



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΜΜΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ
ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ**

Παυλοπούλου Αναστασία

Επιβλέπων: **Β.Ν Γεωργιάννου**, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.



MSc THESIS

**CYCLIC AND DYNAMIC RESPONSE OF TREATED SANDS WITH COLLOIDAL
SILICA**

Pavlopoulou Anastasia

Supervisor: **V.N Georgiannou**, Professor NTUA

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Ευχαριστίες

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

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

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

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και την αδερφή μου και διδάκτορα του Ε.Μ.Π Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου που δεν σταμάτησε να με στηρίζει και να με βοηθάει καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αναστασία

Περίληψη

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχαλικών, 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. 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).

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 έδαφους σε μικρό τμήμα της κάτοψης, πρόκληση προβλημάτων στη θεμελίωση λόγω της εισπίεσης ενεμάτων υπό υψηλή πίεση κλπ.). Οι ανώτερο 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 το σταθεροποιητή ανάντη της κατασκευής, είτε επιβάλλοντας συνθήκες ροής κατασκευάζοντας ένα φρέατα παροχής και άντλησης με χαμηλή υδραυλική κλίση (Pamuk et al., 2007).

Η κολλοειδής πυριτία που επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής στην παρούσα εργασία αρχικά έχει τη μορφή υγρολύματος και με την πάροδο του χρόνου υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη, με ταυτόχρονη αύξηση του ιξώδους του. Ρυθμίζοντας τους 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; A 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.

Για την μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων άμμων στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές ανακυκλικής και δυναμικής φόρτισης. Ειδικότερα για την κάθε φόρτιση έγιναν σειρές από δοκιμές τόσο σε φυσικές όσο και σε

σταθεροποιημένες άμμους. Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και την μελέτη επιρροής της δομής της άμμου επιλέχθηκε να γίνουν δοκιμές σε 2 διαφορεικά είδη άμμων (M31 και Longstone).

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όλων αυτών των δοκιμών προκύπτουν τα εξής:

- Η δομή των κόκκων της άμμου παίζει ρόλο στην συμπεριφορά της έναντι στην ρευστοποίηση. Ειδικότερα σύμφωνα με τις δοκιμές συμπεραίνουμε ότι η άμμος Longstone που έχει πιο γωνιώδης κόκκους ρευστοποιείται πιο γρήγορα σε σχέση με την άμμο M31.
- Αν συγκρίνουμε τις φορτίσεις μεταξύ τους (ανακυκλική και δυναμική) παρατηρείται ότι η ρευστοποίηση γίνεται πιο γρήγορα στα δοκίμια που τους επιβάλλεται δυναμική φόρτιση.

Abstract

Liquefaction of non-cohesive soils (gravels, sands, sand-silt mixtures, non-plastic silts) during seismic excitations can cause significant damage to the superstructure, up to complete failure. The phenomenon of liquefaction occurs when dynamic loading under conditions of impeded drainage, such as seismic excitations, is imposed on saturated non-cohesive soil formations causing the rapid increase in pore fluid pressure leading to accumulation of strains and a reduction in the shear strength of the material. The prevention of the risk of liquefaction at new construction sites can be achieved by a series of established soil improvement methodologies (H. B. Seed & Lee, 1966) prior to building construction depending on the characteristics of the liquefiable soil (Idriss & Boulanger, 2008). These methods are usually based on compaction (e.g. dynamic compaction, deep vibratory compaction), increasing effective stress through preloading, stabilization (e.g. deep soil mixing) or damping of seismic pore overpressures (e.g. gravel-strainers) and have been widely applied in the field (Donovan et al., 1984; Mayne et al., 1984; Maher et al., 1994).

In cases where soil improvement is applied in areas with existing constructions, the appropriate methods are few and usually accompanied by many disadvantages (soil improvement in a small part of the plan, causing problems in the foundation due to the injection of grout under high pressure, etc.). The above conditions led to the development of a new soil improvement method, passive site stabilization (Gallagher, 2000). It is the injection with a low hydraulic gradient of a stabilizer (stabiliser), i.e. a material consisting of environmentally safe nano-particles, with various possible forms of chemical composition, into the flowable foundation soil of the entire floor plan of an existing structure. Stabilizer infiltration can be achieved either through natural flow by constructing a well with the stabilizer upstream of the structure, or by forcing flow conditions by constructing a supply and pumping well with a low hydraulic gradient (Pamuk et al., 2007).

The colloidal silica chosen as a stabilizer in this work is initially in the form of a liquid solution and over time undergoes a controlled transformation into a gel, with a simultaneous increase in its viscosity. Regulating them by enriching the pore fluid with the stabilizer, the mechanical behavior of the soil framework - pore fluid system is changed and the accumulation of deformations during seismic excitation is limited. Although the bonds between the grains of stabilized sand are weak, the sand exhibits higher strength, expansion and resistance to liquefaction (Gallagher & Mitchell, 2002; Kodaka et al., 2005; Díaz-Rodríguez et al., 2008; Porcino et al., 2011, 2012; A Vranna & Tika, 2015). Although the above-mentioned laboratory studies have provided answers to several questions concerning this new attractive method of sand stabilization, their results are based on the classical tests of measuring resistance to liquefaction in the triaxial apparatus or the simple shear apparatus which do not have the possibility to investigate the anisotropic behavior of stabilized sands.

In order to study the anisotropic behavior of the stabilized sands in this master's thesis, triaxial cyclic and dynamic loading tests were performed. In particular, for each loading series of tests both in physical and in stabilized sands were performed. For the accuracy of the results as well as the study of the influence of the sand structure, it was chosen to perform tests on 2 different types of sand (M31 and Longstone).

From the evaluation of the results of all these tests, the following emerges:

- The structure of the sand plays a role in the behavior against liquefaction. According to the tests, we conclude that the Longstone sand, which has more angular grains, liquefies faster than the M31 sand.
- If we compare the loadings (cycling and dynamic) it is observed that the liquefaction occurs faster in the samples under dynamic loading.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....	8
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος.....	8
1.2 Στόχος της Εργασίας.....	11
1.3 Διάρθρωση της Εργασίας.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Παθητική Σταθεροποίηση στην Βιβλιογραφία	12
2.1 Κολλοειδής Πυριτία ως σταθεροποιητής.....	12
2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών.....	12
2.1.2 Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM.....	12
2.1.3 Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που αφορούν στην παθητική σταθεροποίηση	13
A) Γελοποίηση (Gelation).....	13
B) Ωρίμανση (Aging)	14
Γ) Ξήρανση (Drying)	14
Δ) Μηχανισμός αυτό-ίασης του σταθεροποιημένου εδάφους (self-healing mechanism).....	14
2.2 Εργαστηριακές μελέτες Παθητικής Σταθεροποίησης.....	14
2.2.1 Μελέτη των Gallagher and Mitchell (2002)	15
2.2.2 Μελέτη των Diaz-Rodriguez et al. (2008).....	16
2.2.3 Μελέτες των Porcino et al. (2011) και Porcino et al. (2012)	18
2.2.4 Μελέτη των Ciardi et al. (2020)	25
2.2.5 Μελέτη των Vranna et al. (2020).....	27
2.2.6 Μελέτη των Pavliorouli και Georgiannou (2021)	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Φυσικά και Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά και εργαστηριακές Μέθοδοι.....	33
3.1 Εισαγωγή	33
3.2 Πειραματικός προσδιορισμός μεγέθους κόκκων.....	33
3.2.1 Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα.....	34
3.3 Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων	35
3.3 Φυσικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά	36
3.3.1 Άμμος M31.....	37
3.3.3 Άμμος Longstone	37
3.4 Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά.....	38
3.5 Περιγραφή Τριαξονικής Ανακυκλικής Δοκιμής.....	39
3.6 Περιγραφή Τριαξονικής Δυναμικής Δοκιμής	42
3.6 Διαδικασία πειράματος.....	45
3.6.1 Παρασκευή φυσικών δοκιμών	45
3.6.2 Παρασκευή σταθεροποιημένων δοκιμών.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανακυκλική Τριαξονική Φόρτιση	48

4.1 Εισαγωγή	48
4.2 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση φυσικής άμμου M31 και Longstone υπό αστράγγιστες συνθήκες	48
4.3 Μηχανισμός ανάπτυξης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση των άμμων M31 και Longstone	61
4.4 Καμπύλες ρευστοποίησης των άμμων M31 και Longstone	64
4.5 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμου M31 και Longstone σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	67
4.6 Σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και Longstone.....	92
4.7 Σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς της άμμου Longstone με την άμμο M31	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Δυναμική Τριαξονική Φόρτιση.....	122
5.1 Δυναμική τριαξονική φόρτιση φυσικής άμμου M31 και Longstone υπό αστράγγιστες συνθήκες	122
5.2 Μηχανισμός ανάπτυξης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την δυναμική, τριαξονική φόρτιση άμμου M31 και Longstone	132
5.3 Καμπύλες ρευστοποίησης της άμμου M31 και της άμμου Longstone.....	133
5.4 Δυναμική ανακυκλική φόρτιση άμμου M31 και Longstone σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης	135
5.5 Σύγκριση της δυναμικής ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και Longstone	152
5.6 Σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς της άμμου Longstone με την άμμο M31	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία	182

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Η ρευστοποίηση χονδρόκοκκων εδαφών (άμμοι, αμμοχάλικα, μη πλαστικές αμμοιούλες) θεωρείται μία από τις πιο επιβλαβείς φυσικές καταστροφές για τα δομικά έργα και τα έργα υποδομής, και εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων. Κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης, το κορεσμένο χονδρόκοκκο έδαφος αδυνατεί να συμπιεστεί (λόγω αδυναμίας διαφυγής του νερού στα λίγα δευτερόλεπτα της διεγέρσης), με αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων του νερού των πόρων. Σύμφωνα λοιπόν, με την αρχή της ενεργού τάσης, όσο η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται, η ενεργός τάση μειώνεται, και μπορεί να μηδενιστεί. Στην περίπτωση αυτή, η διατμητική αντοχή του εδάφους γίνεται σχεδόν μηδενική και παρατηρείται απότομη αύξηση παραμορφώσεων του εδάφους, άρα και μεγάλες μετακινήσεις στα έργα Πολιτικού Μηχανικού.

Ο κίνδυνος της ρευστοποίησης σε νέες κατασκευές μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, λαμβάνοντας κατάλληλα μέτρα για τη βελτίωση του εν δυνάμει ρευστοποιήσιμου εδάφους. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι βασίζονται στη συμπύκνωση (π.χ. δυναμική συμπύκνωση, βαθιά δονητική συμπύκνωση), την σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) και τη διευκόλυνση της αποτόνωσης των υπερ-πιέσεων του νερού των πόρων (π.χ. με χρήση στραγγιστηρίων). Το μεγάλο πρόβλημα παραμένει σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, κατά τη μελέτη των οποίων δεν είχε ληφθεί υπόψη ο κίνδυνος ρευστοποίησης. Ο λόγος είναι ότι οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες βελτίωσης εδάφους αδυνατούν να εφαρμοσθούν, ή εφαρμόζονται πολύ δύσκολα. Η αδυναμία αυτή οφείλεται τόσο σε χωροταξικούς λόγους (έλλειψη χώρου λόγω αστικού περιβάλλοντος, αδυναμία κάλυψης ολόκληρης της κάτοψης του κτιρίου), όσο και σε κινδύνους πρόκλησης βλαβών στην κατασκευή από τη χρήση των μηχανημάτων για τη βελτίωση (π.χ. δονήσεις). Επιπρόσθετα, η παράλληλη λειτουργία της κατασκευής σε συνδυασμό με τις εργασίες αυτές αποτελεί πολλές φορές περιοριστικό παράγοντα (π.χ. νοσοκομεία). Παράλληλα, το κόστος για την επίτευξη του στόχου και την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων είναι πολλές φορές απαγορευτικό, ιδιαίτερα σε μεγάλες περιοχές που οικοδομήθηκαν χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο κίνδυνος της ρευστοποίησης.

Για τους παραπάνω λόγους, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για βελτίωση εδαφών έναντι ρευστοποίησης σε υφιστάμενες κατασκευές είναι:

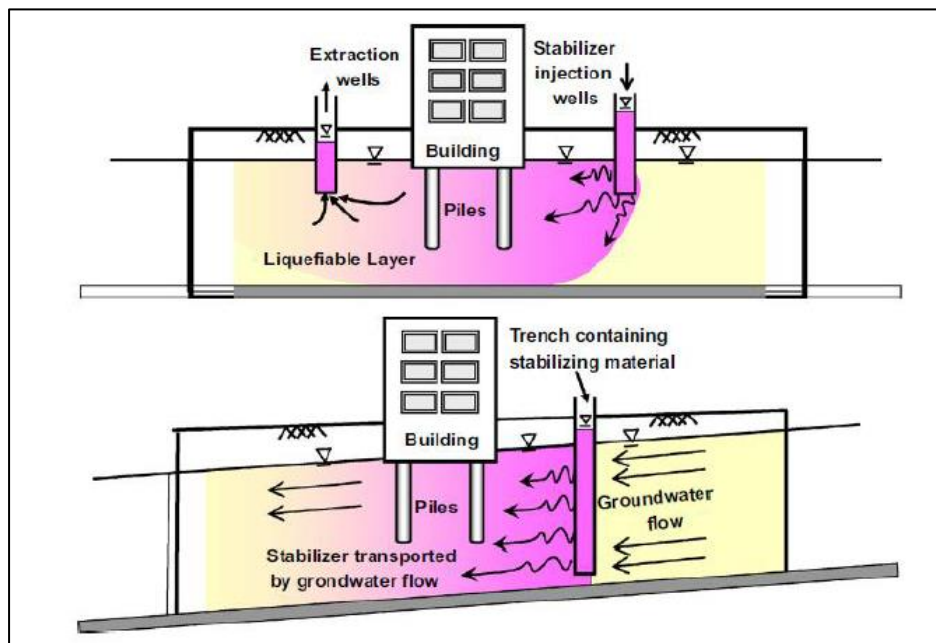
- Τοποθέτηση μικροπασσάλων ή διαφραγματικού τοίχου στην περίμετρο
- Εισπίεση ενέματος (grouting)
- Έμπηξη στραγγιστηρίων με μορφή διακορευμένων σωλήνων περιμετρικά των κτηρίων

Παρόλα αυτά, οι μεθοδολογίες αυτές δεν θεωρούνται πλήρως αποτελεσματικές καθώς, αφενός αδυνατούν να βελτιώσουν το έδαφος στο σύνολο της κάτοψης της κατασκευής και αφετέρου ο κίνδυνος πρόκλησης βλαβών στην κατασκευή είναι υψηλός. Επιπρόσθετα, έχουν και υψηλό κόστος εφαρμογής, γεγονός που πάντα αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα. Η παθητική στερεοποίηση είναι μια εναλλακτική, πολλά υποσχόμενη μέθοδος βελτίωσης, η οποία δεν παρουσιάζει τα

παραπάνω προβλήματα. Μελετήθηκε και παρουσιάστηκε αρχικά από την Gallagher (2000) και έχει αποτελέσει έκτοτε αντικείμενο έρευνας διεθνώς. Η μεθοδολογία συνίσταται στα εξής:

- Εισπίεση με χαμηλή πίεση ενός σταθεροποιητή (stabilizer) στο έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής. Ο σταθεροποιητής αποτελείται από νάνο-σωματίδια διαφόρων πιθανών μορφών χημικής σύστασης που εύκολα εισπνέζεται σε όλη την επιφάνεια της κάτοψης της κατασκευής.
- Ο σταθεροποιητής, αλληλοεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό και το υγρό των πόρων αλλάζοντας τη σύσταση του εδάφους και κατά συνέπεια τη μηχανική συμπεριφορά του και καθιστώντας το λιγότερο έως καθόλου ευάλωτο σε ρευστοποίηση.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η φύση του σταθεροποιητή που επιτρέπει την εύκολη εισπίεση του σε συνδυασμό με την ομοιόμορφη εξάπλωσή του με αποτέλεσμα τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς. Ο σταθεροποιητής έχει αρχικά πολύ χαμηλό ιξώδες (εφάμιλλο με του νερού) που επιτρέπει την εύκολη εισπίεση του στο έδαφος, ενώ προοδευτικά το ιξώδες αυξάνεται ελεγχόμενα με την πάροδο του χρόνου μέχρις ότου να φθάσει τη μέγιστη τιμή όταν ο σταθεροποιητής θα βρίσκεται κάτω από την επιθυμητή περιοχή.



Σχήμα 1.1 Η εφαρμογή της μεθόδου παθητικής στερεοποίησης στην πράξη: α) με εισπίεση και άντληση, β) μέσω της φυσικής υπόγειας ροής (Patuk et al. 2007).

Η ποιότητα της εκτελεσθείσας παθητικής στερεοποίησης πρέπει να διασφαλίζεται. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών που αφορούν τόσο την απαραίτητη ποσότητα υλικού που πρέπει να διηθηθεί ώστε να έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, όσο και δοκιμών που αφορούν την ποιότητα και την ταχύτητα διήθησης του υλικού και την εξάπλωσή του σε

ολόκληρη την επιφάνεια που μας ενδιαφέρει. Η εισπίεση στην περιοχή της θεμελίωσης ενός κτιρίου μπορεί να γίνει είτε μέσω γεωτρήσεων εισπίεσης και άντλησης εκατέρωθεν της κατασκευής με μεγαλύτερη υδραυλική κλίση από τη φυσική (εάν υπάρχει), ή με τη διήθηση του σταθεροποιητή μέσω φρεάτων χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα φυσική ροή για τη μεταφορά του (Σχήμα 1.1). Το κόστος της μεθόδου θεωρείται συγκρίσιμο με αυτά των υπάρχουσών μεθοδολογιών εδαφοπασσάλων (grouting) και αναμένεται περαιτέρω μείωση του εάν υπάρξει ευρύτερη εφαρμογή στην πράξη. Η μέθοδος της παθητικής στερεοποίησης βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, δεδομένου ότι πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές του 21ου αιώνα. Επομένως τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως σταθεροποιητές μελετώνται ακόμα. Εξυπακούεται ότι κάθε υποψήφιο υλικό επιβάλλεται να είναι μη τοξικό, να έχει υψηλή ανθεκτικότητα και να πληροί τις απαραίτητες περιβαλλοντικές προδιαγραφές, καθώς μιλάμε για διήθηση του στο υπέδαφος. Κυρίαρχα υλικά όπως καταδεικνύεται από τις μελέτες αποτελούν η κολλοειδής πυριτία (colloidal silica), αλλά και τα αργιλικά πλακίδια. Ειδικότερα, η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευσή της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα ανθεκτική στον χρόνο και στους φυσικοχημικούς παράγοντες. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η γέλη πυριτίας που διατηρείται κορεσμένη αναμένεται να παραμείνει υγιής για 25 έτη στο πεδίο. Αναφέρεται, επίσης, ότι αποτελεί μία λύση οικονομικά ελκυστική με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των παραδοσιακών μεθόδων βελτίωσης.

Οι ιδιότητες των φυσικών εδαφών, όπως οι άμμοι και οι άργιλοι, έχουν μελετηθεί και είναι αρκετά γνωστές. Αντίθετα, εδάφη σταθεροποιημένα με χημικά υλικά όπως η κολλοειδής πυριτία, αντιπροσωπεύουν ένα σύνθετο υλικό, το οποίο έχει τις δικές του μοναδικές μηχανικές ιδιότητες. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα σταθεροποιημένα με πυριτία εδάφη εμφανίζουν μικρότερες διατμητικές παραμορφώσεις και καθιζήσεις υπό ανακυκλική φόρτιση. Ωστόσο υπάρχει ανάγκη να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων με πυριτία εδαφών με τρόπο τέτοιο ώστε να τους επιτρέπεται η ενσωμάτωση σε εδαφικά μοντέλα που χαρακτηρίζουν την ανακυκλική συμπεριφορά. Για αυτό το λόγο παράγοντες όπως η πίεση πόρων, η επίδραση της πυκνότητας του δοκιμίου, το ποσοστό σταθεροποιητή και ο χρόνος στερεοποίησης πρέπει να ερευνηθούν σε ένα ευρύ πεδίο τάσεων φόρτισης. Η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας σε σχέση με τη ρευστοποίηση της άμμου έχει προσεγγιστεί με διάφορες δοκιμές στη βιβλιογραφία: ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές (Maher et al. 1994b, Gallagher 2000, Towata and Kabashima 2001, Gallagher and Mitchell 2002, Liao et al. 2003), ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης (Kodaka et al. 2005), ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης (Rodriguez et al. 2008) και δοκιμές στήλης (Al et al. 2004, Gallagher et al. 2007, Spencer and Rix 2008) όπως και δοκιμές πεδίου σε πραγματική κλίμακα (Gallagher et al. 2007, Conlee et al. 2009). Οι περισσότεροι από τους παραπάνω ερευνητές (Persoff et al. 1999, Gallagher and Mitchell 2002, Rodriguez et al. 2008) βρήκαν ότι το ποσοστό της πυριτίας που χρησιμοποιείται έχει σημαντική επίδραση στην αύξηση της αντοχής των ρευστοποιήσιμων εδαφών. Το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική είναι η δυναμική φόρτιση που προσομοιώνει τις συνθήκες πεδίου σε σχέση με την αργή ανακυκλική φόρτιση και ανάλογες δοκιμές είναι σχετικά σπάνιες στη βιβλιογραφία

1.2 Στόχος της Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παθητική σταθεροποίηση των αμμωδών εδαφικών υλικών με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Συγκρίνεται η μηχανική συμπεριφορά φυσικών και σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία CS=10% κατά βάρος δοκιμών άμμου. Πιο συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου δοκιμές:

1. Ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης, με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης σε ανακυκλική φόρτιση των σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31 και Longstone και τη σύγκρισή τους με αυτή των φυσικών δοκιμών άμμου.
2. Δυναμικής τριαξονικής φόρτισης, με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης σε ανακυκλική φόρτιση των σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31 και Longstone και τη σύγκρισή τους με αυτή των φυσικών δοκιμών.

1.3 Διάρθρωση της Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου. Συνοπτικά :

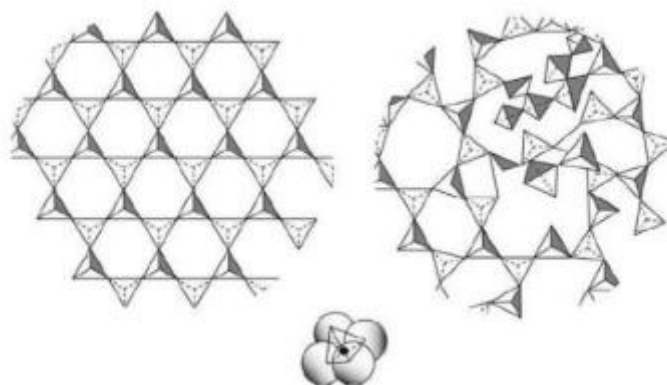
- Στο Κεφάλαιο 2 διερευνάται η υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία, με έμφαση τόσο στα χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας, όσο και στις υπάρχουσες μελέτες παθητικής σταθεροποίησης με αυτό το υλικό.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές καθώς και η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών, ο τρόπος παρασκευής των δοκιμών καθώς και η λειτουργία των συσκευών.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανακυκλικής τριαξονικής δοκιμής τόσο για τα φυσικά όσο και για τα σταθεροποιημένα δοκίμια.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα της δυναμικής τριαξονικής δοκιμής τόσο για τα φυσικά όσο και για τα σταθεροποιημένα δοκίμια.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.
- Στο Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Παθητική Σταθεροποίηση στην Βιβλιογραφία

2.1 Κολλοειδής Πυριτία ως σταθεροποιητής

2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών

Η κολλοειδής επιστήμη μελετά συστήματα που αποτελούνται από 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 δυνάμεις του πεδίου βαρύτητας. Συνεπώς, με βάση αυτές τις διαστάσεις όταν αναμιγύονται με νερό τα κολλοειδή σωματίδια διαφοροποιούνται από τα αιωρήματα και από τα πραγματικά διαλύματα. Τα κολλοειδή σωματίδια χωρίζονται σε διακριτικά και μη διακριτά. Η διάταξη της δομής των ατόμων ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να είναι είτε κρυσταλλική είτε άμορφη, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.1.



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

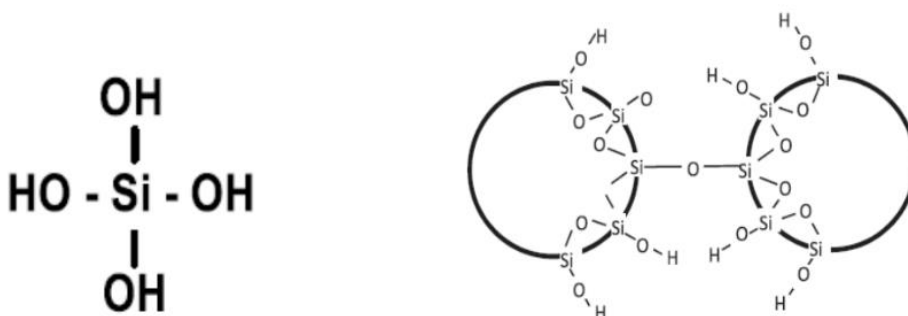
Εξαιτίας των μικροσκοπικών διαστάσεων τους, ο λόγος επιφάνειας/όγκου προς μάζα ή επιφάνειας/μάζας είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές για την πυριτία Ludox-SM (που χρησιμοποιείται στο Ε.Μ.Π., βλ. παρ. 2.1.2) ο λόγος αυτός ισούται με $345\text{ m}^2/\text{g}$. Οι ιδιότητες των επιφανειών και των διεπιφανειών καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα αλληλοεπιδράσουν τα σωματίδια. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μπορεί να είναι είτε απωστικές (ηλεκτροστατικές) είτε ελκτικές (Van der Waals). Ανάλογα με το ποιες υπερτερούν καθορίζεται και η φύση του διαλύματος.

2.1.2 Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM

Η κολλοειδής πυριτία που έχει χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών στο Ε.Μ.Π. ονομάζεται Ludox-SM στο εμπόριο και είναι μια υδάτινη διασπορά διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας μεγέθους 7 nm . Τα σωματίδια είναι συμπαγή και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή. Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας, όπως έρχεται από το εμπόριο, έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 ίση με 30% κατά βάρος και είναι

σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10 με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na₂O. Το ιξώδες του υγρολύματος ισούται με 5,5 cP (το ιξώδες του νερού σε συνήθη θερμοκρασία ισούται με 1cP). Το ιξώδες του υγρολύματος μπορεί να μειωθεί με αραιώση, η οποία οδηγεί και σε ποσοστά κατά βάρος πυριτίας μικρότερα από 30%, ανάλογα με τη χρήση.

Η κolloειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευση της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Η διάρκεια ζωής της μπορεί να υπερβεί τα 25 χρόνια και παράλληλα προτείνεται για την καλύτερη δυνατή διατήρηση της να αποθηκεύεται σε ξηρό περιβάλλον θερμοκρασίας 20-25°C.



Σχήμα 2.2 (α) Δομή μονομερούς σωματιδίου κolloειδούς πυριτίας, (β) δεσμοί σιλοξάνης μεταξύ σωματιδίων κolloειδούς πυριτίας κατά την γελοποίηση (Moridis et al. 1995)

2.1.3 Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που αφορούν στην παθητική σταθεροποίηση

Μερικές από τις φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας σχετίζονται άμεσα με την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών, η οποία επιτυγχάνεται μέσω διοχέτευσης κolloειδούς πυριτίας στους εδαφικούς πόρους. Λόγω του χαμηλού ιξώδους της η πυριτία μπορεί να διοχετευτεί στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών υπό χαμηλή υδραυλική κλίση. Παράλληλα, η πυριτία έχει την δυνατότητα (με την ρύθμιση του pH της και της περιεκτικότητας σε άλατα) να σχηματίσει αρκετά γρήγορα γέλη. Η ταχεία αυτή γελοποίηση καθιστά εφικτή την πλήρωση των εδαφικών πόρων με το υγρόλυμα της πυριτίας χωρίς αυτό να αντικατασταθεί αργότερα από το νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Οι κύριες φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που αφορούν στην παθητική σταθεροποίηση κατά τους Brinker και Scherer (1990) παρουσιάζονται παρακάτω:

A) Γελοποίηση (Gelation)

Γελοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται συμπλέγματα από τη συμπύκνωση πολυμερών ή τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέχρι τη στιγμή που τα συμπλέγματα συγκρούονται. Τότε δημιουργούνται δεσμοί μεταξύ των συμπλεγμάτων, σχηματίζοντας ένα πολύ μεγαλύτερο σύμπλεγμα. Την ώρα που δημιουργείται η γέλη (gel point) υπάρχουν ακόμη ελεύθερα

συμπλέγματα εκτός σκελετικής δομής, που αναμένεται να ενωθούν με αυτή μεταγενέστερα προσδίδοντας της επιπλέον στιβαρότητα.

B) Ωρίμανση (Aging)

Οι αντιδράσεις που οδηγούν στη γελοποίηση δεν σταματούν στο gel point. Αντίθετα, όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν ακόμη αρκετά ελεύθερα συμπλέγματα, τα οποία εν καιρώ θα συγκρουστούν-ενωθούν με την ενιαία σκελετική δομή συμπυκνώνοντας την περαιτέρω. Επομένως οι ιδιότητες της γέλης συνεχίζουν να μεταβάλλονται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το gel point. Αυτή η διαδικασία λέγεται ωρίμανση και οδηγεί σε ένα πυκνότερο και πιο στιβαρό αλλά όχι συρρικνωμένο σκελετικό δίκτυο.

Γ) Ξήρανση (Drying)

Είναι η απομάκρυνση του νερού από τους πόρους της γέλης υπό συνθήκες συνήθους θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή σχεδόν αλλάζει τη διφασικότητα του υλικού, κάνοντας το εν γένει τριφασικό και η συμπεριφορά του θα μπορούσε να προσομοιωθεί με αυτή ενός ακόρεστου εδάφους.

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

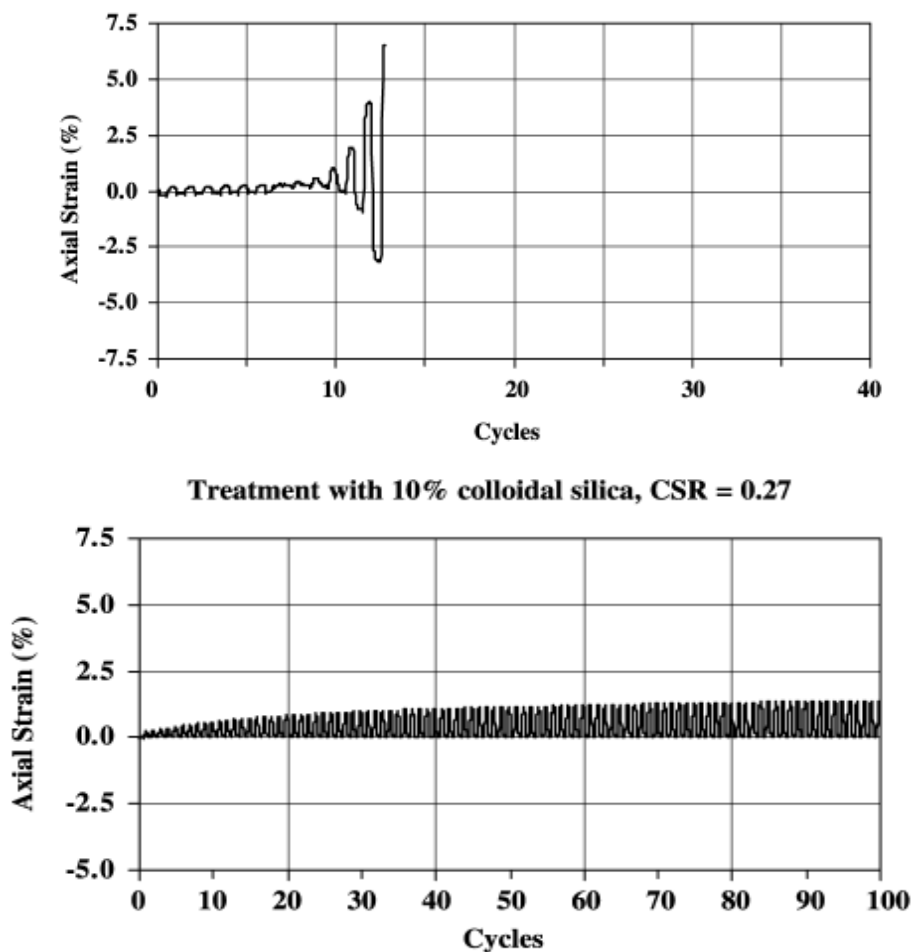
Μετά από μερική καταστροφή των δεσμών του σκελετικού δικτύου (π.χ. ένα έντονο σεισμικό γεγονός), το σταθεροποιημένο έδαφος θα εκτονώσει αργά τις παραμένουσες πιέσεις, μέσω καθιζήσεων που θα φέρουν πιο κοντά τα «σπασμένα κομμάτια» του δικτύου (πυριτικές αλυσίδες), με συνέπεια να δημιουργηθούν νέοι δεσμοί σιλοξάνης, και το δίκτυο να αρχίσει να αποκτά ξανά στιβαρότητα, ενώ γίνεται λιγότερο διαπερατό. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αυτό-ίαση και μπορεί να παρατηρηθεί εργαστηριακά και κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων εδαφών.

2.2 Εργαστηριακές μελέτες Παθητικής Σταθεροποίησης

Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου έχουν διεξαχθεί διάφορες εργαστηριακές μελέτες που επικεντρώνονται σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστεί η αντίσταση του σταθεροποιημένου (με κολλοειδή πυριτία) εδάφους στην ρευστοποίηση. Συγκεκριμένα, 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. 3%). 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. Στις περισσότερες εργαστηριακές μελέτες, η αντίσταση σε ρευστοποίηση καταγραφόταν χωρίς να γίνεται μέτρηση της πίεσης του υγρού των πόρων (Gallagher και Mitchell 2002). Όμως, σε πιο πρόσφατες μελέτες (Porcino et al. 2012, Pavlou και Georgiannou 2021) πραγματοποιείται μέτρηση της πίεσης πόρων, και έτσι γίνεται πιο κατανοητή η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων καθώς αναλύεται με βάση την αρχή των ενεργών τάσεων.

2.2.1 Μελέτη των Gallagher and Mitchell (2002)

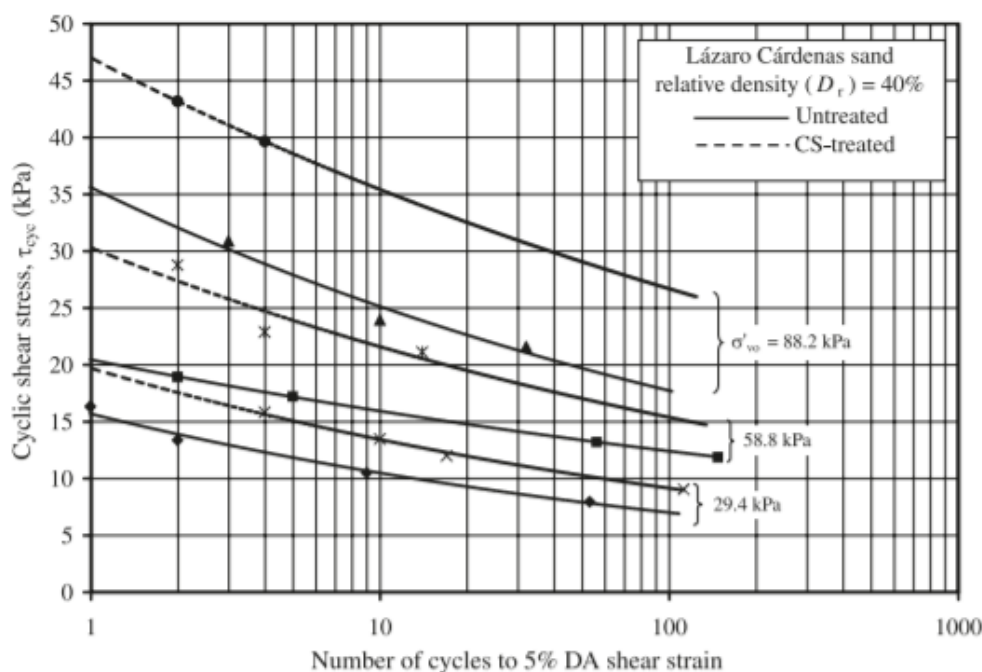
Οι Gallagher και Mitchell (2002) διεξήγαγαν ιστορικά τις πρώτες σχετικές μελέτες με χρήση αστράγγιστων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια άμμου Monterey No. 0/30 με και χωρίς προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφάνιση της ξηρής άμμου στο υγρόλυμα πυριτίας από συγκεκριμένο ύψος για να εξασφαλιστεί ο κορεσμός σε πυριτία του δοκιμίου. Τα δοκίμια έχουν σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ και εύρος ποσοστού σταθεροποιητή 5-20% κατά βάρος. Η σταθεροποίηση με Ludox-SM οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίησης συγκριτικά με τα δοκίμια άμμου χωρίς πυριτία. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι αξονικές παραμορφώσεις για καθαρή και σταθεροποιημένη άμμο για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.27$, όπου CSR για τριαξονικές δοκιμές δίνεται ως ο λόγος $\Delta q/2p'_v$, με Δq το επιβαλλόμενο εύρος της αποκλίνουσας τάσης $q = (\sigma_v - \sigma_h)$ και p'_v είναι η μέση ενεργός τάση $= (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ στην αρχή της δοκιμής. Η άμμος 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 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.



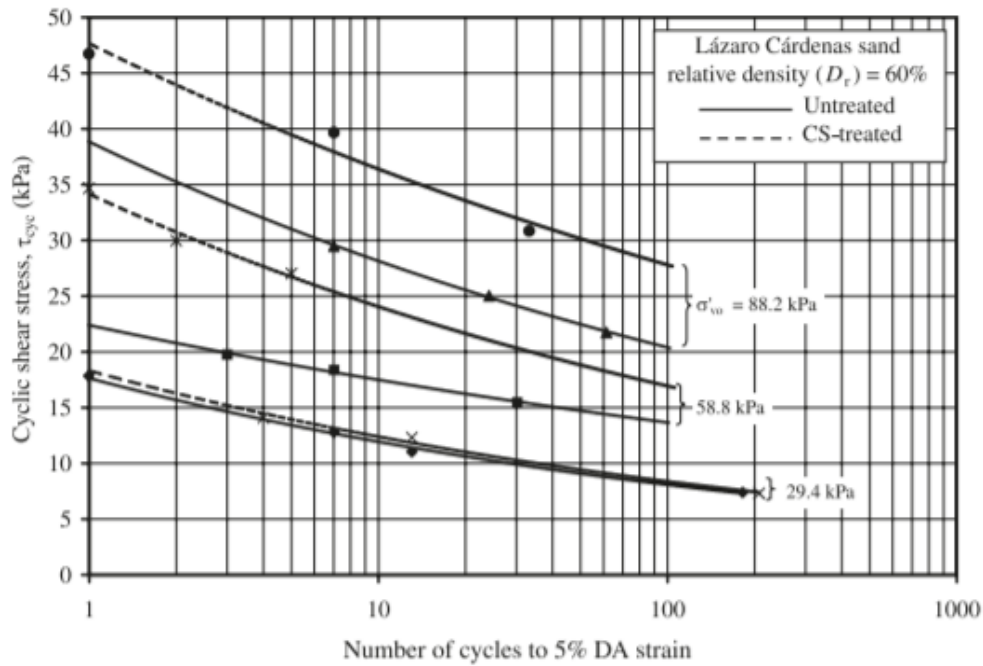
Σχήμα 2.3 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές: (α) άμμος, (β) σταθεροποιημένη άμμος (Gallagher and Mitchell (2002))

2.2.2 Μελέτη των Diaz-Rodriquez et al. (2008)

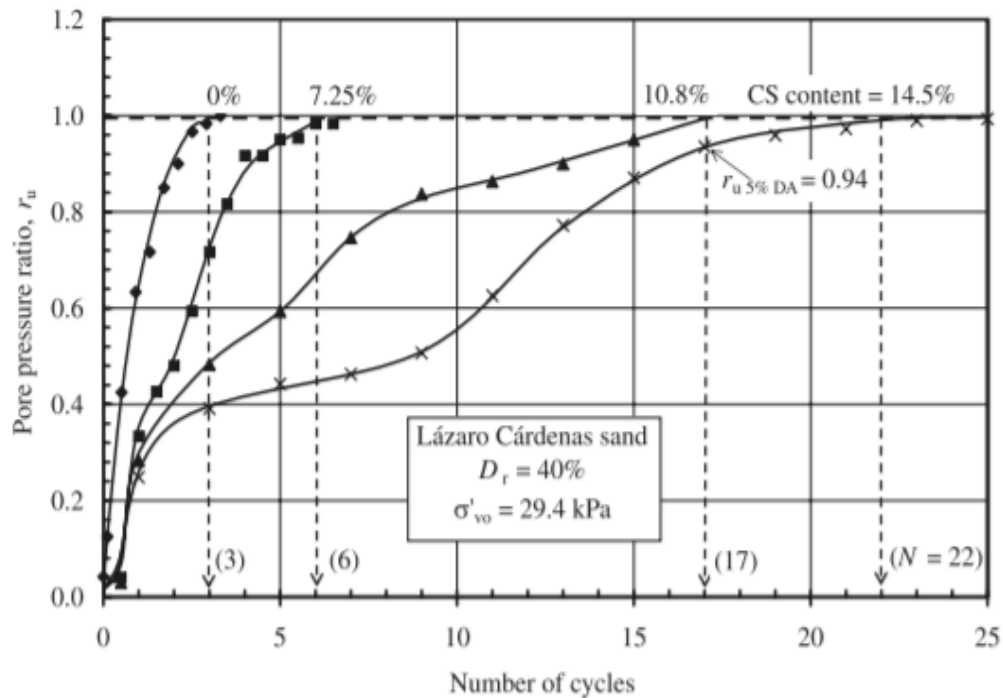
Οι Diaz-Rodriguez et al. (2008) διεξήγαγαν μια σειρά από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο για να αποφύγουν την μέτρηση της πίεσης πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση σύμφωνα με τους Finn and Vaid (1977). Στην εργαστηριακή μελέτη των Diaz-Rodriquez et al. 2008 χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια άμμου Lazaro Cardenas και σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό κατά βάρος πυριτίας στο σταθεροποιητή CS=14.5%, της οποίας ο τύπος δεν διευκρινίζεται στη δημοσίευση (δεν ήταν αναγκαστικά Ludox-SM). Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι κακής διαβάθμισης, με 11.5% ποσοστό λεπτόκοκκων με $e_{max}=1.17$, $e_{min}=0.77$ και $D_{50}=0.17\text{mm}$. Τα δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου είχαν αρχικές ενεργές τάσεις $\sigma'_{v0}=29.4\text{ kPa}$, $\sigma'_{v0}=58.8\text{ kPa}$ και $\sigma'_{v0}=88.2\text{ kPa}$. Ακόμη, για να γίνει μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r=40\%$ και $D_r=60\%$. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών στα Σχήματα 2.4 και 2.5 προκύπτει σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους έναντι αυτής της φυσικής άμμου για 10 κύκλους φόρτισης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου έναντι του φυσικού εδάφους με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης στο μικρό εύρος ενεργών τάσεων που επιβλήθηκαν. Ωστόσο η βελτίωση αυτή είναι πολύ μικρή σε χαμηλές τάσεις ($\sigma'_{v0} < 50\text{kPa}$). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στο σταθεροποιημένο έδαφος έναντι του φυσικού ώστε να γίνει ο λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u = \Delta u / \sigma'_{v0}$) ίσος με 1, όπου Δu είναι η υπερπίεση πόρων, η οποία υπολογίζεται έμμεσα, και σ'_{v0} η αρχική ενεργός τάση. Τέλος, η αύξηση του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας στον σταθεροποιητή οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντίστασης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης (βλ. Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.4 Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=40\%$ (Diaz-Rodriquez et al. 2008).



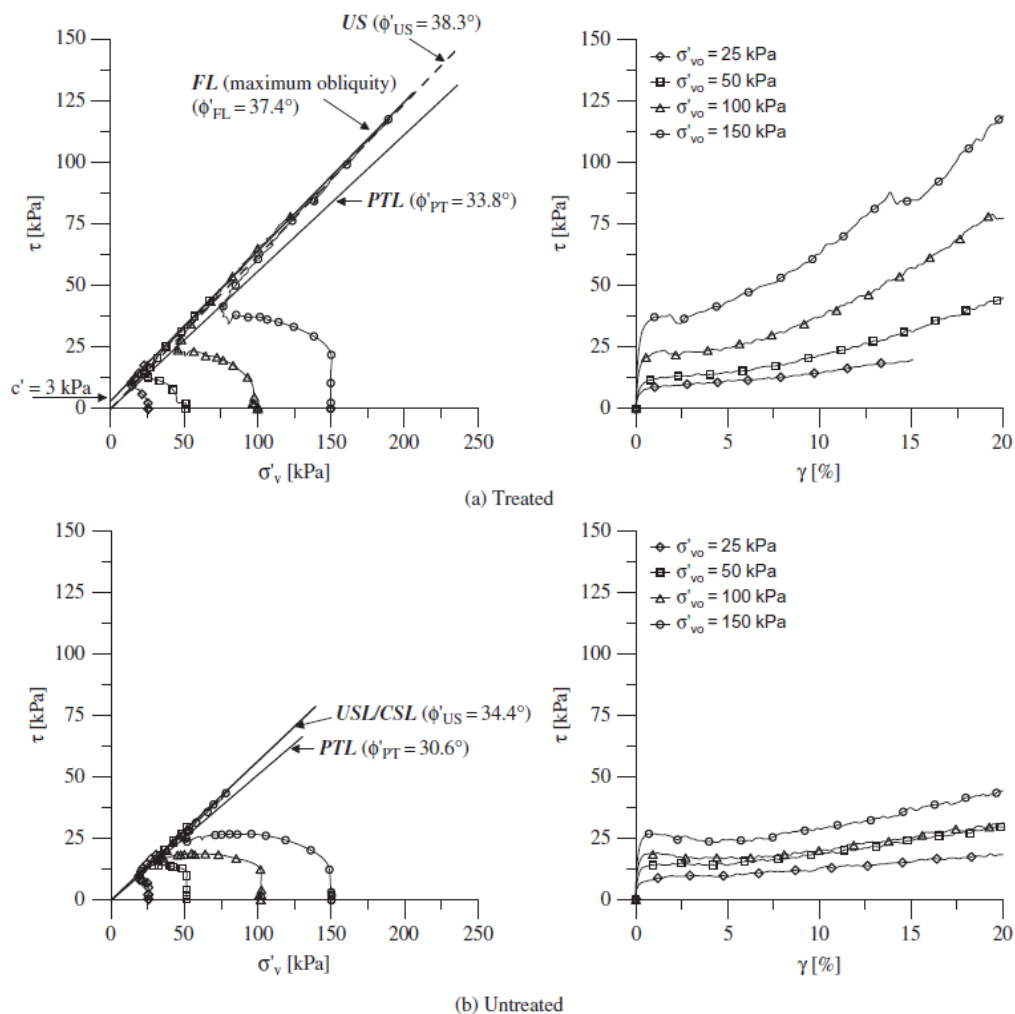
Σχήμα 2.5 Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=60\%$ (Díaz-Rodríguez et al. 2008).



Σχήμα 2.6 Ρυθμός ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσης των πόρων r_u συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά πυριτίδας κατά βάρος στον σταθεροποιητή, για δοκίμια με $D_r=40\%$ και $\sigma'_{vo}=29.4\text{kPa}$ (Díaz-Rodríguez et al. 2008).

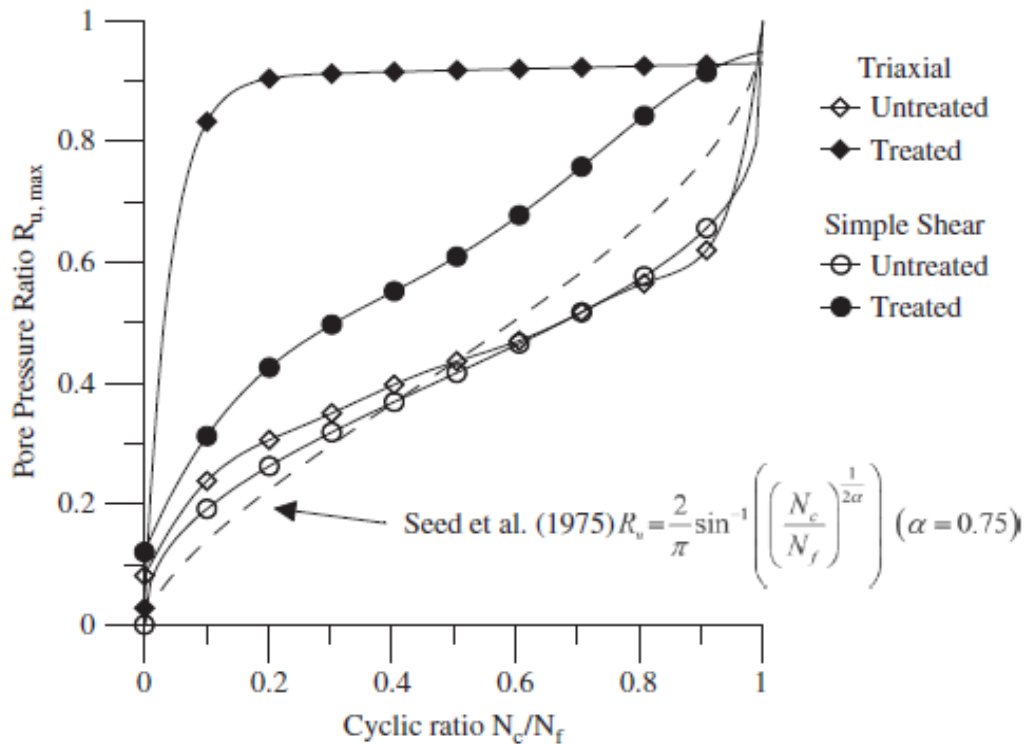
2.2.3 Μελέτες των Porcino et al. (2011) και Porcino et al. (2012)

Οι εργαστηριακές μελέτες των Porcino et al. (2011) και Porcino et al. (2012) έδωσαν βάση στην μέτρηση της πίεσης του υγρού των σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Porcino et al. (2011) εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές αστράγγιστης απλής διάτμησης, και αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου Ticino silica και σε σταθεροποιημένα με sodium-silicate δοκίμια της ίδιας άμμου. Τα δοκίμια άμμου παρασκευάστηκαν σε σχετικές πυκνότητες $Dr=45\%$ και $Dr=75\%$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με ξηρή εμβάπτιση εδαφικού υλικού και εισπίεση του υγρού υπό κατακόρυφη τάση 10 kPa σε σχετική πυκνότητα $Dr=45\%$. Στη συνέχεια, το σταθεροποιημένο δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει για 24 ώρες. Ο κορεσμός των δοκιμών στην τριαξονική συσκευή εξασφαλίζεται με την εφαρμογή αντιπίεσης (back pressure) 300 kPa για 12 ώρες. Έπειτα το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα και αφήνεται σε ισορροπία για 3 ώρες πριν γίνει η διάτμηση. Οι ερευνητές θεώρησαν ότι ο χρόνος αυτός είναι αρκετός για την ολοκλήρωση της στράγγισης και την αποφυγή φαινομένων ερπυσμού. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7, στις αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης στα δοκίμια άμμου παρατηρείται ελάχιστη διαστολική συμπεριφορά (μετά τη γραμμή αλλαγής φάσης στο χώρο των τάσεων), σε αντίθεση με τα σταθεροποιημένα δοκίμια τα οποία αναπτύσσουν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις καθώς και αρκετά σημαντικότερη διαστολικότητα. Επιπλέον παρατηρείται ότι η γραμμή αλλαγής φάσης των σταθεροποιημένων δοκιμών έχει πάντα υψηλότερη κλίση στο χώρο των τάσεων από τη αντίστοιχη γραμμή των δοκιμών φυσικής άμμου.



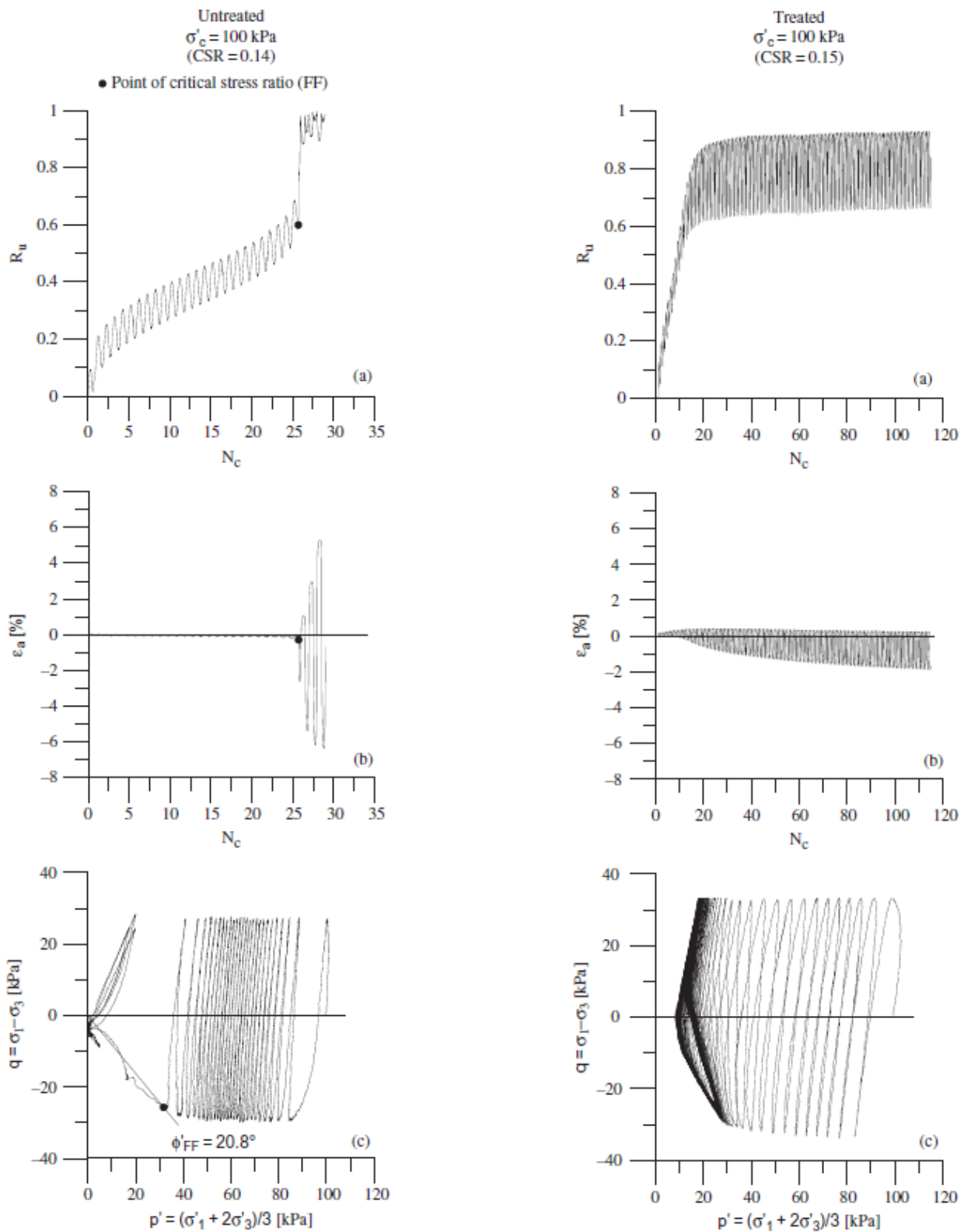
Σχήμα 2.7 Ασφράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης σε (α) σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου, (β) δοκίμια άμμου (Porcino et al. 2011)

Οι ερευνητές παρατήρησαν διαφορές στην ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων και στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κατά την ασφράγγιστη ανακυκλική φόρτιση τους, ειδικά στην τριαξονική συσκευή (Σχήμα 2.8). Συγκεκριμένα, 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. Αυτό δεν είναι το ίδιο έντονο σε δοκιμές απλής διάτμησης, ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης των υπερπίεσεων πόρων είναι ταυτόσημος σε μη σταθεροποιημένα δοκίμια, ανεξάρτητα της δοκιμής, και λιγότερο έντονος απ' ότι για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Συνεπώς, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι οι υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν την ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων δεν είναι κατάλληλες για τα σταθεροποιημένα εδάφη.



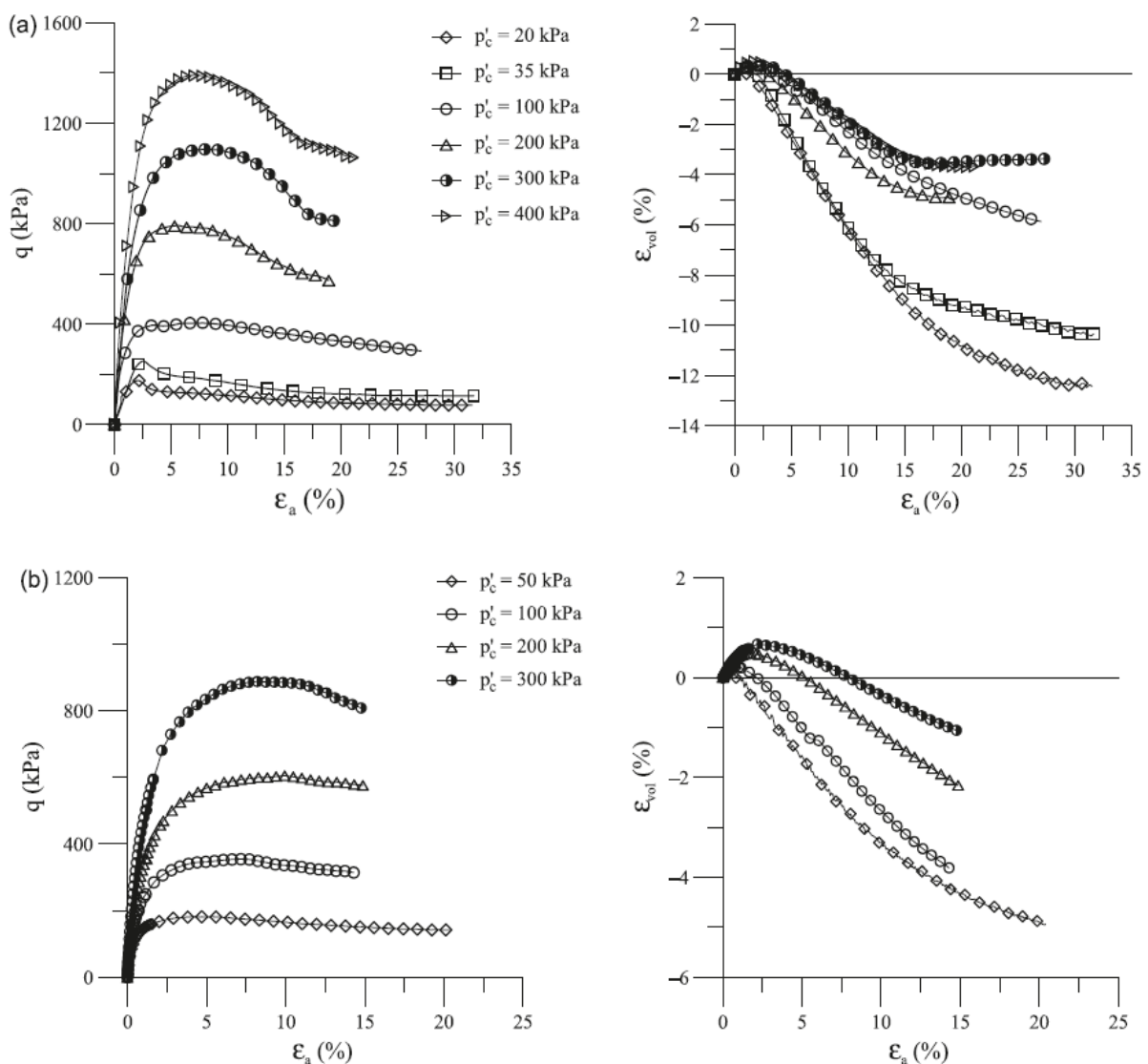
Σχήμα 2.8 Ρυθμός ανάπτυξης του λόγου υπερπιέσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (όπου $R_u = 1$ για $N_c = N_f$) για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου, υπό φόρτιση τριαξονική και απλής διάτμησης (Porcino et al. 2011)

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 2.9 συγκρίνονται πιο αναλυτικά ο ρυθμός ανάπτυξης υπερπιέσεων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης (άνω σχήματα), η συσσώρευση παραμορφώσεων (μεσαία σχήματα) και η ενεργός τασική όδευση (κάτω σχήματα) σε συγκρίσιμες δοκιμές σε δοκίμια άμμου (αριστερά) και δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου (δεξιά). Τα πάνω σχήματα αποτυπώνουν το διαφορετικό ρυθμό ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων λόγω σταθεροποίησης, που είδαμε και στο Σχήμα 2.8, ενώ τα μεσαία σχήματα δείχνουν ότι στα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν υπάρχει κατάρρευση του δοκιμίου λόγω υπερβολικής συσσώρευσης παραμορφώσεων. Τέλος, τα κάτω σχήματα δείχνουν παρόμοια ενεργό τασική όδευση, με τη διαφορά ότι δεν προκύπτει ποτέ $R_u = 1$ στα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου.



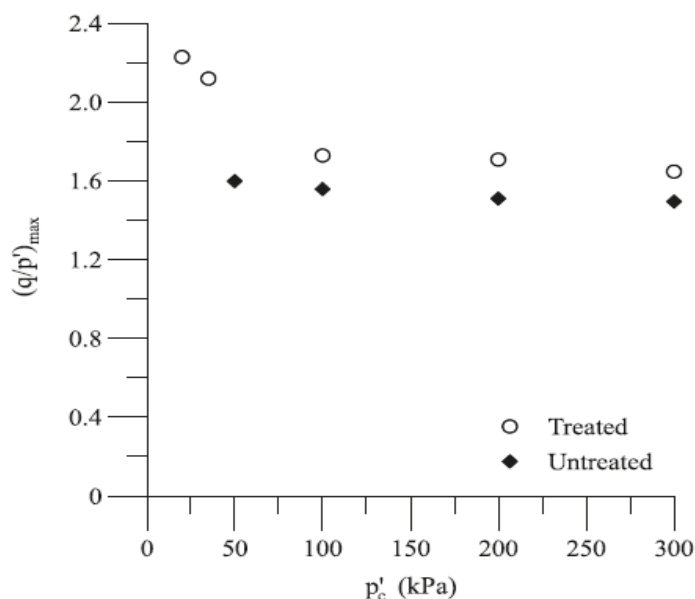
Σχήμα 2.9 Αποτελέσματα αστράγγιστης τριαξονικής ανακυκλικής δοκιμής: (αριστερά) σε φυσικό δοκίμιου άμμου, (δεξιά) σε σταθεροποιημένο δοκίμιου άμμου (Porcino et al. 2011)

Οι Porcino et al. 2012 μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου, διεξάγοντας τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης και ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης. Ο τρόπος παρασκευής των δοκιμών καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κοινά με την αντίστοιχη έρευνα των Porcino et al. (2011). Σε αυτή την έρευνα συγκρίνεται η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών με αυτή των δοκιμών φυσικής άμμου σε ένα εύρος αρχικής ενεργού τάσης $p'_c=40$ έως $p'_c=400$ (Σχήμα 2.10). Στα σταθεροποιημένα δοκίμια το εύρος της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης από την τελική τιμή είναι μεγαλύτερο από το εύρος των τάσεων στα φυσικά δοκίμια. Ακόμη, στα σταθεροποιημένα δοκίμια αφού επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή, εμφανίζεται ένας κλάδος χαλάρωσης (strain softening) που συνοδεύεται από ανάπτυξη διατμητικών επιπέδων (shear bands).

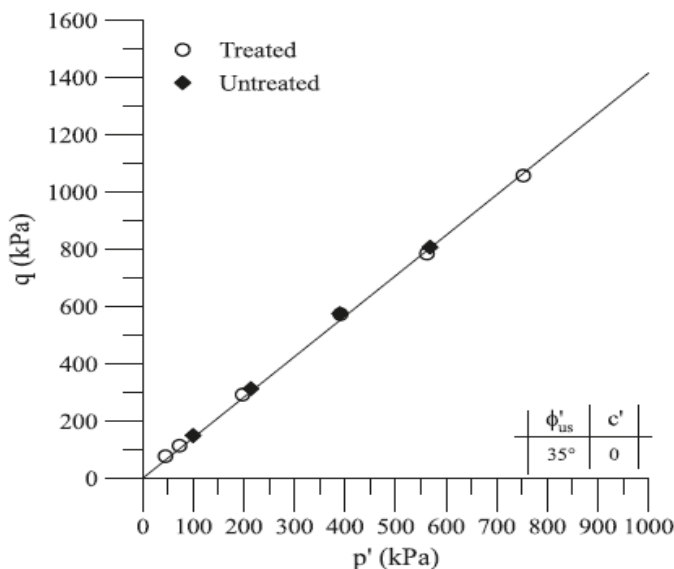


Σχήμα 2.10 Μηχανική συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση ελεύθερης στράγγισης δοκιμών σε όρους διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων και διαστολικότητας: (άνω) σταθεροποιημένης άμμου, (κάτω) φυσικής άμμου (Porcino et al. 2012).

Ταυτόχρονα, στο Σχήμα 2.11 παρατηρήθηκε αύξηση της διατμητικής αντοχής των σταθεροποιημένων δοκιμίων έναντι των φυσικών. Επιπλέον, προκύπτει μείωση του μέγιστου λόγου των τάσεων $(q/p')_{\max}$ όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης (p'_c) στα σταθεροποιημένα δοκίμια, ενώ στα φυσικά ο εν λόγω λόγος τάσεων παραμένει σταθερός. Οι ερευνητές αναφέρουν στην δημοσίευσή τους ότι αυτή η τάση μείωσης υποδεικνύει την έντονη καμπύλωση της περιβάλλουσας αστοχίας των σταθεροποιημένων εδαφών στο εύρος των μικρών τάσεων, ενώ η αντίστοιχη περιβάλλουσα για τα φυσικά είναι γραμμική. Αντίθετα, η κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας στην κρίσιμη κατάσταση δεν δείχνει επηρεασμένη από τη σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία (Σχήμα 2.12).

