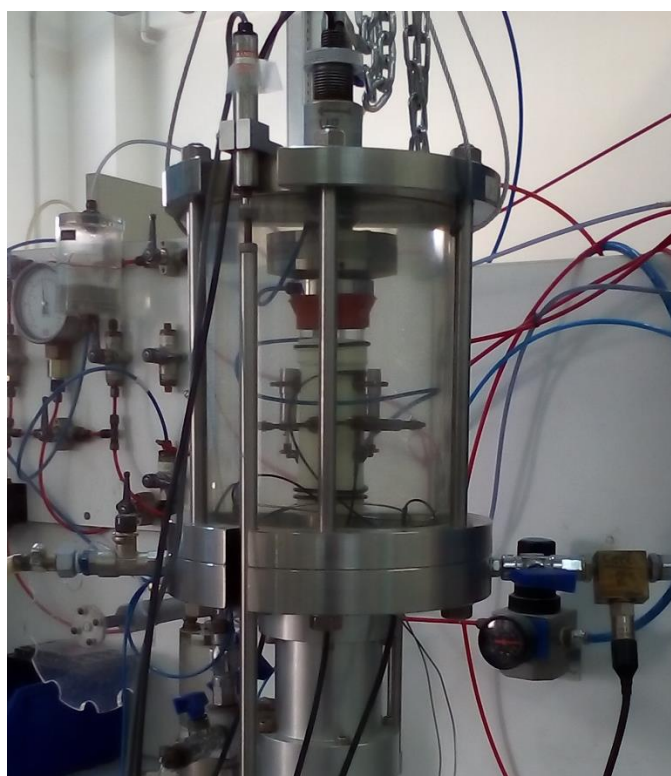




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών,
πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία**



ΕΛΕΝΗ Κ. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΑΓΚΟΥΝΤΟ

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

Αθήνα, Μάρτιος 2019

**Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς μη συνεκτικών
εδαφών, πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με κολλοειδή πυριτία**

Ευχαριστίες

Με την παράδοση αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ο κύκλος των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π. και σηματοδοτείται μια νέα αρχή. Θα ήθελα, λοιπόν, να δώσω ένα ολόκληρο ευχαριστώ σε όσους και όσες ήταν στο πλάι μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κυρία Β. Ν. Γεωργιάννου που ήταν και η επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεχής και υποδειγματική της καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική της κατάρτιση, διαμόρφωσαν τις πιο ευνοϊκές συνθήκες για τη διεξαγωγή της έρευνάς μου. Η διδασκαλία και ο συμβουλευτικός της ρόλος με εφοδίασαν με το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο για την ενασχόληση με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π. Ελένη-Μαρία Παυλοπούλου, για την αμέριστη βοήθεια, τη καθοδήγηση στο σχεδιασμό και υλοποίηση των πειραμάτων και τη συνεχή συμπαράστασή της από την πρώτη μέχρι και την τελευταία μέρα. Με πολλή υπομονή και επιμονή επέλυε τις δεκάδες απορίες μου.

Από αυτό το σημείο, δεν θα μπορούσε να λείπει ο τεχνικός του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής κ. Στέλιος Τσεντίδης με τον οποίο είχαμε μια άψογη συνεργασία. Τον ευχαριστώ όχι μόνο για τις τεχνικές πληροφορίες και οδηγίες σχετικά με τη χρήση και λειτουργία των συσκευών του εργαστηρίου αλλά και για τις συμβουλές ζωής που έδωσε. Ο χαρακτήρας του και το χιούμορ του έκαναν την εργασία μου και τις μέρες μας στο εργαστήριο πιο ευχάριστες.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που παρά τις δυσκολίες, μου στάθηκε σε κάθε μου προσπάθεια μέσα και έξω από τη σχολή μέχρι και σήμερα. Από καρδιάς ευχαριστώ τις φίλες και τους φίλους μου που ο καθένας με τον τρόπο του συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτού του ταξιδιού.

Ελένη

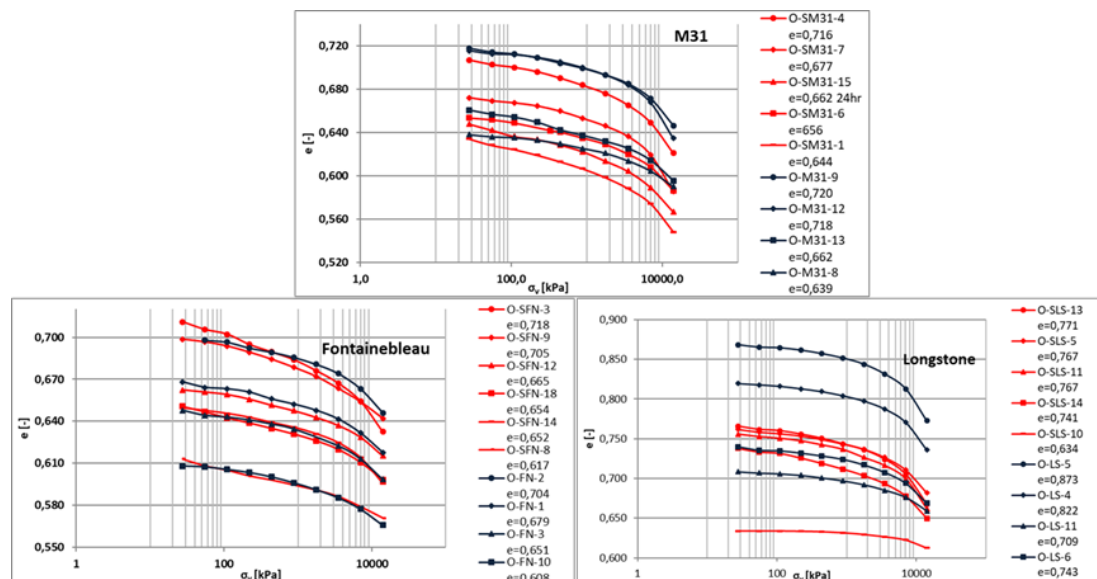
ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την παθητική σταθεροποίηση των μη συνεκτικών εδαφών με χρήση υγρόλυματος κολλοειδούς πυριτίας. Στην πράξη η σταθεροποίηση γίνεται με αργή εισπίεση του κολλοειδούς σταθεροποιητή, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές. Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας διοχετεύεται στη ρευστοποιήσιμη εδαφική μάζα μέσω φυσικής ή τεχνητής ροής του υπόγειου νερού. Πρόκειται για μία εναλλακτική μέθοδο χαμηλής διατάραξης που αποσκοπεί στον περιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης, σε περιοχές με ανεπτυγμένες και ευαίσθητες σε ρευστοποίηση υποδομές. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του σταθεροποιητή στα μη συνεκτικά εδάφη εκτελέστηκαν ανακυκλικές δοκιμές στην τριαξονική συσκευή και δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσική και σε σταθεροποιημένη άμμο M31. Στις δοκιμές του συμπιεσομέτρου πλέον της άμμου M31, διερευνήθηκε η συμπεριφορά φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών άμμων Fontainebleau και Longstone με σκοπό να διευκρινισθεί εάν το σχήμα των κόκκων επηρεάζει τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων σε συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης.

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε, με την εμπορική ονομασία Ludox® SM, είναι μία υδάτινη διασπορά (υγρόλυμα) διακριτών, συμπαγών (μη πορωδών), σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με διαστάσεις στο κάτω όριο της κολλοειδούς κλίμακας. Τα σωματίδια, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, μπορούν να αναπτύξουν πολύ ισχυρούς δεσμούς συνάφειας και συνοχής. Η διάμετρος των κολλοειδών σφαιρών είναι 7 nm και η ειδική επιφάνεια τους είναι ίση με 345 m²/g. Το μεγάλο ανάπτυγμα, η δομή και οι ιδιότητες της επιφάνειας των σωματιδίων πυριτίας παίζουν έναν ουσιαστικό ρόλο σε όλες τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υγρόλυματος και της γέλης. Κατ' επέκταση, οι επιφανειακές ιδιότητες είναι σημαντικές και για τη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους. Το υγρόλυμα Ludox® SM έχει περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου SiO₂ ίση με 30% κατά βάρος και είναι σταθεροποιημένο σε αλκαλικό pH=10. Ο παράγοντας σταθεροποίησης του υγρόλυματος είναι το οξείδιο του νατρίου Na₂O.

Ο όρος «σταθεροποιημένο υγρόλυμα» σημαίνει ότι τα σωματίδια έχουν ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά τους και απωθούν το ένα το άλλο, επομένως πολύ λίγοι δεσμοί δημιουργούνται μεταξύ τους, και το υγρόλυμα δεν μετατρέπεται σε γέλη. Ο όρος «σταθεροποιημένο έδαφος» σημαίνει ότι το έδαφος έχει σχηματισμένη γέλη πυριτίας μέσα στους πόρους του. Υπό την επίδραση συγκεκριμένων παραγόντων το υγρόλυμα αποσταθεροποιείται και δεσμοί σχηματίζονται μεταξύ των σωματιδίων. Η χημική αντίδραση σχηματισμού των δεσμών ονομάζεται συμπύκνωση (condensation). Δύο ομάδες σιλανόλης Si-OH στην επιφάνεια δύο σωματιδίων συνδέονται και σχηματίζουν έναν δεσμό σιλοξάνης Si – O – Si και ένα μόριο νερού H₂O. Η αντίδραση της συμπύκνωσης, όπως αποκαλύπτει ο ίδιος ο όρος, οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή και εκτοπισμό νερού. Αυτό το χαρακτηριστικό της αντίδρασης της συμπύκνωσης είναι ενδεχομένως που έχει πολύ σημαντικές συνέπειες στη συμπεριφορά του εδάφους, όταν οι υπό συρρίκνωση

αλυσίδες πυριτίας, που εμφανίζουν έντονη συνάφεια, αναπτύσσονται μέσα στο εδαφικό πορώδες. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό συμπύκνωσης είναι πολύ σημαντικοί, καθώς το υγρόλυμα πυριτίας αναμένεται να εγχυθεί στην εδαφική μάζα, στο χρονικό διάστημα που το ιξώδες του έχει χαμηλή τιμή (χαμηλότερη από 3.5 – 4.0 cP). Μετά από τη σύντομη περίοδο έγχυσης το υγρόλυμα αναμένεται να μετατραπεί απότομα σε γέλη, προτού απομακρυνθεί από τη στοχευόμενη περιοχή. Κάθε παράγοντας που προωθεί τις βίαιες συγκρούσεις μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων και μειώνει το επιφανειακό ηλεκτρικό φορτίο επιταχύνει καταλυτικά τις αντιδράσεις συμπύκνωσης. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση πυριτίας και αλάτων, τόσο πιο ταχύς είναι ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοζάνης. Ο ρόλος του pH είναι περισσότερο σύνθετος και η επίδραση του δεν είναι μονότονη. Σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τιμές pH οι ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, οι οποίες συμπεριφέρονται ως ασθενή οξέα, προσλαμβάνουν ή αποβάλλουν πρωτόνια, αντίστοιχα. Η πρόσληψη πρωτονίων H^+ φορτίζει την επιφάνεια θετικά, ενώ η αποβολή τους την φορτίζει αρνητικά. Σε ενδιάμεσες τιμές pH ($5 < pH < 7$) αναμένεται, επομένως, ο χρόνος γέλης να είναι ελάχιστος. Το παχύρευστο υγρόλυμα μετατρέπεται σταδιακά σε μία ελαστική γέλη. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό πυριτικό σκελετό και την παγιδευμένη υδάτινη φάση. Το σταθεροποιημένο κοκκώδες έδαφος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας μετά τον σχηματισμό της γέλης μέσα στους πόρους του. 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.

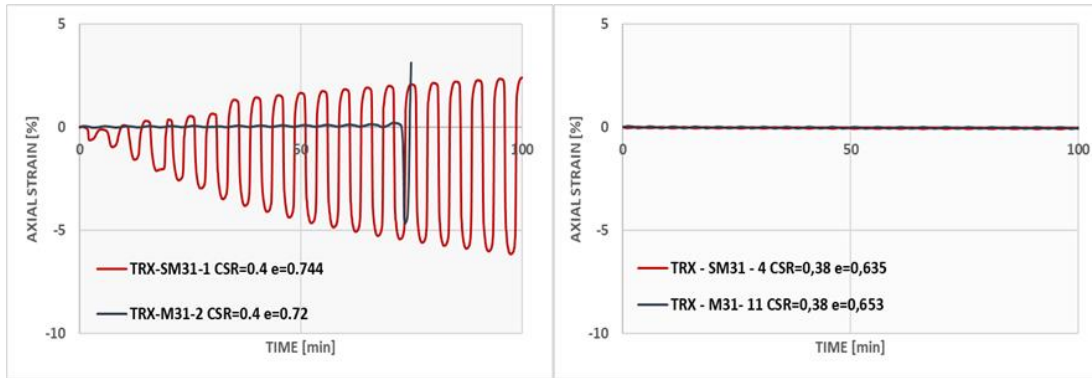


Σχήμα 1. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεστρού για σταθεροποιημένα (κόκκινες καμπύλες) και φυσικά (μπλε καμπύλες) δοκίμια άμμου α) M31, β) Fontainebleau και γ) Longstone.

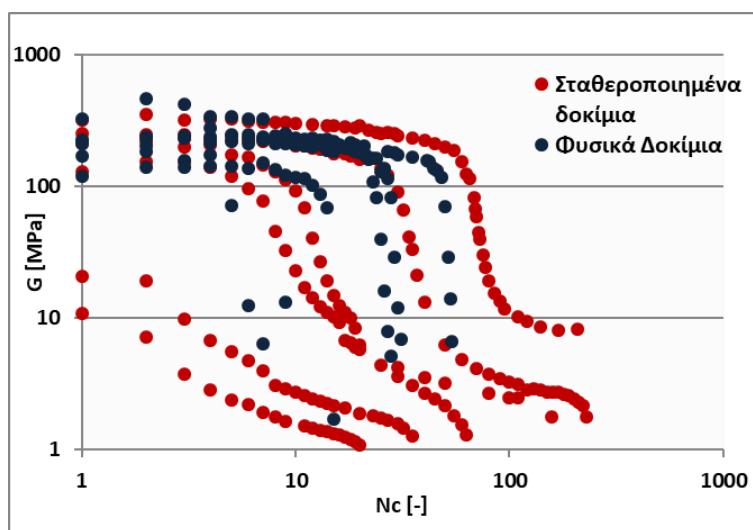
Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, μία σειρά από δοκιμές συμπίεσομέτρου εκτελέστηκαν σε φυσικές και σε σταθεροποιημένες άμμοις M31, Fontainebleau και Longstone. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφάνιση ξηρού εδαφικού υλικού μέσα στο πληρωμένο με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας CS=10% δαχτυλίδι στερεοποίησης και φορτίστηκαν σε υψηλές τάσεις (έως περίπου 14 MPa). Τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του εδαφικού σκελετού. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια ανεξαρτήτως του τύπου της άμμου εμφάνισαν μεγαλύτερη ενδοσιμότητα από τα φυσικά. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1.

Επιπλέον, μία σειρά ανακυκλικών δοκιμών εκτελέστηκε πάνω σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31. Πρόκειται για ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφάνιση ξηρού εδαφικού υλικού σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας CS=10% κατά βάρος. Τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του εδαφικού σκελετού. Στη συνέχεια τα σταθεροποιημένα δοκίμια στερεοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή. Το στάδιο της στερεοποίησης διήρκησε περισσότερο (24hrs.) συγκριτικά με το φυσικό δοκίμιο (1hr.). Η ανακυκλική φόρτιση εκτελέστηκε με επιβολή ημιτονοειδούς συνάρτησης ημιπλάτους Δq και περιόδου $T=5\text{min}$ για τα σταθεροποιημένα δοκίμια ενώ για τα φυσικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν περίοδοι $T=2,5\text{min}$ και $T=5\text{min}$. Η πίεση του νερού των πόρων μετρήθηκε στα φυσικά αλλά και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Η ανακυκλική φόρτιση των φυσικών δοκιμών διήρκησε μέχρι τον μηδενισμό της ενεργού τάσης. Ενώ, τα σταθεροποιημένα δοκίμια φορτίστηκαν για πολλούς κύκλους φόρτισης ώστε να εξεταστεί αν αυτά καταρρέουν μετά τον μηδενισμό της ενεργού τάσης ή την ανάπτυξη μεγάλων αξονικών παραμορφώσεων.

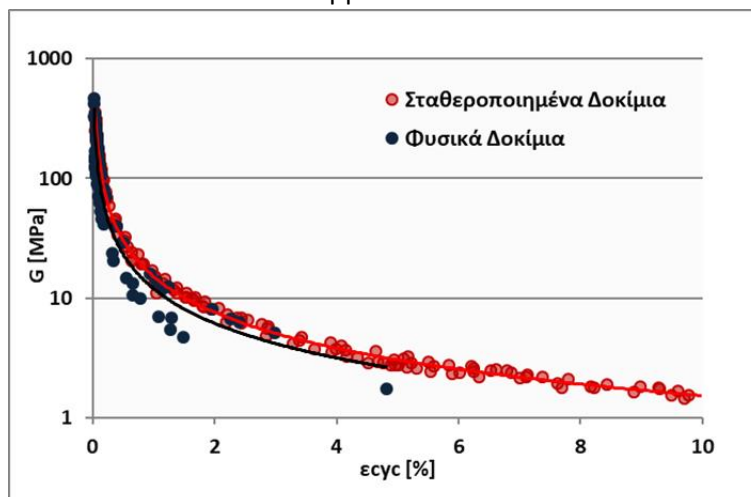
Η βασική διαφορά στη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου και του φυσικού εδαφικού δοκιμίου είναι ότι το πρώτο μπορεί να ανθίσταται σε πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, παρά την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων και υψηλής πίεσης του υγρού των πόρων, χωρίς να καταρρέει. Αυτό οφείλεται στη συνοχή που προσφέρει η γέλη στους ενθυλακωμένους εδαφικούς κόκκους. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης όμως η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών δεν ήταν κοινή σε όλα τα πειράματα. Παρατηρείται ότι στα χαλαρότερα δοκίμια η σταθεροποιημένη άμμος ανέπτυξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις στους πρώτους κύκλους φόρτισης από αυτές που αναπτύσσει η φυσική άμμος αντίστοιχης πυκνότητας. Αντίθετα, στα πυκνότερα δοκίμια η σταθεροποιημένη άμμος ανέπτυξε στους πρώτους κύκλους φόρτισης παραμορφώσεις ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές που αναπτύσσει η φυσική άμμος αντίστοιχης πυκνότητας. Επίσης, διεξάγεται το συμπέρασμα, ότι η σταθεροποίηση των δοκιμών δεν επηρεάζει την απομείωση του μέτρου διάτμησης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, συνδέεται όμως με τον αριθμό κύκλων στους οποίους θα εμφανιστεί η απομείωση αυτή. Η συμπεριφορά των δοκιμών σε ανακυκλική φόρτιση παρουσιάζεται ενδεικτικά στα Σχήματα 2, 3 και 4.



Σχήμα 2. Σύγκριση των αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά.



Σχήμα 3. Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – κύκλων φόρτισης N_c [-] για φυσικά δοκίμια (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένα CS=10% δοκίμια (κόκκινα σημεία) άμμου M31.



Σχήμα 4. Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ϵ_{cyc} [%] για φυσικά δοκίμια (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένα CS=10% δοκίμια (κόκκινα σημεία) άμμου M31.

EXTENDED SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this Diploma Thesis, the effect of passive stabilization of non-cohesive soils on their subsequent behavior is examined using a stabilizing colloidal substance. In actual fact stabilization takes place on site by slowly injecting the stabilizing colloidal substance, underneath existing structures. The colloidal silica (CS) sol is delivered through the liquefiable soil mass using the natural or enhanced groundwater flow. This is an alternative method for non-invasive and non-disruptive mitigation of liquefaction risk, at developed sites susceptible to liquefaction. In this Diploma Thesis, in order to investigate the effect of colloidal silica on the response of non-cohesive soils' behavior, oedometer and cyclic triaxial tests under undrained loading conditions were performed on treated and untreated M31 sand. Oedometer tests were also conducted on treated and untreated Fontainebleau and Longstone sands with the aim to investigate whether the grain shape or the grain angularity affects their response.

The colloidal silica used in this project, under the commercial Ludox[®] SM brand, is a water dispersion (aquasol) of discrete, compact (not porous), spherical particles of amorphous silica, with dimensions at the lower end of the colloidal scale. The particles can develop, under certain conditions, very strong adhesive and cohesive bonds. The diameter of the solid colloidal spheres is 7 nm and their specific surface is equal to 345 m²/g. The tremendous spread, the structure and the properties of the surface of the silica particles play a substantial role to all physicochemical properties of the sol and the gel. Hence the surface properties are also important for the mechanical behavior of the stabilized soil. The Ludox[®] SM sol has a concentration of silicon dioxide SiO₂ equal to 30% by weight and is stabilized at alkaline pH=10. The stabilizing agent of the sol is sodium oxide Na₂O.

The term "stabilized sol" means that the particles have an electrical surface charge and repel each other, so very few bonds form between them, and the sol doesn't transform into a gel. The term "stabilized soil" means that the soil has formed silica gel inside the pores. Under the influence of certain factors, the sol is destabilized and bonds form between the particles. The chemical reaction of bond formation is called condensation. Two surface silanol groups Si-OH of two different particles are connected to form a siloxane bond Si-O-Si and a water molecule H₂O. The condensation reaction, as the term actually indicates, leads to contraction of the solid silica phase and expulsion of the liquid phase. This feature of the condensation reaction probably has a significant effect on the soil behavior, when the contracting, adhesive silica chains are formed inside the soil pores. The factors that affect the condensation rate are very important, as the silica sol is expected to be injected into the soil mass, as long as the viscosity is low (lower than 3.5 – 4.0 cP). After the short period injection time the sol is expected to quickly transform into a gel, before it is

leached away from the target region. Every factor that promotes violent collisions between the colloidal particles and reduces their surface electrical charge plays a catalytic role on the condensation reaction. The higher the temperature and the concentration of silica and salt, the faster the rate of formation of siloxane bonds is. The role of pH is more complicated and its influence is not monotonic. At very low and very high PH values the silanol groups at the particles' surface, which actually act as weak acids, protonate and deprotonate, respectively. The gain of protons H^+ charges the surface positively while their loss charges it negatively. So at intermediate values of pH ($5 < pH < 7$) the gel time is expected to be minimum. The viscous sol progressively turns into an elastic gel. The saturated gel is a two phase material made of a solid silica skeleton which encloses the liquid phase. The stabilized granular soil develops some kind of cohesion after the gel formation inside the soil pores. The colloidal silica is channeled evenly in the soil and covers the whole surface of the grains offering them its beneficial properties.

As part of this thesis, a series of oedometer tests were conducted on natural and stabilized M31, Fontainebleau and Longstone sands. The stabilized specimens were produced by pluviation of dry soil material into the oedometer ring filled with silica sol and were tested under high pressure (up to approximately 14MPa). The treated sands showed increased compressibility in comparison with the untreated. Typical test results are shown in Figure 5.

Another series of tests was conducted in our laboratory on natural and stabilized M31 sand. These were cyclic triaxial tests on cylinder specimens, under undrained loading conditions. The stabilized specimens were produced by pluviation of dry soil material into molds filled with silica sol CS=10% wt. The molds were sealed and the gel was formed into the pores of soil's skeleton. The stabilized specimens were subsequently consolidated in the triaxial apparatus. The consolidation phase of treated specimens lasted more (24hrs) than of the untreated specimens (1hr). During cyclic loading of treated specimens, a sinusoidal stress semi-amplitude Δq and period $T=5\text{min}$ was applied. The period T of the cyclic loading applied to the untreated sand was either $T=2.5\text{min}$ or $T=5\text{min}$. The pore water pressure was measured for both stabilized and natural specimens. The cyclic loading of the untreated specimens was completed when the mean effective stress was equal to zero. Whereas, the treated specimens were loaded for many cycles, to investigate if they remain intact after the effective stress is reduced to essentially zero or after sustaining large axial deformations.

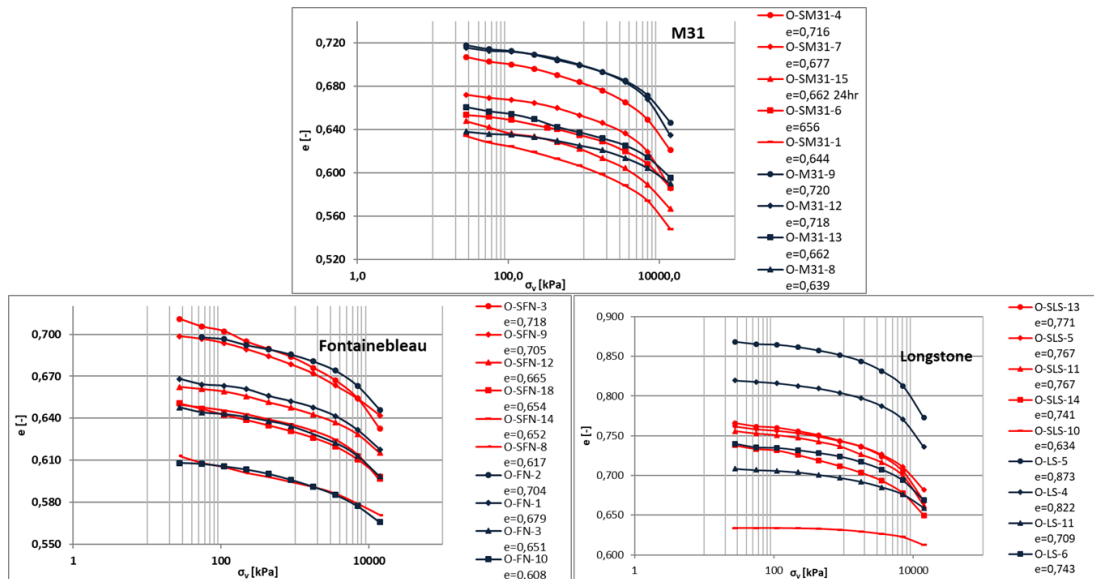


Figure 5. Oedometer test results for treated (red curves) and untreated (blue curves) specimens of a) M31 sand, b) Fontainebleau sand and c) Longstone sand.

The basic difference between the behavior of stabilized and natural sand is that the first can sustain too many cycles under large deformations and pore water pressures, without collapsing. This may be due to the cohesion that the gel provides to the encapsulated soil grains. During the first cycles, though, the behavior of the stabilized specimens wasn't the same among all the experiments. We observed that during the first cycles, the looser specimens developed larger deformations than the ones that the natural specimens developed. On the contrary, the denser treated specimens developed deformations of the same size as their untreated counterparts. In this research it is also observed that the stabilization of M31 sand, does not affect the modification of the shear modulus G versus axial strain of double amplitude ϵ_{cyc} relationship in the range of considered strains, but is linked to the loading cycles. Typical test results are shown in Figures 6, 7 and 8.

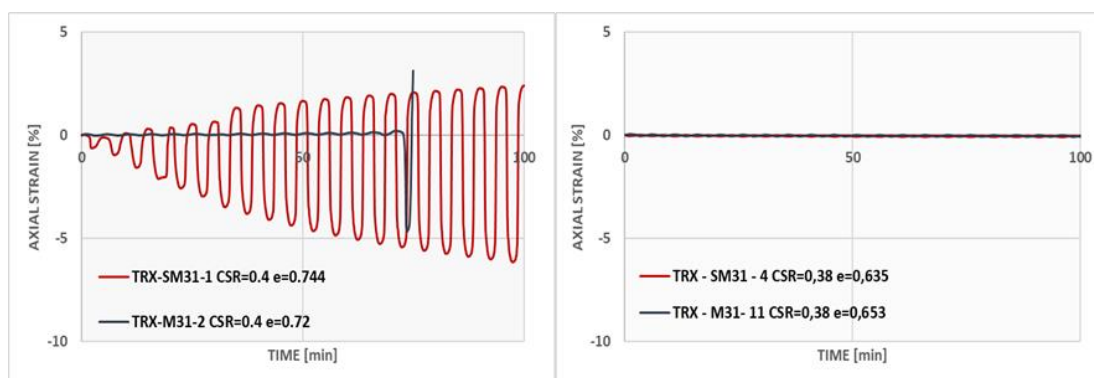


Figure 6. Axial strain ϵ_{zz} [%] versus time t [min] for natural (blue curve) and stabilized CS=10% sand specimens (red curves) of M31 sand. Looser specimens on the left and denser specimens on the right.

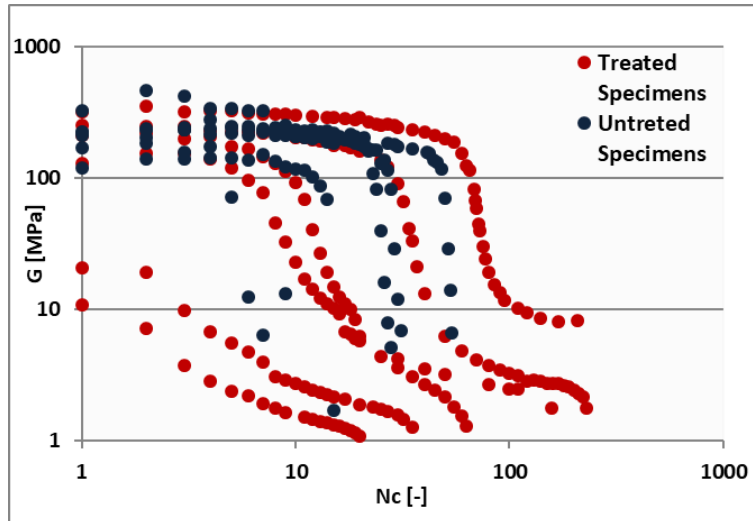


Figure 7. Degradation of shear modulus G [MPa] versus number of cycles N_c [-] of untreated (blue points) and treated specimens $CS=10\%$ (red points) of M31 sand.

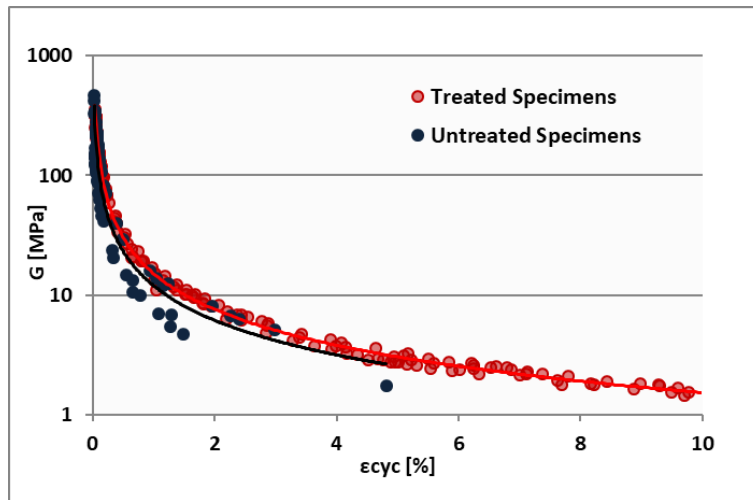


Figure 8. Degradation of shear modulus G [MPa] versus cyclic axial strain ϵ_{cyc} [%] of untreated (blue points) and treated specimens $CS=10\%$ (red points) of M31 sand.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1	Παθητική σταθεροποίηση εδάφους για την άμβλυση του κινδύνου ρευστοποίησης. [πηγή: Gallagher και Mitchell, 2000]	2
Σχήμα 2.1	Κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής τετραεδρικής δομικής ιοντικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$ [πηγή: Bergna και Roberts, 2006]	7
Σχήμα 2.2	α)Σχηματική διδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας [πηγή: Bergna και Roberts, 2006] β)Σταθεροποίηση του υγρολύματος με χρήση του αλκαλικού παράγοντα	10
Σχήμα 3.1	Κοκκομετρικές καμπύλες άμμων M31, Fontainebleau και Longstone	19
Σχήμα 3.2	Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης 100×) των κόκκων της α) άμμου M31, β) άμμου Longstone και γ) άμμου Fontainebleau [πηγή: Tsomokos & Georgiannou, 2010]	20
Σχήμα 3.3	Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	21
Σχήμα 3.4	Φωτογραφία υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	21
Σχήμα 4.1	Συσκευή Wykeham Farrance No 24255	24
Σχήμα 4.2	Παρασκευή σταθεροποιημένου δοκιμίου CS=10% άμμου M31 α) υγρόλυμα πυριτίας, β) καλούπι συσκευής συμπίεσομέτρου, γ) εμφάνιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας, δ) και ε) σταθεροποιημένο δοκίμιο μετά από ώρες ωρίμανσης, στ) σταθεροποιημένο δοκίμιο πριν την φόρτιση	26
Σχήμα 4.3	Διάγραμμα μεταβολής καθίζησης Δh - τετραγωνικής ρίζας χρόνου \sqrt{t}	27
Σχήμα 4.4	Διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών δοκιμών άμμου M31	31
Σχήμα 4.5	Διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών άμμου M31	31
Σχήμα 4.6	Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκιμών άμμου M31	31
Σχήμα 4.7	Συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] -ενεργού τάσης σ'_v [kPa] φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου M31	32
Σχήμα 4.8	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου M31 ($e_0=0,716$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες)	

	δοκίμιο ($e_0=0,718$), διάγραμμα δείκτη πόρου e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	33
Σχήμα 4.9	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου M31 ($e_0=0,662$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,662$), διάγραμμα δείκτη πόρου e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	33
Σχήμα 4.10	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου M31 ($e_0=0,639$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,644$), διάγραμμα δείκτη πόρου e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	34
Σχήμα 4.11	Διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών δοκιμών άμμου Fontainebleau	35
Σχήμα 4.12	Διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών άμμου Fontainebleau	36
Σχήμα 4.13	Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκιμών άμμου Fontainebleau	36
Σχήμα 4.14	Συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - ενεργού τάσης σ'_v φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου Fontainebleau	36
Σχήμα 4.15	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Fontainebleau ($e_0=0,704$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,705$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	37
Σχήμα 4.16	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Fontainebleau ($e_0=0,679$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,665$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	37
Σχήμα 4.17	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Fontainebleau ($e_0=0,651$) με δύο σταθεροποιημένα CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμια ($e_0=0,654$ και $e_0=0,652$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	37

Σχήμα 4.18	Διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών δοκιμών άμμου Longstone	39
Σχήμα 4.19	Διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών άμμου Longstone	40
Σχήμα 4.20	Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου Longstone	40
Σχήμα 4.21	Συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - ενεργού τάσης σ'_v φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου Longstone	40
Σχήμα 4.22	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Longstone ($e_0=0,873$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,771$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	41
Σχήμα 4.23	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Longstone ($e_0=0,822$) με δύο σταθεροποιημένα CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμια ($e_0=0,767$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	41
Σχήμα 4.24	Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Longstone ($e_0=0,743$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,741$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά)	41
Σχήμα 4.25	Συγκεντρωτικά διαγράμματα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου (κόκκινες καμπύλες) και μη (μπλε) για άμμο α) M31, β) Fontainebleau και γ) Longstone. [Μπίκος, 2017]	42
Σχήμα 4.26	Συγκεντρωτικά διαγράμματα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - ενεργού τάσης σ'_v για δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου (κόκκινες καμπύλες) και μη (μπλε) για άμμο α) M31, β) Fontainebleau και γ) Longstone. [Μπίκος, 2017]	43
Σχήμα 5.1	Τυπική διάταξη κυλινδρικής τριαξονικής συσκευής	46
Σχήμα 5.2	Παρασκευή φυσικού δοκιμίου άμμου M31 στην τριαξονική συσκευή α) εμφάνιση στο νερό, β) τοποθέτηση κεφαλής και εφαρμογή αρνητικής πίεσης στο δοκίμιο, γ) αφαίρεση καλουπιού, δ) φυσικό δοκίμιο άμμου στην αδιαπέρατη μεμβράνη και ε) τοποθέτηση μηκυσιομέτρων	48
Σχήμα 5.3	Σταθεροποιημένο δοκίμιο CS=10% άμμου M31 α) σταθεροποιημένο δοκίμιο μετά από ώρες ωρίμανσης, β)	49

	τοποθέτηση στην τριαξονική συσκευή και γ) τοποθέτηση μηκυνσιομέτρων στο δοκίμιο	
Σχήμα 5.4	Βρόγχος υστέρησης ανά κύκλο φόρτισης	53
Σχήμα 5.5	Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] για ανακυκλική φόρτιση σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμίων άμμου M31	53
Σχήμα 5.6	Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης των σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμίων άμμου M31 α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα	57
Σχήμα 5.7	Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,720$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,744$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$	58
Σχήμα 5.8	Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] για φυσικό δοκίμιο με δείκτη πόρων $e=0,720$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,744$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$ α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα	60
Σχήμα 5.9	Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,744$ στον 2ο,8ο και 14ο κύκλο φόρτισης, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,720$ στον 2ο,8ο και 14ο κύκλο φόρτισης, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 14 πρώτους κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 15 κύκλους φόρτισης	61
Σχήμα 5.10	Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου, με $e=0,744$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,720$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$	61
Σχήμα 5.11	Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου, με $e=0,744$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,720$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$	62
Σχήμα 5.12	Διάγραμμα πίεσης πόρων R_u [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,744$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού δοκιμίου με $e=0,720$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$	62
Σχήμα 5.13	Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,648$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,655$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$	63

- Σχήμα 5.14** Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,648$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,655$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$
α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα 64
- Σχήμα 5.15** Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p' [-] – αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,655$ στον 2ο και 8ο κύκλο φόρτισης, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,648$ στον 2ο και 6ο κύκλο φόρτισης, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 6 πρώτους κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 7,5 κύκλους φόρτισης 65
- Σχήμα 5.16** Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,655$ (κόκκινα καμπύλη) και φυσικού με $e=0,648$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$ 66
- Σχήμα 5.17** Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,655$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,648$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$ 66
- Σχήμα 5.18** Διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,655$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,648$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$ 67
- Σχήμα 5.19** Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,653$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,705$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$ 68
- Σχήμα 5.20** Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,653$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,705$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$
α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα 69
- Σχήμα 5.21** Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,705$ στον 2ο, 10ο, 20ο, 30ο, 41ο και 50ο κύκλο φόρτισης, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,653$ στον 2ο, 10ο, 20ο, 30ο, 41ο και 50ο κύκλο φόρτισης, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους πρώτους 50 κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση

	σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 54 κύκλους φόρτισης	70
Σχήμα 5.22	Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου με $e=0,705$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,653$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,38	71
Σχήμα 5.23	Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου με $e=0,705$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,653$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,38	71
Σχήμα 5.24	Διάγραμμα πίεσης πόρων R_u [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου με $e=0,705$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,653$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,38	71
Σχήμα 5.25	Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,633$ (μπλε σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης CSR=0,39 και σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,635$ (κόκκινα σημεία) υπό CSR=0,38	72
Σχήμα 5.26	Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,633$ (μπλε σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης CSR=0,39 και σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,635$ (κόκκινα σημεία) υπό CSR=0,38	
	α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα	73
Σχήμα 5.27	Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,635$ στον 2ο ,8ο ,15ο,22ο και 25ο κύκλο φόρτισης και CSR=0,38, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,633$ στον 2ο ,8ο , 15ο,22ο και 25ο κύκλο φόρτισης και CSR=0,39, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους πρώτους 25 κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 28 κύκλους φόρτισης	74
Σχήμα 5.28	Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου με $e=0,635$ (κόκκινη καμπύλη) υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,38 και φυσικού με $e=0,633$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,39	75
Σχήμα 5.29	Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου με $e=0,635$ (κόκκινη καμπύλη) υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,38 και φυσικού με $e=0,633$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,39	76

Σχήμα 5.30	Διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,635$ υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,633$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,39$	76
Σχήμα 5.31	Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] για ανακυκλική φόρτιση φυσικών δοκιμίων άμμου M31	79
Σχήμα 5.32	Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ϵ_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης των φυσικών δοκιμίων άμμου M31 α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα	79
Σχήμα 5.33	Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – κύκλων φόρτισης N_c [-] για φυσικά δοκίμια (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένα $CS=10\%$ δοκίμια (κόκκινα σημεία) άμμου M31	80
Σχήμα 5.34	Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ϵ_{cyc} [%] για φυσικά δοκίμια (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένα $CS=10\%$ δοκίμια (κόκκινα σημεία) άμμου M31	80
Σχήμα 5.35	Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου για φυσική και σταθεροποιημένη $CS=10\%$ άμμο. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά [Παυλοπούλου & Τσίβου, 2015]	81
Σχήμα 5.36	Σύγκριση των αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου για φυσική και σταθεροποιημένη $CS=10\%$ άμμο στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά	82
Σχήμα 5.37	Διάγραμμα αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου των σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμίων TRX-SM31-3 ($e=0,796$), TRX-SM31-7 ($e=0,705$) και TRX-SM31-4 ($e=0,635$) για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$ στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης	83
Σχήμα 5.38	Διάγραμμα αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου των σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμίων TRX-SM31-1 ($e=0,744$) και TRX-SM31-5 ($e=0,655$) για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,4$ στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης	83
Σχήμα 5.39	Διάγραμμα πίεσης πόρων Δu συναρτήσει του χρόνου t ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31 ($D_r=42,3\%$) και ενός σταθεροποιημένου ($D_r=38,0\%$) για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,25$ [Παυλοπούλου & Τσίβου, 2015]	84
Σχήμα 5.40	Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,27$ α) άμμος, β) σταθεροποιημένη άμμος [πηγή: Gallagher and Mitchell, 2002]	85
Σχήμα 5.41	α) Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, β) Διάγραμμα διαδρομών τάσεων για ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής	86

	διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για άμμο Toyoura. [πηγή: Kodaka et al., 2005]	
Σχήμα 5.42	α) Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, β) Διάγραμμα διαδρομών τάσεων για ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με CS=4% [πηγή: Kodaka et al., 2005]	86
Σχήμα 5.43	Διάγραμμα ανάπτυξης διατμητικής παραμόρφωσης σταθεροποιημένης CS=4% και μη άμμου Toyoura για διάφορους λόγους ανακυκλικής φόρτισης CSR [πηγή: Kodaka et al., 2005]	87
Σχήμα 5.44	Σύγκριση ανακυκλικής διατμητικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, Dr=40% [πηγή: Rodriguez et al., 2008]	88
Σχήμα 5.45	Σύγκριση ανακυκλικής διατμητικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, Dr=60% [πηγή: Rodriguez et al., 2008]	89
Σχήμα 5.46	Σύγκριση ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή, Dr=40% και $\sigma'_v=29,4$ kPa [πηγή: Rodriguez et al., 2008]	89
Σχήμα 5.47	Σύγκριση ανάπτυξης διατμητικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή, Dr=40% και $\sigma'_v=29,4$ kPa [πηγή: Rodriguez et al., 2008]	89
Σχήμα 5.48	Αστράγγιστη τριαξονική ανακυκλική δοκιμή σε φυσικό δοκίμιο άμμου (αριστερά) και σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (δεξιά) [πηγή: Porcino et al., 2011]	92
Σχήμα 5.49	Αστράγγιστη ανακυκλική δοκιμή απλής διάτμησης σε φυσικό δοκίμιο άμμου (αριστερά) και σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (δεξιά) [πηγή: Porcino et al., 2011]	93
Σχήμα 5.50	Διαγραμματική απεικόνιση του λόγου υπερπίεσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου Ticino σε τριαξονική φόρτιση και σε απλή διάτμηση [πηγή: Porcino et al., 2011]	94
Σχήμα 5.51	Συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων και διαδρομές ενεργών τάσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε α) χαλαρό φυσικό, β) χαλαρό σταθεροποιημένο και γ) πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου [πηγή: Porcino et al., 2012]	95
Σχήμα 5.52	Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου TS [πηγή: Porcino et al., 2012]	96
Σχήμα 5.53	Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου TS με διάφορες αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις [πηγή: Porcino et al., 2012]	96

- Σχήμα 5.54** Απομείωση μέτρου διάτμησης σταθεροποιημένων και μη δοκιμίων άμμου TS κατά την ανακυκλική φόρτιση συναρτήσει α) των κύκλων φόρτισης και β) της διατμητικής παραμόρφωσης [πηγή: Porcino et al., 2012] 97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1	Διαστάσεις οπών κοσκίνων	16
Πίνακας 3.2	Κατάταξη αμμωδών εδαφών βάσει της σχετικής πυκνότητας	17
Πίνακας 3.3	Χαρακτηριστικά άμμων M31, Longstone και Fontainebleau	20
Πίνακας 4.1	Χαρακτηριστικά δαχτυλίων συμπιεσομέτρου	24
Πίνακας 4.2	Τάσεις που μεταβιβάζει η συσκευή για φόρτιση 1 kg	25
Πίνακας 4.3	Συγκεντρωτικά στοιχεία των δοκιμών συμπιεσομέτρου	28
Πίνακας 5.1	Χαρακτηριστικά ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σταθεροποιημένων και μη δοκιμών άμμου M31	52

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
EXTENDED SUMMARY	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xx
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	xxi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ο κίνδυνος της ρευστοποίησης και οι μέθοδοι βελτίωσης των εδαφών	1
1.2 Αντικείμενο της έρευνας	4
1.3 Δομή της εργασίας	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ	7
2.1 Επιστήμη των κολλοειδών	7
2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών	7
2.1.2 Η ορολογία και οι μεταφράσεις των χημικών όρων	8
2.1.3 Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox® SM	8
2.2 Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που σχετίζονται με τη σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών	10
2.2.1 Γελοποίηση (Gelation)	12
2.2.2 Ωρίμανση (Aging)	12
2.2.3 Ξήρανση (Drying)	13
2.2.4 Μηχανισμός αυτό-ίασης του σταθεροποιημένου εδάφους (self-healing mechanism)	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	15
3.1 Πειραματικός προσδιορισμός μεγέθους κόκκων	15
3.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα	15
3.2 Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων	16
3.3 Φυσικά μη συνεκτικά εδαφικά υλικά	18
3.3.1 Άμμος M31	18
3.3.2 Άμμος Fontainebleau	18
3.3.3 Άμμος Longstone	19
3.4 Σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	23
4.1 Εισαγωγή	23
4.2 Περιγραφή της συσκευής συμπίεσομέτρου	24

4.3	Προετοιμασία πειραματικής διαδικασίας	25
4.3.1	Παρασκευή φυσικού δοκιμίου άμμου	25
4.3.2	Παρασκευή σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου	25
4.3.3	Δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής	26
4.4	Πειραματική διαδικασία και επεξεργασία μετρήσεων	26
4.4.1	Πειραματική διαδικασία	26
4.4.2	Επεξεργασία μετρήσεων	29
4.5	Αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης	30
4.5.1	Άμμος M31	30
4.5.2	Άμμος Fontainebleau	34
4.5.3	Άμμος Longstone	38
4.6	Αποτελέσματα άλλων ερευνητών	42
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	45
5.1	Εισαγωγή	45
5.2	Περιγραφή της τριαξονικής συσκευής	45
5.3	Διαδικασία πειράματος	47
5.3.1	Παρασκευή φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών	47
5.3.2	Κορεσμός του δοκιμίου	50
5.3.3	Στερεοποίηση του δοκιμίου	50
5.3.4	Το στάδιο της ανακυκλικής φόρτισης	51
5.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών	53
5.4.1	Σύγκριση σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31	53
5.4.2	Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-1 και φυσικού δοκιμίου TRX-M31-2	58
5.4.3	Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-5 και φυσικού δοκιμίου TRX-M31-12	62
5.4.4	Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-7 και φυσικού δοκιμίου TRX-M31-11	67
5.4.5	Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-4 και φυσικού δοκιμίου TRX-M31-13	72
5.4.6	Σύγκριση φυσικών δοκιμών άμμου M31	76
5.4.7	Σύγκριση φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31	80
5.4.8	Επίδραση της πυκνότητας στη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών	81
5.5	Αποτελέσματα άλλων ερευνητών	82
5.5.1	Παυλοπούλου και Τσίβου (2015)	82

Περιεχόμενα

5.5.2	Gallagher και Mitchell (2002)	85
5.5.3	Kodaka et al. (2005)	86
5.5.4	Diaz-Rodriguez et al. (2008)	87
5.5.5	Porcino et al. (2011)	88
5.5.6	Porcino et al. (2012)	94
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-1	103
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-2	112

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

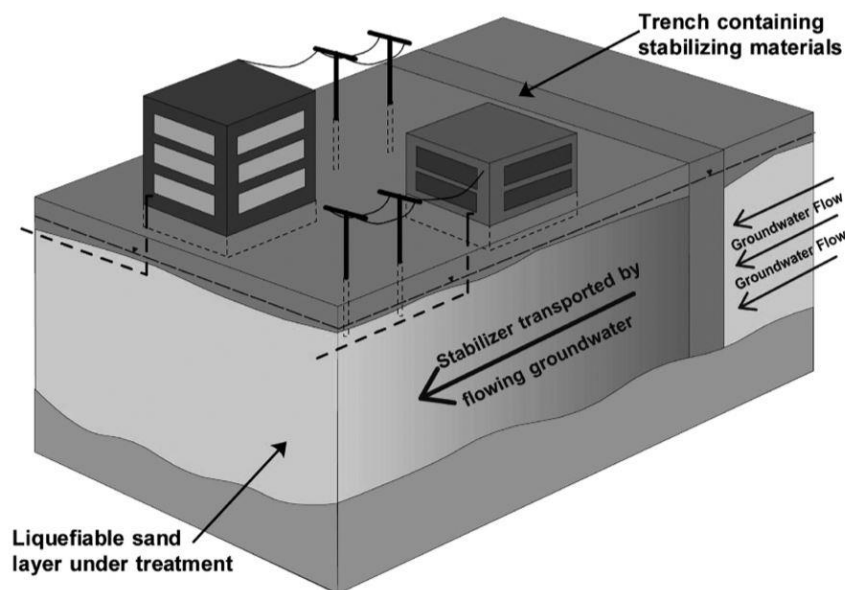
1.1 Ο κίνδυνος της ρευστοποίησης και οι μέθοδοι βελτίωσης των εδαφών

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών θεωρείται σήμερα μια εκ των πλέον σημαντικών αιτιών δομικών αστοχιών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Η αύξηση της πίεσης των πόρων σε κορεσμένους μη συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς, η οποία προκαλείται από δυναμικές φορτίσεις, όπως οι σεισμικές διεγέρσεις, υπό αστράγγιστες συνθήκες μπορεί να επιφέρει συσσώρευση παραμορφώσεων και μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού δημιουργώντας το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Τέτοιου είδους εδαφική αστοχία μπορεί να προκαλέσει μεγάλες παραμορφώσεις και καθιζήσεις, που οδηγούν σε αχρήστευση της θεμελίωσης και κατ' επέκταση στην καταστροφή των κατασκευών. Τα χαρακτηριστικά της προκαλούμενης από σεισμό ρευστοποίησης σχετίζονται με την αντίδραση των εδαφών σε ανακυκλική φόρτιση. Αυτή η αντίδραση οφείλεται στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφών.

