγρού των πόρων, στη συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης, στην αντίσταση στη ρευστοποίηση και στο μέτρο εδαφικής δυσστησίας. Τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.4**.

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% δοκίμια άμμου M31

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες					
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
C-1	0.722	200	0.20	5	1	1	1	1
C-2	0.717	200	0.19	5	2	2	2	2
C-3	0.715	200	0.16	5	5	5	5	5
C-4	0.720	200	0.13	5	9	9	9	9
C-5	0.724	200	0.12	2.5	21	21	21	21
C-6	0.710	200	0.11	2.5	85	85	85	85
SC-1	0.720	200	0.20	5	3	3	5	9
SC-2	0.728	200	0.18	5	5	4	6	12
SC-3	0.717	200	0.16	5	10	7	11	19
SC-4	0.734	200	0.14	5	29	27	35	93
SC-5	0.748	200	0.12	5	46	41	46	59

Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)
 $N_{1\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=1\%$
 $N_{2.5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=2.5\%$
 $N_{5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=5\%$

Στο **Σχήμα 5.31** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, χαλαρής πυκνότητας ($e_i=0.722$ και 0.720) και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 79\text{kPa}$ ($\text{CSR}=0.20$). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης (ε_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Επιπρόσθετα, στο **Σχήμα 5.32** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεϊς κύκλων φόρτισης (ε_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

Παρατηρούμε ότι η χαλαρή άμμος αναπτύσσει σημαντική υπερπίεση του υγρού των πόρων από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, αλλά μηδενική σχεδόν παραμόρφωση μέχρι το σημείο αστάθειας, όπου αναπτύσσεται έντονη παραμόρφωση και το δοκίμιο ρευστοποιείται. Επισημαίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει στον πρώτο κύκλο φόρτισης μεγαλύτερη υπερπίεση (Δu) και αξονική παραμόρφωση (ε_z) σε σχέση με τη φυσική άμμο, ωστόσο δεν εμφανίζεται κάποιο σημείο αστάθειας. Η αξονική παραμόρφωση συσσωρεύεται σταδιακά από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και παρά το μηδενισμό της ενεργού τάσης το δοκίμιο δεν καταρρέει, αλλά συντηρεί παραμορφώσεις διπλού πλάτους έως 10%. Μετά τους 30 κύκλους φόρτισης η αξονική παραμόρφωση αυξάνεται περεταίρω με τη συσσώρευση να παρατηρείται στο εφελκυστικό τμήμα υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου σε αυτή την φόρτιση.

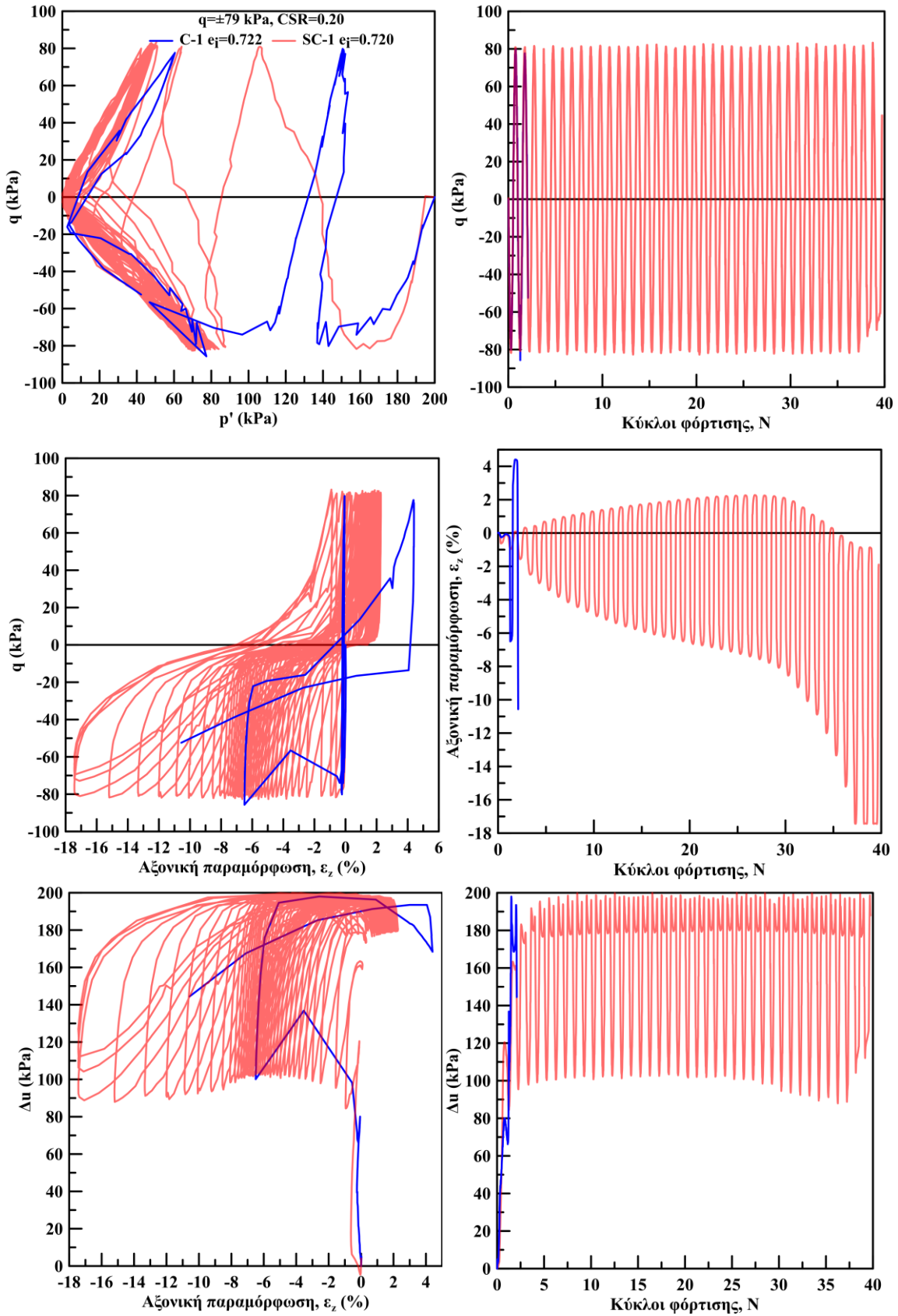
Στα επόμενα σχήματα διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στην ανακυκλική συμπεριφορά της χαλαρής άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $\text{CSR}=0.16$ (**Σχήμα 5.33** και **Σχήμα 5.34**) και $\text{CSR}=0.12$ (**Σχήμα 5.35** και **Σχήμα 5.36**). Παρατηρούμε ότι σε αυτές τις δοκιμές η φυσική και η σταθεροποιημένη άμμος έχουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά στους πρώτους κύκλους φόρτισης με την αξονική παραμόρφωση (ε_z) και την υπερπίεση του υγρού των πόρων (Δu) πρακτικά να ταυτίζονται. Ωστόσο, οι καμπύλες της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 διαφοροποιούνται έντονα όταν η πρώτη πλησιάζει το σημείο αστάθειας της (ενότητα 5.5). Μετά από αυτό το σημείο η χαλαρή άμμος αναπτύσσει έντονη αξονική παραμόρφωση και ρευστοποιείται. Αντίθετα, στη σταθεροποιημένη άμμο παρατηρείται συσσώρευση μεγάλων αξονικών παραμορφώσεων και έντονη διακύμανση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων ακόμη και μετά το μηδενισμό της ενεργού τάσης. Από τα διαγράμματα υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) συμπεραίνεται ότι η έντονη συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζεται περίπου στην ίδια τιμή της υπερπίεσης Δu για

τη σταθεροποιημένη και μη άμμο M31 σε κάθε λόγο τάσεων (CSR). Η τιμή αυτή αυξάνεται όσο μειώνεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης, CSR. Ωστόσο μετά την τιμή αυτή οι καμπύλες των δύο υλικών διαφοροποιούνται, όπως ήδη αναφέρθηκε, αφού η φυσική άμμος ραγδαία αναπτύσσει τη μέγιστη τιμή υπερπίεσης και αξονικής παραμόρφωσης, ενώ η σταθεροποιημένη εμφανίζει έντονη διακύμανση της υπερπίεσης Δu με σταδιακή συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης.

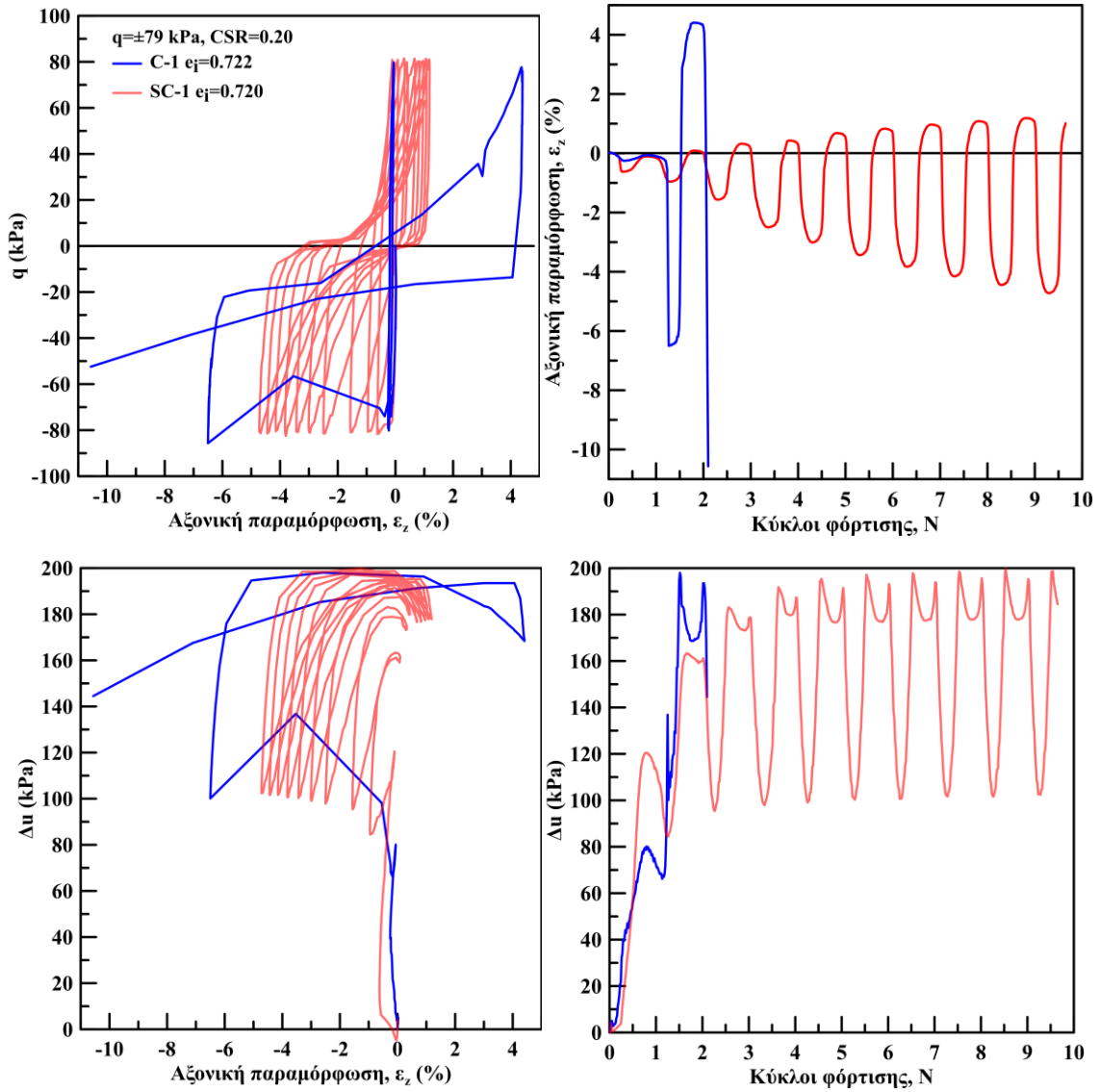
Επιπλέον, αναφέρεται ότι ανεξαρτήτως λόγου τάσεων (CSR) η φυσική άμμος αστοχεί στον εφελκυσμό και η σταθεροποιημένη άμμος συσσωρεύει αξονική παραμόρφωση στον εφελκυσμό, υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της άμμου με και χωρίς σταθεροποίηση στην εφελκυστική φόρτιση. Στη σταθεροποιημένη άμμο το πλάτος της διακύμανσης της αξονικής παραμόρφωσης (ε_z) και της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) αυξάνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης.

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα δοκίμια σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31 με CSR=0.12, 0.16 και 0.20 δεν καταρρέουν μετά το μηδενισμό της ενεργού τάσης όπως τα δοκίμια της φυσικής χαλαρής άμμου. Ωστόσο, αναπτύσσουν αξονική παραμόρφωση από την έναρξη της φόρτισης, καταλήγοντας να «συντηρούν» αξονικές παραμορφώσεις διπλού πλάτους έως και 16%.

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

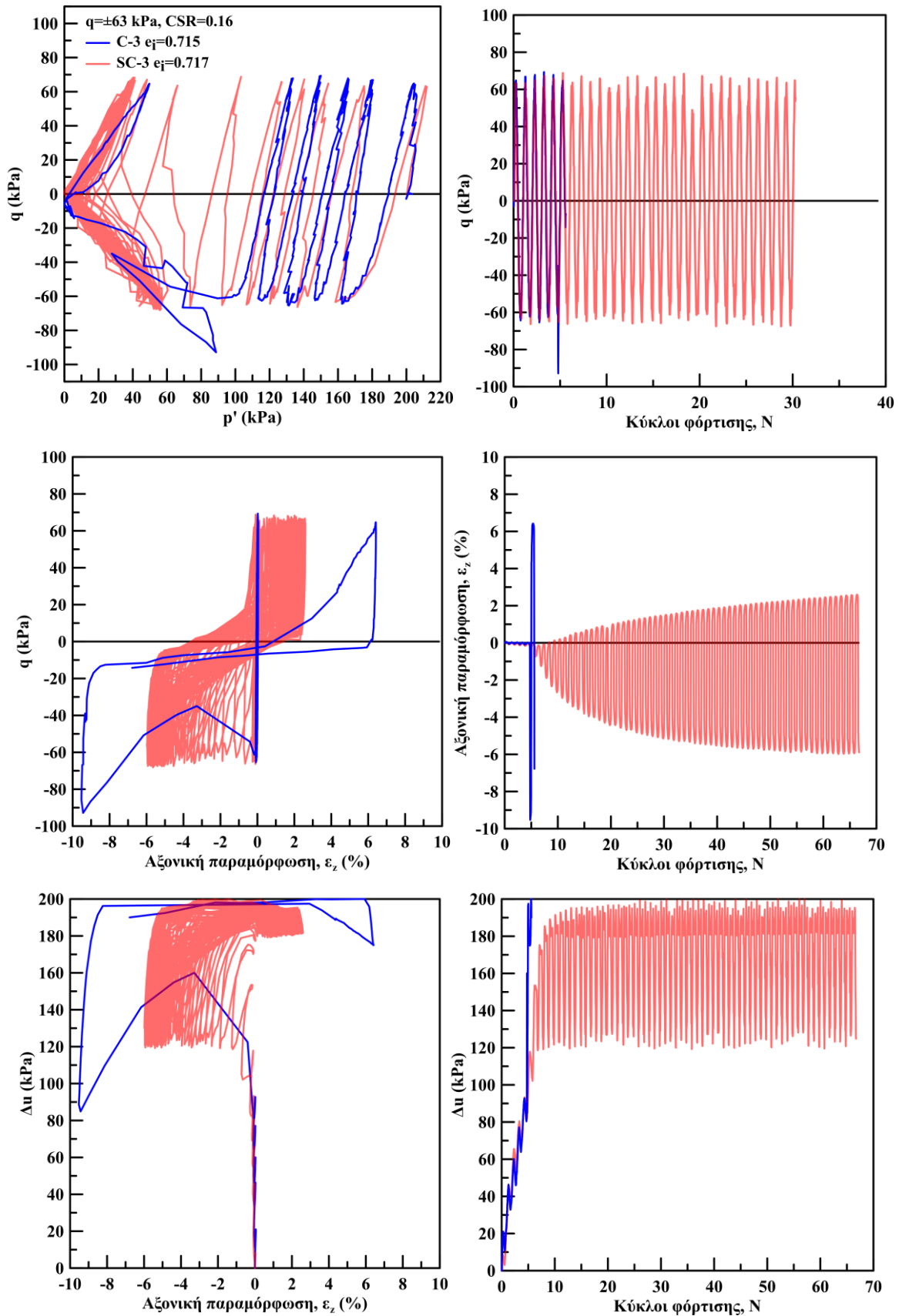


Σχήμα 5.31: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 79$ kPa

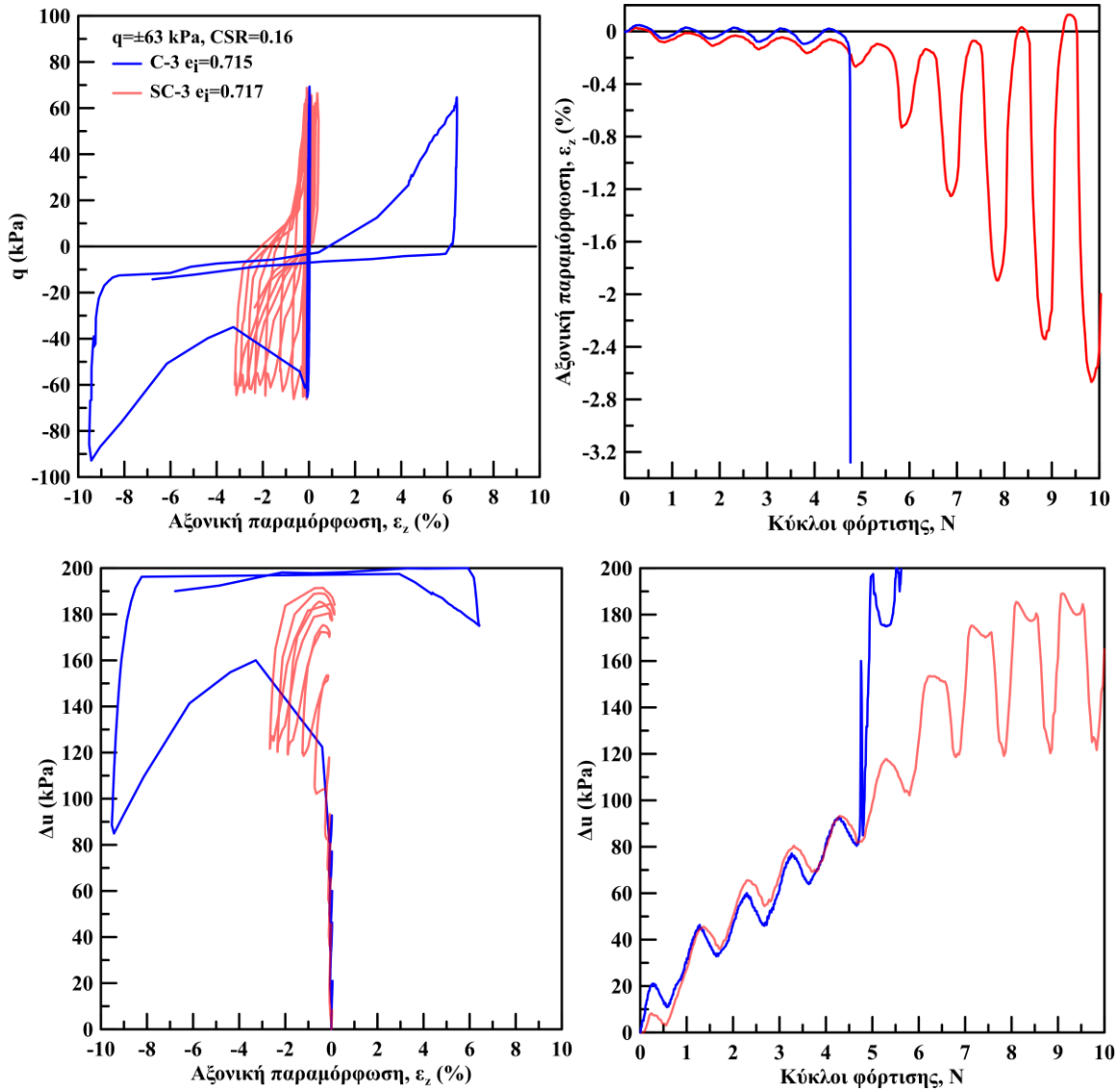


Σχήμα 5.32: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 79$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

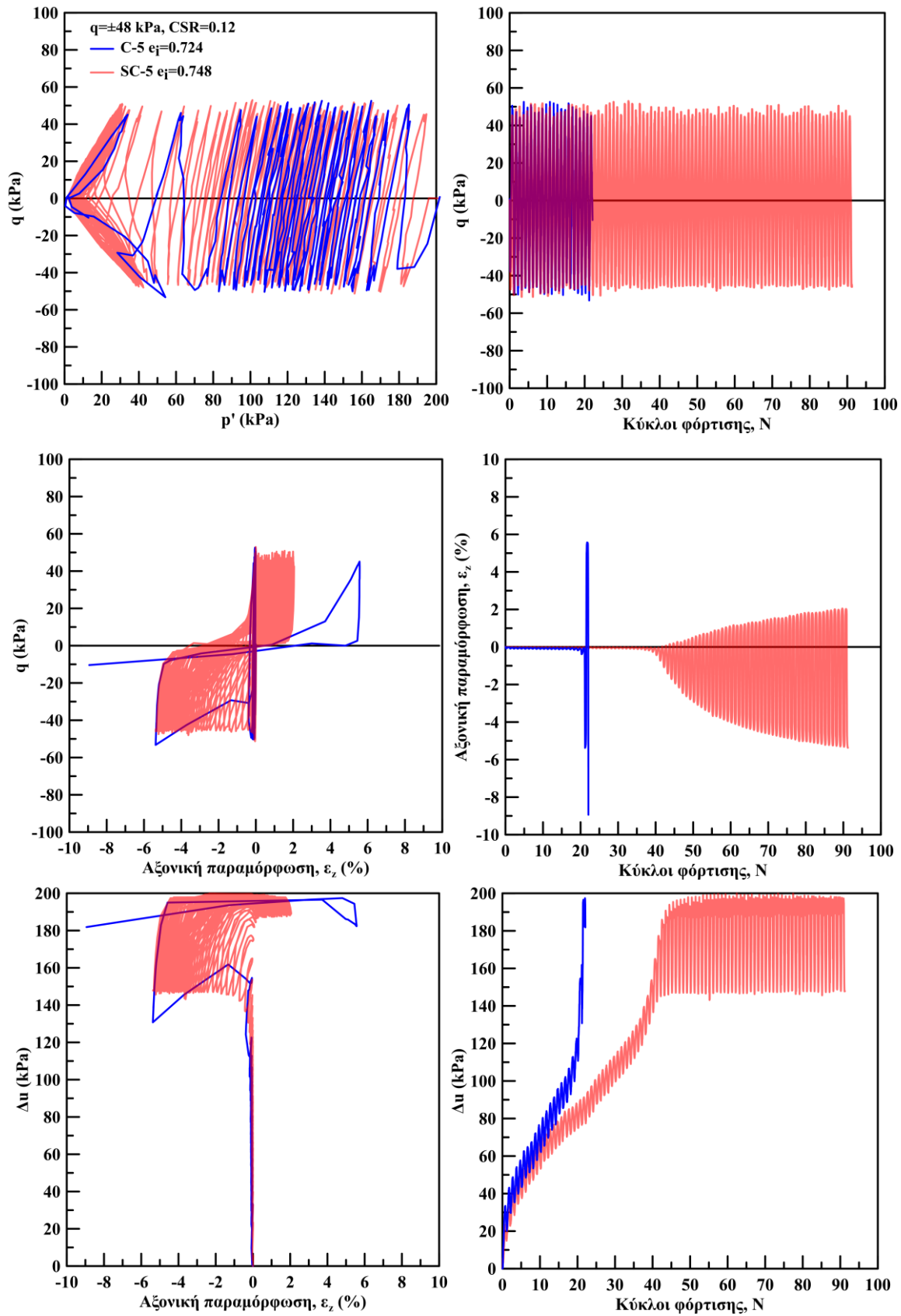


Σχήμα 5.33: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 63$ kPa

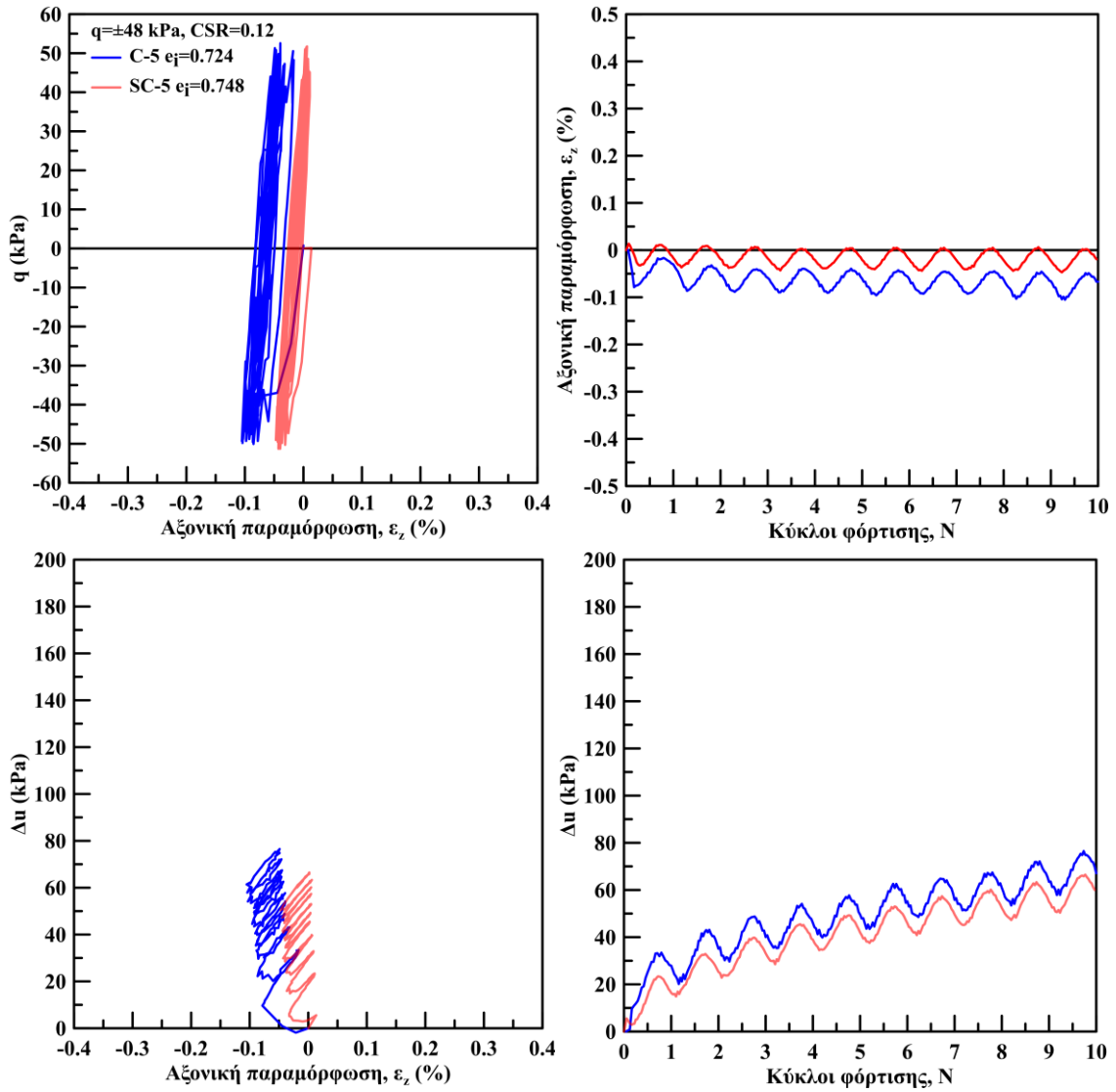


Σχήμα 5.34: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων



Σχήμα 5.35: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 48$ kPa



Σχήμα 5.36: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 48 \text{ kPa}$ για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Η ανάπτυξη μεγάλης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική φόρτιση οδηγεί σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης, δηλαδή η υπερπίεση εξισώνεται με την τάση στερεοποίησης ($\Delta u = p'_i$). Στην παρούσα διατριβή η αντίσταση σε ρευστοποίηση εκφράζεται από το λόγο ανακυκλικών τάσεων, CSR (Cyclic Stress Ratio), σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται είτε μέχρι την αρχική ρευστοποίηση, N_{IL} , είτε μέχρι την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης συγκεκριμένου μεγέθους ($\varepsilon_{cyc} = 1, 2.5$ ή 5%) $N_{1\%}$, $N_{2.5\%}$ ή $N_{5\%}$. Ο λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ως προς την τάση στερεοποίησης, CSR, στην παρούσα διατριβή ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-13). Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται το απόλυτο μέγεθος της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους για τον ορισμό της ρευστοποίησης $|\varepsilon_{cyc}| = 1, 2.5$ και 5% .

Τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, αστράγγιστων, τριαξονικών δοκιμών στα χαλαρά, κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 συνοψίζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα στο **Σχήμα 5.37** σε όρους CSR - κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση N_{IL} . Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR ως συνάρτηση του πλήθους κύκλων φόρτισης, N, που απαιτούνται για να αναπτυχθεί αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc} = 1\%$ (**Σχήμα 5.38**), $\varepsilon_{cyc} = 2.5\%$ (**Σχήμα 5.39**) και $\varepsilon_{cyc} = 5\%$ (**Σχήμα 5.40**).

Αρχικά παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα της σταθεροποίησης οι καμπύλες ρευστοποίησης είναι φθίνουσες καθώς ο λόγος ανακυκλικών τάσεων, CSR, μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης, δηλαδή, όσο μειώνεται το μέγεθος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για την επίτευξη της ρευστοποίησης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα της διατριβής για την άμμο M31 ανήκουν σε μια καμπύλη (καμπύλη ρευστοποίησης-liquefaction curve) που περιγράφεται από μια εξίσωση δύναμης (5-14), (Idriss & Boulanger, 2008) όπου $a = 0.200$ και $b = -0.162$. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την περίπτωση των χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών άμμου M31, για δεδομένη τιμή CSR, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5% πρακτικά ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει γιατί μετά το τέλος του Σταδίου 2 **Σχήμα 5.11**, αρχίζει η ασταθής συμπεριφορά, δηλαδή ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων με ταυτόχρονη ανάπτυξη μεγάλης αξονικής παραμόρφωσης.

Η επίδραση της σταθεροποίησης της άμμου M31 με κολλοειδή πυριτία με ποσοστό σταθεροποιητή 10% κ.β. στις καμπύλες ρευστοποίησης είναι εμφανής. Οι καμπύλες της σταθεροποιημένης άμμου είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά υποδεικνύοντας τη μεγαλύτερη ανακυκλική αντοχή της σε σχέση με τη φυσική άμμο M31. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι στη σταθεροποιημένη άμμο απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για να επιτευχθεί η αρχική ρευστοποίηση (IL) και για να αναπτυχθεί ανακυκλική

παραμόρφωση $\epsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5% . Σε αντίθεση με τη φυσική άμμο, οι καμπύλες $CSR-N_{IL}$, $CSR-N_{1\%}$, $CSR-N_{2.5\%}$ και $CSR-N_{5\%}$ της σταθεροποιημένης άμμου δεν ταυτίζονται. Η αξονική παραμόρφωση στη σταθεροποιημένη άμμο συσσωρεύεται σταδιακά από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και παρά το μηδενισμό της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση) η αξονική παραμόρφωση συνεχίζει να συσσωρεύεται.

Για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της σταθεροποίησης στον λόγο ανακυκλικής τάσης της άμμου M31 και για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL, $\epsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5%), χρησιμοποιείται ένας δείκτης βελτίωσης (I_f) που εκφράζεται από την εξίσωση (5-15).

$$I_f = \frac{CSR_{Treated}}{CSR_{Untreated}} \quad (5-15)$$

Όπου: $CSR_{Treated}$, ο λόγος ανακυκλικής τάσης ($CSR = \frac{q}{2 \cdot p'_i}$) της σταθεροποιημένης άμμου,

$CSR_{Untreated}$, ο λόγος ανακυκλικής τάσης ($CSR = \frac{q}{2 \cdot p'_i}$) της φυσικής άμμου

Η εξέλιξη του δείκτη βελτίωσης I_f σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.41**. Παρατηρούμε ότι με τη σταθεροποίηση η ανακυκλική αντοχή της άμμου βελτιώνεται ($I_f > 1$) ανεξαρτήτως κριτηρίου αστοχίας. Η βελτίωση αυτή μειώνεται με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Ανάλογα με το κριτήριο αστοχίας που επιλέγεται, παρατηρούμε ότι το ποσοστό βελτίωσης της ανακυκλικής αντοχής αλλάζει. Συγκεκριμένα, ο δείκτης βελτίωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η ανακυκλική παραμόρφωση ϵ_{cyc} που τίθεται ως όριο του κριτηρίου. Επομένως, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία καθυστερεί κυρίως την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων με το ποσοστό βελτίωσης της ανακυκλικής αντοχής να κυμαίνεται από $40\%-30\%$ ($N=1-100$) όταν το κριτήριο ρευστοποίησης είναι η επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=5\%$. Επισημαίνεται ότι οι καμπύλες του δείκτη βελτίωσης για την αρχική ρευστοποίηση (IL) και της επίτευξης αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=1\%$ πρακτικά ταυτίζονται, γιατί στη σταθεροποιημένη άμμο η αξονική παραμόρφωση 1% επιτυγχάνεται σχεδόν ταυτόχρονα με την αρχική ρευστοποίηση. Ενδεικτικά ποσοστά βελτίωσης της ανακυκλικής αντοχής της άμμου μετά τη σταθεροποίησή της για αριθμό κύκλων φόρτισης $N=1, 10$ και 100 για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.5**.

Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} (Cyclic Resistance Ratio), είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση του εδαφικού υλικού σε 15 κύκλους φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τυπικός αριθμός κύκλων σε πραγματικούς σεισμούς είναι $N=10-20$ για μέγεθος σεισμού M7.5 (Robertson & Wride, 1998). Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης σε ρευστοποίηση για τη χαλαρή άμμο M31 προκύπτει $CRR_{15}=0.13$ ($e_i=0.710-0.724$) ανεξαρτήτως κριτηρίου ρευστοποίησης. Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} της σταθεροποιημένης άμμου M31 εξαρτάται από

Κεφάλαιο 5: Επίδραση της Κολλοειδούς Πυριτίας στην Ανακυκλική Συμπεριφορά Άμμων

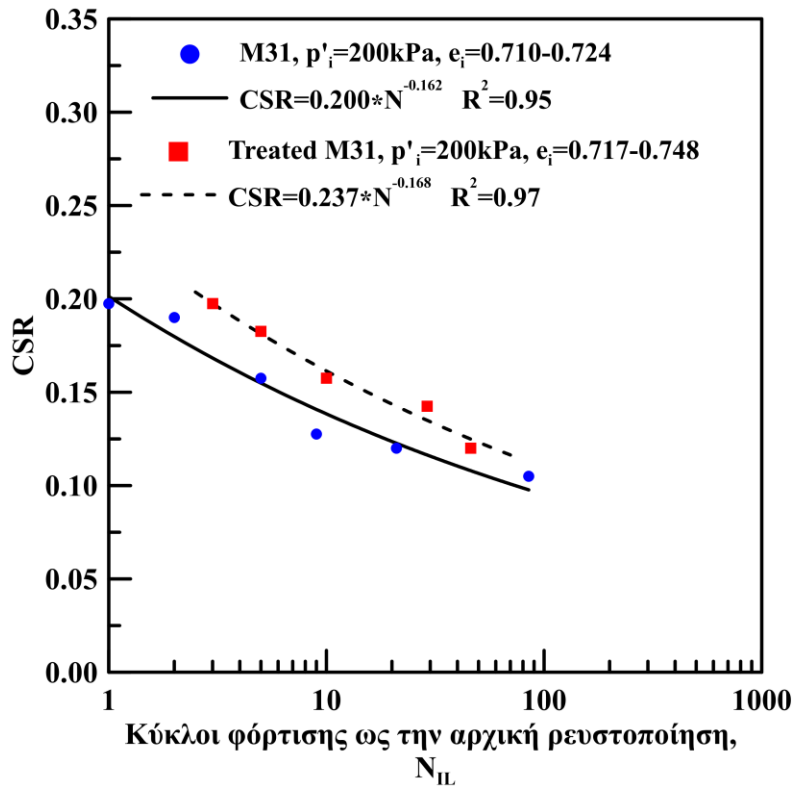
το κριτήριο ρευστοποίησης που ορίζεται, αλλά σε κάθε περίπτωση είναι μεγαλύτερος από αυτόν της φυσικής άμμου. Οι τιμές του CRR_{15} της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.6**.

Πίνακας 5.5: Ποσοστά βελτίωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR της σταθεροποιημένης άμμου έναντι της φυσικής για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης

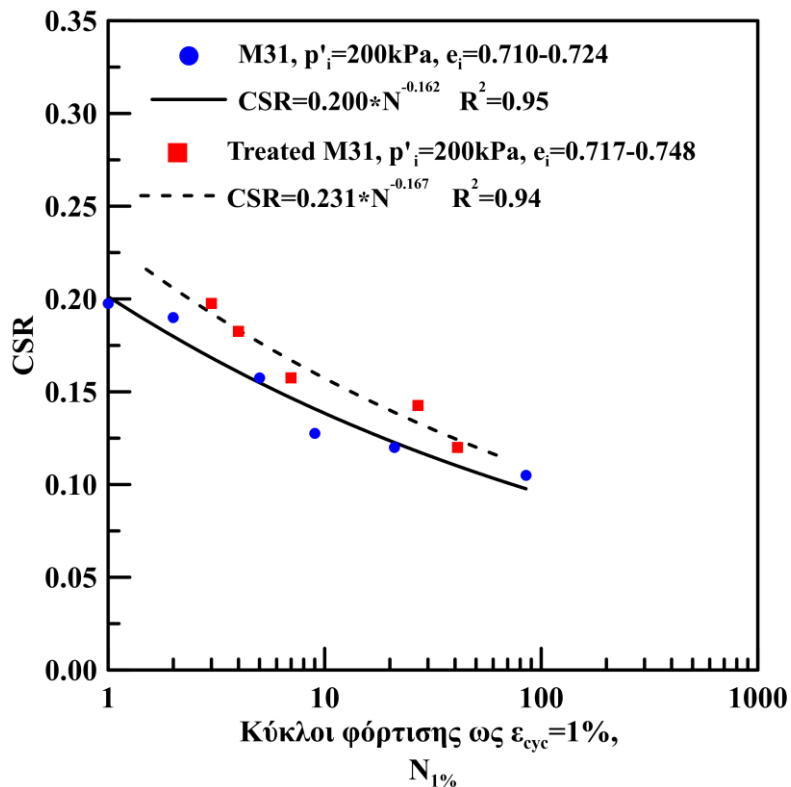
Κριτήριο Ρευστοποίησης	Ποσοστό Βελτίωσης για N=1	Ποσοστό Βελτίωσης για N=10	Ποσοστό Βελτίωσης για N=100
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	19%	17%	15%
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	16%	14%	13%
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	30%	22%	14%
$\epsilon_{cyc} = 5\%$	42%	36%	30%

Πίνακας 5.6: Τιμές του λόγου ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης

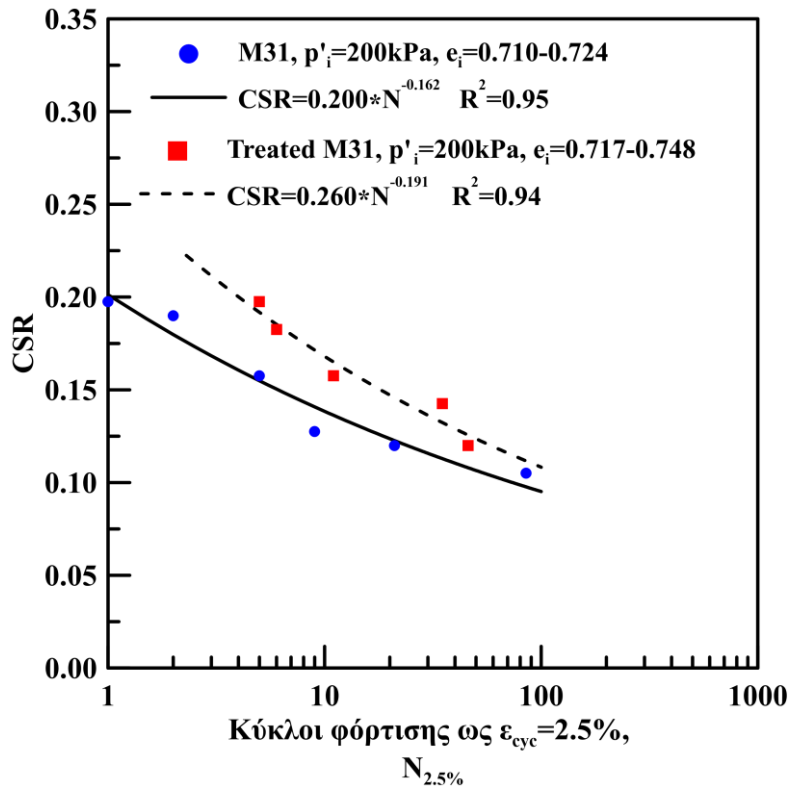
Κριτήριο Ρευστοποίησης	CRR_{15} Σταθεροποιημένης Άμμου M31	CRR_{15} Άμμου M31
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	0.15	0.13
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	0.15	0.13
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	0.16	0.13
$\epsilon_{cyc} = 5\%$	0.17	0.13



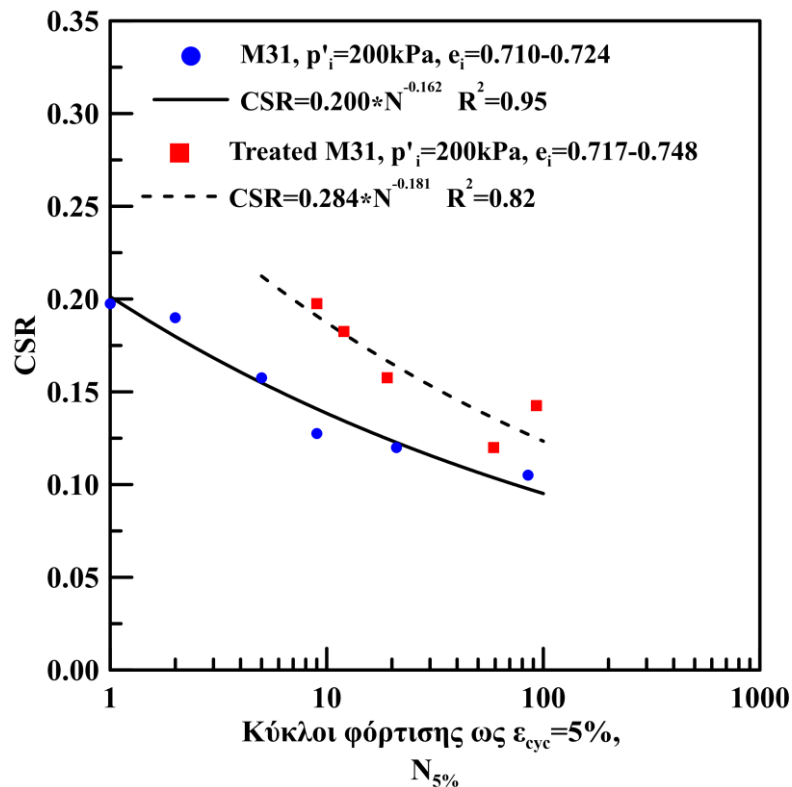
Σχήμα 5.37: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



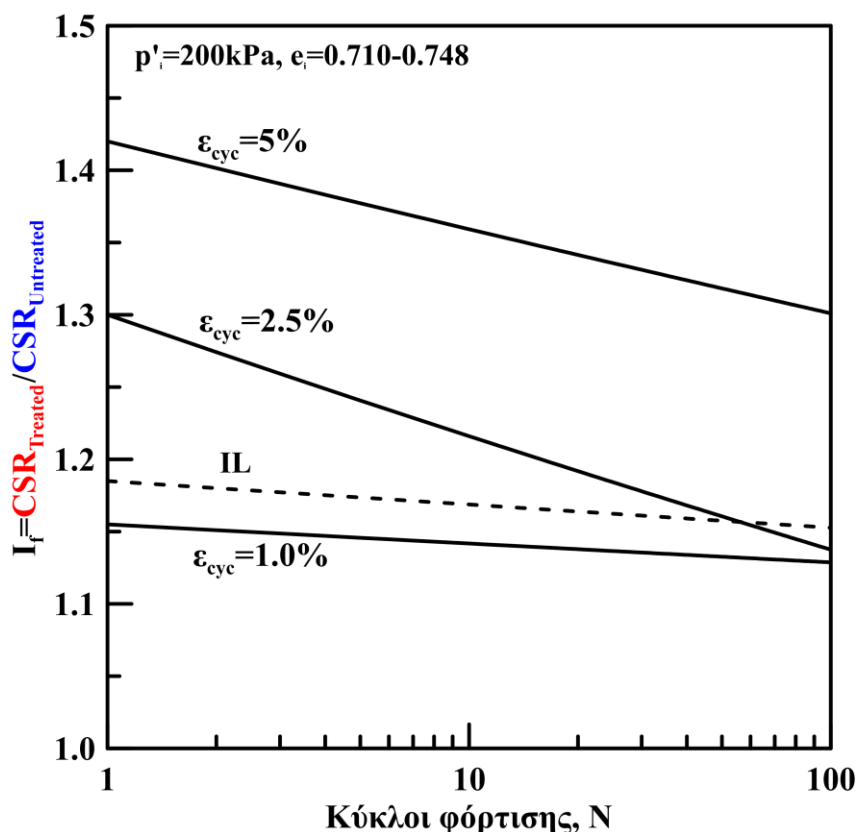
Σχήμα 5.38: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{1\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{cyc}=1\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



Σχήμα 5.39: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{2.5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=2.5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



Σχήμα 5.40: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



Σχήμα 5.41: Εξέλιξη του δείκτη βελτίωσης (I_f) της ανακυκλικής αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη φυσική άμμο M31 για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL, $\varepsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5%)

Στα επόμενα σχήματα μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στην εδαφική δυσστησιότητα της άμμου υπό ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στις δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης το τέμνον μέτρο δυσστησιότητας υπολογίζεται για κάθε κύκλο φόρτισης από το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης, q , συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, ε_z . Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σχηματίζει μία κλειστή διαδρομή, έναν κλειστό βρόγχο του οποίου η κλίση μειώνεται με τη φόρτιση (Σχήμα 5.42). Το τέμνον μέτρο δυσστησιότητας (E_{cyc}) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-16).

$$E_{cyc} = \frac{\Delta q_{cyc}}{\varepsilon_{cyc}}$$

(5-16)

Όπου, q_{cyc} : Η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάσης q διπλού πλάτους (ανακυκλική αποκλίνουσα τάση)

ε_{cyc} : η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους (ανακυκλική παραμόρφωση)

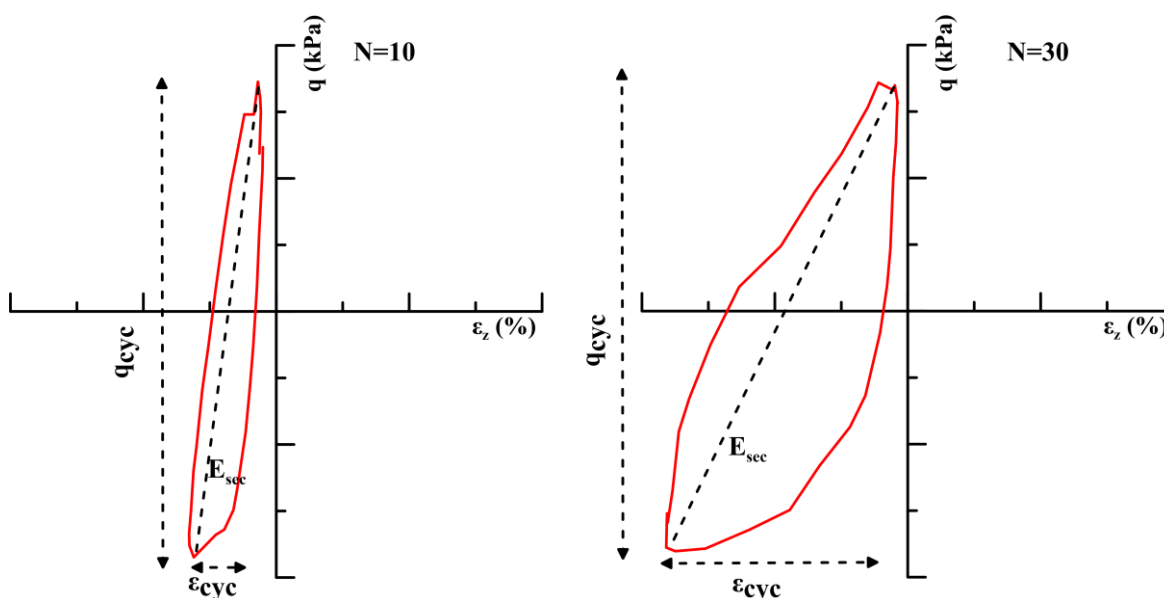
Για τον υπολογισμό των αρχικών παραμορφώσεων στο εύρος $\varepsilon_z = 0,005-1\%$ κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, τοπικοί μετρητές, LVDTs (linear variable displacement transducers), με διακριτότητα 1 μ τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά, στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Χρησιμοποιώντας τοπικούς μετρητές, τοποθετημένους πάνω στο δοκίμιο, αντί του εξωτερικού μετρητή, αποφεύγουμε σφάλματα στον υπολογισμό των παραμορφώσεων, που οφείλονται στην παραμορφωσιμότητα της ίδιας της συσκευής (π.χ. συμπίεση της μονάδας μέτρησης φορτίου, της κυψέλης, κλπ.), στην κλίση του δοκιμίου, στην ατελή επαφή δοκιμίου και άκρων και στην ανομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων λόγω των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλουν τα άκαμπτα και τραχέα άκρα.

Στο **Σχήμα 5.43** παρουσιάζεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσστησίας E_{cyc} συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N σε λογαριθμική κλίμακα για την άμμο M31, όπως προέκυψε από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια άμμου χαλαρής πυκνότητάς ($e_i = 0,710-0,724$) στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$ και υποβλήθηκαν σε ανακυκλική φόρτιση με το πλάτος της αποκλίνουσας τάσης των δοκιμών να κυμαίνεται από $q = 42$ έως 79 kPa . Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες της άμμου διαχωρίζονται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης ανάλογα με το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλάτος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης, αυξάνεται η αρχική εδαφική δυσστησία. Επισημαίνεται ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσστησία της άμμου είναι περίπου σταθερή, αλλά μετά από κάποιο κύκλο φόρτισης μειώνεται ραγδαία και πρακτικά μηδενίζεται. Η ραγδαία πτώση καθυστερεί να εμφανιστεί όσο μειώνεται η ανακυκλική τάση q . Εξάιρεση αποτελεί η δοκιμή με πλάτος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης $q = \pm 79 \text{ kPa}$ όπου η πτώση της δυσστησίας εμφανίζεται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης.

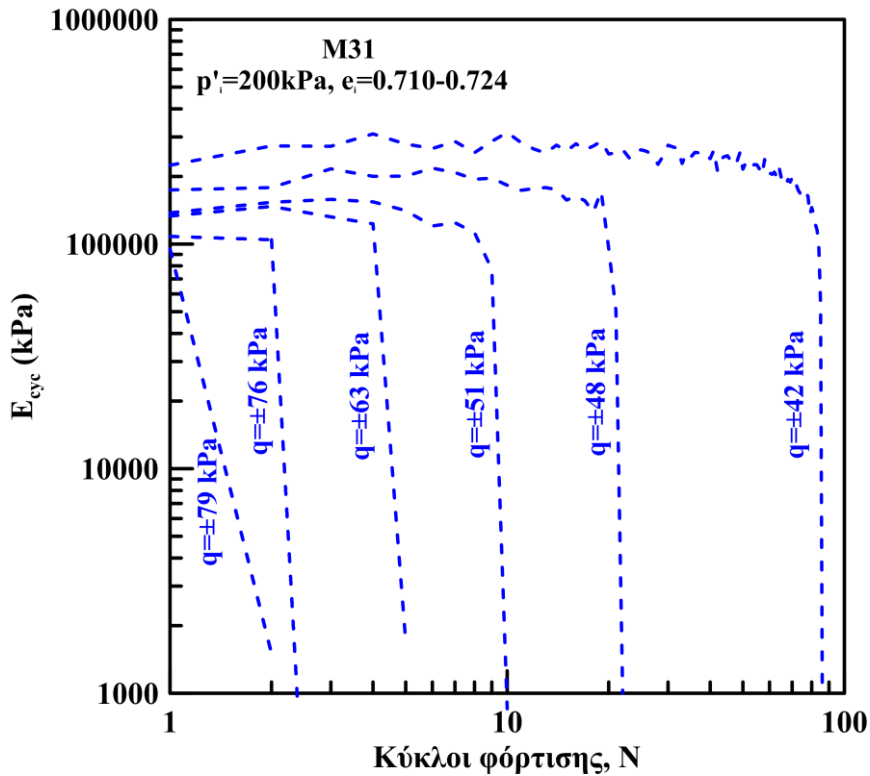
Στο **Σχήμα 5.44** παρουσιάζεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσστησίας E_{cyc} συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N η οποία παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα για τη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31, όπως προέκυψε από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου χαλαρής πυκνότητάς ($e_i = 0,717-0,748$) στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ενεργό τάση $p'_i = 200 \text{ kPa}$ και υποβλήθηκαν σε ανακυκλική φόρτιση με το πλάτος της αποκλίνουσας τάσης των δοκιμών να κυμαίνεται από $q = 48$ έως 79 kPa . Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες της σταθεροποιημένης άμμου διαχωρίζονται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης ανάλογα με το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλάτος της ανακυκλικής, τάσης αυξάνεται η αρχική εδαφική δυσστησία. Στις δοκιμές με $q < 74 \text{ kPa}$ στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσστησία της σταθεροποιημένης άμμου είναι περίπου σταθερή, ενώ μετά από κάποιο κύκλο φόρτισης η δυσστησία μειώνεται σταδιακά. Η απομείωση της δυσστησίας καθυστερεί να εμφανιστεί όσο μειώνεται η ανακυκλική τάση q . Στις δοκιμές με πλάτος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης $q = \pm 79$ και 74 kPa η δυσστησία μειώνεται σταδιακά από τον πρώτο

κύκλο φόρτισης. Επισημαίνεται ότι γι' αυτές τις δοκιμές η τιμή του τέμνοντος μέτρου δυστημσίας στον πρώτο κύκλο φόρτισης είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές.

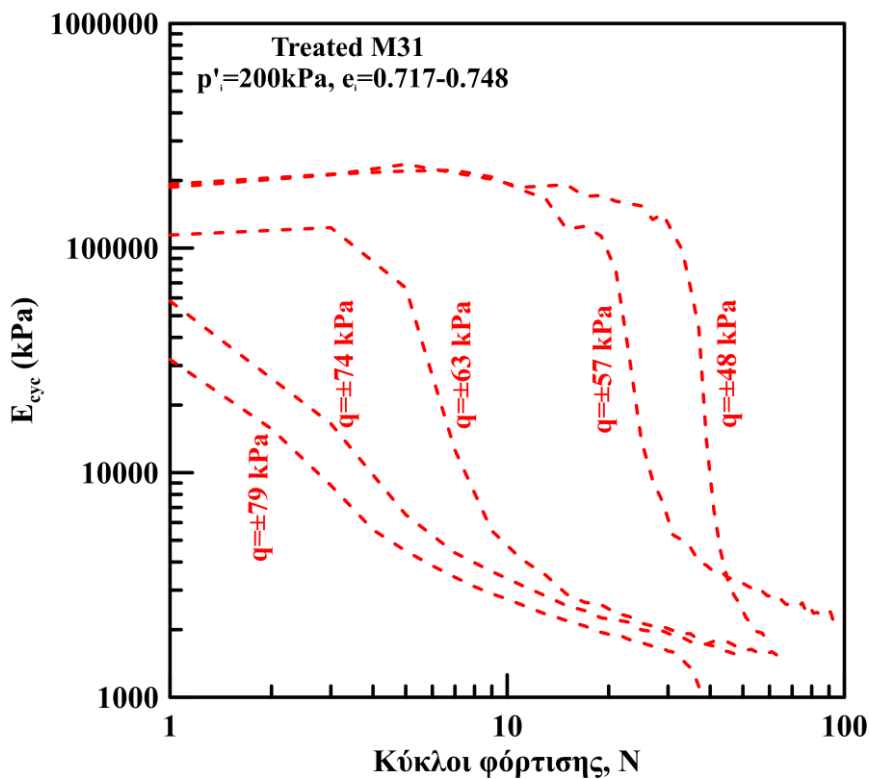
Για να μελετηθεί η επίδραση της σταθεροποίησης στην ανακυκλική δυστημσία της χαλαρής άμμου συνοψίζονται στο **Σχήμα 5.45** σε όρους τέμνοντος μέτρου δυστημσίας E_{cyc} συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης για τη φυσική (μπλε καμπύλες) και για σταθεροποιημένη (κόκκινες καμπύλες) άμμο M31 παρόμοιας πυκνότητας. Οι δοκιμές που παρουσιάζονται έχουν πλάτος αποκλίνουσας τάσης $q=\pm 48, 63$ και 79 kPa. Στις δοκιμές με $q=\pm 48$ και 63 kPa στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυστημσία της σταθεροποιημένης άμμου είναι περίπου ίδια με αυτή της άμμου M31. Ωστόσο, μετά από κάποιον κύκλο οι καμπύλες της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου διαχωρίζονται. Το μέτρο δυστημσίας της φυσικής άμμου μειώνεται ραγδαία και πρακτικά μηδενίζεται, ενώ η δυστημσία της σταθεροποιημένης άμμου αρχίζει να απομειώνεται σταδιακά. Όταν η επιβαλλόμενη ανακυκλική τάση είναι μεγάλη ($q=\pm 79$ kPa) η δυστημσία της σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της φυσικής άμμου M31. Ωστόσο, ακόμη και υπό αυτό το μέγεθος ανακυκλικής τάσης η δυστημσία της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται σταδιακά και όχι ακαριαία όπως στην περίπτωση της φυσικής άμμου. Η μεγάλη μείωση της δυστημσίας της σταθεροποιημένης άμμου που αντανακλά ασταθή συμπεριφορά μπορεί να συνδέεται με τον αυξημένο ρυθμό επιβολής της αποκλίνουσας τάσης. Η επίδραση αυτή του ρυθμού επιβολής φορτίου σε σχέση με ελεγχόμενο ρυθμό επιβολής παραμόρφωσης θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 6.



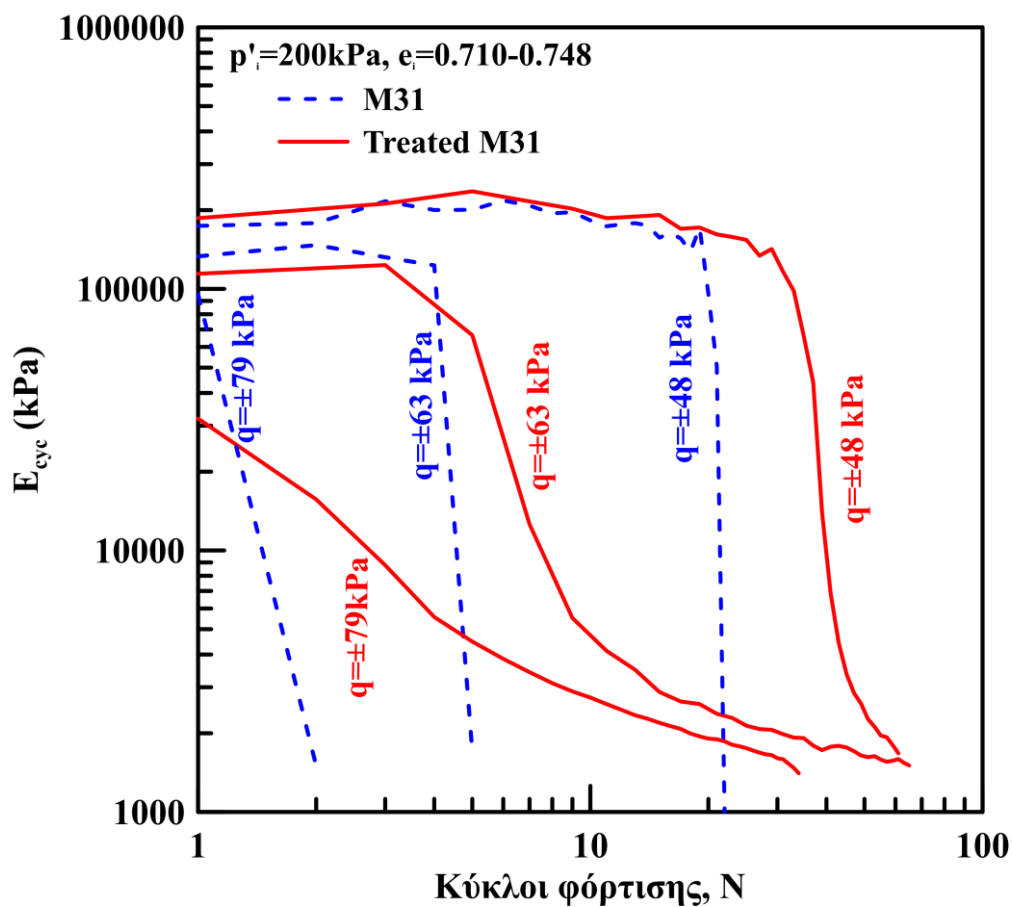
Σχήμα 5.42: Σχηματικός υπολογισμός του τέμνοντος μέτρου δυστημσίας (E) υπό ανακυκλική φόρτιση (Κύκλος $N=10$ και $N=30$)



Σχήμα 5.43: Μέτρο δυσστησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



Σχήμα 5.44: Μέτρο δυσστησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



Σχήμα 5.45: Επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο δυσμησίας της χαλαρής άμμου M31 υπό ανακυκλική φόρτιση

Κεφάλαιο 6 : Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης

6.1 Εισαγωγή

Ο όρος της ανισοτροπίας των εδαφικών υλικών αναφέρεται στην εξάρτηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς (αντοχή, διαστολικότητα, δυσμησία) από την διεύθυνση της φόρτισης, λόγω της ανισότροπης δομής τους. Η προσανατολισμένη εσωτερική διάταξη των κόκκων και των κενών, δηλαδή η διάταξη των κόκκων, ο προσανατολισμός των διανυσμάτων που είναι κάθετα στις μεταξύ τους επαφές, η κατανομή και ο προσανατολισμός των κενών ορίζουν τη δομή (fabric) του υλικού (J. Mitchell & Kenichi, 1976).

Τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα αναφέρονται σε εντατικές καταστάσεις και συνθήκες φόρτισης οι οποίες είναι σύνθετες και περιλαμβάνουν αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κυρίων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) όσο και στη διεύθυνσή τους. Συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη πραγματοποίησης πειραμάτων στο εργαστήριο που θα προσομοιώνουν όσο το δυνατόν καλύτερα πολύπλοκες διαδρομές τάσεων, ώστε να προκύψουν οι εδαφικές παράμετροι που απαιτούνται για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος.

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus, HC) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, ΕΜΠ επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο των τριών κύριων τάσεων και της κατεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης. Κατά συνέπεια, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της γωνίας α (κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σε σχέση με την κατακόρυφο) και του μεγέθους της παραμέτρου της ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$. Επιπρόσθετα, είναι εφικτός ο έλεγχος ή η μέτρηση της πίεσης πόρων και η επιβολή αντιπίεσης (back pressure) ώστε να εκτελούνται πειράματα υπό συνθήκες εμποδιζόμενης και ελεύθερης στράγγισης. Η δυνατότητα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης να επιβάλλει γενικευμένες και σύνθετες συνθήκες φόρτισης, την καθιστά την πλέον κατάλληλη για την μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς εδαφών και την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς τους στη φύση. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση ενός πλαισίου συμπεριφοράς κοκκωδών υλικών για χρήση στις αναλυτικές μελέτες με βάση το οποίο θα είναι δυνατή η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών των αποθέσεων στη φύση.

Σε αυτή την ενότητα αρχικά μελετάται η επίδραση της αλλαγής της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων στην συμπεριφορά της άμμου, μέσω μονοτονικών δοκιμών ακτινικής φόρτισης (διάτμηση υπό σταθερή γωνία α) σε ισότροπα στερεοποιημένα

δοκίμια άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της γωνίας α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°) στην εξέλιξη της διατμητικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης, στο λόγο τάσεων $\eta=q/p'$ στο σημείο αλλαγής φάσης και στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμμικότητα).

Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , στην εδαφική ανισοτροπία της άμμου μέσω δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31, υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Η ακτινική φόρτιση πραγματοποιήθηκε διατηρώντας σταθερή την διεύθυνση των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό γωνία α σε διάφορες τιμές της παραμέτρου b ($b=0, 0.5$, και 1).

Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται η επιρροή της πυκνότητας του εδάφους στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά, μέσω δοκιμών ακτινικής φόρτισης σε σχετικά πυκνά και σε σχετικά χαλαρά δοκίμια άμμου M31 υπό διάφορες σταθερές τιμές της γωνίας α και της παραμέτρου b .

Στη συνέχεια, για πρώτη φορά μελετάται, σε αντιστοιχία με την άμμο, η εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς άμμου σταθεροποιημένης με κolloειδή πυριτία. Εξετάζεται η εξάρτηση της αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμών από τη διεύθυνση φόρτισης α , την τιμή της ενδιάμεσης κύριας τάσης b και από τις συνθήκες επιβολής της φόρτισης (έλεγχος της τάσης-έλεγχος της παραμόρφωσης).

6.2 Περιγραφή των δοκιμών ακτινικής φόρτισης

Για την παρασκευή των δοκιμών άμμου M31 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ξηρής απόθεσης άμμου σε νερό (water pluviation) που εξασφαλίζει ομοιόμορφα και επαναλήψιμα δοκίμια με δομή παρόμοια με αυτή των εδαφικών αποθέσεων (Vaid et al., 1999) και έντονα ανισότροπη (Prashanth et al., 2018). Το πρότυπο κοίλο δοκίμιο άμμου έχει εσωτερική ακτίνα $R_i=20\text{mm}$, εξωτερική ακτίνα $R_o=35\text{mm}$ και ύψος $H=140\text{mm}$, καταλαμβάνοντας συνολικό όγκο $V=363\text{cm}^3$.

Τα δοκίμια φυσικής άμμου M31 υποβάλλονται σε κορεσμό με τιμή αντιπίεσης (back pressure) $u_o=300\text{kPa}$ ώστε να επιτευχθούν τιμές της παραμέτρου Skempton $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ και στερεοποιούνται ισότροπα σε μέση αρχική ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$ στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (HC). Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α . Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης η εσωτερική (p_i) και η εξωτερική (p_o) πίεση ελέγχονται ανεξάρτητα ώστε εκτός της γωνίας α να διατηρείται σταθερή η ενεργός τάση, p' , και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, ενώ αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση,

$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, μέχρι την αστοχία. Η φόρτιση επιβάλλεται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress controlled tests)

Στο **Σχήμα 6.1** απεικονίζεται η διαδρομή τάσεων κατά την ισότροπη στερεοποίηση (κλάδος A-B) και μετέπειτα κατά την ακτινική φόρτιση μέχρι την αστοχία (κλάδος B-Γ) σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων στο επίπεδο q - p' (**Σχήμα 6.1(α)**) και στο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης που εισήγαγαν οι Ishihara & Towhata, (1983) (**Σχήμα 6.1(β)**), το οποίο είναι πλέον κατάλληλο για τα πειράματα στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου, καθώς στον κατακόρυφο άξονα σημειώνεται η τάση $Y = 2\tau_{z\theta}$, που εκφράζει το στρεπτικό τμήμα της διάτμησης και στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η τάση $X = (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$, που εκφράζει τον όρο της αποκλίνουσας τάσης (q) που αντιστοιχεί σε τριαξονικές συνθήκες φόρτισης.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν υπό σταθερή γωνία α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°) και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0, 0.5$ και 1) σε σχετικά χαλαρά ($e_i=0.701-0.721$) και σχετικά πυκνά ($e_i=0.553-0.569$) δοκίμια άμμου M31. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών ακτινικής φόρτισης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.1**.

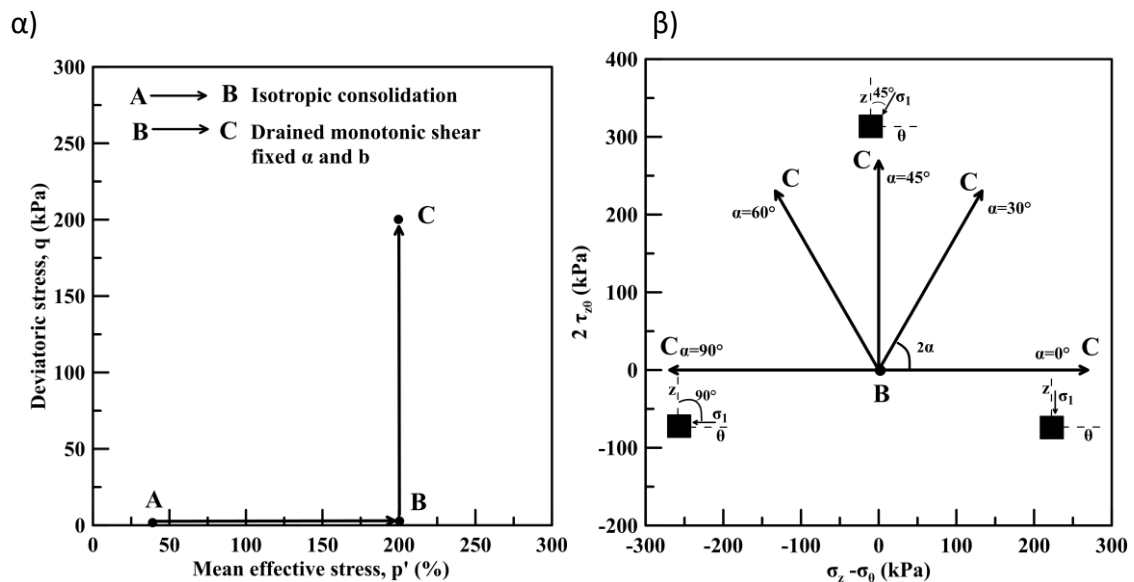
Για πρώτη φορά η εγκατάσταση νέου οργάνου μέτρησης της ογκομετρικής παραμόρφωσης που περιλαμβάνει προχοΐδα (burette) και διαφορικό μετρητή πίεσης για τη μέτρηση των μεταβολών του εσωτερικού όγκου του κοίλου δοκιμίου στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ σε συνδυασμό με τους υπάρχοντες μετρητές παραμόρφωσης, επέτρεψε την ακριβή μέτρηση όλων των επιμέρους παραμορφώσεων στα πειράματα της διατριβής.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης

Πείραμα	e_i	p'_i (kPa)	α ($^\circ$)	b
FA-1	0.718	200	0	0
FA-2	0.711	200	30	0
FA-3	0.708	200	45	0
FA-4	0.719	200	60	0
FA-5	0.709	200	90	0
FA-6	0.553	200	0	0
FA-7	0.559	200	30	0
FA-8	0.565	200	45	0
FA-9	0.560	200	60	0
FA-10	0.565	200	90	0
FA-11	0.715	200	0	0.5
FA-12	0.720	200	30	0.5

FA-13	0.718	200	45	0.5
FA-14	0.716	200	60	0.5
FA-15	0.721	200	90	0.5
FA-16	0.565	200	0	0.5
FA-17	0.557	200	30	0.5
FA-18	0.563	200	45	0.5
FA-19	0.557	200	60	0.5
FA-20	0.559	200	90	0.5
FA-21	0.700	200	0	1
FA-22	0.701	200	30	1
FA-23	0.701	200	45	1
FA-24	0.708	200	60	1
FA-25	0.709	200	90	1
FA-26	0.568	200	0	1
FA-27	0.570	200	30	1
FA-28	0.570	200	45	1
FA-29	0.572	200	60	1
FA-30	0.569	200	90	1

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,
 α , διεύθυνση του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , ως προς την κατακόρυφο
 b , παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2)

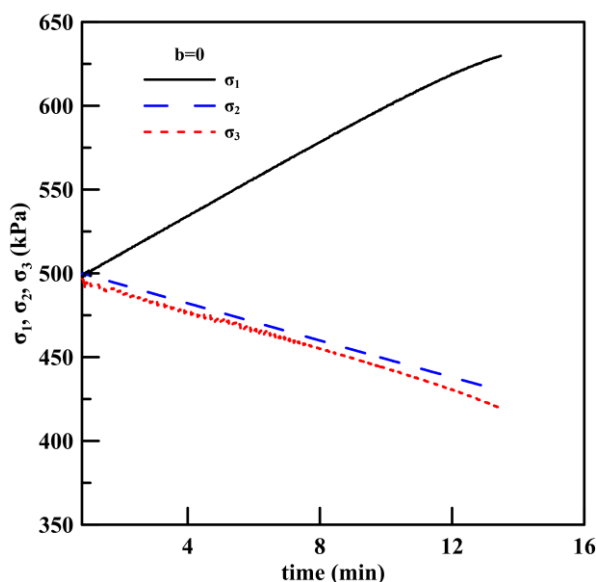


Σχήμα 6.1: Δοκιμή ακτινικής φόρτισης. Διαδρομές τάσεων (α) στο επίπεδο q - p' και (β) στο επίπεδο $2\tau_{\theta}$ - (σ'_{zz} - $\sigma'_{\theta\theta}$)

6.3 Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη σχετικά χαλαρή άμμο M31

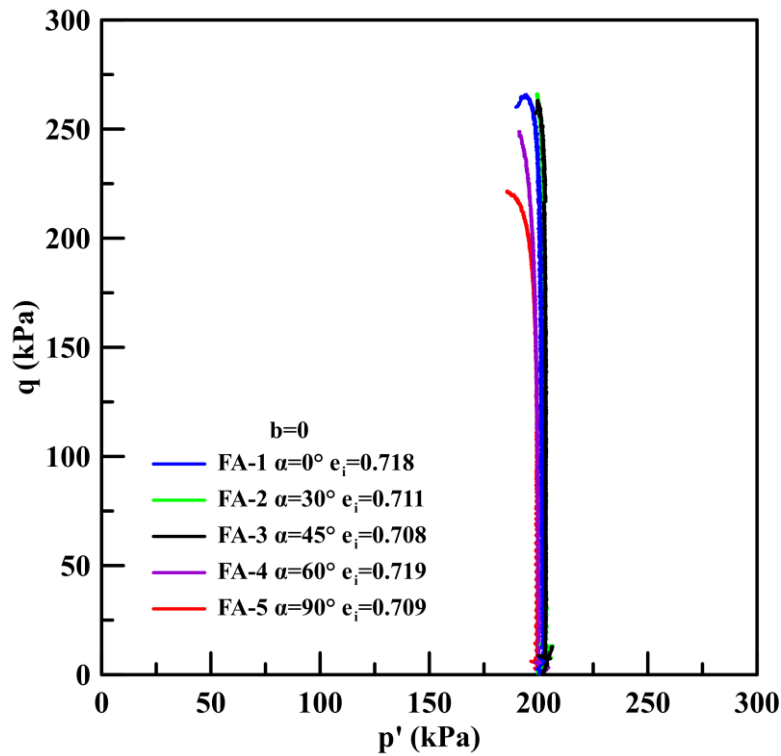
Η πρώτη σειρά πειραμάτων εκτελέστηκε σε ισότροπα στερεοποιημένα σε ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$, σχετικά χαλαρά ($e_i=0.708-0.719$) δοκίμια άμμου M31. Μετά την ισότροπη στερεοποίηση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία υπό σταθερή διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Ταυτόχρονα διατηρούνται σταθερές η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0$) και η μέση ενεργός τάση ($p'=200\text{kPa}$) ελέγχοντας τις κύριες τάσεις (Σχήμα 6.2) μέσω του ρυθμού επιβολής του αξονικού (F) και στρεπτικού (T) φορτίου, αλλά και την εξωτερική (p_o) και εσωτερική (p_i) πίεση στο δοκίμιο καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης.

Οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών παρουσιάζονται στο επίπεδο $q - p'$ (Σχήμα 6.3 (α)), αλλά και στο πλέον κατάλληλο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης $X-Y$ (Σχήμα 6.3 (β)). Στο δεύτερο Σχήμα οι διαδρομές τάσεων είναι ευθείες, με κέντρο την αρχή των αξόνων, διεύθυνση ως προς τον άξονα x ίση με το διπλάσιο της γωνίας α και μήκος ίσο με τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση q κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Παρατηρούμε ότι συνδέοντας τα σημεία αστοχίας των δοκιμών προκύπτει μια μη συμμετρική περιβάλλουσα αστοχίας υπό συνθήκες θλίψης $\alpha=0$ και εφελκυσμού $\alpha=90^\circ$ που αποκλίνει από το ημικύκλιο με ακτίνα τη διαδρομή τάσεων της δοκιμής FA-1 (όπου $\alpha=0^\circ$) με τη μέγιστη αντοχή. Επομένως η μέγιστη αντοχή της χαλαρής άμμου M31 εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α) καθώς όλες οι άλλες παράμετροι των δοκιμών είναι κοινές (αρχική πυκνότητα, ενεργός τάση $p' = 200\text{kPa}$ και παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$).

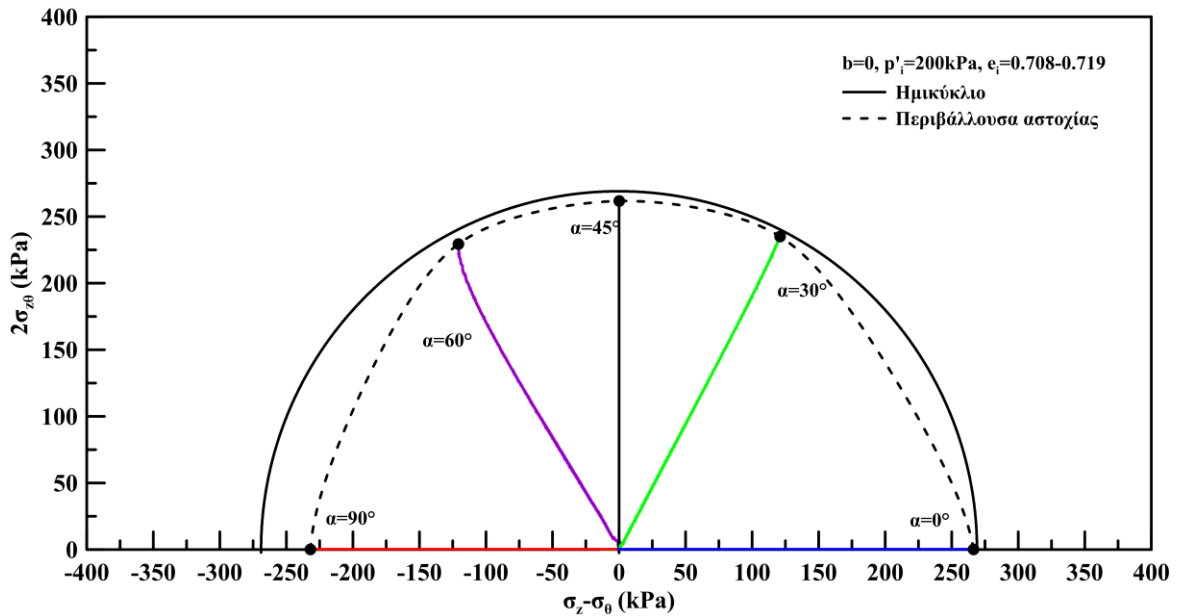


Σχήμα 6.2: Εξέλιξη των κύριων τάσεων με το χρόνο σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0$

α)



β)



Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. Διαδρομές τάσεων στα επίπεδα α) $q-p'$ και β) $X-Y$

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων απεικονίζονται σε όρους λόγου τάσεων (q/p')-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) (**Σχήμα 6.4** (α)) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.4** (β)) (σύμφωνα με τις εξισώσεις **(6-1)**, **(6-2)**, **(6-3)**).

Αποκλίνουσα τάση:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\}} \quad (6-1)$$

Μέση ενεργός τάση:

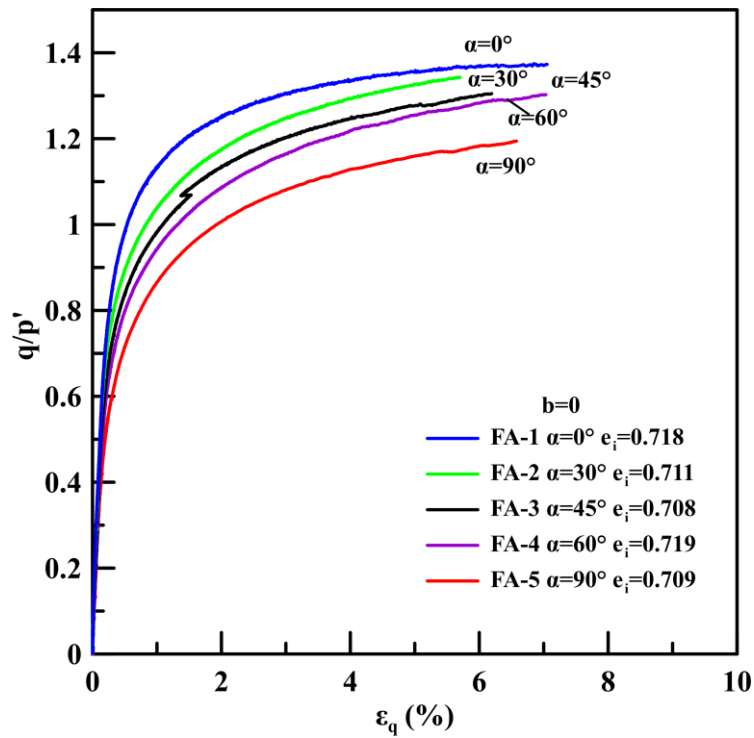
$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - \Delta u \quad (6-2)$$

Γενικευμένη αποκλίνουσα διατμητική παραμόρφωση:

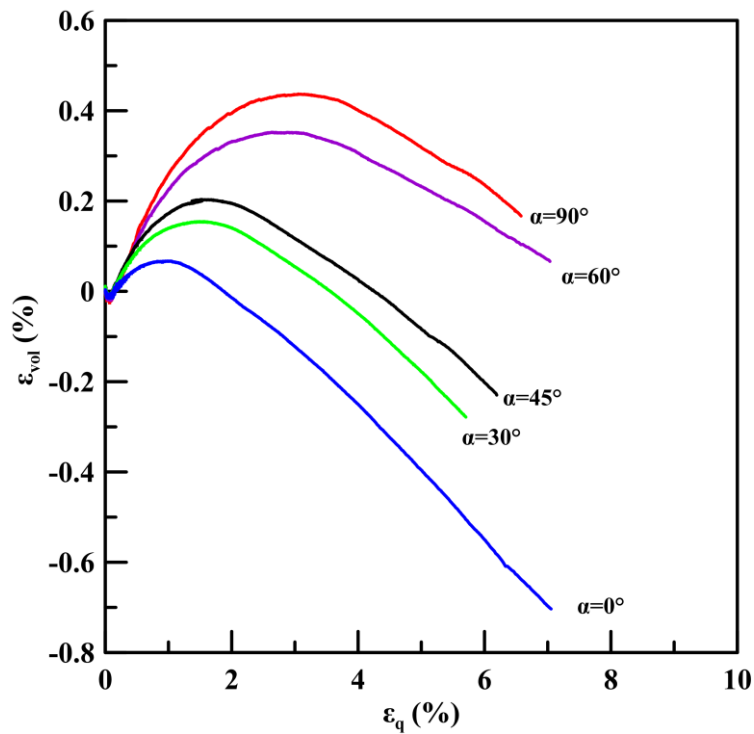
$$\epsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (6-3)$$

Κατά την παρασκευή των δοκιμών με απόθεση της άμμου σε νερό, υπό την επίδραση της βαρύτητας δημιουργούνται οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης (bedding planes) πάνω στα οποία προσανατολίζονται επιλεκτικά οι μεγάλοι άξονες των μη σφαιρικών κόκκων, τα κάθετα διανύσματα διεπαφών (contact normal vectors) των κόκκων (σφαιρικών ή μη) και οι μεγάλοι άξονες των κενών μεταξύ των κόκκων, σχηματίζοντας μία εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή. Επομένως, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς τα οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου όπως παρατηρούμε στο **Σχήμα 6.4**. Η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση/κύρια τάση είναι κάθετη στο επίπεδο διαστρωμάτωσης ($\alpha=0^\circ$) καθώς το δοκίμιο που υποβάλλεται σε φόρτιση υπό γωνία $\alpha=0^\circ$ εμφανίζεται πιο δύσκαμπτο και αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή. Η συμπεριφορά της άμμου γίνεται, εν γένει, περισσότερο συστολική όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή της να μειώνεται με τη γωνία α . Η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη αντοχή και πιο συστολική συμπεριφορά) παρατηρείται όταν η γωνία $\alpha=90^\circ$, δηλαδή η φόρτιση γίνεται στο οριζόντιο επίπεδο. Τότε ένα από τα επίπεδα στα οποία ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση γίνεται μέγιστος (maximum stress obliquity planes – επίπεδα οιονεί αστοχίας) τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης. Το δοκίμιο δείχνει έντονα συστολική συμπεριφορά με ογκομετρικές παραμορφώσεις περίπου πενταπλάσιες σε σχέση με τη φόρτιση στο κατακόρυφο επίπεδο $\alpha=0^\circ$ και έντονα απομειωμένη διαστολικότητα. Επομένως, η εγγενής ανισοτροπία επηρεάζει δραστικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της χαλαρής άμμου M31.

α)



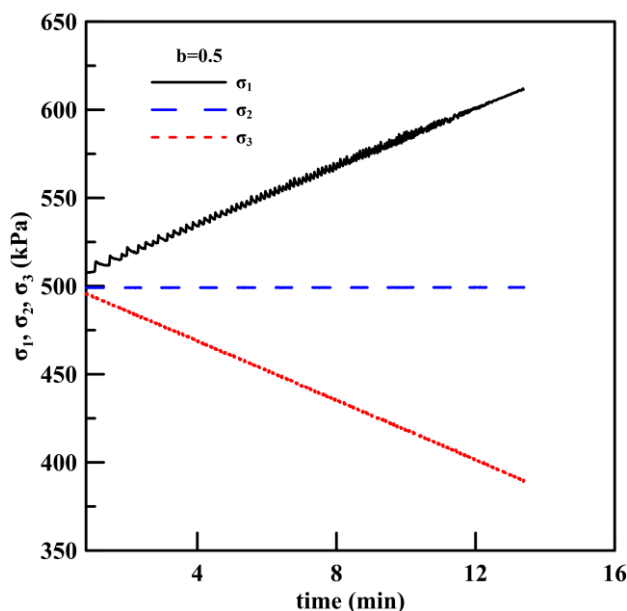
β)



Σχήμα 6.4: Απόκριση χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε ακτινική φόρτιση με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης

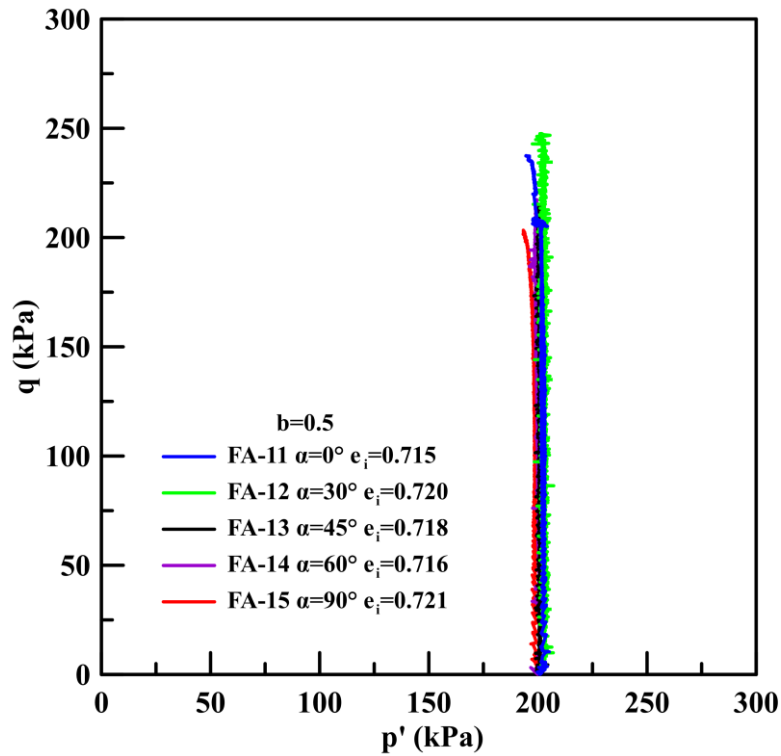
Για να εξεταστεί η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης εκτελέστηκαν τα αντίστοιχα πειράματα ακτινικής φόρτισης σε σχετικά χαλαρά ($e_i=0.715-0.721$) δοκίμια άμμου M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0.5$. Συγκεκριμένα, μετά την ισότροπη στερεοποίηση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Ταυτόχρονα διατηρούνται σταθερές η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0.5$) και η μέση ενεργός τάση ($p'=200\text{kPa}$). Η εξέλιξη των κυρίων τάσεων με το χρόνο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.5**.

Οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών παρουσιάζονται στο επίπεδο $q - p'$ (**Σχήμα 6.6 (α)**), αλλά και στο πλέον κατάλληλο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης $X-Y$ (**Σχήμα 6.6 (β)**). Οι διαδρομές τάσεων είναι ευθείες, με κέντρο την αρχή των αξόνων, διεύθυνση ίση με τη διπλάσια γωνία α και μήκος ίσο με τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση q της δοκιμής. Παρατηρούμε ότι συνδέοντας τα σημεία αστοχίας των δοκιμών εξακολουθεί να προκύπτει μια μη συμμετρική περιβάλλουσα αστοχίας που αποκλίνει από το ημικύκλιο με ακτίνα τη διαδρομή τάσεων της δοκιμής FA-11 (όπου $\alpha=0^\circ$) με τη μέγιστη αντοχή. Επομένως η μέγιστη αντοχή της χαλαρής άμμου M31 εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α) καθώς όλες οι άλλες παράμετροι των δοκιμών είναι κοινές (αρχική πυκνότητα, ενεργός τάση $p' = 200\text{kPa}$ και παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$). Παρατηρούμε ότι η απόκλιση από το ημικύκλιο της περιβάλλουσας αστοχίας για $b=0.5$ είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις δοκιμές στη χαλαρή άμμο με $b=0$ (**Σχήμα 6.3(β)**).

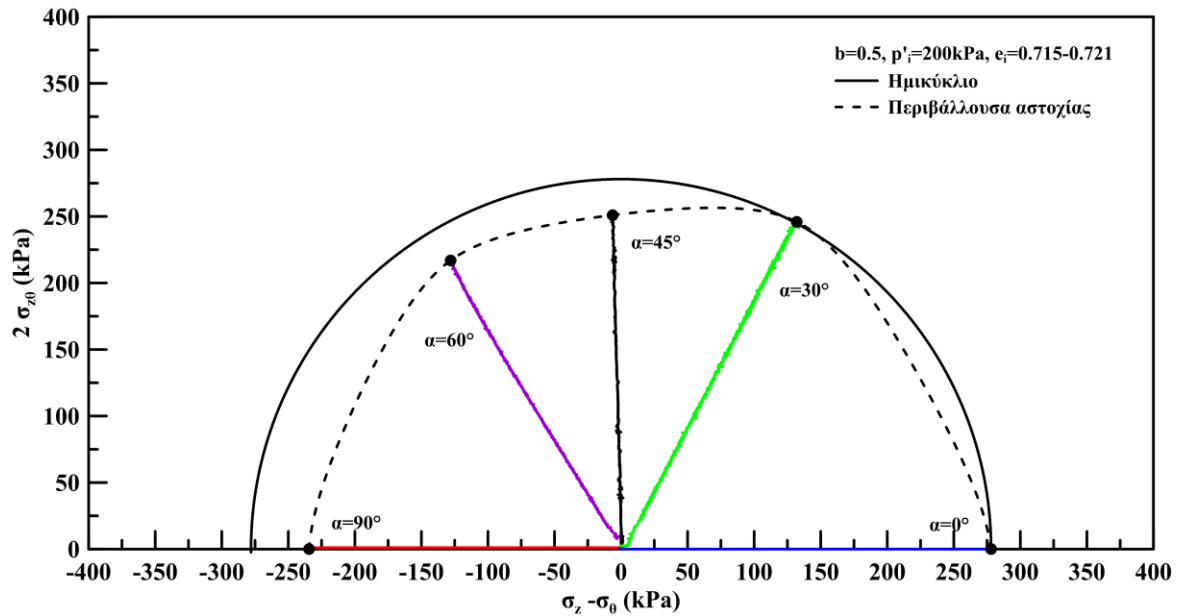


Σχήμα 6.5: Εξέλιξη των κύριων τάσεων με το χρόνο σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0.5$

α)



β)



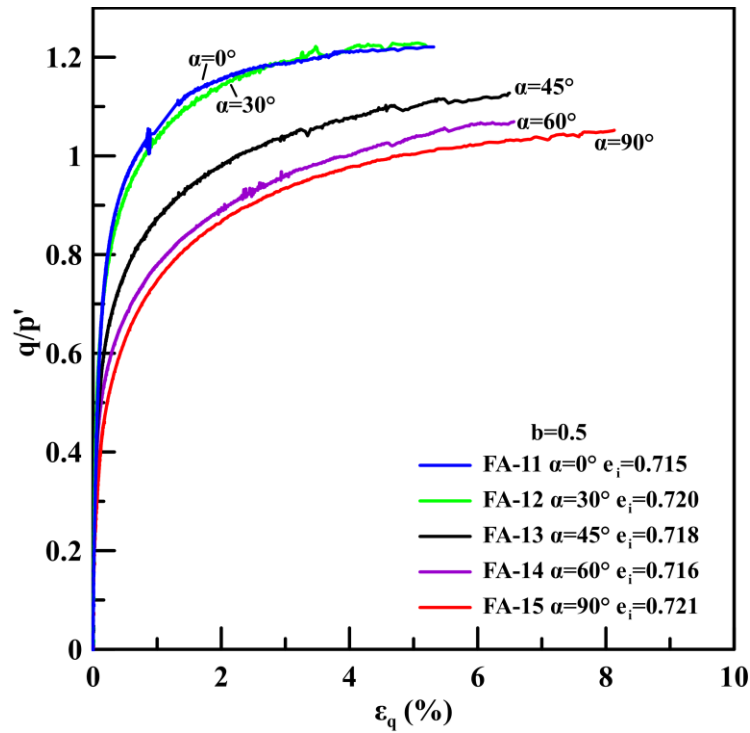
Σχήμα 6.6: Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων απεικονίζονται σε όρους λόγου τάσεων (q/p')-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) (**Σχήμα 6.7 (α)**) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.7 (β)**).

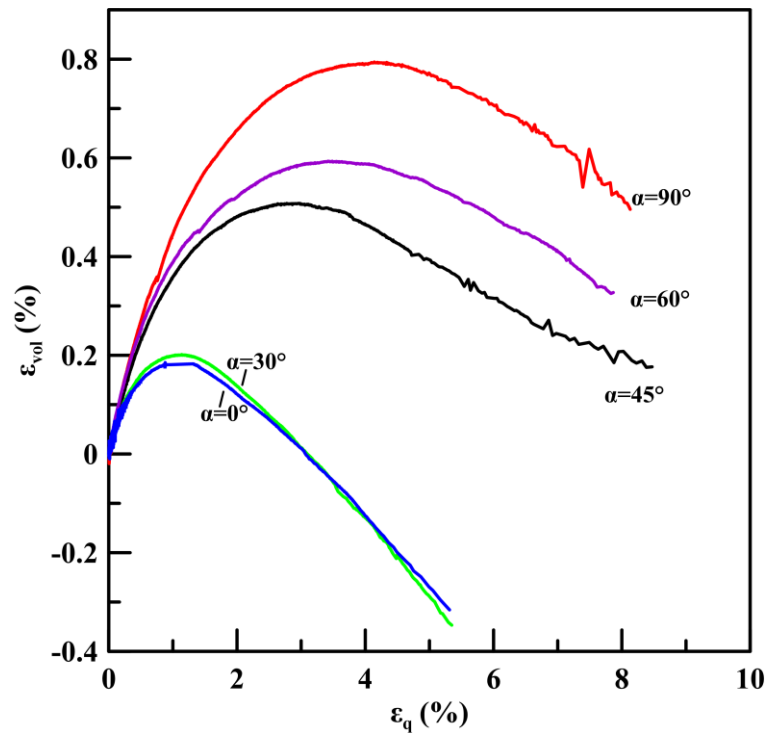
Τα δοκίμια έχουν παρασκευαστεί με τη μέθοδο της απόθεσης στο νερό σε σχετικά χαλαρή πυκνότητα ώστε να σχηματιστεί μια εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή συγκρίσιμη με την προηγούμενη σειρά πειραμάτων. Παρατηρούμε ότι η αλλαγή του προσανατολισμού του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης εξακολουθεί να επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου για $b=0.5$ με τη διαφοροποίηση στη σύγκλιση των αποτελεσμάτων για $\alpha=0^\circ$ και 30° τόσο ως προς τις τάσεις όσο και ως προς τις ογκομετρικές παραμορφώσεις, όπως παρατηρούμε στο **Σχήμα 6.7**.

Γενικά η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι περίπου παράλληλη στο κατακόρυφο επίπεδο ($\alpha=0^\circ$ και $\alpha=30^\circ$) αφού η άμμος εμφανίζεται πιο δύσκαμπτη και αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης. Η συμπεριφορά αλλάζει έντονα όταν η φόρτιση πραγματοποιείται υπό γωνία $\alpha>30^\circ$ ($\alpha=45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Η συμπεριφορά της άμμου γίνεται αισθητά πιο συστολική όταν ο σ_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο. Η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη αντοχή και πιο συστολική συμπεριφορά παρατηρείται όταν $\alpha=90^\circ$, διότι τότε ένα από τα επίπεδα, στα οποία ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση γίνεται μέγιστος, τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης. Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών όπου $b=0.5$ (**Σχήμα 6.7**) και $b=0$ (**Σχήμα 6.4**) γίνεται αντιληπτή η επιρροή του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάση σ_2 . Ανεξάρτητα της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί σε ασθενέστερη συμπεριφορά. Η μέγιστη αντοχή μειώνεται και η συστολικότητα περίπου διπλασιάζεται για $b=0.5$. η αύξηση της συστολικότητας είναι σημαντική για $\alpha\geq 45^\circ$ και λιγότερο σημαντική αλλά παρόμοια για $\alpha=0^\circ$ και 30° . Φαίνεται όταν η ενδιάμεση κύρια τάση, σ_2 αυξάνει ($b=0.5$) αναδεικνύεται η αρχικά ασθενής δομή της άμμου στο οριζόντιο επίπεδο περισσότερο σε σύγκριση με $b=0$, εξ' ου και η μεγαλύτερη συστολικότητα στη πρώτη περίπτωση. Για $\alpha=0^\circ$ και 30° που η φόρτιση είναι θλιπτική η επίδραση είναι μικρή.

α)



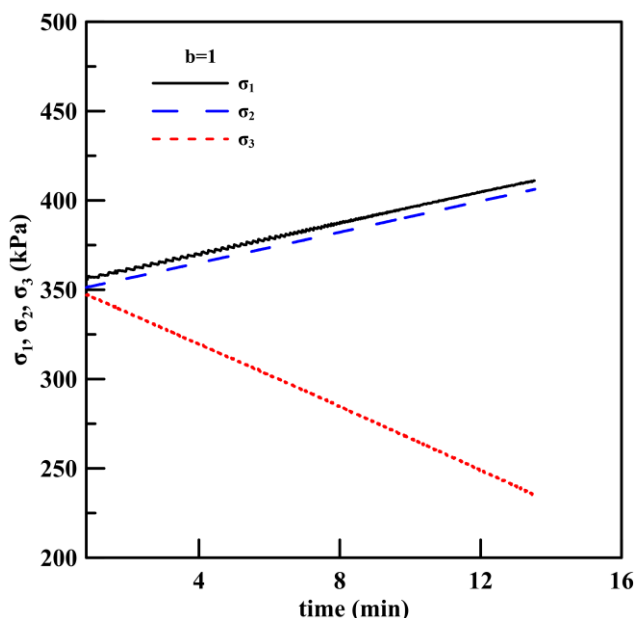
β)



Σχήμα 6.7: Απόκριση χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε ακτινική φόρτιση με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης

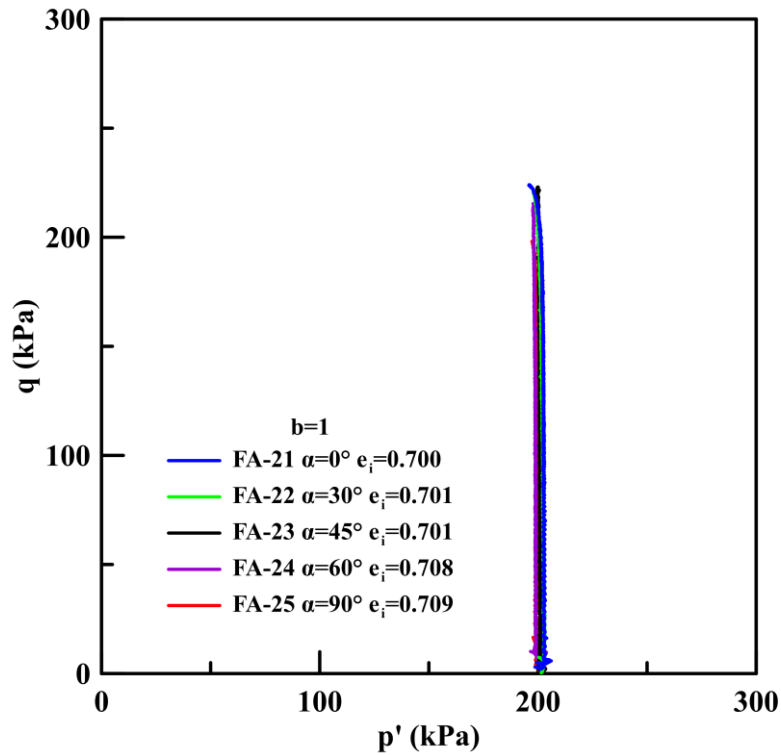
Για να διευκρινιστεί η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης, εκτελέστηκαν τα αντίστοιχα πειράματα ακτινικής φόρτισης σε σχετικά χαλαρά ($e_i=0.700-0.709$) δοκίμια άμμου M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=1$. Συγκεκριμένα, μετά την ισότροπη στερεοποίηση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Ταυτόχρονα διατηρούνται σταθερές η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0.1$) και η μέση ενεργός τάση ($p'=200\text{kPa}$). Η εξέλιξη των κυρίων τάσεων με το χρόνο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.8**.

Οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών παρουσιάζονται στο επίπεδο q - p' (**Σχήμα 6.9** (α)), αλλά και στο πλέον κατάλληλο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης X - Y (**Σχήμα 6.9** (β)). Οι διαδρομές τάσεων είναι ευθείες, με κέντρο την αρχή των αξόνων, διεύθυνση ίση με τη διπλάσια γωνία α και μήκος ίσο με τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση q της δοκιμής. Παρατηρούμε ότι συνδέοντας τα σημεία αστοχίας των δοκιμών προκύπτει μια μη συμμετρική περιβάλλουσα αστοχίας που αποκλίνει από το ημικύκλιο με ακτίνα τη διαδρομή τάσεων της δοκιμής FA-11 (όπου $\alpha=0^\circ$) με τη μέγιστη αντοχή. Επομένως η μέγιστη αντοχή της χαλαρής άμμου M31 εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α) καθώς όλες οι άλλες παράμετροι των δοκιμών είναι κοινές (αρχική πυκνότητα, ενεργός τάση $p'=200\text{kPa}$ και παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$).

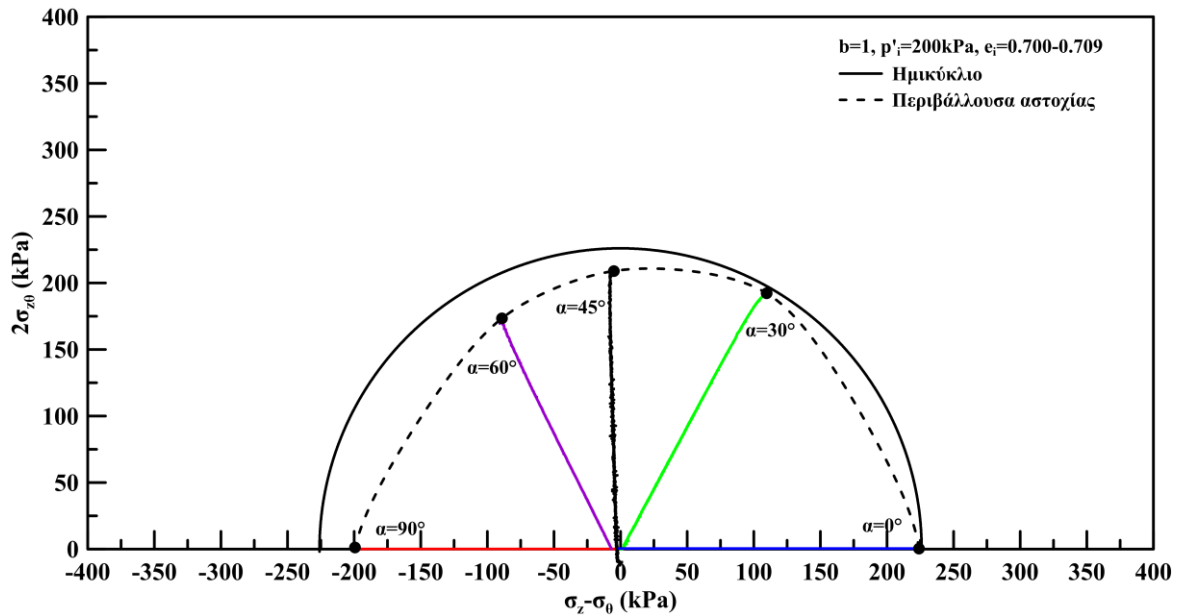


Σχήμα 6.8: Εξέλιξη των κυρίων τάσεων με το χρόνο σε δοκιμή ακτινικής φόρτισης υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=1$

α)



β)



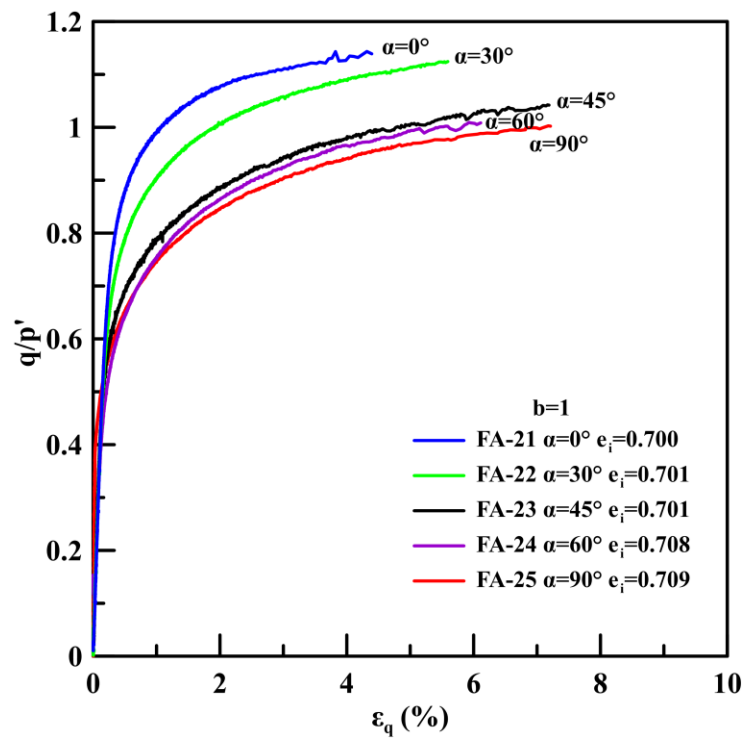
Σχήμα 6.9: Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών απεικονίζονται σε όρους λόγου τάσεων (q/p')-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) (**Σχήμα 6.10(α)**) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.10 (β)**).

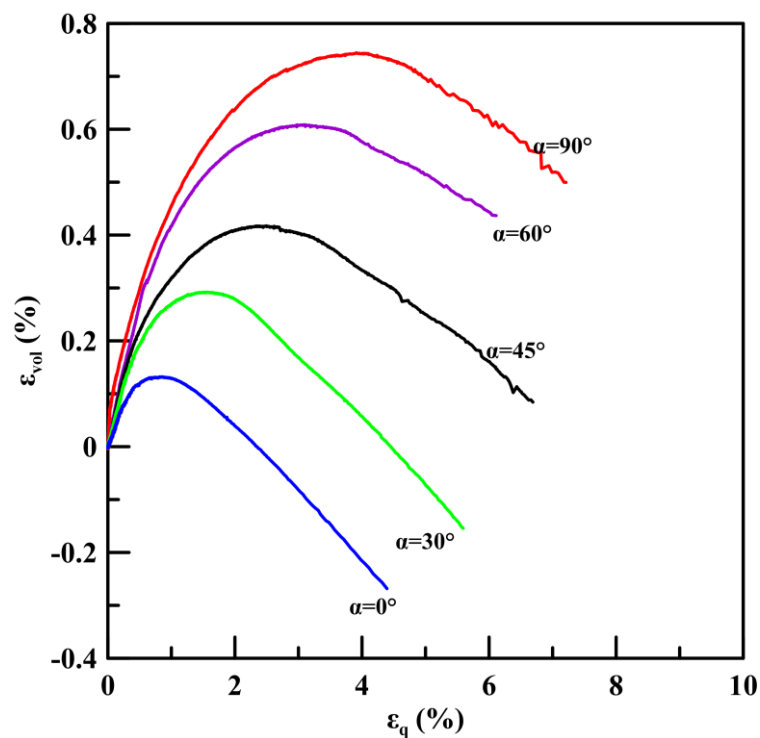
Τα δοκίμια έχουν παρασκευαστεί με τη μέθοδο της απόθεσης στο νερό σε σχετικά χαλαρή πυκνότητα ώστε να σχηματιστεί μια εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή συγκρίσιμη με τις προηγούμενες σειρές πειραμάτων. Παρατηρούμε ότι και στις δοκιμές με τιμή παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 ως προς το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου (**Σχήμα 6.10**).

Γενικά η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στο κατακόρυφο επίπεδο ($\alpha=0^\circ$) αφού η άμμος εμφανίζεται πιο δύσκαμπτη και αναπτύσσει μεγαλύτερη κορυφαία αντοχή υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης. Η απόκριση της άμμου αλλάζει όταν η φόρτιση πραγματοποιείται υπό γωνία $\alpha>0^\circ$ ($\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά της άμμου γίνεται αισθητά πιο συστολική όταν ο σ_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο και η αντοχή μειώνεται. Η συστολικότητα που παρατηρείται είναι συγκρίσιμη σε μέγεθος με εκείνη για $b=0.5$ και σαφώς μικρότερη από εκείνη για $b=0$. Επιπλέον, η εγγενής ανισοτροπία σε συνδυασμό με την περεταίρω αύξηση της σ_2 επηρεάζει και τη φόρτιση υπό $\alpha=30^\circ$ με τη συστολικότητα να αυξάνεται αναλογικά με την απόκλιση από την κατακόρυφο α . Η ανάδειξη της ασθενούς δομής στο οριζόντιο επίπεδο ήταν μικρότερη για $b=0.5$ με αποτέλεσμα την σύγκλιση της απόκρισης για $\alpha=0^\circ$ και 30° . Η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη αντοχή και πιο συστολική συμπεριφορά) παρατηρείται όταν $\alpha=90^\circ$. Επισημαίνεται ωστόσο ότι υπό $b=1$ (μέγιστη δυνατή ακτινική τάση, σ_2) οι διαφορές στη μέγιστη αντοχή της άμμου για $\alpha\geq 45^\circ$ είναι μικρές, καθώς η φόρτιση πραγματοποιείται σε επίπεδα που τείνουν στο οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης,

α)



β)



Σχήμα 6.10: Απόκριση χαλαρής, ισότροπα στερεοποιημένης άμμου M31 σε ακτινική φόρτιση με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης

Προκειμένου να μελετηθεί εκτενέστερα η επιρροή του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 , παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α ($\alpha=0^\circ$ (**Σχήμα 6.11**), $\alpha=30^\circ$ (**Σχήμα 6.12**), $\alpha=45^\circ$ (**Σχήμα 6.13**), $\alpha=60^\circ$ (**Σχήμα 6.14**) και $\alpha=90^\circ$ (**Σχήμα 6.15**)). Ανεξάρτητα της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης ως προς το κατακόρυφο επίπεδο παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν $b=0$. Επιπρόσθετα, ή άμμος για κάθε τιμή της γωνίας α είναι λιγότερο συστολική όταν η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 ισούται με την ελάχιστη κύρια τάση σ_3 ($b=0$). Για κάθε τιμή της γωνίας α παρατηρείται πτώση της αντοχής με την αύξηση της παραμέτρου b . Ωστόσο όσο η γωνία α αυξάνεται οι καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε $b=0.5$ και σε $b=1$ φαίνεται να συγκλίνουν.

Από τα διαγράμματα ογκομετρικής-διατμητικής παραμόρφωσης παρατηρούμε ότι όταν η τιμή της παραμέτρου b αυξάνεται από $b=0$ σε $b=0.5$, αυξάνεται η συστολή και μειώνεται η διαστολικότητα, ενώ περεταίρω αύξηση της παραμέτρου b δεν επηρεάζει την εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, αφού οι καμπύλες των δοκιμών για $b=0.5$ και $b=1$ πρακτικά ταυτίζονται. Η μέγιστη συστολικότητα παρατηρείται για $\alpha=90^\circ$ για όλες τις τιμές της παραμέτρου b . Γενικά παρατηρούμε ότι η επίδραση της παραμέτρου b είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση της χαλαρής άμμου M31.

Στο **Σχήμα 6.16** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0$ (**Σχήμα 6.16** (α)), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.16** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.16** (γ))). Παρατηρούμε ότι η επίδραση της γωνίας α είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης ανεξαρτήτως της παραμέτρου b . Συγκεκριμένα η μέγιστη θλιπτική αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται για τιμή της γωνίας $\alpha=0^\circ$, ενώ μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α και πρακτικά μηδενίζεται όταν $\alpha=45^\circ$. Για $\alpha>45^\circ$ αναπτύσσεται εφελκυστική αξονική παραμόρφωση που μεγιστοποιείται κατά απόλυτη τιμή όταν $\alpha=90^\circ$. Η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) επιφέρει μείωση της αξονικής παραμόρφωσης αλγεβρικά για κάθε τιμή της γωνίας α .

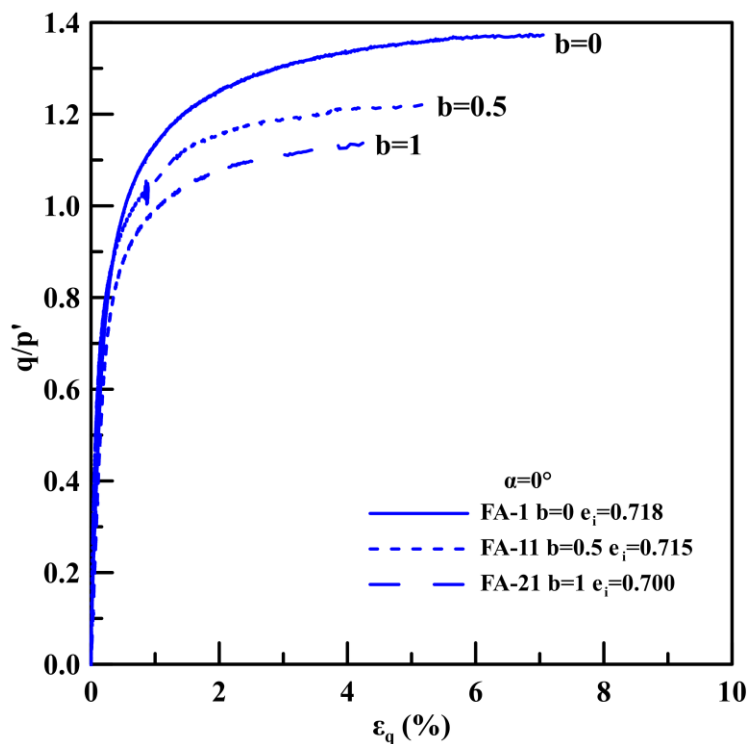
Στο **Σχήμα 6.17** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην εφαπτομενική παραμόρφωση (ϵ_θ) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0$ (**Σχήμα 6.17** (α)), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.17** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.17** (γ))). Παρατηρούμε ότι η επίδραση της γωνίας α είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ανάπτυξη της εφαπτομενικής παραμόρφωσης ανεξαρτήτως της παραμέτρου. Συγκεκριμένα η μέγιστη εφαπτομενική παραμόρφωση εντοπίζεται για τιμή της γωνίας $\alpha=90^\circ$, ενώ μειώνεται με τη μείωση της γωνίας α και πρακτικά μηδενίζεται όταν $\alpha=45^\circ$. Για $\alpha<45^\circ$ αναπτύσσεται αρνητική εφαπτομενική παραμόρφωση που μεγιστοποιείται κατ' απόλυτη τιμή όταν $\alpha=0^\circ$. Γενικά, η αύξηση της γωνίας α οδηγεί σε αλγεβρική αύξηση της εφαπτομενικής παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα οδηγεί σε αλγεβρική μείωση της αξονικής παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, η επιρροή του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης είναι εμφανής, αφού αύξηση της

παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) επιφέρει μείωση της αξονικής παραμόρφωσης αλγεβρικά για κάθε τιμή της γωνίας α .

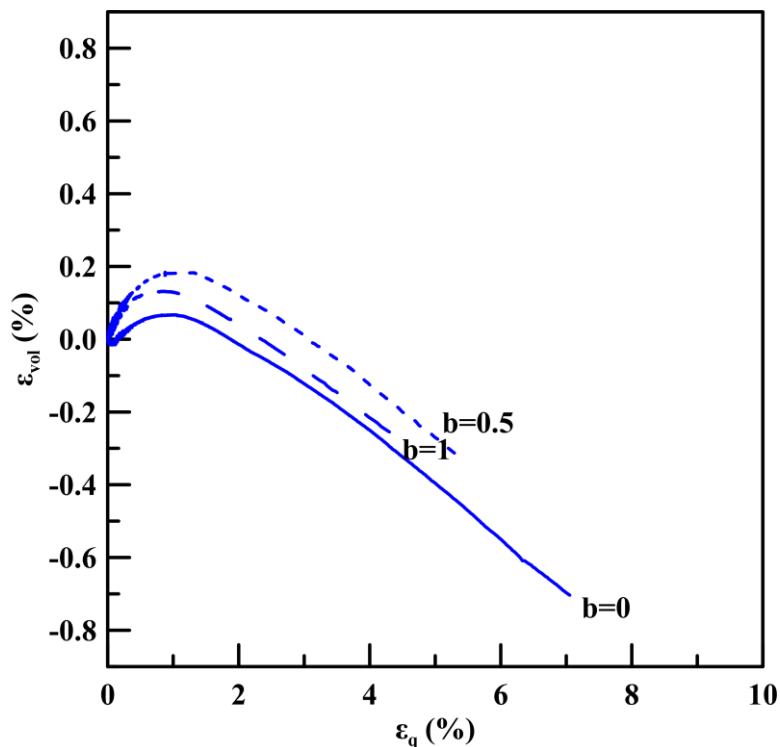
Στο **Σχήμα 6.18** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην ακτινική παραμόρφωση (ϵ_r) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{b=0$ (**Σχήμα 6.18** (α)), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.18** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.18** (γ))}. Σε αντίθεση με την αξονική και εφαπτομενική παραμόρφωση η ακτινική παραμόρφωση δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης (γωνία α). Αντιθέτως, η επιρροή της παραμέτρου b είναι ιδιαίτερα έντονη καθώς αύξηση της παραμέτρου b επιφέρει αύξηση της ακτινικής παραμόρφωσης αλγεβρικά. Συγκεκριμένα για $b=0$ προκύπτει ακτινική $\epsilon_r < 0$, ενώ για $b=0.5$ και 1 προκύπτει $\epsilon_r > 0$. Επομένως τιμές μηδενικής ακτινικής παραμόρφωσης θα είχαμε για τιμές παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης $0 < b < 0.5$. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι συνθήκες μηδενικής πλευρικής παραμόρφωσης (plane strain) όπου $\epsilon_r = 0$ εντοπίζονται όταν $b \approx 0.25-0.3$ (M. M. Yoshimine et al., 1999). Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω παραμορφώσεις είναι αποτέλεσμα μετρήσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής και δείχνουν ότι η παραδοχή $\epsilon_r = \epsilon_\theta$ που συνήθως γίνεται λόγω έλλειψης μετρητών και υιοθετείται σε καταστατικά προσομοιώματα δεν ευσταθεί.

