



National Technical University of Athens

School of Civil Engineering

Department of Geotechnical Engineering

Laboratory of Soil Mechanics

MSc in Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

***Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς
ρευστοποιήσιμων εδαφών, πριν και μετά τη σταθεροποίησή τους με
υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας***

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Κ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΣ

MSc THESIS

***Experimental investigation of mechanical behavior of liquefiable soils,
before and after stabilization with colloidal silica sol***

PANAGIOTIS K. TRIANTAFYLLOS

Επιβλέπουσα:

Β.Ν. Γεωργιάννου

Αναπλ. Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ

2015

Στην οικογένεια μου, για την αγάπη τους,
στον Ιωάννη – Ορέστη Γεωργόπουλο,
για τη γενναιοδωρία του,
και στους Λεωνίδα και Δέσποινα,
για τη γενναιόδωρη αγάπη τους.

Ευχαριστίες

Πρώτη από όλους επιθυμώ να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής διατριβής Αναπλ. Καθηγήτρια Β. Ν. Γεωργιάννου, για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές της. Η συνεχής παρουσία και οι καίριες παρατηρήσεις της βοήθησαν την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, σε ένα ευχάριστο κλίμα συνεργασίας, εμπιστοσύνης και χαράς. Έπειτα, το ίδιο θερμά ευχαριστώ τον εξαιρετικό φίλο και μέντορα Δρ Ιωάννη – Ορέστη Γεωργόπουλο, ο οποίος με μύησε και με καθοδηγεί με γενναιόδωρη προσφορά γνώσεων, εμπειριών, υποστήριξης και αγάπης στην *Τέχνη του Πειραματισμού*. Ο Καθηγητής Γ. Μπουκοβάλας, ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, έδειξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά την παρουσίαση της εργασίας (και όχι μόνο) και έδωσε το έναυσμα για έναν απολαυστικό κατιδεασμό. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για αυτό. Στον Καθηγητή Β. Κουμούση, ο οποίος υπήρξε σύμβουλος μου στον μεταπτυχιακό κύκλο σπουδών, οφείλω ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη για το κουράγιο που μου έδωσε, όταν το χρειαζόμουν. Στον Επικ. Καθηγητή Αχιλλέα Παπαδημητρίου, που ηγείται του ερευνητικού προγράμματος, μέρος του οποίου είναι αυτή η εργασία, εκφράζω ένα θερμότατο ευχαριστώ για την υπομονή, την εμπιστοσύνη του και την άφογη συνεργασία που έχουμε. Στην Δρ Μαρία Κωνσταντίνου και στον τεχνικό του εργαστηρίου Στέλιο Τσεντίδη εκφράζω ένα ακόμα θερμότατο ευχαριστώ για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στα πρώτα μου εργαστηριακά βήματα.

Η συμπαράσταση και η βοήθεια όλων των παραπάνω προσώπων του εργασιακού μου περιβάλλοντος ήταν ανεκτίμητη. Τίποτα, όμως, δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την αγάπη και την υποστήριξη της οικογένειας και των φίλων μου. Σε αυτούς λοιπόν ανήκει το πιο θερμό ευχαριστώ και σε αυτούς αφιερώνεται αυτό το έργο.

Παναγιώτης Κ. Τριαντάφυλλος

Αθήνα,

Φεβρουάριος 2015

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών, 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 (Gallagher 2000). Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η κατανόηση των φυσικοχημικών διαδικασιών του υγρολύματος και της γέλης κολλοειδούς πυριτίας, η αποσαφήνιση του πώς αυτές οι διαδικασίες επηρεάζουν τους μηχανισμούς μεταφοράς των κολλοειδών μέσα στους εδαφικούς πόρους και κυρίως, πώς επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων εδαφών. Η μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 και του μίγματος άμμου M31 με ιλύ D6 (85% κ.β. & 15% κ.β., αντίστοιχα) διερευνήθηκε με την εκτέλεση μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης και ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Τα αποτελέσματα ερμηνεύτηκαν μέσα από ένα φυσικοχημικό πρίσμα.

Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε, με την εμπορική ονομασία Ludox® SM (ένα προϊόν της Sigma - Aldrich®), είναι μία υδάτινη διασπορά (υγρόλυμα) διακριτών, συμπαγών (μη πορωδών), σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με διαστάσεις στο κάτω όριο της κολλοειδούς κλίμακας. Τα σωματίδια, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, μπορούν να αναπτύξουν πολύ ισχυρούς δεσμούς συνάφειας και συνοχής. Η διάμετρος των κολλοειδών σφαιρών είναι 7 nm και η ειδική επιφάνεια τους είναι ίση με $345 \text{ m}^2 / \text{g}$. Το τρομερά μεγάλο ανάπτυγμα, η δομή και οι ιδιότητες της επιφάνειας των σωματιδίων πυριτίας παίζουν έναν ουσιαστικό ρόλο σε όλες τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υγρολύματος και της γέλης. Κατ' επέκταση, οι επιφανειακές ιδιότητες είναι σημαντικές και για τη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους. Το υγρόλυμα Ludox® SM έχει περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 ίση με 30% κ.β. και είναι σταθεροποιημένο σε αλκαλικό $\text{pH}=10$. Ο παράγοντας σταθεροποίησης του υγρολύματος είναι το οξείδιο του νατρίου Na_2O . 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. Το πυκνό υγρόλυμα (30% κ.β. πυριτία) έχει ιξώδες με τιμή 5.5 cP (centipoise). Το αραιωμένο υγρόλυμα, σε περιεκτικότητες 5 – 10 % κ.β., έχει ιξώδες ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό του νερού, η τιμή του οποίου είναι 1 cP υπό συνήθεις θερμοκρασίες. Υπό την επίδραση συγκεκριμένων παραγόντων το υγρόλυμα αποσταθεροποιείται και δεσμοί σχηματίζονται μεταξύ των σωματιδίων. Η χημική αντίδραση σχηματισμού των δεσμών ονομάζεται συμπύκνωση (condensation). Δύο ομάδες σιλανόλης $\text{Si} - \text{OH}$ στην επιφάνεια δύο σωματιδίων συνδέονται και σχηματίζουν έναν δεσμό σιλοξάνης $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ και ένα μόριο νερού H_2O . Η αντίδραση της συμπύκνωσης, όπως αποκαλύπτει ο ίδιος ο όρος, οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή και εκτοπισμό νερού. Έχουμε την πεποίθηση ότι αυτό το χαρακτηριστικό της αντίδρασης της συμπύκνωσης έχει πολύ σημαντικές συνέπειες στη συμπεριφορά του εδάφους, όταν οι υπό συρρίκνωση αλυσίδες πυριτίας, που εμφανίζουν έντονη συνάφεια, αναπτύσσονται μέσα στο εδαφικό πορώδες. Το στερεό σύνορο των εδαφικών κόκκων προσφέρει ένα πλήθος από περιοχές που δρουν ως πυρήνες (nuclei), οι οποίοι επιταχύνουν την αντίδραση της συμπύκνωσης. Ο διαφορικός ρυθμός συμπύκνωσης μεταξύ των περιοχών κοντά στους εδαφικούς κόκκους και στο κέντρο των πόρων οδηγεί σε διαφορεικό ρυθμό συστολής. Μία πλάκα (plaque) υψηλής περιεκτικότητας σε πυριτία σχηματίζεται και ενθυλακώνει τους εδαφικούς κόκκους. Εκφράζουμε την πεποίθησή ότι αυτή η

πλάκα είναι κυρίως υπεύθυνη για την ιδιάζουσα μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών.

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 σιλοξάνης. Ο ρόλος του PH είναι περισσότερο σύνθετος και η επίδραση του δεν είναι μονότονη. Σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τιμές PH οι ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια των σωματιδίων, οι οποίες συμπεριφέρονται ως ασθενή οξέα, προσλαμβάνουν ή αποβάλλουν πρωτόνια, αντίστοιχα. Η πρόσληψη πρωτονίων H^+ φορτίζει την επιφάνεια θετικά, ενώ η αποβολή τους την φορτίζει αρνητικά. Σε ενδιάμεσες τιμές PH ($5 < PH < 7$) αναμένεται, επομένως, ο χρόνος γέλης να είναι ελάχιστος. Οι ομάδες υδροξυλίου OH του υδάτινου διασπορέα σε αυτό το εύρος PH λειτουργούν, επίσης, καταλυτικά. Αυτές οι ομάδες μεταβάλλουν προσωρινά τον αριθμό συνδιάταξης των ατόμων πυριτίου από 4 σε 6, με αποτέλεσμα μία γειτονική ομάδα σιλανόλης ενός άλλου σωματιδίου να συλλαμβάνεται και να σχηματίζεται ο δεσμός σιλοξάνης (Bergna and Roberts 2006). Αυτές οι θεωρητικές προβλέψεις επαληθεύτηκαν πειραματικά στις εργασίες των Gallagher (2000), Hunt et al. (2013) και των συνεργατών στο ερευνητικό πρόγραμμα Nanoliq (Θαλής – Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, MIS 375618, 2014). Οι ερευνητές αυτοί παρήγαγαν τις καμπύλες εξέλιξης του ιξώδους σε συνάρτηση με τον χρόνο, για πολλούς συνδυασμούς των κρίσιμων παραγόντων. Προσδιόρισαν, επίσης, τον χρόνο γέλης σε συνάρτηση με το PH και παρήγαγαν τις τυπικές καμπύλες σχήματος “U”.

Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του υγρούλυματος πυριτίας, κατά το μεταβατικό στάδιο που μετατρέπεται σε γέλη, μελετήθηκαν λεπτομερώς στην εργασία των Sacks και Sheu (1986, 1987) και παρουσιάζονται στο εξαιρετικό σύγγραμμα των Brinker και Scherer (1990). Οι Sacks and Sheu μέτρησαν το μιγαδικό μέτρο διάτμησης του υγρούλυματος πυριτίας, χρησιμοποιώντας ένα ιξωδόμετρο στενού εύρους. Συμπέραναν ότι το υγρόλυμα γίνεται παχύρευστο καθώς σχηματίζονται πυριτικές αλυσίδες. Τα συμπλέγματα πυριτικών αλυσίδων λειτουργούν σαν μία ηλεκτροχημική απόχη, η οποία παγιδεύει το νερό και το εμποδίζει από το να ρέει. Το αδρανισμένο νερό αυξάνει τον ενεργό όγκο των πολυμερών και μακροσκοπικά παρατηρείται μία αύξηση του ιξώδους. Το παχύρευστο υγρόλυμα μετατρέπεται σταδιακά σε μία ελαστική γέλη. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό πυριτικό σκελετό και την παγιδευμένη υδάτινη φάση. Στα πρώτα στάδια της διαδικασίας μετατροπής, το υγρόλυμα συμπεριφέρεται ως νευτώνειο υγρό. Καθώς τα συμπλέγματα πυριτικών αλυσίδων μεγαλώνουν, ορισμένα σπάνε από την επιβαλλόμενη διατμητική τάση και το υγρόλυμα υπόκειται διατμητική λέπτυνση. Η ελαστική γέλη μπορεί να επιστρέψει στη μορφή του παχύρευστου υγρού αν ο στερεός σκελετός τραυματιστεί εκτεταμένα. Τα συμπεράσματα της έρευνας των Sacks και Sheu είναι διαφωτιστικά για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων εδαφών. Επίσης, είναι κατατοπιστικά για την ερμηνεία των πειραματικών μετρήσεων. Για παράδειγμα, η αλληλεπίδραση των πυριτικών αλυσίδων με την υγρή φάση κάνει την εκροή του νερού κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων να διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, προκαλεί μία υστέρηση της εκδήλωσης της πίεσης του υγρού των πόρων στον μετρητή, στα πρώτα στάδια της αστράγγιστης διάτμησης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σωματίδια κολλοειδούς πυριτίας είναι κρίσιμο να μεταφερθούν ομοιόμορφα στους εδαφικούς πόρους, προτού το υγρόλυμα γίνει πολύ παχύρρευστο και σταματήσει η ροή. Οι Gallagher και Lin (2009) και η ερευνητική ομάδα στο πρόγραμμα Nanoliq (2014) μελέτησαν τους μηχανισμούς μεταφοράς των κολλοειδών σωματιδίων. Εκτέλεσαν δοκιμές εισπίεσης του υγρούλυματος σε εδαφικές στήλες άμμου και ιλυώδους άμμου, υπό χαμηλές υδραυλικές κλίσεις. Συμπέραναν ότι ο κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει την επιτυχία της διοχέτευσης της πυριτίας είναι το αυξανόμενο ιξώδες του υγρούλυματος. Η πρόβλεψη της παροχής υγρούλυματος μπορεί να γίνει με χρήση του νόμου του Darcy, αν η αύξηση του ιξώδους ληφθεί υπόψη με τη σχέση των Kozeny – Carman. Η μεταφορά των κολλοειδών στερεών μπορεί να περιγραφεί με τη μονοδιάστατη εξίσωση μεταγωγής – διασποράς. Οι προβλέψεις των αριθμητικών μοντέλων επαληθεύθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα των Gallagher και Lin. Όταν απουσιάζει η μαζική ροή υγρούλυματος, η διάχυση των κολλοειδών μπορεί να είναι ένας σημαντικός μηχανισμός μεταφοράς, σε μικρές αποστάσεις. Η απόσταση που διανύει ένα κολλοειδές σωματίδιο λόγω διάχυσης, σε σύντομη χρονική περίοδο, αναμένεται να είναι ιδιαίτερα μικρή. Συμπερασματικά, μόνο ένας λεπτός φλοιός στην εξωτερική επιφάνεια της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας κινδυνεύει να χάσει κολλοειδή σωματίδια μετά τον σχηματισμό της γέλης. Το συμπέρασμα αυτό είναι σημαντικό διότι ένας μεγάλος αριθμός σωματιδίων πυριτίας αιωρούνται για εκτεταμένο χρονικό διάστημα στο υγρό των πόρων της γέλης, πριν προσκολληθούν στον σχηματισμένο πυριτικό ιστό. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στην ωρίμανση και στην αύξηση της στιβαρότητας της γέλης, αν τα σωματίδια δεν απομακρυνθούν με διαχυτική κίνηση.

Το σταθεροποιημένο κοκκώδες έδαφος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας μετά τον σχηματισμό της γέλης μέσα το πορώδες. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι ένας απλός δείκτης του βαθμού επιτυχίας της σταθεροποίησης (Gallagher and Lin 2009). Οι ερευνητές στο πρόγραμμα Nanoliq (2014) προσδιόρισαν για τη σταθεροποιημένη άμμο M31 και το σταθεροποιημένο μίγμα άμμου M31 με ιλύ D6, αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ίση με μερικές δεκάδες kilopascals (25 – 105 kPa). Η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε πυριτία. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι η αύξηση της αντοχής της ιλυώδους άμμου ήταν μικρότερη από αυτήν της καθαρής άμμου, για την ίδια αύξηση στην περιεκτικότητα της πυριτίας. Οι λεπτότεροι εδαφικοί κόκκοι ίσως προσελκύουν, μέσω ενός μηχανισμού πυρηνοποίησης, μία μεγάλη ποσότητα σωματιδίων πυριτίας, με αποτέλεσμα οι μεγαλύτεροι κόκκοι να απολαμβάνουν λιγότερο αποτελεσματική ενθυλάκωση.

Στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής, μία σειρά από μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη άμμο M31 και επίσης, σε φυσικό και σε σταθεροποιημένο μίγμα 85% κ.β. άμμου M31 με 15% κ.β. ιλύ D6 ($f_c=10\%$). Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε καλούπια που περιείχαν υγρόλυμα πυριτίας (CS=6% και 10% κ.β.). Τα καλούπια σφραγίστηκαν και η γέλη σχηματίστηκε στους πόρους του άτονου εδαφικού σκελετού. Στη συνέχεια τα σταθεροποιημένα δοκίμια στερεοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή. Η εκροή του νερού των πόρων χρειάστηκε αρκετό χρόνο για να εκδηλωθεί, αλλά μακροπρόθεσμα το σταθεροποιημένο έδαφος ανέπτυξε ουσιαστικά τις ίδιες ογκομετρικές παραμορφώσεις με το φυσικό. Οι παραμορφώσεις στερεοποίησης και η εκροή του νερού των πόρων ενδέχεται να τραυματίζει ελαφρώς το στερεό πυριτικό δίκτυο (Towhata 2008). Η τριαξονική θλίψη εκτελέστηκε με επιβολή ρυθμού παραμόρφωσης 0.30 mm / min. Η πίεση του υγρού των πόρων μετρήθηκε και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Οι μετρήσεις αυτές, όμως, απαιτούν κριτική αξιολόγηση. Ο βασικός λόγος είναι η καθυστέρηση της εκδήλωσης της πίεσης του υγρού των πόρων στον μετρητή, λόγω της αλληλεπίδρασης των πυριτικών συμπλεγμάτων με το νερό. Η διάτμηση των δοκιμίων εκτελέστηκε σε καθεστώς πολύ υψηλών αρχικών ενεργών τάσεων (300, 1000, 1500, 2000 kPa) για να διερευνηθεί η επίδραση τέτοιων εντατικών πεδίων πάνω στους

δεσμούς της γέλης. Η σταθεροποιημένη άμμος M31 αύξησε την αντοχή της κατά δύο έως τρεις φορές συγκριτικά με τη φυσική άμμο. Η περιεκτικότητα σε πυριτία (CS=6% και 10% κ.β.) δεν έχει ουσιαστική επίδραση πάνω στην αύξηση της αντοχής. Η σταθεροποιημένη άμμος που υπόκειται μονοτονική τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες συμπεριφέρεται παρόμοια με την πυκνότερη φυσική άμμο, που υπόκειται στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη. Αυτή η συμπεριφορά ίσως οφείλεται στην ενθυλάκωση των εδαφικών κόκκων από την πλάκα υψηλής περιεκτικότητας σε πυριτία, η οποία πρέπει να ενδώσει για να μπορέσει να παραμορφωθεί ο εδαφικός σκελετός. Μπορεί, επίσης, να οφείλεται στον εγκλεισμό των εδαφικών κόκκων μέσα σε πυριτικούς θύλακες, μακριά από άλλους πυριτικούς θύλακες που περιέχουν το πεπεισμένο νερό. Μία πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι, για άλλη μία φορά, η αύξηση της αντοχής του σταθεροποιημένου μίγματος ήταν μικρότερη από αυτήν της σταθεροποιημένης άμμου. Ο μηχανισμός πυρηνοποίησης που έχει ήδη περιγραφεί μπορεί να εξηγεί αυτήν τη συμπεριφορά.

Ακόμα μία σειρά δοκιμών εκτελέστηκε στο εργαστήριό μας πάνω σε φυσική και σταθεροποιημένη (CS=6% και 10% κ.β.) άμμο M31. Πρόκειται για ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης κοίλων κυλινδρικών δοκιμίων, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η μέθοδος παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμίων ήταν η ίδια με αυτήν, που χρησιμοποιήθηκε στα δοκίμια των τριαξονικών δοκιμών. Η φάση στερεοποίησης ήταν, επίσης, η ίδια. Η διάτμηση εκτελέστηκε με επιβολή ημιτονικής διατμητικής τάσης πλάτους Δt και περιόδου $T=10$ s. Η πίεση του υγρού των πόρων μετρήθηκε και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Ως κριτήριο ρευστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους ίσης με $\gamma_{DA}=5\%$. Το πλήθος των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση συμβολίζεται με $N_{5\%}$. Τα αποτελέσματα σχεδιάζονται ως καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στα επίπεδα $CSR - N_{5\%}$ και $CRR_{15} - D_r$. Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως $CSR = \Delta t / p'_{in}$, όπου p'_{in} είναι η μέση ενεργός τάση στην έναρξη της διάτμησης. Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης προσδιορίζεται από τη σχέση $CRR_{15} = CSR_{Dr}(N_{5\%}=15)$, δηλαδή είναι ο λόγος ανακυκλικής τάσης, για δεδομένη σχετική πυκνότητα, ο οποίος προκαλεί ρευστοποίηση σε 15 κύκλους φόρτισης. Η βασική διαφορά στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης και της φυσικής άμμου είναι ότι η πρώτη μπορεί να ανθίσταται σε πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, με μεγάλες παραμορφώσεις και υψηλή πίεση υγρού πόρων, χωρίς να καταρρέει. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη συνοχή που προσφέρει η γέλη στους ενθυλακωμένους εδαφικούς κόκκους. Η σταθεροποιημένη άμμος εκδήλωσε, όμως, μία μη αναμενόμενη συμπεριφορά. Στους πρώτους κύκλους φόρτισης ανέπτυξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε σχέση με τη φυσική άμμο. Θεωρούμε ότι η μέθοδος παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμίων ίσως ευθύνεται για αυτήν τη συμπεριφορά. Ο σχηματισμός της γέλης μέσα σε άτονο εδαφικό σκελετό ενδέχεται να επιβάλλει κάποιες μικρές τάσεις πάνω στους εδαφικούς κόκκους, στους οποίους είναι αγκυρωμένες οι πυριτικές αλυσίδες που συστέλλονται, οδηγώντας σε μία αναδιοργάνωση των επαφών και των δομών. Αυτή η διαταραγμένη δομή των επαφών των κόκκων μπορεί να επηρεάζει την ανάπτυξη του επόμενου δικτύου επαφών κατά τη στερεοποίηση. Το ανώμαλο δίκτυο μεταβίβασης των δυνάμεων που αναπτύσσεται κάτω από αυτές τις συνθήκες, μπορεί να ευθύνεται για τις μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις της σταθεροποιημένης άμμου, από τους πρώτους κιόλας κύκλους φόρτισης.

Μελλοντική έρευνα μπορεί να προσανατολιστεί στη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων πυριτίας με τους εδαφικούς κόκκους, κατά τον σχηματισμό της γέλης. Η αντίδραση της συμπύκνωσης φαίνεται να εξελίσσεται με διαφορετικό τρόπο μέσα στο εδαφικό πορώδες, από ότι μέσα σε ένα μεγάλο δοχείο. Η επιφάνεια των εδαφικών κόκκων ενδέχεται να προσφέρει περιοχές πλούσιες σε πυρήνες, που επιταχύνουν την αντίδραση της συμπύκνωσης και οδηγούν στον σχηματισμό της πυριτικής πλάκας υψηλής περιεκτικότητας. Ο μηχανισμός της πυρηνοποίησης φαίνεται να είναι πιο έντονος όταν το έδαφος περιέχει λεπτότερους (και περισσότερο γωνιώδεις) κόκκους. Επιπρόσθετα, η διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου παρασκευής των

σταθεροποιημένων δοκιμίων στη μηχανική συμπεριφορά τους, ειδικά υπό συνθήκες στρεπτικής διάτμησης, είναι χρήσιμο να πραγματοποιηθεί.

SUMMARY

The present project deals with the concept of passive stabilization of liquefiable soils, 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 (Gallagher 2000). The main goals of the project are to comprehend the physicochemical processes of the colloidal silica aquasol and gel, to understand how these processes affect the transportation mechanisms of the colloids inside the soil pores and mostly, understand how the mechanical properties of the stabilized soil are affected. The mechanical behavior of the stabilized sand M31 and mixture of sand M31 with silt D6 (85% wt. & 15% wt. respectively) is investigated by executing monotonic triaxial compression tests and cyclic torsional shear tests, under undrained conditions. To interpret the results, the physicochemical properties of the materials are considered.

The colloidal silica used in this project, under the commercial Ludox® SM brand (a product of Sigma - Aldrich®), is a water dispersion (aquasol) of discrete, compact (not porous), spherical particles of amorphous silica, with dimensions at the lower edge 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 the 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 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% wt. 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. The concentrated sol (30% wt. silica) has a viscosity value equal to 5.5 cP (centipoise). The diluted sol, at concentrations 5 – 10% wt., has viscosity slightly higher than that of water, which is 1 cP at ordinary temperatures. 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 reveals, leads to contraction of the solid silica phase and expulsion of the liquid phase. We believe that this feature of the condensation reaction has a significant effect on the soil behavior, when the contracting, adhesive silica chains are formed inside the soil pores. The solid boundary of the grains offers numerous regions that act as nuclei which accelerate the condensation reaction. The differential condensation rate between the regions near the grains and the middle of the pores leads to differential contraction rate. A plaque of high silica concentration is formed and encapsulates the soil grains. We speculate that this plaque is mainly responsible for the altered mechanical behavior of the stabilized soil.

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. 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 hydroxyl groups OH of the water dispersant at this range of PH also play a catalytic role. These groups make the coordination number of silicon atoms to temporarily change from 4 to 6, so a nearby silanol group that belongs to another particle is captured and a siloxane bond is formed (Bergna and Roberts 2006). These theoretical predictions were experimentally confirmed in the work of Gallagher (2000), Hunt et al. (2013) and collaborators at the Nanoliq research project (Thalis - University of Thessaly, MIS 375618, 2014). These researchers produced the viscosity evolution curves with time, for many combinations of the critical factors. They also determined the gel time as a function of PH and they produced the typical "U" shaped curves.

The rheological behavior of the silica sol, during the transient state in which it is transformed into a gel, is minutely investigated in the work of Sacks and Sheu (1986, 1987) and is presented at the exceptional book of Brinker and Scherer (1990). Sacks and Sheu measured the complex shear modulus of silica sol, using a narrow - gap viscometer. They concluded that the sol thickens as silica chains are formed. These clusters act like an electrochemical net, which traps the water and makes it unable to flow. The inert water increases the effective volume fraction of polymer and this is manifested macroscopically as an increase of viscosity. The viscous sol progressively turns into an elastic gel. The saturated gel is a two-phase material made of a solid silica skeleton which encloses the liquid phase. At the early stages of this process the sol inhibits Newtonian viscosity. As the silica clusters grow larger, some of them break under the shear stress and the sol becomes shear thinning. The elastic gel can return to a viscous liquid form, if the solid skeleton is extensively injured. The conclusions of Sacks and Sheu research are essential for the understanding of the stabilized soil mechanical behavior. They are also instructive for the interpreting of the experimental measurements. For example, the interaction of silica clusters with water makes the consolidation of stabilized soil last for a long time. It also leads to retarded manifestation of the pore water pressure at the pressure transducer, during the early stages of undrained tests.

As was mentioned above, it is crucial that the colloidal silica particles are transported uniformly into the soil pores, before the sol becomes too viscous to flow. Gallagher and Lin (2009) and the research team at the Nanoliq project (2014) studied the transport mechanisms of the colloidal particles. They conducted injection tests of sol through sand and silty sand columns, under low hydraulic gradients. They found that the critical factor that determines the success of silica delivery is the increasing viscosity of the sol. The prediction of sol supply can be made using the Darcy Law, if the increase of viscosity is taken into account, using the Kozeny - Carman relationship. The transport of the colloidal solids can be described by the one dimensional advection – dispersion equation. The predictions of the numerical model were verified by the experimental results of Gallagher and Lin. In the absence of bulk motion of sol, the diffusion of colloids can be an important short distance transport mechanism. The distance that a colloidal particle can travel due to diffusion, over a short period of time, is expected to be very small. Consequently, only a very thin shell at the external surface of the stabilized soil mass is in danger of losing the colloidal particles after the gelation of the thick sol. This is an important conclusion because many silica particles are suspended for a very long time in the water of the gel pores, before they attach to the formed silica skeleton. This process leads to aging and stiffening of the silica solid network, if the particles are not leached away by diffusive motion.

The stabilized granular soil develops some kind of cohesion after the gel formation inside the soil pores. The unconfined compressive strength is a simple indicator of the degree of stabilization achieved (Gallagher and Lin 2009). The researchers at the Nanoliq project (2014) determined unconfined compressive strength of stabilized sand M31 and of stabilized mixture of sand M31 with silt D6 equal to few dozens of kilopascals (25 -105 kPa). The unconfined compressive strength increases as the relative density of soil increases and as the concentration of silica increases. It is important to mention that the increase in strength of the silty sand is lower than that of pure sand, for the same increase in silica concentration. The finer soil grains might attract, through a nucleation mechanism, a large amount of silica particles and leave the coarser grains with less efficient encapsulation.

As part of this Thesis series of monotonic triaxial compression tests were conducted on natural and stabilized sand M31 and also on natural and stabilized mixture of 85% wt. sand M31 with 15% wt. silt D6 ($f_c=10\%$). The stabilized specimens were produced by pluviation of dry soil material into molds filled with silica sol (CS=6% and 10%). The molds were sealed and the gel was formed into the pores of unstressed soil skeleton. The stabilized specimens were then consolidated in the triaxial apparatus. The expulsion of pore water took a long time to occur but the stabilized soil achieved essentially the same volumetric strains as the natural soil. The consolidation strains and the expulsion of water might cause a minor injury of the silica solid network (Towhata 2008). The triaxial compression was performed under strain control, at a rate of 0.30mm / min. The pore water pressure was measured even for the stabilized specimens; however, these measurements are considered with caution. The main reason for this is the retardation of manifestation of pore water pressure at the transducer, due to the interaction of silica clusters with water. Shearing in compression was conducted at very high initial effective stresses (300, 1000, 1500, 2000 kPa) to investigate the effect of such stresses on the bonds of the gel. The stabilized sand M31 showed an increase in strength two to three times compared to the strength of natural sand. The concentration of silica (CS=6% and 10% wt.) did not essentially affect the increase in strength. The stabilized sand under monotonic undrained triaxial compression actually behaved as the denser natural sand under drained compression. This behavior might be due to the encapsulation of soil grains by the high concentration silica plaque, which must yield to allow the soil to deform. It might also be due to the isolation of the soil grains inside silica capsules away from other capsules that enclose the compressed water. A very important observation is that, again, the increase in strength of the stabilized mixture was lower than that of the stabilized sand. The nucleation mechanism already described may explain this behavior.