Πιο ευαίσθητα σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης είναι τα μη συνεκτικά εδάφη όπως οι χαλαρές άμμοι. Γι' αυτό το λόγο είναι κρίσιμη η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των μη συνεκτικών εδαφών. Η βελτίωσή τους γίνεται με ένα πλήθος μεθόδων και τεχνικών. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η συμπύκνωση (densification) των χαλαρών, κορεσμένων, μη συνεκτικών εδαφικών αποθέσεων. Η συμπύκνωση μπορεί να γίνει με επαναλαμβανόμενη πτώση βαρών από μεγάλο ύψος (deep dynamic compaction), με πρόκληση τεχνητών εκρήξεων μέσα στο έδαφος (explosive compaction) ή με πρόκληση δονήσεων μέσα σε γεωτρήσεις (vibrocompaction). Ακόμα, ευρέως στο πεδίο έχουν εφαρμοστεί μέθοδοι όπως η εδαφική ανάμιξη, η αντικατάσταση του μαλακού και δυνητικά ρευστοποιήσιμου εδάφους και η αποτόνωση των σεισμικών υπερπιέσεων των πόρων (π.χ. με την τοποθέτηση χαλικοστραγγιστηρίων). Οι παραπάνω μέθοδοι προσφέρουν άμεσο έλεγχο της πυκνότητας του εδάφους, αλλά συνήθως δεν μπορούν να εφαρμοσθούν σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών. Η αδυναμία εφαρμογής τους συνίσταται είτε στην έλλειψη επαρκούς χώρου για την τοποθέτηση του απαιτούμενου εξοπλισμού (π.χ. σε συνεχή αστική δόμηση ή στο μέσο της κάτοψης του κτιρίου) ή σε πιθανές δομικές ζημιές που μπορούν να προκληθούν στην κατασκευή από τη χρήση δονητικών ή δυναμικών μεθόδων βελτίωσης. Επιπλέον, το κόστος εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων είναι απαγορευτικό σε μεγάλης έκτασης περιοχές με υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης. Γι' αυτούς τους λόγους η βελτίωση του εδάφους κάτω από υφιστάμενα κτίρια ή υποδομές, ευαίσθητες σε δονήσεις και καθιζήσεις, γίνεται

παραδοσιακά με τη διείδυση μικρό – πασσάλων (micro - piles) στο έδαφος θεμελίωσης ή με την εισπίεση ενέματος υπό χαμηλή ή υψηλή πίεση (permeation or jet grouting). Οι παραπάνω μεθοδολογίες, ωστόσο, κρίνονται μερικώς αναποτελεσματικές, διότι δεν μπορούν να βελτιώσουν το έδαφος σε ολόκληρη την κάτοψη, ενώ ενδέχεται να προκαλέσουν και προβλήματα στο υπάρχον κτίριο (π.χ. η εισπίεση ενεμάτων, λόγω μεγάλων πιέσεων, μπορεί να προκαλέσει και ανασήκωμα θεμελίου). Επιπλέον, συνοδεύονται από υψηλό κόστος και εμποδίζουν την κανονική λειτουργία της κατασκευής κατά την εφαρμογή τους.

Τα τελευταία χρόνια, μία εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης, που δεν παρουσιάζει τα παραπάνω μειονεκτήματα, είναι η παθητική σταθεροποίηση (Gallagher, 2000). Πρόκειται για την εισπίεση με χαμηλή υδραυλική κλίση ενός σταθεροποιητή (stabiliser), δηλαδή ενός υλικού που αποτελείται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανοσωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της κάτοψης μιας υφιστάμενης κατασκευής (Σχήμα 1.1). Μέσω του εμπλουτισμού του υγρού των πόρων με τον σταθεροποιητή αλλάζει η μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού - υγρού των πόρων και επιτυγχάνεται ο περιορισμός της συσσώρευσης παραμορφώσεων κατά τη σεισμική διέγερση. Έτσι αποφεύγονται οι καταστροφικές συνέπειες της ρευστοποίησης για την κατασκευή. Οι Gallagher et al. (2007), διεξήγαγαν μεγάλης κλίμακας πειράματα στο πεδίο όπου εισπίεσαν υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας 8% κατά βάρος σε βάθος 2 m ενός ρευστοποιήσιμου έδαφος πάχους 10 m και στη συνέχεια προκάλεσαν ρευστοποίηση με ανατινάξεις. Στο σταθεροποιημένο έδαφος αναπτύχθηκαν μικρότερες καθιζήσεις (0.3m) ενώ στο φυσικό γειτονικό έδαφος παρατηρήθηκαν καθιζήσεις περίπου 0.5 m.



Σχήμα 1.1 Παθητική σταθεροποίηση εδάφους για την άμβλυνση του κινδύνου ρευστοποίησης. [πηγή: Gallagher και Mitchell, 2000]

Η παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization) βασίζεται στη γενική ιδέα της αργής εισπίεσης του σταθεροποιητικού παράγοντα (π.χ. υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας) μέσα στο έδαφος. Το ένεμα «δένει» τους κόκκους του εδάφους ενισχύοντας τη διατμητική του αντοχή. Οι δύο κύριοι τύποι ενέματος είναι το ένεμα με τσιμέντο (cement-based suspension) και το ένεμα με κυρίαρχο συστατικό κάποιο χημικό διάλυμα (chemical solution). Τα ενέματα με χημικό διάλυμα είναι ομογενή μίγματα που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά. Ο σταθεροποιητικός παράγοντας μεταφέρεται με τη φυσική υπόγεια ροή νερού στην επιθυμητή τοποθεσία. Αν δεν υφίσταται φυσική ροή ή είναι ασθενής, τότε η ροή ενισχύεται με τεχνητά πηγάδια παροχής και άντλησης, τα οποία εξασφαλίζουν χαμηλή υδραυλική κλίση. Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας έχει χαμηλό ιξώδες στην αρχή της εισπίεσης, γεγονός που βοηθά ιδιαίτερα τη διοχέτευση. Ρυθμίζοντας τους κατάλληλους παράγοντες, όπως το pH και τη περιεκτικότητα σε αλάτι, το υγρόλυμα υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη. Η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευσή της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα ανθεκτική στον χρόνο και στους φυσικοχημικούς παράγοντες. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η γέλη πυριτίας που διατηρείται κορεσμένη αναμένεται να παραμείνει υγιής για 25 έτη στο πεδίο. Αναφέρεται, επίσης, ότι αποτελεί μία λύση οικονομικά ελκυστική με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των παραδοσιακών μεθόδων βελτίωσης. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει την τεχνική της παθητικής σταθεροποίησης των ρευστοποιήσιμων εδαφών, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές.

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 σχετικά καινούριο.

1.2 Αντικείμενο της έρευνας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής 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 δοκιμίων άμμου. Πιο συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου δοκιμές:

1. Μονοδιάστατης συμπίεσης, με σκοπό τη διερεύνηση της ενδοσιμότητας των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου (τύπος άμμου δοκιμών συμπίεσομέτρου: M31, Fontainebleau και Longstone) και σύγκρισή της με αυτή των φυσικών
2. Ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης, με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης σε ανακυκλική φόρτιση των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου M31 και τη σύγκρισή της με αυτή των φυσικών δοκιμίων.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Επιγραμματικά,

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

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές καθώς και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον προσδιορισμό τους.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης, ο τρόπος παρασκευής των δοκιμίων καθώς και η λειτουργία της συσκευής. Παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών, περιγράφονται και συγκρίνονται με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης της ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης, ο τρόπος παρασκευής των δοκιμίων καθώς και η λειτουργία της συσκευής. Παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών, περιγράφονται και συγκρίνονται με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 7 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας.

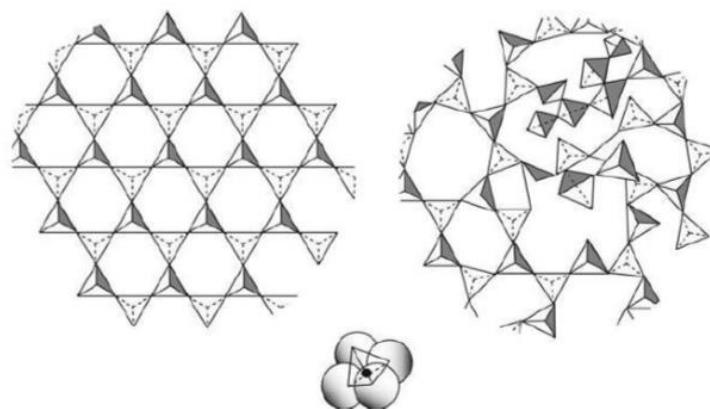
Τέλος, στο παρόν τεύχος της εργασίας συμπεριλαμβάνονται παραρτήματα όπου παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων όλων των δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το παράρτημα Π1 αφορά δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και το παράρτημα Π2 αφορά τις ανακυκλικές δοκιμές στη τριαξονική συσκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ

2.1 Επιστήμη των Κολλοειδών

2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών

Η κολλοειδής επιστήμη μελετά συστήματα που περιλαμβάνουν κινητικές ομάδες, οι οποίες έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τις ατομικές διαστάσεις (> 1 nm) και ταυτόχρονα αρκετά μικρό (< 1 μ m), ώστε να μην επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Επομένως, έχοντας αυτές τις διαστάσεις τα κολλοειδή σωματίδια διαφοροποιούνται αισθητά από τα αιωρήματα και από τα πραγματικά διαλύματα. Τα κολλοειδή σωματίδια μπορεί να είναι είτε διακριτά, όπως ένα πλήθος σκεδασμένων σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας μέσα στον υδάτινο διασπορέα πριν τη γελοποίηση, είτε μη διακριτά, όπως ένα συνεχές δίκτυο από διασυνδεδεμένα κολλοειδή σωματίδια πυριτίας μετά τη γελοποίηση. Τα άτομα ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να διατάσσονται σε κρυσταλλική ή άμορφη δομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



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

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των σωματιδίων της κολλοειδούς κατάστασης υποδηλώνουν τεράστιους λόγους επιφάνειας/όγκου ή επιφάνειας/ μάζας. Συγκεκριμένα, οι προδιαγραφές του παραγωγού για την πυριτία Ludox-SM είναι $345\text{m}^2/\text{g}$. Συμπεραίνουμε ότι αυτά τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με έναν ιδιαίτερο τρόπο που καθορίζεται από τις ιδιότητες των επιφανειών και των διεπιφανειών. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης είναι κυρίως ηλεκτροστατικές (απωστικές) λόγω της φορτισμένης στρώσης στην επιφάνειά τους και δυνάμεις τύπου Van der Waals (ελκτικές) που προκύπτουν εξαιτίας της μόνιμης ή παροδικής πόλωσης. Όταν

υπερτερούν οι πρώτες, τα σωματίδια παραμένουν σκεδασμένα στον υγρό διασπορέα (υγρόλυμα), ενώ όταν υπερτερούν οι δεύτερες, τα σωματίδια συνενώνονται και το υγρόλυμα μετατρέπεται σε γέλη. Η συνάφεια της γέλης (που έχει σχηματιστεί στους πόρους του εδάφους) με τους κόκκους του εδαφικού σχηματισμού προσδίδει ένα είδος συνεκτικότητας στην εδαφική μάζα και την προστατεύει από κατάρρευση λόγω ρευστοποίησης.

2.1.2 Η ορολογία και οι μεταφράσεις των χημικών όρων

Παρακάτω, σε αλφαβητική σειρά αποσαφηνίζονται οι χημικοί όροι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Αιώρημα (suspension): το ανομοιογενές μίγμα στερεών σωματιδίων που αιωρούνται μέσα σε υγρό ή αέριο, τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν διαστάσεις μεγαλύτερες από 1000μm και όταν το υγρό ισορροπήσει λόγω των βαρυτικών δυνάμεων κατακάθονται ως ίζημα.

Γέλη (gel): Αφορά το σύστημα που αποτελείται από ένα συνεχή στερεό σκελετό, ο οποίος συντίθεται από κολλοειδή σωματίδια ή πολυμερή και περιβάλλει μια συνεχή υγρή φάση, δηλαδή περιέχει πόρους στη μάζα της.

Πραγματικό διάλυμα (true solutions): ομογενές μίγμα διαλύτη – διαλυμένης ουσίας, όπου η διαλυμένη ουσία δεν υφίσταται ως στερεό.

Σταθεροποιημένο υγρόλυμα: οι απωστικές δυνάμεις αποτρέπουν τη συσσωμάτωση των κολλοειδών σφαιριδίων και τη γελοποίηση.

Σταθεροποιημένο έδαφος: το έδαφος που έχει στους πόρους του γέλη πυριτίας.

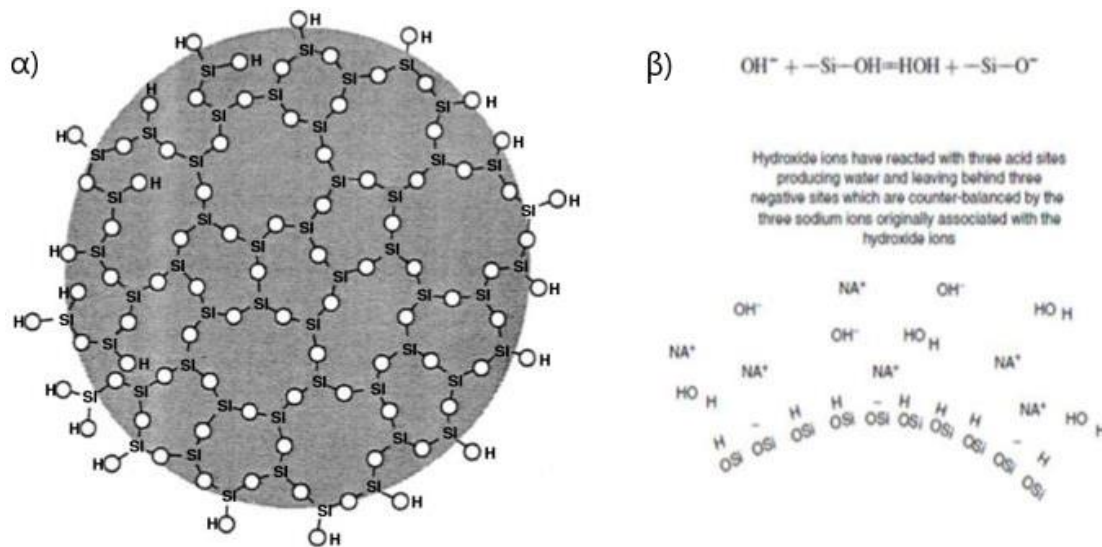
Υγρόλυμα (sol): Μια σταθερή διασπορά (stable dispersion) στερεών κολλοειδών σωματιδίων σε υγρό διασπορέα, (aquasol ή hydrosol) Μια σταθερή διασπορά στερεών κολλοειδών σωματιδίων σε νερό.

2.1.3 Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας Ludox® SM

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών έχει την εμπορική ονομασία Ludox® SM (προϊόν της Sigma - Aldrich®) και είναι μία υδάτινη διασπορά διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με μέγεθος στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους (7 nm). Τα σωματίδια είναι συμπαγή (μη πορώδη) και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή [Ludox Colloidal Silica brochure, 2012]. Η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων είναι 345 m²/g. Το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO₂ 30% wt. και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10 με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na₂O. Το ιζώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρούλυματος

είναι 5.5 cP. Η τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτήν του νερού, η οποία ισούται με 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία. Μετά την αραιώση του υγρού το ιξώδες του παίρνει ακόμα μικρότερη τιμή.

Το σωματίδιο της κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2α. Το τέταρτο οξυγόνο της βασικής τετραεδρικής μονάδας SiO_4 βρίσκεται εκτός του επιπέδου της σελίδας. Στην άμορφη πυριτία η γωνία του δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si ποικίλει, η απόσταση όμως πυριτίου – οξυγόνου Si-O είναι σταθερή. Η επιφάνεια του σωματιδίου είναι πλήρως υδροξυλιωμένη και εμφανίζει μία αρνητικά φορτισμένη στρώση, όταν αποβάλλει πρωτόνια H^+ σε αλκαλικό περιβάλλον. Επίσης, εμφανίζει μία θετικά φορτισμένη στρώση, όταν προσλαμβάνει πρωτόνια H^+ από ένα έντονα όξινο περιβάλλον. Η αμοιβαία ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των επιφανειακών στρώσεων των σωματιδίων αποτρέπει τη συσσωμάτωση και τη γελοποίηση, δηλαδή σταθεροποιεί το υγρόλυμα. Το σωματίδιο έχει αναπτυχθεί στο μέγεθος των 7 nm ύστερα από διαδοχικό πολυμερισμό (polymerization) και συμπύκνωση (condensation) της βασικής τετραεδρικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Τα σωματίδια της κολλοειδούς πυριτίας παρασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ομοιόμορφα και συγκεκριμένου μεγέθους. Αυτό επιτυγχάνεται με ελεγχόμενες διαδικασίες πυρηνοποίησης (nucleation), πολυμερισμού και ανάπτυξης. Όταν φτάσουν στο επιθυμητό μέγεθος, το υγρόλυμα σταθεροποιείται με προσθήκη αλκαλικού παράγοντα. Όταν χρειαστεί να γίνει αποσταθεροποίηση του υγρού, τότε προσθέτουμε οξύ (ρυθμίζοντας το pH) και άλας (επιτυγχάνοντας τη γελοποίηση). Η σύνδεση των σωματιδίων κατά τη γελοποίηση (gelation) γίνεται με το σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης και την αποβολή νερού που παραμένει στους πόρους της γέλης. Στο Σχήμα 2.2β παρουσιάζεται η σταθεροποίηση του υγρού με χρήση του αλκαλικού παράγοντα NaOH (υδροξείδιο νατρίου). Ο αλκαλικός παράγοντας αντιδρά με ένα ποσοστό από τις ασθενώς όξινες ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, σχηματίζοντας ένα μόριο νερού και αφήνοντας πίσω μία φορτισμένη περιοχή. Το ιόν υδροξυλίου έχει διττό ρόλο. Σε υψηλές τιμές pH βοηθά να εμφανιστούν αρνητικά φορτισμένες περιοχές στην επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων και αποτρέπει τον σχηματισμό γέλης. Σε ενδιάμεσες τιμές pH το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως καταλύτης στην αντίδραση της συμπύκνωσης και προάγει τον σχηματισμό γέλης. Η κολλοειδής πυριτία Ludox[®] SM είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δε χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευσή της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Η διάρκεια της ζωής της πυριτίας ξεπερνά τα 25 έτη και προτείνεται για την καλύτερη διατήρησή της αποθήκευση σε ξηρό περιβάλλον θερμοκρασίας 20-25 °C.



Σχήμα 2.2 (α) Σχηματική διδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας [πηγή: Bergna & Roberts (2006)] , (β) Σταθεροποίηση του υγρού με χρήση του αλκαλικού παράγοντα

2.2 Φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρολυμάτων και των γελών πυριτίας που σχετίζονται με τη σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών

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

Η κατανόηση των μηχανισμών γελοποίησης, ωρίμανσης και ξήρανσης μέσα από μία φυσικοχημική σκοπιά, καθώς και η εμπειρική παρατήρηση στο εργαστήριο μας οδηγεί στο να θέσουμε υπό αμφισβήτηση ορισμένες τοποθετήσεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Για παράδειγμα, αναφέρουμε την τοποθέτηση ότι «τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν εμφανίζουν πίεση πόρων (και άρα να αμελείται η

μέτρησή της στα πειράματα), αφού μέσα στους εδαφικούς πόρους η γέλη έχει μετατραπεί σε στερεό». Χρησιμοποιείται μάλιστα ο λανθασμένος και παραπλανητικός όρος «στερεοποίηση της πυριτίας» (solidification of silica) ο οποίος συγχέεται με τη διαδικασία της γελοποίησης [πηγή: Towhata I., "Geotechnical Earthquake Engineering", Springer, 2008]. Η γέλη, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ένα διφασικό υλικό (ή τριφασικό αν υποστεί μερική ξήρανση). Αποτελείται από έναν συνεχή στερεό σκελετό που περικλείει μία συνεχή υγρή φάση (ή μία υγρή και μία αέρια φάση). Ένα σταθεροποιημένο εδαφικό δοκίμιο, με μη ξηραμένη γέλη στους πόρους του, το οποίο υπόκειται σε διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες, αναπτύσσει πίεση στο νερό των πόρων. Μάλιστα, η πίεση αυτή μπορεί να είναι μετρήσιμη υπό προϋποθέσεις, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα πειράματα της βιβλιογραφίας, και σε όσα εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, τα δοκίμια ωρίμασαν υπό συνθήκες που απέτρεπαν την ξήρανση της γέλης. Αν η γέλη ξηρανθεί, το δοκίμιο συμπεριφέρεται σαν φυσική άμμος, με την έννοια ότι δεν παρουσιάζει συνεκτικότητα και δεν διατηρεί τη δομή της χωρίς περίσφιξη.

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

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

νερό των πόρων της γέλης συγκρούονται, συσσωματώνονται και συνδέονται με το συνεχή στερεό σκελετό. Η διαδικασία εξελίσσεται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά από το σχηματισμό της γέλης. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στο νερό των πόρων της γέλης που μόλις έχει σχηματιστεί, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να συμβούν συγκρούσεις. Σε συνθήκες εργαστηρίου, τα δοκίμια ωριμάζουν αεροστεγώς κλεισμένα και διατηρούν τη δική τους υγρασία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες αλυσίδες και να πυκνώνει ο στερεός σκελετός της γέλης.

2.2.1 Γελοποίηση (Gelation)

Οι Brinker και Scherer δίνουν τον εξής εξαιρετικό ορισμό της διαδικασίας μετατροπής ενός υγρού υγρού σε γέλη: «γελοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία συμπλέγματα δημιουργούνται από τη συμπύκνωση των πολυμερών ή τη συσσωμάτωση των σωματιδίων μέχρι τη στιγμή που τα συμπλέγματα συγκρούονται. Τότε, δεσμοί δημιουργούνται μεταξύ των συμπλεγμάτων και σχηματίζεται ένα μεμονωμένο γιγαντιαίο σύμπλεγμα που ονομάζεται γέλη. Τη στιγμή που σχηματίζεται η γέλη, αρκετά συμπλέγματα βρίσκονται σκεδασμένα στην υγρή φάση, χωρίς να έχουν ακόμα ενωθεί στη σκελετική δομή. Με την πάροδο του χρόνου συνδέονται προοδευτικά με το δίκτυο και η δυσκαμψία της γέλης αυξάνεται. Η γέλη εμφανίζεται όταν ο τελευταίος δεσμός σχηματίζεται μεταξύ δύο μεγάλων συμπλεγμάτων και δημιουργείται έτσι η ενιαία σκελετική δομή της στερεάς φάσης. Ο τελευταίος δεσμός δεν διαφέρει σε τίποτα από τους αναρίθμητους άλλους που σχηματίζονται πριν και μετά το σημείο γελοποίησης (gel point), πέραν από το γεγονός ότι είναι το ορόσημο έναρξης της ελαστικότητας του συνεχούς στερεού σκελετού. Στο σημείο γελοποίησης το ιξώδες αυξάνεται απότομα και η γέλη αρχίζει να αποκρίνεται ελαστικά στην τάση».

2.2.2 Ωρίμανση (Aging)

Οι αντιδράσεις που προκαλούν τη γελοποίηση δε σταματούν στο σημείο γέλης. Υπάρχει μια σημαντική ποσότητα ολιγομερών που είναι ελεύθερα να διαχυθούν και να συγκρουστούν και επίσης η σκελετική δομή διαθέτει ικανή εσωτερική κινητικότητα, ώστε να προκύψουν περαιτέρω αντιδράσεις συμπύκνωσης. Οι μηχανικές ιδιότητες της γέλης συνεχίζουν να μεταβάλλονται για μακρύ χρονικό διάστημα μετά το χρόνο γέλης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ωρίμανση και οδηγεί σε ένα πιο στιβαρό και πιο πυκνό στερεό σκελετικό δίκτυο. Οι διάφορες χημικές αντιδράσεις και φυσικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται κατά την ωρίμανση είναι ο πολυμερισμός, η εκτράχυνση και η αλλαγή φάσης. Η εκτράχυνση πραγματοποιείται με τη μεταφορά υλικού της στερεάς φάσης από περιοχές υψηλής διαλυτότητας προς περιοχές χαμηλής διαλυτότητας. Το σκελετικό δίκτυο γίνεται πιο στιβαρό χωρίς να συρρικνώνεται, αφού τα κέντρα των σωματιδίων δε συγκλίνουν. Ο

πολυμερισμός μέσω συμπύκνωσης είναι η κύρια διεργασία που σχετίζεται με την ωρίμανση της κολλοειδούς πυριτίας. Πρόκειται για τον ίδιο μηχανισμό που προκαλεί συσσωμάτωση κατά τη γελοποίηση και επομένως εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες, δηλαδή από τη συγκέντρωση πυριτίας που δεν έχει ενσωματωθεί ακόμα στο στερεό ιστό, από το pH, από την περιεκτικότητα αλάτων και από τη θερμοκρασία.

2.2.3 Ξήρανση (Drying)

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

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

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

Ένα από τα χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας που την καθιστά ελκυστική ως μέσο σταθεροποίησης ρευστοποιήσιμων εδαφών είναι η εξαιρετική

ανθεκτικότητά της στη φθορά του χρόνου. Οι παραμορφώσεις που θα προκαλέσει ένα σεισμικό γεγονός αναμένεται να καταστρέψουν ένα μέρος από το σκελετικό δίκτυο της γέλης. Το ίδιο αναμένεται να συμβεί και κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων σε συνθήκες εργαστηρίου. Η ενδεχόμενη ανάκαμψη της γέλης της πυριτίας σχετίζεται με κάποιον μηχανισμό αυτό-ίασης.

Η ευεργετική δράση της γέλης, όσον αφορά τη βελτίωση της εδαφικής απόκρισης, οφείλεται στην αλληλεπίδραση του στερεού σκελετού της γέλης με τον εδαφικό σκελετό. Η καθαρή κορεσμένη γέλη πυριτίας είναι ένα πολύ μαλακό ευπαραμόρφωτο υλικό με αμελητέα διατμητική αντοχή. Το σταθεροποιημένο έδαφος που περιέχει γέλη στους πόρους του, όπως θα δείξουμε σε επόμενες ενότητες, διατηρεί τη δομή του χωρίς να καταρρέει σε συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης πολλών κύκλων. Η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας. Μπορούμε, επομένως, να συμπεράνουμε ότι ο σκελετός της πυριτίας δρα ευεργετικά μέσω των δεσμών που δημιουργεί μεταξύ των κόκκων του εδάφους και μέσω της ενθυλάκωσής τους.

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

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

3.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα

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

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 N° 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:

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

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

Πίνακας 3.1 Διαστάσεις οπών κοσκίνων

3.2 Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων

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

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

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. Υπο 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 (G_s) 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 (100 περίπου ανά στρώση), από ειδικό χειροκίνητο όργανο. Στη συνέχεια καταγράφηκε ο συνολικός όγκος του δοκιμίου και ζυγίστηκε το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε. Αντίστοιχα, με τον υπολογισμό του μέγιστου δείκτη πόρων, υπολογίζεται και ο ελάχιστος δείκτης πόρων.

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, η άμμος Fontainebleau και η άμμος Longstone. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 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 στίλβωμένους 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 $C_u=1,66$.

3.3.2 Άμμος Fontainebleau

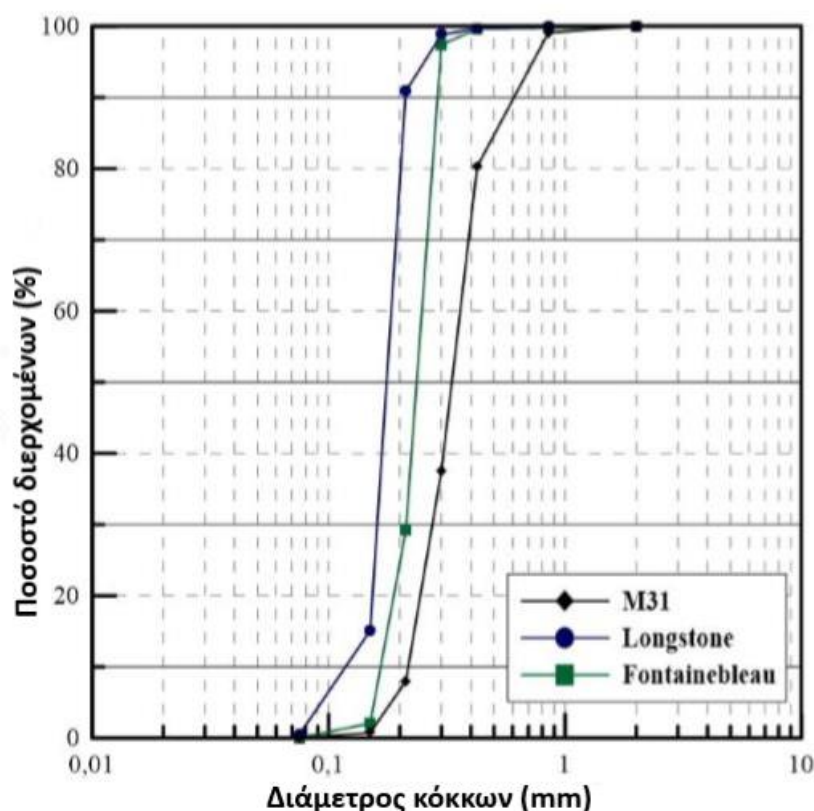
Η άμμος Fontainebleau είναι μια λευκή πυριτική άμμος που αποτελείται από λεπτούς στρογγυλούς κόκκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Έχει ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2,64$, μέγιστο και ελάχιστο δείκτη πόρων $e_{max}=0,866$ και $e_{min}=0,540$ αντίστοιχα, και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της είναι $D_{10}=0,165$ mm, $D_{30}=0,214$ mm, $D_{50}=0,236$ mm, $D_{60}=0,246$ mm και $C_u=1,49$.

3.3.3 Άμμος Longstone

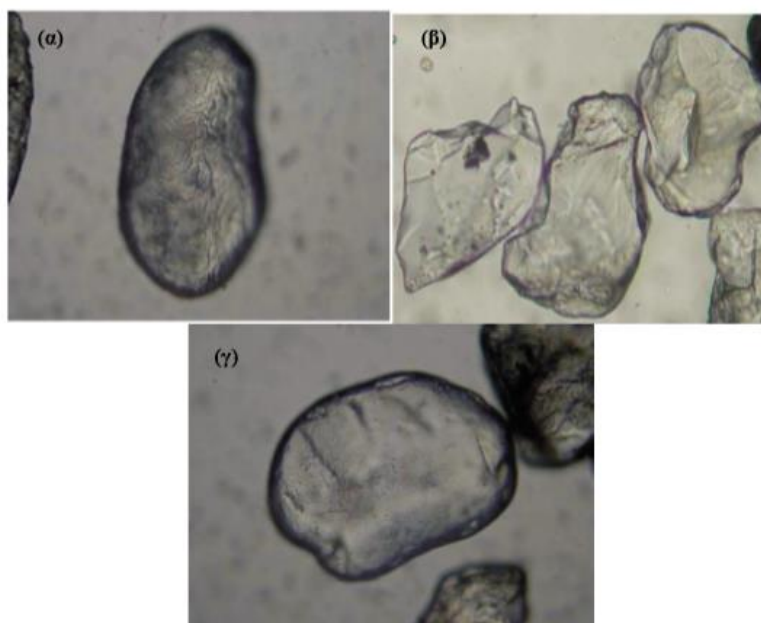
Η άμμος Longstone αποτελείται από λεπτούς και γωνιώδεις κόκκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων έχει τιμή $G_s=2,64$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων είναι $e_{max}=0,995$ και $e_{min}=0,614$ αντίστοιχα, τιμές μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες άμμους λόγω των γωνιωδών 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 $C_u=1,56$.

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 λυώδους 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 Α και Β, 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.



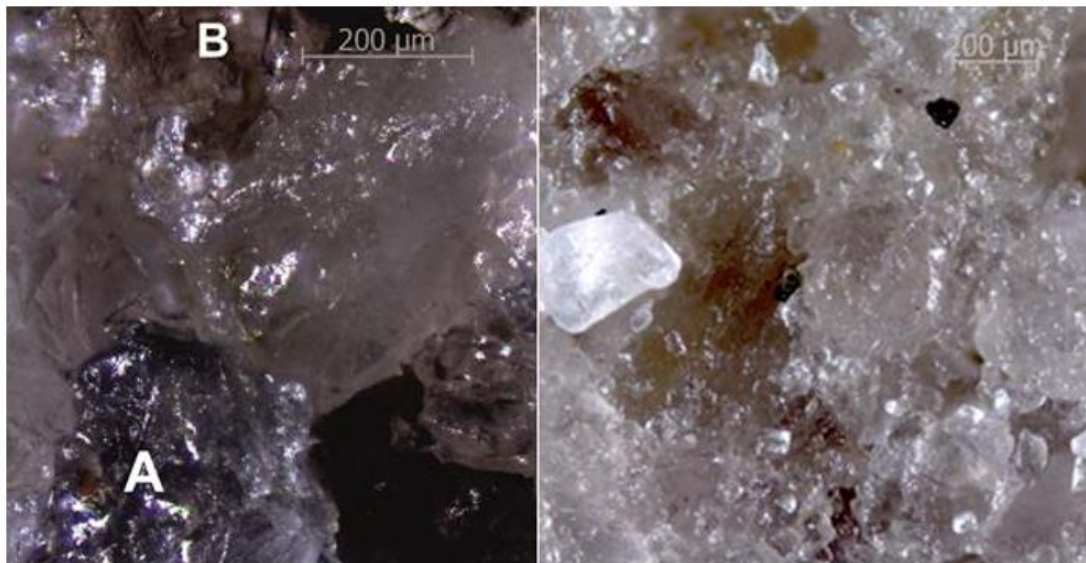
Σχήμα 3.1 Κοκκομετρικές καμπύλες άμμων M31, Fontainebleau και Longstone



Σχήμα 3.2 φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης 100×) των κόκκων της α) άμμου M31, β) άμμου Longstone και γ) άμμου Fontainebleau
[Πηγή: Τσομόκος και Γεωργιάννου, 2010]

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

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά άμμων M31, Longstone και Fontainebleau



Σχήμα 3.3 Φωτογραφίες σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο



Σχήμα 3.4 Φωτογραφία υγρούματος κολλοειδούς πυριτίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Η μονοδιάστατη συμπίεση αποτελεί τη συνηθέστερη δοκιμή Εδαφομηχανικής, λόγω των εκτεταμένων πρακτικών εφαρμογών αλλά και της δυνατότητας επιβολής της στο εργαστήριο με απλές σχετικά διατάξεις. Από τη δοκιμή εξάγονται συμπεράσματα για τη συμπιεστότητα και τη διογκωσιμότητα του εδαφικού υλικού, την τάση προφόρτισής του (και κατ' επέκταση το βαθμό υπερστερεοποίησης), το μέγεθος και τη χρονική εξέλιξη της καθίζησης και το συντελεστή στερεοποίησής του.

Μονοδιάστατη συμπίεση είναι η φόρτιση ενός εδαφικού στοιχείου κατά την οποία του επιβάλλεται ορθή παραμόρφωση στον κατακόρυφο άξονα (z) με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών παραμορφώσεων στους άξονες (x, y) καθώς και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων, δηλαδή:

$$\varepsilon_{zz} \neq 0, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

Όσον αφορά τις τάσεις, εκτός από την κατακόρυφη τάση, αναπτύσσονται και οριζόντιες τάσεις στα παράπλευρα επίπεδα, όπου η παραμόρφωση παρεμποδίζεται από τα ανένδοτα τοιχώματα του δοχείου. Με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης και τη συμπίεση στην κατακόρυφη διεύθυνση, το έδαφος τείνει να διογκωθεί πλευρικά. Επειδή, όμως, η πλευρική διόγκωση παρεμποδίζεται, αναπτύσσονται οριζόντιες θλιπτικές τάσεις σ'_h , οι οποίες αυξάνουν με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης σ'_z . Οι αναπτυσσόμενες οριζόντιες τάσεις εξαρτώνται από την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση και υπολογίζονται μέσω του συντελεστή ουδέτερης ώθησης ($\sigma'_h = K_0 \sigma'_z$).

Η μονοδιάστατη παραμόρφωση είναι συνήθης τρόπος παραμόρφωσης των εδαφικών υλικών, επειδή π.χ. συμβαίνει κατά την ιζηματογένεση. Πράγματι, η απόθεση των εδαφικών υλικών στους πυθμένες των θαλασσών γίνεται σε οριζόντιες στρώσεις μεγάλης έκτασης, οπότε με τη συνεχιζόμενη απόθεση των υπερκειμένων ιζημάτων οι υποκείμενες εδαφικές αποθέσεις συμπιέζονται στην κατακόρυφη διεύθυνση. Λόγω της μεγάλης έκτασης των εδαφικών αποθέσεων η παραμόρφωση στο οριζόντιο επίπεδο παρεμποδίζεται και πληρούνται οι προϋποθέσεις της μονοδιάστατης παραμόρφωσης. Ο τύπος αυτός της παραμόρφωσης είναι αρκετά συνήθης και στα τεχνικά έργα, επειδή κατακόρυφες φορτίσεις μεγάλης έκτασης σε οριζόντιες εδαφικές στρώσεις, οδηγούν σε μονοδιάστατη παραμόρφωση όπως π.χ. επιχώματα οδοποιίας μεγάλου πλάτους, δεξαμενές υγρών καυσίμων μεγάλης διαμέτρου, κτίρια με μεγάλη επιφάνεια κάτοψης εδραζόμενα σε πλάκα θεμελίωσης (γενική κοιτόστρωση) αλλά ακόμη και θεμελιώσεις με μεμονωμένα πέδιλα σε εδαφικές στρώσεις μικρού πάχους (σε σχέση με η διάσταση του πεδύλου).



Σχήμα 4.1 Συσσκευή Wykeham Farrance No 24255

4.2 Περιγραφή της συσκευής

Η δοκιμή της μονοδιάστατης συμπίεσης πραγματοποιήθηκε στη συσκευή του συμπιεσομέτρου (ή οιδημέτρου) Wykeham Farrance No 24255, που φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η συσκευή αποτελείται από τη διάταξη φόρτισης και την κυψέλη στερεοποίησης. Η κυψέλη απαρτίζεται από ένα δαχτυλίδι στερεοποίησης (κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι) με λεία και άκαμπτα τοιχώματα για να παρεμποδίζεται η ανάπτυξη πλευρικών τριβών και παραμορφώσεων, από μία στεγανή βάση και σώμα κυψέλης, από δύο πορώδεις δίσκους ώστε να επιτρέπεται η στράγγιση και από ένα μεταλλικό κεφαλόδεσμο φόρτισης.

Η συσκευή φόρτισης έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει ένα μεγάλο εύρος ορθών τάσεων στο δοκίμιο, ανάλογο των κιλών που εφαρμόζονται χειροκίνητα από τον πειραματιστή, καθώς και από τη θέση στην οποία τοποθετούνται (μοχλοβραχίονας της ροπής). Οι τάσεις που μεταβιβάζει η συσκευή στο δοκίμιο με την τοποθέτηση 1kg σε 3 διαφορετικές θέσεις, για 3 διαφορετικές τιμές της διαμέτρου του δαχτυλιδιού, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το δαχτυλίδι στερεοποίησης $d = 50\text{mm}$ (Πίνακας 4.1). Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να εφαρμόσει η συσκευή είναι 400kg.

Δαχτυλίδι	d (mm)	h (mm)	W (gr)
A	74,89	19,13	121,83
B	74,9	18,95	118,38
50	49,9	17,6	54,1

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά δαχτυλίων συμπιεσομέτρου

Wykeham Farrance international Model No 24255			
W = 1 kg	1η σπή (1:9,62)	2η σπή (1:9,82)	3η σπή (1:11,04)
d = 50 mm E = 19,635 cm²	48,063 kPa	49,063 kPa	55,158 kPa
d = 70 mm E = 38,485 cm²	24,522 kPa	25,032 kPa	28,142 kPa
d = 75 mm E = 44,179 cm²	21,361 kPa	21,806 kPa	24,515 kPa

Πίνακας 4.2 Τάσεις που μεταβιβάζει η συσκευή για φόρτιση 1 kg

4.3 Προετοιμασία πειραματικής διαδικασίας

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών, η οποία είναι κοινή για κάθε τύπο άμμου που χρησιμοποιείται στα πειράματα, αλλά και η δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής του συμπιεσομέτρου.

4.3.1 Παρασκευή δοκιμίου φυσικής άμμου

Η παρασκευή του δοκιμίου φυσικής άμμου γίνεται επί τόπου στη συσκευή. Η κυψέλη τοποθετείται στη συσκευή του συμπιεσομέτρου, στη βάση της εφαρμόζεται ο ένας πορώδης δίσκος, επάνω του το δαχτυλίδι στερεοποίησης και έπειτα, η άμμος αποτίθεται με την βοήθεια χωνιού μέχρι την πλήρωσή του. Στη συνέχεια τοποθετείται ο άλλος πορώδης δίσκος, μία διάταξη σταθεροποίησης του δαχτυλιδιού η οποία σφίγγει με βίδες και τέλος, ο μεταλλικός κεφαλόδεσμος φόρτισης. Η μάζα των δοκιμών ζυγίζεται πριν και μετά τη φόρτιση για επαλήθευση.

4.3.2 Παρασκευή δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου

Η παρασκευή δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου γίνεται με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Το υγρόλυμα αποτελείται από απιονισμένο νερό στο οποίο έχει προστεθεί σταθεροποιητής (LUDOX SM-30) και χλωριούχο νάτριο (NaCl). Το pH του υγρούλυματος ρυθμίζεται με την προσθήκη αραιού διαλύματος HCl ώστε να έχει τιμές pH = 5,5÷6,5. Σε ένα δοχείο τοποθετείται το δαχτυλίδι στερεοποίησης και το υγρόλυμα της κολλοειδούς πυριτίας, η ξηρή άμμος εμβαπτίζεται σε αυτό. Το δοκίμιο παραμένει σε αεροστεγείς συνθήκες για περίπου 50 ώρες, χρόνος που σηματοδοτεί το τέλος της πήξης του υγρούλυματος. Στη συνέχεια, το δαχτυλίδι με το σταθεροποιημένο πλέον εδαφικό υλικό τοποθετείται στη συσκευή. Οι πορώδεις δίσκοι είναι κορεσμένοι, τοποθετούνται όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα που περιγράφονται στην παρασκευή του φυσικού δοκιμίου και η κυψέλη πληρώνεται με απιονισμένο νερό.



Σχήμα 4.2 Παρασκευή σταθεροποιημένου δοκιμίου CS=10% άμμου M31 α) υγρόλυμα πυριτίας, β) καλούπι συσκευής συμπίεσομέτρου, γ) εμφάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας, δ) και ε) σταθεροποιημένο δοκίμιο μετά από ώρες ωρίμανσης, και στ) σταθεροποιημένο δοκίμιο πριν τη φόρτιση.

4.3.3 Δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής

Πριν την εκτέλεση των πειραμάτων είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί η δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής. Η συσκευή αποτελείται από μεταλλικά στοιχεία με κοχλιωτές συνδέσεις, οπότε μετρώνται οι παραμορφώσεις, οι οποίες οφείλονται στη συσκευή και όχι σε πραγματική καθίζηση του δοκιμίου. Για να επιτευχθεί αυτό, τοποθετείται στη συσκευή η κυψέλη στερεοποίησης με ένα μεταλλικό δοκίμιο το οποίο φορτίζεται και αποφορτίζεται με το ίδιο εύρος κιλών που εφαρμόζεται στα δοκίμια, σταθεροποιημένα ή μη, και καταγράφονται οι αποκρίσεις του μηχανοστοιχείου.

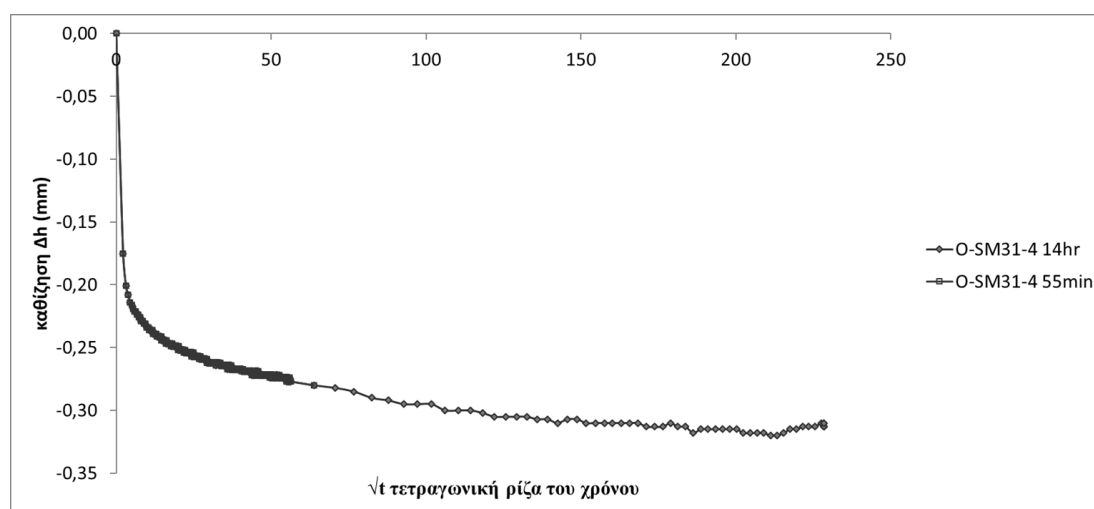
4.4 Πειραματική διαδικασία και επεξεργασία μετρήσεων

4.4.1 Πειραματική διαδικασία

Αφού παρασκευαστούν τα δοκίμια, όπως περιγράφεται σε παραπάνω κεφάλαιο, ξεκινάει η εκτέλεση του πειράματος. Αρχικά, ισορροπείται η δοκός φόρτισης και τοποθετείται το ηλεκτρονικό μηχανοστοιχείο στο σύστημα της κυψέλης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε στοιχειώδεις ενέργειες του πειραματιστή όπως για παράδειγμα η κατακόρυφη εφαρμογή της πίεσης, η ακριβής ανάγνωση του

μηκυσιομέτρου, ή ακόμα η σωστή τοποθέτηση του μετρητή. Το εδαφικό δοκίμιο φορτίζεται χειροκίνητα τοποθετώντας βάρη στο γάντζο φόρτισης της συσκευής με την εξής σειρά: 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 και 256 kg. Σε κάθε στάδιο, λοιπόν, το εφαρμοζόμενο φορτίο διπλασιάζεται και πριν την τοποθέτησή του λαμβάνεται η αρχική μέτρηση του μηκυσιομέτρου, που είναι η τελική τιμή για την προηγούμενη βαθμίδα φόρτισης.

Στα δοκίμια φυσικής άμμου κάθε στάδιο φόρτισης διαρκεί 5 λεπτά εφόσον το φαινόμενο της στερεοποίησης ολοκληρώνεται ακαριαία. Ενώ, στα σταθεροποιημένα δοκίμια κάθε στάδιο φόρτισης διαρκεί 55 λεπτά οπότε και οι καθιζήσεις έχουν σταθεροποιηθεί. Για την επαλήθευση της επάρκειας αυτού του χρονικού διαστήματος φόρτισης, καταγράφονται μέσω υπολογιστή οι καθιζήσεις του δοκιμίου ανά 5". Παρατηρήθηκε ότι ήδη από τα πρώτα 55 λεπτά η εξέλιξη των καθιζήσεων έχει ολοκληρωθεί κατά 90%. Ο δείκτης πόρων τις επόμενες 13 ώρες μεταβάλλεται κατά 0,3%. Αυτή η εξέλιξη χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1, όπου απεικονίζεται η μεταβολή της καθίζησης συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για τη φόρτιση των 256kg (14,1 MPa) για χρονικό διάστημα 55 λεπτών και 14 ωρών. Επιπλέον, για την άμμο M31 πραγματοποιήθηκε δοκιμή με διάρκεια φόρτισης 24 ώρες για κάθε στάδιο και παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει διαφορά στην απόκρισή της.