Στο **Σχήμα 6.19** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στη διατμητική παραμόρφωση $\gamma_{\theta z}$ για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{b=0$ (**Σχήμα 6.19** (α)), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.19** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.19** (γ))}. Παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης πρακτικά δεν επηρεάζεται από την τιμή της παραμέτρου b , αλλά μόνο από τη διεύθυνση του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο και πιο συγκεκριμένα από το μέγεθος στρεπτικού φορτίου που επιβάλλεται. Επομένως, για γωνία $\alpha=0^\circ$ και 90° , όπου δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο η διατμητική παραμόρφωση είναι $\gamma_{\theta z} = 0$, για γωνία $\alpha=30^\circ$ και 60° που επιβάλλεται ισόποσο στρεπτικό φορτίο αναπτύσσεται περίπου κοινή διατμητική παραμόρφωση και τέλος για $\alpha=45^\circ$ όπου επιβάλλεται το μέγιστο στρεπτικό φορτίο αναπτύσσεται και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

α)

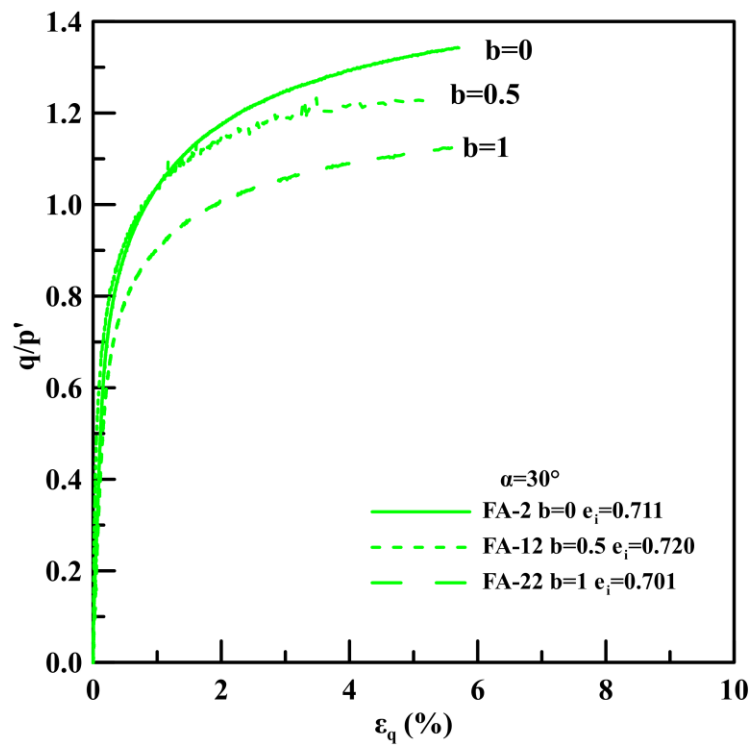


β)

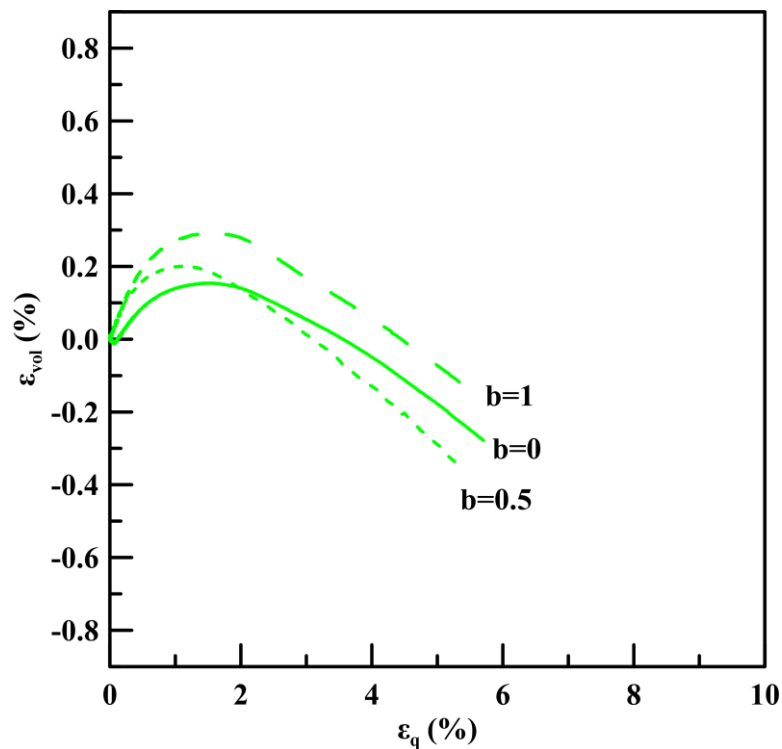


Σχήμα 6.11: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=0^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

α)

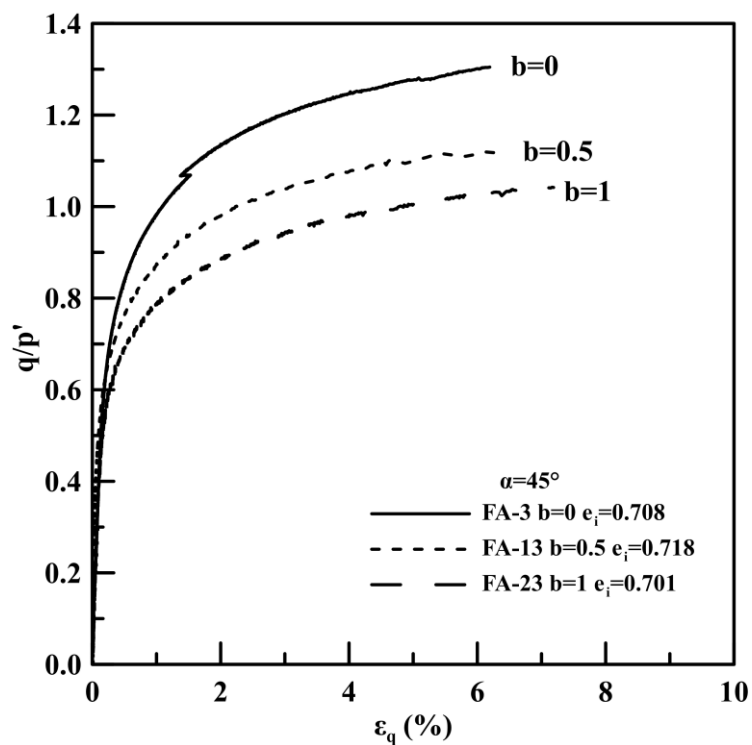


β)

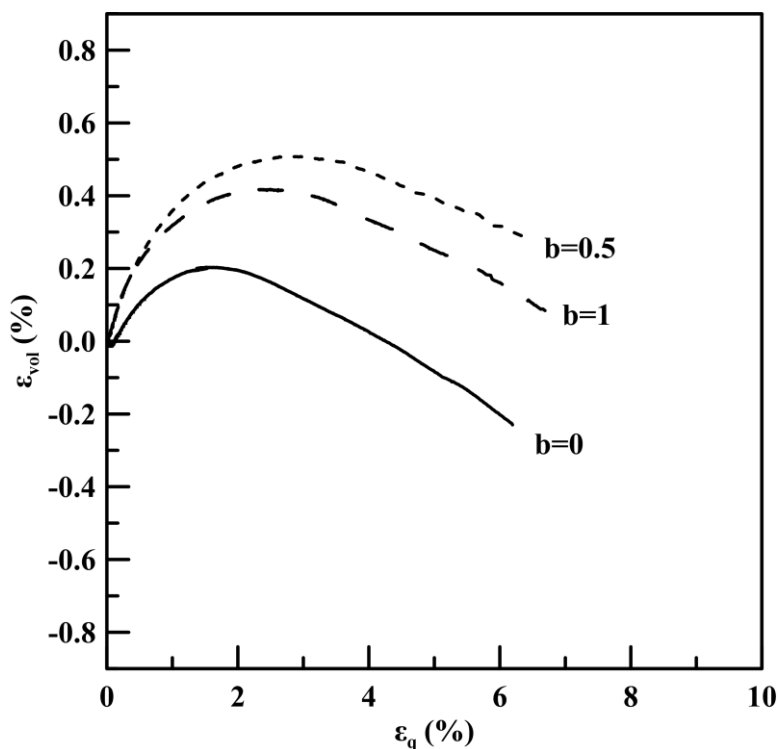


Σχήμα 6.12: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=30^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

α)

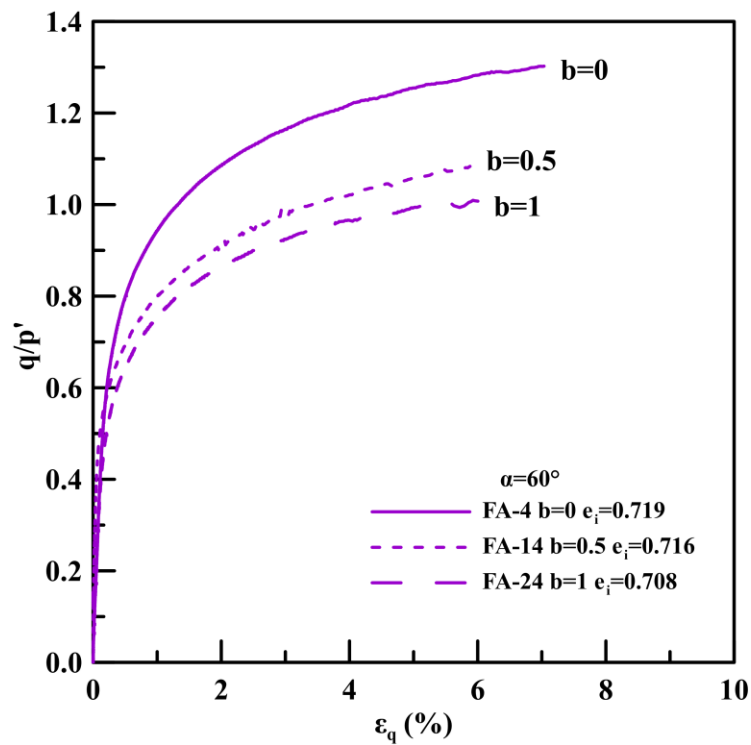


β)

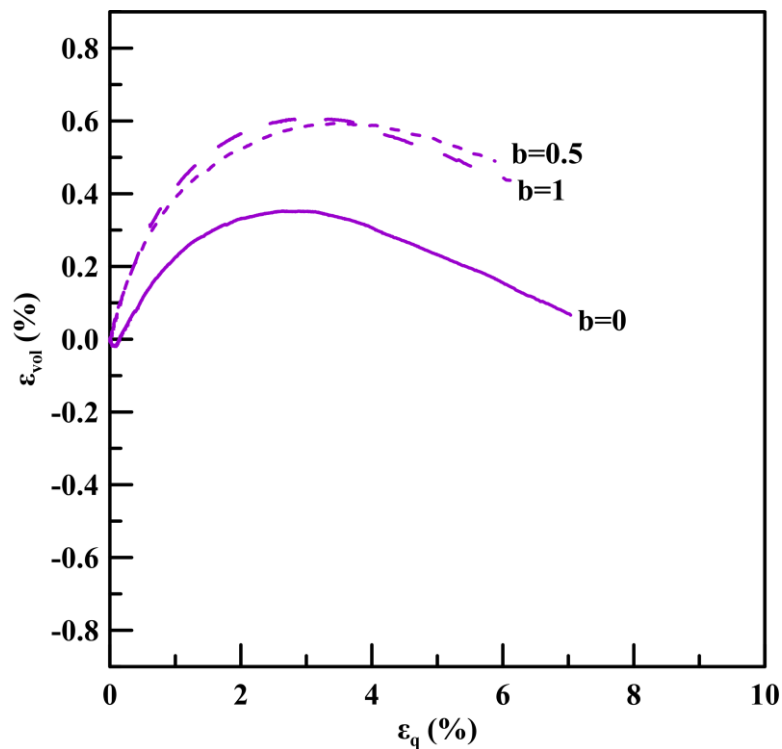


Σχήμα 6.13: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=45^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

α)

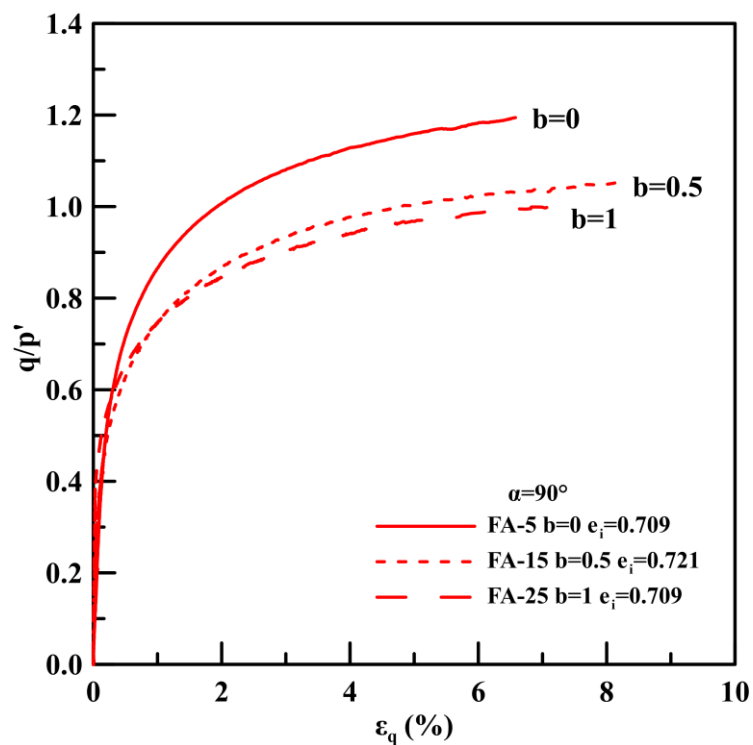


β)

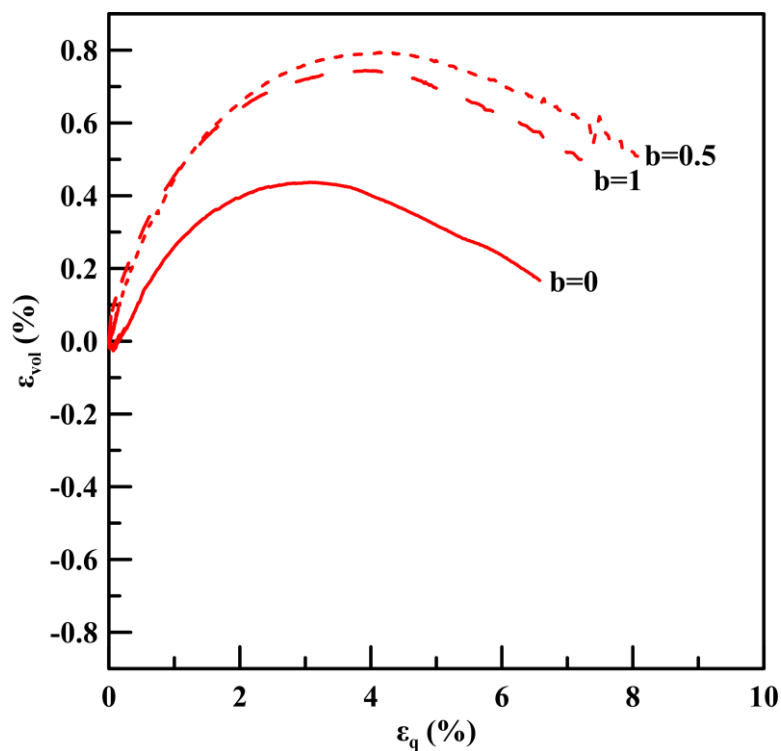


Σχήμα 6.14: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=60^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

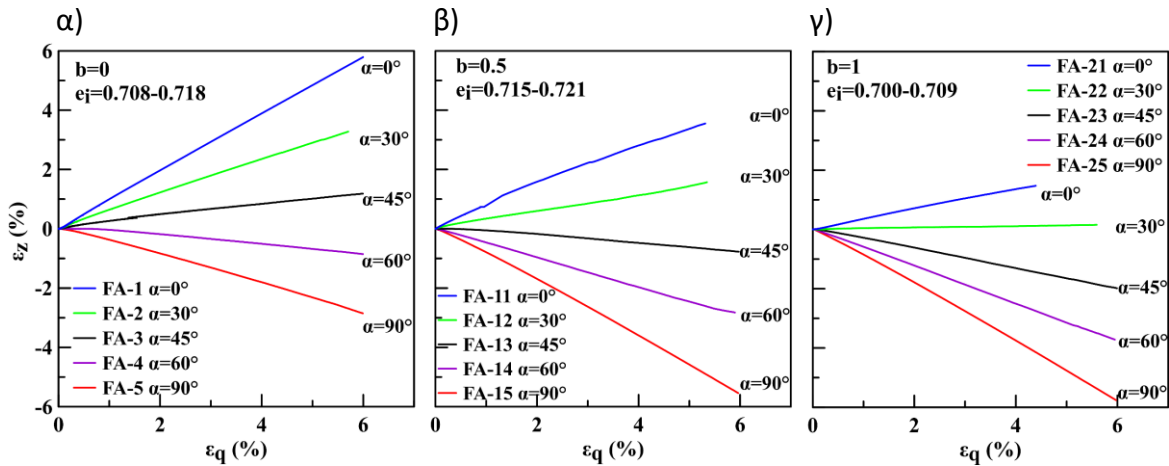
α)



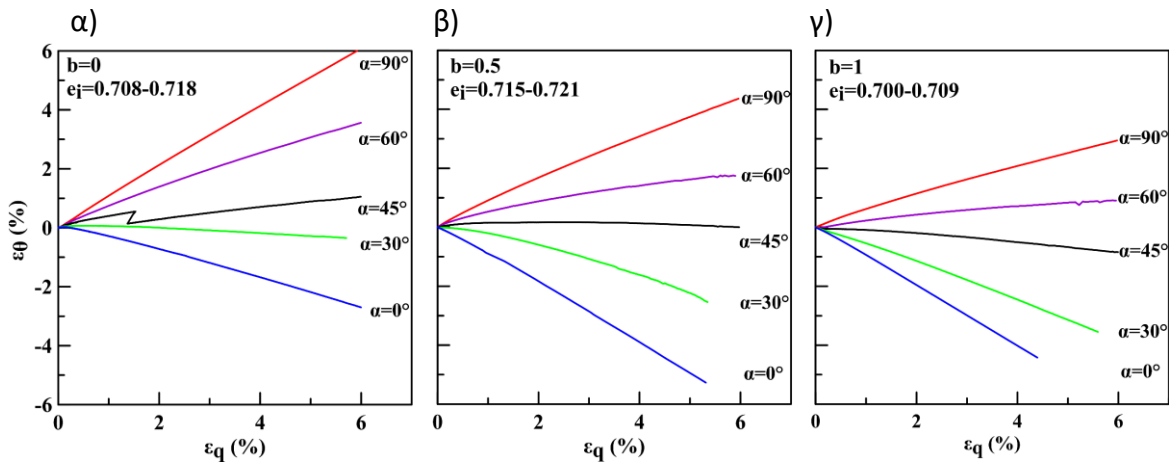
β)



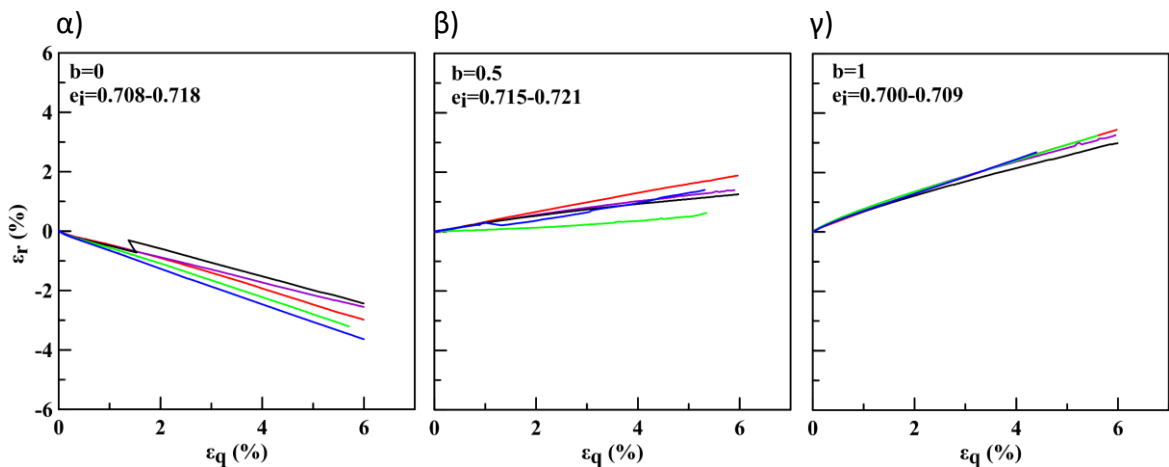
Σχήμα 6.15: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της χαλαρής άμμου M31 υπό γωνία $\alpha=90^\circ$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης



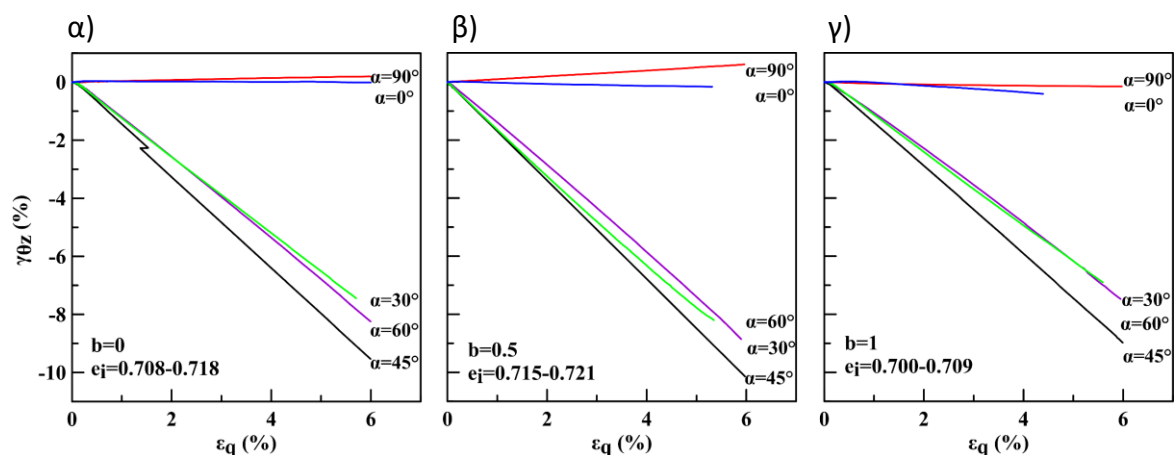
Σχήμα 6.16: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$



Σχήμα 6.17: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της εφαπτομενικής παραμόρφωσης (ϵ_θ) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$



Σχήμα 6.18: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της ακτινικής παραμόρφωσης (ϵ_r) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$



Σχήμα 6.19: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης ($\gamma_{\theta z}$) σε δοκίμια χαλαρής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$

Συμπερασματικά η ασθενής απόκριση που παρατηρείται για $\alpha > 60^\circ$ φαίνεται να συνδυάζεται με αρνητικές αξονικές παραμορφώσεις (εφελκυσμός) που είναι μεγαλύτερες για $b=0.5$ & 1 εξού και η ασθενέστερη συμπεριφορά σε σχέση με $b=0$. Οι εφαπτομενικές παραμορφώσεις όπως και οι αξονικές συνδέονται άμεσα με τη γωνία α .

Αντίθετα, η επίδραση της γωνίας α είναι μηδαμινή στις ακτινικές παραμορφώσεις όπου τον κύριο ρόλο παίζει η ενδιάμεση κύρια τάση, παράμετρος b . Η αδυναμία του υλικού στον οριζόντιο άξονα αναδεικνύεται όταν $b=0.5$ και 1 και το δοκίμιο συνθλίβεται ακτινικά (Σχήμα 6.18). Για τον λόγο αυτόν η συστολικότητα είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με $b=0$ όπου η διάμετρος του δοκιμίου αυξάνεται. Η επίδραση της α είναι ελάχιστη στην ακτινική παραμόρφωση, ϵ_r , αλλά σημαντική στη συστολικότητα που προφανώς αναπτύσσεται στον κατακόρυφο άξονα.

Τέλος, οι διατμητικές παραμορφώσεις έχουν άμεση εξάρτηση από την επιβαλλόμενη στρέψη που είναι μέγιστη για $\alpha=45$ και ελάχιστη για $\alpha=0$ & 90 όπου δεν ασκείται στρέψη.

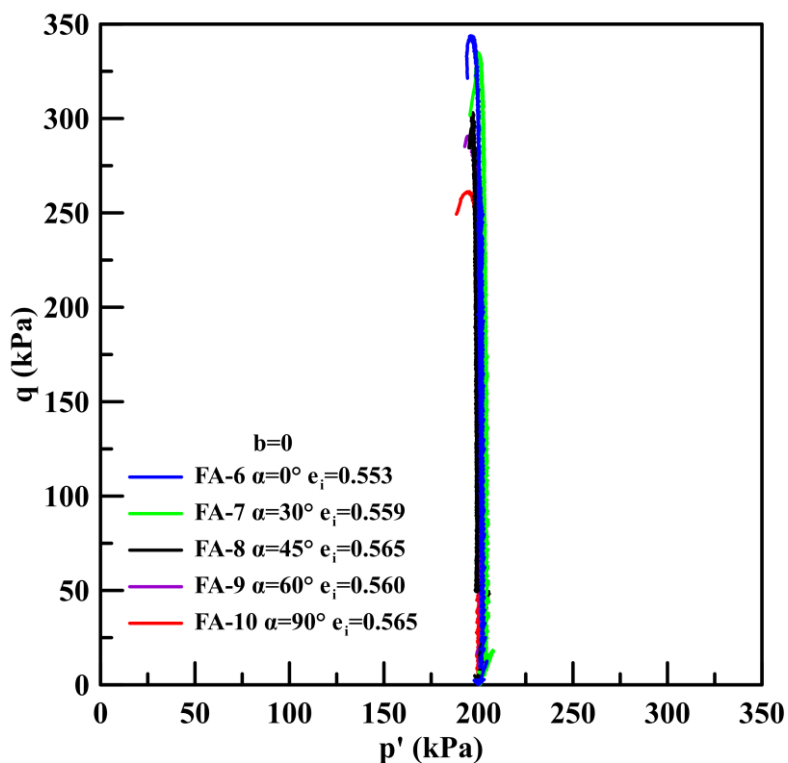
Η αντιστοιχία φόρτισης και παραμορφώσεων επιβεβαιώνει έμμεσα την ορθότητα των μετρήσεων και δείχνει ότι πρέπει να μετρούνται ανεξάρτητα αφού αλλάζουν η συσχέτιση τους ανάλογα με την επιβαλλόμενη φόρτιση.

6.4 Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη σχετικά πυκνή άμμο M31

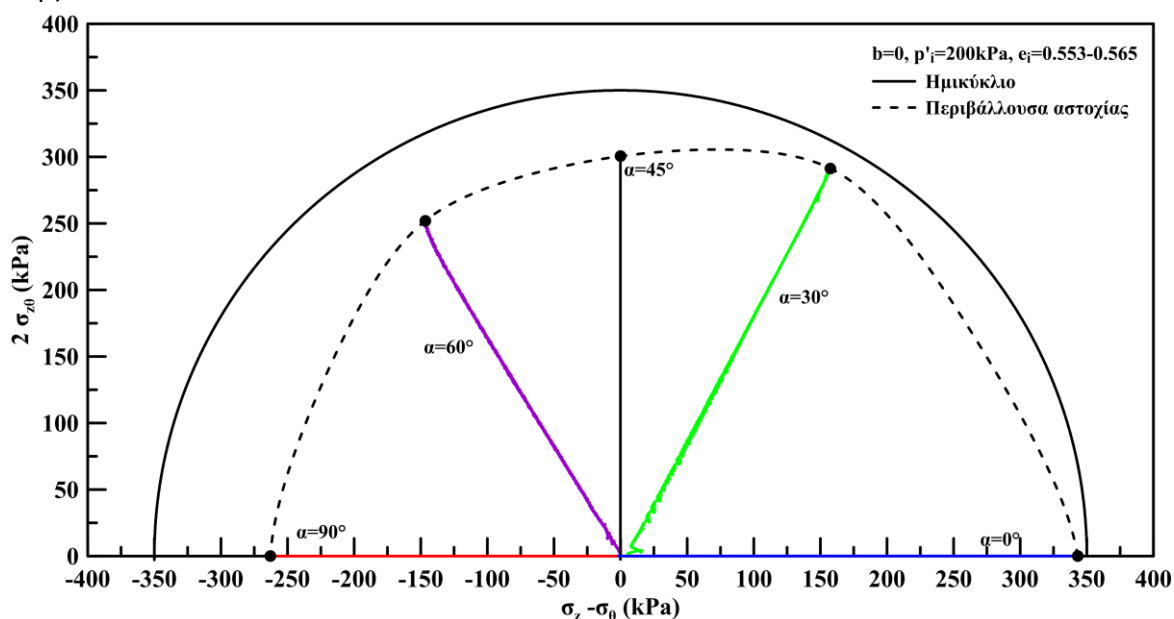
Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας στην ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά της άμμου, η δεύτερη σειρά πειραμάτων εκτελέστηκε σε ισότροπα στερεοποιημένα σε ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$, πυκνά ($e_i=0.553-0.565$) δοκίμια άμμου M31. Μετά την ισότροπη στερεοποίηση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία υπό σταθερή διεύθυνση της μέγιστη κύριας τάσης ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Ταυτόχρονα διατηρούνται σταθερές η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0$) και η μέση ενεργός τάση ($p'=200\text{kPa}$) ελέγχοντας τις κύριες τάσεις (Σχήμα 6.2) μέσω του ρυθμού επιβολής του αξονικού (F) και στρεπτικού (T) φορτίου, αλλά και της εξωτερικής (p_o) και εσωτερικής (p_i) πίεσης που επιβάλλονται στο δοκίμιο καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης.

Οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών παρουσιάζονται στο επίπεδο $q - p'$ (Σχήμα 6.20(α)), αλλά και στο πλέον κατάλληλο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης X-Y (Σχήμα 6.20(β)), όπου οι διαδρομές τάσεων είναι ευθείες, με κέντρο την αρχή των αξόνων, διεύθυνση ίση με το διπλάσιο της γωνίας α και μήκος ίσο με τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση q της δοκιμής. Παρατηρούμε ότι συνδέοντας τα σημεία αστοχίας των δοκιμών προκύπτει μια μη συμμετρική περιβάλλουσα αστοχίας που αποκλίνει από το ημικόκλιο με ακτίνα τη διαδρομή τάσεων της δοκιμής FA-6 (όπου $\alpha=0^\circ$) με τη μέγιστη αντοχή. Επομένως η μέγιστη αντοχή της πυκνής άμμου M31 εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α) καθώς όλες οι άλλες παράμετροι των δοκιμών είναι κοινές (αρχική πυκνότητα, ενεργός τάση $p' = 200\text{kPa}$ και παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$). Επιπρόσθετα, συγκριτικά με την απόκριση της χαλαρής άμμου M31 (Σχήμα 6.3) η πυκνή άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη αντοχή όπως είναι αναμενόμενο, αλλά εμφανίζει και πιο έντονη ανισοτροπία με την περιβάλλουσα αστοχίας να αποκλίνει περισσότερο από το ημικόκλιο.

α)



β)



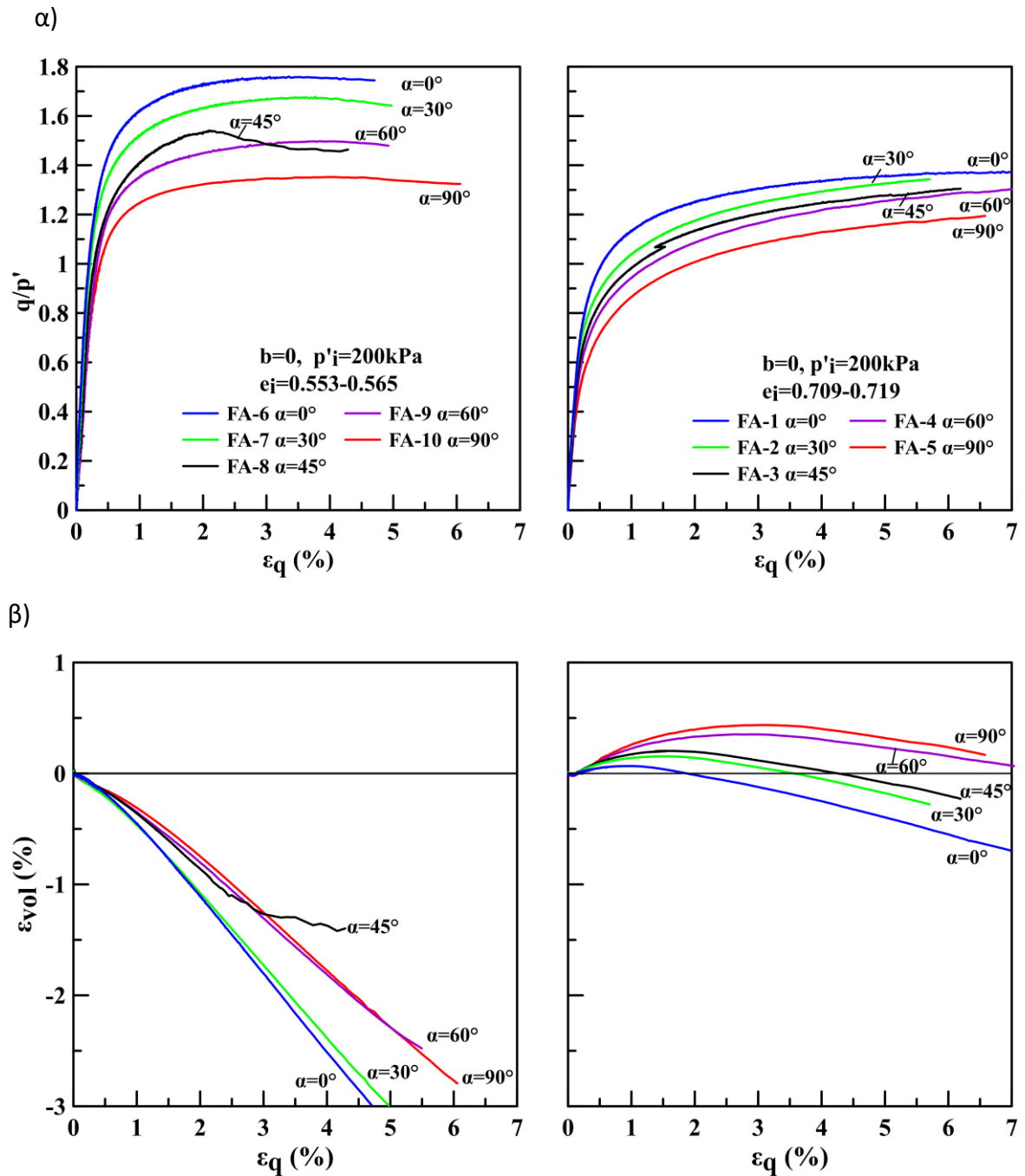
Σχήμα 6.20: Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$

Κατά την παρασκευή των δοκιμών με απόθεση της άμμου σε νερό, υπό την επίδραση της βαρύτητας δημιουργούνται οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης (bedding planes) πάνω στα οποία προσανατολίζονται επιλεκτικά οι μεγάλοι άξονες των μη σφαιρικών κόκκων, τα κάθετα διανύσματα διεπαφών (contact normal vectors) των κόκκων (σφαιρικών ή μη) και οι μεγάλοι άξονες των κενών μεταξύ των κόκκων, σχηματίζοντας μία εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή. Επομένως, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς τα οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου. Με την αύξηση της πυκνότητας οι επαφές είναι περισσότερες και η αλληλεμπλοκή των κόκκων πιο έντονη. Τα αποτελέσματα της ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.21** σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της χαλαρής άμμου.

Όμοια με την απόκριση της χαλαρής άμμου, στην πυκνή άμμο M31 η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στο επίπεδο απόθεσης ($\alpha=0^\circ$) καθώς το δοκίμιο που υποβάλλεται σε φόρτιση υπό γωνία $\alpha=0^\circ$ εμφανίζεται πιο δύσκαμπτο και αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή. Η συμπεριφορά της άμμου γίνεται, εν γένει, πιο ασθενής όταν ο σ_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή να μειώνεται με τη γωνία α . Η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη αντοχή παρατηρείται όταν η γωνία $\alpha=90^\circ$, διότι τότε ένα από τα επίπεδα στα οποία ο λόγος της διατμητικής προς την ορθή τάση γίνεται μέγιστος (maximum stress obliquity planes – επίπεδα οιονεί αστοχίας) τείνει να προσανατολιστεί με το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης. Επομένως, η εγγενής ανισοτροπία επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της πυκνής άμμου M31.

Επισημαίνεται ότι η επίδραση της πυκνότητας στην απόκριση της άμμου υπό ακτινική φόρτιση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ανεξάρτητα της γωνίας α η πυκνή άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή και αναπτύσσει την μέγιστη αντοχή της σε μικρότερη διατμητική παραμόρφωση. Επιπλέον, δεν εμφανίζει καθόλου συστολική συμπεριφορά αφού διέρχεται απευθείας στο στάδιο της διαστολής. Αντίθετα, η χαλαρή άμμος είναι ιδιαίτερα συστολική με τη συστολικότητα να αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας α . Συνολικά, η πυκνή άμμος αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση σε σχέση με τη χαλαρή. Συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της πυκνότητας οι επαφές είναι περισσότερες και η αλληλεμπλοκή των κόκκων πιο έντονη γι' αυτό και εμφανίζεται βελτιωμένη αντοχή, εκμηδενίζεται η συστολική συμπεριφορά και ενισχύεται η επιρροή της εγγενούς ανισοτροπίας.

Κεφάλαιο 6: Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης



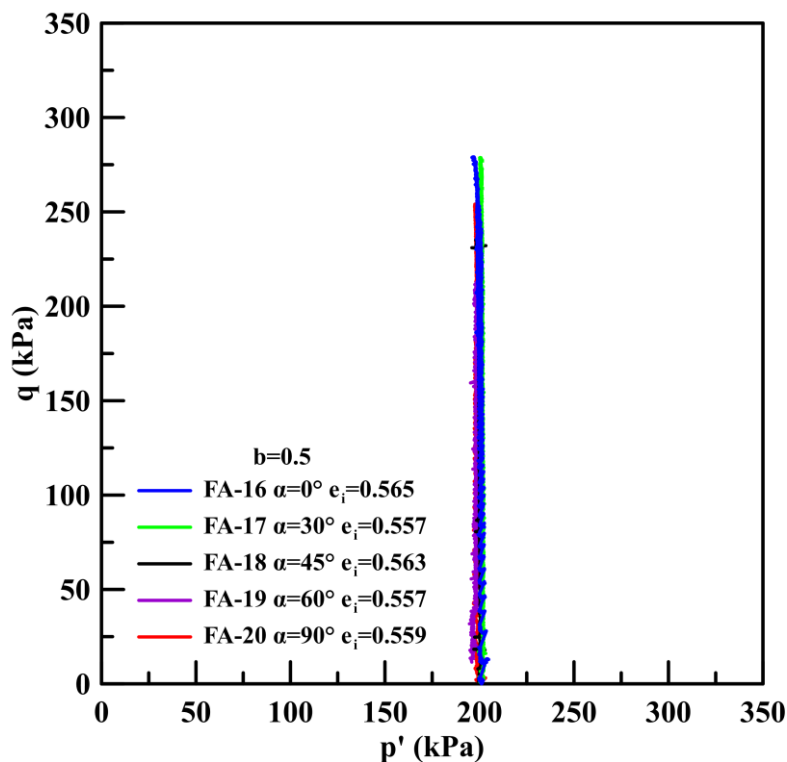
Σχήμα 6.21: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης στην πυκνή (αριστερά) και στη χαλαρή (δεξιά) άμμο M31

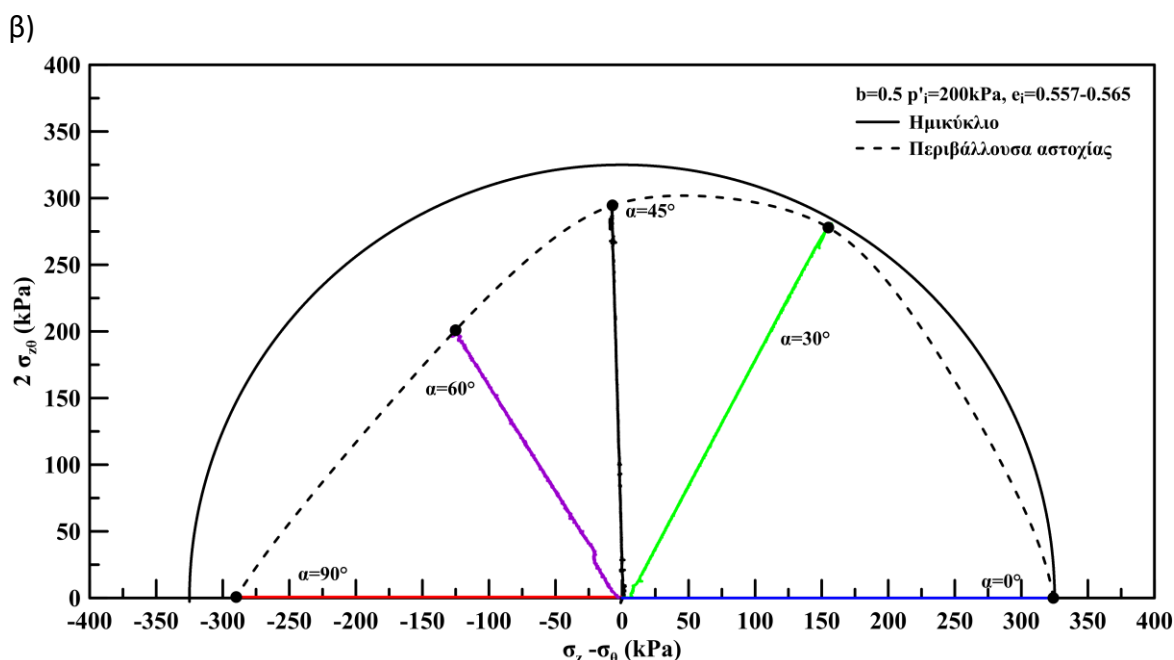
Για να εξεταστεί η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2) εκτελέστηκαν τα πειράματα ακτινικής φόρτισης σε πυκνά ($e_i=0.557-0.565$) δοκίμια άμμου M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0.5$. Συγκεκριμένα, μετά την ισότροπη στερεοποίηση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης

στράγγισης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Ταυτόχρονα διατηρούνται σταθερές η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0.5$) και η μέση ενεργός τάση ($p'=200\text{kPa}$). Η εξέλιξη των κυρίων τάσεων με το χρόνο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.5**.

Οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών παρουσιάζονται στο επίπεδο $q - p'$ (**Σχήμα 6.22(α)**), αλλά και στο πλέον κατάλληλο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης $X-Y$ (**Σχήμα 6.22 (β)**). Στο δεύτερο οι διαδρομές τάσεων είναι ευθείες, με κέντρο την αρχή των αξόνων, διεύθυνση ίση με το διπλάσιο της γωνίας α και μήκος ίσο με τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση q της δοκιμής. Παρατηρούμε ότι συνδέοντας τα σημεία αστοχίας των δοκιμών προκύπτει μια μη συμμετρική περιβάλλουσα αστοχίας που αποκλίνει από το ημικύκλιο με ακτίνα τη διαδρομή τάσεων της δοκιμής FA-16 (όπου $\alpha=0^\circ$) με τη μέγιστη αντοχή. Επομένως, η μέγιστη αντοχή της πυκνής άμμου M31 εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α) καθώς όλες οι άλλες παράμετροι των δοκιμών είναι κοινές (αρχική πυκνότητα, ενεργός τάση $p'=200\text{kPa}$ και παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$). Παρατηρούμε ότι η απόκλιση από το ημικύκλιο της περιβάλλουσας αστοχίας για $b=0.5$ είναι σημαντική για τιμές της γωνίας $\alpha \geq 45^\circ$ κυρίως λόγω της απότομης μείωσης της αντοχής που παρατηρείται για $\alpha=60^\circ$.

α)





Σχήμα 6.22: Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) $q-p'$ και β) $X-Y$

Τα αποτελέσματα της ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.23** σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της χαλαρής άμμου σε όρους λόγου τάσεων (q/p') -αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) (**Σχήμα 6.23(α)**) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.23(β)**).

Τα δοκίμια έχουν παρασκευαστεί με τη μέθοδο της απόθεσης στο νερό με ταυτόχρονη δόνηση, ώστε να σχηματιστεί μια εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή στην πρακτικά μέγιστη δυνατή πυκνότητα. Παρατηρούμε ότι η αλλαγή του προσανατολισμού του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου.

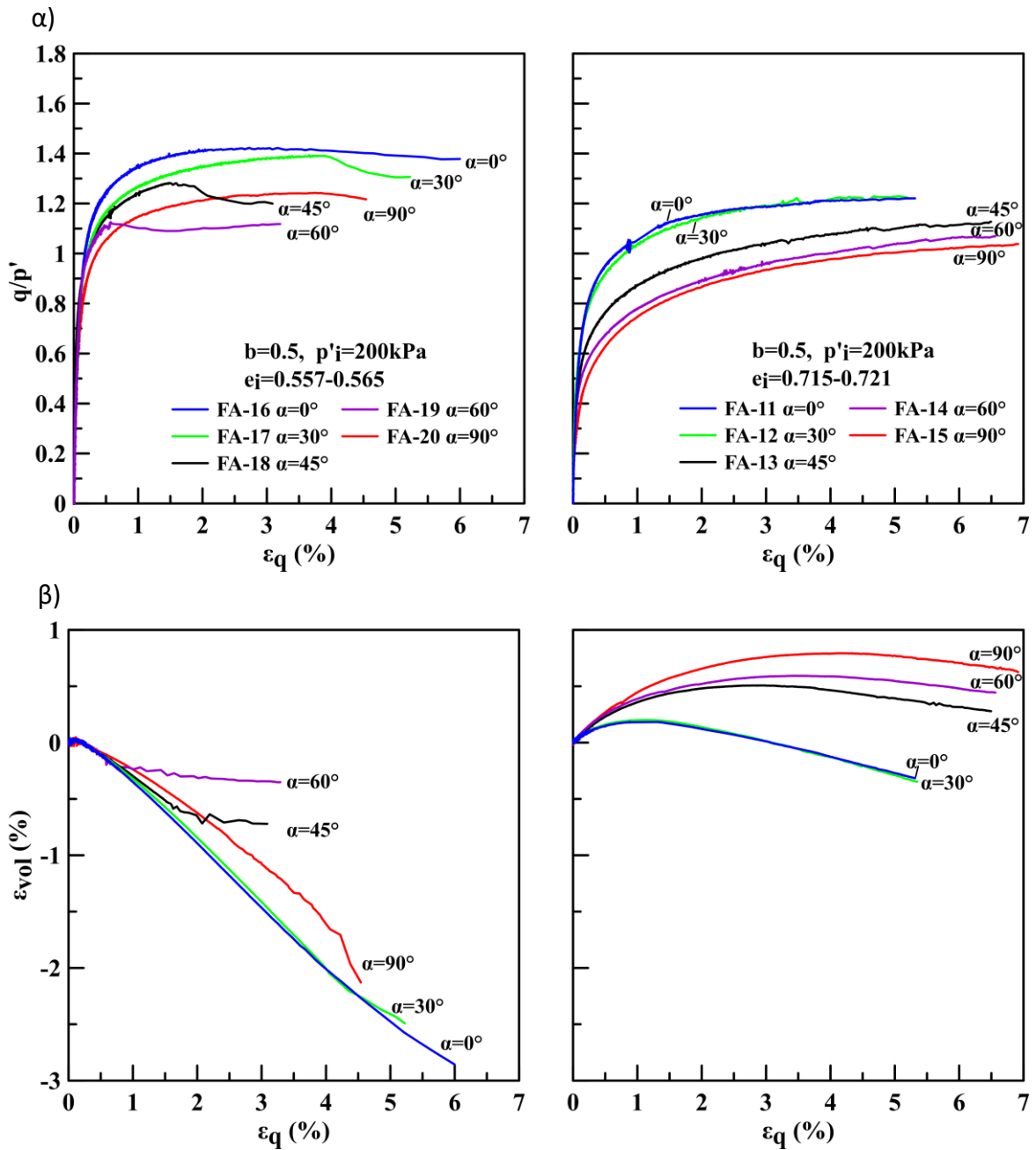
Γενικά η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι περίπου παράλληλη στο κατακόρυφο επίπεδο ($\alpha=0^\circ$) αφού η άμμος εμφανίζεται πιο δύσκαμπτη και αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης. Η συμπεριφορά της άμμου γίνεται, εν γένει, πιο ασθενής όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή να μειώνεται με τη γωνία α . Ωστόσο, για τιμή παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη αντοχή παρατηρείται όταν η γωνία $\alpha=60^\circ$. Ωστόσο επισημαίνεται το πυκνό δοκίμιο ανέπτυξε εμφανές επίπεδο διάτμησης υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης με αποτέλεσμα να σταματήσει η διαστολή του και ενδεχομένως η περεταίρω αύξηση της αντοχής.

Σε σχέση με την εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης ανεξαρτήτως γωνίας α η πυκνή άμμος διαστέλλεται πρακτικά από την αρχή της ακτινικής φόρτισης. Η ογκομετρική παραμόρφωση σταθεροποιείται όταν εμφανίζεται έντονο επίπεδο διάτμησης (shear band). Επομένως, η αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης δεν φαίνεται να επηρεάζει την ογκομετρική παραμόρφωση της πυκνής άμμου με το ρυθμό διαστολικότητας να είναι κοινός για φόρτιση υπό γωνία $\alpha=0^\circ$ και 30° και λίγο μικρότερος για φόρτιση υπό γωνία $\alpha \geq 45^\circ$.

Γενικότερα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών για $b=0.5$ (**Σχήμα 6.23**) και $b=0$ (**Σχήμα 6.21**) γίνεται αντιληπτή η επιρροή του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 . Ανεξάρτητα της τιμής της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί σε ασθενέστερη συμπεριφορά. Η κορυφαία αντοχή μειώνεται και η διαστολικότητα μειώνεται.

Η επίδραση της πυκνότητας στην απόκριση της άμμου υπό ακτινική φόρτιση και $b=0.5$ είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ανεξάρτητα της γωνίας α η πυκνή άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή και αναπτύσσει την μέγιστη αντοχή της σε μικρότερη διατμητική παραμόρφωση. Επιπλέον, δεν εμφανίζει καθόλου συστολική συμπεριφορά αφού διέρχεται απευθείας στο στάδιο της διαστολής. Αντίθετα, η χαλαρή άμμος είναι ιδιαίτερα συστολική με τη συστολικότητα να αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας α . Συνολικά, η πυκνή άμμος αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση σε σχέση με τη χαλαρή. Συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της πυκνότητας οι επαφές είναι περισσότερες και η αλληλεμπλοκή των κόκκων πιο έντονη γι' αυτό και εμφανίζεται βελτιωμένη αντοχή και εκμηδενίζεται η συστολή. Επισημαίνεται ότι η επίδραση της γωνίας α δεν είναι τόσο σημαντική στην εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης της πυκνής άμμου όσο στη χαλαρή άμμο. Επομένως, η εγγενώς ανισότροπη δομή επηρεάζει τη μηχανική απόκριση πιο έντονα στη φάση της συστολής και όχι τόσο στη διαστολική φάση της άμμου M31.

Κεφάλαιο 6: Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης

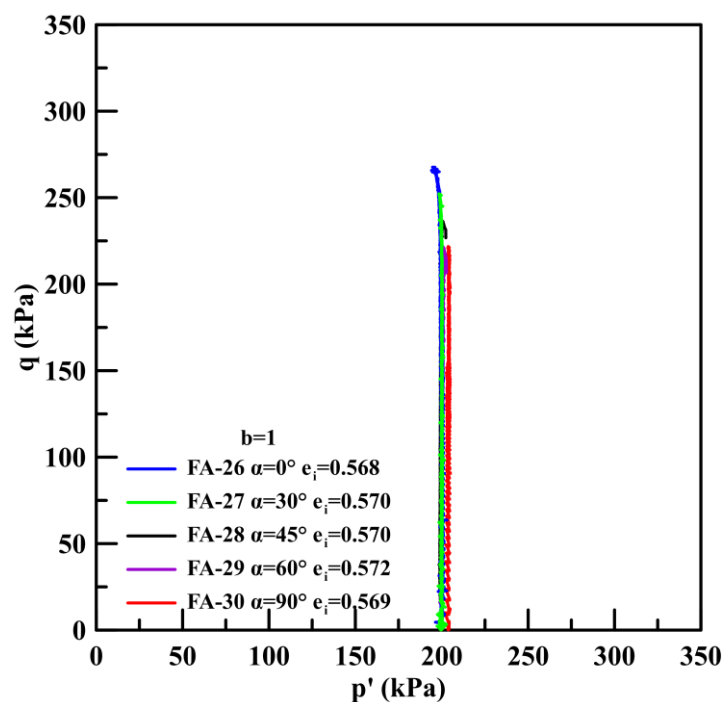


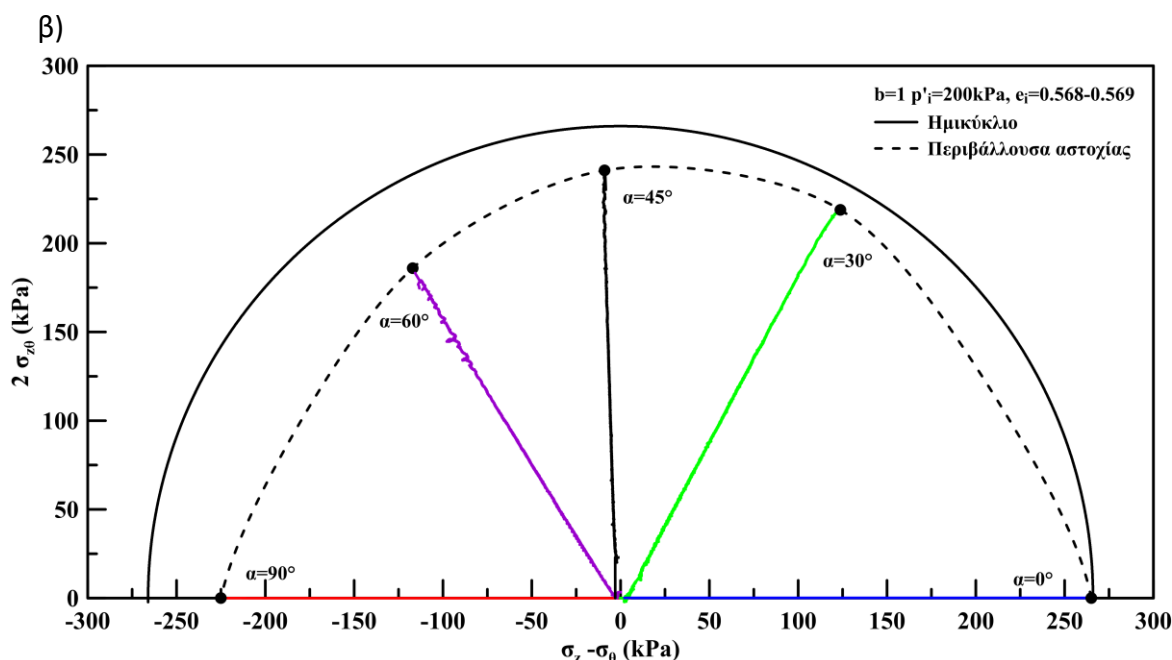
Σχήμα 6.23: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης στην πυκνή (αριστερά) και στη χαλαρή (δεξιά) άμμο M31

Για να εξεταστεί περαιτέρω η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης εκτελέστηκαν πειράματα ακτινικής φόρτισης σε πυκνά ($e_i=0.568-0.569$) δοκίμια άμμου M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=1$. Συγκεκριμένα, μετά την ισότροπη στερεοποίηση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Ταυτόχρονα διατηρούνται σταθερές η παράμετρος της ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=1$) και η μέση ενεργός τάση ($p'=200\text{kPa}$). Η εξέλιξη των κυρίων τάσεων με το χρόνο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.8**.

Οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών παρουσιάζονται στο επίπεδο q - p' (**Σχήμα 6.24 (α)**), αλλά και στο πλέον κατάλληλο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης X - Y (**Σχήμα 6.24 (β)**) όπου οι διαδρομές τάσεων είναι ευθείες, με κέντρο την αρχή των αξόνων, διεύθυνση ίση με τη διπλάσια γωνία α και μήκος ίσο με τη μέγιστη αποκλίνουσα τάση q της δοκιμής. Παρατηρούμε ότι συνδέοντας τα σημεία αστοχίας των δοκιμών προκύπτει μια μη συμμετρική περιβάλλουσα αστοχίας που αποκλίνει από το ημικύκλιο με ακτίνα τη διαδρομή τάσεων της δοκιμής FA-26 (όπου $\alpha=0^\circ$) με τη μέγιστη αντοχή. Επομένως η μέγιστη αντοχή της πυκνής άμμου M31 εξαρτάται από τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (γωνία α) καθώς όλες οι άλλες παράμετροι των δοκιμών είναι κοινές (αρχική πυκνότητα, ενεργός τάση $p'=200\text{kPa}$ και παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$). Παρατηρούμε ότι η απόκλιση από το ημικύκλιο της περιβάλλουσας αστοχίας για $b=1$ είναι σημαντική για τιμές της γωνίας $\alpha \geq 30^\circ$, με τη μέγιστη απόκλιση να εμφανίζεται για $\alpha=60$ και 90° .

α)





Σχήμα 6.24: Αποτελέσματα δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο α) q - p' και β) X - Y

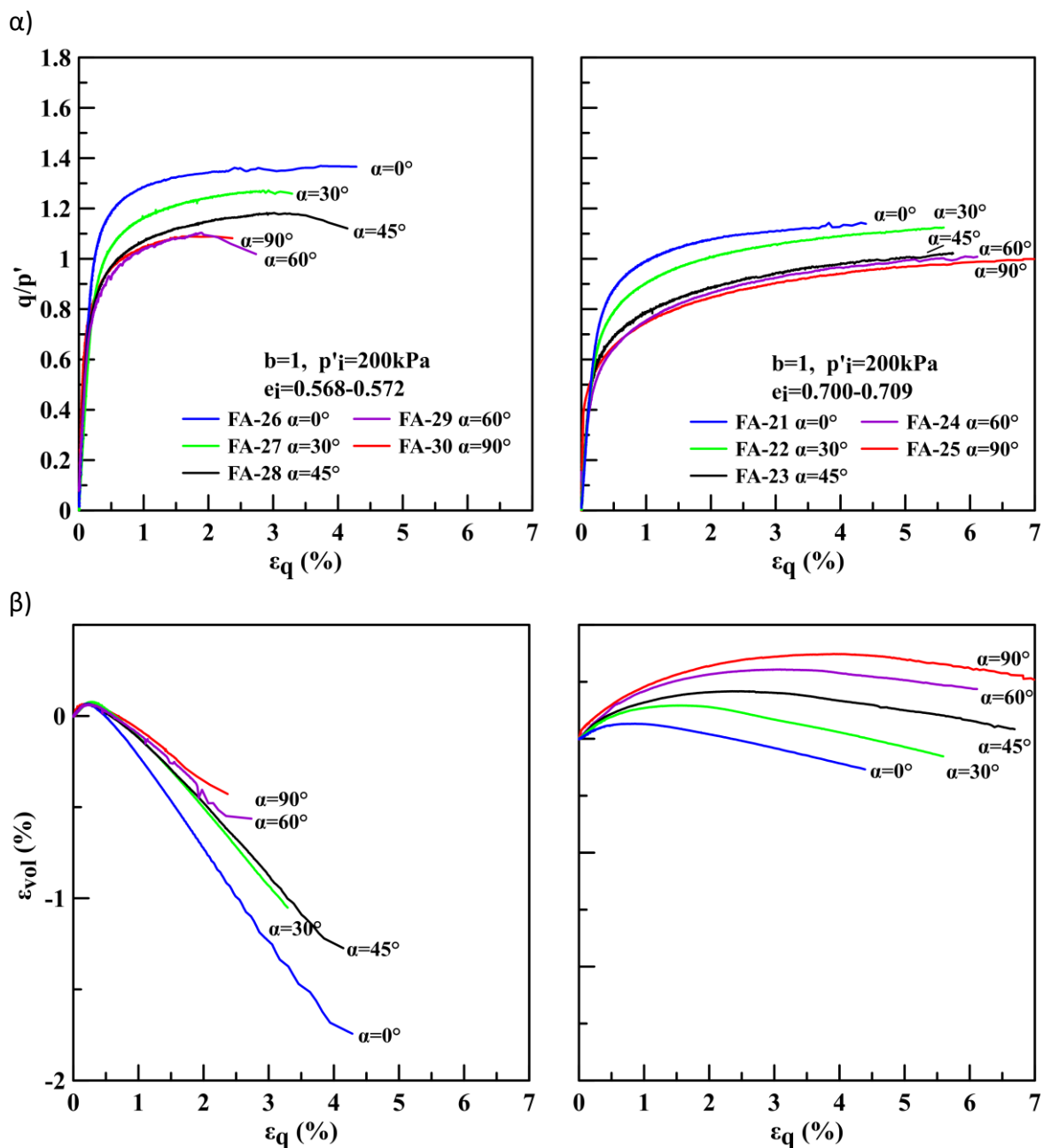
Τα αποτελέσματα της ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.25** σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της χαλαρής άμμου σε όρους λόγου τάσεων (q/p')-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) (**Σχήμα 6.25** (α)) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.25** (β)).