Another series of tests was conducted in our laboratory on natural and stabilized (CS=6% and 10% wt.) sand M31. These were cyclic torsional shear tests of hollow cylinder specimens, under undrained conditions. The preparation method for the stabilized specimens was the same as for the specimens subjected to triaxial tests. The consolidation phase was also the same. The shearing was performed by applying sinusoidal shear stress at amplitude $\Delta\tau$ and period $T=10s$. The pore water pressure was measured even for stabilized specimens. The liquefaction criterion used was the development of double amplitude shear strain equal to $\gamma_{DA}=5\%$. The number of cycles until liquefaction occurs is denoted as $N_{5\%}$. The results are plotted as liquefaction resistance curves at the $CSR - N_{5\%}$ and at the $CRR_{15} - D_r$ planes. The cyclic stress ratio is defined as $CSR=\Delta\tau / p'_{in}$, where p'_{in} is the mean effective stress at the beginning of shearing. The cyclic resistance ratio is defined as $CRR_{15}=CSR_{Dr}(N_{5\%=15})$, namely as the cyclic stress ratio, for a specific relative density, that causes liquefaction at fifteen cycles. The basic difference between the behavior of stabilized and natural sand is that the first can sustain too many cycles with large deformation and pore water pressure, without collapsing. This may be due to the cohesion that the gel provides to the

encapsulated soil grains. The stabilized sand exhibited an unexpected behavior, though. At the first cycles of loading it developed larger deformations than the natural sand. It is suggested that the preparation method of stabilized specimens may be responsible for this behavior. The gel formation inside unstressed soil could apply some minor stresses on the grains at which the contracting silica chains are anchored to, leading to a rearrangement of grain contacts and structure. This irregular structure of intergranular contacts could interfere with the formation of the following force network during consolidation. The abnormal force network formed under these conditions might be responsible for the large deformations of stabilized sand, during the initial cycles of loading.

Future research can be oriented to the identification of the interaction between the silica particles and the soil grains, during the gelation process. The condensation reaction seems to be very different inside the soil pores compared to the same reaction in a large container. The surface of the soil grains might offer nuclei rich regions that accelerate the condensation reaction, and lead to the formation of a high concentration silica plaque. The nucleation mechanism seems to be more intense when the soil contains finer (and more angular) grains. Additionally, the investigation of the effects of the preparation method of the stabilized specimens on their mechanical behavior, especially under torsional shear conditions, can be carried out.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ.....	6
2.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ.....	6
2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών.....	6
2.1.2 Η ορολογία και οι μεταφράσεις των χημικών όρων.....	7
2.1.3 Το γενεαλογικό δέντρο της κολλοειδούς πυριτίας.....	8
2.1.4 Το υγρόλυμα(aquasol) κολλοειδούς πυριτίας Ludox SM.....	8
2.1.5 Σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών.....	9
2.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΥΓΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΓΕΛΩΝ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	9
2.2.1 Γελοποίηση (Gelation).....	16
2.2.2 Ωρίμανση (Aging).....	21
2.2.3 Ξήρανση (Drying).....	22
2.2.4 Μηχανισμοί μεταφοράς των σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας (Colloidal silica transport mechanisms).....	24
2.2.4.1 Μηχανισμός μεταγωγής – υδροδυναμικής διασποράς(advection – hydrodynamic dispersion mechanism).....	24
2.2.4.2 Μηχανισμός διάχυσης(diffusion mechanism).....	31
2.2.5 Η αντίδραση της συμπύκνωσης(condensation reaction) μέσα στο εδαφικό πορώδες.....	37
2.2.5.1 Στερεοποίηση σταθεροποιημένου εδάφους και μηχανισμός αυτό – ίασης(consolidation of stabilized soil and self – healing mechanism).....	38
2.2.5.2 Μηχανισμός πυρηνοποίησης κατά τον σχηματισμό της γέλης μέσα στο εδαφικό πορώδες(nucleation mechanism during gelation inside the pores of the soil).....	44
2.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2.....	46
2.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2:.....	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	98
3.1 ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	98
3.1.1 Η φυσική άμμος M31.....	98
3.1.2 Η φυσική ιλύς D6.....	98
3.1.3 Η ιλυώδης άμμος M31 – D6.....	98
3.1.4 Παράμετροι γραμμής κρίσιμης κατάστασης φυσικών εδαφών.....	99
3.2 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	99

(UNCONFINED COMPRESSION TESTS) – ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ	99
3.2.1 Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη ως δείκτης επιτυχίας της παθητικής σταθεροποίησης των ρευστοποιήσιμων εδαφών με κολλοειδή πυριτία.....	99
3.2.2 Συγκριτική παράθεση της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη διάφορων μη συνεκτικών εδαφών σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία	101
3.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3	102
3.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3:.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ	112
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ	112
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	112
4.2.1 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική άμμο M31 ..	113
4.2.2 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη άμμο M31.....	115
4.2.3 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική ιλυώδη άμμο M31 – D6	125
4.2.4 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο M31 – D6.....	129
4.2.5 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες σε φυσική άμμο M31	133
4.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4(ΕΚΤΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ Π4-1 ΕΩΣ Π4-4):	137
4.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4:.....	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ	145
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ	145
5.1.1 Περιγραφή εξοπλισμού.....	145
5.1.2 Περιγραφή ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης στα μη σταθεροποιημένα εδάφη	146
5.1.3 Περιγραφή ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης στα σταθεροποιημένα εδάφη.....	147
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	152
5.2.1 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα μη σταθεροποιημένα εδάφη.....	152
5.2.2 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα σταθεροποιημένα εδάφη.....	153
5.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5(ΕΚΤΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ Π5-1 ΚΑΙ Π5-2):	155
5.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5:.....	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ.....	162
6.1 ΓΙΑΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΛΚΥΣΤΙΚΗ Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ	162

6.2 ΥΓΡΟΛΥΜΑ ΚΑΙ ΓΕΛΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ	163
6.3 ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Ο ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ	169
6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	169
6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ.....	171
6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΩΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	172
6.7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	174
6.8. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6	175
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	194

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών, 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 (Gallagher 2000). Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η κατανόηση των φυσικοχημικών διαδικασιών του υγρολύματος και της γέλης κολλοειδούς πυριτίας, η αποσαφήνιση του πώς αυτές οι διαδικασίες επηρεάζουν τους μηχανισμούς μεταφοράς των κολλοειδών μέσα στους εδαφικούς πόρους και κυρίως, πώς επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των σταθεροποιημένων εδαφών. Η μηχανική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 και του μίγματος άμμου M31 με ιλύ D6 (85% κ.β. & 15% κ.β., αντίστοιχα) διερευνήθηκε με την εκτέλεση μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης και ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Τα αποτελέσματα ερμηνεύτηκαν μέσα από ένα φυσικοχημικό πρίσμα.

Όσον αφορά τη δομή της εργασίας, στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων, του υγρολύματος και της γέλης κολλοειδούς πυριτίας. Παρουσιάζονται η δομή και οι ιδιότητες της επιφάνειας των κολλοειδών σωματιδίων, οι οποίες είναι καθοριστικές για όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες. Αναλύεται η χημική αντίδραση της συμπύκνωσης (condensation reaction) που οδηγεί στην ένωση των κολλοειδών σωματιδίων με δεσμούς σιλοξάνης. Ο σχηματισμός τέτοιων δεσμών μετατρέπει το υγρόλυμα σε γέλη. Κατά το μεταβατικό αυτό στάδιο αναλύονται τα ρεολογικά χαρακτηριστικά και η ξωδοελαστική συμπεριφορά του υγρολύματος και της γέλης. Έμφαση δίνεται στους παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό της συμπύκνωσης και επιταχύνουν τον σχηματισμό της γέλης. Η επίδραση αυτών των παραγόντων έχει διερευνηθεί πειραματικά από διάφορους ερευνητές, το έργο των οποίων παραθέτουμε. Εκτός από τη διαδικασία σχηματισμού της γέλης, παρουσιάζονται και τα στάδια της ωρίμανσης αλλά και της ξήρανσής της. Στη συνέχεια περιγράφονται οι μηχανισμοί μεταφοράς των κολλοειδών σωματιδίων μέσω μεταγωγής, υδροδυναμικής διασποράς και διάχυσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του μηχανισμού σχηματισμού της γέλης μέσα στο εδαφικό πορώδες. Η αντίδραση της συμπύκνωσης φαίνεται να εξελίσσεται με διαφορετικό τρόπο μέσα στους πόρους του εδάφους από ότι μέσα σε ένα μεγάλο δοχείο. Μελετώνται, επομένως, οι συνέπειες πάνω στη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους, ενός τέτοιου μηχανισμού.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές. Τα σταθεροποιημένα κοκκώδη εδαφικά υλικά αποκτούν ένα είδος συνοχής, λόγω της ενθυλάκωσής τους από τη γέλη. Παρουσιάζονται, επομένως, οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα εδάφη. Τέτοιες δοκιμές εκτελούνται ως ένας ποιοτικός έλεγχος της επιτυχίας της σταθεροποίησης.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσικά και σταθεροποιημένα εδάφη. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών και γίνεται η προσπάθεια να ερμηνευτεί η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών, υπό την επίδραση των φυσικοχημικών διεργασιών της γέλης πυριτίας.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται η διαδικασία εκτέλεσης και τα αποτελέσματα δοκιμών ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσικά και σταθεροποιημένα

εδαφικά υλικά. Η ερμηνεία της μηχανικής συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων εδαφών γίνεται και πάλι σε συνδυασμό με τις φυσικοχημικές ιδιότητες της πυριτίας.

Τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας και προτάσεις για σχετική μελλοντική έρευνα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες με τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που εκτελέστηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων. Τα επιμέρους παραρτήματα Π4-1 έως Π4-4 αφορούν τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης και μερικές μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης. Τα παραρτήματα Π5-1 και Π5-2 αφορούν τις ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΟΛΛΟΕΙΔΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑ

2.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

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

2.1.1 Η κολλοειδής κλίμακα μεγεθών

Η κολλοειδής επιστήμη μελετά συστήματα που περιλαμβάνουν κινητικές ομάδες, οι οποίες έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τις ατομικές διαστάσεις και ταυτόχρονα αρκετά μικρό, ώστε να μην επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις. Κολλοειδή σωματίδια θεωρούνται όσα έχουν μέγεθος μικρότερο από 1 μm και μεγαλύτερο από 1nm, οπότε διαφοροποιούνται αισθητά από τα αιωρήματα και από τα πραγματικά διαλύματα. Τα κολλοειδή σωματίδια μπορεί να είναι διακριτά, όπως για παράδειγμα ένα πλήθος σκεδασμένων σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας μέσα στον υδάτινο διασπορέα πριν τη γελοποίηση. Μπορεί, επίσης, να είναι μη διακριτά, όπως ένα συνεχές δίκτυο από διασυνδεδεμένα κολλοειδή σωματίδια πυριτίας μετά τη γελοποίηση. Κολλοειδές θεωρείται το σωματίδιο που έχει τρεις, δύο ή μόνο μία από τις διαστάσεις τους στο εύρος των κολλοειδών μεγεθών (π.χ. συμπαγή σφαιρικά σωματίδια κολλοειδούς πυριτίας, λεπτά δισκοειδή φιλμ πυριτίας ή πορώδεις πυριτικές ίνες). Ένα κολλοειδές σωματίδιο που το μέγεθός του ή η μία του διάσταση είναι στο εύρος 1 nm – 1 μm(10 Å – 10,000 Å, όπου 1 Angstrom= 10⁻¹⁰ m) αποτελείται από μία ομάδα 10³ – 10⁹ ατόμων, με την ατομική κλίμακα μεγεθών της κλασικής χημείας να αφορά διαστάσεις < 0.50 nm. Τα άτομα ενός κολλοειδούς σωματιδίου μπορεί να διατάσσονται σε κρυσταλλική ή σε άμορφη δομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [4].

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των σωματιδίων της κολλοειδούς κατάστασης υποδηλώνουν τεράστιους λόγους επιφάνειας / όγκου ή επιφάνειας / μάζας. Οι Bergna και Roberts [4] αναφέρουν το παράδειγμα τεμαχισμού ενός κύβου με ακμή 1 m σε χίλιους μικρότερους κύβους με ίδια συνολική μάζα και όγκο, αλλά με 10 φορές μεγαλύτερη επιφάνεια. Η κατάτμηση σε μικρότερες δομικές μονάδες δεκαπλασίασε τους παραπάνω λόγους. Ο Bardet [3] αναφέρει ότι η *ειδική επιφάνεια*(*specific area*) ενός εδαφικού υλικού, η οποία είναι η συνολική επιφάνεια των εδαφικών σωματιδίων ανά μονάδα μάζας, είναι αντιστρόφως ανάλογη της ισοδύναμης διαμέτρου D. Αν θεωρήσουμε ένα σωματίδιο αργίλου με ισοδύναμη διάμετρο D=10⁻⁶ m και ειδική επιφάνεια 2.3 m²/g (μεγέθη από Bardet [3]) μπορούμε να εκτιμήσουμε την ειδική επιφάνεια των νάνο - σωματιδίων της κολλοειδούς πυριτίας με την εμπορική ονομασία Ludox-SM και με διάμετρο σωματιδίου 7 nm. Η απλή αναλογία με το αντίστροφο της διαμέτρου εκτιμά ειδική επιφάνεια ίση με 1000/7*2.3=328 m²/g. Η τιμή που ορίζουν οι προδιαγραφές του παραγωγού είναι 345 m²/g. Είναι προφανές ότι, σωματίδια με τόσο μικρές διαστάσεις και με τόσο μεγάλους λόγους επιφάνειας / όγκου ή επιφάνειας / μάζας αλληλεπιδρούν με έναν ιδιαίτερο τρόπο που καθορίζεται από τις ιδιότητες των επιφανειών και των δι - επιφανειών. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης είναι κυρίως ηλεκτροστατικές(απωστικές) και δυνάμεις τύπου van der Waals(ελκτικές). Η ηλεκτροστατική άπωση οφείλεται στη φορτισμένη στρώση στην

επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων(charged surface layer) και οι ελκτικές δυνάμεις τύπου van der Waals - London μεταξύ των μορίων, προκύπτουν εξαιτίας της μόνιμης ή παροδικής πόλωσης. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές περιγράφονται εκτενώς στα συγγράμματα των Bergna και Roberts [4], των Brinker και Scherer [5] και στο σύγγραμμα του Jim Goodwin [17]. Σε αυτό το σημείο δεν θα εμβαθύνουμε περισσότερο στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης, αλλά θα αναφέρουμε ότι, όταν υπερτερούν οι απωστικές δυνάμεις τα σωματίδια παραμένουν σκεδασμένα στον υγρό διασπορέα(σταθερή διασπορά / υγρόλυμα – stable sol), ενώ όταν υπερνικηθούν οι απωστικές δυνάμεις από τις ελκτικές, τα σωματίδια συνενώνονται και το υγρόλυμα / διασπορά μετατρέπεται σε γέλη. Προαναφέροντας τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας μπορούμε να αποφανθούμε ότι, η συνάφεια της γέλης(που έχει σχηματιστεί στους πόρους του εδάφους) με τους κόκκους του εδαφικού σχηματισμού προσδίδει ένα είδος *συνεκτικότητας* στην εδαφική μάζα και την προστατεύει από την κατάρρευση λόγω σεισμικής ρευστοποίησης.

2.1.2 Η ορολογία και οι μεταφράσεις των χημικών όρων

Ξεκινώντας την παρουσίαση των βασικών αρχών της χημείας της κολλοειδούς πυριτίας κρίνουμε σκόπιμο ότι χρειάζεται να αποσαφηνίσουμε τη χρησιμοποιούμενη ορολογία στην ελληνική και στην αγγλική γλώσσα. Όπως αναφέρουν οι Bergna και Roberts [4], μία σταθερή διασπορά(stable dispersion) στερεών κολλοειδών σωματιδίων σε υγρό διασπορέα ονομάζεται στην αγγλική γλώσσα “sol”. Η αντίστοιχη λέξη στην ελληνική είναι το «υγρόλυμα», όπου το μέσο διασποράς είναι υγρό και η διεσπαρμένη ουσία είναι στερεή [43]. Τα κολλοειδή σωματίδια δεν είναι αρκετά μικρά ώστε όταν διασπείρονται στην υγρή φάση το μίγμα να παρουσιάζει τις ιδιότητες των πραγματικών διαλυμάτων(true solutions). Στα πραγματικά διαλύματα η διαλυμένη ουσία δεν υφίσταται ως στερεό και το μίγμα διαλύτη - διαλυμένης ουσίας είναι ομογενές. Επίσης, τα κολλοειδή σωματίδια δεν είναι αρκετά μεγάλα(>1000 nm) ώστε η διασπορά να χαρακτηριστεί ως αιώρημα(suspension). Τα κολλοειδή σε αντίθεση με τα αιωρήματα δεν καθιζάνουν λόγω των μικρών διαστάσεων τους. Όταν ο υγρός διασπορέας είναι νερό, τότε η διασπορά ονομάζεται στην αγγλική “aquasol ή hydrosol”, ενώ όταν είναι οργανικός η διασπορά ονομάζεται “organosol”. Ο όρος γέλη(gel) αφορά ένα σύστημα που αποτελείται από έναν *συνεχή στερεό σκελετό*, ο οποίος συντίθεται από κολλοειδή σωματίδια ή πολυμερή και περιβάλλει μία *συνεχή υγρή φάση*. Η γέλη, δηλαδή, περιέχει πόρους στη μάζα της. Αυτοί οι πόροι είναι αρχικά γεμάτοι με υγρό διασπορέα και κάποια ποσότητα αιωρούμενης κολλοειδούς ουσίας, που δεν έχει ενωθεί ακόμα στην σκελετική στερεά δομή. Συχνά θα αναφέρουμε στη συνέχεια ότι η στερεά σκελετική δομή είναι *κλειστή*. Με τον όρο αυτόν διαχωρίζουμε τη διαδικασία της γελοποίησης(gelation), η οποία δημιουργεί ένα μεμονωμένο, μεγάλο σύμπλεγμα αλυσίδων, από άλλες διαδικασίες συσσωμάτωσης(π.χ. κροκίδωση: flocculation) που οδηγούν σε μη συνδεδεμένα συσσωματώματα τα οποία καθιζάνουν. Δεν εννοούμε ότι οι πόροι είναι κλειστοί και δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Η ξήρανση(drying) της γέλης μέσω εξάτμισης υπό συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης μετατρέπει τη γέλη σε ξηρό - γέλη(xerogel). Η ξηρό - γέλη μειώνει τον όγκο της 5 έως 10 φορές σε σχέση με την υγρή γέλη. Η συρρίκνωση οφείλεται στις *τριχοειδείς δυνάμεις(capillary forces)* που ασκούνται στον σκελετό και τον συμπιέζουν καθώς η υγρή φάση εγκαταλείπει τους πόρους. Η ξηρό - γέλη περιέχει ακόμα μία ποσότητα χημικά δεσμευμένου νερού [4], [5]. Η ξήρανση της υγρής γέλης σε αεροστεγή κλίβανο υπό συνθήκες πέραν από το *κρίσιμο σημείο(critical point)* του υγρού των πόρων εξαφανίζει την πίεση από τριχοειδείς δυνάμεις και επομένως περιορίζει την συρρίκνωση ξήρανσης. Το προϊόν που προκύπτει αποτελείται κυρίως από αέρα, με περιεκτικότητα σε στερεή φάση της τάξεως 0.10% κατ’ όγκο και ονομάζεται αέρο - γέλη(aerogel). Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η εξαφάνιση της πίεσεως από τριχοειδείς δυνάμεις που αναφέρει η βιβλιογραφία οφείλεται στο γεγονός ότι πέραν από το κρίσιμο σημείο($P > P_{cr}$ και $T > T_{cr}$) στο διάγραμμα φάσης πίεσης P – θερμοκρασίας T (δηλαδή για σταθερό όγκο $V = \text{σταθ.}$) υπάρχει η περιοχή του *υπερκρίσιμου ρευστού(supercritical fluid)*. Σε αυτήν την

κατάσταση η υγρή και η αέρια φάση είναι *αδιαχώριστες*. Το υλικό τείνει να εισέλθει στην αέρια φάση λόγω υψηλής θερμοκρασίας, αλλά παράλληλα τείνει και προς την υγρή φάση λόγω της υψηλής πίεσης. Επομένως, η πίεση λόγω των τριχοειδών δυνάμεων(capillary pressure), που αναπτύσσεται κατά την ξήρανση υπό φυσιολογικές συνθήκες, εξαλείφεται υπό υπερκρίσιμες συνθήκες.

Εκτός από διασπορές στερεών κολλοειδών σε υγρό διασπορέα υπάρχουν και διασπορές σε αέριο διασπορέα, που ονομάζονται στην αγγλική “aerosols”. Από τις αέρο - διασπορές / αερολύματα προκύπτουν, ύστερα από συμπύκνωση(condensation) υπό υψηλές θερμοκρασίες, οι πυρογενείς σκόνες(powders). Ένα παράδειγμα πυρογενούς σκόνης είναι η πυρογενής πυριτία(fumed or pyrogenic silica). Σκόνες που παράγονται ύστερα από πάγωμα μίας υγρής διασποράς(sol) ονομάζονται στην αγγλική “cryogels”.

2.1.3 Το γενεαλογικό δέντρο της κολλοειδούς πυριτίας

Τα είδη της εμπορικά διαθέσιμης *κολλοειδούς πυριτίας*(θηλυκό γένος) έχουν τη μορφή υγρών ή αέριων διασπορών(sols or aerosols), ξηρών ή αέριων γελών(xerogels or aerogels). Το κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των ειδών είναι το *κολλοειδές σωματίδιο πυριτίας*, το μέγεθος του οποίου καθορίζει την ειδική επιφάνεια του προϊόντος και άρα τις περισσότερες ιδιότητές του [4]. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τον σχηματισμό κολλοειδών πυριτικών υγρολυμάτων, γελών και σκονών.

2.1.4 Το υγρόλυμα(aquasol) κολλοειδούς πυριτίας Ludox SM

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο της εισαγωγής, η παρούσα εργασία συνδέεται στενά με το έργο που έχει εκτελεστεί από το εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος: «Θαλής – Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας: Αποτροπή Σεισμικής Ρευστοποίησης Εδάφους Θεμελίωσης Υφιστάμενων Κατασκευών μέσω Εμπλουτισμού του Υγρού Πόρων με Περιβαλλοντικώς Ασφαλή Νανοσωματίδια», με κωδικό MIS 375618. Η κολλοειδής πυριτία που χρησιμοποιήθηκε για την σταθεροποίηση των εδαφικών δοκιμών έχει την εμπορική ονομασία Ludox® SM(προϊόν της Sigma - Aldrich®) και είναι μία υδάτινη διασπορά(water dispersion ή aquasol) διακριτών, σφαιρικών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με μέγεθος στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους(7 nm). Τα σωματίδια είναι συμπαγή(μη πορώδη) και δεν εμφανίζουν περιοδική κρυσταλλική δομή(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(άνυδρο υδροξείδιο του νατρίου NaOH). Το ιξώδες του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP. Η τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτήν του νερού, το οποίο ισούται με 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία. Μετά την αραίωση του υγρολύματος το ιξώδες του παίρνει ακόμα μικρότερη τιμή. Με τον όρο σταθεροποιημένο υγρόλυμα εννοούμε ότι οι απωστικές δυνάμεις αποτρέπουν τη συσσωμάτωση των κολλοειδών σφαιριδίων και τη γελοποίηση, ενώ με τον όρο σταθεροποιημένο έδαφος εννοούμε το έδαφος που έχει στους πόρους του γέλη πυριτίας.

Το σωματίδιο της κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Έχει αναπτυχθεί στο μέγεθος των 7 nm ύστερα από διαδοχικό πολυμερισμό και συμπύκνωση(polymerization and condensation) της *βασικής τετραεδρικής μονάδας* [SiO₄]⁴⁻, ώστε να προκύψει ένα μη κρυσταλλικό τρισδιάστατο δίκτυο διασυνδεδεμένων τετραέδρων. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση των σωματιδίων της κολλοειδούς πυριτίας ξεκινά με τη συμπύκνωση - πολυμερισμό του *ορθοπυριτικού οξέος* H₄SiO₄(ή *υδροξο - σύνθετου πυριτίου* Si(OH)₄ σύμφωνα με τον Railsback [29]) που οδηγεί στην εμφάνιση ομάδων σιλανόλης Si - OH στην επιφάνεια των παραγόμενων ολιγομερών, κατά το Σχήμα 2.4. Στη συνέχεια τα ολιγομερή πολυμερίζονται περαιτέρω και σχηματίζουν τα σωματίδια κολλοειδούς πυριτίας. Η παρασκευή ομοιόμορφων σωματιδίων συγκεκριμένου μεγέθους επιτυγχάνεται με

ελεγχόμενες διαδικασίες πυρηνοποίησης(nucleation), πολυμερισμού(polymerization) και ανάπτυξης(growth). Όταν τα σωματίδια φτάσουν στο επιθυμητό μέγεθος το υγρόλυμα σταθεροποιείται με προσθήκη αλκαλικού παράγοντα. Όταν είναι επιθυμητή η αποσταθεροποίηση του υγρούλυματος τότε επιτυγχάνεται με προσθήκη οξέως και αλάτων, οπότε επιταχύνεται η γελοποίηση. Η σύνδεση των σωματιδίων κατά τη γελοποίηση(gelation) γίνεται με τον σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης και την αποβολή νερού που παραμένει στους πόρους της γέλης, κατά το Σχήμα 2.5.

Η επιφανειακή δομή των σωματιδίων παίζει καθοριστικό ρόλο σε όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες της κolloειδούς πυριτίας. Οι Brinker και Scherer [5] αναφέρουν πως, δεδομένου ότι η αντίδραση συμπύκνωσης(condensation reaction) είναι εξώθερμη κάθε άτομο πυριτίου Si προσπαθεί να περικυκλώσει τον εαυτό του με τέσσερις δεσμούς σιλοξάνης $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ (siloxane bonds). Τα σωματίδια που βρίσκονται στο κάτω όριο του κolloειδούς εύρους έχουν περισσότερα από 50% των ατόμων πυριτίου Si στην επιφάνειά τους, οπότε πρέπει να έχουν έναν ή περισσότερους δεσμούς σιλανόλης $\equiv\text{Si-OH}$ (silanol bonds). Για την ακρίβεια έχει υπολογιστεί η επιφανειακή πυκνότητα τουλάχιστον 4.6 ομάδων σιλανόλης $\equiv\text{Si-OH}$ ανά τετραγωνικό νανόμετρο nm^2 (Bergna και Roberts [4], p.26). Ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η τιμή αυτή αποτελεί μία φυσικοχημική σταθερά ανεξάρτητη από την προέλευση και τα δομικά χαρακτηριστικά της πυριτίας και ονομάζεται *αριθμός σιλανόλης*(silanol number). Το εσωτερικό του σωματιδίου αποτελείται από μία *πυκνή διάταξη* ομάδων διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 ανά 1000 \AA^3 . Η επιφάνεια των σωματιδίων της κolloειδούς πυριτίας παρουσιάζει επομένως μία *υδροξυλιωμένη στρώση*, η οποία αποβάλλει πρωτόνια H^+ και φορτίζεται αρνητικά όταν ο διασπορέας είναι αλκαλικός και απουσιάζουν τα άλατα. Η ηλεκτροστατική άπωση των σωματιδίων λόγω αυτής της στρώσης εξασφαλίζει την σταθερότητα της διασποράς [4], [5], [32]. Η ελεγχόμενη γελοποίηση της διασποράς επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του pH και την προσθήκη αλάτων που συρρικνώνουν τη φορτισμένη στρώση.

Η κolloειδής 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. Για την καλύτερη διατήρησή της προτείνεται η αποθήκευση σε ξηρό περιβάλλον θερμοκρασίας 20-25°C. Η διάρκεια ζωής της πυριτίας ξεπερνά τα 25 έτη και τα βασικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1(ερευνητικό MIS 375618, Θαλής – Π.Θ.).