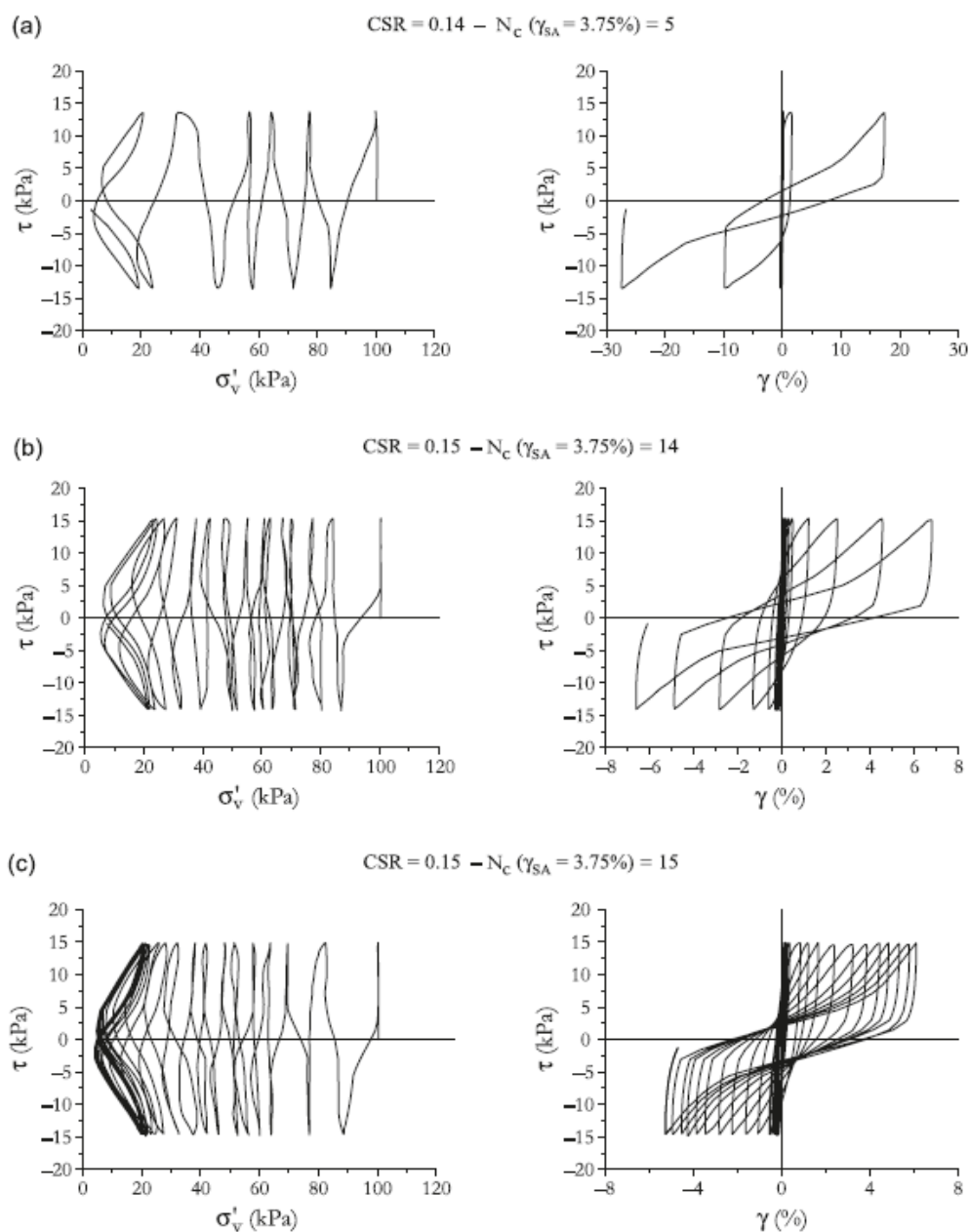


Σχήμα 2.11 Επίδραση της μέσης ενεργού τάσεως στο μέγιστο λόγο τάσεων για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου (Porcino et al. 2012)



Σχήμα 2.12 Περιβάλλουσα αστοχίας στην κρίσιμη κατάσταση (σε διάγραμμα $q-p'$) για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια από τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης (Porcino et al. 2012)

Επιπλέον, η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων και φυσικών δοκιμών από τις αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13. Το φυσικό δοκίμιο μικρής πυκνότητας παρουσιάζει γρήγορα μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις και ρευστοποιείται μετά από λίγους κύκλους φόρτισης ($N_f=5$). Το σταθεροποιημένο δοκίμιο μικρότερης πυκνότητας δεν καταρρέει και διατηρεί ένα χαμηλό επίπεδο ανάπτυξης διατμητικών παραμορφώσεων, ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης. Επίσης, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου με πυριτρία χαλαρού δοκιμίου προσομοιώνει τη συμπεριφορά του πυκνού δοκιμίου. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι αυτό ίσως οφείλεται στην αυξημένη διαστολικότητα που προκύπτει από το σπάσιμο των δεσμών.

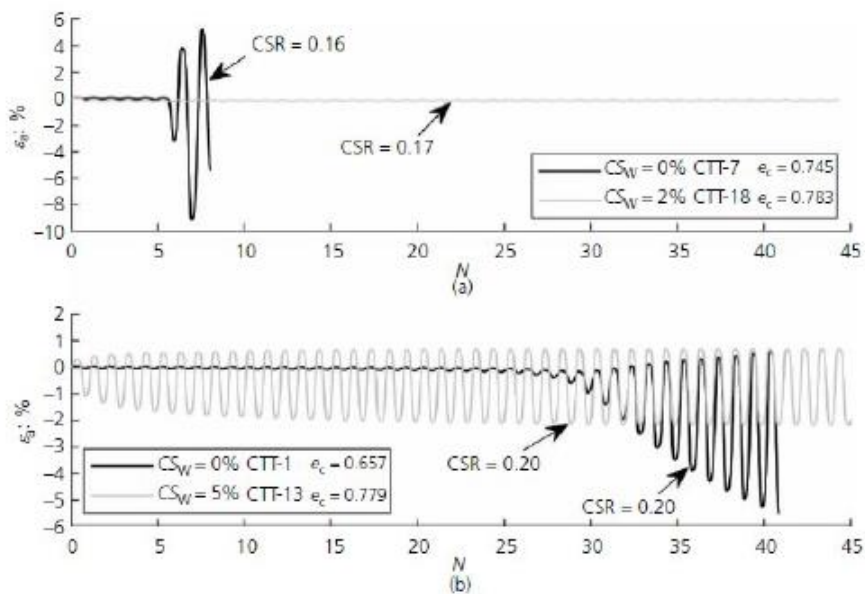


Σχήμα 2.13 Σύγκριση ενεργών τασικών οδεύσεων και σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκίμια: α) χαλαρής φυσικής άμμου, β) χαλαρής σταθεροποιημένης άμμου, και γ) πυκνής φυσικής άμμου (Porcino et al. 2012)

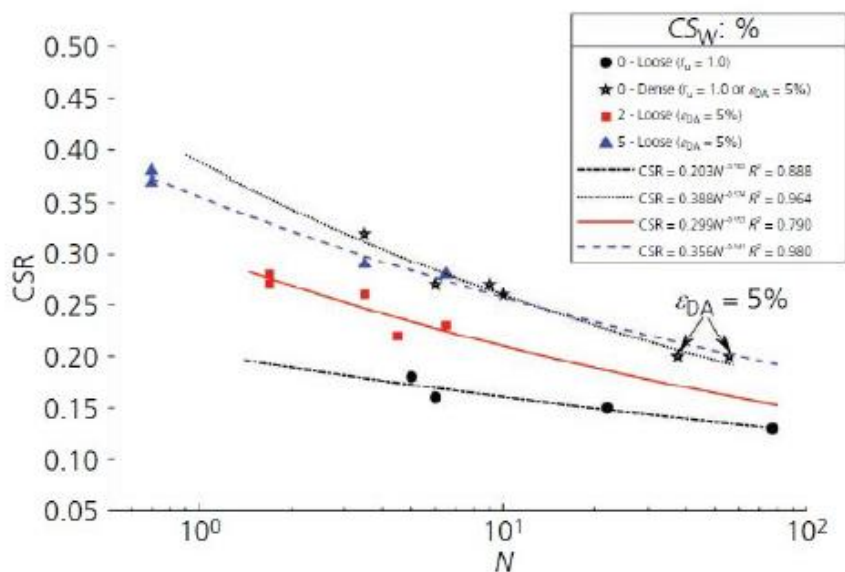
2.3.4 Μελέτη των Ciardi et al. (2020)

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 υπερπιέσεων 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 πυριτίας στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου S3 υπό ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζεται σε όρους αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_a(\%)$ - αριθμού κύκλων φόρτισης N στο Σχήμα 2.14. 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 2.14 (α). Για μεγαλύτερο λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.20$ το πυκνό δοκίμιο άμμου Σχήμα 2.14(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 2.15. 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.



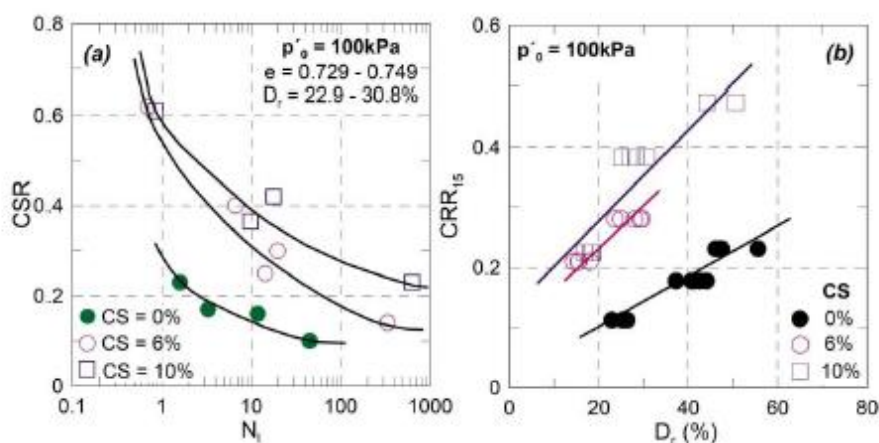
Σχήμα 2.14: Αποτελέσματα αστράγγιστων ανακυκλικών δοκιμών σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου S3 σε όρους αξονικής παραμόρφωσης ε_s - αριθμού κύκλων φόρτισης N (Ciardi et al., 2020).



Σχήμα 2.15: Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο S3 (Ciardi et al., 2020).

2.3.5 Μελέτη των Vranna et al. (2020)

Οι Vranna et al. (2020) εκτέλεσαν ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου M31 πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτίδα 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 2.16 ως καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στα επίπεδα $CSR - N_1$ ($e_{DA}=5\%$) (Σχήμα 2.85(α)) και $CRR_{15} - D_r$ (Σχήμα 2.16(β)). Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως $CSR = \sigma_d / (2 \cdot \sigma'_o)$, όπου σ'_o είναι η μέση ενεργός τάση στην έναρξη της διάτμησης. Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, $CRR_{15} = CSR \cdot D_r (N_1=15)$, 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 ($e_{DA} \approx 5\%$). Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Mollamahmutoglu & Yilmaz, 2010.

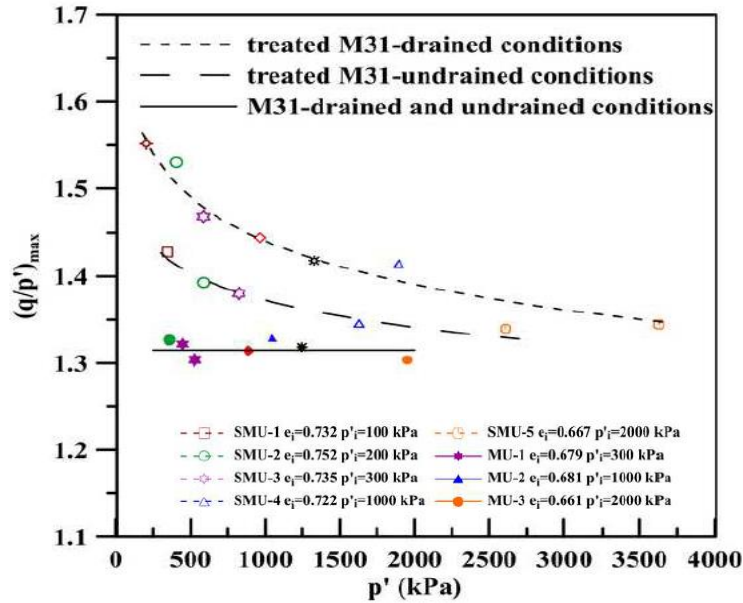


Σχήμα 2.16: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 με ποσοστό σταθεροποιητή $CS=6\%$ και 10% : (α) Ανακυκλική διατμητική αντοχή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση και (β) λόγος ανακυκλικής αντίστασης συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας (Vranna et al., 2020).

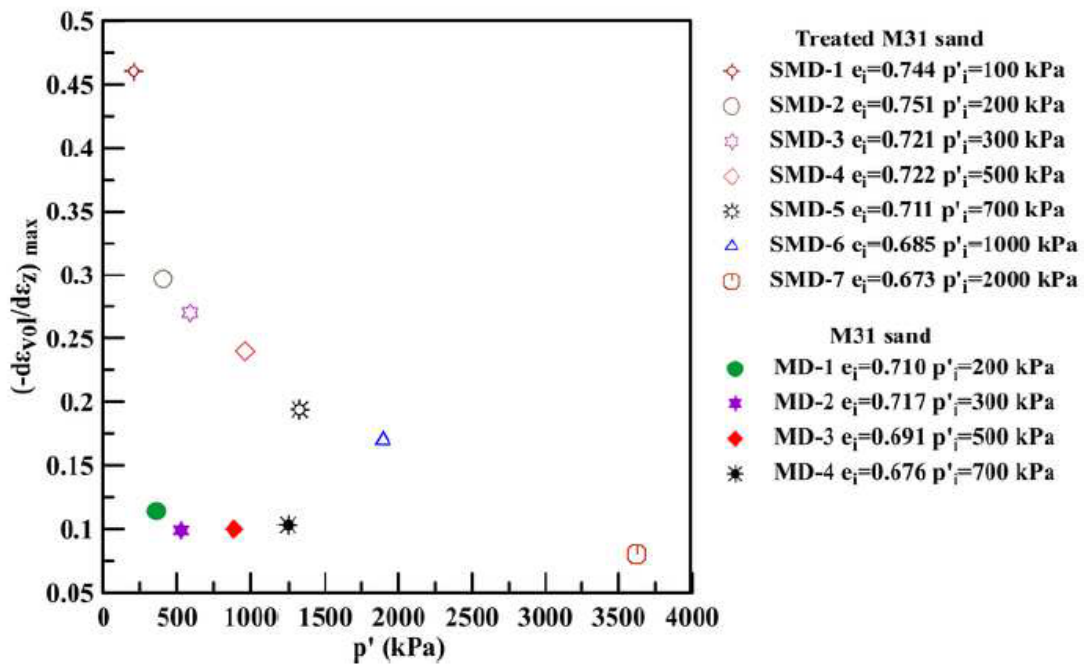
2.3.6 Μελέτη των Ραλιόπουλου και Georgiannou (2021)

Στην δημοσίευση των Ραλιόπουλου και Georgiannou (2021) εξετάζεται η συμπεριφορά της άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτιά (Ludox-SM) για μια σειρά από διάφορες φορτίσεις ώστε να αναπτυχθεί μια τυποποιημένη μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου και να επιβεβαιωθεί η ανθεκτικότητα της όταν αυξάνεται η διατμητική της αντοχή. Χρησιμοποιήθηκε η άμμος M31 με στρογγυλεμένους και η άμμος Longstone (LS) με γωνιώδεις κόκκους. Εφαρμόστηκε εμβάπτιση του εδαφικού ξηρού υλικού σε απαερωμένο νερό (water pluviation) για την παρασκευή δοκιμών άμμου και εμβάπτιση σε υγρόλυμα πυριτίας για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. 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 and Papadimitriou 2018).

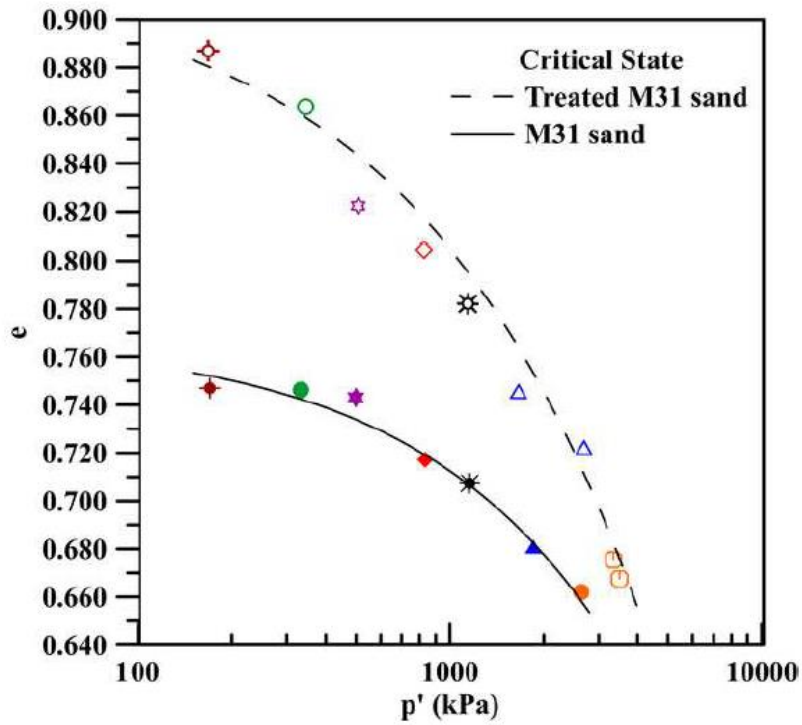
Σε αυτήν την έρευνα εκτελέστηκαν μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές στην φυσική και σταθεροποιημένη άμμο με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) και μέτρηση της πίεσης πόρων. Επισημαίνεται στο στάδιο του κορεσμού η επιβολή μεγάλου εύρους τιμών αντιπίεσης (back pressure) δεν φαίνεται να καταστρέφει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας αφού οι ογκομετρικές παραμορφώσεις και η διατμητική απόκριση σε τριαξονική φόρτιση παραμένουν αμετάβλητες. Στις τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης στράγγισης τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση q από τα δοκίμια άμμου, καθώς και μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου λόγου των τάσεων q/p' (Σχήμα 2.16). Η μέγιστη τιμή της διαστολικότητας αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την επίτευξη του μέγιστου λόγου των τάσεων και στα σταθεροποιημένα και στα φυσικά δοκίμια άμμου M31, με τα πρώτα να αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερη από τα δεύτερα (Σχήμα 2.17). Η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης CSL στο χώρο $(e-p')$ είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω εκφράζοντας την έντονη διαστολή των σταθεροποιημένων δοκιμών (Σχήμα 2.18). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι οι δυο γραμμές CSL στο χώρο $(e-p')$ για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα δοκίμια συγκλίνουν για μεγάλες τάσεις που οδηγούν σε πιθανή θραύση κόκκων.



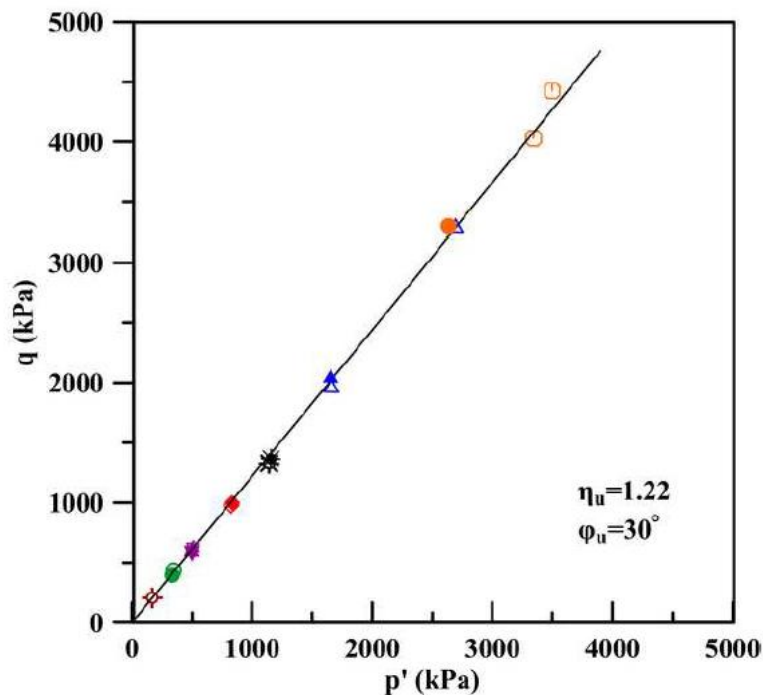
Σχήμα 2.16 Επίδραση μέσης ενεργού τάσης στον μέγιστο λόγο τάσεων q/p' για σταθεροποιημένη και φυσική άμμου M31 σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης, υπό στραγγιζόμενες και αστραγγιστες συνθήκες (Pavlopoulou and Georgiannou 2021)



Σχήμα 2.17 Επίδραση της μέσης ενεργού τάσης στις τιμές μέγιστης διαστολικότητας σε φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 (Pavlopoulou and Georgiannou 2021).

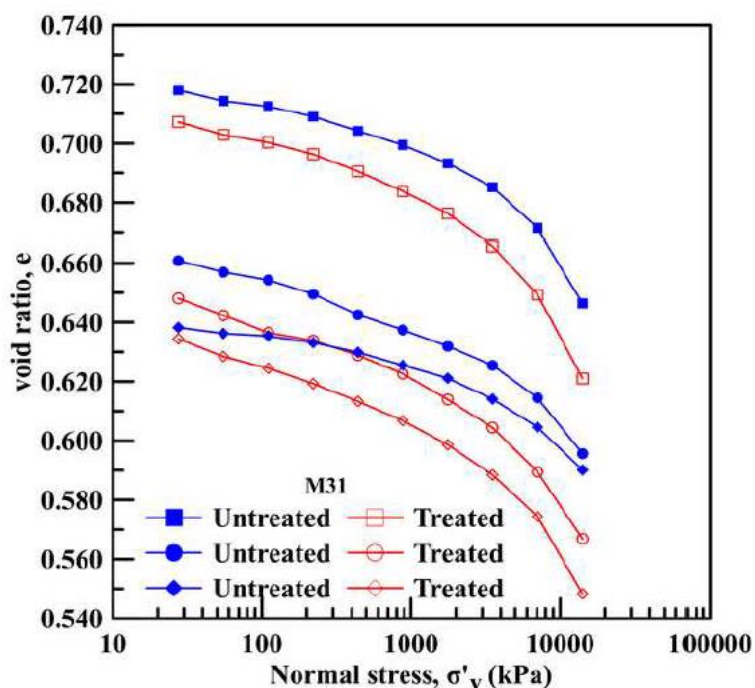


Σχήμα 2.18 Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο χώρο δείκτη πόρων e – μέσης ενεργού τάσης p' για φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 (Pavlioroulou and Georgiannou 2021)



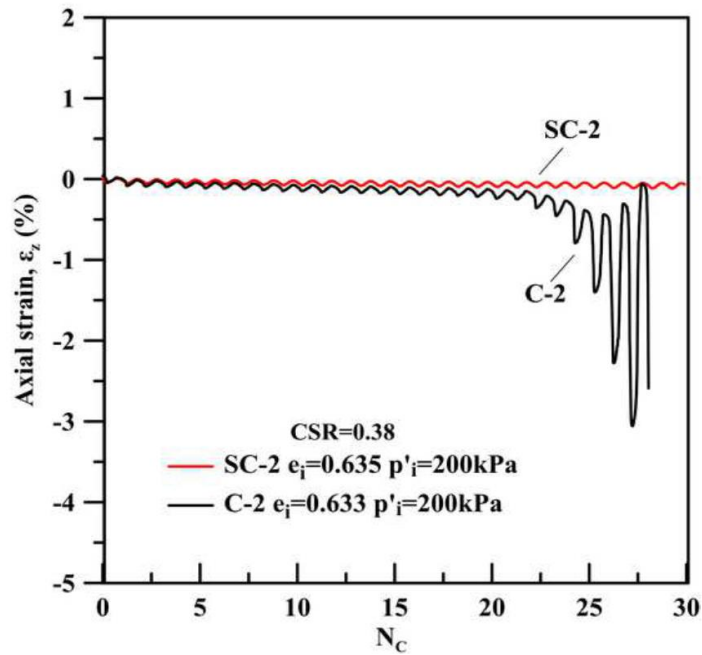
Σχήμα 2.19 Περιβάλλουσα Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο αποκλίνουσας τάσης q - μέσης ενεργού τάσης p' για φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 (Pavlioroulou and Georgiannou 2021)

Τέλος, όπως προκύπτει από το Σχήμα 2.19, η περιβάλλουσα κρίσιμης κατάστασης στο χώρο των τάσεων είναι κοινή για τα σταθεροποιημένα και τα φυσικά δοκίμια, όπως και η γωνία κρίσιμης κατάστασης (για την άμμο M31, $\phi_c=30^\circ$) όπως και στο Σχήμα 2.12 των Porcino et al. 2012. Κλείνοντας την αναφορά στη μονοτονική φόρτιση, οι μελετητές συμπέραναν ότι σε συνθήκες συμπίεσμού τα πυκνά σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου εμφανίζουν μεγαλύτερες ογκομετρικές μεταβολές σε σχέση με τα αντίστοιχα φυσικά, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με τα σχετικά χαλαρά τα οποία εμφανίζουν ταυτόσημη συμπίεστικότητα (βλ. Σχήμα 2.20).

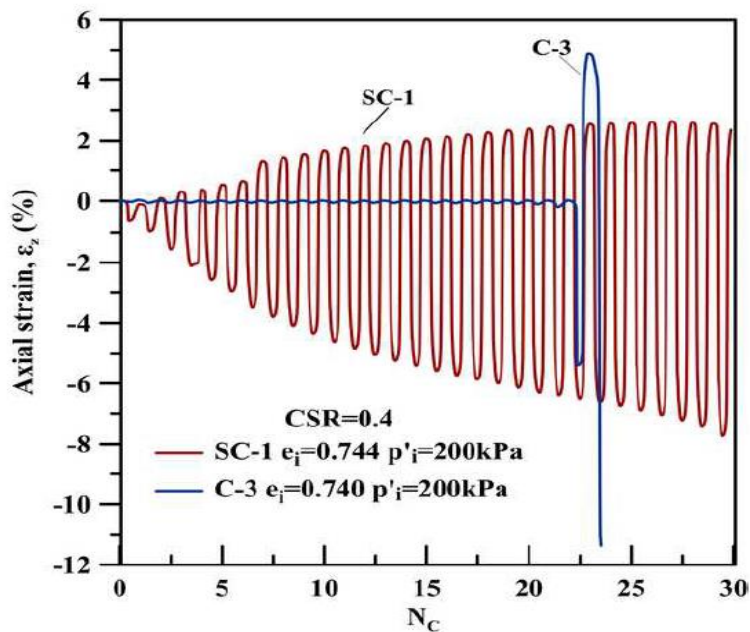


Σχήμα 2.20 Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 (Pavloroulou and Georgiannou 2021)

Μελετώντας την ανακυκλική συμπεριφορά, οι Pavloroulou and Georgiannou (2021), και σε συμφωνία με όλη τη βιβλιογραφία, παρατήρησαν ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν καταρρέουν με την αύξηση της πίεσης πόρων και τη συσσώρευση αξονικών παραμορφώσεων. Επίσης, προέκυψε αύξηση του αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση λόγω σταθεροποίησης στα πυκνά δοκίμια, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία (βλ. Σχήμα 2.21). Ωστόσο, στα χαλαρά σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 παρατηρήθηκε ότι αναπτύσσονται μεγαλύτερες αξονικές παραμορφώσεις στους πρώτους κύκλους φόρτισης από αυτές της άμμου (βλ. Σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.21 Συσώρευση αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε πυκνή φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 (Pavlioroulou and Georgiannou 2021)



Σχήμα 2.22 Συσώρευση αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε χαλαρή φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 (Pavlioroulou and Georgiannou 2021)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Φυσικά και Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά και εργαστηριακές Μέθοδοι

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα υλικά και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των άμμων M31 και Longstone και της κολλοειδούς πυριτίας LUDOX SM που επιλέχθηκε ως σταθεροποιητής. Επιπλέον, περιγράφονται αναλυτικά οι τριαξονικές συσκευές του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής δοκιμίων με και χωρίς σταθεροποιητή και τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας για κάθε δοκιμή.

3.2 Πειραματικός προσδιορισμός μεγέθους κόκκων

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

Οι κόκκοι στα εδάφη ποικίλουν όχι μόνο ως προς το μέγεθος, αλλά και ως προς το σχήμα τους. Δύο είναι οι βασικές διακρίσεις ως προς το σχήμα των κόκκων: οι περίπου σφαιρικού σχήματος κόκκοι, που οι τρεις διαστάσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, και οι πλατείς κόκκοι, με πάχος πολύ μικρότερο της διαμέτρου τους. Οι σφαιροειδείς κόκκοι παρουσιάζονται κατά κανόνα στα αμμώδη εδάφη και τα αμμοχάλικα ενώ οι πλατείς κόκκοι συναντώνται, κυρίως στις αργίλους. Τα αμμώδη εδάφη αποτελούνται από περίπου σφαιρικούς κόκκους που μπορεί να έχουν στρογγυλό ή γωνιώδες σχήμα. Είναι δυνατόν να φέρουν μεγάλα στατικά φορτία και να προκαλούνται σχετικά μικρές παραμορφώσεις (ιδίως όταν οι κόκκοι τους είναι γωνιώδεις). Επίσης, με την επίδραση δονήσεων τα εδάφη αυτά υφίστανται εύκολα μετατοπίσεις και αναδιάταξη των κόκκων τους.

3.2.1 Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα

Η κατανομή των κόκκων και το σχήμα που γενικά επικρατεί στα εδάφη είναι από τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν τους διάφορους τύπους εδαφών και παίζουν πολύ ουσιώδη ρόλο στη συμπεριφορά τους. Για τον προσδιορισμό αυτής της κατανομής πραγματοποιήθηκαν κοκκομετρικές αναλύσεις με αμερικανικά πρότυπα κόσκινα, σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM D422-63 και BS-1377. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Όνομασία κόσκινου	Διάμετρος οπής κόσκινου
N°10	2.000
N°20	0.850
N°40	0.425
N°50	0.300
N°60	0.250
N°70	0.212
N°100	0.150
N°200	0.075

Πίνακας 3.1 Διαστάσεις οπών κοσκίνων

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

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

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

3.3 Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων

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

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

Τα μη-συνεκτικά εδαφικά υλικά μπορεί να εμφανιστούν στη φύση με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων (e), που εξαρτώνται από την εκάστοτε διάταξη (δομή) των κόκκων τους. Η πλέον χαλαρή διάταξη των κόκκων με το μέγιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στην ελάχιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη βραδεία απόθεση μιας άμμου μέσα στο νερό. Υπό ανάλογες φυσικές συνθήκες οι άμμοι τείνουν να έχουν πυκνότητες που προσεγγίζουν την ελάχιστη πυκνότητα. Η πλέον πυκνή διάταξη των κόκκων αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με παρατεταμένη και έντονη δόνηση της άμμου, που προκαλεί συμπύκνωση με την επαναδιάταξη των κόκκων της σε πυκνότερη δομή. Τόσο η ελάχιστη όσο και η μέγιστη πυκνότητα είναι συμβατικά μεγέθη και αναφέρονται σε πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές. Κατά συνέπεια, είναι δυνατό μια άμμος να υπάρξει στη φύση σε κατάσταση με πυκνότητα μικρότερη από την ελάχιστη ή μεγαλύτερη από τη μέγιστη συμβατική. Ορίζεται λοιπόν, το χρήσιμο μέγεθος για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης μιας άμμου σε σχέση με την ελάχιστη και τη μέγιστη πυκνότητά της, η σχετική πυκνότητα ως εξής:

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} - 100 (\%)$$

όπου:

e είναι ο πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου,

e_{max} είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα (μέγιστη τιμή του δείκτη πόρων) και

e_{min} είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στη μέγιστη συμβατική πυκνότητα (ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων).

Οι τιμές της μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας μιας άμμου εξαρτώνται από το σχήμα και την ποικιλία των μεγεθών των κόκκων της. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η ποικιλία μεγεθών των κόκκων και όσο πιο σφαιρικοί είναι οι κόκκοι σε ένα αμμώδη εδαφικό σχηματισμό, τόσο η ελάχιστη και η μέγιστη πυκνότητα είναι μεγαλύτερες.

Η κατάταξη των αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική τους πυκνότητα γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 και σημειώνονται οι χρησιμοποιούμενες προς σύγκριση κατηγορίες στις ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές.

σχετική πυκνότητα (%)	περιγραφή μη-συνεκτικού εδάφους
0-15	πολύ χαλαρό
15-35	χαλαρό
35-65	μέσης πυκνότητας
65-85	πυκνό
85-100	πολύ πυκνό

Πίνακας 3.2 Κατάταξη αμμωδών εδαφών βάσει της σχετικής πυκνότητας

Ο μέγιστος δείκτης πόρων προσδιορίστηκε με τη μέθοδο του Kolbuszewski (1948). Σε διάφορους γυάλινους ογκομετρικούς σωλήνες αποτέθηκαν ποικίλες ποσότητες ξηρού εδαφικού υλικού και το άκρο τους καλύφθηκε με ελαστική μεμβράνη. Στους σωλήνες επιβλήθηκε χειροκίνητη ανάδευση, αναποδογυρίστηκαν μερικές φορές και επέστρεψαν στην αρχική τους θέση. Η διαδικασία επαναλήφθηκε 5 φορές για κάθε δοκιμή. Μετά το τέλος της δοκιμής, καταγράφηκε η ένδειξη του ογκομετρικού σωλήνα και το εδαφικό υλικό ζυγίστηκε. Μέσω του όγκου του δοκιμίου, του ειδικού βάρους των στερεών κόκκων (Gs) και της μάζας της άμμου υπολογίστηκε ο μέγιστος δείκτης πόρων.

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

3.3 Φυσικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά

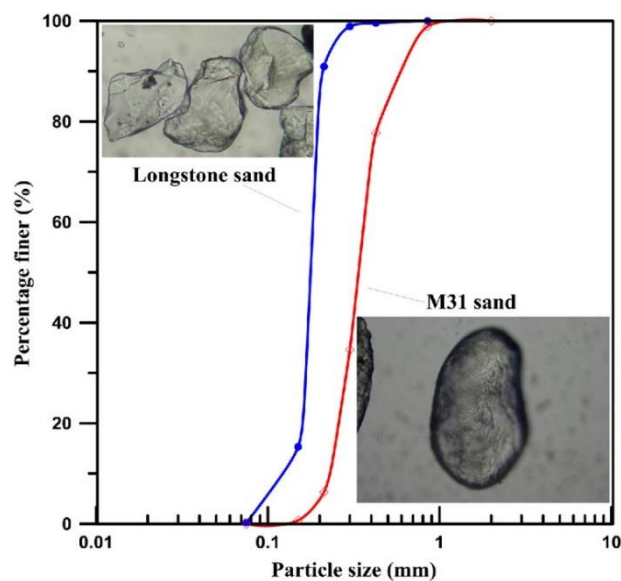
Στα πειράματα που εκτελούνται στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιείται εργαστηριακή άμμος, και όχι εδαφικά υλικά που μπορούμε να συλλέξουμε από το φυσικό περιβάλλον. Αυτά τα εδαφικά υλικά είναι κατάλληλα επεξεργασμένα ώστε να είναι καθαρά (χωρίς προσμίξεις με άλλα υλικά), σχετικά ομοιογενή, κατάλληλα διαβαθμισμένα και περιέχουν κόκκους με χαρακτηριστικό μέγεθος και σχήμα. Η χρήση τέτοιων εδαφικών υλικών οδηγεί σε ακριβή συμπεράσματα για την εδαφική απόκριση καθώς είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές της παρούσας εργασίας είναι η άμμος M31 και η άμμος Longstone. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται παρακάτω και οι κοκκομετρικές καμπύλες τους στο Σχήμα 3.1.

3.3.1 Άμμος M31

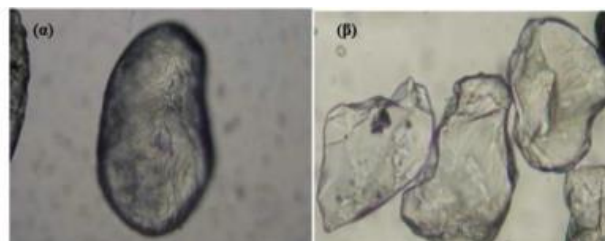
Η ανάλυση στο μικροσκόπιο έδειξε ότι όσον αφορά στην άμμο M31 πρόκειται για καθαρή άμμο, με σχετικά ομοιόμορφα σιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα. Η στίλβωση αποτελεί ένδειξη προέλευσης από υδάτινο περιβάλλον. Οι κόκκοι στην πλειονότητά τους είναι διαυγείς, ενώ ένα ποσοστό 5-10% είναι γαλακτόχρωμοι (ημιδιαφανείς). Στο εργαστήριο του ΕΜΠ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της άμμου M31. Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων έχει τιμή $G_s=2.66$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι $e_{max}=0.844$ και $e_{min}=0.505$ αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι $D_{10}=0.218$ mm, $D_{30}=0.275$ mm, $D_{50}=0.314$ mm, $D_{60}=0.359$ mm και $C_u=1.66$.

3.3.3 Άμμος Longstone

Η άμμος Longstone αποτελείται από λεπτούς και γωνιώδεις κόκκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων έχει τιμή $G_s=2.64$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων είναι $e_{max}=0.995$ και $e_{min}=0.614$ αντίστοιχα, τιμές μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες άμμους λόγω των γωνιωδών κόκκων της. Τα χαρακτηριστικά της μεγέθη είναι $D_{10}=0.118$ mm, $D_{30}=0.161$ mm, $D_{50}=0.176$ mm, $D_{60}=0.184$ mm και $C_u=1.56$.



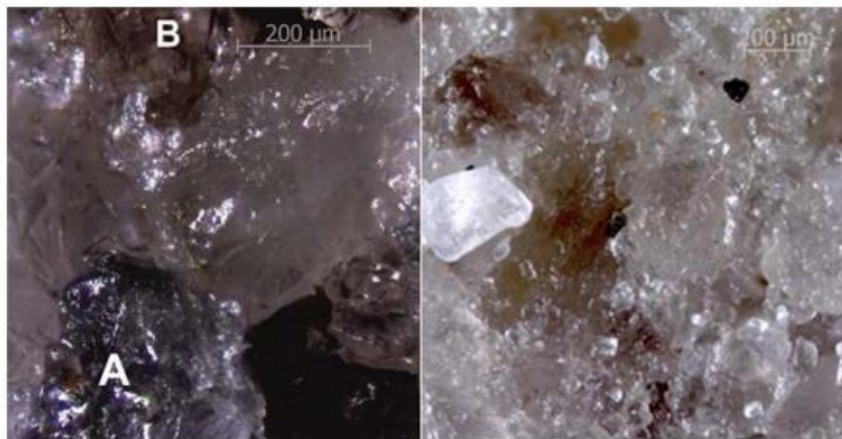
Σχήμα 3.1: Κοκκομετρικές καμπύλες και φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των κόκκων της άμμου M31 και Longstone (Pavloroulou & Georgiannou, 2021)



Σχήμα 3.2: Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης 100×) των κόκκων της α) άμμου M31 και β) άμμου Longstone

3.4 Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά

Για να παρατηρηθεί σε μικροσκοπική κλίμακα το υλικό της κολλοειδούς πυριτίας και να κατανοηθεί ο τρόπος που συνδέεται με το φυσικό έδαφος, δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας και σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία άμμου παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του ΕΜΠ και του Imperial College London. Η κολλοειδής πυριτία διοχετεύεται ομοιόμορφα στο εδαφικό υλικό και καλύπτει όλη την επιφάνεια των κόκκων προσδίδοντας τις ευεργετικές της ιδιότητες σε όλη την έκταση του υλικού. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το δείγμα σταθεροποιημένης άμμου M31, σε φωτογραφία από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του Imperial College London. Παρατηρούνται στην αριστερή φωτογραφία οι κόκκοι άμμου, σημεία A και B, που ξεχωρίζουν και το υγρόλυμα ανάμεσα στις επαφές των κόκκων. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μορφή του υγρολύματος (hydrogel) με CS=10% όπως αυτή προκύπτει από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 3.3: Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

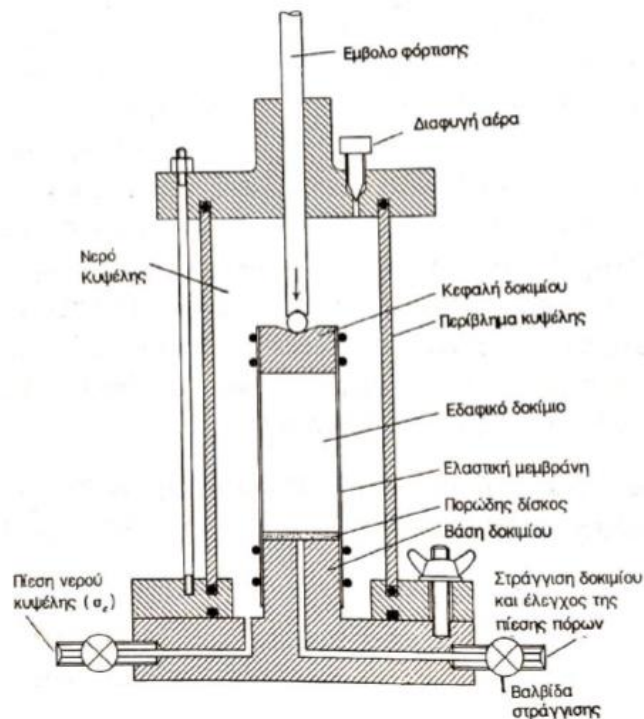


Σχήμα 3.4: Φωτογραφία υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

3.5 Περιγραφή Τριαξονικής Ανακυκλικής Δοκιμής

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης. Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται με μια (αδιαπέρατη) ελαστική μεμβράνη, ενώ στη βάση και στην κεφαλή του είναι τοποθετημένοι άκαμπτοι πορώδεις δίσκοι. Το δοκίμιο τοποθετείται στο εσωτερικό μιας κυλινδρικής κυψέλης, η οποία στη συνέχεια πληρώνεται με νερό που μπορεί να τεθεί υπό ελεγχόμενη πίεση. Το έμβολο στο κέντρο της κυψέλης μπορεί να επιβάλλει επιπλέον τάση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο δοκίμιο, όταν η βάση του δοκιμίου κινείται ελεγχόμενα κατά αυτή τη διεύθυνση με αποτέλεσμα αυτό να συμπιέζεται ή να εφελκύεται. Η εν λόγω συσκευή διαθέτει επιπρόσθετα, ειδική βεντούζα η οποία εφαρμόζει στην κεφαλή του δοκιμίου (Σχήμα 3.6) και επιτρέπει την εκτέλεση ανακυκλικής φόρτισης βάσει της επιβαλλόμενης συνάρτησης (π.χ. ημιτονοειδής). Απαιτούμενες προϋποθέσεις είναι η κατακορυφότητα του δοκιμίου, η κεντρική εφαρμογή του αξονικού φορτίου, ο περιορισμός της τριβής μεταξύ δοκιμίου και πορωδών δίσκων, η πληρότητα με νερό όλων των σωληνώσεων που επικοινωνούν με το δοκίμιο.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι ο έλεγχος της στράγγισης και της υδατικής πίεσης στο εσωτερικό του δοκιμίου. Ο αγωγός που συνδέει τον πορώδη δίσκο στη βάση του δοκιμίου διαμέσου της βάσης της κυψέλης με ένα σύστημα επιβολής πίεσης, οπότε η υδατική πίεση στο εσωτερικό του δοκιμίου (πίεση πόρων) μπορεί να ελέγχεται. Η κεφαλή του δοκιμίου επίσης συνδέεται με το σύστημα επιβολής πίεσης διαμέσου κατάλληλου εύκαμπτου σωληνίσκου, οπότε και η υδατική πίεση στη κεφαλή του δοκιμίου μπορεί να ελέγχεται με το ίδιο σύστημα που ελέγχει την πίεση πόρων στη βάση του δοκιμίου.



Σχήμα 3.5: Τυπική διάταξη κυλινδρικής τριαξονικής συσκευής



Σχήμα 3.6: Τυπική διάταξη κυλινδρικής τριαξονικής συσκευής

Εάν η βαλβίδα στράγγισης διατηρείται ανοιχτή το σύστημα επιβολής της υδατικής πίεσης βρίσκεται σε ελεύθερη επικοινωνία με το εσωτερικό του δοκιμίου και έτσι μπορεί να διατηρεί οποιαδήποτε σταθερή πίεση στο εσωτερικό του. Στην περίπτωση επιβολής σταθερής υδατικής πίεσης στη βάση (και την κεφαλή) του δοκιμίου, η διαφυγή νερού από το δοκίμιο ή η είσοδος νερού στο δοκίμιο διαμέσου του αγωγού στράγγισης δεν παρεμποδίζονται. Ειδικότερα, αν κατά τη φόρτιση του δοκιμίου το εδαφικό υλικό τείνει να συμπιεστεί, εφόσον το δοκίμιο είναι κορεσμένο η μείωση του όγκου θα συνοδευτεί από την διαφυγή ίσου όγκου νερού των πόρων. Αν, αντίθετα, κατά τη φόρτιση του δοκιμίου το εδαφικό υλικό τείνει να διογκωθεί, τότε το δοκίμιο θα εισροφήσει νερό από τον εξωτερικό χώρο. Όταν η φόρτιση του δοκιμίου είναι αρκετά αργή, ώστε σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η πίεση πόρων να είναι ίση με την εξωτερικώς επιβαλλόμενη στη βάση (και στην κεφαλή) του δοκιμίου η φόρτιση ονομάζεται πλήρως στραγγισμένη. Ο κορεσμός και η στερεοποίηση των δοκιμίων πραγματοποιούνται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

Εάν η βαλβίδα στράγγισης που επιτρέπει την επικοινωνία του εσωτερικού του δοκιμίου με το σύστημα ελέγχου της πίεσης πόρων είναι κλειστή, παρεμποδίζεται η διαφυγή νερού από το εσωτερικό του δοκιμίου (ή η εισρόφηση νερού από το δοκίμιο), οπότε η παραμόρφωση του εδάφους γίνεται υπό σταθερό όγκο. Ο τύπος αυτός της φόρτισης ονομάζεται αστραγγιστή φόρτιση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, εφόσον κατά τη δοκιμή παρεμποδίζεται η στράγγιση του δοκιμίου η υδατική πίεση πόρων μεταβάλλεται ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη της μη-μεταβολής του όγκου. Ο αγωγός στράγγισης συνδέεται με ένα μετρητή της υδατικής πίεσης (pore pressure transducer), με τον οποίο καταγράφεται η μεταβαλλόμενη υδατική πίεση στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η μέτρησή της είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των ενεργών τάσεων του δοκιμίου ($\sigma'_i = \sigma_i - u$) από τις

οποίες, σύμφωνα με την αρχή των ενεργών τάσεων, εξαρτάται η διατμητική αντοχή. Η ανακυκλική φόρτιση των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Τα συστήματα ελέγχου της δοκιμής κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι:

1. Το σύστημα επιβολής της πλευρικής πίεσης ή πίεσης κυψέλης (sc).
2. Το σύστημα επιβολής της υδατικής πίεσης πόρων ή αντιπίεσης πόρων (u) στο εσωτερικό του δοκιμίου καθώς και το σύστημα μέτρησης της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου με τη μέτρηση του όγκου (ΔV) του νερού που εισρέει στο δοκίμιο ή διαφεύγει από αυτό κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.
3. Το σύστημα επιβολής φόρτισης στο κατακόρυφο έμβολο που επιβάλλει είτε συγκεκριμένο φορτίο είτε συγκεκριμένη μετακίνηση κατά τη φόρτιση, η μέτρηση της μετακίνησης του εμβόλου, που ισούται με τη μεταβολή του μήκους του δοκιμίου, καθώς και η μέτρηση του φορτίου του εμβόλου.

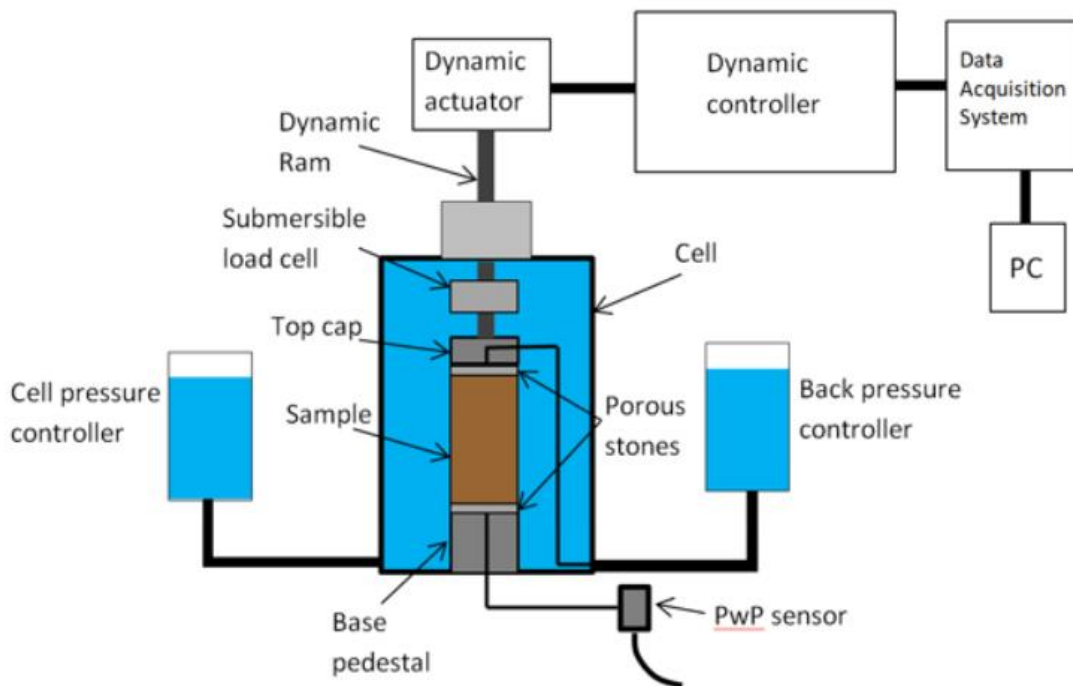
Για την εκτέλεση των τριαξονικών δοκιμών εφελκυσμού καθώς και των ανακυκλικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ (Σχήμα 3.7). Στην τριαξονική συσκευή Bishop & Wesley η αξονική τάση μεταβάλλεται είτε με μετακίνηση της βάσης του δοκιμίου (έλεγχος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης) είτε με επιβολή της αξονικής δύναμης (έλεγχος της επιβαλλόμενης τάσης). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως τρόπος φόρτισης η επιβολή αξονικής δύναμης (stress control).



Σχήμα 3.7: Τριαξονική συσκευή (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

3.6 Περιγραφή Τριαξονικής Δυναμικής Δοκιμής

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής δυναμικής τριαξονικής φόρτισης. Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται με μια (αδιαπέρατη) ελαστική μεμβράνη, ενώ στη βάση και στην κεφαλή του είναι τοποθετημένοι άκαμπτοι πορώδεις δίσκοι. Το δοκίμιο τοποθετείται στο εσωτερικό μιας κυλινδρικής κυψέλης, η οποία έπειτα πληρώνεται με νερό που μπορεί να τεθεί υπό ελεγχόμενη πίεση. Η τριαξονική κυψέλη που χρησιμοποιείται στη δυναμική δοκιμή είναι μια τροποποιημένη έκδοση της στατικής τριαξονικής κυψέλης. Χρησιμοποιεί ένα ενισχυμένο έμβολο με στεγανοποίηση και χαμηλή τριβή για την πρόληψη της υπερθέρμανσης και τη μείωση της υποβάθμισης κατά την κυκλική κίνηση του εμβόλου. Οι κυψέλες έχουν συνήθως τρεις θύρες ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της πίεσης γύρω από το δοκίμιο, την εφαρμογή της αντιπίεσης στο δοκίμιο και μία με μετατροπέα για τη μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων (PWP) (Σχήμα 5.2). Τα Top Caps που χρησιμοποιούνται στη Δυναμική δοκιμή συνήθως στερεώνονται στο έμβολο φόρτισης για να επιτρέπεται ο εφελκυσμός (αρνητική τάση) και συνδέονται με το δοχείο ελέγχου αντιπίεσης μέσω της βαλβίδας οπίσθιας πίεσης, από την οποία το δείγμα μπορεί να κορεσθεί και να στερεοποιηθεί.



Σχήμα 3.8: Τυπική διάταξη κυλινδρικής τριαξονικής συσκευής

Κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτωσης του δείγματος, το έμβολο φόρτισης μετακινείται περιοδικά μέσα και έξω από την κυψέλη. Αυτό αναγκάζει την πίεση κυψέλης να αυξάνεται και να μειώνεται ανάλογα, μεταβάλλοντας τις οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις. Ένας τρόπος ελέγχου της μεταβολής της πίεσης κυψέλης είναι με τη χρήση ενός ελεγκτή πνευματικής πίεσης και μιας διεπιφάνειας επαφής αέρα-νερού (Σχήμα 3.9). Με αυτή τη διάταξη, η ρύθμιση της πίεσης είναι πολύ γρήγορη και επιτρέπεται στην πίεση κυψέλης να παραμένει σταθερή ακόμη και σε υψηλές συχνότητες φόρτισης.



Σχήμα 3.9: Τυπική διάταξη κυλινδρικής τριαξονικής συσκευής

Ο ρυθμιστής αντιπίεσης (back pressure) είναι συνήθως υδραυλικός και στέλνει ή αντλεί νερό μέσω του επάνω άκρου. Κατά τον κορεσμό του δείγματος στέλνει νερό και επομένως αναγκάζει τον αέρα των πόρων να διαλυθεί σε αυτό. Οι ρυθμιστές αντιπίεσης έχουν συχνά τη δυνατότητα να μετρούν τον όγκο του νερού που κινείται μέσα και έξω από το δείγμα και, επομένως, να προσδιορίζουν τις αλλαγές όγκου του δείγματος μετά τον κορεσμό του.

Ο αισθητήρας μετατόπισης είναι τοποθετημένος στο έμβολο φόρτισης προκειμένου να παρακολουθείται η ακριβής παραμόρφωση του δείγματος κατά την κυκλική φόρτιση. Είναι συνήθως γραμμικοί μετατροπείς μετατροπής παραμόρφωσης (LSCT) και μπορούν να έχουν μέγιστη διαδρομή 100 mm. Η πίεση του νερού των πόρων μετράται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα πίεσης συνδεδεμένο σε μια θύρα στο κάτω μέρος του δείγματος εδάφους. Ο αισθητήρας πίεσης που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό πρέπει να έχει τη δυνατότητα να μετράει πιέσεις με υψηλότερο ρυθμό (δηλαδή ταχύτερο) από ό,τι σε ένα στατικό Τριαξονικό σύστημα.. Το σύστημα λήψης δεδομένων πρέπει να μπορεί να καταγράφει δεδομένα με υψηλή ταχύτητα, έως και 500 δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Με αυτόν τον τρόπο, οι κυματομορφές που προκύπτουν απεικονίζονται με μεγάλη ακρίβεια και η συμπεριφορά του εδάφους μπορεί να αποτυπωθεί λεπτομερώς.

Όπως και στην τριαξονική συσκευή όταν η βαλβίδα στράγγισης διατηρείται ανοιχτή το σύστημα επιβολής της υδατικής πίεσης βρίσκεται σε ελεύθερη επικοινωνία με το εσωτερικό του δοκιμίου και έτσι μπορεί να διατηρεί οποιαδήποτε σταθερή πίεση στο εσωτερικό του.. Στην περίπτωση επιβολής

σταθερής υδατικής πίεσης στη βάση (και την κεφαλή) του δοκιμίου, η διαφυγή νερού από το δοκίμιο ή είσοδος νερού στο δοκίμιο διαμέσου του αγωγού στράγγισης δεν παρεμποδίζονται. Ο τύπος αυτός της φόρτισης ονομάζεται φόρτιση ελεύθερης στράγγισης.

Εάν η βαλβίδα στράγγισης που επιτρέπει την επικοινωνία του εσωτερικού του δοκιμίου με το σύστημα ελέγχου της πίεσης πόρων είναι κλειστή, παρεμποδίζεται η διαφυγή νερού από το εσωτερικό του δοκιμίου (ή η εισρόφηση νερού από το δοκίμιο), οπότε η παραμόρφωση του εδάφους γίνεται υπό σταθερό όγκο. Ο τύπος αυτός της φόρτισης ονομάζεται φόρτιση εμποδιζόμενης στράγγισης. Η δυναμική φόρτιση των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Για την εκτέλεση των τριαξονικών δυναμικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική δυναμική συσκευή GDS Instruments (Σχήμα 3.10). Οι ανακυκλικές και δυναμικές δοκιμές που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress control tests).



Σχήμα 3.10: Τριαξονική δυναμική συσκευή (Bishop & Wesley, 1975) του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

3.6 Διαδικασία πειράματος

3.6.1 Παρασκευή φυσικών δοκιμίων

Η παρασκευή των φυσικών δοκιμίων άμμου γίνεται επί τόπου στη συσκευή (είναι η ίδια διαδικασία και για τις 2 συσκευές). Αρχικά μετράται το πάχος της ελαστικής αδιαπέρατης μεμβράνης που θα χρησιμοποιηθεί. Τοποθετείται ο ένας πορώδης δίσκος στην κυλινδρική βάση της τριαξονικής συσκευής και στη συνέχεια η μεμβράνη η οποία συγκρατείται και στεγανοποιείται εκεί με τη βοήθεια ειδικών ελαστικών δακτυλίων από καουτσούκ. Εφαρμόζεται ειδικό μεταλλικό καλούπι και μέσω της μονάδας παροχής αέρα επιβάλλεται αρνητική πίεση μεταξύ αυτού και της μεμβράνης. Με αυτό τον τρόπο η μεμβράνη αναρροφάται, «κολλάει» στα τοιχώματα του καλουπιού και αποκτά την απαιτούμενη κυλινδρική μορφή. Στη συνέχεια πληρώνεται ο χώρος του δοκιμίου περνώντας δια μέσου των γραμμών στράγγισης απιονισμένο και απαερωμένο νερό. Χρησιμοποιώντας χωνί αποτίθεται στον ίδιο χώρο άμμος ώστε να διασφαλιστεί ο καλύτερος κορεσμός του δοκιμίου. Η απόθεση του δείγματος γίνεται από ύψος το οποίο μεταβάλλεται διαρκώς, ούτως ώστε η απόσταση από την επιφάνεια της άμμου που έχει ήδη εναποτεθεί και συνεπώς η ενέργεια πρόσπτωσης να διατηρείται σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται κατά το δυνατό η ομοιομορφία και η επαναληπτικότητα του δοκιμίου.

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο που προτάθηκε από τους Bishop και Henkel (1957), και ονομάζεται «εμβάπτιση στο νερό» (water pluviation) και όσο γίνεται η απόθεση της άμμου συμπυκνώνεται με συγκεκριμένο αριθμό κτύπων, ώστε να επιτευχθούν δομές σε διάφορες πυκνότητες. Τέλος, η κορυφή του δείγματος επιτεδοποιείται, τοποθετείται ο δεύτερος πορώδης δίσκος και συνδέεται η γραμμή στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου. Μέσω της γραμμής στράγγισης της κεφαλής του δοκιμίου, επιβάλλεται στο δοκίμιο αρνητική πίεση της τάξεως των 40 kPa. Η αρνητική πίεση, που ισοδυναμεί με μέση ενεργό τάση $p' = 40$ kPa, προσδίδει αντοχή στο δοκίμιο και καθίσταται δυνατή η αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών που το συγκρατούσαν. Μετά την αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών μετράται η διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου με μηκυνσιόμετρο ακρίβειας 0,01 mm.

Στη συνέχεια συνδέεται το τμήμα της συσκευής με το οποίο θα επιβληθεί η εξωτερική φόρτιση και ακολουθεί η διέλευση απαερωμένου νερού μέσα από το δοκίμιο (η ποσότητα νερού εισέρχεται από τις γραμμές στράγγισης στη βάση του δοκιμίου και εξέρχεται από τη γραμμή στράγγισης στην κορυφή του και είναι περίπου δύο φορές ο όγκος του δοκιμίου). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο πλήρης κορεσμός του δοκιμίου και των γραμμών στράγγισης. Έπειτα, τοποθετείται το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης και σφίγγονται όλοι οι κοχλίες, ώστε να επιτευχθεί η στεγάνωση του θαλάμου. Κατόπιν, ανοίγεται η βαλβίδα παροχής νερού και γεμίζει με νερό ο θάλαμος.



Σχήμα 3.11: Καλούπι κατασκευής του δοκιμίου φυσικής άμμου



Σχήμα 3.12 Διαδικασία τοποθέτησης της φυσικής άμμου στο καλούπι

3.6.2 Παρασκευή σταθεροποιημένων δοκιμίων

Το υγρόλυμα της κolloειδούς πυριτίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία παρασκευάζεται μέσα σε καθαρό, γυάλινο δοχείο αναμειγνύοντας απιονισμένο νερό με κolloειδή πυριτία (Ludox-SM®) και καθαρό χλωριούχο νάτριο (NaCl), ενώ η τιμή του pH προσαρμόστηκε προσθέτοντας μικρές ποσότητες υδροχλωρικού οξέος (HCl). Ο χρόνος γέλης του υγρούλυματος κolloειδούς 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 κolloειδούς πυριτίας ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ιξώδες σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες των 100cP (0,1 Pa*s).

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 μεταξύ τους και με τους 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 παρέλθει 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 κolloειδής 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 ξηρά – γέλη (xerogel). Με την απεικόνιση από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διαπιστώνουμε ότι οι κόκκοι του εδάφους έχουν καλυφθεί σε όλη τους την έκταση από κolloειδή 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



Σχήμα 3.13: Σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου M31 φωτογραφία και απεικόνιση ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανακυκλική Τριαξονική Φόρτιση

4.1 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.

4.2 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση φυσικής άμμου M31 και Longstone υπό αστράγγιστες συνθήκες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αστράγγιστων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών της άμμου M31 και Longstone. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, διότι η ανακυκλική φόρτιση της άμμου σε αστράγγιστες συνθήκες 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 όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο 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 $e_i=0.710-0.724$ και $e_i=0.859-0.876$ για την άμμο M31 και την άμμο Longstone αντίστοιχα. Υπογραμμίζεται ότι όλες οι τριαξονικές ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31, εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) $u_0=400\text{ kPa}$ 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 δοκιμίων. 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).

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.11-0.20$ για να προσδιοριστεί η επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και έπειτα παρατίθενται αναλυτικά κάποιες ενδεικτικές δοκιμές.

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες				
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$
CM-1	0.722	200	0.20	5	1	0.7	0.8
CM-2	0.717	200	0.19	5	2.4	2.2	2.3
CM-3	0.715	200	0.16	5	5	4.7	4.7
CM-4	0.720	200	0.13	5	9.4	9.1	9.2
CM-5	0.724	200	0.12	2.5	21.5	21.1	21.2
CM-6	0.710	200	0.11	2.5	85.5	85.2	85.3
CL-1	0.861	200	0.15	5	1	1	1
CL-2	0.847	200	0.13	5	3	3	3
CL-3	0.876	200	0.13	5	7	7	7
CL-4	0.860	200	0.12	5	43	43	43
CL-5	0.872	200	0.11	2.5	54	54	54
CL-6	0.859	200	0.11	2.5	87	87	87

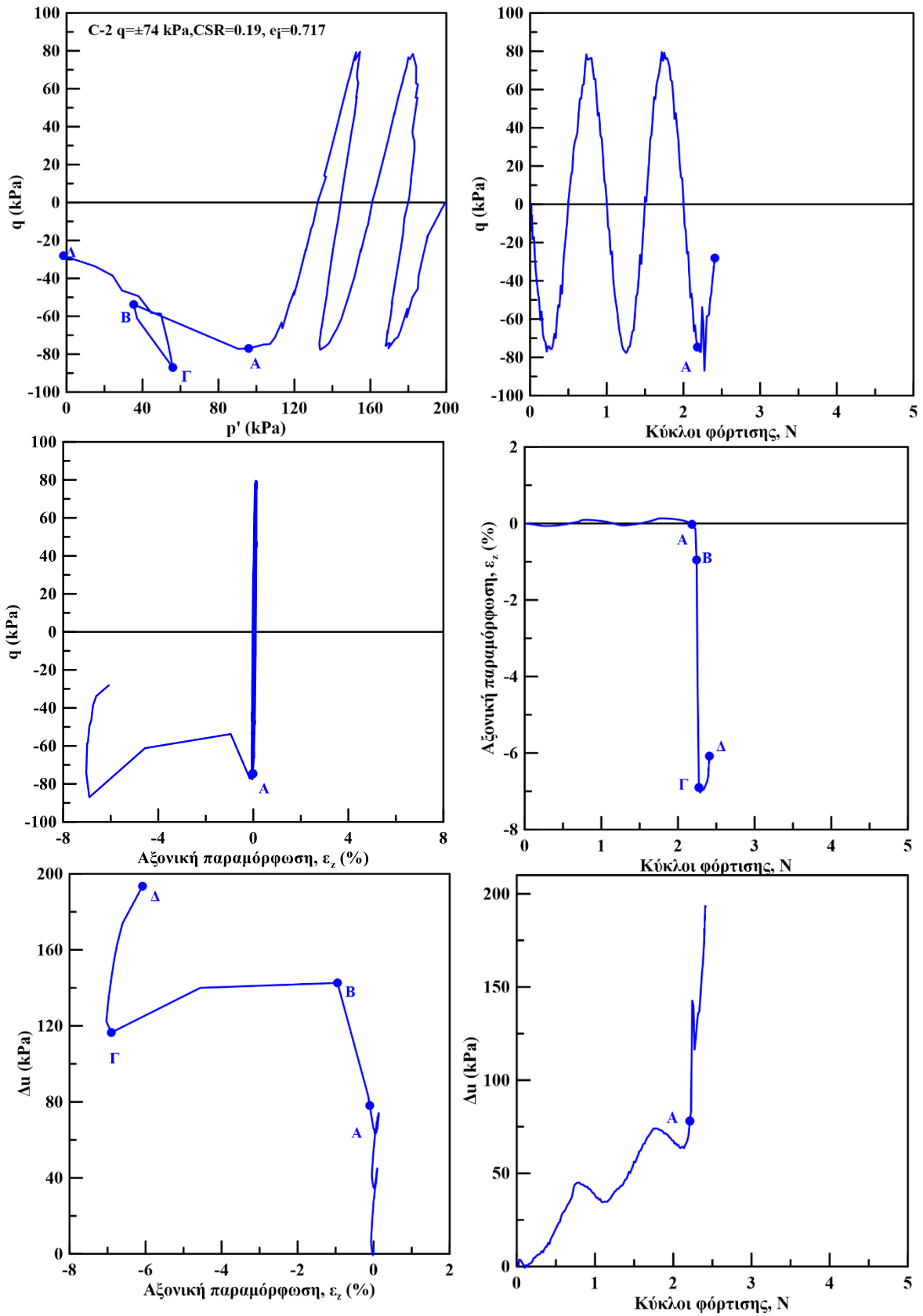
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά δοκίμια άμμου M31 και Longstone

Όπου:

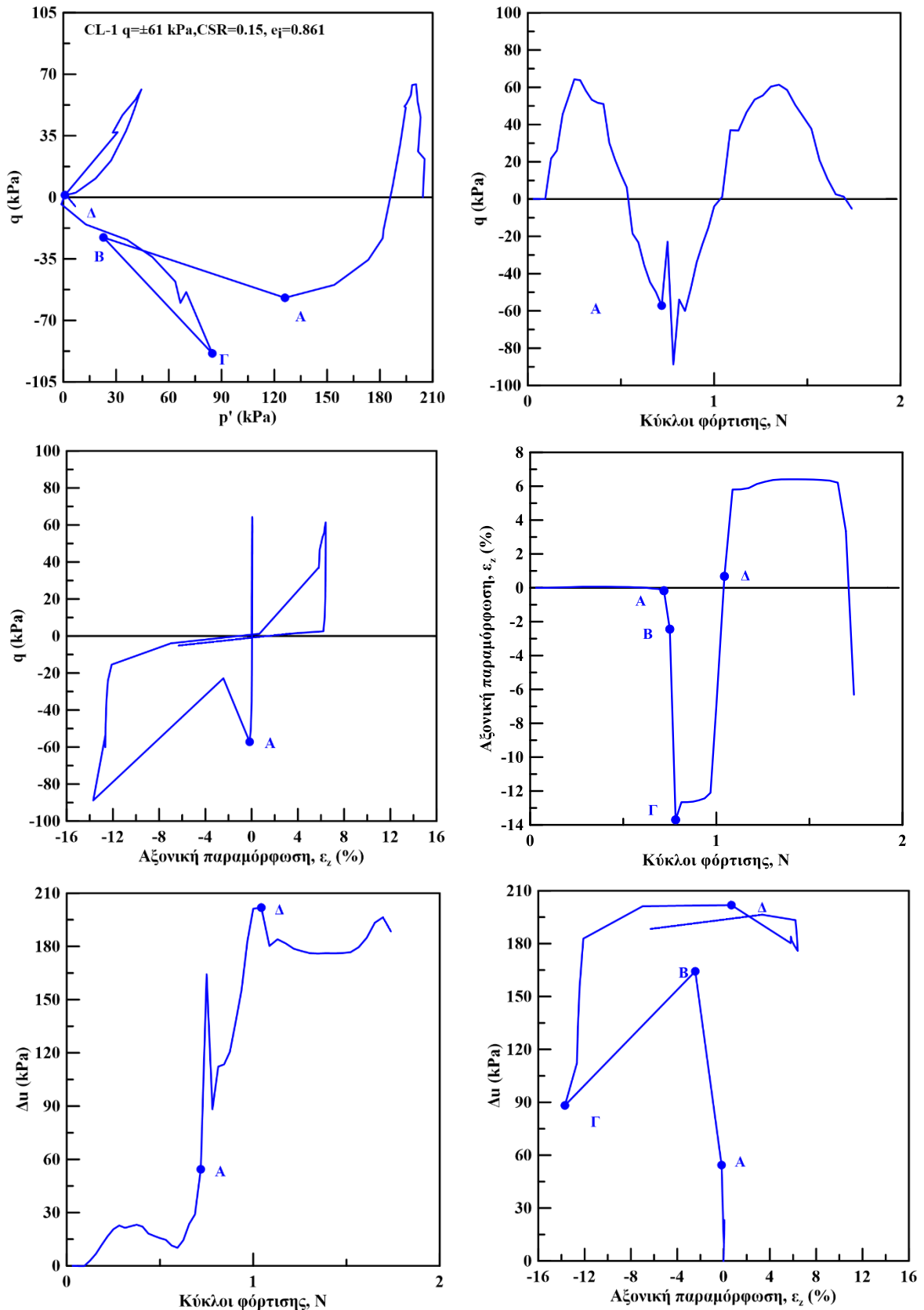
- e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
- p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
- CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)
- N_{IL} , κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για μηδενισμό ενεργού τάσης
- $N_{1\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\varepsilon_z=1\%$
- $N_{2.5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\varepsilon_z=2.5\%$

Στα Σχήμα 4.1 έως 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, στην άμμο M31 και Longstone με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ (CM-2,3),CL-1,2). Τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνονται 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 ($\varepsilon_z -N$), 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 στους πρώτους κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζει έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων. Συνεπώς, 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 κύκλο όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης 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 παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$ πραγματοποιούνται στον ίδιο κύκλο. Συνεπώς, τα δοκίμια που φορτίζονται με μεγάλη ανακυκλική τάση χρειάζονται μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης για να αστοχήσουν. 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 παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

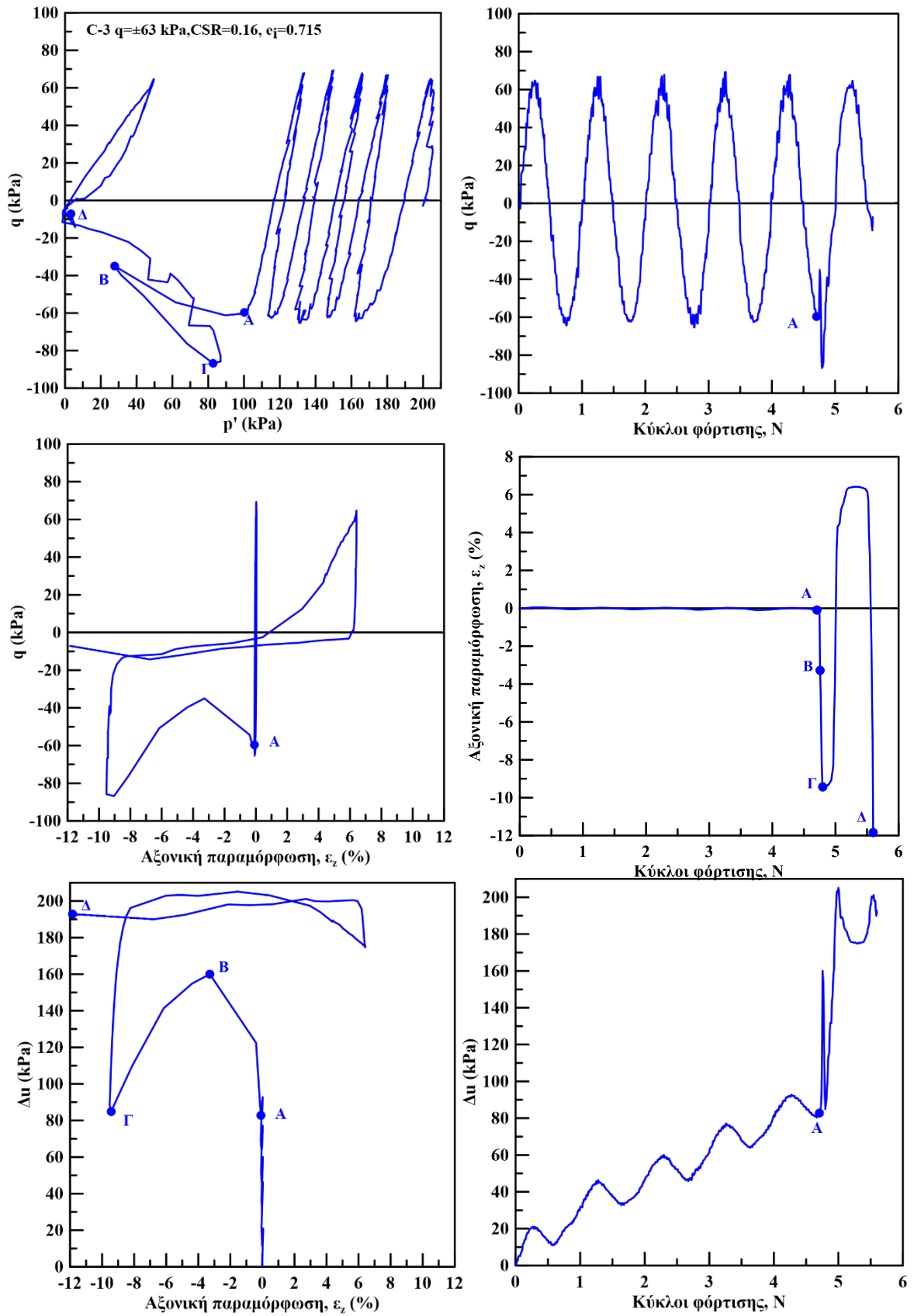
Μετά το σημείο A, όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, το δοκίμιο αρχικά παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος AB), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ) και τελικά οδηγείται στην αστοχία (κλάδος ΓΔ) με ταυτόχρονη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο A), αλλά και όταν τελικά το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία (σημείο Γ), η αποκλίνουσα τάση q , αλλάζει κατεύθυνση από εφελευσμό 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.