Τα δοκίμια έχουν παρασκευαστεί με τη μέθοδο της απόθεσης στο νερό στη μέγιστη δυνατή πυκνότητα ώστε να σχηματιστεί μια εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή συγκρίσιμη με τις προηγούμενες σειρές πειραμάτων. Παρατηρούμε ότι και στις δοκιμές με τιμή παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 ως προς το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου (**Σχήμα 6.10**).

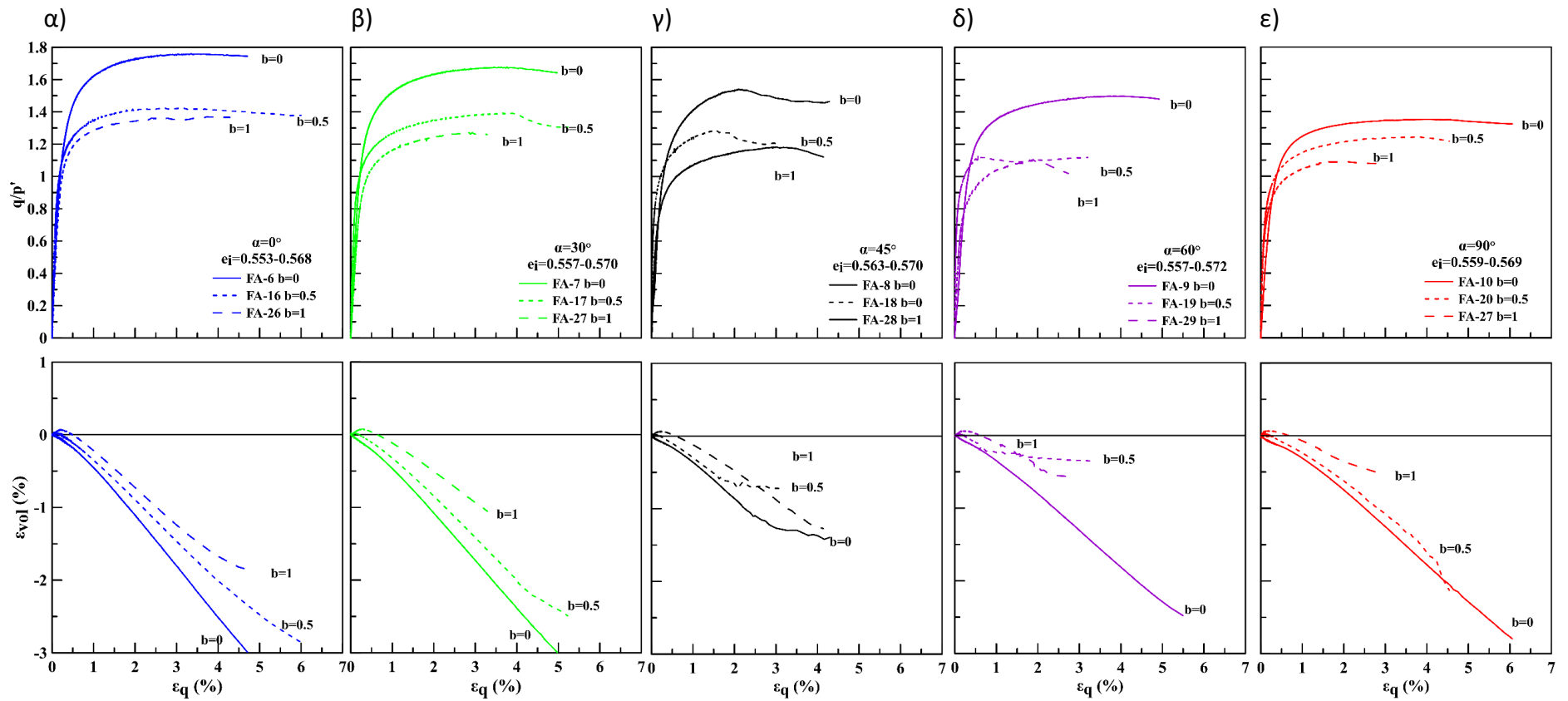
Γενικά, η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στο κατακόρυφο επίπεδο ($\alpha=0^\circ$) αφού η άμμος εμφανίζεται πιο δύσκαμπτη και αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης. Η απόκριση της άμμου αλλάζει όταν η φόρτιση πραγματοποιείται σε γωνία $\alpha>0^\circ$ ($\alpha=30^\circ$, 45° , 60° και 90°). Συγκεκριμένα, όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο η αντοχή μειώνεται. Η ασθενέστερη απόκριση (μικρότερη αντοχή και λιγότερο διαστολική συμπεριφορά παρατηρείται όταν $\alpha=90^\circ$. Ωστόσο ελάχιστη διαφορά παρατηρείται στην απόκριση της πυκνής άμμου για φόρτιση υπό γωνία $\alpha=60$ και 90° . Η επίδραση της πυκνότητας στην απόκριση της άμμου υπό ακτινική φόρτιση και $b=1$ είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ανεξάρτητα της γωνίας α η πυκνή άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή και αναπτύσσει την μέγιστη αντοχή της σε μικρότερη διατμητική παραμόρφωση σε αντίθεση με τη χαλαρή άμμο που είναι ιδιαίτερα συστολική με τη συστολικότητα να αυξάνεται με

την αύξηση της γωνίας α . Συνολικά, η πυκνή άμμος αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση σε σχέση με τη χαλαρή λόγω της έντονης αλληλεμπλοκής των κόκκων.

Προκειμένου να μελετηθεί εκτενέστερα η επιρροή του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 , παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ακτινικής φόρτισης στην πυκνή άμμο M31 για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α $\{\alpha=0^\circ$ **Σχήμα 6.26** (α), $\alpha=30^\circ$ **Σχήμα 6.26** (β), $\alpha=45^\circ$ **Σχήμα 6.26** (γ), $\alpha=60^\circ$ **Σχήμα 6.26** (δ), και $\alpha=90^\circ$ **Σχήμα 6.26** (ϵ)}. Ανεξάρτητα της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης ως προς το κατακόρυφο επίπεδο παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν $b=0$. Γενικά, η αντοχή μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α . Για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην εξέλιξη του λόγου τάσεων q/p' είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής και η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται σε μικρότερη διατμητική παραμόρφωση (πιο «απότομες» καμπύλες). Επισημαίνεται ότι η αύξηση της παραμέτρου b από $b=0$ σε $b=0.5$ οδηγεί σε πτώση της αντοχής ωστόσο η περαιτέρω αύξηση από $b=0.5$ σε $b=1$ δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της πυκνής άμμου. Σχετικά με την εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης παρατηρούμε ότι η πυκνή άμμος εμφανίζει αμελητέα συστολή και διέρχεται απευθείας στη φάση της διαστολής για όλες τις τιμές της γωνίας α και της παραμέτρου b . Επιπρόσθετα, η διαστολικότητα μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α . Για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης μειώνει τη διαστολικότητα, ωστόσο η επιρροή δεν είναι τόσο εμφανής όσο στην περίπτωση της χαλαρής άμμου M31. Επομένως, η παράμετρος b επηρεάζει τη μηχανική απόκριση πιο έντονα στη φάση της συστολής και λιγότερο στη διαστολική φάση της άμμου M31.



Σχήμα 6.25: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στην άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης στην πυκνή (αριστερά) και στη χαλαρή (δεξιά) άμμο M31



Σχήμα 6.26: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της πυκνής άμμου M31 υπό γωνία α) $\alpha=0^\circ$, β) $\alpha=30^\circ$, γ) $\alpha=45^\circ$, δ) $\alpha=60^\circ$ και ε) $\alpha=90^\circ$.

Στο **Σχήμα 6.27** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{b=0$ (**Σχήμα 6.27** (α)), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.27** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.27** (γ)) $\}$. Παρατηρούμε ότι η επίδραση της γωνίας α είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης ανεξαρτήτως της παραμέτρου b . Συγκεκριμένα η μέγιστη θλιπτική αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται για τιμή της γωνίας $\alpha=0^\circ$, ενώ μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α και πρακτικά μηδενίζεται όταν $\alpha=45^\circ$. Για $\alpha>45^\circ$ αναπτύσσεται εφελκυστική αξονική παραμόρφωση που μεγιστοποιείται κατά απόλυτη τιμή όταν $\alpha=90^\circ$ γεγονός που συνάδει με την μέγιστη αρνητική τιμή της $\sigma_z-\sigma_\theta$ και τον αυξημένο ρυθμό ανάπτυξης της αξονικής παραμόρφωσης που παρατηρείται στο Σχήμα 6.27 (β). Η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , επιφέρει μείωση της αξονικής παραμόρφωσης αλγεβρικά για κάθε τιμή της γωνίας α .

Στο **Σχήμα 6.28** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην εφαπτομενική παραμόρφωση (ϵ_θ) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{b=0$ **Σχήμα 6.28** (α)), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.28** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.28** (γ)) $\}$. Παρατηρούμε ότι η επίδραση της γωνίας α είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ανάπτυξη της εφαπτομενικής παραμόρφωσης ανεξαρτήτως της παραμέτρου. Συγκεκριμένα η μέγιστη εφαπτομενική παραμόρφωση εντοπίζεται για τιμή της γωνίας $\alpha=90^\circ$, ενώ μειώνεται με τη μείωση της γωνίας α και πρακτικά μηδενίζεται όταν $\alpha=45^\circ$. Για $\alpha<45^\circ$ αναπτύσσεται αρνητική εφαπτομενική παραμόρφωση που μεγιστοποιείται κατ' απόλυτη τιμή όταν $\alpha=0^\circ$. Γενικά, η αύξηση της γωνίας α οδηγεί σε αλγεβρική αύξηση της περιμετρικής παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα οδηγεί σε αλγεβρική μείωση της αξονικής παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, η επιρροή της του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης είναι εμφανής, αφού αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) επιφέρει μείωση της εφαπτομενικής παραμόρφωσης αλγεβρικά για κάθε τιμή της γωνίας α .

Στο **Σχήμα 6.29** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην ακτινική παραμόρφωση (ϵ_r) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{b=0$ (**Σχήμα 6.29** (α)), $b=0.5$ **Σχήμα 6.29** (β)) και $b=1$ (**Σχήμα 6.29** (γ)) $\}$. Σε αντίθεση με την αξονική και εφαπτομενική παραμόρφωση η ακτινική παραμόρφωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης (γωνία α). Αντιθέτως, η επιρροή της παραμέτρου b είναι έντονη, καθώς αύξηση της παραμέτρου b επιφέρει αύξηση της ακτινικής παραμόρφωσης αλγεβρικά. Συγκεκριμένα για $b=0$ προκύπτει ακτινική $\epsilon_r<0$, ενώ για $b=0.5$ και 1 προκύπτει $\epsilon_r>0$ αυξανόμενο με την αύξηση της σ_2 .

Η διαφορετική ανάπτυξη των εφαπτομενικών και ακτινικών παραμορφώσεων με τις πρώτες να επηρεάζονται άμεσα από την διεύθυνση των κυρίων τάσεων σε αντίθεση με τις ακτινικές που επηρεάζονται μόνο από την παράμετρο b και όχι από την α , δείχνει ότι η συχνά αποδεκτή παραδοχή $\epsilon_\theta=\epsilon_r$ δεν ευσταθεί και οι παραμορφώσεις πρέπει να μετρώνται σε όλες τις διευθύνσεις.

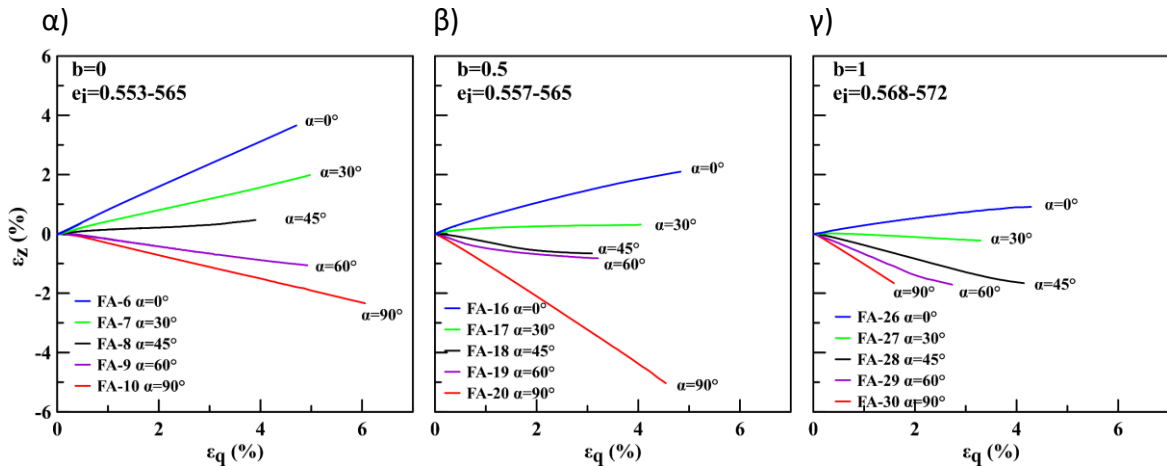
Επισημαίνεται επίσης ότι για $b=0.5$ η ακτινική παραμόρφωση της πυκνής άμμου είναι μικρή για κάθε τιμή της γωνίας α καθώς αυξάνεται μόνο σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις οδεύοντας προς την αστοχία. Επομένως, τιμές μηδενικής ακτινικής παραμόρφωσης θα είχαμε για τιμές παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης $0 < b < 0.5$. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι συνθήκες μηδενικής πλευρικής παραμόρφωσης (plane strain) όπου $\epsilon_r=0$ εντοπίζονται όταν $b \approx 0.25-0.3$ (M. M. Yoshimine et al., 1999). Οι μικρές ακτινικές παραμορφώσεις αντανakλούν την πυκνή δομή της άμμου σε αντίθεση με τη χαλαρή (**Σχήμα 6.18β**) όπου είναι μεγαλύτερες και επηρεάζονται σε κάποιο βαθμό από τη γωνία α . Το ίδιο ισχύει και για τις εφαπτομενικές παραμορφώσεις (**Σχήμα 6.28β**) σε σύγκριση με το **Σχήμα 6.17β**).

Οι μικρές ακτινικές παραμορφώσεις αντανakλούν την πυκνή δομή της άμμου σε αντίθεση με τη χαλαρή (**Σχήμα 6.18β**) όπου είναι μεγαλύτερες και επηρεάζονται σε κάποιο βαθμό από τη γωνία α . Το ίδιο ισχύει και για τις εφαπτομενικές παραμορφώσεις (**Σχήμα 6.28β**) σε σύγκριση με το **Σχήμα 6.17β**).

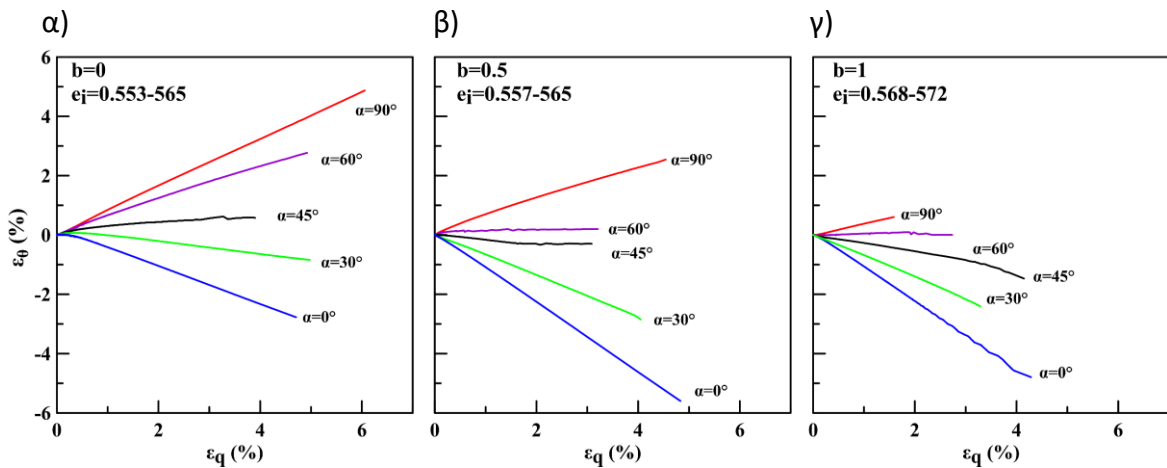
Στο **Σχήμα 6.30** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στη διατμητική παραμόρφωση $\gamma_{\theta z}$ για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{b=0$ (**Σχήμα 6.30 (α)**), $b=0.5$ **Σχήμα 6.30 (β)**) και $b=1$ (**Σχήμα 6.30 (γ)**)}. Παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης πρακτικά δεν επηρεάζεται από την τιμή της παραμέτρου b , αλλά μόνο από τη διεύθυνση του άξονα της κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο και συγκεκριμένα από το στρεπτικό φορτίο που επιβάλλεται. Επομένως, για γωνία $\alpha=0^\circ$ και 90° , όπου δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο η διατμητική παραμόρφωση είναι $\gamma_{\theta z}=0$, για γωνία $\alpha=30^\circ$ και 60° που επιβάλλεται ισόποσο στρεπτικό φορτίο αναπτύσσεται περίπου κοινή διατμητική παραμόρφωση και τέλος για $\alpha=45^\circ$ όπου επιβάλλεται το μέγιστο στρεπτικό φορτίο αναπτύσσεται και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση για κάθε τιμή της παραμέτρου b .

Γενικά ο κάθε συνδυασμός φορτίσεων επηρεάζει με παρόμοιο τρόπο τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις τόσο στη χαλαρή όσο και στην πυκνή άμμο.

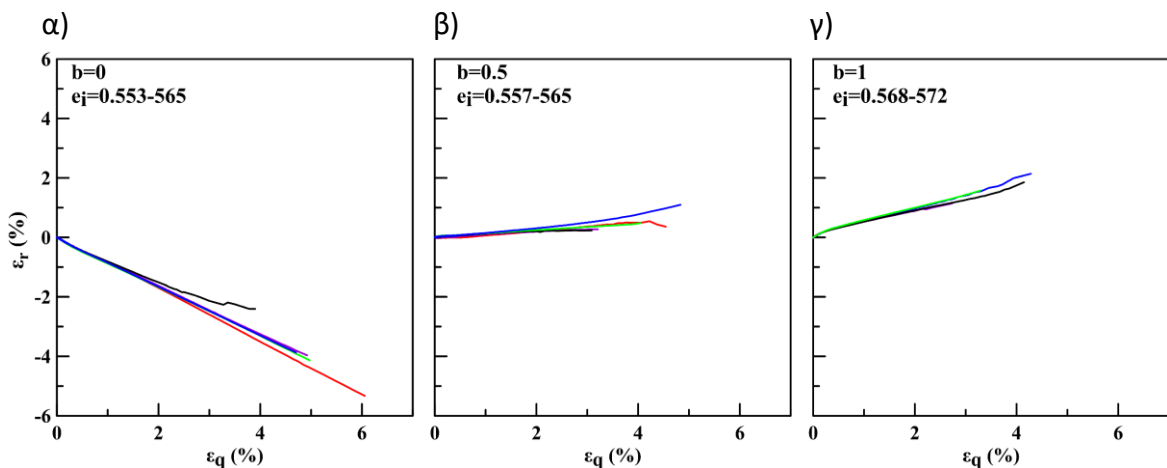
Κεφάλαιο 6: Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης



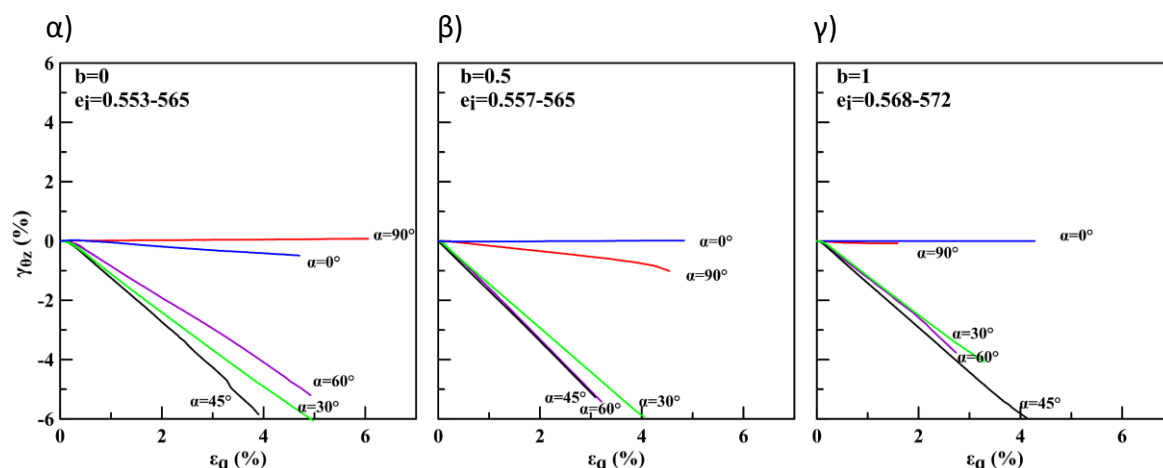
Σχήμα 6.27: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$



Σχήμα 6.28: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της εφαπτομενικής παραμόρφωσης (ϵ_θ) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$



Σχήμα 6.29: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της ακτινικής παραμόρφωσης (ϵ_r) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$

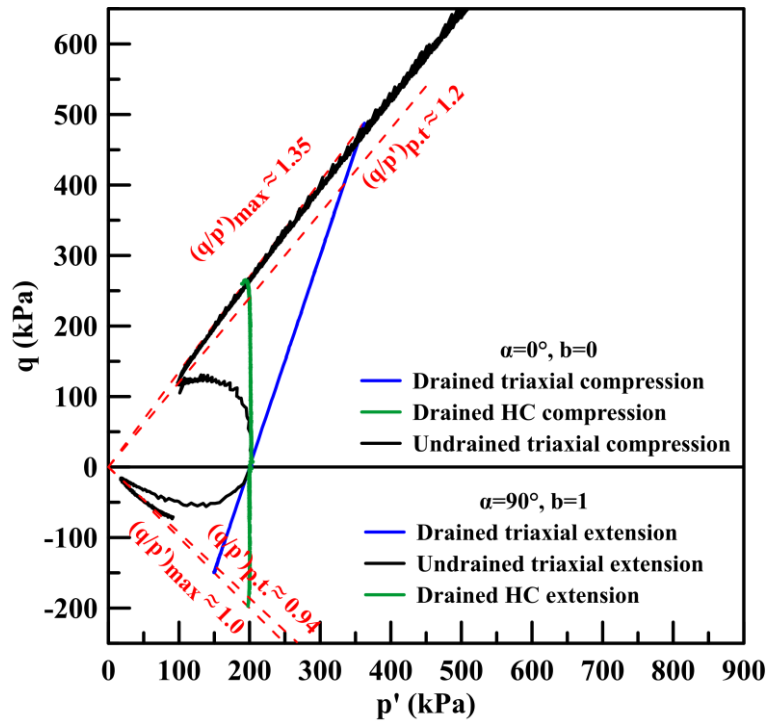


Σχήμα 6.30: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης ($\gamma_{\theta z}$) σε δοκίμια πυκνής άμμου M31 υπό α) $b=0$, β) $b=0.5$ και γ) $b=1$

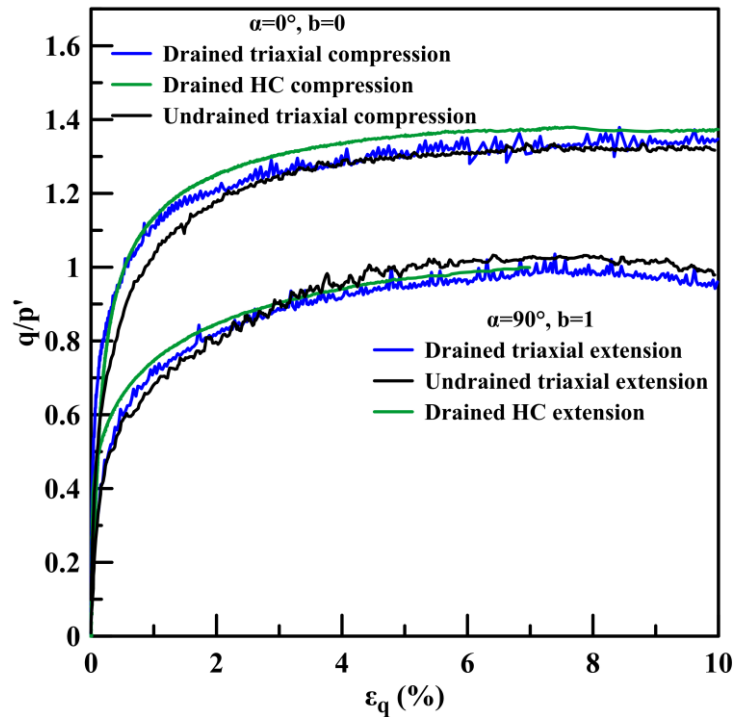
6.5 Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου b στο σημείο αλλαγής φάσης και στη μέγιστη διατμητική αντοχή της άμμου M31

Στο **Σχήμα 6.31** συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στη χαλαρή άμμο M31 από τη συσκευή στρεσπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (HC) με τα αντίστοιχα από την τριαξονική συσκευή. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων και οι καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης των δοκιμών τριαξονικής θλίψης ($\alpha=0^\circ$, $b=0$) και τριαξονικού εφελκυσμού ($\alpha=90^\circ$, $b=1$) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (μπλε καμπύλες) και υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (μαύρες κάμπυλες) στην ισότροπα στερεοποιημένη ($p'_i=200$ kPa) χαλαρή άμμο M31 ($e_i=0.737-0.748$). Οι δοκιμές στην τριαξονική συσκευή πραγματοποιήθηκαν επιβάλλοντας παραμόρφωση (strain controlled). Οι δοκιμές στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες επιβαλλόμενης τάσης (stress controlled) διατηρώντας σταθερή τη μέση ενεργό τάση. Παρατηρούμε ότι οι διαδρομές τάσεων ορίζουν μια περιβάλλουσα αστοχίας με κλίση $(q/p')_{max} \approx 1.35$ για τη θλίψη και μία περιβάλλουσα αστοχίας για τον εφελκυσμό με κλίση $(q/p')_{max} \approx 1.0$ ανεξαρτήτως συσκευής και συνθηκών στράγγισης. Επιπρόσθετα, σημειώνονται οι καμπύλες αλλαγής φάσης από συστολική σε διαστολική συμπεριφορά (phase transformation lines) με κλίση $(q/p')_{p.t.} \approx 1.2$ για τη θλίψη και $(q/p')_{p.t.} \approx 0.94$ για τον εφελκυσμό ανεξαρτήτως συσκευής και συνθηκών στράγγισης.

α)



β)



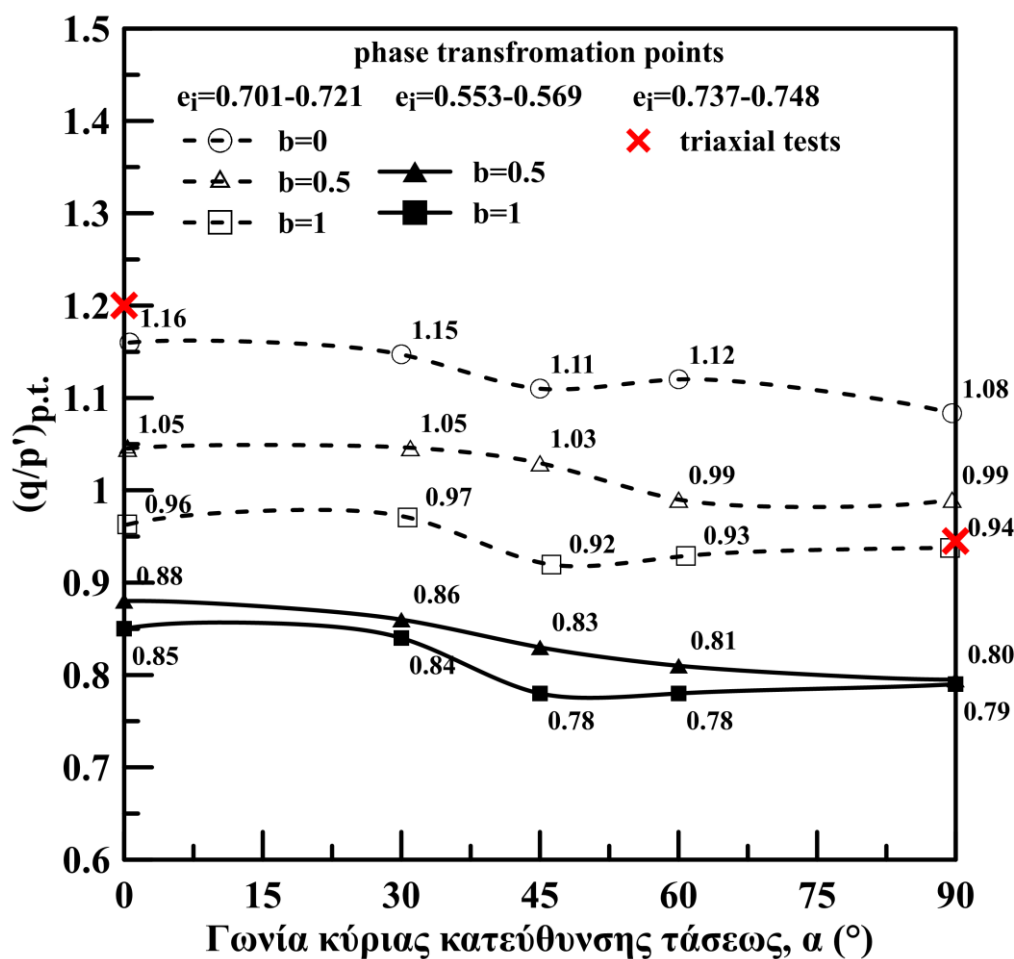
Σχήμα 6.31: Δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης και στην τριαξονική συσκευή στη χαλαρή άμμο M31: α) Ενεργές τασικές οδεύσεις στο χώρο q - p' και β) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης

Στο **Σχήμα 6.32** εξετάζεται η επίδραση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης στον λόγο τάσεων του σημείου αλλαγής φάσης $(q/p')_{p.t}$ για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) για τη σχετικά χαλαρή ($e_i= 0.701-0.721$) και τη σχετικά πυκνή ($e_i= 0.553-0.569$) άμμο M31 από δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Επιπλέον, με κόκκινα σύμβολα σημειώνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης ($\alpha=0^\circ, b=0$) και τριαξονικού εφελκυσμού ($\alpha=90^\circ, b=1$) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στην ισότροπα στερεοποιημένη ($p'_i=200$ kPa) χαλαρή άμμο M31 ($e_i=0.737-0.748$).

Για τη χαλαρή άμμο παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών στην τριαξονική συσκευή πρακτικά συμπίπτουν με τα αντίστοιχα ($\alpha=0^\circ, b=0$) της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για ορισμένη τιμή της παραμέτρου b παρατηρούμε ότι η αλλαγή της γωνίας α δεν επηρεάζει σημαντικά το λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι (Georgiannou et al., 2018). Αντίθετα, η αλλαγή της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση. Συγκεκριμένα, αύξηση της παραμέτρου b από $b=0$ σε $b=0.5$ επιφέρει μείωση του λόγου τάσεων $(q/p')_{p.t}$ κατά μέσο όρο $\sim 9\%$ και αύξηση της παραμέτρου b από $b=0$ σε $b=1$ επιφέρει μείωση του λόγου τάσεων $(q/p')_{p.t}$ κατά μέσο όρο $\sim 16\%$.

Η πυκνή άμμος σε όλες τις δοκιμές υπό $b=0$ δεν εμφάνισε καθόλου συστολή, αλλά διήλθε απευθείας στη διαστολή. Επομένως, δεν υπάρχει γραμμή αλλαγής φάσης στο διάγραμμα. Για τις υπόλοιπες δοκιμές, παρατηρούμε ότι αύξηση της παραμέτρου b και της γωνίας α επιφέρει μείωση του λόγου τάσεων $(q/p')_{p.t}$, αλλά η επίδραση είναι μικρή.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της χαλαρής και της πυκνής άμμου παρατηρούμε ότι η επίδραση της πυκνότητας είναι καθοριστική στην τιμή του λόγου τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται η σχετική πυκνότητα της άμμου από $Dr \approx 30\%$ σε 80% ο λόγος τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης μειώνεται κατά μέσο όρο 18% και 14% για $b=0.5$ και $b=1$ αντίστοιχα. Επομένως, η αύξησης της πυκνότητας «επισπεύδει» την έναρξη της διαστολικής συμπεριφοράς της άμμου M31.



Σχήμα 6.32: Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) στο λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης $(q/p')_{p.t.}$ της σχετικά χαλαρής άμμου M31

Στο **Σχήμα 6.33** εξετάζεται η επίδραση της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης στο μέγιστο λόγο τάσεων $q/p'_{(max)}$ για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) για τη σχετικά χαλαρή ($e_i=0.701-0.721$) άμμο M31 από δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Επιπλέον, με κόκκινα σύμβολα σημειώνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης ($\alpha=0^\circ, b=0$) και τριαξονικού εφελκυσμού ($\alpha=90^\circ, b=1$) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στην ισότροπα στερεοποιημένη ($p'_i=200$ kPa) χαλαρή άμμο M31 ($e_i=0.737-0.748$).

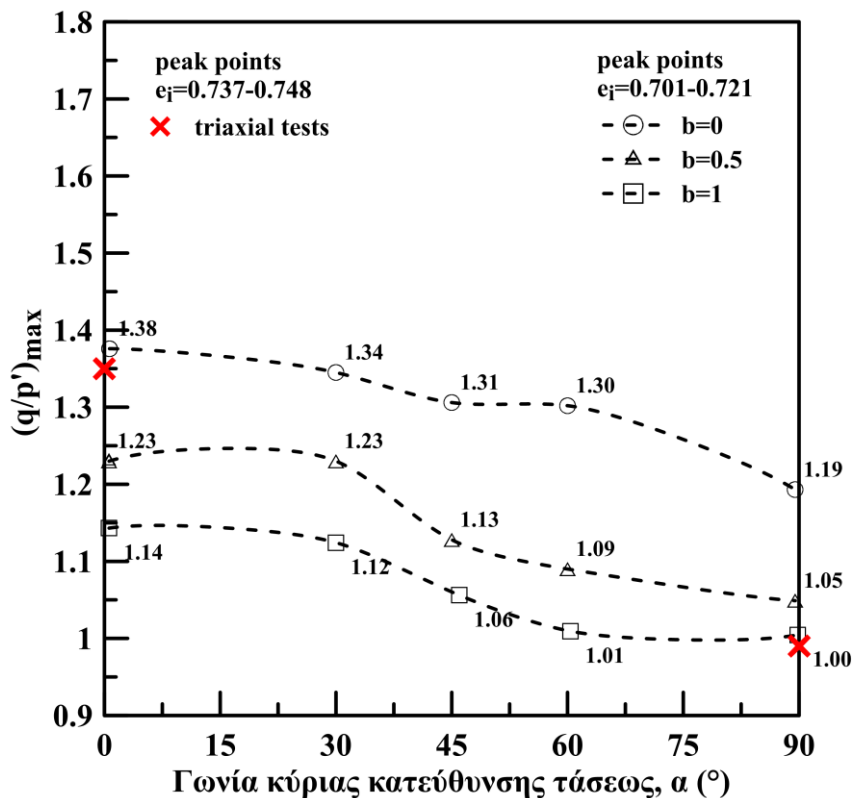
Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών στην τριαξονική συσκευή πρακτικά συμπίπτουν με τα αντίστοιχα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι 2 αυτές καταστάσεις είναι και οι ακραίες, καθώς η μέγιστη αντοχή της άμμου ($q/p'=1.38$) προκύπτει για $\alpha=0^\circ$ και $b=0$, ενώ η ελάχιστη αντοχή είναι 38% μικρότερη ($q/p'=1.00$) και προκύπτει για $\alpha=90^\circ$ και $b=1$. Όλοι οι υπόλοιποι συνδυασμοί της γωνίας α και της παραμέτρου b που εξετάστηκαν στα πλαίσια της διατριβής οδηγούν σε μέγιστο λόγο τάσεων που εμπίπτει σε αυτά τα όρια.

Γενικά παρατηρείται ότι ανεξάρτητα της παραμέτρου b η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν η διεύθυνση της μέγιστη κύρια τάσης είναι παράλληλη με τη διεύθυνση της απόθεσης ($\alpha=0^\circ$). Μικρή πτώση της αντοχής παρατηρείται για αύξηση της γωνίας α από 0° σε 30° , ενώ περεταίρω αύξηση της γωνίας α επιφέρει μεγαλύτερη πτώση της αντοχής. Η ελάχιστη αντοχή της χαλαρής άμμου εμφανίζεται όταν η γωνία $\alpha=90^\circ$. Όταν η ενδιάμεση κύρια τάση ισούται με την ελάχιστη κύρια τάση ($b=0$) η μέγιστη αντοχή μειώνεται κατά 14% για αύξηση της γωνίας α από 60° σε $\alpha=90^\circ$. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι για τις δοκιμές υπό $b=0.5$ και 1 δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά στην αντοχή της άμμου όταν $\alpha=60^\circ$ και 90° .

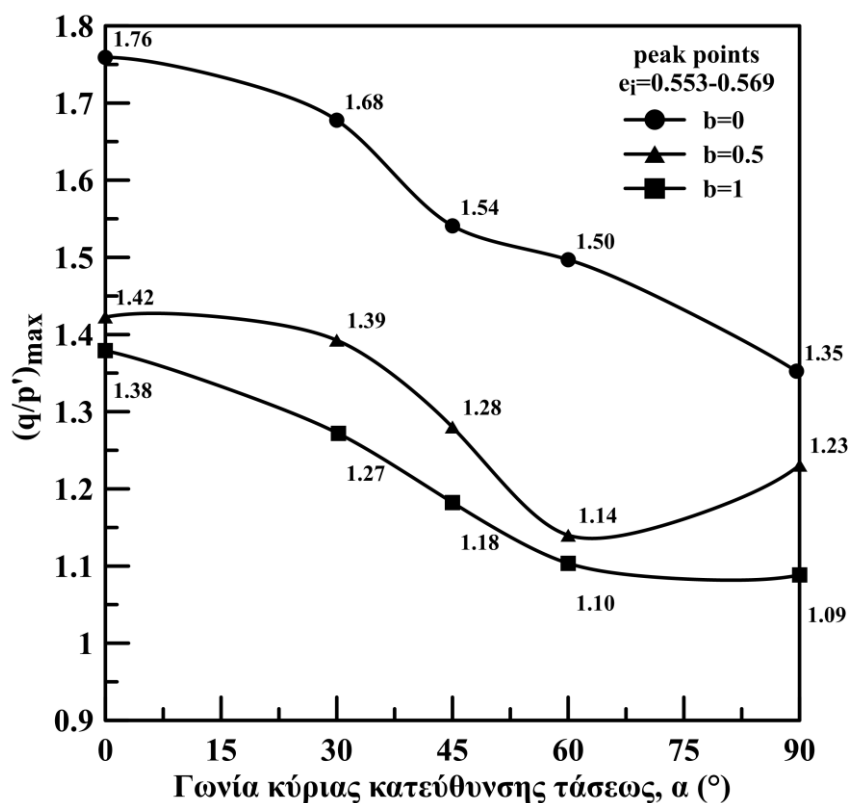
Στο **Σχήμα 6.34** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας της μέγιστης κύριας τάσης στο μέγιστο λόγο τάσεων $q/p'_{(max)}$ για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) για την πυκνή ($e_i= 0.553-0.569$) άμμο M31 από δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Όπως και στη χαλαρή άμμο, η μέγιστη αντοχή της πυκνής άμμου ($q/p'=1.76$) προκύπτει για $\alpha=0^\circ$ και $b=0$, ενώ η ελάχιστη αντοχή είναι 40% μικρότερη και προκύπτει για $\alpha=90^\circ$ και $b=1$. Όλοι οι υπόλοιποι συνδυασμοί της γωνίας α και της παραμέτρου b που εξετάστηκαν στα πλαίσια της διατριβής οδηγούν σε μέγιστη αντοχή μέσα σε αυτά τα όρια. Η επίδραση της γωνίας α φαίνεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην πυκνή σε σχέση με την χαλαρή άμμο.

Γενικά παρατηρείται ότι ανεξάρτητα της παραμέτρου b η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν η διεύθυνση της μέγιστη κύρια τάσης είναι παράλληλη με τη διεύθυνση της απόθεσης ($\alpha=0^\circ$). Πτώση της αντοχής παρατηρείται για αύξηση της γωνίας α από 0° σε 30° , ενώ περεταίρω αύξηση της γωνίας α επιφέρει μεγαλύτερη πτώση της αντοχής. Η ελάχιστη αντοχή της πυκνής άμμου εμφανίζεται όταν η γωνία $\alpha=90^\circ$ για $b=0$, όταν $\alpha=60^\circ$ για $b=0.5$ και όταν $\alpha=90^\circ$ για $b=1$. Όταν η ενδιάμεση κύρια τάση ισούται με την ελάχιστη κύρια τάση ($b=0$) η μέγιστη αντοχή μειώνεται κατά 10% για αύξηση της γωνίας α από 60° σε $\alpha=90^\circ$. Όταν $b=0.5$ η ελάχιστη αντοχή εμφανίζεται όταν $\alpha=60^\circ$ ενώ αυξάνεται πάλι για $\alpha=90^\circ$. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η φόρτιση υπό γωνία $\alpha=60^\circ$ σε πυκνό δοκίμιο άμμου οδηγεί στην ανάπτυξη εμφανούς επιπέδου διάτμησης σε μικρή παραμόρφωση ($\epsilon_q=0.6\%$) περιορίζοντας ενδεχομένως την επίτευξη της μέγιστης αντοχής. Επισημαίνεται ότι για τις δοκιμές υπό $b=1$ δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά στην αντοχή της άμμου όταν $\alpha=60^\circ$ και 90° .

Τα αποτελέσματα της πυκνής άμμου για $b=0.5$ συμφωνούν με την έρευνα των Miura, Miura, et al., (1986) που περιλάμβανε δοκιμές ακτινικής φόρτισης, ελεύθερης στράγγισης υπό $b=0.5$ σε πυκνή άμμο Toyoura. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι η μέγιστη αντοχή της άμμου δεν αλλάζει σημαντικά από $\alpha=0^\circ$ έως 30° , στη συνέχεια παρατηρείται σημαντική πτώση από $\alpha=30^\circ$ σε 45° και από $\alpha=45^\circ$ έως 90° .



Σχήμα 6.33: Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) στο μέγιστο λόγο τάσεων $(q/p')_{max}$ της σχετικά χαλαρής άμμου M31

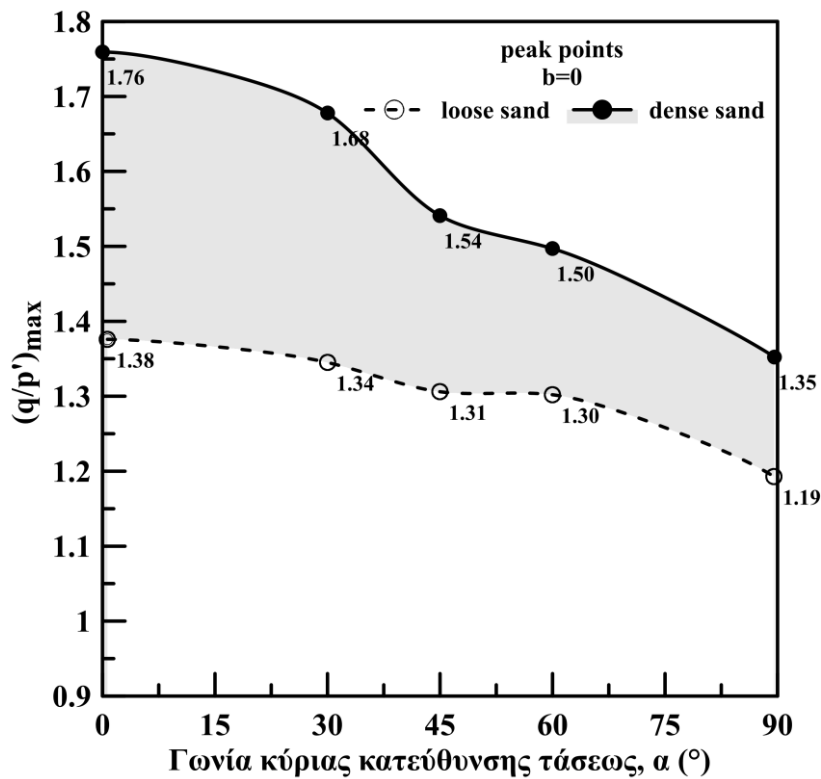


Σχήμα 6.34: Επίδραση της γωνίας α και της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) στο μέγιστο λόγο τάσεων $(q/p')_{max}$ της σχετικά πυκνής άμμου M31

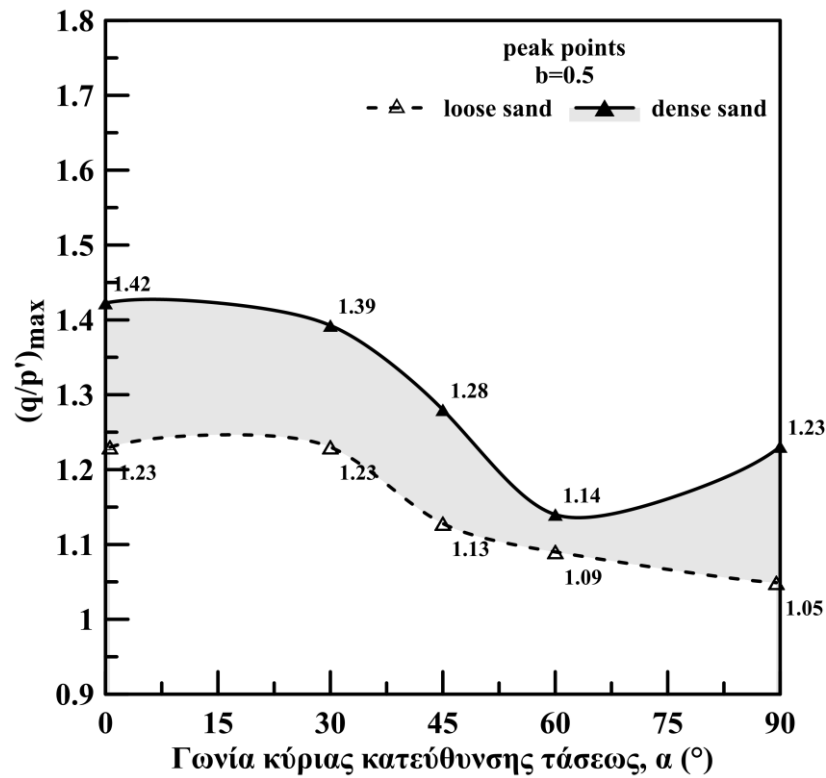
Στο **Σχήμα 6.35** εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας της άμμου στο μέγιστο λόγο τάσεων q/p'_{max} της άμμου M31 για διάφορες τιμές της γωνίας α (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b $\{(b=0$ (**Σχήμα 6.35(α)**), $b=0.5$ (**Σχήμα 6.35(β)**) και $b=1$ (**Σχήμα 6.35(γ)**)}. Επισημαίνεται ότι η διαφορά της σχετικής πυκνότητας χαλαρής και πυκνής άμμου είναι περίπου 40%. Όπως ήταν αναμενόμενο για κάθε συνδυασμό της γωνία α και της παραμέτρου b που εξετάστηκε στις δοκιμές της διατριβής, προκύπτει ότι η αντοχή της πυκνής άμμου είναι μεγαλύτερη από αυτή της χαλαρής άμμου. Ωστόσο, το ποσοστό βελτίωσης της αντοχής δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων α και b .

Για τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης όπου $b=0$ παρατηρούμε ότι η αντοχή της πυκνής άμμου είναι (12-22 %) μεγαλύτερη από τη χαλαρή άμμο M31 ενώ για $b=0.5$ και $b=1$ το ποσοστό βελτίωσης της αντοχής μειώνεται. Επιπρόσθετα για κάθε τιμή της παραμέτρου b η βελτίωση της αντοχής μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία α . Σημειώνεται ότι η μέγιστη βελτίωση της αντοχής της πυκνής άμμου (22%) εντοπίζεται όταν $b=0$ και $\alpha=0^\circ$, ενώ η ελάχιστη βελτίωση (8%) όταν $b=1$ και $\alpha=90^\circ$. Εξαιρείται η δοκιμή υπό $\alpha=60^\circ$ και $b=0.5$ της πυκνής άμμου που εμφανίζει ελάχιστη αντοχή και πρόωρη ανάπτυξη επιπέδου αστοχίας. Συμπεραίνεται ότι όσο μειώνεται η διαστολική συμπεριφορά και αυξάνεται η συστολική λόγω των διαφορετικών συνθηκών φόρτισης η επίδραση της πυκνότητας είναι λιγότερο σημαντική.

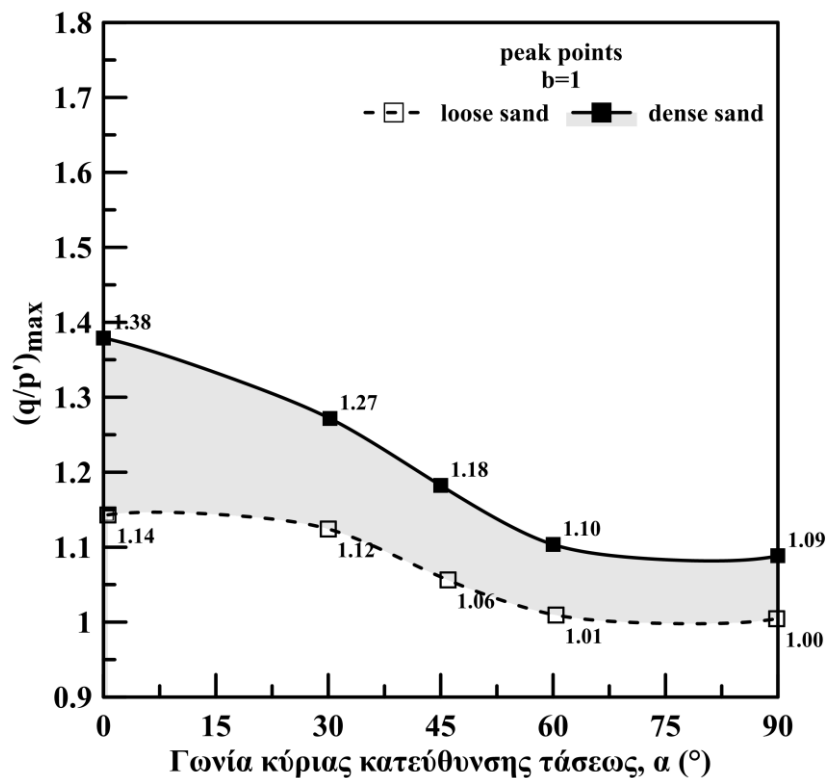
α)



β)



γ)



Σχήμα 6.35: Επίδραση της πυκνότητας της άμμου στο μέγιστο λόγο τάσεων q/p'_{max} της άμμου M31 σε δοκιμές ακτινικής φόρτισης

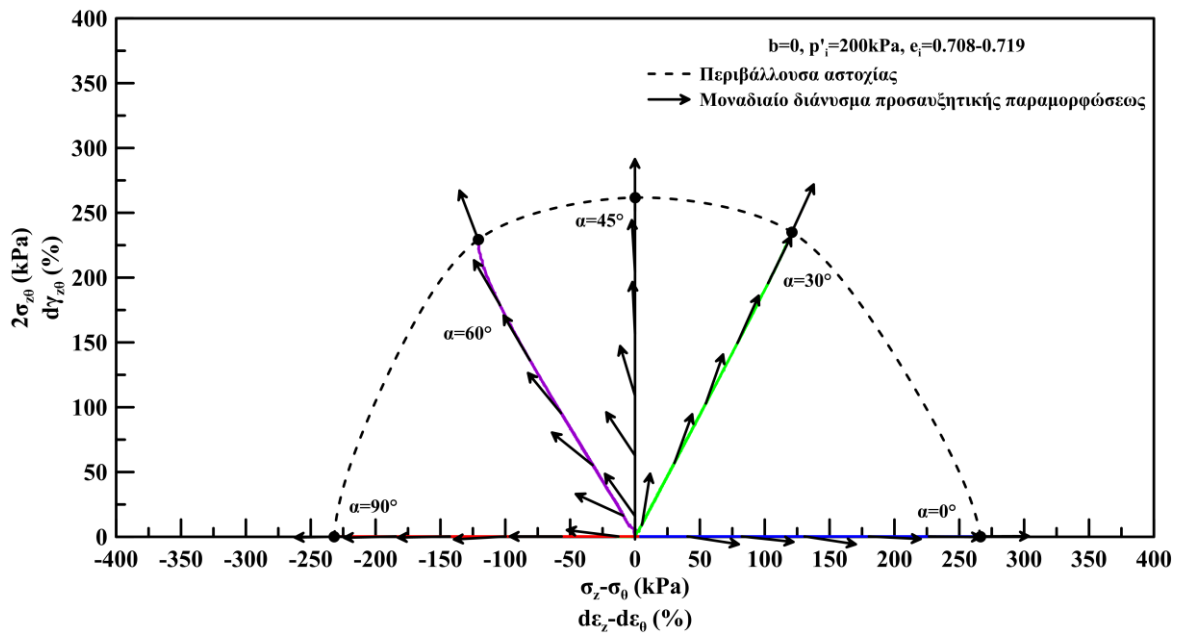
6.6 Μη συγγραμμική συμπεριφορά της άμμου M31 υπό δοκιμές ακτινικής φόρτισης

Η μη συγγραμμικότητα /μη ομοαξονικότητα (non-coaxiality) είναι σημαντικός όρος στη μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς άμμων και αναφέρεται στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης. Η παραδοχή της συγγραμμικότητας σε πολλά από τα καταστατικά προσομοιώματα της γεωτεχνικής μηχανικής που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα, μπορεί να οδηγήσει σε επισφαλή σχεδιασμό και έρχεται σε αντίθεση με έρευνες της βιβλιογραφίας που μέσω εργαστηριακών δοκιμών έχουν αποδείξει τη μη-συγγραμμική συμπεριφορά του εδάφους (Arthur et al., 1977; K. Miura, Toki, et al., 1986; Symes et al., 1988; Tong et al., 2010; L.-T. Yang et al., 2016). Το ελαστικό τμήμα της ολικής παραμόρφωσης θεωρείται αμελητέο σε σχέση με το πλαστικό τμήμα (Gutierrez et al., 1991) γι' αυτό και σε πολλές έρευνες για τον υπολογισμό της συγγραμμικότητας χρησιμοποιείται η κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής ολικής (ελαστική και πλαστική) παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016; P. K. Triantafyllos et al., 2021), όπως και στην παρούσα διατριβή.

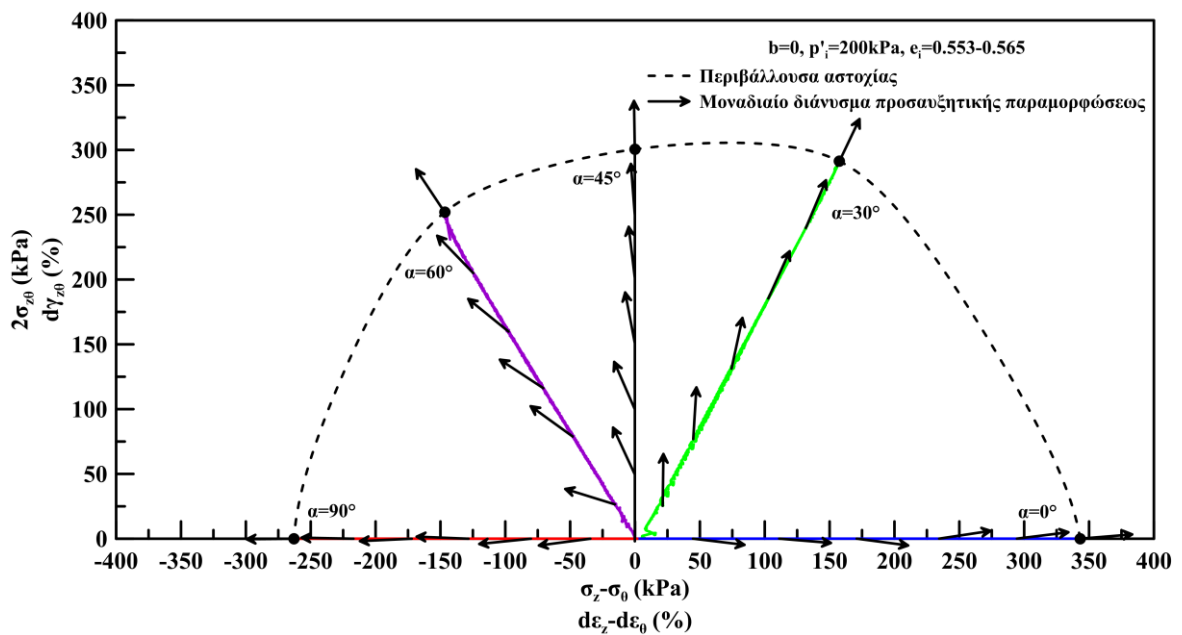
Για τη διερεύνηση της μη συγγραμμικής συμπεριφοράς της άμμου εκτελέστηκαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία, διατηρώντας παράλληλα σταθερή κύρια κατεύθυνση τάσεως (ακτινική φόρτιση) υπό διάφορες τιμές της γωνίας της μέγιστης κύριας τάσης με την κατακόρυφο ($\alpha=0, 30, 45, 60$ και 90°). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν διατηρώντας σταθερή την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) σε σχετικά χαλαρά και σε σχετικά πυκνά δοκίμια άμμου M31.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τη χαλαρή και την πυκνή άμμο παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.36**, **Σχήμα 6.37** και **Σχήμα 6.38** για τις 3 τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b=0, 0.5$ και 1 αντίστοιχα. Οι διαδρομές τάσεων και τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα της προσαυξητικής (incremental) ολικής παραμόρφωσης για την κάθε τασική όδευση απεικονίζονται στο επίπεδο X-Y που εισήγαγαν οι (Ishihara & Towhata, 1983). Ο χώρος X-Y είναι κατάλληλος για τα πειράματα στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου, καθώς στον κάθετο άξονα σημειώνεται η τάση $Y= 2\tau_{z\theta}$, που εκφράζει το στρεπτικό τμήμα της διάτμησης και στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η τάση $X= (\sigma'_{zz}-\sigma'_{\theta\theta})$, που εκφράζει τον όρο της αποκλίνουσας τάσης (q) που αντιστοιχεί σε τριαξονικές συνθήκες φόρτισης ενώ σε όρους παραμορφώσεων, ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί σε $Y= d\gamma_{z\theta} (=2d\epsilon_{z\theta})$ και ο οριζόντιος άξονας σε $X= (d\epsilon_{zz}-d\epsilon_{\theta\theta})$.