2.1.5 Σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών

Μία σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών(sol-gel processing) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Η αρίθμηση των διαδικασιών αντιστοιχεί στα κεφαλαία του συγγράμματος των Brinker and Scherer [5], όπου περιγράφεται εκτενώς η κάθε διαδικασία. Οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι, μόνο ορισμένες από τις διαδικασίες που παρουσιάζονται στο σχήμα σχετίζονται με τη σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών με κolloειδή πυριτία. Χρειάζεται όμως μία γενικότερη εποπτεία για να κατανοήσουμε τη μηχανική φύση του προβλήματος μέσα από μία φυσικοχημική σκοπιά.

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

Από όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες των υγρούλυμάτων και των γελών που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6, ορισμένες σχετίζονται άμεσα με την παθητική σταθεροποίηση των ρευστοποιήσιμων εδαφών μέσω διοχέτευσης κolloειδούς πυριτίας στους εδαφικούς πόρους. Για παράδειγμα, οι παράγοντες που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του υγρούλυματος(stability of aquasol) και αποτρέπουν τη γελοποίησή του(gelation) 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 υγρόλυμα πυριτίας που έχει αντικαταστήσει το νερό των εδαφικών πόρων δεν θα αντικατασταθεί εκ νέου από νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ούτε θα αραιώσει σημαντικά λόγω διάχυσης.

Η κατανόηση των μηχανισμών γελοποίησης, ωρίμανσης και ξήρανσης μέσα από μία *φυσικοχημική σκοπιά*, καθώς και η εμπειρική παρατήρηση στο εργαστήριο μάς 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 στα πειράματα δεν μετριέται), 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 (gelation), [37], [23]. 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 περιγράψουμε 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, δηλαδή υπό *αεροστεγείς συνθήκες και με σταθερή υγρασία*. Αν η γέλη ξεραθεί, το δοκίμιο συμπεριφέρεται σαν φυσική άμμος, με την έννοια ότι δεν παρουσιάζει συνεκτικότητα και δεν διατηρεί τη δομή της χωρίς περίσφιγξη. Το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει ένα σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου (με CS=10% wt.) το οποίο αποθηκεύτηκε μέσα σε νερό για 45 ημέρες, μετά από ωρίμανση 30 ημερών. Το δοκίμιο όσο βρισκόταν σε υγρό περιβάλλον διατηρούσε τη δομή του, ενώ δεν γινόταν αισθητά πιο μαλακό ή πιο εύθρυπτο. Στη συνέχεια αφέθηκε εκτεθειμένο στον αέρα να ξεραθεί. Το αποτέλεσμα ήταν η σταδιακή μετάπτωση σε μία *ψαθυρή και εύθρυπτη δομή*, από τις πρώτες κιόλας ώρες. Όταν η ξήρανση ολοκληρώθηκε, η άμμος κατέρρεε με το άγγιγμα.

Μία δεύτερη τοποθέτηση που παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία αφορά τη *συμπιεστότητα της κολλοειδούς πυριτίας*. Η καθαρή κολλοειδής πυριτία μετά τη γελοποίηση και την ωρίμανσή της είναι μία πολύ μαλακή, ελαστική, υδαρής μάζα, η οποία παρουσιάζει αμελητέα αντίσταση σε διάτμηση (βλέπετε Σχήματα 2.8 και 2.9). Γεννιέται λοιπόν εύλογα η απορία πώς η προσθήκη της ασθενούς πυριτίας στους πόρους του εδάφους αυξάνει την αντοχή της σταθεροποιημένης μάζας. Ο Towhata [37] αναφέρει την ερμηνεία του H. Di Benedetto 2001, που υποστηρίζει ότι η απάντηση βρίσκεται στη συμπιεστότητα της μαλακής πυριτίας. Η πυριτία όντας συμπιεστή (επειδή είναι μαλακή σύμφωνα με τους Towhata, Di Benedetto) οδηγεί, μέσω της μείωσης του όγκου της, σε μικρότερη ανάπτυξη πίεσης πόρων. Η σύγκριση γίνεται αναφορικά με την πίεση που θα ανέπτυξε το πρακτικά ασυμπιεστό νερό στους πόρους του φυσικού εδάφους, όταν το αυτό τείνει να συσταλεί. Δηλαδή, ο εδαφικός σκελετός τείνει να συσταλεί κατά την αστράγγιστη διάτμηση και το νερό των πόρων αποτρέπει τη μείωση του όγκου με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης. Αντίθετα, η γέλη στους πόρους επιτρέπει μία μεγαλύτερη μείωση όγκου που συνοδεύεται από μία μικρότερη αύξηση πίεσης. Αυτό το επιχείρημα εύκολα αποδεικνύεται ασταθές, όταν αναλύσουμε τη δομή της πυριτίας μέσα από μία φυσικοχημική σκοπιά και όχι από μία αισθητηριακή. Το γεγονός ότι η πυριτία είναι

μαλακή ουδεμία σχέση έχει με τη συμπιεστότητά της. Το νερό είναι, επίσης, ιδιαίτερα μαλακό στη διεύθυνση(αντιστέκεται η επιφανειακή τάση) αλλά πρακτικά ασυμπιέστο. Μάλιστα, όπως έχουμε ήδη περιγράψει, η κορεσμένη γέλη κολλοειδούς πυριτίας αποτελείται από έναν στερεό σκελετό πολυμερών σωματιδίων πυριτίας που περικλείει μία υγρή φάση. Τα σωματίδια της πυριτίας Ludox – SM είναι συμπαγή και το εσωτερικό τους είναι μία ιδιαίτερα πυκνή διάταξη SiO_2 , επομένως είναι ασυμπιέστα. Η στερεή σκελετική φάση είναι ασυμπιέστη, αλλά μπορεί να ενδίδει αν επιτρέπεται η αποβολή υγρού από τους πόρους της γέλης. Η υγρή φάση που περικλείεται στους πόρους είναι νερό μαζί με ένα ποσοστό σκεδασμένων αιωρούμενων σωματιδίων πυριτίας. Συμπεραίνουμε ότι και η υγρή φάση είναι ασυμπιέστη, άρα και όλη η δομή της γέλης είναι ασυμπιέστη υπό αστράγγιστες συνθήκες. Την τοποθέτηση αυτήν υποστηρίζει και η βιβλιογραφία. Οι Brinker and Scherer [5] αναφέρουν ότι η υγρή φάση είναι πρακτικά ασυμπιέστη και αποτρέπει τη μείωση όγκου της γέλης, ενώ αν αυτή αφαιρεθεί, ή επιτραπεί η στράγγισή της, το σκελετικό δίκτυο ενδίδει υπό ισότροπη πίεση. Η ενδοσιμότητα του στερεού σκελετού οφείλεται στην αραιή διάταξη των αλυσίδων των κολλοειδών πολυμερών, ενώ τα ίδια τα σωματίδια είναι προφανώς ασυμπιέστα και οι δεσμοί τους είναι ιδιαίτερα ισχυροί. Οι Style και Perrin [33] αναφέρουν ότι λαμβάνουν στο μοντέλο τους ασυμπιέστη την υγρή και τη στερεή φάση της γέλης που προκύπτει από κολλοειδή υγρή διασπορά. Ο Zhigang Suo, αρχιτέκτονας της ιστοσελίδας iMechanica και ακαδημαϊκός, εξηγεί στην ιστοσελίδα του γιατί το καουτσούκ(rubber) είναι πρακτικά ασυμπιέστο παρόλο που είναι μαλακό, υποστηρίζοντας ότι αυτό οφείλεται στην σχεδόν υγρή φύση του. Οι διασυνδεδεμένες, μέσω ομοιοπολικών δεσμών, αλυσίδες πολυμερών του καουτσούκ του προσδίδουν στερεή μορφή. Σε επίπεδο μεμονωμένων αλυσίδων μακρό - μορίων ή σε επίπεδο μονομερών το καουτσούκ θα ήταν υγρό, όπως το φυσικό υγρό λατέξ. Η δομή αυτή και η συμπεριφορά του καουτσούκ παρουσιάζει ουσιαστική ομοιότητα και αναλογία με τις αλυσίδες πολυμερών της γελοποιημένης πυριτίας. Η ομοιότητα έγκειται στο γεγονός ότι το υγρόλυμα πυριτίας αποκτά ψευδο - στερεή δομή, όταν δημιουργηθούν πολλοί δεσμοί μεταξύ των αλυσίδων σωματιδίων πυριτίας. Είναι, επομένως, πρακτικά ασυμπιέστη όπως τα υγρά ενώ ταυτόχρονα είναι πολύ μαλακή και παρουσιάζει αμελητέα μέτρα διάτμησης και ελαστικότητας.

Ο Towhata [37] αναφέρει ακόμα ότι, ύστερα από δοκιμές ανεμπόδισης θλίψης σε καθαρή πυριτία, *με μέτρηση των αξονικών και των εγκάρσιων παραμορφώσεων* κατά τη διάταξη του Σχήματος 2.9, προσδιορίστηκε λόγος Poisson περίπου ίσος με 0.30. Ισχυρίζεται ότι η απόκλιση από την τιμή $\nu=0.50$ αποδεικνύει ότι το υλικό είναι συμπιεστό. Ας εξετάσουμε τη συλλογιστική πίσω από αυτήν τη διατύπωση. Εφόσον τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης της γέλης πυριτίας είναι αμελητέα, για να είναι πρακτικά ασυμπιέστη θα πρέπει ο λόγος του Poisson να τείνει στο 0.50. Αυτό προκύπτει από τη σχέση της θεωρίας Ελαστικότητας $K=E/[3*(1-2\nu)]$, η οποία συνδέει το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K με το μέτρο ελαστικότητας E . Αντιστρέφοντας τον συλλογισμό, αν ο λόγος του Poisson αποκλίνει από τη τιμή 0.50 αυτό αποδεικνύει ότι είναι συμπιεστή.

Σχετικά με αυτόν τον ισχυρισμό παρατηρούμε, αρχικώς, ότι η γέλη πυριτίας αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό(π.χ. $\geq 90\%$ wt.) από νερό. Το νερό συγκρατείται από τον αραιό στερεό σκελετό της γέλης με τριχοειδείς δυνάμεις(Bergna και Roberts [4], p.15) και με απορροφητική - προσροφητική δράση. Η δομή της πυριτικής γέλης μοιάζει με αυτήν των ελαστομερών γελών, όπως την περιγράφει ο Zhigang Suo [42], με τη διαφορά ότι ο σκελετός πυριτίας είναι πολύ πιο αραιός. Ο σκελετός αυτός έχει σχηματιστεί από τη συνένωση σωματιδίων με ομοιοπολικούς δεσμούς σιλοξάνης(Si-O-Si). Η γέλη είναι, δηλαδή, ένα διφασικό υλικό στο οποίο υπερισχύει ποσοτικά(κατά βάρος και κατ' όγκο) η υγρή φάση. Στο σύστημα αυτό υπάρχουν διαφορετικά είδη δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο φάσεων. Μία πρώτη λογική σκέψη είναι να αντιμετωπίσουμε το υλικό ως πρακτικά ασυμπιέστο υγρό νερό και όχι ως στερεό με χαμηλά μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης. Στην περίπτωση των διφασικών υλικών, που αποτελούνται από έναν στερεό σκελετό με

υγρό μέσα στους πόρους, είναι απαραίτητο να ορίσουμε το μέτρο συμπίεσης υπό αστράγγιστες και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Το ίδιο ισχύει και για τον λόγο του Poisson. Στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης του Σχήματος 2.9 προφανώς δεν εμποδίζεται η στράγγιση.

Η χρήση της σχέσης της θεωρίας ελαστικότητας που συνδέει το μέτρο ισότροπης συμπίεσης με το μέτρο Young και τον λόγο του Poisson, $K=E/[3*(1-2\nu)]$, αμφισβητείται από τον Tabor [34], [35] στην περίπτωση του καουτσούκ. Ο Tabor υποστηρίζει ότι σε ένα στερεό οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού(E, G, K) σχετίζονται με τις ατομικές ή μοριακές δυνάμεις μεταξύ των δομικών του στοιχείων. Αν οι δυνάμεις αυτές είναι αποκλειστικά ενός είδους, δηλαδή δυνάμεις μεταξύ ομοιοπολικών ή ιοντικών δεσμών, ή δυνάμεις μεταξύ των κατιόντων ενός μετάλλου και της «θάλασσας» των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή δυνάμεις τύπου van der Waals, τότε τα μέτρα E, K και G είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Σε αυτήν την περίπτωση εύλογα συνδέονται μεταξύ τους, π.χ. με τις σχέσεις της θεωρίας ελαστικότητας. Στην περίπτωση, όμως, του καουτσούκ, το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας $E=100$ kPa και μέτρο ισότροπης συμπίεσης $K=2$ GPa, ο Tabor υποστηρίζει ότι οι δύο αυτές ιδιότητες σχετίζονται με διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς. Δεν έχει νόημα, επομένως, να συνδέονται με τη σχέση της θεωρίας ελαστικότητας. Μάλιστα, δεν είναι απαραίτητο να θεωρηθεί λόγος Poisson κοντά στην τιμή $\frac{1}{2}$ ώστε να δικαιολογηθεί η υψηλή τιμή του K σε σχέση με το E. Σύμφωνα με τον Tabor, το γεγονός ότι σε αντίθεση με σχεδόν όλα τα υπόλοιπα στερεά, το μέτρο ελαστικότητας E του καουτσούκ αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας, υποδηλώνει ότι αυτό σχετίζεται με την εντροπία(*entropy*) και όχι με τις διά - μοριακές δυνάμεις. Στο καουτσούκ με βάση τον άνθρακα ένα τεράστιο πλήθος από μονομερή συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν αλυσίδες πολυμερών. Οι αλυσίδες με τη σειρά τους συνδέονται σε διάφορα σημεία σχηματίζοντας ένα τρισδιάστατο στερεό δίκτυο. Αν υπάρχει ελευθερία στροφής περί τον ομοιοπολικό δεσμό άνθρακα – άνθρακα, οι αλυσίδες συστρέφονται σε τυχαίους σχηματισμούς, αυξάνοντας την εντροπία του συστήματος. Όταν το καουτσούκ εφελκύεται οι συστρεμμένες αλυσίδες τείνουν να ευθυγραμμιστούν σε μία πιο «τακτική» δομή και το καουτσούκ ανθίσταται σε αυτήν τη μείωση της εντροπίας. Αυτός είναι ο μηχανισμός που περιγράφει το μέτρο ελαστικότητας του καουτσούκ, το οποίο είναι ανάλογο της θερμοκρασίας και σχετίζεται με την εντροπία. Παρατηρούμε ότι, η εντροπία και η θερμοκρασία είναι *συζυγείς ποσότητες* στη Θερμοδυναμική. Αντίθετα, το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του καουτσούκ σχετίζεται με τις δυνάμεις van der Waals μεταξύ των ομάδων μεθυλενίου CH_2 του ενός μορίου, με τις αντίστοιχες ομάδες των γειτονικών μορίων. Με βάση αυτόν τον συλλογισμό ο Tabor προσδιορίζει με θεωρητικούς υπολογισμούς το μέτρο συμπίεσης K. Επίσης, θεωρεί χωρίς νόημα την εξαγωγή του λόγου Poisson ν από τα προσδιορισμένα πειραματικώς μέτρα E και K, με χρήση της σχέσης της θεωρίας ελαστικότητας, η οποία δίνει $\nu=0.499992$. Οι Tabor [34] και Treloar [38] ισχυρίζονται ότι το μέτρο ελαστικότητας του καουτσούκ δεν συνδέεται με κανέναν τρόπο με το μέτρο συμπίεσης. Αυτό αυξάνει τον σκεπτικισμό μας σχετικά με την εξαγωγή συμπερασμάτων για το μέτρο συμπίεσης της ψευδ - στερεής γέλης πυριτίας χρησιμοποιώντας τη σχέση ελαστικότητας και τον λόγο του Poisson.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναρωτηθούμε γιατί είμαστε τόσο προσκολλημένοι στον μαθηματικό φορμαλισμό, που ορίζει ότι καθώς ο λόγος του Poisson πλησιάζει την τιμή $\nu=0.50$ τα υλικά τείνουν να γίνουν ιδεατά ασυμπίεστα. Δεδομένου ότι κανένα υλικό δεν είναι τέλεια ασυμπίεστο, η τιμή $\nu=0.50$, που σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικότητας οδηγεί σε άπειρο μέτρο ισότροπης συμπίεσης, δεν υφίσταται *φυσικά*. Ο λόγος Poisson $\nu=0.50$ αποτελεί έναν βολικό τρόπο για να μηδενιστούν *λογιστικά* οι ογκομετρικές παραμορφώσεις [24], [25]. Οι Mott, Dorgan και Roland [24] *αποδεικνύουν* ότι πλησιάζοντας την τιμή $\nu=0.5$ το μέτρο συμπίεσης ιξωδοελαστικών υλικών είναι πεπερασμένο και *μειώνεται*. Η απόδειξη τους είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα πειραμάτων που εκτελέστηκαν σε δεκάδες πολυμερή. Ο λογιστικός μηδενισμός των παραμορφώσεων με χρήση της τιμής $\nu=0.50$ παρουσιάζεται στα παραδείγματα που ακολουθούν.

Ας φανταστούμε ότι εκτελούμε μία δοκιμή αστράγγιστης, τριαξονικής συμπίεσης ενός κορεσμένου με νερό αμμώδους δοκιμίου. Ας δεχτούμε ότι καθώς το δοκίμιο διατέμνεται βρίσκεται στη φάση που θα μείωνε τον όγκο του, αν ήταν ελεύθερο να στραγγίσει. Οι κόκκοι προσπαθούν να εκτοπίσουν το νερό των πόρων ώστε να επέλθει η συστολή. Το νερό(υγρό και απαερωμένο) είναι *πρακτικώς ασυμπίεστο* οπότε ενδίδει αμελητέα και *αυξάνει* την πίεσή του. Καθώς δεν υπάρχει συνήθως πρακτικό ενδιαφέρον σε επίπεδο εδαφομηχανικής για τον υπολογισμό αυτής της αμελητέας μείωσης του όγκου του νερού και των κόκκων θεωρούμε ότι η *διάτμηση υλοποιείται ισόογκα(και ταυτόχρονα υπάρχει τάση για μεταβολή του όγκου)*. Θέτουμε επομένως, την ογκομετρική παραμόρφωση κατά παραδοχή ίση με μηδέν: $\epsilon_{vol} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$. Υιοθετώντας τη δεύτερη παραδοχή ότι η βαρύτητα εξασφαλίζει *εγκάρσια ανισοτροπία(transverse anisotropy)*, προκύπτει ότι $\epsilon_y = \epsilon_x = -\epsilon_z/2$ (όπου ο z- άξονας είναι ο διαμήκης) και άρα ο *αστράγγιστος* λόγος του Poisson *συνεπάγεται* ότι είναι ίσος με $\nu_u = 0.5$. Η τιμή $\nu_u = 0.5$ αφορά διάτμηση(ή συμπίεση) κορεσμένου πορώδους μέσου με πρακτικά ασυμπίεστο υγρό στους πόρους, το οποίο δεν μπορεί να διαφύγει ή να εισρεύσει. Αν συνεχίσουμε να διατέμνουμε το δοκίμιο μπορούμε να δεχτούμε ότι μετά την τάση για συστολή επέρχεται(υπό προϋποθέσεις) η τάση για διαστολή και ύστερα επέρχεται η *πλαστική κατάσταση που είναι γνωστή ως κρίσιμη κατάσταση(critical state)*. Στην πλαστική κρίσιμη κατάσταση η διάτμηση εξελίσσεται *χωρίς να υπάρχει τάση για μεταβολή όγκου*, δηλαδή σε μία αστράγγιστη δοκιμή η πίεση των πόρων θα σταθεροποιούνταν. Σε αυτήν την πλαστική κατάσταση ισχύει: $d\epsilon_{vol} = d(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) = 0$ και έχει νόημα κατά παραδοχή ο *πλαστικός* λόγος Poisson: $\nu_{pl} = -d\epsilon_{pl,y}/d\epsilon_{pl,x} = 0.50$ [30], [16]. Η *ασυμπίεστη πλαστικότητα(incompressible plasticity)*, που είναι συνήθης παραδοχή στα μεταλλικά και σε άλλα υλικά, ορίζει ότι *το ογκομετρικό μέρος των αυξητικών πλαστικών παραμορφώσεων είναι μηδέν*, δηλαδή $d\epsilon_{vol,pl} = d(\epsilon_{pl,x} + \epsilon_{pl,y} + \epsilon_{pl,z}) = 0$ [6], [16], [30]. Η *ασυμπίεστη ελαστικότητα(incompressible elasticity)* με παραδοχή λόγου Poisson $\nu_{el} = 0.50$ και μέτρου ισότροπης συμπίεσης $K = \infty$ μηδενίζει το ογκομετρικό μέρος των ελαστικών παραμορφώσεων, δηλαδή $d\epsilon_{vol,el} = d(\epsilon_{el,x} + \epsilon_{el,y} + \epsilon_{el,z}) = 0$. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις ο μηδενισμός των ογκομετρικών παραμορφώσεων είναι *απόλυτος και λογιστικός*. Είναι παρόλα αυτά δικαιολογημένος σε επίπεδο εφαρμογών της Μηχανικής. Η αντίστροφη, όμως, συλλογιστική δεν αιτιολογείται. Η απόκλιση του λόγου Poisson από την τιμή 0.50, ανεξάρτητα από την τιμή των μέτρων E και G, δεν είναι απόδειξη συμπιεστότητας.

Παραμένει ένα ακόμα επιχείρημα προς εξέταση πίσω από τη διατύπωση του Towhata [37] ότι ο λόγος Poisson του δοκιμίου καθαρής πυριτιάς, ο οποίος μετρήθηκε ίσος με $\nu = 0.30$ σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, αποδεικνύει ότι το υλικό είναι συμπιεστό. Δεδομένου ότι οι αξονικές και οι εγκάρσιες παραμορφώσεις που μετρήθηκαν είναι σημαντικές σε τιμή(π.χ. $\epsilon_{ax} = +0.03$, $\epsilon_{lat} = -0.01$ κατά το Σχήμα 2.9) συνεπάγεται ότι και οι ογκομετρικές παραμορφώσεις είναι επίσης σημαντικές(π.χ. $\epsilon_{vol} = \epsilon_{zz} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{xx} = 0.01$). Οι παραμορφώσεις αυτές προέκυψαν υπό την ασήμαντη αξονική τάση των 5 kPa. Πιστεύουμε ότι αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η γέλη είχε υποστεί μερική ξήρανση και οι πόροι της περιείχαν αέρα και νερό κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Επίσης, η στράγγιση δεν ήταν εμποδιζόμενη [6]. Συγκρίνοντας τις φωτογραφίες στα Σχήματα 2.8 και 2.9 παρατηρούμε ότι η μη ξηραμένη γέλη που έχει κορεσμένους με νερό πόρους έχει πολύ υδαρή και μαλακή μορφή. Το υγρό των πόρων αποκαλύπτεται αμέσως αν τραυματιστεί ο στερεός σκελετός, δεδομένου ότι η στερεά φάση είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής μάζας και του συνολικού όγκου. Στη φωτογραφία του Σχήματος 2.9 το δοκίμιο γέλης με περιεκτικότητα σε πυριτία 6.5%(και με νερό 93.5%) δεν έχει καθόλου υδαρή μορφή, ούτε αποκαλύπτει υγρό πόρων μετά την καταστροφή του. Η διαδικασία της γελοποίησης(gelation) δεν πρέπει να συγχέεται με τη διαδικασία της πήξης - στερεοποίησης(freezing - solidification), δηλαδή με την αλλαγή φάσης ενός υγρού σε στερεό. Η υγρή φάση του λύματος παραμένει στους πόρους της γέλης μετά τον σχηματισμό του στερεού σκελετού. Μάλιστα, προκύπτει και νέα ποσότητα νερού κατά την αντίδραση της

συμπύκνωσης(water condensation). Η μερική καταστροφή του σκελετού σε μία πλήρως κορεσμένη γέλη πρέπει να αποκαλύπτει την υγρή φάση. Αν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, τότε προφανώς η γέλη έχει εξατμίσει ένα μεγάλο μέρος του υγρού των πόρων.

Είναι προφανές ότι, 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([5], p.387) 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.». Οι Baek και Pence [2] μελέτησαν τις μη ομογενείς παραμορφώσεις των ελαστομερών γελών υπό συνθήκες πλήρους και μερικού κορεσμού. Αναφέρουν τον ισχυρισμό του Treloar [38] ότι: «οι μηχανικές ιδιότητες μίας γέλης σε κατάσταση ισορροπίας αντιστοιχούν σε αυτές ενός συμπίεστου υλικού που αποτελείται από ένα συστατικό, ακόμα και όταν τα επιμέρους συστατικά, δηλαδή ο στερεός σκελετός του πολυμερούς και το υγρό, είναι πρακτικώς ασυμπίεστα». Στο κείμενο γίνεται σαφές πως για να προκύψει ογκομετρική παραμόρφωση της γέλης, όταν υπόκειται σε κάποια φόρτιση, θα πρέπει να επιτραπεί η ροή ή η διάχυση υγρού προς το εσωτερικό της γέλης ή από το εσωτερικό της γέλης. Επίσης, χρειάζεται να εξελιχθεί η ανακατανομή του υγρού μέσα στο στερεό δίκτυο. Περιγράφεται, δηλαδή, η συμπίεστικότητα της διφασικής ή τριφασικής γέλης υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης. Σύμφωνα με το κείμενο, το υγρό των πόρων επικοινωνεί με ένα λουτρό υγρού ίδιας φύσης, ή με ένα περιβάλλον που περιέχει ατμούς από υγρό ίδιας φύσης. Επομένως, η συμπίεστικότητα μίας κορεσμένης γέλης νοείται μόνο αν επιτραπεί η στράγγιση του υγρού των πόρων. Γίνεται σαφές ότι δεν 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(Towhata [37]).

Μία ακόμη περίπτωση παράβλεψης των φυσικοχημικών διαδικασιών που σχετίζονται με τη χρήση της κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητικό παράγοντα εδαφών, πιθανώς να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μηχανική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους στο πεδίο. Στη βιβλιογραφία διατυπώνεται ότι η ωρίμανση της γέλης(aging of gel ή curing of gel) 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, αφού υπάρχει ένας σχεδόν κατακόρυφος κλάδος εκτίναξης στην καμπύλη ιξώδους – χρόνου [11]. Συγκεκριμένα, οι Gallagher και Mitchell [15] και ο Towhata [37] αναφέρουν ότι οι Yonekura και Miwa [41] μέτρησαν αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη σταθεροποιημένης άμμου με 32% wt. πυριτικό νάτριο(sodium silicate) ίση με 335 kPa. Η αντοχή αυξήθηκε σε 1200 kPa ύστερα από 1000 ημέρες ωρίμανσης. Το πυριτικό νάτριο έχει παρόμοιες ιδιότητες με την κολλοειδή πυριτία αλλά και σημαντικές διαφορές. Οι Persoff et al. [26] επίσης υποστηρίζουν ότι τα σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία δοκίμια συνέχισαν να αυξάνουν την αντοχή τους, ακόμα και μετά από ένα έτος. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ευεργετικής αύξησης πραγματοποιείται σε χρόνο τετραπλάσιο του χρόνου γέλης. Ως χρόνος γέλης σε αυτήν την αναφορά νοείται ο χρόνος που απαιτείται για τον σχηματισμό στιβαρής γέλης, η οποία ηχεί κατά τη μηχανική διέγερση(βλέπετε Πίνακα 2.2). Η *φυσικοχημική διαδικασία* που εξασφαλίζει την αύξηση της αντοχής της γέλης και κατ' επέκταση της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας είναι η *ωρίμανση(aging)*. 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 τον συνεχή στερεό σκελετό. Η διαδικασία εξελίσσεται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά από τον σχηματισμό της γέλης [4], [5].