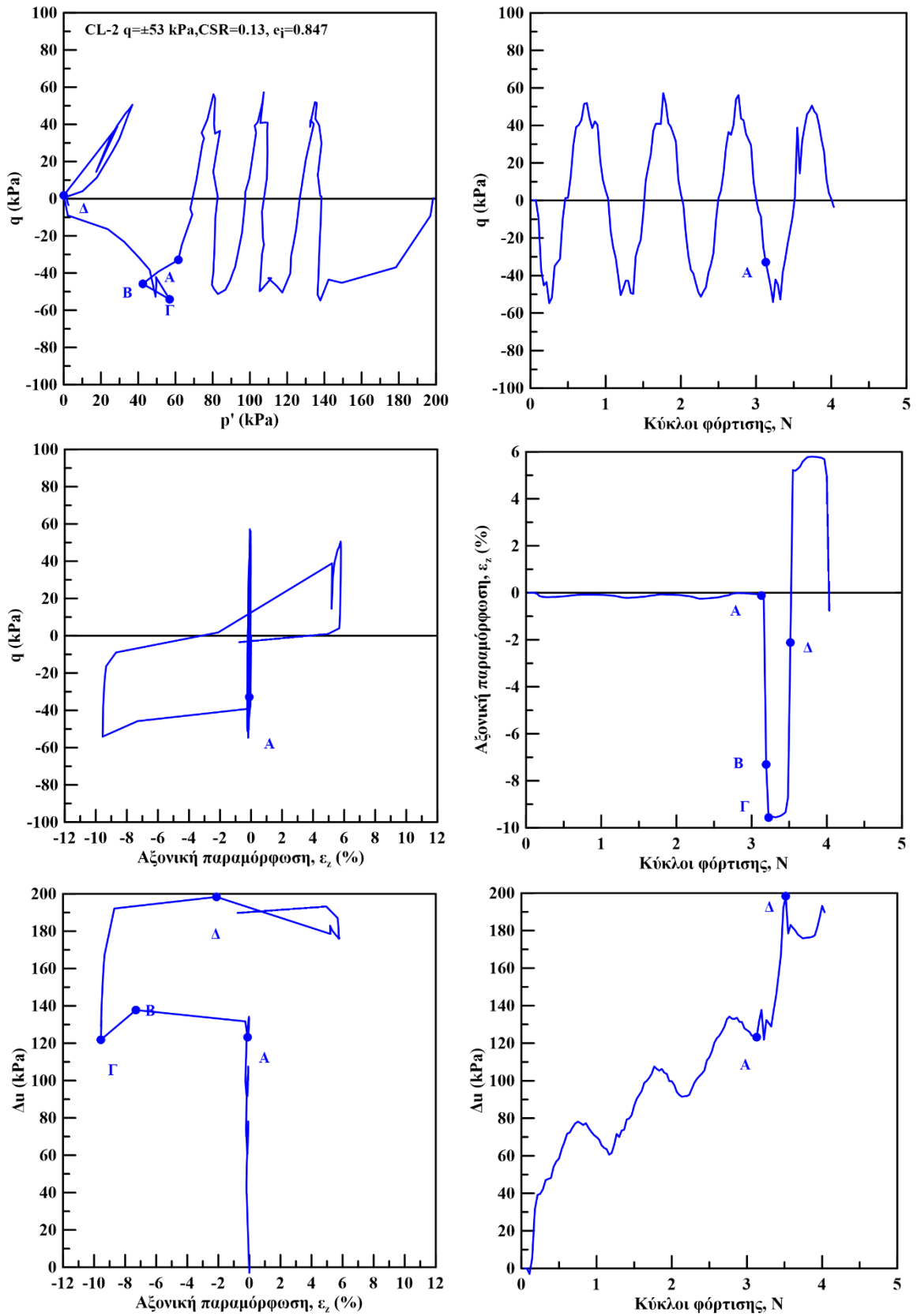
Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 77$ kPa



Σχήμα 4.2: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 61$ kPa βαλε τα B και Γ στο πανω αριστερά διάγραμμα.



Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 63 \text{ kPa}$



Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q=\pm 53$ kPa

Στο Σχήμα 4.5 έως 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, στην άμμο M31 και longstone αντίστοιχα για τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ (CM-5,6 και CL-4,6). Τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($q-N$), 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 στους κύκλους φόρτισης πριν την αστοχία τα δοκίμια ενώ έχουν αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζουν 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 στον κύκλο πριν την αστοχία, όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων ($Ru=\Delta u/p'_i$), δηλαδή μηδενισμός της ενεργού τάσης (αρχική ρευστοποίηση). Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται σημαντική αξονική παραμόρφωση και τελικά τα δοκίμια οδηγούνται στην αστοχία. Τα C1, C2, C3 δείχνουν κοινή συμπεριφορά κατά την φόρτιση σε εφελκυσμό στον κύκλο αστοχίας. Δηλαδή στο σημείο A εμφανίζεται αστάθεια του δοκιμίου με αποτέλεσμα ενώ στο δοκίμιο αναπτύσσεται αρνητική παραμόρφωση εφόσον εφελκύεται χάνει την αντοχή του σε εφελκυσμό και εμφανίζεται μείωση στην απόλυτη τιμή του q μέχρι το σημείο B στο οποίο οι παραμορφώσεις είναι περίπου 2%. Κατά την ασταθή αυτή συμπεριφορά η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται στο αντίστοιχο Σχήμα. Καθώς η συσκευή εξακολουθεί να εφελκύει το δοκίμιο από το B στο Γ αυτό αλλάζει φάση και διαστέλλεται αλλά με μεγάλες παραμορφώσεις περίπου 12% στο Γ. Κατά τη διαστολή μπορεί να αναλάβει το εφελκυστικό φορτίο που στόχευε η ανακυκλική φόρτιση και μάλιστα το ξεπερνά λόγω της φόρτισης με έλεγχο φορτίου που διαρκεί δευτερόλεπτα. Λόγω της αλλαγής φάσης του δοκιμίου ο έλεγχος του φορτίου δεν είναι ακριβής και το τελικό φορτίο στο Γ είναι μεγαλύτερο του επιθυμητού. Όμως η διαδρομή AB είναι απόκριση του υλικού και όχι πρόβλημα ελέγχου της συσκευής.

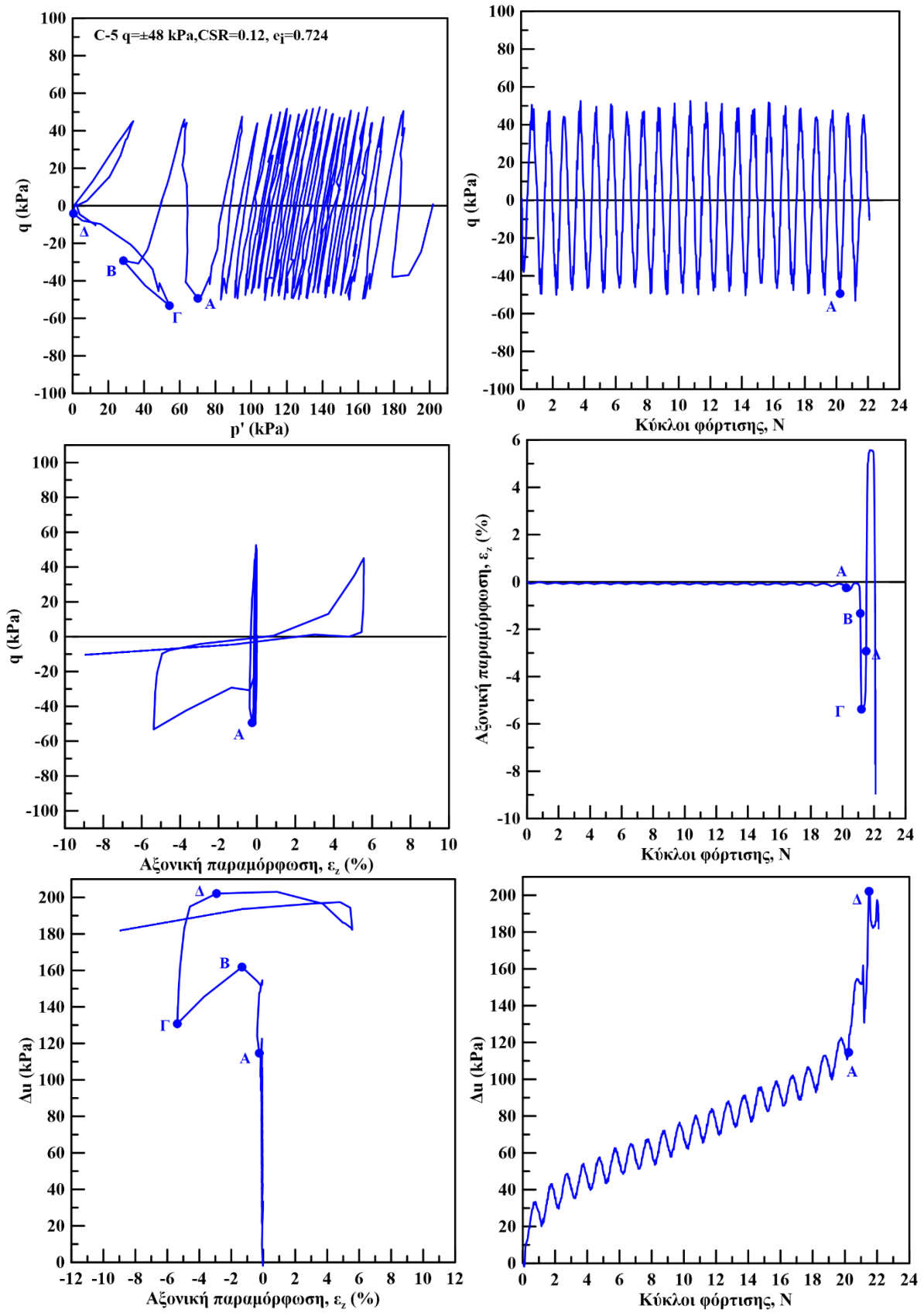
Η απόκριση αυτή του δοκιμίου στον εφελκυστικό κλάδο της ημιτονοειδούς φόρτισης είναι ισοδύναμη με μονοτονική φόρτιση σε εφελκυσμό. Αυτό φαίνεται καθαρά στο δοκίμιο C3 όπου λόγω ενδιάμεσης τιμής πλάτους ανακυκλικής φόρτισης περισσότερα σημεία περιγράφουν αυτή την απόκριση η οποία είναι τυπική μονοτονικής φόρτισης σε εφελκυσμό. Άρα η πτώση του εφελκυστικού φορτίου από το A στο B είναι απόκριση του υλικού όχι της συσκευής. Όμοια αποτελέσματα από διαφορετική τριαξονική υπάρχουν στη βιβλιογραφία για πολύ μικρότερα πλάτη ημιτονοειδούς φόρτισης (Georgiannou et al. 1991).

Συνοψίζοντας, ξαφνικά το δοκίμιο αστοχεί και δεν μπορεί να φέρει την αποκλίνουσα τάση (βλ. μείωση q από το B στο Γ) με αποτέλεσμα να καταρρέει με την παραμόρφωση να αυξάνεται από 2% σε 12% από το B στο Γ. Παρόλα αυτά καθώς οι κόκκοι αναδιατάσσονται λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης το δοκίμιο μπορεί πλέον να αναλάβει φορτίο από το Γ στο Δ αλλά αυτό γίνεται με ανακυκλικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 10% (cyclic mobility).

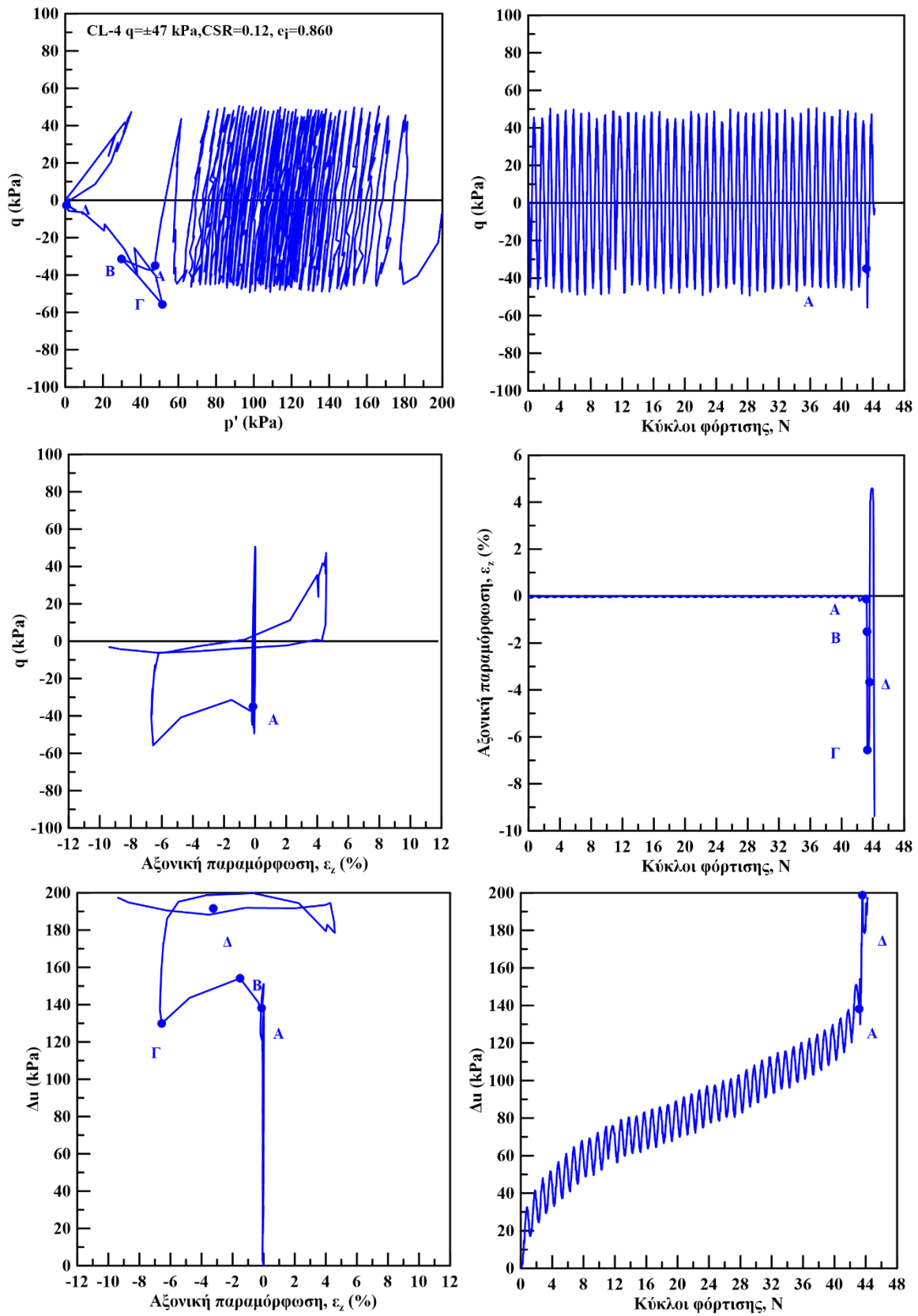
Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$ πραγματοποιούνται στον ίδιο κύκλο. Συνεπώς, τα δοκίμια που φορτίζονται με μικρότερη

ανακυκλική τάση απαιτούν μεγαλύτερο 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 για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στην άμμο M31 και Longstone παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

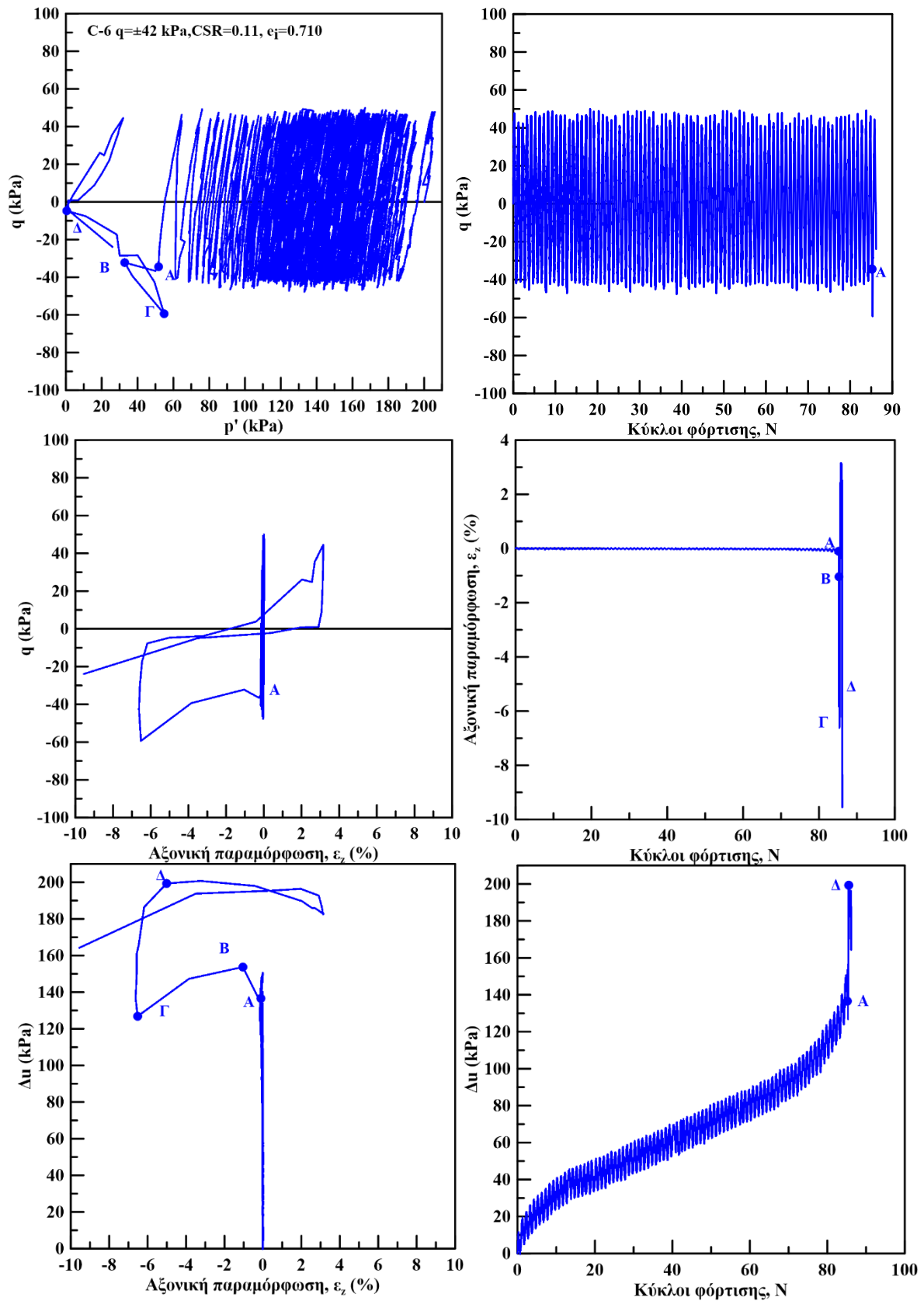
Μετά το σημείο A, όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, αρχικά το κάθε δοκίμιο παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος AB), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ), οδηγείται στην αρχική ρευστοποίηση (κλάδος ΓΔ) και με τη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης οδηγείται στην κατάρρευση (όπου τερματίζουν και οι μετρητές αξονικής παραμόρφωσης). Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο A), αλλά και όταν τελικά το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία (σημείο Δ), η αποκλίνουσα τάση, σ , 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, με την αύξηση της της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την έναρξη της ασταθούς συμπεριφοράς και τη συσσώρευση των παραμορφώσεων αυξάνει (σημείο A). Ωστόσο, ανεξαρτήτως μεγέθους της ανακυκλικής τάσης, μετά το σημείο A, η χαλαρή άμμος M31 και Longstone ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά, δηλαδή, στον ίδιο κύκλο αναπτύσσεται αξονική παραμόρφωση $\epsilon_z=1\%$ και $\epsilon_z=2.5\%$, μηδενίζεται η ενεργός τάση και το δοκίμιο οδηγείται στην αστοχία.



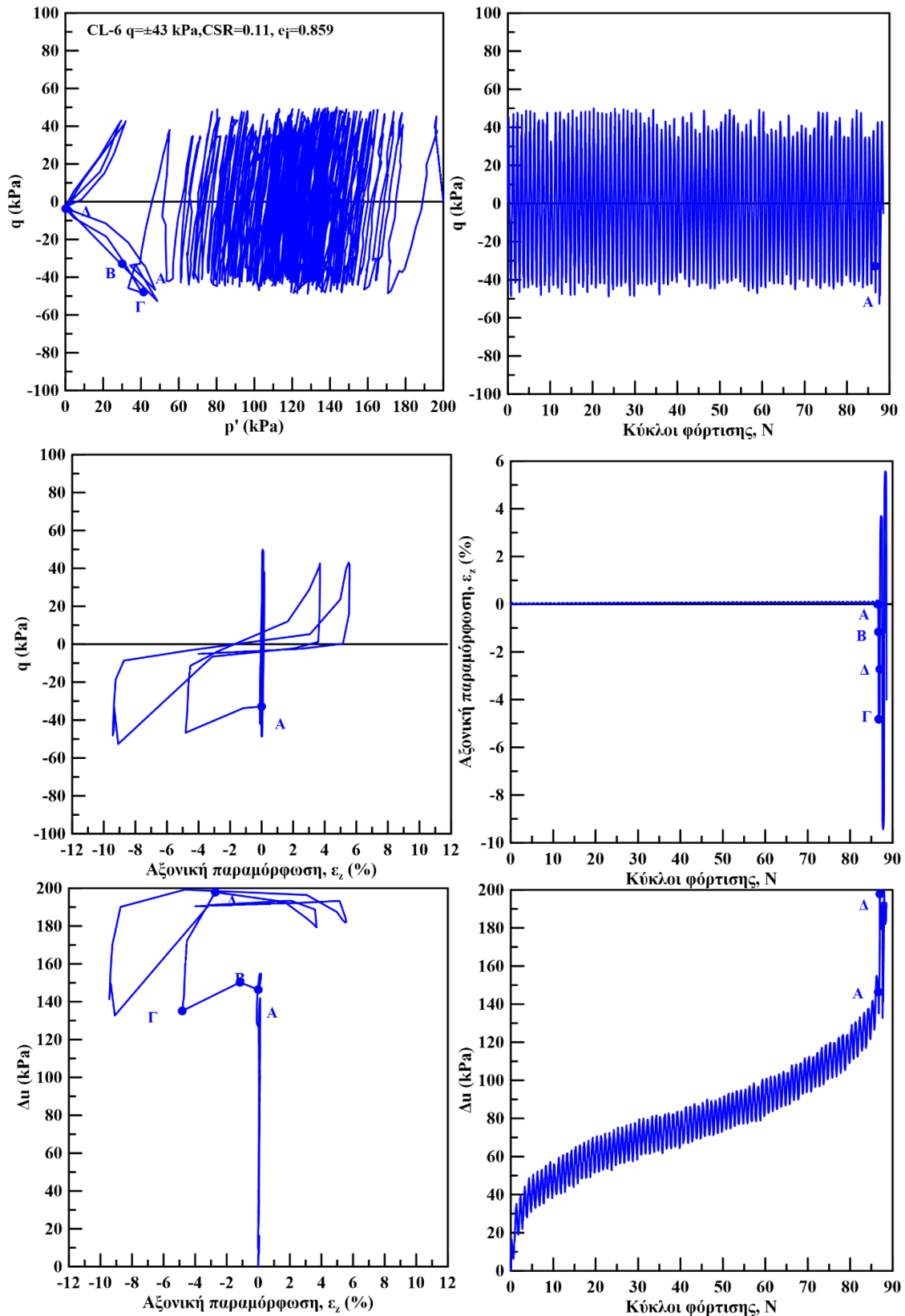
Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 48$ kPa



Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 47 \text{ kPa}$



Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q = \pm 42$ kPa

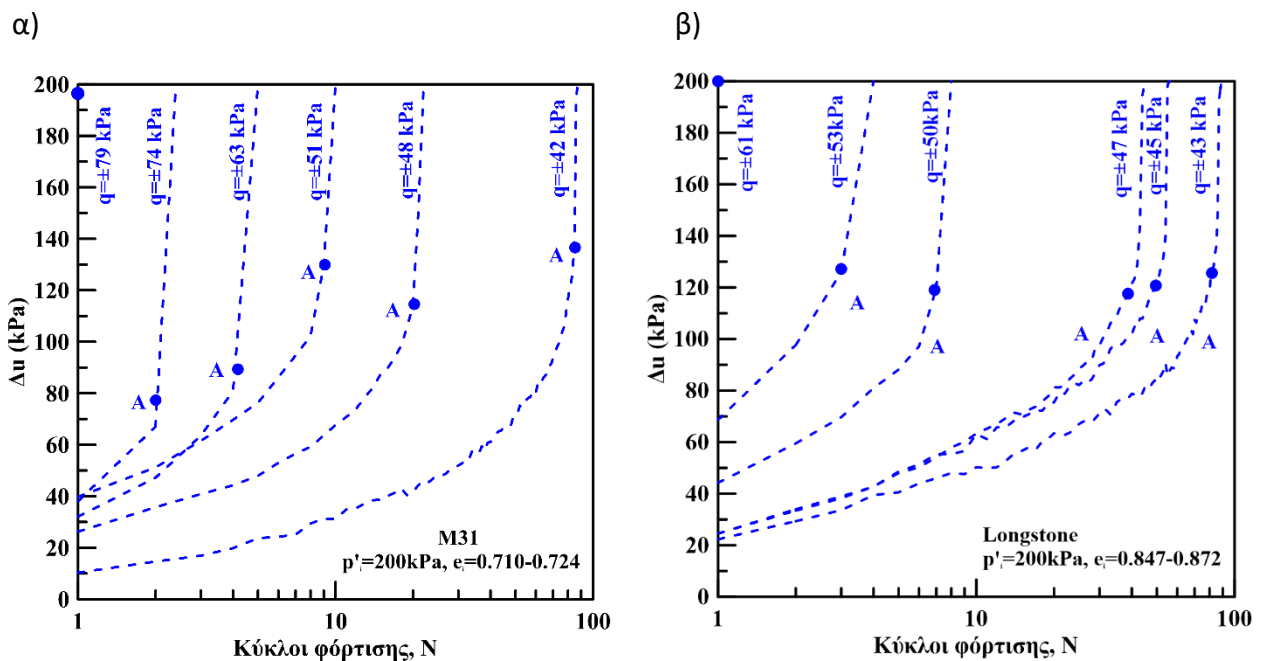


Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 43$ kPa

4.3 Μηχανισμός ανάπτυξης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση των άμμων M31 και Longstone

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές των άμμων M31 και Longstone. 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 σε ασταθή 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 η δοκιμή C-1 με $q=\pm 79$ kPa ρευστοποιείται στον πρώτο κύκλο φόρτισης και σημειώνεται στο σχήμα ως σημείο. 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».

Φαίνεται ότι η επίδραση του πλάτους φόρτισης στην εμφάνιση αστάθειας είναι μεγάλη στα μεγάλα πλάτη και για μικρότερα πλάτη μιάς οριακής τιμής δεν επηρεάζεται.



Σχήμα 4.9: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου M31(α) και της άμμου Longstone (β)

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 συναρτήσει 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 4. 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών δοκιμών, εμποδιζόμενη στράγγισης στην

άμμο M31 σε όρους κανονικοποιημένης υπερπίεσης πόρων ως προς την ενεργό τάση, $\Delta u/p'_i$, συναρτήσει του λόγου 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 (4-1). Αργότερα, οι Booker et al. (1976) πρότειναν μια πιο απλουστευμένη εξίσωση (4-2). Η εξίσωση αυτή τροποποιήθηκε για τη βέλτιστη προσομοίωση των αποτελεσμάτων της άμμου M31 (4-3) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Παρατηρούμε ότι η πρόβλεψη είναι αρκετά ικανοποιητική.

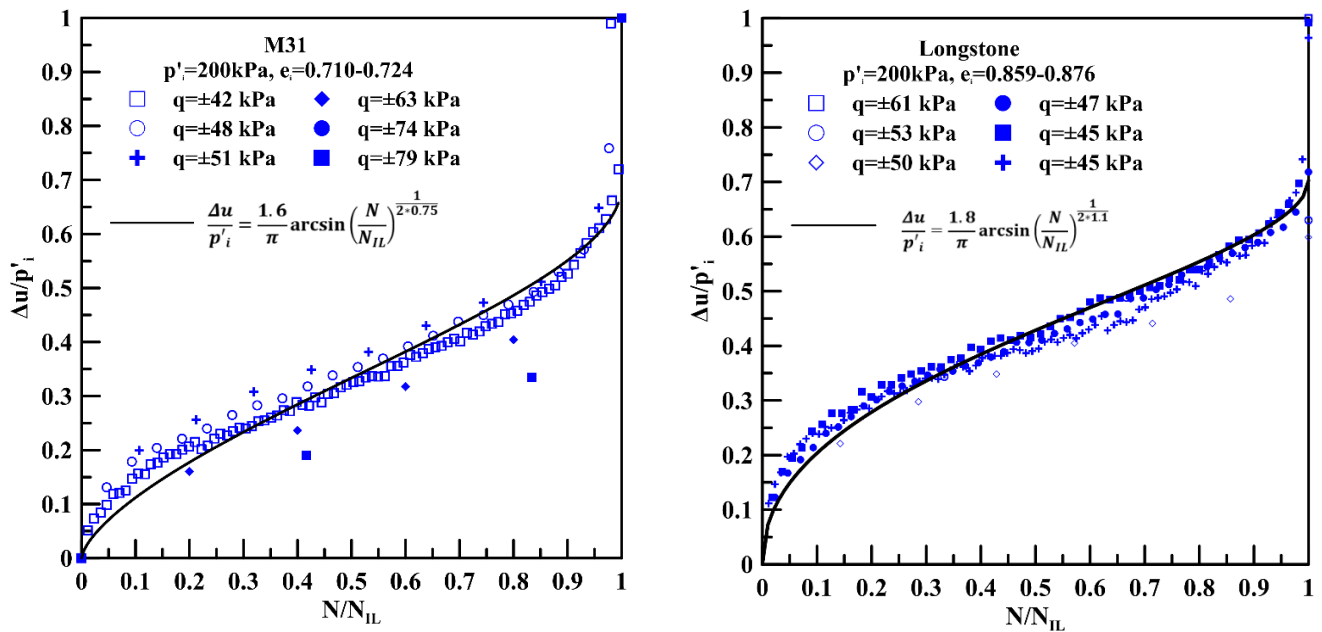
$$\frac{\Delta u}{p'_i} = 0.5 + \frac{1}{\pi} \arcsin\left(2 * \left(\frac{N}{N_{IL}}\right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1\right) \quad (4-1)$$

$$\frac{\Delta u}{p'_i} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_{IL}}\right)^{\frac{1}{2*\alpha}} \quad (4-2)$$

Όπου:

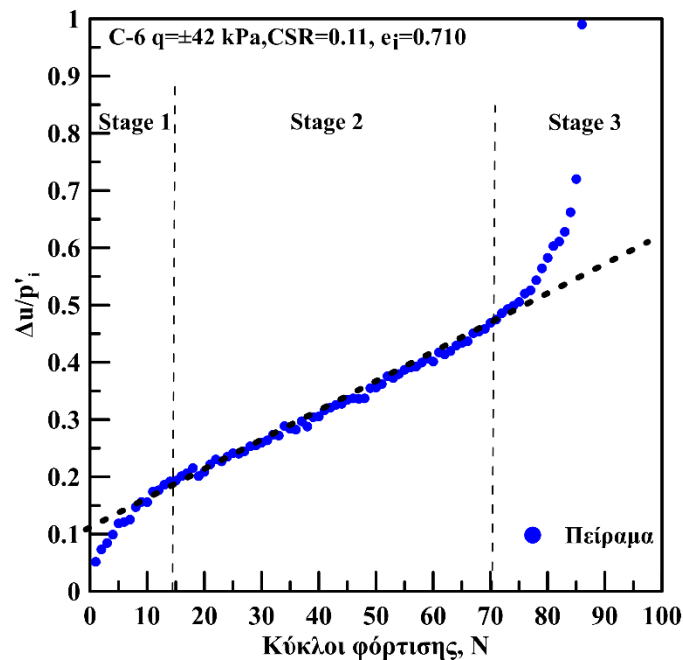
- Δu , υπερπίεση του υγρού των πόρων στο τέλος του κάθε κύκλου φόρτισης,
- p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
- N , τρέχων κύκλος φόρτισης
- N_{IL} , αριθμός κύκλων φόρτισης για ανάπτυξη ρευστοποίησης
- α , εμπειρική παράμετρος

$$\frac{\Delta u}{p'_i} = \frac{1.6}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_{IL}}\right)^{\frac{1}{2*0.75}} \quad (4-3)$$



Σχήμα 4.10: 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 $q=\pm 44-79\text{ kPa}$

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζονται τα στάδια 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) ώπου 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).



Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής δοκιμής υπό εμποδιζόμενη στράγγιση: Τυπικά στάδια της εξέλιξης της κανονικοποιημένης υπερπίεσης του υγρού των πόρων με τους κύκλους φόρτισης

4.4 Καμπύλες ρευστοποίησης των άμμων M31 και Longstone

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_{1L} , 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 (4-4). Επιπρόσθετα, λόγω της συμμετρικής ανακυκλικής παραμόρφωσης, χρησιμοποιείται το απόλυτο μέγεθος της αξονικής παραμόρφωσης για τον ορισμό της ρευστοποίησης $|\varepsilon_z|=1\%$ και 2.5% .

$$CSR = \frac{q}{2 * p'_i}$$

(4-4)

Τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, αστράγγιστων, τριαξονικών δοκιμών στα χαλαρά, κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31 συνοψίζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα στο Σχήμα 4.12 σε όρους CSR- κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση N_{1L} . 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.

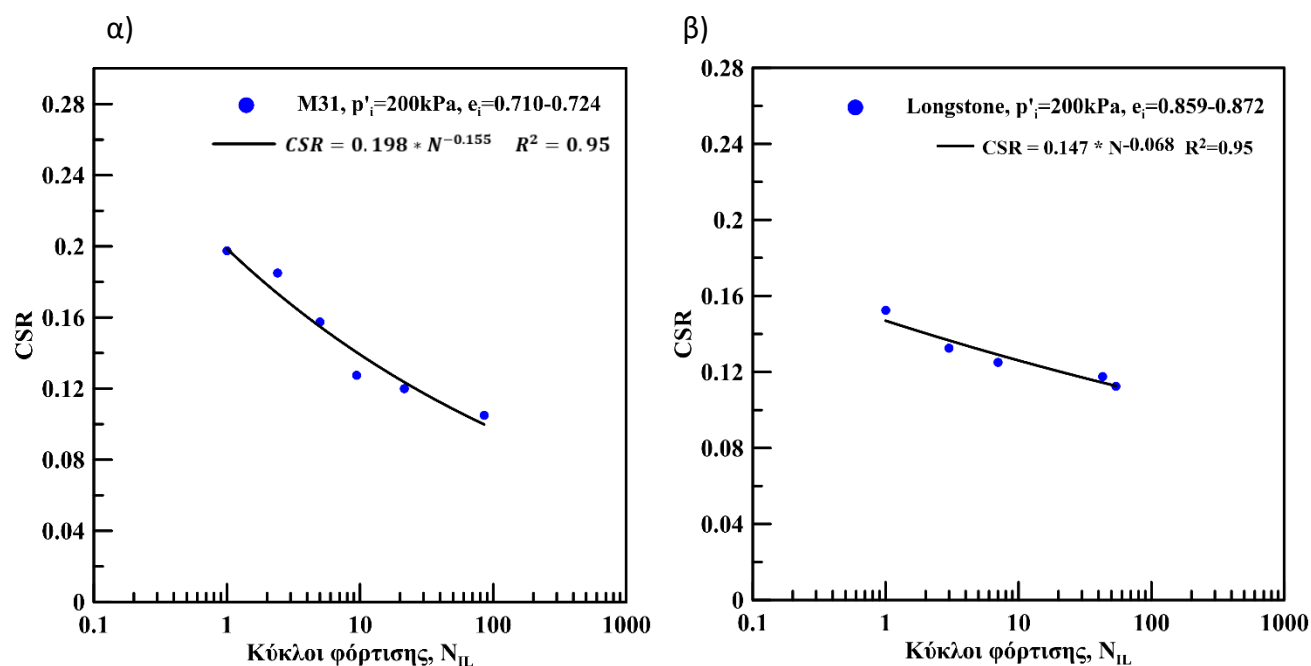
Τα πειραματικά αποτελέσματα της διατριβής ανήκουν σε μια καμπύλη (καμπύλη ρευστοποίησης-liquefaction curve) που περιγράφεται από μια εξίσωση δύναμης (4-5), (Idriss & Boulanger, 2008) όπου $a = 0.198$ και $b = -0.155$.

$$CSR = a * N^b$$

(4-5)

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 $|\varepsilon_z|=1$ και 2.5% πρακτικά ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει γιατί μετά το τέλος του Σταδίου 2, 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). Παρόμοια τιμή εμφανίζει και η γωνιώδης άμμος Longstone η οποία φαίνεται να έχει μειωμένη αντίσταση για υψηλούς λόγους CSR.



Σχήμα 4.12: Καμπύλη ρευστοποίησης χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31 και Longstone

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 4.13).

α)



β)



Σχήμα 4.13: Φωτογραφίες δοκιμίου άμμου M31: α) πριν την φόρτιση, β) μετά από τριαξονική, ανακυκλική φόρτιση υπό εμποδιζόμενη στράγγιση

4.5 Ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμου M31 και Longstone 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 και Longstone 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 ενώ για τις τριαξονικές δυναμικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η δυναμική τριαξονική συσκευή. Οι ανακυκλικές δοκιμές που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (stress control tests).

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια της άμμου M31 και Longstone στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa με εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e_i=0.717-0.748$ και $e_i=0.825-0.837$ αντίστοιχα. 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 4.2. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών .

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες					N _{5%}
	e _i	p' _i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N _{IL}	N _{1%}	N _{2.5%}	
SCM-1	0.720	200	0.20	5	3	3	5	9
SCM-2	0.728	200	0.18	5	5	4	6	12
SCM-3	0.717	200	0.16	5	10	7	11	19
SCM-4	0.734	200	0.14	5	29	27	35	93
SCM-5	0.748	200	0.12	5	46	41	46	59
SCL-1	0.837	200	0.15	5	18	7	12	31
SCL-2	0.825	200	0.14	5	51	12	39	-
SCL-3	0.831	200	0.13	5	107	64	216	-

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 και Longstone σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας σταθεροποιητή 10% κ.β.

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 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 με τάση στερεοποίησης p'_i=200kPa, δείκτη πόρων e_i=0.720 και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση q=±79kPa (SC-1). Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη δοκιμή με τάση στερεοποίησης p'_i=200kPa, δείκτη πόρων e_i=0.728 και επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση q=±74kPa (SC-2).

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων (q-p'), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης (q-N), αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης (q-ε_z),

αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει κύκλων φόρτισης (ϵ_z -N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης (Δu - ϵ_z) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει κύκλων φόρτισης (Δu -N). Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 4.16 και 4.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης (q - ϵ_z), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει κύκλων φόρτισης (ϵ_z -N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης (Δu - ϵ_z) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει κύκλων φόρτισης (Δu -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 4.18 (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 είναι προσεγγιστικά σταθερό. Το πλάτος της διακύμανσης της υπερπίεσης, Δu , είναι μεγαλύτερο στη δοκιμή με το μεγαλύτερο λόγο ανακυκλικής τάσης (SC-1). 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 $q=0$ -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 4.18(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 (SC-1).

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα δοκίμια σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31 και Longstone με μεγάλο λόγο ανακυκλικής τάσης 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 μεγάλου διπλού πλάτους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο M31 και Longstone για μικρότερους λόγους ανακυκλικής τάσης CSR. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα αποτελέσματα δοκιμής SC-3,4,5 και SCL-1,2,3 Σχήμα 4.20-4.25. 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 (ϵ_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$), (Σχήμα 4.26-4.31).

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 ενεργής 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.

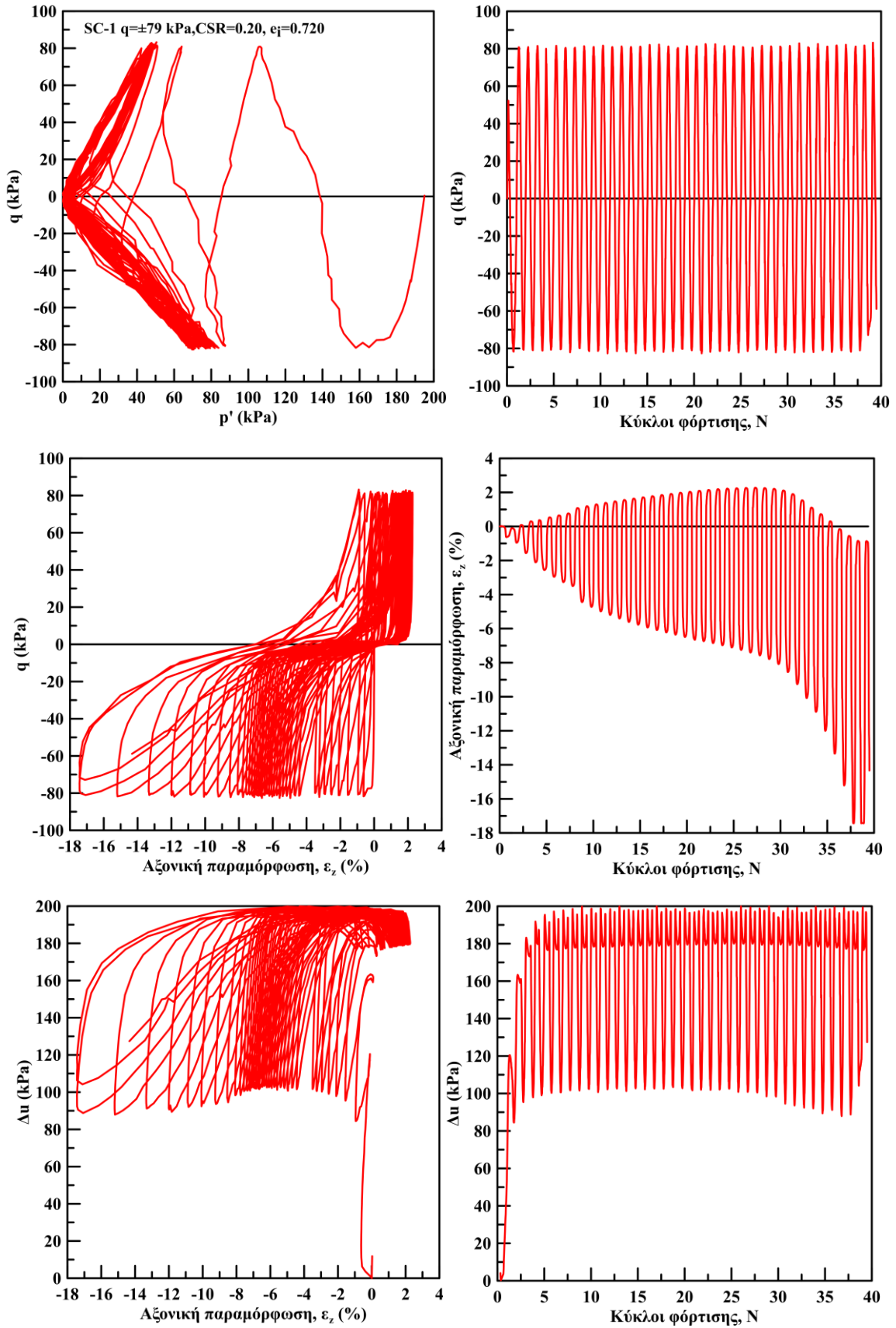
Από την αρχή της ανακυκλικής φόρτισης έως προσεγγιστικά την επίτευξη της μέγιστης τιμής Δu παρατηρείται διακύμανση της υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε κάθε κύκλο φόρτισης με τη συστολική συμπεριφορά να εμφανίζεται οδεύοντας προς τη μέγιστη θλιπτική αποκλίνουσα τάση ($q=-\max$ έως $q=+\max$) και διαστολική 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 4.32 (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.

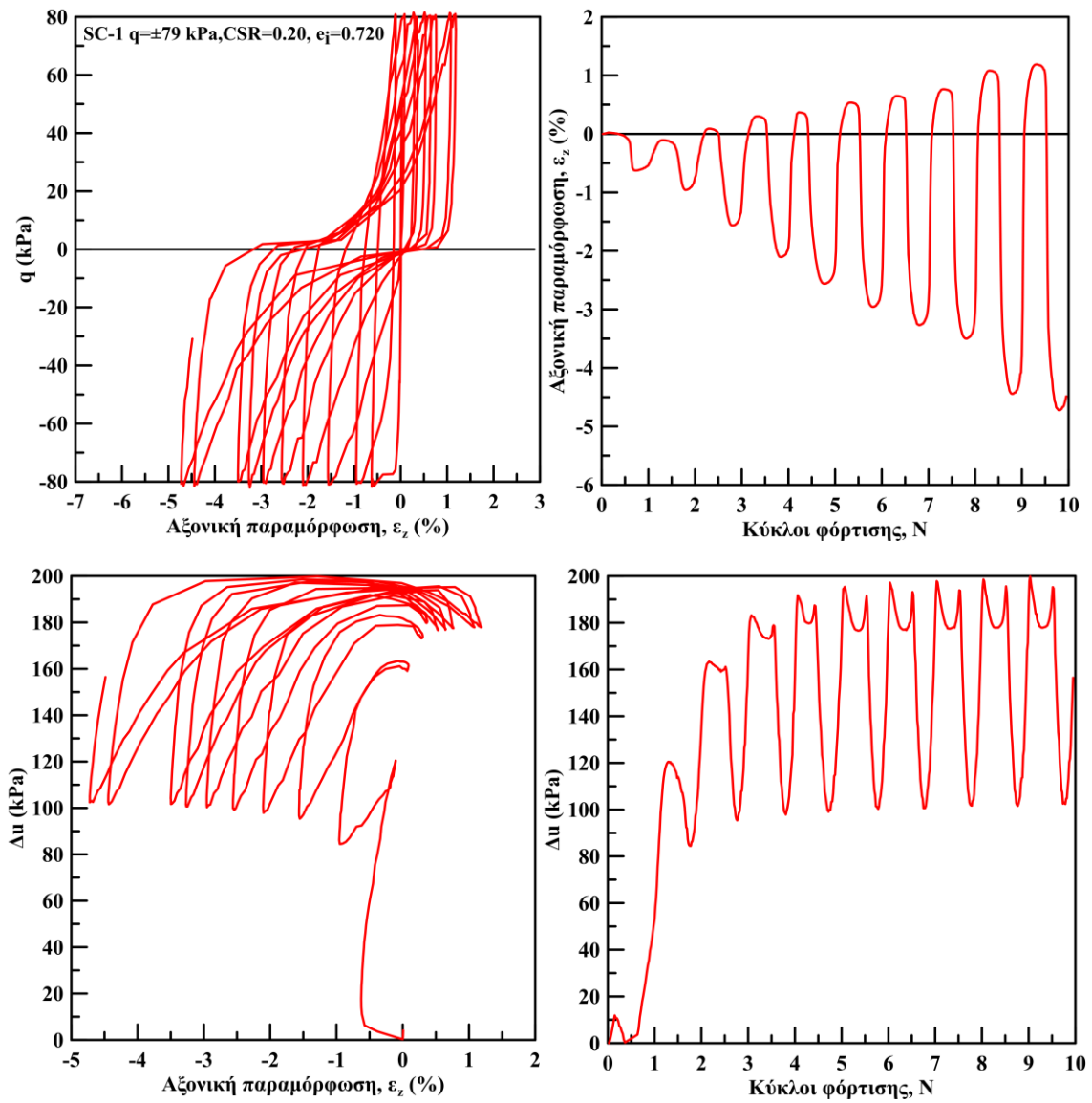
Ωστόσο, μετά από κάποιο κύκλο φόρτισης το πλάτος της αξονικής παραμόρφωσης αυξάνεται σημαντικά. Ο απαιτούμενος αριθμός των κύκλων φόρτισης για να εμφανιστεί αυτή η αλλαγή αυξάνεται με τη μείωση του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR. Μετά από αυτό το σημείο η αξονική παραμόρφωση αυξάνεται σταδιακά χωρίς να εμφανίζεται κάποια ραγδαία μεταβολή ακόμη και όταν η ενεργός τάση μηδενίζεται.

Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης παρατηρείται σημαντική διακύμανση της 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 4.32 (β)). Ωστόσο, η συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζεται στο εφελκυστικό τμήμα υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτρία 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).

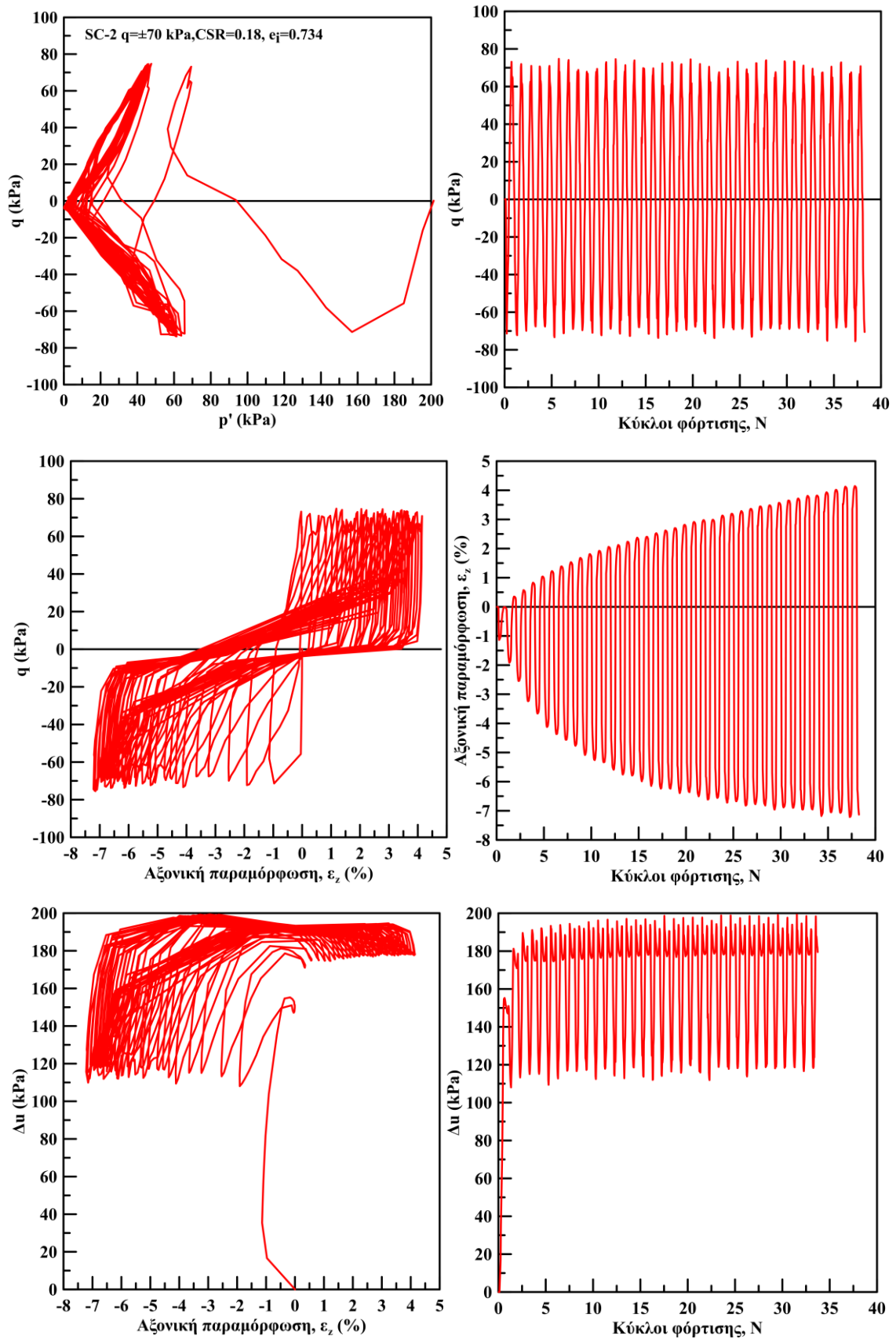
Σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $\epsilon_z=1, 2.5$ και 5% πραγματοποιούνται σε διαφορετικούς κύκλους σε αντίθεση με τη φυσική άμμο M31. Όσο μειώνεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης CSR ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων για την επίτευξη αυτών των παραμορφώσεων αυξάνεται. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (αρχική ρευστοποίηση, επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_z=1, 2.5$ και 5%) και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης CSR για όλες τις ανακυκλικές δοκιμές στη σταθεροποιημένη άμμο M31 παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.