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα μεταβολής καθίζησης Δh – τετραγωνικής ρίζας χρόνου \sqrt{t}

Για πληρέστερη εικόνα όσον αφορά τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού σε συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης, το δοκίμιο αποφορτίζεται. Ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία από αυτή της φόρτισης, αφαιρείται το φορτίο από τη συσκευή και λαμβάνοντας αρχικές και τελικές μετρήσεις σε κάθε βαθμίδα αποφόρτισης. Παρατηρήθηκε ότι τόσο στα φυσικά όσο και στα σταθεροποιημένα δοκίμια οι κλάδοι αποφόρτισης ήταν παράλληλοι μεταξύ τους ανεξάρτητα της σχετικής τους πυκνότητας. Επομένως, για λόγους σύγκρισης στα

Δοκιμή Μονοδιάστατης Συμπίεσης

διαγράμματα των παρακάτω κεφαλαίων δίνεται έμφαση στους κλάδους φόρτισης των δοκιμών.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμών όπως: ημερομηνία και χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής, χαρακτηριστικά δοκιμίου (ύψος H (mm)/ διάμετρος D (mm)/ μάζα M (gr)), αρχικός δείκτης πόρων e_0 και τύπος δοκιμίου. Η ονομασία των δοκιμών ξεκινά με το γράμμα 'Ο' το οποίο συμβολίζει τη δοκιμή του συμπιεσομέτρου (oedometer), τον τύπο της άμμου και ακολουθεί ο αριθμός της δοκιμής.

Δοκιμή	Ημερομηνία	(H/D/M)	e_0	Ώρες ωρίμανσης	Τύπος Δοκιμίου Άμμου	Χρόνος φόρτισης
O-M31-8	11/1/2019	19/49,9/60,32	0,639	-	M31	5 min
O-M31-9	11/1/2019	19/49,9/57,46	0,720	-	M31	5 min
O-M31-12	27/2/2019	17,6/49,9/53,3	0,718	-	M31	5 min
O-M31-13	1/3/2019	17,6/49,9/55,08	0,662	-	M31	5 min
O-SM31-1	16/12/2018	17,5/49,9/55,49	0,644	71	M31 (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SM31-4	10/1/2019	18,8/49,9/57,14	0,716	71	M31 (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SM31-6	14/1/2019	19/49,9/59,67	0,656	65	M31 (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SM31-7	14/1/2019	19/49,9/58,93	0,677	65	M31 (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SM31-15	24/1/2019	19/49,9/59,46	0,662	47	M31 (σταθεροποιημένο)	24 hr
O-FN-1	5/11/2018	17,6/49,9/54,02	0,679	-	Fontainebleau	5 min
O-FN-2	5/11/2018	17,5/49,9/53,14	0,704	-	Fontainebleau	5 min
O-FN-3	7/11/2018	17,6/49,9/55,04	0,651	-	Fontainebleau	5 min
O-FN-10	29/1/2019	17,6/49,9/56,51	0,608	-	Fontainebleau	5 min
O-SFN-3	7/1/2019	17,5/49,9/52,59	0,718	71	Fontainebleau	55 min
O-SFN-8	1/3/2019	19/49,9/60,67	0,617	48	Fontainebleau (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SFN-9	17/1/2019	19/49,9/57,52	0,705	45	Fontainebleau (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SFN-12	21/1/2019	19/49,9/58,9	0,665	69	Fontainebleau (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SFN-14	21/1/2019	17,6/49,9/55,01	0,652	69	Fontainebleau (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SFN-18	8/2/2019	19/49,9/59,31	0,654	65	Fontainebleau (σταθεροποιημένο)	55 min

O-LS-4	7/11/2018	17,5/49,9/49,68	0,822	-	Longstone	5 min
O-LS-5	9/11/2018	17,6/49,9/48,39	0,873	-	Longstone	5 min
O-LS-6	9/11/2018	17,6/49,9/52,03	0,743	-	Longstone	5 min
O-LS-11	29/1/2019	17,6/49,9/53,18	0,709	-	Longstone	5 min
O-SLS-5	10/1/2019	17,6/49,9/51,42	0,767	44	Longstone (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SLS-10	17/1/2019	17,6/49,9/55,61	0,634	44	Longstone (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SLS-11	17/1/2019	19/49,9/55,53	0,767	45	Longstone (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SLS-13	21/1/2019	19/49,9/55,4	0,771	69	Longstone (σταθεροποιημένο)	55 min
O-SLS-14	1/3/2019	18/49,9/53,38	0,741	48	Longstone (σταθεροποιημένο)	55 min

Πίνακας 4.3 Συγκεντρωτικά στοιχεία των δοκιμών συμπίεσομέτρου

4.4.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Το πρώτο βήμα των υπολογισμών περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του αρχικού δείκτη πόρων (e_0), από τη σχέση:

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

όπου:

V είναι ο συνολικός όγκος του εδαφικού δοκιμίου (υπολογίζεται μέσω των διαστάσεων του καλουπιού),

V_v είναι ο όγκος των πόρων (υπολογίζεται έμμεσα),

V_s είναι ο όγκος που καταλαμβάνουν οι στερεοί κόκκοι (προκύπτει ως το πηλίκο της μάζας του εδαφικού δοκιμίου προς το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων $V_s = M/G_s$)

και

G_s είναι το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων.

Έπειτα, υπολογίζεται η σχετική πυκνότητα του δοκιμίου D_r χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων για κάθε τύπο άμμου που εξετάζεται.

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

Ο υπολογισμός της συνολικής καθίζησης σε κάθε βαθμίδα φόρτισης (Δh_i) γίνεται αφαιρώντας από την αρχική ένδειξη του μηκυνομέτρου την τελική ένδειξη καθώς και την ανίστοιχη ποσότητα που υπολογίζεται από τη δοκιμή συμμόρφωσης της συσκευής.

Ακολουθως, προκύπτουν η μεταβολή του δείκτη πόρων Δe [-] και η παραμόρφωση ε [%] σε κάθε βαθμίδα φόρτισης από τις σχέσεις:

$$\Delta e_i = \frac{\Delta h_i}{h_i} (1 + e_{i-1})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} * 100$$

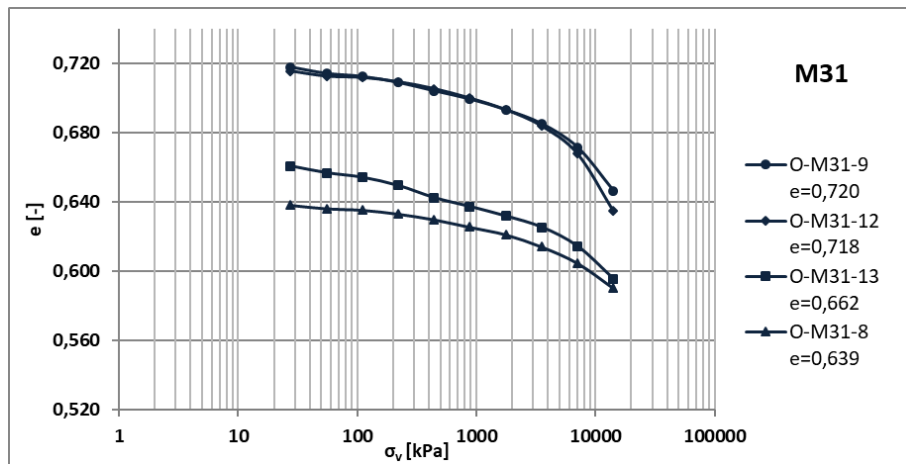
Στη συνέχεια, διαμορφώνονται τα διαγράμματα τόσο του δείκτη πόρων e [-] – κατακόρυφης τάσης σ [kPa], όσο και παραμόρφωσης ε [%] – κατακόρυφης τάσης σ [kPa], συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των φυσικών και των σταθεροποιημένων δοκιμών για διάφορες τιμές της σχετικής πυκνότητας.

4.5 Αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης

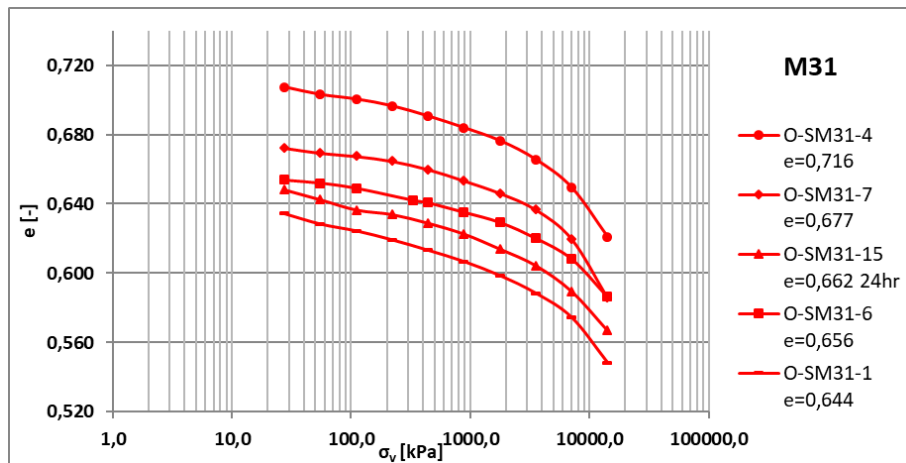
4.5.1 Άμμος M31

Στα Σχήματα 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής του δείκτη πόρων των φυσικών και σταθεροποιημένων αντίστοιχα, δοκιμών άμμου M31 συναρτήσεως του λογαρίθμου της ενεργού τάσης. Τα φυσικά όπως και τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου αλλάζουν την κλίση τους μετά το 1 MPa. Υπάρχει διαφοροποίηση ως προς αυτό, στο φυσικό δοκίμιο ενδιάμεσης πυκνότητας ($e_0=0,662$), το οποίο αλλάζει κλίση μετά το 0,5 MPa. Η ενδοσιμότητα των σταθεροποιημένων δοκιμών φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη των φυσικών (Σχήμα 4.6). Στα σχήματα θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μπλε καμπύλες αντιπροσωπεύουν τα φυσικά δοκίμια και οι κόκκινες τα σταθεροποιημένα.

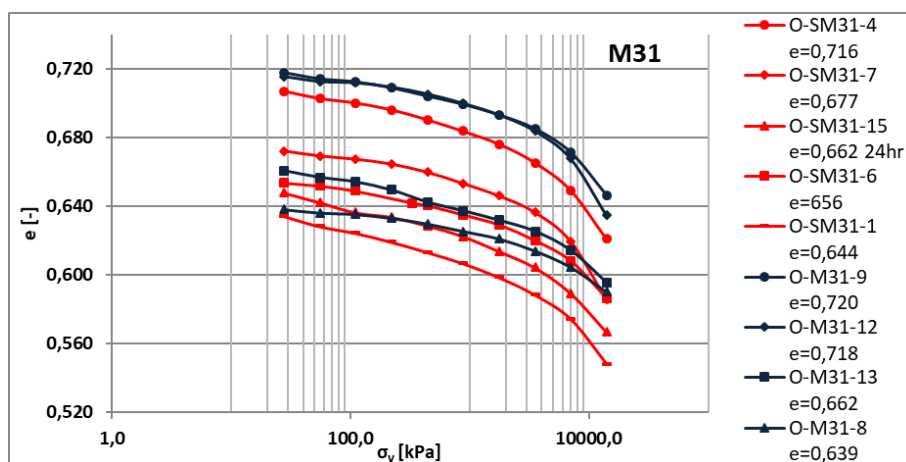
Παρατηρώντας το συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης συναρτήσεως της ενεργού τάσης (Σχήμα 4.7), τα φυσικά δοκίμια για κατακόρυφη τάση ίση με 14,1 MPa μειώνουν τελικά τον όγκο τους κατά 2,9-4,8% ενώ τα σταθεροποιημένα κατά 4,2-5,8% για την ίδια τάση. Φαίνεται ότι γενικότερα τα σταθεροποιημένα δοκίμια έχουν την τάση να παραμορφώνονται περισσότερο από τα φυσικά, διότι οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν δοκίμια διαφόρων πυκνοτήτων. Ειδικότερα, λοιπόν, μπορεί να σχολιαστεί ότι η καμπύλη του φυσικού δοκιμίου O-M31-9 με αρχικό δείκτη πόρων $e=0,720$ ταυτίζεται με αυτή του σταθεροποιημένου O-SM31-6 με αρχικό δείκτη πόρων $e=0,656$, δηλαδή με το σταθεροποιημένο δοκίμιο πυκνότερης δομής. Όλες οι υπόλοιπες καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης – κατακόρυφης τάσης των σταθεροποιημένων δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) βρίσκονται ψηλότερα των φυσικών, γενικά αλλά και των αντίστοιχων τους σε όρους αρχικού δείκτη πόρων, δοκιμών.



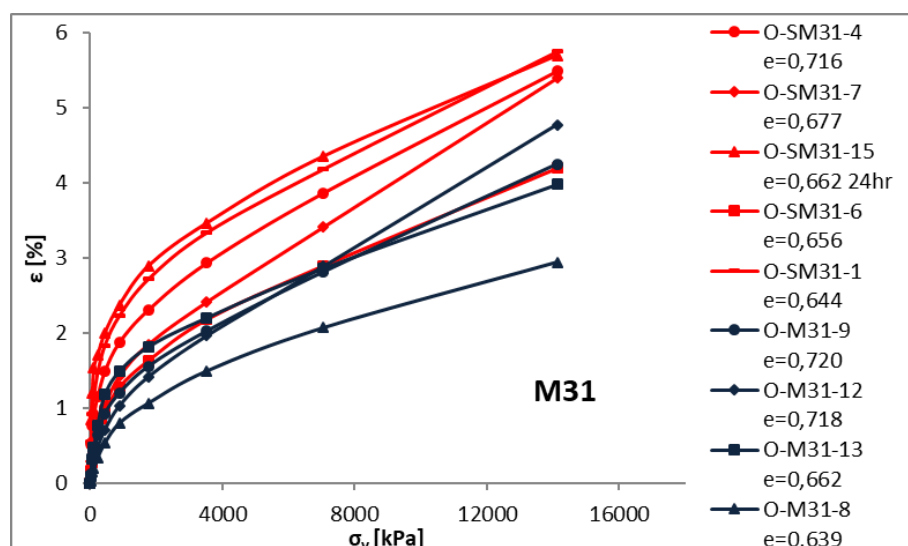
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών δοκιμών άμμου M31.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών άμμου M31.



Σχήμα 4.6 Συγκεντρικό διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκιμών άμμου M31.



Σχήμα 4.7 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] – ενεργού τάσης σ'_v [kPa] φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμίων (κόκκινες καμπύλες) άμμου M31.

Για την καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων, παρατίθενται τα Σχήματα 4.8 έως 4.10 όπου συγκρίνονται μεταξύ τους δοκίμια άμμου M31 με ίδιο ή κοντινό αρχικό δείκτη πόρων.

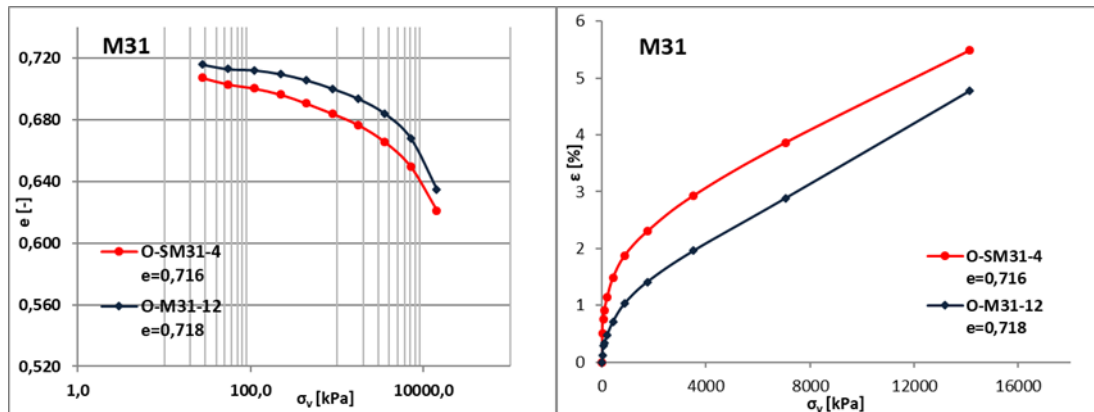
Στο Σχήμα 4.8 συγκρίνονται οι δοκιμές O-M31-4 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SM31-12 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,718$ σε $e_{0,03MPa}=0,716$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1MPa}=0,635$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=4,77\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,716$ σε $e_{0,03MPa}=0,707$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1MPa}=0,621$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,49\%$.

Στο Σχήμα 4.9 συγκρίνονται οι δοκιμές O-M31-13 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SM31-15 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,662$ σε $e_{0,03MPa}=0,661$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1MPa}=0,596$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=3,98\%$. Το εν λόγω σταθεροποιημένο δοκίμιο έχει φορτιστεί 24 ώρες σε κάθε στάδιο φόρτισης, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,662$ σε $e_{0,03MPa}=0,648$ ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1MPa}=0,567$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,69\%$.

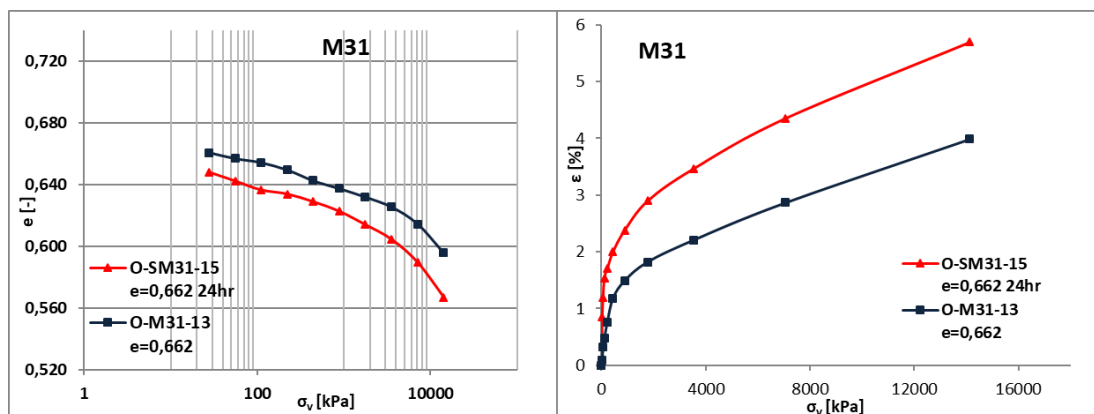
Στο Σχήμα 4.10 συγκρίνονται οι δοκιμές O-M31-8 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SM31-1 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,639$ σε $e_{0,03MPa}=0,638$,

ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,590$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=2,94\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,644$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,634$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,548$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,75\%$.

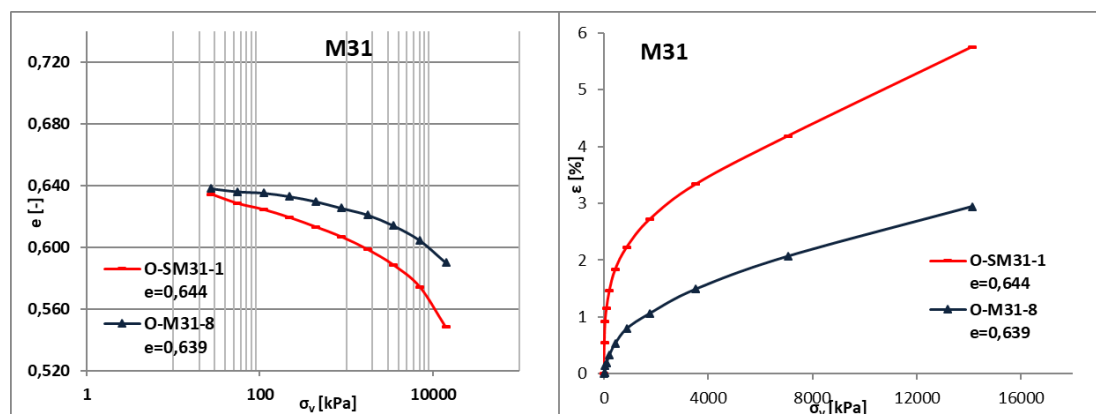
Παρατηρείται ότι όσο πυκνότερα είναι τα δοκίμια τόσο περισσότερο αυξάνονται οι παραμορφώσεις των σταθεροποιημένων δοκιμίων σε σχέση με τα φυσικά.



Σχήμα 4.8 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου M31 ($e_0=0,716$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,718$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).



Σχήμα 4.9 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου M31 ($e_0=0,662$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο με ίδιο αρχικό δείκτη πόρων, διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).



Σχήμα 4.10 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου M31 ($e_0=0,639$) με σταθεροποιημένο $CS=10\%$ (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,644$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{vol} [\%]$ - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).

4.5.2 Άμμος Fontainebleau

Στα Σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής του δείκτη πόρων e των φυσικών και σταθεροποιημένων αντίστοιχα, δοκιμίων άμμου Fontainebleau συναρτήσει του λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$. Οι καμπύλες σταθεροποιημένων και μη δοκιμίων είναι αντίστοιχα παράλληλες μεταξύ τους και παρατηρείται αλλαγή κλίσης στο 1 MPa. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα στο Σχήμα 4.13, παρατηρείται ότι η κλίση των φυσικών και των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι παρόμοια. Από το διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε συναρτήσει της ενεργού τάσης σ'_v (Σχήμα 4.14) παρατηρείται ότι τα φυσικά δοκίμια για ενεργό τάση 14,1 MPa μεταβάλλουν τον όγκο τους κατά 2,6-3,6% και τα σταθεροποιημένα για την ίδια ενεργό τάση τον μεταβάλλουν κατά 2,8-3,7%. Το Σχήμα 4.14 περιλαμβάνει δοκιμές φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου Fontainebleau διαφόρων σχετικών πυκνοτήτων. Παρατηρείται από τις καμπύλες δοκιμίων με παρόμοιο αρχικό δείκτη πόρων ότι έχουν παρόμοια απόκριση στη μονοδιάστατη συμπίεση. Η δοκιμή του σταθεροποιημένου δοκιμίου O-SFN-3 διαφοροποιείται από τα υπόλοιπα, μεταβάλλοντας στο τέλος της δοκιμής τον όγκο του κατά $\varepsilon=4,95\%$, είναι όμως πιο χαλαρής δομής σταθεροποιημένο από τα υπόλοιπα.

Για την καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων, παρατίθενται τα Σχήματα 4.15 έως 4.17 όπου συγκρίνονται μεταξύ τους δοκίμια άμμου Fontainebleau με ίδιο ή κοντινό αρχικό δείκτη πόρων.

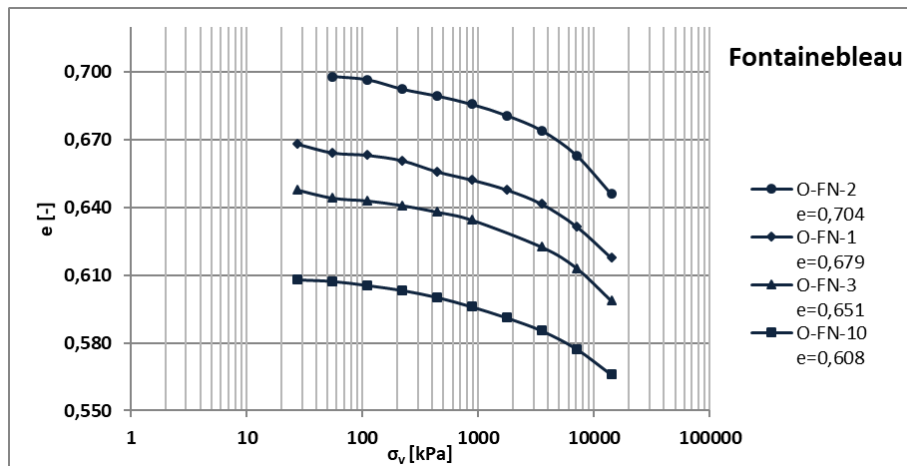
Στο Σχήμα 4.15 συγκρίνονται οι δοκιμές O-FN-2 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SFN-9 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο δεύτερο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,06 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,704$ σε $e_{0,06MPa}=0,698$, ενώ

στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,646$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,38\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, στο δεύτερο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,705$ σε $e_{0,06\text{MPa}}=0,697$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,642$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,70\%$.

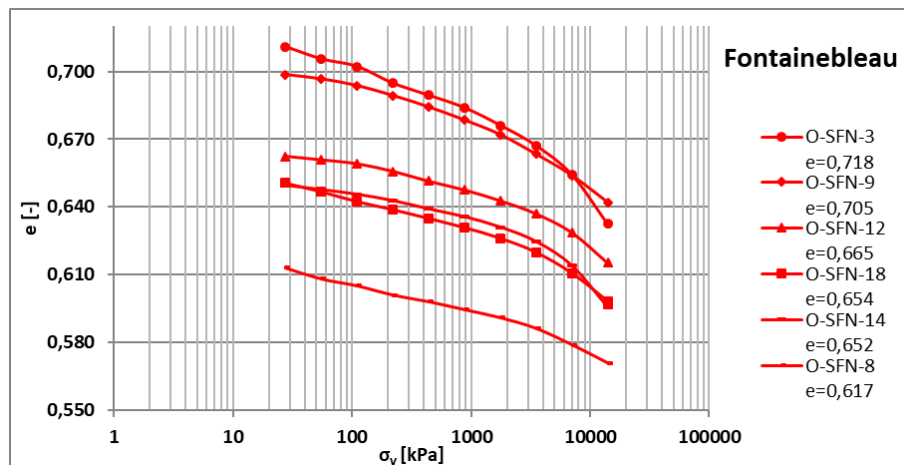
Στο Σχήμα 4.16 συγκρίνονται οι δοκιμές O-FN-1 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SFN-12 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,679$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,668$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,618$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,60\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,665$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,662$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,615$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,00\%$.

Στο Σχήμα 4.17 συγκρίνονται οι δοκιμές O-FN-3 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) O-SFN-14 και O-SFN-14 (σταθεροποιημένα δοκίμια – κόκκινες καμπύλες). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,651$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,648$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,599$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,15\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο O-SFN-14, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,652$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,650$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,596$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,39\%$, ενώ το σταθεροποιημένο δοκίμιο O-SFN-18 στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,654$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,651$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,598$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\epsilon=3,36\%$.

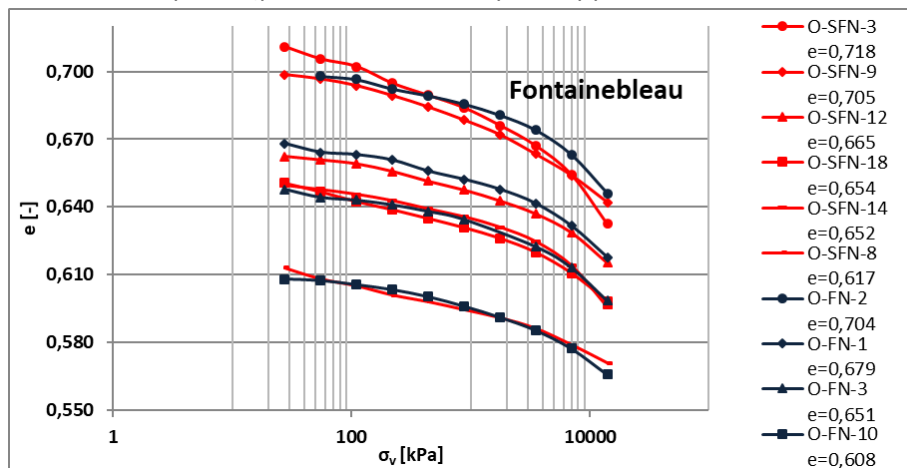
Σε σύγκριση με την άμμο M31 οι ογκομετρικές παραμορφώσεις των σταθεροποιημένων δοκιμίων της άμμου Fontainebleau κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης εξακολουθούν να είναι μεγαλύτερες από εκείνες της φυσικής άμμου αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.



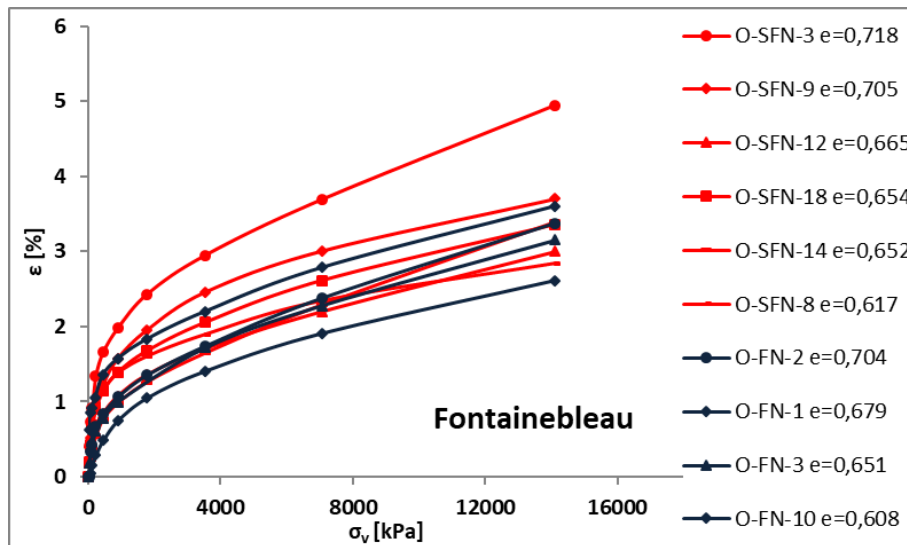
Σχήμα 4.11 Διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών δοκιμών άμμου Fontainebleau.



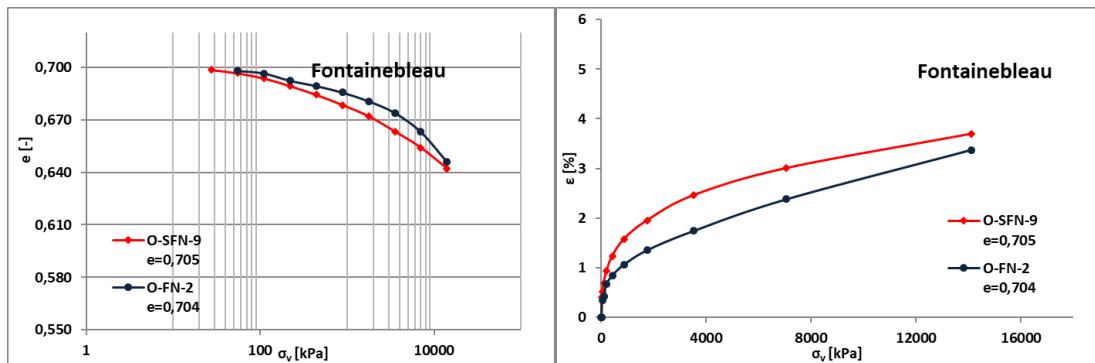
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμών άμμου Fontainebleau.



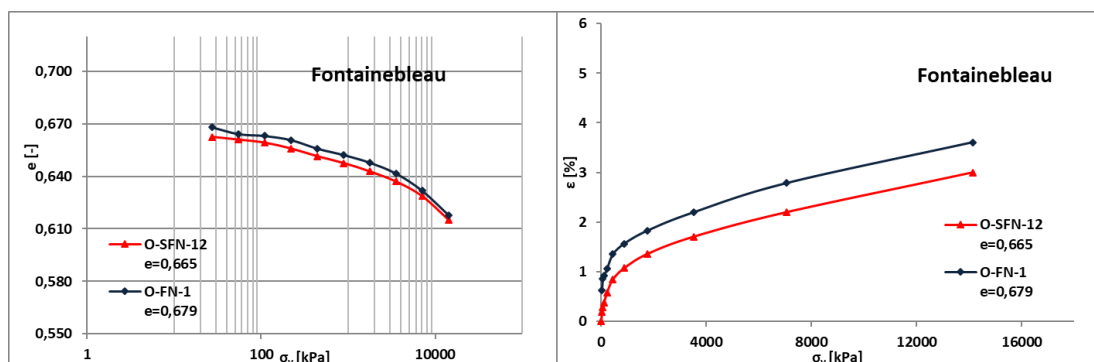
Σχήμα 4.13 Συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων $CS=10\%$ (κόκκινες καμπύλες) δοκιμών άμμου Fontainebleau.



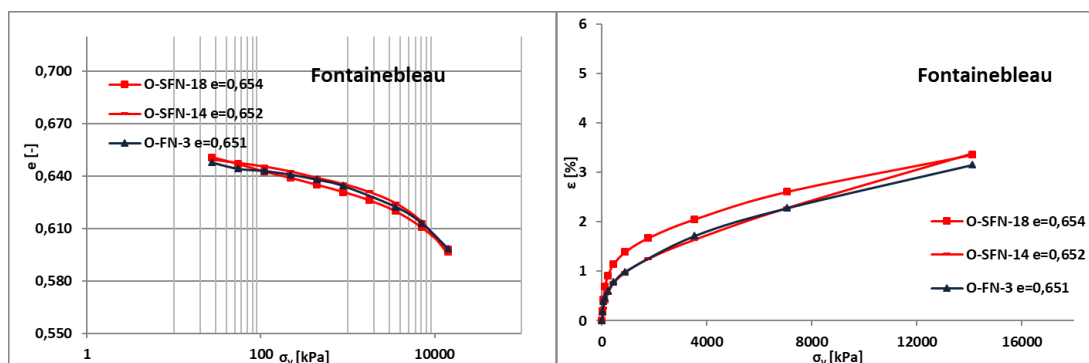
Σχήμα 4.14 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε – ενεργού τάσης σ'_v [kPa] φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου Fontainebleau.



Σχήμα 4.15 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Fontainebleau ($e_0=0,704$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,705$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).



Σχήμα 4.16 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Fontainebleau ($e_0=0,679$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,665$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).



Σχήμα 4.17 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Fontainebleau ($e_0=0,651$) με δύο σταθεροποιημένα $CS=10\%$ (κόκκινες καμπύλες) δοκίμια ($e_0=0,654$ και $e_0=0,652$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).

4.5.3 Άμμος Longstone

Στα Σχήματα 4.18 και 4.19 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής του δείκτη πόρων e των φυσικών και σταθεροποιημένων αντίστοιχα, δοκιμίων άμμου Longstone συναρτήσεως του λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$. Οι καμπύλες φυσικής άμμου είναι παράλληλες μεταξύ τους και παρατηρείται αλλαγή κλίσης περίπου στο 1 MPa. Αναφορικά με τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρατηρείται να ακολουθούν παράλληλες μεταξύ τους καμπύλες και με αλλαγή κλίσης επίσης περίπου στο 1MPa με εξαίρεση το πολύ πυκνό δοκίμιο ($e_0=0,634$) το οποίο έχει μικρή ενδοσιμότητα. Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα δείκτη πόρων e συναρτήσεως του λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων δοκιμίων (κόκκινες καμπύλες) άμμου Longstone όπου τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη συμπιεστότητα. Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε συναρτήσεως της ενεργού τάσης σ'_v (Σχήμα 4.21) παρατηρείται ότι τα φυσικά δοκίμια για ενεργό τάση 14,1 MPa μεταβάλλουν τον όγκο τους κατά 2,89-5,26% και τα σταθεροποιημένα για την ίδια ενεργό τάση τον μεταβάλλουν κατά 1,31-5,85%, με τις καμπύλες των σταθεροποιημένων να δείχνουν ελαφρώς μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση εκτός από το πολύ πυκνό σταθεροποιημένο δοκίμιο O-SLS-10 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,634$ που μεταβάλλει τον όγκο του κατά $\varepsilon=1,31\%$.

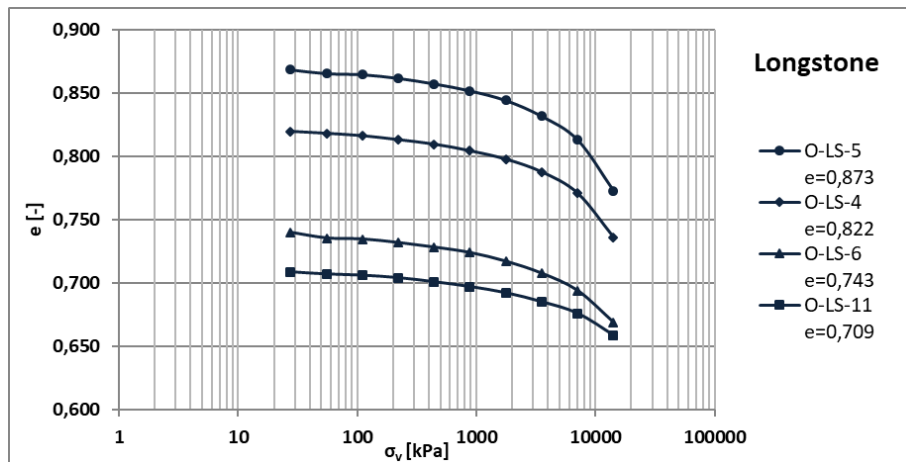
Για την καλύτερη διερεύνηση αυτής της συμπεριφοράς παρατίθενται με τα παρακάτω Σχήματα 4.22 έως 4.24 τα διαγράμματα φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων με ίδιο ή παρόμοιο αρχικό δείκτη πόρων ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμα.

Στο Σχήμα 4.22 συγκρίνονται οι δοκιμές O-LS-5 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SLS-13 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa

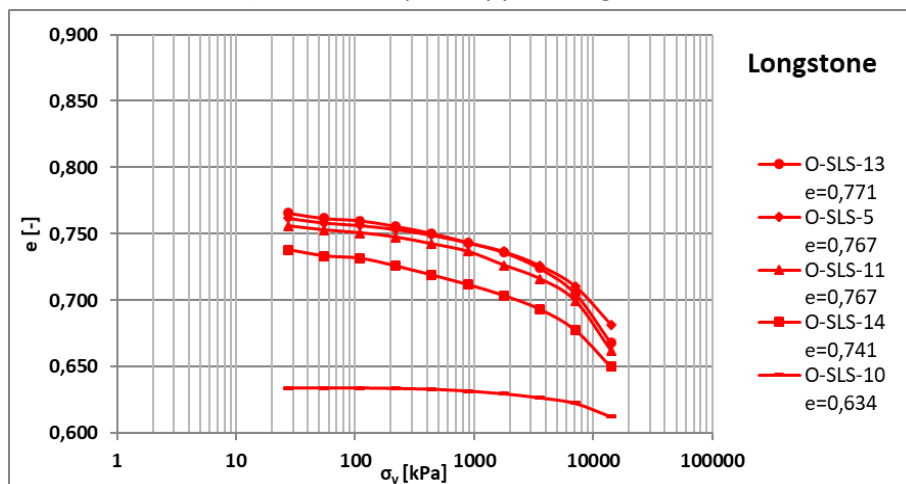
μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,873$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,868$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,773$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,26\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,771$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,766$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,668$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,74\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, παρά το ότι είναι πυκνότερης δομής, έχει μεγαλύτερη ογκομετρική παραμόρφωση από το φυσικό δοκίμιο.

Στο Σχήμα 4.23 συγκρίνονται οι δοκιμές O-LS-4 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) O-SLS-5 και O-SLS-11 (σταθεροποιημένα δοκίμια – κόκκινες καμπύλες). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,822$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,819$ ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,736$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=4,68\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο O-SLS-5, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,767$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,762$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,682$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=4,79\%$, ενώ το σταθεροποιημένο δοκίμιο O-SLS-11 στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,767$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,756$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,662$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,85\%$. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρόλο που είναι πυκνότερης δομής συγκριτικά με το φυσικό δοκίμιο Longstone εμφανίζουν μεγαλύτερη συμπίεστικότητα.

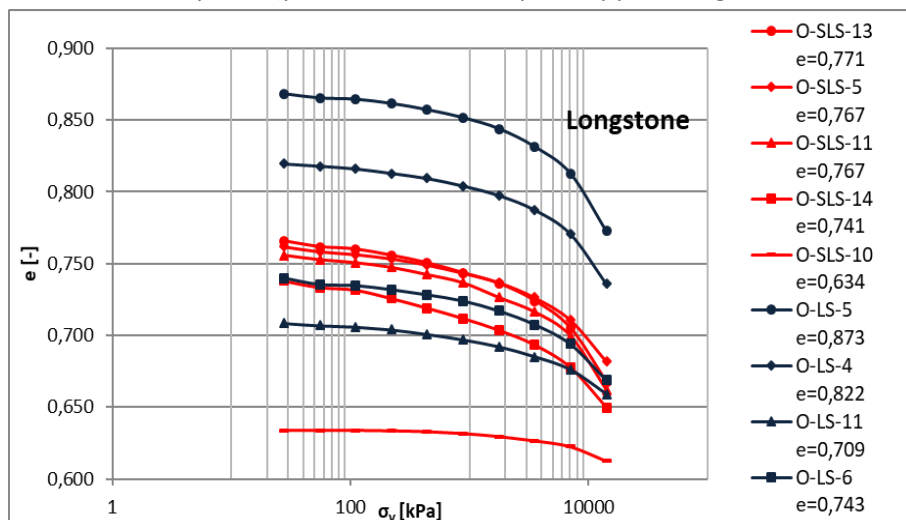
Στο Σχήμα 4.24 συγκρίνονται οι δοκιμές O-LS-6 (φυσικό δοκίμιο – μπλε καμπύλη) και O-SLS-14 (σταθεροποιημένο δοκίμιο – κόκκινη καμπύλη). Το φυσικό δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη τάση 0,03 MPa μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από την αρχική τιμή $e_0=0,743$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,740$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί σε 14,1 MPa σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,669$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=4,21\%$. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, στο πρώτο στάδιο της φόρτισης μεταβάλλει το δείκτη πόρων του από $e_0=0,741$ σε $e_{0,03\text{MPa}}=0,738$, ενώ στο τελικό στάδιο φόρτισης σε $e_{14,1\text{MPa}}=0,650$ και η συνολική ογκομετρική παραμόρφωση είναι $\varepsilon=5,19\%$. Και από αυτή τη σύγκριση προκύπτει το σταθεροποιημένο δοκίμιο είναι περισσότερο συμπίεστο συγκριτικά με το φυσικό κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών δοκιμών άμμου Longstone.

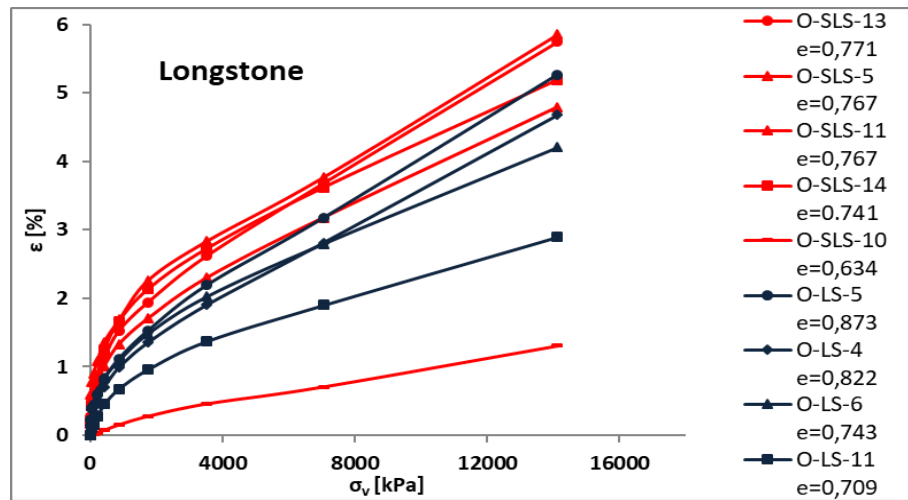


Σχήμα 4.19 Διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών άμμου Longstone.

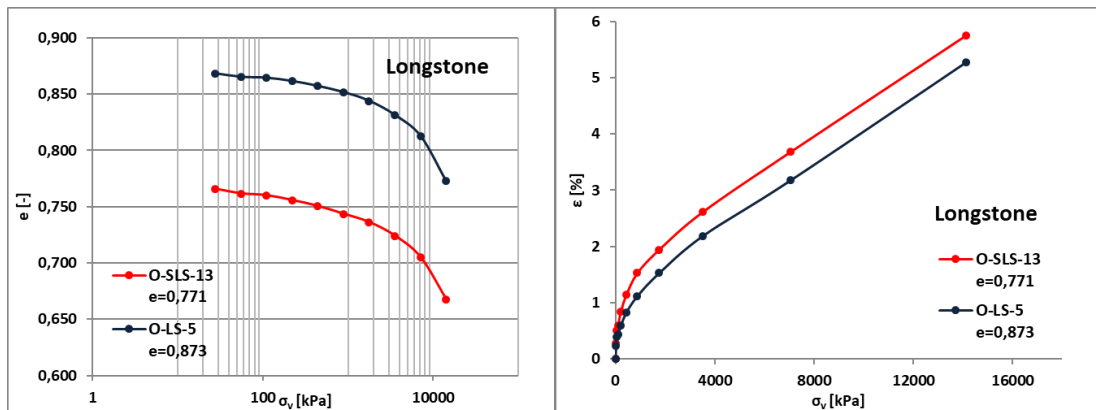


Σχήμα 4.20 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου Longstone.

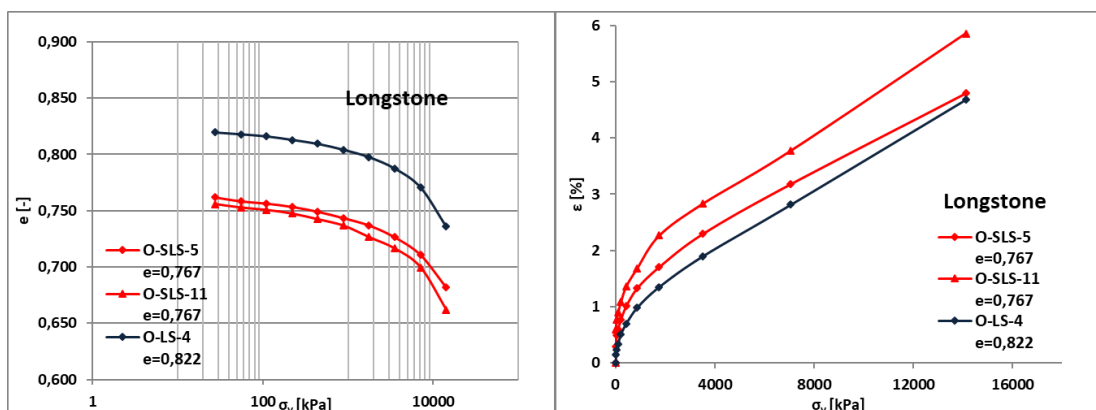
Δοκιμή Μονοδιάστατης Συμπίεσης



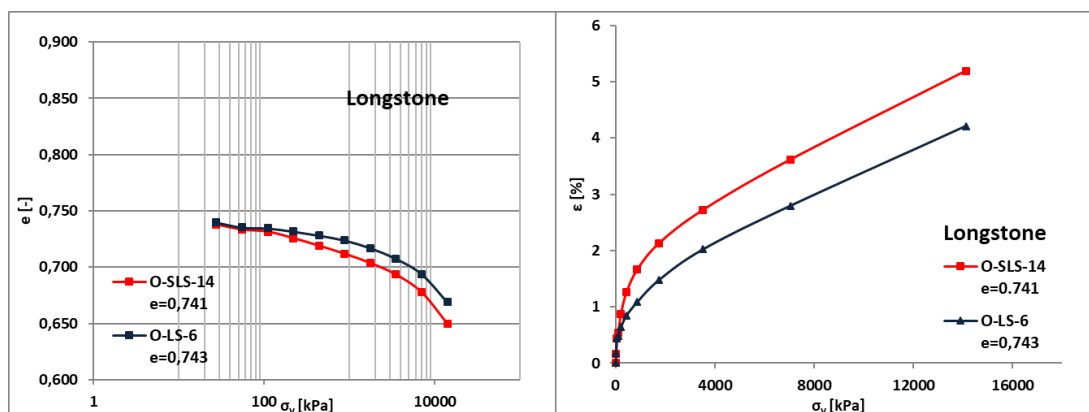
Σχήμα 4.21 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης $e -$ ενεργού τάσης σ'_v [kPa] φυσικών (μπλε καμπύλες) και σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών (κόκκινες καμπύλες) άμμου Longstone.



Σχήμα 4.22 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Longstone ($e_0=0,873$) με σταθεροποιημένο CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,771$), διάγραμμα δείκτη πόρων $e -$ λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης e_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).