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. Σε *συνθήκες πεδίου*, όμως, η πυριτία διοχετεύεται με τεχνητή ή φυσική ροή μέσα στο έδαφος, εκτοπίζοντας το νερό από τους πόρους του εδάφους. Η εισπίεση διαρκεί μέχρι να αυξηθεί το ιξώδες (π.χ. σε τιμές 3 – 4 cP) και να μειωθεί η διαπερατότητα. Στο τέλος της εισπίεσης, το πορώδες του εδάφους περιέχει παχύρρευστο υγρόλυμα από το οποίο θα σχηματιστεί η γέλη. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων πυριτίας δεν έχει προσκολληθεί σε αναπτυγμένες αλυσίδες ή σε συμπλέγματα και βρίσκεται σε επαφή με το καθαρό νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η χημική βαθμίδα περιεκτικότητας (chemical concentration gradient) σωματιδίων πυριτίας ενδέχεται να οδηγήσει σε *διάχυση* (diffusion) της πυριτίας προς το καθαρό νερό. Η διάχυση θα συμβεί αν το χημικό δυναμικό (chemical potential) είναι αρκετά υψηλό και ο συντελεστής διάχυσης επαρκώς μεγάλος. Ο Albert Einstein το 1905 [10] μελέτησε το φαινόμενο που διατηρεί σε αιώρηση τα κολλοειδή σωματίδια σε ένα υγρόλυμα, σύμφωνα με τις αρχές της κίνησης Brown. Κατέληξε σε μία γενικευμένη έκφραση της διαχυτικότητας μεμονωμένων κολλοειδών σφαιρών. Η εξίσωση Stokes - Einstein ορίζει ότι ο συντελεστής διάχυσης είναι αντιστρόφως ανάλογος της ακτίνας του σφαιρικού σωματιδίου και του ιξώδους της υγρής φάσης. Συμπεραίνουμε ότι τα κολλοειδή σωματίδια που δεν έχουν αναπτυχθεί σε μέγεθος είναι περισσότερο εύκολο να διαφύγουν μέσω διάχυσης. Με την πάροδο του χρόνου το υγρόλυμα αυξάνει το ιξώδες του και σχηματίζεται ο στερεός σκελετός της γέλης. Η διάχυση των κολλοειδών σωματιδίων περιορίζεται όσο πυκνώνει το στερεό δίκτυο της γέλης [5]. Επομένως, η κρίσιμη περίοδος για να εκδηλωθεί διαχυτική ροή είναι από τη στιγμή που σταματά η εισπίεση, επειδή το υγρόλυμα είναι παχύρρευστο, και για όσο χρόνο η γέλη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ωρίμανσης. Ο μηχανισμός μεταφοράς μάζας μέσω διάχυσης (μοριακή κίνηση - molecular motion) διαφέρει από τον μηχανισμό μεταφοράς μάζας μέσω ροής (μακροσκοπική κίνηση - bulk motion), δηλαδή η διάχυση μπορεί να συμβεί ακόμα και όταν η διαπερατότητα του εδάφους είναι πολύ μικρή λόγω της γέλης. Αν το παχύρρευστο υγρόλυμα ή η πρώιμη γέλη χάσουν σημαντική ποσότητα πυριτίας λόγω διάχυσης, η διαδικασία της ωρίμανσης θα αναχαιτιστεί μερικώς. Επίσης, η διάχυση των ηλεκτρολυτών (αλάτων και οξέων) του υγρούλυματος μπορεί να είναι και αυτή ένας παράγοντας αναχαίτισης της ωρίμανσης. Μάλιστα, τα διαλυμένα άλατα είναι και παραμένουν περισσότερο κινητικά από τα κολλοειδή σωματίδια που αναπτύσσονται σε μέγεθος.

Οι Persoff et al. [26] προσπάθησαν να εξακριβώσουν αν η επαφή του σταθεροποιημένου εδάφους (με κολλοειδή πυριτία Ludox – SM σε ποσοστά 5% - 27% wt.) με νερό που περιέχει οργανικούς παράγοντες μόλυνσης (organic contaminants) επηρεάζει τη διαπερατότητα και την αντοχή του. Για τον σκοπό αυτόν εμβάπτισαν σταθεροποιημένα δοκίμια *μετά την ωρίμανσή τους* σε λουτρό καθαρού νερού ή νερού με οργανικούς παράγοντες. Η εμβάπτιση διήρκησε για χρονικά διαστήματα έως ένα έτος. Παρατήρησαν ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου Monterey, τα οποία εμβαπτίστηκαν σε λουτρό καθαρού νερού, συνέχισαν να αυξάνουν την αντοχή τους σε ανεμπόδιστη θλίψη για έναν χρόνο. Για παράδειγμα το δοκίμιο (άμμου Monterey με 20% CS) που φορτίστηκε μετά από 7 ημέρες ωρίμανσης χωρίς εμβάπτιση σε νερό εμφάνισε αντοχή 330 kPa. Το αντίστοιχο δοκίμιο που εμβαπτίστηκε σε καθαρό νερό για χρονικό διάστημα ίσο με 347 ημέρες εμφάνισε αντοχή 670 kPa. Η εμβάπτιση του δοκιμίου έγινε μετά από ωρίμανση 7 ημερών σε στεγανό και υγρό περιβάλλον, μέσα στο καλούπι του, σε θάλαμο με σταθερή θερμοκρασία και υγρασία 100%. Αυτά τα πειράματα δείχνουν ότι η παρατεταμένη ωρίμανση της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας μέσα σε

περιβάλλον καθαρού νερού επιφέρει αύξηση της αντοχής. Δεν είναι όμως ενδεικτικά για να αποδειχτεί ή να απορριφθεί η πιθανότητα αναχαίτισης της ωρίμανσης λόγω διάχυσης της πυριτίας, διότι πριν την εμφάνιση είχε ήδη προηγηθεί ωρίμανση 7 ημερών σε μονωμένο περιβάλλον. Σε επόμενη ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα απλών πειραμάτων εμφάνισης σταθεροποιημένων δοκιμίων σε καθαρό νερό, με καταγραφή της διαχεόμενης ουσίας.

2.2.1 Γελοποίηση (Gelation)

Οι Brinker και Scherer [5] δίνουν τον εξής εξαιρετικό ορισμό της διαδικασίας μετατροπής ενός υγρολύματος σε γέλη: «γελοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία συμπλέγματα δημιουργούνται από την 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*. Το γιγαντιαίο σκελετικό σύμπλεγμα φτάνει μέχρι το δοχείο που περιέχει τη γέλη και έτσι η γέλη δεν χύνεται όταν το δοχείο γείρει. 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. Σύμφωνα με αυτήν την εικόνα της διαδικασίας, 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.» (ελεύθερη μετάφραση).

Ο ορισμός αυτός είναι ιδιαίτερα περιεκτικός εννοιολογικά, αφού υπονοεί τη χημεία και την *κινητική θεωρία συγκρούσεων*(*kinetic theory of collisions*) πίσω από τη διαδικασία της γελοποίησης. Ξεκαθαρίζει τη *διφασική φύση* της γέλης που υπό προϋποθέσεις συνεπάγεται την ασυμπιεστότητά της(συμπαγή, μη πορώδη σωματίδια, μόνο νερό στους πόρους της γέλης). Φανερώνει ότι η στερεά φάση της γέλης αναπτύσσει *δυνάμεις συνάφειας* με ξένα σώματα. Είναι προάγγελος της διαδικασίας της ωρίμανσης. Δίνει μία πρώτη εικόνα για τις παραμορφώσεις που μπορεί να υποστεί η στερεά φάση και τη ροή που μπορεί να προκύψει διά μέσου της, ή ακόμα και τη ροή της στερεάς φάσης διαμέσου της υγρής.

Ο πιο κομψός τρόπος προσδιορισμού του χρόνου γελοποίησης, είναι σύμφωνα με τους Brinker και Scherer [5] η διαδικασία που ακολούθησαν οι Sacks και Sheu(1986, 1987), οι οποίοι μελέτησαν την ιξωδοελαστική συμπεριφορά(*viscoelastic behavior*) του υγρολύματος που μετατρέπεται σε γέλη. Η μελέτη έγινε σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης της διατμητικής παραμόρφωσης που επέβαλλε το ιξωδομέτρο(*narrow gap viscometer – vibrational type*). Χρησιμοποίησαν την έννοια του μιγαδικού δυναμικού μέτρου διάτμησης. Το δυναμικό μέτρο διάτμησης(*dynamic shear modulus*) είναι ένα χαρακτηριστικό των ιξωδοελαστικών υλικών και συνδέει τη διατμητική τάση με τη διατμητική παραμόρφωση, υπό συνθήκες ταλάντωσης. Σε καθαρά ελαστικά υλικά η τάση και η παραμόρφωση βρίσκονται σε φάση. Σε καθαρά ιξώδη υλικά(*viscous materials*) η παραμόρφωση υστερεί κατά $\pi/2$ rad της τάσης. Σε ιξωδοελαστικά υλικά(*viscoelastic materials*) υπάρχει μία ενδιάμεση υστέρηση φάσης δ (rad) της παραμόρφωσης ως προς την τάση. Όπως συνηθίζεται όταν υπάρχει διαφορά φάσης σε κάποιο φαινόμενο, ο πιο βολικός μαθηματικός χώρος για να περιγραφεί το φαινόμενο είναι το *μιγαδικό επίπεδο*. Οι μιγαδικοί αριθμοί έχουν το χαρακτήρα διανύσματος, ενώ ταυτόχρονα έχουν μία ιδιότητα που λείπει από τα διανύσματα. *Ο επιμερισμός μιγαδικών αριθμών δίνει αποτέλεσμα στον ίδιο χώρο με τους μιγαδικούς που επιμερίζονται*. Αντίθετα, το εσωτερικό και το εξωτερικό γινόμενο διανυσμάτων δίνουν αποτέλεσμα εκτός χώρου. Αν αποδώσουμε στο μέτρο διάτμησης έναν ελαστικό χαρακτήρα που συνδέεται με την *αποθήκευση ελαστικής ενέργειας*(

storage modulus G') και έναν ιξώδη χαρακτήρα που συνδέεται με την απώλεια ενέργειας λόγω τριβών κατά την ιξώδη ροή (loss modulus G'') προκύπτει το μιγαδικό μέτρο διάτμησης: $G^* = G' + iG''$ (για ιξωδοελαστικά υλικά). Η διαφορά φάσης δ δίνεται από τον τύπο: $\tan\delta = G''/G'$ (loss tangent), αφού $G' = (\tau_0/\gamma_0) \cdot \cos\delta$ και $G'' = (\tau_0/\gamma_0) \cdot \sin\delta$. Το φάσμα των δύο αυτών μέτρων διάτμησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 συναρτήσει της κανονικοποιημένης συχνότητας ταλάντωσης ω / ω_0 (κανονικοποίηση ως προς την ιδιοσυχνότητα ω_0) και συναρτήσει του βαθμού προόδου του φαινομένου της γελοποίησης ρ . Ερμηνεύοντας ποιοτικά το φάσμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για δεδομένο βαθμό προόδου ρ της γελοποίησης το μέτρο αποθήκευσης G' τείνει στο γνωστό στατικό μέτρο διάτμησης G της ελαστικότητας, όταν η συχνότητα διέγερσης είναι πολύ μεγαλύτερη της ιδιοσυχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν δεν έχει επέλθει η πήξη της γέλης, η υδαρή μάζα μπορεί να εμφανίσει ελαστικότητα υπό ταχύτατες διεγέρσεις λόγω εμπλοκών των αλυσίδων συσσωματωμάτων. Αντίθετα, το μέτρο αποθήκευσης G' ($\omega=0$), το οποίο πάλι εκφράζει το στατικό μέτρο διάτμησης για δεδομένο ρ , είναι μηδέν μέχρι να σχηματιστεί μία συνεχής σκελετική δομή. Όσον αφορά το μέτρο απωλειών G'' είναι μηδενικό για πολύ αργή διέγερση, διότι το ένα μόριο μπορεί να γλιστρά πάνω στο άλλο με αμελητέα αντίσταση, άρα με αμελητέα απώλεια ενέργειας. Αν αμφιβάλλετε, θυμηθείτε ότι η δύναμη αντίστασης που συναντά ένα κινούμενο μέσα σε ρευστό σώμα είναι ανάλογη της ταχύτητας. Επίσης, σκεφτείτε τις αντιστρεπτές θερμοδυναμικές διαδικασίες ενός ρευστού, οι οποίες δεν συνοδεύονται από απώλειες ενέργειας, επειδή πραγματοποιούνται πολύ αργά. Στη Θερμοδυναμική η τάση (stress) και ο ρυθμός παραμόρφωσης (strain rate) έχουν σχέση γενικευμένης δύναμης – συζυγούς γενικευμένης ροής (generalized force – conjugate generalized flux). Το γινόμενο τους, δηλαδή, δίνει τον ρυθμό απώλειας / υποβάθμισης της ενέργειας (rate of energy dissipation). Το μέτρο κατανάλωσης τείνει πάλι στο μηδέν για υπερβολικά υψίσυχνες διεγέρσεις, διότι τα μόρια δεν προλαβαίνουν να αποκριθούν και άρα δεν εκδηλώνεται ροή, αλλά ελαστικότητα λόγω αλληλό - εμπλοκής. Η απώλεια ενέργειας γίνεται μέγιστη όταν το δείγμα διεγείρεται με συχνότητα ίση με κάποια από τις ιδιοσυχνότητές του. Αφήνουμε σε εσάς την απόλαυση της ερμηνείας του φάσματος για δεδομένη αδιάστατη συχνότητα διέγερσης και μεταβαλλόμενο βαθμό προόδου της γελοποίησης.

Επιστρέφοντας στην έρευνα των Sacks και Sheu, αναφέρουμε ότι αυξάνοντας και μετά μειώνοντας τον ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$ στο ιξωδόμετρο (περιστροφική κίνηση, όχι ταλάντωση) παρατήρησαν ότι τα υγρόλυμα πυριτίας συμπεριφέρονταν με τον τρόπο που παρουσιάζουν τα Σχήματα 2.11 και 2.12. Στα αρχικά στάδια της γελοποίησης το υγρόλυμα συμπεριφέρεται ως νευτώνιο ρευστό, δηλαδή ο ρυθμός της διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$ είναι ανάλογος της διατμητικής τάσης, και το ιξώδες που εκφράζει τη σταθερά αναλογίας είναι ανεξάρτητο του ρυθμού $\dot{\gamma}$ ($\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$, όπου $\mu = \text{σταθ.}$). Με την πάροδο του χρόνου το ιξώδες αυξάνεται καθώς αναπτύσσονται αλυσίδες πολυμερών σωματιδίων και το υγρόλυμα γίνεται πιο παχύρευστο. Όταν τα συμπλέγματα αναπτυχθούν αρκετά σε μέγεθος, μερικά από αυτά σπάνε από τον στρεφόμενο κύλινδρο και το υγρόλυμα παρουσιάζει διατμητική λέπτυνση (shear thinning). Αυτό σημαίνει ότι το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Στα Σχήματα 2.11 και 2.12 το υγρόλυμα παρουσιάζει διατμητική λέπτυνση μετά τις 1176 ώρες. Το διάγραμμα $\tau - \dot{\gamma}$ μειώνει την κλίση του για υψηλές τιμές του $\dot{\gamma}$ (μείωση ιξώδους), ενώ το διάγραμμα $\mu - \dot{\gamma}$ παύει να είναι οριζόντιο και δείχνει μείωση του μ με την αύξηση του $\dot{\gamma}$. Καθώς τα συμπλέγματα ενώνονται περαιτέρω και αρχίζει να σχηματίζεται ο στερεός σκελετός, το υγρόλυμα μπορεί να διατηρήσει ένα στατικό διατμητικό φορτίο χωρίς να ρέει, δηλαδή εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά. Η ελαστικότητα της σχηματιζόμενης γέλης αρχίζει να διαφαίνεται στο Σχήμα 2.11 μετά τις 1327 ώρες. Η διατμητική τάση αυξάνει κατακόρυφα για μηδενικό ρυθμό διάτμησης $\dot{\gamma}$, δηλαδή η τάση προκαλεί παραμόρφωση και όχι ρυθμό παραμόρφωσης. Έχουμε μεταβεί από την ιξώδη συμπεριφορά στην ελαστική. Η γέλη, όμως, δεν παραμένει ελαστική υπό οποιαδήποτε τάση. Αν η τάση αυξηθεί αρκετά, ο σκελετός ενδίδει (yields)

και το υγρόλυμα *ρέει* (*flows*). Η *τάση μετάπτωσης* σε ιξώδη κατάσταση είναι περίπου 25 Pa στις 1339 ώρες και 75 Pa στις 1356 ώρες. Η υστέρηση των καμπυλών του Σχήματος 2.12 για 1339 ώρες και 1356 ώρες καθώς μειώνεται ο ρυθμός διάτμησης υποδηλώνει ότι ο σκελετός έχει υποστεί *θραύση* και δεν επανέρχεται αμέσως όταν η τάση μειωθεί κάτω από την τιμή μετάπτωσης [5]. Οι Sacks και Sheu παρατήρησαν ότι καθώς το σημείο γελοποίησης πλησιάζει, οι ελαστικές ιδιότητες ενισχύονται περισσότερο από το ιξώδες, οπότε η εφαπτομένη της διαφοράς φάσης $\tan\delta$ (*loss tangent*) αποκτά μία μέγιστη τιμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Σε αυτήν την παρατήρηση έγκειται η κομψότητα της μεθόδου των Sacks και Sheu αφού δεν προσδιορίζουν τον χρόνο γέλης με αντιστοίχιση σε μία συγκεκριμένη τιμή του ιξώδους. Η συγκεκριμένη τιμή ιξώδους που κατά σύμβαση αντιστοιχεί στον χρόνο γέλης είναι ένας πρακτικός προσδιορισμός, αλλά έχει δύο μειονεκτήματα. Το ιξώδες εξαρτάται από τον ρυθμό διάτμησης (διατμητική λέπτυνση) και μία συγκεκριμένη τιμή ιξώδους μπορεί να απέχει χρονικά μερικά δευτερόλεπτα από τη στιγμή σχηματισμού του συνεχούς σκελετού (απόλυτος ορισμός χρόνου γέλης) ή να απέχει μερικές ώρες, ανάλογα με τη σύσταση του υγρολύματος. Οι Sacks και Sheu αντίθετα προσδιορίζουν τον χρόνο γέλης μέσω μίας συγκεκριμένης τιμής της εφαπτομένης $\tan\delta$ (*loss tangent*), για παράδειγμα της μέγιστης τιμής του Σχήματος 2.13.

Στο ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. (MIS 375618) για τον προσδιορισμό του χρόνου γέλης υιοθετήθηκε η πρακτική αντιστοίχιση σε μία τιμή ιξώδους. Κατά τις δοκιμές μέτρησης του ιξώδους του υγρολύματος με την πάροδο του χρόνου ορίστηκε ως χρόνος γέλης (*gel time*), ο χρόνος της τελευταίας μετρηθείσας τιμής με ιξώδες άνω των 100 cP (1 centipoise = 1 mPa.s). Σε αυτήν την τιμή ιξώδους το υγρόλυμα είναι παχύρρεστο και δεν έχει σχηματιστεί ο συνεχής στερεός σκελετός, ούτε η στιβαρή γέλη που συντονίζεται και ηχεί (*rigid ringing gel*, βλέπετε Πίνακα 2.2). Όμως, για όλα τα υγρολύματα που παρασκευάστηκαν με διάφορους συνδυασμούς των παραγόντων περιεκτικότητας πυριτίας CS %, pH και περιεκτικότητας αλάτων, παρατηρήθηκε εκθετική αύξηση του ιξώδους μετά την τιμή των 100 cP. Επομένως, ο χρόνος που παρεμβάλλεται από τη στιγμή που το υγρόλυμα αποκτήσει ιξώδες ίσο με 100 cP μέχρι να σχηματιστεί ο ελαστικός σκελετός της γέλης είναι αμελητέος. Επίσης, οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή τιμή 200 περιστροφών ανά λεπτό ($f=200/60=3.33$ Hz) για τις χαμηλές τιμές ιξώδους, ενώ όσο το ιξώδες αυξανόταν ο αριθμός περιστροφών μειωνόταν με βάση τις ενδείξεις του οργάνου, ώστε να καθίσταται δυνατή η μέτρηση (Θαλής – Π.Θ.), [11]. Οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι, ο ρυθμός διάτμησης (*shear rate* σε s^{-1}) που παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα των Σχημάτων 2.11 και 2.12 είναι ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$, όπως προκύπτει από το κείμενο των Brinker και Scherer [5]. Δεν πρέπει να γίνεται απευθείας σύγκριση με τη συχνότητα περιστροφής $f=3.33$ Hz που αναφέρεται παραπάνω. Τα διάφορα στάδια προόδου της διαδικασίας μετατροπής του υγρολύματος σε γέλη απεικονίζονται στον Πίνακα 2.2.

Η μελέτη των ρεολογικών χαρακτηριστικών του υγρολύματος κolloειδούς πυριτίας Ludox® – SM με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 2.1, ύστερα από αραίωση, ρύθμιση του pH και προσθήκη αλάτων έγινε με χρήση του ιξωδόμετρου Brookfield LVDV-II+PX (Σχήμα 2.14) και του υδατόλουτρου Brookfield TC-150 (Σχήμα 2.15) με το οποίο διατηρούταν σταθερή θερμοκρασία 25°C. Οι δοκιμές μέτρησης του ιξώδους του υγρολύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο έγιναν από τα συνεργαζόμενα στο ερευνητικό εργαστήριο και όχι από το εργαστήριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, οπότε ό,τι παρουσιάζεται στην εργασία έχει ισχύ βιβλιογραφικής αναφοράς. Σκοπός των δοκιμών ήταν η κατάστρωση καμπυλών εξέλιξης του δυναμικού ιξώδους μ σε συνάρτηση με τον χρόνο t για υγρολύματα με διαφορετικές:

- συγκεντρώσεις CS% wt. κατά βάρος του κolloειδούς παράγοντα SiO₂,
- τιμές κανονικότητας N λόγω παρουσίας αλάτων NaCl,

- τιμές pH.

Η ρύθμιση του pH του υγρολύματος έγινε με προσθήκη υδροχλωρικού οξέος HCl της SIGMA - ALDRICH® με συγκέντρωση 37%, μοριακό βάρος MW= 36.46 g/mol και πυκνότητα 1.20 g/ml στους 25°C. Το pH μετρήθηκε με πεχάμετρο του οίκου Metrohm, type 826 pH mobile. Η ρύθμιση του ιονικού σθένους έγινε με προσθήκη καθαρού (>99.8% καθαρότητα) χλωριούχου νατρίου της SIGMA - ALDRICH®, με μοριακό βάρος MW= 58.44 g/mol. Η περιεκτικότητα αλάτων που προσδίδει ιονικό σθένος στο υγρόλυμα μετράται σε όρους κανονικότητας N (normality). Συγκεκριμένα, περιεκτικότητα σε χλωριούχο νάτριο ίση με 1N αντιστοιχεί σε 58.5 g NaCl ανά λίτρο υγρολύματος (Θαλής – Π.Θ., MIS 375618). Οι δοκιμές μέτρησης ιξώδους εκτελέστηκαν σε υγρολύματα με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 2.3.

Η επιλογή ρύθμισης των παραπάνω τριών παραμέτρων δικαιολογείται θεωρητικά. Οι Bergna και Roberts [4] αναφέρουν ότι για όλα τα είδη κολλοειδών πυριτικών γελών οι χρόνοι γέλης γίνονται μικρότεροι καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα της κολλοειδούς πυριτίας, αυξάνεται η θερμοκρασία και αυξάνεται η περιεκτικότητα των αλάτων. Η μεγάλη περιεκτικότητα σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας στη διασπορά αυξάνει την πιθανότητα συγκρούσεων και άρα συσσωματώσεων. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την κινητικότητα των σωματιδίων, άρα και την πιθανότητα σύγκρουσης. Έχει υπολογιστεί ότι η ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy) του κεντρικού μηχανισμού πολυμερισμού είναι περίπου 80,000 J/mol. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος γέλης θα διπλασιάζεται για κάθε 10°C μείωση θερμοκρασίας. Η επίδραση των αλάτων έγκειται στο γεγονός ότι όταν διαλυθούν σε θετικά και αρνητικά ιόντα λόγω του οιονεί διπόλου του μορίου του νερού, τα θετικά ιόντα θα επισκιάσουν (screen) την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των σωματιδίων της πυριτίας και οι απωστικές δυνάμεις θα εξασθενήσουν, καθιστώντας τις συγκρούσεις πιο πιθανές.

Η επίδραση του pH είναι περισσότερο σύνθετη. Ξεκινώντας από ισχυρά όξινα συστήματα ο χρόνος γέλης αρχικά μειώνεται ραγδαία με την αύξηση της συγκέντρωσης των βασικών μονάδων υδροξυλίων OH^- (Bergna και Roberts [4] p.748). Για να μην υπάρξει σύγχυση αυτών των υδροξυλίων με τα υδροξύλια της επιφανειακής στρώσης των σωματιδίων πυριτίας, θεωρούμε χρήσιμη την αποσαφήνιση της έννοιας pH και της έννοιας pOH (προφέρεται πε-ο-χα). Ο όρος pH συμβολίζει τον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των κατιόντων υδρογόνου H^+ , ή πιο σωστά των κατιόντων υδροξωνίου H_3O^+ στο υγρόλυμα, δηλαδή $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$. Ο όρος pOH συμβολίζει τον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ανιόντων υδροξυλίου OH^- στο υγρόλυμα, δηλαδή $\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-]$. Σε ένα υδάτινο διάλυμα ή σε ένα υγρόλυμα πραγματοποιείται αυτοϊοντισμός του νερού, που σημαίνει ότι ορισμένα μόρια νερού διασπώνται προς σχηματισμό ιόντων υδροξωνίου H_3O^+ και υδροξυλίου OH^- , κατά την εξίσωση: $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$. Ο αριθμός των σχηματιζόμενων ιόντων είναι μικρός και αποδεικνύεται ότι σε συγκεκριμένη θερμοκρασία το γινόμενο των συγκεντρώσεων $[\text{H}_3\text{O}^+]$ και $[\text{OH}^-]$ είναι σταθερό. Για παράδειγμα, στους 25°C το γινόμενο αυτό ονομάζεται σταθερά ιονισμού του νερού και είναι ίσο με $K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$. Λογαριθμίζοντας αυτήν τη σχέση βρίσκουμε ότι σε μία υδάτινη διασπορά θερμοκρασίας 25°C ισχύει: $\text{pH} + \text{pOH} = 14$. Είναι προφανές ότι σε ένα ουδέτερο διάλυμα ισχύει $\text{pH} = \text{pOH} = 7$. Καθώς το διάλυμα (ή το υγρόλυμα) γίνεται περισσότερο όξινο, η περιεκτικότητα των κατιόντων $[\text{H}_3\text{O}^+]$ αυξάνεται εις βάρος της περιεκτικότητας των ανιόντων $[\text{OH}^-]$. Άρα, στην αρχή της παραγράφου η φράση «αύξηση της συγκέντρωσης των βασικών μονάδων υδροξυλίων OH^- » σημαίνει αύξηση του pH. Η μείωση του χρόνου γέλης με την αύξηση του pH δεν είναι μονότονη. Ο χρόνος γέλης εμφανίζει ελάχιστο και στη συνέχεια αυξάνεται ραγδαία με την περαιτέρω αύξηση του pH (καμπύλη “U” στο διάγραμμα χρόνου γέλης – pH). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στον διπλό ρόλο του υδροξυλίου OH^- . Ο πρώτος ρόλος είναι αυτός του καταλύτη (catalyst). Ένα άτομο πυριτίου Si στην επιφάνεια ενός κολλοειδούς πυριτικού σωματιδίου έχει αριθμό συνδιάταξης (coordination number) ίσο με 4. Ο αριθμός αυτός

μπορεί προσωρινά να αυξηθεί με την προσρόφηση ενός ιόντος υδροξυλίου, με ταυτόχρονη προσρόφηση μίας έκτης(στην καινούργια συνδιάταξη) ομάδας σιλανόλης Si-OH που ανήκει σε άλλο κολλοειδές σωματίδιο. Αυτό το μεταβατικό σύμπλεγμα(transition complex) είναι ασταθές και νερό αποβάλλεται από τις δύο ομάδες σιλανόλης, μέσω μίας αντίδρασης συμπύκνωσης(water condensation reaction). Η συμπύκνωση οδηγεί σε σχηματισμό ενός μόνιμου δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si(βλέπετε Σχήματα 2.3 και 2.5). Ο αριθμός συνδιάταξης γίνεται πάλι ίσος με 4, το ιόν υδροξυλίου εκροφάται και συνεχίζει την καταλυτική του δράση σε άλλη θέση του υγρολύματος(Bergna και Roberts [4] p.748). Αν ο ρόλος του υδροξυλίου ήταν μόνο καταλυτικός τότε ο χρόνος γέλης θα μειωνόταν μονότονα με την αύξηση του pH. Αντίθετα, παρατηρείται ένα ελάχιστο στον χρόνο γέλης και στη συνέχεια ραγδαία αύξηση με την αύξηση της οξύτητας, γεγονός που υποδεικνύει διπτό ρόλο. Οι ομάδες σιλανόλης Si-OH στην επιφάνεια των σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας είναι *ασθενή οξέα*(*weak acids*) που αποβάλλουν πρωτόνια(H⁺) σε βασικό περιβάλλον και αποκτούν ένα αρνητικό ηλεκτροστατικό φορτίο(βλέπετε τις ομάδες Si-O⁻ στο Σχήμα 2.3). Οι αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες απωθούν άλλα σωματίδια με όμοια επιφανειακά φορτία, οπότε οι συγκρούσεις αποτρέπονται και δεν δημιουργούνται δεσμοί σιλοξάνης μεταξύ των σωματιδίων. Το επιφανειακό φορτίο αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση του pH και για αυτόν το λόγο το υγρόλυμα σε υψηλό pH είναι *σταθερό*(*stable*). Επίσης, σε περιβάλλον με πολύ χαμηλό PH οι ομάδες σιλανόλης προσλαμβάνουν πρωτόνια και αποκτούν θετικό ηλεκτροστατικό φορτίο(βλέπετε τις ομάδες M-OH₂⁺ στο Σχήμα 2.3), εξασφαλίζοντας και πάλι τη σταθερότητα του υγρολύματος (Goodwin [17] p.131), (Brinker και Scherer [5] p.240).