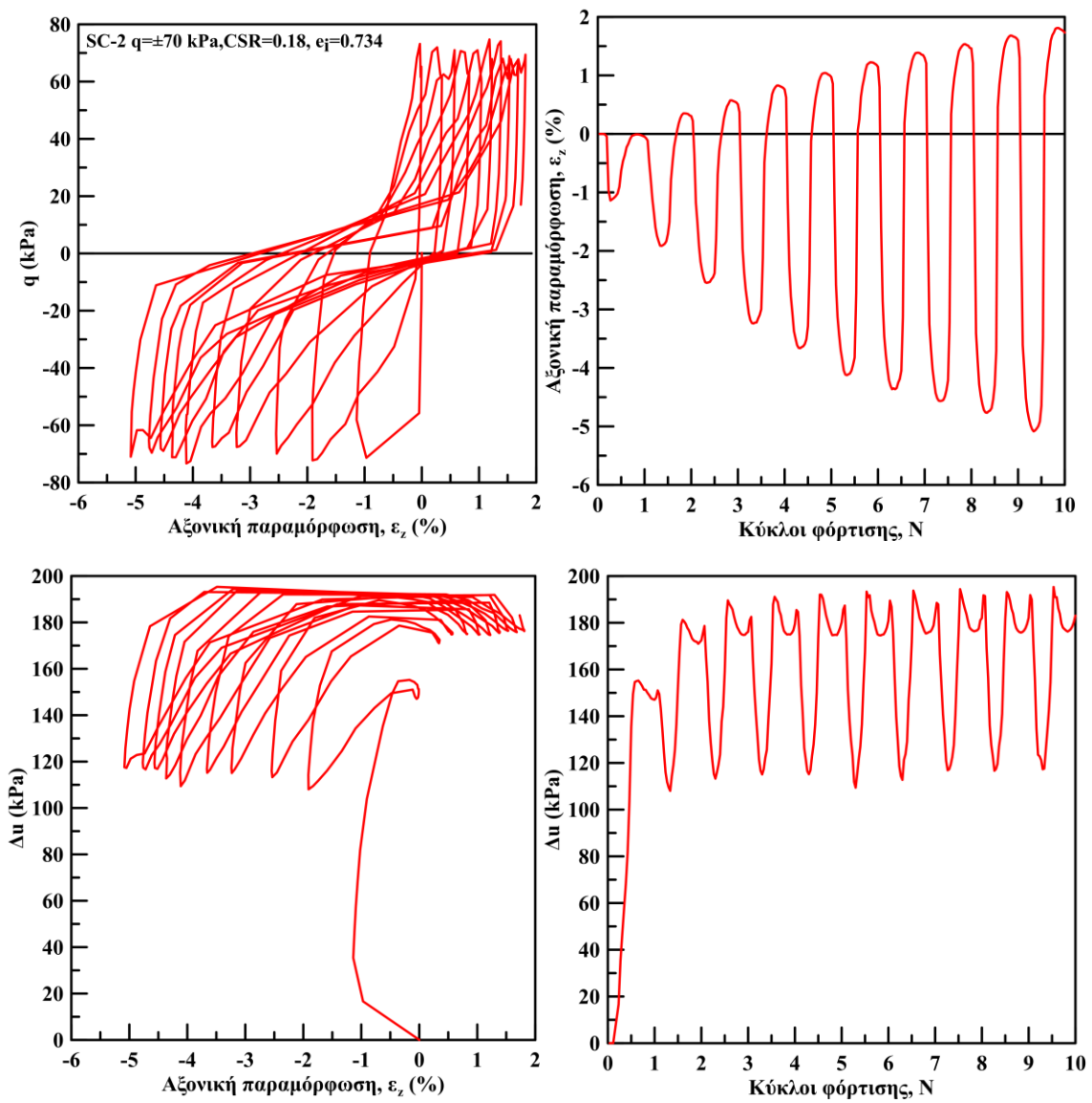
Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 79$ kPa



Σχήμα 4.15: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 79$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

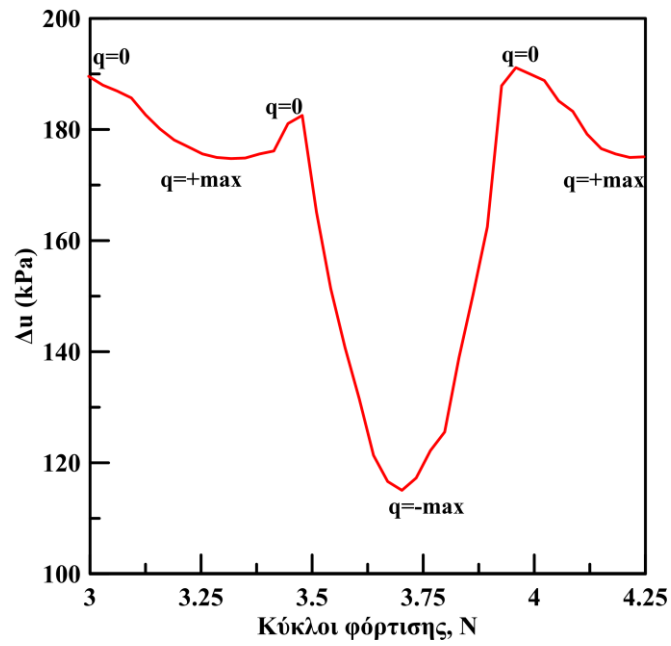


Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 70$ kPa

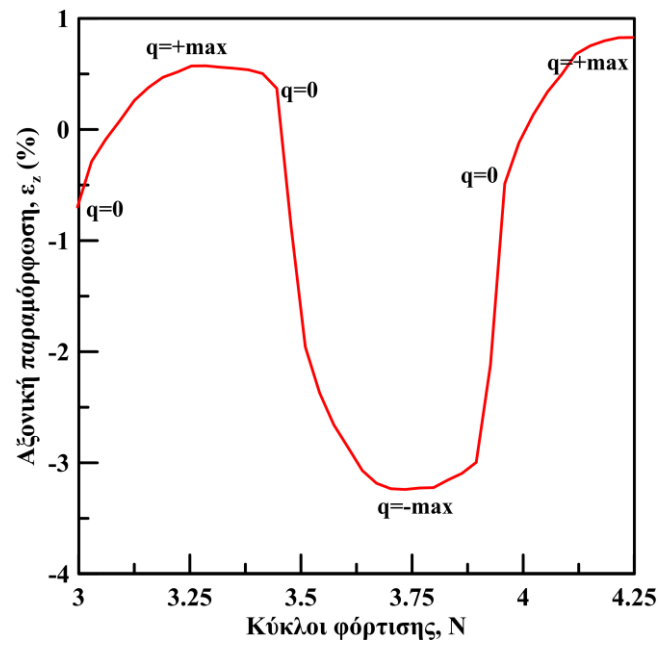


Σχήμα 4.17: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 70$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

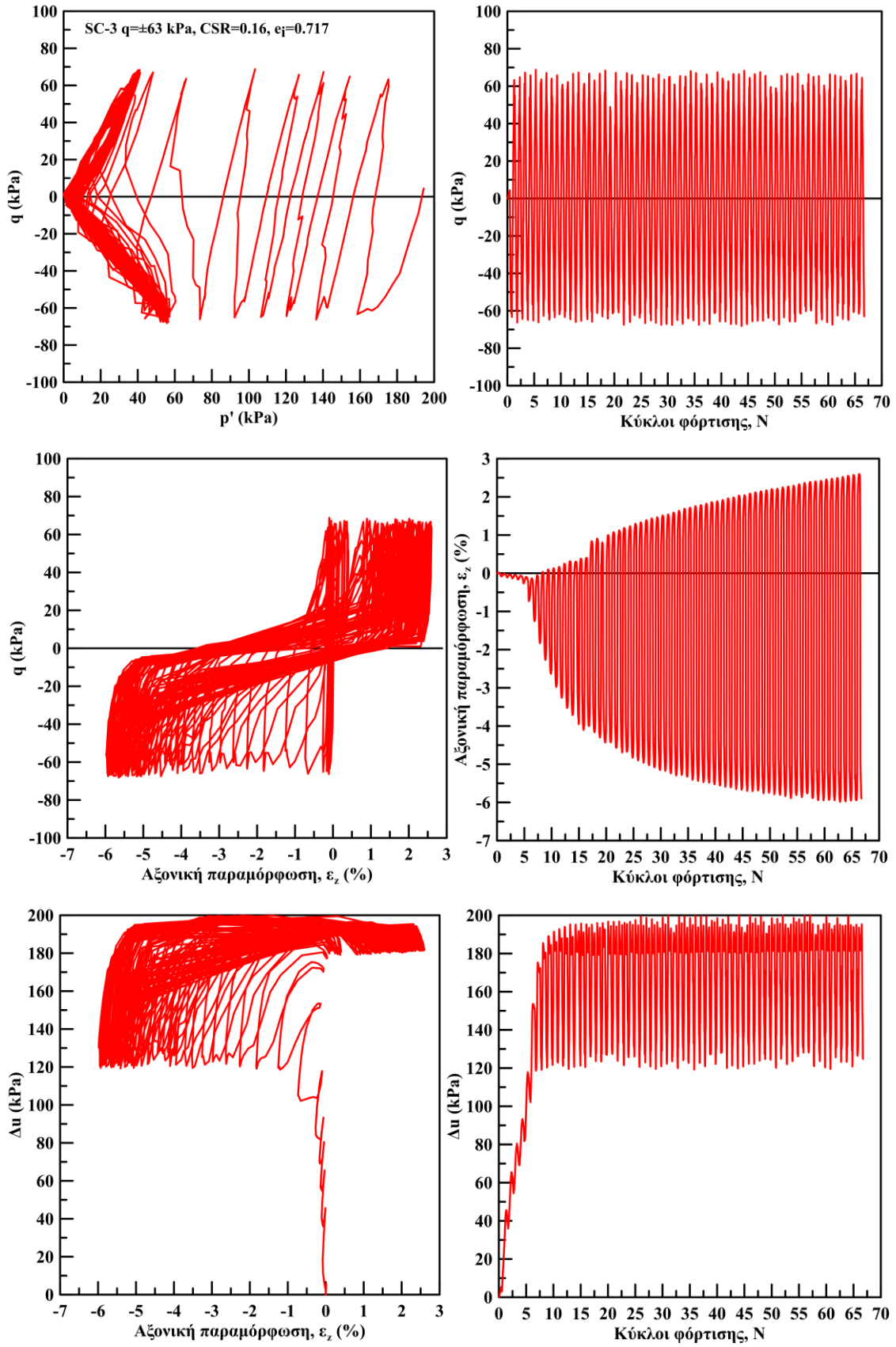
α)



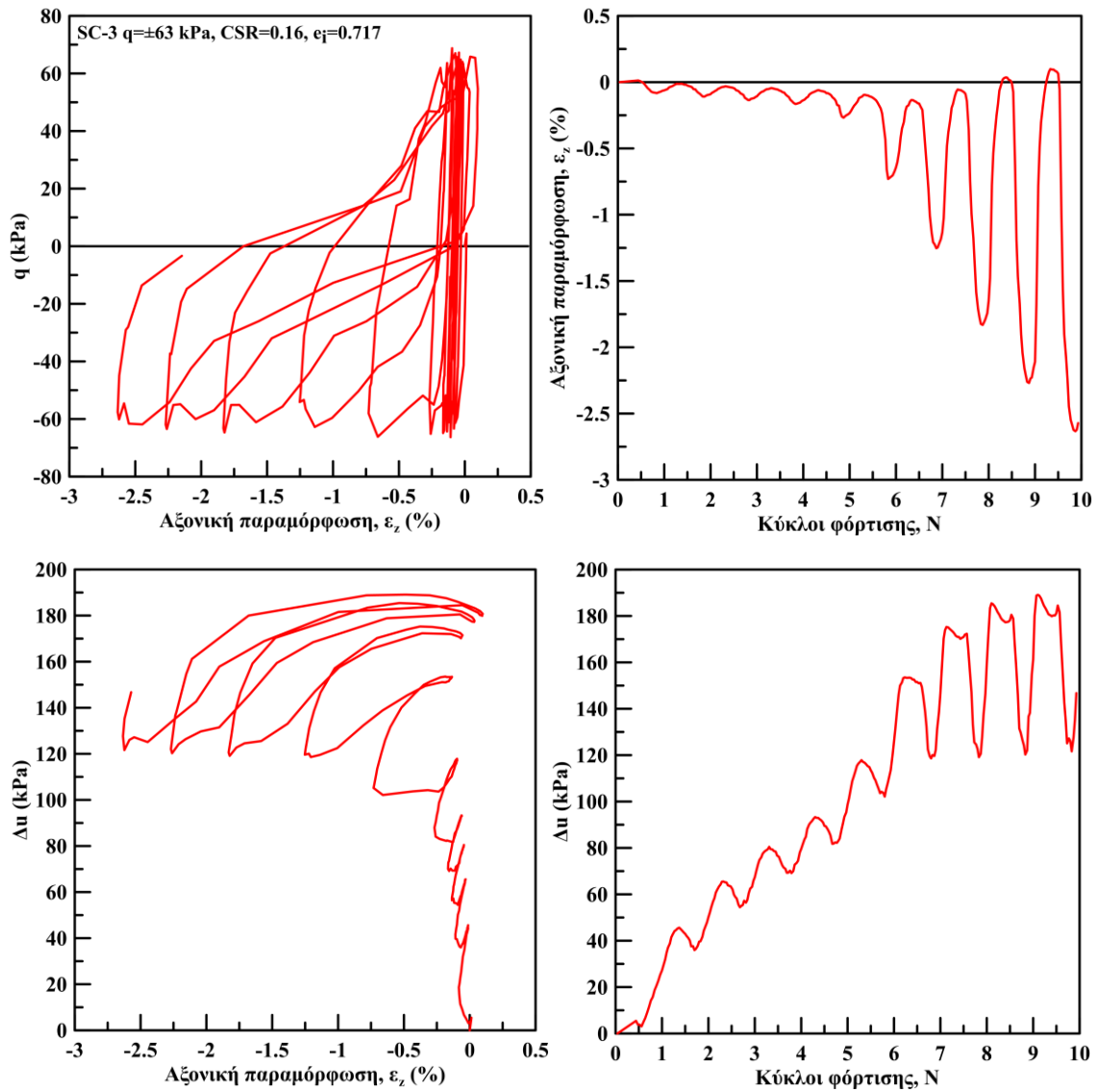
β)



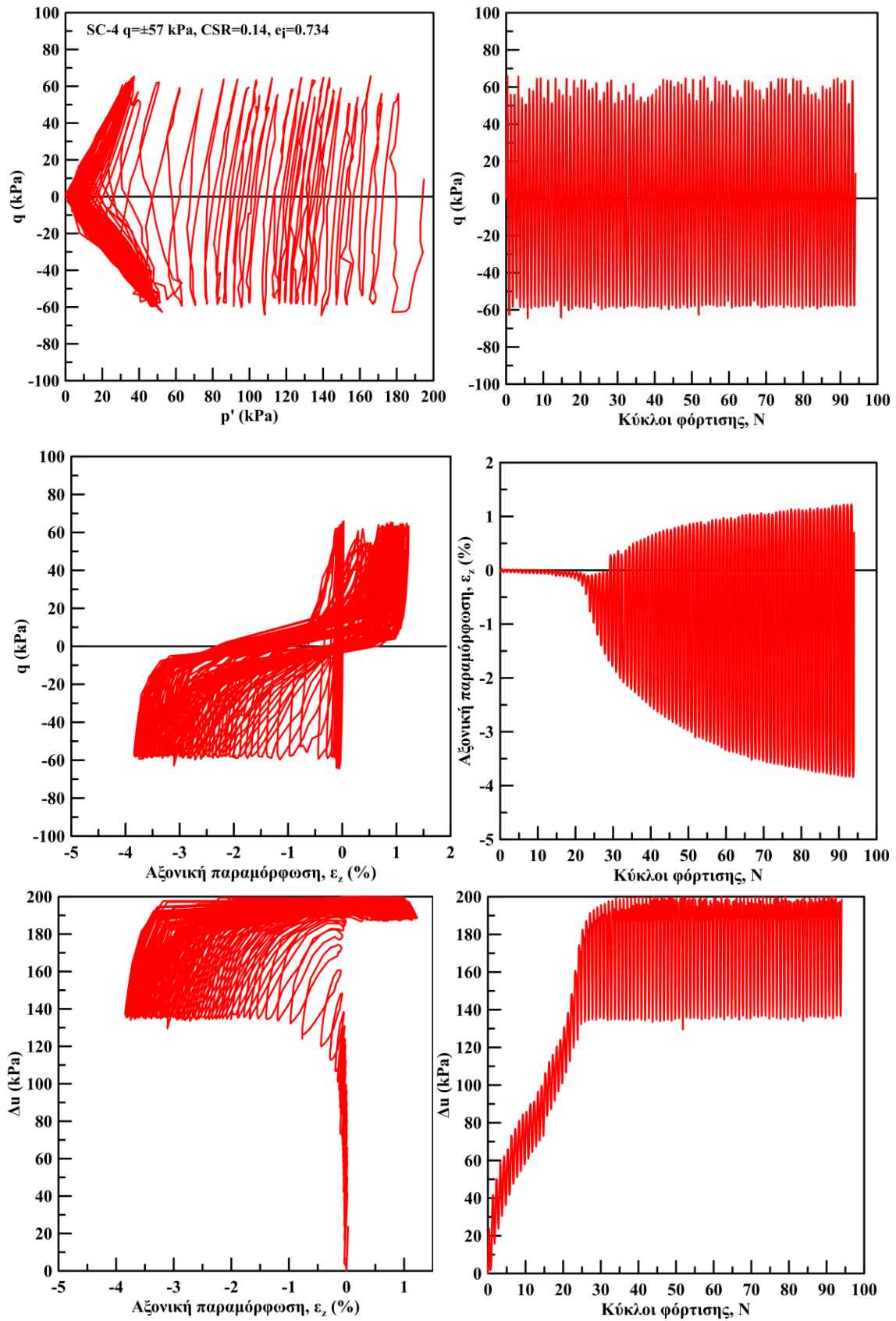
Σχήμα 4.18: Διακύμανση α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής παραμόρφωσης στη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης



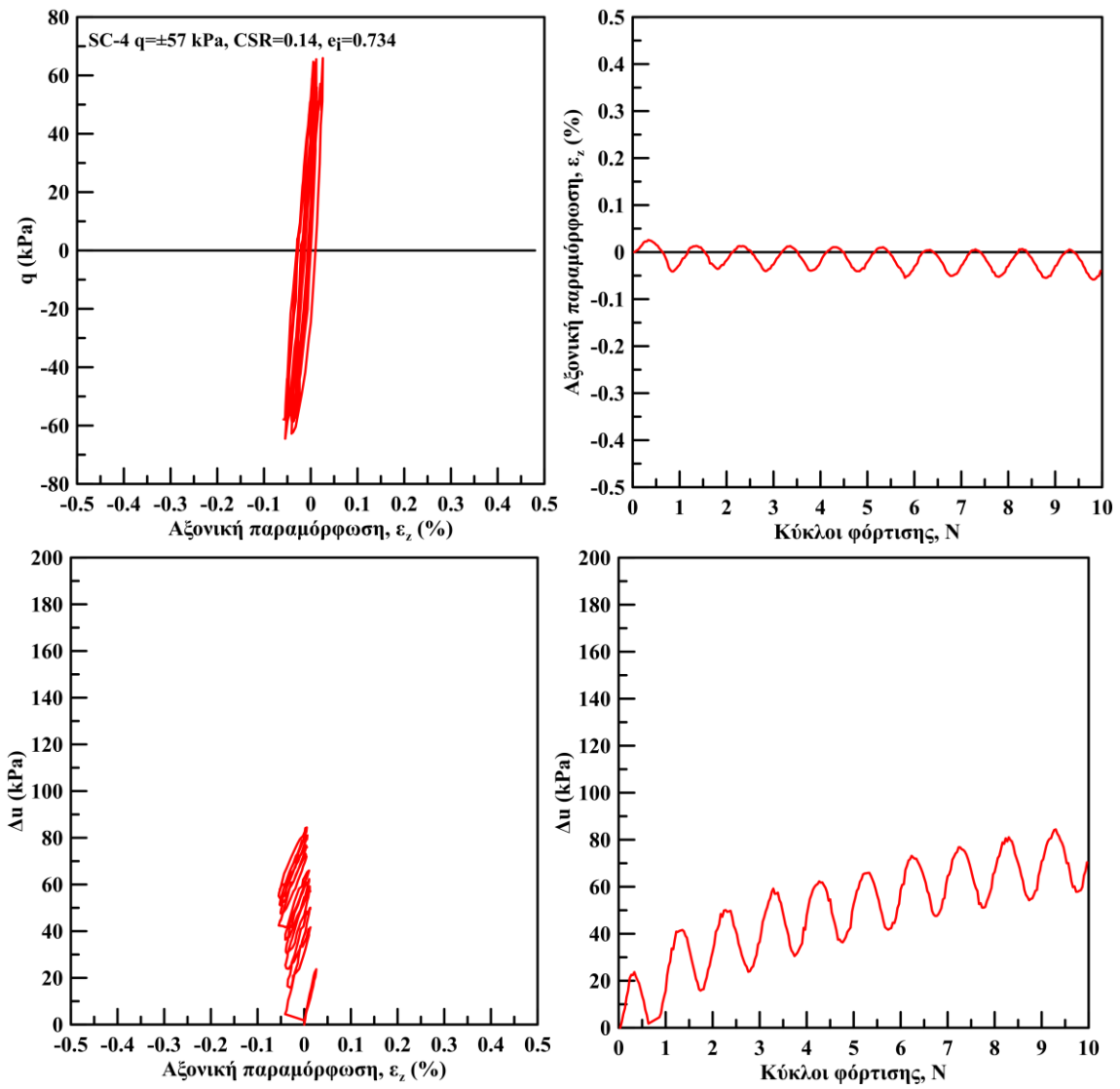
Σχήμα 4.19: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa



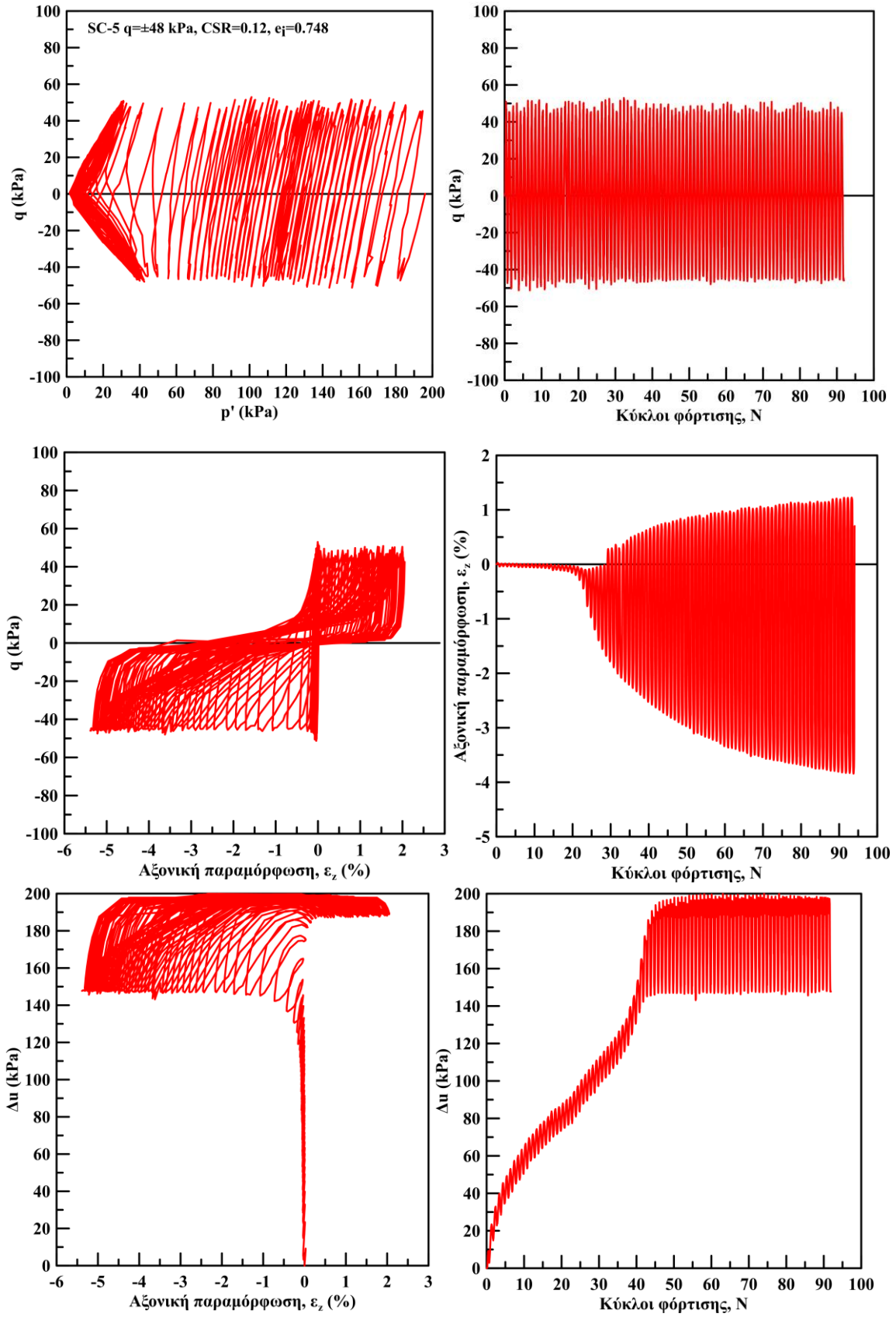
Σχήμα 4.20: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



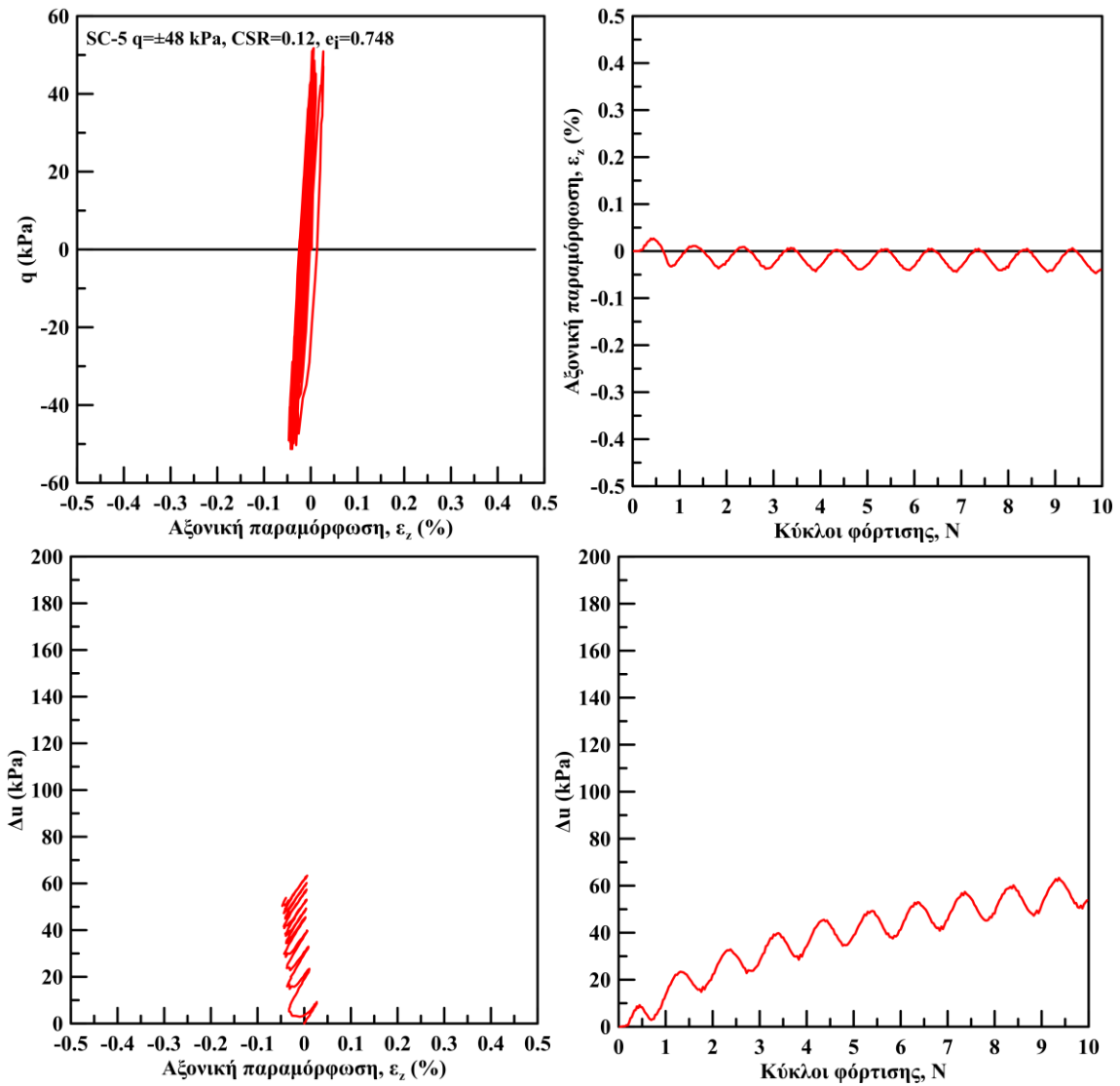
Σχήμα 4.21: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 57$ kPa



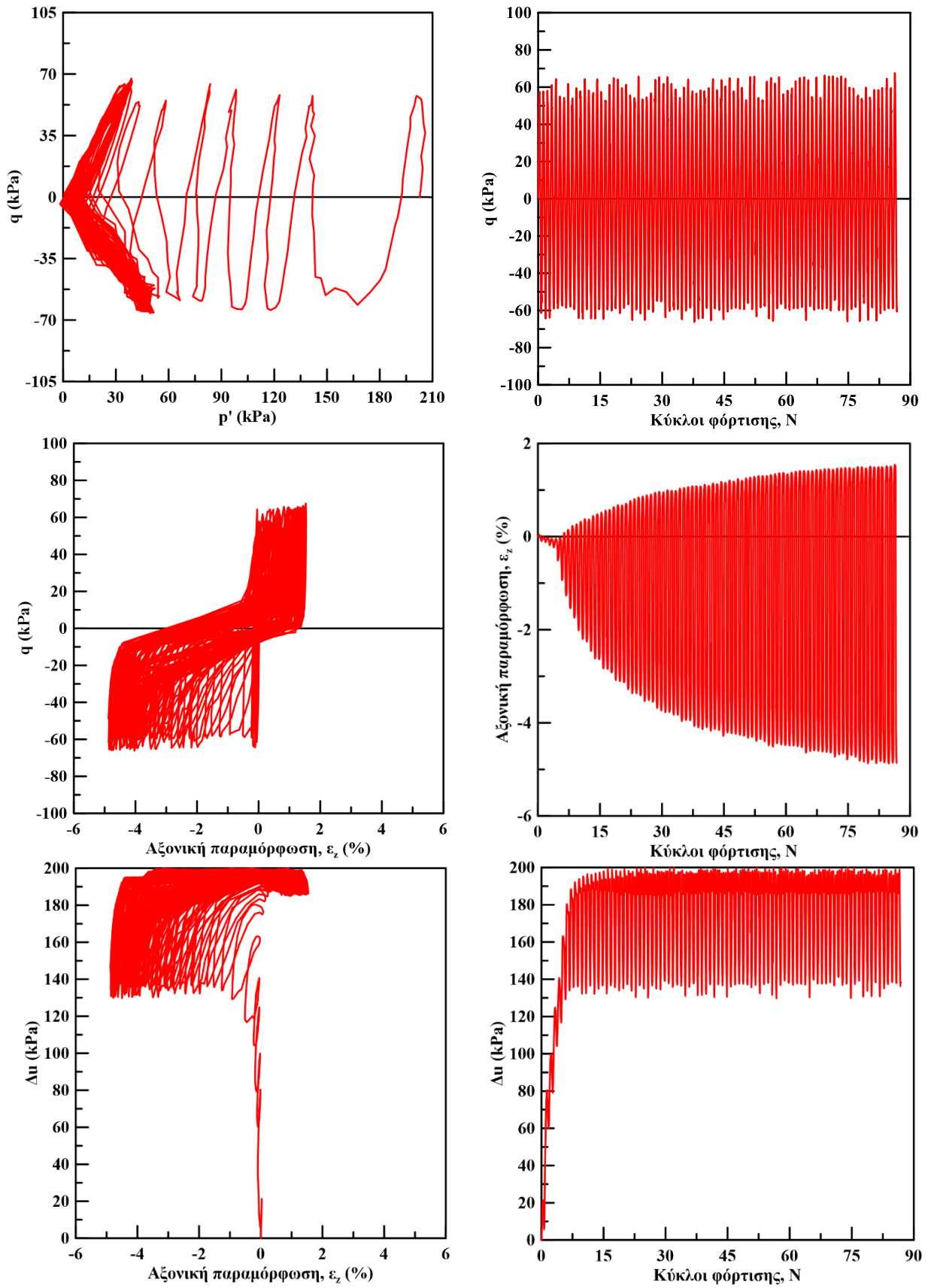
Σχήμα 4.22: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 57$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



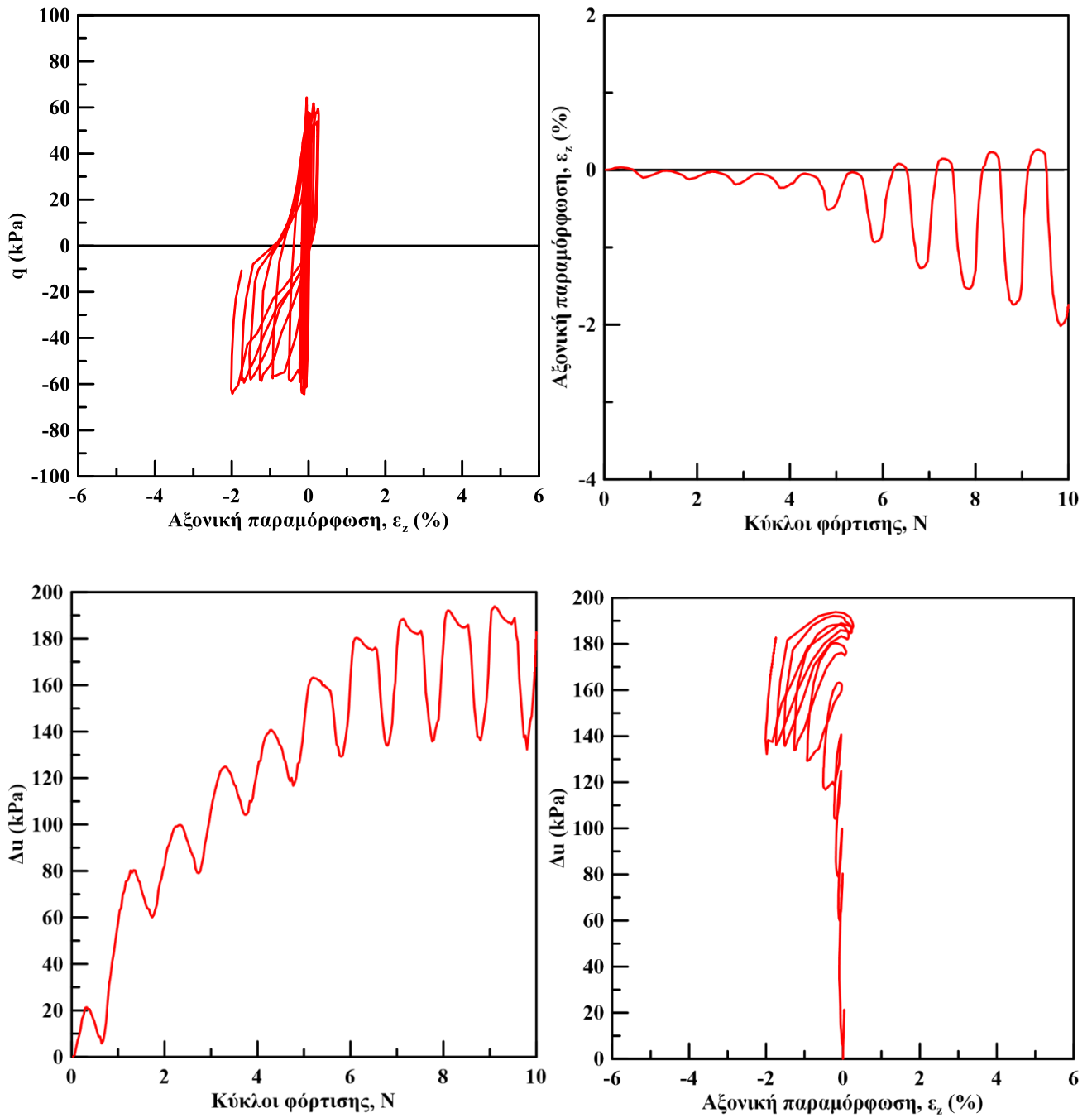
Σχήμα 4.23: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 48$ kPa



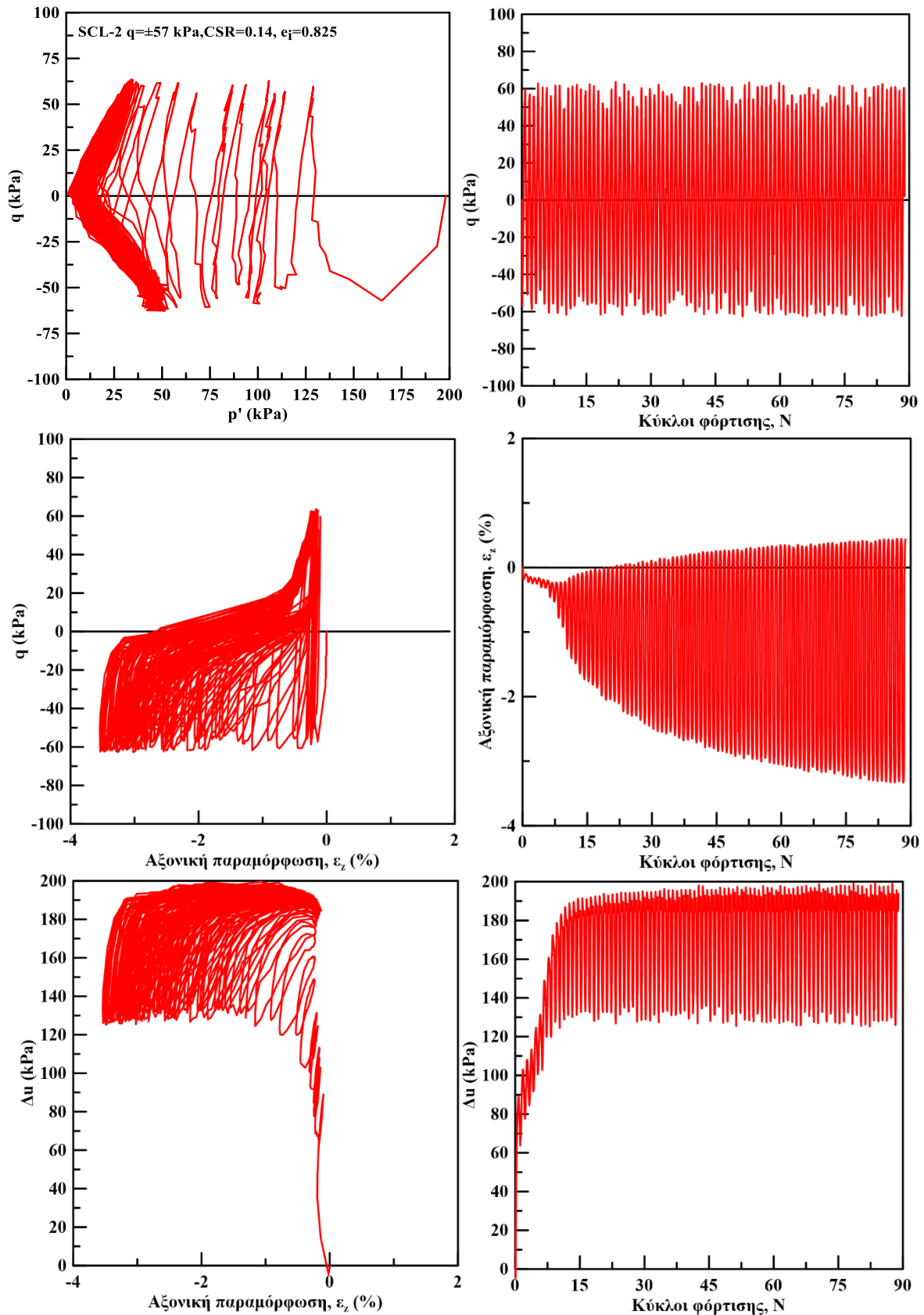
Σχήμα 4.24: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



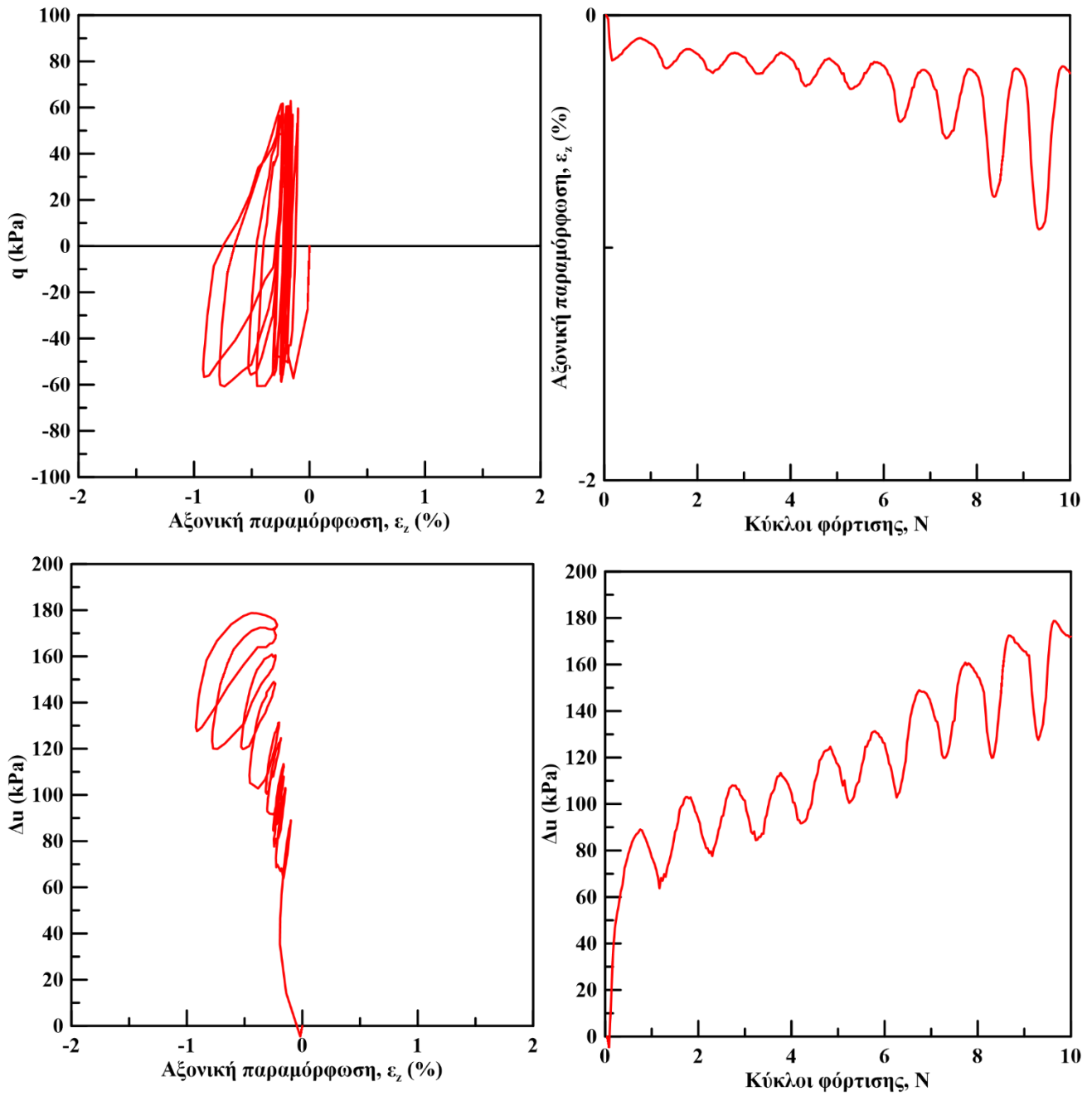
Σχήμα 4.25: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q=\pm 61$ kPa



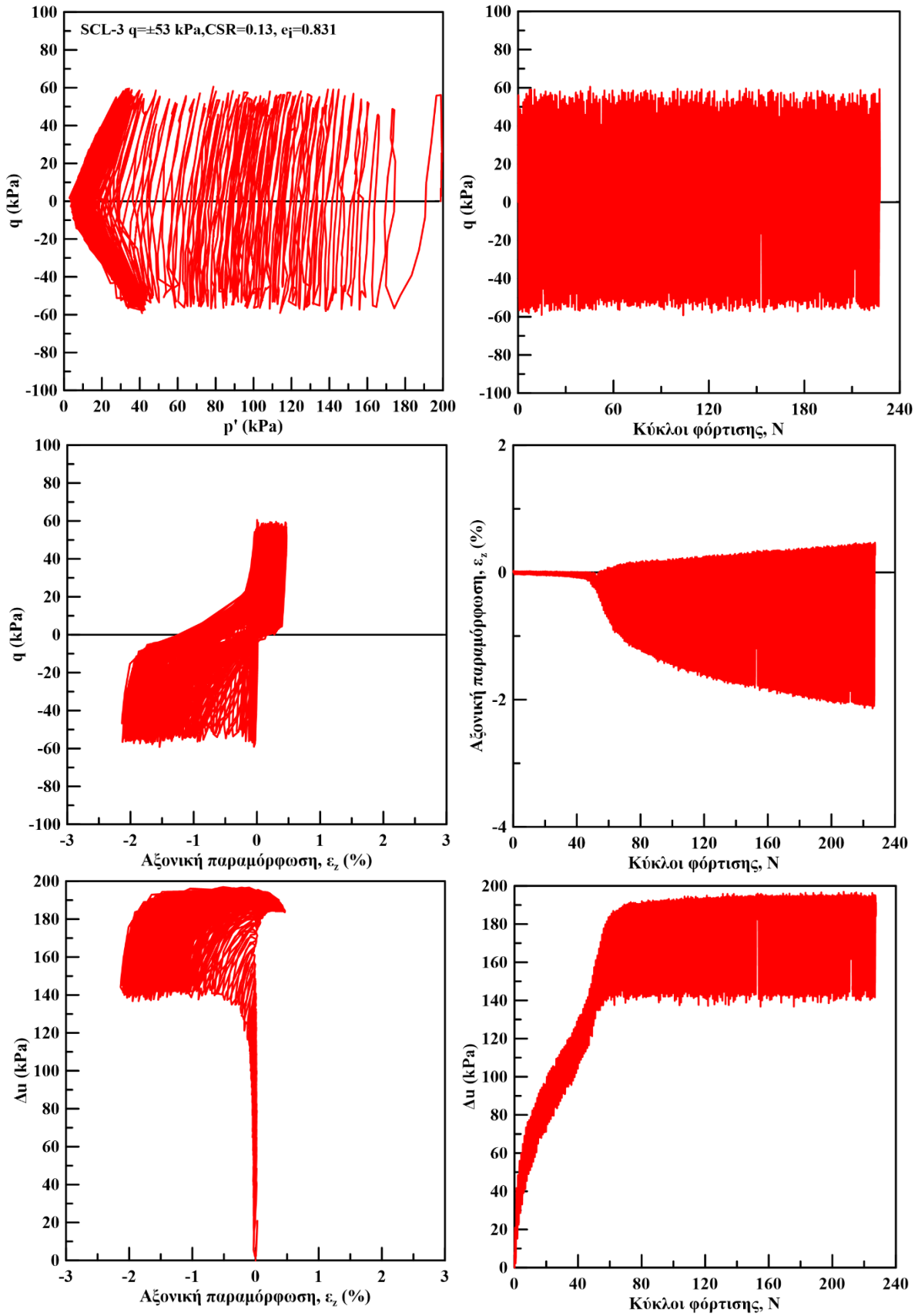
Σχήμα 4.26: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q=\pm 61$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



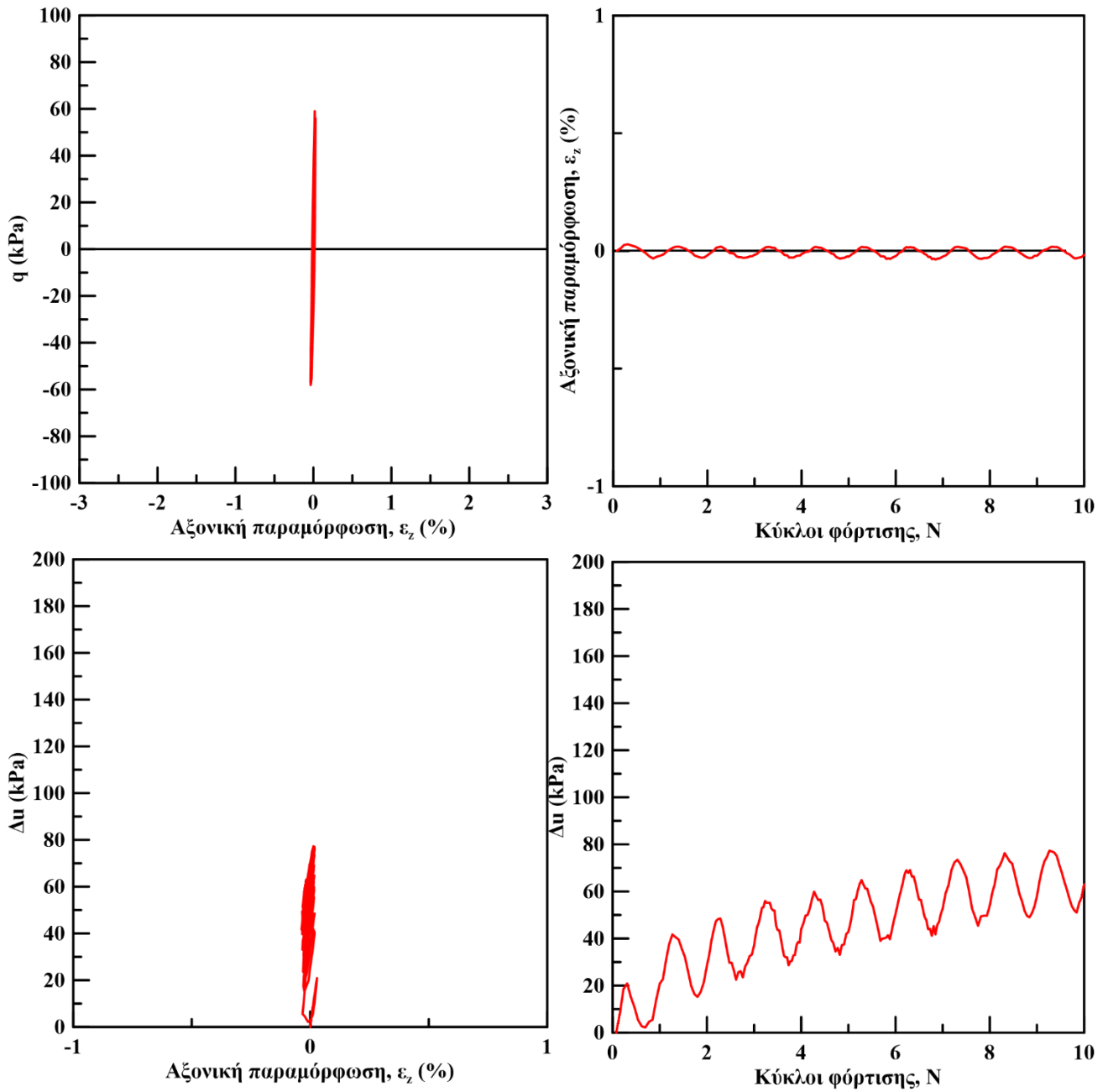
Σχήμα 4.27: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q=\pm 57$ kPa



Σχήμα 4.28: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q=\pm 57$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 4.29: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 53$ kPa



Σχήμα 4.30: Αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 53 \text{ kPa}$ για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Στα Σχήμα 5.31 και 4.32 συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των ανακυκλικών δοκιμών στις σταθεροποιημένες άμμους M31 και Longstone αντίστοιχα. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) Σχήμα 4.31 (α) και 4.32 (α) και της ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_{cyc}) Σχήμα 5.31 (β) και 4.32 (β) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης.

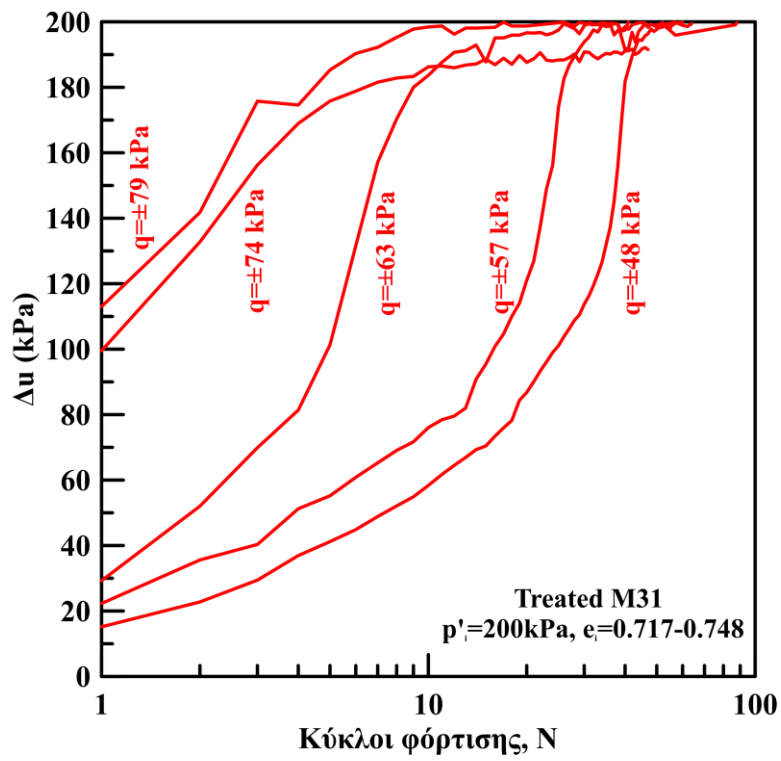
Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση q μηδενίζεται. Στις δοκιμές με μεγάλη επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση η υπερπίεση του υγρού των πόρων αναπτύσσεται σε μεγάλο ποσοστό από τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Στη συνέχεια αυξάνεται γρήγορα μέχρι τη μέγιστη τιμή της όπου και σταθεροποιείται. Στις δοκιμές με μικρότερη επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση εμφανίζεται υπερπίεση του υγρού των πόρων από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια αυξάνεται με 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 ίση με την αρχική ενεργό τάση ($\Delta u = p'_{i0} = 200 \text{ kPa}$) και την «αρχική ρευστοποίηση».

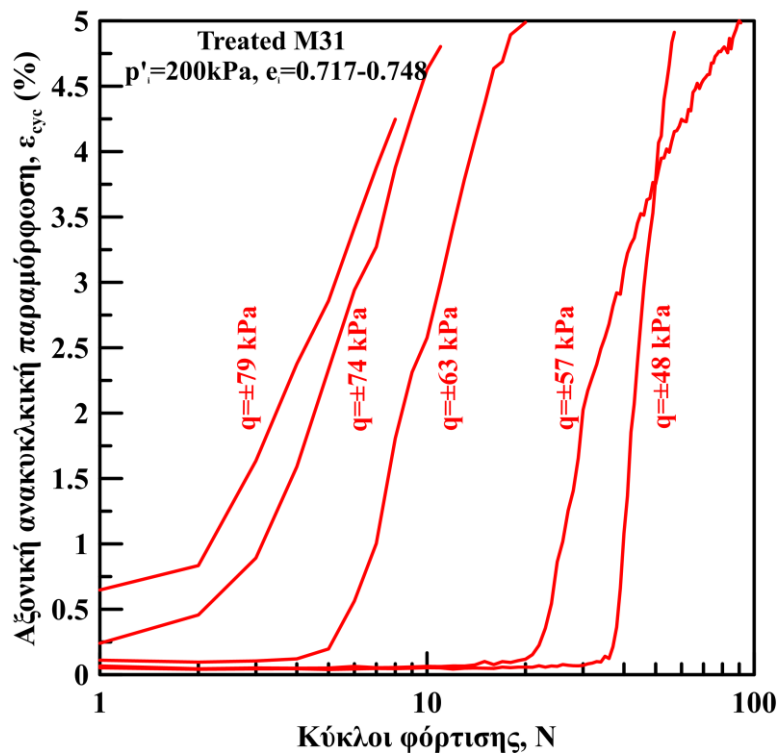
Στα Σχήμα 5. 4.31 (β) και 4.32 (β) η αξονική ανακυκλική τάση (ϵ_{cyc}) δηλαδή η παραμόρφωση διπλού πλάτους σε κάθε κύκλο φόρτισης υπολογίζεται ως το απόλυτο μέγεθος της διαφοράς της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) που επιτυγχάνεται στην μέγιστη θλιπτική ($+q_{max}$) και στη μέγιστη εφελκυστική αποκλίνουσα τάση ($-q_{max}$) κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης.

Στις δοκιμές με μεγάλη επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση αναπτύσσεται αξονική παραμόρφωση από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια αυξάνεται έντονα καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Στις δοκιμές με μικρότερη επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση 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)

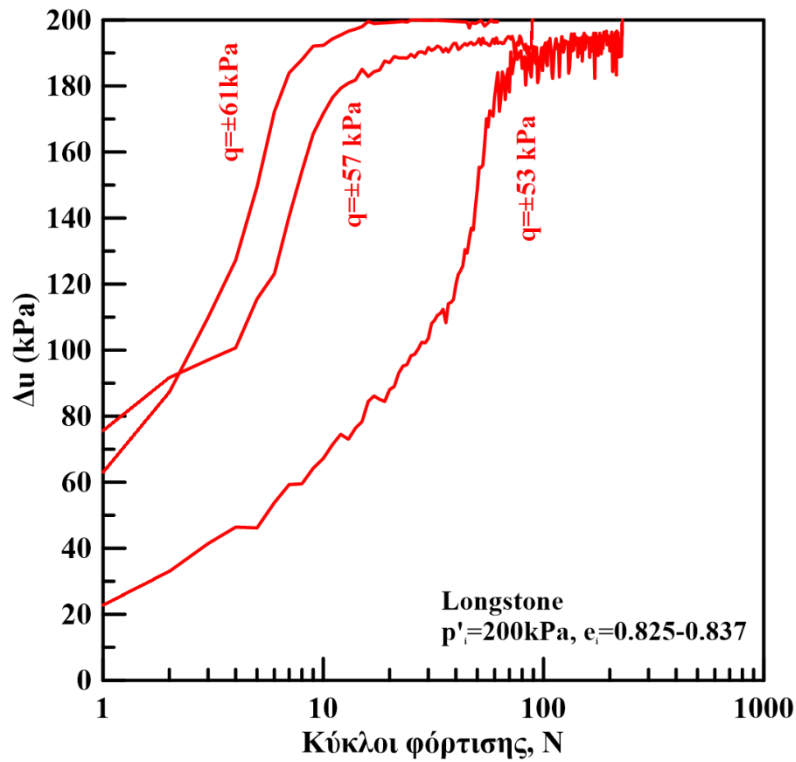


β)

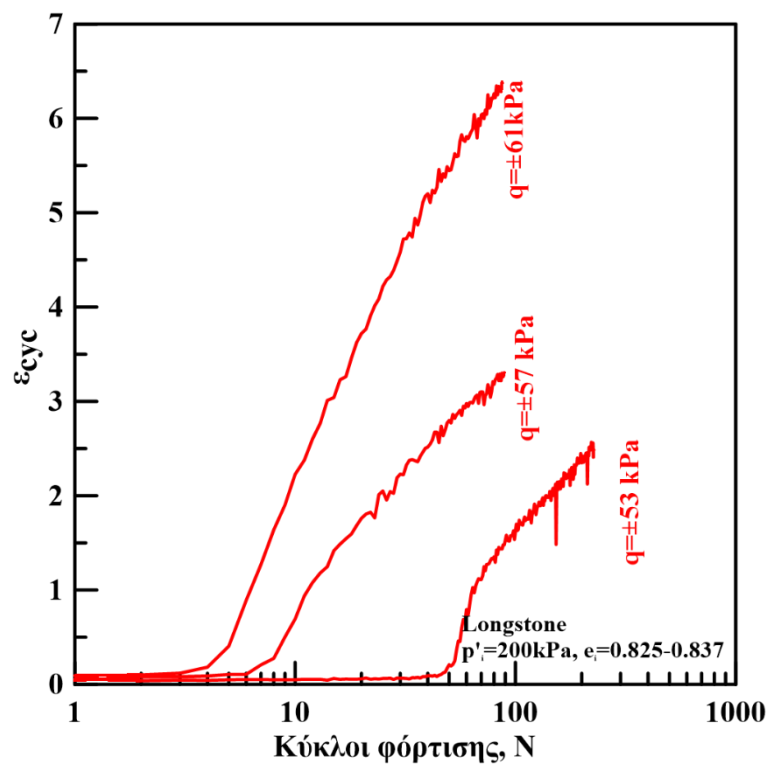


Σχήμα 4.31: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής ανακυκλικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31

α)



β)



Σχήμα 4.32: 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 longstone.

4.6 Σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και Longstone

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, τριαξονικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 και Longstone. 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 4.3.

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες					
	e_i	ρ'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	
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
CL-1	0.722	200	0.20	5	1	1	1	1
CL-2	0.717	200	0.19	5	3	3	3	3
SCL-1	0.734	200	0.14	5	11	7	12	31
SCL-2	0.748	200	0.12	2.5	107	64	191	-

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας CS=10% δοκίμια άμμου M31 και Longstone

Όπου: ϵ_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 ρ'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2*\rho'_i)$)
N_{1%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=1\%$
N_{2.5%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=2.5\%$

Στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 ενώ στα σχήματα 4.39 και 4.41 παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο Longstone. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-\rho'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 4.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\epsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\epsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

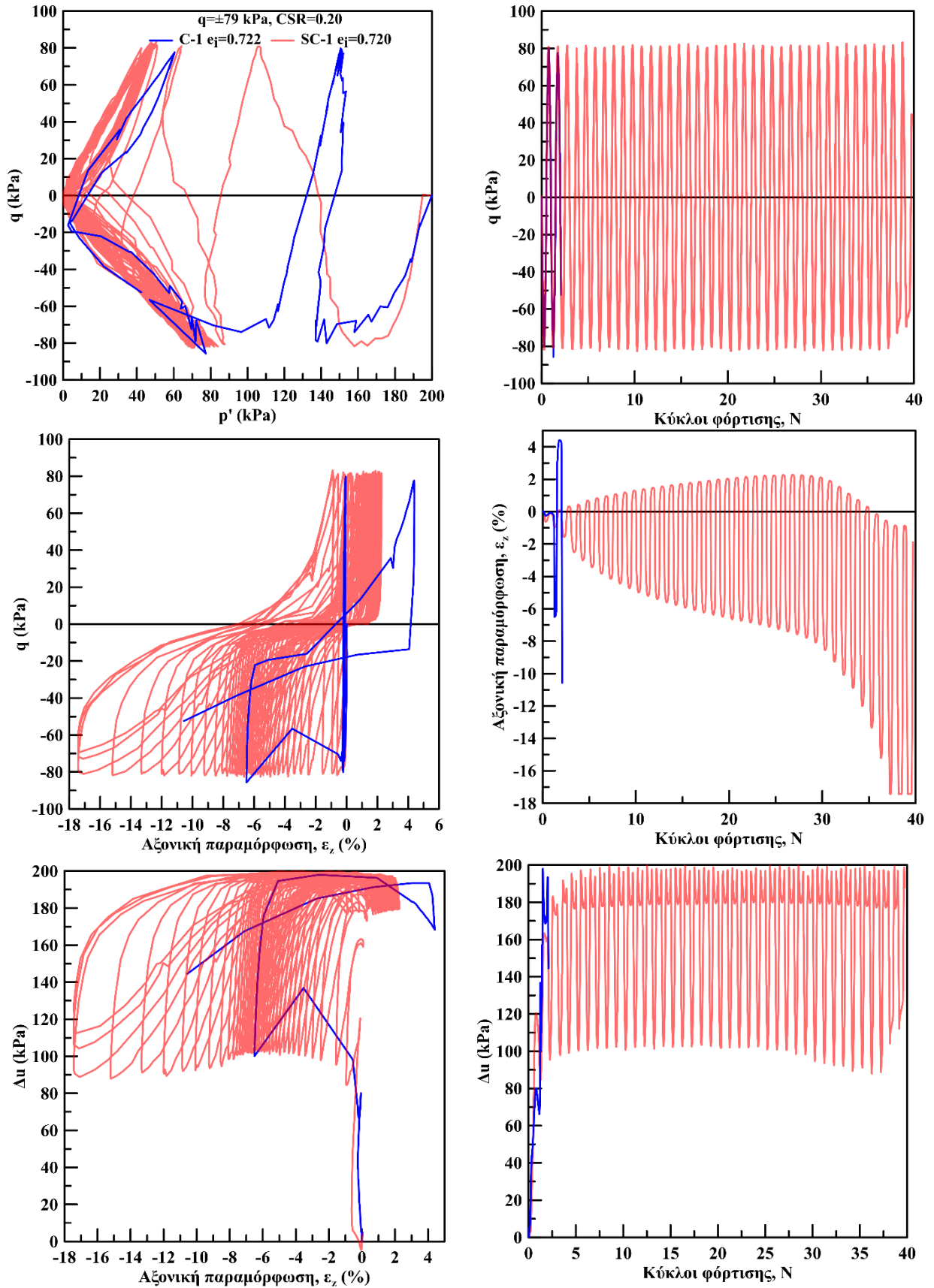
Παρατηρούμε ότι η χαλαρή άμμος αναπτύσσει σημαντική υπερπίεση του υγρού των πόρων από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, αλλά μηδενική σχεδόν παραμόρφωση μέχρι το σημείο αστάθειας, όπου αναπτύσσεται έντονη παραμόρφωση και το δοκίμιο ρευστοποιείται. Επισημαίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει στον πρώτο 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 μεγάλου διπλού πλάτους.

Στα επόμενα σχήματα διερευνάται η επίδραση της σταθεροποίησης στην ανακυκλική συμπεριφορά της χαλαρής άμμου M31 και Longstone υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.16$ (Σχήμα 4.35 και Σχήμα 4.39) και $CSR=0.12$ (Σχήμα 4.37 και Σχήμα 4.41). 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. 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 ($\Delta u-\epsilon_z$) συμπεραίνεται ότι η έντονη συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης εμφανίζεται περίπου στην ίδια τιμή της υπερπίεσης Δu για τη σταθεροποιημένη και μη άμμο M31 και Longstone σε κάθε λόγο τάσεων (CSR). Η τιμή αυτή αυξάνεται όσο μειώνεται ο λόγος

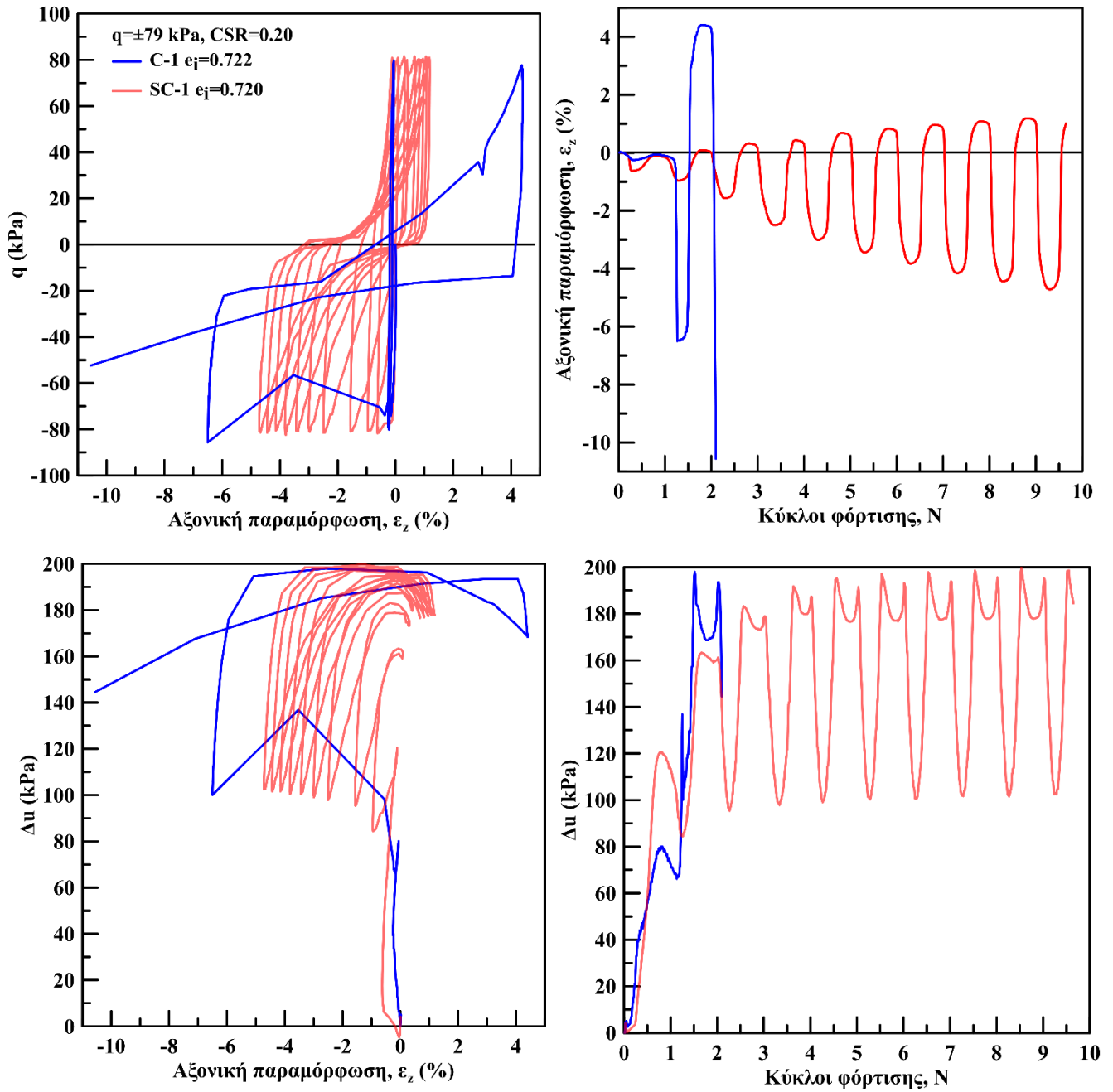
ανακυκλικής τάσης, CSR. Ωστόσο μετά την τιμή αυτή οι καμπύλες των δύο υλικών διαφοροποιούνται, όπως ήδη αναφέρθηκε, αφού η φυσική άμμος ραγδαία αναπτύσσει τη μέγιστη τιμή υπερπίεσης και αξονικής παραμόρφωσης, ενώ η σταθεροποιημένη εμφανίζει έντονη διακύμανση της υπερπίεσης Δu με σταδιακή συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης.

Επιπλέον, αναφέρεται ότι ανεξαρτήτως λόγου τάσεων (CSR) η φυσική άμμος αστοχεί στον εφελκυσμό και η σταθεροποιημένη άμμος συσσωρεύει αξονική παραμόρφωση στο εφελκυστικό τμήμα, 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.

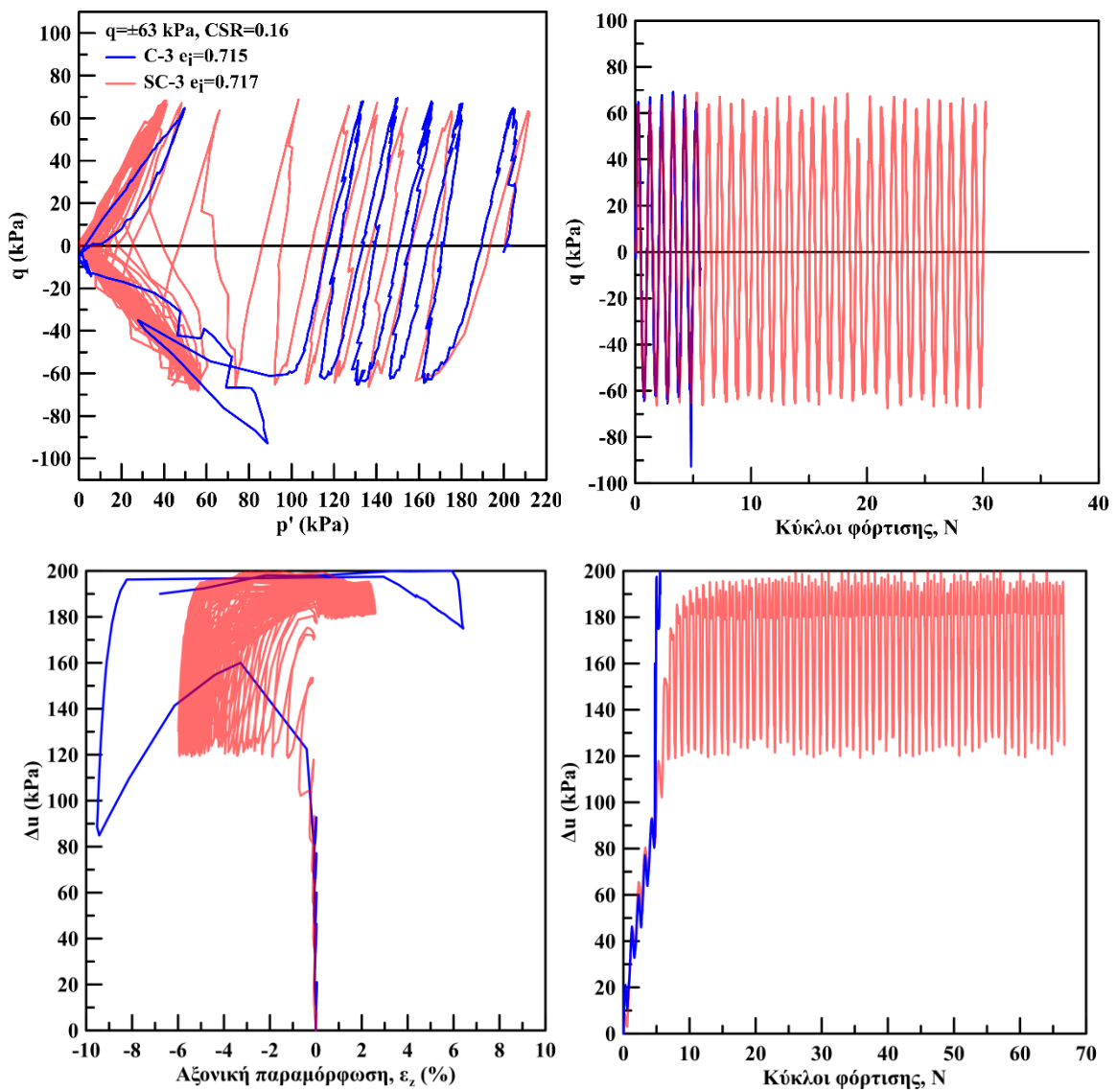
Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα δοκίμια των σταθεροποιημένων χαλαρών άμμων (M31 και Longstone) δεν καταρρέουν μετά το μηδενισμό της ενεργού τάσης όπως τα δοκίμια της φυσικής χαλαρής άμμου. Ωστόσο, αναπτύσσουν αξονική παραμόρφωση από την έναρξη της φόρτισης, καταλήγοντας να «συντηρούν» αξονικές παραμορφώσεις διπλού πλάτους έως και 16%.