α)

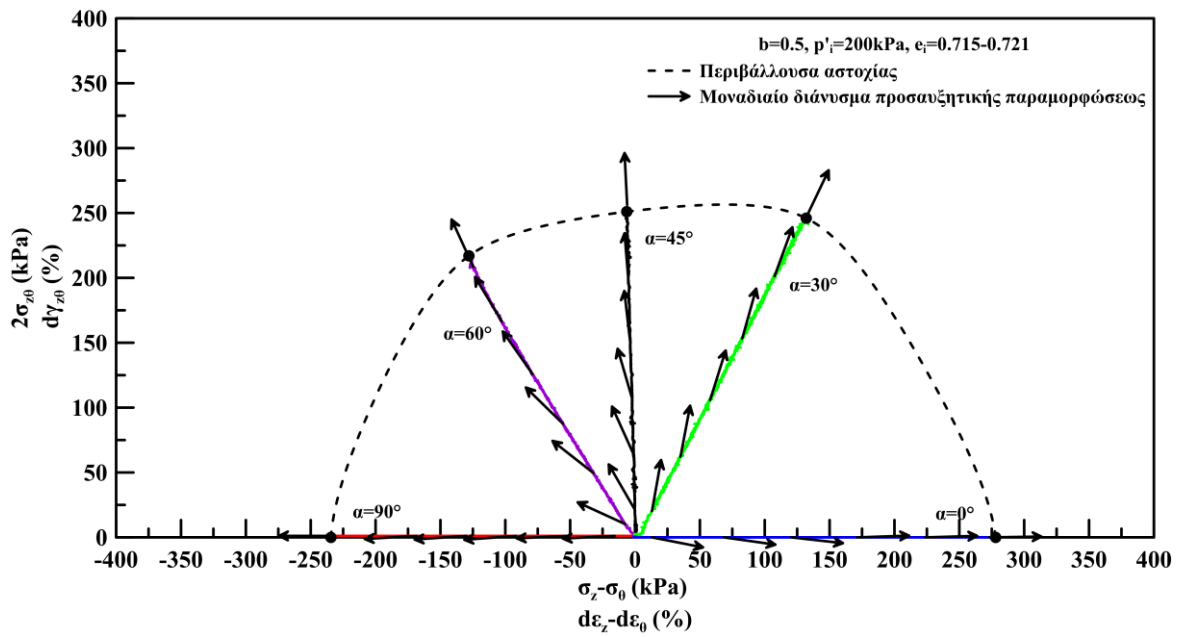


β)

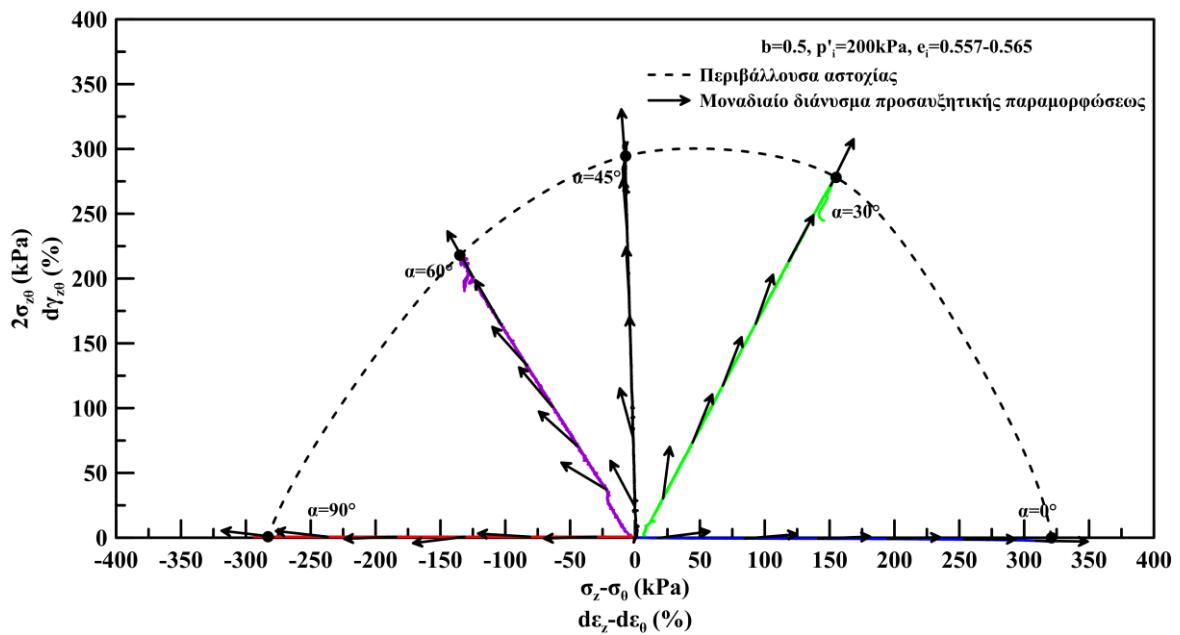


Σχήμα 6.36: Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο $Y-X$ επίπεδο. Ακτινική φόρτιση υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$ για τη α) χαλαρή και β) την πυκνή άμμο M31

α)

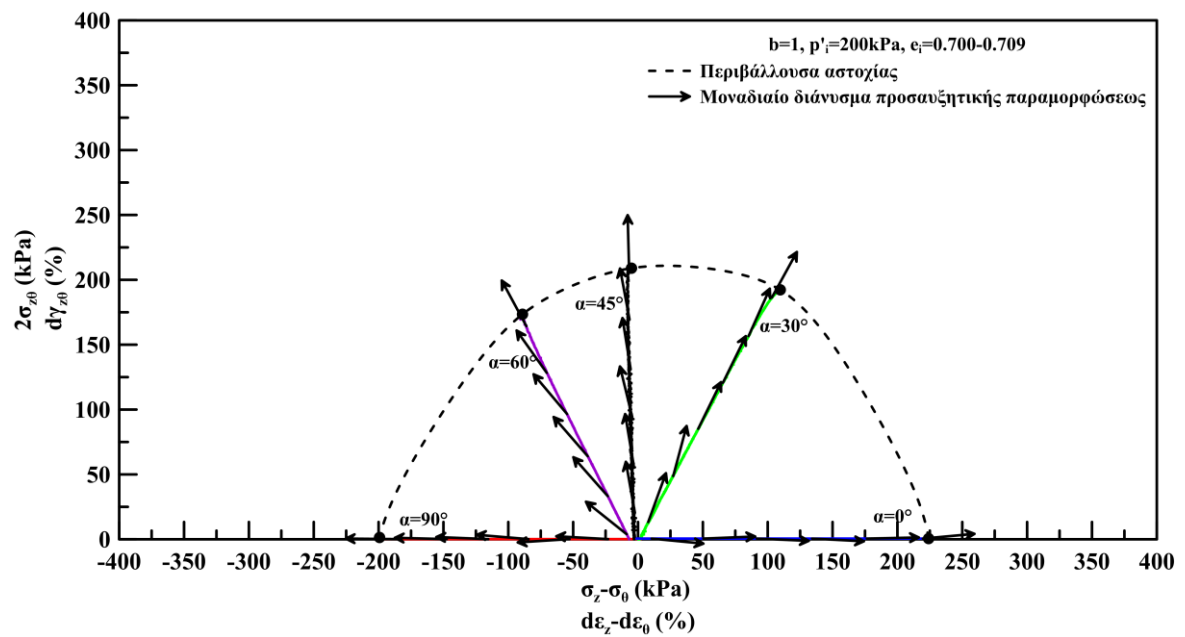


β)

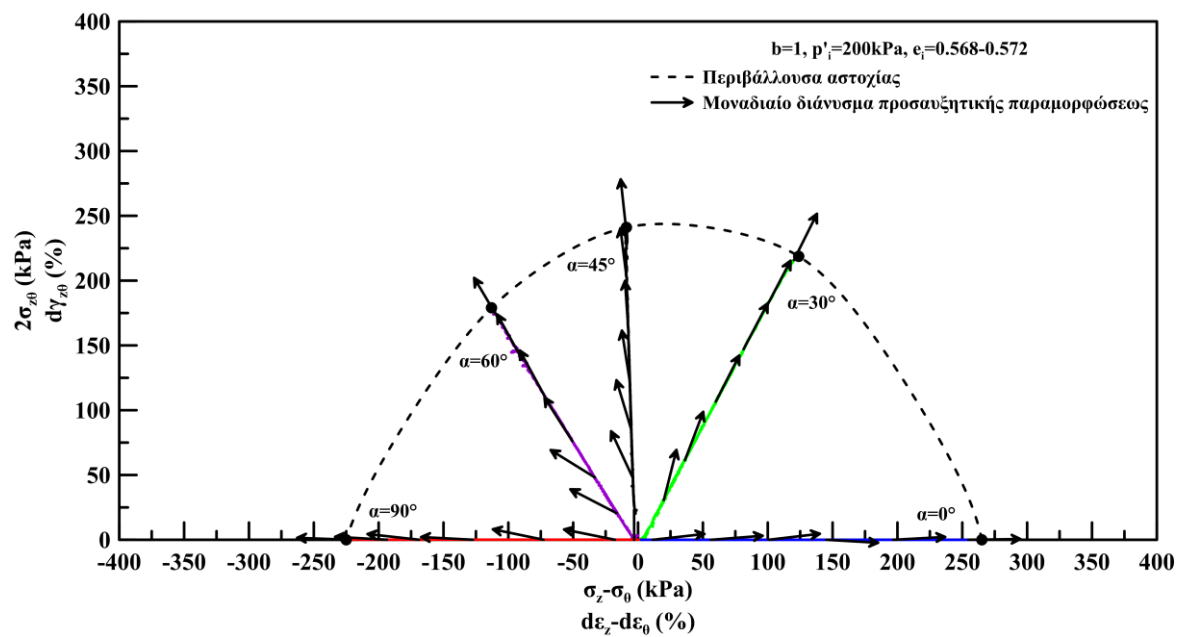


Σχήμα 6.37: Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y-X επίπεδο. Ακτινική φόρτιση υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ για τη α) χαλαρή και β) την πυκνή άμμο M31

α)



β)

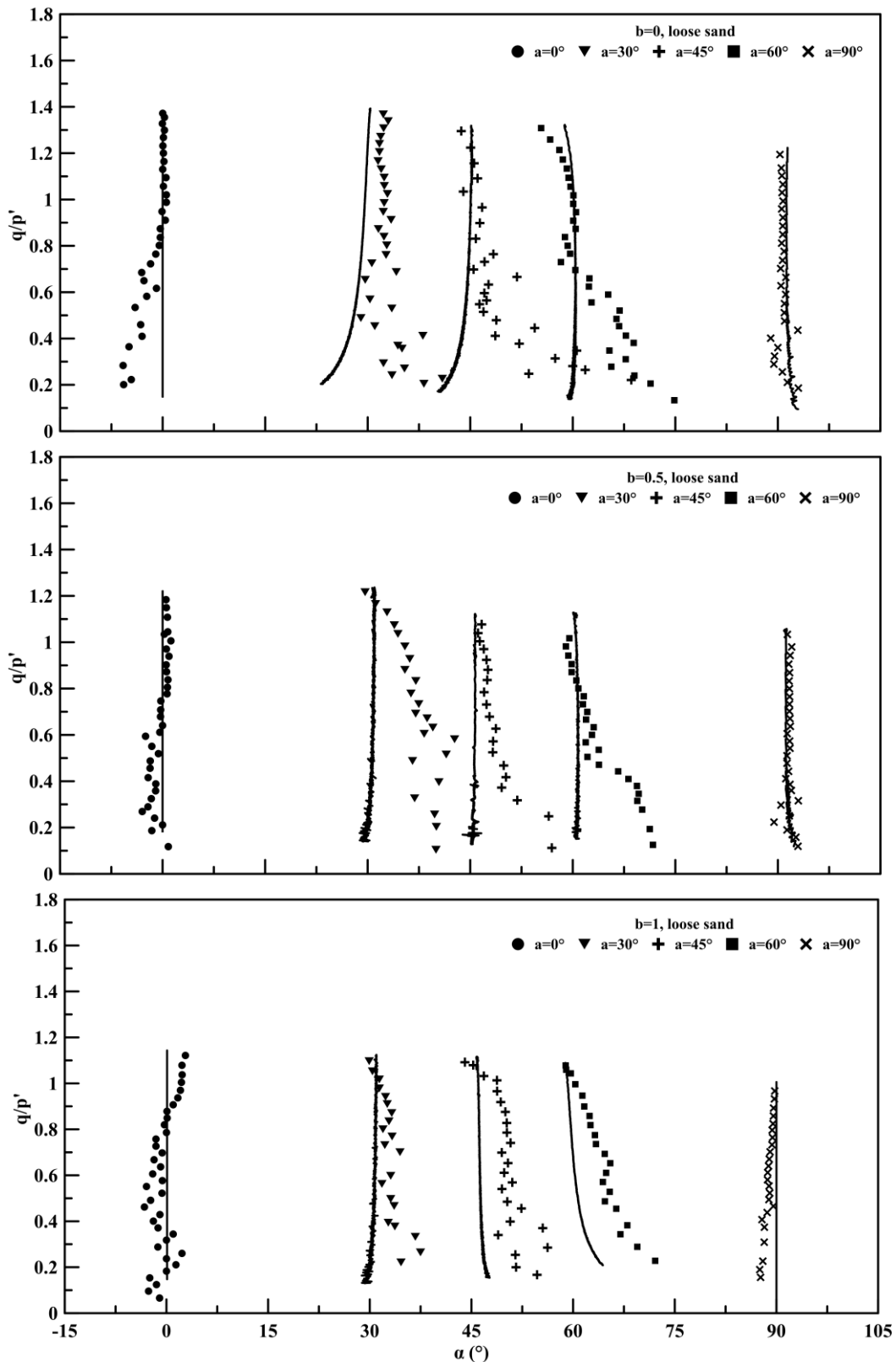


Σχήμα 6.38: Μοναδιαία διανύσματα των προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο Y-X επίπεδο. Ακτινική φόρτιση υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=1$ για τη α) χαλαρή και β) την πυκνή άμμο M31

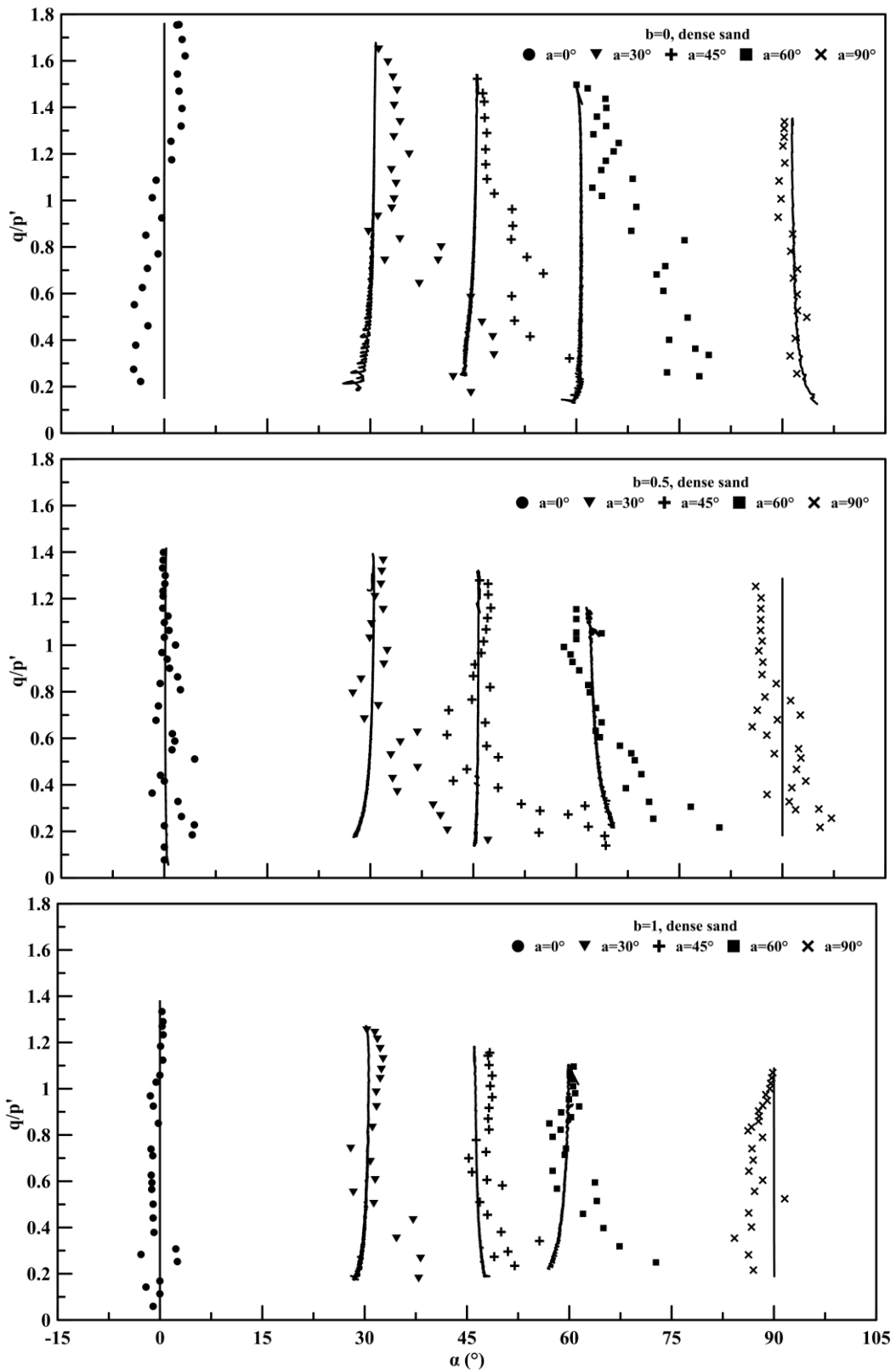
Η συμπεριφορά του εδάφους εμφανίζεται μη συγγραμική με τα μοναδιαία διανύσματα της προσαυξητικής ολικής παραμόρφωσης να αποκλίνουν από τις ακτινικές διαδρομές τάσεων κυρίως στην αρχή της φόρτισης, για χαμηλές διατμητικές τάσεις. Αντιθέτως, τα διανύσματα φαίνεται να συγκλίνουν στις ακτινικές διαδρομές πλησιάζοντας την επιφάνεια αστοχίας (failure surface). Για τις φορτίσεις όπου $\alpha=0$ και 90° τα μοναδιαία διανύσματα προσαυξητικής παραμόρφωσης είναι περίπου συγγραμικά με τη διεύθυνση τάσης. Αντίθετα, για τις άλλες τιμές της γωνίας α τα διανύσματα αποκλίνουν πιο έντονα από τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης και μάλιστα φαίνεται να έχουν καθορισμένη διεύθυνση ανεξαρτήτως πυκνότητας και τιμής της παραμέτρου b . Συγκεκριμένα, τα διανύσματα έχουν κατεύθυνση προς την ασθενέστερη σε αντοχή περιοχή στην αρχή της φόρτισης, έως ότου γίνουν ομοαξονικά με την διαδρομή τάσεων πλησιάζοντας στην αστοχία. Δηλαδή, εμφανίζονται να είναι περίπου κάθετα στην περιβάλλουσα αστοχίας. Επομένως, τα διανύσματα προσαυξητικής παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στη δοκιμή με $\alpha=30^\circ$ κατευθύνονται προς τη γωνία $\alpha=45^\circ$, τα διανύσματα της δοκιμής $\alpha=45^\circ$ προς τη γωνία $\alpha=60^\circ$ και τα διανύσματα της δοκιμής $\alpha=60^\circ$ προς τη γωνία $\alpha=90^\circ$. Επισημαίνεται πως τα διανύσματα των δοκιμών $\alpha=0^\circ$ και 90° δεν έχουν προτιμώμενη διεύθυνση καθώς η φόρτιση είναι συμμετρική με μηδενικό στρεπτικό φορτίο. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της χαλαρής και πυκνής άμμου για τις αντίστοιχες τιμές της γωνίας α και της παραμέτρου b παρατηρούμε ότι το πλαίσιο της μη συγγραμικής απόκρισης είναι το ίδιο με ελάχιστη αύξηση παρά τη μεγάλη διαφορά στην πυκνότητα των δοκιμών ($Dr_{\text{πυκνής}} - Dr_{\text{χαλαρής}} \approx 40\%$)

Πιο αναλυτικά, οι τιμές της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμορφώσεως (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνση τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τις 3 τιμές της παραμέτρου b ($b=0, 0.5$, και 1) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.39** και στο **Σχήμα 6.40** για τη χαλαρή και την πυκνή άμμο αντίστοιχα. Αρχικά παρατηρούμε ότι όταν η φόρτιση πραγματοποιείται υπό γωνία κύριας κατεύθυνσης τάσης $\alpha=0^\circ$ και 90° η γωνία προσαυξητικής παραμόρφωσης πρακτικά συμπίπτει με τη γωνία κύριας τάσης με τη μέγιστη διαφορά των γωνιών να προκύπτει $\alpha_{de}-\alpha=4^\circ$ για τη χαλαρή και την πυκνή άμμο. Στις υπόλοιπες δοκιμές ($\alpha=30, 45$, και 60°) εμφανίζεται έντονα μη συγγραμική συμπεριφορά με τη διαφορά των γωνιών προσαυξητικής παραμόρφωσης και τάσης να προκύπτει έως και $\alpha_{de}-\alpha=15^\circ$ στα αρχικά στάδια της φόρτισης ενώ εκμηδενίζεται οδεύοντας προς την αστοχία. Η αύξηση της πυκνότητας φαίνεται να αυξάνει την μη συγγραμικότητα της άμμου κατά μέσο όρο 2° . Επιπρόσθετα η επίδραση της παραμέτρου b είναι σημαντική ιδιαίτερα στην πυκνή άμμο. Συγκεκριμένα, πιο έντονα μη συγγραμική συμπεριφορά αναπτύσσεται όταν $b=0$ με τη διαφορά των γωνιών $\alpha_{de}-\alpha$ να είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες δοκιμές υπό $b=0.5$ και 1 . Επιπλέον, η απόκριση της άμμου καθυστερεί περισσότερο να γίνει ομοαξονική στις δοκιμές όπου $b=0$ αφού οι γωνίες κατεύθυνσης προσαυξητικής παραμόρφωσης και τάσης εξισώνονται σε μεγαλύτερη λόγο τάσεων q/p' . Οι δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό $b=0.5$ και 1 οδηγούν σε παραπλήσια αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6: Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτιά Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης



Σχήμα 6.39: Εξέλιξη της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνσης τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τις 3 τιμές της παραμέτρου b για τη χαλαρή άμμο M31



Σχήμα 6.40: Εξέλιξη της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνση τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τις 3 τιμές της παραμέτρου b για την πυκνή άμμο M31

6.7 Επίδραση της διεύθυνσης των αξόνων στην απόκριση της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου M31

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης, γωνία α , στην απόκριση της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου M31. Επομένως εξετάζεται αν η δομή της άμμου που οδηγεί σε ανισότροπη συμπεριφορά όπως αποδείχθηκε στις προηγούμενες ενότητες εντοπίζεται και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης ξηρής άμμου σε υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας 10% κ.β. σταθεροποιητή ώστε να επιτευχθεί συγκρίσιμη δομή με τα αντίστοιχα μη σταθεροποιημένα δοκίμια. Μετά από κατάλληλες τροποποιήσεις στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης τα δοκίμια παρασκευάζονται πάνω στη συσκευή και αφήνονται να ωριμάσουν για 50 ώρες. Το πρότυπο κοίλο δοκίμιο άμμου έχει εσωτερική ακτίνα $R_i=20\text{mm}$, εξωτερική ακτίνα $R_o=35\text{mm}$ και ύψος $H=140\text{mm}$, καταλαμβάνοντας συνολικό όγκο $V=363\text{cm}^3$.

Τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 υποβάλλονται σε κορεσμό με τιμή αντιστάσεως (back pressure) $u_o=400\text{kPa}$ ώστε να επιτευχθούν τιμές της παραμέτρου Skempton $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.93$ και στερεοποιούνται ισότροπα σε μέση αρχική ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$ στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (HC). Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας τον προσανατολισμό του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , σταθερό σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατακόρυφο, μετρούμενες με τη γωνία α . Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης η εσωτερική (p_i) και η εξωτερική (p_o) πίεση ελέγχονται ανεξάρτητα ώστε να διατηρείται σταθερή η ενεργός τάση, p' , και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, ενώ αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση, $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, μέχρι την αστοχία. Η φόρτιση επιβάλλεται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress controlled tests).

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν υπό σταθερή γωνία α ($\alpha=0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90°) και σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) σε σχετικά χαλαρά ($e_i=0.713-0.721$) δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 ελέγχοντας τις κύριες τάσεις μέσω του ρυθμού επιβολής του αξονικού (F) και στρεπτικού (T) φορτίου, αλλά και της εξωτερικής (p_o) και εσωτερικής (p_i) πίεσης στο δοκίμιο καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών ακτινικής φόρτισης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.1**.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ακτινικής φόρτισης για τιμή ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.41**. σε όρους λόγου τάσεων (q/p')- αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_q) (**Σχήμα 6.41** (α)) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.41** (β)). Παρατηρούμε ότι η αλλαγή του προσανατολισμού του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο διαστρωμάτωσης επηρεάζει σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της σταθεροποιημένης άμμου..

Η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στο κατακόρυφο επίπεδο ($\alpha=0^\circ$) όπου η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζεται πιο δύσκαμπτη και αναπτύσσει μεγαλύτερη κορυφαία αντοχή. Η συστολή είναι αμελητέα και το δοκίμιο πρακτικά διέρχεται κατευθείαν στη διαστολή. Η απόκριση της άμμου αλλάζει δραστικά όταν η φόρτιση πραγματοποιείται σε γωνία $\alpha>0^\circ$ ($\alpha=45^\circ, 60^\circ$ και 90°). Συγκεκριμένα, όταν ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο η αντοχή μειώνεται σημαντικά και η συστολή αυξάνεται. Η μικρότερη αντοχή παρατηρείται όταν $\alpha=60^\circ$ όπως και στην περίπτωση της πυκνής άμμου M31(Σχήμα 6.23).

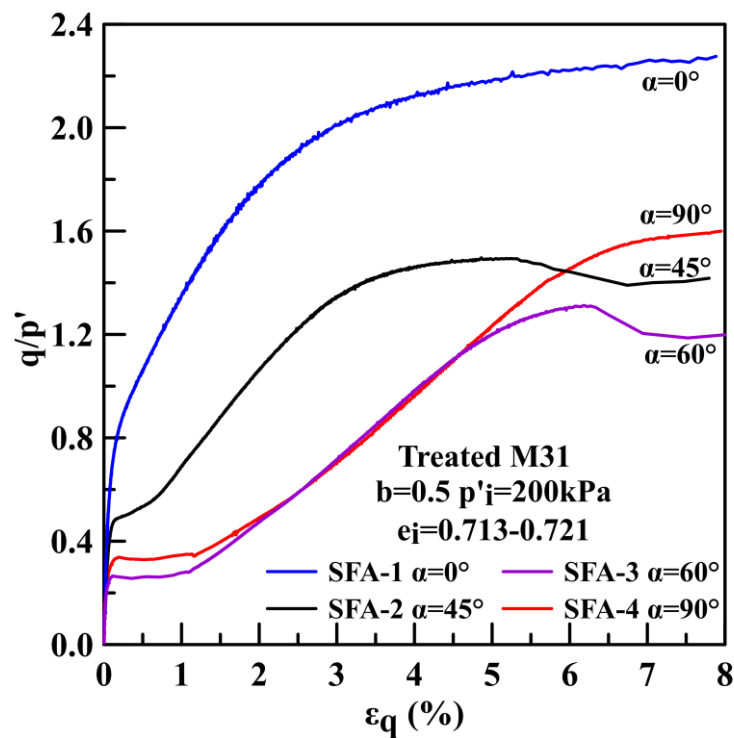
Προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 , στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη χαλαρή σταθεροποιημένη άμμο M31 για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0, 0.5$ και 1) σε συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α { ($\alpha=0^\circ$ Σχήμα 6.42(α) , και $\alpha=90^\circ$ Σχήμα 6.42(β) }. Ανεξάρτητα της διεύθυνσης της μέγιστης κύριας τάσης ως προς το κατακόρυφο επίπεδο παρατηρούμε ότι η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί σε μείωση της διατμητικής όπως στην περίπτωση της φυσικής άμμου. Ωστόσο επισημαίνεται ότι ενώ η αύξηση της παραμέτρου b από $b=0$ σε $b=0.5$ όταν $\alpha=0^\circ$ οδηγεί σε σημαντική πτώση της αντοχής ωστόσο η περαιτέρω αύξηση από $b=0.5$ σε $b=1$ όταν $\alpha=90^\circ$ δεν επηρεάζει αισθητά την απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου. Σχετικά με την εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης παρατηρούμε ότι για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης αυξάνει τη συστολή και μειώνει τη διαστολικότητα.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών ακτινικής φόρτισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης

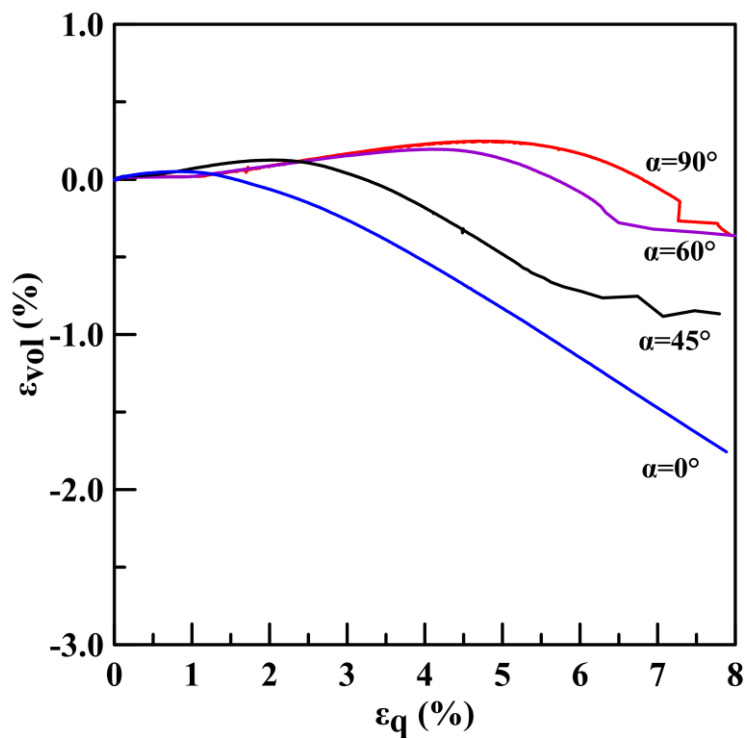
Πείραμα	e_i	p'_i (kPa)	α ($^\circ$)	b
SFA-1	0.713	200	0	0.5
SFA-2	0.716	200	45	0.5
SFA-3	0.720	200	60	0.5
SFA-4	0.721	200	90	0.5
SFA-5	0.710	200	0	0
SFA-6	0.720	200	90	1

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,

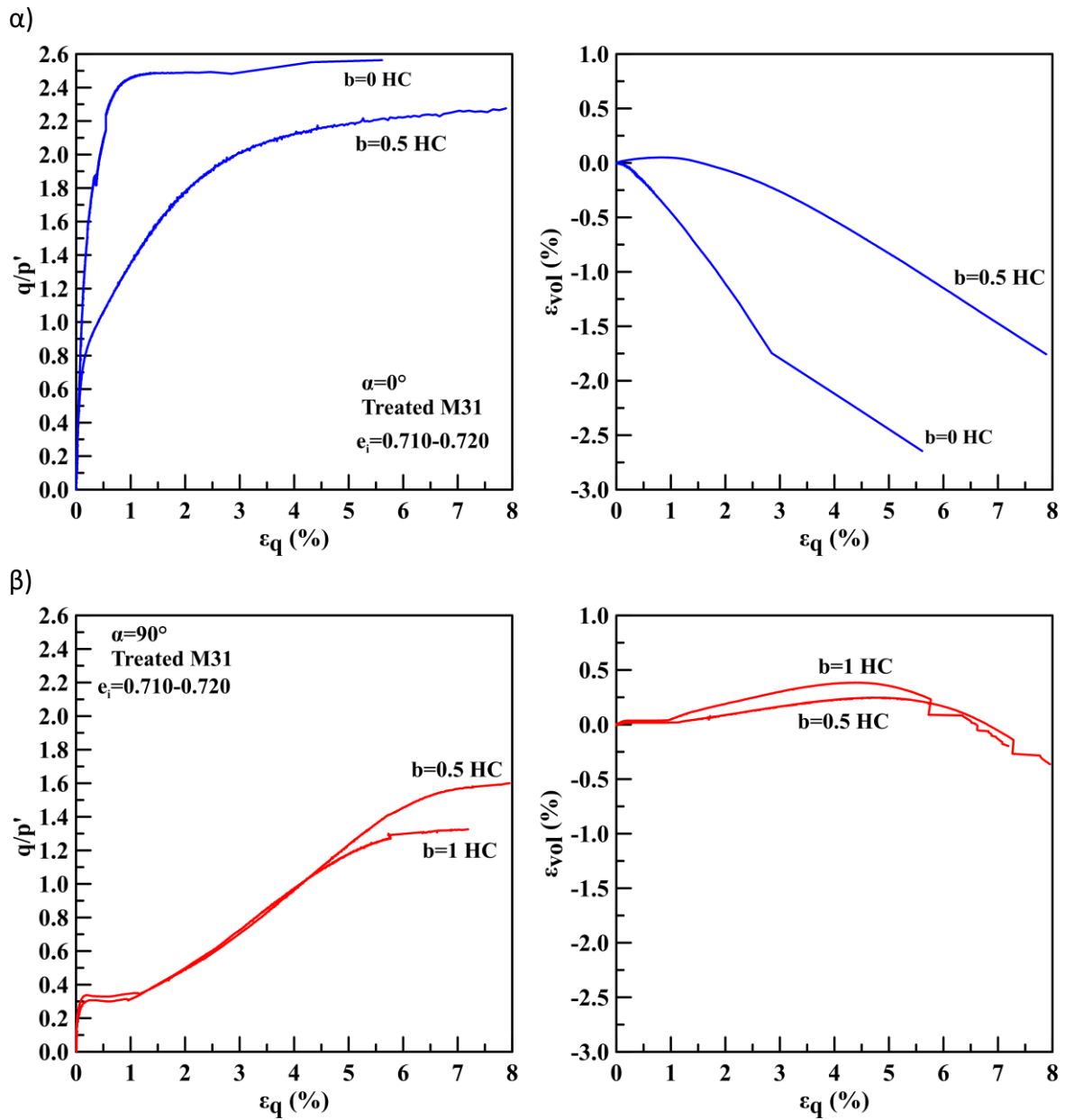
α)



β)



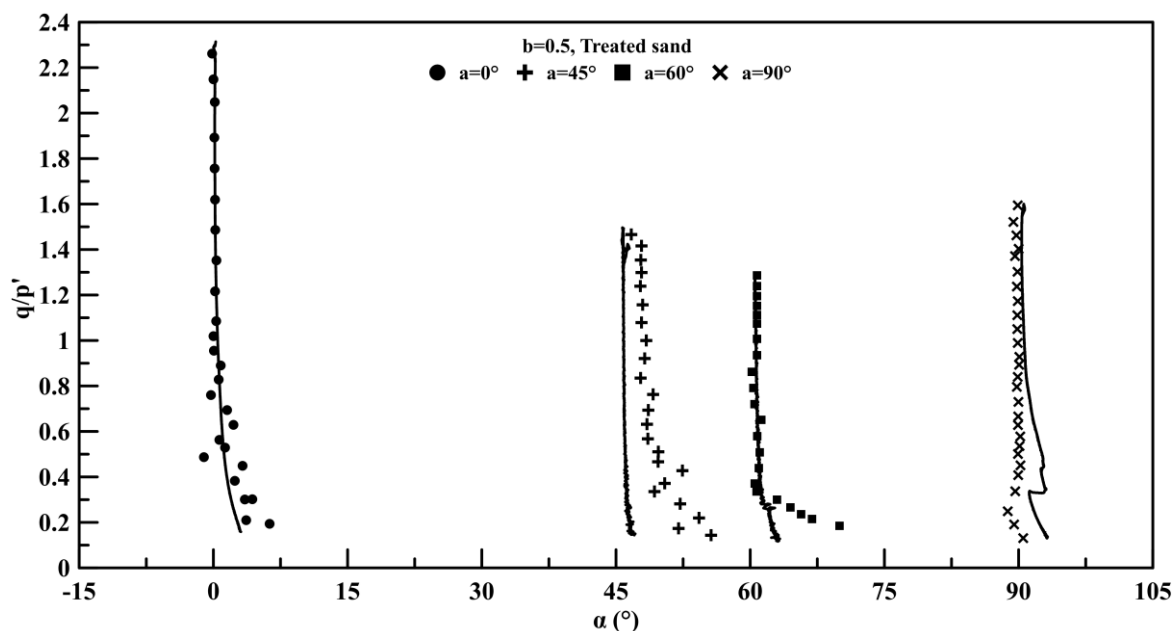
Σχήμα 6.41: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης



Σχήμα 6.42: Επίδραση της παραμέτρου b στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου M31. Μονοτονική φόρτιση υπό γωνία α) $\alpha=0^\circ$ και β) $\alpha=90^\circ$

Για τη διερεύνηση της ομοαξονικότητας της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτιά άμμου M31 εκτελέστηκαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση q μέχρι την αστοχία, διατηρώντας παράλληλα σταθερή κύρια κατεύθυνση τάσεως (ακτινική φόρτιση), για διάφορες τιμές της γωνίας της μέγιστης κύριας τάσης με την κατακόρυφο ($\alpha=0, 45, 60$ και 90°). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν διατηρώντας σταθερή τη μέση ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ σε σχετικά χαλαρά ($e_i=0.713-0.721$) σταθεροποιημένα δοκίμια.

Οι τιμές της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνση τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τη σταθεροποιημένη άμμο παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.43**. Όπως και στη φυσική άμμο, όταν η φόρτιση πραγματοποιείται υπό γωνία κύριας κατεύθυνσης τάσης $\alpha=0^\circ$ και 90° η γωνία προσαυξητικής παραμόρφωσης πρακτικά συμπίπτει με τη γωνία κύριας τάσης με τη μέγιστη διαφορά των γωνιών να προκύπτει $\alpha_{de}-\alpha=4^\circ$ για τη χαλαρή και την πυκνή άμμο. Στις υπόλοιπες δοκιμές ($\alpha=45, \text{ και } 60^\circ$) εμφανίζεται μη συγγραμική συμπεριφορά με τη διαφορά των γωνιών προσαυξητικής παραμόρφωσης και τάσης να προκύπτει έως και $\alpha_{de}-\alpha=10^\circ$ στα αρχικά στάδια της φόρτισης, αλλά εκμηδενίζεται γρήγορα για λόγο τάσεων $q/p'>0.4$. Συμπερασματικά, η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει πρακτικά ομοαξονική συμπεριφορά σε αντίθεση με τη χαλαρή (**Σχήμα 6.39**) και την πυκνή (**Σχήμα 6.40**) άμμο M31 που εμφανίζει σημαντική μη συγγραμική συμπεριφορά.

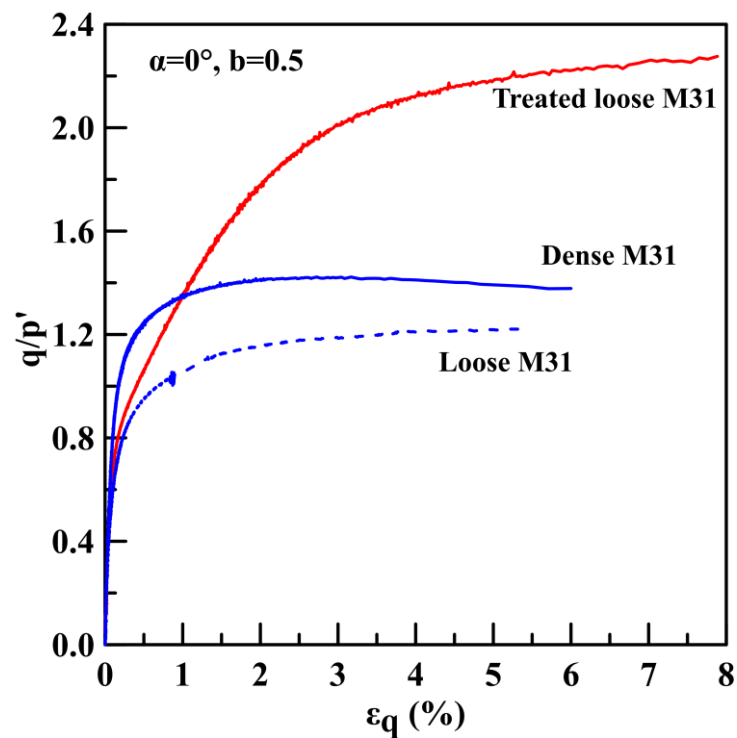


Σχήμα 6.43: Εξέλιξη της γωνίας κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμόρφωσης (α_{de}) και της γωνίας της κύριας κατεύθυνση τάσεως (α) σε σχέση με το λόγο τάσεων q/p' για τη σταθεροποιημένη άμμο M31

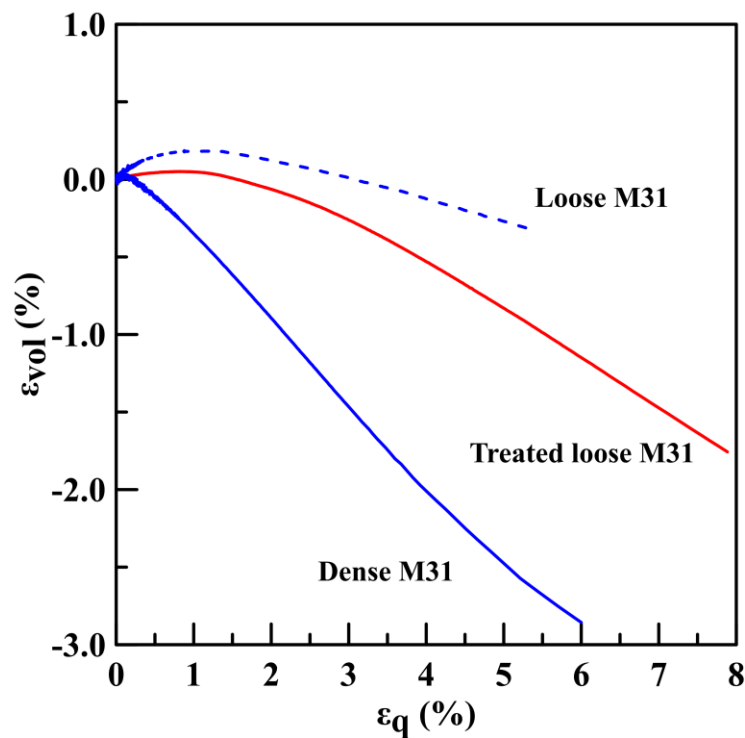
Για να εξεταστεί η επίδραση της προσθήκης κολλοειδούς πυριτίας στην ανισότροπη συμπεριφορά της άμμου M31, συγκρίνονται τα αποτελέσματα ακτινικών φορτίσεων της χαλαρής σταθεροποιημένης άμμου (κόκκινη γραμμή) με αυτά της χαλαρής (μπλε διακεκομμένη γραμμή) και της πυκνής (μπλε συνεχής γραμμή) άμμου M31 για φόρτιση υπό γωνία $\alpha=0^\circ$ (Σχήμα 6.44), $\alpha=45^\circ$ (Σχήμα 6.45), $\alpha=60^\circ$ (Σχήμα 6.46) και $\alpha=90^\circ$ (Σχήμα 6.47). Γενικά, παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα της γωνίας α η μέγιστη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου είναι μεγαλύτερη και από αυτή της πυκνής άμμου M31. Επιπρόσθετα, η προσθήκη σταθεροποιητή μειώνει τη συστολή και αυξάνει τη διαστολικότητα με τις καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης άμμου να τοποθετούνται ανάμεσα σε αυτές της πυκνής και της χαλαρής άμμου ανεξάρτητα της διεύθυνσης της κύριας τάσης. Ωστόσο, η αύξηση της γωνίας α επιφέρει μείωση στο ποσοστό βελτίωσης της μεθόδου της σταθεροποίησης. Σε συνθήκες διάτμησης και εφελκυσμού ($\alpha=45, 60$ και 90°) η διατμητική αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου εμφανίζει μια έντονη διαρροή (yield stress) σε συγκεκριμένο λόγο τάσεων και αναπτύσσεται συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης υπό σταθερό όγκο. Επομένως, δεν έχουμε συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο με την αύξηση της γωνίας α , αφού το σημείο διαρροής εμφανίζεται σε μικρότερο λόγο τάσεων (q/p') και αναπτύσσονται μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις όταν $\alpha=60^\circ$ και 90° σε σχέση με την περίπτωση όπου $\alpha=45^\circ$. Επισημαίνεται ότι ο λόγος τάσεων όπου συμβαίνει η διαρροή είναι μικρότερος από το λόγο τάσεων της αστοχίας και του σημείου αλλαγής φάσης.

Το φαινόμενο της διαρροής, δηλαδή η συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων υπό σταθερό όγκο της σταθεροποιημένης άμμου παρατηρήθηκε στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου και όχι στις δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή (Κεφάλαιο 4). Επομένως χρειάζεται να μελετηθεί περαιτέρω η επίδραση των συνθηκών φόρτισης στη συμπεριφορά της κολλοειδούς πυριτίας.

α)

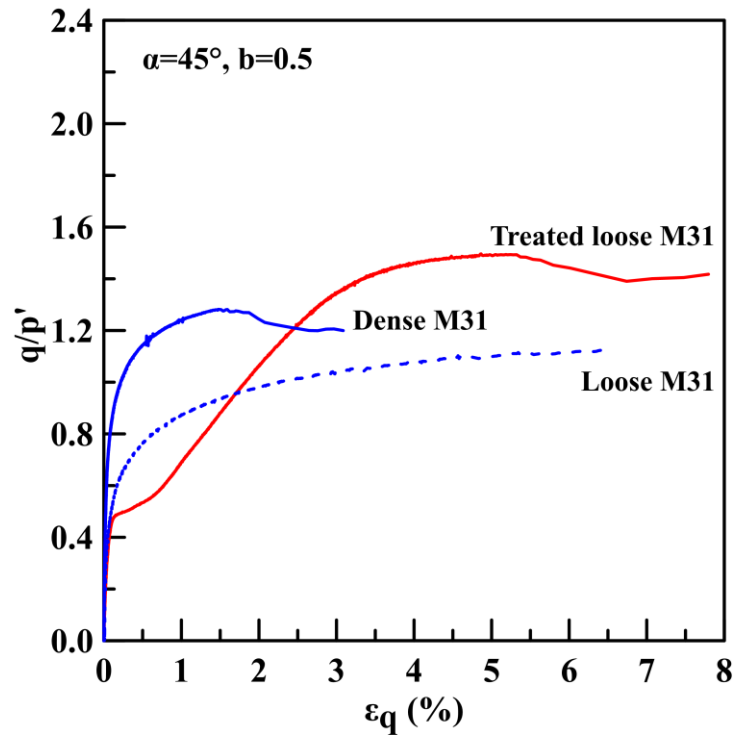


β)

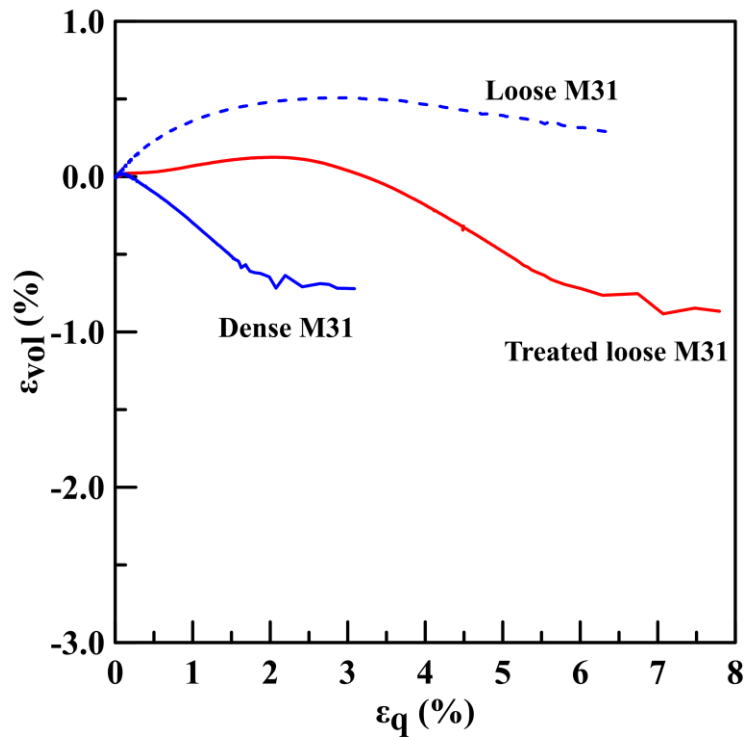


Σχήμα 6.44: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=0^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

α)

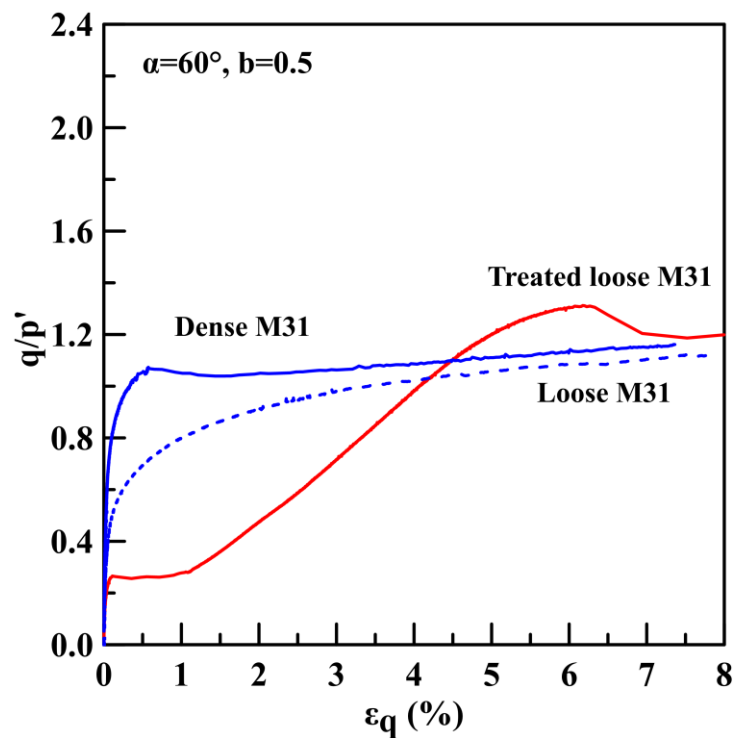


β)

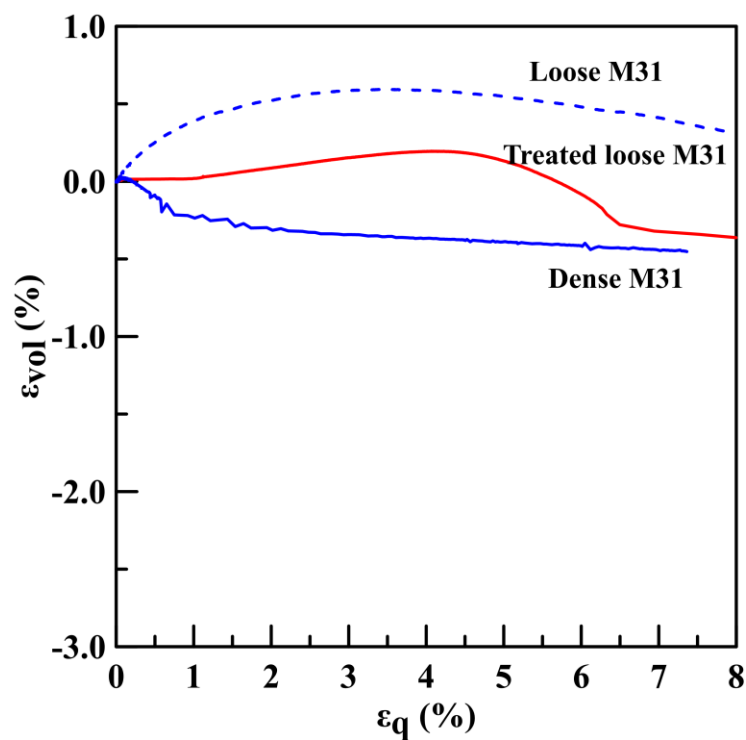


Σχήμα 6.45: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=45^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

α)

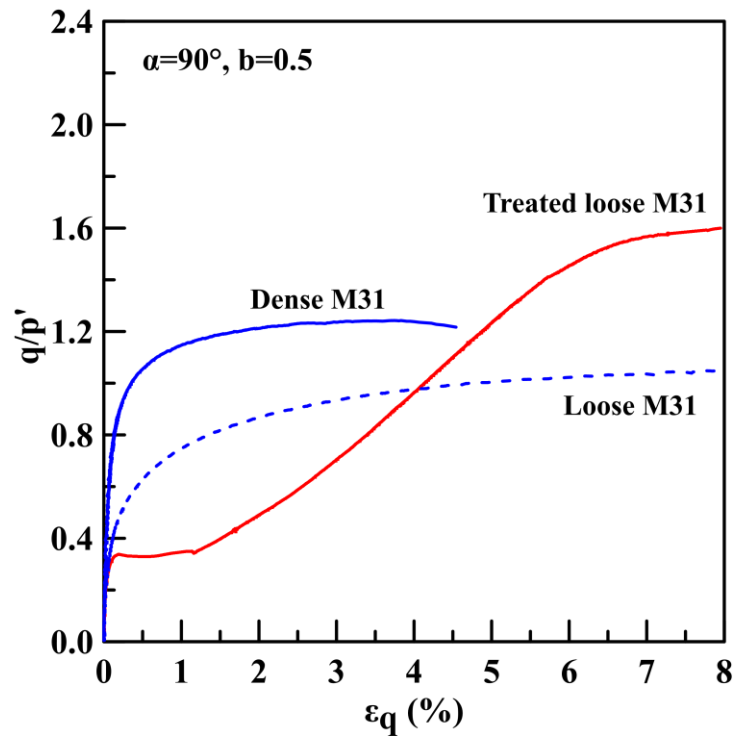


β)

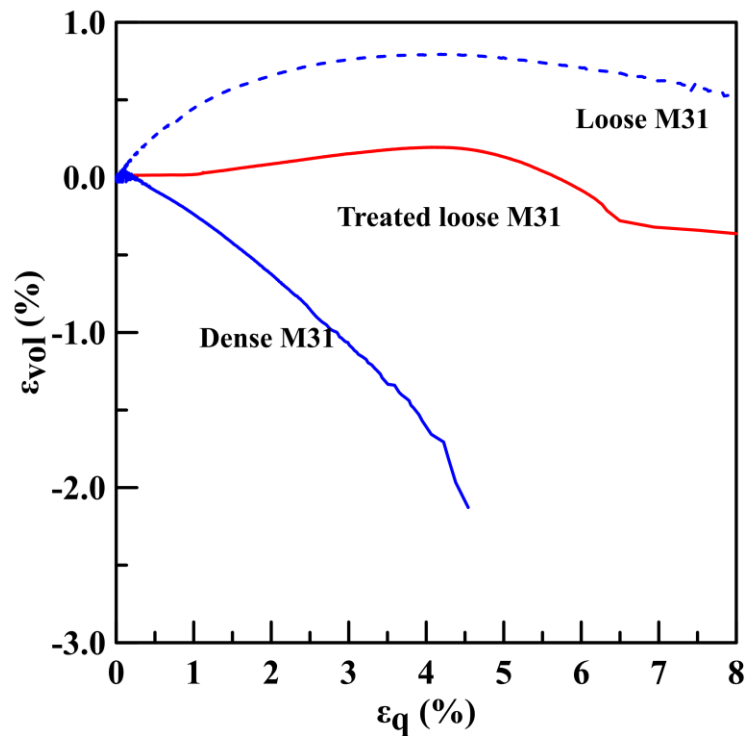


Σχήμα 6.46: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=60^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

α)



β)



Σχήμα 6.47: Αποτελέσματα ακτινικής φόρτισης υπό γωνία $\alpha=90^\circ$ στη χαλαρή, στην πυκνή και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 με παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$. α) Καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και β) Καμπύλες ογκομετρικής- αποκλίνουσας παραμόρφωσης

Κεφάλαιο 6: Φόρτιση Φυσικής και Σταθεροποιημένης με Κολλοειδή Πυριτία Άμμου M31 Υπό Σταθερή Γωνία α και Παράμετρο b στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης

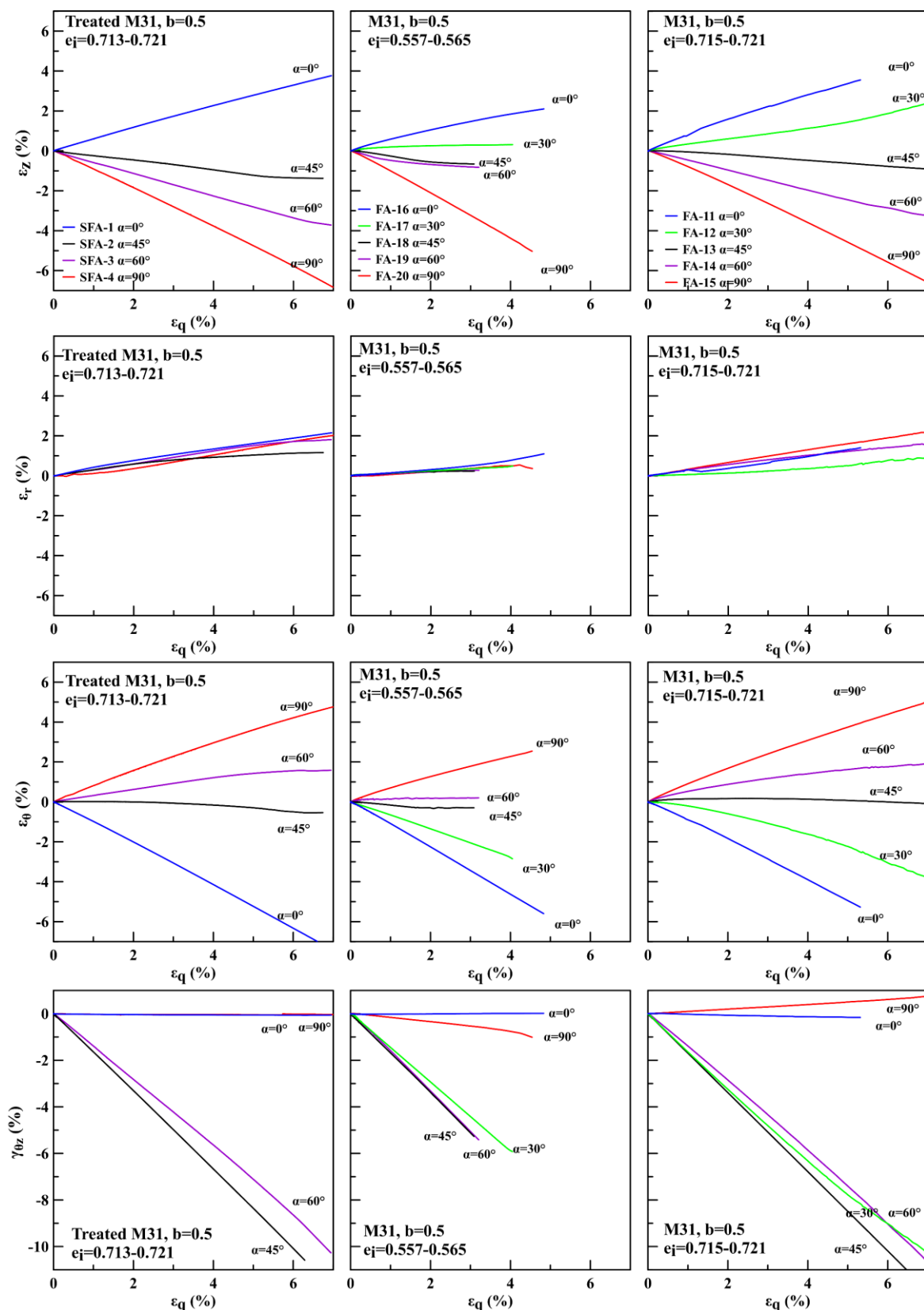
Στο **Σχήμα 6.48** εξετάζεται η επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής (ϵ_z), ακτινικής (ϵ_r), εφαπτομενικής (ϵ_θ) και διατμητικής ($\gamma_{\theta z}$) παραμόρφωσης της σταθεροποιημένης και της φυσικής πυκνής και χαλαρής άμμου M31. Παρατηρούμε ότι οι επιμέρους παραμορφώσεις της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με την αποκλίνουσα παραμόρφωση μεταβάλλονται παρόμοια με τη φυσική άμμο M31. Συγκεκριμένα, η μέγιστη θλιπτική αξονική παραμόρφωση εντοπίζεται για τιμή της γωνίας $\alpha=0^\circ$, ενώ μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α και πρακτικά μηδενίζεται όταν $\alpha=45^\circ$. Για $\alpha>45^\circ$ αναπτύσσεται εφελκυστική αξονική παραμόρφωση που μεγιστοποιείται κατά απόλυτη τιμή όταν $\alpha=90^\circ$.

Η μέγιστη εφαπτομενική παραμόρφωση εντοπίζεται για τιμή της γωνίας $\alpha=90^\circ$, ενώ μειώνεται με τη μείωση της γωνίας α και πρακτικά μηδενίζεται όταν $\alpha=45^\circ$. Για $\alpha<45^\circ$ αναπτύσσεται αρνητική εφαπτομενική παραμόρφωση που μεγιστοποιείται κατ' απόλυτη τιμή όταν $\alpha=0^\circ$. Γενικά, η αύξηση της γωνίας α οδηγεί σε αλγεβρική αύξηση της περιμετρικής παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα οδηγεί σε αλγεβρική μείωση της αξονικής παραμόρφωσης.

Σε αντίθεση με την αξονική και περιμετρική παραμόρφωση η ακτινική παραμόρφωση δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα της κύριας τάσης (γωνία α). Επισημαίνεται ότι για $b=0.5$ η ακτινική παραμόρφωση της πυκνής άμμου είναι μικρή για κάθε τιμή της γωνία α καθώς αυξάνεται μόνο σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις οδεύοντας προς την αστοχία.

Η ανάπτυξη της διατμητικής παραμόρφωσης επηρεάζεται από τη διεύθυνση του άξονα της κύριας τάσης ως προς την κατακόρυφο και συγκεκριμένα από το στρεπτικό φορτίο που επιβάλλεται. Επομένως, για γωνία $\alpha=0^\circ$ και 90° , όπου δεν επιβάλλεται στρεπτικό φορτίο η διατμητική παραμόρφωση είναι $\gamma_{\theta z}=0\%$. Όταν $\alpha=45^\circ$ όπου επιβάλλεται το μέγιστο στρεπτικό φορτίο αναπτύσσεται και η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

Γενικά, η σταθεροποιημένη χαλαρή άμμος αναπτύσσει τιμές σε κάθε επιμέρους παραμόρφωση συγκρίσιμες με αυτές της χαλαρής άμμου M31. Αντίθετα, η πυκνή άμμος αναπτύσσει μικρότερες κατ' απόλυτη τιμή των επιμέρους παραμορφώσεων για κάθε τιμή της γωνίας α .