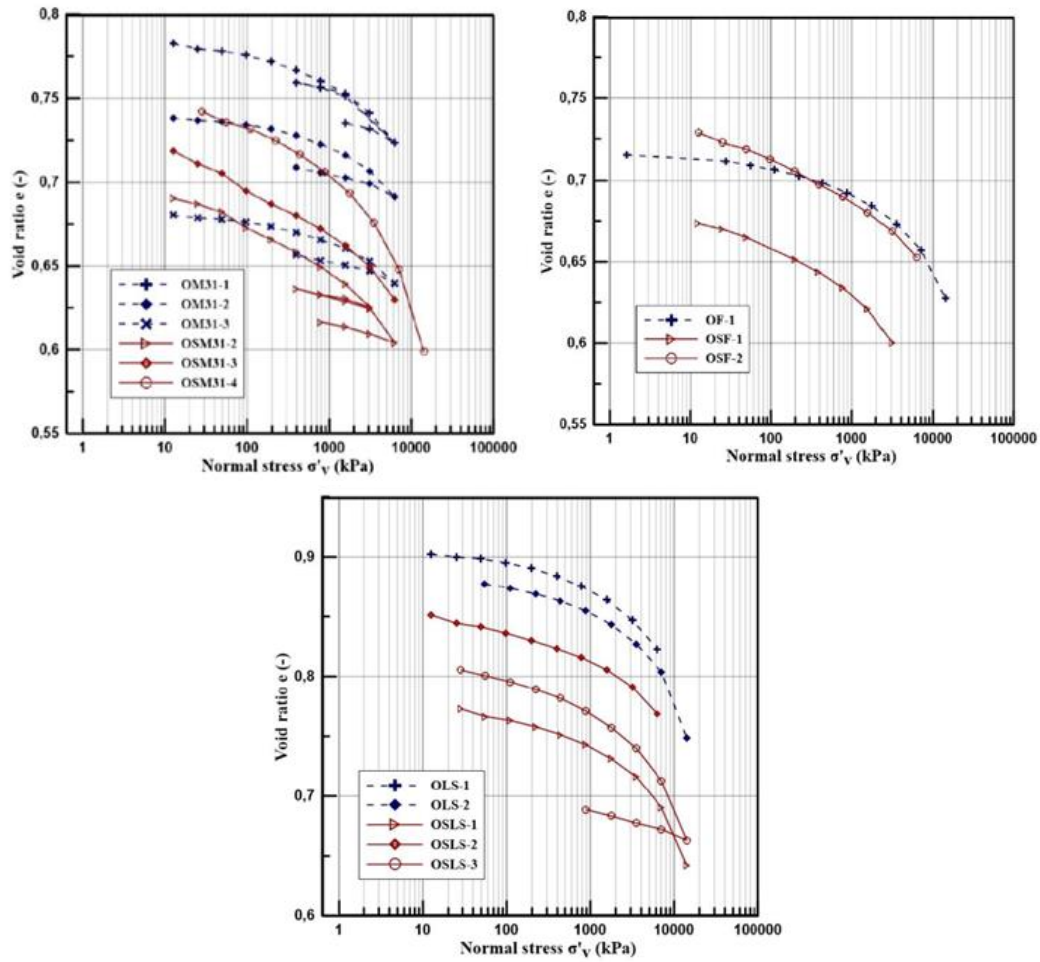
Σχήμα 4.23 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Longstone ($e_0=0,822$) με δύο σταθεροποιημένα CS=10% (κόκκινες καμπύλες) δοκίμια ($e_0=0,767$), διάγραμμα δείκτη πόρων $e -$ λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης e_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).



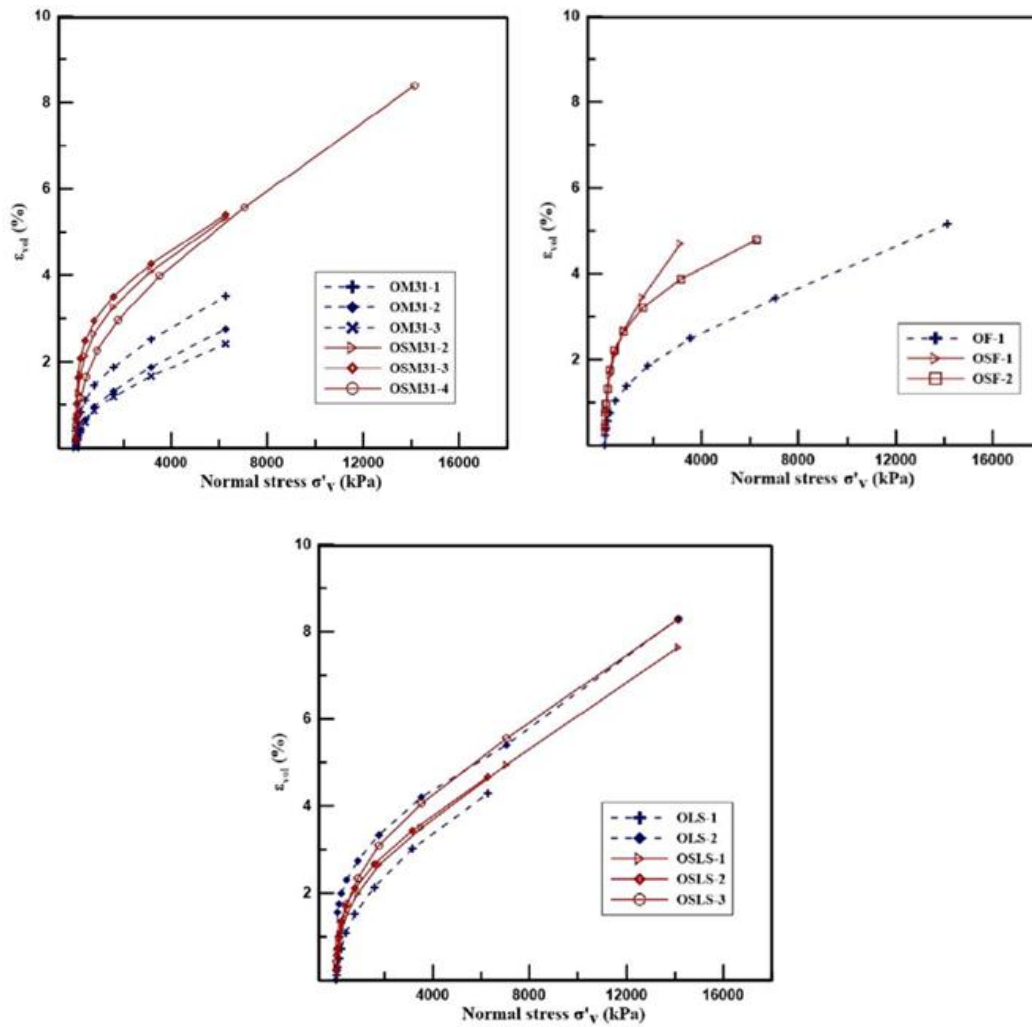
Σχήμα 4.24 Σύγκριση φυσικού δοκιμίου (μπλε καμπύλες) άμμου Longstone ($e_0=0,743$) με σταθεροποιημένο $CS=10\%$ (κόκκινες καμπύλες) δοκίμιο ($e_0=0,741$), διάγραμμα δείκτη πόρων e - λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ (αριστερά) και διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης ε_{vol} [%] - κατακόρυφης τάσης σ'_v [kPa] (δεξιά).

4.6 Αποτελέσματα άλλων ερευνητών

Ο Μπίκος (2017) εκτέλεσε μια σειρά από δοκιμές συμπιεσομέτρου σε φυσικές και σταθεροποιημένες άμμους M31, Longstone και Fontainebleau. Συμπέρανε ότι οι σταθεροποιημένες άμμοι M31 και Fontainebleau παρουσίασαν μεγαλύτερη συμπιεστότητα από τις αντίστοιχες φυσικές άμμους. Αντίθετα, η σταθεροποίηση της γωνιώδους άμμου Longstone δεν επηρέασε την καθίζηση. Εξάγοντας το συμπέρασμα ότι, το σχήμα του κόκκου της άμμου είναι αυτό που επηρεάζει την ενδοσιμότητα του σταθεροποιημένου υλικού. Τα αποτελέσματά του παρατίθενται στα Σχήματα 5.25 και 5.26. Μπορεί βέβαια να σχολιαστεί το γεγονός ότι ναι μεν τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Longstone παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τα αντίστοιχα φυσικά αλλά δεν αντιστοιχούν στον ίδιο δείκτη πόρων. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο είναι πυκνότερης δομής από το φυσικό (Σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.25 Συγκεντρωτικά διαγράμματα δείκτη πόρων e – λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης $\log(\sigma'_v)$ για δοκίμια σταθεροποιημένου άμμου (κόκκινες καμπύλες) και μη (μπλε) για άμμο α) M31, β) Fontainebleau και γ) Longstone. [Μπίκος, 2017]



Σχήμα 4.26 Συγκεντρωτικά διαγράμματα ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_{vol} [%] – ενεργού τάσης σ'_v [kPa] για δοκίμια σταθεροποιημένου άμμου (κόκκινες καμπύλες) και μη (μπλε καμπύλες) για άμμο α) M31, β) Fontainebleau και γ) Longstone. [Μπίκος, 2017]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

5.1 Εισαγωγή

Η δοκιμή τριαξονικής κυλινδρικής φόρτισης είναι μία από τις πιο διαδεδομένες δοκιμές της Πειραματικής Εδαφομηχανικής. Χρησιμοποιείται σε πολλές μελέτες για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών όπως η αντοχή σε μονοτονική (θλίψη ή εφελκυσμό) και ανακυκλική φόρτιση, η γωνία τριβής, η συνοχή, ο δείκτης ουδέτερης ώθησης K_0 κλπ.

Στην κυλινδρική τριαξονική συσκευή μπορούν να εκτελεστούν δοκιμές υπό διαφορετικές εντατικές καταστάσεις και ρυθμιζόμενους ρυθμούς εφαρμογής των φορτίων με δυνατότητα ελεύθερης αλλά και εμποδιζόμενης στράγγισης του δοκιμίου. Σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών οι παραμορφώσεις του δοκιμίου μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια μηκυνσιομέτρων μεγάλης ακρίβειας και να καταγραφούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

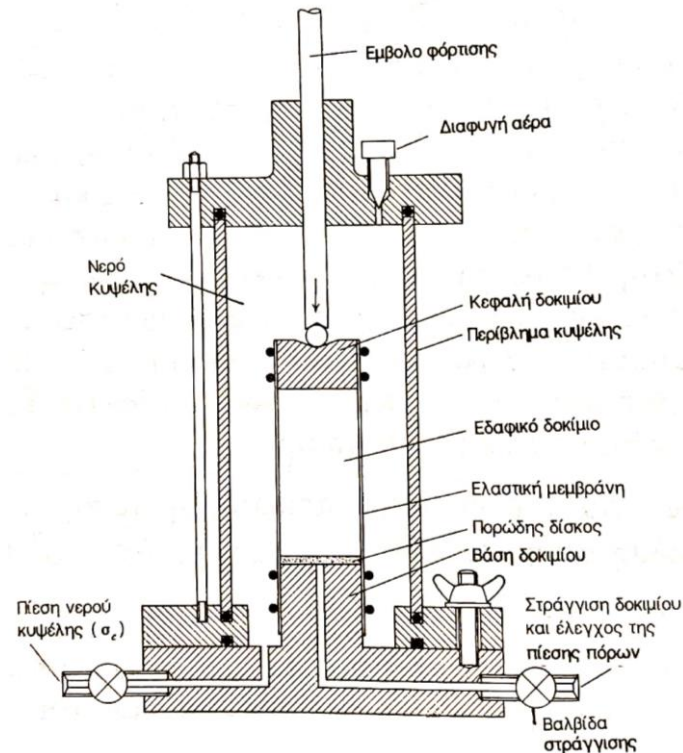
Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η συσκευή αυτή μπορεί να προσομοιώσει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες που επικρατούν στη φύση και άρα τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν άμεση πρακτική εφαρμογή σε ό,τι αφορά το ενδιαφέρον του Πολιτικού Μηχανικού και όχι μόνο ερευνητικό χαρακτήρα.

5.2 Περιγραφή συσκευής

Στο Σχήμα 5.1 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 και επιτρέπει την εκτέλεση ανακυκλικής φόρτισης βάσει της επιβαλλόμενης συνάρτησης (π.χ. ημιτονοειδής). Απαιτούμενες προϋποθέσεις είναι οι 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 να ελέγχεται με το ίδιο σύστημα που ελέγχει την πίεση πόρων στη βάση του δοκιμίου.



Σχήμα 5.1 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 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 εσωτερικώς επιβαλλόμενη στη βάση (και στη 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 αστράγγιστη 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 καταγράφέα 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, ως γνωστόν, εξαρτάται η διατμητική αντοχή. Η ανακυκλική φόρτιση των δοκιμίων της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Τα συστήματα ελέγχου της δοκιμής κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι:

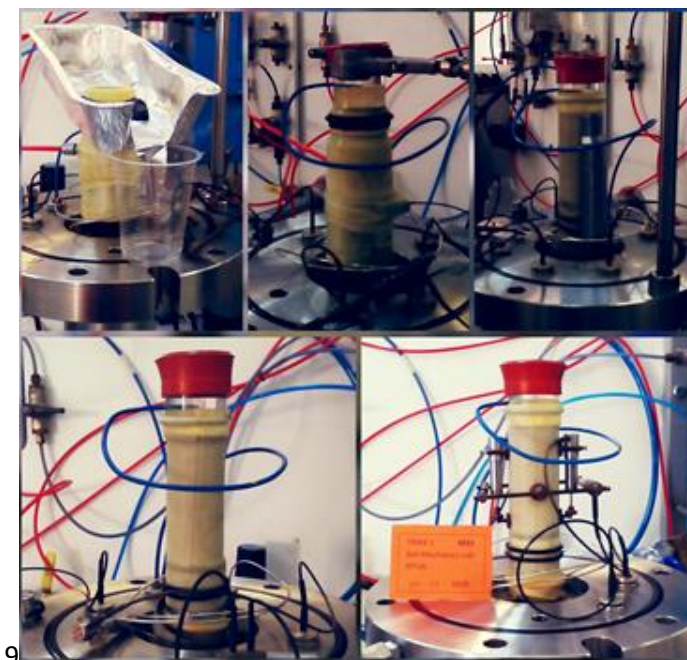
1. Το σύστημα επιβολής της πλευρικής πίεσης ή πίεσης κυψέλης (σ_c).
2. Το σύστημα επιβολής της υδατικής πίεσης πόρων ή αντιπίεσης πόρων (u) στο εσωτερικό του δοκιμίου καθώς και το σύστημα μέτρησης της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου με τη μέτρηση του όγκου (ΔV) του νερού που εισρέει στο δοκίμιο ή διαφεύγει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

5.3 Διαδικασία πειράματος

5.3.1 Παρασκευή φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμίων

Η παρασκευή των φυσικών δοκιμίων άμμου γίνεται επί τόπου στη συσκευή. 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 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 επιπεδοποιείται, 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 μηκυσιόμετρο 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 όγκο 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 5.2 Παρασκευή φυσικού δοκιμίου άμμου M31 στην τριαξονική συσκευή (α) εμβάπτιση στο νερό (β) τοποθέτηση κεφαλής και εφαρμογή αρνητικής πίεσης στο δοκίμιο (γ) αφαίρεση καλουπιού (δ) φυσικό δοκίμιο άμμου στην αδιαπέρατη μεμβράνη (ε) τοποθέτηση μηκυσιομέτρων

Η παρασκευή των σταθεροποιημένων δοκιμίων άμμου γίνεται σε ειδική κυλινδρική βάση όπου το δοκίμιο θα παραμείνει για να ωριμάσει η γέλη στους πόρους του. Η διαδικασία παρασκευής τους είναι παρόμοια με αυτή των φυσικών. Τοποθετείται ένας συμπαγής δίσκος στη βάση και η μεμβράνη συγκρατείται και στεγανοποιείται εκεί με τη βοήθεια ειδικών ελαστικών δακτυλίων από καουτσούκ. Εφαρμόζεται ειδικό καλούπι και μέσω της μονάδας παροχής αέρα αναρροφάται η μεμβράνη. Στη συνέχεια πληρώνεται ο χώρος του δοκιμίου με το υγρόλυμα πυριτίας στο οποίο αποτίθεται ξηρή άμμος. Η απόθεση και σε αυτή την περίπτωση γίνεται από ίδια απόσταση από την επιφάνεια που διαμορφώνεται ενώ ταυτόχρονα το δοκίμιο συμπυκνώνεται με συγκεκριμένο αριθμό κτύπων. Η κορυφή του δείγματος επιπεδοποιείται και κλείνεται όσο το δυνατόν αεροστεγώς για περίπου 50 ώρες. Με το πέρας του χρόνου ωρίμανσης, το καλούπι αφαιρείται, αποκαλύπτεται το δοκίμιο και κόβεται ώστε να έχει τις επιθυμητές διαστάσεις. Τυπικές διαστάσεις του σταθεροποιημένου δοκιμίου είναι 76mm διάμετρος και 38mm ύψος. Μετριοούνται οι διαστάσεις του δοκιμίου και περικλείεται ξανά από μεμβράνη ώστε να τοποθετηθεί στη συσκευή. Το δοκίμιο μεταφέρεται στην τριαξονική συσκευή, τοποθετούνται οι πορώδεις δίσκοι στη βάση και στην κεφαλή του δοκιμίου και στερεώνονται οι μετρητές LVTD στο σώμα του δοκιμίου. Ελέγχεται η ενεργός τάση που διαθέτει από μόνο του το δοκίμιο και στη συνέχεια όμως διαμορφώνεται σε 40kPa ώστε να ξεκινήσει το στάδιο του κορεσμού.



Σχήμα 5.3 Σταθεροποιημένο δοκίμιο CS=10% άμμου M31 α) σταθεροποιημένο δοκίμιο μετά από ώρες ωρίμανσης, β) τοποθέτηση στην τριαξονική συσκευή και γ) τοποθέτηση μηχανομετρών στο δοκίμιο

5.3.2 Κορεσμός του δοκιμίου

Μετά την τοποθέτηση του εδαφικού δοκιμίου στο εσωτερικό της κυψέλης και την πλήρωσή της με νερό, επιχειρείται ο κορεσμός του δοκιμίου, δηλαδή η πλήρωση των πόρων του με νερό. Τούτο επιτυγχάνεται συνήθως με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και τη διάλυσή της (μικρής γενικά) ποσότητας του αέρα που υπάρχει στους πόρους, επειδή η διαλυτότητα των αερίων στο νερό αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της πίεσης. Προφανώς, η αύξηση της αντιπίεσης πόρων πρέπει να συνοδεύεται από ισόποση αύξηση της πίεσης της κυψέλης. Έτσι, η πίεση της κυψέλης και η αντιπίεση πόρων αυξάνονται βαθμιαία και ισόποσα μέχρι να επιτευχθεί ο κορεσμός του δοκιμίου. Ο έλεγχος του βαθμού κορεσμού γίνεται με τη μέθοδο του συντελεστή B . Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μεγάλη διαφορά συμπίεστικότητας μεταξύ του νερού των πόρων και του εδαφικού σκελετού, με συνέπεια, όταν σε ένα κορεσμένο εδαφικό δοκίμιο αυξηθεί ισότροπα η επιβαλλόμενη ολική πίεση (κατά $\Delta\sigma$) χωρίς μεταβολή του όγκου η πίεση πόρων αυξάνει ισόποσα δηλαδή: $\Delta u = \Delta\sigma$. Όταν το δοκίμιο δεν είναι πλήρως κορεσμένο, η αναπτυσσόμενη πίεση πόρων είναι μικρότερη. $B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma}$

Πλήρης κορεσμός θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί στα συνήθη εδάφη για τιμές του $B > 0,95$.

Στα φυσικά δοκίμια άμμου για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός κορεσμού απαιτήθηκε το στάδιο αυτό να έχει διάρκεια 24 ωρών ενώ στα σταθεροποιημένα κατά μέσο όρο 5 ώρες. Στα σταθεροποιημένα δοκίμια ο βαθμός κορεσμού ήταν πιο εύκολο να επιτευχθεί και ο χρόνος αυτός χρησίμευε ώστε το δοκίμιο να έρθει σε ισορροπία και να μην μεταβάλλεται ο όγκος του.

5.3.3 Στερεοποίηση του δοκιμίου

Σε αυτό το στάδιο του πειράματος διαμορφώνεται η αρχική ενεργός τάση με την οποία το δοκίμιο θα συνεχίσει στο στάδιο της διάτμησης και θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του σε ανακυκλική φόρτιση.

Η στερεοποίηση του δοκιμίου μπορεί να γίνει είτε σε καθεστώς ισότροπης συμπίεσης, δηλαδή χωρίς την εφαρμογή κατακόρυφου αξονικού φορτίου, είτε ανισότροπης (πιο κοντά στις διεργασίες της φύσης) είτε μικτής τασικής όδευσης την οποία θα επιλέξει ο πειραματιστής. Το γεγονός ότι το δοκίμιο είναι κορεσμένο μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε ότι οποιαδήποτε μεταβολή του όγκου του οφείλεται καθαρά και μόνο στην αποβολή νερού από τους πόρους του και όχι σε συμπίεση του αέρα. Άρα μπορούμε να υπολογίσουμε την ογκομετρική παραμόρφωση απευθείας από τη μεταβολή της στάθμης στο αντίστοιχο δοχείο.

Στην παρούσα εργασία η στερεοποίηση είναι ισότροπη, εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη τιμή της αντιπίεσης πόρων που διατηρείται σταθερή, και αυξάνεται

σταδιακά η τιμή της πίεσης της κυψέλης. Η τελευταία προκαλεί άμεσα ανάπτυξη υπερπιέσεων εντός του δοκίμιου και η διαφορά πίεσης σε σχέση με την επιβαλλόμενη αντιπίεση πόρων οδηγεί το νερό σε στράγγιση. Οι κόκκοι έρχονται πιο κοντά και το δοκίμιο αποκτά μεγαλύτερη ενεργό τάση. Ο ρυθμός μεταβολής της ογκομετρικής παραμόρφωσης μειώνεται και το στάδιο της στερεοποίησης ολοκληρώνεται. Στα φυσικά δοκίμια η στερεοποίηση πραγματοποιείται ακαριαία επομένως το στάδιο διαρκεί 1 ώρα σε αντίθεση με τα σταθεροποιημένα δοκίμια τα οποία αφήνονται στο στάδιο της στερεοποίησης για περίπου 24 ώρες.

5.3.4 Το στάδιο της ανακυκλικής φόρτισης

Αφού ολοκληρωθεί η στερεοποίηση και το δοκίμιο έχει πλέον την επιθυμητή ενεργό τάση, ακολουθεί το στάδιο της ανακυκλικής φόρτισής του υπό αστράγγιστες συνθήκες μέχρι την αστοχία.

Καθ' όλη τη διάρκεια της διάτμησης η πίεση της κυψέλης διατηρείται σταθερή στα 700 kPa ενώ η βάση της συσκευής κινείται στην κατακόρυφη διεύθυνση σύμφωνα με συνάρτηση η οποία καθορίζεται από την αρχή της διαδικασίας. Η συνάρτηση της δοκιμής είναι ημιτονοειδής, ορίζεται το πλάτος q ανάλογα με τον λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR = q/p'$ που θέλουμε να έχει η δοκιμή και η περίοδος T είναι ίση με 5 λεπτά. Η συσκευή διαθέτει χρονόμετρο (timer) και από αυτό εξαρτάται αν η βάση θα ξεκινήσει να κινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω και κατ' επέκταση αν το δοκίμιο αρχικά θα συμπιεστεί ή θα εφελκυστεί αντίστοιχα.

Με το τέλος της δοκιμής η βάση σταματά να μετακινείται και επιστρέφει στην αρχική της θέση, μηδενίζονται οι πιέσεις στο εσωτερικό της κυψέλης και αυτή αδειάζει. Το δοκίμιο αφαιρείται από τη συσκευή και αφού πρώτα αφαιρεθούν οι πορόλιθοι, η κεφαλή και η μεμβράνη, τοποθετείται σε υποδοχέα για τη μέτρηση της μάζας του.

Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε σταθεροποιημένα και μη δοκίμια. Ο δείκτης πόρων e_0 είναι αυτός που έχει το δοκίμιο μετά το πέρας του σταδίου της στερεοποίησης. Η περίοδος των ανακυκλικών φορτίσεων στα σταθεροποιημένα δοκίμια είναι κοινή για όλες τις δοκιμές και ίση με $T=5\text{min}$. Η περίοδος των ανακυκλικών φορτίσεων στα φυσικά δοκίμια είναι $T=2,5\text{min}$ και $T=5\text{min}$, ανάλογα με το ημιπλάτος το οποίο επιβάλλεται ώστε να έχει τη δυνατότητα η τριαξονική συσκευή να επιβάλλει ένα πλήρη κύκλο φόρτισης, εφελκυσμού και θλίψης.

Ανακυκλική Τριαξονική Φόρτιση

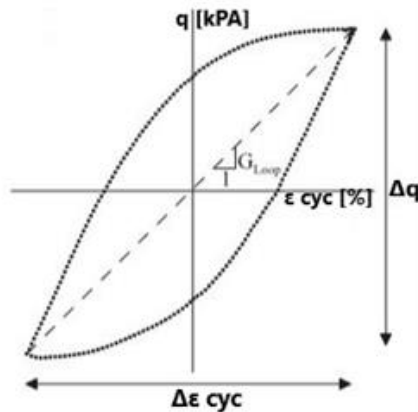
Δοκιμή	Ημ/νία	Τύπος Δοκιμίου Άμμου	Ώρες Ωρίμασης [hr]	Δείκτης Πόρων e_0	Τάση Στερεοποίησης p'_v [kPa]	Ημιπλάτος q [kPa]	Περίοδος T [min]	CSR
TRX-SM31-1	8/1/2019	M31 (Σταθεροποιημένο)	47	0,744	200	80	5	0,4
TRX-M31-2	28/3/2018	M31	-	0,72	100	40	2,5	0,4
TRX-SM31-3	23/1/2019	M31 (Σταθεροποιημένο)	47	0,796	200	76	5	0,38
TRX-SM31-4	28/1/2019	M31 (Σταθεροποιημένο)	67	0,635	200	76	5	0,38
TRX-SM31-5	31/1/2019	M31 (Σταθεροποιημένο)	44	0,655	200	80	5	0,4
TRX-SM31-6	4/2/2019	M31 (Σταθεροποιημένο)	67	0,684	200	68	5	0,34
TRX-SM31-7	7/2/2019	M31 (Σταθεροποιημένο)	47	0,705	200	76	5	0,38
TRX-M31-8	7/5/2018	M31	-	0,645	100	35	2,5	0,35
TRX-M31-9	23/4/2018	M31	-	0,712	200	80	2,5 ^[1]	0,4
TRX-M31-10	11/5/2018	M31	-	0,605	100	40	2,5	0,4
TRX-M31-11	15/5/2018	M31	-	0,653	200	76	2,5	0,38
TRX-M31-12	17/5/2018	M31	-	0,651	200	80	5	0,4
TRX-M31-13	21/5/2018	M31	-	0,633	200	78	2,5	0,39
TRX-M31-14	30/4/2018	M31	-	0,664	200	70	2,5	0,35

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σταθεροποιημένων και μη δοκιμών άμμου M31.

^[1] Η περίοδος T της δοκιμής TRX-M31-9 στην αρχή του πειράματος τροποποιήθηκε, από $T=2,5\text{min}$ σε $T=5\text{min}$.

5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών

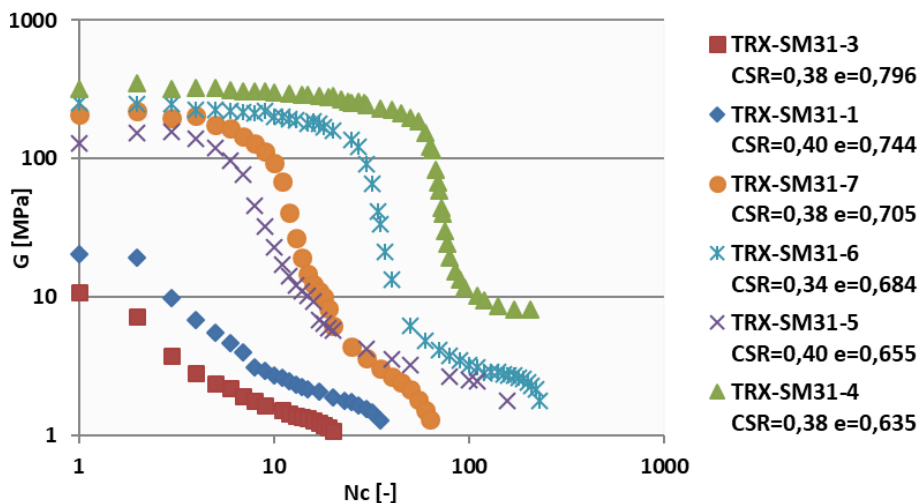
Διερευνάται η επίδραση της πυκνότητας των σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31 στην αρχική τιμή του μέτρου διάτμησης G αλλά και στην απομείωσή του κατά την ανακυκλική φόρτιση. Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού του μέτρου διάτμησης G , το οποίο ορίζεται ως το πηλίκο του εύρους της αποκλίνουσας τάσης Δq ως προς το εύρος της αντίστοιχης αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $\Delta \epsilon_{cyc}$ για τον ίδιο κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 5.4 Βρόγχος υστέρησης ανά κύκλο φόρτισης

5.4.1 Σύγκριση σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του μέτρου διάτμησης G [MPa] συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης N_c [-]. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένα $CS=10\%$ δοκίμια άμμου M31. Η τάση στερεοποίησης των δοκιμών είναι $p'_i=200kPa$, κοινή σε όλες τις δοκιμές. Το διάγραμμα περιλαμβάνει σταθεροποιημένα δοκίμια με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων e και του λόγου ανακυκλικής φόρτισης CSR .



Σχήμα 5.5 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] για ανακυκλική φόρτιση σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμών άμμου M31.

Αναλυτικά στο Σχήμα 5.5 παρατηρούνται τα εξής:

- Η δοκιμή TRX-SM31-3 με αρχικό δείκτη πόρων $e=0,796$ είναι ένα πολύ χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=113,8\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=1,045\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=10,9\text{MPa}$ το οποίο στη συνέχεια απομειώνεται. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι 20 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπορντό σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-1 με δείκτη πόρων $e=0,744$ είναι ένα χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=133,4\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,648\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=20,6\text{MPa}$ το οποίο στη συνέχεια απομειώνεται. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι 40 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπλε σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-7 με δείκτη πόρων $e=0,705$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=152,2\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,072\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=210,4\text{MPa}$ το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους 5 πρώτους κύκλους και στη συνέχεια απομειώνεται. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι 20 πρώτοι κύκλοι της δοκιμής και στη συνέχεια κάθε σημείο αντιστοιχεί στους επόμενους 5 κύκλους μέχρι τον 63° που ολοκληρώνεται η δοκιμή (πορτοκαλί σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-6 με δείκτη πόρων $e=0,684$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,34$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=98,6\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,039\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=253,3\text{MPa}$ το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους πρώτους 25 κύκλους και στη συνέχεια απομειώνεται. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι 40 πρώτοι κύκλοι φόρτισης και στη συνέχεια κάθε σημείο αντιστοιχεί σε 10 κύκλους μέχρι τον 230° κύκλο που ολοκληρώνεται η δοκιμή (γαλάζια σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-5 με δείκτη πόρων $e=0,655$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=162,6\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,126\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=128,9\text{MPa}$ το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους πρώτους 5 κύκλους και στη συνέχεια απομειώνεται. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι 20 πρώτοι κύκλοι φόρτισης της δοκιμής ($G=6,5\text{MPa}$) και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι κύκλοι μέχρι τους 158 κύκλους που ολοκληρώνεται η δοκιμή (μοβ σημεία).

- Η δοκιμή TRX-SM31-4 με δείκτη πόρων $e=0,635$ είναι ένα πυκνό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=157,2\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,049\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=318,1\text{MPa}$ το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους πρώτους 40 κύκλους και στη συνέχεια απομειώνεται. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι πρώτοι 30 κύκλοι φόρτισης και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι κύκλοι μέχρι τον 207^ο κύκλο που ολοκληρώνεται η φόρτιση (πράσινα σημεία).

Συμπεραίνεται ότι, το αρχικό μέτρο διάτμησης G_0 είναι μικρότερο όσο πιο χαλαρή είναι η δομή του σταθεροποιημένου δοκιμίου. Επιπλέον, όσο η δομή του σταθεροποιημένου δοκιμίου είναι πιο χαλαρή, το μέτρο διάτμησης G του δοκιμίου απομειώνεται από τους πρώτους κύκλους φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή εκδηλώνεται για λόγους ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$ και $CSR=0,40$. Το παραπάνω συμπέρασμα, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5 όπου οι δοκιμές TRX-SM31-3, TRX-SM31-7 και TRX-SM31-4 φορτίζονται υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$, ενώ οι δοκιμές TRX-SM31-1 και TRX-SM31-5 υπό $CSR=0,40$. Αξίζει να σχολιαστεί ότι η δοκιμή TRX-SM31-6 μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένου δοκιμίου ($e=0,684$) έχει μεγαλύτερο αρχικό μέτρο διάτμησης G_0 από την δοκιμή επίσης σταθεροποιημένου δοκιμίου μέσης πυκνότητας TRX-SM31-5 ($e=0,655$) και το μέτρο διάτμησης G απομειώνεται πιο σταδιακά διότι η πρώτη φορτίζεται υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,34$ ενώ η δεύτερη υπό $CSR=0,40$.

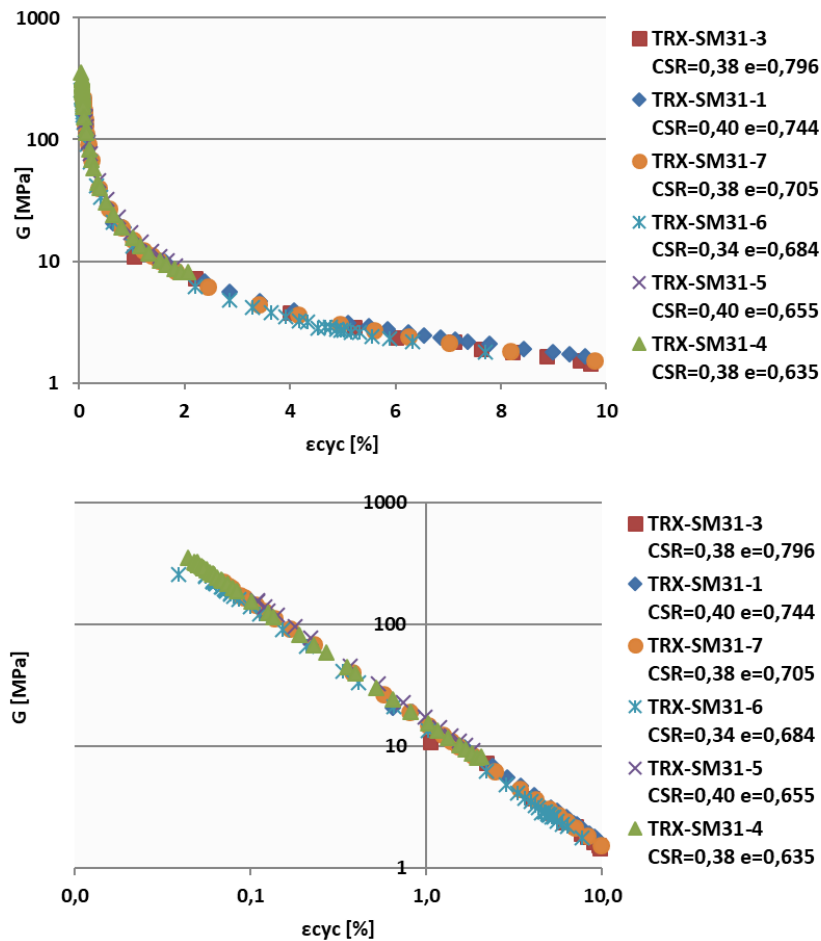
Παρατίθεται ακόμα το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του μέτρου διάτμησης G συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} (Σχήμα 5.6) όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε σταθεροποιημένα $CS=10\%$ δοκίμια άμμου M31. Η τάση στερεοποίησης των δοκιμών είναι $p'_i=200\text{kPa}$, κοινή σε όλες τις δοκιμές. Το διάγραμμα περιλαμβάνει σταθεροποιημένα δοκίμια με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων e και λόγου ανακυκλικής φόρτισης CSR . Το Σχήμα 5.6 περιλαμβάνει το ημιλογαριθμικό (πάνω) και λογαριθμικό διάγραμμα (κάτω) ώστε να μπορούν να παρατηρηθούν οι αξονικές παραμορφώσεις διπλού πλάτους με τιμή μικρότερη του $\varepsilon_{cyc}=1\%$. Όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία από την έρευνα των Porcino et al. (2012), η καμπύλη του μέτρου διάτμησης G συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} είναι κοινή για όλες τις δοκιμές σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31.

Αναλυτικά στο Σχήμα 5.6 παρατηρούνται τα εξής:

- Η δοκιμή TRX-SM31-3 με αρχικό δείκτη πόρων $e=0,796$ είναι ένα πολύ χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=1,045\%$ και έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=10,9\text{MPa}$, ενώ στον δεύτερο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=2,203\%$ και

έχει $G=7,2\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5.6 σημειώνονται οι 20 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπορντό σημεία).

- Η δοκιμή TRX-SM31-1 με δείκτη πόρων $e=0,744$ είναι ένα χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=0,648\%$ και έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=20,6\text{MPa}$, ενώ στον τρίτο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\epsilon_{cyc}=1,636\%$ και έχει $G=9,8\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5.6 σημειώνονται οι 40 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπλε σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-7 με δείκτη πόρων $e=0,705$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=0,072\%$ και έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=210,4\text{MPa}$, ενώ στον 18^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\epsilon_{cyc}=1,522\%$ και έχει $G=10\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5.6 σημειώνονται οι πρώτοι 20 κύκλοι φόρτισης και στη συνέχεια κάθε σημείο αντιστοιχεί σε 5 κύκλους έως τον 63^ο που ολοκληρώνεται η δοκιμή (πορτοκαλί σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-6 με δείκτη πόρων $e=0,684$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,34$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=0,039\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=253,3\text{MPa}$, ενώ στον 40^ο κύκλο αναπτύσσει 1,017% και έχει $G=13,3\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5.6 σημειώνονται οι πρώτοι 40 κύκλοι φόρτισης και στη συνέχεια κάθε σημείο αντιστοιχεί σε 10 κύκλους έως τον 230^ο που ολοκληρώνεται η δοκιμή (γαλάζια σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-5 με δείκτη πόρων $e=0,655$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=0,126\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=128,9\text{MPa}$, ενώ στον 14^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\epsilon_{cyc}=1,536\%$ και έχει $G=11\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5.6 σημειώνονται αυτούσιοι οι 20 πρώτοι κύκλοι φόρτισης της δοκιμής και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι μέχρι τους 158 κύκλους που ολοκληρώνεται η δοκιμή (μωβ σημεία).
- Η δοκιμή TRX-SM31-4 με δείκτη πόρων $e=0,635$ είναι ένα πυκνό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\epsilon_{cyc}=0,049\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=318,1\text{MPa}$, ενώ στον 110^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\epsilon_{cyc}=1,5\%$ και έχει $G=10,2\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5.6 σημειώνονται οι πρώτοι 30 κύκλοι φόρτισης και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι μέχρι τον 207^ο κύκλο που ολοκληρώνεται η φόρτιση (πράσινα σημεία).



Σχήμα 5.6 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης των σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμών άμμου M31 α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα.

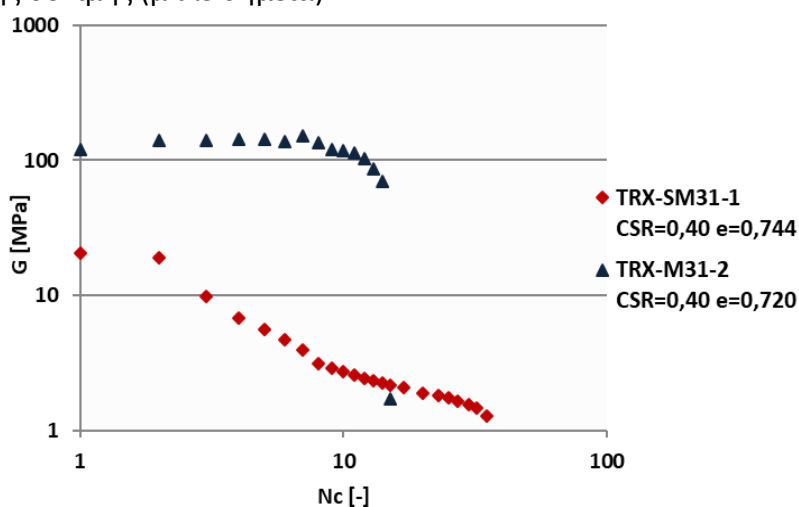
Ακολουθούν οι ενότητες 5.4.2 έως 5.4.3 όπου συγκρίνονται δοκιμές σταθεροποιημένων $CS=10\%$ και φυσικών δοκιμών άμμου M31 με παρόμοιο αρχικό δείκτη πόρων e και κοινό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR . Τα διαγράμματα απεικονίζουν την απομείωση του μέτρου διάτμησης G [MPa] συναρτήσει είτε των κύκλων φόρτισης N_c [-], είτε της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%]. Ακόμα παρατίθενται τα διαγράμματα λόγου τάσεων q/p'_i [-] συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%]. Και τέλος, παρατίθενται τα διαγράμματα λόγου τάσεων q/p'_i (διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q κανονικοποιημένης ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i) συναρτήσει της μέσης ενεργού τάσης p' (επίσης κανονικοποιημένης ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i), της αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} συναρτήσει του χρόνου t [min] και του λόγου υπερπίεσης πόρων R_u (όπου $R_u = \Delta u/p'_i$ κανονικοποίηση της πίεσης των πόρων Δu ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i) συναρτήσει του χρόνου t [min]. Οι δοκιμές που συγκρίνονται μεταξύ τους είναι οι εξής τέσσερις:

- Το χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο TRX-SM31-1 με το χαλαρό φυσικό δοκίμιο TRX-M31-2
- Το μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο TRX-SM31-5 με το μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο TRX-M31-12
- Το μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο TRX-SM31-7 με το μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο TRX-M31-11
- Το πυκνό σταθεροποιημένο δοκίμιο TRX-SM31-4 με το επίσης πυκνό φυσικό δοκίμιο TRX-M31-13

5.4.2 Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-1 με το φυσικό δοκίμιο TRX-M31-2

Η δοκιμή TRX-SM31-1 με δείκτη πόρων $e=0,744$ είναι ένα χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,648\%$ και γι' αυτό έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=20,6\text{MPa}$, ενώ στον τρίτο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\varepsilon=1,636\%$ και έχει $G=9,8\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.7 και 5.8 σημειώνονται οι 15 πρώτοι κύκλοι φόρτισης της δοκιμής και επιλέγονται ακόμα κάποιοι μέχρι τους 40 κύκλους που ολοκληρώνεται η δοκιμή (κόκκινα σημεία).

Η δοκιμή TRX-M31-2 είναι ένα χαλαρό φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται και αυτό σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,065\%$ γι' αυτό και έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=119,7\text{MPa}$. Ενώ στον 14^ο κύκλο έχει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,113\%$ και μέτρο διάτμησης $G=69,4\text{MPa}$ ακαριαία στον επόμενο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=4,813\%$ και το μέτρο διάτμησης μειώνεται στη τιμή $G=1,7\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.7 και 5.8 σημειώνονται οι 15 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπλε σημεία).

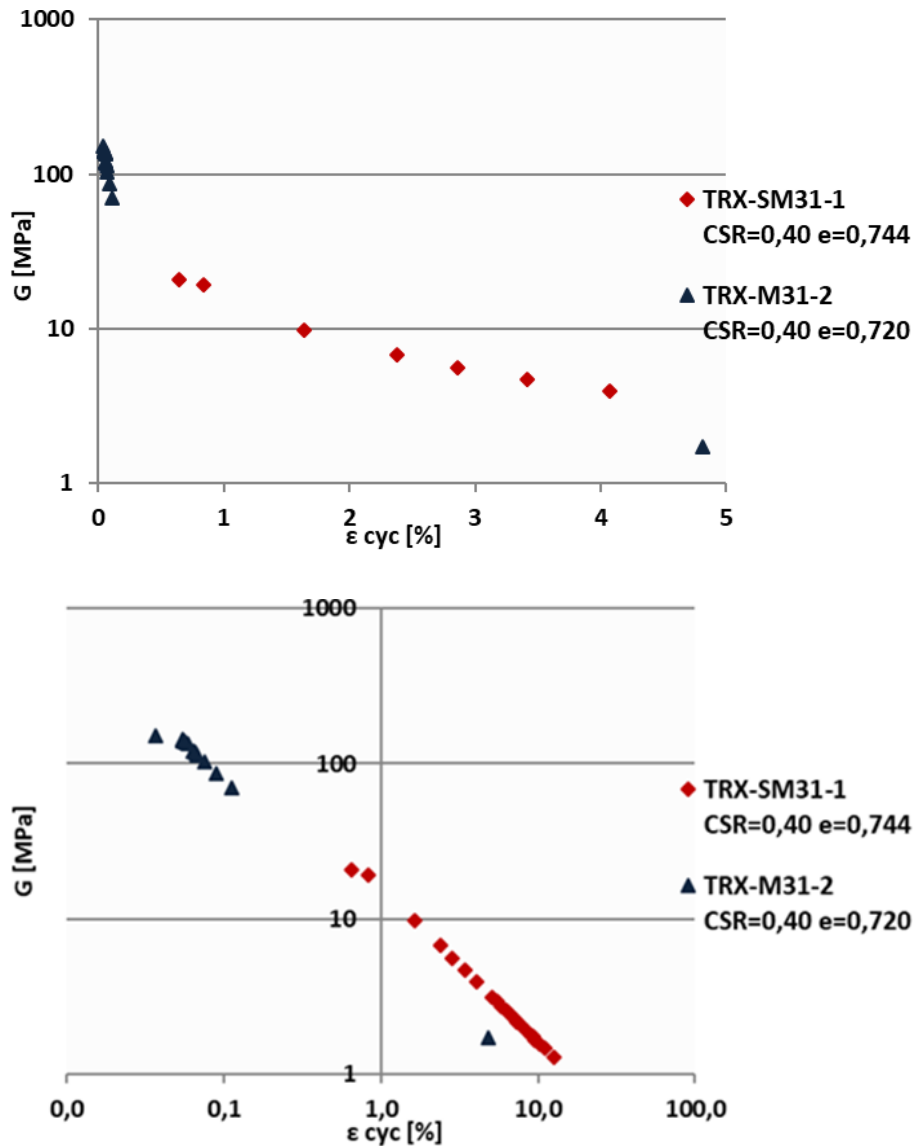


Σχήμα 5.7 Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] για φυσικό δοκίμιο με δείκτη πόρων $e=0,720$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένο $CS=10\%$ δοκίμιο άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,744$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$.

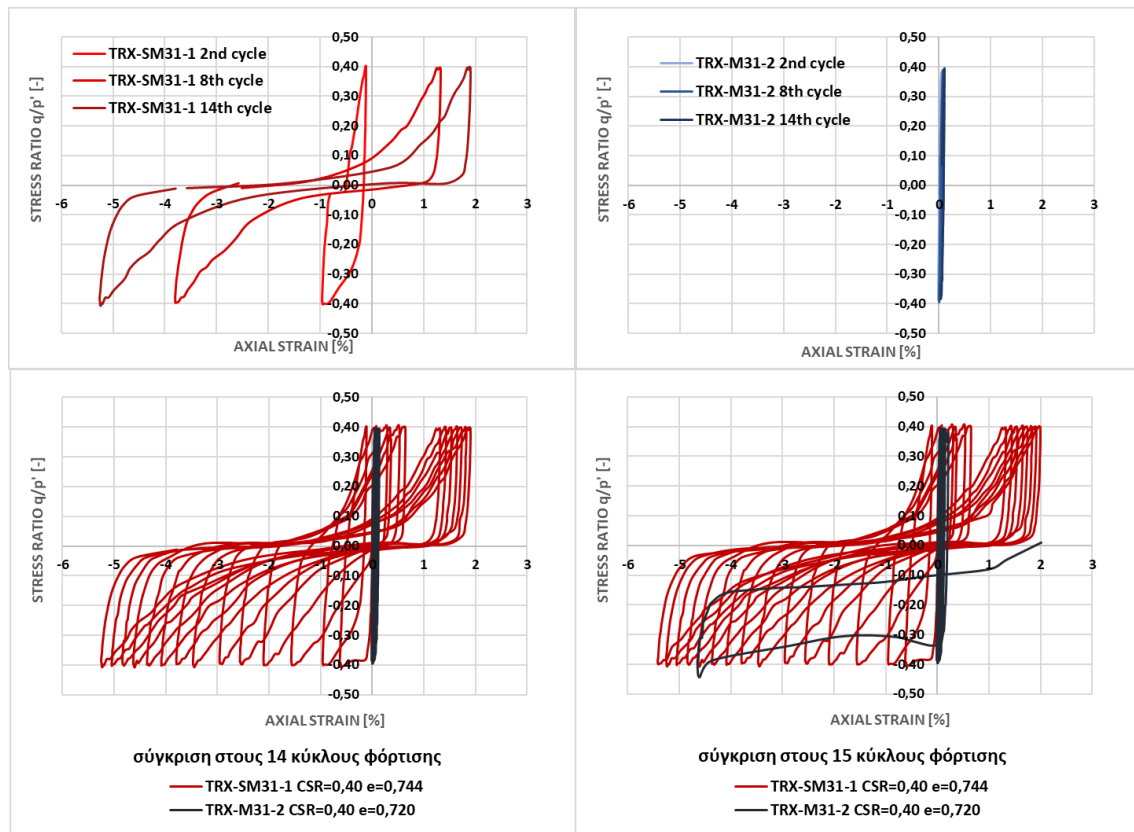
Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται το διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%], (πάνω αριστερά) για το σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου TRX-SM31-1 με $e=0,744$ στον $2^\circ, 8^\circ$ και 14° κύκλο φόρτισης και (πάνω δεξιά) για το φυσικό δοκίμιο άμμου TRX-M31-2 με $e=0,720$ στους ίδιους κύκλους φόρτισης με το σταθεροποιημένο. Στο ίδιο σχήμα (κάτω αριστερά) συγκρίνεται το σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου για τους 14 πρώτους κύκλους φόρτισης και (κάτω δεξιά) συγκρίνεται το σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου για το σύνολο των 15 κύκλων φόρτισης της δοκιμής. Η αποκλίνουσα τάση q έχει κανονικοποιηθεί ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η εξέλιξη των αξονικών παραμορφώσεων ε_{zz} των δοκιμίων. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου είχε τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ και χρόνο ωρίμανσης 47 ώρες, ενώ η τάση στερεοποίησης του φυσικού δοκιμίου ήταν $p'_i=100\text{kPa}$. Παρατηρείται ότι από τον πρώτο κύκλο το σταθεροποιημένο δοκίμιο παραμορφώνεται κατά $\varepsilon=-0,95\%$ κατά τον εφελκυσμό, επομένως το μέτρο διάτμησης απομειώνεται συνεχώς, ενώ το φυσικό δοκίμιο εμφανίζει μεγαλύτερη δυσστησία. Το φυσικό δοκίμιο διατηρεί τη δυσστησία του μέχρι τους 14 κύκλους φόρτισης όταν ακαριαία αναπτύσσει παραμόρφωση ανάλογη αυτής που θα έχει αναπτύξει το σταθεροποιημένο δοκίμιο στους ίδιους κύκλους.

Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q , κανονικοποιημένης ως προς την αντίστοιχη τάση στερεοποίησης των δοκιμίων p'_i , συναρτήσει της μέσης ενεργού τάσης p' , επίσης κανονικοποιημένης ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i των δοκιμίων. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, μετά τους 2 πρώτους κύκλους φόρτισης, η ενεργός τάση p' απομειώνεται κατά 75% και μηδενίζεται για πρώτη φορά μετά τον 5° κύκλο. Στα Σχήματα 5.10 έως 5.12 ο μηδενισμός της ενεργού τάσης p' του σταθεροποιημένου δοκιμίου σημειώνεται με πράσινο σημείο. Για τους επόμενους κύκλους μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 40 κύκλους, το φορτίο που επιβάλλεται παραλαμβάνεται από το σταθεροποιημένο δοκίμιο, αναπτύσσοντας αξονικές παραμορφώσεις ε_{zz} χωρίς αυτό να καταρρέει. Στο φυσικό δοκίμιο η ενεργός τάση p' στους πρώτους κύκλους απομειώνεται σταδιακά, στους 13 κύκλους απομειώνεται κατά 50% και στον 15° κύκλο μηδενίζεται αναπτύσσοντας και αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{zz}=-4,61\%$ (Σχήμα 5.11).

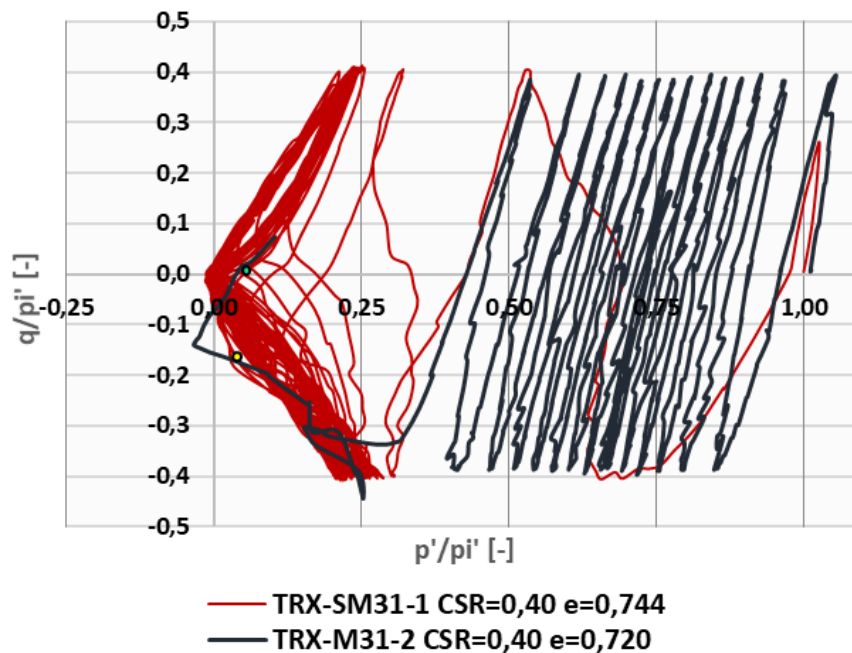
Στο Σχήμα 5.12 Διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-], η ποσότητα R_u ισούται με το λόγο της αναπτυσσόμενης πίεσης πόρων Δu προς την τάση στερεοποίησης p'_i , συναρτήσει του χρόνου t [min]. Η ανάπτυξη της πίεσης πόρων για το σταθεροποιημένο δοκίμιο γίνεται άμεσα αφού υπάρχει και η αντίστοιχη ανάπτυξη παραμορφώσεων. Αντίθετα, το φυσικό δοκίμιο αναπτύσσει με πιο αργό ρυθμό την πίεση των πόρων μέχρι ακαριαία ο λόγος υπερπίεσης πόρων να πάρει την τιμή 1.



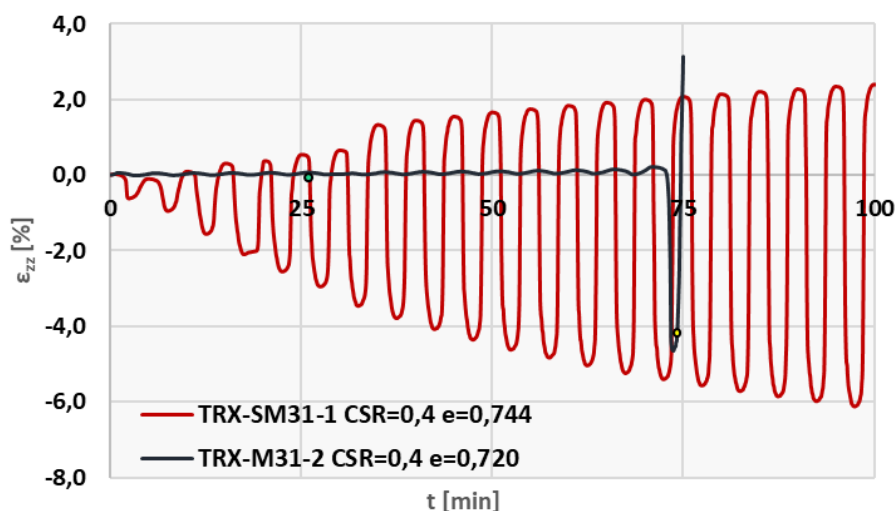
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,720$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,744$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$. α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα.



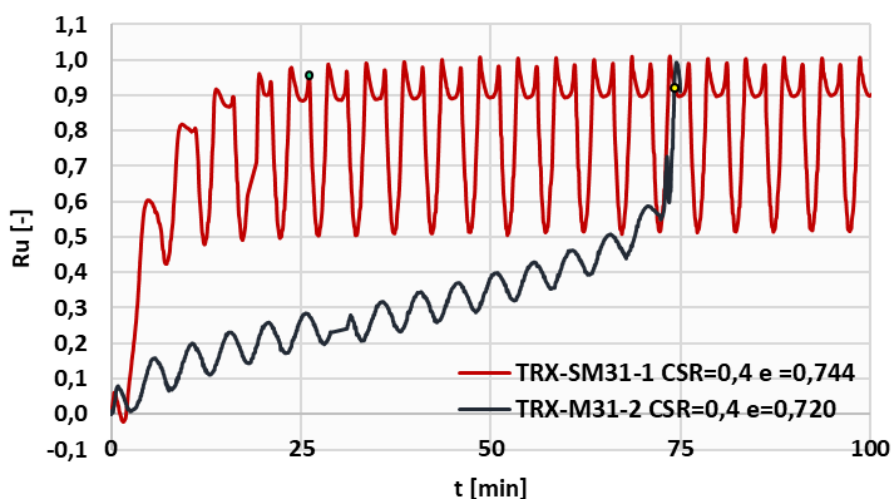
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p' [-] – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,744$ στον 2^ο, 8^ο και 14^ο κύκλο φόρτισης, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,720$ στον 2^ο, 8^ο και 14^ο κύκλο φόρτισης, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 14 πρώτους κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 15 κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p' [-] – μέσης ενεργού τάσης p'/p' [-] σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου με $e=0,744$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού δοκιμίου με $e=0,720$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης CSR=0,40.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,744$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού δοκιμίου, με $e=0,720$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$.



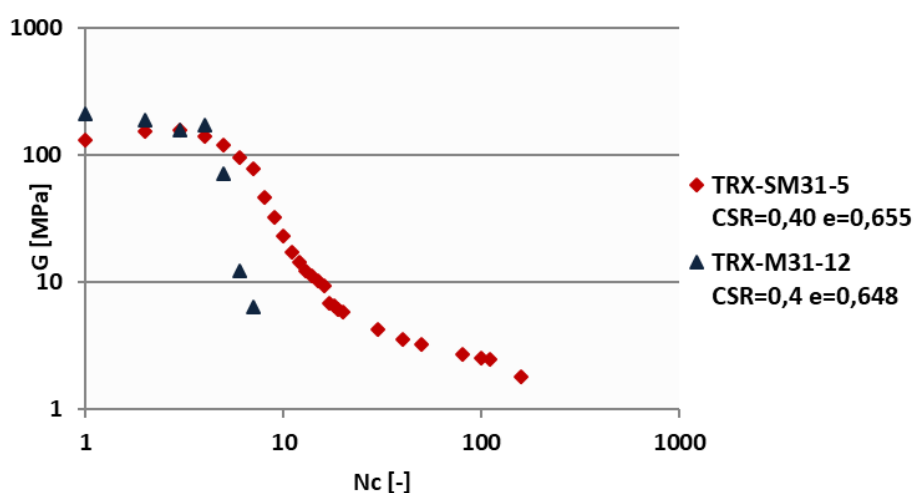
Σχήμα 5.12 Διάγραμμα πίεσης πόρων Ru [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,744$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,720$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$.

5.4.3 Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-5 με το φυσικό δοκίμιο TRX-M31-12

Η δοκιμή TRX-SM31-5 αφορά ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο με δείκτη πόρων $e=0,655$ που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,126\%$ γι' αυτό και έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=128,9\text{MPa}$, το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους επόμενους 5 κύκλους. Στον 11^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc} = 0,984\%$ και έχει $G=17\text{MPa}$, στον 14^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc} = 1,536\%$ με $G=11\text{MPa}$ και στον 18^ο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc} = 2,547\%$ ενώ το μέτρο διάτμησης είναι $G=6,5\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 σημειώνονται οι 20 πρώτοι

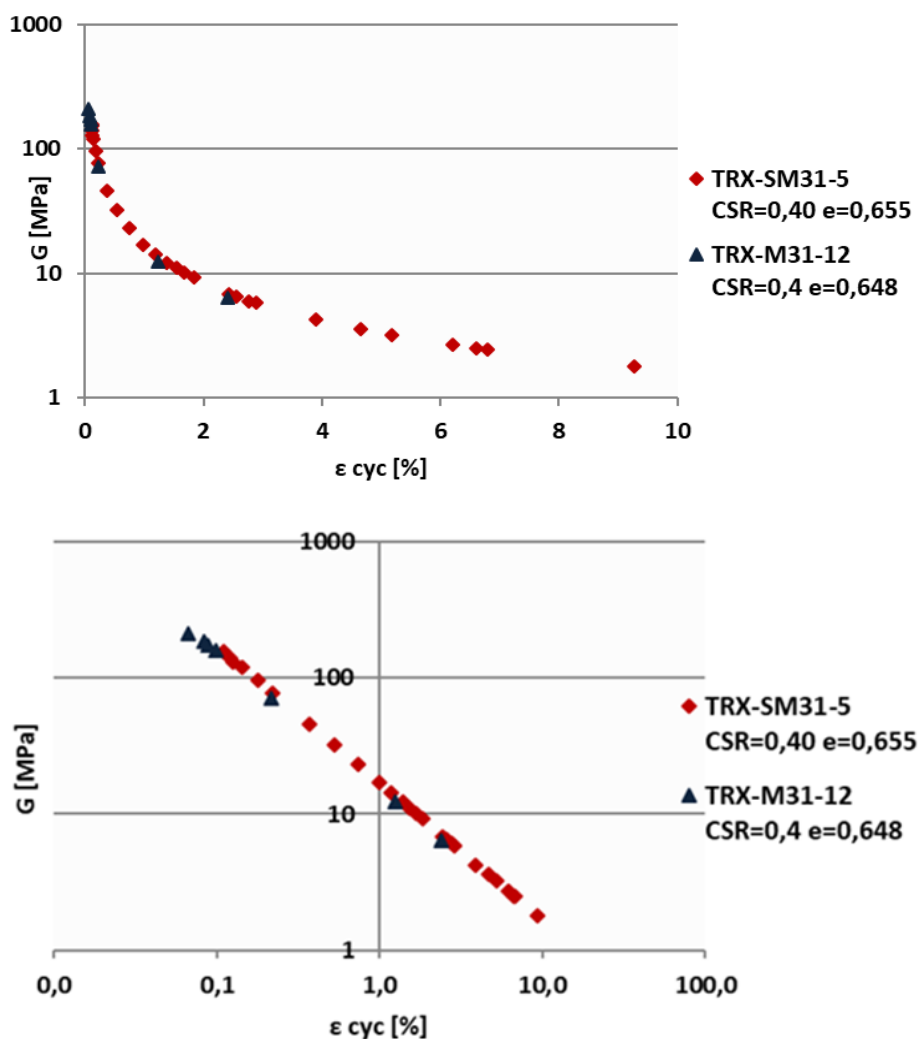
κύκλοι φόρτισης της δοκιμής και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι κύκλοι μέχρι τον 158^ο κύκλο που ολοκληρώνεται η δοκιμή (κόκκινα σημεία).

Η δοκιμή TRX-M31-12 είναι ένα μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται και αυτό σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,066\%$ και γι' αυτό έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=210,4\text{MPa}$. Στον 6^ο κύκλο αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=1,239\%$ με μέτρο διάτμησης $G=12,3\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=2,403\%$ και $G=6,3\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 σημειώνονται οι 7 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπλε σημεία).



Σχήμα 5.13 Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] φυσικού δοκίμιου με δείκτη πόρων $e=0,648$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκίμιου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,655$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$.

Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται το διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] συναρτήσεως της αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%], (πάνω αριστερά) για το σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου TRX-SM31-5 με $e=0,655$ στον 2^ο και 6^ο κύκλο φόρτισης, (πάνω δεξιά) για το φυσικό δοκίμιο άμμου TRX-M31-12 με $e=0,648$ στους ίδιους κύκλους φόρτισης με το σταθεροποιημένο. Στο ίδιο σχήμα, (κάτω αριστερά) συγκρίνεται το σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου για τους 6 πρώτους κύκλους φόρτισης και (κάτω δεξιά) συγκρίνεται το σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου για το σύνολο των 7,5 κύκλων φόρτισης της δοκιμής. Η αποκλίνοσα τάση q έχει κανονικοποιηθεί ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η εξέλιξη των αξονικών παραμορφώσεων ε_{zz} των δοκιμίων. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου είχε τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ και χρόνο ωρίμανσης 44 ώρες και η τάση στερεοποίησης του φυσικού δοκίμιου ήταν επίσης $p'_i=200\text{kPa}$. Παρατηρείται ότι η δυσμησία του σταθεροποιημένου δοκίμιου είναι μεγαλύτερη του φυσικού δοκίμιου αφού στον ίδιο αριθμό κύκλων αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση μόλις $\varepsilon_{zz}=-0,25\%$.



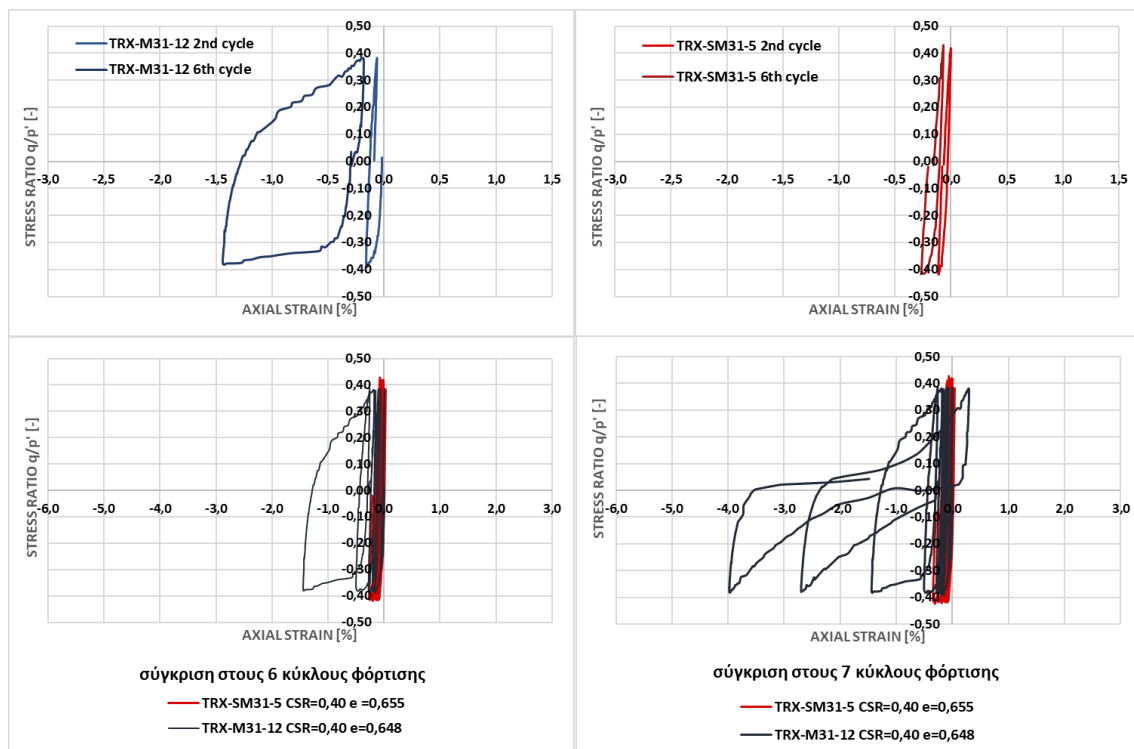
Σχήμα 5.14 Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ϵ_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,648$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,655$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$.

α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα

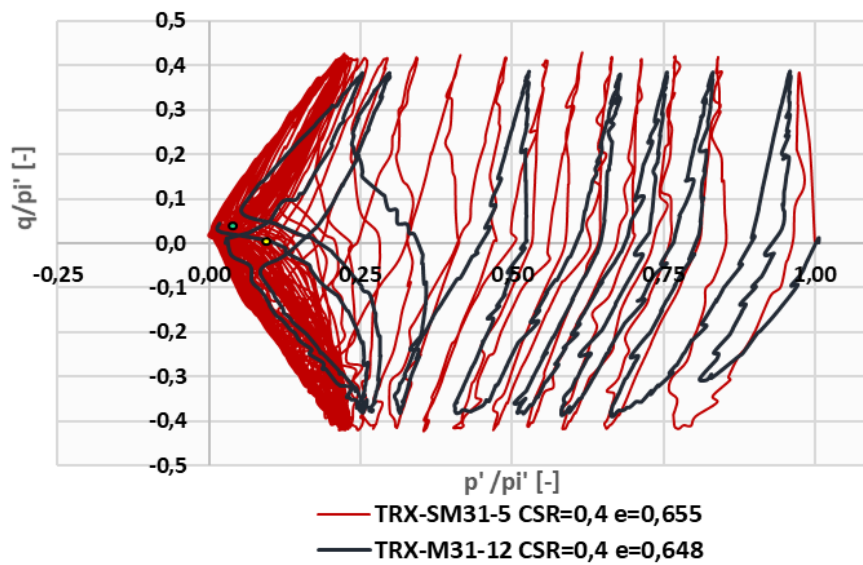
Στο Σχήμα 5.16 φαίνεται το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης σ , κανονικοποιημένης ως προς την αντίστοιχη τάση στερεοποίησης ρ'_i των δοκιμίων, συναρτήσεως της μέσης ενεργού τάσης ρ' , επίσης κανονικοποιημένης ως προς την τάση στερεοποίησης των δοκιμίων, $\rho'_i=200\text{kPa}$ και για τα δύο δοκίμια. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, η ενεργός τάση απομειώνεται κατά 75% μετά τους 9 κύκλους φόρτισης και μηδενίζεται για πρώτη φορά μετά τον 28^ο κύκλο. Στα Σχήματα 5.16 έως 5.17 ο μηδενισμός της ενεργού τάσης του σταθεροποιημένου δοκιμίου σημειώνεται με πράσινο σημείο. Για τους επόμενους κύκλους μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 158 κύκλους, το φορτίο που επιβάλλεται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο παραλαμβάνεται αναπτύσσοντας αξονικές παραμορφώσεις χωρίς αυτό να καταρρέει. Στο φυσικό δοκίμιο, η ενεργός τάση απομειώνεται κατά 75% στους 5 πρώτους κύκλους φόρτισης και μηδενίζεται στον 8^ο κύκλο, αναπτύσσοντας αξονική παραμόρφωση $\epsilon_{zz}=-3,99\%$

(Σχήμα 5.17). Στα σχήματα 5.16 έως 5.18 ο μηδενισμός της ενεργού τάσης του φυσικού δοκιμίου σημειώνεται με κίτρινο σημείο.

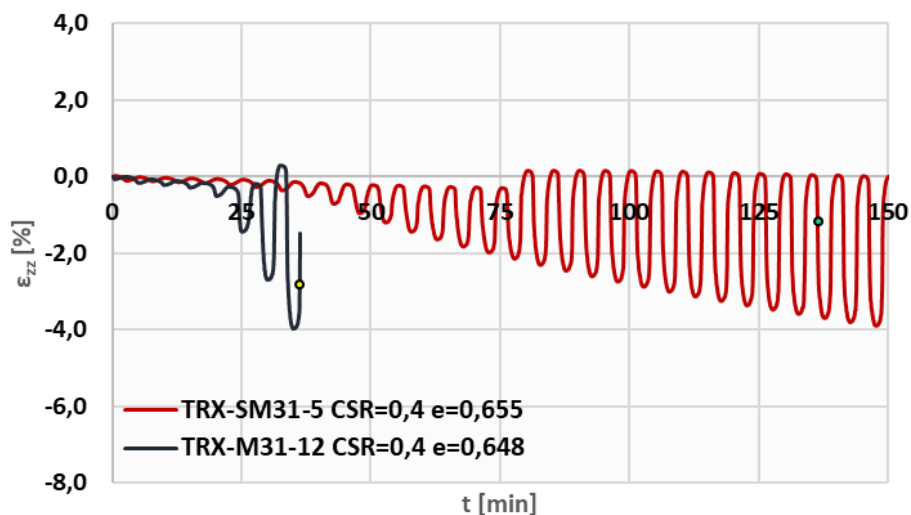
Στο Σχήμα 5.18 φαίνεται το διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-], η ποσότητα R_u ισούται με την κανονικοποιημένη αναπτυσσόμενη πίεση των πόρων Δu ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i , συναρτήσεως του χρόνου t [min]. Η ανάπτυξη της πίεσης πόρων Δu για το σταθεροποιημένο και φυσικό δοκίμιο γίνεται με παρόμοιο τρόπο για τους πρώτους 4 κύκλους φόρτισης. Στη συνέχεια το φυσικό δοκίμιο, εφόσον οδεύει στο μηδενισμό της ενεργού τάσης p' αναπτύσσει ταχύτερα πίεση πόρων Δu , αυτό συμφωνεί και με την αντίστοιχη ανάπτυξη παραμορφώσεων στο δοκίμιο ϵ_{zz} .



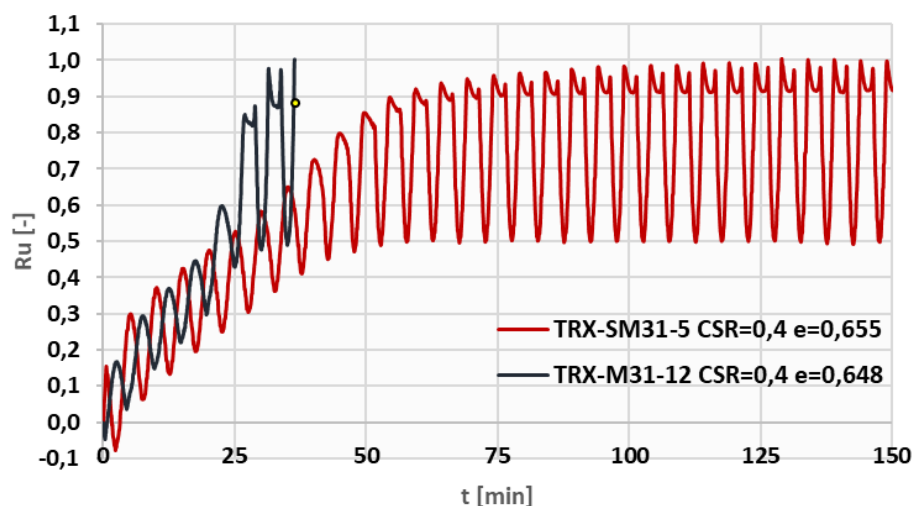
Σχήμα 5.15 Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p' [-] – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,655$ στον 2^ο και 8^ο κύκλο φόρτισης, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,648$ στον 2^ο και 6^ο κύκλο φόρτισης, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 6 πρώτους κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 7,5 κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα λόγου τάσεων $q/p_i' [-]$ – μέσης ενεργού τάσης $p'/p_i' [-]$ σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,655$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού δοκιμίου, με $e=0,648$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$.



Σχήμα 5.17 Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_{zz} [%]$ – χρόνου $t [min]$ σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,655$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού δοκιμίου, με $e=0,648$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$.

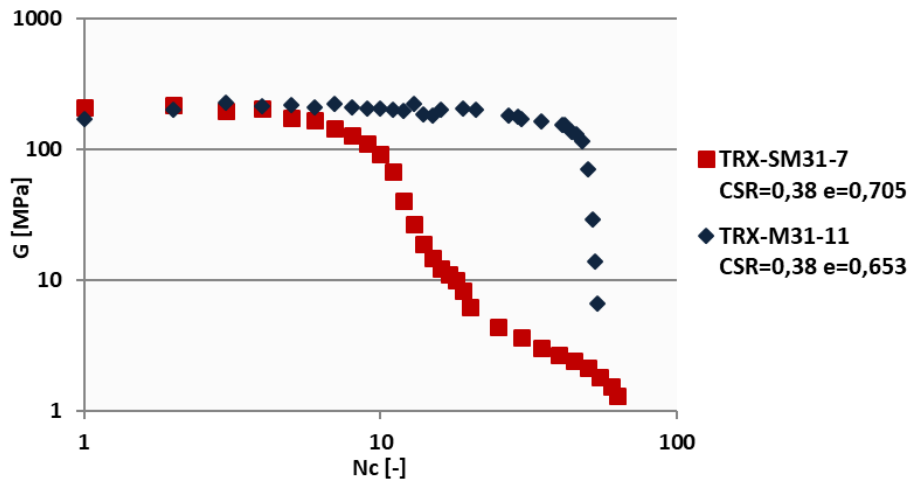


Σχήμα 5.18 Διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,655$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού δοκιμίου, με $e=0,648$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$.

5.4.4 Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-7 με το φυσικό δοκίμιο TRX-M31-11

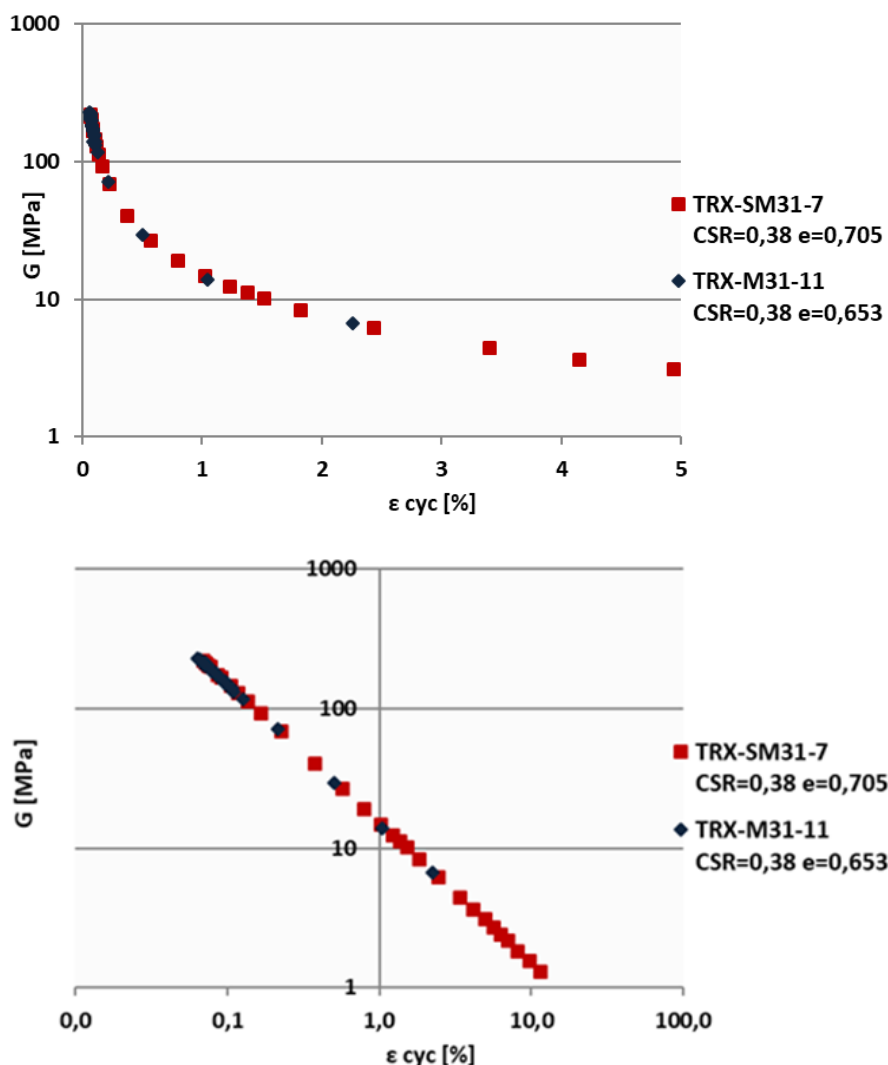
Η δοκιμή TRX-SM31-7 με δείκτη πόρων $e=0,705$ είναι ένα μέσης πυκνότητας σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,072\%$ και γι' αυτό έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=210,4\text{MPa}$, το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους επόμενους 5 κύκλους φόρτισης. Στον 6^ο κύκλο αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,092\%$ και έχει μέτρο διάτμησης $G=166,9\text{MPa}$, σταδιακά το μέτρο διάτμησης απομειώνεται. Στον 15^ο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=1,026\%$ και $G=14,9\text{MPa}$, στον 18^ο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=1,522\%$ με $G=10\text{MPa}$ ενώ στον 20^ο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=2,433\%$ και μέτρο διάτμησης $G=6,2\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.19 και 5.20 σημειώνονται οι 20 πρώτοι κύκλοι της δοκιμής και στη συνέχεια κάθε σημείο αντιστοιχεί στους επόμενους 5 κύκλους φόρτισης μέχρι τους 63 κύκλους που ολοκληρώνεται η δοκιμή (κόκκινα σημεία).

Η δοκιμή TRX-M31-11 είναι ένα μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται και αυτό σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,087\%$ και γι' αυτό έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=170,13\text{MPa}$ το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους επόμενους 35 κύκλους φόρτισης όταν αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=0,087\%$ και έχει $G=165,9\text{MPa}$. Στον 53^ο κύκλο αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=1,048\%$ και μέτρο διάτμησης $G=13,9\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=2,260\%$ και $G=6,62\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.19 και 5.20 σημειώνονται οι 20 πρώτοι κύκλοι φόρτισης και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι κύκλοι μέχρι και τον 54^ο που ολοκληρώνεται η δοκιμή (μπλε σημεία).



Σχήμα 5.19 Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] φυσικού δοκίμιου με δείκτη πόρων $e=0,653$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκίμιου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,705$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$.

Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται το διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{zz} [%], (πάνω αριστερά) για σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκίμιου άμμου M31 με $e=0,705$ στον $2^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 41^\circ$ και 50° κύκλο φόρτισης και (πάνω δεξιά) για φυσικό δοκίμιο άμμου M31 με $e=0,653$ στους ίδιους κύκλους φόρτισης με το σταθεροποιημένο. Στο ίδιο σχήμα, (κάτω αριστερά) συγκρίνονται σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου M31 στους πρώτους 50 κύκλους φόρτισης και (κάτω δεξιά) συγκρίνονται σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου M31 για το σύνολο των 54 κύκλων φόρτισης. Η αποκλίνουσα τάση q έχει κανονικοποιηθεί ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η εξέλιξη των αξονικών παραμορφώσεων ϵ_{zz} των δοκιμίων. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου είχε τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ και χρόνο ωρίμανσης 47 ώρες και η τάση στερεοποίησης του φυσικού δοκίμιου ήταν επίσης $p'_i=200\text{kPa}$. Παρατηρείται ότι το χαλαρό σταθεροποιημένο δοκίμιο αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις συγκριτικά με το μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο. Και τα δύο δοκίμια φορτίζονται υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στους 54 κύκλους φόρτισης το σταθεροποιημένο δοκίμιο αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση $\epsilon_{zz}=-6,94\%$ όταν η αξονική παραμόρφωση που αναπτύσσει το φυσικό δοκίμιο είναι $\epsilon_{zz}=-2,23\%$.



Σχήμα 5.20 Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,653$ (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,705$ (κόκκινα σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$.

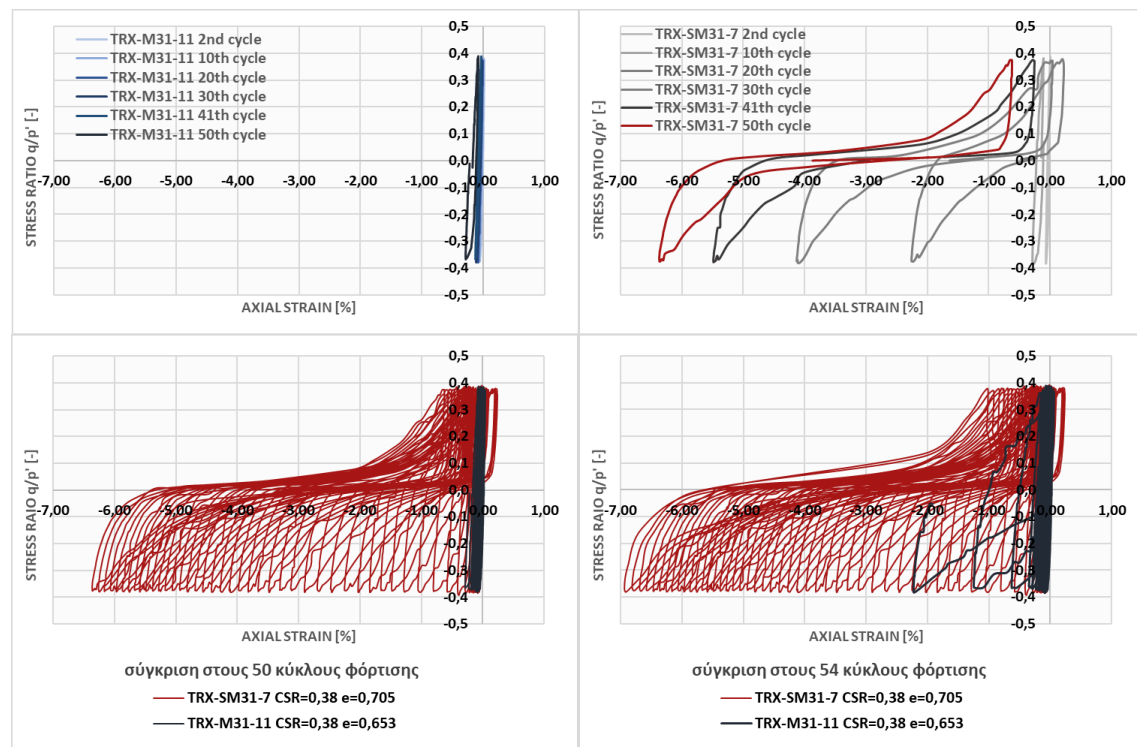
α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα

Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q , κανονικοποιημένης ως προς την αντίστοιχη τάση στερεοποίησης p'_i των δοκιμίων, συναρτήσεως της μέσης ενεργού τάσης p' , επίσης κανονικοποιημένης ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i των δοκιμίων, η οποία είναι $p'_i=200\text{kPa}$ και για τα δύο δοκίμια. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, η ενεργός τάση απομειώνεται κατά 75% μετά τους 12 κύκλους φόρτισης και μηδενίζεται για πρώτη φορά μετά τον 20^ο κύκλο. Στα σχήματα 5.23 έως 5.24 ο μηδενισμός της ενεργού τάσης p' του σταθεροποιημένου δοκιμίου σημειώνεται με πράσινο σημείο. Για τους επόμενους κύκλους μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 63 κύκλους, το φορτίο που επιβάλλεται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο παραλαμβάνεται αναπτύσσοντας αξονικές παραμορφώσεις χωρίς αυτό να

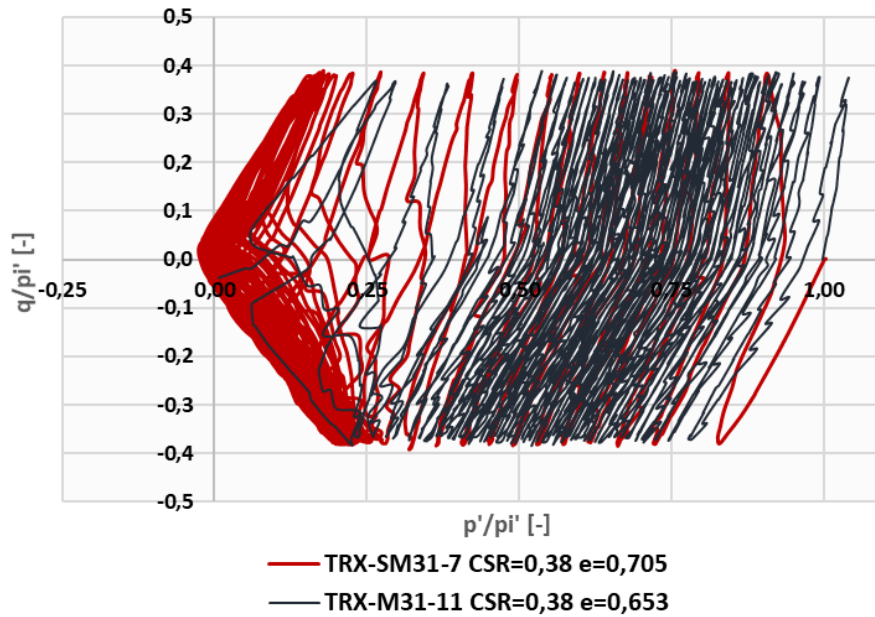
καταρρέει. Στο φυσικό δοκίμιο, η ενεργός τάση p' απομειώνεται κατά 75% στους 52 κύκλους φόρτισης και μηδενίζεται στον 55^ο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσοντας αξονική παραμόρφωση $\epsilon_{zz}=-2,23\%$ (Σχήμα 5.23). Στο Σχήμα 5.23 ο μηδενισμός της ενεργού τάσης p' του φυσικού δοκιμίου σημειώνεται με κίτρινο σημείο.

Στα Σχήματα 5.23 και 5.24 για να απεικονιστούν πιο ολοκληρωμένα οι δοκιμές, αριστερά φαίνονται οι 60 κύκλοι φόρτισης ενώ δεξιά 30 κύκλοι φόρτισης, ενώ η κλίμακα της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{zz} στον κατακόρυφο άξονα παραμένει κοινή.

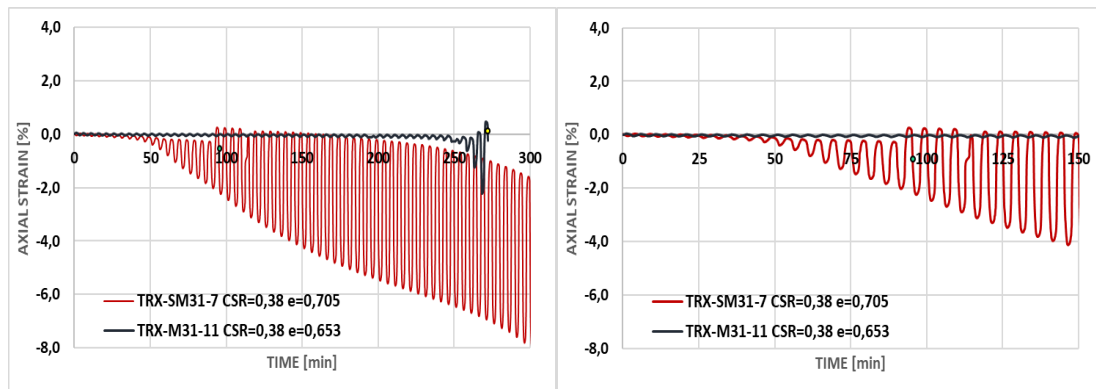
Στο Σχήμα 5.24 φαίνεται το διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-], όπου η ποσότητα R_u ισούται με το λόγο της αναπτυσσόμενης πίεσης των πόρων Δu προς την τάση στερεοποίησης p'_i , συναρτήσεως του χρόνου t [min]. Η ανάπτυξη της πίεσης πόρων για το σταθεροποιημένο δοκίμιο γίνεται άμεσα αφού υπάρχει και η αντίστοιχη ανάπτυξη παραμορφώσεων. Αντίθετα, το φυσικό δοκίμιο αναπτύσσει πίεση πόρων Δu με πιο αργό ρυθμό μέχρι τον ακαριαίο μηδενισμό της ενεργού τάσης.



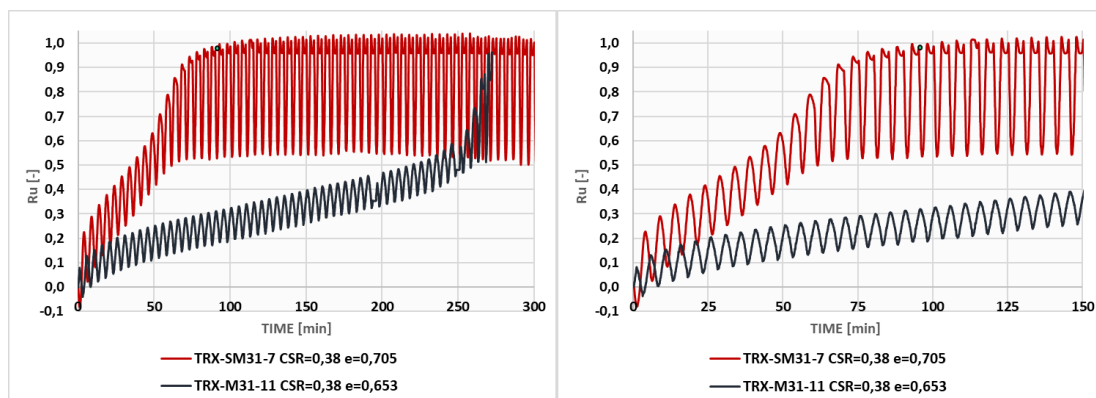
Σχήμα 5.21 Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p' [-] – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,705$ στον 2^ο, 10^ο, 20^ο, 30^ο, 41^ο και 50^ο κύκλο φόρτισης, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,653$ στον 2^ο, 10^ο, 20^ο, 30^ο, 41^ο και 50^ο κύκλο φόρτισης, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους πρώτους 50 κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 54 κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 5.22 Διάγραμμα λόγου τάσεων $q/p' [-]$ – μέσης ενεργού τάσης $p'/p' [-]$ σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,705$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,653$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$.



Σχήμα 5.23 Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{zz} [%]$ – μέσης ενεργού τάσης $p'/p' [-]$ σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,705$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,653$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$.

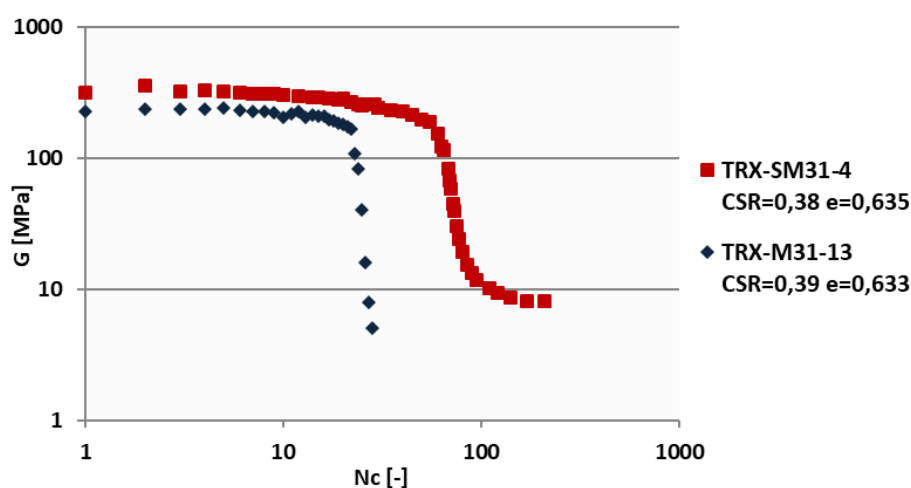


Σχήμα 5.24 Διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων $R_u [-]$ – χρόνου $t [min]$ σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,705$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,653$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$.

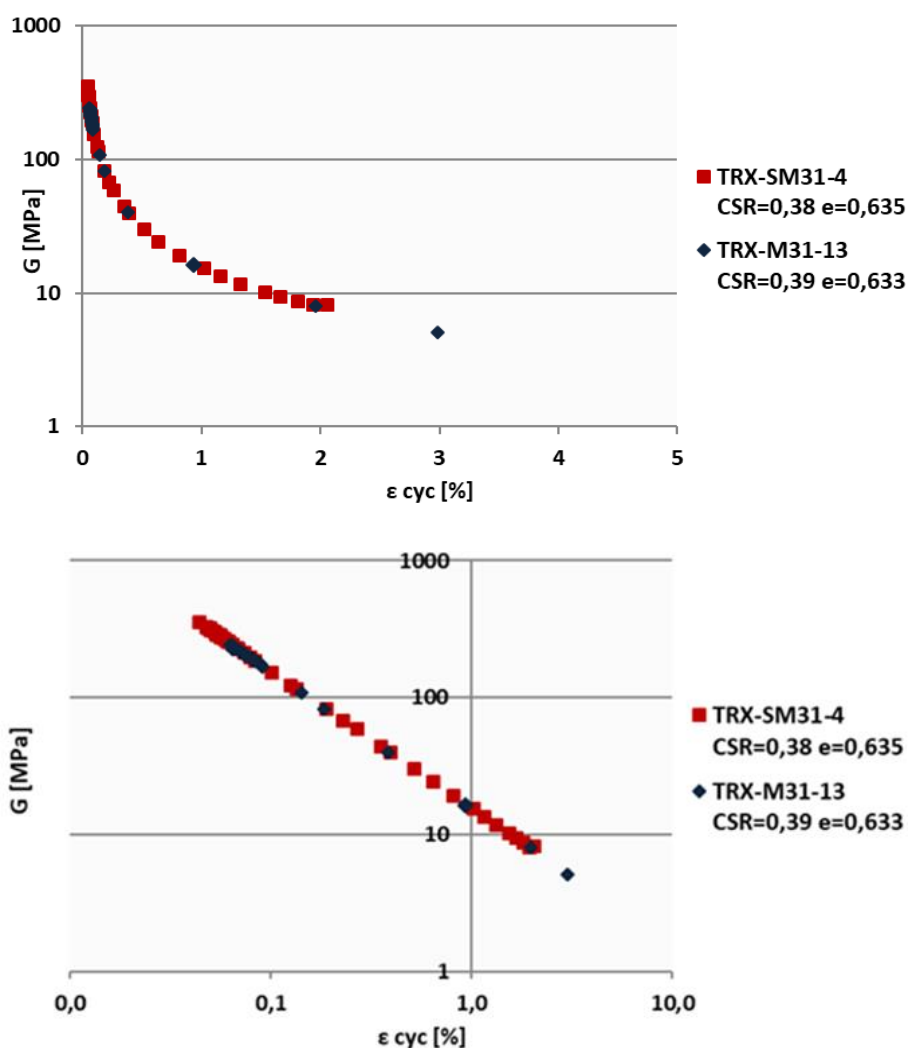
5.4.5 Σύγκριση σταθεροποιημένου δοκιμίου TRX-SM31-4 με το φυσικό δοκίμιο TRX-M31-13

Η δοκιμή TRX-SM31-4 με δείκτη πόρων $e=0,635$ είναι ένα πυκνό σταθεροποιημένο δοκίμιο που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,049\%$ και γι' αυτό έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=318,1\text{MPa}$, το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους επόμενους 40 κύκλους. Στον 85^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=1,019\%$ και έχει $G=15,5\text{MPa}$, στον 110^ο κύκλο φόρτισης αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=1,5\%$ και $G=10,2\text{MPa}$ και στον 207^ο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=2,061\%$ με μέτρο διάτμησης $G=8,2\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.25 και 5.26 σημειώνονται οι 30 πρώτοι κύκλοι φόρτισης της δοκιμής και στη συνέχεια επιλέγονται κάποιοι κύκλοι μέχρι τον 207^ο κύκλο που ολοκληρώνεται η δοκιμή (κόκκινα σημεία).