Τα αποτελέσματα δοκιμών ρεολογίας που εκτελέστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618) είναι σύμφωνα με τις θεωρητικές προβλέψεις και τις αναφορές της βιβλιογραφίας. Τα Σχήματα 2.16 έως 2.18 παρουσιάζουν τις καμπύλες ιξώδους – χρόνου για περιεκτικότητα πυριτίας CS=5%, κανονικότητα διασποράς 0 N, 0.03 N και 0.1 N και PH στο εύρος 3 – 7. Τα Σχήματα 2.19 έως 2.21 παρουσιάζουν τις αντίστοιχες καμπύλες για περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5%, ενώ τα Σχήματα 2.22 έως 2.24 για περιεκτικότητα CS=10%. Στις δοκιμές μετρήθηκαν τιμές ιξώδους μεγαλύτερες από 700 cP, οι οποίες δεν απεικονίζονται χάριν ευκρίνειας. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- το υγρόλυμα μετά την αραίωση από περιεκτικότητα πυριτίας 30% wt.(αρχικό προϊόν) σε τιμές 5%, 7.5% και 10%(οικονομικά ελκυστικές) έχει μία αρχική τιμή ιξώδους λίγο μεγαλύτερη εκείνης του νερού(1cP). Το ιξώδες αυξάνεται ήπια και σχεδόν γραμμικά μέχρι τιμές 3 έως 6 cP και έπειτα αυξάνεται ραγδαία(εκθετικά) καθώς το υγρόλυμα μετατρέπεται ταχύτατα σε γέλη. Η συμπεριφορά αυτή είναι γενική και παρατηρείται για όλους τους συνδυασμούς CS(%) – N – pH,
- η επίδραση της περιεκτικότητας πυριτίας είναι μονότονη, δηλαδή η αύξηση του CS(%) οδηγεί πάντα σε μείωση του χρόνου γέλης για τον ίδιο συνδυασμό N – pH,
- η επίδραση της περιεκτικότητας αλάτων είναι μονότονη, δηλαδή η αύξηση του N οδηγεί πάντα σε μείωση του χρόνου γέλης για τον ίδιο συνδυασμό CS(%) – pH,
- η επίδραση του pH δεν είναι μονότονη, δηλαδή ο χρόνος γέλης φαίνεται να παρουσιάζει ελάχιστο σε κάποιο εύρος τιμών pH και να αυξάνεται για τιμές pH μικρότερες ή μεγαλύτερες, για δεδομένο συνδυασμό CS(%) – N,
- οι χρόνοι γέλης που μετρήθηκαν κυμαίνονται από μερικές ώρες μέχρι περίπου έναν μήνα, καλύπτοντας όλες τις περιπτώσεις πρακτικής εφαρμογής.

Δύο ακόμα δοκιμές εκτελέστηκαν σε pH=6.00, σε κανονικότητα 0.03 N και σε περιεκτικότητες CS=6.25 % και 8.75%, ώστε να πραγματοποιηθεί πύκνωση των καμπύλων ιξώδους – χρόνου για διάφορες περιεκτικότητες CS(%). Οι καμπύλες αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2.25 και διακρίνεται η μονοτονική επίδραση της περιεκτικότητας CS(%) στον χρόνο γέλης. Τα Σχήματα 2.26 έως 2.28

παρουσιάζουν τις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% και διάφορες τιμές κανονικότητας. Τα Σχήματα 2.29 έως 2.31 παρουσιάζουν τις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5% και διάφορες τιμές κανονικότητας. Τα Σχήματα 2.32 έως 2.34 παρουσιάζουν τις καμπύλες χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα πυριτίας CS=10% και διάφορες τιμές κανονικότητας. Όλες οι καμπύλες έχουν την χαρακτηριστική μορφή “U” και παρουσιάζουν ελάχιστο χρόνο γέλης σε τιμές pH μέσα στο εύρος 4.5 – 6.5. Η μορφή των καμπυλών συμφωνεί ποιοτικά και ποσοτικά με τις αντίστοιχες καμπύλες της βιβλιογραφίας, ενώ επαληθεύονται και οι προβλέψεις της *κινητικής θεωρίας γελοποίησης με συγκρούσεις (kinetics of collision gels)*.

Μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική παρουσίαση των καμπυλών χρόνου γέλης σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα πυριτίας CS, την κανονικότητα N(συμβολίζεται με m) και το pH έγινε από τους Hunt et al. [19]. Οι Hunt et al. μελέτησαν την κινητική της γελοποίησης(kinetics of gelation) υπό γεωθερμικές συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Χρησιμοποίησαν την κολλοειδή πυριτία Ludox® - SM σε διάφορες περιεκτικότητες πυριτίας SiO₂ % wt., ενώ ρύθμισαν την κανονικότητα m της διασποράς με χρήση χλωριούχου νατρίου NaCl και το pH με χρήση υδροχλωρικού οξέος HCl. Η πρωτοτυπία της παρουσίασης των αποτελεσμάτων έγκειται στο γεγονός ότι αντί να μεταβάλλουν την περιεκτικότητα της πυριτίας με προσθήκη του κολλοειδούς SiO₂ και κρατώντας σταθερό το pH και την περιεκτικότητα αλάτων NaCl, *μετέβαλαν την περιεκτικότητα της πυριτίας προσθέτοντας νερό*. Καθώς το υγρόλυμα αραιώνει με την προσθήκη νερού, η περιεκτικότητα πυριτίας SiO₂ και αλάτων NaCl μειώνεται, το pH μεταβάλλεται, αλλά παραμένει σταθερός ο μοριακός λόγος αλάτων / πυριτίας(NaCl / SiO₂ όπου δεν λαμβάνεται υπόψη το νάτριο του σταθεροποιητή ούτε το χλώριο του οξέος) και ο μοριακός λόγος οξέος / σταθεροποιητή(Cl⁻ / Na⁺ όπου δεν λαμβάνεται υπόψη το νάτριο ή το χλώριο των αλάτων). Το αποτέλεσμα είναι να αποκαλυφθεί μία *γραμμική σχέση* μεταξύ του λογαρίθμου του χρόνου γέλης και του λογαρίθμου της περιεκτικότητας πυριτίας, όπως στο Σχήμα 2.35. Η σχέση μεταξύ του λογαρίθμου του χρόνου γέλης και του μοριακού λόγου NaCl / SiO₂ προσεγγίζεται με *υπερβολική καμπύλη(hyperbola)*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.36. Αλάτι NaCl που προκύπτει από την εξουδετέρωση του αλκαλικού σταθεροποιητή Na⁺ με το οξύ HCl δεν περιλαμβάνεται στον λόγο NaCl / SiO₂. Η υπερβολική μορφή της καμπύλης σημαίνει ότι η προσθήκη αλάτων μειώνει τον χρόνο γέλης στην αρχή με ραγδαίο ρυθμό αλλά στη συνέχεια η επίδραση φθίνει. Η σχέση μεταξύ του λογαρίθμου του χρόνου γέλης και του μοριακού λόγου Cl⁻ / Na⁺(όπου δεν λαμβάνεται υπόψη το νάτριο ή το χλώριο των αλάτων) προσεγγίζεται με *παραβολική καμπύλη(parabola)* στο εύρος pH=6 - 9 ή Cl⁻ / Na⁺=0.5 - 1.0, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.37. Στο όριο του διαγράμματος για pH=6 η παραβολή τείνει να σηκωθεί και να σχηματιστεί η χαρακτηριστική μορφή “U”, παρά το γεγονός ότι ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει τον λογάριθμο του χρόνου γέλης και όχι τον χρόνο γέλης υπό λογαριθμική κλίμακα.

2.2.2 Ωρίμανση (Aging)

Οι αντιδράσεις που προκαλούν τη γελοποίηση δεν σταματούν στο σημείο γέλης(gel point). Οι Brinker και Scherer([5] p.314) αναφέρουν ότι υπάρχει μία σημαντική ποσότητα ολιγομερών που είναι ελεύθερα να διαχυθούν και να συγκρουστούν, και επίσης η σκελετική δομή διαθέτει και αυτή ικανή εσωτερική κινητικότητα(internal mobility), ώστε να προκύψουν περαιτέρω αντιδράσεις συμπύκνωσης(condensation reactions). Οι μηχανικές ιδιότητες της γέλης συνεχίζουν να μεταβάλλονται για μακρύ χρονικό διάστημα μετά τον χρόνο γέλης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *ωρίμανση(aging)* 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(polymerization), η εκτράχυνση(coarsening) και η αλλαγή φάσης(phase transformation).

Η εκτράχυνση(*coarsening*) πραγματοποιείται με τη μεταφορά υλικού της στερεάς φάσης από περιοχές υψηλής διαλυτότητας προς περιοχές χαμηλής διαλυτότητας. Υλικό συσσωρεύεται στους «λαιμούς» μεταξύ των μεγάλων συσσωματωμάτων κατά το Σχήμα 2.38. Το σκελετικό δίκτυο γίνεται πιο στιβαρό χωρίς να συρρικνώνεται, αφού τα κέντρα των σωματιδίων δεν συγκλίνουν [5]. Μία περίπτωση αλλαγής φάσης είναι η *μικρό - συναίρεση(microsynesesis)*. Κατά την μικρό - συναίρεση η στερεά φάση διαχωρίζεται από την υγρή σε τοπικό επίπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.39. Η διαδικασία αυτή δεν αφορά τα συσσωματώματα της κολλοειδούς πυριτίας Ludox - SM, αλλά αλυσίδες πολυμερών άλλων γελών. Η Gallagher [11] αναφέρει ότι η συγκεκριμένη κολλοειδής πυριτία ελέγχθηκε από τους Yonekura και Miwa [41] για να εξακριβώσουν αν εμφανίζει συναίρεση. Συναίρεση είναι η συστολή της στερεάς φάσης, με ταυτόχρονη αποβολή της υγρής, που οδηγεί σε συρρίκνωση της γέλης. Πρόκειται για διαφορετικού τύπου συρρίκνωση από τη συστολή ξήρανσης, καθώς η συναίρεση συμβαίνει σε *υγρό περιβάλλον*. Το υγρό των πόρων δεν απομακρύνεται από τη γέλη με εξάτμιση, απλά εκτοπίζεται από τη στερεά φάση που συρρικνώνεται. Η συναίρεση οφείλεται στο γεγονός ότι η στερεά φάση αρέσκειται στο να συσσωματώνεται με τη συγγενική στερεά φάση(π.χ. μικρό - συναίρεση του Σχήματος 2.39). Επίσης, οφείλεται στο γεγονός ότι η στερεά φάση συνεχίζει μετά τη γελοποίηση να υπόκειται *συμπύκνωση(condensation)* και να σχηματίζει νέους δεσμούς σιλοξάνης, με ταυτόχρονη αποβολή νερού(π.χ. μακρό - συναίρεση του Σχήματος 2.40). Η συρρίκνωση προκύπτει διότι ο δεσμός σιλοξάνης Si-O-Si καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από τις δύο ομάδες σιλανόλης Si-OH που τον δημιούργησαν. Μεγαλύτερη συρρίκνωση προκαλείται όταν οι αλυσίδες της στερεάς φάσης είναι εύκαμπτες. Όταν μία μετακίνηση φέρει κοντά δύο αλυσίδες με ενεργές ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια τους, σχηματίζεται δεσμός σιλοξάνης με περαιτέρω συμπύκνωση και μη αναστρέψιμη συρρίκνωση. Οι Yonekura και Miwa διατήρησαν δοκίμια κολλοειδούς πυριτίας εμβαπτισμένα σε ουδέτερο νερό για πάνω από 1000 ημέρες και δεν παρατήρησαν ορατή συναίρεση της γέλης ή έκπλυση(*leaching*) της πυριτίας. Επίσης, εμβάπτισαν δοκίμια κολλοειδούς πυριτίας σε όξινο και αλκαλικό νερό για 100 ημέρες και ομοίως δεν παρατήρησαν ορατή συναίρεση ή έκπλυση. Είναι άγνωστο μετά από πόσες ημέρες ωρίμανσης εμβαπτίστηκαν τα δοκίμια στο νερό. Το γεγονός ότι η κολλοειδής πυριτία δεν εμφανίζει *έντονη* συναίρεση την καθιστά περισσότερο αποτελεσματική από άλλους σταθεροποιητές, π.χ. από το πυριτικό νάτριο(*sodium silicate*).

Η κύρια διεργασία που σχετίζεται με την ωρίμανση της κολλοειδούς πυριτίας που μελετάμε είναι ο πολυμερισμός μέσω συμπύκνωσης. 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 στον στερεό ιστό, από το pH, από την περιεκτικότητα αλάτων και από τη θερμοκρασία. Για τις πρακτικές εφαρμογές σταθεροποίησης εδαφών στο πεδίο είναι πολύ σημαντικό να εξακριβωθεί αν αναχαιτίζεται πλήρως ή μερικώς η ωρίμανση, λόγω πιθανής απομάκρυνσης της σκεδασμένης πυριτίας από τους πόρους της γέλης. Ένας μηχανισμός που θα μπορούσε να ευθύνεται για μία τέτοια αραίωση της περιεκτικότητας κολλοειδών στους πόρους της γέλης είναι η *διάχυση(diffusion)*. Διάχυση των κολλοειδών σωματιδίων είναι δυνατόν να συμβεί, διότι στο πεδίο η υπό σταθεροποίηση εδαφική μάζα έρχεται σε επαφή με το καθαρό νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια της γελοποίησης και της ωρίμανσης. Ο μηχανισμός της διάχυσης και η πιθανή αναχαίτιση της ωρίμανσης σε συνθήκες πεδίου θα παρουσιαστούν εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα.

2.2.3 Ξήρανση (*Drying*)

Με τον όρο ξήρανση(*drying*) εννοούμε την απομάκρυνση του νερού από τους πόρους της γέλης υπό συνθήκες συνήθους θερμοκρασίας. Εξάριση αποτελούν η ξήρανση σε υπερκρίσιμες συνθήκες με θερμοκρασία $T > T_c$ και πίεση $P > P_c$ (*supercritical conditions*) και η ξήρανση με πάγωμα του υγρού

πόρων και εξάχνωση της στερεάς φάσης της γέλης υπό κενό(sublime under vacuum). Η απομάκρυνση της υγρής φάσης υπό συνήθεις θερμοκρασίες γίνεται αρχικά με εξάτμιση του νερού στην επιφάνεια της γέλης, με αποτέλεσμα οι πόροι να αδειάζουν προοδευτικά και να συρρικνώνονται. Η επιφανειακή τάση εφελκύει το νερό και η τριχοειδής πίεση(capillary pressure) 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. Η τριχοειδής πίεση αυξάνεται, διότι η επιφανειακή τάση δρα σε μηνίσκους με ακτίνα καμπυλότητας η οποία μειώνεται(βλέπετε Σχήμα 2.41). Όταν η ακτίνα καμπυλότητας γίνει ίση με την ακτίνα ενός πόρου, τότε το υγρό υφίσταται τον μέγιστο εφελκυσμό και ο στερεός σκελετός τη μέγιστη θλίψη. Η συρρίκνωση του σκελετού σταματάει και επομένως δεν μπορεί πλέον να παραμείνει βυθισμένος στην υγρή φάση, ενώ συνεχίζεται η εξάτμιση. Οι μηνίσκοι υποχωρούν στο εσωτερικό της γέλης και κοντά στην επιφάνεια παραμένουν *πόροι γεμάτοι με αέρα*. Σύμφωνα με τους Brinker και Scherer [5] σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η *περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης(constant rate period, CRP)*. Το όνομα της περιόδου οφείλεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός εξάτμισης κατά τη φάση αυτή είναι ανεξάρτητος του χρόνου και περίπου ίσος με τον ρυθμό εξάτμισης νερού από ένα πιάτο ίσης επίπεδης ελεύθερης επιφάνειας(βλέπετε Σχήμα 2.42). Κατά την περίοδο σταθερού ρυθμού η γέλη μειώνει τον όγκο της κατά έναν παράγοντα 5 έως 10, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8([5] p.464). Η συνάφεια της γέλης με το δοχείο και οι ανομοιομορφες τάσεις ξήρανσης οδηγούν στη ρωγμάτωση της, ειδικά όταν η παρατεταμένη συστολή έχει μειώσει την ευκαμψία της(κατάσταση κοντά στο κρίσιμο σημείο). Μετά το *κρίσιμο σημείο(critical point)* όπου σταματάει η συρρίκνωση ξεκινά η *πρώτη περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης(first falling rate period)*. Το υγρό μέτωπο των μηνίσκων έχει υποχωρήσει στο εσωτερικό της γέλης αλλά οι πόροι κοντά στην επιφάνεια βρίσκονται στην «κατάσταση τελεφερίκ»(funicular state). Η κατάσταση αυτή επιτρέπει να συντηρηθεί *ροή νερού* προς την εξωτερική επιφάνεια με ταυτόχρονη διάχυση υδρατμών, όπως στο Σχήμα 2.43. Ο ρυθμός εξάτμισης, η οποία συντελείται κατά κύριο λόγο κοντά στην επιφάνεια, μειώνεται κατά το Σχήμα 2.42 και είναι ευαίσθητος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στην πίεση ατμών([5] p.470). Καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται, το μέτωπο ξήρανσης(διεπιφάνεια υγρού - ατμών) μετακινείται πιο βαθιά μέσα στη μάζα της γέλης και παύει να υπάρχει συνεχής υγρή φάση μέχρι την εξωτερική επιφάνεια. Οι πόροι κοντά στην επιφάνεια εισέρχονται στην ακόρεστη κατάσταση εκκρεμούς(pendular state) και διακόπτεται η ροή υγρού από το μέτωπο ξήρανσης προς την εξωτερική επιφάνεια. Αυτή είναι η *δεύτερη περίοδος μειούμενου ρυθμού ξήρανσης(second falling rate period)* κατά την οποία η υγρή φάση απομακρύνεται με διάχυση των ατμών της από το εσωτερικό προς το εξωτερικό. Ο ρυθμός εξάτμισης, που συντελείται στο εσωτερικό πλέον, δεν είναι τόσο ευαίσθητος στις εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας([5] p.470).

Η διαδικασία της ξήρανσης της γέλης, όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο(Chapter 8: Drying) του συγγράμματος των Brinker και Scherer [5] προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του υλικού, που αφορούν άμεσα τη χρήση του ως σταθεροποιητή εδαφών. Για παράδειγμα, 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(βλ. Σχήμα 2.9 και [37]). Ο ισχυρισμός ότι ο σχηματισμός της γέλης είναι μία διαδικασία μετατροπής του υγρολύματος σε καθαρό στερεό(βλέπετε [23]) είναι επίσης ασταθής και οδηγεί στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι το σταθεροποιημένο έδαφος είναι μονοφασικό υλικό, αποτελούμενο από δύο στερεά. Οι Brinker και Scherer δίνουν ακόμα μία σπουδαία πληροφορία για τη γέλη. Αναφέρουν ότι, η συστολή λόγω ξήρανσης φέρνει κοντά ενεργές ομάδες σιλανόλης (M-OH, όπου το μέταλλο M είναι πυρίτιο Si) και πραγματοποιούνται νέες αντιδράσεις συμπύκνωσης(condensation) με

σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης Si-O-Si([5] p.408, p.460). Αυτή η συμπεριφορά έχει τεράστια σημασία για τις εφαρμογές της Γεωτεχνικής. Δεδομένου ότι η επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων είναι πλούσια σε ομάδες σιλανόλης([4] p.22 και p.26) η γέλη μπορεί να εμφανίζει *αυτο-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. Η συστολή στερεοποίησης είναι πιθανό να καταστρέφει ένα μέρος των(πιο δύσκαμπτων) δεσμών της στερεάς φάσης της γέλης, αλλά μπορεί να δημιουργεί νέους δεσμούς σιλοξάνης στα σημεία που συγκλίνουν οι αλυσίδες πυριτικών σωματιδίων. Ακόμα και κατά την εξέλιξη των διαμηθικών παραμορφώσεων σε ένα σταθεροποιημένο έδαφος είναι πιθανό να υφίσταται μία συνεχής διαδικασία καταστροφής και δημιουργίας δεσμών στον στερεό σκελετό της γέλης.

2.2.4 Μηχανισμοί μεταφοράς των σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας (Colloidal silica transport mechanisms)

Η σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών στοχεύει στην αντικατάσταση του νερού των εδαφικών πόρων από υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας, το οποίο στη συνέχεια θα μετατραπεί σε γέλη. Είναι μία ελκυστική μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί σε αναπτυσσόμενες οικοδομικά περιοχές και υποδομές, όπου δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους [11]. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την ικανότητα διοχέτευσης του υγρού στην εδαφική μάζα και την ομοιόμορφη κάλυψη του πορώδους με γέλη. Η γέλη οφείλει να έχει την επιθυμητή περιεκτικότητα κολλοειδών σωματιδίων. Η περιεκτικότητα αυτή πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλή, ώστε η μέθοδος να προσφέρει μία οικονομική λύση, αλλά και επαρκώς υψηλή, ώστε να επιτυγχάνονται οι στόχοι της σταθεροποίησης(μείωση παραμορφώσεων, μείωση καθιζήσεων, μείωση διαπερατότητας, αύξηση αντοχής). Είναι, επομένως, πολύ κρίσιμο να εξακριβωθεί ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τους *μηχανισμούς μεταφοράς(transport mechanisms)* του υγρού στους πόρους κορεσμένων εδαφικών υλικών [14].

2.2.4.1 Μηχανισμός μεταγωγής - υδροδυναμικής διασποράς(advection - hydrodynamic dispersion mechanism)

Οι Gallagher και Lin [14] μελέτησαν πειραματικά τη διοχέτευση υγρούλυμα κολλοειδούς πυριτίας σε στήλες εδαφικού υλικού ύψους 0.9 m. Το υγρόλυμα πυριτίας που χρησιμοποίησαν ήταν το Ludox - SM που διατίθεται στο εμπόριο σε περιεκτικότητα 30% wt. CS, με μέσο μέγεθος σωματιδίων 7nm, ιξώδες 5.5 cP και PH=10, δηλαδή το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται στο ερευνητικό. Μία τυπική εδαφική στήλη και το σκαρίφημα της πλήρους πειραματικής διάταξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.44. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποίησαν ήταν άμμος Nevada No. 120, άμμος Ottawa 20/30 και ιλυώδης άμμος 5% και 10% wt. και το αραιωμένο υγρόλυμα είχε περιεκτικότητα σε πυριτία 5% wt. Η διοχέτευση του υγρού μέσα στα κορεσμένα εδαφικά δοκίμια έγινε υπό χαμηλές υδραυλικές κλίσεις(0.04 - 0.18), με εισροή από τη βάση της στήλης και εκροή από την κορυφή. Σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος υπάρχουν σημεία δειγματοληψίας υγρού. Στα δείγματα υγρού που συλλέγονται κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς προωθείται το χρωματισμένο μέτωπο του υγρού, γίνονται μετρήσεις της περιεκτικότητας των ιόντων χλωρίου, της πυριτίας, του PH και του ιξώδους. Οι ίδιες μετρήσεις γίνονται και στο παρεχόμενο υγρόλυμα. Μετά το πέρας των δοκιμών διοχέτευσης της πυριτίας και του σχηματισμού γέλης

αποσπάστηκαν δοκίμια σταθεροποιημένου εδάφους από τις στήλες, ώστε να προσδιοριστεί η αντοχή τους σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Σύμφωνα με τους Gallagher και Lin, ένας τρόπος για να ελεγχθεί αν η πυριτία έχει διοχετευθεί σε ικανή περιεκτικότητα στις διάφορες περιοχές της εδαφικής μάζας είναι η μέτρηση της περιεκτικότητας του υγρού των πόρων σε ιόντα χλωρίου. Συλλέγοντας δείγματα υγρού από διάφορες θέσεις κατά την προώθηση του μετώπου πυριτίας μπορεί να γίνει με κατάλληλο όργανο η μέτρηση των ιόντων χλωρίου. Ξηραίνοντας γνωστή ποσότητα του δείγματος στους 200°C για δύο ημέρες αποκαλύπτεται η μάζα της πυριτίας που υπήρχε στο δείγμα(μαζί με μία μικρή ποσότητα αλάτων και χρωστικής ουσίας). Το Σχήμα 2.45 απεικονίζει την κανονικοποιημένη συγκέντρωση πυριτίας σε συνάρτηση με την κανονικοποιημένη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου, για τις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας. Η κανονικοποίηση έγινε ως προς τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις του υγρού που διοχετεύεται. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.45 οι δύο συγκεντρώσεις είναι ισχυρά γραμμικά συσχετισμένες και επομένως, η περιεκτικότητα ιόντων χλωρίου είναι ένας εξαιρετικός δείκτης της περιεκτικότητας πυριτίας στο υγρό των πόρων. Ένας δεύτερος τρόπος για να αξιολογηθεί ο βαθμός επιτυχίας της σταθεροποίησης είναι η εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, σε δοκίμια σταθεροποιημένου εδάφους που αποσπώνται από τις στήλες. Δοκίμια σταθεροποιημένης(CS=5% wt.) άμμου Nevada No.120 σχετικής πυκνότητας $D_r=39-43\%$ επέδειξαν αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη 40-60 kPa. Η τυπική απόκλιση της αντοχής για τα δοκίμια της ίδιας στήλης κυμαίνεται από 4.4 έως 13.4 kPa. Τα δοκίμια αφέθηκαν να ωριμάσουν για χρόνο τουλάχιστον τετραπλάσιο του χρόνου γέλης, προτού εκτελεστούν οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Ως χρόνος γέλης, σύμφωνα με τους Gallagher και Lin, ορίζεται ο χρόνος από τη στιγμή της παρασκευής του υγρού μέχρι να μετατραπεί σε στιβαρή γέλη(firm gel). Σταθεροποιημένα εδάφη με 5% CS που παρουσιάζουν τις παραπάνω τιμές αντοχής αναμένεται να περιορίσουν τον κίνδυνο ρευστοποίησης [15], [14], δηλαδή η σταθεροποίηση θεωρείται επιτυχής.

Οι Gallagher και Lin συμπέραναν ότι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μεταφορά υγρού στους πόρους του εδάφους είναι το ιξώδες(viscosity). Στις δοκιμές που εκτέλεσαν, το υγρό έπαψε να κινείται υπό υδραυλική κλίση 0.04 όταν το ιξώδες του αυξήθηκε πάνω από την τιμή 4 cP. Το Σχήμα 2.46 απεικονίζει τη μεταβολή του ρυθμού ροής(παροχή) του υγρού μέσα από την εδαφική στήλη σε συνάρτηση με την αύξηση του ιξώδους. Το Σχήμα 2.47 απεικονίζει τη μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας της εδαφικής μάζας σε συνάρτηση με το ιξώδες του υγρού που αντικαθιστά το υγρό των πόρων. Ο οριζόντιος άξονας(αντίστροφο ιξώδους 1/μ) απεικονίζει τον τύπο του Todd(1990) που δίνει το ιξώδες του μίγματος δύο υγρών, καθώς το ένα αντικαθιστά το άλλο μέσα σε ένα πορώδες μέσο. Οι συνεχείς γραμμές είναι η πρόβλεψη μέσω αναλυτικής σχέσης της διαπερατότητας με χρήση του τύπου του Todd, καθώς το υγρό εκτοπίζει το νερό των πόρων, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει το ιξώδες του. Τα σημεία απεικονίζουν τα πειραματικά δεδομένα δύο δοκιμών(test 5 και test 9). Σύμφωνα με τους Gallagher και Lin, κατά τη δοκιμή test 5 το υγρό στην αρχή της διαδικασίας διοχέτευσης είχε ιξώδες 2.4 cP ενώ στο τέλος είχε 3.6 cP. Επομένως, απεικονίζεται, πρώτον, η επίδραση της αντικατάστασης του νερού από ένα υγρό μεγαλύτερου ιξώδους και, δεύτερον, η επίδραση της αύξησης του ιξώδους του υγρού με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, στη δοκιμή 9 το ιξώδες του υγρού παρέμεινε σταθερό κατά τη διάρκεια της διοχέτευσης, άρα απεικονίζεται μόνο η επίδραση της αντικατάστασης του νερού από το υγρό. Αυτή η παρατήρηση των Gallagher και Lin μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής. Το υγρό κολοειδούς πυριτίας έχει αυξημένο ιξώδες σε σχέση με το νερό, διότι τα σωματίδια ενώνονται προοδευτικά σχηματίζοντας μεγαλύτερα συμπλέγματα και αλυσίδες σωματιδίων. Αυτά τα συμπλέγματα και οι αλυσίδες σωματιδίων είναι κολοειδείς, δηλαδή εμφανίζουν συνάφεια με ξένα σώματα και συνοχή μεταξύ τους. Επίσης, αλληλεπιδρούν με το νερό παρεμποδίζοντας τη ροή. Η αλληλεπίδραση γίνεται με δυνάμεις προσρόφησης, με συγκράτηση του νερού στους πόρους και με

τριβή κατά τη σχετική κίνηση. Αυτή η αλληλεπίδραση της στερεάς φάσης της πυριτίας με το νερό είναι η αιτία που το υγρόλυμα παρουσιάζει αυξημένο ιξώδες σε σχέση με το καθαρό νερό. Μάλιστα, το ιξώδες αυξάνεται όσο το φαινόμενο της γελοποίησης εξελίσσεται και ο στερεός σκελετός της γέλης πυκνώνει (βλέπετε Ενότητα 2.2.1 και Σχήματα 2.11 και 2.12). Επομένως, όταν υγρόλυμα σταθερού ιξώδους εισέρχεται στους εδαφικούς πόρους εκτοπίζοντας το νερό, η διαπερατότητα του εδάφους μειώνεται. Η μείωση οφείλεται στα συσσωματώματα κολλοειδών σωματιδίων που προσκολλώνται στους εδαφικούς κόκκους και παρεμποδίζουν τη ροή του νερού, όπως ακριβώς τα λίπη προσκολλώνται στα τοιχώματα των αρτηριών και παρεμποδίζουν τη ροή του αίματος. Η εξέλιξη του φαινομένου της γελοποίησης, η οποία εκδηλώνεται με αύξηση του ιξώδους, μειώνει περαιτέρω τη διαπερατότητα του εδάφους, αφού ο στερεός σκελετός της γέλης γίνεται πιο πυκνός.