Σχήμα 6.48: Επίδραση της γωνίας α στην ανάπτυξη της αξονικής, ακτινικής, εφαπτομενικής και διατμητικής παραμόρφωσης στη σταθεροποιημένη, και στη φυσική πυκνή και χαλαρή άμμο M31 υπό ακτινική φόρτιση με $b=0.5$

6.7.1 Επίδραση των συνθηκών φόρτισης στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου M31

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η επίδραση των συνθηκών φόρτισης και στράγγισης στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης και φυσικής άμμου M31. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που παρουσιάζονται σε αυτή η την ενότητα συνοψίζονται στον **Πίνακα 6.3**.

Στο **Σχήμα 6.49**, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού, ελεύθερης στράγγισης υπό συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης (TRIAX strain controlled) (διακεκομμένες γραμμές), των δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (TRIAX stress controlled) (συνεχείς γραμμές) και των δοκιμών στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (HC) υπό γωνία $\alpha=90^\circ$ και $b=1$ (συνεχείς γραμμές) για τα σταθεροποιημένα δοκίμια (κόκκινο χρώμα) και για τα δοκίμια άμμου M31 (μπλε χρώμα). Στην περίπτωση της φυσικής άμμου ο τρόπος επιβολής του εφελκυσμού δεν φαίνεται να επηρεάζει την απόκρισή της υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Επισημαίνεται ότι η χαμηλότερη αντοχή και η πιο συστολική συμπεριφορά της άμμου στην περίπτωση της φόρτισης μέσω επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (TRIAX strain controlled) οφείλεται στην μικρότερη πυκνότητα του δοκιμίου. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια παρατηρούμε ότι όταν η επιβολή του εφελκυσμού γίνεται μέσω ελέγχου της τάσης είτε στην τριαξονική συσκευή (SED-2) είτε στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (SFA-6) σε συγκεκριμένο λόγο τάσεων q/p' αναπτύσσεται ακαριαία σημαντική πλαστική παραμόρφωση υπό σταθερό όγκο ενώ στη συνέχεια ανακτάται η «σταθερή» συμπεριφορά, η αντοχή αυξάνεται, ο όγκος μεταβάλλεται και τελικά οι καμπύλες τους συγκλίνουν με αυτή του σταθεροποιημένου δοκιμίου στο οποίο γίνεται φόρτωση επιβάλλοντας παραμόρφωση (SED-1). Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι το φαινόμενο «ασταθούς» συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων δοκιμών που παρατηρήθηκε στην προηγούμενη ενότητα δεν οφείλεται στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης, αλλά στη φόρτιση μέσω επιβαλλόμενης τάσης.

Επειδή κατά τη διάρκεια της ασταθούς συμπεριφοράς, ο όγκος δεν αλλάζει, συμπεραίνεται ότι οι συνθήκες ελεύθερης στράγγισης δεν επιτυγχάνονται παρά τον αργό ρυθμό επιβολής τάσης (3kPa/min) που εφαρμόστηκε και στις 2 συσκευές. Επομένως, χρειάζεται να μελετηθεί η επιρροή του τρόπου επιβολής φόρτισης και υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στο **Σχήμα 6.50** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού, εμποδιζόμενης στράγγισης στη σταθεροποιημένη, χαλαρή άμμο M31 υπό συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης (TRIAX strain controlled) (διακεκομμένες γραμμές) και συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (TRIAX stress controlled) (συνεχείς γραμμές). Διαφορά στην απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμών ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης παρατηρείται και όταν η στράγγιση είναι εμποδιζόμενη. Συγκεκριμένα, σε περίπου κοινό λόγο τάσεων με την περίπτωση της ελεύθερης στράγγισης ($q/p'=0.5$) όπως σημειώνεται με τον μαύρο κύκλο στα διαγράμματα παρατηρείται ασταθής συμπεριφορά όταν επικρατούν συνθήκες επιβαλλόμενης τάσης. Πλαστική παραμόρφωση συσσωρεύεται υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση σχεδόν

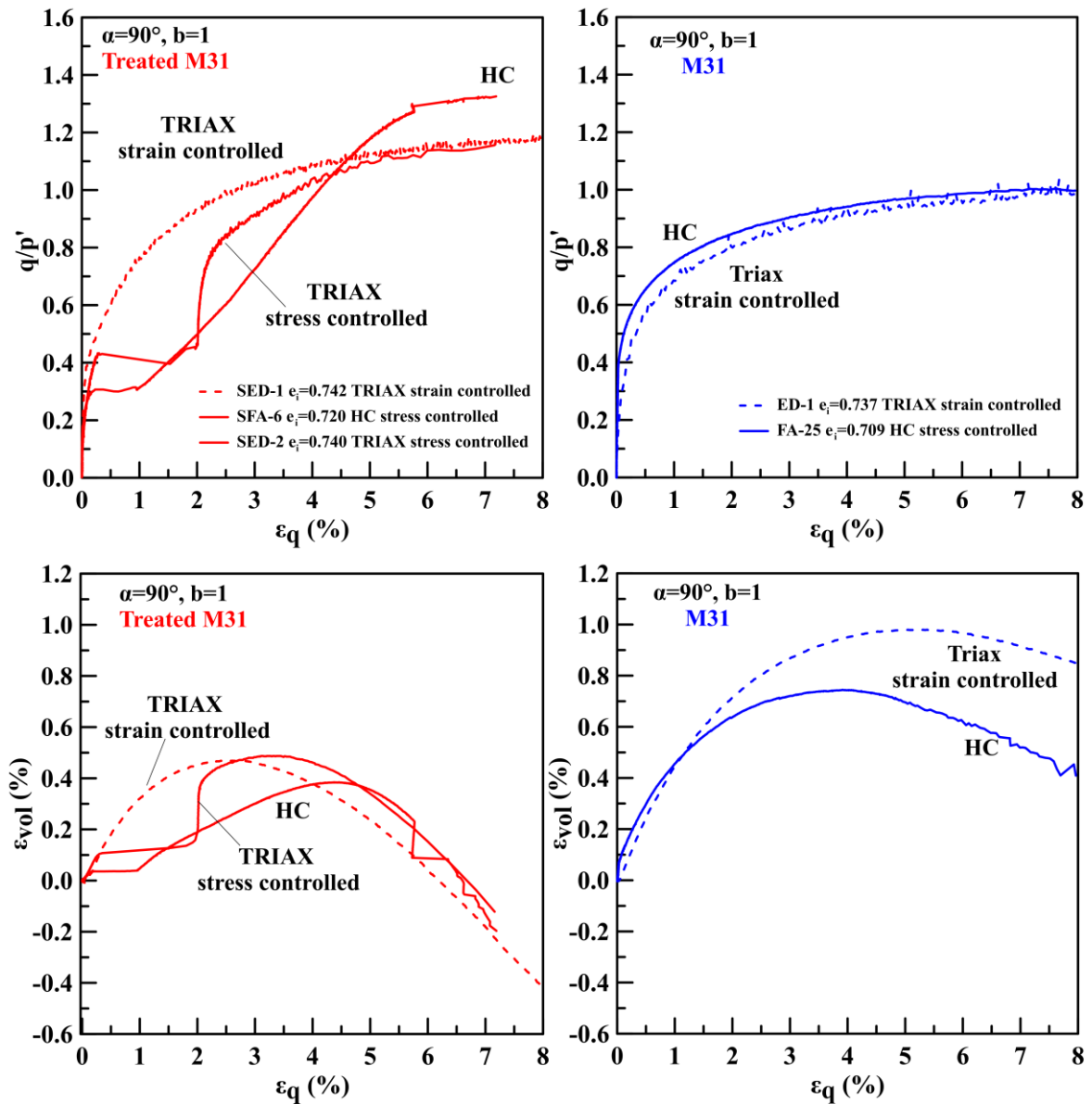
ακαριαία με αποτέλεσμα την καταγραφή ελάχιστων τιμών από τους μετρητές κατά τη διάρκεια αυτής της ασταθούς συμπεριφοράς. Στη συνέχεια, η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου σταθεροποιείται. Η αντοχή αυξάνεται και οι καμπύλες λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης και υπερπίεσης πόρων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης συγκλίνουν με τις αντίστοιχες της δοκιμής ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Το σημείο παροδικού μεγίστου αντοχής εμποδιζόμενης στράγγισης ταυτίζεται πρακτικώς με το σημείο εκκίνησης της αστάθειας (instability points, Lade (1993)).

Επομένως, όταν η επιβολή της φόρτισης γίνεται μέσω ελέγχου της τάσης και η στράγγιση είτε είναι εμποδιζόμενη είτε γίνεται με ελεύθερη στράγγιση (η οποία είναι εφικτή πριν και μετά την ασταθή απόκριση) η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά, όπως θα έκανε και η χαλαρή άμμος υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Ο κρίσιμος λόγος είναι $q/p'=0.4$ **Σχήμα 6.49** υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Για $b=0.5$ ασταθή συμπεριφορά εμφανίζει η φυσική άμμος υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης όταν $\alpha \geq 45^\circ$ με το λόγο τάσεων στο «σημείο αστάθειας» (instability point) να μειώνεται με την αύξηση της γωνίας α (P. K. Triantafyllos et al., 2020) όχι όμως υπό ελεύθερη στράγγιση (**Σχήμα 6.49**).

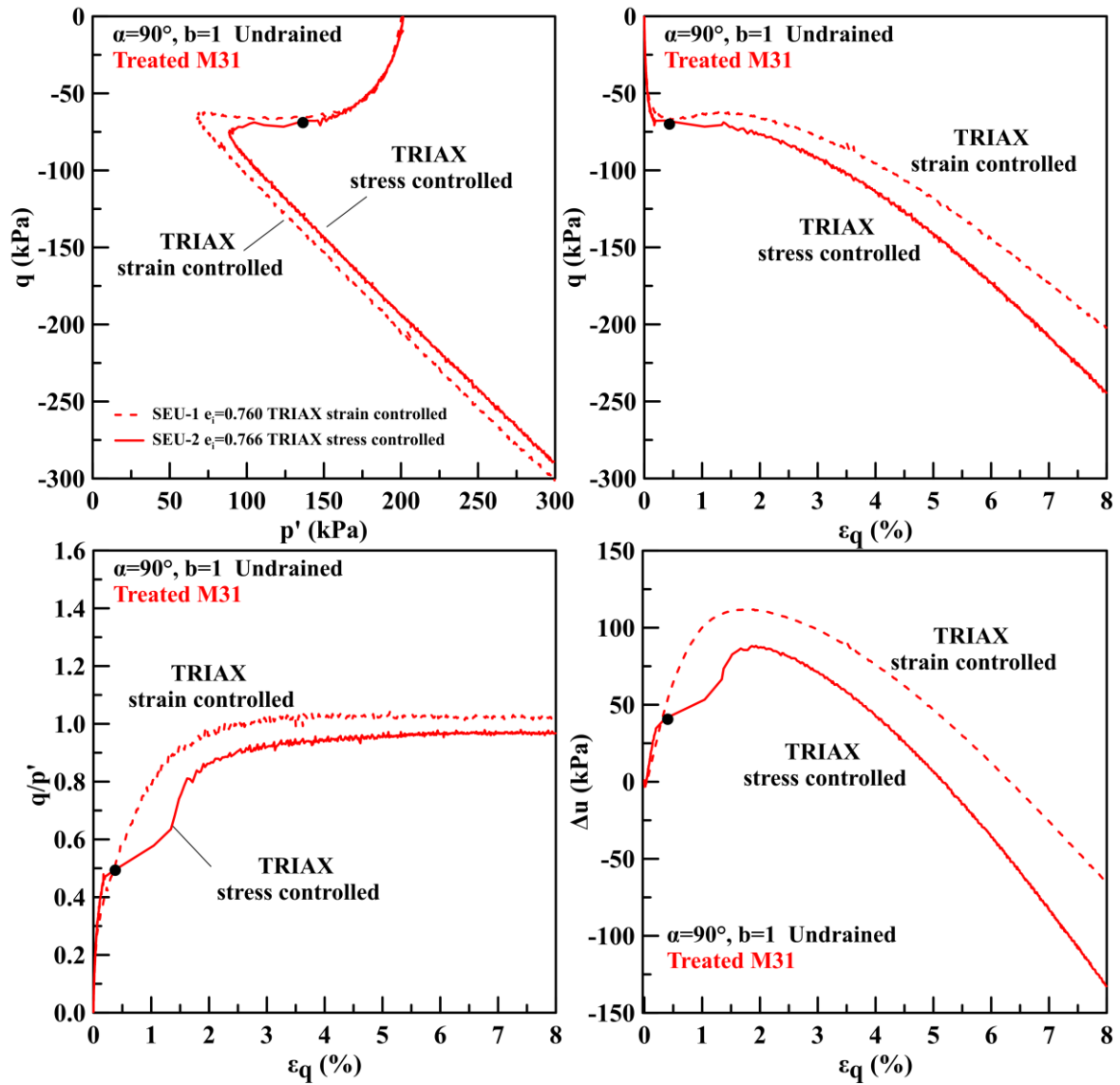
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών εφελκυσμού ($\alpha=0^\circ$, $b=1$) στη σταθεροποιημένη και στη φυσική άμμο M31 στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης και στην τριαξονική συσκευή

Πείραμα	Σταθεροποίηση	e_i	p'_i (kPa)	Συσκευή	Επιβολή	Στράγγισης
SFA-6	T	0.720	200	HC	Τάσης	Ελεύθερη
SED-1	T	0.742	200	TRIAX	Παραμόρφωσης	Ελεύθερη
SED-2	T	0.740	200	TRIAX	Τάσης	Ελεύθερη
FA-25	-	0.709	200	HC	Τάσης	Ελεύθερη
ED-1	-	0.737	200	TRIAX	Παραμόρφωσης	Ελεύθερη
SEU-1	T	0.760	200	TRIAX	Παραμόρφωσης	Εμποδιζόμενη
SEU-2	T	0.766	200	TRIAX	Τάσης	Εμποδιζόμενη

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,



Σχήμα 6.49: Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών, ελεύθερης στράγγισης στην τριαξονική συσκευή (TRIAX) και στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης (HC). Επίδραση των συνθηκών φόρτισης στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου (αριστερά) και της φυσικής άμμου M31 (δεξιά). Καμπύλες λόγου τάσεων αποκλίνουσας παραμόρφωσης q/p' - ε_q (πάνω) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ε_{vol} - ε_q (κάτω)



Σχήμα 6.50: Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού στη σταθεροποιημένη χαλαρή άμμο M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Επίδραση συνθηκών φόρτισης: Συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης (TRIAX strain controlled) (διακεκομμένες γραμμές) και συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (TRIAX stress controlled) (συνεχείς γραμμές)

Κεφάλαιο 7 : Δοκιμές Πλήρους Στροφής των Κύριων Αξόνων των Τάσεων στην Άμμο M31

7.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα αναφέρονται σε εντατικές καταστάσεις και συνθήκες φόρτισης οι οποίες είναι σύνθετες και περιλαμβάνουν αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κυρίων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) όσο και στη διεύθυνση τους. Μάλιστα υπό ανακυκλική φόρτιση λόγω σεισμού ή κυματικής φόρτισης παρατηρείται συνεχής μεταβολή της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων (Ishihara & Towhata, 1983; Sivathayalan & Vaid, 2002). Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται εργαστηριακές μελέτες που επικεντρώνονται στα αποτελέσματα της συνεχούς μεταβολής της γωνίας α στην απόκριση μη συνεκτικών εδαφών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (Jardine et al., 1985; M. Yoshimine et al., 1998; Zdravković & Jardine, 2001; Sivathayalan & Vaid, 2002; Shibuya et al., 2003a; Z. X. Yang et al., 2007; Georgiannou et al., 2018; P. K. Triantafyllos et al., 2021). Γενικά παρατηρήθηκε ότι όσο ο άξονας της κύριας τάσης σ_1 απομακρύνεται από την κατακόρυφη διεύθυνση η απόκριση του μη συνεκτικού εδαφικού υλικού γίνεται πιο ψαθυρή. Η συνεχής στροφή επιφέρει πλαστική συστολή, αστάθεια, παροδική μονότονη ρευστοποίηση και τελικά αστοχία της χαλαρής άμμου σύμφωνα με τους ερευνητές.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στροφής των αξόνων υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι βέβαια πολύ σημαντικά για την κατανόηση του ρόλου της ανισοτροπίας και την ανάγκη ένταξης της στις αναλύσεις, αλλά χωρίς τον έλεγχο της ενεργού τάσης δεν μπορεί να αποδοθεί η παρατηρούμενη ανισότροπη συμπεριφορά αποκλειστικά στην αλλαγή της δομής του δοκιμίου. Αντίθετα, στις δοκιμές που διεξάγονται υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης υπάρχει η δυνατότητα να επιβάλλεται συνεχής στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης q , μέσης ενεργού τάσης p' και παραμέτρου b . Συνεπώς, διατηρώντας σταθερό το μέγεθος των κύριων τάσεων και της ενεργού τάσης η απόκριση του δοκιμίου λόγω της περιστροφής των αξόνων αντανακλά αποκλειστικά την διαφορετική δομή στην αρχή της δοκιμής ανάλογα με τον συνδυασμό q, p', b . Οι εργαστηριακές μελέτες που περιλαμβάνουν συνεχή στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης είναι λιγοστές (Symes et al., 1988; Wijewickreme & Vaid, 1993; Tong et al., 2010; Yu et al., 2016) συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη πραγματοποίησης πειραμάτων συνεχούς στροφής των αξόνων υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση q , μέση ενεργό τάση p' και παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης b στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο των κύριων τάσεων $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$.

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η επίδραση της συνεχούς μεταβολής της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων στην συμπεριφορά της άμμου, μέσω δοκιμών περιστροφής των κυρίων τάσεων σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της στροφής στην εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης και των επιμέρους παραμορφώσεων ($\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_\theta, \gamma_{\theta z}$) και στην απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (μη συγγραμικότητα). Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση του μεγέθους του λόγου τάσεων q/p' και της παραμέτρου b ($b=0$ και $0,5$), που διατηρούνται σταθερά κατά την περιστροφή, για διαφορετικές πυκνότητες του εδάφους.

7.2 Περιγραφή των δοκιμών συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων

Για την παρασκευή των δοκιμών άμμου M31 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ξηρής απόθεσης άμμου σε νερό (water pluviation) που εξασφαλίζει ομοιόμορφα και επαναλήψιμα δοκίμια με δομή παρόμοια με αυτή των εδαφικών αποθέσεων (Vaid et al., 1999) και έντονα ανισότροπη (Prashanth et al., 2018). Το πρότυπο κοίλο δοκίμιο άμμου έχει εσωτερική ακτίνα $R_i=20\text{mm}$, εξωτερική ακτίνα $R_o=35\text{mm}$ και ύψος $H=140\text{mm}$, καταλαμβάνοντας συνολικό όγκο $V=363\text{cm}^3$.

Τα δοκίμια άμμου M31 υποβάλλονται σε κορεσμό με τιμή αντιπίεσης (back pressure) $u_o=300\text{kPa}$ ώστε να επιτευχθούν τιμές της παραμέτρου Skempton $B=\Delta u/\Delta\sigma>0.97$ και στερεοποιούνται ισότροπα σε μέση αρχική ενεργό τάση $p'_i=200\text{kPa}$ στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (HC). Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης διατηρώντας σταθερή τη γωνία α ($\alpha=0^\circ$) και την παράμετρο b ($b=0$ ή $b=0.5$) μέχρι ένα συγκεκριμένο λόγο τάσεων $\eta=q/p'$. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης η εσωτερική (p_i) και η εξωτερική (p_o) πίεση ελέγχονται ανεξάρτητα ώστε να διατηρείται σταθερή η μέση ενεργός τάση, p' , και η παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης, $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, ενώ αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση, $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$. Η φόρτιση επιβάλλεται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress controlled tests). Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερό τον λόγο τάσεων q/p' και την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης b εκτελούνται περιστροφές των αξόνων των κύριων τάσεων ($\alpha=0 \rightarrow 180^\circ$) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Στο **Σχήμα 7.1** απεικονίζεται η διαδρομή τάσεων κατά την ισότροπη στερεοποίηση (κλάδος A-B), μετέπειτα κατά την ακτινική φόρτιση μέχρι ένα συγκεκριμένο λόγο τάσεων q/p' (κλάδος B-C) και κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (κλάδος C-D) σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων στο επίπεδο $q-p'$ (**Σχήμα 7.1** (α)) και στο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης που εισήγαγαν οι Ishihara & Towhata, (1983) (**Σχήμα 7.1** **Σχήμα 6.1**(β)). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης ($b=0$ ή 0.5) σε μέσης πυκνότητας ($e_i=0.681-0.690$) και σε πυκνά ($e_i=0.560-0.565$) δοκίμια άμμου M31. Τα

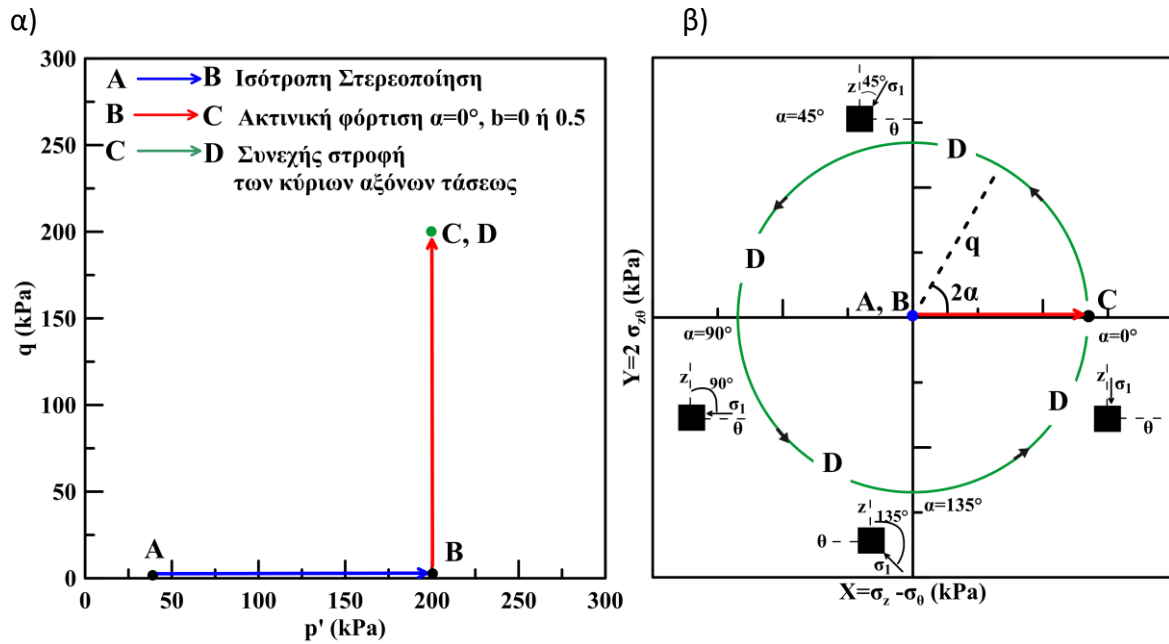
χαρακτηριστικά των δοκιμών περιστροφής των κυρίων αξόνων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται στον **Πίνακα 7.1**

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων στην άμμο M31 υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης

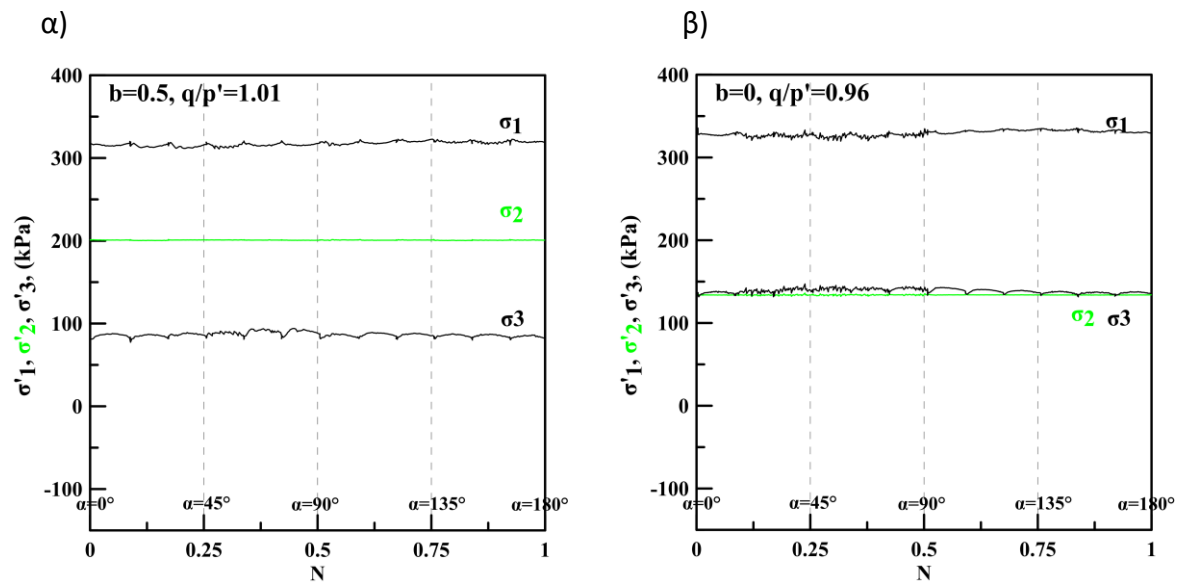
Πείραμα	Ακτινική Φόρτιση $\alpha=0^\circ$				Στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων $\alpha=0^\circ \rightarrow 180^\circ$			
	e_i	p'_i (kPa)	b	$(q/p')_{p.t.}$	e_r	q/p'	b	N_f
R-5	0.690	200	0.5		0.690	0.69	0.5	4
R-8	0.689	200	0.5		0.689	0.87	0.5	3
R-7	0.681	200	0.5	0.97	0.681	1.04	0.5	1.75/Αστ.
R-6	0.562	200	0.5	0.88	0.562	0.98	0.5	4
R-1	0.565	200	0.5	0.88	0.565	1.02	0.5	5
R-4	0.560	200	0.5	0.88	0.560	1.10	0.5	1.7/Αστ.
R-9	0.564	200	0	-	0.564	0.84	0	2.5
R-10	0.560	200	0	-	0.560	0.98	0	5

Όπου: e_i , δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης/αρχή ακτινικής φόρτισης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση στο τέλος της στερεοποίησης,
 α , διεύθυνση του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, σ'_1 , ως προς το κατακόρυφο επίπεδο,
 b , παράμετρος ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2),
 e_r , δείκτης πόρων στο τέλος της ακτινικής φόρτισης/ αρχή της περιστροφής,
 q/p' λόγος τάσεων σταθερός κατά την περιστροφή των αξόνων,
 N_f Αριθμός περιστροφών, *Αστ.=Αστοχία του δοκιμίου

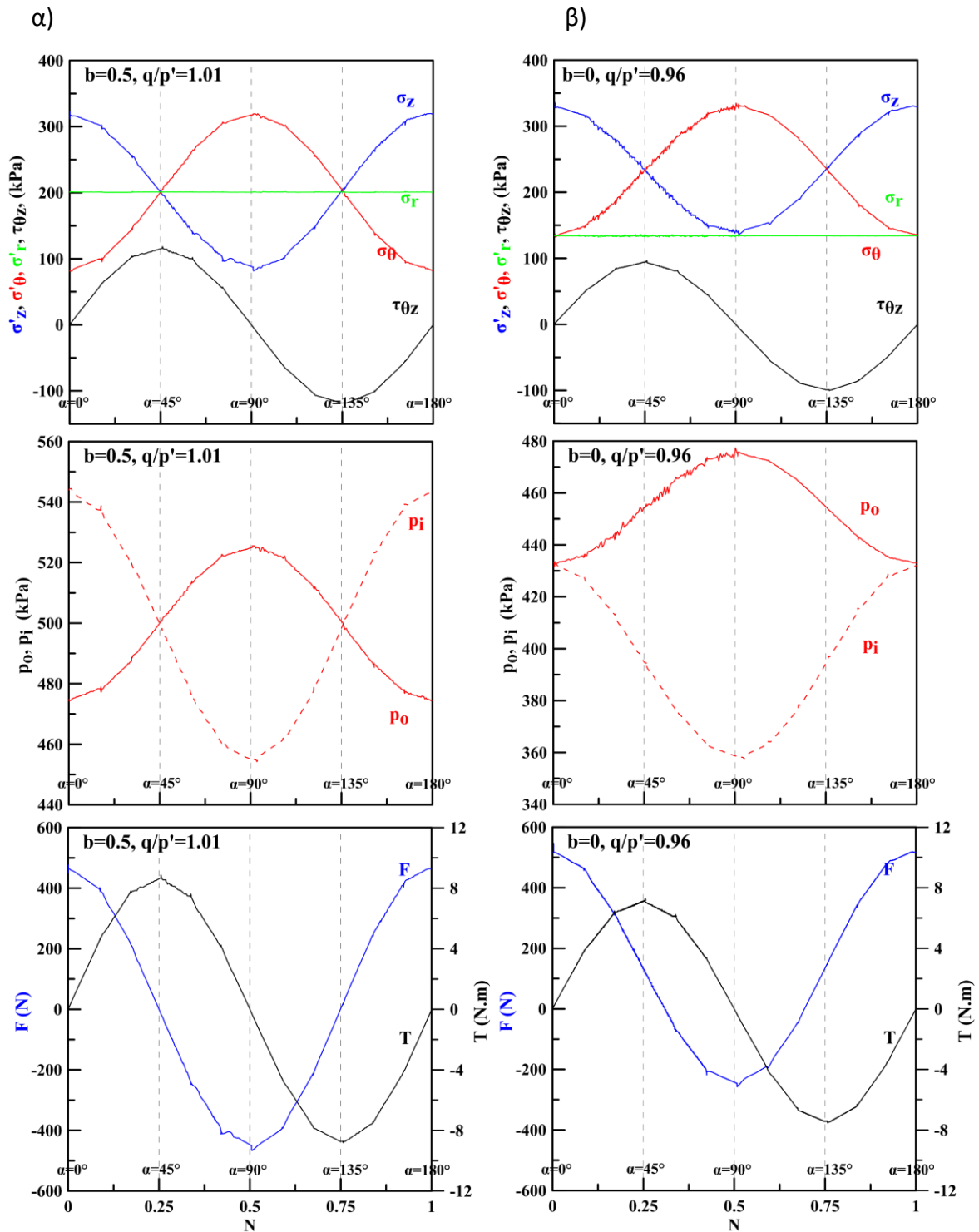
Στις δοκιμές στροφής υπό ελεύθερη στράγγιση, η διεύθυνση των αξόνων μεταβάλλεται συνεχώς ($\alpha=0^\circ \rightarrow 180^\circ$), ενώ διατηρείται σταθερό το μέγεθος ενεργών κύριων τάσεων, σ'_1 , σ'_2 και σ'_3 , σε κάθε κύκλο περιστροφής (**Σχήμα 7.2**) Για να επιβληθεί αυτό το είδος φόρτισης, οι τάσεις σ_{zz} , $\sigma_{\theta\theta}$ και $\tau_{z\theta}$ θα πρέπει να αλλάζουν ημιτονοειδώς με κατάλληλη διαφορά φάσης ενώ η τάση $\sigma_{rr}=\sigma_2$ θα πρέπει να διατηρείται σταθερή. Αυτό επιτυγχάνεται όταν τα ελεγχόμενα μεγέθη δηλαδή η πίεση εξωτερικής (p_o) και εσωτερικής (p_i) κυψέλης το αξονικό και το στρεπτικό φορτίο ακολουθούν συγκεκριμένες ημιτονοειδείς συναρτήσεις με πλάτος ανάλογο με τον επιθυμητό λόγο τάσεων q/p' και την παράμετρο b (**Σχήμα 7.3**). Ωστόσο, στη συγκεκριμένη συσκευή στρεπτικής διάτμησης οι τάσεις στην πραγματικότητα αλλάζουν με μικρές διαδοχικές γραμμικές αυξήσεις που προσεγγίζουν τις ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Η περιστροφή εκτελείται μονότονα και σταδιακά και με ρυθμό περίπου $3^\circ/\text{min}$ ώστε να διασφαλιστούν οι συνθήκες ελεύθερης στράγγισης μεταξύ των διαδοχικών βημάτων.



Σχήμα 7.1: Στάδια δοκιμής συνεχούς στρόφιξης των αξόνων κυρίων τάσεων. Διαδρομές τάσεων (α) στο επίπεδο q - p' (α) και (β) στο επίπεδο $2\tau_{z\theta}$ - $(\sigma'_z - \sigma'_\theta)$



Σχήμα 7.2: Εξέλιξη των κύριων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) σε μια πλήρη στρόφιξη των αξόνων κύριων τάσεων υπό α) $q/p'=1.01$ και $b=0.5$ και β) $q/p'=0.96$ και $b=0$



Σχήμα 7.3: Διακύμανση των επιμέρους τάσεων (σ_z , σ_r , σ_θ , $\tau_{\theta z}$) και των επιβαλλόμενων πιέσεων (p_o , p_i) και φορτίων (F , T) σε μια πλήρη στροφή των αξόνων κύριων τάσεων υπό α) $q/p'=1.01$ και $b=0.5$ και β) $q/p'=0.96$ και $b=0$

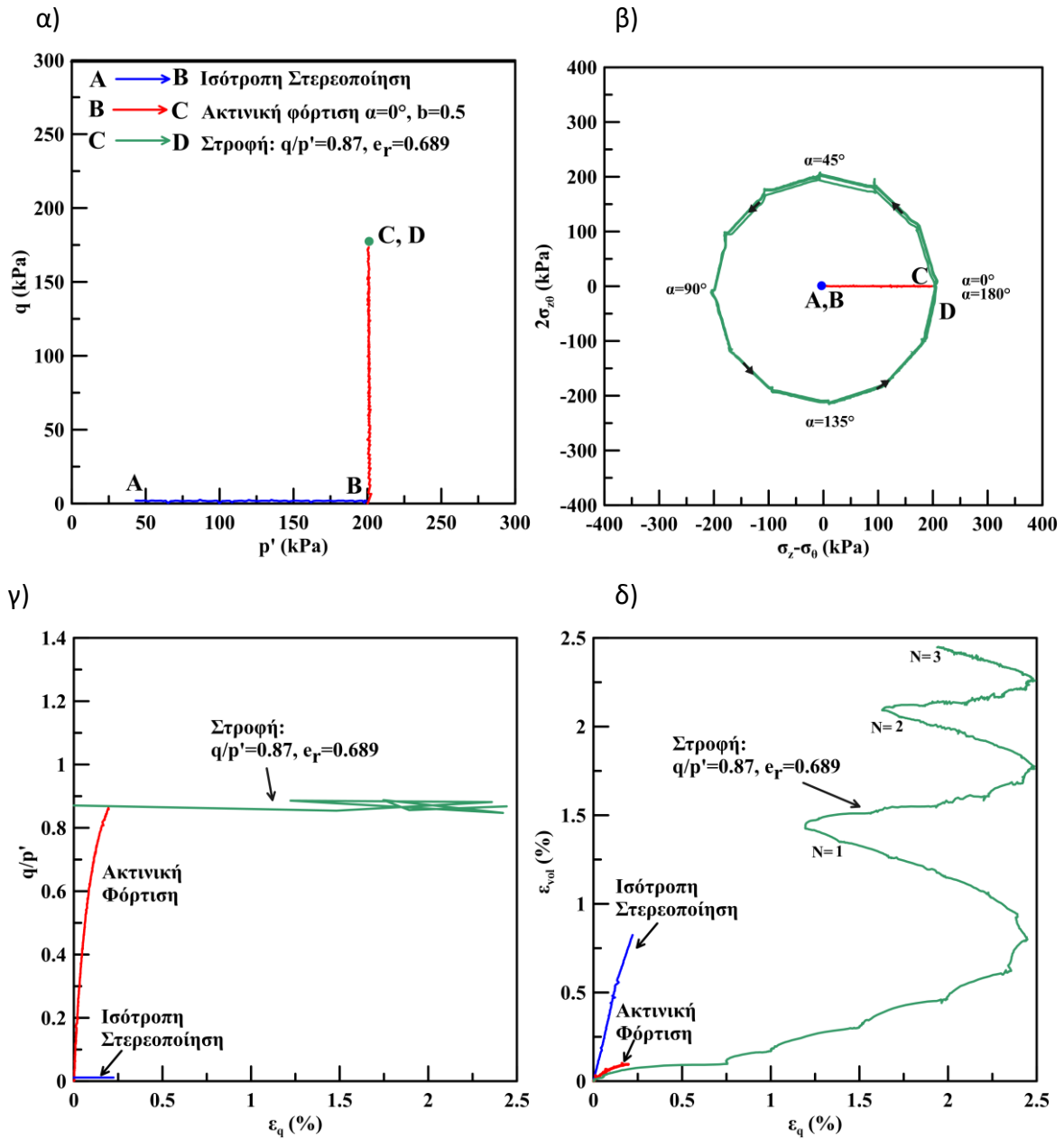
7.3 Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' στην απόκριση της άμμου M31 κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων

Σε μια πρόσφατη μελέτη οι Tong et al. (2010) διεξήγαγαν δοκιμές συνεχούς στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε μέσης πυκνότητας και σε πυκνά δοκίμια άμμου Toyoura με σταθερή ενεργό (p') και αποκλίνουσα τάση (q) για σταθερό λόγο τάσεων $\eta=q/p' < 1$. Παρατηρήθηκε συστολή των δοκιμίων κυρίως στους πρώτους κύκλους φόρτισης. Ωστόσο, δεν αναφέρεται αν η στροφή των αξόνων εκκίνησε όσο το δοκίμιο βρισκόταν στο στάδιο συστολής, δηλαδή αν ο λόγος τάσεων κατά τη διάρκεια της περιστροφής ήταν μικρότερος από το λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης. Επιπρόσθετα, τα δοκίμια συσσωρεύουν παραμορφώσεις κατά τη στροφή, αλλά δεν οδηγούνται στην αστοχία. Στην παρούσα διατριβή η στροφή των αξόνων εκτελείται σε ένα εύρος λόγου τάσεων πριν αλλά και μετά το σημείο αλλαγής φάσης ώστε να μελετηθεί η παραμορφωσιακή συμπεριφορά αλλά και να διερευνηθεί εάν η στροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων υπό σταθερές q , p' , b προκαλεί συστολική συμπεριφορά, που μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία, είτε το δοκίμιο βρίσκεται στο στάδιο συστολής ή διαστολής.

Στο **Σχήμα 7.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων σε ένα δοκίμιο μέσης πυκνότητας άμμου M31 (δοκιμή R-8) υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Για όλα τα στάδια της δοκιμής παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q-p'$ (**Σχήμα 7.4** (α)) και στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$ (**Σχήμα 7.4** (β)), οι καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης $q/p' - \epsilon_q$ (**Σχήμα 7.4** (γ)) και καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης $\epsilon_{vol} - \epsilon_q$ (**Σχήμα 7.4** (δ)). Αρχικά το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα από μέση ενεργό τάση $p'=40$ έως 200kPa (μπλε καμπύλες). Στη συνέχεια επιβάλλεται ακτινική φόρτιση (κόκκινες καμπύλες) υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200$ kPa, σταθερή γωνία $\alpha=0^\circ$ και παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ αυξάνοντας την αποκλίνουσα τάση, q , έως $q/p'=0.87$. Το δοκίμιο κατά την ακτινική φόρτιση έως το συγκεκριμένο λόγο τάσεων συστέλλεται (**Σχήμα 7.4** (γ)). Η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων (πράσινες καμπύλες) πραγματοποιείται υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ και λόγο τάσεων $q/p'=0.87$, δηλαδή λίγο πριν το σημείο αλλαγής φάσης.

Το δοκίμιο όπως φαίνεται στο διάγραμμα εξέλιξης της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της στροφής των τάσεων συστέλλεται. Εκτελέστηκαν 3 κύκλοι περιστροφής της γωνίας α από 0° έως 180° . Το μεγαλύτερο ποσοστό ογκομετρικής παραμόρφωσης αναπτύχθηκε στον 1^ο κύκλο φόρτισης ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησης μειώνεται. Η συστολή στον 1^ο κύκλο περιστροφής είναι ιδιαίτερα σημαντική και πολύ μεγαλύτερη από αυτή κατά την ακτινική φόρτιση (1.35% και 0.1% αντίστοιχα). Σημειώνεται ότι η συστολή της άμμου, η οποία σχετίζεται με τη δυνητική ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων του δοκιμίου, λαμβάνει χώρα υπό σταθερή τιμή των τάσεων,

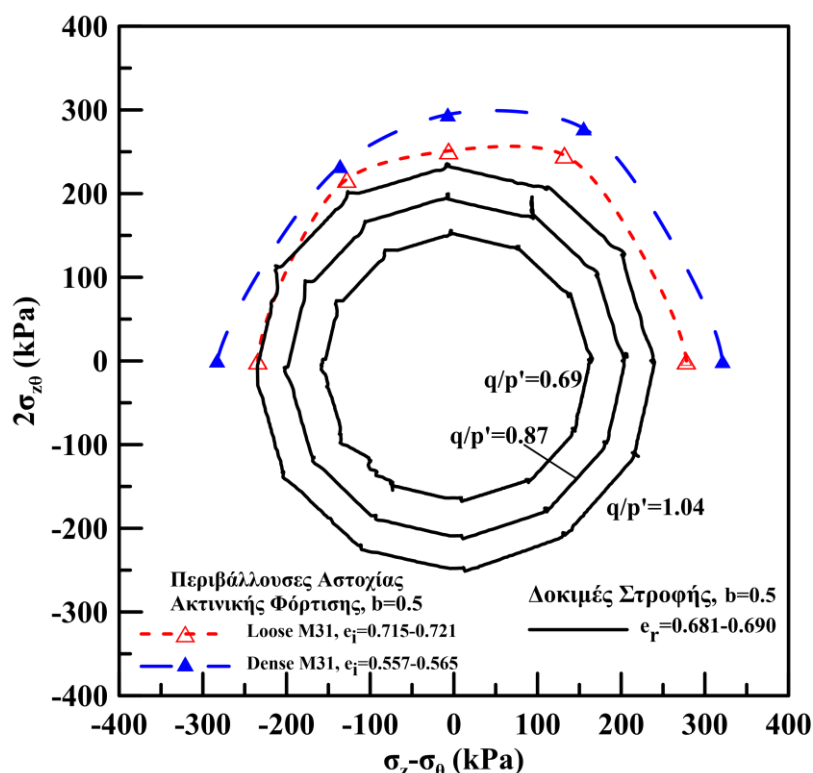
q , p' και κατά συνέπεια συσχετίζεται άμεσα με τη μεταβολή της δομής της άμμου αφού το τασικό πεδίο παραμένει αμετάβλητο.



Σχήμα 7.4: Στάδια δοκιμής R-8. Ισότροπη στερεοποίηση, ακτινική φόρτιση και στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $b=0.5$ και $q/p'=0.87$. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q - p' (α) και (β) στο επίπεδο $2\tau_{z\theta}$ - ($\sigma'_z - \sigma'_\theta$), γ) καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης q/p' - ε_q και δ) καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ε_{vol} - ε_q

Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση του μεγέθους του λόγου τάσεων, q/p' , που διατηρείται σταθερός κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε δοκίμια μέσης πυκνότητας. Σε αυτή την πυκνότητα εκτελέστηκαν δοκιμές στροφής σε λόγο τάσεων, q/p'

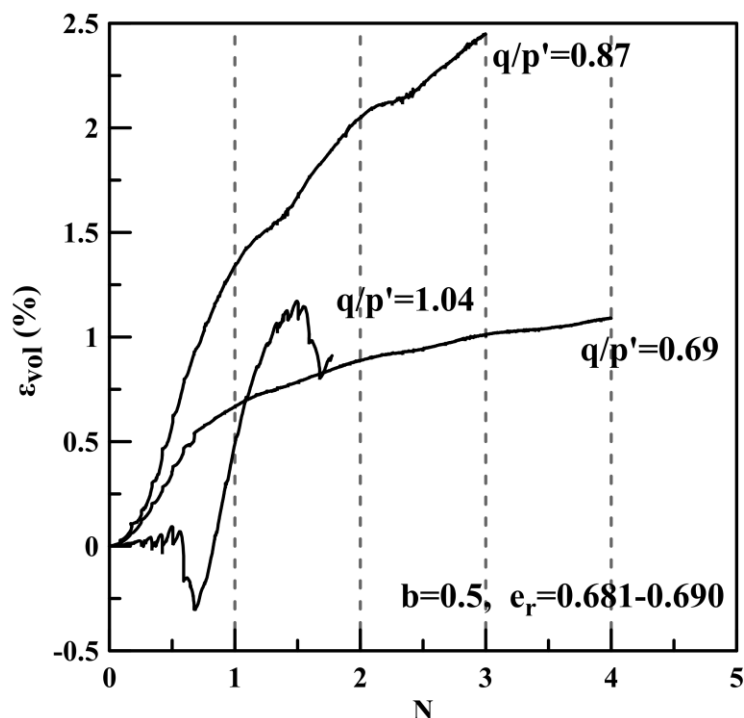
μικρότερο (R-5 και R-8) και μεγαλύτερο (R-7) από το λόγο τάσεων του σημείου αλλαγής φάσης ($q/p'_{p.t.} \approx 0.97$). Στο **Σχήμα 7.5** παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$. Επιπλέον, παρατίθενται οι περιβάλλουσες αστοχίας για τα χαλαρά (κόκκινη καμπύλη) και τα πυκνά (μπλε καμπύλη) δοκίμια άμμου M31, όπως προέκυψαν από τις μονοτονικές δοκιμές ακτινικής φόρτισης. Οι διαδρομές τάσεων των R-5 ($q/p'=0.69$) και R-8 ($q/p'=0.87$), τοποθετούνται μακριά από τις περιβάλλουσες, ενώ της R-7 ($q/p'=1.04$) τέμνει την περιβάλλουσα της χαλαρής ($e_i=0.715-0.721$) άμμου. Επισημαίνεται το ότι τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε στροφή ήταν λίγο πιο πυκνά με δείκτη πόρων στην εκκίνηση της στροφής $e_r=0.681-0.690$ αντί για $0.715-0.721$ των δοκιμών της χαλαρής άμμου που όρισαν την περιβάλλουσα για ακτινικές οδεύσεις υπό σταθερό α .



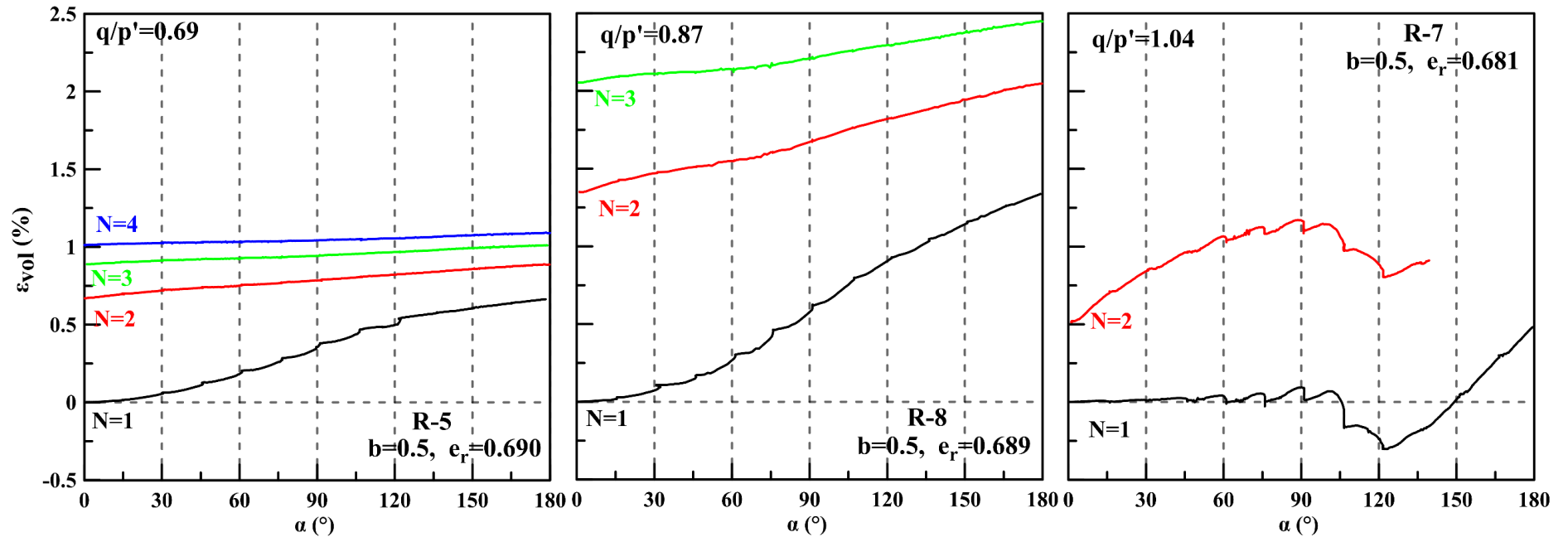
Σχήμα 7.5: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$,

Η επιρροή του μεγέθους του λόγου τάσεων q/p' κατά την περιστροφή των αξόνων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ανάπτυξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης των δοκιμών μέσης πυκνότητας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7.6** και στο **Σχήμα 7.7** όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης με τους κύκλους περιστροφής και με τη γωνία α αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι σε κάθε πλήρη κύκλο, N , η γωνία α μεταβάλλεται από 0 έως 180° και ότι η συστολή σημειώνεται ως θετική ογκομετρική παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι η στροφή των αξόνων της δοκιμής R-5 προκαλεί σημαντική συστολή στο δοκίμιο από τον 1° κύκλο στροφής ($\epsilon_{vol}=0.67\%$). Η συστολή αυξάνεται στους επόμενους κύκλους, αλλά με μικρότερο ρυθμό. Στη δοκιμή R-8 όπου η στροφή εκτελείται

υπό μεγαλύτερο λόγο τάσεων ($q/p'=0.87$) αναπτύσσεται συνολικά μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση ($\epsilon_{vol}=1.35\%$) στο τέλος του 1^{ου} κύκλου περιστροφής των κυρίων τάσεων. Στους επόμενους κύκλους ο ρυθμός συστολής μειώνεται χωρίς ωστόσο να μηδενίζεται πρακτικά όπως στη δοκιμή με μικρότερο λόγο τάσεων. Στη δοκιμή R-7 ($q/p'=1.04$) όπου η στροφή πραγματοποιείται μετά το σημείο αλλαγής φάσης και σε λόγο τάσεων q/p' πιο κοντά στην περιβάλλουσα αστοχίας, παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά. Εντοπίζεται διακύμανση της ογκομετρικής παραμόρφωσης από διαστολή σε συστολή κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης με συσσώρευση ωστόσο της συστολικής παραμόρφωσης, αν και σε μικρότερο βαθμό από τα δοκίμια στα οποία η περιστροφή των αξόνων αρχίζει όταν βρίσκονται στο στάδιο συστολής πριν την αλλαγή φάσης. Το δοκίμιο αστόχησε πριν ολοκληρωθεί ο 2^{ος} κύκλος περιστροφής όταν η γωνία κύριας τάσης ήταν $\alpha=125^\circ$ λόγω μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Προφανώς στα πρώτα δύο δοκίμια ενισχύεται η συστολική συμπεριφορά τους, όμως είναι σημαντικό ότι το τρίτο δοκίμιο αρχικά διαστέλλεται και στη συνέχεια συστέλλεται αποκλειστικά λόγω της περιστροφής των κυρίων αξόνων, αφού ευρίσκεται αρχικά στο στάδιο διαστολής μετά την αλλαγή φάσης. Στο **Σχήμα 7.7** φαίνεται καθαρά ότι η περιστροφή των κυρίων αξόνων κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης έχει σαν αποτέλεσμα περίπου μηδενική ογκομετρική παραμόρφωση μέχρι τις 90° και ελαφρώς διαστολική για $90-120^\circ$ και στη συνέχεια, αφού συναντήσει την περιβάλλουσα αστοχίας (**Σχήμα 7.5**), ενεργοποιείται η συστολική συμπεριφορά που συνεχίζεται και στον επόμενο κύκλο.



Σχήμα 7.6: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των κυρίων αξόνων σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N



Σχήμα 7.7: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο στροφής N

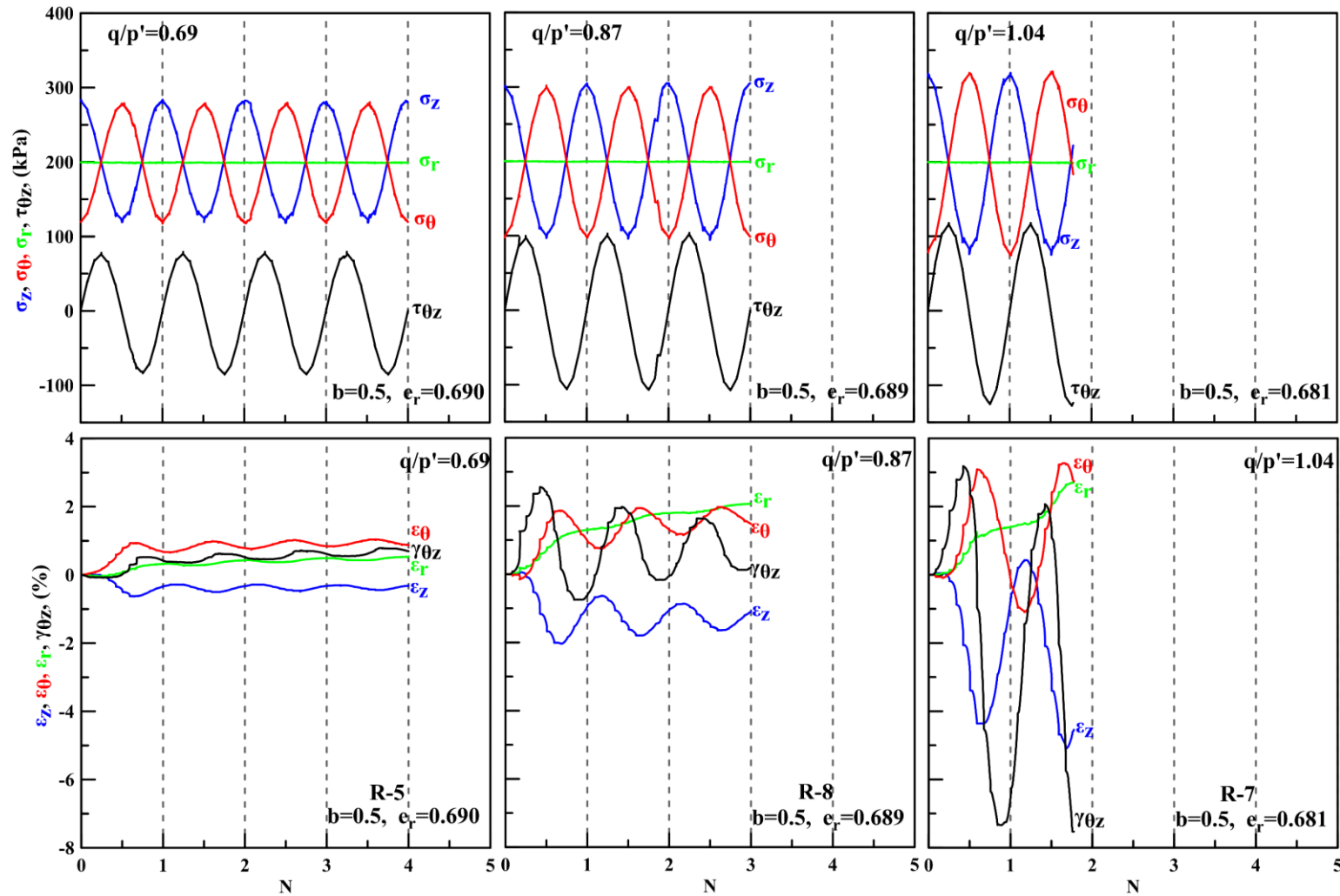
Οι επιβαλλόμενες τάσεις (σ_z , σ_θ , σ_r και $\tau_{z\theta}$) και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις (ε_z , ε_θ , ε_r και $\gamma_{z\theta}$) που αναπτύχθηκαν παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7.8**. Στις δοκιμές στροφής υπό $q/p'=0.69$ και 0.87 όπου δεν παρατηρήθηκε αστοχία, το πλάτος των παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερο στον πρώτο κύκλο στροφής, ενώ τείνει να σταθεροποιηθεί στους επόμενους κύκλους. Συμπεραίνεται ότι η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων προκαλεί μία αναδιάταξη της δομής έως ότου το εδαφικό δοκίμιο να οδηγηθεί σε μια νέα «σταθερή» κατάσταση με ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητάς του. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρείται συσσώρευση εφελκυστικής κατακόρυφης παραμόρφωσης, ε_z , και σημαντική ανάπτυξη της ακτινικής παραμόρφωσης, ε_r . Εξαιτίας της κατακόρυφης απόθεσης κατά την παρασκευή του δοκιμίου, αλλά και της αρχικής ακτινικής φόρτισης υπό κατακόρυφη διεύθυνση ($\alpha=0^\circ$), πριν την εκκίνηση της στροφής, το εδαφικό δοκίμιο αναπτύσσει μικρότερη συμπιεστότητα κατά τον κατακόρυφο άξονα σε σχέση με τον οριζόντιο διευκολύνοντας τη θλιπτική παραμόρφωση κατά την ακτινική διεύθυνση.

Το μέγεθος του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων σε δοκίμια ίδιας πυκνότητας ($e_r=0.681-0.690$) φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη των παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου τάσεων οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις και σε αύξηση της διακύμανσης (oscillation) των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου στροφής.

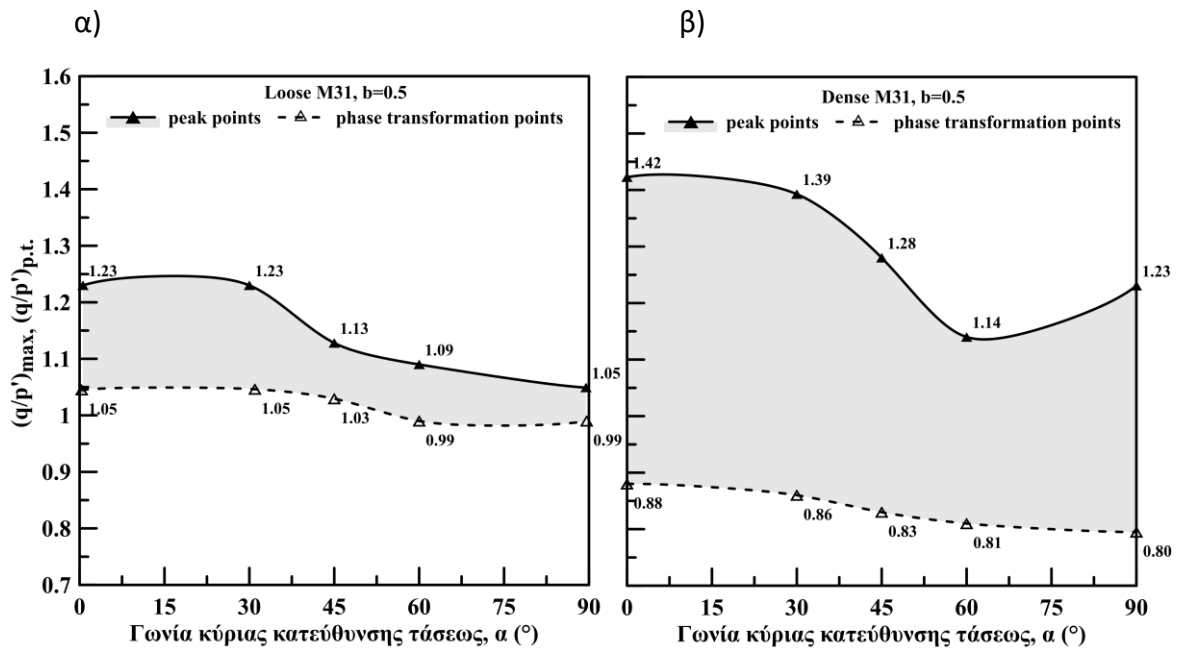
Όταν η στροφή των αξόνων εκτελέστηκε υπό μεγαλύτερο λόγο τάσεων, $q/p'=1.04$ (R-7) το δοκίμιο άμμου M31 μέσης πυκνότητας αστόχησε πριν ολοκληρωθεί ο 2^{ος} κύκλος στροφής. Παρότι οι επιβαλλόμενες τάσεις (σ_z , σ_θ και $\tau_{z\theta}$) ακολουθούν ημιτονοειδείς καμπύλες σταθερού πλάτους, οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις εμφανίζουν πολύ έντονη διακύμανση. Μάλιστα, στον 1^ο κύκλο αναπτύσσεται μέγιστη διατμητική παραμόρφωση $\gamma_{\theta z}=8\%$ έναντι 2.5% που ανέπτυξε η δοκιμή R-8 με $q/p'=0.87$.