Η δοκιμή TRX-M31-13 είναι ένα πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,39$. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,064\%$ γι' αυτό και έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=225,5\text{MPa}$ το οποίο παραμένει περίπου σταθερό για τους επόμενους 16 κύκλους φόρτισης, όταν αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=0,073\%$ και έχει $G=207,1\text{MPa}$. Στον 22^ο κύκλο αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,091\%$ και έχει μέτρο διάτμησης $G=166\text{MPa}$. Στην συνέχεια το μέτρο διάτμησης απομειώνεται απότομα. Στον 26^ο κύκλο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=0,941\%$ και έχει $G=16\text{MPa}$, στον 27^ο αναπτύσσει $\varepsilon_{cyc}=1,961\%$ με $G=8\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο $\varepsilon_{cyc}=2,986\%$ με μέτρο διάτμησης $G=5,1\text{MPa}$. Στα Σχήματα 5.25 και 5.26 σημειώνονται οι 28 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπλε σημεία).



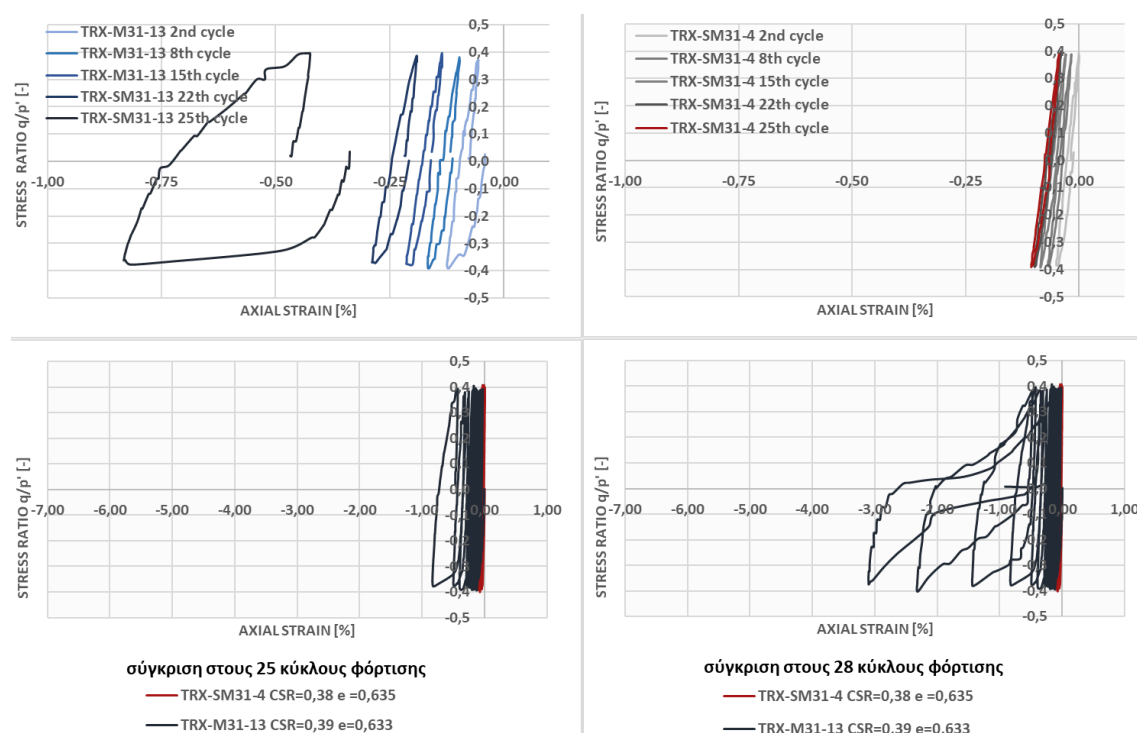
Σχήμα 5.25 Λογαριθμικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,633$ (μπλε σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,39$ και σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,635$ (κόκκινα σημεία) υπό $CSR=0,38$.



Σχήμα 5.26 Διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης φυσικού δοκιμίου με δείκτη πόρων $e=0,633$ (μπλε σημεία) υπό λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,39$ και σταθεροποιημένο $CS=10\%$ δοκιμίου άμμου M31 με δείκτη πόρων $e=0,635$ (κόκκινα σημεία) υπό $CSR=0,38$.
α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα

Στο Σχήμα 5.27 παρουσιάζεται το διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%], (πάνω αριστερά) για σταθεροποιημένο $CS=10\%$ δοκίμιο άμμου M31 με $e=0,635$ και $CSR=0,38$ στον $2^\circ, 8^\circ, 15^\circ, 22^\circ$ και 25° κύκλο φόρτισης και (πάνω δεξιά) για φυσικό δοκίμιο άμμου M31 με $e=0,633$ και $CSR=0,39$ στους ίδιους κύκλους φόρτισης με το σταθεροποιημένο. Στο ίδιο σχήμα, (κάτω αριστερά) συγκρίνονται σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου M31 στους πρώτους 25 κύκλους φόρτισης και (κάτω δεξιά) συγκρίνονται σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο άμμου M31 στο σύνολο των 28 κύκλων φόρτισης της δοκιμής. Η αποκλίνουσα τάση q έχει κανονικοποιηθεί ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η εξέλιξη των αξονικών παραμορφώσεων ε_{zz} των δοκιμών. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου είχε τάση στερεοποίησης $p'_i=200\text{kPa}$ και χρόνο ωρίμανσης 67 ώρες και η τάση στερεοποίησης του φυσικού δοκιμίου ήταν επίσης $p'_i=200\text{kPa}$. Η πάνω σειρά του Σχήματος 5.27 στον οριζόντιο άξονα της αξονικής

παραμόρφωσης έχει μικρότερη κλίμακα, φαίνεται ότι στους 25 πρώτους κύκλους η μεγαλύτερη αξονική παραμόρφωση που έχει αναπτύξει το πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου είναι $\epsilon_{zz}=-0,83\%$ έναντι της αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{zz}=-0,11\%$ που αναπτύσσει το πυκνό σταθεροποιημένο δοκίμιο στον ίδιο αριθμό κύκλων. Στον οριζόντιο άξονα της αξονικής παραμόρφωσης της κάτω σειράς του Σχήματος 5.27 υπάρχει μεγαλύτερη κλίμακα, φαίνεται ότι στους 24 πρώτους κύκλους το πυκνό φυσικό και σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου έχουν παρόμοια δυσστημσία. Στους 28 κύκλους που φαίνονται στο Σχήμα 5.27δ η αξονική παραμόρφωση του φυσικού δοκιμίου είναι $\epsilon_{zz}=-3,08\%$ ενώ του σταθεροποιημένου δοκιμίου $\epsilon_{zz}=-0,10\%$.



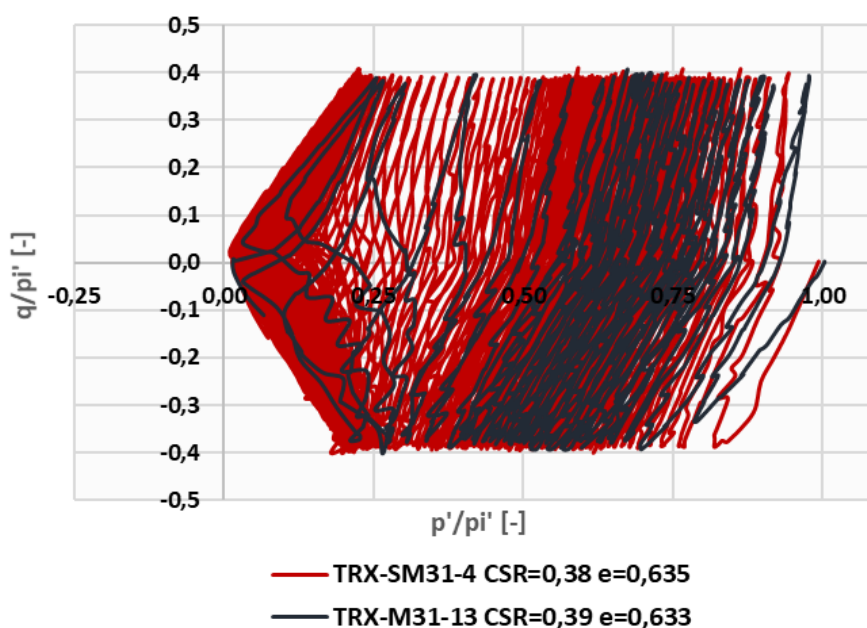
Σχήμα 5.27 Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p' [-] – αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{zz} [%] α) σταθεροποιημένου CS=10% δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,635$ στον 2°, 8°, 15°, 22° και 25° κύκλο φόρτισης και CSR=0,38, β) φυσικού δοκιμίου άμμου M31 με $e=0,633$ στον 2°, 8°, 15°, 22° και 25° κύκλο φόρτισης και CSR=0,39, γ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους πρώτους 25 κύκλους φόρτισης και δ) σύγκριση σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου M31 στους 28 κύκλους φόρτισης.

Στο Σχήμα 5.28 φαίνεται το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q , κανονικοποιημένης ως προς την αντίστοιχη τάση στερεοποίησης p'_i των δοκιμίων, συναρτήσεως της μέσης ενεργού τάσης p' , επίσης κανονικοποιημένης ως προς την τάση στερεοποίησης p'_i των δοκιμίων, η οποία είναι $p'_i=200\text{kPa}$ και για τα δύο δοκίμια. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, η ενεργός τάση p' απομειώνεται κατά 75% μετά τους 68 κύκλους φόρτισης και μηδενίζεται για πρώτη φορά μετά τον 125° κύκλο. Για τους επόμενους κύκλους μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 207 κύκλους, το φορτίο που επιβάλλεται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο παραλαμβάνεται, αναπτύσσοντας αξονικές

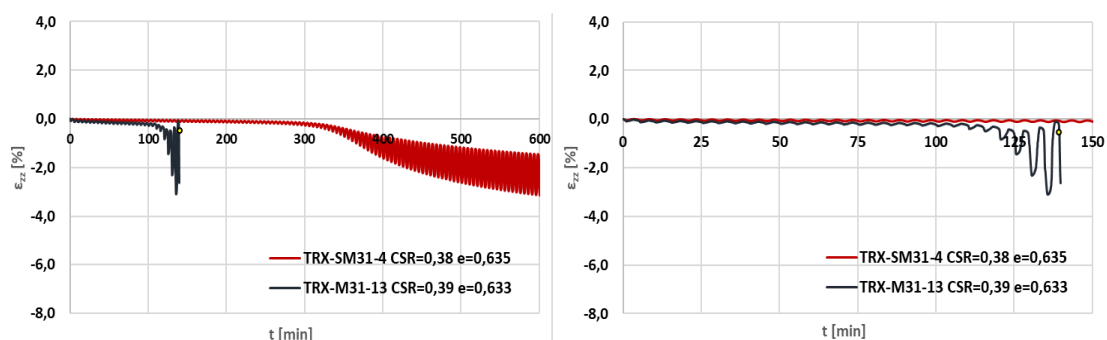
παραμορφώσεις χωρίς αυτό να καταρρέει. Στο φυσικό δοκίμιο, η ενεργός τάση p' απομειώνεται κατά 75% στους 26 κύκλους φόρτισης και μηδενίζεται στον 28^ο κύκλο φόρτισης, αναπτύσσοντας αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{zz}=-3,08\%$ (Σχήμα 5.29). Στο Σχήμα 5.29 ο μηδενισμός της ενεργού τάσης p' του φυσικού δοκιμίου σημειώνεται με κίτρινο σημείο.

Στα Σχήματα 5.29 και 5.30 προκειμένου να απεικονιστούν πιο ολοκληρωμένα οι δοκιμές, αριστερά φαίνονται οι 120 κύκλοι φόρτισης ενώ δεξιά οι 30 πρώτοι κύκλοι φόρτισης, ενώ η κλίμακα της αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} στον κατακόρυφο άξονα παραμένει ίδια.

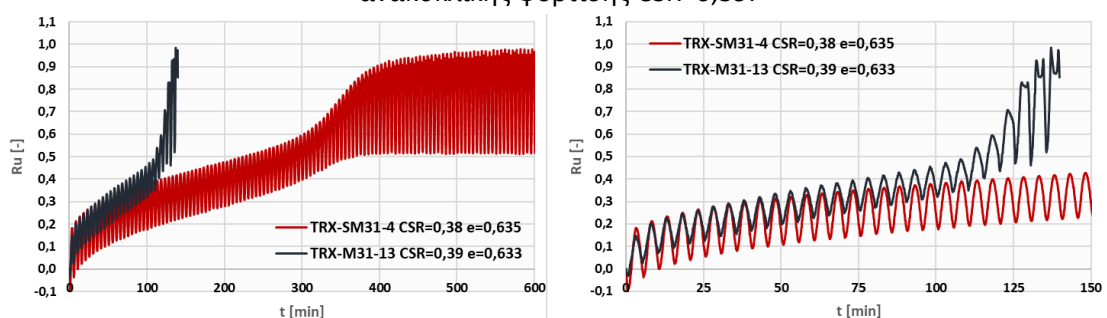
Στο Σχήμα 5.30 φαίνεται το διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-], όπου η ποσότητα R_u ισούται με το λόγο της αναπτυσσόμενης πίεσης των πόρων Δu προς την τάση στερεοποίησης p'_i των δοκιμίων, συναρτήσει του χρόνου t [min]. Η ανάπτυξη της πίεσης των πόρων Δu για το σταθεροποιημένο και μη δοκίμιο γίνεται με παρόμοιο τρόπο για τους πρώτους 25 κύκλους φόρτισης. Στη συνέχεια το φυσικό δοκίμιο, εφόσον οδεύει στο μηδενισμό της ενεργού τάσης p' αναπτύσσει ταχύτερα πίεση πόρων, αυτό συμφωνεί και με την αντίστοιχη ανάπτυξη αξονικών παραμορφώσεων στο δοκίμιο.



Σχήμα 5.28 Διάγραμμα λόγου τάσεων q/p'_i [-] – μέσης ενεργού τάσης p'/p'_i [-] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,635$ (κόκκινη καμπύλη) υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$ και φυσικού με $e=0,633$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,39$.



Σχήμα 5.29 Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης ε_{zz} [%] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,635$ (κόκκινη καμπύλη) υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$ και φυσικού με $e=0,633$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,39$.



Σχήμα 5.30 Διάγραμμα λόγου υπερπίεσης πόρων R_u [-] – χρόνου t [min] σταθεροποιημένου $CS=10\%$ δοκιμίου με $e=0,635$ υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,38$ (κόκκινη καμπύλη) και φυσικού με $e=0,633$ (μπλε καμπύλη) άμμου M31 υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,39$.

5.4.6 Σύγκριση φυσικών δοκιμών άμμου M31

Στο Σχήμα 5.31 φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα η μεταβολή του μέτρου διάτμησης G [MPa] συναρτήσει των κύκλων φόρτισης N_c [-] με βάση τα αποτελέσματα ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης σε φυσικά δοκίμια άμμου M31. Η τάση στερεοποίησης των δοκιμών είναι $p'_i=200\text{kPa}$, εκτός από τις δοκιμές TRX-M31-2, TRX-M31-8 και TRX-M31-10 όπου είναι $p'_i=100\text{kPa}$. Το διάγραμμα περιλαμβάνει φυσικά δοκίμια με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων e και του λόγου ανακυκλικής φόρτισης CSR .

Αναλυτικά στα Σχήματα 5.31 και 5.32 παρατηρούνται τα εξής:

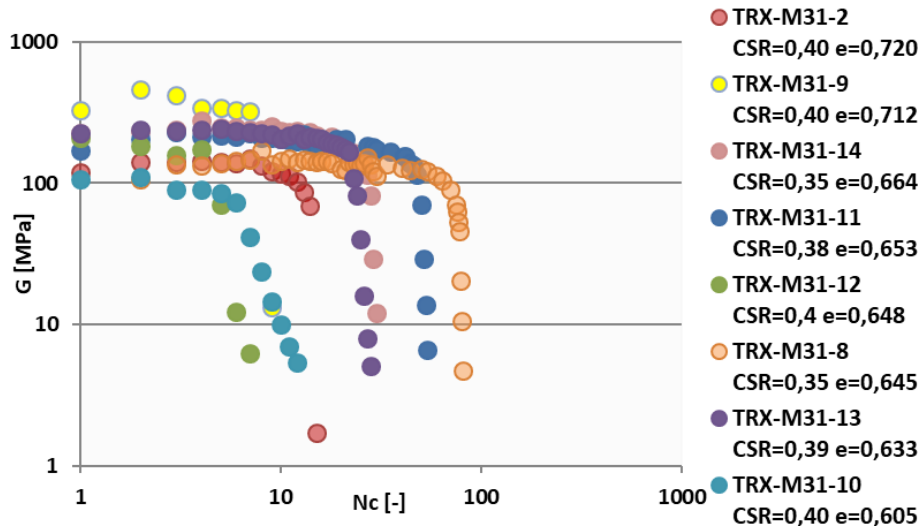
- Η δοκιμή TRX-M31-2 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,720$ είναι ένα χαλαρό φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=77,9\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,065\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=119,7\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 10^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{cyc}=0,066\%$ παίρνει την τιμή $G=117,5\text{MPa}$. Στον 14^ο κύκλο φόρτισης για $\varepsilon_{cyc}=0,113\%$ έχει μέτρο διάτμησης $G=69,4\text{MPa}$ το οποίο στον επόμενο κύκλο

απομειώνεται σε $G=1,7\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,113\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 15 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπορντό σημεία).

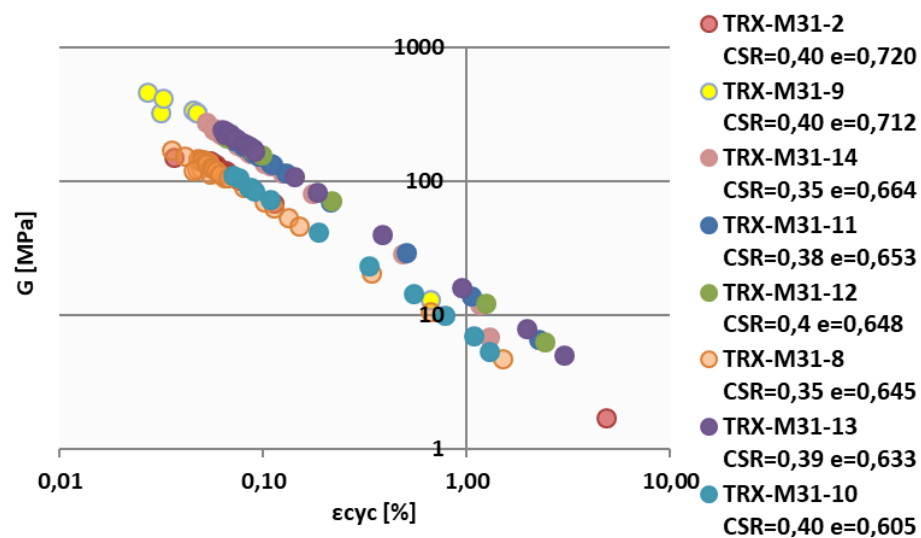
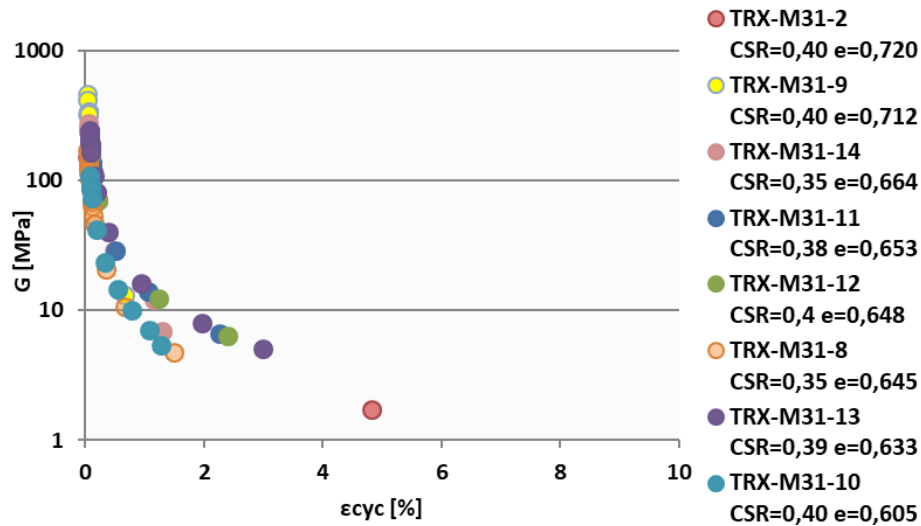
- Η δοκιμή TRX-M31-9 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,712$ είναι ένα χαλαρό φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $\text{CSR}=0,40$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=101,9\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,030\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=326,9\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 7^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,070\%$ παίρνει την τιμή $G=324,3\text{MPa}$. Στον 9^ο το μέτρο διάτμησης απομειώνεται σε $G=13,2\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,660\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 9 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (κίτρινα σημεία).
- Η δοκιμή TRX-M31-14 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,664$ είναι ένα μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $\text{CSR}=0,35$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=138,1\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,062\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=224,2\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 15^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,063\%$ παίρνει την τιμή $G=218,8\text{MPa}$. Στους επόμενους κύκλους το μέτρο διάτμησης σταδιακά απομειώνεται, το μέτρο διάτμησης μειώνεται κατά περίπου 50% στους 27^ο κύκλο φόρτισης. Στον 30^ο κύκλο φόρτισης για $\varepsilon_{\text{cyc}}=1,149\%$ έχει μέτρο διάτμησης $G=12,1\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο απομειώνεται σε $G=6,9\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{\text{cyc}}=1,295\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 28 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (ροζ σημεία).
- Η δοκιμή TRX-M31-11 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,653$ είναι ένα μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $\text{CSR}=0,38$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=148,8\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,087\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=170,1\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 30^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,087\%$ παίρνει την τιμή $G=172,1\text{MPa}$. Στους επόμενους κύκλους το μέτρο διάτμησης συνεχώς απομειώνεται. Στον 53^ο κύκλο φόρτισης για $\varepsilon_{\text{cyc}}=1,048\%$ έχει μέτρο διάτμησης $G=13,9\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο απομειώνεται σε $G=6,6\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{\text{cyc}}=2,260\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 54 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μπλε σημεία).
- Η δοκιμή TRX-M31-12 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,648$ είναι ένα μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $\text{CSR}=0,40$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=138,5\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{\text{cyc}}=0,066\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=210,4\text{MPa}$. Το μέτρο

διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 4^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{cyc}=0,088\%$ παίρνει την τιμή $G=172,1\text{MPa}$. Στους επόμενους κύκλους το μέτρο διάτμησης συνεχώς απομειώνεται. Στον 6^ο κύκλο φόρτισης για $\varepsilon_{cyc}=1,239\%$ έχει μέτρο διάτμησης $G=12,3\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο απομειώνεται σε $G=6,3\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{cyc}=3,403\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 54 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (πράσινα σημεία).

- Η δοκιμή TRX-M31-8 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,645$ είναι ένα μέσης πυκνότητας φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,35$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=69,5\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,065\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=107,3\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 6^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{cyc}=0,067\%$ παίρνει την τιμή $G=105,3\text{MPa}$. Στους επόμενους κύκλους το μέτρο διάτμησης συνεχώς απομειώνεται. Στον 8^ο κύκλο φόρτισης για $\varepsilon_{cyc}=0,660\%$ έχει μέτρο διάτμησης $G=10,6\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο απομειώνεται σε $G=4,7\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{cyc}=1,494\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 81 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (πορτοκαλί σημεία).
- Η δοκιμή TRX-M31-13 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,633$ είναι ένα πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,39$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=145\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,064\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=225,5\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G παραμένει περίπου σταθερό μέχρι τον 9^ο κύκλο φόρτισης, όταν για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{cyc}=0,069\%$ παίρνει την τιμή $G=222,8\text{MPa}$. Στους επόμενους κύκλους το μέτρο διάτμησης σταδιακά απομειώνεται, το μέτρο διάτμησης μειώνεται κατά 50% στους 23^ο κύκλο φόρτισης. Στον 27^ο κύκλο φόρτισης για $\varepsilon_{cyc}=1,961\%$ έχει μέτρο διάτμησης $G=8\text{MPa}$ και στον επόμενο κύκλο απομειώνεται σε $G=5,1\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{cyc}=2,986\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 28 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (μωβ σημεία).
- Η δοκιμή TRX-M31-10 με αρχικό δείκτη πόρων $e_0=0,605$ είναι ένα πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου M31 που υποβάλλεται σε λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,40$. Από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, για $\Delta q=80,9\text{kPa}$ αναπτύσσει αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\varepsilon_{cyc}=0,076\%$ επομένως έχει αρχικό μέτρο διάτμησης $G_0=106,3\text{MPa}$. Το μέτρο διάτμησης G απομειώνεται σταδιακά όταν στο 10^ο κύκλο φόρτισης για αξονική παραμόρφωση $\varepsilon_{cyc}=0,781\%$ παίρνει την τιμή $G=10\text{MPa}$. Στον 12^ο κύκλο φόρτισης το μέτρο διάτμησης απομειώνεται σε $G=5,4\text{MPa}$ αναπτύσσοντας $\varepsilon_{cyc}=1,281\%$. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 φαίνονται οι 12 κύκλοι φόρτισης της δοκιμής (γαλάζια σημεία).



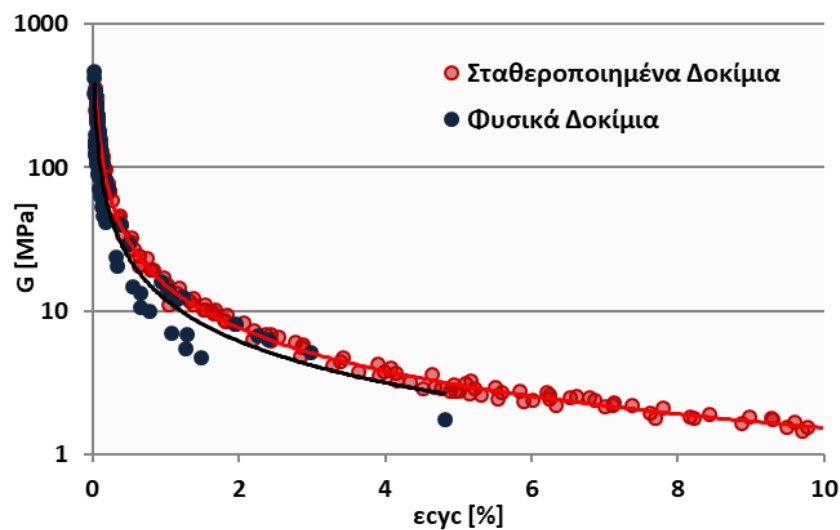
Σχήμα 5.31 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] - κύκλων φόρτισης N_c [-] για ανακυκλική φόρτιση φυσικών δοκιμίων άμμου M31.



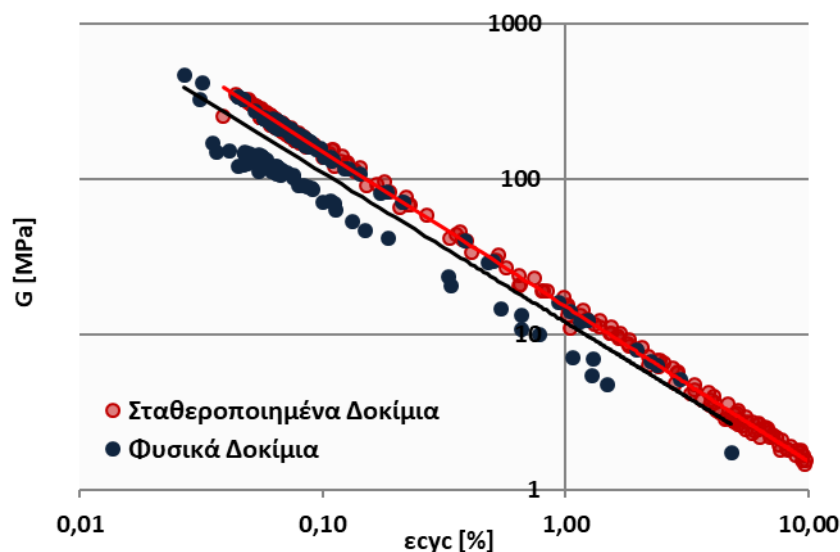
Σχήμα 5.32 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ϵ_{cyc} [%] για κάθε κύκλο φόρτισης των φυσικών δοκιμίων άμμου M31 α) ημιλογαριθμικό και β) λογαριθμικό διάγραμμα.

5.4.7 Σύγκριση φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών άμμου M31

Στα Σχήματα 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δοκιμές σε φυσικά δοκίμια άμμου M31 (μπλε σημεία) και σε σταθεροποιημένα (κόκκινα σημεία). Συγκρίνονται ως προς την απομείωση που υφίσταται το μέτρο διάτμησης G συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} . Φαίνεται να ακολουθούν κοινή καμπύλη, επομένως η σταθεροποίηση δεν επηρεάζει τόσο το μέγεθος της παραμόρφωσης που θα αναπτύξουν τα δοκίμια κατά την ανακυκλική φόρτιση. Η παραμόρφωση και η απομείωση του μέτρου διάτμησης G , όπως παρατηρείται στα Σχήματα 5.5 και 5.31 θα πραγματοποιηθεί σε διαφορετικό αριθμό κύκλων φόρτισης. Αντίστοιχη παρατήρηση είχε γίνει και στα αποτελέσματα των Porcino et al. (2012).



Σχήμα 5.33 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – κύκλων φόρτισης N_c [-] για φυσικά δοκίμια (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένα CS=10% δοκίμια (κόκκινα σημεία) άμμου M31.



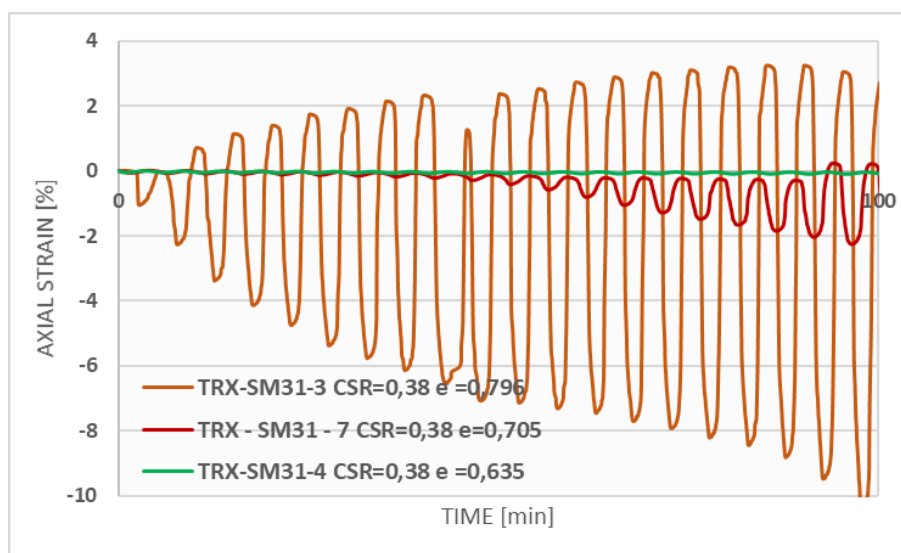
Σχήμα 5.34 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου διάτμησης G [MPa] – αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ε_{cyc} [%] για φυσικά δοκίμια (μπλε σημεία) και σταθεροποιημένα CS=10% δοκίμια (κόκκινα σημεία) άμμου M31.

5.4.8 Επίδραση της πυκνότητας στη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών

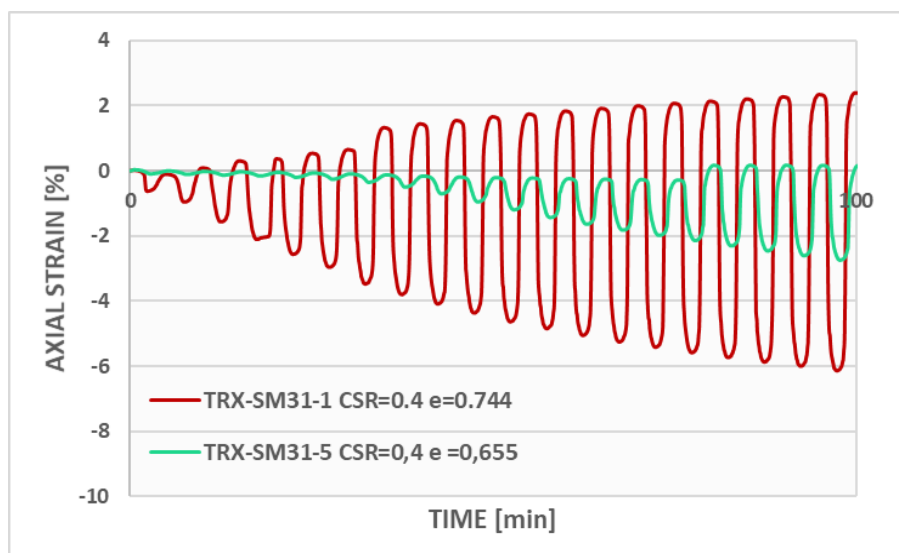
Κατά την ανακυκλική φόρτιση σε δοκίμια άμμου M31, στα φυσικά δοκίμια μετά από κάποιους κύκλους φόρτισης μηδενίζεται η ενεργός τάση τους και ταυτόχρονα αναπτύσσονται ακαριαία μεγάλη αξονική παραμόρφωση και υπερπίεση του νερού των πόρων με αποτελέσματα να ρευστοποιούνται στους επόμενους κύκλους. Από την άλλη πλευρά, στα σταθεροποιημένα δοκίμια υπήρχε μια σταδιακή ανάπτυξη παραμορφώσεων από τους αρχικούς κύκλους φόρτισης.

Τα Σχήματα 5.35 και 5.36 που ακολουθούν αφορούν σταθεροποιημένα δοκίμια. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.35 συγκρίνονται οι δοκιμές TRX-SM31-3 ($e=0,796$), TRX-SM31-7 ($e=0,705$) και TRX-SM31-4 ($e=0,635$) στις οποίες τα δοκίμια φορτίστηκαν με λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$. Ενώ, στο Σχήμα 5.36 συγκρίνονται οι δοκιμές TRX-SM31-1 ($e=0,744$) και TRX-SM31-5 ($e=0,655$), οι οποίες φορτίστηκαν με λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,40$. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης της ανακυκλικής δοκιμής, με την αύξηση της πυκνότητας οι αξονικές παραμορφώσεις ε_{zz} που αναπτύσσει το σταθεροποιημένο δοκίμιο μειώνονται.

Συμπεραίνεται, επομένως, ότι η πυκνότητα του δοκιμίου της σταθεροποιημένης άμμου έχει καθοριστική σημασία στη συμπεριφορά του στην ανακυκλική φόρτιση στους πρώτους κύκλους.



Σχήμα 5.35 Διάγραμμα αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου των σταθεροποιημένων $CS=10\%$ δοκιμών TRX-SM31-3 ($e=0,796$), TRX-SM31-7 ($e=0,705$) και TRX-SM31-4 ($e=0,635$) για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,38$ στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 5.36 Διάγραμμα αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου των σταθεροποιημένων CS=10% δοκιμών TRX-SM31-1 (e=0,744) και TRX-SM31-5 (e=0,655) για λόγο ανακυκλικής τάσης CSR=0,4 στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης.

5.5 Αποτελέσματα άλλων ερευνητών

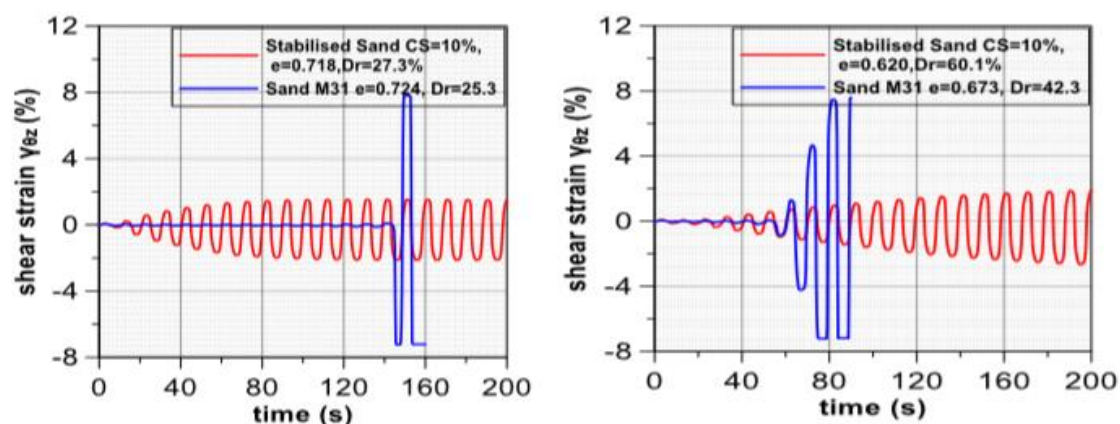
Για να εξακριβωθεί ο ρόλος της κολλοειδούς πυριτίας, CS, στη μηχανική συμπεριφορά της άμμου έχουν διεξαχθεί διάφορες εργαστηριακές μελέτες που επικεντρώνονται σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές προκειμένου να καθοριστεί η αντίσταση του σταθεροποιημένου με κολλοειδή πυριτία εδάφους στη ρευστοποίηση.

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

5.5.1 Παυλοπούλου και Τσίβου (2015)

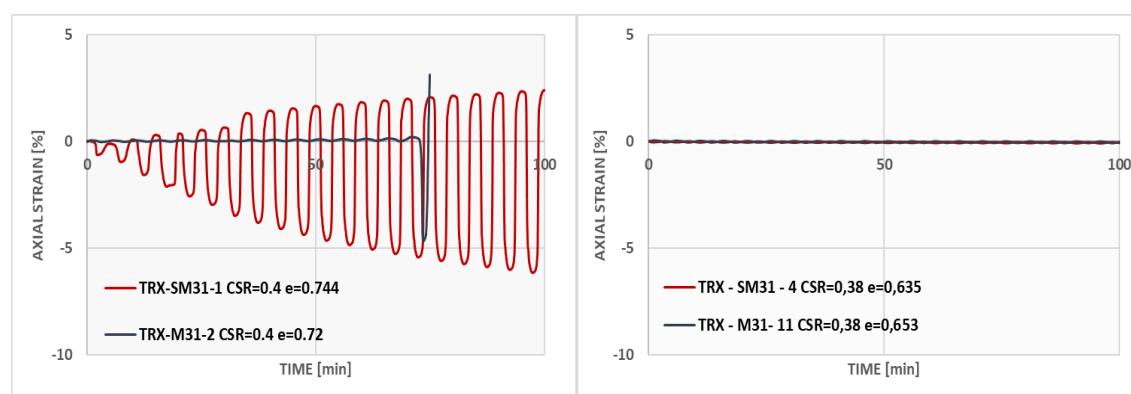
Οι Παυλοπούλου και Τσίβου (2015) εκτέλεσαν ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλων κυλινδρικών δοκιμών υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο M31. Παρατήρησαν ότι η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων δοκιμών δεν ήταν κοινή σε όλα τα πειράματα. Στα χαλαρότερα δοκίμια η σταθεροποιημένη άμμος ανέπτυξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις στους πρώτους κιάλας κύκλους φόρτισης από αυτές που αναπτύσσει η φυσική άμμος αντίστοιχης πυκνότητας. Αντίθετα, στα πυκνότερα δοκίμια η σταθεροποιημένη άμμος ανέπτυξε στους πρώτους κύκλους φόρτισης παραμορφώσεις ίδιας τάξης με

αυτές που αναπτύσσει η φυσική άμμος αντίστοιχης πυκνότητας. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.37 που ακολουθεί.



Σχήμα 5.37 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά. [πηγή: Παυλοπούλου & Τσίβου, 2015]

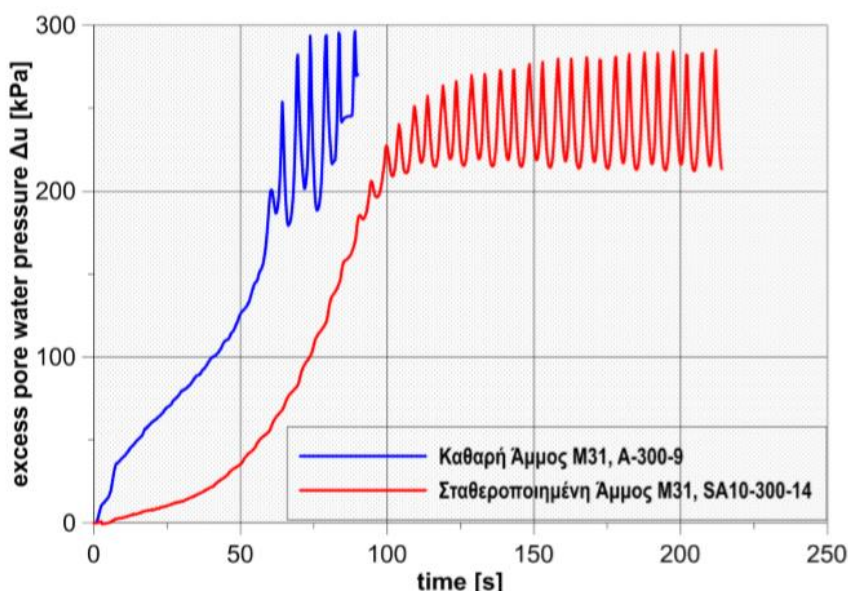
Παρόμοια συμπεριφορά με αυτή παρατηρείται στις ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο Σχήμα 5.38 συγκρίνονται για τους 20 πρώτους κύκλους οι δοκιμές TRX-SM31-1 ($e=0,744$) και TRX-M31-2 ($e=0,720$) και φαίνεται ότι από τους πρώτους κύκλους το σταθεροποιημένο δοκίμιο παραμορφώνεται ενώ το φυσικό έχει σχεδόν μηδενική παραμόρφωση. Επιπλέον, στους 15 κύκλους όπου το φυσικό δοκίμιο αναπτύσσει ακαριαία αξονική παραμόρφωση $\epsilon_{zz}=5\%$, το σταθεροποιημένο δοκίμιο έχει ήδη αναπτύξει σταδιακά ανάλογη αξονική παραμόρφωση. Στο ίδιο σχήμα συγκριτικά παρατίθενται και οι δοκιμές TRX-SM31-4 ($e=0,635$) και TRX-M31-11 ($e=0,653$) οι οποίες έχουν σχεδόν μικρές παραμορφώσεις, της τάξης του $\epsilon_{zz}=0,2\%$ για τους πρώτους 48 κύκλους.



Σχήμα 5.38 Σύγκριση των αναπτυσσόμενων αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου για φυσική και σταθεροποιημένη CS=10% άμμο στους πρώτους 20 κύκλους φόρτισης. Χαλαρότερα δοκίμια αριστερά και πυκνότερα δοκίμια δεξιά.

Ένα ακόμα στοιχείο που παρατήρησαν οι Παυλοπούλου και Τσίβου (2015) στις δοκιμές που διεξήγαγαν είναι ότι η ανάπτυξη της πίεσης πόρων στα σταθεροποιημένα δοκίμια γινόταν με υστέρηση, γεγονός που ερχόταν σε αντίθεση με την ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων που είχαν ήδη αναπτυχθεί. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.39, όπου φαίνεται η ανάπτυξη υπερ-πίεσης πόρων Δu συναρτήσει του χρόνου t , ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31 σχετικής πυκνότητας $D_r=42,3\%$ (μπλε καμπύλη) συγκρινόμενο με ένα σταθεροποιημένο δοκίμιο $CS=10\%$ άμμου M31, ηλικίας ωρίμανσης 115 ωρών, σχετικής πυκνότητας $D_r=38,0\%$ (κόκκινη καμπύλη) για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,25$.

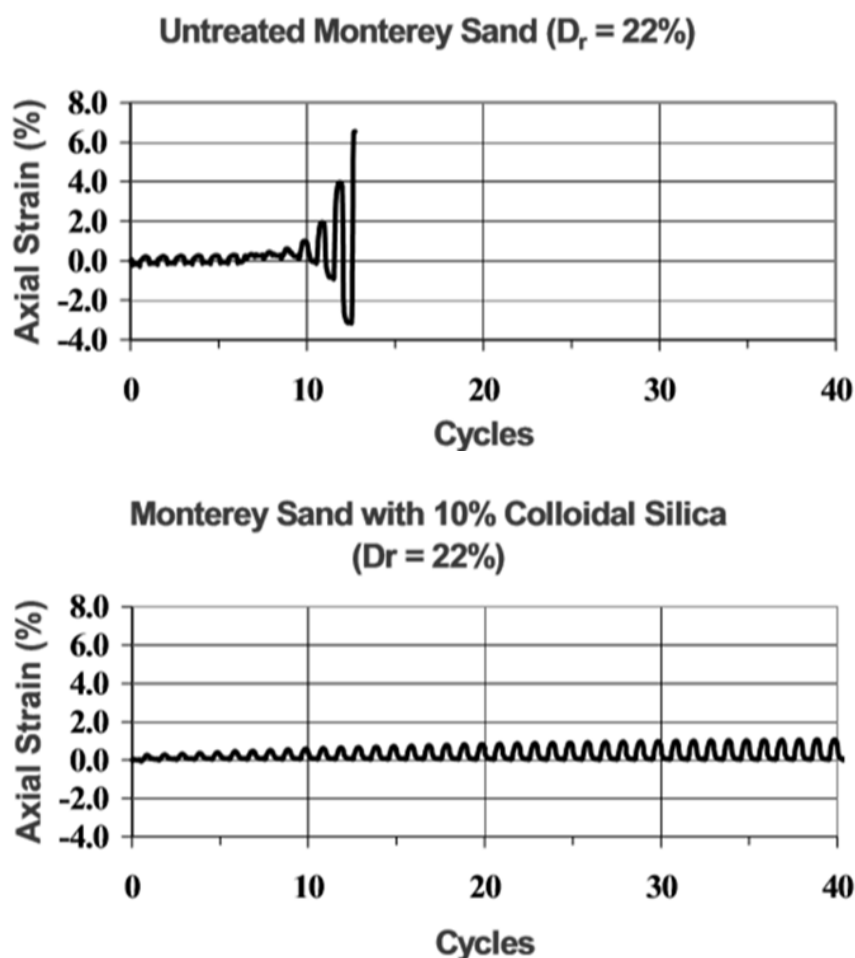
Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν για την παρούσα διπλωματική στην τριαξονική συσκευή δεν παρουσίασαν δυσκολία στην καταγραφή της πίεσης πόρων που αναπτύσσει το σταθεροποιημένο δοκίμιο (Σχήμα 5.17) και είναι σε αντιστοιχία με την ανάπτυξη των αξονικών παραμορφώσεων (Σχήμα 5.18). Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη μεγαλύτερη περίοδο της ανακυκλικής φόρτισης, $T=5\text{min}$ έναντι $T=10\text{s}$ ώστε ο μετρητής της συσκευής να προλαβαίνει να καταγράψει τις πιέσεις που αναπτύσσει το δοκίμιο καθώς φορτίζεται. Το στάδιο της στερεοποίησης των σταθεροποιημένων δοκιμίων ήταν αρκετά μεγαλύτερο, 24 ώρες έναντι 90 λεπτών. Δύο ακόμα λόγοι που συμβάλλουν στην ακριβέστερη καταγραφή της πίεσης πόρων είναι ότι η μέτρησή της γίνεται σε δύο θέσεις του δοκιμίου, στη βάση και στην κεφαλή του, και το δοκίμιο που τοποθετείται στην τριαξονική συσκευή είναι λιγότερο υψίκορμο συγκριτικά με αυτό των Παυλοπούλου & Τσίβου, 2015, ύψος $H=76\text{mm}$ έναντι $H=140\text{mm}$.