Ένα ακόμα συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι Gallagher και Lin είναι ότι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς της πυριτίας είναι η *μεταγωγή (advection)*, ενώ η *υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion)* παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Η ροή του υγρούλυματος μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy, δεδομένου ότι λαμβάνεται υπόψη η αύξηση του ιξώδους. Η αύξηση του ιξώδους και η αντικατάσταση του νερού των πόρων μπορεί να περιγραφεί με την ενσωμάτωση του κανόνα του Todd στην εξίσωση των Kozeny – Carman. Επιπλέον, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν *αναλυτικές λύσεις* της εξίσωσης μονοδιάστατης μεταγωγής – διασποράς (one dimensional advection – dispersion equation) για να προβλεφθεί ο χρόνος μεταφοράς του υγρούλυματος σε μία εδαφική μάζα στο πεδίο. Αυτό προϋποθέτει τη χρήση της *καθολικής (σταθερής) ταχύτητας ροής (overall seepage velocity)* και των *μέσων συντελεστών υδροδυναμικής διασποράς (average hydrodynamic dispersion coefficients)*, που προσδιορίζονται πειραματικά. Επιπλέον, η εφαρμογή του κανόνα του Todd προϋποθέτει ότι τα δύο υγρά είναι μιγνυόμενα και το μίγμα συμπεριφέρεται ως Νευτώνειο ρευστό. Οι Gallagher και Lin ισχυρίζονται ότι μέχρι το ιξώδες να φτάσει την τιμή των 1000 cP η παραδοχή Νευτώνειου ρευστού είναι επαρκής (σύμφωνα με τους Persoff et al. 1999 [26]). Σύμφωνα με το Σχήμα 2.12 οι Sacks και Sheu εντόπισαν διατμητική λέπτυνση (shear thinning) σε πολύ χαμηλότερα ιξώδη, π.χ. περί τα 100 mPa.s ή 100 cP. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, δεδομένου ότι η εισπίεση υπό χαμηλή υδραυλική κλίση διακόπτεται όταν το ιξώδες φτάσει τα 4 cP, μπορεί να εφαρμοστεί η παραπάνω μεθοδολογία. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει εφαρμογή αναλυτικών λύσεων σε συνδυασμό με *αριθμητικές μεθόδους (numerical methods)*. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται *διαφορετικές ταχύτητες ροής*, καθώς το μέτωπο πυριτίας προωθείται σε διαφορετικές θέσεις μέσα στην εδαφική στήλη, μεταβάλλοντας τη διαπερατότητά της. Αυτή η συνδυαστική μέθοδος οδήγησε στα αποτελέσματα του Σχήματος 2.48. Το σχήμα απεικονίζει την κανονικοποιημένη περιεκτικότητα πυριτίας και τον χρόνο που απαιτείται για να μεταφερθεί σε κάποια θέση της εδαφικής στήλης. Οι συνεχείς καμπύλες γραμμές αποτελούν την πρόβλεψη των αναλυτικών σχέσεων σε συνδυασμό με τις αριθμητικές μεθόδους και τα μεμονωμένα σημεία απεικονίζουν τα πειραματικά δεδομένα.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξε και η έρευνα των συνεργατών στο ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. (MIS 375618). Συγκεκριμένα, έγιναν δοκιμές εισπίεσης υγρούλυματος κολλοειδούς πυριτίας Ludox – SM περιεκτικότητας 10% wt. σε εδαφικές στήλες άμμου M31 και ιλυώδους άμμου M31 – D6. Οι στήλες είχαν ύψος 20 και 40 cm και η εισπίεση έγινε υπό χαμηλή υδραυλική κλίση 0.05, με εισροή από τη βάση και εκροή από την κορυφή της στήλης. Η στήλη ύψους 20 cm και η υπόλοιπη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.49. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών άμμου M31 φαίνονται στον Πίνακα 2.4. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με αυτή των Gallagher και Lin [14]. Το υγρόλυμα πυριτίας χρωματίστηκε με χρώμα ζαχαροπλαστικής ώστε να υπάρχει οπτική παρατήρηση της θέσης του ανερχόμενου μετώπου. Στις δοκιμές ήταν κρίσιμο να εξακριβωθεί αν το εισπιεζόμενο, πυκνότερο και περισσότερο δύσρευστο υγρόλυμα εκτοπίζει το νερό των πόρων ή αν υπάρχει διάχυση των σωματιδίων πυριτίας (και των

σωματιδίων του χρώματος). Το υγρόλυμα έχει πυκνότητα 1.05 – 1.06 g/ml και ιξώδες μεγαλύτερο από 1.24 – 1.5 cP κατά την παρασκευή του, σε περιεκτικότητα 10% wt. CS. Για να είναι δυνατή η εξακρίβωση, παράλληλα με την οπτική παρατήρηση της θέσης του μετώπου, ελήφθησαν από ειδικές οπές δειγματοληψίας ποσότητες υγρού, οι οποίες ξηράθηκαν στους 200°C για δύο ημέρες, αποκαλύπτοντας την περιεκτικότητα σε στερεά σωματίδια πυριτίας(αλάτων και χρωστικής ουσίας). Το Σχήμα 2.50 παρουσιάζει τη διαδικασία δειγματοληψίας υγρού με φαρμακευτική σύριγγα. Η περιεκτικότητα πυριτίας στις διάφορες θέσεις, σε σχέση με τη θέση του μετώπου, αποκαλύπτει αν υπάρχει μηχανισμός διάχυσης ή μεταγωγής της κολλοειδούς ουσίας. Το Σχήμα 2.51 παρουσιάζει την περιεκτικότητα σε πυριτία σε συνάρτηση με τη σχετική θέση δειγματοληψίας – μετώπου. Από τις δοκιμές προκύπτει μία καμπύλη περιεκτικότητας με μορφή “S”. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των συνεργατών στο ερευνητικό, σε θέσεις μπροστά από το μέτωπο κατά την κίνησή του(χαρακτηρίζονται στο Σχήμα 2.51 ως θέσεις «πριν το μέτωπο» και έχουν αρνητική τετμημένη $x < -2$ cm) δεν παρατηρείται ουσιώδες ποσοστό πυριτίας, επομένως δεν διαφαίνεται ουσιαστική ανάμιξη των δύο υγρών πριν την οπτική άφιξη της πυριτίας. Σε θέσεις πίσω από το μέτωπο κατά την κίνησή του(χαρακτηρίζονται στο Σχήμα 2.51 ως θέσεις «μετά το μέτωπο» και έχουν θετική τετμημένη $x > 2$ cm) δεν προκύπτει ουσιώδης διαφορά στο ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας σε σχέση με την ονομαστική τιμή του. Στην περιοχή του μετώπου υπάρχει μία μεταβατική ζώνη στις τιμές περιεκτικότητας της πυριτίας, με πάχος 4 cm(2 cm μπροστά από το μέτωπο και 2 cm πίσω από αυτό). Η μέση τιμή των ποσοστών πυριτίας στη μεταβατική ζώνη είναι 5% wt., δηλαδή ίση με τη μισή ονομαστική τιμή του διοχετευόμενου υγρολύματος. Από αυτά τα δεδομένα προκύπτει ότι η κατακόρυφη μονοδιάστατη εισπίεση υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας με μικρή υδραυλική κλίση προκαλεί ουσιαστικά εκτόπιση του νερού των πόρων του εδάφους, ενώ επιπρόσθετα υπάρχει μία στενή μεταβατική ζώνη ανάμιξης των δύο υγρών(ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. MIS 375618).

Οι συνεργάτες στο ερευνητικό, όπως και οι Gallagher και Lin [14], ισχυρίζονται ότι η εφαρμογή του νόμου του Darcy μπορεί να περιγράψει την εισπίεση του υγρολύματος πυριτίας στην εδαφική στήλη, αν ληφθεί υπόψη η μεταβολή του ιξώδους. Παρατηρούν, όμως, ότι όταν το υγρόλυμα δεν έχει κατακλύσει πλήρως το δοκίμιο(π.χ. όπως στο Σχήμα 2.50) χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και η διαφορά πυκνοτήτων των δύο υγρών κατά τον υπολογισμό της υδραυλικής κλίσης. Η διαφορά πυκνοτήτων οδηγεί σε μείωση της υδραυλικής κλίσης(όταν ανέρχεται το μέτωπο υγρολύματος) ακόμα και αν γεωμετρικά οι στάθμες της δεξαμενής εισόδου και εξόδου μένουν σταθερές. Αυτό γίνεται σαφές αν σκεφτούμε ότι μία στήλη νερού ύψους h δεν έχει την ίδια πίεση στη βάση της με μία στήλη υγρολύματος ίδιου ύψους. Προτείνουν, επομένως, τη χρήση της εξίσωσης Bernoulli, όπου γίνεται σαφής αναφορά στο ειδικό βάρος του υγρού, όταν υπολογίζεται το ύψος ενέργειας και κατ' επέκταση η υδραυλική κλίση. Ο νόμος Darcy εφαρμόζεται με τη μορφή:

$$Q = \frac{k}{\mu_{nor}} \cdot i \cdot A \quad (2.1)$$

όπου Q (cm³/s) είναι η παροχή υγρολύματος, k (cm/s) είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του δοκιμίου μετρημένος *πριν* την εισπίεση του υγρολύματος, i (-) είναι η υδραυλική κλίση, η οποία λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά ειδικά βάρη των δύο υγρών, A (cm²) είναι το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου και μ_{nor} είναι το αδιάστατο ιξώδες του υγρού των πόρων στο τμήμα που έχει κατακλυστεί από το υγρόλυμα. Το αδιάστατο ιξώδες έχει διαιρεθεί με το ιξώδες του νερού $\mu_w = 1$ cP και θεωρείται ότι έχει μεταβαλλόμενη χρονικά τιμή, αλλά σταθερή σε όλο το κατακλυσμένο τμήμα. Ουσιαστικά, η σκέψη πίσω από την εφαρμογή του νόμου του Darcy με αυτόν τον τρόπο είναι η παρακάτω. Ο συντελεστής διαπερατότητας στην πλήρη μορφή του γράφεται [18]:

$$k = \frac{K \cdot \gamma}{\mu} \text{ (m/s)} \quad (2.2)$$

όπου K (m^2) είναι η απόλυτη διαπερατότητα που εξαρτάται μόνο από το πορώδες του εδάφους και όχι από το ρευστό, γ (N/m^3) είναι το ειδικό βάρος του ρευστού και μ ($Pa \cdot s$) είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Επειδή ο συντελεστής διαπερατότητας k (m/s) υπολογίστηκε για το έδαφος με νερό της πόρους(ιξώδους $\mu_w=1$ cP ή 1 mPa.s) μία πρώτη διόρθωση που πρέπει να γίνει όταν το υγρόλυμα κατακλύζει ένα τμήμα του δοκιμίου είναι η εξής: $\frac{k \cdot \mu_w}{\mu} = \frac{k}{(\mu/\mu_w)}$, όπου μ είναι το ιξώδες

του υγρολύματος. Αυστηρά, ο νόμος του Darcy θα έπρεπε να εφαρμοστεί ξεχωριστά για το τμήμα που περιέχει υγρόλυμα και για αυτό που περιέχει νερό. Η διόρθωση, όμως, γίνεται ανεξάρτητα από το ύψος του δοκιμίου που έχει κατακλυστεί με πυριτρία και εφαρμόζεται μία φορά ο νόμος του Darcy. Αυτό γίνεται διότι η κοινή παροχή(εξίσωση συνέχειας ή αρχή διατήρησης μάζας) καθορίζεται κυρίως από το λιγότερο διαπερατό τμήμα. Παρόλα αυτά, η υδραυλική κλίση θα υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη ακριβώς τη θέση του μετώπου της πυριτίας, δηλαδή την επίδραση της διαφορετικής πυκνότητας των δύο υγρών.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω διαδικασία οι συνεργάτες στο ερευνητικό συμπέραναν ότι ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει την εισπίεση του υγρολύματος υπό χαμηλές υδραυλικές κλίσεις είναι το ιξώδες του. Η εισπίεση υπό κλίση 0.05 πρακτικά διακόπτεται όταν το ιξώδες πάρει τιμή μεγαλύτερη από $3.5 - 4.0$ cP, κάτι το οποίο έχουν παρατηρήσει και οι Gallagher και Lin [14]. Κατά την εφαρμογή του νόμου του Darcy, εκτός από το μεταβαλλόμενο ιξώδες, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορά των πυκνοτήτων υγρολύματος – νερού, όταν δεν έχει κατακλυστεί πλήρως η εδαφική στήλη. Ο μηχανισμός μεταφοράς πυριτίας είναι κυρίως η μεταγωγή της ουσίας κατά τη μαζική ροή(bulk motion) του υγρού, η οποία(μαζική ροή) περιγράφεται από τον νόμο του Darcy. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η περιεκτικότητα σε πυριτρία αυξάνεται στις θέσεις όπου έχει φτάσει οπτικά το μέτωπο του εισπνεζόμενου υγρολύματος και μπροστά από το μέτωπο το ποσοστό πυριτίας είναι ασήμαντο. Επίσης, βασίζεται στο ότι η θέση του ανερχόμενου μετώπου μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, αφού υπάρχει πειραματική επαλήθευση του προσομοιώματος.

Είναι ενδιαφέρον να σχολιαστεί το γεγονός ότι οι Gallagher και Lin [14] και οι συνεργάτες στο ερευνητικό αντιμετώπισαν προβλήματα στην εισπίεση υγρολύματος πυριτίας σε δοκίμια ιλυώδους άμμου. Οι πρώτοι αναφέρουν ότι αντιμετώπισαν δυσκολίες στη διεξαγωγή πειραμάτων σε ιλυώδη άμμο καθώς υπήρχε απόπλυση του λεπτόκοκκου υλικού από τους πόρους της άμμου και σχηματισμός στρώσεων ιλύος κατά το στάδιο κυκλοφορίας καθαρού νερού(στάδιο κορεσμού). Κατά την εισπίεση υγρολύματος η δειγματοληψία υγρού πόρων δεν ήταν δυνατή λόγω απόφραξης των οπών. Πιο σημαντική θεωρείται η παρατήρηση ότι κατά τις δοκιμές εισπίεσης σε δοκίμια ιλυώδους άμμου(5% και 10% wt.) το μέτωπο του υγρολύματος πυριτίας σταμάτησε να ανεβαίνει προτού φτάσει στη μέση της εδαφικής στήλης(0.45 m). Οι Gallagher και Lin αποδίδουν το γεγονός αυτό στη χαμηλή διαπερατότητα της ιλυώδους άμμου. Παρόμοια προβλήματα αντιμετώπισαν οι συνεργάτες στο ερευνητικό. Αναφέρουν ότι σε δοκίμιο ιλυώδους άμμου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.50, ήταν δύσκολο να εντοπιστεί η ακριβής θέση του ανερχόμενου μετώπου υγρολύματος, αν και υπήρχε χρωματισμός του υγρού των πόρων. Ο χρωματισμός ήταν λιγότερο έντονος σε σχέση με τα δοκίμια άμμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.50. Η δειγματοληψία υγρού πόρων ήταν προβληματική, πιθανώς λόγω απόφραξης της σύριγγας από το λεπτόκοκκο υλικό.

Η εμπειρία του γράφοντος από τα πειράματα που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είναι παρόμοια, αν και έχει διαμορφωθεί η

προσωπική πεποίθηση ότι τα προβλήματα δεν οφείλονται στη χαμηλή διαπερατότητα της φυσικής ιλυώδους άμμου. Συγκεκριμένα, στο εργαστήριο του ΕΜΠ εκτελέστηκαν για τις ανάγκες του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ. MIS 375618 δοκιμές τριαξονικής θλίψης ιλυώδους άμμου σταθεροποιημένης με κολλοειδή πυριτία. Οι δοκιμές έγιναν υπό υψηλές ενεργές τάσεις για να μελετηθεί η επίδραση τέτοιων εντατικών πεδίων στη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών(π.χ. καταστροφή δεσμών στη στερεή φάση της γέλης). Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση του εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 6% και 10% wt. Η ιλυώδης άμμος είχε σύσταση 85% w.t. σε άμμο M31 και 15% w.t. σε ιλύ D6 που οδηγεί σε ποσοστό λεπτόκοκκων $f_c=10\%$. Μετά την ωρίμανση των σταθεροποιημένων δοκιμών σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια, αυτά μεταφέρθηκαν στην τριαξονική συσκευή για να στερεοποιηθούν και να φορτιστούν. Κατά τη στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμών αυξάνεται η πίεση της κυψέλης και επιτρέπεται η αργή εκροή του υγρού των πόρων. Η εκροή γίνεται σε δεξαμενή, μέσω της λεπτής μεταλλικής σωλήνας που επικοινωνεί με τη βάση του δοκιμίου. Σε ορισμένα πειράματα σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο παρατηρήθηκε απόφραξη του σωληνίσκου εκροής. Αντίθετα, σε κανένα πείραμα σε φυσική ιλυώδη άμμο υπό τις ίδιες συνθήκες δεν παρατηρήθηκε απόφραξη. Η προσωπική άποψη του γράφοντος είναι ότι τα κολλοειδή σωματίδια της πυριτίας αλληλεπιδρούν με τα πιο μικροσκοπικά εδαφικά σωματίδια με κάποιον μηχανισμό *πυρηνοποίησης*(*nucleation*). Ένα μικρό κλάσμα λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού που πιθανόν έχει διαπεράσει τον πορώλιθο δεν αρκεί για να φράξει ο σωληνίσκος. Μπορεί, όμως, να λειτουργήσει ως πυρήνας και να αναπτυχθεί ένα δίκτυο σωματιδίων πυριτίας γύρω του. Το φαινόμενο είναι παρόμοιο με τον βρασμό του νερού μέσα σε ένα μπρίκι. Ενώ οι ατμοί νερού εμφανίζονται σε όλη τη μάζα του υγρού, οι φυσαλίδες φαίνεται να ξεκινούν από τα σημεία όπου το σκεύος έχει μικρές χαρακιές και ατέλειες.

Η πυρηνοποίηση πιθανώς να ευνοεί επιλεκτικά την ανάπτυξη της στερεάς φάσης της γέλης μέσα σε ορισμένες περιοχές του πορώδους του εδάφους. Τα πιο λεπτόκοκκα εδαφικά σωματίδια ίσως λειτουργούν ως πυρήνες έναρξης της διαδικασίας συσσωμάτωσης των κολλοειδών σωματιδίων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ευνοούν τοπικά τον σχηματισμό αλυσίδων του στερεού σκελετού της γέλης. Εμφανίζονται, επομένως, περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε πυριτία και περιοχές με χαμηλότερη περιεκτικότητα. Το αποτέλεσμα είναι το δίκτυο της στερεής φάσης της γέλης να μην καλύπτει ομοιόμορφα το εδαφικό πορώδες. Στις πρώτες περιοχές η διαπερατότητα μειώνεται δραστικά και οι εδαφικοί κόκκοι είναι καλά δεμένοι μεταξύ τους από το κολλοειδές στερεό δίκτυο. Αντίθετα, στις δεύτερες περιοχές το υγρό των πόρων κυκλοφορεί με λιγότερη αντίσταση και οι κόκκοι δεν συνδέονται με τις κολλοειδείς αλυσίδες.

Σε αρκετά πειράματα τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες τα δοκίμια σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου επέδειξαν συμπεριφορά παρόμοια με αυτήν των δοκιμών φυσικής ιλυώδους άμμου. Με τη διατύπωση αυτή εννοούμε ότι οι καταγραμμένες πιέσεις του υγρού των πόρων στα σταθεροποιημένα δοκίμια ήταν της *ίδιας τάξης μεγέθους και ταυτόχρονες* με αυτές των φυσικών δοκιμών. Αυτό υποδηλώνει ότι το υγρό των πόρων της γέλης και του εδάφους *κυκλοφορεί χωρίς ιδιαίτερη αντίσταση* και το νερό μέσα στο πορώδες του δοκιμίου *επικοινωνεί ακαριαία* με το νερό μέσα στις σωληνώσεις μέχρι τον μετρητή πίεσης. Ισχύει, δηλαδή, η Αρχή του Pascal και η καταγραφή της πίεσης του νερού στον μετρητή(*pressure transducer*) μπορούμε να ισχυριστούμε ότι εκφράζει την πίεση μέσα στο πορώδες του συστήματος εδάφους – γέλης ακριβώς εκείνη τη στιγμή. Διαφορετική συμπεριφορά επέδειξαν τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου. Οι πιέσεις του υγρού που καταγράφονταν στον μετρητή της δοκιμής σταθεροποιημένης άμμου ήταν πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές της φυσικής άμμου. Μάλιστα, οι καμπύλες πίεσης φαίνεται ότι *εξελίσσονται ετεροχρονισμένα*, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.52. Αυτή η συμπεριφορά είναι ίσως η αιτία που στη βιβλιογραφία εμφανίζεται η άποψη ότι η γέλη πυριτίας είναι συμπίεστη και άρα αναπτύσσει μικρότερες πιέσεις από το νερό(βλέπετε Ενότητα 2.2). Όπως θα αναπτυχθεί στις

επόμενες ενότητες, θεωρούμε ότι μέσα στους πόρους της γέλης και του εδάφους η πίεση του υγρού είναι η ίδια που θα προέκυπτε αν είχαμε μόνο νερό, υπό αντίστοιχες συνθήκες παραμόρφωσης του εδάφους σε αστράγγιστες διάτμηση. Επειδή, όμως, το νερό αλληλεπιδρά με τον στερεό σκελετό της γέλης και αργεί να κινηθεί, αυτό έχει ως συνέπεια την *ετεροχρονισμένη καταγραφή πίεσης στον μετρητή*, ο οποίος βρίσκεται εκτός δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι, δεν εκτελέστηκαν πειράματα με πολύ αργούς ρυθμούς διάτμησης, όπως για παράδειγμα στα αργιλικά εδάφη, για να αποφευχθεί η πιθανή ανάπτυξη δικτύου γέλης μέσα στις σωληνώσεις και στα μετρητικά όργανα. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι η διατμητική αντίσταση του σταθεροποιημένου εδάφους(αμμώδους ή ιλυώδους), η οποία μπορεί να περιγραφεί ως η αποκλίνουσα τάση q σε κάποιο επίπεδο αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{ax} , είναι βελτιωμένη σε σχέση με το φυσικό έδαφος, μόνο όταν οι πιέσεις του υγρού που καταγράφονται είναι μικρότερες από της αντίστοιχες του φυσικού εδάφους. Αυτό θεωρούμε ότι είναι λάθος να ερμηνεύεται ως αύξηση της αντίστασης λόγω μειωμένων πιέσεων στο υγρό των πόρων του σταθεροποιημένου δοκιμίου. Η αύξηση της αντίστασης και της αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους έχουμε την πεποίθηση ότι οφείλεται στην αλληλεπίδραση της στερεάς φάσης της γέλης με την στερεά εδαφική φάση. Όταν το στερεό δίκτυο της γέλης αναπτύσσεται *κατά το δυνατόν ομοιόμορφα* σε όλο το πορώδες μεταξύ των κόκκων του εδάφους, τότε δύο είναι τα συνεπαγόμενα. Πρώτον, η κίνηση του νερού των πόρων παρεμποδίζεται καθολικά, άρα η πίεση μέσα στο πορώδες του εδάφους δεν εκδηλώνεται αμέσως στον μετρητή. Δεύτερον, όλοι οι κόκκοι είναι καλά δεμένοι μεταξύ τους και το έδαφος παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά. Αντίθετα, όταν τα σωματίδια πυριτίας συγκεντρώνονται επιλεκτικά γύρω από τη λεπτόκοκκη εδαφική φάση τότε πιθανώς να δημιουργούνται κανάλια υψηλής διαπερατότητας μέσα στην εδαφική μάζα και οι κόκκοι να μην απολαμβάνουν καθολικά την ευεργετική επίδραση της πυριτίας. Με αυτήν τη λογική μπορεί να ερμηνευτεί το γεγονός ότι σε αρκετές δοκιμές σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο η συμπεριφορά του εδάφους ήταν ταυτόσημη με αυτήν της φυσικής ιλυώδους άμμου. Επιπλέον, αναφέρουμε ότι ο σχηματισμός της γέλης μέσα στο πορώδες του δοκιμίου δεν αμφισβητείται αφού ελέγχθηκε με κάθε πιθανό τρόπο. Για παράδειγμα, η δοκιμή με κωδικό SB10-1000-6 αφορά σταθεροποιημένο δοκίμιο ιλυώδους άμμου με πυριτία 10% wt. Το δοκίμιο αφέθηκε να ωριμάσει 1515 ώρες(αντί για 50 ώρες), ώστε να έχει αναπτυχθεί ένα πυκνό στερεό δίκτυο πυριτίας μέσα στη γέλη. Αποκλείεται, δηλαδή, το υγρόλυμα να μην είχε μετατραπεί σε γέλη.

Με αυτήν τη συλλογιστική πορεία ίσως μπορούν να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.52, από τα πειράματα που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο του ΕΜΠ, αλλά και τα αποτελέσματα των Gallagher και Lin [14] και των συνεργατών στο ερευνητικό. Το γεγονός ότι, στα πειράματα των Gallagher και Lin, το μέτωπο υγρούλυματος σταμάτησε να προωθείται προτού φτάσει στη μέση της εδαφικής στήλης, ενδέχεται να μην οφείλεται στη χαμηλή διαπερατότητα του ιλυώδους εδάφους. Σύμφωνα με το κείμενο [14], ο συντελεστής διαπερατότητας της ιλυώδους άμμου στις διάφορες δοκιμές είχε τιμές 6.2×10^{-3} cm/s(test 13, 5% κ.β. ιλυώδης άμμος, επιτυχής εισπίεση στο 100% του ύψους), 2.6×10^{-3} cm/s(test 14, 10% κ.β. ιλυώδης άμμος, αδυναμία εισπίεσης στο 100% του ύψους) και 5.0×10^{-3} cm/s(test 15, 5% κ.β. ιλυώδης άμμος, αδυναμία εισπίεσης στο 100% του ύψους), ενώ η καθαρή άμμος Nevada είχε συντελεστή με τιμή στο εύρος $(4.6 - 8.9) \times 10^{-3}$ cm/s. Η διαφορά στη διαπερατότητα της καθαρής και της ιλυώδους άμμου δεν προκύπτει τόσο σημαντική. Το ίδιο ισχύει και για τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο ερευνητικό. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4 οι συντελεστές διαπερατότητας των αμμωδών εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές εισπίεσης είχαν τιμές στο εύρος $(1.09 - 3.40) \times 10^{-2}$ cm/s, ενώ σε ανεξάρτητες δοκιμές διαπερατότητας προσδιορίστηκαν συντελεστές για την ιλυώδη άμμο στο εύρος $(0.96 - 1.33) \times 10^{-2}$ cm/s. Παρατηρούμε ότι, στην ιλυώδη άμμο του ερευνητικού με τυπικό συντελεστή διαπερατότητας της τάξεως 10^{-2} cm/s, υπήρξε αδυναμία εντοπισμού του μετώπου του υγρούλυματος και αδυναμία λήψης υγρού πόρων, ενώ στην καθαρή άμμο των Gallagher και Lin με συντελεστή της τάξεως 10^{-3}

cm/s η εισπίεση έγινε κατά κανόνα χωρίς πρόβλημα, υπό ίδια υδραυλική κλίση. Η ιλυώδης άμμος των Gallagher και Lin με συντελεστή της τάξεως 10^{-3} cm/s εμφάνισε τα ίδια προβλήματα με αυτά που αναφέρουν οι συνεργάτες. Γίνεται προφανές ότι μάλλον δεν ευθύνεται η διαπερατότητα της φυσικής ιλυώδους άμμου για τα προβλήματα εισπίεσης. Το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό πολλαπλασιάζει τις επιφάνειες στις οποίες μπορεί να αγκυρωθεί ένα σωματίδιο πυριτίας και να αρχίσει η ανάπτυξη της αλυσίδας, άρα ευνοεί τη διαδικασία της γελοποίησης. Είναι σαφές ότι το ιξώδες του υγρολύματος σχετίζεται με τον βαθμό προόδου της γελοποίησης, όπως φαίνεται στα διαφωτιστικά Σχήματα 2.10, 2.11 και 2.12 από το έργο των Sacks και Sheu. Το υγρόλυμα μέσα στους πόρους του εδάφους ενδέχεται να σχηματίζει γέλη, και άρα να αυξάνει το ιξώδες του, με γρηγορότερο ρυθμό από ότι το υγρόλυμα της ίδιας παρτίδας που φυλάσσεται σε δοχείο. Στο δοχείο οι αλυσίδες και τα συμπλέγματα σωματιδίων δημιουργούνται ύστερα από συγκρούσεις μεταξύ τους ή με τα τοιχώματα. Στο πορώδες του εδάφους η γελοποίηση μπορεί να επιταχύνεται αφού οι συγκρούσεις με τους εδαφικούς κόκκους είναι πιο πιθανές, λόγω της πληθώρας και της εγγύτητας των επιφανειών. Μάλιστα, αν υπάρχει λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό οι συγκρούσεις γίνονται ακόμα πιο πιθανές. Συμπεραίνουμε ότι, το υγρόλυμα μέσα σε ένα ιλυώδες έδαφος μπορεί να έχει σχηματίσει γέλη πιο γρήγορα από ότι το υγρόλυμα στο δοχείο, όπου μετράμε το ιξώδες του.