7.3.1 Επίδραση της πυκνότητας της άμμου M31

Στα χαλαρά δοκίμια άμμου M31 που υποβλήθηκαν σε ακτινική φόρτιση υπό $b=0.5$ παρατηρήθηκε ότι η διαφορά του λόγου τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης $(q/p')_{p.t.}$ από αυτόν στη μέγιστη αντοχή $(q/p')_{max}$ είναι μικρή με τις τιμές για $\alpha=90^\circ$ να ταυτίζονται ((**Σχήμα 7.9** (α)). Επομένως, όταν η στροφή εκτελείται υπό $q/p' > (q/p')_{p.t.}$ η τιμή αυτή είναι αρχικά ($\alpha=0^\circ$) μικρότερη από την τιμή της περιβάλλουσας αστοχίας, αλλά όσο η γωνία α αυξάνεται ($0^\circ \rightarrow 90^\circ$) εξισώνεται με αυτή της περιβάλλουσας αστοχίας. Ωστόσο, όταν η πυκνότητα της άμμου M31 αυξάνεται, μεγαλώνει η απόσταση του λόγου τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης $(q/p')_{p.t.}$ από αυτόν στη μέγιστη αντοχή $(q/p')_{max}$ για όλες τις τιμές της γωνίας α ((**Σχήμα 7.9** (β)). Για να μελετήσουμε την απόκριση της άμμου υπό στροφή των αξόνων μετά το σημείο αλλαγής φάσης εκτελέστηκαν δοκιμές στροφής σε πυκνά δοκίμια άμμου M31.



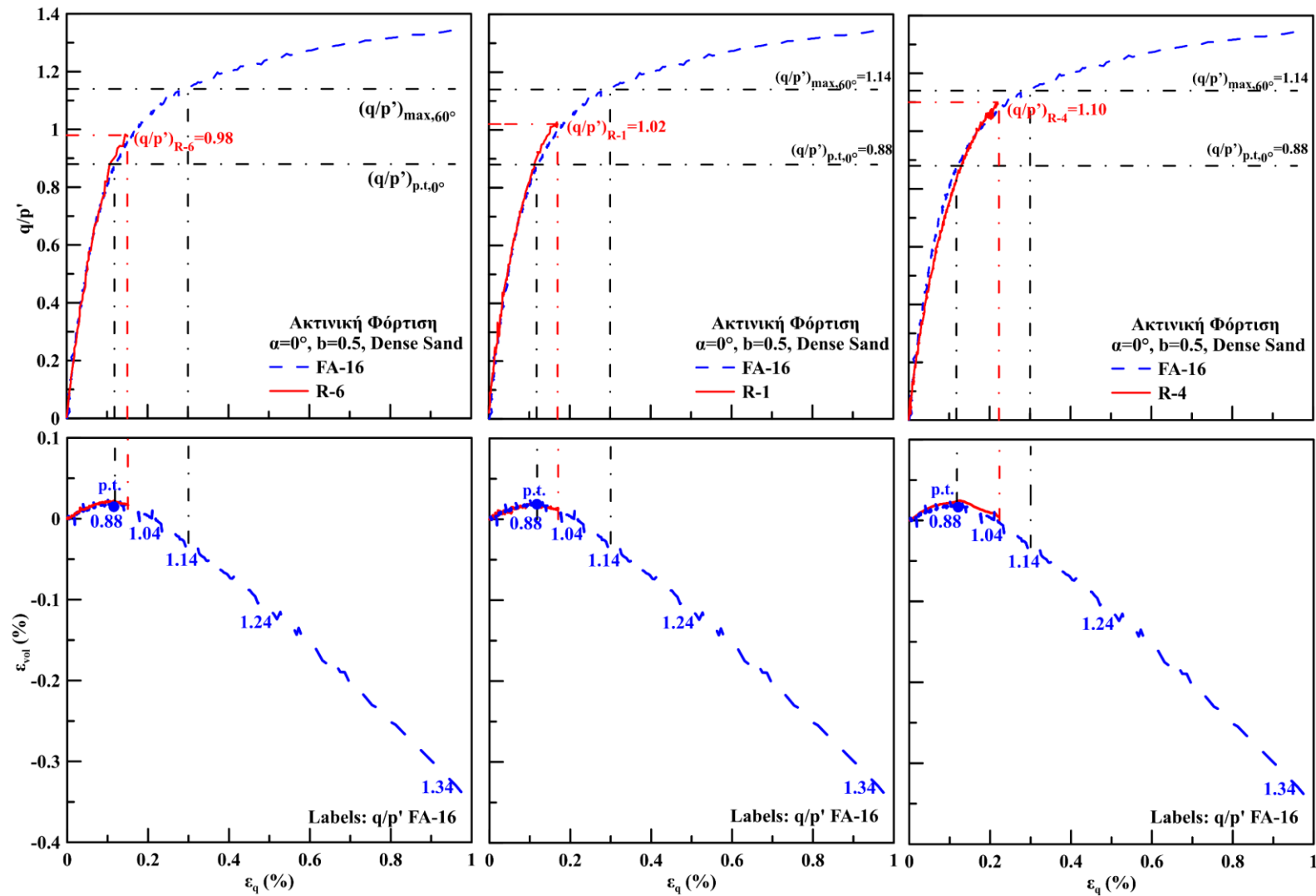
Σχήμα 7.8: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων,



Σχήμα 7.9: Επίδραση της γωνίας α στον λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης $(q/p')_{p.t.}$ και στη μέγιστη αντοχή $(q/p')_{max}$ α) στη χαλαρή και β) στην πυκνή άμμο M31

Όταν η πυκνή άμμος φορτίζεται ακτινικά υπό $b=0.5$ και $\alpha=0^\circ$, αναμένεται να περάσει στη διαστολική φάση για λόγο τάσεων $q/p' > 0.88$ ((**Σχήμα 7.9** (β))). Επιπλέον, η ελάχιστη αντοχή παρατηρήθηκε όταν $\alpha=60^\circ$ $(q/p')_{max,60^\circ}=1.14$. Προκειμένου η στροφή των αξόνων να εκκινεί μετά το σημείο αλλαγής φάσης, όταν το δοκίμιο διαστέλλεται και ταυτόχρονα να μην ταυτίζεται ο λόγος τάσεων κατά τη στροφή με αυτόν της αστοχίας υπό ακτινική φόρτιση, επιλέγεται ο λόγος τάσεων να είναι στο εύρος $0.88 < q/p' < 1.14$.

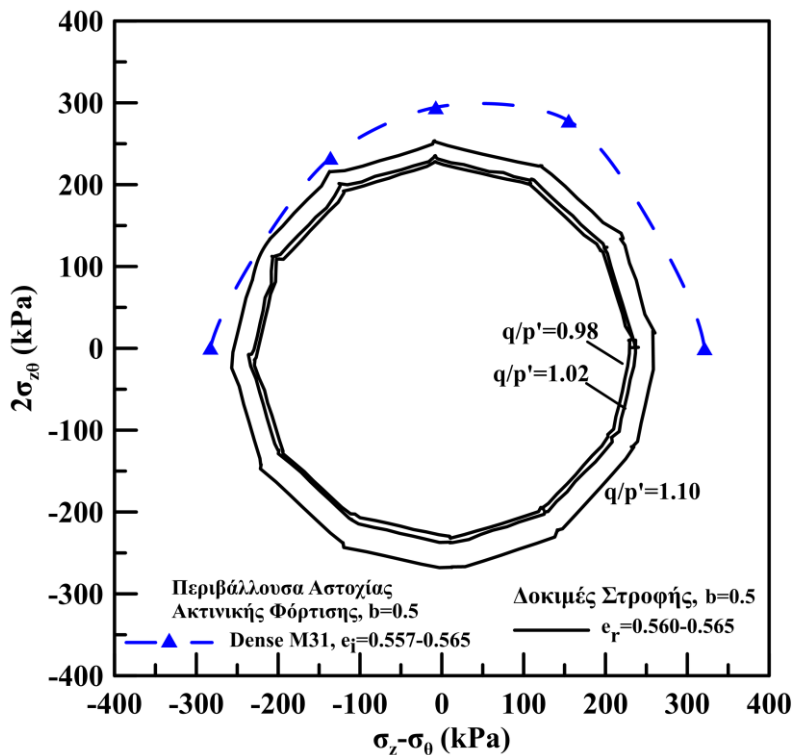
Στο **Σχήμα 7.10** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών R-6, R-1 και R-4 κατά την ακτινική φόρτιση, ελεύθερης στράγγισης υπό $\alpha=0$ και $b=0.5$ έως το σημείο εκκίνησης της στροφής, σε όρους λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης $(q/p' - \epsilon_q)$ και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης $(\epsilon_{vol} - \epsilon_q)$. Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και τα αποτελέσματα της αντίστοιχης δοκιμής ακτινικής φόρτισης FA-16 (μπλε διακεκομμένη γραμμή). Επιπρόσθετα με μαύρες διακεκομμένες γραμμές επισημαίνονται το σημείο αλλαγής φάσης της δοκιμής FA-16 $(q/p')_{p.t.,0^\circ}=0.88$ και ο λόγος τάσεων στην αστοχία για φόρτιση υπό $\alpha=60^\circ$ και $b=0.5$ $((q/p')_{max,60^\circ}=1.14)$ της πυκνής άμμου M31. Παρατηρούμε ότι και στα 3 δοκίμια η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων εκκινεί μετά το σημείο αλλαγής φάσης τους. Επιπλέον, οι λόγοι τάσεων που επιλέχθηκαν βρίσκονται στο επιθυμητό εύρος $0.88 < q/p' < 1.14$



Σχήμα 7.10: Ακτινική φόρτιση υπό $\alpha=0^\circ$ και $b=0.5$ των δοκιμών R-6, R-1, R-4 και FA-16. Καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($q/p'-\epsilon_q$) και καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($\epsilon_{vol}-\epsilon_q$)

Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση του μεγέθους του λόγου τάσεων, q/p' , που διατηρείται σταθερός κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Σε αυτή την πυκνότητα εκτελέστηκαν δοκιμές στροφής (R-6, R-1 και R-4) σε λόγο τάσεων, q/p' μεγαλύτερο από το λόγο τάσεων του σημείου αλλαγής φάσης ($q/p'_{p.t.} \approx 0.88$).

Στο **Σχήμα 7.11** παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών στροφής των κυρίων αξόνων στην πυκνή άμμο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$. Τα δοκίμια τη στιγμή εκκίνησης της στροφής των αξόνων είχαν δείκτη πόρων $e_r = 0.560-0.565$. Επιπλέον, παρατίθεται η περιβάλλουσα αστοχίας για την πυκνή άμμο (μπλε καμπύλη), όπως προέκυψε από τις μονοτονικές δοκιμές ακτινικής φόρτισης. Οι διαδρομές τάσεων των R-6 ($q/p' = 0.98$) και R-1 ($q/p' = 1.02$), τοποθετούνται μακριά από την περιβάλλουσα αστοχίας, ενώ της R-4 ($q/p' = 1.10$) πλησιάζει την περιβάλλουσα αστοχίας της πυκνής ($e_i = 0.557-0.565$) άμμου.

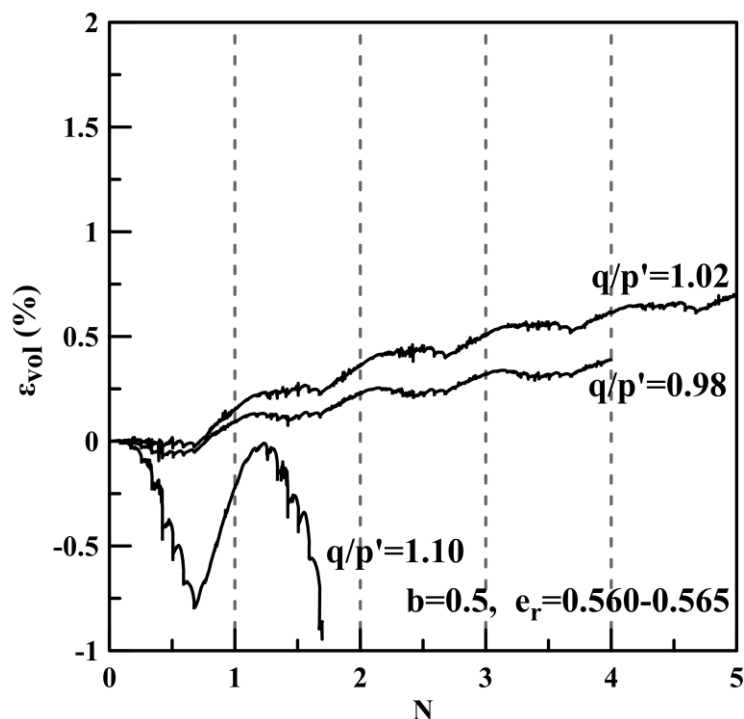


Σχήμα 7.11: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$

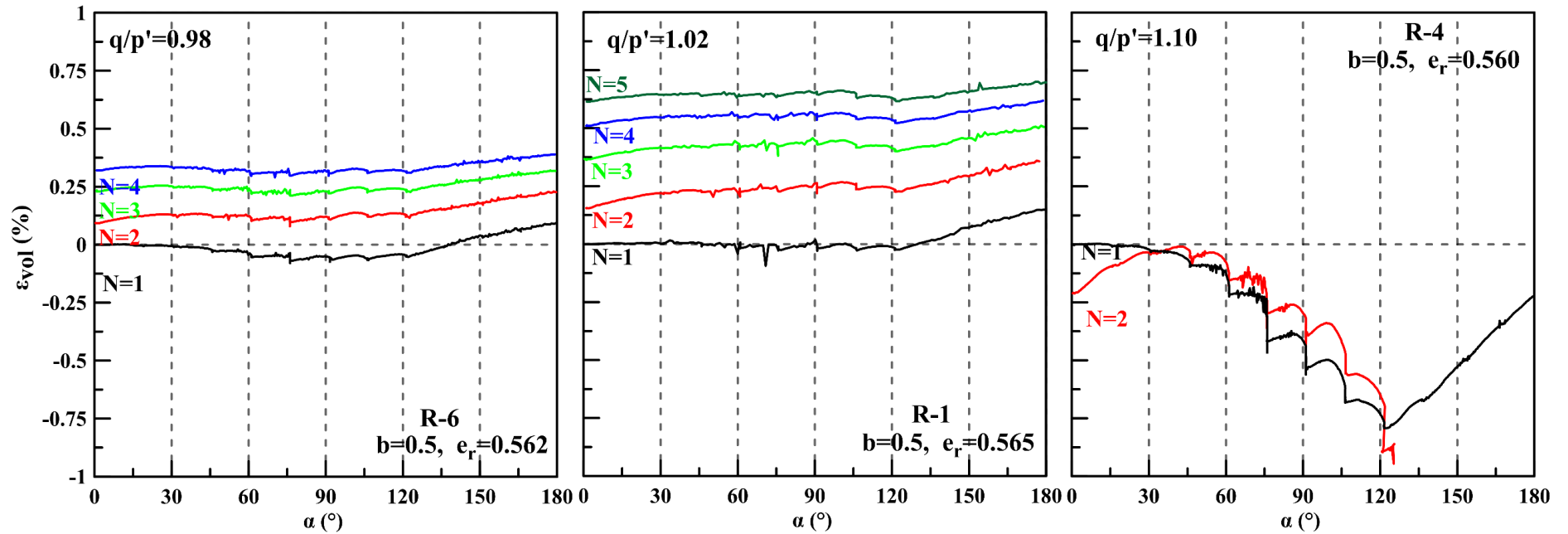
Η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης με τους κύκλους περιστροφής και με τη γωνία α στα πυκνά δοκίμια άμμου M31 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.12** και στο **Σχήμα 7.13** αντίστοιχα. Παρόλο που τα δοκίμια R-6 και R-1 φορτίζονται ακτινικά έως να ξεπεράσουν το σημείο αλλαγής φάσης και βρίσκονται στη φάση της διαστολής (**Σχήμα 7.10**), όταν εκκινεί η στροφή των αξόνων παρατηρείται ότι τα δοκίμια συσσωρεύουν συστολική παραμόρφωση, αντί να συνεχίσουν να διαστέλλονται. Η παραμένουσα συστολική παραμόρφωση αυξάνεται με τους κύκλους περιστροφής, αλλά ο ρυθμός

αύξησης μειώνεται. Μάλιστα η αύξηση του λόγου τάσεων από $q/p'=0.98$ σε 1.02 οδηγεί σε αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης που αναπτύσσεται σε κάθε κύκλο. Κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου, παρατηρείται διακύμανση της ογκομετρικής παραμόρφωσης με τη μεταβολή της γωνίας α (Σχήμα 7.13). Η ογκομετρική παραμόρφωση παραμένει σταθερή ή μειώνεται ελάχιστα για $\alpha=0$ έως 120° , ενώ αυξάνεται από $\alpha=120$ έως 180° . Επισημαίνεται ότι σε κάθε πλήρη κύκλο, N , η γωνία α μεταβάλλεται από 0 έως 180° και ότι η συστολή σημειώνεται ως θετική ογκομετρική παραμόρφωση. Όταν ο λόγος τάσεων της στροφής αυξάνεται περεταιίρω ($R-4$, $q/p=1.10$) προσεγγίζοντας την περιβάλλουσα αστοχίας, παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά. Εντοπίζεται έντονη διακύμανση της ογκομετρικής παραμόρφωσης με το δοκίμιο να διαστέλλεται από $\alpha=0$ έως 120° , και στη συνέχεια να συστέλλεται από $\alpha=120$ έως 180° . Τελικά το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία πριν ολοκληρωθεί ο 2^{ος} κύκλος περιστροφής όταν η γωνία κύριας τάσης είναι $\alpha=122^\circ$.

Η επίδραση της πυκνότητας των δοκιμών όταν επιβάλλεται η στροφή των αξόνων είναι εμφανής στην εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης. Στα χαλαρότερα δοκίμια που δεν αστόχησαν, η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση που αναπτύσσεται είναι μεγαλύτερη απ' ότι στα πυκνά. Επιπλέον, δεν εμφανίζεται διακύμανση της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου, όπως στην περίπτωση των πυκνών δοκιμών, παρά μόνο συστολή. Ωστόσο, στη συνεχή συστολή συμβάλλει και το γεγονός ότι στα χαλαρότερα δοκίμια η στροφή εκκίνησε πριν το σημείο αλλαγής φάσης. Σχετικά με τις δοκιμές που αστόχησαν και το πυκνό δοκίμιο και το δοκίμιο μέσης πυκνότητας αστόχησαν κατά τη διάρκεια του 2^{ου} κύκλου φόρτισης σε $\alpha=120-122^\circ$.



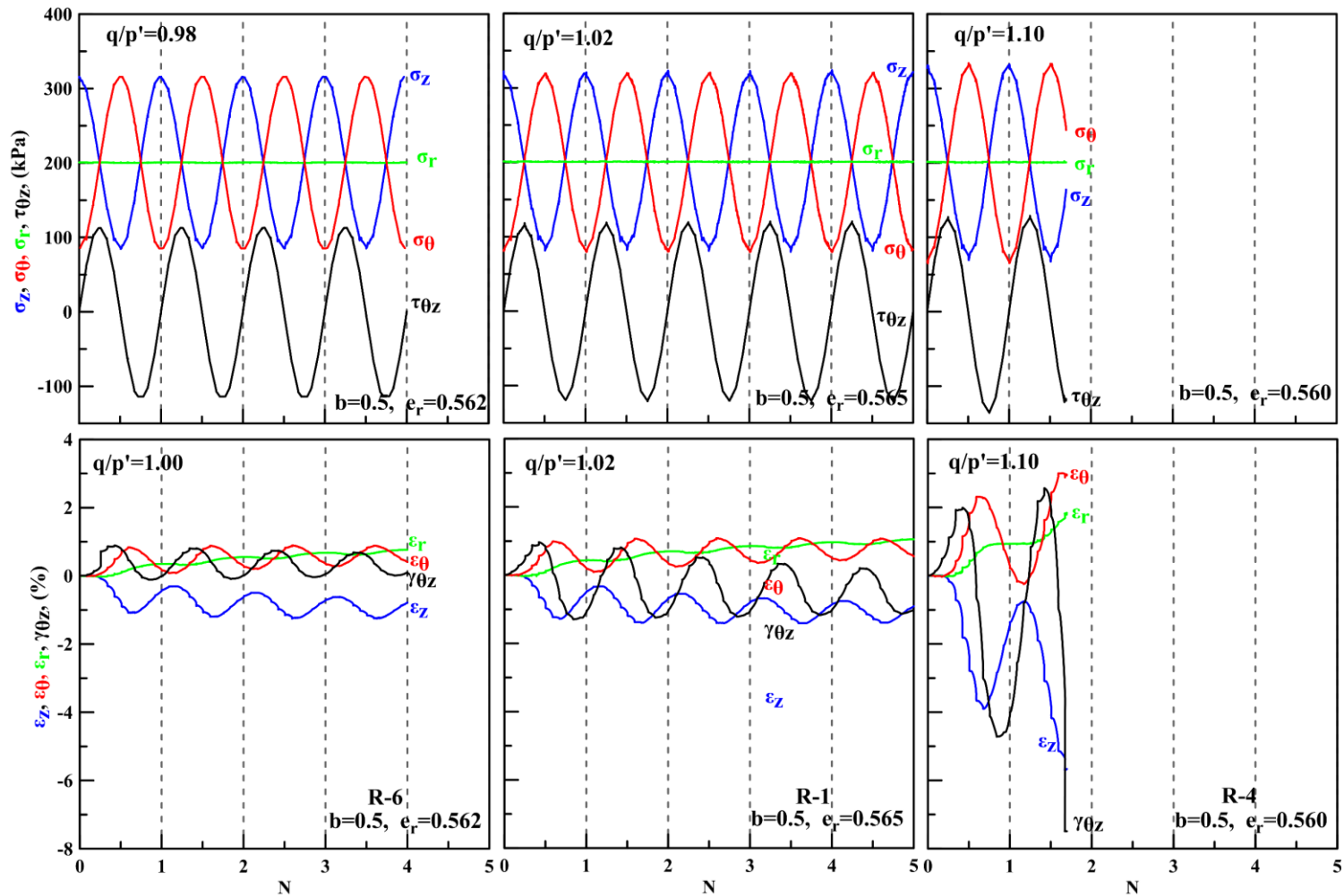
Σχήμα 7.12: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N



Σχήμα 7.13: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0.5$ της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ε_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο περιστροφής, N

Οι επιβαλλόμενες τάσεις (σ_z , σ_θ , σ_r και $\tau_{z\theta}$) και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις (ε_z , ε_θ , ε_r και $\gamma_{z\theta}$) που αναπτύχθηκαν κατά τη στροφή των αξόνων σε πυκνά δοκίμια άμμου M31 παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7.14**. Στις δοκιμές στροφής υπό $q/p'=0.98$ και 1.02 όπου δεν παρατηρήθηκε αστοχία, το πλάτος των παραμορφώσεων ε_z , ε_θ , και $\gamma_{z\theta}$ σταθεροποιείται με το πέρας των κύκλων περιστροφής, με το πλάτος της ταλάντωσής τους να είναι μεγαλύτερο στον 1^ο κύκλο στροφής. Η ακτινική παραμόρφωση ε_r , αναπτύσσεται κυρίως στον 1^ο κύκλο φόρτισης, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησής της μειώνεται. Συμπεραίνεται ότι η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων προκαλεί μία αναδιάταξη της δομής έως το εδαφικό δοκίμιο να οδηγηθεί σε μια νέα «σταθερή» κατάσταση με ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητάς του. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρείται συσσώρευση εφελκυστικής κατακόρυφης παραμόρφωσης (ε_z) θετικής ακτινικής (ε_r) και εφαπτομενικής (ε_θ) παραμόρφωσης. Επισημαίνεται ότι λόγω της κατακόρυφης απόθεσης (άξονας z) κατά την παρασκευή του δοκιμίου, αλλά και της αρχικής ακτινικής φόρτισης στην κατακόρυφη διεύθυνση ($\alpha=0^\circ$), πριν την εκκίνηση της στροφής, το εδαφικό δοκίμιο αναπτύσσει μικρότερη συμπίεστικότητα κατά τον κατακόρυφο άξονα σε σχέση με τη θ- διεύθυνση. Επομένως, κατά την εκκίνηση της στροφής όπου η σ_z μειώνεται και ταυτόχρονα αυξάνεται η σ_θ αναμένουμε αύξηση της ε_θ και μείωση της ε_z . Το μεγαλύτερο ποσοστό των παραμορφώσεων αναπτύσσεται κατά το πρώτο κύκλο στροφής και συγκεκριμένα κατά στο πρώτο μισό του, όπου για πρώτη φορά η γωνία α μεταβάλλεται από 0 έως 90° . Επομένως η εφελκυστική κατακόρυφη (ε_z) και η θλιπτική εφαπτομενική (ε_θ) παραμόρφωση που αναπτύχθηκαν στο πρώτο μισό του 1^{ου} κύκλου στροφής υπερσχύουν στη μετέπειτα εξέλιξη των παραμορφώσεων με την αύξηση του αριθμού των κύκλων.

Η αύξηση του λόγου τάσεων (q/p') κατά τη στροφή των αξόνων στα πυκνά δοκίμια οδηγεί σε μεγαλύτερες συνολικά παραμορφώσεις και σε αύξηση του πλάτους της ταλάντωσής τους (κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου στροφής. Περαιτέρω αύξηση του λόγου τάσεων (R-4, όπου $q/p'=1.10$) οδηγεί στην ανάπτυξη πολύ μεγάλων επιμέρους παραμορφώσεων με έντονη διακύμανση στον 1^ο κύκλο στροφής και τελικά στην αστοχία πριν ολοκληρωθεί ο 2^{ος} κύκλος όταν $\alpha=122^\circ$.



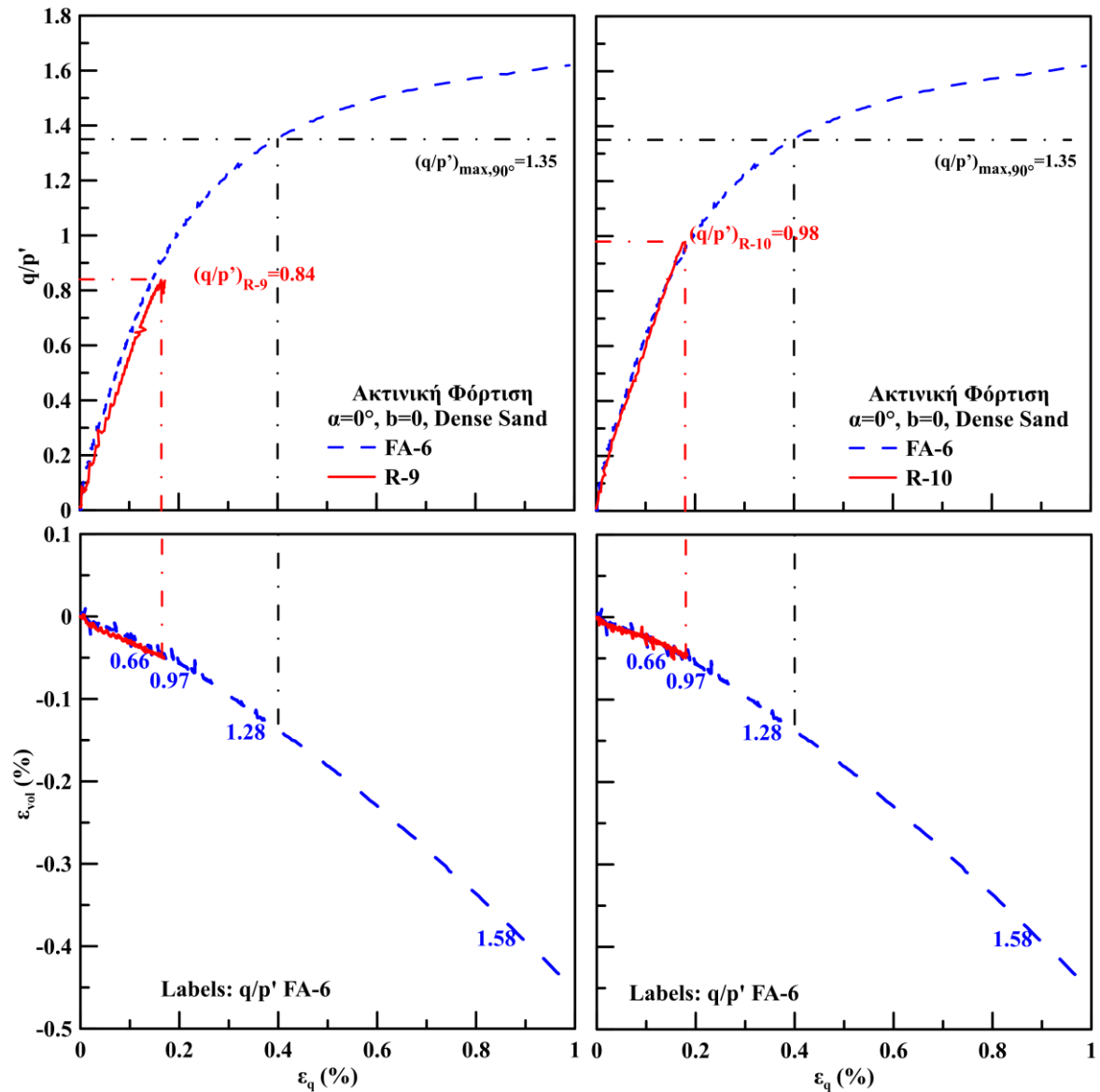
Σχήμα 7.14: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0.5$ της πυκνής άμμου M31. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N

7.3.2 Επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b

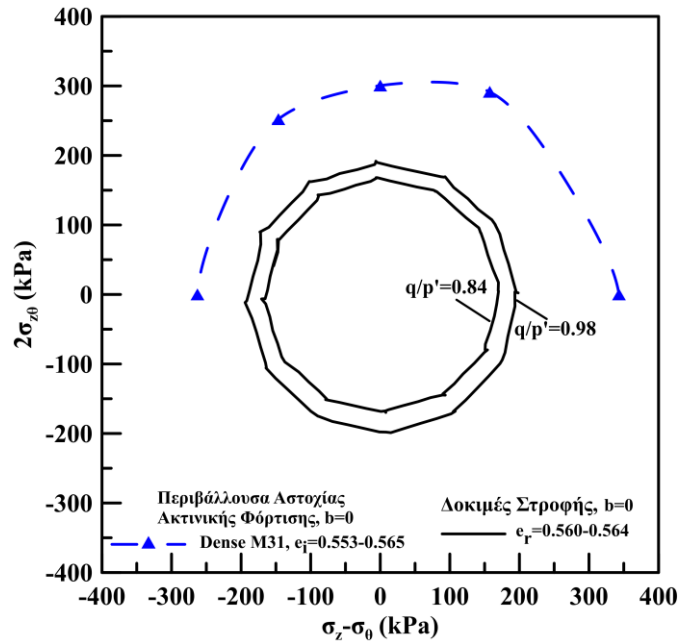
Η ακτινική φόρτιση της πυκνής άμμου M31 υπό $\alpha=0^\circ$ και $b=0.5$ οδηγεί σε εκμηδενισμό της συστολής και στην απευθείας διαστολή των δοκιμίων. Επομένως η στροφή μετά την ακτινική φόρτιση υπό οποιονδήποτε λόγο τάσεων q/p' θα εκτελεστεί ενώ το δοκίμιο βρίσκεται στη φάση της διαστολής. Στο **Σχήμα 7.15** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών R-9 και R-10 κατά την ακτινική φόρτιση, ελεύθερης στράγγισης υπό $\alpha=0^\circ$ και $b=0$ έως το σημείο εκκίνησης της στροφής, σε όρους λόγου τάσεων - αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($q/p'-\varepsilon_q$) και ογκομετρικής-αποκλίνουσας παραμόρφωσης ($\varepsilon_{vol}-\varepsilon_q$). Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και τα αποτελέσματα της αντίστοιχης δοκιμής ακτινικής φόρτισης FA-6 (μπλε διακεκομμένη γραμμή). Επιπρόσθετα, με μαύρη διακεκομμένη γραμμή επισημαίνεται ο λόγος τάσεων στην αστοχία για φόρτιση υπό $\alpha=90^\circ$ και $b=0$ ($(q/p')_{\max,90^\circ}=1.35$) της πυκνής άμμου M31. Παρατηρούμε ότι και στα 2 δοκίμια η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων εκκινεί όταν το δοκίμιο διαστέλλεται, αφού υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης δεν παρατηρείται φάση συστολής και ταυτόχρονα υπό λόγο τάσεων μικρότερο από αυτό της αστοχίας υπό $\alpha=90^\circ$, $q/p' < (q/p')_{\max,90^\circ}=1.35$.

Στο **Σχήμα 7.16** παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων των δοκιμών στροφής υπό ελεύθερη στράγγιση στην πυκνή άμμο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$. Η στροφή πραγματοποιείται υπό σταθερή ενεργό τάση $p'=200\text{kPa}$ και υπό σταθερή παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0$. Τα δοκίμια τη στιγμή εκκίνησης της στροφής των αξόνων είχαν δείκτη πόρων $e_i=0.560-0.564$. Επιπλέον, παρατίθεται η περιβάλλουσα αστοχίας για την πυκνή άμμο (μπλε καμπύλη), όπως προέκυψε από τις μονοτονικές δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό $b=0$ για $\alpha=0, 30, 45, 60$ και 90° . Οι διαδρομές τάσεων των R-9 ($q/p'=0.84$) και R-10 ($q/p'=0.98$), τοποθετούνται μακριά από την περιβάλλουσα αστοχίας της πυκνής ($e_i=0.553-0.565$) άμμου M31.

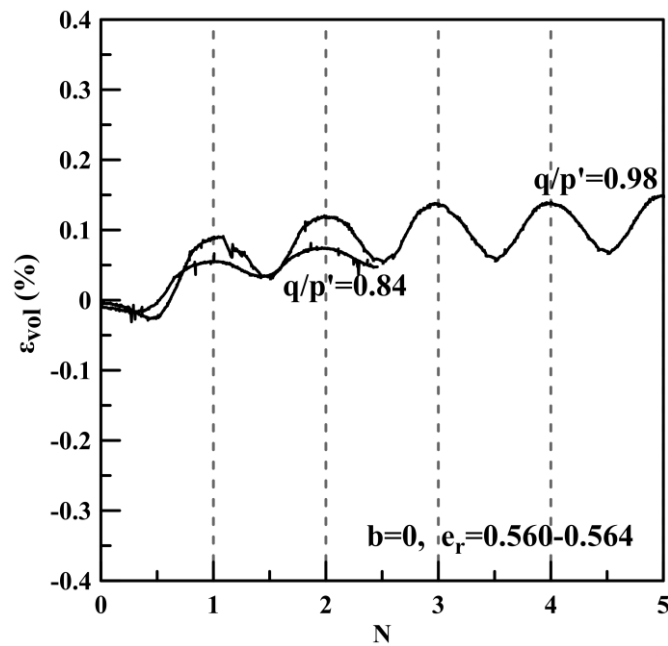
Η εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης με τους κύκλους στροφής και με τη γωνία α στα πυκνά δοκίμια άμμου M31 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.18** και **Σχήμα 7.19** αντίστοιχα. Παρόλο που τα δοκίμια R-9 και R-10 κατά την ακτινική φόρτιση διαστέλλονταν, όταν εκκινεί η στροφή των αξόνων παρατηρείται ότι τα δοκίμια τελικά συσσωρεύουν συστολική παραμόρφωση. Η ογκομετρική παραμόρφωση αυξάνεται με την αύξηση του λόγου τάσεων q/p' . Σε κάθε κύκλο στροφής παρατηρείται μια διακύμανση με την ανάπτυξη διαστολικής παραμόρφωσης από 0 έως 90° και στη συνέχεια συστολικής από 90 έως 180° . Μετά τον 1° κύκλο στροφής δεν συσσωρεύεται περαιτέρω ογκομετρική παραμόρφωση με τις καμπύλες της ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με τη γωνία α να ταυτίζονται για τους κύκλους $N=2$ έως 5 .



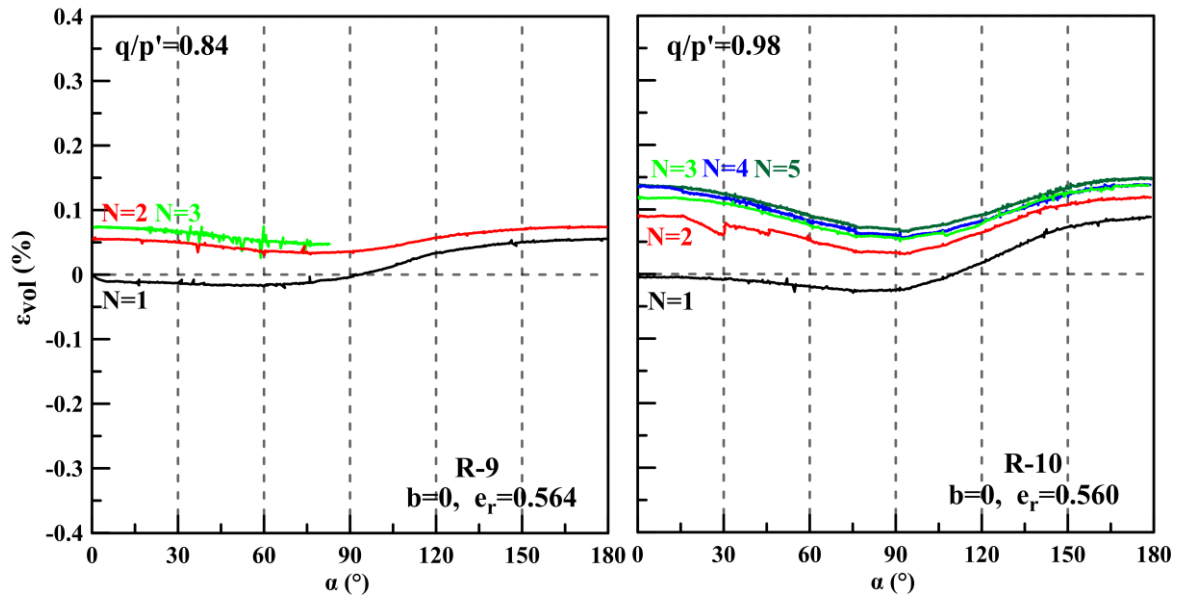
Σχήμα 7.15: Ακτινική φόρτιση υπό $\alpha=0^\circ$ και $b=0$ των δοκιμών R-9, R-10 και FA-6. Καμπύλες λόγου τάσεων-αποκλίουσας παραμόρφωσης ($q/p'-\epsilon_q$) και καμπύλες ογκομετρικής-αποκλίουσας παραμόρφωσης ($\epsilon_{vol}-\epsilon_q$)



Σχήμα 7.16: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή υπό $b=0$ της πυκνής άμμου M31. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο στο επίπεδο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_z - \sigma'_\theta)$

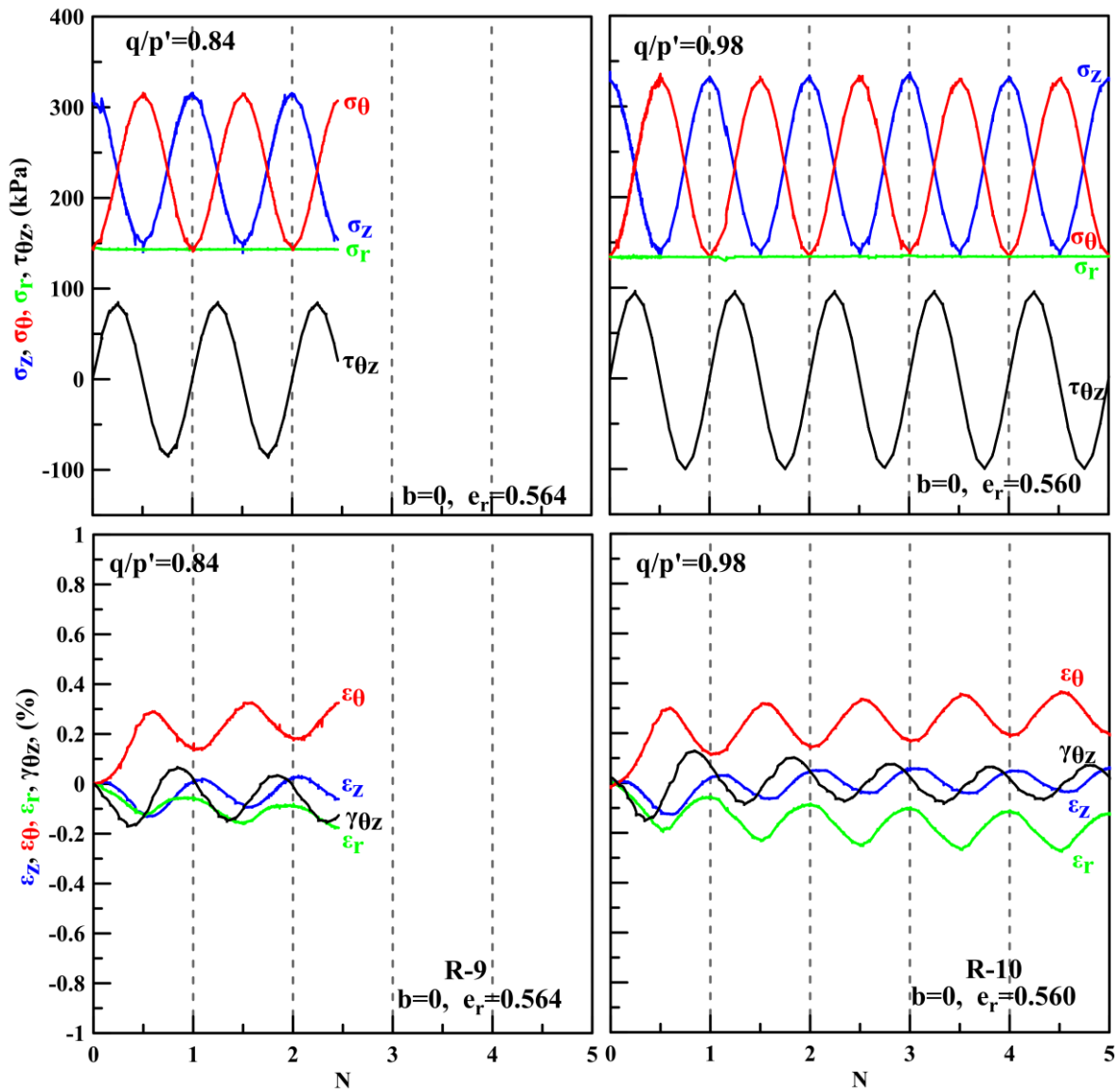


Σχήμα 7.17: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N



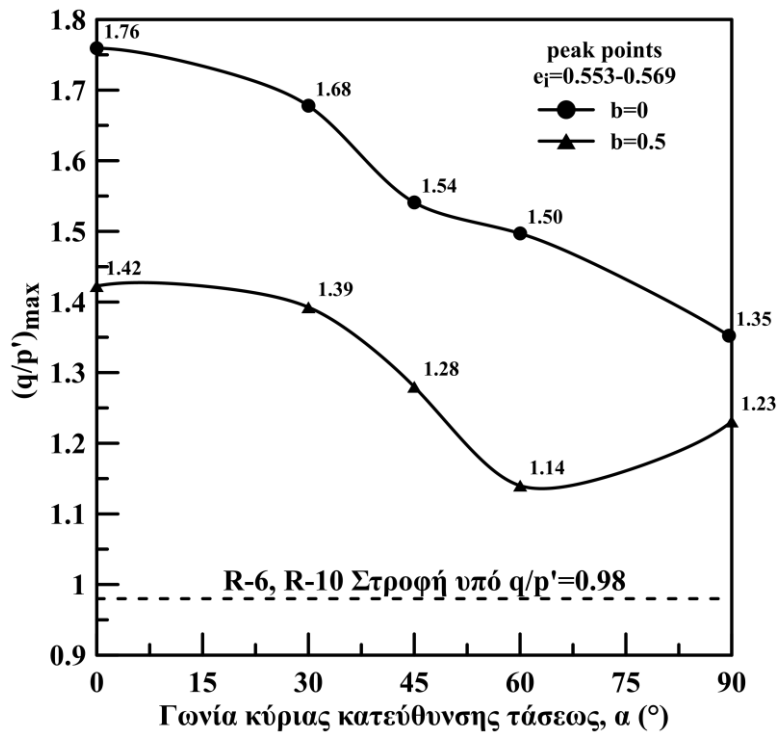
Σχήμα 7.18: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή υπό $b=0$ της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο στροφής, N

Οι επιβαλλόμενες τάσεις (σ_z , σ_θ , σ_r και $\tau_{z\theta}$) και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις (ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r και $\gamma_{z\theta}$) που αναπτύχθηκαν κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0$ στην πυκνή άμμο M31 παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7.14**. Στις δοκιμές στροφής υπό $q/p'=0.84$ και 0.98 δεν παρατηρήθηκε αστοχία, το πλάτος των παραμορφώσεων ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r και $\gamma_{z\theta}$ σταθεροποιείται μετά τον 1^ο κύκλο φόρτισης. Συμπεραίνεται ότι η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων προκαλεί μία αναδιάταξη της δομής έως το εδαφικό δοκίμιο να οδηγηθεί σε μια νέα «σταθερή» κατάσταση. Υπό αυτές τις συνθήκες οι παραμορφώσεις αναπτύσσουν τη μέγιστη τιμή τους στον 1^ο κύκλο στροφής και στη συνέχεια ταλαντώνονται υπό σταθερό πλάτος. Η κατακόρυφη παραμόρφωση (ϵ_z), αρχικά είναι αρνητική, αλλά στη συνέχεια εμφανίζει μια σταθερή διακύμανση διαστολικής και συστολικής συμπεριφοράς. Η εφαπτομενική (ϵ_θ) παραμόρφωση είναι θλιπτική ενώ η ακτινικής (ϵ_r) είναι εφελκυστική. Υπενθυμίζεται ότι λόγω της κατακόρυφης απόθεσης (άξονας z) κατά την παρασκευή του δοκίμιου, αλλά και της αρχικής ακτινικής φόρτισης στην κατακόρυφη διεύθυνση ($\alpha=0^\circ$), πριν την εκκίνηση της στροφής, το εδαφικό δοκίμιο αναπτύσσει μικρότερη συμπίεση κατά τον κατακόρυφο άξονα σε σχέση με τη θ - διεύθυνση. Επομένως, κατά την εκκίνηση της στροφής όπου η σ_z μειώνεται και ταυτόχρονα αυξάνεται η σ_θ αναμένουμε αύξηση της ϵ_θ και μείωση της ϵ_z . Η αύξηση του λόγου τάσεων (q/p') κατά τη στροφή των αξόνων οδηγεί σε μεγαλύτερες συνολικά παραμορφώσεις και σε αύξηση του πλάτους της ταλάντωσής τους κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου στροφής.



Σχήμα 7.19: Επίδραση του λόγου τάσεων q/p' κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0$ της πυκνής άμμου M31. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N

Η επίδραση του μεγέθους της ενδιάμεσης κύριας τάσης, σ_2 , κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων μελετάται αναλυτικά συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών στροφής στην πυκνή άμμο με κοινό λόγο τάσεων q/p' . Η στροφή των αξόνων εκτελέστηκε υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε δοκίμια ίδιας πυκνότητας ($e_r=0.562$ και 0.565) υπό σταθερό λόγο τάσεων $q/p'=0.98$ και υπό παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης $b=0.5$ (R-6) και $b=0$ (R10). Και τα δύο δοκίμια κατά την ακτινική τους φόρτιση, πριν την εκκίνηση της στροφής, βρισκόταν στη φάση της διαστολής. Στο **Σχήμα 7.20** παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες αστοχίας, όπως προέκυψαν από τις μονοτονικές δοκιμές ακτινικής φόρτισης υπό $b=0$ και $b=0.5$ για $\alpha=0, 30, 45, 60$ και 90° της πυκνής άμμου. Σημειώνεται ο λόγος τάσεων $q/p'=0.98$ που διατηρείται σταθερός κατά τις δοκιμές στροφής R-6 και R-10.

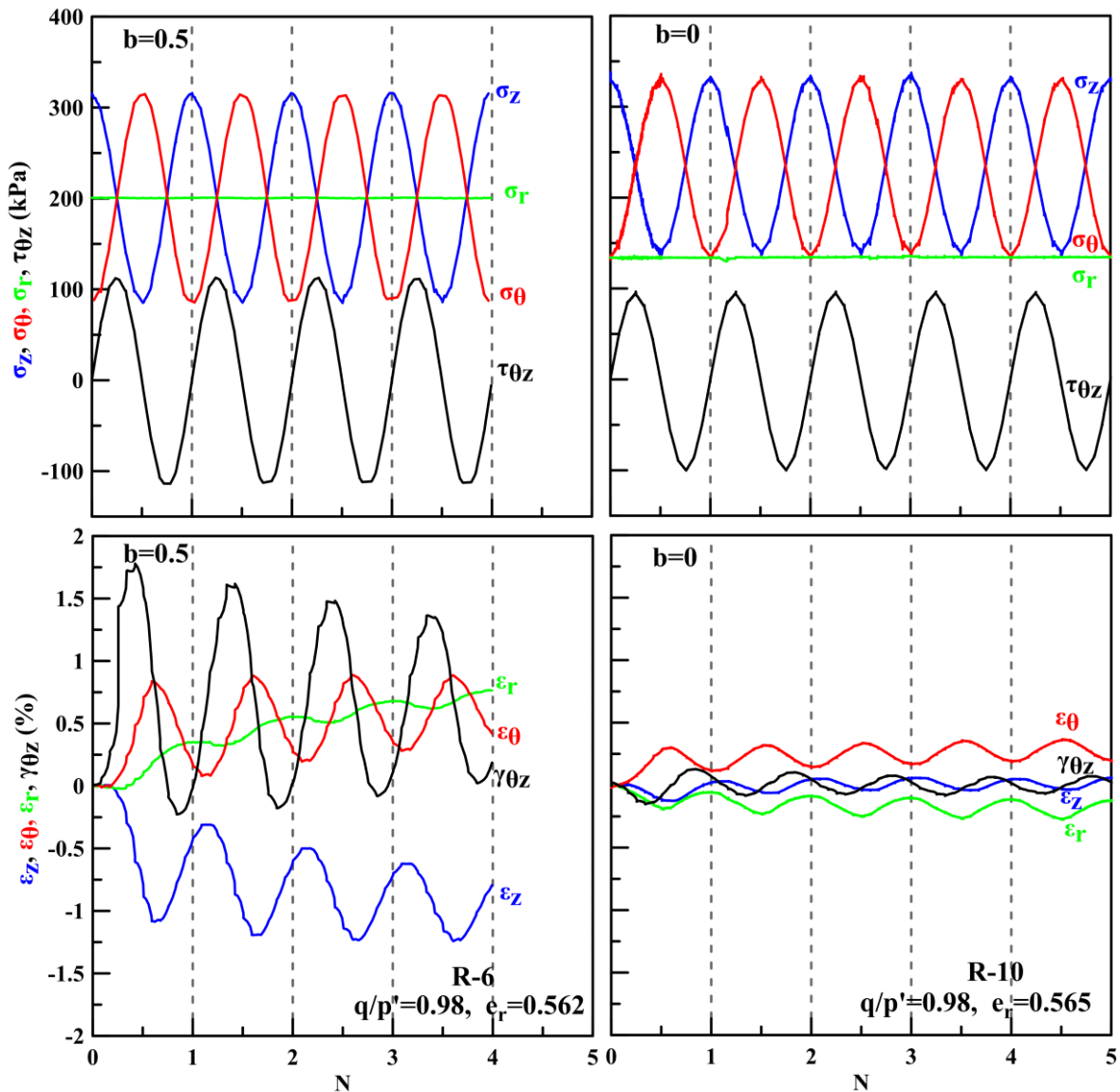


Σχήμα 7.20: Συσχέτιση του λόγου τάσεων των δοκιμών στροφής με τις περιβάλλουσες αστοχίας ακτινικής φόρτισης της πυκνής άμμου υπό $b=0$ και 0.5

Στο **Σχήμα 7.21** παρουσιάζονται οι επιβαλλόμενες τάσεις (σ_z , σ_θ , σ_r και $\tau_{z\theta}$) και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις (ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r και $\gamma_{z\theta}$) που αναπτύχθηκαν κατά τη στροφή των αξόνων υπό $b=0.5$ και $b=0$ στην πυκνή άμμο M31. Η επιρροή της ενδιάμεσης κύριας τάσης αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντική. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της παραμέτρου b οδηγεί στην αύξηση του μεγέθους των επιμέρους παραμορφώσεων και στην αύξηση του πλάτους της ταλάντωσής τους. Όταν η στροφή εκτελείται υπό $b=0$ οι παραμορφώσεις εμφανίζουν το μέγιστο πλάτος τους στον 1^ο κύκλο στροφής και μετά ταλαντώνονται υπό ένα σταθερό πλάτος. Στην περίπτωση που η στροφή εκτελείται υπό $b=0.5$ η σταθεροποίηση του πλάτους της ταλάντωσης των παραμορφώσεων καθυστερεί περισσότερο. Συγκεκριμένα, το μέγιστο πλάτος των παραμορφώσεων εμφανίζεται στον 1^ο κύκλο και στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση του πλάτους ταλάντωσης των επιμέρους παραμορφώσεων, χωρίς ωστόσο να σταθεροποιείται εντελώς έως τον 4^ο κύκλο στροφής.

Η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης b οδηγεί στην αύξηση του μεγέθους όλων των επιμέρους παραμορφώσεων, αλλά αλλάζει δραστικά την απόκριση της ακτινικής παραμόρφωση (ϵ_r) από θλιπτική/συστολική ($b=0$) σε εφελκυστική/διαστολική ($b=0.5$). Η τιμή της παραμέτρου b εκφράζει τον περιορισμό κατά την ακτινική διεύθυνση. Επομένως, όταν ο περιορισμός είναι μικρός ($b=0$) αναπτύσσεται διαστολική ακτινική παραμόρφωση (ϵ_r), ενώ όταν ο περιορισμός αυξάνεται ($b=0.5$) εμφανίζεται θλιπτική/συστολική ακτινική παραμόρφωση. Για τιμή της παραμέτρου

$b \sim 0.2-0.3$ αναμένεται μηδενική ακτινική παραμόρφωση (plane strain) όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα των ακτινικών δοκιμών του Κεφαλαίου 6.

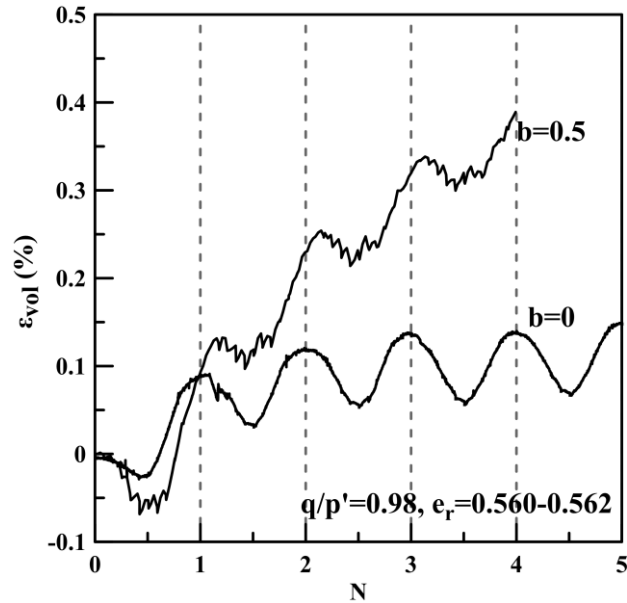


Σχήμα 7.21: Επίδραση της παραμέτρου b κατά τη στροφή των αξόνων της πυκνής άμμου M31. Επιβαλλόμενες τάσεις και εξέλιξη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N

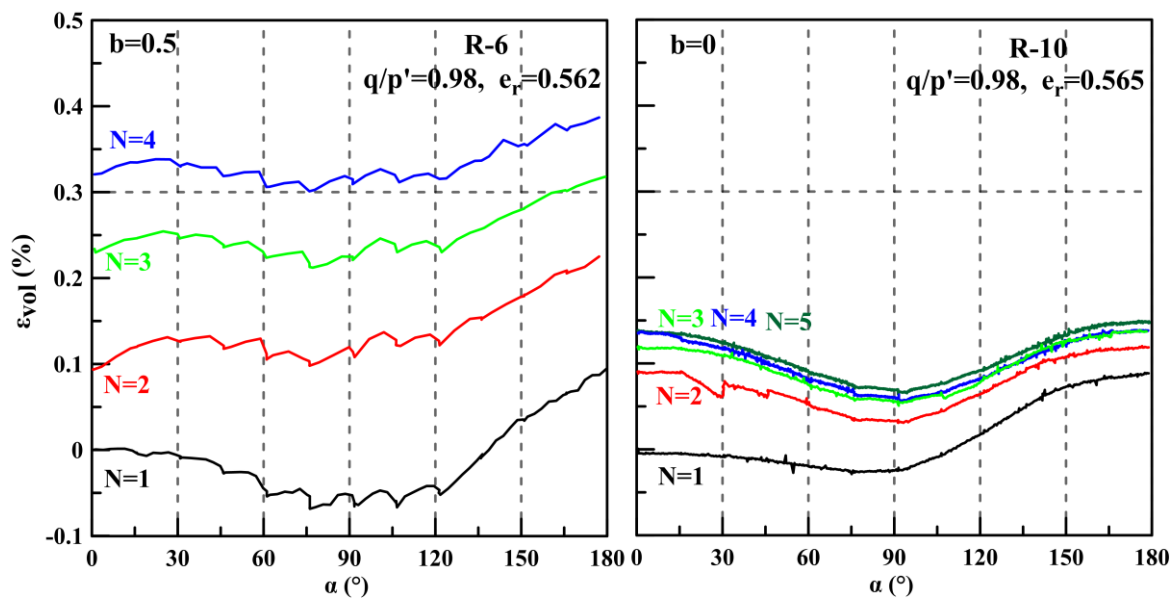
Η επίδραση της παραμέτρου b στην εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης με τους κύκλους στροφής και με τη γωνία α στα πυκνά δοκίμια άμμου M31 παρουσιάζεται στο

Σχήμα 7.22 και στο **Σχήμα 7.23** αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και τα δύο δοκίμια συσσωρεύουν συστολική παραμόρφωση παρά τη διαστολή τους κατά την ακτινική φόρτιση. Η ογκομετρική παραμόρφωση αυξάνεται με την αύξηση της παραμέτρου b . Όταν η στροφή εκτελείται υπό $b=0$ η συσσώρευση της ογκομετρικής παραμόρφωσης σταματά μετά τον 1^ο κύκλο στροφής, ενώ υπό $b=0.5$ η ογκομετρική παραμόρφωση συνεχίζει να αυξάνεται με τους κύκλους στροφής, αλλά με μικρότερο ρυθμό. Σε κάθε

κύκλο στροφής παρατηρείται μια διακύμανση της ογκομετρικής παραμόρφωσης, με τη διαστολική παραμόρφωση να είναι μεγαλύτερη υπό $b=0$ και τη συστολική παραμόρφωση μεγαλύτερη υπό $b=0.5$. το Η συστολική παραμόρφωση εμφανίζεται όταν $\alpha \approx 90^\circ$ ή 120° για $b=0$ και 0.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.22: Επίδραση της παραμέτρου b κατά τη στροφή των αξόνων της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , με τον αριθμό περιστροφών των αξόνων των κύριων τάσεων, N



Σχήμα 7.23: Επίδραση της παραμέτρου b κατά τη στροφή των αξόνων της πυκνής άμμου M31. Εξέλιξη της ογκομετρικής παραμόρφωσης, ϵ_{vol} , σε σχέση με τη γωνία α για κάθε κύκλο στροφής, N

Επισημαίνεται ότι η αύξηση των παραμορφώσεων (ϵ_z , ϵ_θ , ϵ_r και $\gamma_{z\theta}$) και η μεγαλύτερη συστολή που παρατηρείται στη στροφή υπό μεγαλύτερη παράμετρο ενδιάμεσης κύριας

τάσης (b) οφείλεται στη γενικότερη ασθενέστερη απόκριση της άμμου υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης. Δηλαδή, ο κοινός λόγος τάσεων των δοκιμών στροφής (R-6 και R-10), $q/p'=0.98$, είναι πιο «δυσμενής» στην περίπτωση της R-6 αφού είναι πιο κοντά στην περιβάλλουσα αστοχίας της πυκνής άμμου υπό $b=0.5$ σε σχέση με αυτήν υπό $b=0$ (**Σχήμα 7.20**). Επομένως, οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά τη στροφή υπό $b=0.5$ είναι αναμενόμενες. Γενικότερα ανάλογα με τη φόρτιση οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται αντανακλούν έμμεσα τη δομή του υλικού π.χ. θλιπτική ακτινική παραμόρφωση, ϵ_r , για $b=0.5$ (**Σχήμα 7.21**) και μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση (**Σχήμα 7.23**) σε σχέση με τη φόρτιση υπό $b=0$ όπου η ϵ_r είναι εφελκυστική και η ογκομετρική παραμόρφωση μικρότερη.