Σχήμα 5.39 Διάγραμμα πίεσης πόρων Δu συναρτήσει του χρόνου t ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31 ($D_r=42,3\%$) και ενός σταθεροποιημένου ($D_r=38,0\%$) για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,25$. [πηγή: Παυλοπούλου & Τσίβου, 2015]

5.5.2 Gallagher και Mitchell (2002)

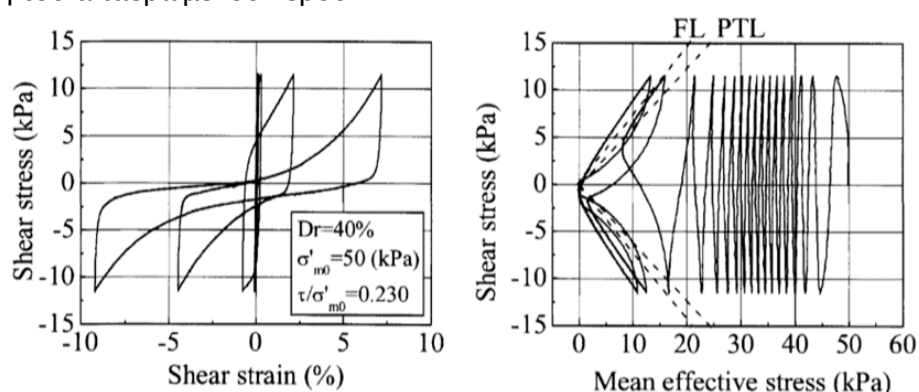
Οι Gallagher and Mitchell (2002) διεξήγαγαν αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου Monterey No.0/30 με και χωρίς προσθήκη κολλοειδούς πυριτίας. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφάνιση της ξηρής άμμου στο υγρόλυμα πυριτίας από συγκεκριμένο ύψος για να εξασφαλισθεί ο κορεσμός σε πυριτία του δοκιμίου. Τα δοκίμια έχουν σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ και εύρος ποσοστού σταθεροποιητή 5-20% κατά βάρος. Η σταθεροποίηση με Ludox[®]-SM οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση συγκριτικά με τα δοκίμια άμμου χωρίς CS. Στο Σχήμα 5.40 απεικονίζονται οι αξονικές παραμορφώσεις για καθαρή και σταθεροποιημένη άμμο για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,27$ ($CSR= \Delta\tau_{\theta z} / p'_i$). Η άμμος ανέπτυξε αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους (double amplitude) $DA=5\%$ σε 12 κύκλους φόρτισης και στους 13 κύκλους κατέρρευσε. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος με ποσοστό σταθεροποιητή, $CS=10\%$ ανέπτυξε πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις που συσσωρεύονταν κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης, φτάνοντας την τιμή $DA=5\%$ μετά από 276 κύκλους, ενώ δεν κατέρρευσε ούτε ρευστοποιήθηκε.



Σχήμα 5.40 Σύγκριση αξονικών παραμορφώσεων συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό λόγο ανακυκλικής φόρτισης $CSR=0,27$
α) άμμος, β) σταθεροποιημένη άμμος. [πηγή: Gallagher and Mitchell, 2002]

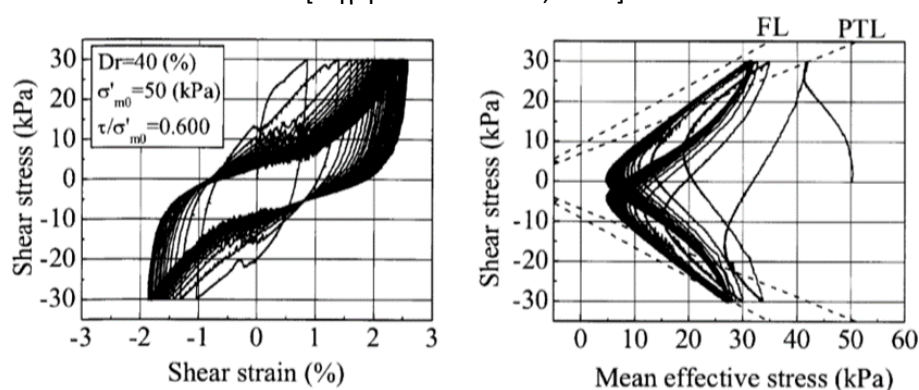
5.5.3 Kodaka et al. (2005)

Οι Kodaka et al. (2005) εκτέλεσαν ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές στρεπτικής διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδή πυριτία άμμο Toyoura με μέτρηση της πίεσης πόρων για να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου. Οι ανακυκλικές δοκιμές εκτελέστηκαν σε συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου. Τα δοκίμια σταθεροποιήθηκαν με ποσοστό κολλοειδούς πυριτίας $CS=4\%$ κατά βάρος και αφέθηκαν να ωριμάσουν και να στερεοποιηθούν για 4 βδομάδες. Ο κορεσμός του δοκιμίου έγινε εισπιέζοντας αέριο CO_2 και απαερωμένο νερό από τη βάση του καλουπιού. Η πυριτία διοχετεύεται σταδιακά μέσα στην κορεσμένη άμμο από τη βάση του δοκιμίου καταλαμβάνοντας τη θέση του απαερωμένου νερού.



Σχήμα 5.41 α) Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, β) Διάγραμμα διαδρομών τάσεων για ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για άμμο Toyoura.

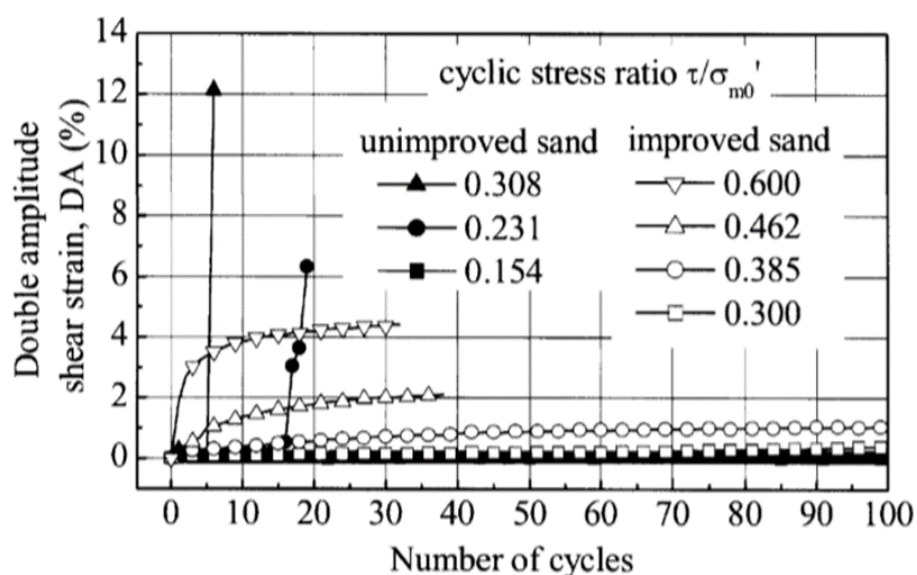
[πηγή: Kodaka et al., 2005]



Σχήμα 5.42 α) Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, β) Διάγραμμα διαδρομών τάσεων για ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $CS=4\%$. [πηγή: Kodaka et al., 2005]

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανακυκλικής αστράγγιστης στρεπτικής διάτμησης σταθεροποιημένης και μη άμμου για λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0,23$ παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.41, 5.42 και 5.43. Γίνεται φανερό ότι το δοκίμιο της καθαρής άμμου ρευστοποιείται και καταρρέει από τους πρώτους κύκλους φόρτισης ενώ το δοκίμιο της σταθεροποιημένης άμμου παρουσιάζει πολύ αυξημένη αντοχή σε στρεπτική διάτμηση και δεν καταρρέει. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα

σταθεροποιημένα εδάφη αναπτύσσουν μεγάλες παραμορφώσεις από το αρχικό στάδιο φόρτισης, οι οποίες όμως δεν αυξάνουν σημαντικά με τους κύκλους, ούτε οδηγούν σε κατάρρευση ή ρευστοποίηση του δοκιμίου.



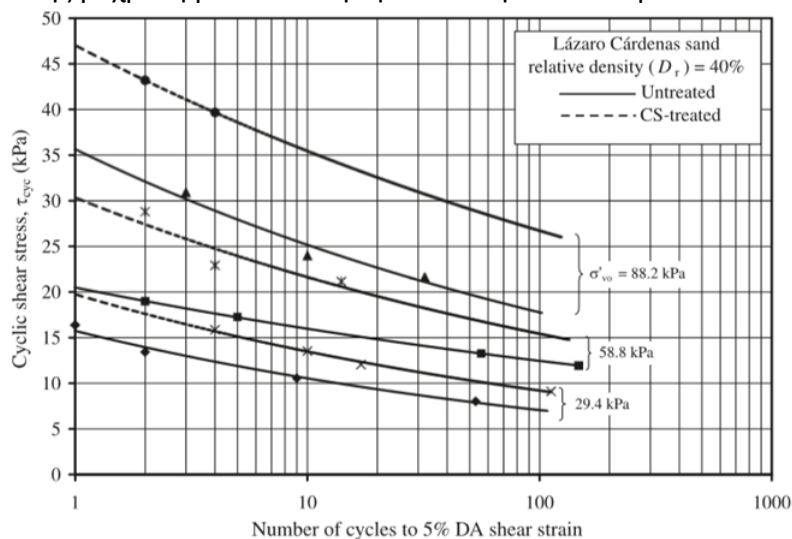
Σχήμα 5.43 Διάγραμμα ανάπτυξης διατμητικής παραμόρφωσης σταθεροποιημένης CS=4% και μη άμμου Toyoura για διάφορους λόγους ανακυκλικής φόρτισης CSR.

[πηγή: Kodaka et al., 2005]

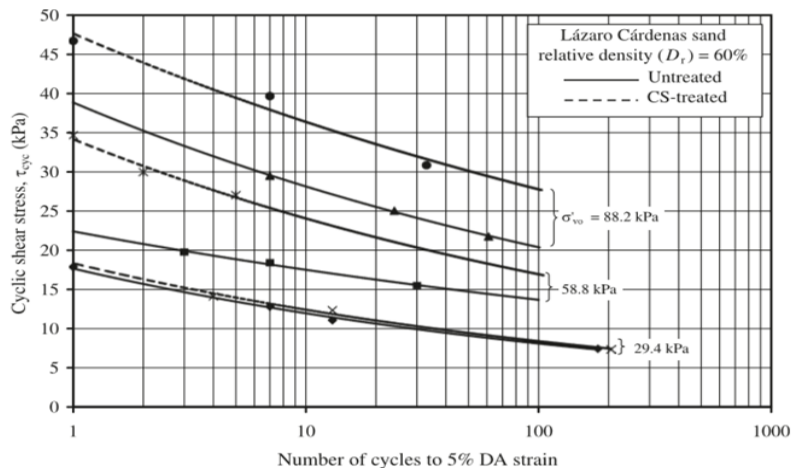
5.5.4 Diaz-Rodriguez et al. (2008)

Οι Diaz-Rodriguez et al. (2008) διεξήγαγαν μία σειρά από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης υπό σταθερό όγκο για να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα της ανάπτυξης της πίεσης των πόρων κατά την αστράγγιστη φόρτιση σύμφωνα με τους Finn and Vaid, (1977). Στην εργαστηριακή μελέτη των Diaz-Rodriguez et al. χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια άμμου Lazaro Carenas και σταθεροποιημένης άμμου με ποσοστό σταθεροποιητή, CS=14,5% κατά βάρος, της οποίας ο τύπος δεν διευκρινίζεται στη δημοσίευση. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι κακής διαβάθμισης, με 11,5% ποσοστό λεπτόκοκκων με $e_{max}=1,17$, $e_{min}=0,77$ και $D_{50}=0,17$ mm. Τα δοκίμια άμμου και σταθεροποιημένης άμμου είχαν αρχική ενεργό τάση $\sigma'_{vo}=29,4$ kPa, $\sigma'_{vo}=58,8$ kPa και $\sigma'_{vo}=88,2$ kPa. Επιπλέον, για να μελετηθεί η επίδραση της πυκνότητας των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σχετικής πυκνότητας $D_r=40\%$ και $D_r=60\%$. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προκύπτει σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους. Παρατηρείται ότι, η κολλοειδής πυριτία έχει μεγαλύτερη επίδραση στις άμμους με μικρή σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$ (Σχήμα 5.44) σε σχέση με αυτές με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$ (Σχήμα 5.45). Συγκεκριμένα, η αύξηση της διατμητικής τάσης της σταθεροποιημένης άμμου έναντι αυτής της φυσικής άμμου στους 10 κύκλους φόρτισης είναι 30%, 35% και 41% για τις διάφορες αρχικές ενεργές τάσεις στα δοκίμια με $D_r=40\%$ ενώ σε αυτά με $D_r=60\%$ η αντίστοιχη αύξηση είναι 4%, 37% και 29%. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η αρχική ενεργός τάση αυξάνεται η

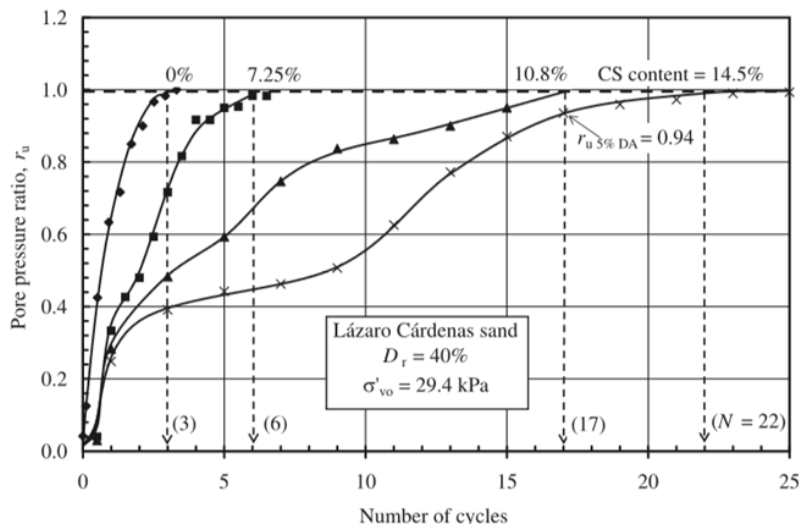
βελτίωση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου έναντι του φυσικού εδάφους, αλλά η βελτίωση στις χαμηλές τάσεις ($\sigma'_{v0}=50 < kPa$) είναι πολύ μικρή (4% για τα δοκίμια με $D_r=60\%$ και $\sigma'_{v0}=29,4 \text{ kPa}$). Στο Σχήμα 5.45 απεικονίζεται η μείωση του ρυθμού ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων στο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία έδαφος για τα δοκίμια με $D_r=40\%$ και $\sigma'_{v0}=29,4 \text{ kPa}$ σε διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή CS. Παρατηρείται ότι χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στο σταθεροποιημένο έδαφος έναντι του φυσικού για να γίνει ο λόγος υπερπιέσεων πόρων $Ru=u/\sigma'_{v0}$ ίσος με 1 και ότι η αύξηση του ποσοστού σταθεροποιητή οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντίστασης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης. Στο Σχήμα 5.46 απεικονίζεται η μείωση του ρυθμού ανάπτυξης διατμητικών παραμορφώσεων διπλού πλάτους ϵ_{AD} στο σταθεροποιημένο με κολλοειδή πυριτία έδαφος για τα δοκίμια με $D_r=40\%$ και $\sigma'_{v0}=29,4 \text{ kPa}$ σε διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή CS. Παρατηρείται ότι χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στο σταθεροποιημένο έδαφος έναντι του φυσικού για να αναπτυχθεί $\epsilon_{AD}=5\%$ που έχει οριστεί ως κριτήριο ρευστοποίησης και ότι η αύξηση του ποσοστού σταθεροποιητή οδηγεί σε αύξηση των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση του εδαφικού δοκιμίου.



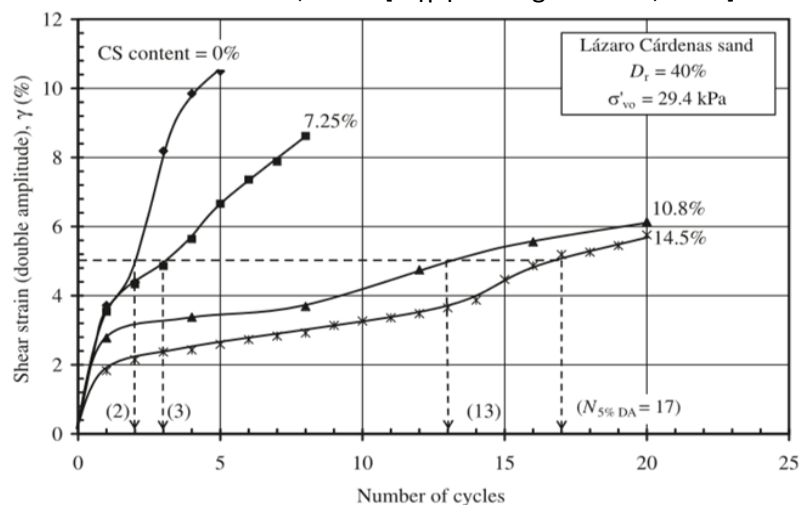
Σχήμα 5.44 Σύγκριση ανακυκλικής διατμητικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=40\%$. [πηγή: Rodriguez et al., 2008]



Σχήμα 5.45 Σύγκριση ανακυκλικής διατμητικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους 5% σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο, $D_r=60\%$. [πηγή: Rodriguez et al., 2008]



Σχήμα 5.46 Σύγκριση ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή, $D_r=40\%$ και $\sigma'_{vo}=29,4$ kPa. [πηγή: Rodriguez et al., 2008]



Σχήμα 5.47 Σύγκριση ανάπτυξης διατμητικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης σε σταθεροποιημένη και φυσική άμμο για διάφορα ποσοστά σταθεροποιητή, $D_r=40\%$ και $\sigma'_{vo}=29,4$ kPa. [πηγή: Rodriguez et al., 2008]

5.5.5 Porcino et al. (2011)

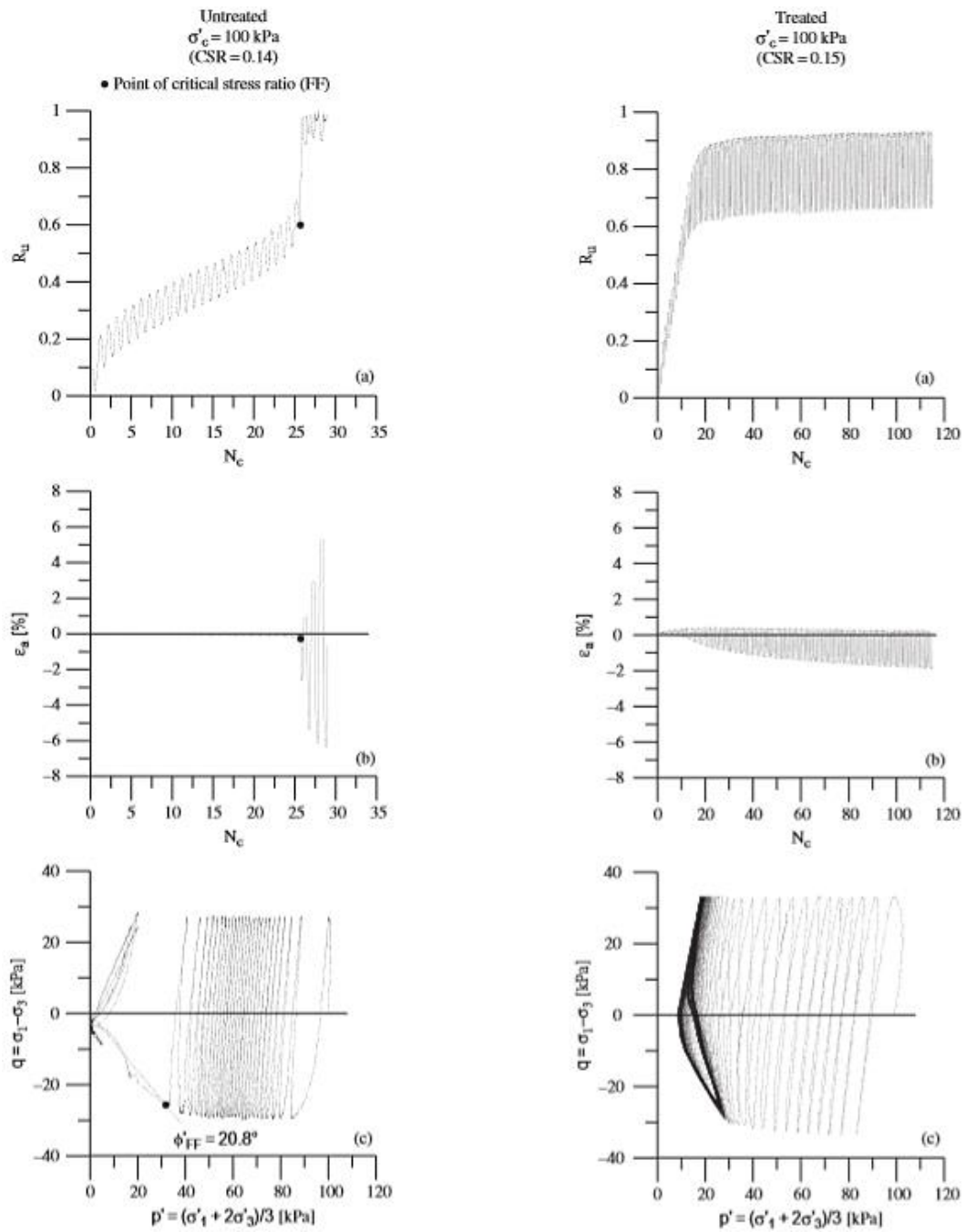
Στην έρευνα των Porcino et al. (2011) εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, αστράγγιστες μονοτονικές δοκιμές απλής διάτμησης και αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης και αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άμμου Ticino silica και σε σταθεροποιημένα με sodium-silicate δοκίμια άμμου. Τα δοκίμια άμμου παρασκευάστηκαν με ξηρή εμβάπτιση εδαφικού υλικού (dry air pluviation). Καθορισμένη ποσότητα ξηρής άμμου διοχετεύεται στο καλούπι από συγκεκριμένο ύψος επιτυγχάνοντας σχετικές αρχικές πυκνότητες $I_r=45$ και 75% . Κατακόρυφη τάση 10 kPa ασκείται στο πάνω μέρος του δοκιμίου για να διατηρηθεί η ευστάθεια. Στη συνέχεια, για την παρασκευή των σταθεροποιημένων δοκιμίων εισπνέεται διοξείδιο του άνθρακα και απαερωμένο νερό για να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας. Το υγρόλυμα πυριτίας 10% συγκέντρωσης κατά βάρος εισπνέεται από το κάτω μέρος του καλουπιού ως το πάνω μέχρι να αντικατασταθεί όλο το νερό που βρίσκεται στους πόρους. Για να εξασφαλισθεί αυτό, εισπνέεται στο δοκίμιο τριπλάσιος όγκος υγρολύματος από τον όγκο των κενών. Το δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει για 24 ώρες ώστε να αναπτυχθούν οι δεσμοί του. Αφού τοποθετηθεί το δοκίμιο στην τριαξονική συσκευή, του επιβάλλεται πίεση κυψέλης 15 kPa . Ο κορεσμός του δοκιμίου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αντιπίεσης (back pressure) 300 kPa για 12 ώρες εξασφαλίζοντας τιμές $B>0,96$. Στη συνέχεια το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα και αφήνεται σε ισορροπία για 3 ώρες πριν τη διάτμηση. Αυτός ο χρόνος θεωρήθηκε από τους ερευνητές αρκετός για την ολοκλήρωση της αστράγγισης και την αποφυγή φαινομένων ερπυσμού.

Στο Σχήμα 5.48 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου δοκιμίου σε αστράγγιστη ανακυκλική φόρτιση στην τριαξονική συσκευή σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του φυσικού δοκιμίου. Τα δύο δοκίμια υποβλήθηκαν σε λόγο ανακυκλικής τάσης, $CSR=0,15$. Παρατηρείται πολύ διαφορετική συμπεριφορά των δοκιμίων και στην ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων και στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Το δοκίμιο άμμου σε 25 κύκλους έφτασε σε ένα σημείο αστοχίας στη φάση του εφελκυσμού. Τελικά, αστοχεί από τη συσσώρευση των ανακυκλικών παραμορφώσεων. Η γωνία της αστοχίας υπολογίζεται σε $\phi_{FF}=17-20,8^\circ$ για όλα τα δοκίμια άμμου. Αντίθετα, τα σταθεροποιημένα δοκίμια μετά από 120 κύκλους αναπτύσσουν αξονική παραμόρφωση διπλού πλάτους $DA<2,5\%$. Το μεγαλύτερο ποσοστό της πίεσης του υγρού των πόρων αναπτύσσεται στο αρχικό στάδιο της φόρτισης και μετά από αυτό ελάχιστη επιπρόσθετη πίεση αναπτύσσεται παρά την αύξηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Στο διάγραμμα της διαδρομής των τάσεων παρατηρείται ένας κλάδος φόρτισης επαναφόρτισης που συμφωνεί με αυτόν της υπερπίεσης πόρων. Το διάγραμμα των αξονικών παραμορφώσεων δεν είναι συμμετρικό καθώς παρατηρείται μεγαλύτερη ανάπτυξη παραμορφώσεων στην

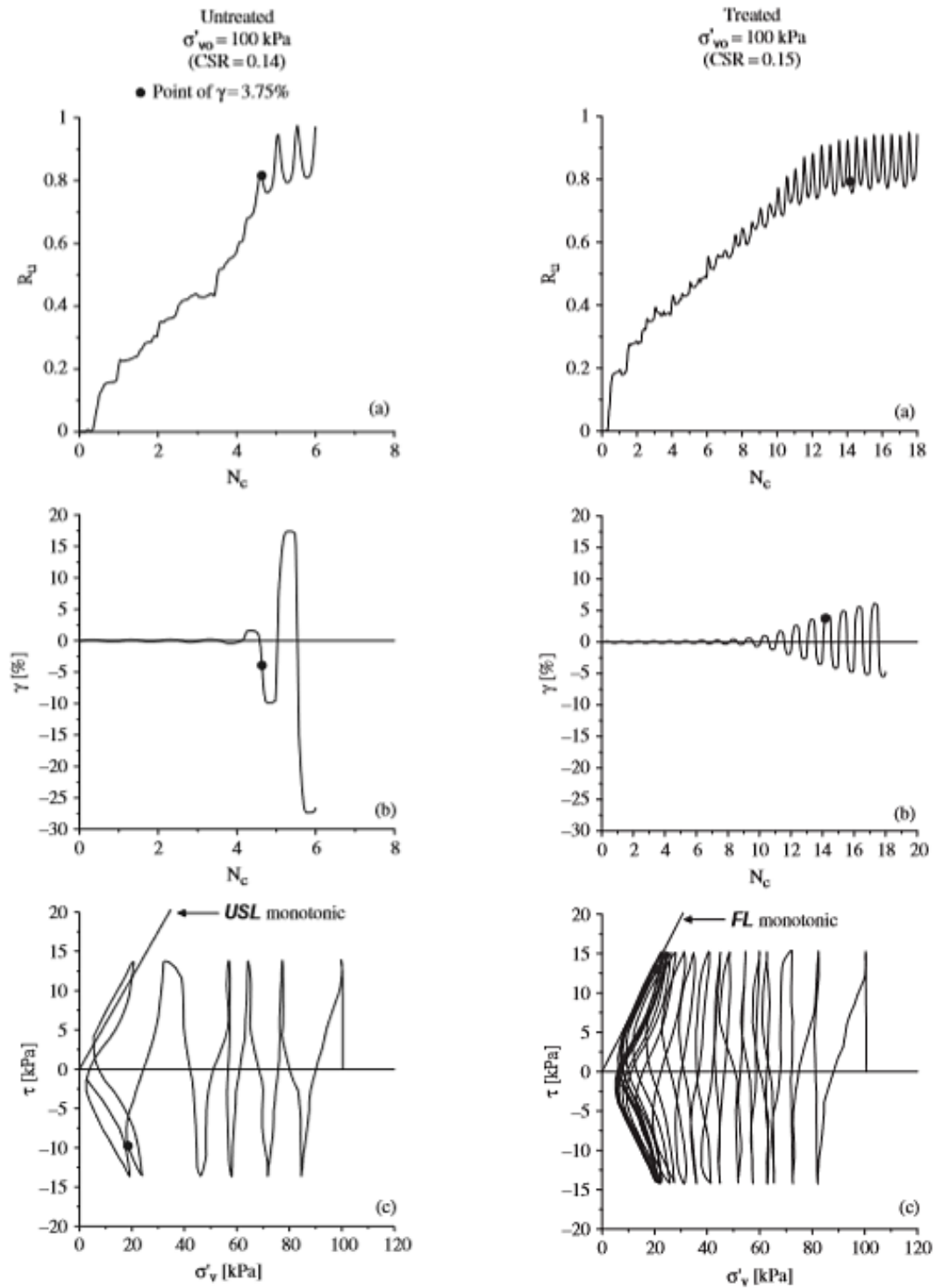
εφελκυστική φάση. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο ακόμη και μετά το πείραμα δεν καταρρέει, όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι ερευνητές.

Στο Σχήμα 5.49 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου δοκιμίου σε αστράγγιστη ανακυκλική φόρτιση στη συσκευή απλής διάτμησης σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του φυσικού δοκιμίου. Τα δύο δοκίμια υποβλήθηκαν σε λόγο ανακυκλικής τάσης, $CSR=0,15$. Υπό συνθήκες απλής διάτμησης αξιοσημείωτες είναι οι διαφορές μεταξύ σταθεροποιημένου και μη δοκιμίου άμμου. Τα ευεργετικά αποτελέσματα της σταθεροποίησης εκφράζονται και σε όρους διατμητικής αντοχής αλλά και ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων. Χρήσιμο είναι να αναφερθεί το συμπέρασμα των ερευνητών ότι ο συντελεστής βελτίωσης έναντι ρευστοποίησης στις ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο των ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών κατά 32%.

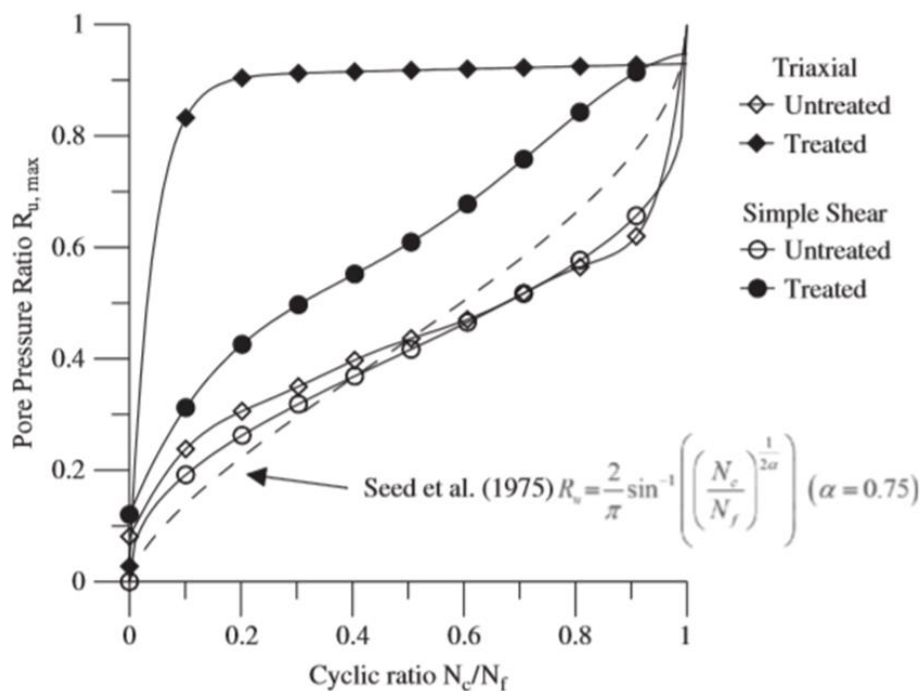
Οι Porcino et al., (2011) αναφέρουν ότι ο λόγος υπερπίεσης του υγρού των πόρων σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης είναι πάντα μεγαλύτερος για τα σταθεροποιημένα δοκίμια και για την τριαξονική φόρτιση και για την απλή διάτμηση (Σχήμα 5.50). Παρατηρείται όμως, ότι η μορφή των καμπυλών για τους δύο τύπους φόρτισης διαφέρει αρκετά για τα σταθεροποιημένα δοκίμια ενώ είναι σχεδόν ταυτόσημη για τα φυσικά δοκίμια. Στην τριαξονική φόρτιση ο λόγος υπερπίεσεων πόρων R_u σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης αυξάνεται απότομα και στη συνέχεια παραμένει σταθερός, ενώ στην απλή διάτμηση η συμπεριφορά της υπερπίεσης του υγρού των πόρων προσομοιάζει αυτή των φυσικών δοκιμών άμμου. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι οι εμπειρικές σχέσεις που προβλέπουν την ανάπτυξη της πίεσης του υγρού των πόρων για άμμους δεν είναι κατάλληλες για τα σταθεροποιημένα εδάφη.



Σχήμα 5.48 Αστράγγιστη τριαξονική ανακυκλική δοκιμή σε φυσικό δοκίμιο άμμου (αριστερά) και σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (δεξιά). [πηγή: Porcino et al., 2011]



Σχήμα 5.49 Αστράγγιστη ανακυκλική δοκιμή απλής διάτμησης σε φυσικό δοκίμιο άμμου (αριστερά) και σε σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (δεξιά). [πηγή: Porcino et al., 2011]



Σχήμα 5.50 Διαγραμματική απεικόνιση του λόγου υπερπιέσεων πόρων σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου Ticino σε τριαξονική φόρτιση και σε απλή διάτμηση. [πηγή: Porcino et al., 2011]

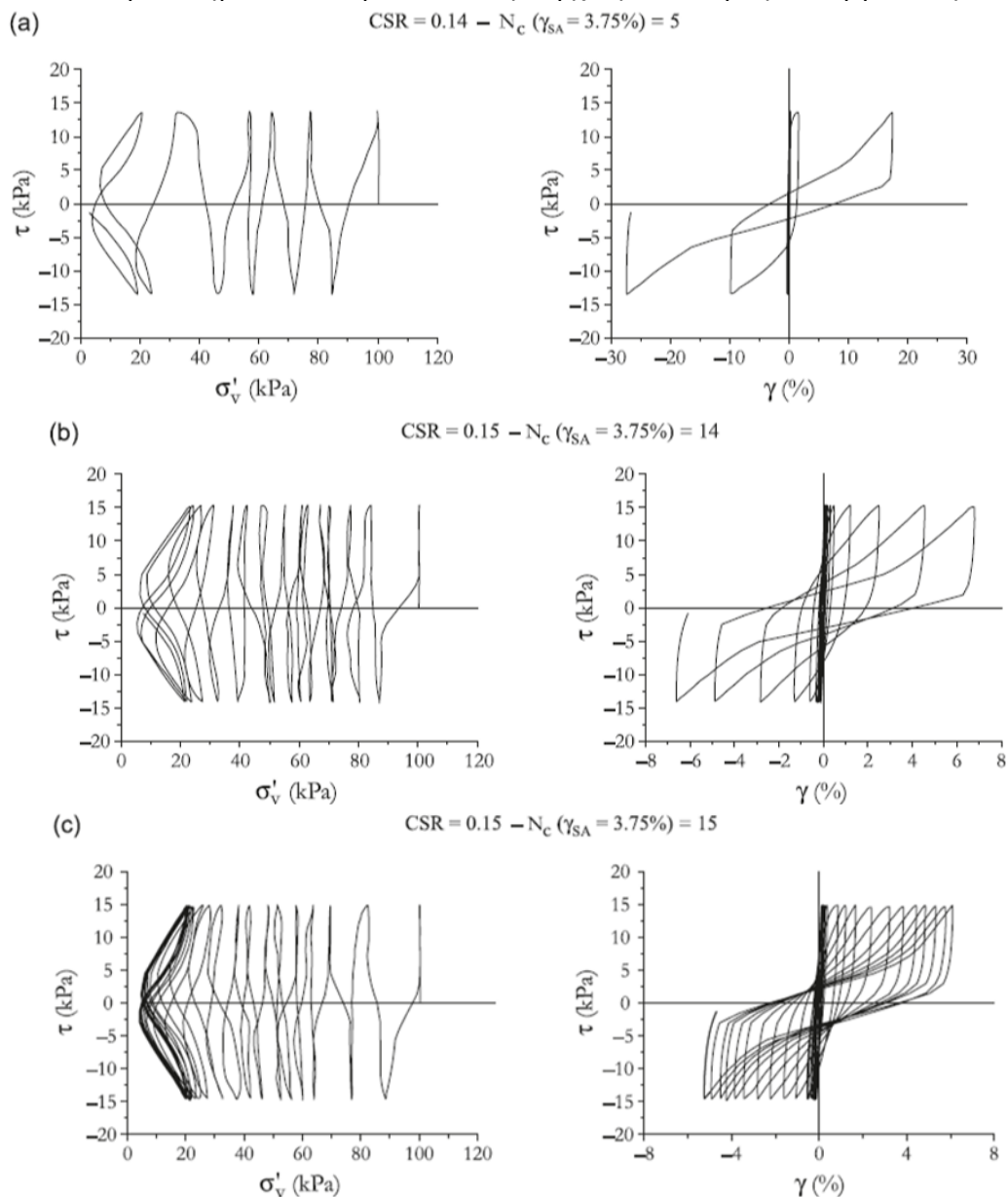
5.5.6 Porcino et al. (2012)

Οι D. Porcino, V. Marciandò, and R. Granata, (2012) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων (sodium-silicate) δοκιμών άμμου Ticino silica (Ιταλία), 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) που έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω.

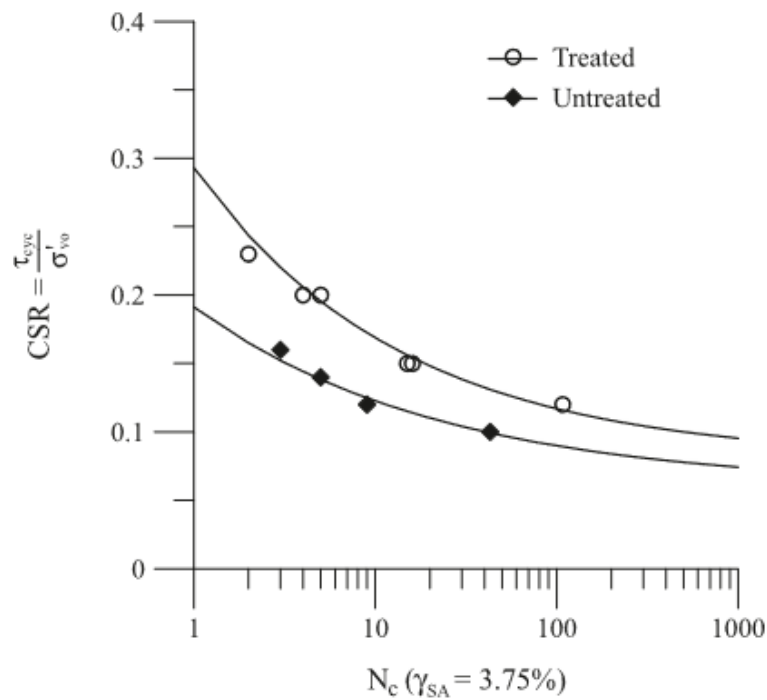
Η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων και φυσικών δοκιμών από τις αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης των Porcino et al. (2012), απεικονίζεται στο Σχήμα 5.51. Το φυσικό δοκίμιο μικρής πυκνότητας παρουσιάζει γρήγορα μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις και ρευστοποιείται μετά από λίγους κύκλους φόρτισης ($N_f=5$). Το σταθεροποιημένο δοκίμιο μικρότερης πυκνότητας, δεν καταρρέει και διατηρεί ένα χαμηλό επίπεδο ανάπτυξης διατμητικών παραμορφώσεων ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου με πυριτία χαλαρού δοκιμίου ($I_r=45\%$) προσομοιάζει τη συμπεριφορά του πυκνού φυσικού δοκιμίου ($I_r=75\%$). Αυτό ίσως οφείλεται στην αυξημένη διαστολή που προκύπτει από το σπάσιμο των δεσμών, όπως υποστηρίζουν οι ερευνητές.

Στο Σχήμα 5.52 παρουσιάζεται ο λόγος ανακυκλικής τάσης ($CSR=\tau_{cyc}/\sigma'_{vo}$) σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης (N_c) που απαιτούνται για να επέλθει η ρευστοποίηση του δοκιμίου ($q_{SA}=3.75\%$) για σταθεροποιημένα χαλαρά και φυσικά χαλαρά δοκίμια άμμου με αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{vo}=100$ kPa από αστράγγιστες

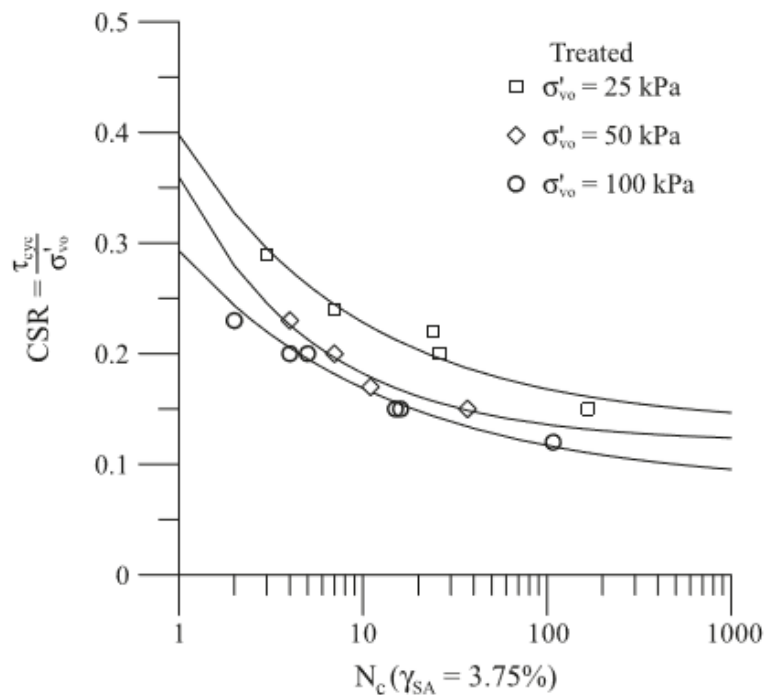
ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρέχουν μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση υπό ανακυκλική φόρτιση από τα φυσικά δοκίμια. Στο Σχήμα 5.53 παρουσιάζονται οι καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης για σταθεροποιημένα δοκίμια με διάφορες αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις στερεοποίησης ($\sigma'_{v0}=25, 50$ και 100 kPa). Παρατηρείται ότι η καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση των δοκιμών με τη μικρή ενεργό τάση ($\sigma'_{v0}=25$ kPa) βρίσκεται υψηλότερα και η καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση των δοκιμών με την υψηλή ενεργό τάση ($\sigma'_{v0}=100$ kPa) βρίσκεται χαμηλότερα υποδεικνύοντας την μεγάλη εξάρτηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμών από την αρχική κατακόρυφο ενεργό τάση.



Σχήμα 5.51 Συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων και διαδρομές ενεργών τάσεων για αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε α) χαλαρό φυσικό, β) χαλαρό σταθεροποιημένο και γ) πυκνό φυσικό δοκίμιο άμμου (Porcino et al., 2012).



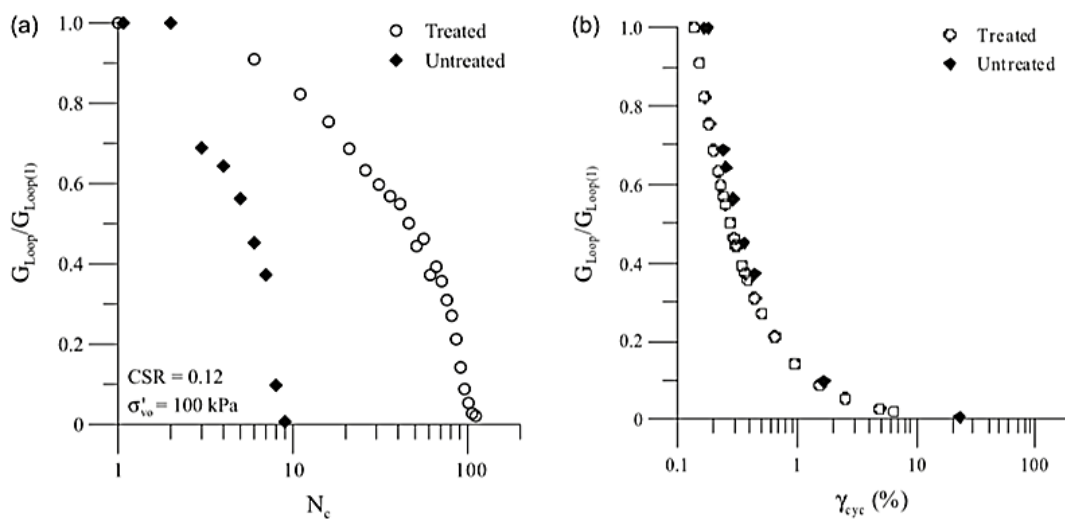
Σχήμα 5.52 Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα και φυσικά δοκίμια άμμου TS [πηγή: Porcino et al., 2012].



Σχήμα 5.53 Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση για σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου TS με διάφορες αρχικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις. [πηγή: Porcino et al., 2012]

Στο Σχήμα 5.54 απεικονίζεται η απομείωση του μέτρου διάτμησης, κανονικοποιημένου ως προς το μέτρο διάτμησης που έχει το δοκίμιο στον πρώτο κύκλο φόρτισης, σταθεροποιημένων και μη δοκιμίων άμμου Ticino silica κατά την ανακυκλική φόρτιση συναρτήσεως των κύκλων φόρτισης (αριστερά) και της διατμητικής παραμόρφωσης (δεξιά). Το μέτρο διάτμησης του φυσικού δοκιμίου

απομειώνεται ταχύτατα όσο αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης σε αντίθεση με τη σταδιακή απομείωση της στιβαρότητας που υφίσταται το σταθεροποιημένο δοκίμιο στους ίδιους κύκλους φόρτισης. Όταν η απομείωση του μέτρου διάτμησης αναπαρίσταται συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, η καμπύλη του σταθεροποιημένου και του φυσικού δοκιμίου είναι κοινή. Συνεπώς, για την ελαφρώς σταθεροποιημένη άμμο της έρευνας, η σταθεροποίηση δεν επιδρά στο μέτρο διάτμησης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης αλλά σχετίζεται με την απομείωση του μέτρου διάτμησης σε μικρότερο αριθμό κύκλων για το φυσικό δοκίμιο έναντι του σταθεροποιημένου.



Σχήμα 5.54 Απομείωση μέτρου διάτμησης σταθεροποιημένων και μη δοκιμίων άμμου Ticino silica κατά την ανακυκλική φόρτιση συναρτήσει α) των κύκλων φόρτισης και β) της διατμητικής παραμόρφωσης. [πηγή: Porcino et al., 2012]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη Διπλωματική Εργασία μελετήθηκε, μέσω μιας σειράς εργαστηριακών δοκιμών, η επίδραση της χημικής βελτίωσης στις μηχανικές ιδιότητες λεπτόκοκκων αμμωδών εδαφικών υλικών, χρησιμοποιώντας υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- ❖ Η σταθεροποίηση άμμου με κολλοειδή πυριτία έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της διαστολικότητάς της με αποτέλεσμα μία σχετικά χαλαρή άμμος να συμπεριφέρεται ως πυκνή άμμος κατά τη φόρτισή της τόσο σε τριαξονική θλίψη όσο και σε απευθείας διάτμηση.
- ❖ Όμως κατά τη μονοαξονική συμπίεση της άμμου στο συμπιεσόμετρο, φαίνεται ότι η σταθεροποίηση προκαλεί στο δοκίμιο μεγαλύτερη ενδοσιμότητα σε σχέση με την καθαρή άμμο. Η γέλη της κολλοειδούς πυριτίας που βρίσκεται στα κενά των πόρων φαίνεται, όταν τραυματίζεται η δομή της κατά τη φόρτιση με αποτέλεσμα την απελευθέρωση του δεσμευμένου νερού, να διευκολύνει την πύκνωση της δομής του εδαφικού σκελετού.
- ❖ Οι δοκιμές συμπιεσομέτρου έγιναν σε τρεις διαφορετικές άμμους. Το σχήμα των κόκκων της άμμου, φαίνεται να μην παίζει ρόλο στην απόκριση των σταθεροποιημένων δοκιμών κατά τη μονοαξονική συμπίεσή τους. Κατά τη στράγγιση του νερού που απελευθερώνει η γέλη μετά τον τραυματισμό της, δοκίμια είτε με στρογγυλεμένους είτε με γωνιώδεις κόκκους δεν εμποδίζονται να αναδιαταχθούν σε πυκνότερη δομή με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγαλύτερη συμπίεση σε σχέση με την καθαρή άμμο.
- ❖ Με αφορμή τις ανωτέρω παρατηρήσεις ελέγχθηκε εάν η επιβολή μεγάλης τιμής αντιπίεσης (back pressure) στο στάδιο του κορεσμού ή της διάτμησης τραυματίζει την δομή της και καταστρέφει τους δεσμούς της κολλοειδούς πυριτίας. Παρατηρήθηκε ότι η απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της επιβαλλόμενης αντιπίεσης κατά τη διάρκεια δοκιμών ελεύθερης στράγγισης
- ❖ Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η επιβολή μεγάλων τιμών αντιπίεσης, για να εξασφαλισθεί ο κορεσμός του δοκιμίου και κυρίως στη συνέχεια για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης (cavitation) στις τριαξονικές δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης.
- ❖ Κατά τη διάρκεια των τριαξονικών δοκιμών, στο στάδιο της ισότροπης στερεοποίησης ο ρυθμός αύξησης της επιβαλλόμενης πλευρικής πίεσης

επιδρά στη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου. Η διαδικασία στράγγισης των σταθεροποιημένων δοκιμίων είναι μια αργή διαδικασία, γι' αυτό και η αύξηση της ενεργού τάσης χρειάζεται να γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς, από αυτούς που εφαρμόζονται στην καθαρή άμμο.