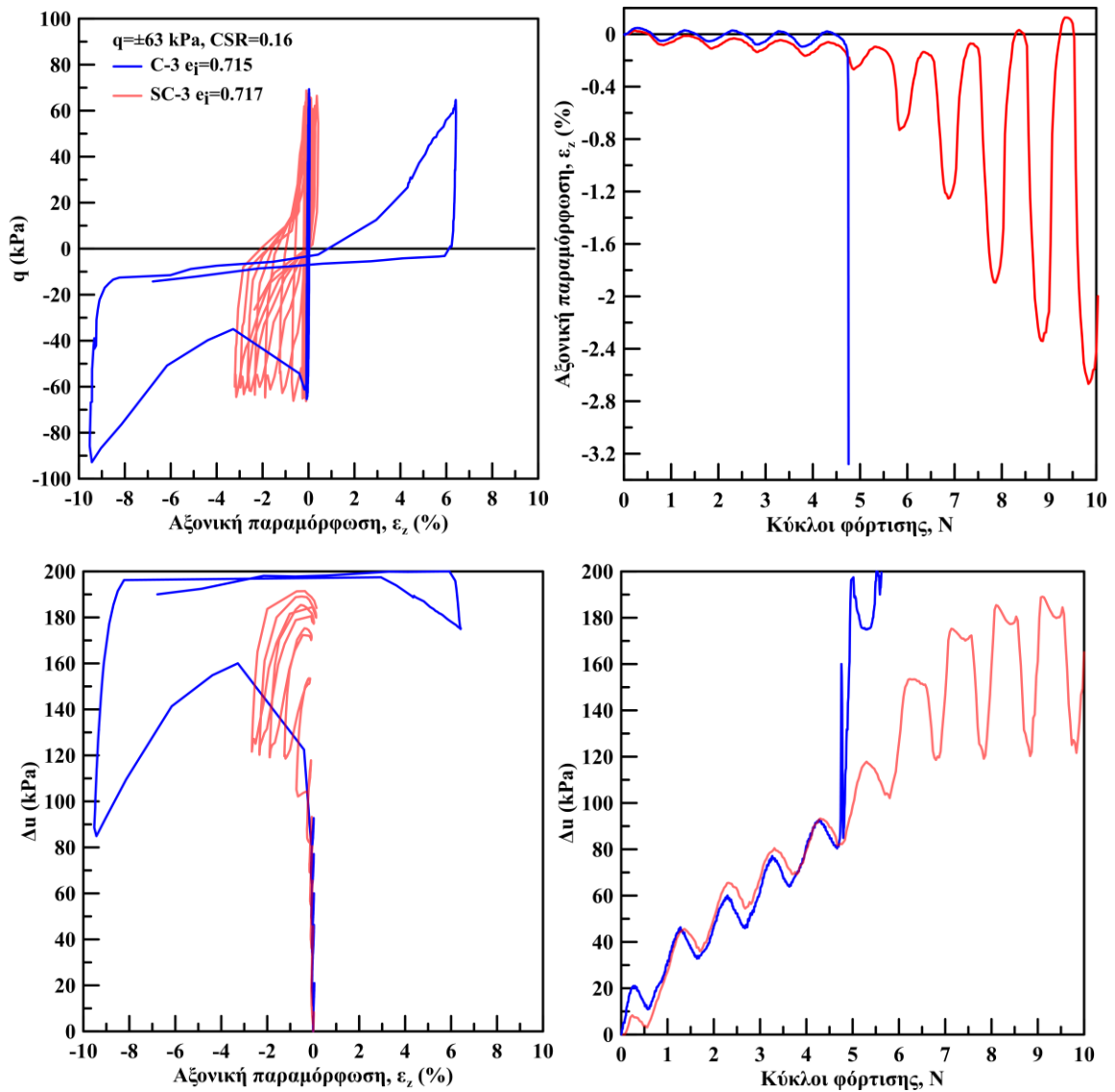
Σχήμα 4.33: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 79$ kPa



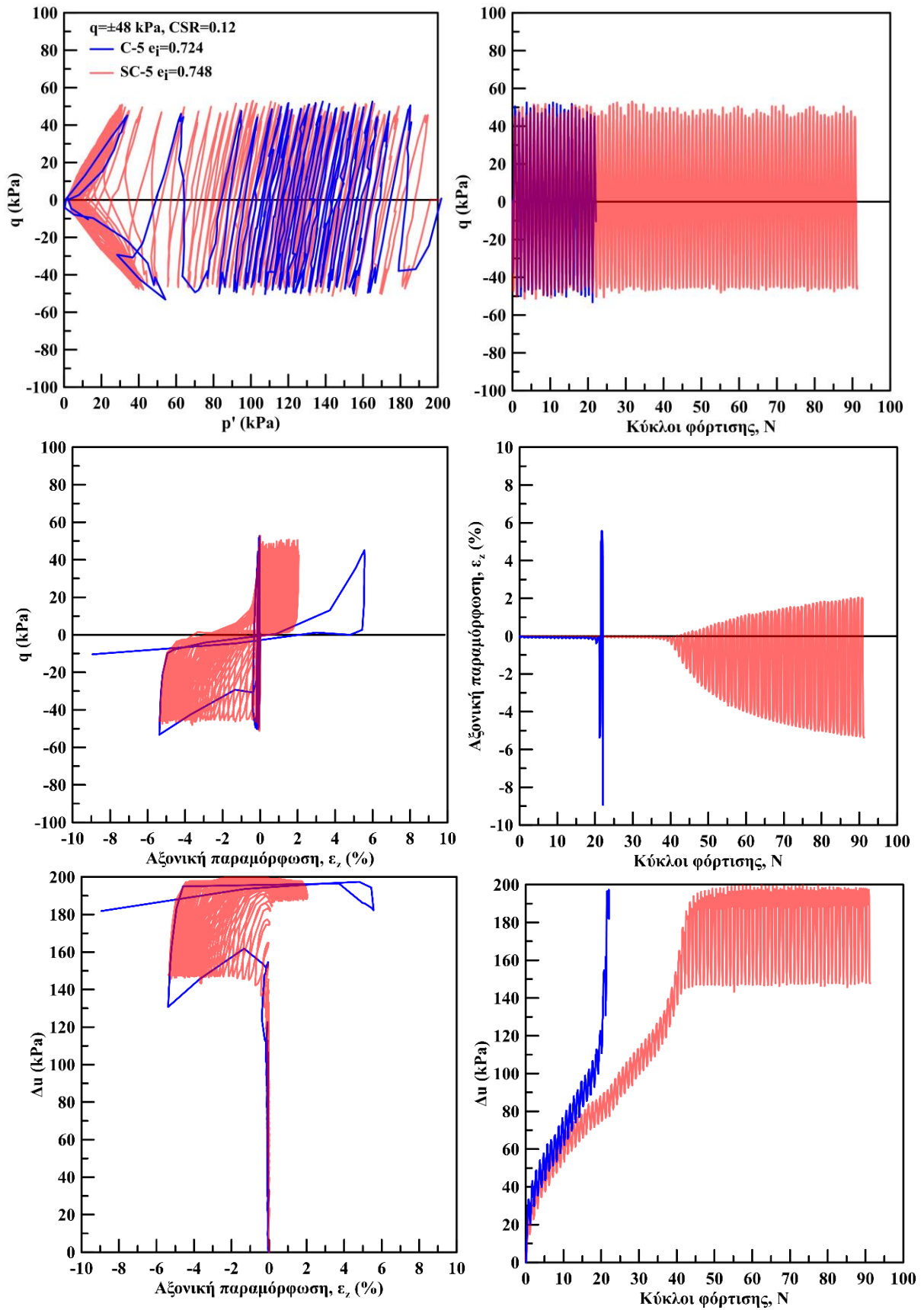
Σχήμα 4.34: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 79$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



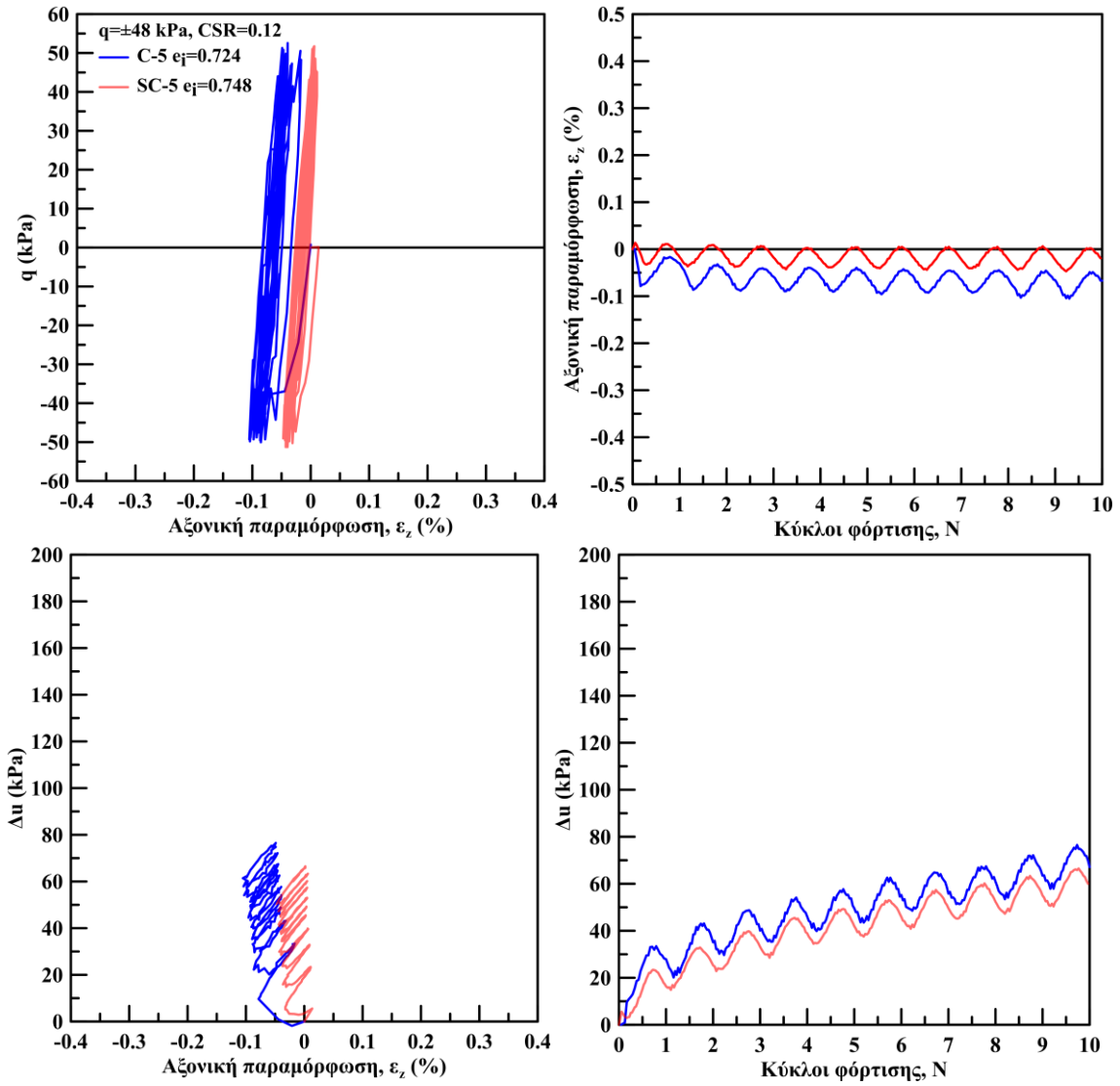
Σχήμα 4.35: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 63 \text{ kPa}$



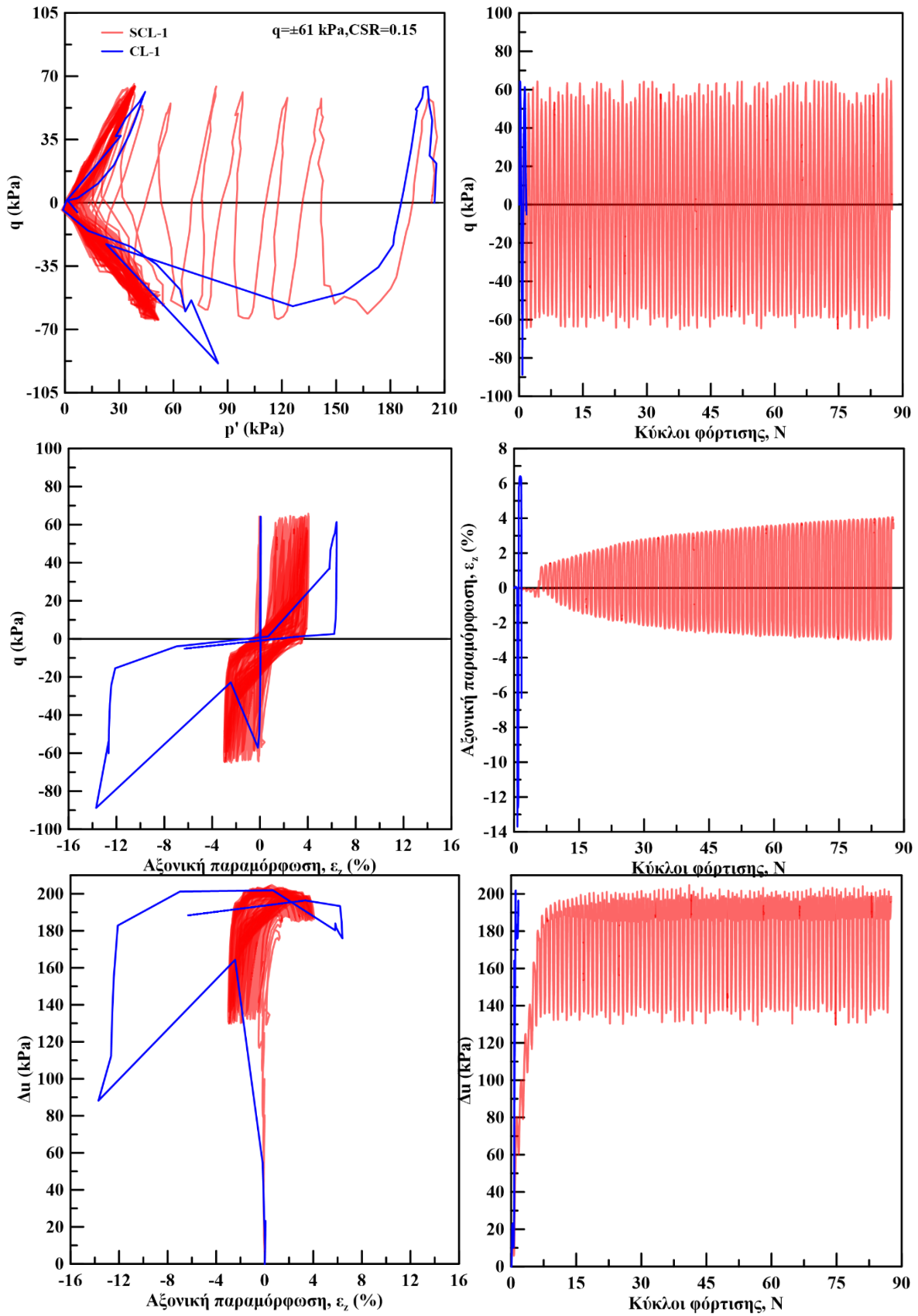
Σχήμα 4.36: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 63$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



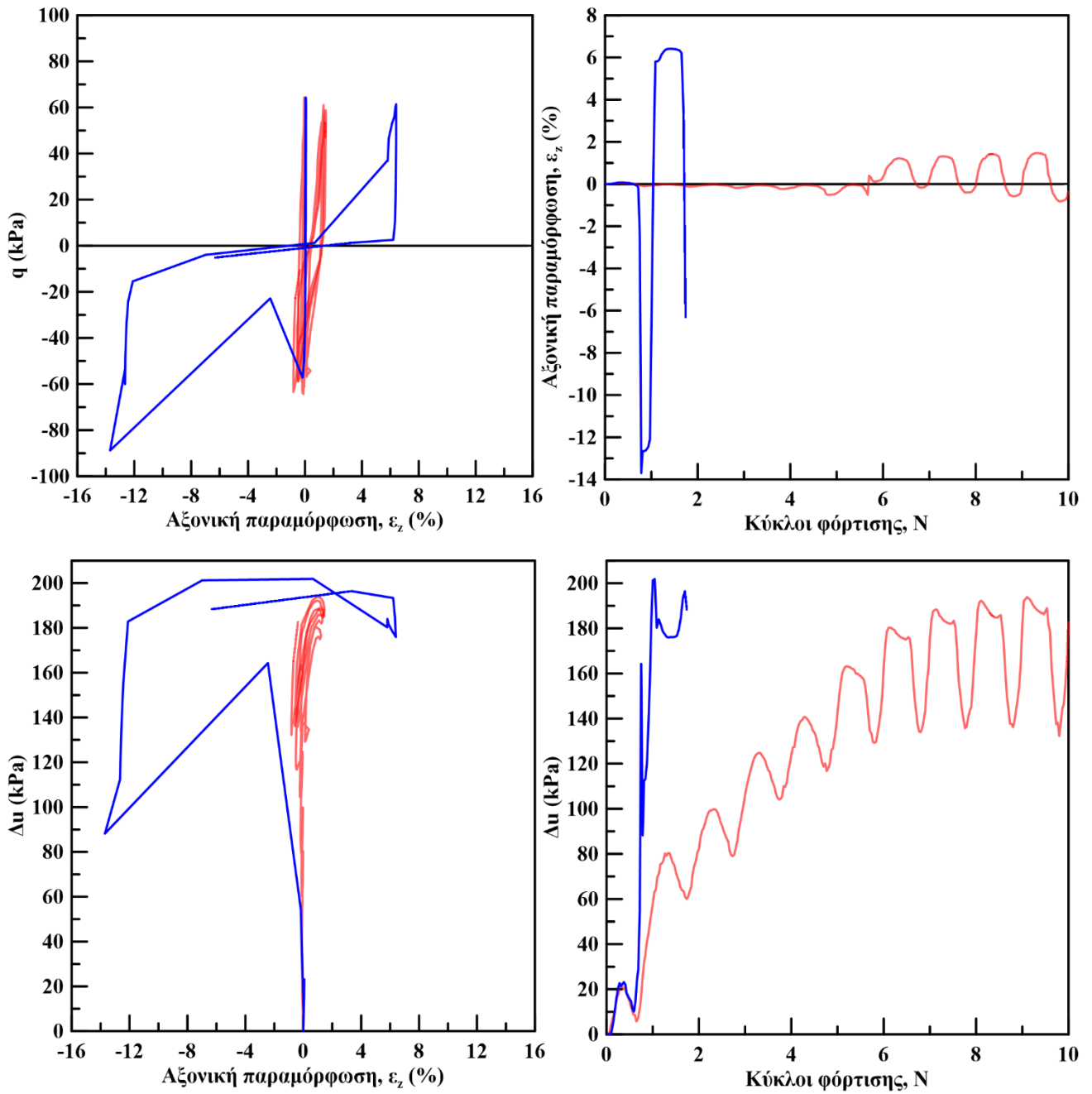
Σχήμα 4.37: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 48$ kPa



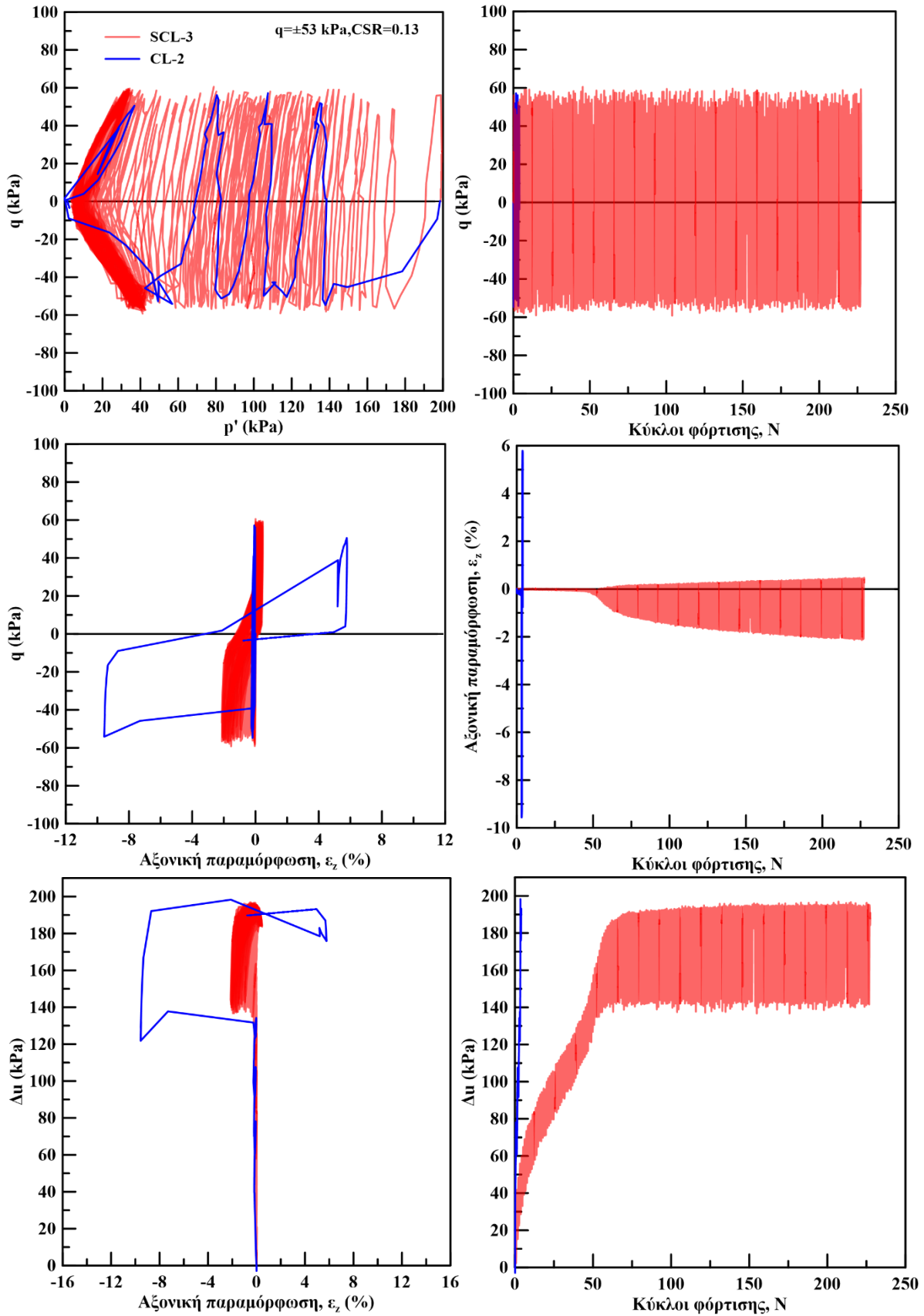
Σχήμα 4.38: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 48$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



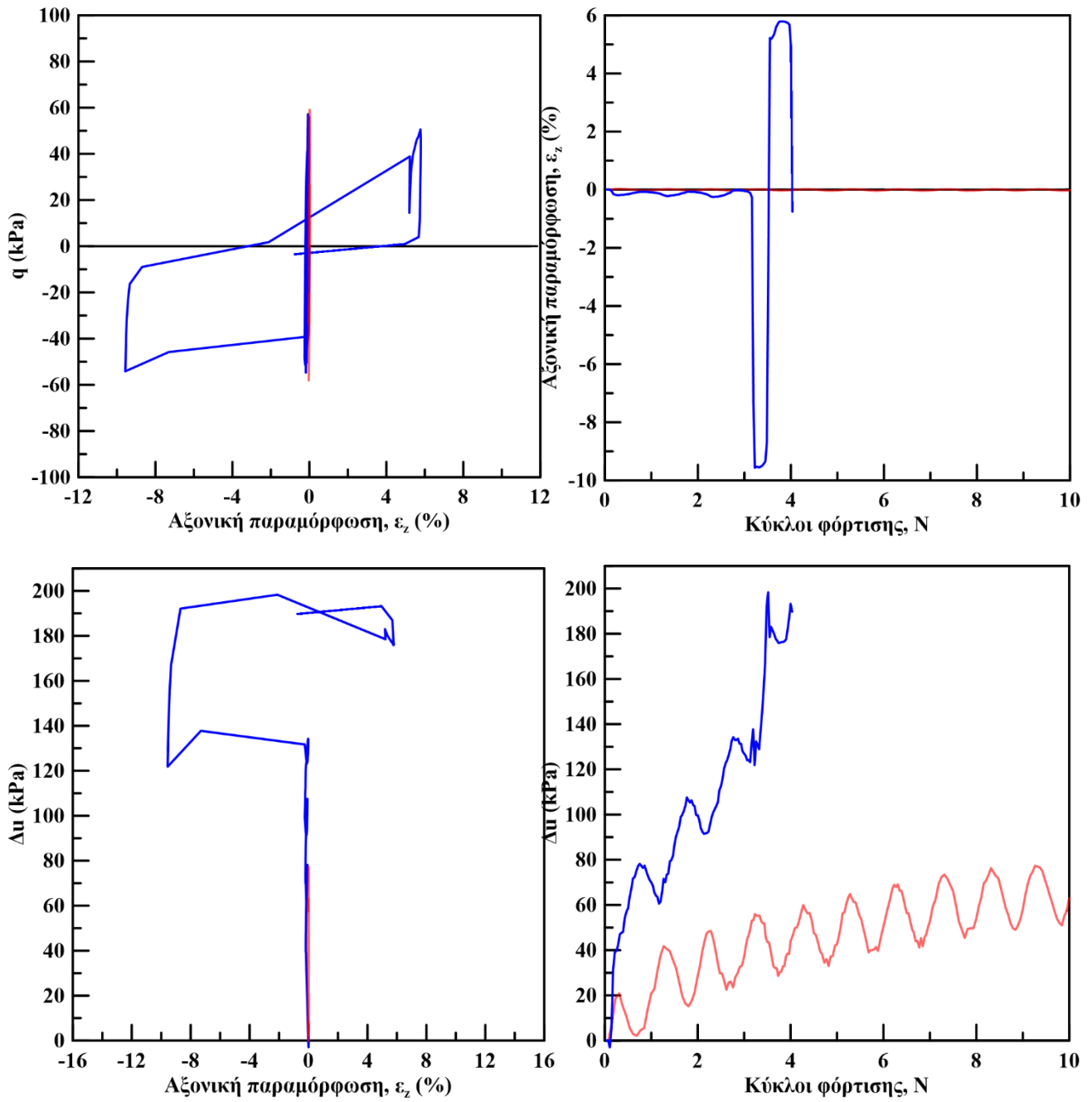
Σχήμα 4.39: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 61 \text{ kPa}$



Σχήμα 4.40: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 61$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 4.41: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 53 \text{ kPa}$



Σχήμα 4.42: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 53$ 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 εργασία ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4-4). 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 και Longstone συνοψίζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα στα Σχήμα 4.43 και 4.48 σε όρους CSR - κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση N_{IL} . Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση του πλήθους κύκλων φόρτισης, N, που απαιτείται για να αναπτυχθεί αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc} = 1\%$ (Σχήμα 4.44 για την άμμο M31, Σχήμα 4.49 για την Longstone), $\varepsilon_{cyc} = 2.5\%$ (Σχήμα 4.45 για την άμμο M31, Σχήμα 4.50 για την Longstone) και $\varepsilon_{cyc} = 5\%$ για την άμμο M31).

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 έρευνας για την άμμο M31 ανήκουν σε μια καμπύλη (καμπύλη ρευστοποίησης-liquefaction curve) που περιγράφεται από μια εξίσωση δύναμης (Idriss & Boulanger, 2008) όπου $a = 0.200$ και $b = -0.162$. Ομοίως για την άμμο Longstone όλα τα αποτελέσματα ανήκουν στην καμπύλη ρευστοποίησης με συντελεστές εξίσωσης $a = 0.15$ και $b = 0.073$. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την περίπτωση των χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών, 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.

Η επίδραση της σταθεροποίησης στις άμμους με κολλοειδή πυριτία με ποσοστό σταθεροποιητή 10% κ.β. στις καμπύλες ρευστοποίησης είναι εμφανής. Οι καμπύλες των σταθεροποιημένων άμμων είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά υποδεικνύοντας τη μεγαλύτερη ανακυκλική αντοχή της σε σχέση με τις φυσικές. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι στις σταθεροποιημένες άμμους απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για να επιτευχθεί η αρχική ρευστοποίηση (IL) και για να αναπτυχθεί ανακυκλική παραμόρφωση $\varepsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5% . Σε αντίθεση με τις φυσικές, οι καμπύλες CSR- N_{IL} , CSR- $N_{1\%}$, CSR- $N_{2.5\%}$ και CSR- $N_{5\%}$ των σταθεροποιημένων 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 στο λόγο ανακυκλικής τάσης της άμμου M31 και για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL, ϵ_{cyc} = 1, 2.5 και 5%), χρησιμοποιείται ένας δείκτης βελτίωσης (I_f) που εκφράζεται από την εξίσωση (4-6).

$$I_f = \frac{CSR_{Treated}}{CSR_{Untreated}} \quad (4-6)$$

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 για της 2 άμμους που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.47 και 4.51 (M31 και Longstone). 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 στους Πίνακες 4.4 και 4.6 (M31 και Longstone).

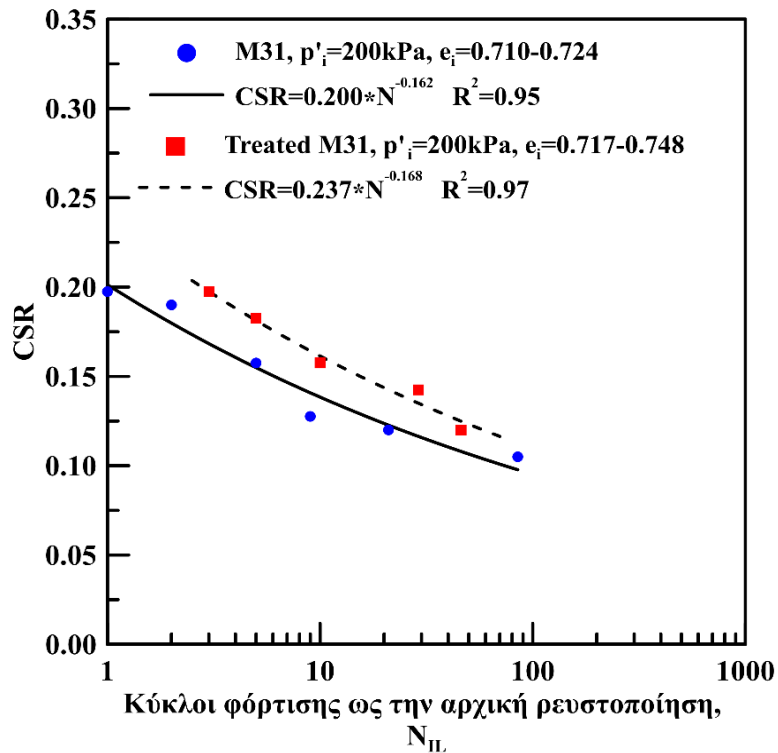
Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} (Cyclic Resistance Ratio), είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση του εδαφικού υλικού σε 15 κύκλους φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τυπικός αριθμός κύκλων σε πραγματικούς σεισμούς είναι N=10-20 για μέγεθος 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 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 4.5. Ομοίως για την χαλαρή άμμο Longstone ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης ισούται με $CRR_{15}=0.12$ ενώ για την σταθεροποιημένη είναι όσος με 0.15 (εμφανώς μεγαλύτερος από αυτόν της χαλαρής άμμου). Οι τιμές του CRR_{15} της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Longstone συνοψίζονται στον Πίνακα 4.7.

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%

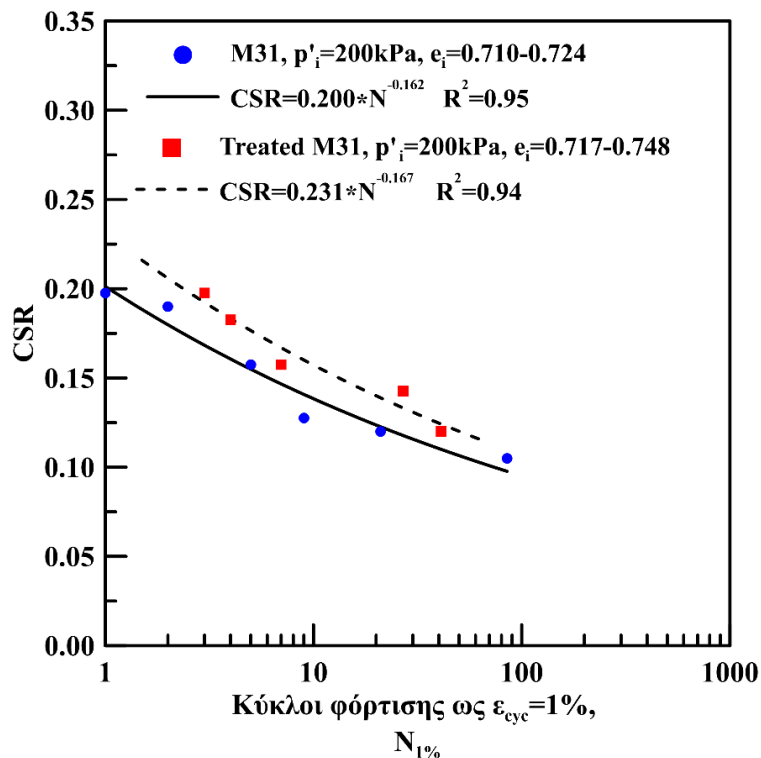
Πίνακας 4.4: Ποσοστά βελτίωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR της σταθεροποιημένης άμμου έναντι της φυσικής για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης

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

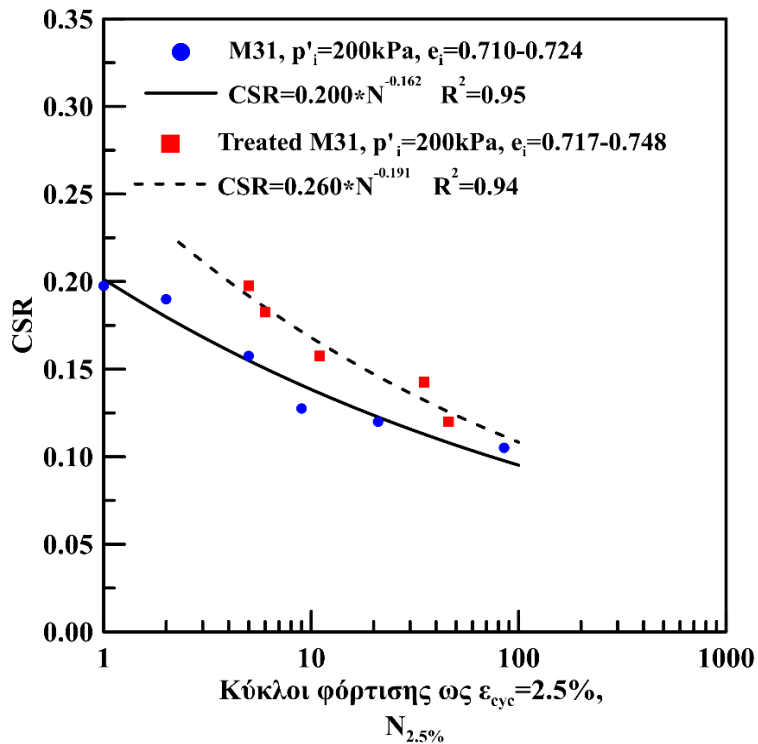
Πίνακας 4.5 Τιμές του λόγου ανακυκλικής αντίστασης, CRR₁₅ της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης



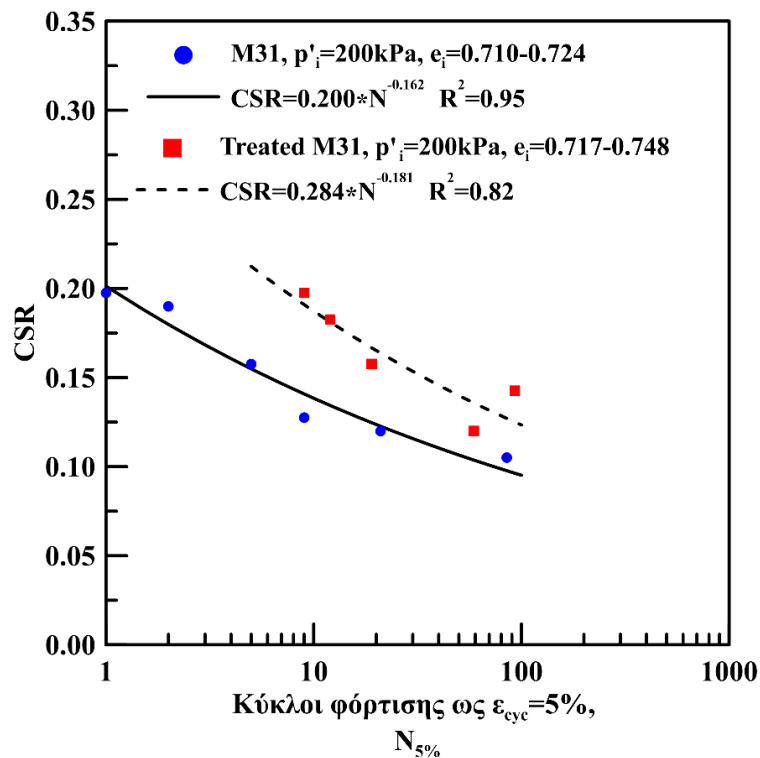
Σχήμα 4.43: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



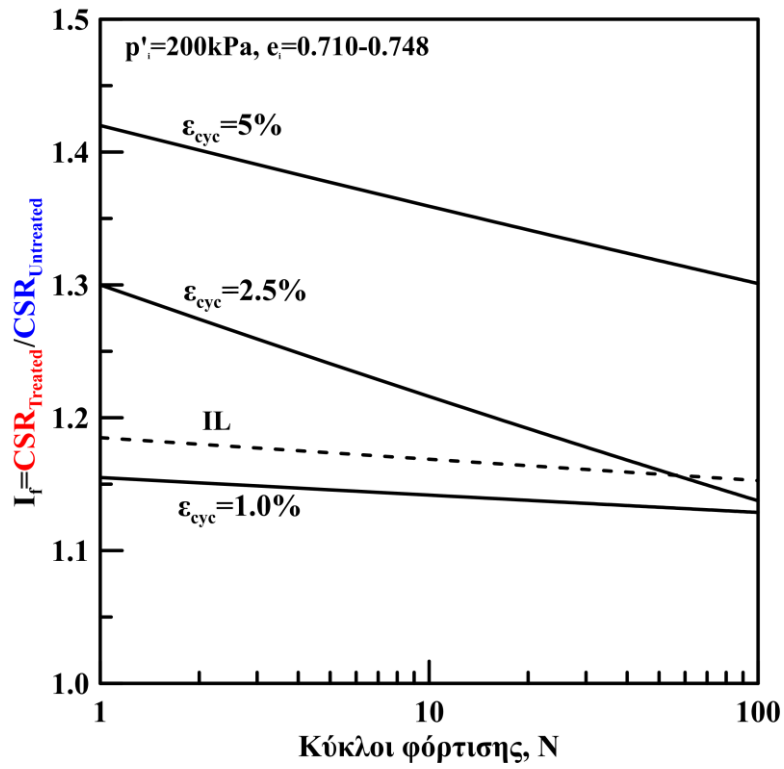
Σχήμα 4.44: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσσει των κύκλων φόρτισης $N_{1\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{cyc}=1\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



Σχήμα 4.45: 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 4.46: 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.



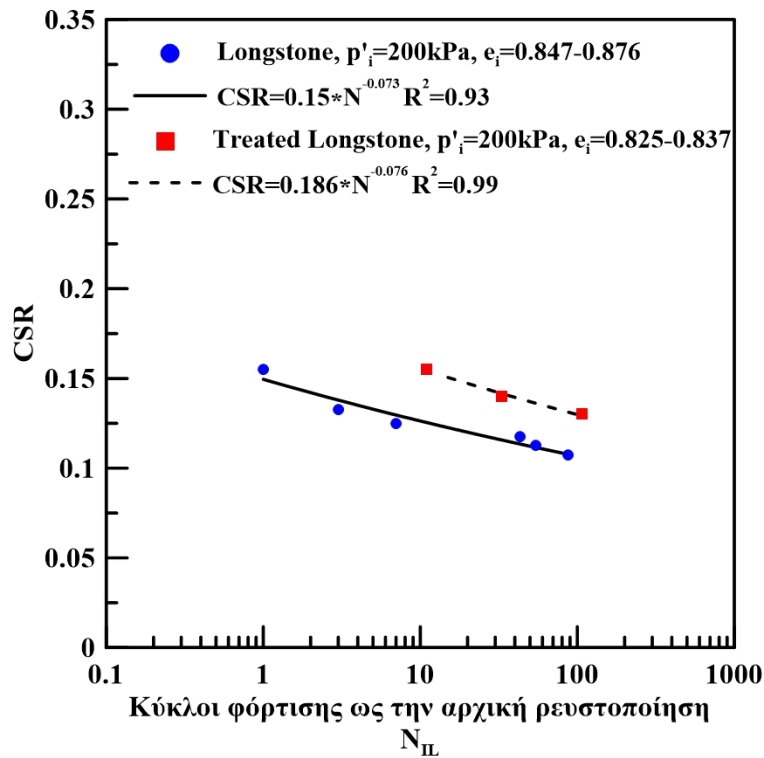
Σχήμα 4.47: Εξέλιξη του δείκτη βελτίωσης (I_f) της ανακυκλικής αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη φυσική άμμο M31 για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL, $\epsilon_{cyc}= 1, 2.5$ και 5%)

Κριτήριο Ρευστοποίησης	Ποσοστό Βελτίωσης για N=1	Ποσοστό Βελτίωσης για N=10	Ποσοστό Βελτίωσης για N=100
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	24%	16%	11%
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	12%	11%	10%
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	26%	25%	24%

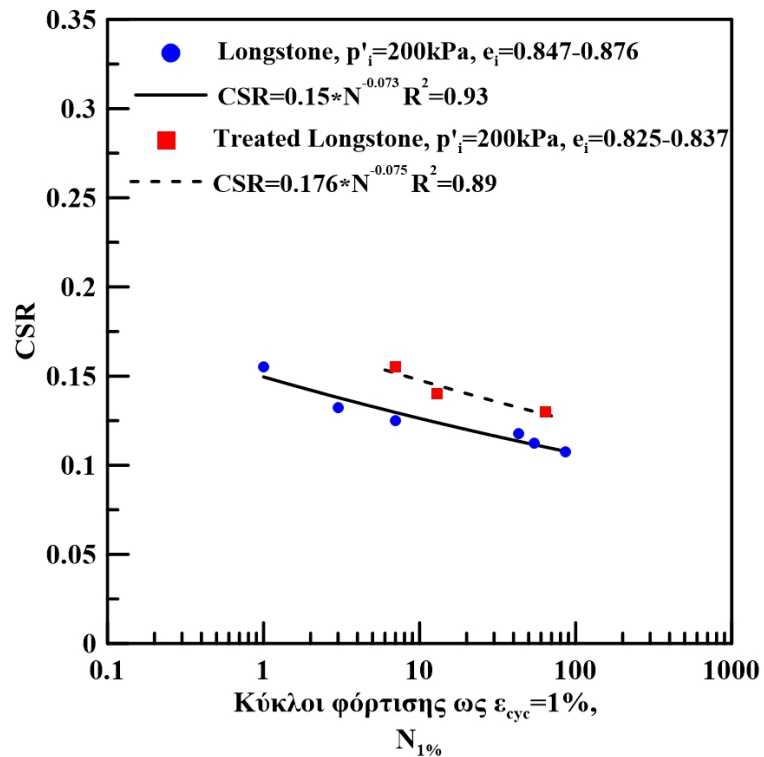
Πίνακας 4.6: Ποσοστά βελτίωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR της σταθεροποιημένης άμμου έναντι της φυσικής για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης

Κριτήριο Ρευστοποίησης	CRR ₁₅ Σταθεροποιημένης Άμμου Longstone	CRR ₁₅ Άμμου Longstone
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	0.15	0.12
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	0.14	0.12
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	0.15	0.12

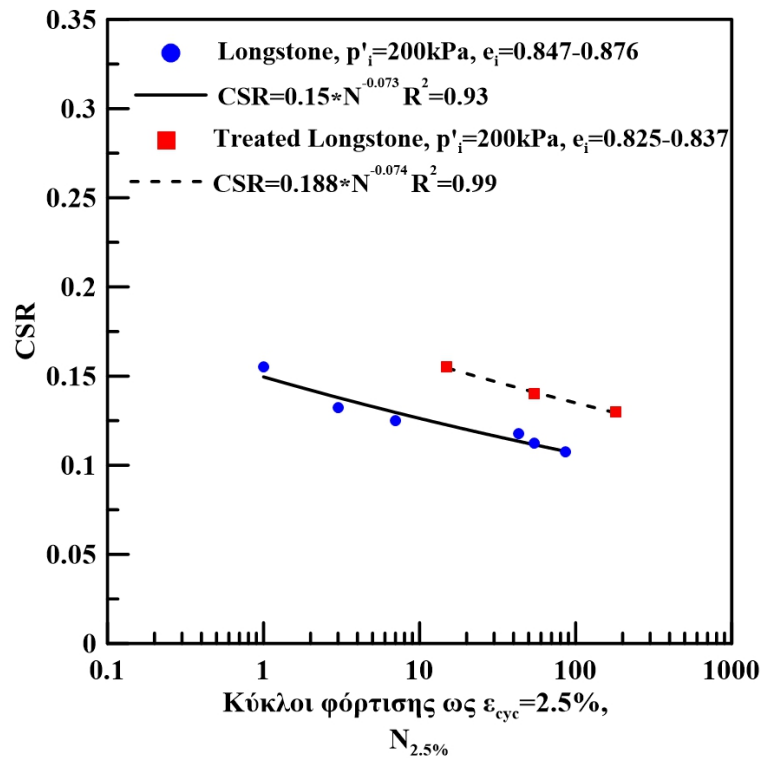
Πίνακας 4.7: Τιμές του λόγου ανακυκλικής αντίστασης, CRR₁₅ της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου Longstone για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης



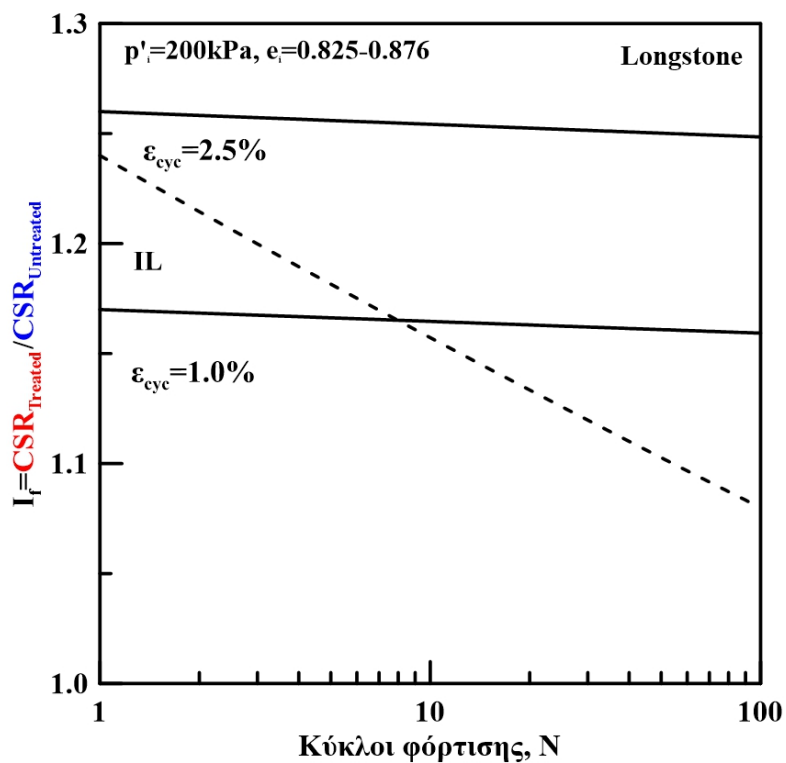
Σχήμα 4.48: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου Longstone.



Σχήμα 4.49: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσσει των κύκλων φόρτισης $N_{1\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=1\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου Longstone.



Σχήμα 4.50: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{2.5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{cyc} = 2.5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου Longstone.



Σχήμα 4.51: 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 , $\epsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5%)

Στα επόμενα σχήματα μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στην εδαφική δυσμησία της άμμου υπό ανακυκλική τριαξονική φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στις δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης το τέμνον μέτρο δυσμησίας υπολογίζεται για κάθε κύκλο φόρτισης από το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης, q , συναρτήσεως της αξονικής παραμόρφωσης, ε_z . Το τέμνον μέτρο δυσμησίας (E_{cyc}) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4-7).

$$E_{cyc} = \frac{\Delta q_{cyc}}{\varepsilon_{cyc}} \quad (4-7)$$

Όπου:

q_{cyc} : Η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάσης q διπλού πλάτους (ανακυκλική αποκλίνουσα τάση)

ε_{cyc} : η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους (ανακυκλική παραμόρφωση)

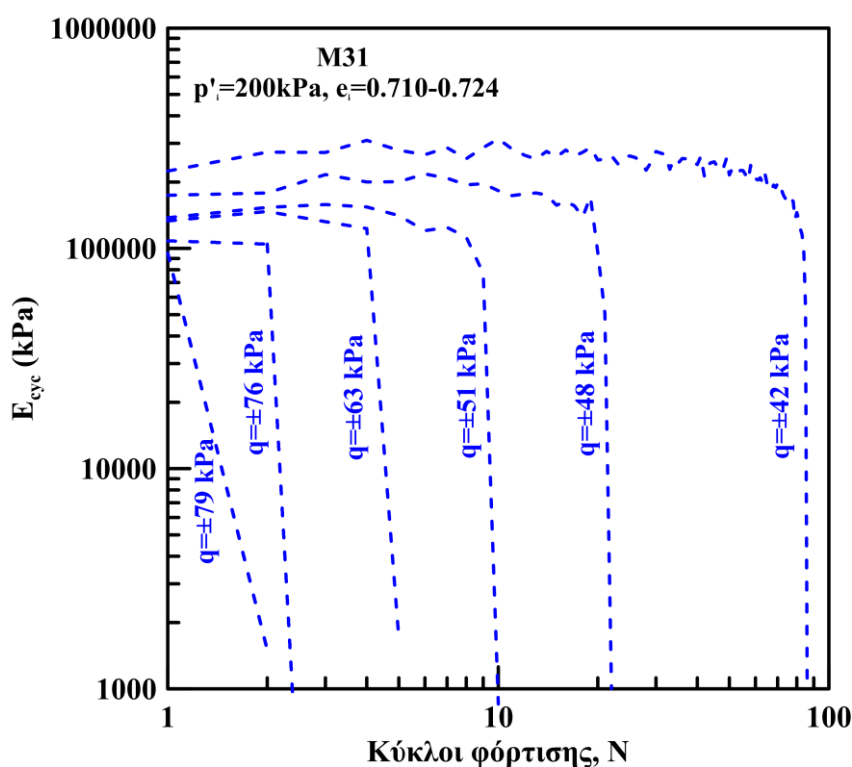
Για τον υπολογισμό των αρχικών παραμορφώσεων στο εύρος $\varepsilon_z = 0,005-1\%$ κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, τοπικοί μετρητές, LVDTs (linear variable displacement transducers), (RDP Electronics, Wolverhampton, UK), με διακριτικότητα 1 μ τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά, στο κεντρικό τμήμα 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, κ.λπ.), 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 4.52 παρουσιάζεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσμησίας E_{cyc} συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N σε λογαριθμική κλίμακα για τις άμμους M31 και Longstone αντίστοιχα, όπως προέκυψε από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των φυσικών άμμων διαχωρίζονται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης ανάλογα με το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλάτος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης, αυξάνεται η εδαφική δυσμησία. Επισημαίνεται ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσμησία 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 . Εξάριση αποτελεί η δοκιμή με πλάτος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης $q = \pm 79$ kPa για την άμμο M31 και $q = 61$ kPa για την άμμο Longstone όπου η πτώση της δυσμησίας εμφανίζεται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης.

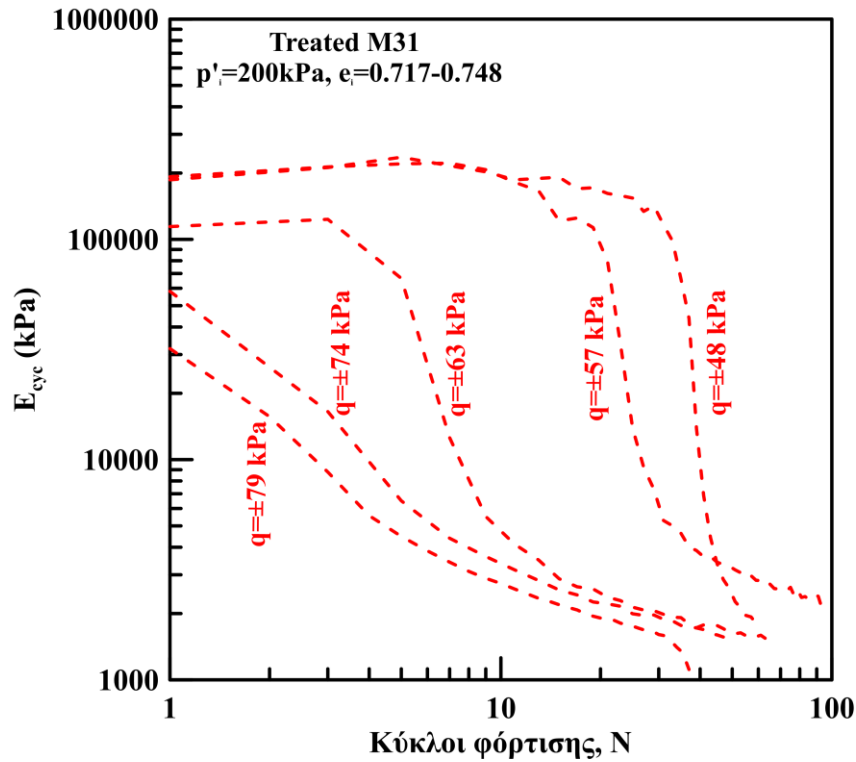
Στα Σχήμα 4.53 και 4.56 παρουσιάζεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσμησίας E_{cyc} συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N η οποία παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα για τις σταθεροποιημένες με κολλοειδή πυριτία άμμους M31 και Longstone αντίστοιχα, όπως προέκυψε από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των σταθεροποιημένων άμμων διαχωρίζονται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης ανάλογα με το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλάτος της ανακυκλικής τάσης αυξάνεται η εδαφική δυσμησία. Στις δοκιμές με $q < 74$ kPa στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσμησία της σταθεροποιημένης άμμου είναι περίπου σταθερή, ενώ μετά από κάποιο κύκλο

φόρτισης η δυσμησία μειώνεται σταδιακά. Η απομείωση της δυσμησίας καθυστερεί να εμφανιστεί όσο μειώνεται η ανακυκλική τάση q . Στις δοκιμές με πλάτος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης $q=\pm 79$ και 74 kPa (άμμος M31) η δυσμησία μειώνεται σταδιακά από τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Επισημαίνεται ότι γι' αυτές τις δοκιμές η τιμή του τέμνοντος μέτρου δυσμησίας στον πρώτο κύκλο φόρτισης είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές.

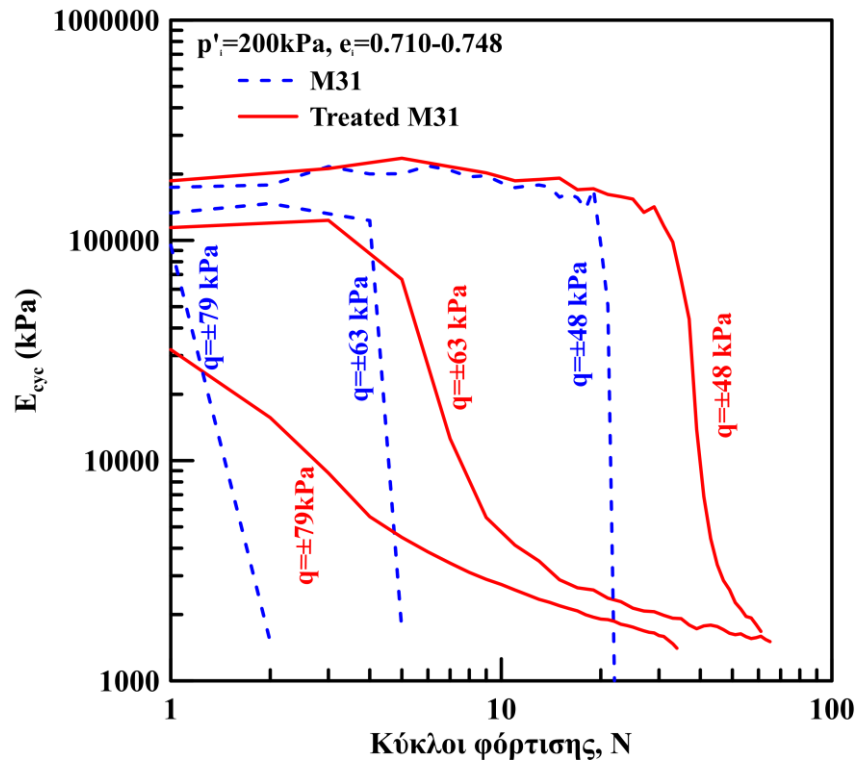
Τέλος για να μελετηθεί η επίδραση της σταθεροποίησης στην ανακυκλική δυσμησία της χαλαρής άμμου συνοψίζονται στα Σχήμα 4.54 και 4.57 σε όρους τέμνοντος μέτρου δυσμησίας E_{cyc} συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής, ανακυκλικής φόρτισης για τη φυσική (μπλε καμπύλες) και για σταθεροποιημένη (κόκκινες καμπύλες) άμμο παρόμοιας πυκνότητας. Στις δοκιμές με $q=\pm 48$ και 63 kPa στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσμησία της σταθεροποιημένης άμμου είναι περίπου ίδια με αυτή της άμμου M31 και αντίστοιχα στην άμμο Longstone το ίδιο συμβαίνει για $q=53$ kPa. Ωστόσο, μετά από κάποιον κύκλο οι καμπύλες της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου διαχωρίζονται. Το μέτρο δυσμησίας της φυσικής άμμου μειώνεται ραγδαία και πρακτικά μηδενίζεται, ενώ η δυσμησία της σταθεροποιημένης άμμου αρχίζει να απομειώνεται σταδιακά. Όταν η επιβαλλόμενη ανακυκλική τάση είναι μεγάλη η δυσμησία της σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της φυσικής άμμου. Ωστόσο, ακόμη και υπό αυτό το μέγεθος ανακυκλικής τάσης η δυσμησία της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται σταδιακά και όχι ακαριαία όπως στην περίπτωση της φυσικής άμμου.



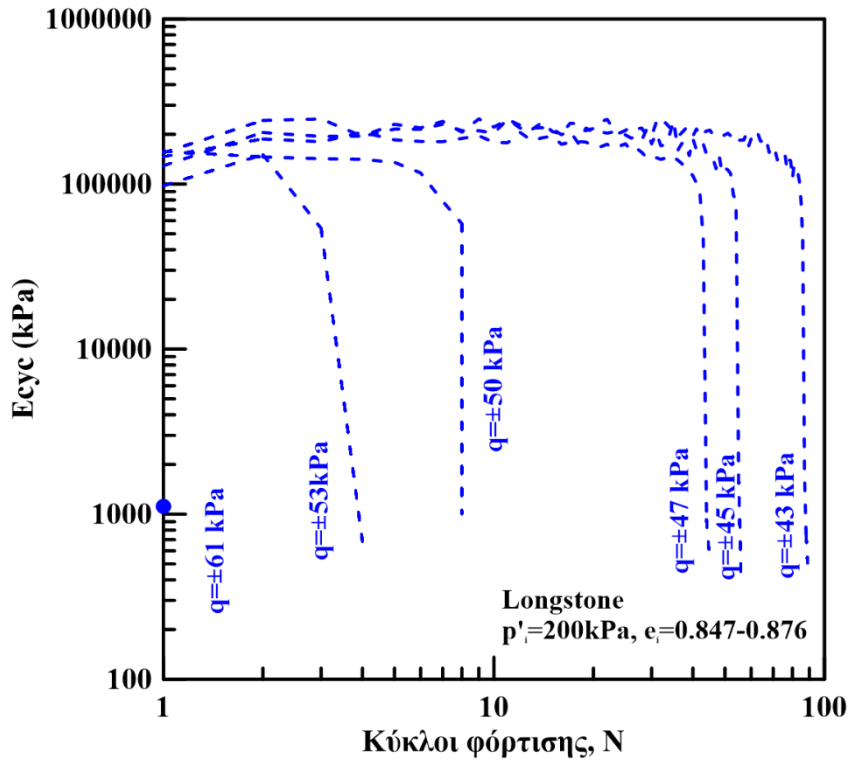
Σχήμα 4.52: Μέτρο δυσμησίας συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης της άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



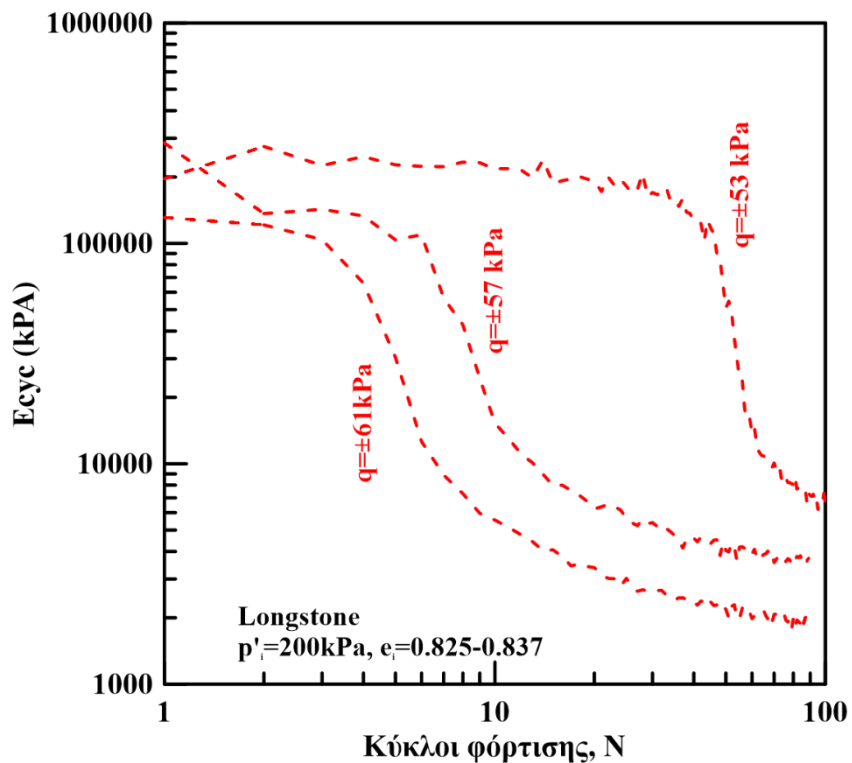
Σχήμα 4.53: Μέτρο δυσστησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



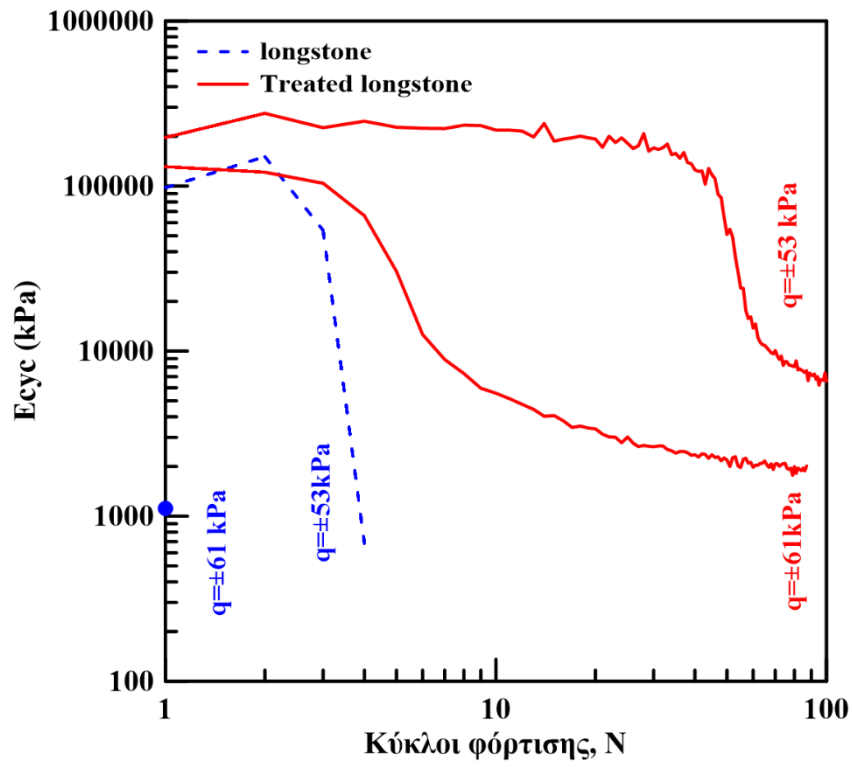
Σχήμα 4.54: Επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο δυσστησίας της χαλαρής άμμου M31 υπό ανακυκλική φόρτιση



Σχήμα 4.55: Μέτρο δυσμησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου Longstone από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



Σχήμα 4.56: Μέτρο δυσμησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου Longstone από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



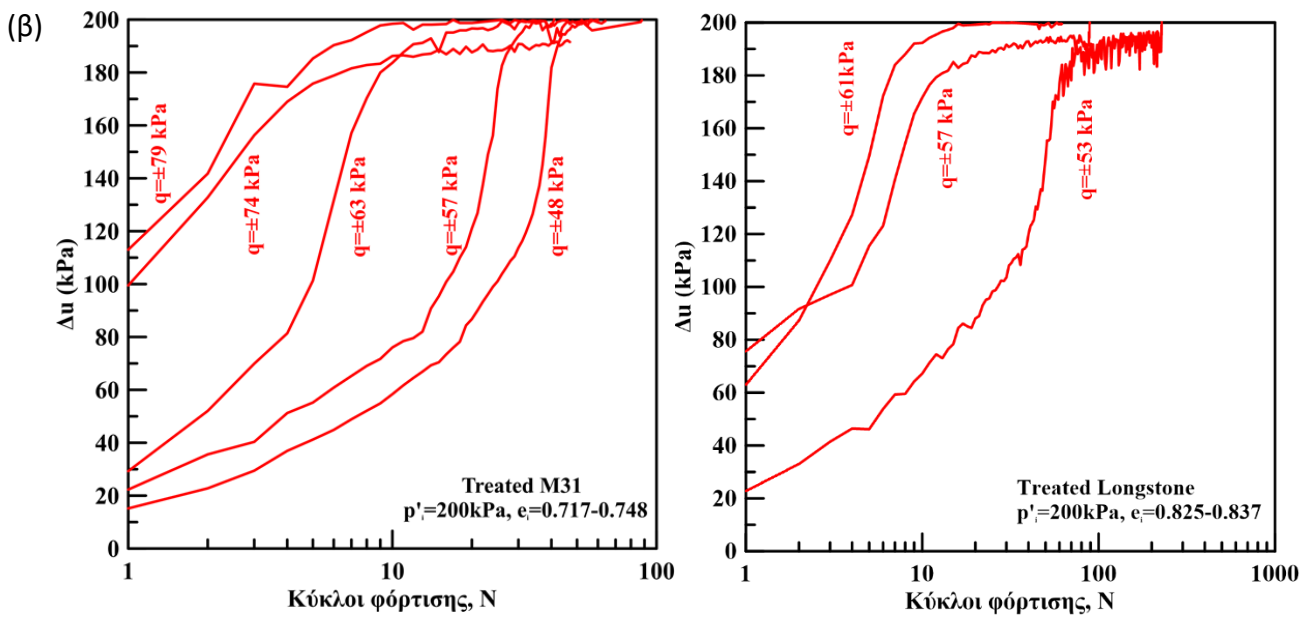
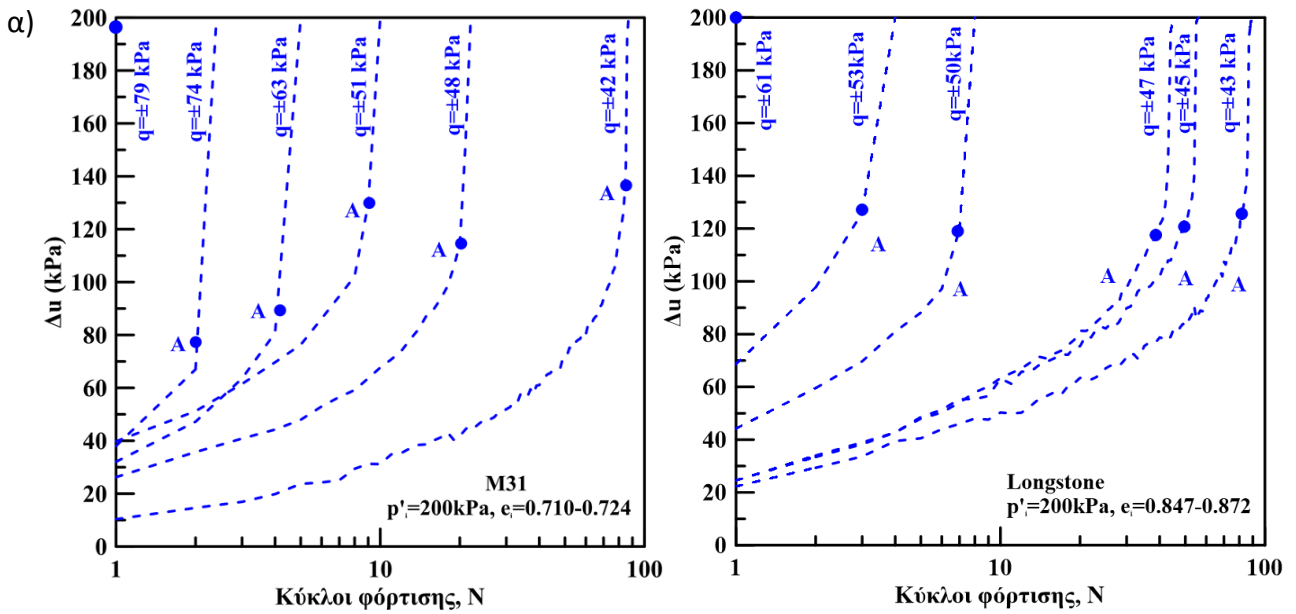
Σχήμα 4.57: Επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο δυσμησίας της χαλαρής άμμου longstone υπό ανακυκλική φόρτιση

4.7 Σύγκριση της ανακυκλικής συμπεριφοράς της άμμου Longstone με την άμμο M31

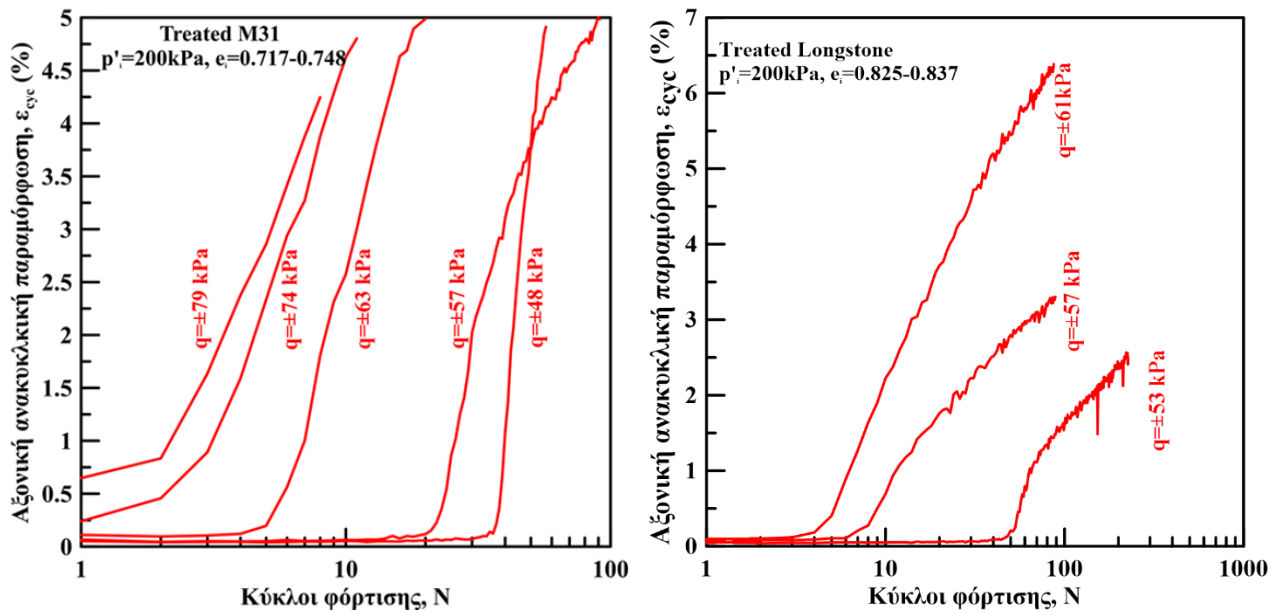
Σε αυτήν την ενότητα συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των ανακυκλικών δοκιμών για άμμο longstone και για άμμο M31 (φυσικής και σταθεροποιημένης) ώστε να γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους. Ειδικότερα στο Σχήμα 4.58 (α) παρουσιάζεται η σύγκριση της εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τις φυσικές άμμους M31 και longstone και στο Σχήμα 4.58 (β) η σύγκριση της εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τις σταθεροποιημένες άμμους M31 και longstone. Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση q μηδενίζεται. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.40 (α) και το (β) συμπεραίνουμε ότι στις δοκιμές με μεγάλη επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση q η υπερπίεση του υγρού των πόρων είναι μεγαλύτερη στην άμμο longstone ενώ σε μικρότερες τάσεις q η αρχική υπερπίεση είναι περίπου ίδια. Επιπρόσθετα μια ακόμη διαφορά που παρατηρείται είναι ότι σε μεγαλύτερες επιβαλλόμενες τάσεις η άμμος M31 ξεκινάει να ρευστοποιείται πιο αργά από την longstone ενώ σε μικρές επιβαλλόμενες τάσεις συμβαίνει το αντίθετο.