Δύο ενδιαφέροντα παραδείγματα ενισχύουν την ιδέα ότι το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό μπορεί να επιταχύνει τον σχηματισμό γέλης, μέσω του μηχανισμού πυρηνοποίησης, και να συσσωρεύει τα σωματίδια πυριτίας γύρω του. Ας υποθέσουμε ότι τοποθετούμε δύο μπουκάλια μπύρας μέσα σε μία κατάψυξη. Αφαιρούμε το ένα μπουκάλι πριν παγώσει ολόκληρο το περιεχόμενό του και παρατηρούμε ότι έχουν σχηματιστεί κομμάτια πάγου μέσα στη μάζα του. Μπορούμε εύκολα να φανταστούμε ότι στο μπουκάλι που αφήσαμε μέσα στην κατάψυξη η διαδικασία σχηματισμού πάγου συνεχίζεται αργά. Αν χτυπήσουμε στο τραπέζι το μπουκάλι που αφαιρέσαμε από την κατάψυξη θα δούμε έκπληκτοι ότι το περιεχόμενο παγώνει με γοργό ρυθμό. Οι φυσαλίδες που σχηματίστηκαν από τον κτύπο λειτούργησαν ως πυρήνες και επιτάχυναν τον σχηματισμό του στερεού πάγου!

Το δεύτερο παράδειγμα συνδέεται άμεσα με την κολλοειδή πυριτία. Κατά την παρασκευή υγρολύματος γίνεται η ανάμιξη νερού, πυκνού υγρολύματος πυριτίας (30% wt.), αλατιού και οξέος. Αν το πυκνό υγρόλυμα προστεθεί στο αλατόνερο τότε δεν παρατηρείται τίποτα απρόσμενο. Το αλάτι έχει ήδη διαλυθεί στο νερό και έχει χάσει την υπόστασή του ως στερεό (πρόκειται για πραγματικό διάλυμα – true solution). Όταν προστεθεί το υγρόλυμα, τα στερεά κολλοειδή σωματίδια δεν μπορούν να εντοπίσουν στερεούς κόκκους αλατιού. Τη δουλειά αυτήν την έχει αναλάβει το οιονεί ηλεκτρικό δίπολο του μορίου του νερού που έχει διαχωρίσει τα ιόντα νατρίου από τα ιόντα χλωρίου. Αντίθετα, αν ανακατευθεί πρώτα το νερό με το υγρόλυμα και μετά προστεθεί το αλάτι τότε παρατηρείται μειωμένη διαλυτότητα. Τα σωματίδια της πυριτίας εντοπίζουν γρήγορα τους πυρήνες στερεού αλατιού, συσσωματώνονται γύρω του και δημιουργούν θρόμβους που δύσκολα διαλύονται. Το φαινόμενο εξελίσσεται τόσο γρήγορα ώστε το αλάτι δεν προλαβαίνει να διαλυθεί κατά την επαφή με το νερό. Η πυρηνοποίηση, επομένως, ενδέχεται να είναι ένας καταλυτικός μηχανισμός της συσσωμάτωσης των κολλοειδών σωματιδίων, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει τη διοχέτευση και τη μεταφορά της πυριτίας στην εδαφική μάζα. Η ύπαρξη μικροσκοπικών πυρήνων μπορεί να θεωρηθεί άλλος ένας παράγοντας, μαζί με το PH, την περιεκτικότητα σε πυριτία και σε αλάτι, ο οποίος επηρεάζει την ταχύτητα σχηματισμού της γέλης.

2.2.4.2 Μηχανισμός διάχυσης (diffusion mechanism)

Είναι γενικά αποδεδειγμένο ότι η μεταφορά κολλοειδών στερεών μέσα στο πορώδες εδαφών γίνεται κατά κύριο λόγο με μηχανισμό μεταγωγής (advection) και με υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion), όταν υπάρχει μαζική ροή υγρού (bulk flow). Η διάχυση (diffusion) των

κολλοειδών στερεών γίνεται ένας σημαντικός μηχανισμός μεταφοράς όταν πάψει να υφίσταται μαζική ροή, καθολικά ή τοπικά [40], [27], [7]. Για παράδειγμα, οι Zighang Suo et al. [40] αναφέρουν ότι η αυτό – διάχυση (self – diffusion) των μορίων του διαλύτη παύει να είναι ο κυρίαρχος κινητικός μηχανισμός μέσα στη γέλη πολυμερούς (polymeric gel), όταν υπάρχει σημαντική μακροσκοπική ροή με μεταγωγή – διασπορά των μορίων (macroscopic flow of convection of solvent molecules). Οι D. Predelus et al. [27] στην εργασία τους πάνω στη μεταφορά κολλοειδών σωματιδίων μέσα σε ακόρεστα εδάφη διαχωρίζουν το νερό σε δύο φάσεις, μία κινητική (mobile) και μία μη κινητική (immobile). Στην κινητική περιοχή ο μηχανισμός μεταφοράς των κολλοειδών περιγράφεται από την εξίσωση μεταγωγής – διασποράς, ενώ μεταξύ κινητικών και μη κινητικών ζωνών η ανταλλαγή σωματιδίων γίνεται με μηχανισμό διάχυσης. Οι N. M. De Novio et al. [7] υποστηρίζουν και αυτοί ότι η διάχυση των κολλοειδών είναι πιο σημαντική από τη μεταγωγή σε στρώματα μη κινητικού ύδατος (layers of immobile water).

Οι Brinker και Scherer [5] p.313) διατυπώνουν ότι το στερεό δίκτυο της γέλης περικλείει μία συνεχή υγρή φάση, η οποία επιτρέπει σχετικά γρήγορη μεταφορά μέσω διάχυσης. Αναφέρουν ότι οι Gits – Leon et al. απόδειξαν ότι ο συντελεστής διάχυσης D (diffusion coefficient) του χλωριούχου νατρίου NaCl σε γέλη πυριτίας είναι ελαφρώς μικρότερος από ότι σε καθαρό νερό (της τάξεως $D=10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$). Επιπρόσθετα, αναφέρονται στο έργο του Dwivedi ο οποίος απέδειξε ότι ο ρυθμός εξάτμισης του υγρού από τους πόρους της γέλης αλουμίνας (alumina gel) είναι περίπου ο ίδιος, με τον αντίστοιχο από ένα ανοικτό πιάτο με το ίδιο υγρό (βλέπετε Σχήμα 2.42). Σε άλλο σημείο του κειμένου οι Brinker και Scherer [5] p.408-409) περιγράφουν την οσμωτική διάχυση (osmosis) διά μέσου ημί – διαπερατής μεμβράνης. Η διάχυση αυτή προκύπτει από τη βαθμίδα στο χημικό δυναμικό κάποιας ουσίας (chemical potential gradient). Σύμφωνα με το κείμενο, ο Yoldas τοποθέτησε υγρόλυμα αλουμίνας σε μία σακούλα που ήταν φτιαγμένη από ημί – διαπερατή μεμβράνη διάλυσης (semipermeable dialysis membrane). Στη συνέχεια βύθισε τη σακούλα σε λουτρό οινόπνευματος. Καθώς τα μόρια νερού διαχύθηκαν από το υγρόλυμα προς το λουτρό οινόπνευματος, το υγρόλυμα συρρικνώθηκε ταχύτητα προς σχηματισμό γέλης. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.53. Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι, η παρουσία μεμβράνης δεν είναι απαραίτητη για να προκύψει οσμωτική ροή σε μία σχηματισμένη γέλη. Το στερεό δίκτυο της γέλης μπορεί να παίξει τον ρόλο της μεμβράνης, επιτρέποντας την επιλεκτική μοριακή διάχυση προς το εξωτερικό. Ταυτόχρονα, το πυκνό δίκτυο προσφέρει υψηλή αντίσταση τριβής, που αποτρέπει τη μαζική ροή υγρού προς το εσωτερικό. Για αυτόν τον λόγο η γέλη πυριτίας συρρικνώνεται ταχύτερα όταν βυθίζεται σε νερό με αλάτι, από ότι σε καθαρό νερό. Η Gallagher ([11] p.30) αναφέρεται στο έργο των Yonekura και Miwa [41] οι οποίοι βύθισαν δοκίμια γέλης από πυριτικό νάτριο (sodium silicate gel) μέσα σε νερό για 1000 ημέρες. Παρατήρησαν ότι, το 30% της ουσίας υπέστη έκπλυση (leaching) προς το νερό, σε αυτό το χρονικό διάστημα. Αντίθετα, τα δοκίμια γέλης από κολλοειδή πυριτία δεν εμφάνισαν έκπλυση όταν εμβάπτιστηκαν σε νερό ([11] p.26). Η εμβάπτιση διήρκησε χρονικό διάστημα πάνω από 1000 ημέρες. Είναι άγνωστη η ηλικία της γέλης την στιγμή της εμβάπτισης.

Δύο απλά πειράματα πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να εξακριβωθεί αν η διάχυση των σωματιδίων της πυριτίας ή / και των αλάτων μέσα από τους πόρους του σταθεροποιημένου δοκιμίου μπορεί να αναχαιτίσει μερικώς την ωρίμανση της γέλης. Δύο κοίλα κυλινδρικά δοκίμια άμμου M31 σταθεροποιήθηκαν με υγρόλυμα περιεκτικότητας 10% wt. σε πυριτία. Το PH και η περιεκτικότητα σε αλάτι του υγρούλυματος ρυθμίστηκαν σε τέτοιες τιμές ώστε να εξασφαλίζεται χρόνος γέλης ίσος με 10 ώρες. Σε αυτόν τον χρόνο το ιξώδες εκτιμάται ότι έχει τιμή μεγαλύτερη των 100 cP, το υγρόλυμα είναι παχύρευστο αλλά δεν έχει σχηματιστεί ο συνεχής στερεός σκελετός της γέλης. Ο σχηματισμός της γέλης δεν αργεί όμως να συμβεί, καθώς σε όλες τις δοκιμές ρεολογίας οι καμπύλες ιξώδους –

χρόνου ανέρχονται εκθετικά σε τιμές ιξώδους >100 cP(βλέπετε την Ενότητα 2.2.1 και τα Σχήματα 2.16 – 2.25).

Τα χαρακτηριστικά του πρώτου δοκιμίου και του υγρολύματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5. Η μάζα των κόκκων της άμμου M31 προσδιορίζεται με μέτρηση πριν και μετά την εμβάπτιση στο υγρόλυμα. Τα γεωμετρικά μεγέθη μετρώνται όταν το δοκίμιο μπορεί να σταθεί χωρίς υποστήριξη. Γνωρίζοντας τον όγκο των κενών και την πυκνότητα του υγρολύματος προσδιορίζεται η μάζα του υγρολύματος μέσα στο πορώδες του δοκιμίου. Το 10% αυτής της μάζας είναι η εκτιμώμενη μάζα σωματιδίων πυριτίας, ενώ η μικρή ποσότητα αλατιού υπολογίζεται με απλή αναλογία ως προς τη μάζα του αρχικού υγρολύματος. Είναι, επομένως, γνωστή η μάζα των κόκκων της άμμου, του υγρολύματος μέσα στο πορώδες της άμμου, των σωματιδίων πυριτίας και του αλατιού. Το δοκίμιο εμβάπτιστηκε σε λουτρό καθαρού, αφαλατωμένου νερού μάζας 490 g όταν η ηλικία του ήταν 25 ώρες. Σε αυτήν την ηλικία η γέλη έχει σχηματιστεί και το δοκίμιο στέκεται χωρίς υποστήριξη. Παρατηρούμε ότι, οι δοκιμές αντοχής πραγματοποιούνται κατά κανόνα σε ηλικία ωρίμανσης ίση με 50 ώρες. Η εμβάπτιση έγινε, λοιπόν, σε πρώιμη σχετικά ηλικία ωρίμανσης. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο είχε αρκετά στιβαρή δομή, ώστε να στέκεται χωρίς υποστήριξη και να μην διαλύεται κατά τη διαδικασία. Μπορούμε εύλογα να υποθέσουμε ότι μέσα στους πόρους της πρώιμης γέλης υπάρχουν ακόμα αρκετά σωματίδια πυριτίας, τα οποία αιωρούνται στο νερό χωρίς να έχουν ενσωματωθεί στον στερεό σκελετό. Αυτό που θέλουμε να εξακριβώσουμε είναι αν αυτά τα σωματίδια διαχέονται από το εσωτερικό των πόρων του εδάφους και της γέλης προς το λουτρό καθαρού νερού. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα το νερό του λουτρού φιλτράρεται από το κόσκινο No 200(οπή 74 μm), ώστε να συγκρατηθούν οι κόκκοι άμμου, και τοποθετείται σε φούρνο. Η απομάκρυνση του νερού αποκαλύπτει τα σωματίδια πυριτίας και το αλάτι, τα οποία ζυγίζονται. Το δοκίμιο και η μικροποσότητα άμμου που συγκρατήθηκε από το κόσκινο εμβάπτιζονται αμέσως σε νέο λουτρό καθαρού, αφαλατωμένου νερού. Μετά από ορισμένο χρόνο επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

Η μάζα των στερεών που μετακινήθηκαν μέσω διάχυσης από το πορώδες του δοκιμίου στο λουτρό παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5. Από τις μετρήσεις παράγονται τα διαγράμματα αθροιστικής μάζας διαχεόμενων σωματιδίων σε συνάρτηση με τον χρόνο, αθροιστικού ποσοστού μάζας διαχεόμενων σωματιδίων σε συνάρτηση με τον χρόνο και ποσοστού πυριτίας που παραμένει στη γέλη μέσα στο πορώδες του εδάφους. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.54. Από το σχήμα παρατηρούμε ότι μετά από 11 ημέρες εμβάπτισης, 5.48 g πυριτίας και αλατιού διαχύθηκαν προς το λουτρό καθαρού, αφαλατωμένου νερού. Η συνολική αρχική μάζα πυριτίας και αλατιού μέσα στους πόρους του δοκιμίου εκτιμάται ίση με 15.88 g. Δηλαδή, μετά από 11 ημέρες εμβάπτισης το 34.51% wt. των σωματιδίων πυριτίας(και αλατιού) έχει απομακρυνθεί από τους πόρους μέσω διάχυσης και η γέλη των πόρων έχει παραμένουσα περιεκτικότητα σε πυριτία 6.49% wt. Είναι προφανές ότι η απομάκρυνση ενός τόσο σημαντικού ποσοστού σωματιδίων πυριτίας θα αναχαιτίσει μερικώς την ευεργετική ωρίμανση της γέλης. Αξίζει να παρατηρηθεί, μάλιστα, ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο υπέστη σταδιακή αποσύνθεση με την πάροδο του χρόνου. Η αποσύνθεση εκδηλώθηκε αρχικά με την εξαλλοίωση της εξωτερικής επιφάνειας, συνέχισε με την απώλεια της στιβαρότητας και ολοκληρώθηκε με την εμφάνιση ρωγμών. Οι εμβάπτισεις σταμάτησαν όταν το δοκίμιο διαλύθηκε ολοκληρωτικά. Η εξέλιξη της αποσύνθεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.55.

Η αναχαιπίση της ωρίμανσης της γέλης προφανώς οφείλεται στην απομάκρυνση των σωματιδίων πυριτίας και του αλατιού μέσω διάχυσης. Αξίζει, όμως, να αναρωτηθούμε πού οφείλεται η αποσύνθεση. Η παραμένουσα περιεκτικότητα της γέλης σε πυριτία(6.49% wt.) δεν είναι αρκετά χαμηλή ώστε να αιτιολογεί την απώλεια στιβαρότητας και τη διάλυση. Η γέλη κολλοειδούς πυριτίας δεν διαλύεται σε νερό, τουλάχιστον στις συνθήκες που αφορούν τις εφαρμογές που μελετάμε. Οι

Brinker και Scherer([5] p.139) αναφέρουν τη διατύπωση του Ilav [20], ότι ο σχηματισμός του δεσμού σιλοξάνης είναι μη αναστρέψιμος χημικά, όταν δεν προάγεται ο από – πολυμερισμός(depolymerization). Η διαδικασία της εκτράχυνσης που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.2 και στο Σχήμα 2.38 δεν αφορά κατάλυση του δεσμού σιλοξάνης μέσω υδρόλυσης, αφού οι αλυσίδες πολυμερών δεν αποσυντίθενται σε oligομερή / μονομερή. Εξάλλου, η εκτράχυνση οδηγεί σε περισσότερο στιβαρό στερεό δίκτυο της γέλης. Ο μόνος μηχανισμός που μπορούμε να σκεφτούμε ότι είναι υπεύθυνος για αυτήν τη διάλυση, είναι η οσμωτική πίεση. Είναι πιθανό να υπάρχουν περιοχές μέσα στη γέλη στις οποίες το στερεό δίκτυο εμποδίζει τα ανεπτυγμένα σωματίδια πυριτίας να απομακρυνθούν. Σε αυτές τις περιοχές θέλουν να εισβάλλουν τα μικρότερα μόρια του νερού, για να επέλθει η αραίωση της περιεκτικότητας σωματιδίων πυριτίας. Προκύπτει, επομένως, οσμωτική ροή των μορίων του νερού μέσα από το στερεό σκελετικό δίκτυο της γέλης. Το δίκτυο λειτουργεί ως ημί – διαπερατή μεμβράνη. Η μερική παρεμπόδιση της ελεύθερης διόγκωσης(free swelling) του στερεού δικτύου της γέλης από τους κόκκους του εδάφους ενδέχεται να οδηγεί στην ανάπτυξη τάσεων. Αυτές οι τάσεις μπορεί να είναι ικανές να τραυματίσουν το στερεό σκελετικό δίκτυο της γέλης σε πρώιμη ωρίμανση. Οι Zhigang Suo et al. [40], [42] περιγράφουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον στερεό σκελετό της γέλης ελαστομερούς(elastomeric gel), όταν προκύπτει διαχυτική ροή λόγω κάποιας βαθμίδας χημικού δυναμικού(chemical potential gradient). Εξετάζουν την περίπτωση ελεύθερης διόγκωσης της γέλης, καθώς και τις περιπτώσεις μερικής ή πλήρους παρεμπόδισης. Μία αντίστοιχη κατάσταση μπορεί να υφίσταται στη γέλη κολλοειδούς πυριτίας. Σε αντίθεση, όμως, με τη γέλη ελαστομερούς, η οποία έχει ικανότητα να αναπτύσσει μεγάλες παραμορφώσεις, η γέλη κολλοειδούς πυριτίας θραύεται. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ερμηνευτεί η απώλεια της στιβαρότητας και η διάλυση του δοκιμίου που περιέχει γέλη πρώιμης ωρίμανσης στους πόρους του, όταν αυτό εμβαπτίζεται σε νερό.

Η συμπεριφορά του δεύτερου δοκιμίου το οποίο εμβαπτίστηκε στο λουτρό νερού μετά από ωρίμανση 50 ωρών ήταν σαφώς βελτιωμένη. Τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου και του υγρού παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6. Στον πίνακα παρουσιάζονται, επίσης, οι μετρήσεις της διαχεόμενης μάζας σωματιδίων με την πάροδο του χρόνου. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.56. Η συνολική αρχική μάζα πυριτίας και αλατιού μέσα στους πόρους του δοκιμίου εκτιμάται ίση με 15.58 g. Μετά από 40 ημέρες εμβάπτισης, 1.24 g πυριτίας και αλατιού διαχύθηκαν προς το λουτρό καθαρού, αφαλατωμένου νερού. Το ποσοστό των σωματιδίων που απομακρύνθηκαν με διάχυση ήταν 7.95% wt. και η παραμένουσα περιεκτικότητα της γέλης σε πυριτία ήταν 9.19% wt. Υπάρχει, δηλαδή, σαφής μείωση της ποσότητας της διαχεόμενης ουσίας, όταν η εμβάπτιση γίνεται σε προχωρημένο στάδιο ωρίμανσης. Στις 50 ώρες η γέλη φαίνεται να έχει ενσωματώσει στον συνεχή στερεό σκελετό το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων πυριτίας. Όσα σωματίδια δεν έχουν ενσωματωθεί ακόμα, έχουν αρκετά ανεπτυγμένο μέγεθος, ώστε να παρεμποδίζεται η απομάκρυνσή τους από τον στερεό ιστό της γέλης. Φυσικά, το διαλυμένο αλάτι και το οξύ μπορούν ακόμα να διαχυθούν μακριά από το εδαφικό πορώδες. Αυτή η απομάκρυνση των ηλεκτρολυτών θα επέφερε μία επιβράδυνση της ενσωμάτωσης όσων σωματιδίων αιωρούνται ακόμα. Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι το δοκίμιο δεν υπέστη αισθητή αποσύνθεση, αλλά παρέμεινε στιβαρό και υγιές. Αυτό υποδεικνύει ότι ο ιστός της ώριμης γέλης αντέχει την οσμωτική πίεση και δεν θραύεται. Ακόμα ένα δοκίμιο το οποίο ωρίμασε για 30 ημέρες σε στεγανό περιβάλλον και μετά εμβαπτίστηκε σε καθαρό νερό για 45 ημέρες, επέδειξε την ίδια ανθεκτικότητα. Διατήρησε, δηλαδή, μία στιβαρή και μη εύθρυπτη δομή. Το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει αυτό το δοκίμιο. Παρατηρούμε ότι δεν έγιναν μετρήσεις της μάζας των διαχεόμενων στερεών, αλλά ελέγχθηκε ποιοτικά η ανθεκτικότητα του σταθεροποιημένου δοκιμίου μέσα σε λουτρό νερού και ύστερα εκτεθειμένο στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται σαφές ότι ο μηχανισμός διάχυσης ενδέχεται να απομακρύνει μία ποσότητα σωματιδίων πυριτίας και αλατιού αναχαιτίζοντας μερικώς την ωρίμανση της γέλης. Η διάχυση γίνεται σημαντικός μηχανισμός σε συνθήκες απουσίας μακροσκοπικής ροής και όταν το υγρόλυμα είναι σε πρώιμο στάδιο ωρίμανσης. Σε περιοχές όπου δεν μπορούν να απομακρυνθούν τα ανεπτυγμένα σωματίδια πυριτίας αναπτύσσεται οσμωτική πίεση. Η πίεση αυτή φαίνεται να είναι ικανή να τραυματίσει τον πρώιμο ιστό της γέλης. Οφείλουμε να επισημάνουμε ότι όλες οι παραπάνω μετρήσεις και παρατηρήσεις αφορούν τη διάχυση πυριτίας και αλατιού μέσα από της πόρους σταθεροποιημένων δοκιμίων. Το μικρό πάχος του δοκιμίου, σε συνδυασμό με την μεγάλη παράπλευρη επιφάνεια του κοίλου κυλίνδρου, δημιουργούν συνθήκες ευνοϊκές για τη διάχυση. Σε συνθήκες πεδίου, το μήκος που πρέπει να διανύσει ένα κolloειδές σωματίδιο για να απομακρυνθεί από το εσωτερικό της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας είναι σαφώς μεγαλύτερο. Για παράδειγμα, στην κλίμακα δοκιμίου ο λόγος του όγκου της σταθεροποιημένης μάζας προς την παράπλευρη επιφάνεια έχει τιμή 6.75 – 6.77 mm (βλέπετε Πίνακα 2.5 και 2.6). Οι Gallagher et al. [13] παρουσιάζουν στην εργασία τους τα αποτελέσματα της διαδικασίας εισπίεσης κolloειδούς πυριτίας, μέσα σε ρευστοποιήσιμη αμμώδη εδαφική μάζα, σε κλίμακα πεδίου. Η εισπίεση υγρολύματος πυριτίας 8% wt. έγινε στα ανώτερα 2m μιας στρώσης άμμου πάχους 10 m. Συγκεκριμένα, η εδαφική μάζα που σταθεροποιήθηκε είχε κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 9 m, πάχος 2 m και εκτεινόταν από βάθος 5 m έως βάθος 7 m. Η διοχέτευση του υγρολύματος έγινε από 8 πηγάδια στην περίμετρο του κύκλου, ενώ στο κέντρο του υπήρχε ένα πηγάδι εξαγωγής του νερού. Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας κατά τη διάρκεια της εισπίεσης βρισκόταν σε κυμαινόμενο βάθος 2.8 – 3.4 m λόγω παλιρροϊκών διακυμάνσεων. Ο λόγος όγκου / επιφάνειας της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας είναι, επομένως, ίσος με 0.692 m ή 692 mm. Το μήκος αυτό, που αφορά κλίμακα πεδίου, είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το αντίστοιχο που αφορά κλίμακα δοκιμίου. Η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των μετατοπίσεων ενός μεμονωμένου κolloειδούς σωματιδίου μέσα στον υγρό διασπορέα είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του συντελεστή διάχυσης και του χρόνου, δηλαδή $\lambda_x = \sqrt{\text{mean}(x^2)} = \sqrt{2 \cdot D \cdot t}$ [10]. Ο συντελεστής διάχυσης ενός μεμονωμένου κolloειδούς σωματιδίου πυριτίας που κινείται μέσα σε νερό προκύπτει, σύμφωνα με τη σχέση Stokes – Einstein [10], ίσος με:

$$D_{SE} = \frac{k \cdot T}{6\pi\mu \cdot R} = 3.14 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s} = 3.14 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{s} \quad (2.3)$$

όπου η σταθερά του Boltzmann είναι $k=1.3806 \cdot 10^{-23}$ J/K, η θερμοκρασία είναι $T=300$ K, το ιξώδες του νερού είναι $\mu=10^{-3}$ Pa.s και η ακτίνα του κolloειδούς σωματιδίου είναι $R=7 \cdot 10^{-9}$ m. Ο συντελεστής διάχυσης των κolloειδών σωματιδίων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με τον ιστό της γέλης αναμένεται ακόμα μικρότερος [39], [22], [28]. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι η αραίωση της περιεκτικότητας σε πυριτία αναμένεται να περιοριστεί μόνο σε έναν λεπτό φλοιό στην περιφέρεια της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας. Πρέπει, όμως, να ληφθεί υπόψη ότι η αραίωση λόγω διάχυσης αναμένεται να ξεκινήσει από τη στιγμή που θα σταματήσει η εισπίεση υγρολύματος. Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.2.4.1, η εισπίεση υπό χαμηλή υδραυλική κλίση σταματά όταν το υγρόλυμα αποκτήσει ιξώδες μεγαλύτερο από 3.5 – 4.0 cP. Το δοκίμιο της πρώτης δοκιμής εμβάπτισης έχασε μεγάλη ποσότητα πυριτίας από τους πόρους του και τελικά διαλύθηκε. Αυτό το δοκίμιο, είχε μεν μικρό λόγο όγκου προς επιφάνεια, αλλά η γέλη στους πόρους του τη στιγμή της πρώτης εμβάπτισης είχε τεράστιο ιξώδες. Αν παρατηρήσουμε το Σχήμα 2.25 μπορούμε να αποφανθούμε ότι στις 25 ώρες ωρίμανσης το ιξώδες του υγρολύματος περιεκτικότητας 10% wt. σε πυριτία, με $PH=6$ και με κανονικότητα 0.03 N NaCl, έχει τιμή >700 cP. Κρίνουμε, επομένως, απαραίτητο να διερευνηθεί πειραματικά η επίδραση του μηχανισμού διάχυσης της πυριτίας και του αλατιού σε μία εδαφική μάζα με διαστάσεις που αντιστοιχούν σε πραγματικές εφαρμογές.