7.4 Μη συγγραμμική συμπεριφορά της άμμου M31 υπό δοκιμές συνεχούς στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων

Η μη συγγραμμικότητα / μη ομοαξονικότητα (non-coaxiality) της άμμου, δηλαδή η απόκλιση της κατεύθυνσης των κύριας τάσης από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης, εντοπίζεται στη βιβλιογραφία κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό συνθήκες εμποδιζόμενης (Symes et al., 1984; P. K. Triantafyllos et al., 2021) και ελεύθερης (K. Miura, Miura, et al., 1986; Tong et al., 2010; Cai et al., 2013) στράγγισης. Το ελαστικό τμήμα της ολικής παραμόρφωσης θεωρείται αμελητέο σε σχέση με το πλαστικό τμήμα (Gutierrez et al., 1991) γι' αυτό και σε πολλές έρευνες για τον υπολογισμό της συγγραμμικότητας χρησιμοποιείται η κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής ολικής (ελαστική και πλαστική) παραμόρφωσης (L.-T. Yang et al., 2016; P. K. Triantafyllos et al., 2021), όπως και στην παρούσα διατριβή.

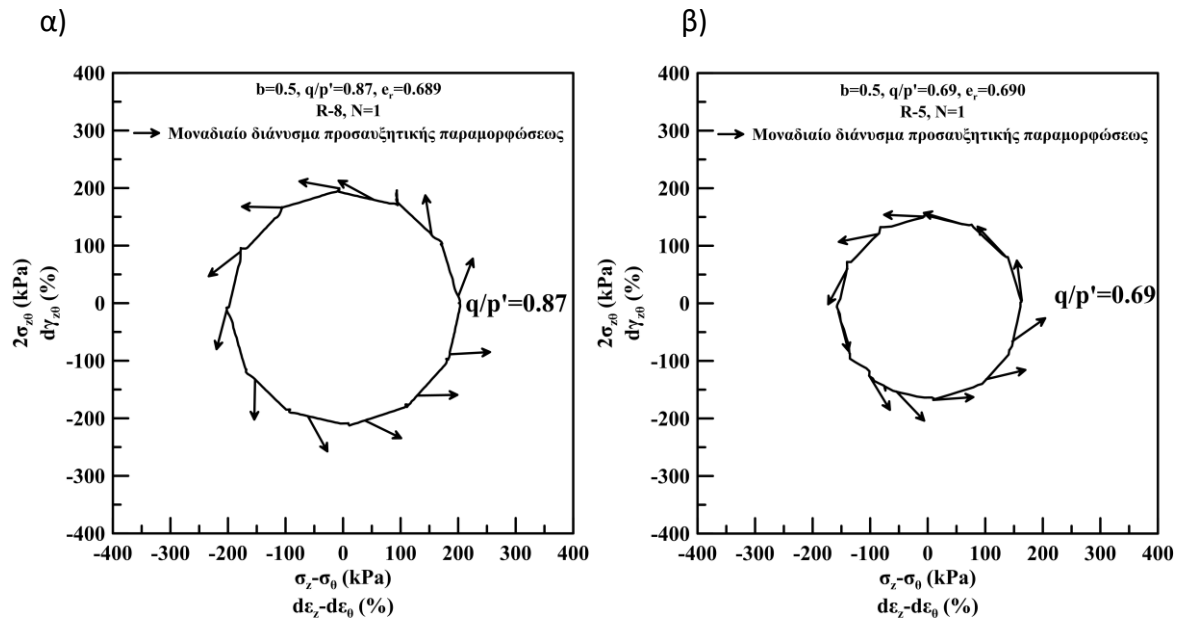
Για τη διερεύνηση της μη συγγραμμικής συμπεριφοράς της άμμου εκτελέστηκαν δοκιμές συνεχούς στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων υπό ελεύθερη στράγγιση στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης, διατηρώντας σταθερό το λόγο τάσεων, q/p' , και την παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης b ($b=0$ και 0.5) σε μέσης πυκνότητας και σε πυκνά δοκίμια άμμου M31. Τα δοκίμια που ανέπτυξαν μεγάλες παραμορφώσεις από τον πρώτο κύκλο περιστροφής και τελικά οδηγήθηκαν στην αστοχία δεν παρουσιάζονται καθώς δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός των προσαυξητικών παραμορφώσεων με ακρίβεια. Στο **Σχήμα 7.24** παρουσιάζεται η διαδρομή τάσεων (πράσινη καμπύλη) στο χώρο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$ και ενδεικτικά ένα μοναδιαίο διάνυσμα προσαυξητικής ολικής παραμόρφωσης (μπλε διάνυσμα) στο χώρο $d\gamma_{z\theta} - (d\epsilon_{zz} - d\epsilon_{\theta\theta})$. Η γωνία προσαυξητικής παραμόρφωσης, α_{de} , ορίζεται από το μοναδιαίο διάνυσμα προσαυξητικής παραμόρφωσης και την οριζόντιο και η γωνία προσαυξητικής τάσης, α_{σ} , ορίζεται από το διάνυσμα προσαυξητικής τάσης (πράσινο διάνυσμα) και την οριζόντιο. Το διάνυσμα προσαυξητικής τάσης είναι πάντα εφαπτόμενο στη διαδρομή τάσεων που είναι ένας κύκλος. Η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα σ , d_{σ} και d_{ϵ} με τον οριζόντιο άξονα είναι ίση με 2α , $2\alpha_{d\sigma}$ και $2\alpha_{de}$, αντίστοιχα. Η γωνία μη ομοαξονικότητας (non-coaxiality angle) υπολογίζεται ως $\beta=2\alpha_{de}-2\alpha$ και υποδεικνύει την απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης της προσαυξητικής παραμορφώσεως

γίνουν εφαπτομενικά στην κυκλική διαδρομή τάσεων συνεπώς τείνουν να γίνουν ομοαξονικά με την προσαυξητική τάση. Σε υψηλότερο λόγο τάσεων ($q/p'=0.87$) τα διανύσματα απομακρύνονται από την κατεύθυνση της προσαυξητικής τάσης πλησιάζοντας την κατεύθυνση της κύριας τάσης (ακτινική διεύθυνση). Επομένως, όσο αυξάνεται ο λόγος τάσεων και συσσωρεύονται παραμορφώσεις, η απόκριση τείνει να γίνει πλαστική.

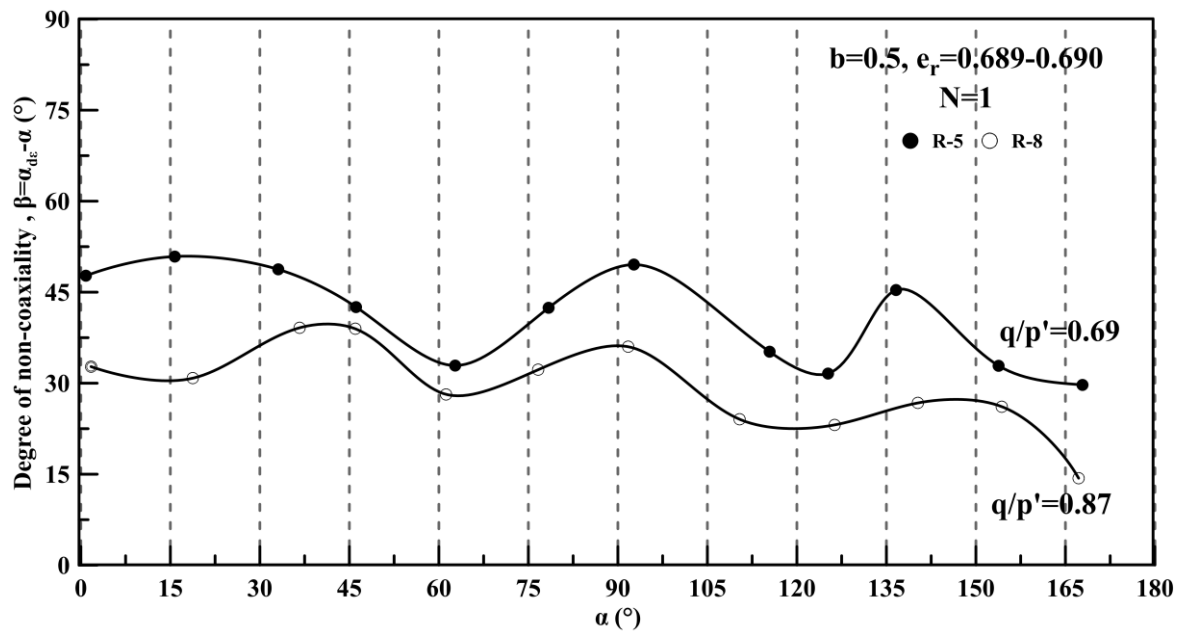
Στο **Σχήμα 7.26** παρουσιάζεται η γωνία μη ομοαξονικότητας, β , για τις δοκιμές R-5 ($q/p'=0.69$) και R-8 ($q/p'=0.87$). Η γωνία μη ομοαξονικότητας, β , επηρεάζεται από την αλλαγή του προσανατολισμού του σ'_1 -άξονα ως προς την κατακόρυφο σε μια πλήρη στροφή εμφανίζοντας έντονη διακύμανση. Η μικρότερη τιμή της γωνίας β και για τις δύο δοκιμές παρατηρείται όταν $\alpha \approx 60^\circ$ και 120° . Επιπλέον, η γωνία β φθίνει με την αύξηση του λόγου τάσεων με τις τιμές της να κυμαίνονται από 48° έως 35° για $q/p'=0.69$ και από 40° έως 28° για $q/p'=0.87$. Σε σχέση με τα αποτελέσματα της ακτινικής φόρτισης (σταθερή γωνία α) η μη ομοαξονική συμπεριφορά είναι πολύ πιο έντονη υπό τη συνεχή μεταβολή της γωνίας α .

Η επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , στη μη συγγραμμική συμπεριφορά εξετάζεται στο **Σχήμα 7.27** όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών στροφής των αξόνων για $N=1$ σε πυκνά δοκίμια ($e_r=0.560-0.561$) άμμου M31 υπό λόγο τάσεων $q/p=0.98$. Οι διαδρομές τάσεων παρουσιάζονται στο χώρο $2\tau_{z\theta} - (\sigma'_{zz} - \sigma'_{\theta\theta})$ και τα μοναδιαία διανύσματα προσαυξητικής ολικής παραμόρφωσης στο χώρο $d\gamma_{z\theta} - (d_{\epsilon_z} - d_{\epsilon_\theta})$ για τη δοκιμή R=6 όπου $b=0.5$ (**Σχήμα 7.27** (α)) και τη δοκιμή R-10 όπου $b=0$ (**Σχήμα 7.27** (β)). Όταν η στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων εκτελείται υπό $b=0$ τα διανύσματα τείνουν να γίνουν εφαπτομενικά στην κυκλική διαδρομή τάσεων, ενώ όταν η τιμή της παραμέτρου ενδιάμεση κύριας τάσης αυξάνεται σε $b=0.5$ τα διανύσματα απομακρύνονται από την κατεύθυνση της προσαυξητικής τάσης πλησιάζοντας την κατεύθυνση της κύριας τάσης (ακτινική διεύθυνση). Επομένως, όταν η ενδιάμεση κύρια τάση είναι ίση με την ελάχιστη κύρια τάση εντοπίζονται ομοαξονικές συνθήκες παραμόρφωσης. Αντίθετα όταν η ενδιάμεση κύρια τάση μεγαλώνει κυριαρχεί η πλαστική απόκριση τουλάχιστον στους πρώτους κύκλους στροφής που εξετάστηκαν στη διατριβή.

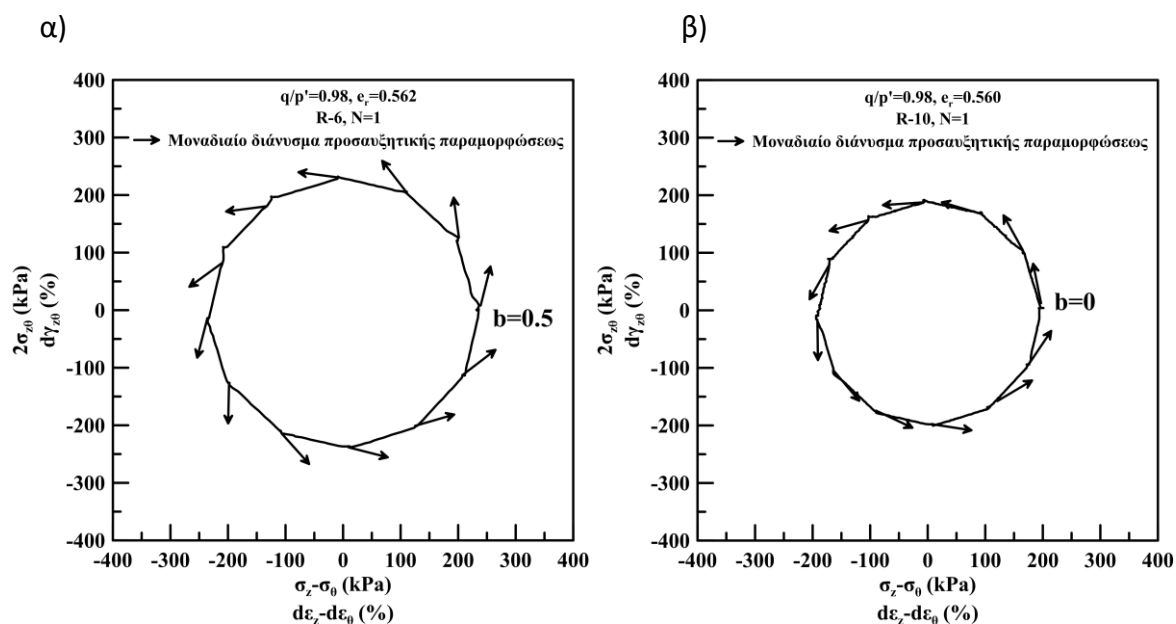
Στο **Σχήμα 7.28** αναλύονται τα αποτελέσματα της γωνίας μη ομοαξονικότητας, β , για τη δοκιμή R-6 ($b=0.5$) και R-10 ($b=0$). Η γωνία μη ομοαξονικότητας, β , και στα πυκνά δοκίμια επηρεάζεται από την αλλαγή του προσανατολισμού του σ'_1 -άξονα ως προς την κατακόρυφο σε μια πλήρη στροφή εμφανίζοντας έντονη διακύμανση αν και μικρότερη σε σχέση με τα χαλαρότερα δοκίμια. Η επιρροή της παραμέτρου b είναι σημαντική, αφού η γωνία β φθίνει με την αύξηση της b . Συγκεκριμένα οι τιμές της γωνίας μη ομοαξονικότητας κυμαίνονται από 49° έως 36° όταν $b=0$ και από 36° έως 28° όταν $b=0.5$. Επισημαίνεται όμως ότι, υπό $b=0$ η γωνία β κυμαίνεται πιο κοντά στην τιμή που αντιστοιχεί στην ομοαξονικότητα ($\beta=45^\circ$) σε σχέση με την περίπτωση όπου $b=0.5$, γεγονός που συνάδει με την πιο πλαστική απόκριση και τις μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις που παρατηρούνται για $b=0.5$ (**Σχήμα 7.21**).



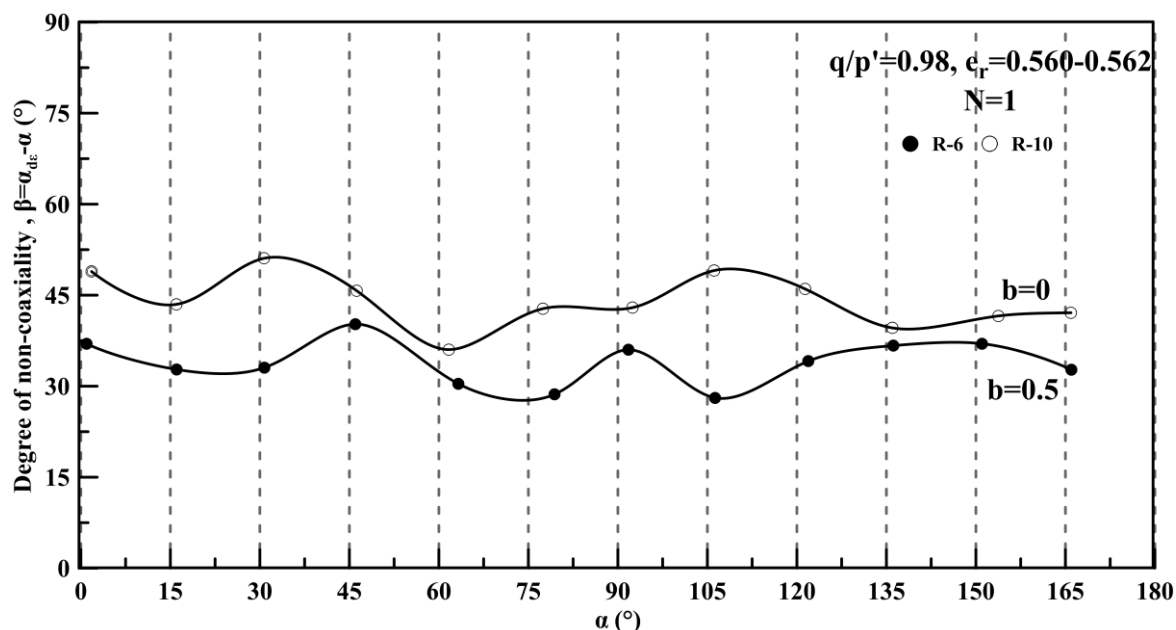
Σχήμα 7.25: Μοναδιαία διανύσματα προσασυζητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασικές οδεύσεις στο γ - χ επίπεδο. Στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $b=0.5$ και λόγο τάσεων α) $q/p'=0.87$ β) $q/p'=0.69$



Σχήμα 7.26: Επίδραση του λόγου τάσεων, q/p' , στη γωνία μη ομοαξονικότητας, β , της άμμου M31 κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $b=0.5$



Σχήμα 7.27: Μοναδιαία διανύσματα προσαυξητικών παραμορφώσεων παρατιθέμενα στις τασιικές οδεύσεις στο Y-X επίπεδο. Στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων σε πυκνά δοκίμια άμμου M31 υπό λόγο τάσεων $q/p'=0.98$ και παράμετρο ενδιάμεσης κύριας τάσης α) $b=0.5$ και β) $b=0$



Σχήμα 7.28: Επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης, b , στη γωνία μη ομοαξονικότητας, β , της πυκνής άμμου M31 κατά τη στροφή των αξόνων των κύριων τάσεων υπό $q/p'=0.98$

Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

8.1 Σύνοψη

Σε περιπτώσεις που η βελτίωση του εδάφους εφαρμόζεται σε περιοχές με υφιστάμενες κατασκευές, οι κατάλληλες μέθοδοι είναι λίγες και συνήθως συνοδεύονται από πολλά μειονεκτήματα (βελτίωση του εδάφους σε μικρό τμήμα της κάτοψης, πρόκληση προβλημάτων στη θεμελίωση λόγω της εισπίεσης ενεμάτων υπό υψηλή πίεση κ.λπ.). Στη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης (passive site stabilization) (Gallagher, 2000) η εισπίεση γίνεται υπό χαμηλή υδραυλική κλίση ενός σταθεροποιητή μέσω φυσικής ή τεχνητής ροής. Ο σταθεροποιητής αποτελείται από περιβαλλοντικά ασφαλή νανοσωματίδια και χαρακτηρίζεται από αρχικά χαμηλό ιξώδες με ελεγχόμενο χρόνο μετατροπής του σε γέλη.

Για την εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στην πράξη απαιτείται η ολοκληρωμένη γνώση της απόκρισης του σταθεροποιημένου εδάφους υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Στο πλαίσιο της διατριβής διερευνάται πειραματικά η αποτελεσματικότητα της «νέας» μεθόδου βελτίωσης μη συνεκτικών εδαφών μέσω δοκιμών μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης εξετάζοντας την επίδραση του σχήματος των κόκκων, των συνθηκών στράγγισης και της ενεργού τάσης. Ωστόσο, επειδή στα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα οι αρχικές εντατικές καταστάσεις και οι συνθήκες φόρτισης είναι σύνθετες περιλαμβάνοντας αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) όσο και στη διεύθυνσή τους, η μελέτη της απόκρισης του εδάφους υπό γενικευμένες συνθήκες φόρτισης είναι αναγκαία. Γι' αυτόν το σκοπό, για πρώτη φορά μελετάται η επίδραση της μεταβολής της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων στην απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου μέσω δοκιμών τριαξονικού εφελκυσμού και εξειδικευμένων πειραμάτων στη συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Κυλινδρικού Δοκιμίου.

Αποτέλεσμα αυτής της έρευνας είναι ένας σημαντικός αριθμός διαφορετικών δοκιμών στην άμμο που χρησιμοποιήθηκε ως βάση αναφοράς για την ανάδειξη της βελτιωμένης συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου. Η ανισότροπη απόκριση της άμμου μελετήθηκε μέσω δοκιμών μονοτονικής φόρτισης υπό σταθερή διεύθυνση των αξόνων των κύριων τάσεων, αλλά και μέσω δοκιμών συνεχούς στροφής των αξόνων υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης (b) και της σχετικής πυκνότητας. Σε αντιστοιχία με την άμμο, μελετήθηκε για τη σταθεροποιημένη άμμο με περιεκτικότητα σταθεροποιητή 10% κ.β., η επίδραση της διεύθυνσης των αξόνων των κύριων τάσεων στην εξέλιξη των επιμέρους

παραμορφώσεων, στο σημείο αλλαγής φάσης, στη μέγιστη αντοχή αλλά και στη μη-συγγραμμικότητα.

Τελικά, δημιουργήθηκε μίας εκτενής και συστηματική βάση δεδομένων για σύνθετες γενικευμένες συνθήκες φόρτισης άμμων και σταθεροποιημένων άμμων που συνεισφέρει στην υπάρχουσα επιστημονική γνώση και εξυπηρετεί την ανάγκη ανάπτυξης καταστατικών προσομοιωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις γεωτεχνικών προβλημάτων μέσω πεπερασμένων στοιχείων

8.2 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών δοκιμών της διατριβής είναι τα ακόλουθα:

Τα σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια, ανεξάρτητα του τύπου της άμμου, **υπό μονοδιάστατη συμπίεση** αναπτύσσουν μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση από τα μη σταθεροποιημένα για όλο το εύρος των πυκνοτήτων από την αρχή της φόρτισης, γεγονός που υποδεικνύει αποδόμηση της αρχικής δομής τους (structural breakdown). Φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης η γέλη τραυματίζεται απελευθερώνοντας νερό και το σκελετικό δίκτυο της σταθεροποιημένης άμμου αναδιατάσσεται στην πλέον πυκνή δομή σε μεγάλες τάσεις. Ωστόσο, κατά την αποφόρτιση οι ογκομετρικές παραμορφώσεις σταθεροποιημένου και φυσικού εδάφους είναι ταυτόσημες, δηλαδή, οι ελαστικές παραμορφώσεις του εδάφους είναι κοινές. Συμπερασματικά, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη ενδοσιμότητα κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση διευκολύνοντας την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων (πλαστικές παραμορφώσεις), ενώ κατά την αποφόρτιση δεν φαίνεται να επηρεάζει την ανάπτυξη των οιονεί ελαστικών παραμορφώσεων.

Αντίθετα, **σε δοκιμές απευθείας διάτμησης** η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει αυξημένη διατμητική αντοχή σε σχέση με την άμμο, αντίστοιχης ενεργού τάσης και πυκνότητας, που μειώνεται με την αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης, προσεγγίζοντας την τιμή της αντοχής της άμμου στην κρίσιμη κατάσταση. Η μέγιστη τιμή μειώνεται αισθητά με την αύξηση της ενεργού τάσης με αποτέλεσμα η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr coulomb να είναι καμπύλη στις χαμηλές τάσεις. Η συνοχή της σταθεροποιημένης άμμου είναι αμελητέα και η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την ενεργό τάση αλλά είναι μεγαλύτερη από της άμμου. Στην κρίσιμη κατάσταση τα αποτελέσματα της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου περιγράφονται από μια κοινή ευθεία υποδεικνύοντας την έλλειψη δεσμών σιμέντωσης. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου μέσης πυκνότητας αναπτύσσουν πολύ έντονη διαστολικότητα με την τελική τιμή κατακόρυφης μετατόπισης να είναι σχεδόν διπλάσια από την τελική τιμή της πυκνής άμμου που ταυτίζεται με τη διάμετρο του μέσου κόκκου της.

Υπό τριαξονική θλίψη κατά τη φάση της συστολής η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης δεν είναι ιδιαίτερα αισθητή. Μάλιστα η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει μικρότερη δυσμησία σε σχέση με τη φυσική άμμο. Στη συνέχεια της φόρτισης η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει ογκομετρική παραμόρφωση ή υπερπίεση του υγρού των πόρων, ανάλογα με τις συνθήκες στράγγισης, ελάχιστα μικρότερη από αυτή της άμμου αντίστοιχης πυκνότητας. Ο λόγος τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης είναι κοινός με την άμμο, αλλά επιτυγχάνεται σε μικρότερη αξονική παραμόρφωση. Ωστόσο, μετά το σημείο αλλαγής φάσης η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου βελτιώνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται έντονη διαστολή ή τάση για διαστολή, που οδηγεί σε αυξημένη αντοχή σε σχέση με την άμμο. Υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης η μέγιστη διαστολικότητα αναπτύσσεται ταυτόχρονα με το μέγιστο λόγο τάσεων τόσο στα σταθεροποιημένα όσο και φυσικά δοκίμια άμμου υποδεικνύοντας την έλλειψη δεσμών. Η μέγιστη διαστολικότητα είναι μεγαλύτερη για τα σταθεροποιημένα δοκίμια ενώ μειώνεται με την αύξηση της ενεργού τάσης πλησιάζοντας την σχεδόν σταθερή τιμή της άμμου M31 για το ίδιο εύρος τάσεων. Η μέγιστη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται επίσης με την αύξηση της ενεργού τάσης προσεγγίζοντας την τιμή της φυσικής άμμου εξαιτίας της καταστολής της διαστολικότητας. Σε αντίθεση με τη φυσική άμμο, η πολύ έντονη τάση για διαστολή στις χαμηλές ενεργές τάσεις έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης σε σχέση με τις συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, υποδεικνύοντας την ευεργετική δράση της διαστολής στη διατμητική αντοχή έναντι της διάτμησης υπό σταθερό όγκο. Στην κρίσιμη κατάσταση, όπου η διαστολικότητα είναι μηδενική, ο λόγος τάσεων της σταθεροποιημένης άμμου προσομοιάζει τον λόγο τάσεων της άμμου, όταν πλέον κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά τριβής στις επαφές των κόκκων. Η προβολή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο χώρο $e-p'$ για τη σταθεροποιημένη άμμο είναι μια καμπύλη γραμμή που εναποτίθεται πάνω από αυτή της άμμου M31. Η θέση της καμπύλης εκφράζει την έντονη διαστολικότητα της σταθεροποιημένης άμμου που οδηγεί την άμμο σε χαλαρότερη δομή κατά τη διάτμηση μέχρι και την κρίσιμη κατάσταση.

Υπό τριαξονικό εφελκυσμό η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει ασθενέστερη απόκριση σε σχέση με τη θλιπτική φόρτιση, όπως και η φυσική άμμος. Δηλαδή, μικρότερη δυσμησία, πιο έντονη συστολική συμπεριφορά και μικρότερη αντοχή σε σχέση με τη θλιπτική φόρτιση, υποδεικνύοντας ένα βαθμό ανισοτροπίας παρόμοιο με αυτό της φυσικής άμμου. Ωστόσο, η σταθεροποίηση και υπό εφελκυστική φόρτιση βελτιώνει τη συμπεριφορά της άμμου αυξάνοντας τη δυσμησία, τη διαστολικότητα και τη μέγιστη αντοχή. Ο βαθμός βελτίωσης είναι μεγαλύτερος υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, όπως και στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης.

Η χαλαρή άμμος M31 που εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη μονοτονική φόρτιση υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, κατά την **ανακυκλική τριαξονική φόρτιση** αναπτύσσει σημαντική υπερπίεση του νερού των πόρων από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, αλλά μηδενική σχεδόν παραμόρφωση μέχρι ένα κρίσιμο σημείο, όπου αναπτύσσεται

έντονη παραμόρφωση και το δοκίμιο ρευστοποιείται. Η άμμος εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά όταν η διαδρομή ενεργών τάσεων προσεγγίσει τη γραμμή αστάθειας που προσδιορίστηκε από την εφελκυστική μονοτονική φόρτιση. Στη σταθεροποιημένη χαλαρή άμμο η αξονική παραμόρφωση συσσωρεύεται σταδιακά και παρά το μηδενισμό της ενεργού τάσης το δοκίμιο δεν καταρρέει, αλλά συντηρεί μεγάλες παραμορφώσεις. Επιπλέον, αναφέρεται ότι ανεξαρτήτως λόγου τάσεων (CSR) η φυσική άμμος και η σταθεροποιημένη άμμος συσσωρεύουν αξονική παραμόρφωση στο εφελκυστικό τμήμα της ανακυκλικής φόρτισης, υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της άμμου με ή και χωρίς σταθεροποίηση, στη φόρτιση παράλληλα με το επίπεδο διαστρωμάτωσης. Ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και της ανακυκλικής παραμόρφωσης αυξάνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q . Το μέτρο δυστημσίας της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου στους πρώτους κύκλους φόρτισης είναι παρόμοιο, με εξαίρεση τη χαμηλότερη τιμή της σταθεροποιημένης άμμου στον μέγιστο λόγο τάσεων $CSR=0.2$. Στους επόμενους κύκλους η δυστημσία της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται σταδιακά μέχρι μια παραμένουσα τιμή και όχι ακαριαία όπως στην περίπτωση της φυσικής άμμου. Η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% κ.β. αυξάνει την ανακυκλική αντοχή της άμμου κυρίως καθυστερώντας την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων, με το ποσοστό βελτίωσης της ανακυκλικής αντοχής να είναι $\sim 37\%$ όταν το κριτήριο αστοχίας είναι η επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% έναντι 17% όταν κριτήριο είναι η αρχική ρευστοποίηση.

Κατά την παρασκευή των δοκιμών με απόθεση της άμμου σε νερό, υπό την επίδραση της βαρύτητας δημιουργούνται οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης, σχηματίζοντας μία εγγενώς ανισότροπη εσωτερική δομή. Επομένως, όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του άξονα της μέγιστης κύριας τάσης ως προς τα οριζόντια επίπεδα διαστρωμάτωσης μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου. Σε δοκιμές **μονοτονικής φόρτισης υπό σταθερή γωνία α** στην άμμο, η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η μέγιστη κύρια τάση είναι κάθετη στο επίπεδο διαστρωμάτωσης ($\alpha=0^\circ$). Η απόκριση της άμμου γίνεται πιο συστολική όσο ο σ'_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο με αποτέλεσμα η αντοχή της να μειώνεται με τη γωνία α . Η επίδραση της γωνίας α στη μέγιστη αντοχή φαίνεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην πυκνή σε σχέση με την χαλαρή άμμο. Για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας α η αύξηση της παραμέτρου ενδιάμεσης κύριας τάσης από $b=0$ σε 0.5 οδηγεί σε σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής και αύξηση της συστολικότητας. Περαιτέρω αύξηση από $b=0.5$ σε 1 δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της άμμου. Η τιμή του λόγου τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης δε φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την γωνία α , αλλά από την παράμετρο b . Συγκεκριμένα, η αύξηση της παραμέτρου b μειώνει τον λόγο τάσεων στο σημείο αλλαγής φάσης. Η διεύθυνση της κύριας φόρτισης επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη των επιμέρους παραμορφώσεων. Η διαφορετική ανάπτυξη των εφαπτομενικών και ακτινικών παραμορφώσεων με τις πρώτες να επηρεάζονται άμεσα από την διεύθυνση των κυρίων τάσεων σε αντίθεση με τις ακτινικές που επηρεάζονται

μόνο από την παράμετρο b και όχι από την γωνία α , δείχνει ότι η συχνά αποδεκτή παραδοχή $\varepsilon_{\theta}=\varepsilon_r$ δεν ευσταθεί και οι παραμορφώσεις πρέπει να μετρώνται σε όλες τις διευθύνσεις. Συμπεραίνεται ότι οι συνθήκες μηδενικής πλευρικής παραμόρφωσης (plane strain) όπου $\varepsilon_r=0$ εντοπίζονται όταν $b\approx 0.25-0.3$

Η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει έντονα ανισότροπη συμπεριφορά όπως η άμμος. Η βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου εμφανίζεται όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στο κατακόρυφο επίπεδο ($\alpha=0^\circ$). Όταν ο σ_1 -άξονας απομακρύνεται από την κατακόρυφο η αντοχή μειώνεται σημαντικά και η συστολή αυξάνεται. Η μικρότερη αντοχή παρατηρείται όταν $\alpha=60^\circ$ όπως και στην περίπτωση της πυκνής άμμου. Ανεξάρτητα της γωνίας α η μέγιστη αντοχή της σταθεροποιημένης άμμου είναι μεγαλύτερη και από αυτή της πυκνής άμμου. Επιπρόσθετα, η προσθήκη σταθεροποιητή μειώνει τη συστολή και αυξάνει τη διαστολικότητα. Ωστόσο, για $\alpha\geq 45^\circ$ η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει **ασθενέστερη** απόκριση από την άμμο υπό ελεύθερη στράγγιση σε **χαμηλό λόγο τάσεων**, με τη συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης υπό σταθερό όγκο. Όταν η επιβολή της φόρτισης γίνεται μέσω ελέγχου της τάσης και η στράγγιση είτε είναι εμποδιζόμενη είτε γίνεται με ελεύθερη στράγγιση (η οποία είναι εφικτή πριν και μετά την ασταθή απόκριση) η σταθεροποιημένη χαλαρή άμμος εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά, όπως θα έκανε και η χαλαρή άμμος υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στη συνέχεια της φόρτισης, όταν αρχίζει η διαστολική συμπεριφορά, η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή και από την πυκνότερη άμμο.

Στις δοκιμές **συνεχούς στροφής των αξόνων των κυρίων τάσεων** υπό σταθερές τιμές αποκλίνουσας τάσης q , μέσης ενεργού τάσης p' και παραμέτρου b , η απόκριση του δοκιμίου λόγω της περιστροφής των αξόνων αντανακλά αποκλειστικά την αλλαγή της δομής από την αρχική της κατάσταση. Κατά τη στροφή των αξόνων συσσωρεύεται συστολική ογκομετρική παραμόρφωση και αναπτύσσονται πλαστικές επιμέρους παραμορφώσεις. Ακόμη και όταν η άμμος βρίσκεται στη διαστολική φάση της μονοτονικής φόρτισης, όταν εκκινεί η στροφή των αξόνων συσσωρεύεται συστολική ογκομετρική παραμόρφωση. Το μεγαλύτερο ποσοστό της παραμόρφωσης αναπτύσσεται στον πρώτο κύκλο στροφής με το ρυθμό ανάπτυξης να μειώνεται με τον αριθμό των κύκλων. Όταν η στροφή πραγματοποιείται υπό $b=0.5$ οι επιμέρους παραμορφώσεις είναι μικρότερες και σταθεροποιούνται πιο γρήγορα σε σχέση με τις δοκιμές στροφής υπό $b=0$. Επιπλέον, η συστολική συμπεριφορά αυξάνεται όταν η στροφή πραγματοποιείται υπό μεγαλύτερο λόγο τάσεων και σε χαλαρότερα δοκίμια. Μάλιστα η στροφή των αξόνων σε μεγάλο λόγο τάσεων οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων και σε αστοχία των δοκιμίων.

Απόκλιση της κύριας κατεύθυνσης τάσεων από την αντίστοιχη κατεύθυνση της κύριας προσαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης (**μη συγγραμικότητα**) παρατηρείται στη χαλαρή και πυκνή άμμο M31 σε δοκιμές μονοτονικής φόρτισης. Η απόκλιση είναι

σημαντική στο αρχικό στάδιο της φόρτισης όταν $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$. Με την αύξηση της διατμητικής τάσης και τη συσσώρευση των παραμορφώσεων η μη συγγραμμικότητα εξαλείφεται. Ομοίως στη σταθεροποιημένη άμμο παρατηρείται μη συγγραμμικότητα που όμως εκμηδενίζεται πιο γρήγορα σε σχέση με την άμμο. Σε σχέση με τη φόρτιση υπό σταθερή γωνία α , η μη συγγραμμικότητα της άμμου είναι πιο έντονη υπό συνεχή μεταβολή της γωνίας α . Η γωνία μη ομοαξονικότητας μειώνεται όταν η στροφή πραγματοποιείται υπό μεγαλύτερο λόγο τάσεων και όταν αυξάνεται η παράμετρος b . Γενικά, η συμπεριφορά της άμμου γίνεται πρακτικά ομοαξονική με τη συσσώρευση διατμητικής παραμόρφωσης πλησιάζοντας την αστοχία

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο πλαίσιο της διατριβής δημιουργήθηκε μια εκτενής και συστηματική βάση δεδομένων για σύνθετες γενικευμένες συνθήκες φόρτισης άμμων με και χωρίς σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία συνεισφέροντας στην υπάρχουσα επιστημονική γνώση. Ωστόσο, για να εφαρμοστεί μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης με επιτυχία στην πράξη προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα:

- Εφόσον στη φύση σπανίως απαντώνται καθαρές άμμοι, απαραίτητο είναι να μελετηθεί η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης σε διάφορα μη συνεκτικά εδάφη (αμμοχάλικα, μίγματα αμμοιλύων, μη-πλασίμων ιλύων κ.λπ.)
- Στην παρούσα έρευνα τα δοκίμια σταθεροποιήθηκαν με ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας 10% κ.β. Για την βέλτιστη οικονομική απόδοση της μεθόδου θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιηθούν πειράματα σε δοκίμια με μικρότερα ποσοστά σταθεροποιητή.
- Τα ανακυκλικά τριαξονικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Προτείνεται να πραγματοποιηθούν ανακυκλικές δοκιμές και υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης προκειμένου να εξεταστεί περαιτέρω η ασθενέστερη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη φυσική, υπό συνθήκες επιβαλλόμενης τάσης και ελεύθερης στράγγισης, που παρατηρήθηκε στις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης όταν $\alpha \geq 45^\circ$.
- Οι δοκιμές στροφής των αξόνων των κύριων τάσεων πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια που είχαν φορτιστεί μονοτονικά υπό $\alpha = 0^\circ$. Θα ήταν ωφέλιμο να πραγματοποιηθούν πειράματα στροφής σε δοκίμια που έχουν φορτιστεί υπό διαφορετικές διευθύνσεις των αξόνων των κύριων τάσεων προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση της ιστορίας προφόρτισης.
- Για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου της παθητικής σταθεροποίησης εκτός από τις δοκιμές εδαφικού στοιχείου που πραγματοποιήθηκαν στη διατριβή, προτείνονται δοκιμές μικρής κλίμακας στη σεισμική τράπεζα. Με αυτές τις δοκιμές μπορεί αρχικά να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της εισπίεσης του σταθεροποιητή στο έδαφος και στη συνέχεια η απόκριση του συστήματος

σταθεροποιημένου εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής υπό δυναμική φόρτιση.

Βιβλιογραφία

- Agapoulaki, G. I., & Papadimitriou, A. G. (2018). Rheological Properties of Colloidal Silica Grout for Passive Stabilization Against Liquefaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018251.
- Arthur, J. R. F., Chua, K. S., & Dunstan, T. (1977). Induced anisotropy in a sand. *Géotechnique*, 27(1), 13–30.
- Arthur, J. R. F., & Menzies, B. K. (1972). Inherent anisotropy in a sand. *Géotechnique*, 22(1), 115–128.
- Axelsson, M. (2006). Mechanical tests on a new non-cementitious grout, silica sol: A laboratory study of the material characteristics. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(5), 554–560.
- Baldi, G., & Nova, R. (1985). Membrane penetration effects in triaxial testing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(8), 1048–1049.
- Been, K., & Jefferies, M. G. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35(2), 99–112.
- Bergna, H. E. (1994). Colloid Chemistry of Silica. *Advances in Chemistry; American Chemical Society* (pp. 1–47).
- Bergna, H. E., & Roberts, W. O. (2005). *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. (H. E. Bergna & W. O. Roberts, Eds.) (Vol. 131). CRC Press.
- Bishop, A. W. (1966). The Strength of Soils as Engineering Materials. *Géotechnique*, 16(2), 91–130.
- Bishop, A. W., & Wesley, L. D. (1975). A Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing. *Geotechnique*, 25(4), 657–670.
- Bradley, K., Mallick, R., Andikagumi, H., Hubbard, J., Meilianda, E., Switzer, A., Du, N., et al. (2019). Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation. *Nature Geoscience*, 12(11), 935–939. Springer US.
- Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science: The physics and chemistry of Sol-Gel Processing*.
- Cai, Y., Yu, H.-S., Wanatowski, D., & Li, X. (2013). Noncoaxial Behavior of Sand under Various Stress Paths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8), 1381–1395.
- Casagrande, A., & Carillo, N. (1944). *Shear failure of anisotropic materials*. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* (Vol. 31, pp. 122–135).
- Ciardi, G., Bardotti, R., Vannucchi, G., & Madiari, C. (2020). Effects of high-diluted colloidal silica grouting on the behaviour of a liquefiable sand. *Geotechnical Research*, 7(4), 193–208.

- Conlee, C. T., Gallagher, P. M., Boulanger, R. W., & Kamai, R. (2012). Centrifuge Modeling for Liquefaction Mitigation Using Colloidal Silica Stabilizer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(11), 1334–1345.
- Cubrinovski, M. (2011). Liquefaction-induced damage in the 2010-2011 Christchurch (New Zealand) Earthquakes. *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, April 29-May 4, 2013, Chicago* (pp. 1–11). Chicago.
- Cuccovillo, T., & Coop, M. R. (1999). On the mechanics of structured sands. *Géotechnique*, 49(6), 741–760.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Antonio-Izarraras, V. M., Bandini, P., & López-Molina, J. A. (2008). Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10), 1345–1355.
- Donovan, N. C., Becker, A. M., & Lau, G. Y. F. (1984). Liquefaction Mitigation by Site Improvement—A Case Study. *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*. (pp. 693–700). SAN FRANCISCO, CALIFORNIA.
- Finn, W. D. L., Byrne, P. M., Evans, S., & Law, T. (1996). Some geotechnical aspects of the Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake of January 17, 1995. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23(3), 778–796.
- Gallagher, P. M. (2000). *Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk*. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Gallagher, P. M., Conlee, C. T., & Rollins, K. M. (2007). Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 186–196.
- Gallagher, P. M., & Lin, Y. (2009). Colloidal Silica Transport through Liquefiable Porous Media. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1702–1712.
- Gallagher, P. M., & Mitchell, J. K. (2002). Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9–12), 1017–1026. Elsevier BV.
- Gallagher, P. M., Pamuk, A., & Abdoun, T. (2007). Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica Grout. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(1), 33–40.
- De Gennaro, V., Canou, J., Dupla, J. C., & Benahmed, N. (2004). Influence of loading path on the undrained behaviour of a medium loose sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1), 166–180.
- Georgiannou, V. N. (2006). The undrained response of sands with additions of particles of various shapes and sizes. *Geotechnique*, 56(9), 639–649.
- Georgiannou, V. N., Konstadinou, M., & Triantafyllos, P. K. (2018). Sand Behavior under Stress States Involving Principal Stress Rotation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(6), 04018028.
- Georgiannou, V. N., Pavlopoulou, E. M., & Bikos, Z. (2017). Mechanical behaviour of sand stabilised with colloidal silica. *Geotechnical Research*, 4(1), 1–11.

- Georgiannou, V. N., & Tsomokos, A. (2008). Comparison of two fine sands under torsional loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(12), 1659–1672.
- Gutierrez, M., Ishihara, K., & Towhata, I. (1991). Flow Theory for Sand During Rotation of Principal Stress Direction. *Soils and Foundations*, 31(4), 121–132.
- Hight, D. W., Gens, A., & Symes, M. J. (1983). The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. *Géotechnique*, 33(4), 355–383.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute; 2nd edition.
- Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H., & Inatomi, T. (1996). Performance of caisson type quay walls at Kobe Port. *Soils and Foundations*, (Special), 119–136.
- Ishibashi, I., Sherif, M. A., & Tsuchiya, C. (1977). Pore-Pressure Rise Mechanism and Soil Liquefaction. *Soils and Foundations*, 17(2), 17–27. Elsevier Masson SAS.
- Ishihara, K., & Towhata, I. (1983). Sand Response to Cyclic Rotation of Principal Stress Directions as Induced by Wave Loads. *Soils and Foundations*, 23(4), 11–26.
- Jardine, R. J., Symes, M. J., & Burland, J. B. (1985). Discussion: The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. *Géotechnique*, 35(3), 378–382.
- Kodaka, T., Ohno, Y., & Takyu, T. (2005). Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment*, 2, 401–404.
- Konstadinou, M., & Georgiannou, V. N. (2014). Prediction of pore water pressure generation leading to liquefaction under torsional cyclic loading. *Soils and Foundations*, 54(5), 993–1005. Elsevier.
- Kramer, S. L., Sivanesarwan, N., & Davis, R. O. (1990). Analysis of Membrane Penetration in Triaxial Test. *Journal of Engineering Mechanics*, 116(4), 773–789.
- Krishnaswamy, N. R., & Thomas I. N. (1995). Liquefaction Analysis of Saturated Reinforced Granular Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(9), 645–651.
- Kurbis, R., & Vaid, Y. P. (1988). Sand sample preparation - the slurry deposition method. *Soils and Foundations*, 28(4), 107–118.
- Lade, P. V. (2008). Failure Criterion for Cross-Anisotropic Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1), 117–124.
- Lade, P. V. (1993). Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 895–904.
- Lade, P. V., Nam, J., & Hong, W. P. (2009). Interpretation of strains in torsion shear tests. *Computers and Geotechnics*, 36(1–2), 211–225. Elsevier Ltd.
- Lade, P. V., Nam, J., & Hong, W. P. (2008). Shear banding and cross-anisotropic behavior observed in laboratory sand tests with stress rotation. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1), 74–84.
- Lam, W.-K., & Tatsuoka, F. (1988). Effects of Initial Anisotropic Fabric and σ_2 On Strength

- and Deformation Characteristics of Sand. *Soils and Foundations*, 28(1), 89–106. Elsevier Masson SAS.
- Li, X. S., & Wang, Y. (1998). Linear Representation of Steady-State Line for Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), 1215–1217.
- Li, X., & Yu, H.-S. (2015). Particle-Scale Insight into Deformation Noncoaxiality of Granular Materials. *International Journal of Geomechanics*, 15(4), 04014061.
- Li, X., & Yu, H. (2009). Influence of loading direction on the behavior of anisotropic granular materials. *International Journal of Engineering Science*, 47(11–12), 1284–1296. Elsevier Ltd.
- Li, Xiang Song, & Dafalias, Y. F. (2012). Anisotropic Critical State Theory: Role of Fabric. *Journal of Engineering Mechanics*, 138(3), 263–275.
- Lin, Y. (2006). *Colloidal Silica Transport Mechanisms*. Ph.D. Thesis, Drexel Univ.
- Maher, M. H., Ro, K. S., & Welsh, J. P. (1994). Cyclic Undrained Behavior and Liquefaction Potential of Sand Treated with Chemical Grouts and Microfine Cement (MC-500). (H. J. Pincus, Ed.) *Geotechnical Testing Journal*, 17(2), 159–170. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Mahmood, Z., & Iwashita, K. (2010). Influence of inherent anisotropy on mechanical behavior of granular materials based on DEM simulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(8), 795–819.
- Mayne, P. W., Jones, J. S., & Dumas, J. C. (1984). Ground response to dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), 757–774.
- Mitchell, J., & Kenichi, S. (1976). *Fundamentals of soil behaviour*. (J. W. and Sons, Ed.). New York, USA.
- Mitchell, J. M., & Jardine, F. M. (2002). *A guide to ground treatment*. CIRIA publication, C573.
- Miura, K., Miura, S., Toki, S., & Miura, S. (1986). Deformation Behavior of Anisotropic Dense Sand Under Principal Stress Axes Rotation. *Soils and Foundations*, 26(1), 36–52.
- Miura, K., Toki, S., & Miura, S. (1986). Deformation Prediction for Anisotropic Sand During the Rotation of Principal Stress Axes. *Soils and Foundations*, 26(3), 42–56.
- Miura, S., & Toki, S. (1984). Anisotropy in Mechanical Properties and its Simulation of Sands Sampled from Natural Deposits. *Soils and Foundations*, 24(3), 69–84.
- Molenkamp, F., & Luger, H. J. (1981). Modelling and minimization of membrane penetration effects in tests on granular soils. *Géotechnique*, 31(4), 471–486.
- Mollamahmutoglu, M., & Yilmaz, Y. (2010). Pre- and post-cyclic loading strength of silica-grouted sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 163(6), 343–348.
- Moradi, G., Seyedi, S., Moradi, G., & Seyedi, S. (2015). Effect of Sampling Method on Strength of Stabilized Silty Sands with Colloidal Nano Silica. *Journal of Civil Engineering Research*, 5(6), 129–135.

- Nakata, Y., Hyodo, M., Murata, H., & Yasufuku, N. (1998). Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation. *Soils and Foundations*, 38(2), 115–128. Japanese Geotechnical Society.
- Naughton, P. J., & O’Kelly, B. C. (2007). Stress non-uniformity in a hollow cylinder torsional sand specimen. *Geomechanics and Geoengineering*, 2(2), 117–122.
- Newland, P. L., & Allely, B. H. (1957). Volume Changes in Drained Triaxial Tests on Granular Materials. *Géotechnique*, 7(1), 17–34.
- Newland, P. L., & Allely, B. H. (1959). Volume Changes During Undrained Triaxial Tests on Saturated Dilatant Granular Materials. *Géotechnique*, 9(4), 174–182.
- Nozari, M. amin, Moayed, R. Z., & Mohebi, M. M. (2019). Stabilization of saturated silty sand by colloidal silica : compressive and cyclic strength and shear wave velocity. *AUT Journal of Civil Engineering*, (August).
- Oda, M. (1972a). The Mechanism of Fabric Changes During Compressional Deformation of Sand. *Soils and Foundations*, 12(2), 1–18. Elsevier Masson SAS.
- Oda, M. (1972b). Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material. *Soils and Foundations*, 12(1), 17–36. Elsevier Masson SAS.
- Oda, M. (1981). Anisotropic Strength of Cohesionless Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(9), 1219–1231. American Society of Civil Engineers.
- Oda, M., & Iwashita, K. (1999). *Mechanics of Granular Materials: An introduction*. CRC Press.
- Oda, M., & Konishi, J. (1974a). Rotation of Principal Stresses in Granular Material During Simple Shear. *Soils and Foundations*, 14(4), 39–53.
- Oda, M., & Konishi, J. (1974b). Microscopic Deformation Mechanism of Granular Material in Simple Shear. *Soils and Foundations*, 14(4), 25–38.
- Oda, M., Nemat-Nasser, S., & Konishi, J. (1985). Stress-Induced Anisotropy in Granular Masses. *Soils and Foundations*, 25(3), 85–97.
- Ōhara, S., & Yamamoto, T. (1991). A Practical Method for Obtaining Correction Factor of Liquefaction Resistance for Membrane Penetration. *Soils and Foundations*, 31(2), 188–196.
- Pamuk, A., Gallagher, P. M., & Zimmie, T. F. (2007). Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(9), 864–874.
- Pavlopoulou, E.-M. E., & Georgiannou, V. N. (2021). Effect of Colloidal Silica Aqueous Gel on the Monotonic and Cyclic Response of Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11), 1–18. American Society of Civil Engineers.
- Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., & Whang, J. M. (1999). Effect of Dilution and Contaminants on Sand Grouted with Colloidal Silica. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(6), 461–469.
- Polito, C. P., Green, R. A., & Lee, J. (2008). Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(10), 1490–1500.

- Porcino, D., & Marcianò, V. (2017). Bonding degradation and stress–dilatancy response of weakly cemented sands. *Geomechanics and Geoengineering*, 12(4), 221–233. Taylor & Francis.
- Porcino, D., Marcianò, V., & Granata, R. (2011). Undrained cyclic response of a silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes. *Geomechanics and Geoengineering*, 6(3), 155–170.
- Porcino, D., Marcianò, V., & Granata, R. (2012). Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(10), 1117–1133.
- Porcino, D., Marcianò, V., & Granata, R. (2015). Cyclic liquefaction behaviour of a moderately cemented grouted sand under repeated loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 36–46. Elsevier.
- Prashanth, S., Kodicherla, K., Gong, G., Fan, L., Moy, C. K. S., & He, J. (2018). Effects of preparation methods on inherent fabric anisotropy and packing density of reconstituted sand. *Cogent Engineering*, 00(00), 1–14. Cogent.
- Robertson, P. K., & Wride, C. (Fear). (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442–459.
- Rodriguez, N. M., & Lade, P. V. (2013). True Triaxial Tests on Cross-Anisotropic Deposits of Fine Nevada Sand. *International Journal of Geomechanics*, 13(6), 779–793.
- Roscoe, K. H. (1970). The Influence of Strains in Soil Mechanics. *Géotechnique*, 20(2), 129–170.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., & Wroth, C. P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique*, 8(1), 22–53.
- Rowe, P. W. (1962). The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 269(1339), 500–527.
- Saada, A. S., Fries, G., & Ker, C.-C. (1983). An Evaluation of Laboratory Testing Techniques in Soil Mechanics. *Soils and Foundations*, 23(2), 98–112.
- Salvatore, E., Modoni, G., Mascolo, M. C., Grassi, D., & Spagnoli, G. (2020). Experimental Evidence of the Effectiveness and Applicability of Colloidal Nanosilica Grouting for Liquefaction Mitigation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(10), 04020108.
- Sayao, A., & Vaid, Y. P. (1991). A Critical Assessment of Stress Nonuniformities in Hollow Cylinder Test Specimens. *Soils and Foundations*, 31(1), 60–72.
- Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(6), 105–134. American Society of Civil Engineers.
- Seed, H., & Idriss, I. M. (1967). Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93, 83–108.
- Seyedi Hosseininia, E. (2012). Discrete element modeling of inherently anisotropic granular

- assemblies with polygonal particles. *Particuology*, 10(5), 542–552. Chinese Society of Particuology.
- Shibuya, S., & Hight, D. W. (1987). A Bounding Surface for Granular Materials. *Soils and Foundations*, 27(4), 123–136.
- Shibuya, S., Hight, D. W., & Jardine, R. J. (2003a). Four-dimensional local boundary surfaces of an isotropically consolidated loose sand. *Soils and Foundations*, 43(2), 89–103.
- Shibuya, S., Hight, D. W., & Jardine, R. J. (2003b). Local boundary surfaces of a loose sand dependent on consolidation path. *Soils and Foundations*, 43(3), 85–93. Elsevier Masson SAS.
- Sivathayalan, S., & Vaid, Y. P. (1998). Truly undrained response of granular soils with no membrane-penetration effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5), 730–739.
- Sivathayalan, S., & Vaid, Y. P. (2002). Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 63–76.
- Symes, M. J., Gens, A., & Hight, D. W. (1988). Drained principal stress rotation in saturated sand. *Géotechnique*, 38(1), 59–81.
- Symes, M. J., Gens, A., & Hight, D. W. (1984). Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand. *Géotechnique*, 34(1), 11–27.
- Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S., & Pradhan, T. B. S. (1986). Failure and Deformation of Sand in Torsional Shear. *Soils and Foundations*, 26(4), 79–97.
- Tong, Z.-X., Zhang, J.-M., Yu, Y.-L., & Zhang, G. (2010). Drained Deformation Behavior of Anisotropic Sands during Cyclic Rotation of Principal Stress Axes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(11), 1509–1518.
- Towhata, I. (2007). Developments of soil improvement technologies for mitigation of liquefaction risk. *Earthquake geotechnical engineering: Proceedings of the 4th international conference on earthquake geotechnical engineering – invited lectures* (pp. 355–383). Thessaloniki, Greece: Springer Series (eds K.D. Pitilakis),.
- Triantafyllos, P. K., Georgiannou, V. N., Dafalias, Y. F., & Georgopoulos, I.-O. (2021). Novel findings on the dilatancy and non-coaxiality of sand under generalised loading. *Acta Geotechnica*, 16(6), 1699–1734. Springer Berlin Heidelberg.
- Triantafyllos, P. K., Georgiannou, V. N., Dafalias, Y. F., & Georgopoulos, I. O. (2020). New findings on the evolution of the instability surface of loose sand. *Acta Geotechnica*, 15(1), 197–221. Springer Berlin Heidelberg.
- Triantafyllos, Panagiotis K., Georgiannou, V. N., Pavlopoulou, E.-M. E., & Dafalias, Y. F. (2022). Strength and dilatancy of sand before and after stabilisation with colloidal-silica gel. *Géotechnique*, 72(6), 471–485.
- Uthayakumar, M., & Vaid, Y. P. (1998). Static liquefaction of sands under multiaxial loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), 273–283.
- Vaid, Y. P., & Chern, J. (1985). Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands.
- Vaid, Y. P., Sayao, A., Enhuang Hou, & Negussey, D. (1990). Generalized stress-path-

- dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(5), 601–616.
- Vaid, Y. P., Sivathayalan, S., & Stedman, D. (1999). Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 22(3), 187–195. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Vranna, A., & Tika, T. (2015). Undrained Monotonic and Cyclic Behaviour of a Silty Sand Stabilized with Colloidal Silica. *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, (November).
- Vranna, Antigoni, Tika, T., & Papadimitriou, A. G. (2020). Laboratory investigation into the monotonic and cyclic behaviour of a clean sand stabilised with colloidal silica. *Géotechnique*, 1–14.
- Whang, J. M. (1995). Section 9—Chemical-based barrier materials. In R. R. Ryan & M. E. Rumer (Eds.), *Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications* (pp. 211–246).
- Wijewickreme, D., & Vaid, Y. P. (2008). Experimental observations on the response of loose sand under simultaneous increase in stress ratio and rotation of principal stresses. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(5), 597–610.
- Wijewickreme, D., & Vaid, Y. P. (1991). Stress nonuniformities in hollow cylinder torsional specimens. *Geotechnical Testing Journal*, 14(4), 349–362. ASTM International.
- Wijewickreme, D., & Vaid, Y. P. (1993). Behaviour of loose sand under simultaneous increase in stress ratio and principal stress rotation. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 953–964.
- Wong, C., Pedrotti, M., El Mountassir, G., & Lunn, R. J. (2018). A study on the mechanical interaction between soil and colloidal silica gel for ground improvement. *Engineering Geology*, 243(June), 84–100. Elsevier.
- Wong, R. C. K. (2003). Strain-induced anisotropy in fabric and hydraulic parameters of oil sand in triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 489–500.
- Wong, R. K. S., & Arthur, J. R. F. (1985). Induced and inherent anisotropy in sand. *Géotechnique*, 35(4), 471–481.
- Wroth, C. P., & Bassett, R. H. (1965). A stress-strain relationship for the shearing behaviour of a sand. *Geotechnique*, 15(1), 32–56.
- Yamada, Y., & Ishihara, K. (1979). Anisotropic deformation characteristics of sand under three dimensional stress conditions. *Soils and Foundations*, 19(2), 79–94.
- Yang, L.-T., Li, X., Yu, H.-S., & Wanatowski, D. (2016). A laboratory study of anisotropic geomaterials incorporating recent micromechanical understanding. *Acta Geotechnica*, 11(5), 1111–1129.
- Yang, Z. X., Li, X. S., & Yang, J. (2007). Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil. *Geotechnique*, 57(4), 371–384.
- Yang, Z. X., Lit, X. S., & Yang, J. (2008). Quantifying and modelling fabric anisotropy of granular soils. *Geotechnique*, 58(4), 237–248.

- Yoshimine, M., Ishihara, K., & Vargas, W. (1998). Effects of principal stress direction and intermediate principal stress. *Soils and Foundations*, 38(3), 179–188.
- Yoshimine, M. M., Özyay, R., Sezen, A., & Ansal, A. (1999). Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus. *Soils and Foundations*, 39(2), 131–136.
- Yu, H., Yang, L., Li, X., & Wanatowski, D. (2016). Experimental investigation on the deformation characteristics of granular materials under drained rotational shear. *Geomechanics and Geoengineering*, 11(1), 47–63.
- Zdravković, L., & Jardine, R. J. (2001). The effect on anisotropy of rotating the principal stress axes during consolidation. *Geotechnique*, 51(1), 69–83.
- Zdravković, L., Potts, D. M., & Hight, D. W. (2002). The effect of strength anisotropy on the behaviour of embankments on soft ground. *Géotechnique*, 52(6), 447–457.
- Zhang, J.-M., Tong, Z.-X., & Yu, Y.-L. (2008). Effects of cyclic rotation of principal stress axes and intermediate principal stress parameter on the deformation behavior of sands. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, 181, 131–136.
- Zhang, L., & Thornton, C. (2007). A numerical examination of the direct shear test. *Géotechnique*, 57(4), 343–354.