Στο Σχήμα 4.59 παρουσιάζεται η αξονική ανακυκλική παραμόρφωση (ϵ_{cyc}) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τις σταθεροποιημένες άμμους M31 και longstone. Σε όλες τις δοκιμές 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. Αν συγκρίνουμε όμως τις 2 άμμους μεταξύ τους παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των υψηλών αρχικών επιβαλλομένων τάσεων η αύξηση των παραμορφώσεων γίνεται πιο γρηγορά στην άμμο Longstone ενώ στην περίπτωση των χαμηλών η αύξηση γίνεται πιο γρηγορά στην άμμο M31. Παράλληλα παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την επιβαλλόμενη τάση q η άμμος longstone σε υψηλούς κύκλους φόρτισης έχει μικρότερες παραμορφώσεις από την άμμο M31.

Οι 2 άμμοι παρουσιάζουν διαφορές διότι έχουν διαφορετική δομή. Η άμμος Longstone αποτελείται από λεπτούς και γωνιώδεις ενώ η άμμος M31 από ομοιόμορφα στιλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα. Η δομή της άμμου Longstone που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αλληλοεμπλοκή των κόκκων λόγω του γωνιώδους σχήματός τους ευνοεί την ανάπτυξη μικρότερων παραμορφώσεων στον ίδιο αριθμό κύκλων και αστοχούν σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης (βλ. Σχήματα 4.54 & 4.54). Το ίδιο παρατηρείται και μετά τη σταθεροποίηση (βλ. Σχήμα 4.59).



Σχήμα 4.58: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης (α) της φυσικής άμμου M31 και Longstone και (β) της σταθεροποιημένης.



Σχήμα 4.59: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της αξονικής ανακυκλικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 (αριστερά) και longstone (δεξιά).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Δυναμική Τριαξονική Φόρτιση

5.1 Δυναμική τριαξονική φόρτιση φυσικής άμμου M31 και Longstone υπό αστράγγιστες συνθήκες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αστράγγιστων τριαξονικών δυναμικών δοκιμών της άμμου M31 και Longstone. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, διότι η ανακυκλική φόρτιση της άμμου σε αστράγγιστες συνθήκες 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 όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο 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 $e_i=0.712-0.734$ (M31) και $e_i=0.824-0.841$ (Longstone). Υπογραμμίζεται ότι όλες οι τριαξονικές δοκιμές, εκτελέστηκαν με επιβολή αντιπίεσης (back pressure) $u_0=400\text{ kPa}$ 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 δοκιμίων.

Για τη διεξαγωγή των δυναμικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η δυναμική τριαξονική GDS του εργαστηρίου Θεμελιώσεων του ΕΜΠ. Η συσκευή τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας από τα μέλη ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής κκ Παυλοπούλου και Τσεντίδη υπό την επίβλεψη της Καθηγήτριας ΒΝ Γεωργιάννου. Οι δυναμικές δοκιμές που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (strain control tests).

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.11-0.20$ για να προσδιοριστεί η επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 και έπειτα παρατίθενται αναλυτικά κάποιες ενδεικτικές δοκιμές.

Όπως φαίνεται στον πίνακα η περίοδος ανακυκλικής φόρτισης είναι υποδεκαπλάσια της περιόδου που χρησιμοποιήθηκε στις ανακυκλικές δοκιμές του Κεφαλαίου 4 και για πρώτη φορά έχουμε τη δυνατότητα να δούμε την επιρροή της συχνότητας στην απόκριση δύο διαφορετικών άμμων. Στο κεφάλαιο αυτό θα επιβεβαιωθεί ότι:

- 1) η απόκριση των άμμων μετά την έναρξη αστάθειας (π.χ. σημείο A, Σχήμα 4.3) είναι απόκριση υλικού και όχι επίδραση συσκευής αφού παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά και στην εντελώς διαφορετικού σχεδιασμού δυναμική συσκευή.
- 2) Οι καμπύλες ρευστοποίησης έχουν την ίδια μορφή απλά στην δυναμική φόρτιση είναι μετατοπισμένες προς τα κάτω σε σχέση με της αντίστοιχες καμπύλες της ανακυκλικής φόρτισης. Αυτό δηλώνει ότι στην δυναμική φόρτιση η ρευστοποίηση γίνεται πιο γρήγορα.
- 3) Η ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό στην δυναμική φόρτιση. Παρόλα αυτά η μορφή τους για την φυσική όσο και για την σταθεροποιημένη άμμο είναι παρόμοια.

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες				
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$
DM-1	0.712	200	0.11	0.5	6	6	6
DM-2	0.734	200	0.09	0.5	7	7	7
DM-3	0.733	200	0.07	0.5	148	148	148
DL-1	0.84	200	0.11	0.5	1	1	1
DL-2	0.841	200	0.09	0.5	16	16	16
DL-3	0.826	200	0.08	0.5	23	23	23
DL-4	0.824	200	0.07	0.5	329	329	329

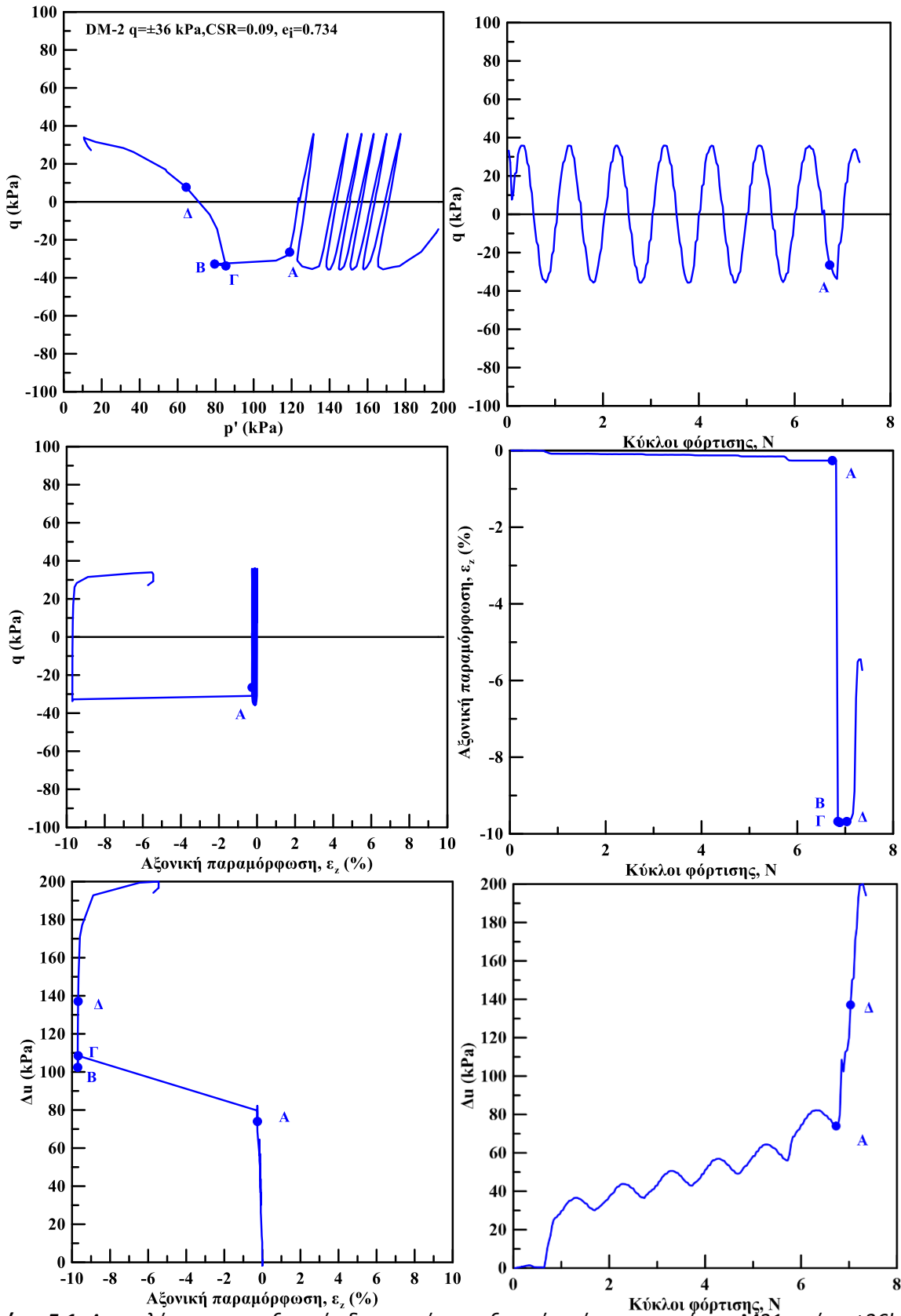
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά δοκίμια άμμου M31

Όπου:

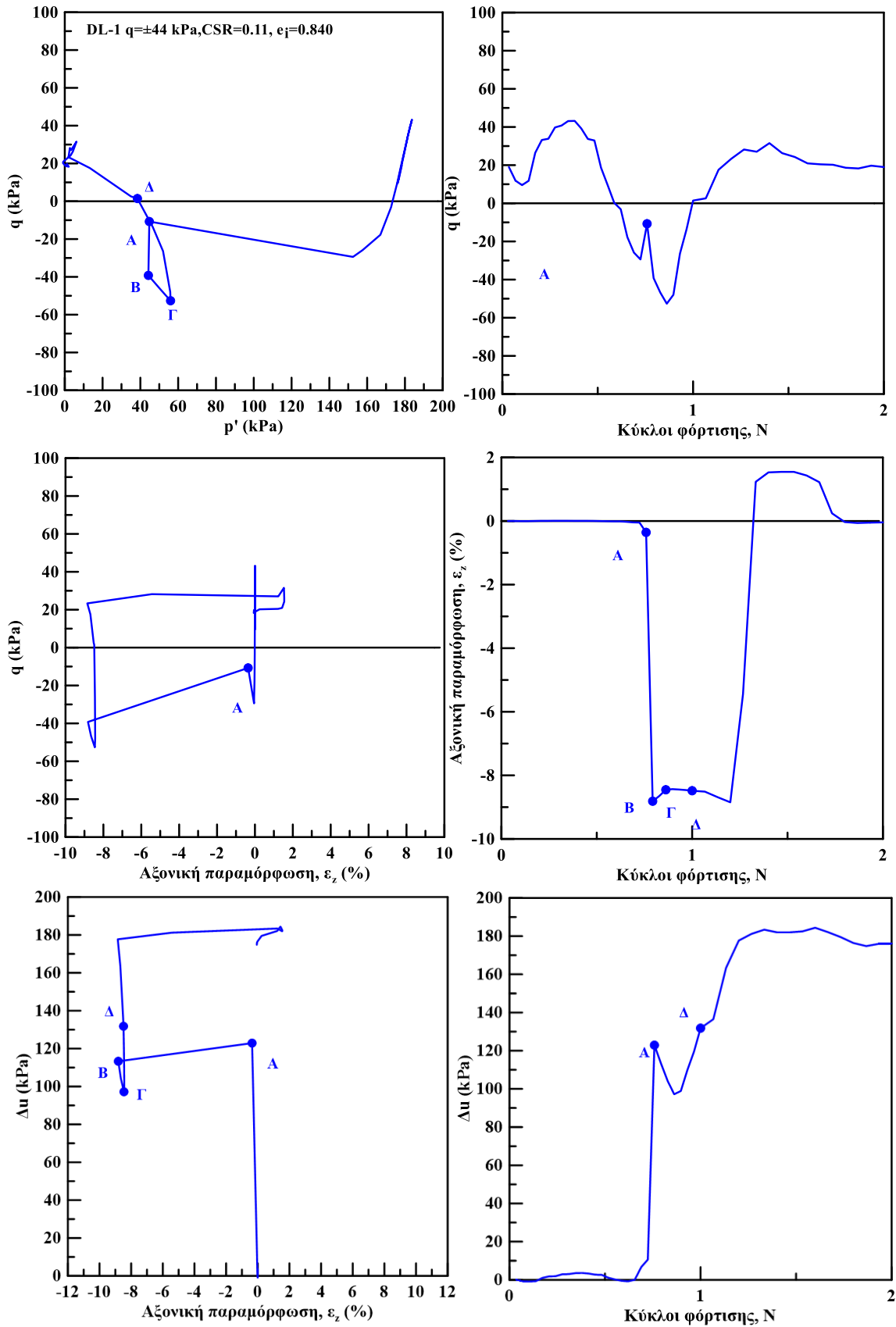
- e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
- p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
- CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)
- N_{IL} , κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για μηδενισμό ενεργού τάσης
- $N_{1\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\varepsilon_z=1\%$
- $N_{2.5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\varepsilon_z=2.5\%$

Στα Σχήμα 4.1-5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής δυναμικής, φόρτισης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, στην άμμο M31 και Longstone με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ (DM-2 και DL-1,2,3). Τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεϊς κύκλων φόρτισης ($\varepsilon_z -N$), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεϊς κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Παρατηρούμε ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης το δοκίμιο ενώ έχει αναπτύξει πρακτικά μηδενική αξονική παραμόρφωση, εμφανίζει έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων. Συνεπώς, η ενεργός τάση μειώνεται γρήγορα, με τη διαδρομή των ενεργών τάσεων να μετακινείται προς τα αριστερά. Ωστόσο, δραματική αλλαγή στην απόκριση της άμμου παρατηρείται εκεί όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων (σημείο A). Συγκριμένα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης 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 παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$ πραγματοποιούνται στον ίδιο κύκλο. Συνεπώς, τα δοκίμια που φορτίζονται με μεγάλη ανακυκλική τάση, απαιτούν μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης για να αστοχήσουν. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η σχέση μεταξύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση (αρχική ρευστοποίηση, επίτευξη αξονικής

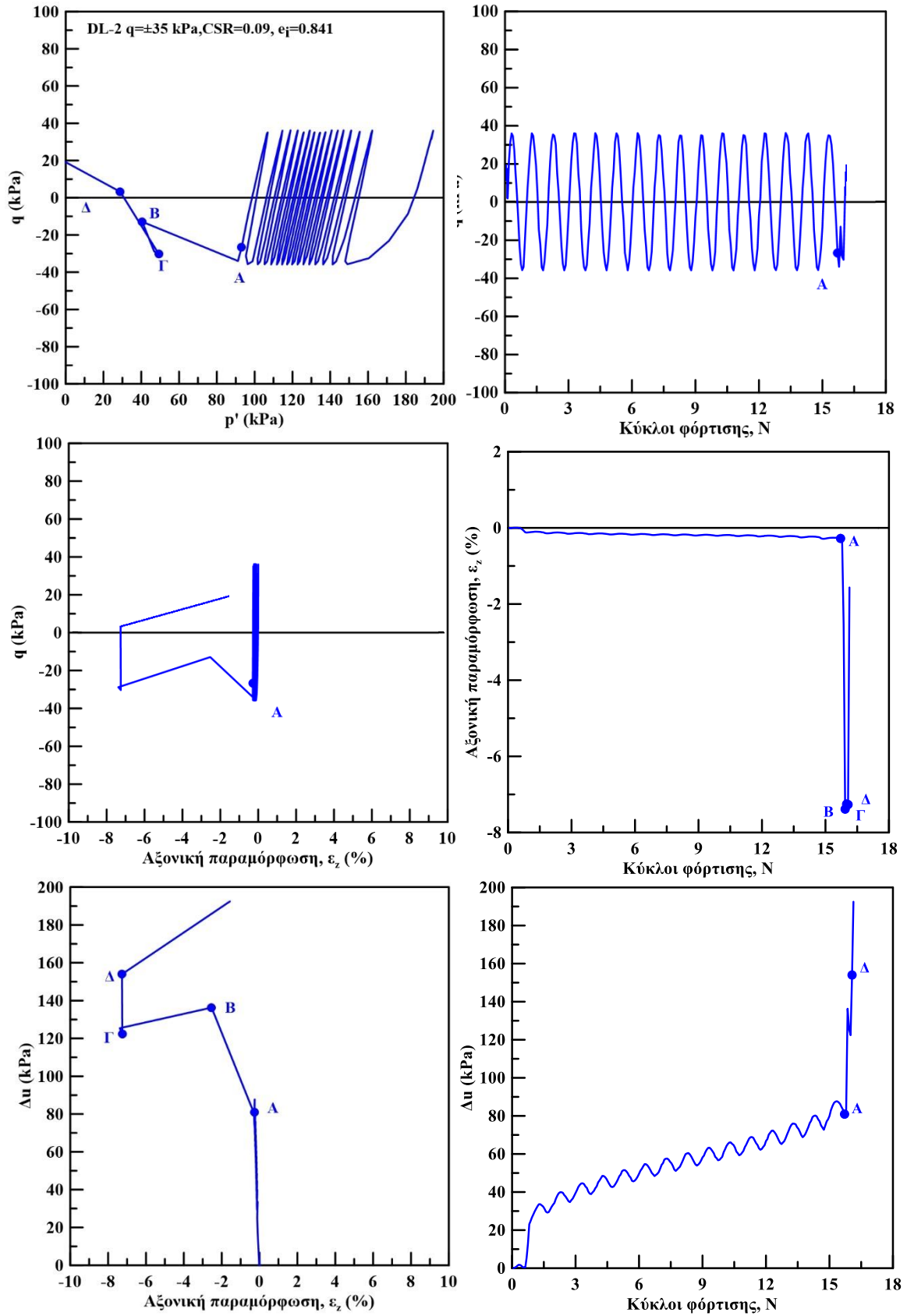
παραμόρφωσης $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$) και της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.



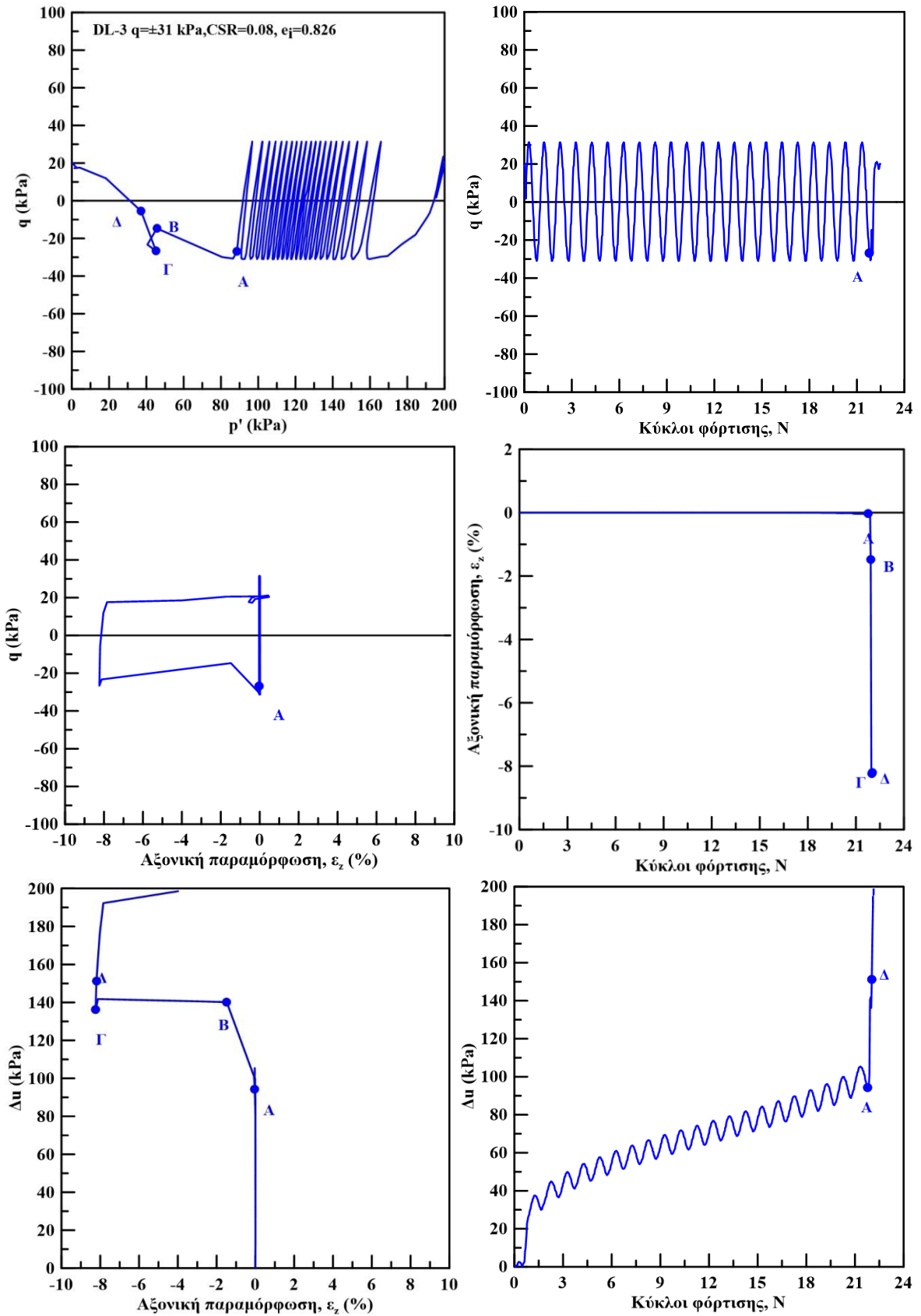
Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα τριαξονικής δυναμικής τριαξονικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 36$ kPa



Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα τριαξονικής δυναμικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 44$ kPa



Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα τριαξονικής δυναμικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 35 \text{ kPa}$



Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα τριαξονικής δυναμικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 31 \text{ kPa}$

Αν παρατηρήσουμε τα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης προς αριθμό κύκλων στα Σχήματα 5.3-5.6 όπου οι άμμοι εμφανίζουν σταθερή απόκριση για αρκετούς κύκλους πριν την αστοχία βλέπουμε ότι οι κύκλοι που επιβάλλονται είναι πανομοιότυποι χωρίς τις μικροδιαφορές της ανακυκλικής φόρτισης στην τριαξονική συσκευή διαδρομών τάσεων, όπως θα αναμενόταν από τη δυναμική συσκευή που είναι ειδικά σχεδιασμένη για ανακυκλική φόρτιση. Ένα μειονέκτημα της συσκευής είναι ότι μετά την αστοχία δεν επαναφέρει την αποκλίνουσα τάση στο 0 αλλά σε περίπου 20kPa.

Επειδή μας ενδιαφέρει να δούμε αφενός εάν αλλάζει η απόκριση της άμμου σε μικρές συχνότητες φόρτισης και αφετέρου αν η αστοχία είναι αναπόφευκτη μετά από ένα αριθμό κύκλων φόρτισης μεγάλο ή μικρό ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση, η συμπεριφορά μετά την αστοχία είναι μείζονος σημασίας.

Στο Σχήμα 5.1 η αποκλίνουσα τάση είναι αρκετά μεγάλη ώστε μετά από 6 κύκλους το δοκίμιο της άμμου M31 να οδηγείται στη αστοχία. Συγκεκριμένα στο εφελκυστικό τμήμα του κύκλου φόρτισης αναπτύσσεται υπερπίεση πόρων, ένδειξη ασταθούς συμπεριφοράς, αλλά σχετικά μικρές παραμορφώσεις μέχρι το σημείο Α. Στο σημείο Α εκδηλώνεται η αστάθεια του δοκιμίου και αφενός η εφελκυστική παραμόρφωση εκτινάσσεται στο -10% και ο ρυθμός ανάπτυξης υπερπίεσης αυξάνεται δραματικά από το Α στο Β. Στη φάση αυτή το δοκίμιο αδυνατεί να φέρει το φορτίο που του επιβάλει η συσκευή και αφού αναδιαταχθούν οι κόκκοι μετά την μεγάλη παραμόρφωση αλλάζει φάση εμφανίζοντας μικρή διαστολή από το Β στο Γ όπου και παραλαμβάνει το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο. Στη συνέχεια η υπερπίεση αυξάνεται καθώς η φορά φόρτισης αλλάζει σε θλίψη και η εφελκυστική παραμόρφωση μειώνεται από το -10% προς το 0%. Φυσικά το δοκίμιο έχει αστοχήσει.

Τα ανωτέρω παρατηρούνται πιο παραστατικά στο Σχήμα 5.2 όπου η άμμος longstone αστοχεί στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Βλέπουμε ότι στα μέσα του εφελκυστικού τμήματος του κύκλου στο σημείο Α το δοκίμιο αδυνατεί να φέρει το φορτίο που του επιβάλλεται και μάλιστα εμφανίζει σημεία κατάρρευσης αφού μειώνεται το φορτίο που φέρει από το Α στο Β. Αυτή είναι η απόκριση του υλικού αφού η συσκευή βρίσκεται στο μέσο του εφελκυστικού τμήματος άρα μηχανικά δεν έχει πρόβλημα επιβολής φορτίου. Εξάλλου όταν το δοκίμιο αναλαμβάνει φορτίο στο Γ το εφελκυστικό τμήμα του κύκλου επιβάλλεται με ακρίβεια από τη συσκευή (βλ. q-κύκλοι).

Η πίεση πόρων στο Α όπως και η παραμόρφωση είναι μικρές αφού δεν έχουν προηγηθεί άλλοι κύκλοι φόρτισης. Από το Α στο Β όμως αυξάνονται δραματικά. Όπως προαναφέρθηκε μετά την αλλαγή φάσης το δοκίμιο αναλαμβάνει το φορτίο που του επιβάλλει η συσκευή με αντίστοιχη μείωση της υπερπίεσης πόρων από το Β στο Γ. Για να οδηγηθεί τελικά στην αστοχία καθώς υπερπίεσεις και παραμορφώσεις αναπτύσσονται κατά το στάδιο της επαναφόρτισης του δοκιμίου από το Γ.

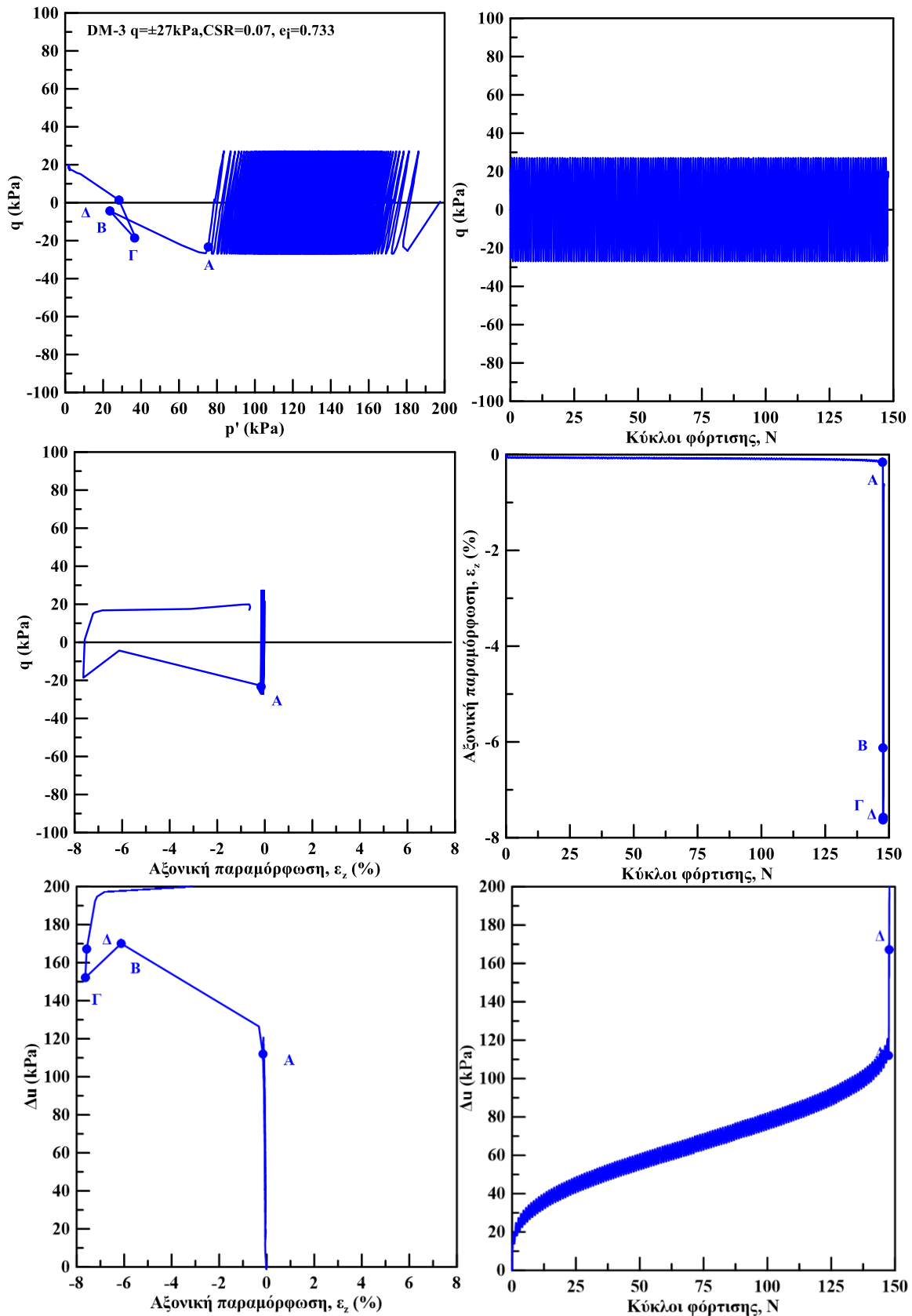
Στα Σχήματα 5.5-5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών δυναμικής ανακυκλικής φόρτισης μ , υπό αστραγγιστες συνθήκες, στην άμμο M31 και Longstone με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$, για μικρότερη επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 27\text{ kPa}$ (DM-3 και DL-4) με αποτέλεσμα να παρεμβάλλονται περισσότεροι κύκλοι μέχρι την έναρξη ασταθούς συμπεριφοράς στο Α.

Όμως η απόκριση από το Α στο Β επιβεβαιώνει ότι το δοκίμιο αστοχεί μερικώς και μάλιστα με μείωση του φορτίου που είχε αναλάβει που συνοδεύεται από απότομη αύξηση υπερπίεσης πόρων

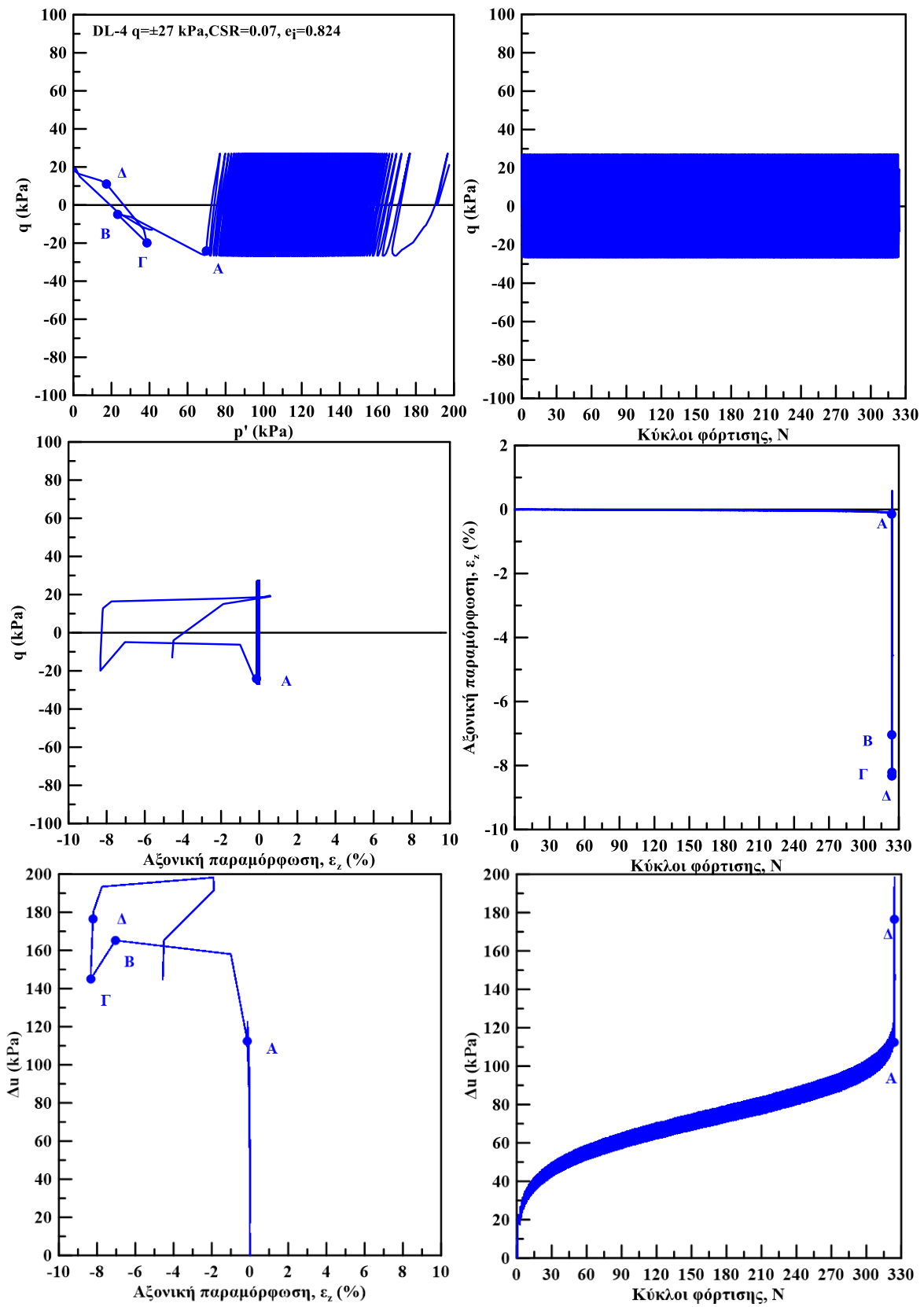
και παραμορφώσεων. Το μέγιστο φορτίο σε εφελκυσμό κατά τον κύκλο φόρτισης αναλαμβάνεται στο Γ καθώς το δοκίμιο έχει διαστολική τάση με μείωση της υπερπίεσης. Στη συνέχεια του κύκλου αρχίζει η επαναφόρτιση του δοκιμίου που οδηγεί στην τελική αστοχία. Τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνονται 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 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 σημείο Α όπου αλλάζει και η μορφή των διαγραμμάτων. Ειδικότερα, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της υπερπίεσης πόρων, 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. Συνεπώς, τα δοκίμια που φορτίζονται με μικρότερη ανακυκλική τάση ($q=\pm 27$ kPa), απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι να αστοχήσουν. 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 για κάθε άμμο παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Ομοίως με τις προηγούμενες δοκιμές με τις μεγαλύτερες επιβαλλόμενες ανακυκλικές τάσεις, μετά το σημείο Α όπου αλλάζει δραματικά η συμπεριφορά της άμμου, αρχικά το δοκίμιο παρουσιάζει έντονη τάση για συστολή (κλάδος ΑΒ), στη συνέχεια εμφανίζει διαστολική συμπεριφορά (κλάδος ΒΓ), οδηγείται στην αρχική ρευστοποίηση (κλάδος ΓΔ) και με τη συσσώρευση σημαντικής αξονικής παραμόρφωσης οδηγείται στην κατάρρευση (όπου τερματίζουν και οι μετρητές αξονικής παραμόρφωσης). Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η απόκριση αλλάζει μορφή (σημείο Α), 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 δυναμική φόρτιση. Συμπερασματικά, με την αύξηση της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την έναρξη της ασταθούς συμπεριφοράς και τη συσσώρευση των παραμορφώσεων αυξάνει (σημείο Α).

Ωστόσο, ανεξαρτήτως μεγέθους της ανακυκλικής τάσης, μετά το σημείο Α, χαλαρή άμμος (M31 και Longstone) ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά, δηλαδή, στον ίδιο κύκλο αναπτύσσεται αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_z=1\%$ και $\varepsilon_z=2.5\%$, μηδενίζεται η ενεργός τάση και το δοκίμιο οδηγείται τελικά στην αστοχία.



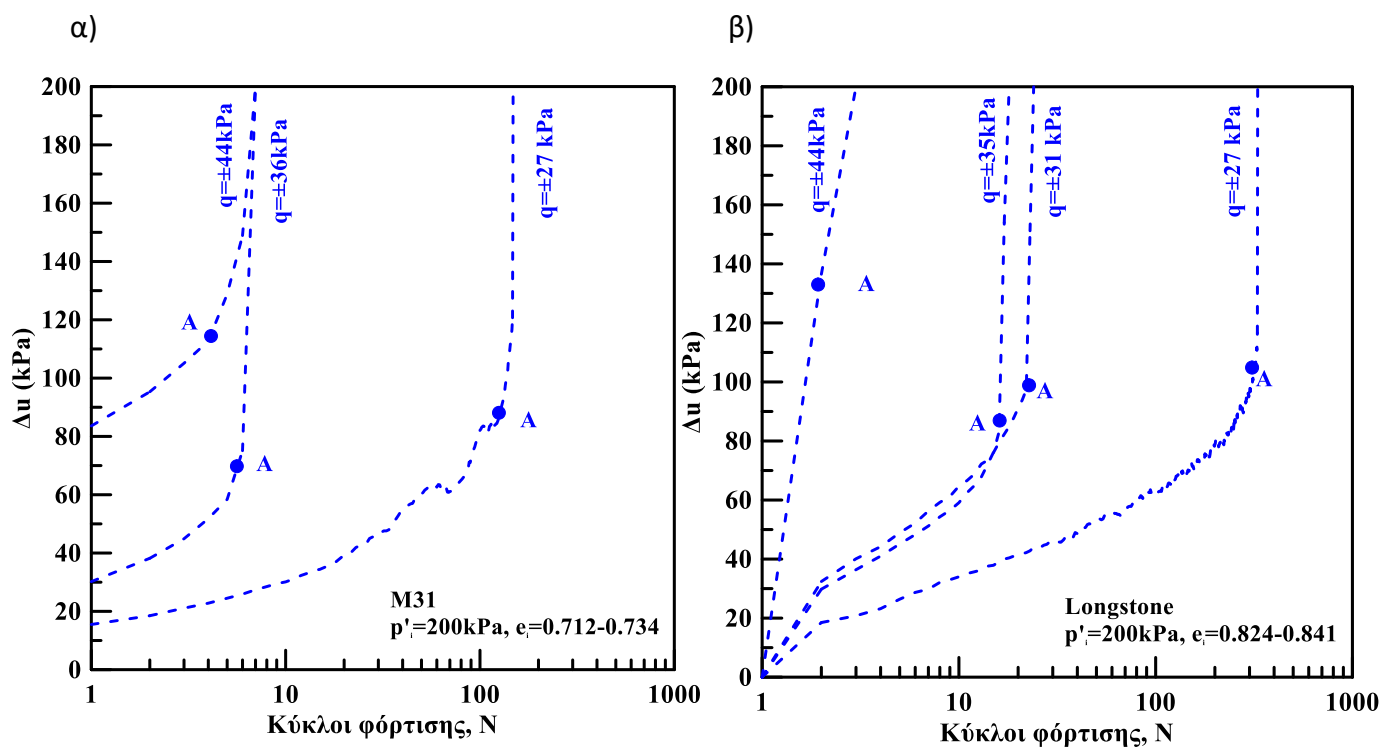
Σχήμα 5.5: Αποτελέσματα τριαξονικής δυναμικής φόρτισης σε άμμο M31 υπό $q=\pm 27\text{kPa}$



Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα τριαξονικής δυναμικής φόρτισης σε άμμο Longstone υπό $q = \pm 27$ kPa

5.2 Μηχανισμός ανάπτυξης υπερπίεσης του υγρού των πόρων κατά την δυναμική, τριαξονική φόρτιση άμμου M31 και Longstone

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για όλες τις τριαξονικές δυναμικές δοκιμές στις άμμους M31 και Longstone. 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 . Επιπρόσθετα, όσο μειώνεται η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση, q , απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης για την ανάπτυξη υπερπίεσης ίσης με την αρχική ενεργό τάση ($\Delta u = p' = 200 \text{ kPa}$) και την «αρχική ρευστοποίηση».



Σχήμα 5.7: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της άμμου M31 (α) και της άμμου Longstone (β)

5.3 Καμπύλες ρευστοποίησης της άμμου M31 και της άμμου Longstone

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 όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 4 προσομοιώνεται με ανακυκλικές δοκιμές υπό εμποδιζόμενη στράγγιση στην τριαξονική και δυναμική συσκευή, στη συσκευή απλής διάτμησης, στη συσκευή διάτμησης κοίλου 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 διπλωματική ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4-4).

$$CSR = \frac{q}{2 * p'_i}$$

(5-1)

Τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, αστράγγιστων, ανακυκλικών δοκιμών στα χαλαρά, κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια άμμου M31 και Longstone συνοψίζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα στο Σχήμα 5.8 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 εργασίας ανήκουν σε μια καμπύλη (καμπύλη ρευστοποίησης-liquefaction curve) που περιγράφεται από την εξίσωση δύναμης (5-2), (Idriss & Boulanger, 2008).

$$CSR = a * N^b$$

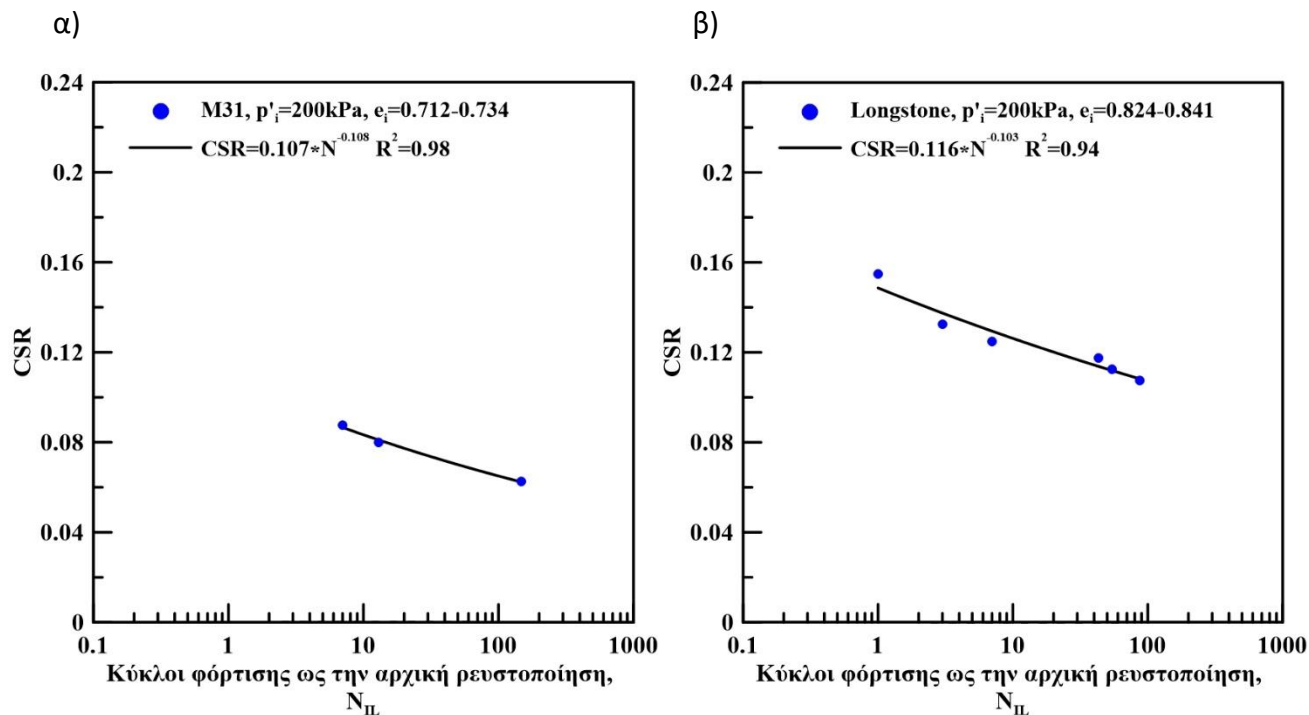
(5-2)

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την περίπτωση των χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών των 2 αυτών φυσικών άμμων, για δεδομένη τιμή CSR, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $|\varepsilon_z|=1$ και 2.5% πρακτικά ταυτίζονται.

Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης σε ρευστοποίηση για τη χαλαρή άμμο M31 προκύπτει $CRR_{15}=0.09$ ενώ για την άμμο Longstone ισούται με $CRR_{15}=0.12$. 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).

Οι αντίστοιχες καμπύλες από τις μεγαλύτερης περιόδου ανακυκλικές δοκιμές έχουν προστεθεί στις αντίστοιχες καμπύλες ρευστοποίησης λόγω δυναμικής φόρτισης.



Σχήμα 5.8: Καμπύλη ρευστοποίησης χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31(α) και Longstone (β) να προστεθούν οι καμπύλες από τις ανακυκλικές να δουμε τη διαφορά

5.4 Δυναμική ανακυκλική φόρτιση άμμου M31 και Longstone σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυναμικών δοκιμών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην άμμο M31 και Longstone σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία Ludox-SM®, περιεκτικότητας CS=10%. Η μέθοδος της σταθεροποίησης μη συνεκτικών εδαφών όπως έχει ήδη αναφερθεί αναπτύχθηκε για βελτίωση του εδάφους κάτω από υφιστάμενες κατασκευές έτσι ώστε να αντέχει περισσότερο στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Επομένως, οι δυναμικές δοκιμές υπό εμποδιζόμενη στράγγιση όπως και οι ανακυκλικές στο προηγούμενο Κεφάλαιο είναι απαραίτητες για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφάνιση ξηρής άμμου σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας CS=10%. Έπειτα, 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 δυναμικές 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).

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p'_i=200$ kPa με εύρος αρχικού δείκτη πόρων $e_i=0.723-0.732$ για την άμμο M31 και $e_i=0.828-0.856$ για την άμμο Longstone . Για να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης εκτελέστηκαν δοκιμές σε εύρος λόγου ανακυκλικής τάσης, $CSR=0.09-0.13$. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών .

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες				
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$
SDM-1	0.723	200	0.13	0.5	20	13	23
SDM-2	0.728	200	0.11	0.5	151	138	187
SDM-3	0.732	200	0.09	0.5	-	-	-
SDL-1	0.828	200	0.11	0.5	34	24	39
SDL-2	0.856	200	0.09	0.5	227	208	280

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια άμμου M31 και Longstone σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας σταθεροποιητή 10% κ.β.

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 $\varepsilon_{cyc}=1\%$
N_{2.5%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\varepsilon_{cyc}=2.5\%$
N_{5%}, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\varepsilon_{cyc}=5\%$

Στα Σχήμα 5.6, 5.8, 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής δυναμικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στις σταθεροποιημένες με κολλοειδή πυριτρία άμμους M31 και Longstone με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ (SDM-1, SDM-2, SDL-1).

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, στα Σχήματα 5.7, 5.9, 5.11 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 συναρτήσεϊς κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

Αρχικά παρατηρούμε ότι η απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου είναι παρόμοια με εκείνη που παρατηρήθηκε στις ανακυκλικές δοκιμές. Έχει σημειωθεί στη βιβλιογραφία (Georgiannou et al. 2017) ότι η γέλη επιτρέπει στο νερό των πόρων να μετακινείται από και προς το δοκίμιο. Λόγω της μικρότερης διαπερατότητας της σταθεροποιημένης άμμου η μετακίνηση γίνεται σε μεγαλύτερο χρόνο αλλά ο όγκος του νερού που μετακινείται κατά τη διάτμηση ελεύθερης στράγγισης είναι ανάλογος με εκείνον της άμμου παρόμοιας πυκνότητας. Στις δυναμικές δοκιμές οι συνθήκες είναι αστράγγιστες άρα δεν γίνεται μετακίνηση νερού απλά εξισορροπούνται οι πιέσεις καθ' ύψος του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτό συμβαίνει άμεσα και υπάρχει πλήρης αντιστοιχία φόρτισης και ανάπτυξης υπερπίεσης π.χ. βλ. Σχήμα 5.7, διάγραμμα Δu προς αριθμό κύκλων N .

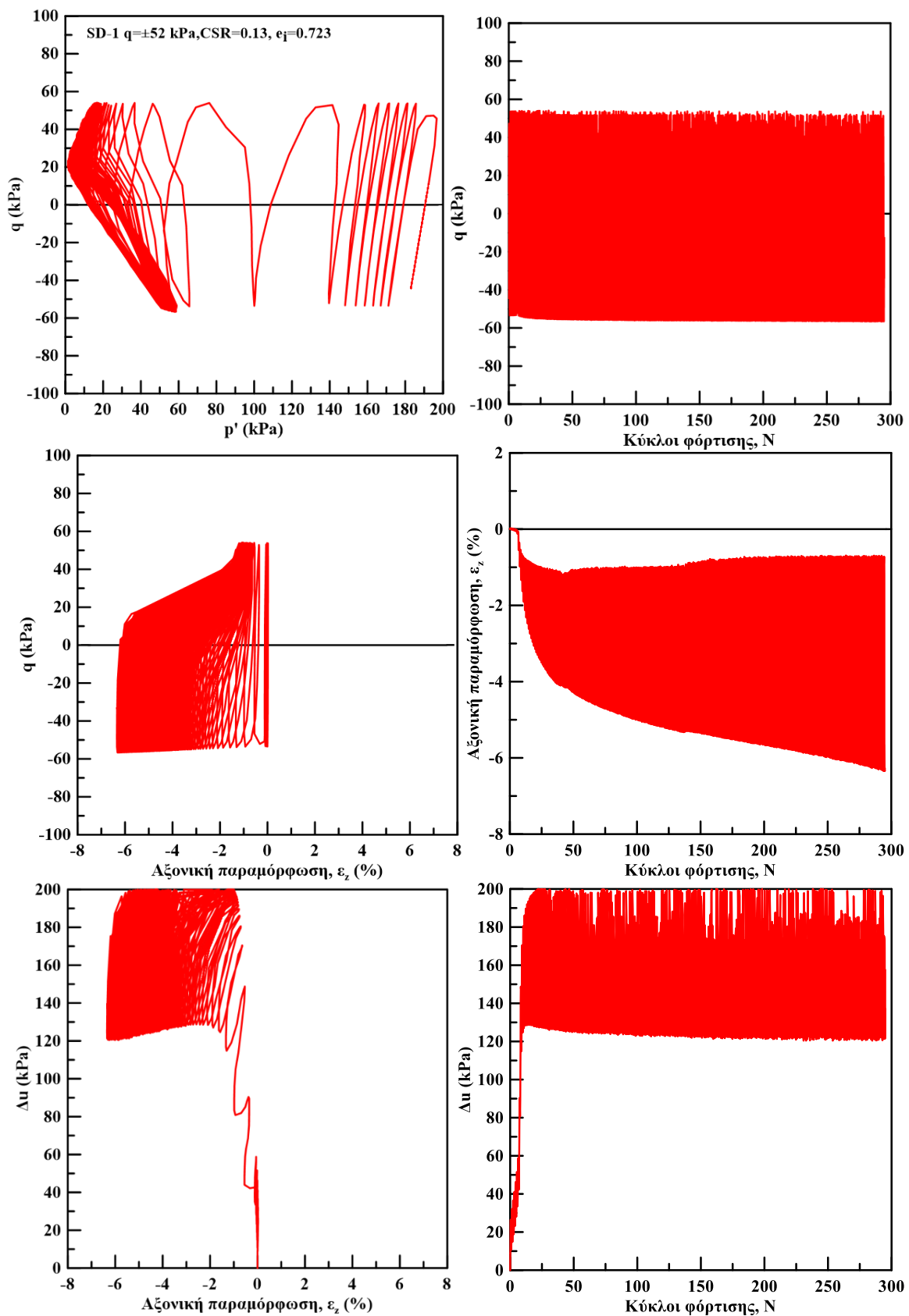
Στην δοκιμή SDM-1 αναπτύσσεται έντονη υπερπίεση του υγρού των πόρων με τη μέση ενεργό τάση να μειώνεται αρκετά από τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης. Στους επόμενους κύκλους φόρτισης η υπερπίεση προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή της ($\Delta u=200\text{ kPa}$). Αντίθετα στις δοκιμές SDM-2 και SDL-1 που επιβλήθηκε μικρότερη τάση η υπερπίεση του υγρού των πόρων αυξάνεται με πολύ μικρότερο ρυθμό για πολλούς κύκλους άρα και η ρευστοποίηση γίνεται πολύ αργότερα ($\Delta u=200\text{ kPa}$). 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 4. (α)). Η τιμή της υπερπίεσης του υγρού των πόρων κυμαίνεται από $\Delta u=100\text{kPa}$ έως 200kPa 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 (SCM-1). 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).

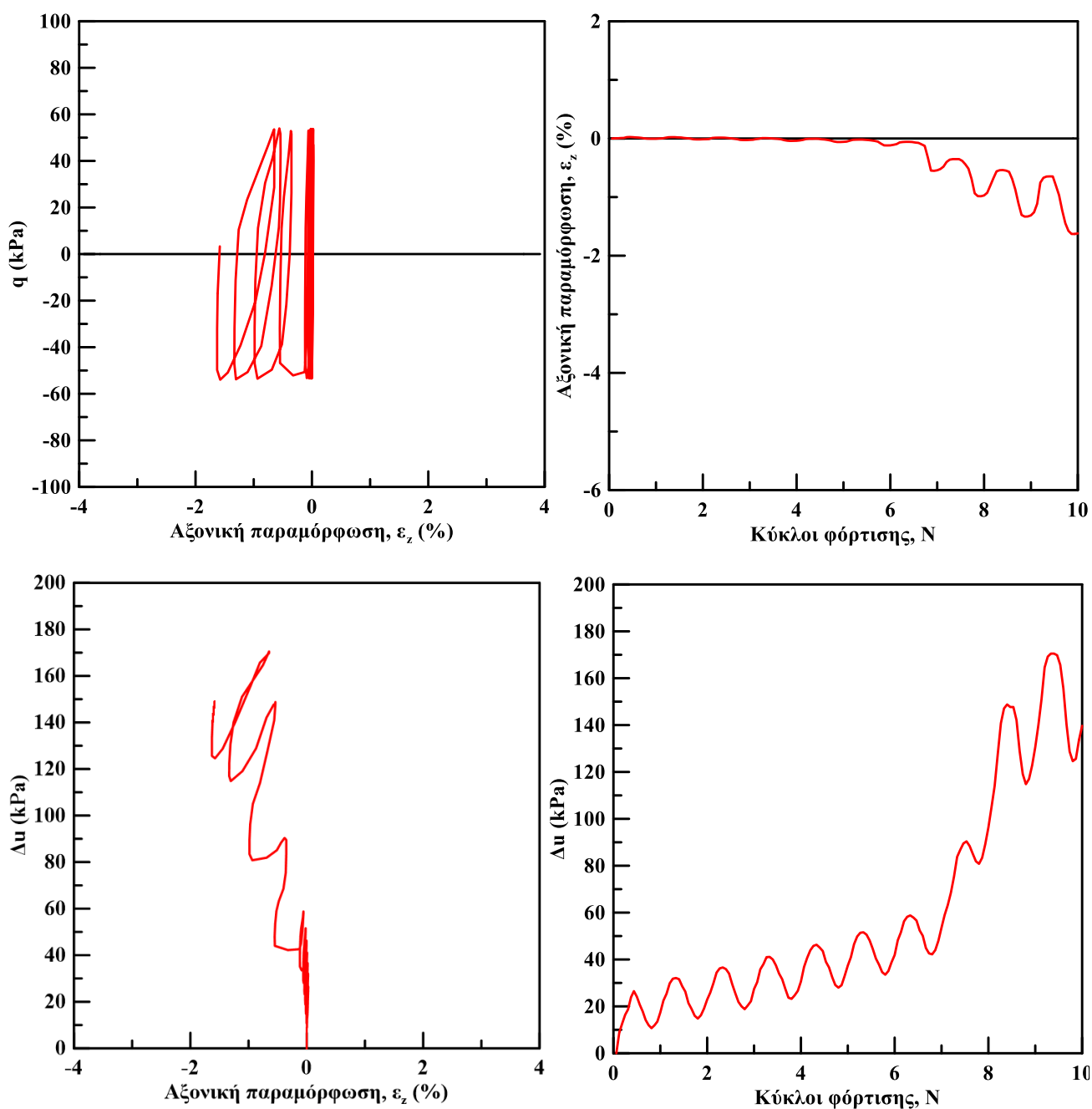
Από τις καμπύλες αξονικής παραμόρφωσης-κύκλων φόρτισης (ϵ_z-N) παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη των αξονικών παραμορφώσεων αρχίζει από τους πρώτους κύκλους φόρτισης και συσσωρεύεται βαθμιαία κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης παρατηρείται σημαντική διακύμανση της 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 5.12 (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 (SDM-1).

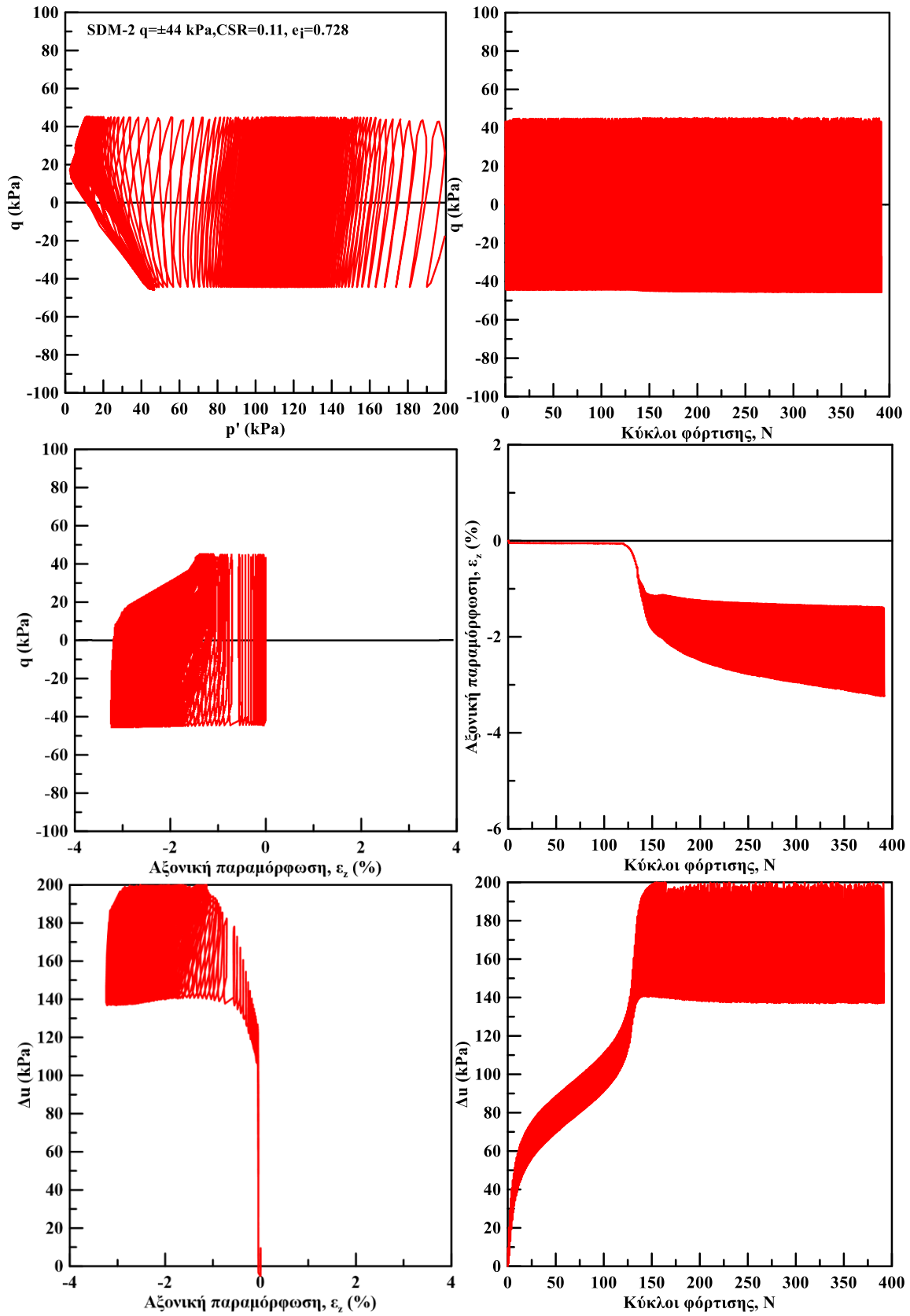
Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα δοκίμια σταθεροποιημένων χαλαρών άμμων δεν καταρρέουν μετά το μηδενισμό της ενεργού τάσης όπως τα δοκίμια των φυσικών άμμων.