- ❖ Για τον ίδιο λόγο στο τέλος της ισότροπης στερεοποίησης και αφού επιτευχθεί η επιθυμητή τάση στερεοποίησης στο σταθεροποιημένο δοκίμιο, απαιτείται η ωρίμανση για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από αυτό της καθαρής άμμου όπου η διαδικασία στερεοποίησης ολοκληρώνεται σχεδόν ακαριαία.
- ❖ Με την προϋπόθεση ότι η στερεοποίηση πραγματοποιείται με αργό ρυθμό, τα σταθεροποιημένα δοκίμια υφίστανται τις ίδιες ογκομετρικές παραμορφώσεις με τα αντίστοιχης πυκνότητας δοκίμια άμμου M31.
- ❖ Στις ανακυκλικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες υπάρχει ανάπτυξη της πίεσης των 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 του δοκιμίου) είναι καθοριστικοί παράγοντες στην καταγραφή της από τους μετρητές της συσκευής.
- ❖ Όσον αφορά τη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 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 άμμου M31. Σταθεροποιημένα και μη δοκίμια διαφέρουν στον αριθμό κύκλων φόρτισης στον οποίο υφίστανται την εκάστοτε απομείωση του μέτρου διάτμησης τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agapoulaki G.I. and Papadimitriou A.G. (2018), *Rheological Properties of Colloidal Silica Grout for Passive Stabilization Against Liquefaction*. J. Mater. Civ. Eng. 30 (10): 1-11.
- Agapoulaki G.I. and A.G. Papadimitriou (2015), *Rheological Properties of Colloidal Silica as means for designing passive stabilization of liquefiable soils*. In Proc., 16th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2331-2336.
- Bergna H.E. and W.O. Roberts (eds), *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*, CRC, Boca Raton, FL, USA.
- Díaz-Rodríguez J.A., V.M. Antonio-Izarraras, P. Bandini and J.A. López-Molina (2008), *Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout*. Can. Geotech. J. 45 (10): 1345-1355.
- Finn W.D.L. and Y.P. Vaid (1977), *Liquefaction potential from drained constant volume cyclic simple shear tests*. In Proc., 6th World Conf. on Earthquake Eng. Sarita Prakashan, Meerut City, India, 6: 7-12.
- Gallagher P.M. (2000), *Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk*, Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ.
- Gallagher P.M., C.T. Conlee and K.M. Rollins (2007a), *Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk*. J. Geotech. and Geoenviron. Eng. 133 (2): 186-196.
- Gallagher P.M. and J.K. Mitchell (2002), *Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand*. Soil Dyn. Earthquake Eng. 22 (9-12): 1017-1026.
- Gallagher P.M., A. Pamuk and T. Abdoun (2007b), *Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout*. J. Mater. Civ. Eng. 19 (1): 33-40.
- Georgiannou V.N., Pavlopoulou E.M. and Bikos Z. (2017), *Mechanical behavior of sand stabilised with colloidal silica*. Geotech. Res. 4 (1), 1-11.
- Kodaka T., F. Oka, Y. Ohno, T. Takyu and N. Yamasaki (2005), *Modeling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand*. In Proc., 1st Japan-US Workshop on Testing, Modelling and Simulation (GSP 143): 205-216.
- Kolbuszewski J.J. (1948), *An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand*. In Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam: 158-165.
- Liao H.J., C.C. Huang and B.S. Chao (2003), *Liquefaction Resistance of a Colloid Silica Grouted Sand*. In Proc., 3rd Int. Conf. on Grouting and Ground Treatment (GSP 120), 1305-1313.

Βιβλιογραφία

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

Moradi G. and S. Seyedi (2015), *Effect of Sampling Method on Strength of Stabilized Silty Sands with Colloidal Nano Silica*. J. Civ. Eng. Res. 5 (6): 129-135.

Persoff P., J. Apps, G. Moridis and J. M. Whang (1999), *Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 125 (6): 461–469.

Porcino D., V. Marcianò and R. Granata (2012), *Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand*. Can. Geotech. J. 49 (10): 1117– 1133.

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

Towhata I. (2008), *Geotechnical Earthquake Engineering*. Geomechanics and geoengineering, edited by W. Wu and R. I. Borja, 697. Berlin: Springer.

Towhata I. and Y. Kabashima (2001), *Mitigation of seismically – induced deformation of loose sandy foundation by uniform permeation grouting*. In Proc., 15th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical. Eng., Earthquake Geotech. Eng. Satellite Conf., Istanbul, Turkey: 313–318.

Tsomokos A. and V.N. Georgiannou (2010), *Effect of granular materials under high stresses*, Can. Geotech. J. 47: 539-551.

Vranna A.D. and T. Tika (2015), *The mechanical behavior of a clean sand stabilized with colloidal silica*. In Proc., 16th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Καββαδάς Μ., *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2009.

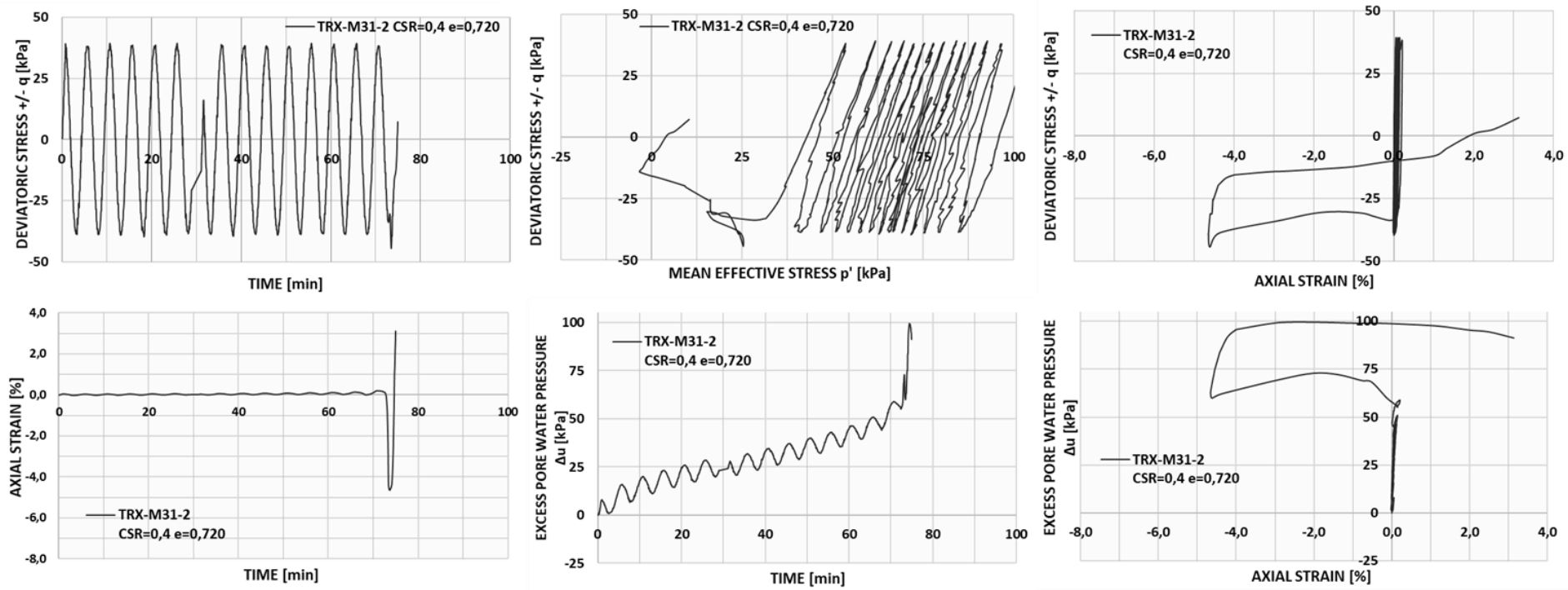
Μπίκος Ζ., *Επίδραση της κolloειδούς πυριτίας στη συμπεριφορά κορεσμένων λεπτόκοκκων άμμων*, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, 2017.

Παυλοπούλου Ε.Μ. και Ε. Τσίβου, *Μονοτονικές και ανακυκλικές δοκιμές σε σταθεροποιημένα με κolloειδή πυριτία μη συνεκτικά εδάφη*, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, 2015.

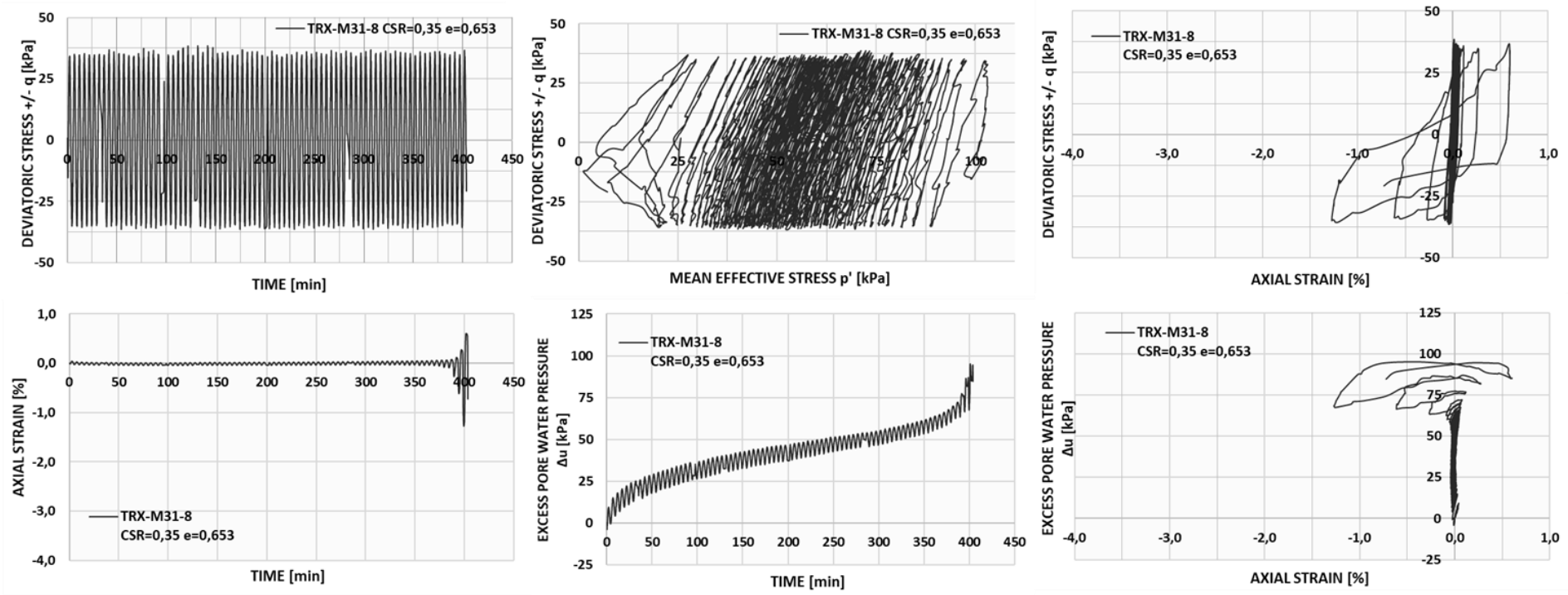
Παπαχαρίσης Ν., Ι. Γραμματικόπουλος και Ν. Ανδρεάδου-Μάνου, *Γεωτεχνική Μηχανική*, εκδόσεις Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη 2015.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-1

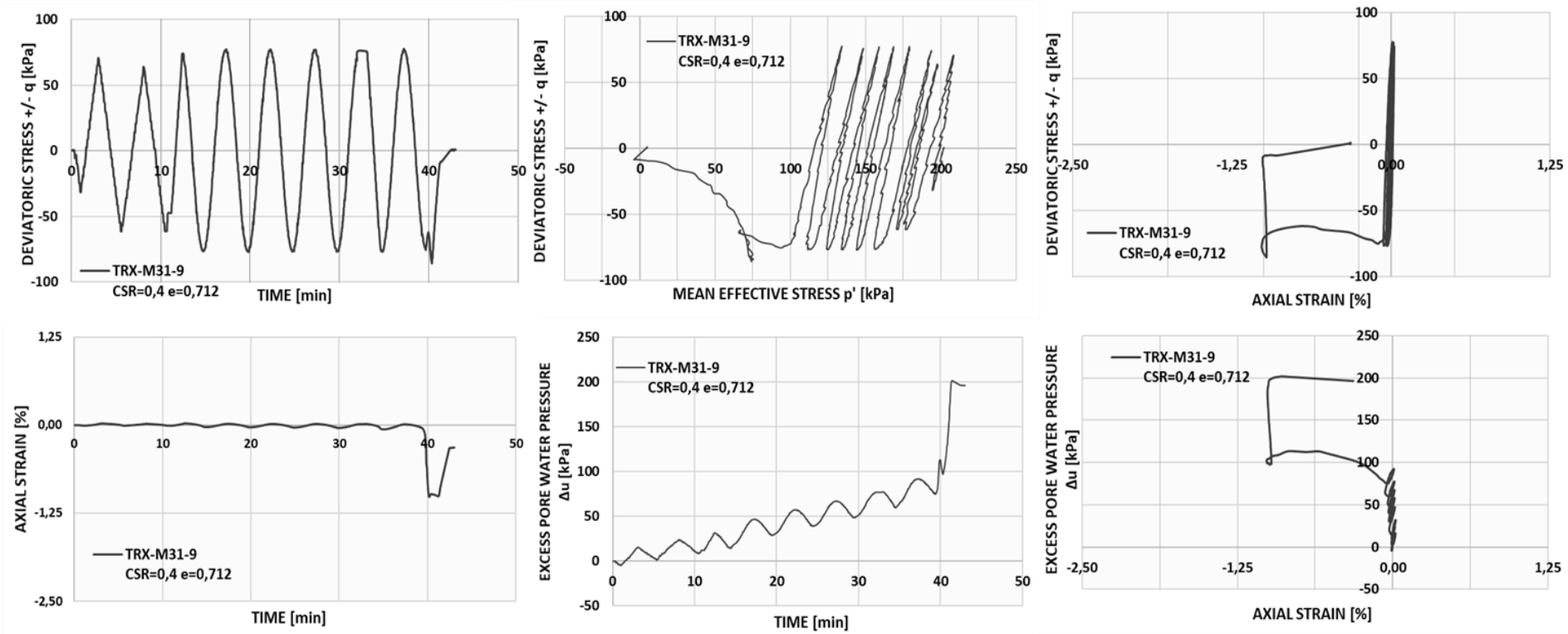
**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΣΤΗΝ ΑΜΜΟ Μ31**



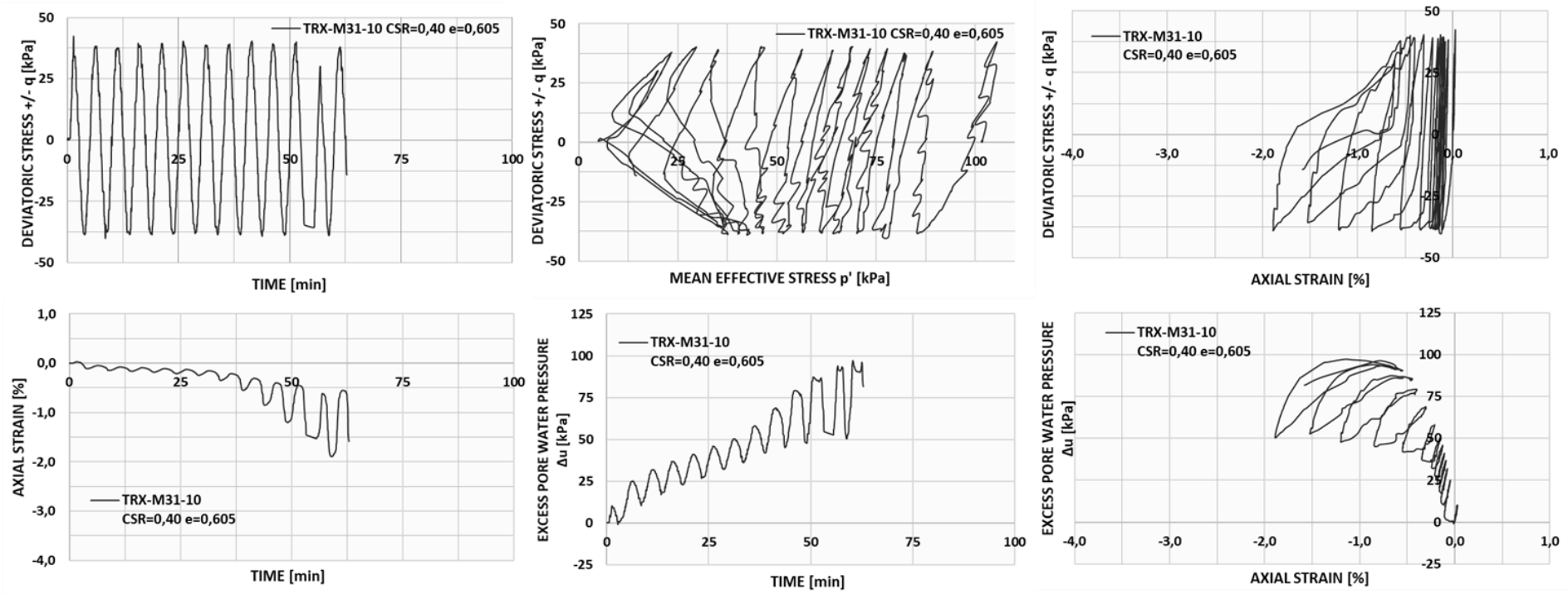
Σχήμα Π-1. 1 Δοκιμή TRX-M31-2



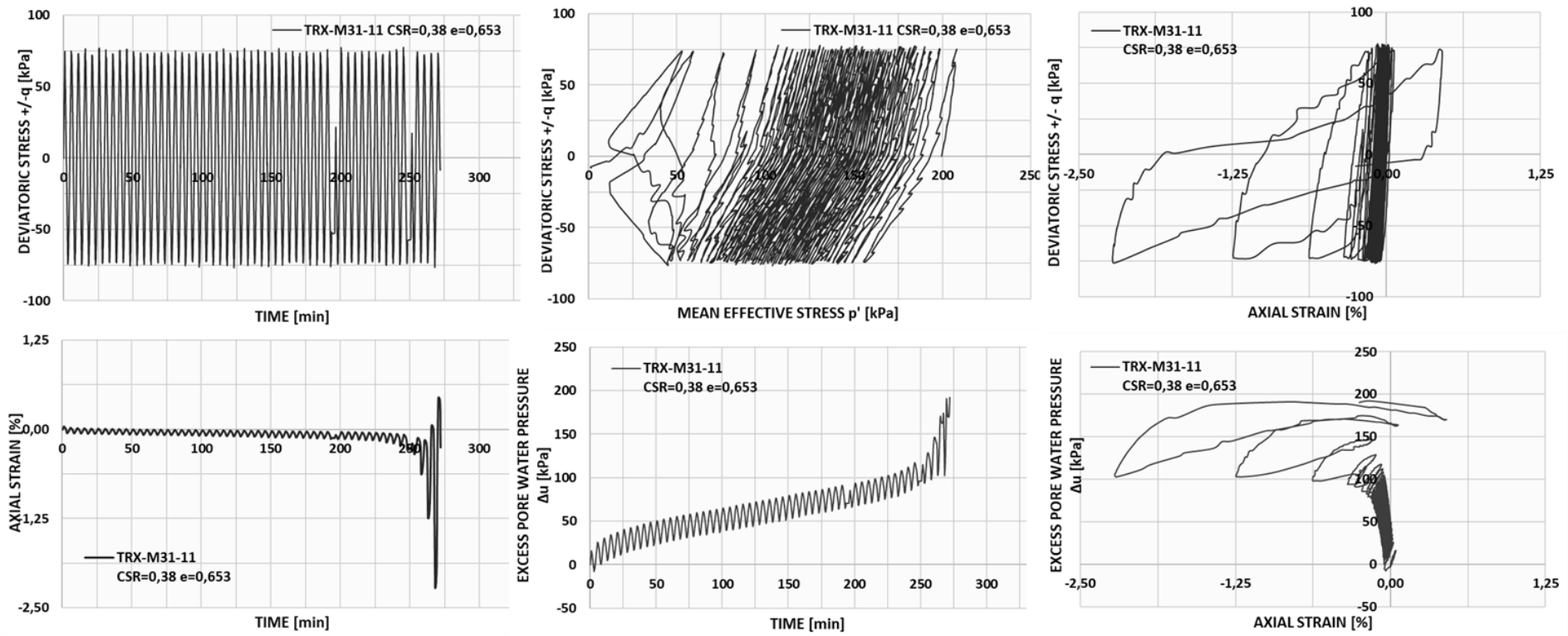
Σχήμα Π-1. 2 Δοκιμή TRX-M31-8



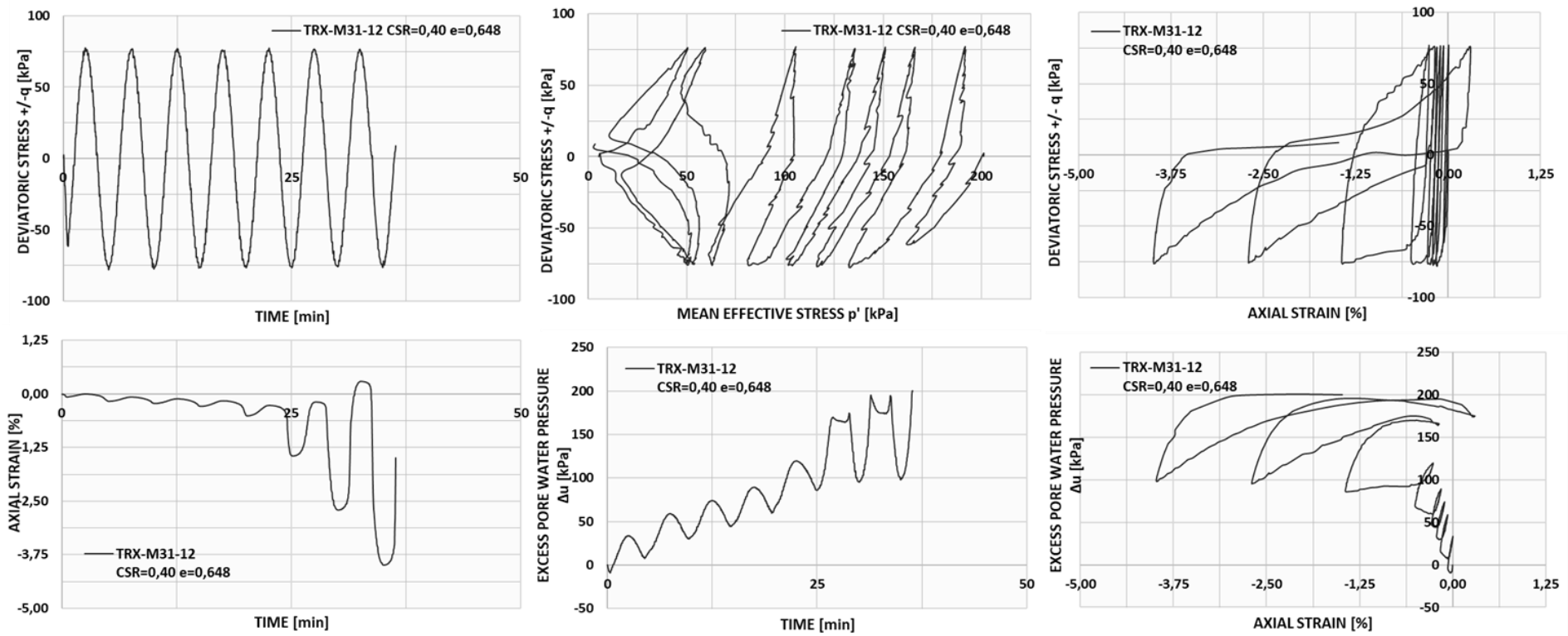
Σχήμα Π-1. 3 Δοκιμή TRX-M31-9



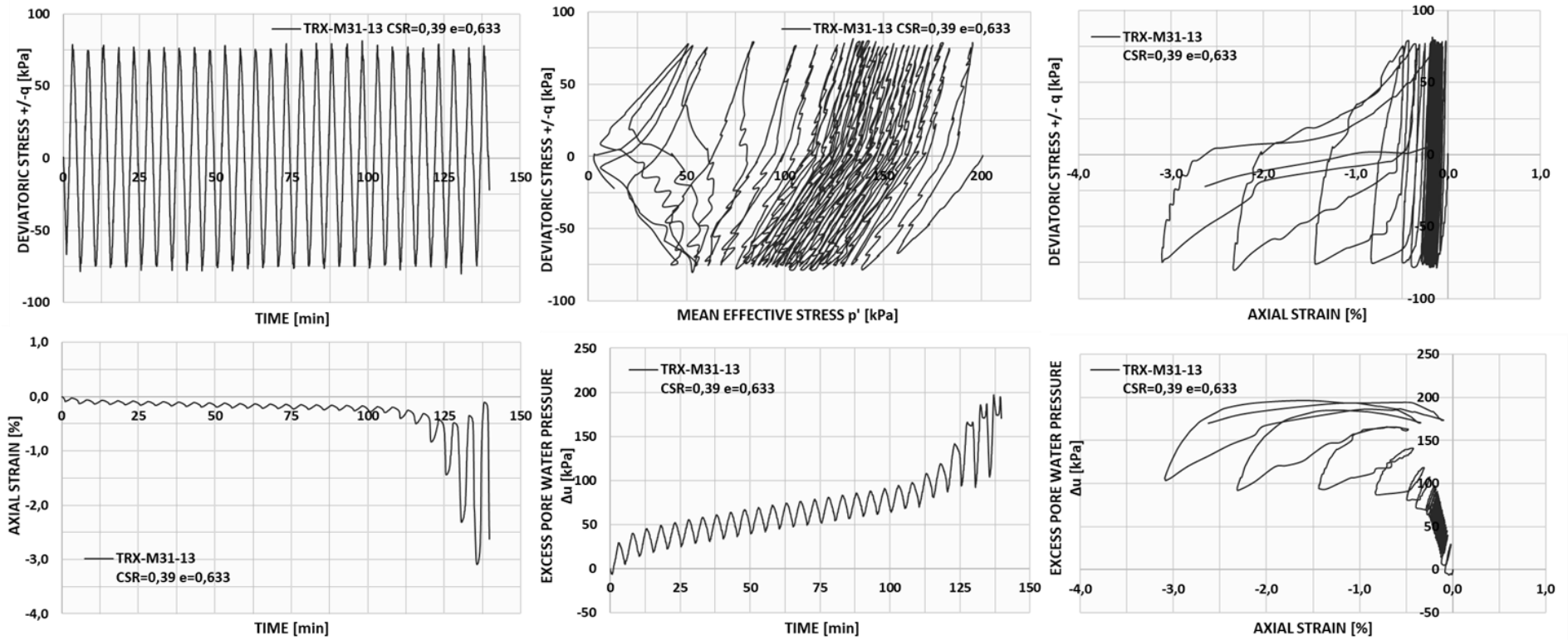
Σχήμα Π-1. 4 Δοκιμή TRX-M31-10



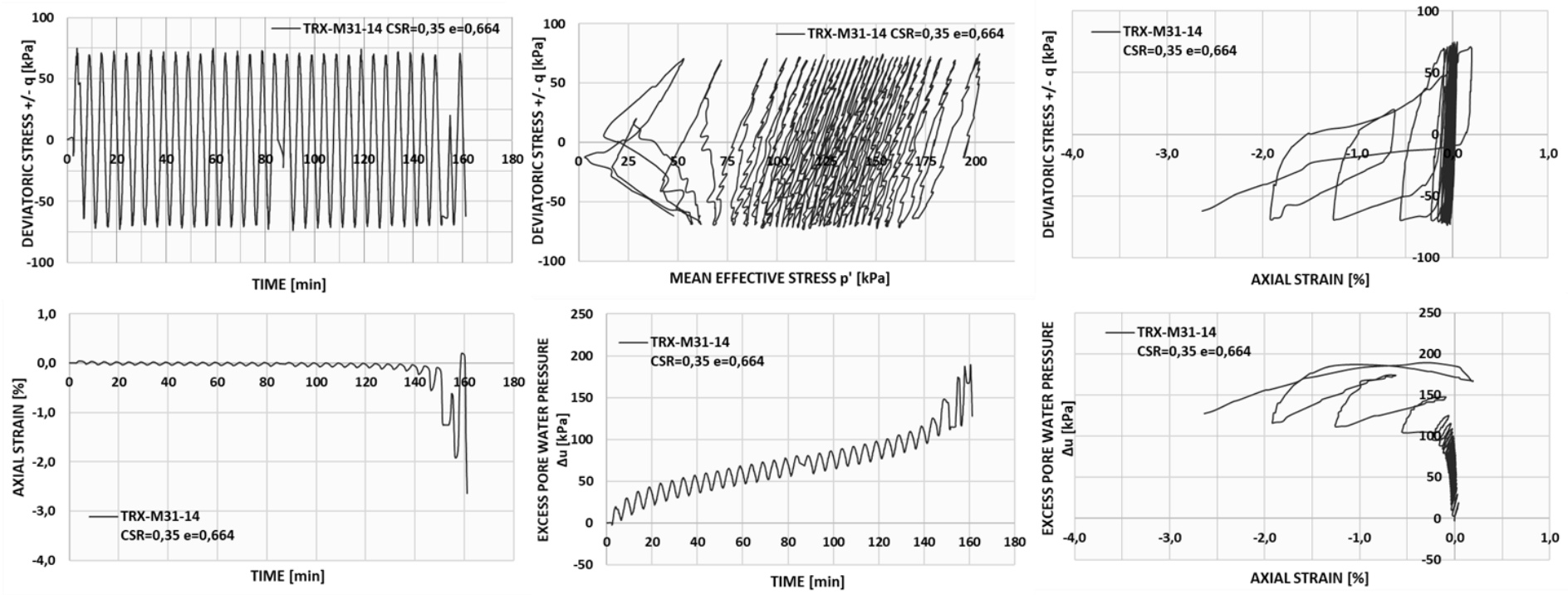
Σχήμα Π-1. 5 Δοκιμή TRX-M31-11



Σχήμα Π-1. 6 Δοκιμή TRX-M31-12



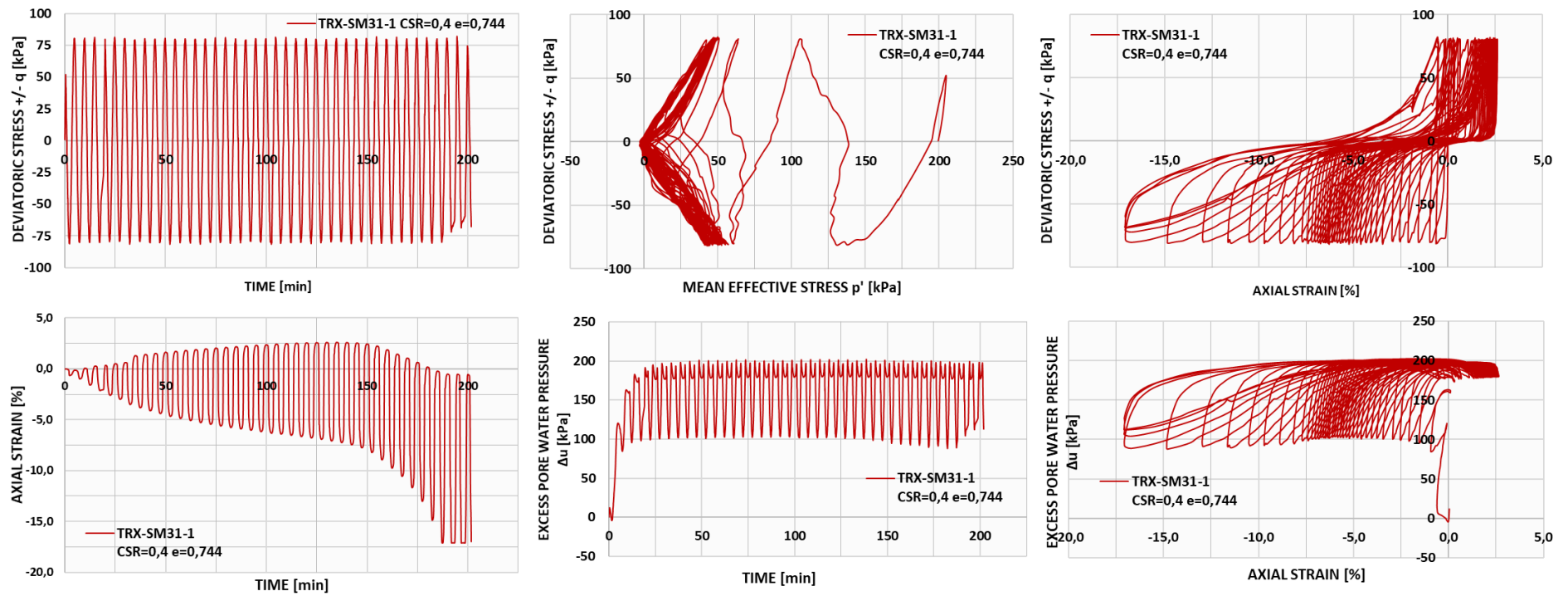
Σχήμα Π-1. 7 Δοκιμή TRX-M31-13



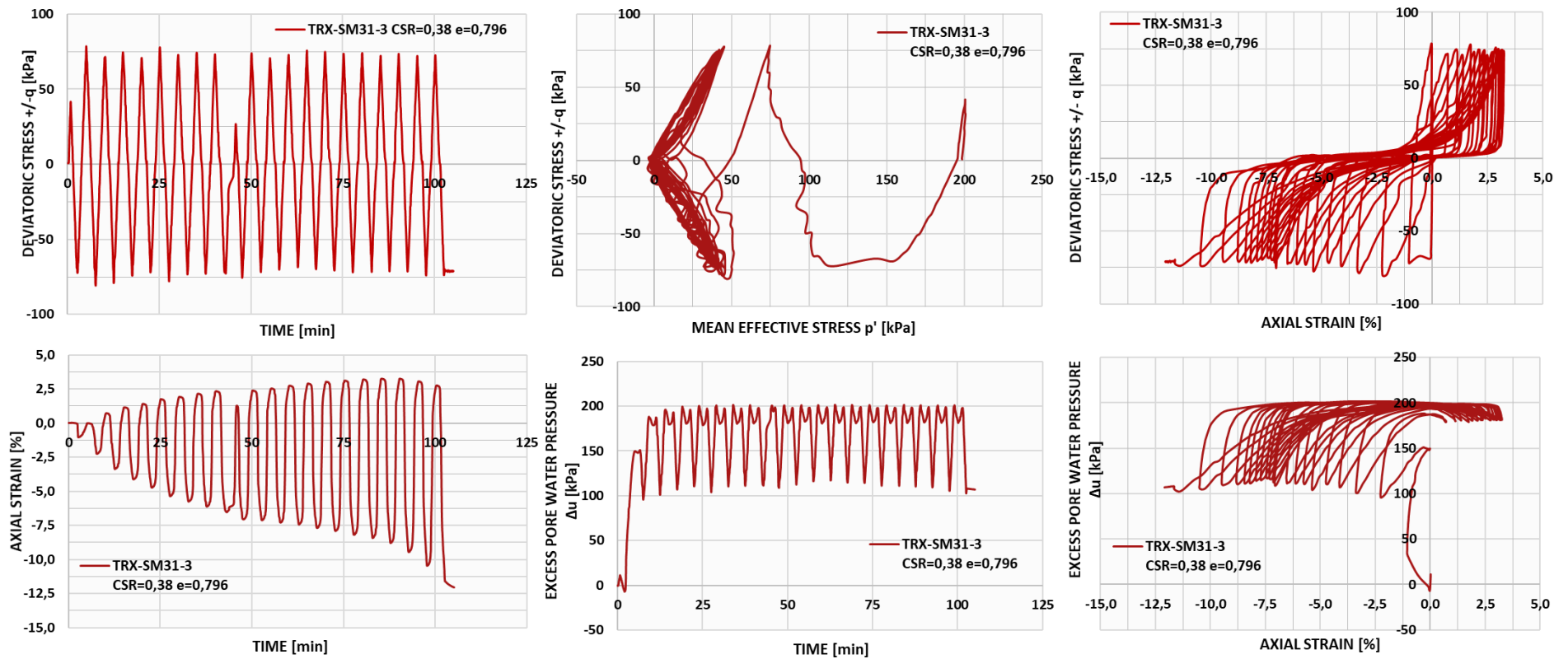
Σχήμα Π-1. 8 Δοκιμή TRX-M31-14

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-2

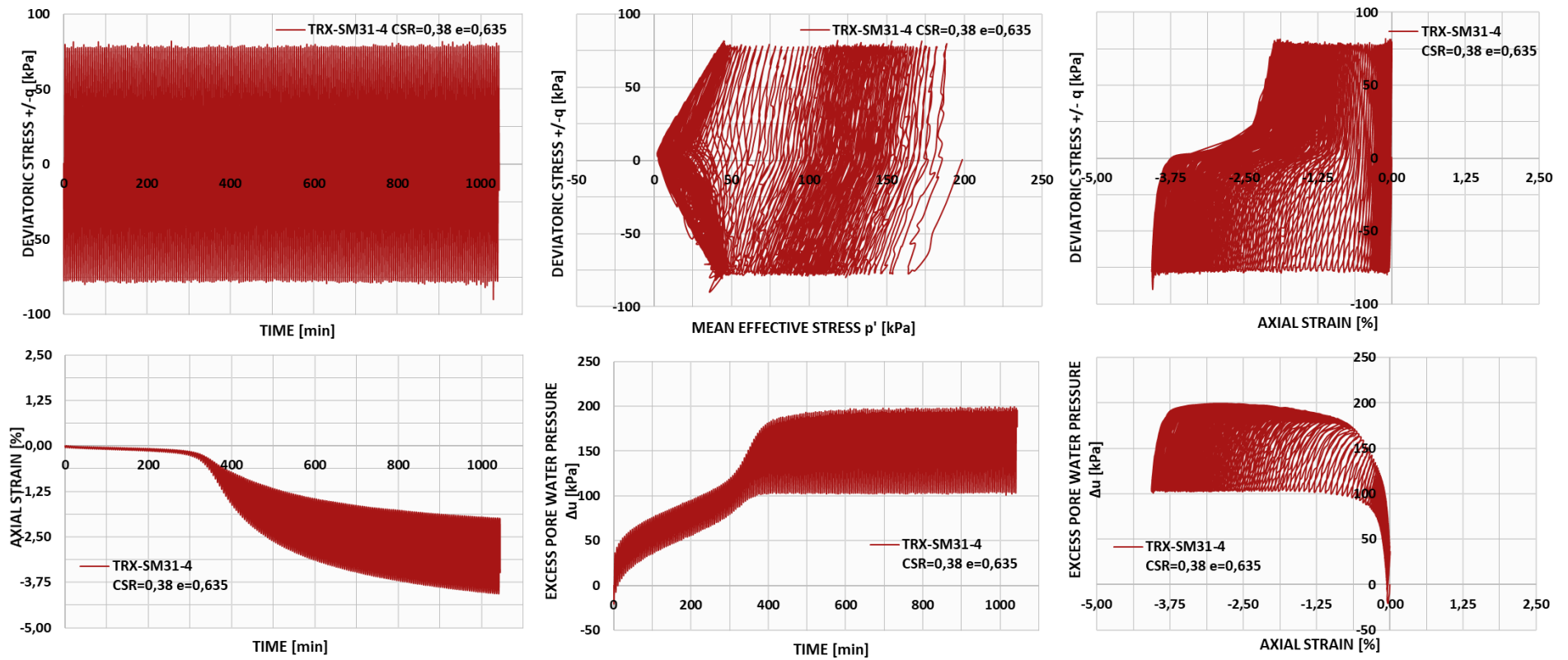
**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΜΜΟ Μ31**



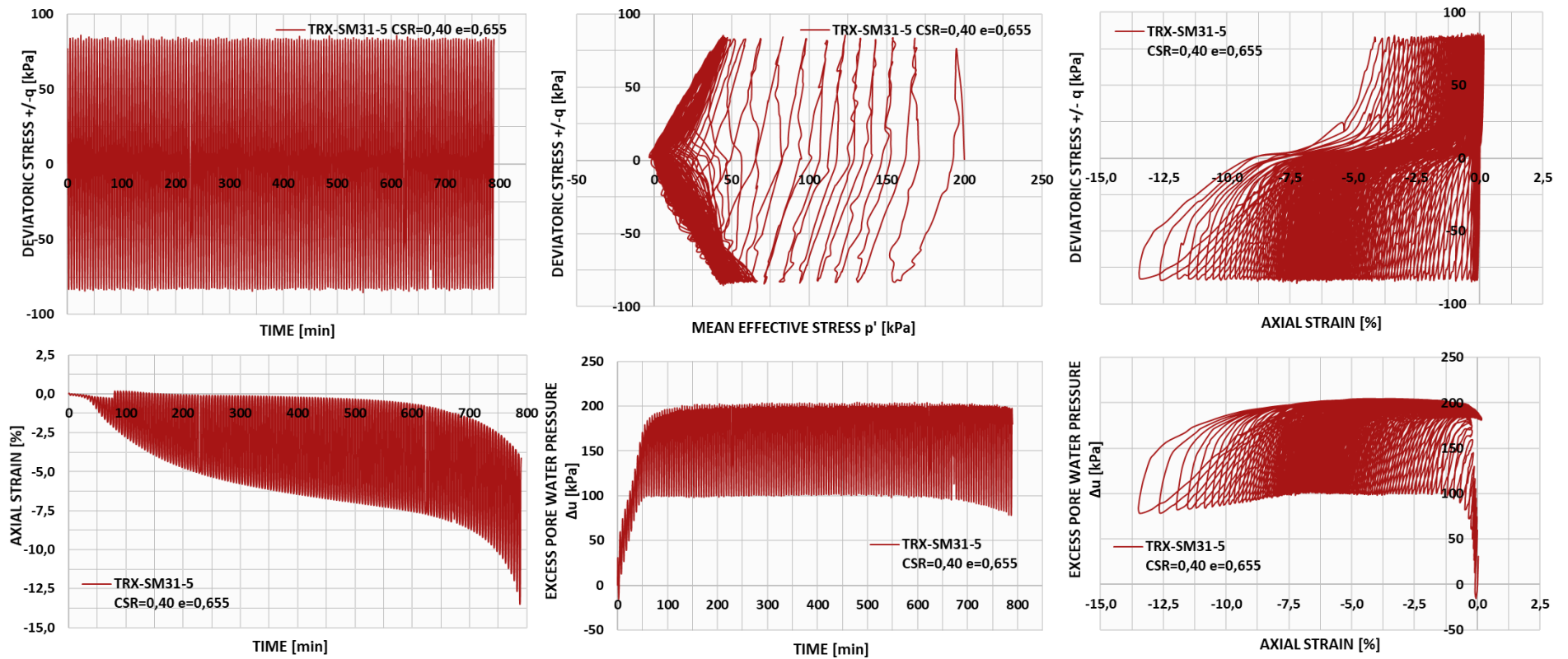
Σχήμα Π-2. 1 Δοκιμή TRX-SM31-1



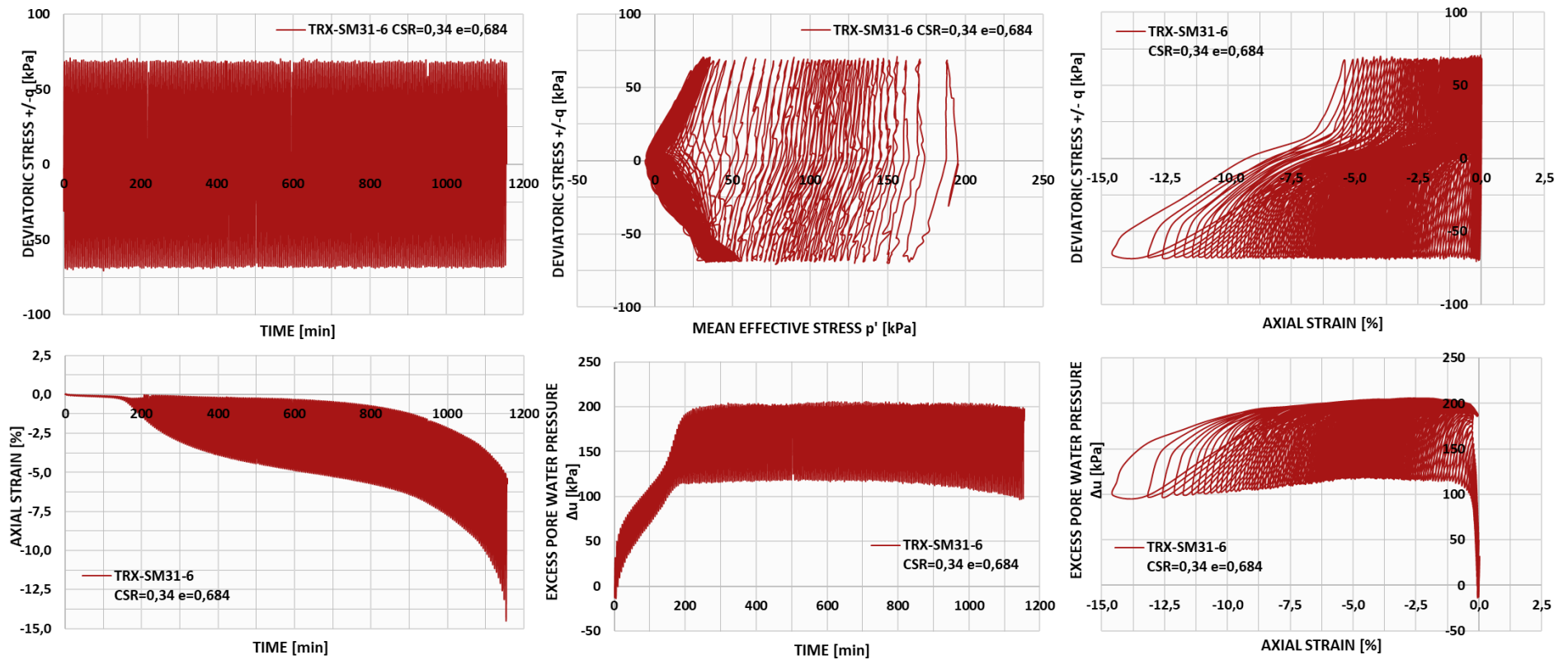
Σχήμα Π-2. 2 Δοκιμή TRX-SM31-3



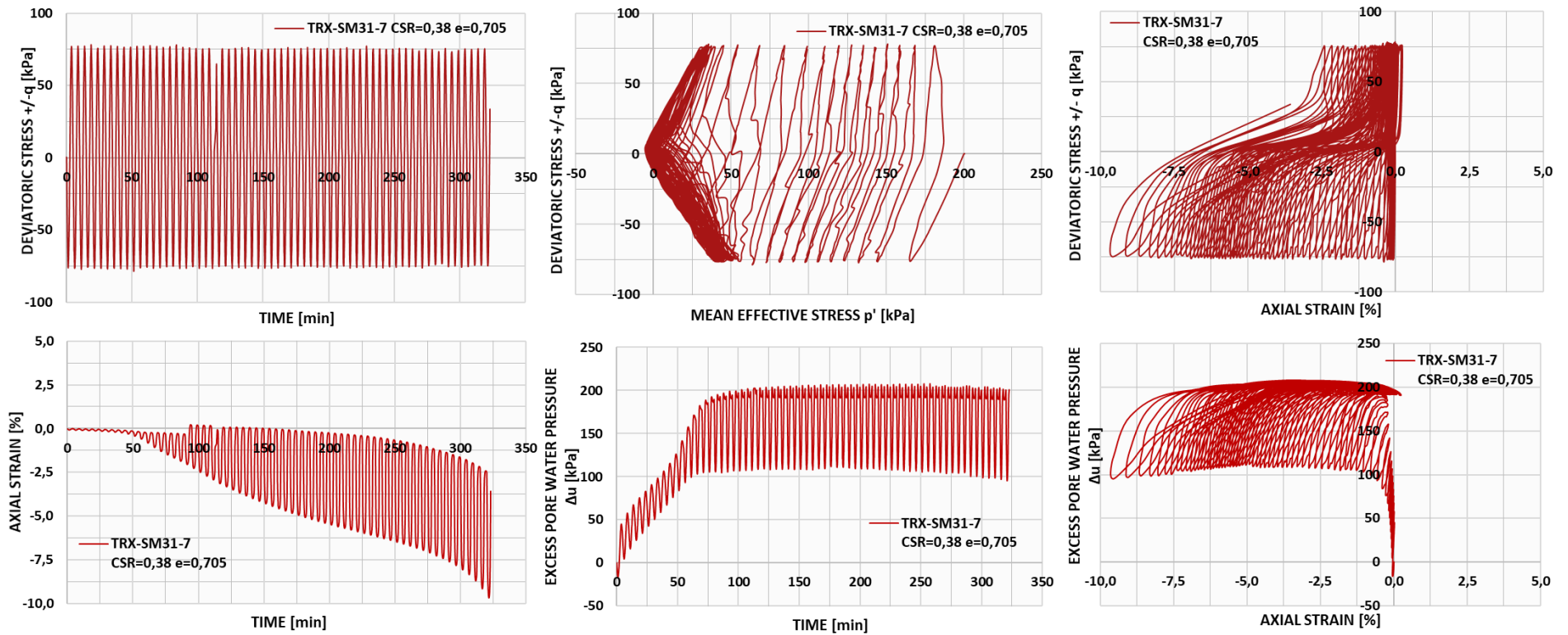
Σχήμα Π-2. 3 Δοκιμή TRX-SM31-4



Σχήμα Π-2. 4 Δοκιμή TRX-SM31-5



Σχήμα Π-2. 5 Δοκιμή TRX-SM31-6



Σχήμα Π-2. 6 Δοκιμή TRX-SM31-7