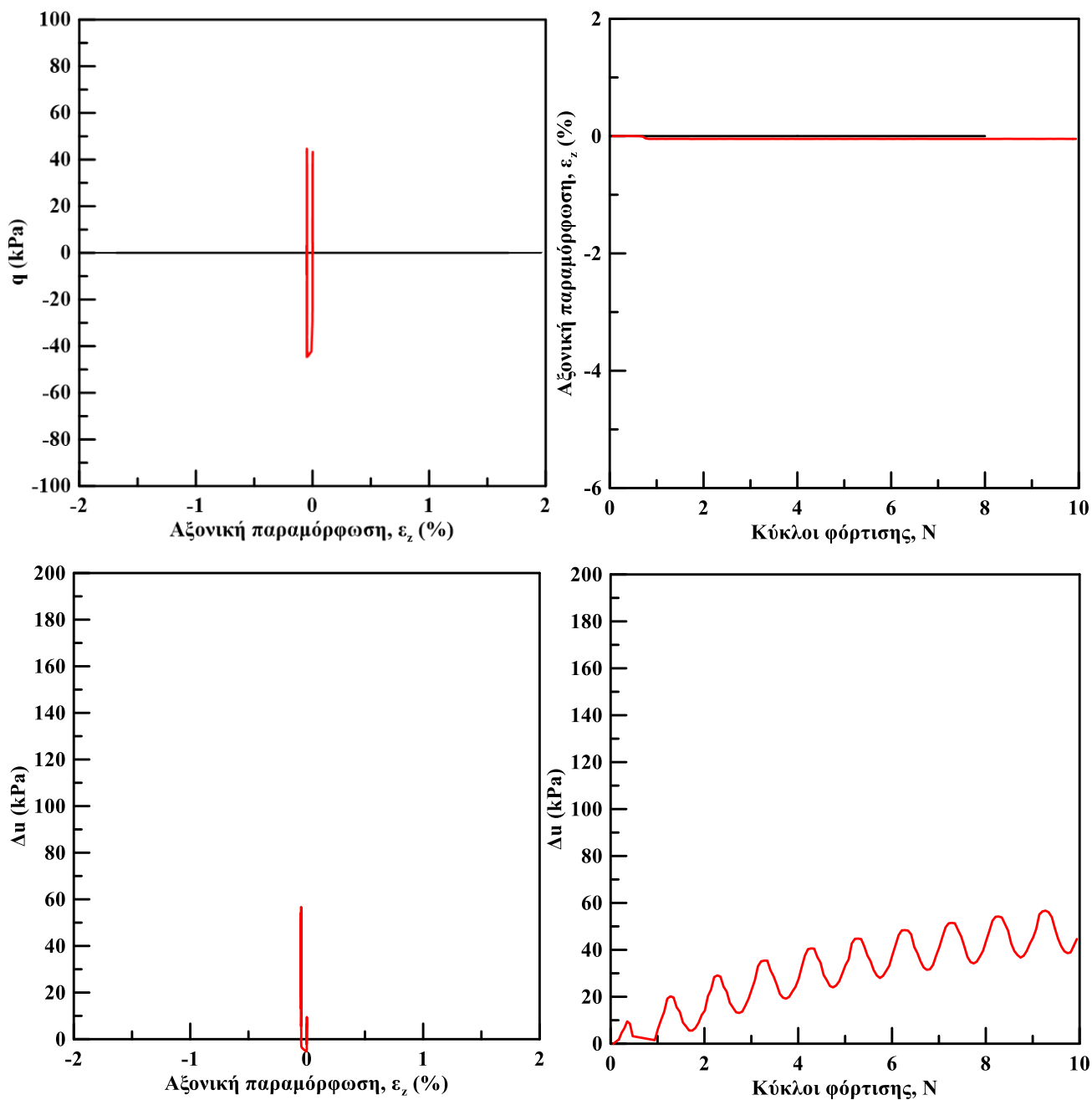
Σχήμα 5.9: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 52$ kPa



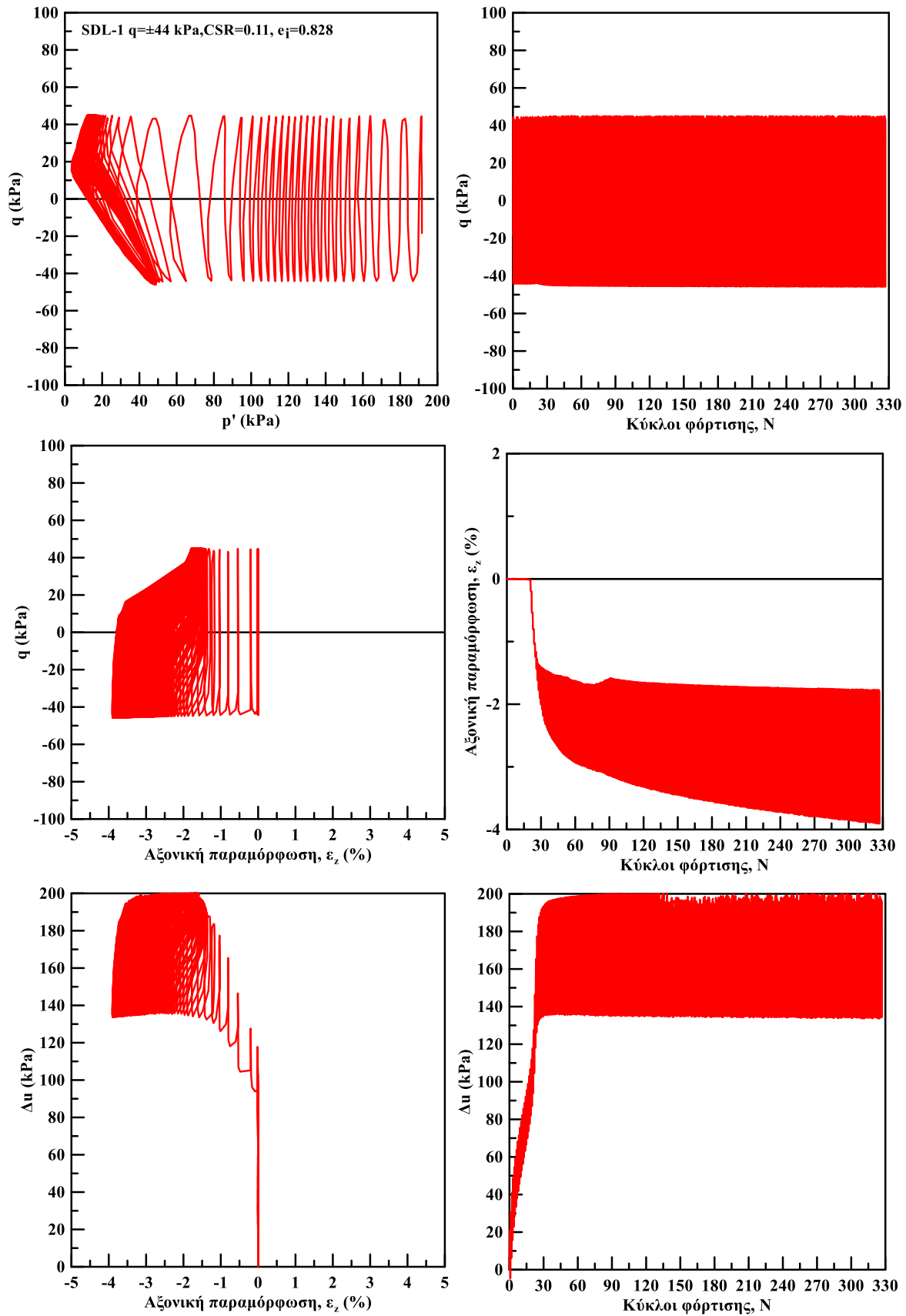
Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q=\pm 52$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



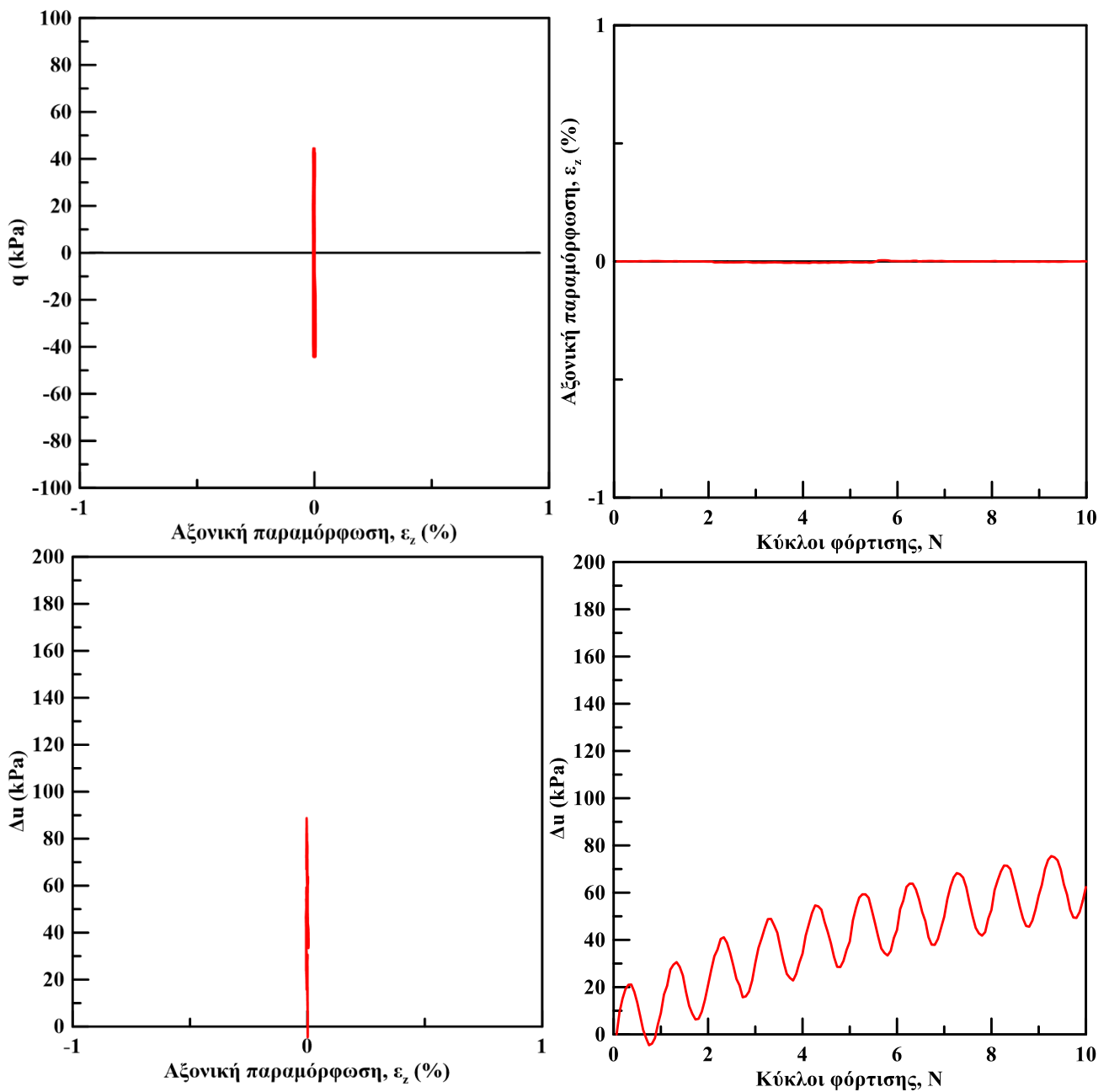
Σχήμα 5.11: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 44$ kPa



Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 44 \text{ kPa}$ για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

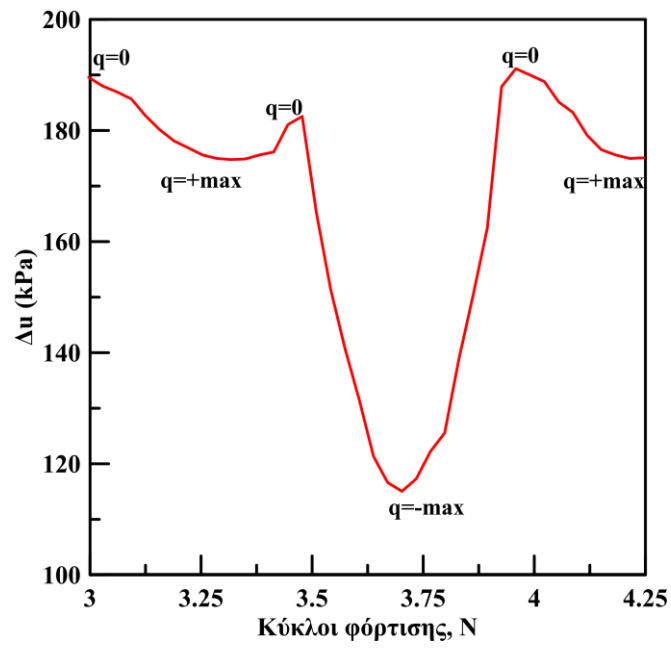


Σχήμα 5.13: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 44$ kPa

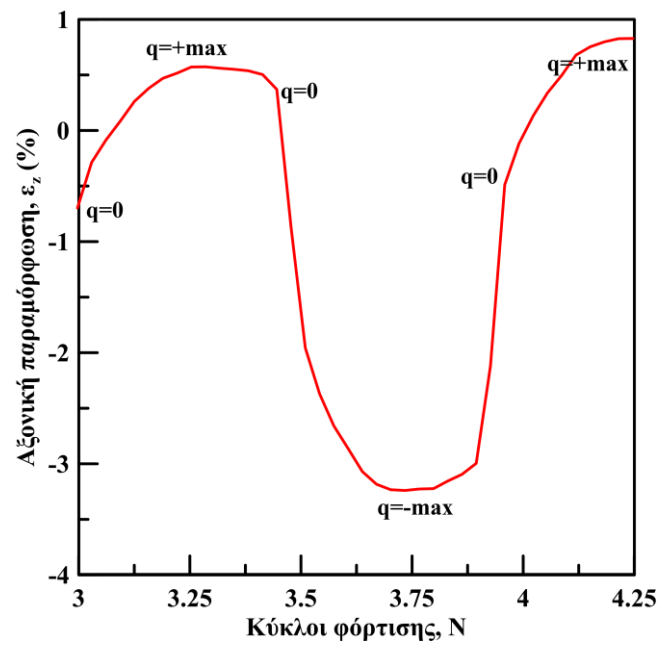


Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 44$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

α)



β)

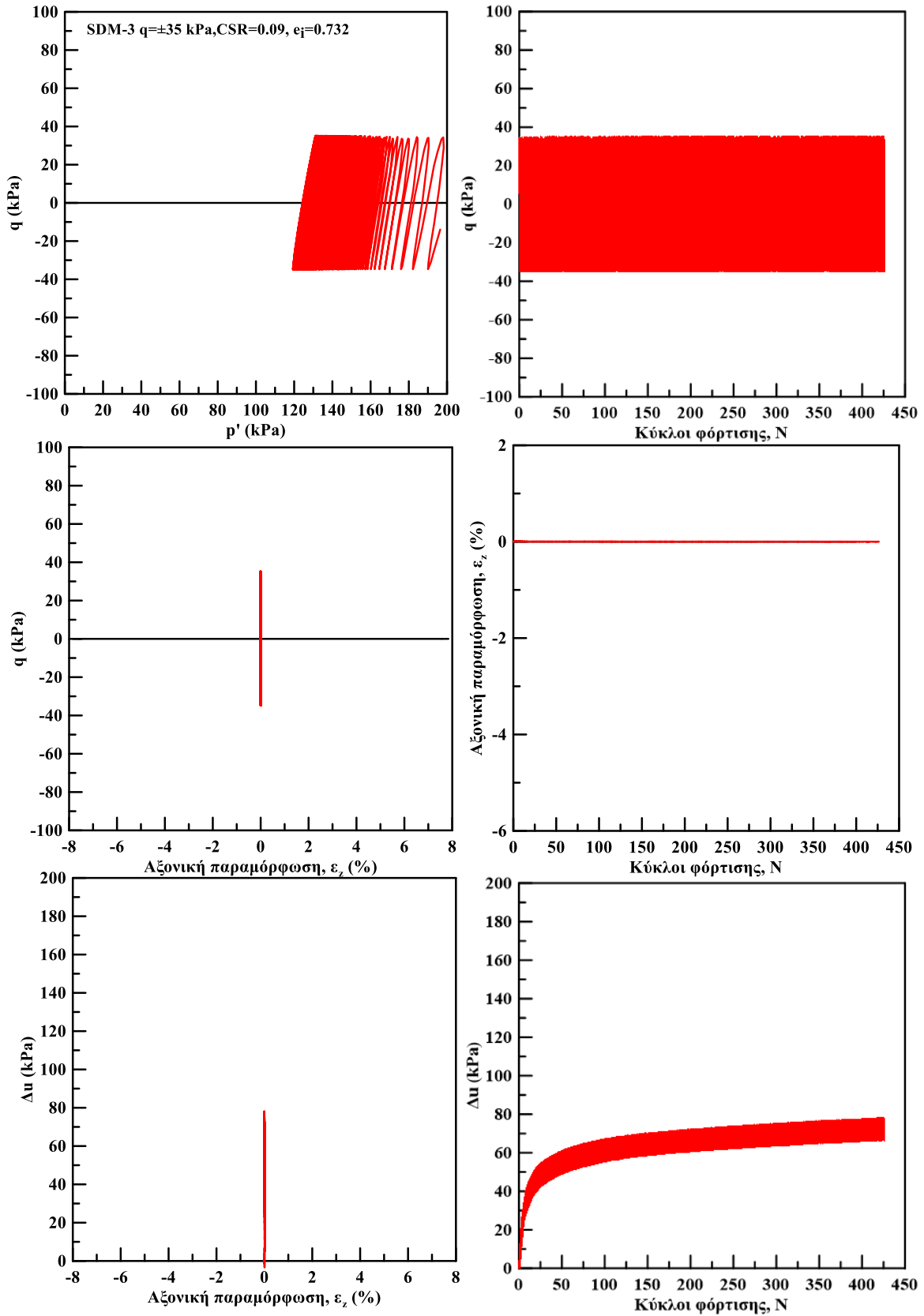


Σχήμα 5.15: Διακύμανση α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής παραμόρφωσης στη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών δυναμικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στις σταθεροποιημένες με κολλοειδή πυριτία άμμους M31 και Longstone με μικρότερους λόγους ανακυκλικής τάσης CSR. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα αποτελέσματα δοκιμής SDM-3 και SDL-3 με επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση $q=\pm 35\text{kPa}$ (Σχήμα 5.13 και 5.15). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ($q-e_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($e_z -N$), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-e_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεϊ κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$).

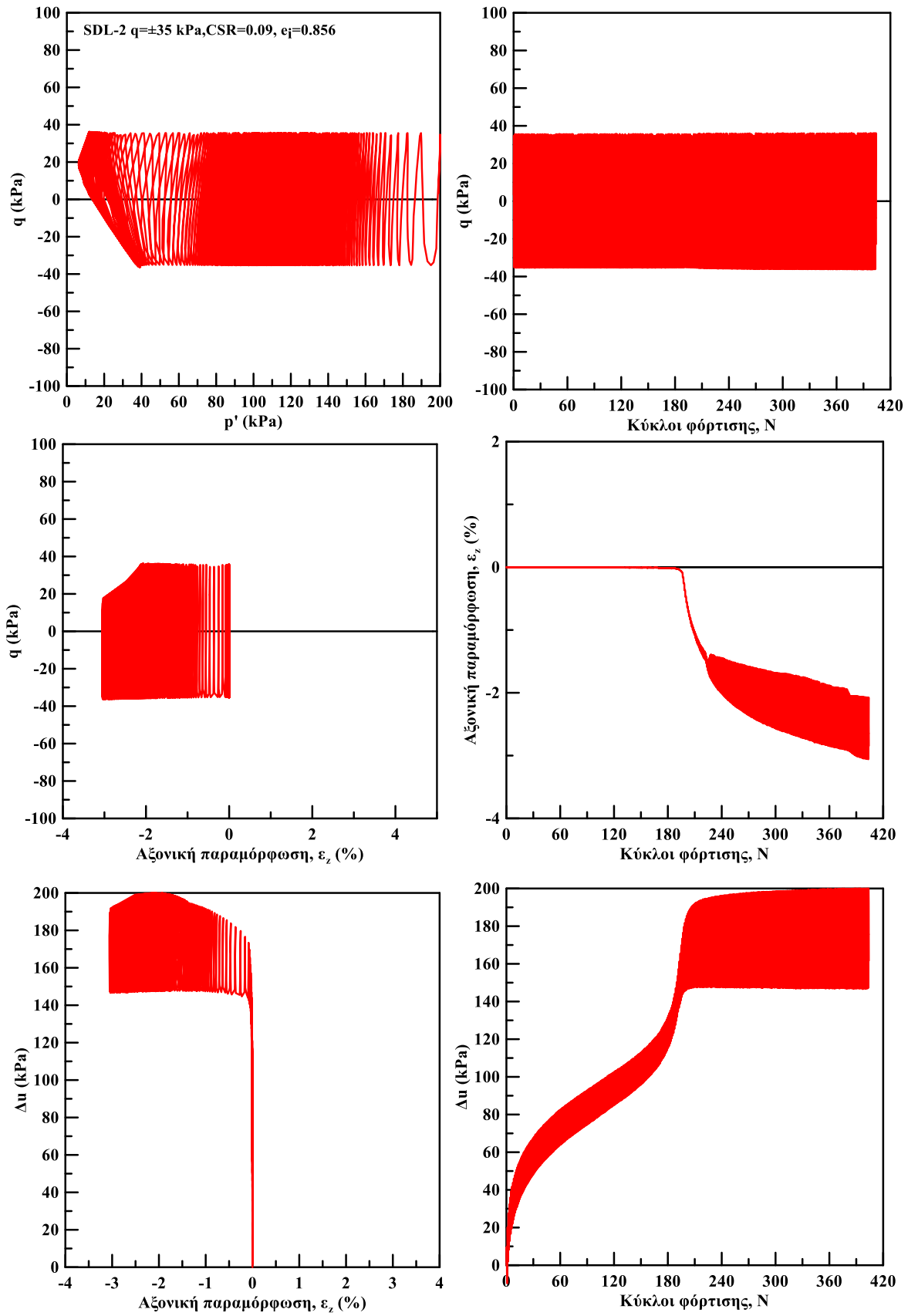
Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης (CSR), μειώνεται ο ρυθμός ανάπτυξης της υπερπίεσης του υγρού των πόρων, αλλά και ο ρυθμός συσσώρευσης της αξονικής παραμόρφωσης. Στην δοκιμή SDM-3 μέχρι τους 500 κύκλους δεν έχει αναπτυχθεί μεγάλη υπερπίεση πόρων και άρα συμπεραίνουμε ότι θα θέλαμε αρκετούς κύκλους μέχρι να φτάσουμε στην ρευστοποίηση. Στην δοκιμή SDL-2 η αρχική ρευστοποίηση πραγματοποιείται έπειτα από 227 κύκλους.

Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι η αρχική ρευστοποίηση, η ανάπτυξη αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $e_z=1$ και 2.5% πραγματοποιούνται σε διαφορετικούς κύκλους σε αντίθεση με τη φυσικές άμμους. Όσο μειώνεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης CSR ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων για την επίτευξη αυτών των παραμορφώσεων αυξάνεται.

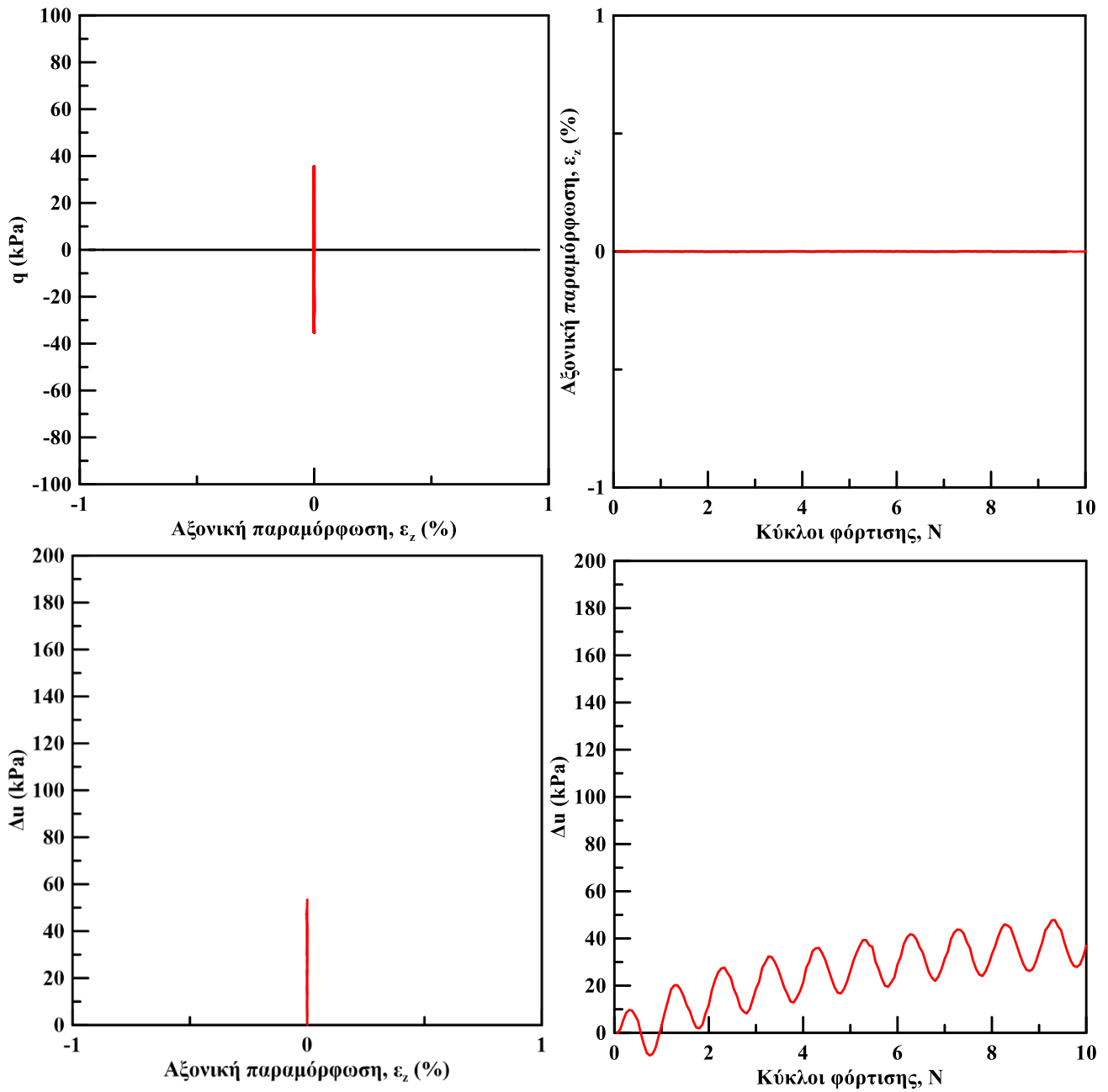


Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 35$

kPa



Σχήμα 5.17: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 35 \text{ kPa}$



Σχήμα 5.18: Αποτελέσματα ανακυκλικής δυναμικής φόρτισης σε σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 35 \text{ kPa}$ για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης

Στα Σχήμα 5.16 και 5.17 συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των ανακυκλικών δοκιμών στη σταθεροποιημένη άμμο M31 και Longstone αντίστοιχα. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) Σχήμα 5.16 και 5.17 (α) και της ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_{cyc}) Σχήμα 5.16 και 5.17 (β) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης.

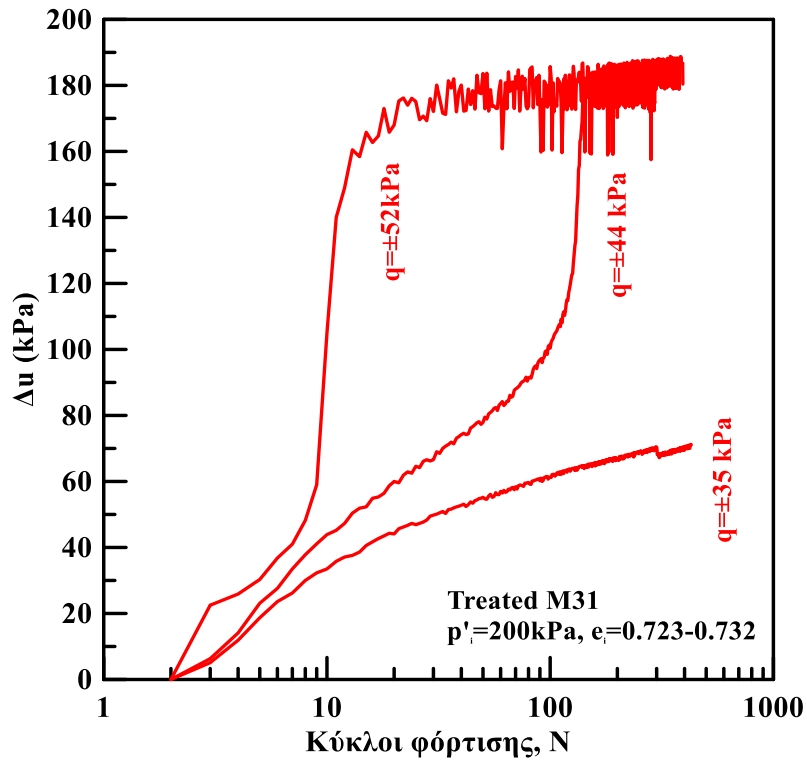
Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση q μηδενίζεται. Στις δοκιμές με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=52$ και 44 kPa εμφανίζεται υπερπίεση του υγρού των πόρων από τον πρώτο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια αυξάνεται με περίπου σταθερά μέχρι ένα σημείο όπου ο ρυθμός αυξάνεται ώσπου η υπερπίεση (Δu) να μεγιστοποιηθεί. Στην δοκιμή με επιβαλλόμενη ανακυκλική τάση $q=35$ kPa εμφανίζεται υπερπίεση πόρων από τους πρώτους κύκλους αλλά δεν η υπερπίεση δεν έχει μεγιστοποιείται μέχρι τους 430 κύκλους.

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 ίση με την αρχική ενεργό τάση ($\Delta u = p' = 200$ kPa) και την «αρχική ρευστοποίηση».

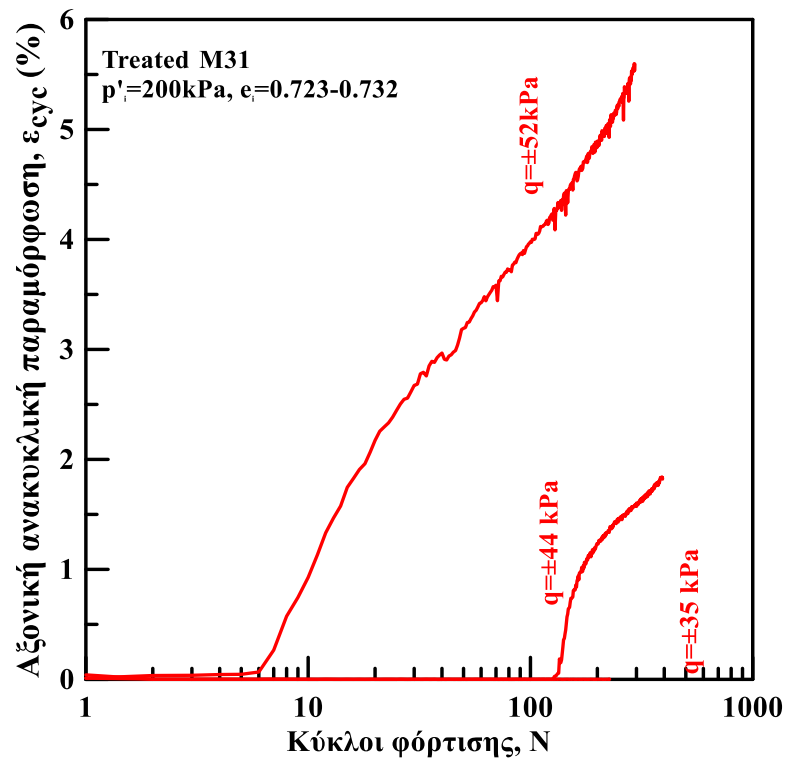
Στο Σχήμα 5.16 (β) η αξονική ανακυκλική τάση (ϵ_{cyc}) δηλαδή η παραμόρφωση διπλού πλάτους σε κάθε κύκλο φόρτισης υπολογίζεται ως το απόλυτο μέγεθος της διαφοράς της αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_z) που επιτυγχάνεται στην μέγιστη θλιπτική ($+q_{max}$) και στη μέγιστη εφελκυστική αποκλίνουσα τάση ($-q_{max}$) κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου φόρτισης.

Στις δοκιμές με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=52$ kPa και 44 kPa αναπτύσσεται αξονική παραμόρφωση από τους πρώτους κύκλους φόρτισης και στη συνέχεια αυξάνεται έντονα καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Στην δοκιμή με επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση $q=35$ kPa η ανακυκλική αξονική παραμόρφωση είναι πρακτικά μηδενική μέχρι το τέλος της δοκιμής.

α)

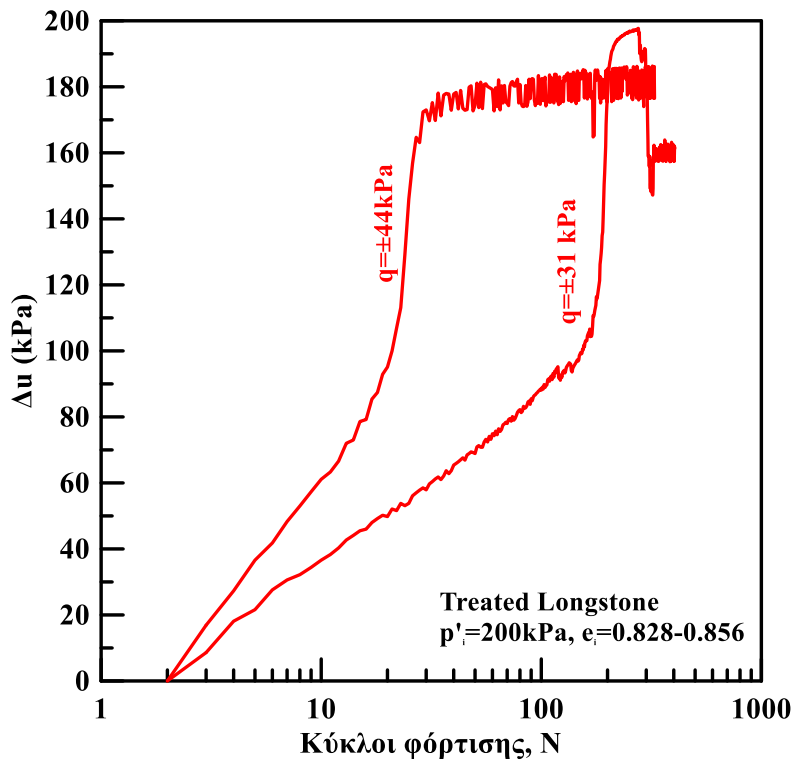


β)

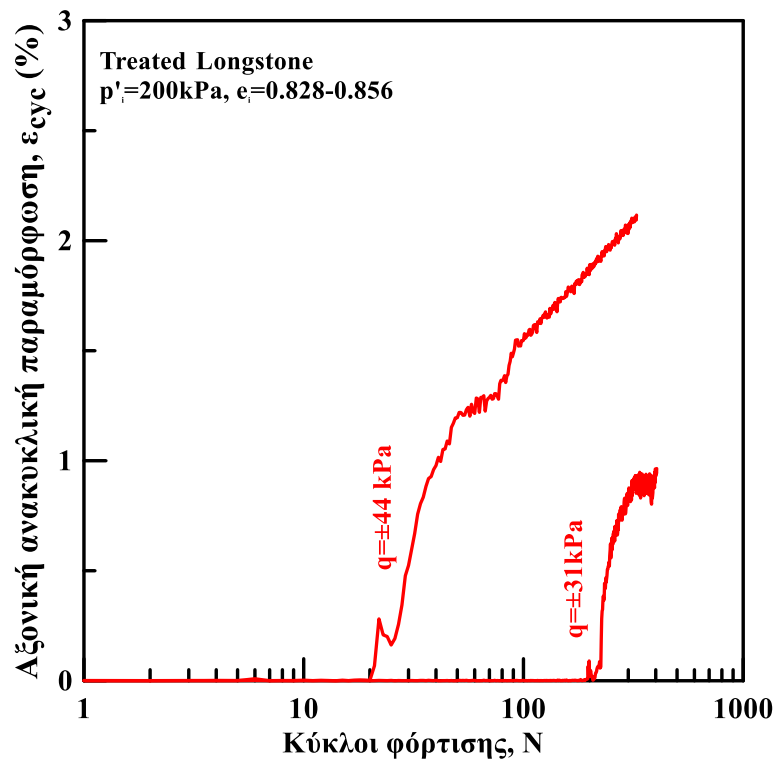


Σχήμα 5.19: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη α) της υπερπίεσης του υγρού των πόρων και β) της αξονικής ανακυκλικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31

α)



β)



Σχήμα 5.20: 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 longstone.

5.5 Σύγκριση της δυναμικής ανακυκλικής συμπεριφοράς φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και Longstone

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, δυναμικών δοκιμών εμποδιζόμενης στράγγισης σε ισότροπα στερεοποιημένα φυσικά και σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 και Longstone. 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 δυστημσίας. Τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3.

Πείραμα	Τέλος της στερεοποίησης		Ανακυκλική Φόρτιση Αστράγγιστες συνθήκες				
	e_i	p'_i (kPa)	CSR	Περίοδος (min)	N_{IL}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$
DM-1	0.712	200	0.11	0.5	6	6	6
DM-2	0.734	200	0.09	0.5	7	7	7
SDM-2	0.728	200	0.11	0.5	151	138	187
SDM-3	0.732	200	0.09	0.5	-	-	-
CL-1	0.840	200	0.11	0.5	2	2	2
CL-2	0.841	200	0.09	0.5	16	16	16
SCL-1	0.828	200	0.11	0.5	34	29	39
SCL-2	0.856	200	0.09	0.5	227	208	280

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών δυναμικής, τριαξονικής φόρτισης, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε φυσικά και σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία περιεκτικότητας $CS=10\%$ δοκίμια άμμου M31 και Longstone

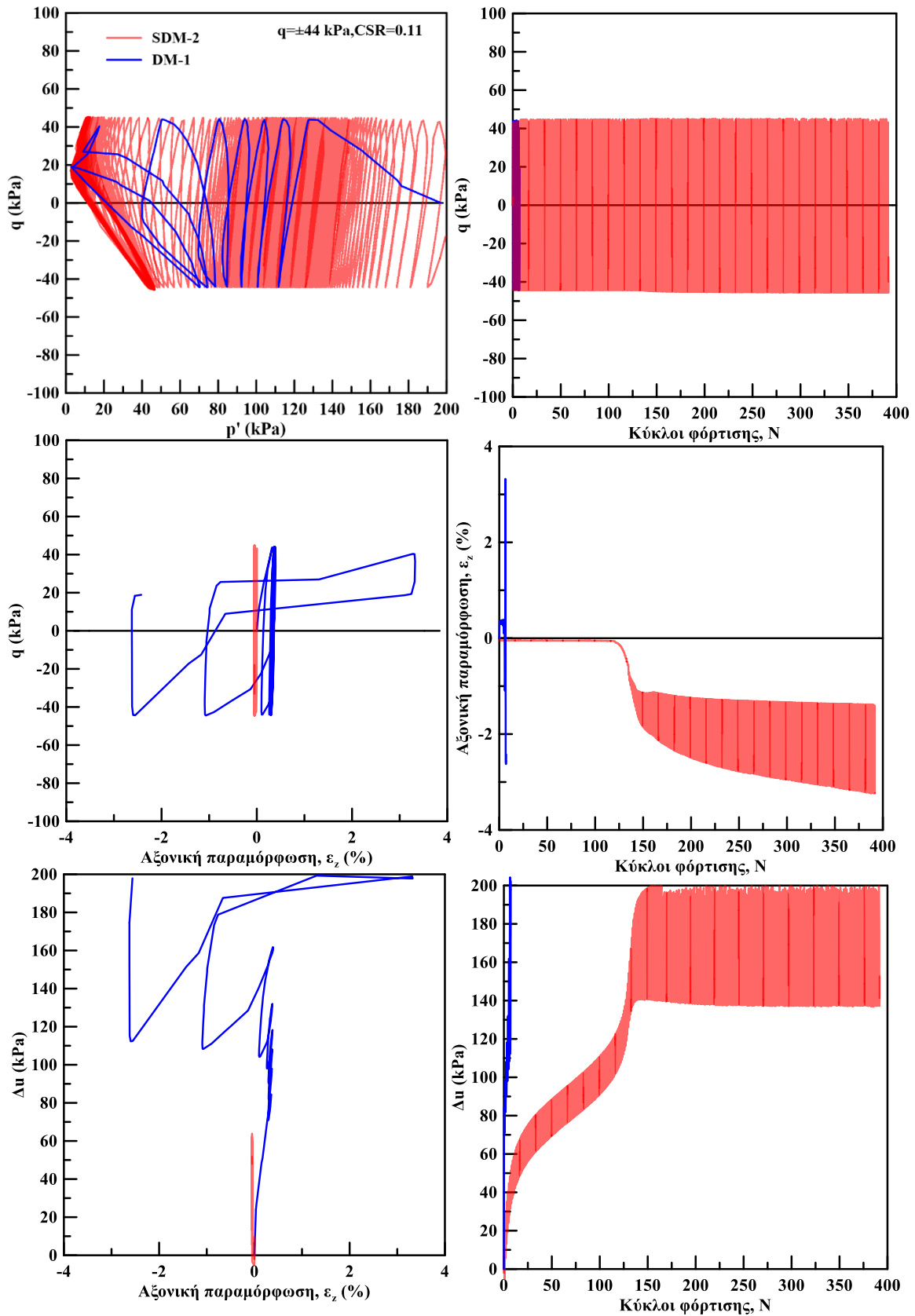
Όπου: e_i , δείκτης πόρων μετά το τέλος της στερεοποίησης,
 p'_i , μέση ενεργός τάση μετά το τέλος της στερεοποίησης,
CSR, λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ($q/(2 \cdot p'_i)$)
 $N_{1\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=1\%$
 $N_{2.5\%}$, κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ανάπτυξη $\epsilon_{cyc}=2.5\%$

Στα Σχήμα 5.18, 5.20, 5.22, 5.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής, δυναμικής φόρτισης, υπό εμποδιζόμενη στράγγιση, στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο M31 και Longstone (τα Σχήματα 5.18 και 5.20 αντιστοιχούν στην άμμο M31 και το 5.22 και 5.24 στην

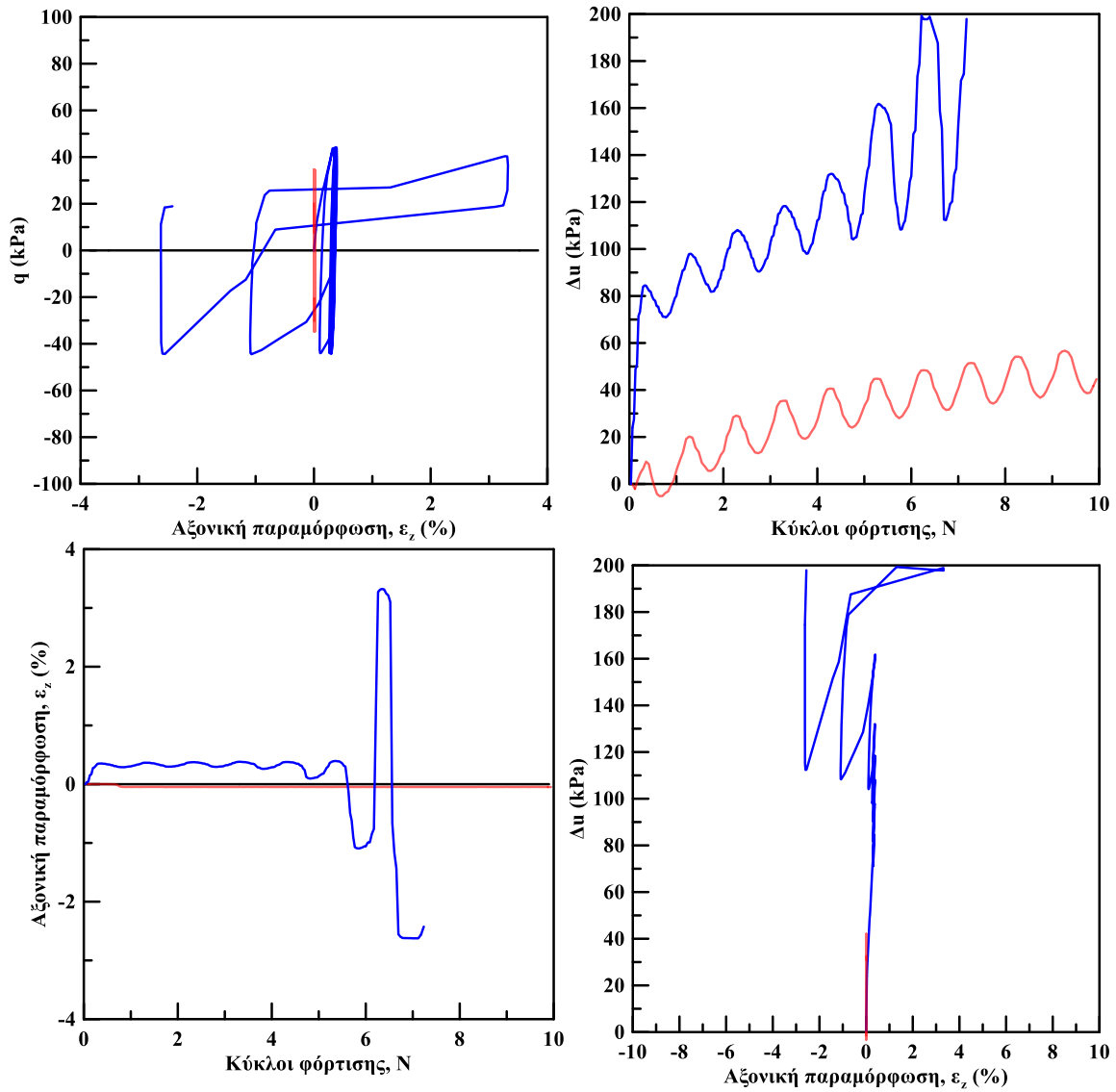
άμμο Longstone) με τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε όρους ενεργών τασικών οδεύσεων ($q-p'$), αποκλίνουσας τάσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($q-N$), αποκλίνουσας τάσης αξονικής παραμόρφωσης ($q-\varepsilon_z$), αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσεως κύκλων φόρτισης (ε_z-N), υπερπίεσης του υγρού των πόρων-αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta u-\varepsilon_z$) και υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσεως κύκλων φόρτισης ($\Delta u-N$). Επιπλέον, στα Σχήματα 5.19, 5.21, 5.23 και 5.25 (τα Σχήματα 5.19 και 5.21 αντιστοιχούν στην άμμο M31 ενώ το 5.23 και 5.25 στην άμμο Longstone) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης σε όρους 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 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 στα δοκίμια με μεγάλο λόγο ανακυκλικής τάσης (CSR) αναπτύσσει κάποια υπερπίεση (Δu) από τους πρώτους κύκλους φόρτισης 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. Στην περίπτωση μάλιστα με το μικρό λόγο ανακυκλικής τάσης το δοκίμιο δεν έχει ρευστοποιηθεί καν.

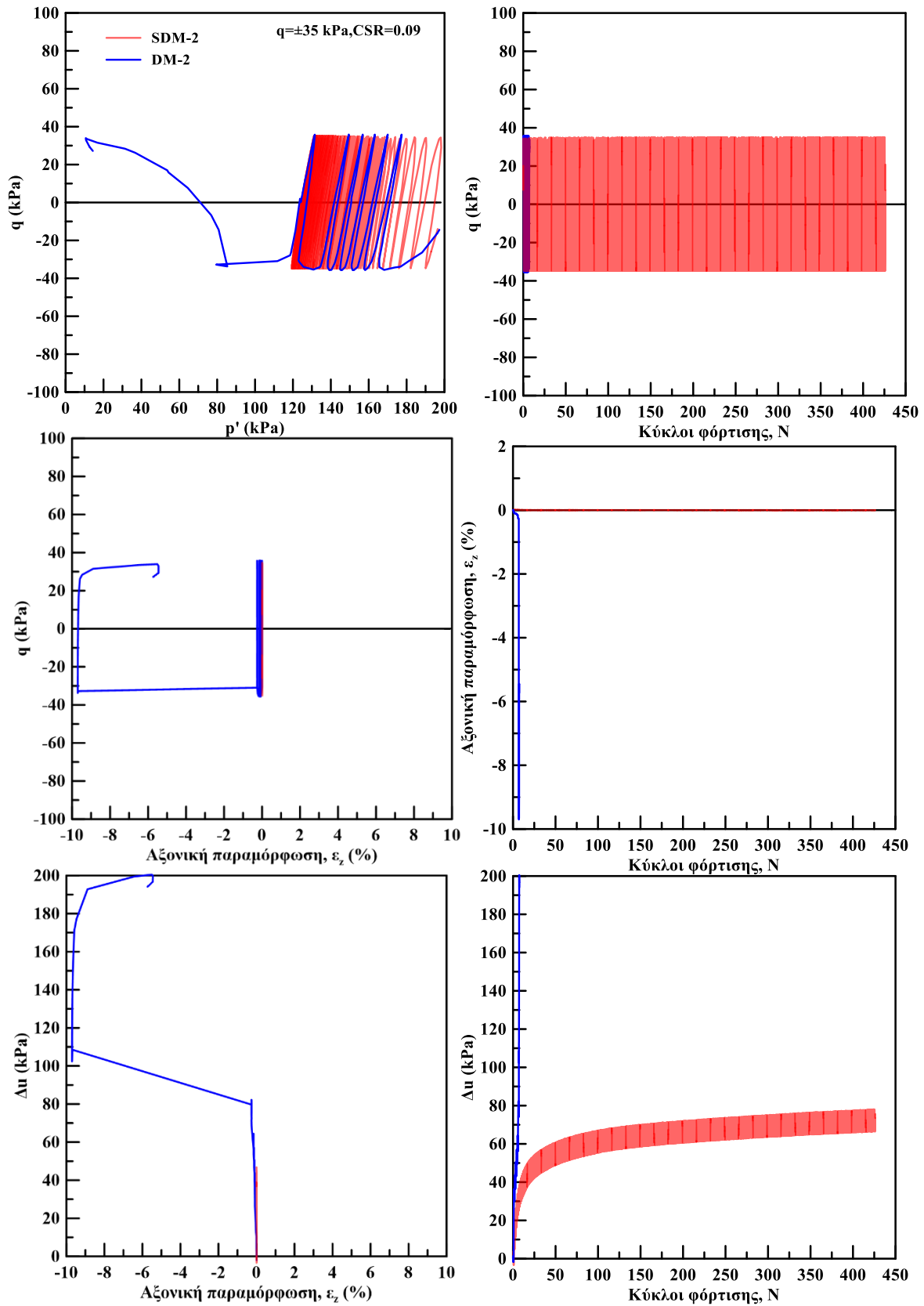
Επιπλέον, αναφέρεται ότι ανεξαρτήτου λόγου τάσεων (CSR) η φυσική άμμος αστοχεί στον εφελκυσμό και η σταθεροποιημένη άμμος συσσωρεύει αξονική παραμόρφωση στο εφελκυστικό τμήμα, υποδεικνύοντας την ασθενέστερη απόκριση της άμμου με και χωρίς σταθεροποίηση στην εφελκυστική φόρτιση. Στη σταθεροποιημένη άμμο 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.



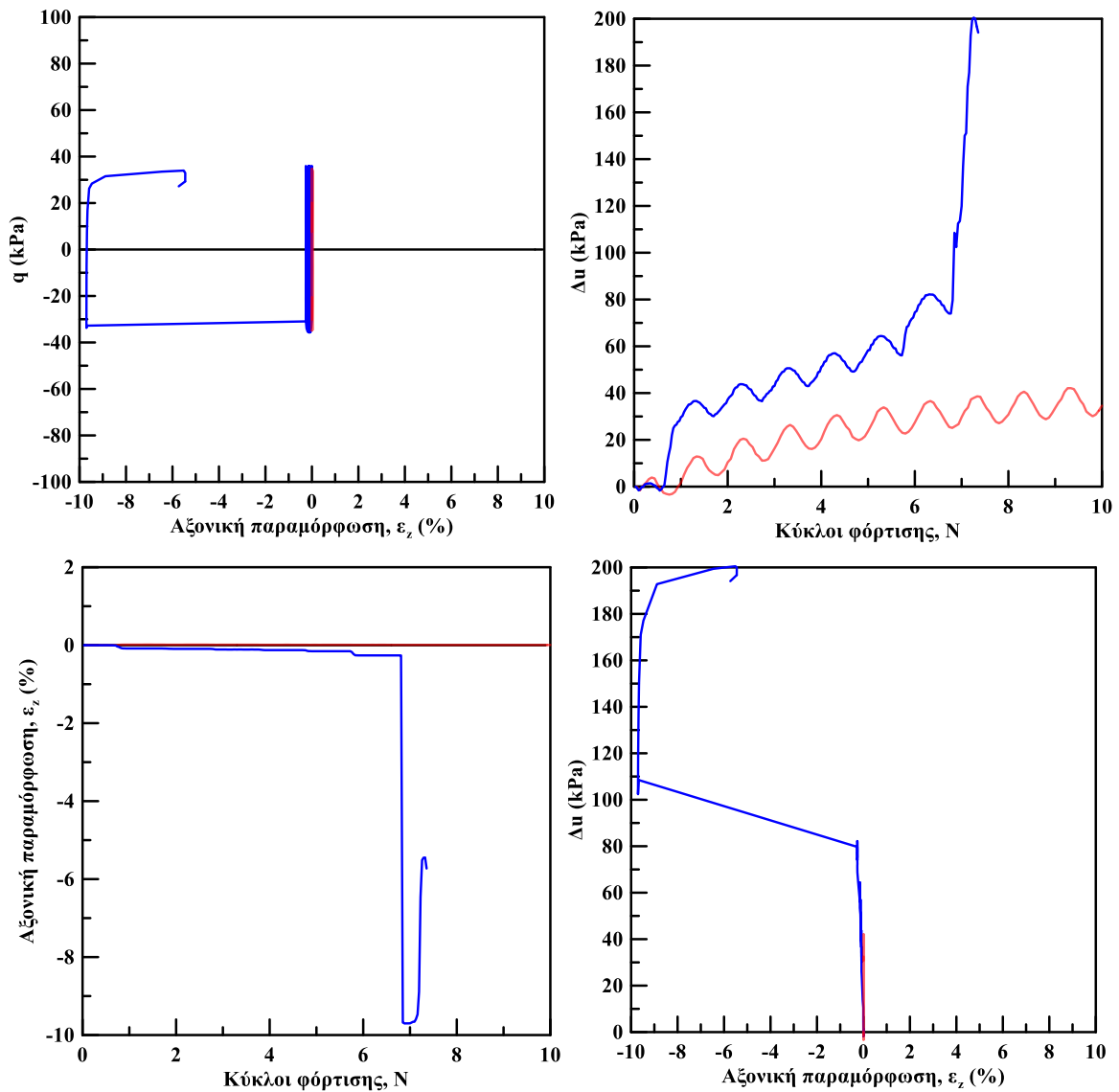
Σχήμα 5.21: Αποτελέσματα ανακυκλικής, δυναμικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 44 \text{ kPa}$



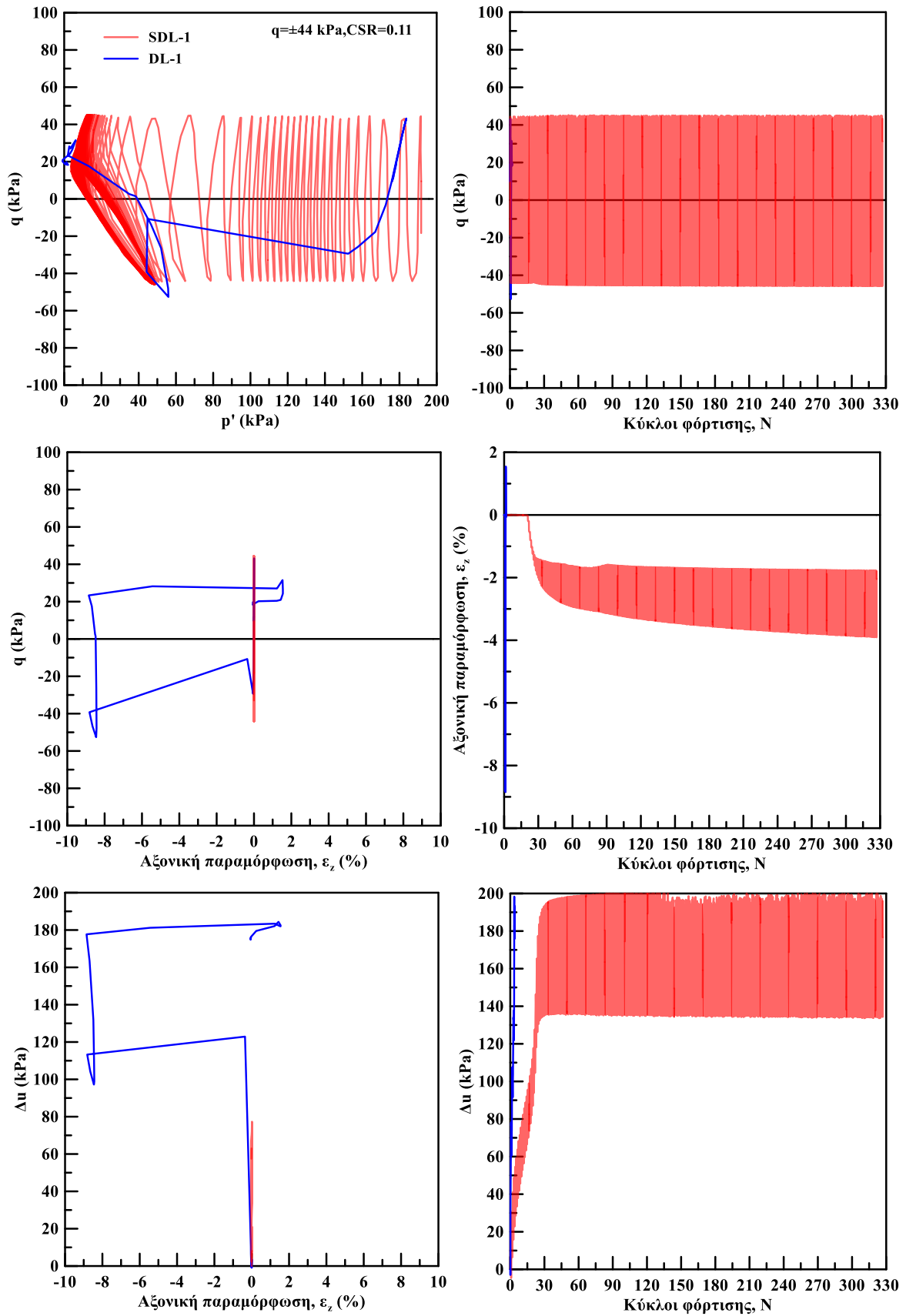
Σχήμα 5.22: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 44$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



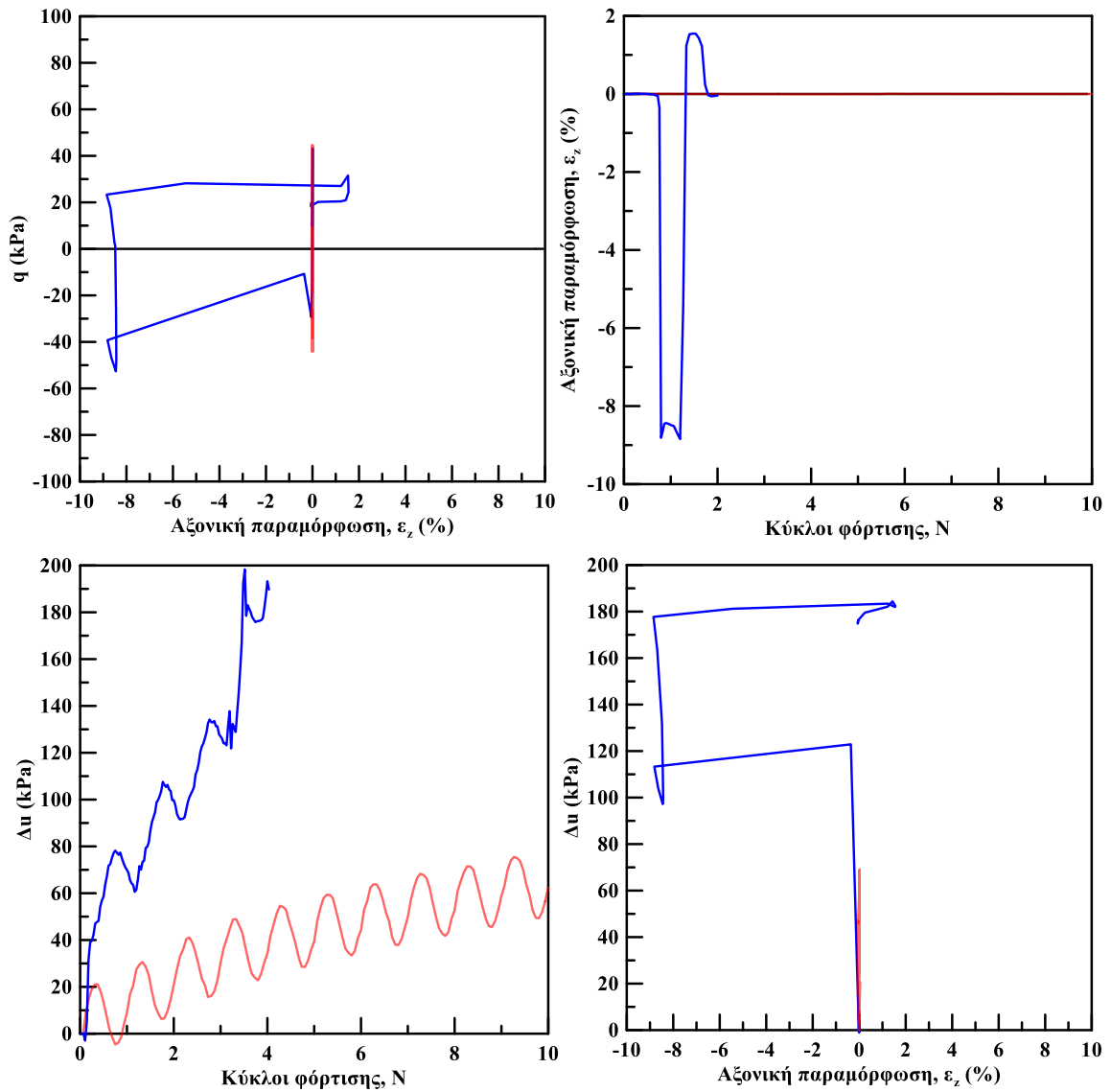
Σχήμα 5.23: Αποτελέσματα ανακυκλικής, δυναμικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 35 \text{ kPa}$



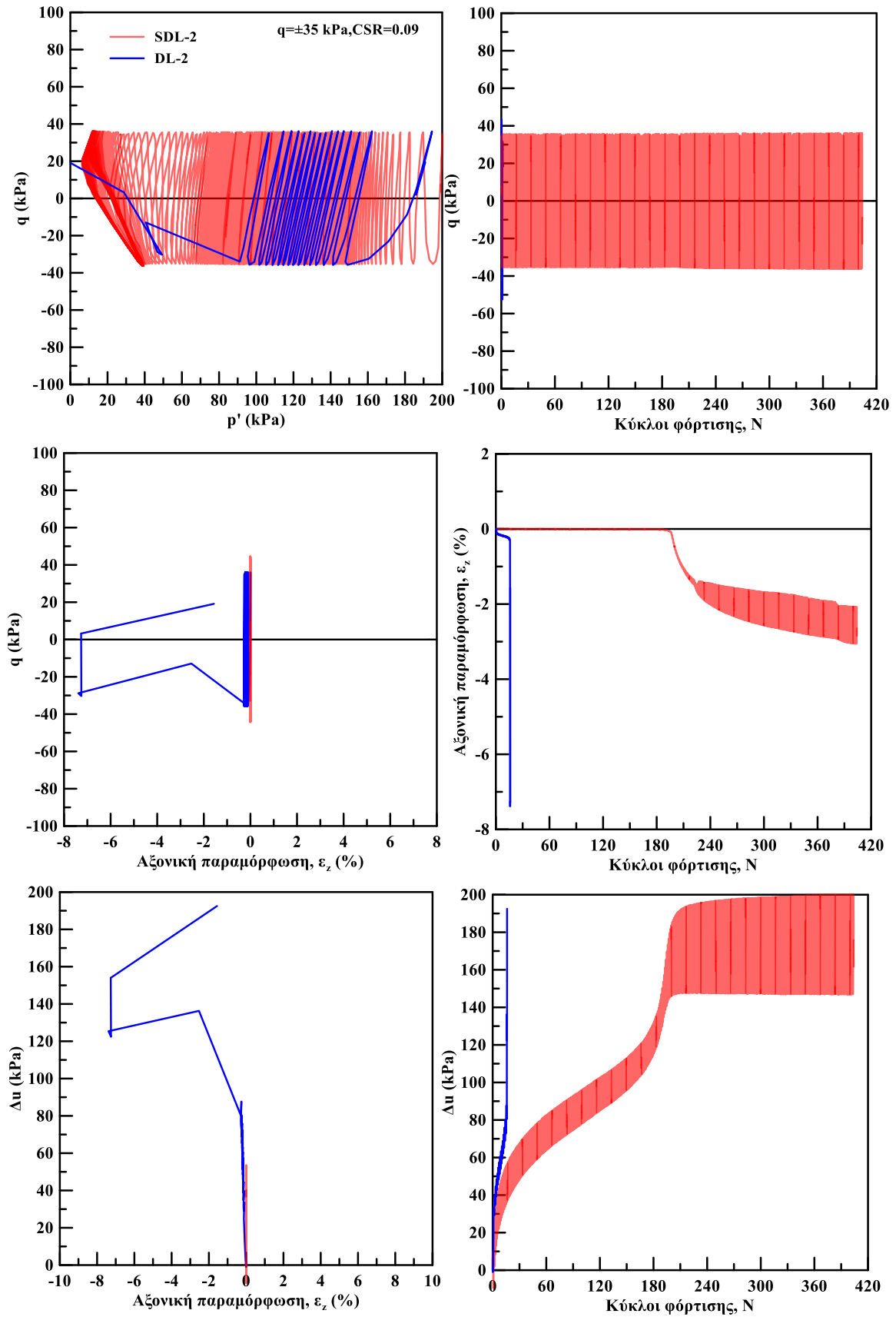
Σχήμα 5.24: Αποτελέσματα ανακυκλικής, τριαξονικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31 υπό $q = \pm 35$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



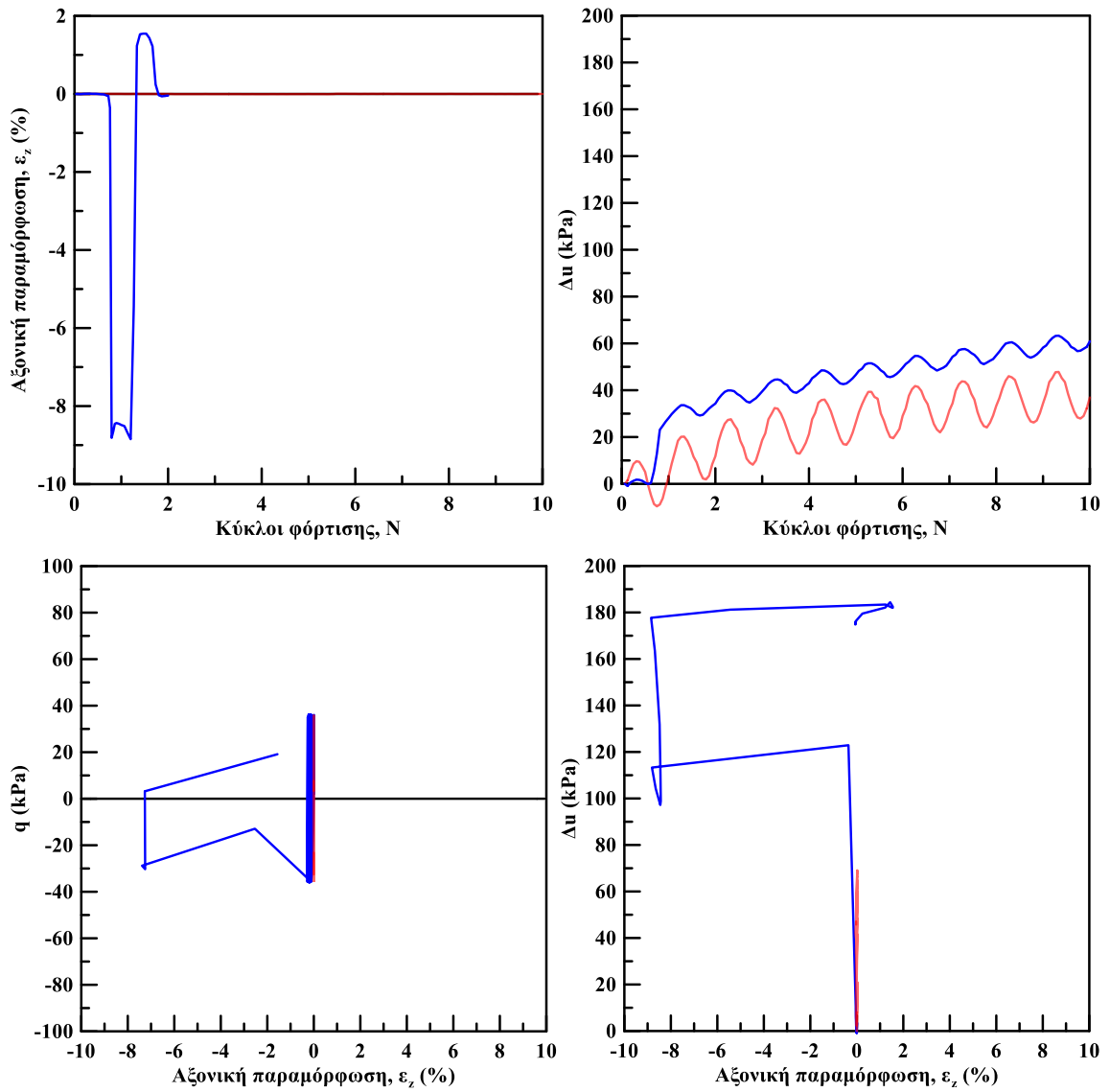
Σχήμα 5.25: Αποτελέσματα ανακυκλικής, δυναμικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 44 \text{ kPa}$



Σχήμα 5.26: Αποτελέσματα ανακυκλικής, δυναμικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο *longstone* υπό $q = \pm 44$ kPa για τους πρώτους 10 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 5.27: Αποτελέσματα ανακυκλικής, δυναμικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 35 \text{ kPa}$



Σχήμα 5.28: Αποτελέσματα ανακυκλικής, δυναμικής φόρτισης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο longstone υπό $q = \pm 35$ 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 ($\epsilon_{cyc} = 1, 2.5$ ή 5%) $N_{1\%}$, $N_{2.5\%}$ ή $N_{5\%}$. Ο λόγος επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ως προς την τάση στερεοποίησης, CSR, στην παρούσα εργασία ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4-4). Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται το απόλυτο μέγεθος της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους για τον ορισμό της ρευστοποίησης $|\epsilon_{cyc}| = 1, 2.5$ και 5% .

Τα αποτελέσματα των ανακυκλικών, αστράγγιστων, τριαξονικών δοκιμών στα χαλαρά, κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 και Longstone συνοψίζονται σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα στα Σχήματα και 5.30 σε όρους CSR - κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση N_{IL} . Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση του πλήθους κύκλων φόρτισης, N , που απαιτείται για να αναπτυχθεί αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc} = 1\%$ (Σχήμα 5. για την άμμο M31 Σχήμα 5.31 για την Longstone), $\epsilon_{cyc} = 2.5\%$ (Σχήμα 5. για την άμμο M31 5.32 για την Longstone). 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 έρευνας για την άμμο M31 ανήκουν σε μια καμπύλη (καμπύλη ρευστοποίησης-liquefaction curve) που περιγράφεται από μια εξίσωση δύναμης (Idriss & Boulanger, 2008) όπου $a = 0.200$ και $b = -0.162$. Ομοίως για την άμμο Longstone όλα τα αποτελέσματα ανήκουν στην καμπύλη ρευστοποίησης με συντελεστές εξίσωσης $a = 0.15$ και $b = 0.073$. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την περίπτωση των χαλαρών, ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμών, για δεδομένη τιμή CSR, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αρχική ρευστοποίηση και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την επίτευξη αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{cyc} = 1, 2.5$ και 5% πρακτικά ταυτίζονται.

Η επίδραση της σταθεροποίησης στις άμμους με κολλοειδή πυριτία με ποσοστό σταθεροποιητή 10% κ.β. στις καμπύλες ρευστοποίησης είναι εμφανής. Οι καμπύλες των σταθεροποιημένων άμμων είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά υποδεικνύοντας τη μεγαλύτερη ανακυκλική αντοχή τους σε σχέση με τις φυσικές. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι στις σταθεροποιημένες άμμους 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 τις φυσικές, οι καμπύλες CSR- N_{IL} , CSR- $N_{1\%}$, CSR- $N_{2.5\%}$ και CSR- $N_{5\%}$ των σταθεροποιημένων 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 στο 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 (5-6).

$$I_f = \frac{CSR_{Treated}}{CSR_{Untreated}} \quad (5-6)$$

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 για της 2 άμμους που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στα Σχήματα 5. και 5.34 (M31 και Longstone). 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 στους Πίνακες 5.4 και 5.6 (M31 και Longstone).

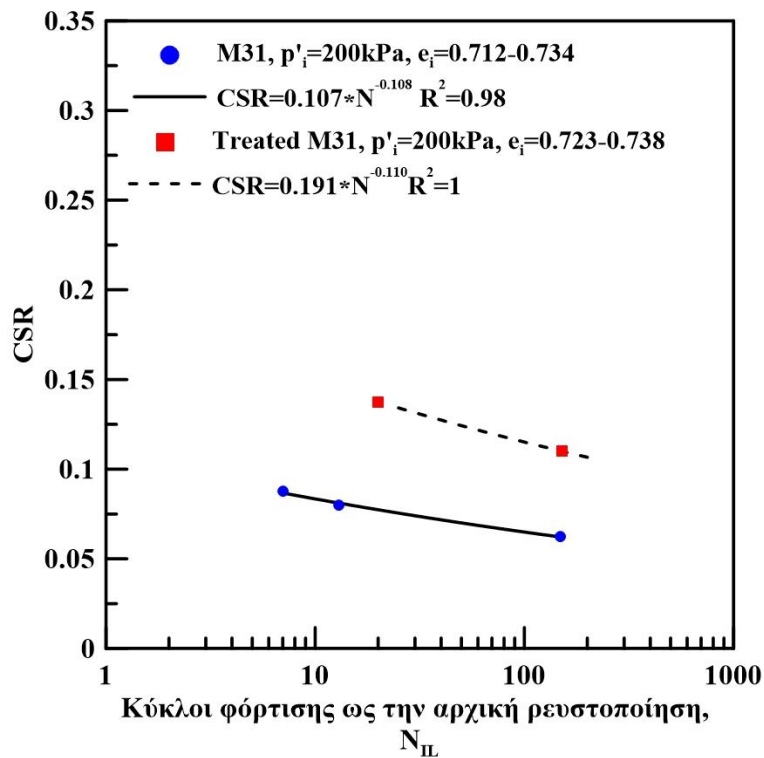
Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} (Cyclic Resistance Ratio), είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση του εδαφικού υλικού σε 15 κύκλους φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τυπικός αριθμός κύκλων σε πραγματικούς σεισμούς είναι N=10-20 για μέγεθος σεισμού M7.5 (Robertson & Wride, 1998). Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης σε ρευστοποίηση για τη χαλαρή άμμο M31 προκύπτει $CRR_{15}=0.08$ ($e_i=0.710-0.724$) ανεξαρτήτου κριτηρίου ρευστοποίησης. Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης, CRR_{15} της σταθεροποιημένης άμμου M31 εξαρτάται από 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 5.5. Ομοίως για την χαλαρή άμμο Longstone ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης ισούται με $CRR_{15}=0.09$ ενώ για την σταθεροποιημένη είναι όσος με 0.15 (εμφανώς μεγαλύτερος από αυτόν της χαλαρή άμμου). Οι τιμές του CRR_{15} της φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Longstone συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

Κριτήριο Ρευστοποίησης	Ποσοστό Βελτίωσης για N=1	Ποσοστό Βελτίωσης για N=10	Ποσοστό Βελτίωσης για N=100
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	78%	77%	76%
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	63%	62%	61%
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	79%	78%	77%

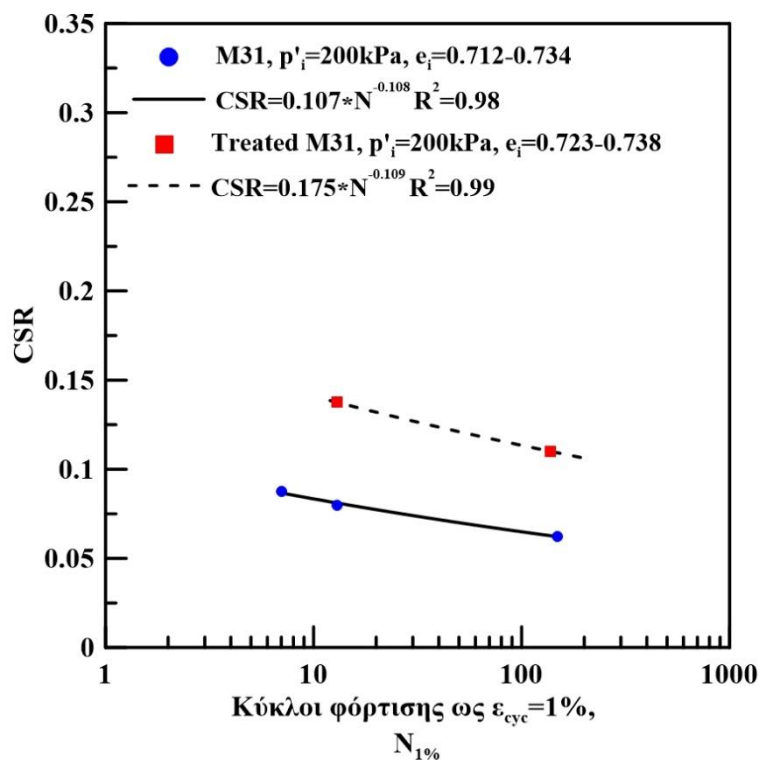
Πίνακας 5.4: Ποσοστά βελτίωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR της σταθεροποιημένης άμμου έναντι της φυσικής για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης

Κριτήριο Ρευστοποίησης	CRR ₁₅ Σταθεροποιημένης Άμμου M31	CRR ₁₅ Άμμου M31
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	0.14	0.08
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	0.13	0.08
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	0.15	0.08

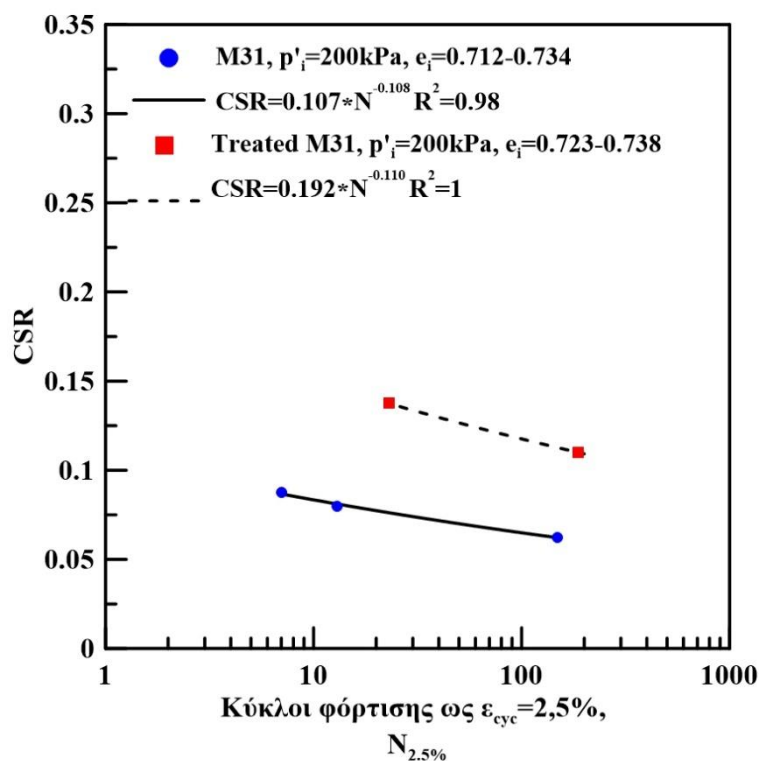
Πίνακας 5.5 Τιμές του λόγου ανακυκλικής αντίστασης, CRR₁₅ της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου M31 για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης



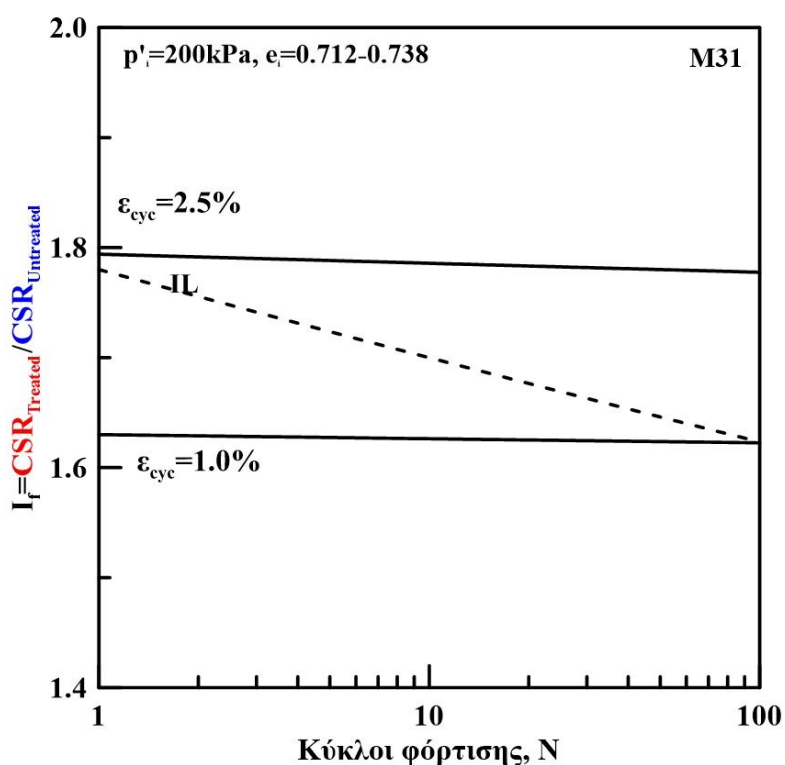
Σχήμα 5.29: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



Σχήμα 5.30: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης $N_{1\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη δυναμικής αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{cyc}=1\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



Σχήμα 5.31: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσεϊ των κύκλων φόρτισης $N_{2.5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη δυναμικής αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{cyc}=2.5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου M31.



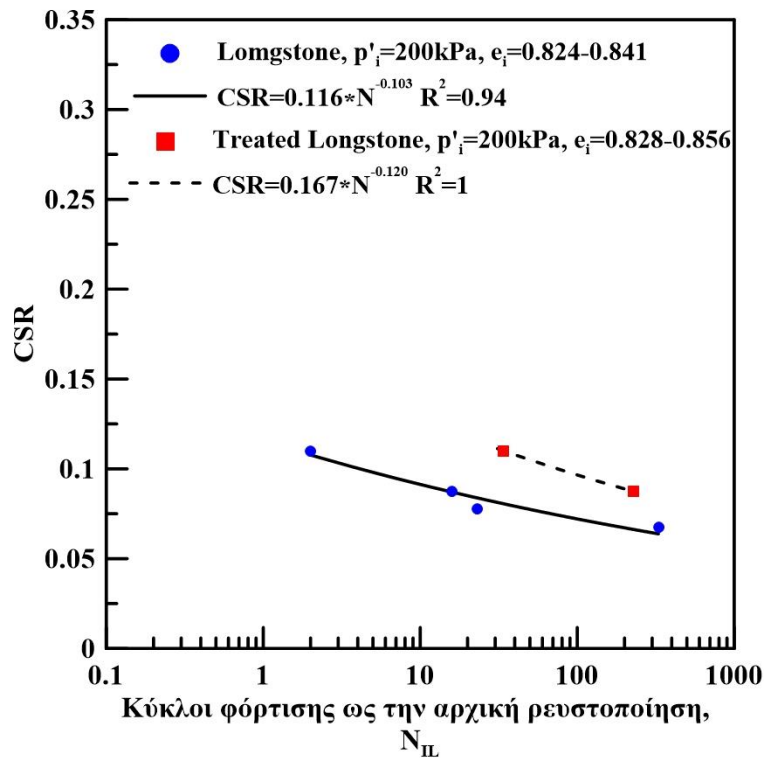
Σχήμα 5.32: Εξέλιξη του δείκτη βελτίωσης (I_f) της ανακυκλικής αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη φυσική άμμο M31 για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL , $\varepsilon_{cyc} = 1$, και 2.5%)

Κριτήριο Ρευστοποίησης	Ποσοστό Βελτίωσης για N=1	Ποσοστό Βελτίωσης για N=10	Ποσοστό Βελτίωσης για N=100
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	43%	31%	20%
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	33%	26%	19%
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	44%	33%	23%

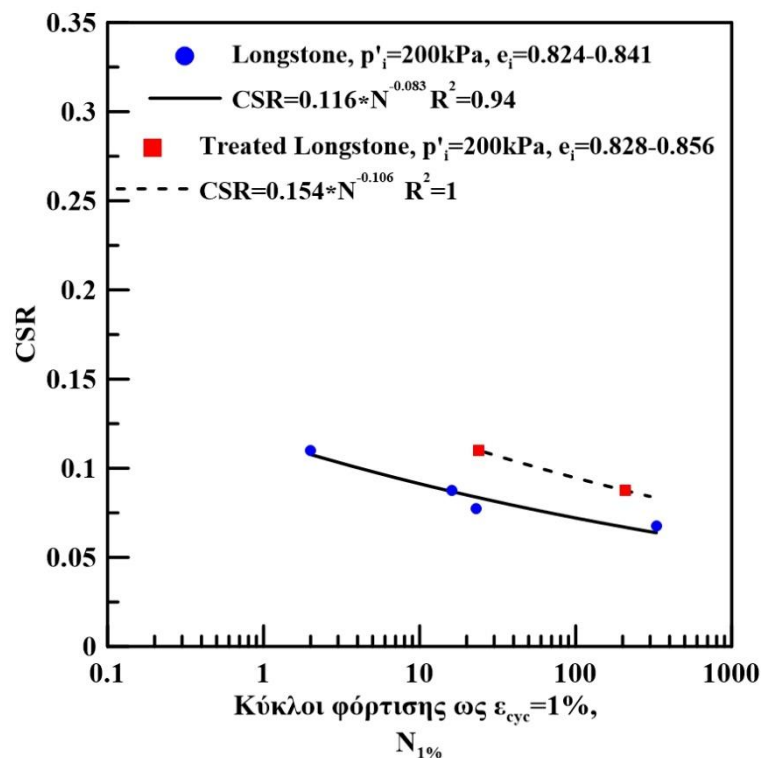
Πίνακας 5.6: Ποσοστά βελτίωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR της σταθεροποιημένης άμμου έναντι της φυσικής για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης

Κριτήριο Ρευστοποίησης	CRR ₁₅ Σταθεροποιημένης Άμμου Longstone	CRR ₁₅ Άμμου Longstone
Αρχική Ρευστοποίηση (IL)	0.12	0.09
$\epsilon_{cyc} = 1\%$	0.12	0.09
$\epsilon_{cyc} = 2.5\%$	0.13	0.09

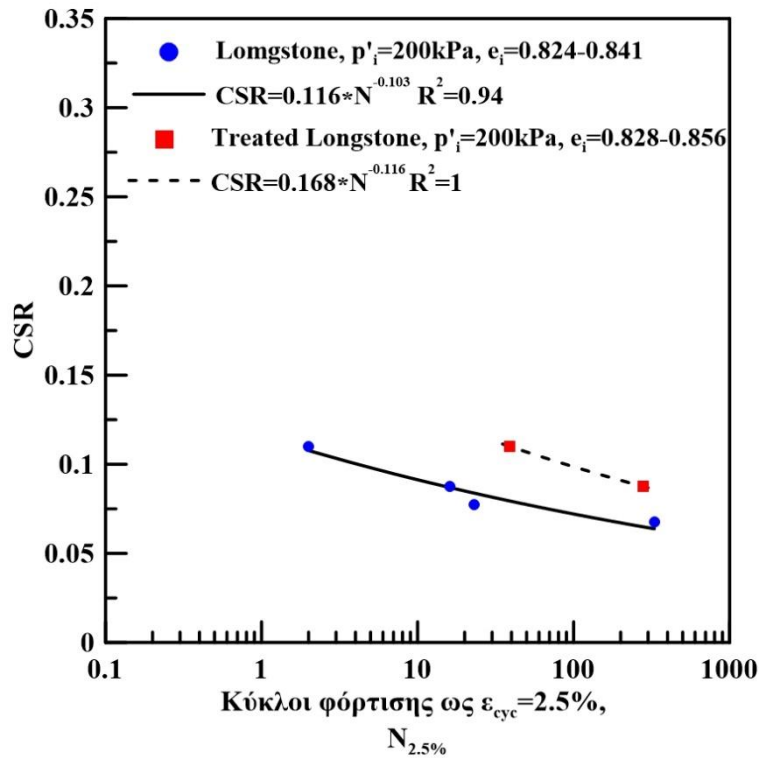
Πίνακας 5.7: Τιμές του λόγου ανακυκλικής αντίστασης, CRR₁₅ της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου Longstone για τα 4 κριτήρια ρευστοποίησης



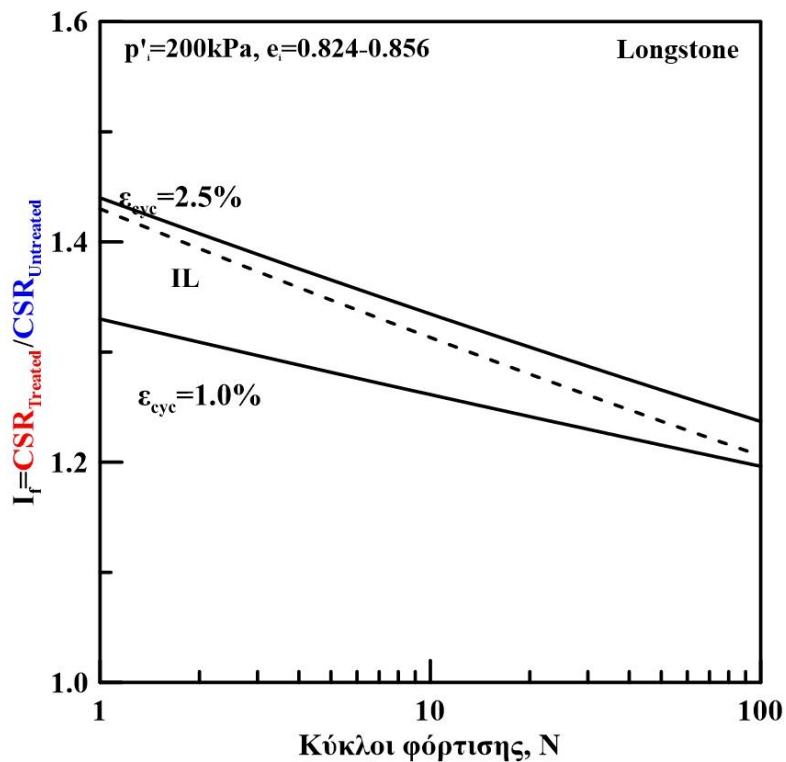
Σχήμα 5.33: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου Longstone.



Σχήμα 5.34: 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 Longstone.



Σχήμα 5.35: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης $N_{2.5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη ανακυκλικής αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{cyc} = 2.5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου Longstone.



Σχήμα 5.36: Εξέλιξη του δείκτη βελτίωσης (I_f) της ανακυκλικής αντοχής της σταθεροποιημένης άμμου σε σχέση με τη φυσική άμμο Longstone για τα 4 κριτήρια αστοχίας (IL, $\epsilon_{cyc} = 1$, και 2.5%)

Στα επόμενα σχήματα μελετάται η επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας στην εδαφική δυσμησία της άμμου υπό ανακυκλική, τριαξονική φόρτιση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Στις δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης το τέμνον μέτρο δυσμησίας υπολογίζεται για κάθε κύκλο φόρτισης από το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης, q , συναρτήσεως της αξονικής παραμόρφωσης, ε_z . Το τέμνον μέτρο δυσμησίας (E_{cyc}) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-7).

$$E_{cyc} = \frac{\Delta q_{cyc}}{\varepsilon_{cyc}} \quad (5-7)$$

Όπου:

q_{cyc} : Η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάσης q διπλού πλάτους (ανακυκλική αποκλίνουσα τάση)

ε_{cyc} : η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους (ανακυκλική παραμόρφωση)

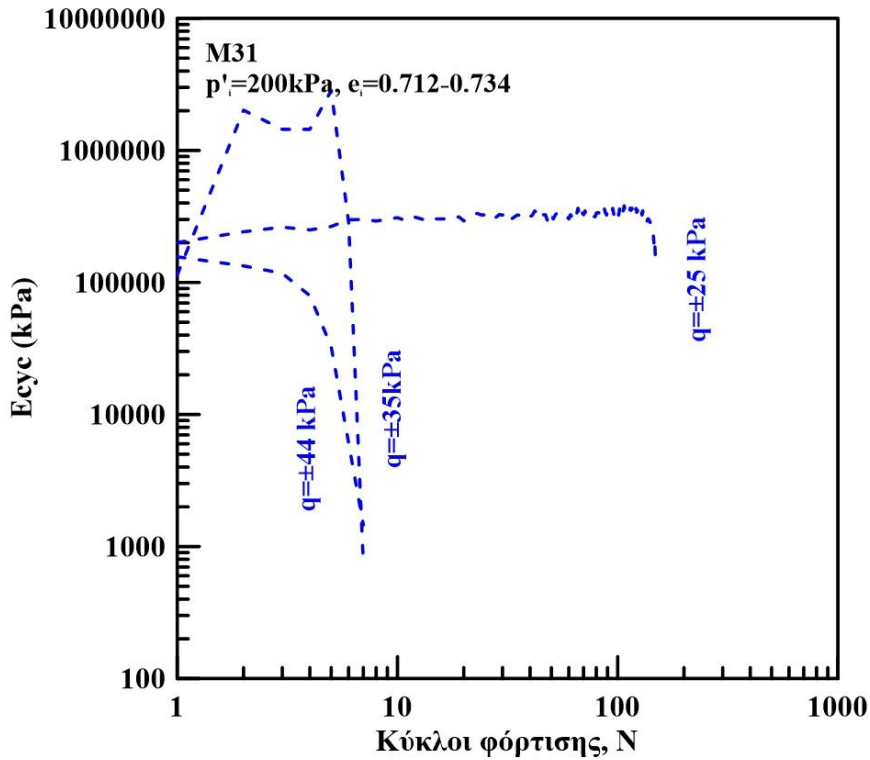
Για τον υπολογισμό των αρχικών παραμορφώσεων στο εύρος $\varepsilon_z = 0,005-1\%$ κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, τοπικοί μετρητές, LVDTs (linear variable displacement transducers), (RDP Electronics, Wolverhampton, UK), με διακριτότητα 1μ τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά, στο κεντρικό τμήμα του 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 επιβάλουν τα άκαμπτα και τραχέα άκρα.

Στα Σχήματα 5.34 και 5.37 παρουσιάζεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσμησίας E_{cyc} συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N σε λογαριθμική κλίμακα για τις άμμους M31 και Longstone αντίστοιχα, όπως προέκυψε από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των φυσικών άμμων διαχωρίζονται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης ανάλογα με το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλάτος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης, αυξάνεται η εδαφική δυσμησία. Επισημαίνεται ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσμησία 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 . Εξαιρέση αποτελεί η δοκιμή με πλάτος επιβαλλόμενης ανακυκλικής $q=44\text{kPa}$ για την άμμο Longstone όπου η πτώση της δυσμησίας εμφανίζεται από τον δεύτερο κύκλο φόρτισης.

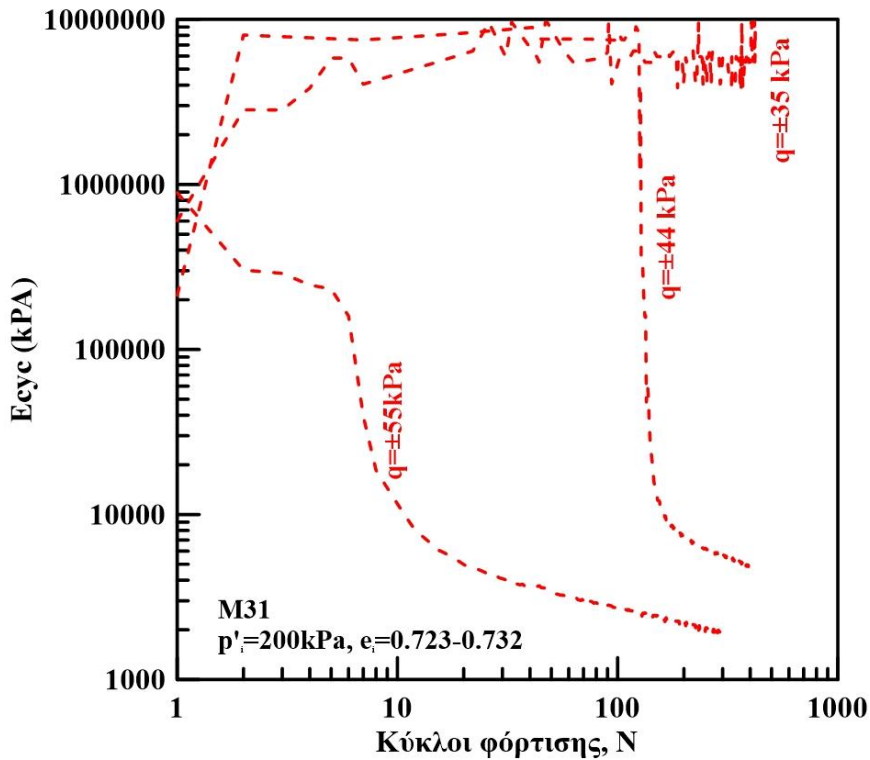
Στα Σχήματα 5.35 και 5.38 παρουσιάζεται η διακύμανση του τέμνοντος μέτρου δυσμησίας E_{cyc} συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N η οποία παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα για τις σταθεροποιημένες με κολλοειδή πυριτία άμμους M31 και Longstone αντίστοιχα, όπως προέκυψε από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των σταθεροποιημένων άμμων διαχωρίζονται από τον πρώτο κύκλο φόρτισης ανάλογα με το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πλάτος της ανακυκλικής, τάσης αυξάνεται η εδαφική δυσμησία. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης η δυσμησία της σταθεροποιημένης άμμου είναι περίπου σταθερή, ενώ μετά από κάποιο κύκλο φόρτισης η

δυστησία μειώνεται σταδιακά. Η απομείωση της δυστησίας καθυστερεί να εμφανιστεί όσο μειώνεται η ανακυκλική τάση q .

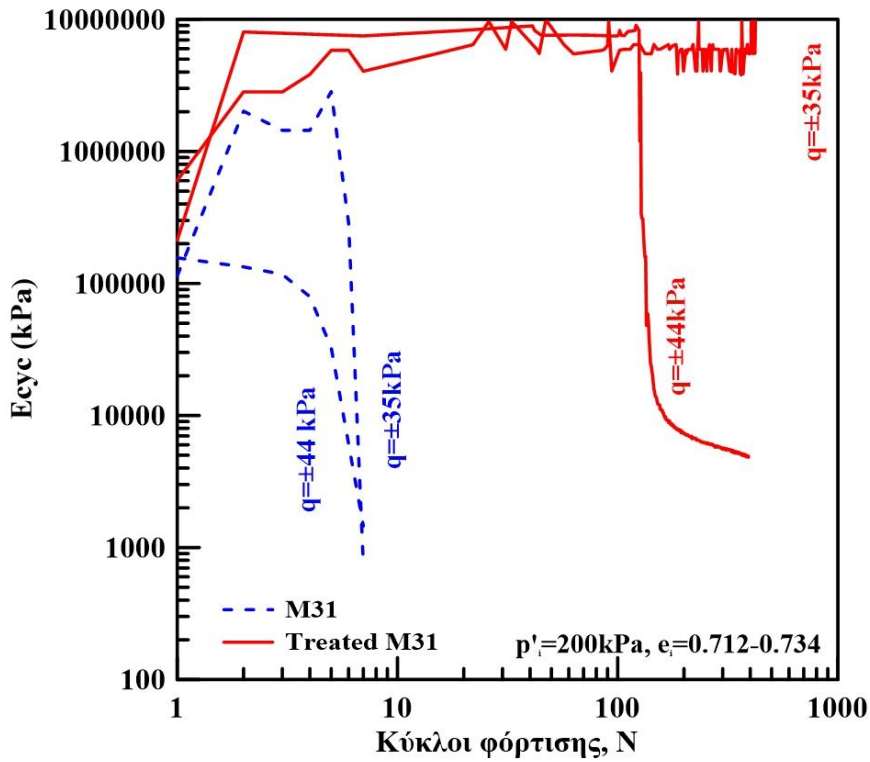
Τέλος για να μελετηθεί η επίδραση της σταθεροποίησης στην ανακυκλική δυστησία της χαλαρής άμμου συνοψίζονται στα Σχήμα 5.36 και 5.39 σε όρους τέμνοντος μέτρου δυστησίας E_{cyc} συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής, δυναμικής φόρτισης για τη φυσική (μπλε καμπύλες) και για σταθεροποιημένη (κόκκινες καμπύλες) άμμο παρόμοιας πυκνότητας. Το μέτρο δυστησίας της φυσικής άμμου μειώνεται ραγδαία και πρακτικά μηδενίζεται, ενώ η δυστησία της σταθεροποιημένης άμμου αρχίζει να απομειώνεται σταδιακά. Όταν η επιβαλλόμενη ανακυκλική τάση είναι μεγάλη η δυστησία της σταθεροποιημένης χαλαρής άμμου είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της φυσικής άμμου. Ωστόσο, ακόμη και υπό αυτό το μέγεθος ανακυκλικής τάσης η δυστησία της σταθεροποιημένης άμμου μειώνεται σταδιακά και όχι ακαριαία όπως στην περίπτωση της φυσικής άμμου.



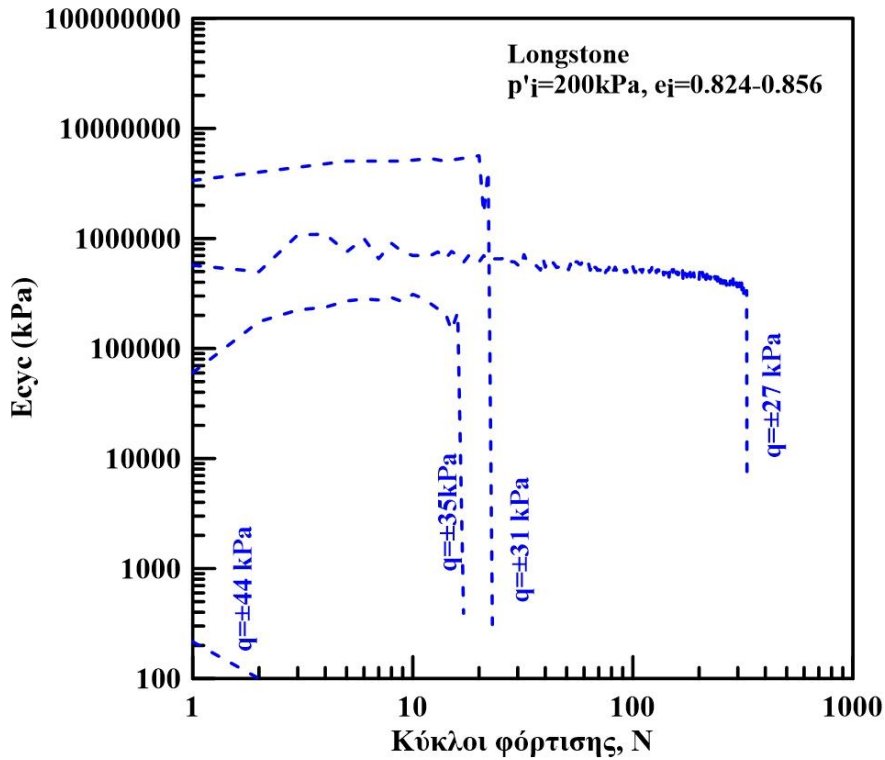
Σχήμα 5.34: Μέτρο δυσσημίας συναρτήσεϊ των κύκλων φόρτισης της άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q



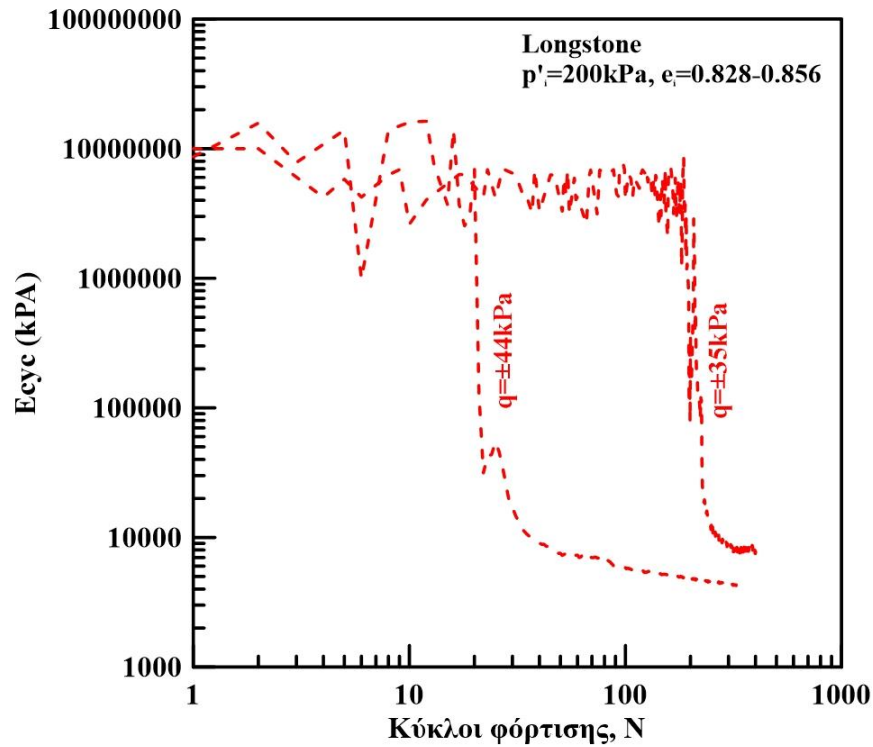
Σχήμα 5.35: Μέτρο δυσσημίας συναρτήσεϊ των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .



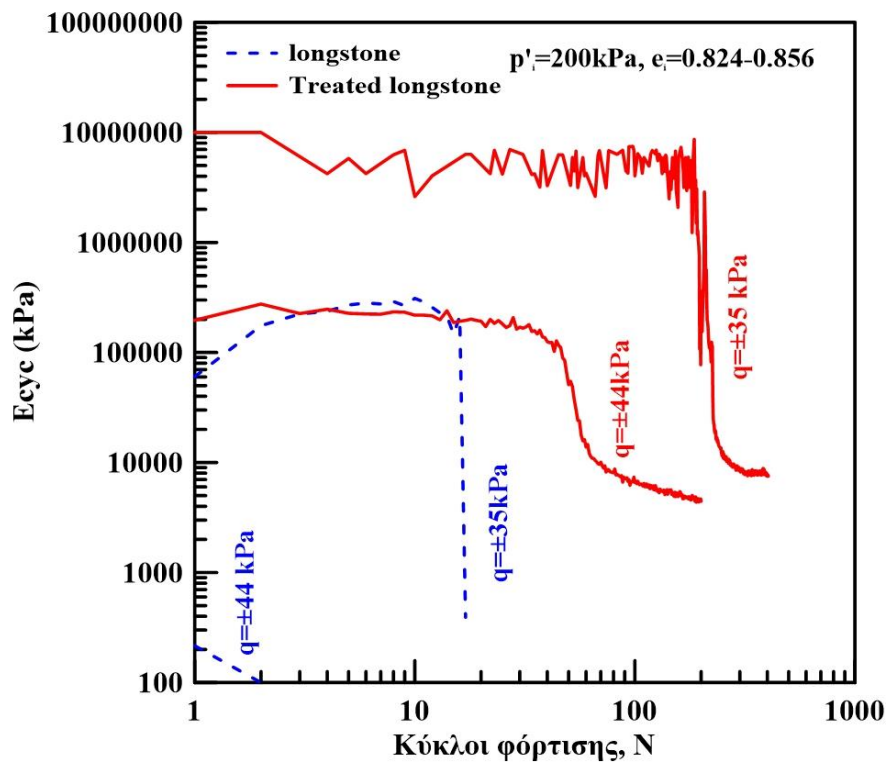
Σχήμα 5.36: Επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο δυσμησίας της χαλαρής άμμου M31 υπό ανακυκλική φόρτιση



Σχήμα 5.37: Μέτρο δυσμησίας συναρτήσεϊ των κύκλων φόρτισης της άμμου longstone από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q.



Σχήμα 5.38: Μέτρο δυσμησίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου *longstone* από ανακυκλικές δοκιμές. Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης q .

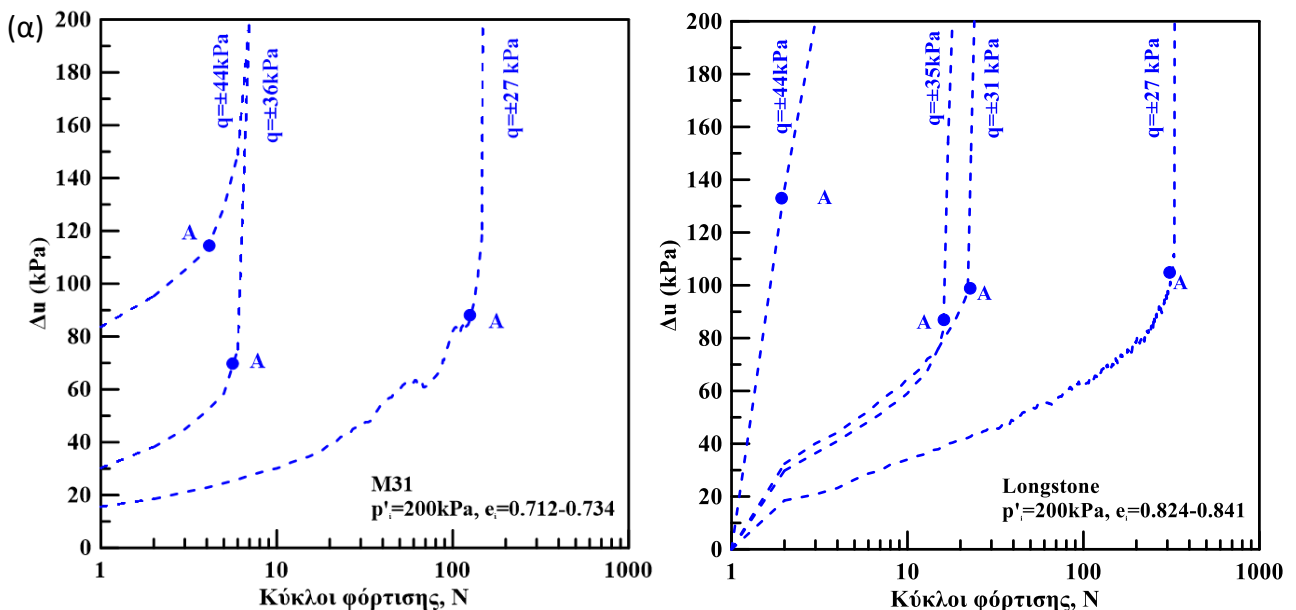


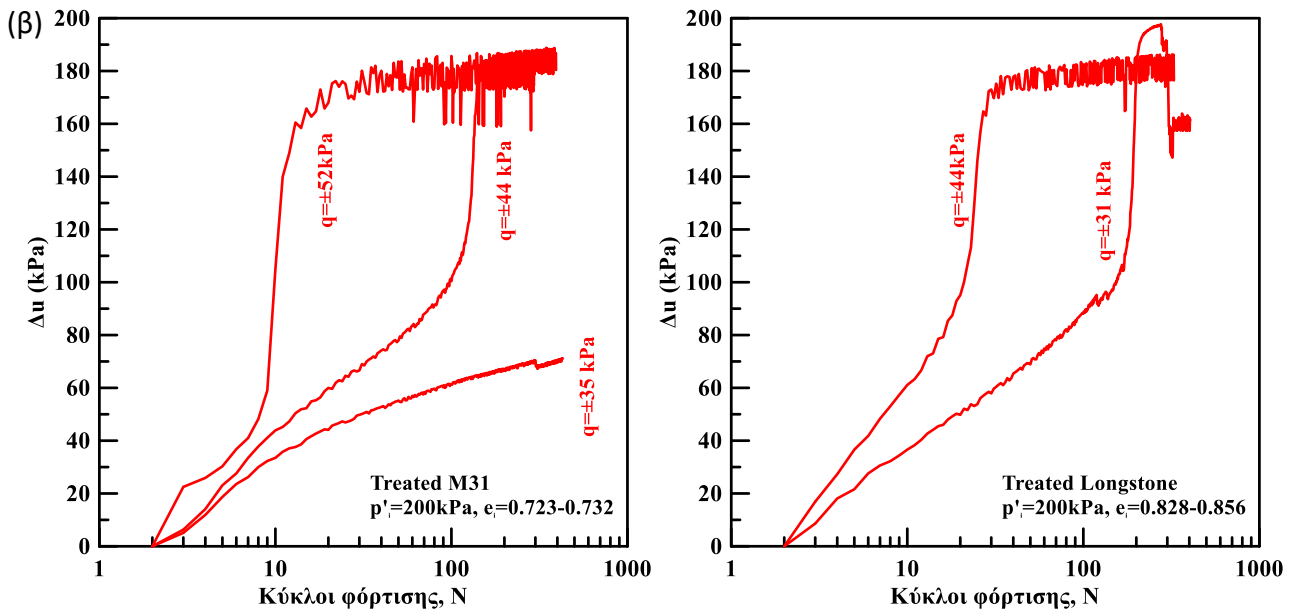
Σχήμα 5.39: Επίδραση της σταθεροποίησης στο μέτρο δυσμησίας της χαλαρής άμμου *longstone* υπό ανακυκλική φόρτιση

5.6 Σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς της άμμου Longstone με την άμμο M31

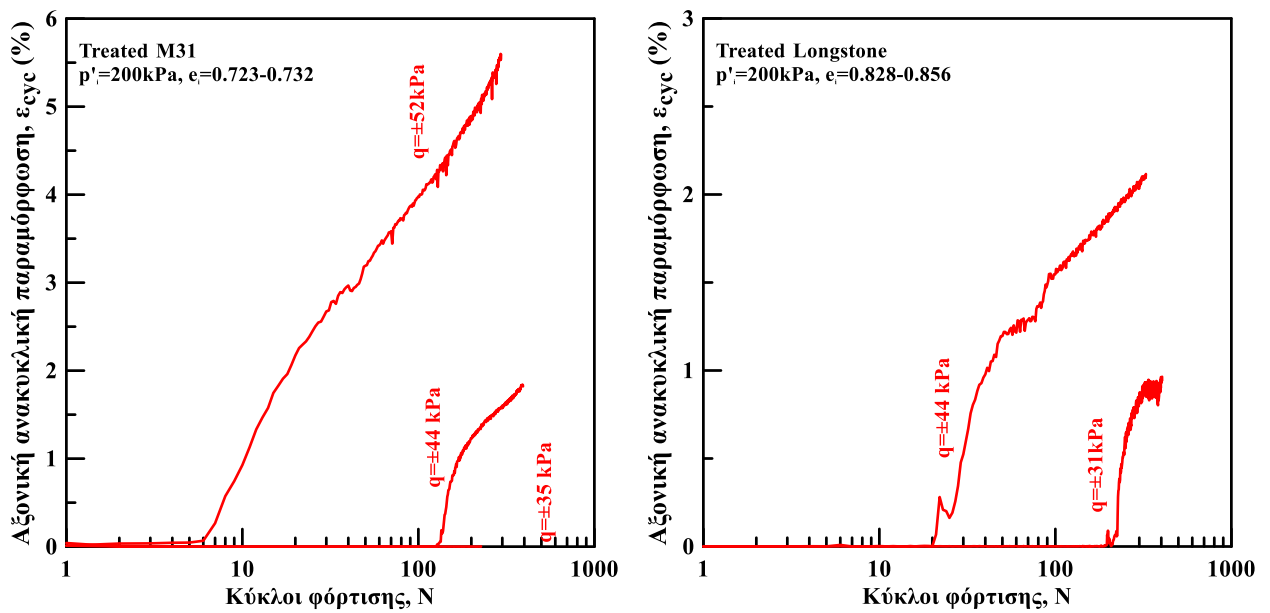
Σε αυτήν την ενότητα συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των ανακυκλικών δοκιμών για άμμο Longstone και για άμμο M31 (φυσικής και σταθεροποιημένης) ώστε να γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους. Ειδικότερα στο Σχήμα 5.40(α) παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τις φυσικές άμμου M31 και Longstone και στο Σχήμα 5.40 (β) η σύγκριση της εξέλιξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων (Δu) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τις σταθεροποιημένες άμμου M31 και Longstone. Οι τιμές της υπερπίεσης πόρων λαμβάνονται στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης όταν η αποκλίνουσα τάση q μηδενίζεται. Παρατηρώντας το Σχήμα 5.40 (α) και το (β) συμπεραίνουμε ότι στις δοκιμές με μεγάλη επιβαλλόμενη ανακυκλική αποκλίνουσα τάση q η υπερπίεση του υγρού των πόρων είναι μεγαλύτερη στην άμμο Longstone ενώ σε μικρότερες τάσεις q η αρχική υπερπίεση είναι περίπου ίδια. Επιπρόσθετα μια ακόμη διαφορά που παρατηρείται είναι ότι σε μεγαλύτερη επιβαλλόμενες τάσεις η άμμος M31 ξεκινάει να ρευστοποιείται πιο αργά από την Longstone ενώ σε μικρές επιβαλλόμενες τάσεις συμβαίνει το αντίθετο.

Στο Σχήμα 5.41 παρουσιάζεται η αξονική ανακυκλική παραμόρφωση (ϵ_{cyc}) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τις σταθεροποιημένες άμμου M31 και Longstone. Σε όλες τις δοκιμές 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. Αν συγκρίνουμε όμως τις 2 άμμου μεταξύ τους παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των υψηλών αρχικών επιβαλλομένων τάσεων η αύξηση των παραμορφώσεων γίνεται πιο γρηγορά στην άμμο Longstone ενώ στην περίπτωση των χαμηλών η αύξηση γίνεται πιο γρηγορά στην άμμο M31. Παράλληλα παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την επιβαλλόμενη τάση q η άμμος Longstone σε υψηλούς κύκλους φόρτισης έχει μικρότερες παραμορφώσεις από την άμμο M31.





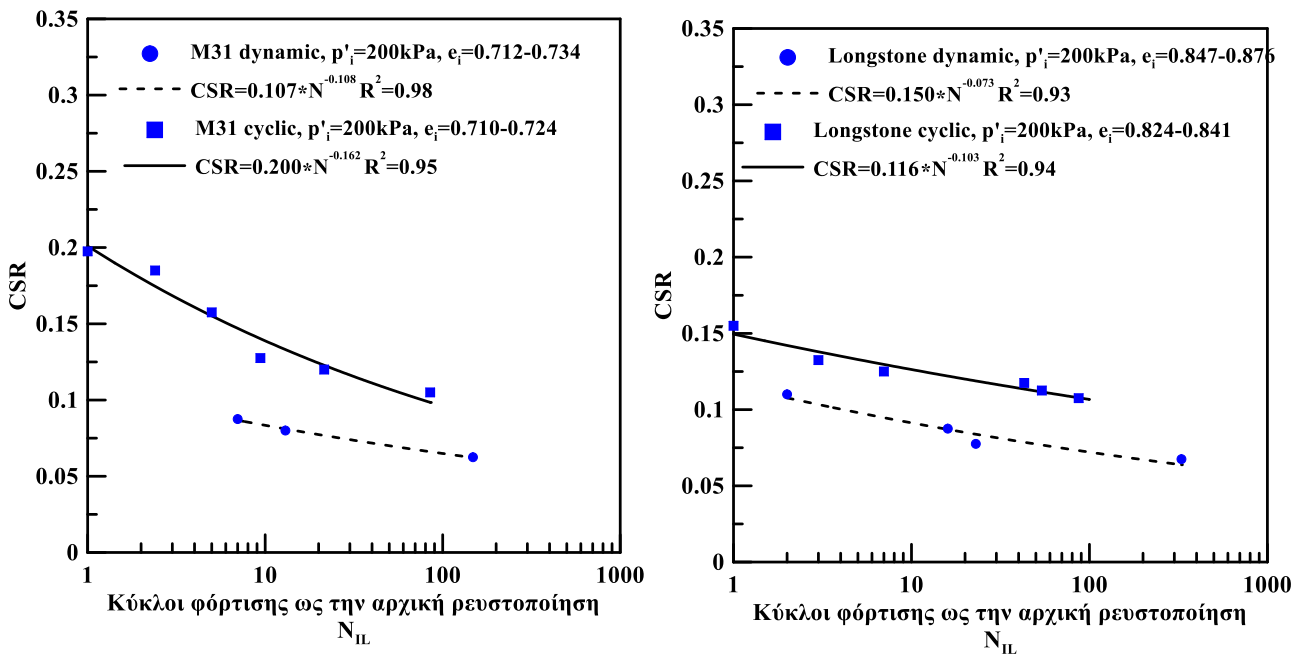
Σχήμα 5.40: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης (α) της φυσικής άμμου M31 και longstone και (β) της σταθεροποιημένης.



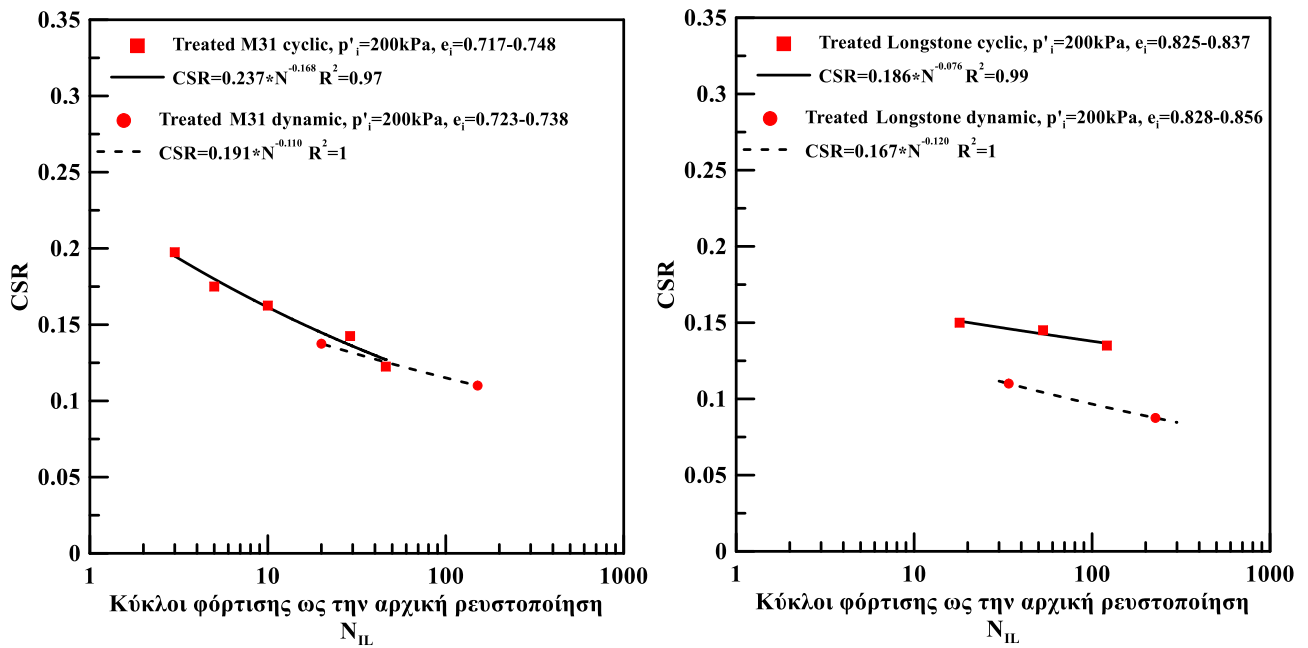
Σχήμα 5.41: Επίδραση του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της αξονικής ανακυκλικής παραμόρφωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 (αριστερά) και longstone (δεξιά).

5.7 Σύγκριση των τριαξονικών δοκιμών σε ανακυκλική και δυναμική φόρτιση

Σε αυτήν την ενότητα συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των τριαξονικών δοκιμών σε ανακυκλική και δυναμική φόρτιση για άμμο Longstone και για άμμο M31 (φυσικής και σταθεροποιημένης) ώστε να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των 2 αυτών δοκιμών. Ειδικότερα στο Σχήμα 5.42 παρουσιάζεται η σύγκριση της εξέλιξη λόγου ανακυκλικής τάσης (CSR) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για την άμμο M31 και στο Σχήμα 5.43 για την άμμο Longstone. Παρατηρούμε ότι για τον ίδιο αριθμό κύκλων οι φυσικές άμμοι στην ανακυκλική φόρτιση ρευστοποιείται για μεγαλύτερη τάση ενώ στη δυναμική σε μικρότερη. Το ίδιο γίνεται και στις σταθεροποιημένες άμμους. Ωστόσο σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία θα περιμέναμε η δοκιμή με την μεγαλύτερη συχνότητα (μικρότερη περίοδος) δηλαδή η δυναμική να ρευστοποιείται με πιο αργό ρυθμό.

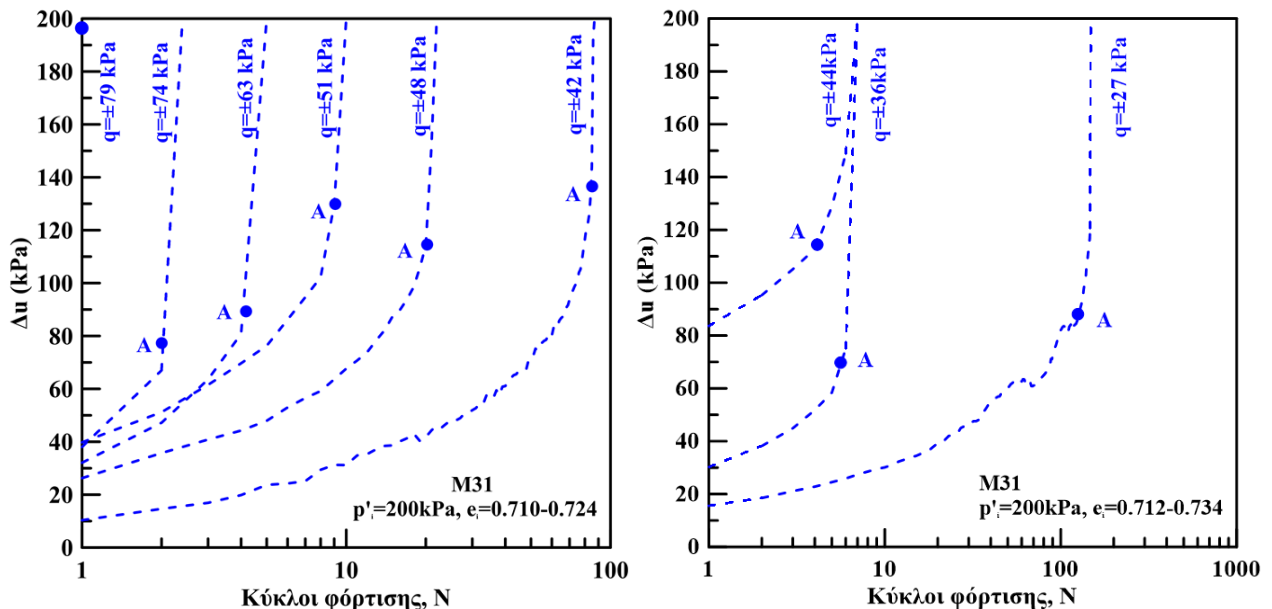


Σχήμα 5.42: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση δυναμικής και ανακυκλικής φόρτισης για την άμμο M31 (δεξί σχήμα) και για την άμμο Longstone (αριστερό σχήμα).

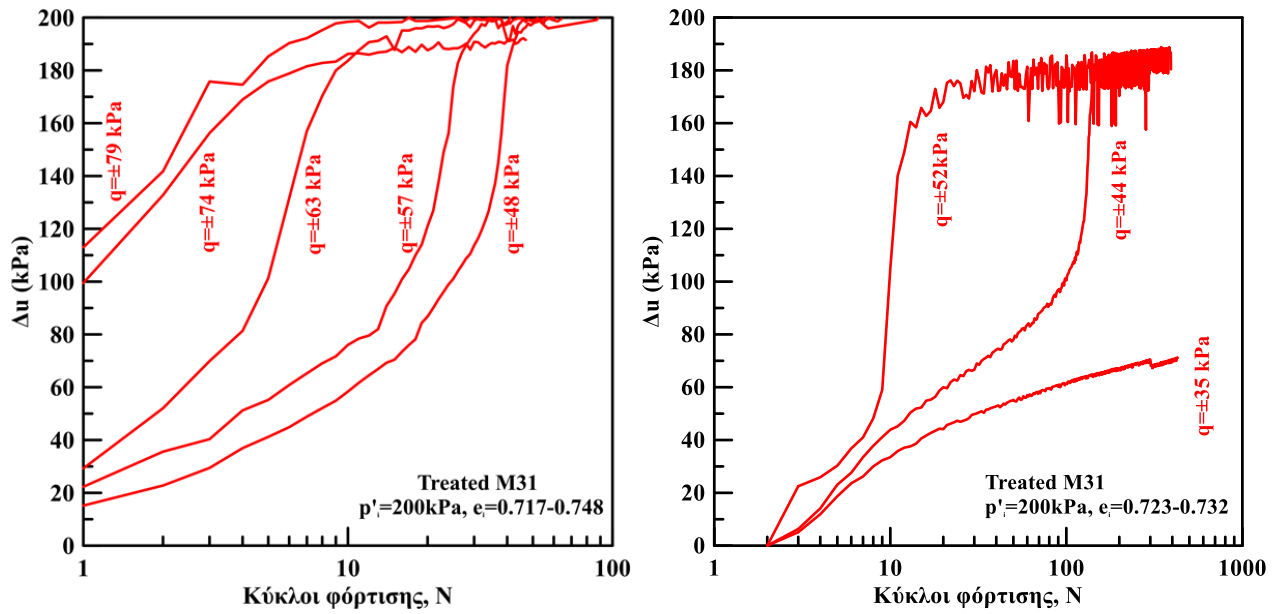


Σχήμα 5.43: Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_{IL} που απαιτούνται για την επίτευξη της «αρχικής» ρευστοποίησης. Σύγκριση δυναμικής και ανακυκλικής φόρτισης για την σταθεροποιημένη άμμο M31 (δεξί σχήμα) και για την σταθεροποιημένη άμμο Longstone (αριστερό σχήμα).

Στο Σχήμα 5.44 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης της ανακυκλικής (αριστερά) και δυναμικής φόρτισης (δεξιά) του λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Παρατηρούμε ότι η μορφή των διαγραμμάτων είναι η ίδια αλλά και από εδώ συμπεραίνεται ότι η ρευστοποίηση στην δυναμική φόρτιση γίνεται σε μικρότερους κύκλους φόρτισης για παρόμοιες πυκνότητες. Το ίδιο συμβαίνει και στην σταθεροποιημένη άμμο (Σχήμα 5.45).



Σχήμα 5.44: Σύγκριση επίδρασης του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της φυσικής άμμου M31 (αριστερά ανακυκλική φόρτιση δεξιά η δυναμική)



Σχήμα 5.45: Σύγκριση επίδρασης του μεγέθους της επιβαλλόμενης αποκλίνουσας τάσης στην ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων συναρτήσει των κύκλων φόρτισης της σταθεροποιημένης άμμου M31 (αριστερά ανακυκλική φόρτιση δεξιά η δυναμική).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε, μέσω μιας σειράς εργαστηριακών δοκιμών, η επίδραση της χημικής βελτίωσης στις μηχανικές ιδιότητες μη συνεκτικών εδαφικών υλικών (άμμος M31 και Longstone), χρησιμοποιώντας υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή (περιεκτικότητας CS=10%). Αναλύοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ανακυκλική συμπεριφορά εφόσον στόχος της σταθεροποίησης είναι η αποφυγή ρευστοποίησης. Αν και η μονοτονική και ανακυκλική συμπεριφορά σταθεροποιημένων άμμων έχει μελετηθεί ενδελεχώς στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ (Georgiannou et al., 2017, Pavloroulou and Georgiannou, 2020, Pavloroulou 2023) στην παρούσα διπλωματική έγιναν για πρώτη φορά δυναμικές δοκιμές.

Στις αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές υπάρχει ανάπτυξη πίεσης πόρων στα σταθεροποιημένα δοκίμια, όπως συμβαίνει και στα κορεσμένα φυσικά δοκίμια άμμου. Η περίοδος της ανακυκλικής φόρτισης, το μέγεθος του εξεταζόμενου δοκιμίου και οι θέσεις μέτρησης της πίεσης πόρων (κεφαλή και βάση δοκιμίου) είναι καθοριστικοί παράγοντες στην καταγραφή της από μετρητές της συσκευής.

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

Ο παράγοντας που φαίνεται να έχει καθοριστική σημασία στη συμπεριφορά του δοκιμίου της σταθεροποιημένης άμμου στην ανακυκλική φόρτιση στους πρώτους κύκλους, είναι η πυκνότητα του. Παρατηρούμε ότι όσα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το αντίστοιχο φυσικό ήταν πιο χαλαρά, ενώ τα δοκίμια που εμφανίζουν παραμορφώσεις που προσομοιάζουν τις παραμορφώσεις του φυσικού ήταν πιο πυκνά.

Η σχέση της απομείωσης του μέτρου διάτμησης συναρτήσει της αναπτυσσόμενης αξονικής παραμόρφωσης είναι κοινή για τα σταθεροποιημένα και τα φυσικά δοκίμια. Σταθεροποιημένα και μη δοκίμια διαφέρουν στον αριθμό κύκλων φόρτισης στον οποίο υφίστανται την εκάστοτε απομείωση του μέτρου διάτμησης τους.

Η ανάπτυξη της υπερπίεσης του υγρού των πόρων για μικρές τιμές του λόγου ανακυκλικής τάσης q και η συσσώρευση της αξονικής παραμόρφωσης φαίνεται να καθυστερεί στη σταθεροποιημένη γωνιώδη άμμο Longstone συγκριτικά με τη σταθεροποιημένη άμμο M31 όπου οι κόκκοι είναι στρογγυλεμένοι.

Το μέτρο δυσμηνσίας της φυσικής άμμου μειώνεται ραγδαία και πρακτικά μηδενίζεται, ενώ η δυσμηνσία της σταθεροποιημένης άμμου αρχίζει να απομειώνεται σταδιακά και δεν μηδενίζεται.

Στη σταθεροποιημένη άμμο Longstone η παραμένουσα τιμή της δυσμησίας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της σταθεροποιημένης άμμου M31.

Το ποσοστό βελτίωσης της ανακυκλικής αντοχής τόσο για την ανακυκλική όσο για την δυναμική φόρτιση είναι μεγαλύτερο για στην άμμο M31 από ότι στην άμμο Longstone. Επομένως, η σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτρία φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική στην περίπτωση της άμμου με τους πιο στρογγυλεμένους κόκκους.

Στην ανακυκλική φόρτιση τόσο για την άμμο M31 όσο και την άμμο Longstone ο μηδενισμός της ενεργού τάσης (ρευστοποίηση) γίνεται πιο αργά από ότι στην δυναμική φόρτιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία

- ✓ Agapoulaki G.I. and Papadimitriou A.G. (2018), Rheological Properties of Colloidal Silica Grout for Passive Stabilization Against Liquefaction. *Mater. Civ. Eng.* 30 (10): 1-11.
- ✓ Andrianopoulos K. I., Agapoulaki G. I., Papadimitriou A. G. (2016), “Simulation of seismic response of passively stabilized sand”, *Geotechnical Research*, ICE Publishing, 3(2): 40-53.
- ✓ Bergna, H. E. (1994). *Colloid Chemistry of Silica. Advances in Chemistry*; American Chemical Society (pp. 1–47).
- ✓ Brinker C.J. and Scherer G.W. (eds) (1990), *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press, Cambridge, MA, USA.
- ✓ 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.
- ✓ Mitigation Using Colloidal Silica Stabilizer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138, p. 1334 – 1348.
- ✓ Díaz-Rodríguez J.A., Antonio-Izarraras V.M., Bandini P. and López-Molina J.A. (2008), Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. *Canadian Geotechnical Journal* 45(10): 1345–1355.
- ✓ 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.
- ✓ 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.
- ✓ Kolbuszewski J.J. (1948), An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand. *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, 21-30 June 1948, 158-165.
- ✓ Moradi G. and S.Seyedi (2015), Effect of Sampling Method on Strength of Stabilized Silty Sandswith Colloidal Nano Silica.*J.Civ.Eng.Res.5* (6): 129-135.
- ✓ Pamuk A., Gallagher P.M, Thomas Z.F, (2007) Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, p.864–874
- ✓ Pavlopoulou E.M, Georgiannou V.N. (2021), The effect of colloidal silica aqueous gel on the monotonic and cyclic response of sands, *Geotechnical Research* (under publication).
- ✓ Porcino D., Marcianò V., and Granata R. (2011), Undrained cyclic response of silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal* 6(3): 155–170.
- ✓ Porcino D., Marcianò V., and Granata R. (2012), Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand. *Canadian Geotechnical Journal* 49(10): 1117– 1133.
- ✓ 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.
- ✓ 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.