Σημειώνουμε ότι οι Gallagher et al. [13] εφήρμοσαν τρεις μεθόδους για να εξακριβώσουν την αποτελεσματικότητα της εισπίεσης πυριτιάς μέσα στην εδαφική μάζα. Χρησιμοποίησαν εκρηκτικά για να προκαλέσουν τεχνητή ανάπτυξη πίεσης στο νερό των πόρων του φυσικού και του σταθεροποιημένου εδάφους. Σε πρώτη φάση κατέγραψαν την ανάπτυξη της πίεσης των πόρων και τον χρόνο που χρειάστηκε για την εκτόνωσή της. Η πίεση που αναπτύχθηκε στις σταθεροποιημένες περιοχές ήταν ουσιαστικά ίδιου μεγέθους με αυτήν που αναπτύχθηκε μέσα στο φυσικό έδαφος. Η εκτόνωση της πίεσης μέσα στο σταθεροποιημένο έδαφος χρειάστηκε περισσότερο χρόνο, χωρίς ο χρόνος να είναι δυσανάλογα μεγαλύτερος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.57. Οι μετρητές πίεσης P2 και P4 τοποθετήθηκαν μετά τον σχηματισμό της γέλης μέσα στη σταθεροποιημένη εδαφική μάζα. Οι μετρητές P1 και P3 τοποθετήθηκαν στο φυσικό έδαφος ακριβώς κάτω από την σταθεροποιημένη περιοχή. Ο λόγος της υπέρ – πίεσης του υγρού των πόρων προς την ενεργό κατακόρυφη τάση, $R_u = \Delta u / \sigma'_{vo}$, αποτελεί ένα κριτήριο ρευστοποίησης, όταν η τιμή του πλησιάζει τη μονάδα. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο η σταθεροποιημένη εδαφική μάζα υπέστη ρευστοποίηση [13]. Το κριτήριο $R_u = 1$ δεν είναι, όμως, το καταλληλότερο για να περιγραφεί η ρευστοποίηση σε ένα σταθεροποιημένο έδαφος. Το σταθεροποιημένο έδαφος διατηρεί τη δομή του ακόμα και όταν αναπτύσσει υψηλές πιέσεις στο νερό των πόρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το στερεό σκελετικό δίκτυο της γέλης αγκυρώνεται πάνω της εδαφικούς κόκκους και προσδίδει στο έδαφος ένα είδος συνοχής. Καταλληλότερο κριτήριο θεωρείται, επομένως, η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση.

Οι Gallagher et al. κατέγραψαν σε δεύτερη φάση τις καθιζήσεις που προκάλεσαν οι εκρήξεις, στην περιοχή του σταθεροποιημένου εδάφους και σε γειτονική περιοχή φυσικού εδάφους. Οι δύο κυκλικές επιφάνειες που έγιναν οι καταγραφές απείχαν 90 m στην οριζόντια έννοια. Στην πρώτη περιοχή η μέγιστη καθίζηση είχε τιμή 0.3 m, ενώ στη δεύτερη είχε τιμή 0.5 m. Οι Gallagher et al. εκφράζουν την πεποίθηση ότι η καθίζηση των 0.3 m οφείλεται κατά κύριο λόγο σε παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν κάτω από την σταθεροποιημένη εδαφική μάζα. Η ύπαρξη της σταθεροποιημένης ζώνης περιόρισε τις παραμορφώσεις, αφού στην περιοχή του φυσικού εδάφους η τιμή της καθίζησης ήταν 1.67 φορές μεγαλύτερη. Με κριτήριο τις παραμορφώσεις θεωρούν, επομένως, ότι η εισπίεση της πυριτιάς ήταν επιτυχής και ότι η σταθεροποιημένη εδαφική μάζα ουσιαστικά περιορίζει τον κίνδυνο ρευστοποίησης.

Άλλη μία διαδικασία εφαρμόστηκε για να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητα της διοχέτευσης πυριτιάς σε εδαφική μάζα στο πεδίο. Μετά τη διοχέτευση του υγρούματος και τον σχηματισμό της γέλης εκτελέστηκαν δοκιμές στατικής πενετρομέτρησης CPT (cone penetration test) και δοκιμές προσδιορισμού της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν μέσα στην σταθεροποιημένη εδαφική μάζα και μέσα στο φυσικό έδαφος, για να γίνουν οι συγκρίσεις. Επιπλέον συγκρίσεις έγιναν και με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών, καθώς στην ευρύτερη περιοχή είχαν διεξαχθεί εκτεταμένες δοκιμές πεδίου, όσον αφορά το φυσικό έδαφος. Η τοποθεσία αυτή βρίσκεται δίπλα στη Σήραγγα George Massey, στο Richmond (British Columbia, Canada) και κοντά στην Καναδική Περιοχή Εκτέλεσης Δοκιμών Ρευστοποίησης (CANLEX, Canadian Liquefaction Experiment Site). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν 27, 131 και 216 ημέρες μετά από τις εκρήξεις, για να διαπιστωθεί αν η ωρίμανση της γέλης βελτιώνει την εδαφική συμπεριφορά. Γενικά, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου και του φυσικού εδάφους. Οι Gallagher et al. συμπέραναν ότι τα ευεργετικά αποτελέσματα της σταθεροποίησης του εδάφους με κολλοειδή πυριτία δεν είναι ανιχνεύσιμα με τη βοήθεια των παραδοσιακών αυτών μεθόδων.

Γίνεται σαφές ότι, τουλάχιστον στη βιβλιογραφία που γνωρίζουμε, δεν έχει ελεγχθεί ποσοτικά η περιεκτικότητα σε πυριτία της γέλης μέσα στο πορώδες του εδάφους, ύστερα από παρατεταμένη

επαφή με το καθαρό νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η πιο κοινή μέθοδος ελέγχου είναι η εξαγωγή πυρήνων σταθεροποιημένου εδάφους και η εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο, με γνωστή περιεκτικότητα πυριτίας. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων υποδηλώνει αποτελεσματική διοχέτευση της πυριτίας σε συνθήκες πεδίου. Η εξιδανίκευση της μεθόδου θα ήταν η εκτέλεση δύο οικογενειών δοκιμών σε βάθος χρόνου. Η πρώτη θα αφορούσε δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο με γνωστή περιεκτικότητα πυριτίας στο πορώδες τους. Οι δοκιμές που θα εκτελούνταν με την πάροδο του χρόνου θα αποκαλύπταν την ευεργετική αύξηση της αντοχής, λόγω της ωρίμανσης της γέλης. Η δεύτερη οικογένεια θα αφορούσε δοκίμια από δειγματοληψίες στο πεδίο, σε αντίστοιχους χρόνους. Αν η αύξηση της αντοχής των δοκιμών της δεύτερης οικογένειας ακολουθεί την ίδια τάση στον χρόνο με αυτήν της πρώτης οικογένειας, τότε η παρόμοια ωρίμανση μπορεί να θεωρηθεί δείκτης παρόμοιας περιεκτικότητας. Φυσικά, η κλίμακα χρόνου θα πρέπει να είναι πολύ εκτενής, π.χ. πάνω από 1000 ημέρες.

Η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της εισπίεσης γίνεται και με άλλους έμμεσους και ποιοτικούς τρόπους. Για παράδειγμα, ο Towhata [37] αναφέρεται στην εκσκαφή της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας και στον οπτικό έλεγχο. Οι Gallagher et al. [13] σχολιάζουν τις δοκιμές πεδίου που εκτέλεσαν οι Moridis et al. (1996). Οι δεύτεροι εισπίεσαν υγρόλυμα πυριτίας 30% wt. σε ετερογενείς, ακόρεστους σχηματισμούς ιλύος, άμμου και χαλικιών. Η εκσκαφή μετά την εισπίεση αποκάλυψε ότι το υγρόλυμα είχε μετατραπεί σε γέλη. Το σταθεροποιημένο έδαφος μπορούσε να σταθεί σε κατακόρυφο πρηνές ύψους 3 m ανυποστήρικτο. Σε άλλο σημείο του κειμένου [13] αναφέρεται ότι οι Noll et al. (1993) διοχέτευσαν υγρόλυμα πυριτίας 5% wt. σε μία εδαφική μάζα κυκλικής επιφάνειας. Η διάμετρος του κύκλου ήταν 6 m και η διοχέτευση έγινε από βάθος 1 – 2.4 m. Στο κέντρο του κύκλου τοποθετήθηκε το πηγάδι εισπίεσης, ενώ ακτινικά τοποθετήθηκαν τα πηγάδια εξαγωγής του νερού. Τα αποτελέσματα του ελέγχου έδειξαν ότι η γέλη σχηματίστηκε σε μία επιφάνεια διαμέτρου περίπου 5 m και πάχους 3 m. Είναι πιθανό στον δακτύλιο 1 m στην περιφέρεια του κύκλου να μην σχηματίστηκε γέλη εξαιτίας της απομάκρυνσης των κολλοειδών σωματιδίων μέσω διάχυσης.

Κρίνουμε, επομένως, απαραίτητο να εξακριβωθεί αν υφίσταται σημαντική αραίωση της πυριτίας λόγω διάχυσης, σε μία εδαφική μάζα με διαστάσεις που αφορούν πραγματικές εφαρμογές. Ένα τέτοιο ενδεχόμενο θα αναχαίτιζε μερικώς τη διαδικασία της ωρίμανσης. Συχνά στη βιβλιογραφία συναντάται η διατύπωση ότι η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω σκλήρυνσης (curing) της γέλης [37], [26], [11]. Αν υφίσταται σημαντικός μηχανισμός διάχυσης στο πεδίο, η ευεργετική επίδραση της ωρίμανσης θα είναι περιορισμένη. Σε μία τέτοια περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αντοχή που εξασφαλίζει η γέλη μειωμένης περιεκτικότητας σε πυριτία και μάλιστα σε πρώιμο στάδιο ωρίμανσης. Θεωρούμε ότι μελλοντική πρωτότυπη έρευνα μπορεί να διεξαχθεί σε αυτόν τον κατευθυντήριο άξονα.

2.2.5 Η αντίδραση της συμπύκνωσης (condensation reaction) μέσα στο εδαφικό πορώδες

Τα κολλοειδή σωματίδια πυριτίας συνενώνονται και σχηματίζουν πολυμερή και αλυσίδες πολυμερών, μέσω της χημικής αντίδρασης της συμπύκνωσης (condensation reaction). Στην περίπτωση της κολλοειδούς πυριτίας, δύο συγκλίνουσες ομάδες σιλανόλης (Si-OH) στην επιφάνεια των σωματιδίων αντιδρούν σχηματίζοντας έναν δεσμό σιλοξάνης (Si-O-Si) και ένα μόριο νερού (H₂O), κατά το Σχήμα 2.5. Η αντίδραση είναι εξώθερμη ([5] p.237), [1]. Ο σχηματισμός του δεσμού σιλοξάνης οδηγεί σε συστολή της στερεής φάσης, με ταυτόχρονη αποβολή νερού. Η συστολή οφείλεται στο γεγονός ότι ο δεσμός σιλοξάνης καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από τις δύο ομάδες σιλανόλης που τον παρήγαγαν ([5] p.374). Η διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.40. Η

συνεπαγόμενη συρρίκνωση του στερεού σκελετού της γέλης οδηγεί σε σύγκλιση νέων ομάδων σιλανόλης και σε σχηματισμό νέων δεσμών σιλοξάνης. Ο μηχανισμός αυτός, προφανώς, δεν εξελίσσεται επ' αόριστον. Η σύγκλιση των στερεών αλυσίδων γίνεται δυσκολότερη όσο το δίκτυο γίνεται περισσότερο πυκνό. Η πυκνότερη σκελετική δομή είναι περισσότερο δύσκαμπτη και παρεμποδίζει την απομάκρυνση του νερού([5] p.378-379).

Η αντίδραση της συμπύκνωσης, όσον αφορά τις εφαρμογές σταθεροποίησης ρευστοποιήσιμων εδαφών, εξελίσσεται μέσα στο εδαφικό πορώδες που περιέχει υγρόλυμα ή γέλη. Η αλληλεπίδραση των κολλοειδών σωματιδίων με τον εδαφικό σκελετό εγείρει δευτερεύοντες μηχανισμούς, σημαντικούς για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων εδαφών. Δύο από τους μηχανισμούς που είμαστε σε θέση να συλλάβουμε και να ερμηνεύσουμε θεωρητικά είναι η *αυτό – ίαση*(*self – healing*) της γέλης και η *πυρηνοποίηση*(*nucleation*) κατά τον σχηματισμό της. Ένας τρίτος μηχανισμός, ίσως ερμηνεύει τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών, όπως εκδηλώθηκε στις ανακυκλικές δοκιμές που εκτελέστηκαν. Η συμπεριφορά αυτή διέφερε μερικώς από όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Η αιτία πιθανώς να είναι η διαφορετική μεθοδολογία παρασκευής δοκιμίων. Ο μηχανισμός που πιστεύουμε ότι κινητοποιείται οδηγεί σε μία ιδιάζουσα εξέλιξη επαφών και δομών μεταξύ των κόκκων του άτονου εδάφους, όταν στο πορώδες του σχηματίζεται η γέλη.

2.2.5.1 Στερεοποίηση σταθεροποιημένου εδάφους και μηχανισμός αυτό – ίασης(*consolidation of stabilized soil and self – healing mechanism*)

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(Gallagher [13] με αναφορά στους Ilter 1979 και Whang 1995). Οι παραμορφώσεις, βέβαια, που θα προκαλέσει ένα σεισμικό γεγονός αναμένεται να καταστρέψουν ένα μέρος από το σκελετικό δίκτυο της γέλης. Το ίδιο αναμένεται να συμβεί και κατά την στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων, σε συνθήκες εργαστηρίου. Είναι ενδιαφέρον να αναρωτηθούμε αν η γέλη πυριτίας μπορεί, αυθόρμητα, να ανακάμψει μερικώς. Η ανάκαμψη θα σχετίζεται με κάποιον μηχανισμό αυτό – ίασης(*self – healing mechanism*).

Η ευεργετική δράση της γέλης, όσον αφορά τη βελτίωση της εδαφικής απόκρισης, οφείλεται στην αλληλεπίδραση του στερεού σκελετού της γέλης με τον εδαφικό σκελετό. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό με την εξής συλλογιστική. Η καθαρή, κορεσμένη γέλη πυριτίας είναι ένα πολύ μαλακό, ευπαραμόρφωτο υλικό, με αμελητέα διατμητική αντοχή. Όπως θα δείξουμε σε επόμενες ενότητες, το σταθεροποιημένο έδαφος που περιέχει γέλη στους πόρους του παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη αντοχή σε συνθήκες τριαξονικής μονοτονικής φόρτισης. Επίσης, διατηρεί τη δομή του χωρίς να καταρρέει, σε συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης πολλών κύκλων. Η σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει ένα είδος συνεκτικότητας, αφού παρουσιάζει αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη. Μπορούμε, επομένως, να συμπεράνουμε ότι ο στερεός σκελετός της πυριτίας δρα ευεργετικά μέσω των δεσμών(*bonding*) που δημιουργεί μεταξύ των κόκκων του εδάφους και μέσω της ενθυλάκωσής τους(*encapsulation*) [13]. Αφού η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης κρύβεται στην ανάπτυξη του στερεού ιστού της γέλης, που αλληλεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό, στον ίδιο μηχανισμό θα πρέπει να αναζητήσουμε την ικανότητα αυτό – ίασης.

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 τον σχηματισμό της γέλης [5]. Η επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων είναι πλούσια σε ενεργές ομάδες σιλανόλης([4] p.26)

και εξασφαλίζει τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων δεσμών σιλοξάνης. Ένας νέος δεσμός θα δημιουργηθεί όταν ένα αιωρούμενο σωματίδιο συγκρουστεί με ένα άλλο, ή με μία σχηματισμένη αλυσίδα σωματιδίων. Στην περίπτωση που το σεισμικό γεγονός(ή η συστολή στερεοποίησης) συμβεί σε προχωρημένο στάδιο ωρίμανσης, οπότε τα αιωρούμενα σωματίδια είναι πολύ λίγα, υπάρχει και πάλι η δυνατότητα δημιουργίας νέων δεσμών σιλοξάνης. Αυτήν 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 τον σεισμό. Επίσης, προκαλείται από τη συστολή στερεοποίησης. Οι ενεργές ομάδες σιλανόλης έρχονται κοντά και προάγεται η αντίδραση της συμπύκνωσης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που αποκαλύπτει αυτήν τη συμπεριφορά έχει ήδη περιγραφεί στην Ενότητα 2.2.3 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Η συστολή κατά την ξήρανση της γέλης είναι τόσο έντονη, ώστε οδηγεί στον σχηματισμό ενός μεγάλου πλήθους νέων δεσμών. Η γέλη μετατρέπεται σε ένα σκληρό υλικό που μοιάζει με πλαστικό και δεν θυμίζει σε τίποτα την αρχική μαλακή μορφή της.

Στο εργαστήριό μας έγινε η προσπάθεια πειραματικής επαλήθευσης του μηχανισμού αυτό – ίασης της γέλης πυριτίας. Εφαρμόστηκαν δύο απλές διαδικασίες. Παρασκευάστηκε αραιό υγρόλυμα περιεκτικότητας 6% wt. σε πυριτία, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την σταθεροποίηση ενός δοκιμίου άμμου M31. Το υγρόλυμα που περίσσεψε από την παρασκευή του δοκιμίου αφέθηκε μέσα στο δοχείο του για 50 ώρες. Στη συνέχεια ο σκελετός της γέλης καταστράφηκε ολοκληρωτικά με μηχανική ανάδευση και το παχύρευστο υγρό που προέκυψε αφέθηκε στο δοχείο του. Μετά από 25 ώρες το παχύρευστο υγρό είχε σχηματίσει και πάλι στιβαρή γέλη. Οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι η παραπάνω διαδικασία συνοδεύτηκε από εξάτμιση ενός μέρους του υγρού της γέλης. Η δημιουργία νέων δεσμών και η πλήρης ανάκαμψη της γέλης ευνοήθηκε, στη συγκεκριμένη περίπτωση, από την έντονη συστολή ξήρανσης.

Η δεύτερη διαδικασία που εφαρμόστηκε είχε σκοπό να εξακριβωθεί αν μπορεί να προκύψει σημαντική και ανιχνεύσιμη αυτό – ίαση χωρίς να επέλθει συστολή. Η μέθοδος βασίζεται στη λογική ότι το υγιές στερεό δίκτυο της γέλης, που καλύπτει κατά το δυνατόν ομοιόμορφα το πορώδες του εδάφους, καθυστερεί την εκδήλωση της πίεσης πόρων στον μετρητή(βλέπετε Ενότητα 2.2.4.1 και Σχήμα 2.52). Αντίθετα, το τραυματισμένο δίκτυο επιτρέπει την άμεση επικοινωνία του νερού μέσα στο πορώδες του εδάφους με το νερό μέσα στις σωληνώσεις, μέχρι τον μετρητή. Επομένως, η υστέρηση στην καταγραφή της πίεσης πόρων είναι μία ένδειξη της κατάστασης του στερεού δικτύου της γέλης. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο που παρασκευάστηκε είχε γέλη στους πόρους με μηδενική σχετική πίεση στο υγρό. Η πίεση της κυψέλης αυξήθηκε από 5 σε 300 kPa. Η στράγγιση του νερού των πόρων ήταν εμποδιζόμενη. Το φορτίο της περίσφιγξης, υπό αυτές τις συνθήκες, το παρέλαβε το υγρό των πόρων του δοκιμίου. Η πίεση του υγρού των πόρων δεν εκδηλώθηκε αμέσως στον μετρητή πίεσης, ο οποίος βρίσκεται εκτός δοκιμίου. Χρειάστηκε χρόνος περίπου 50 λεπτών για να καταγραφεί πίεση ίση με 280 kPa. Η παράμετρος B έχει τιμή 0.95, υποδηλώνοντας καλό κορεσμό και απουσία συμπιεστής φάσης. Στο Σχήμα 2.58 παρουσιάζεται η υστέρηση της εκδήλωσης της πίεσης πόρων στον μετρητή που βρίσκεται εκτός του δοκιμίου, όταν αυξάνεται η πίεση περίσφιγξης. Η ερμηνεία αυτής της συμπεριφοράς έχει ήδη γίνει στην Ενότητα 2.2.4.1. Η αλληλεπίδραση της στερεάς φάσης της γέλης με την υγρή καθυστερεί τις μικρό – μετακινήσεις νερού που απαιτούνται, ώστε να εκδηλωθεί η πίεση στον μετρητή. Η σύγκριση των Σχημάτων 2.58 και 2.52 αποκαλύπτει ότι το πυκνότερο δίκτυο της γέλης με περιεκτικότητα 10% wt. σε πυριτία καθυστερεί περισσότερο τις μικρό – μετακινήσεις νερού, σε σχέση με το δίκτυο της γέλης 6% wt. Στο Σχήμα 2.52 η πίεση στον μετρητή σταθεροποιείται πρακτικά ύστερα από 200 λεπτά, ενώ στο Σχήμα 2.58 απαιτούνται μόλις 50 λεπτά.

Μετά από την ανάπτυξη του πλήρους πλατό πίεσης επιτράπηκε η αργή στράγγιση του δοκιμίου σε δεξαμενή νερού υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η στράγγιση του νερού έγινε χωρίς καταγραφή του όγκου που εκρέει. Η διαδικασία θα περιγραφεί λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα. Η εκροή του νερού από τους πόρους του δοκιμίου επιτρέπει να εκδηλωθεί η απαιτούμενη ογκομετρική παραμόρφωση, ώστε να παραλάβει ο εδαφικός σκελετός το φορτίο περίσφιγξης. Η στερεοποίηση(consolidation) του σταθεροποιημένου δοκιμίου διαρκεί περισσότερο χρόνο συγκριτικά με το φυσικό δοκίμιο. Η υστέρηση οφείλεται και πάλι στην αλληλεπίδραση του δικτύου της γέλης με το νερό. Οι ογκομετρικές παραμορφώσεις και η εκροή νερού κατά το στάδιο της στερεοποίησης κατά πάσα πιθανότητα τραυματίζουν τον στερεό ιστό της γέλης [37]. Η συστολή στερεοποίησης ενδέχεται, πάντως, να ευνοεί τον σχηματισμό νέων δεσμών σιλοξάνης και τη μερική αποκατάσταση του τραυματισμένου ιστού. Επιπλέον, η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου εδάφους δεν πρόκειται να συμβεί στις πραγματικές εφαρμογές, δεδομένου ότι το υγρόλυμα εισπνέζεται στο έδαφος κάτω από υφιστάμενες κατασκευές. Η ιδανική περίπτωση για τις εφαρμογές του εργαστηρίου θα ήταν να εισπνέζεται το υγρόλυμα σε δοκίμιο που βρίσκεται υπό ενεργό τάση [37]. Με αυτόν τον τρόπο, η γέλη που θα σχηματιστεί θα ενθυλακώσει τον εδαφικό σκελετό που έχει ήδη αναπτύξει τις επαφές μεταξύ των κόκκων(*grain contacts*) και το δίκτυο μεταβίβασης των θλιπτικών δυνάμεων(*force network*). Μία τέτοια μεθοδολογία απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, όπως αυτόν που περιγράφεται από τους Kodaka et al. [21]. Το σχήμα 2.59 παρουσιάζει αυτόν τον εξοπλισμό. Η άμμος τοποθετείται σε καλούπι και ένα έμβολο επιβάλλει κατακόρυφη ενεργό τάση. Το καλούπι εξασφαλίζει συνθήκες πλευρικής παρεμπόδισης K_0 . Στη συνέχεια εισπνέζεται από τη βάση του δοκιμίου αέριο διοξείδιο του άνθρακα CO_2 και μετά απαερωμένο νερό. Το διοξείδιο του άνθρακα διευκολύνει τον κορεσμό, αφού είναι περισσότερο διαλυτό στο νερό από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Μετά τον κορεσμό του δοκιμίου, το απαερωμένο νερό αντικαθίσταται από το εισπνιζόμενο υγρόλυμα πυριτίας. Το δοκίμιο αφήνεται στο καλούπι του για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται, ώστε να ωριμάσει η γέλη. Κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης διατηρείται σταθερή η κατακόρυφος ενεργός τάση. Στο κείμενο [21] δεν περιγράφεται πώς γίνεται η παρασκευή του κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου από το συμπαγές και πώς τοποθετείται στη συσκευή της στρεπτικής διάτμησης. Υποθέτουμε ότι αφαιρείται υλικό από το εσωτερικό με κάποιο περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο. Υπάρχει, επομένως, και σε αυτήν τη μεθοδολογία ο κίνδυνος να τραυματιστεί ο στερεός ιστός της γέλης. Ο τραυματισμός μπορεί να προκύψει κατά τη διάτρωση του συμπαγούς δοκιμίου ή κατά την αποτόνωση των τάσεων, όταν το δοκίμιο μεταφέρεται από το καλούπι ωρίμανσης στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης. Φυσικά, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης θα πρέπει να διαμορφωθεί ξανά μία ενεργός τάση, προτού εκτελεστεί η διάτμηση. Υποθέτουμε ότι οι Kodaka et al. δεν επέτρεψαν τη στράγγιση όταν αύξησαν την πίεση περίσφιγξης και βασίστηκαν στη μνήμη του εδάφους, όπως ακριβώς στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών.

Μετά το στάδιο της στερεοποίησης εκτελέστηκε η ανακυκλική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης με κωδικό SA6-300-2, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.60. Κατά την ανακυκλική δοκιμή επιβλήθηκε αρμονικά μεταβαλλόμενη διατμητική τάση(stress control) με περίοδο $T=10$ s και πλάτος $\Delta t=62$ kPa. Ο λόγος ανακυκλικής τάσης προκύπτει $CSR=\Delta t / p'_o =62$ kPa / 300 kPa=0.21. Το δοκίμιο είχε σχετική πυκνότητα $D_r=40.9\%$. Στο σχήμα παρατηρούμε ότι από τους πρώτους κύκλους προκύπτουν σημαντικές παραμορφώσεις. Μετά τον πέμπτο κύκλο, το εύρος της διατμητικής παραμόρφωσης γ έχει ξεπεράσει την τιμή 8% και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης πόρων R_u αρχίζει να ταλαντώνεται μεταξύ των τιμών 0.77 – 0.97. Αυτό σημαίνει ότι η καταγραφόμενη πίεση πόρων ταλαντώνεται μεταξύ των τιμών 230 – 290 kPa, ενώ υπάρχει σχετικά γρήγορη απόκριση στις μεταβολές πίεσης. Το στερεό δίκτυο της γέλης, προφανώς, έχει υποστεί σημαντικό τραυματισμό. Δίαυλοι επικοινωνίας έχουν ανοίξει μεταξύ του νερού μέσα στους πόρους του δοκιμίου και του νερού μέσα στις σωληνώσεις, μέχρι τον μετρητή πίεσης. Παρόλα αυτά, το σταθεροποιημένο έδαφος συνεχίζει να ανθίσταται στην επιβαλλόμενη τάση, αν και φαίνεται να

χρειάζεται η ανάπτυξη όλο και μεγαλύτερων παραμορφώσεων. Μία συσσώρευση των παραμορφώσεων προς τη φορά φόρτισης που χαρακτηρίζεται κατά σύμβαση ως αρνητική είναι εμφανής στο διάγραμμα $\tau - \gamma$. Έχουμε την πεποίθηση ότι αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η συσκευή προσπαθεί να εκτελέσει τον κάθε κύκλο φόρτισης ικανοποιώντας ταυτόχρονα δύο συνθήκες. Η μία είναι να επιβάλει το προκαθορισμένο πλάτος διατμητικής τάσης (stress control) και η άλλη είναι να ολοκληρώσει τον κύκλο σε περίοδο $T=10$ s. Δεδομένου ότι το σταθεροποιημένο έδαφος μπορεί να υπόκειται σε διαδοχικούς κύκλους φόρτισης με υπερβολικά μεγάλο εύρος διατμητικής παραμόρφωσης, η συσκευή αδυνατεί να τηρήσει αυστηρά και τις δύο συνθήκες. Στη φορά αρνητικής φόρτισης επιβάλλει ακριβώς το πλάτος τάσης, ενώ στη φορά θετικής φόρτισης το επιβαλλόμενο πλάτος τάσης μειώνεται ελαφρώς με την πάροδο του χρόνου. Αυτό φαίνεται να γίνεται ώστε να μπορέσει να κλείσει ο κάθε κύκλος σε χρόνο μίας περιόδου. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές στο διάγραμμα τάσης – χρόνου αποκαλύπτουν αυτήν τη μείωση της επιβαλλόμενης τάσης στη μία φορά. Το αποτέλεσμα είναι οι παραμορφώσεις στην αρνητική φορά φόρτισης να είναι περισσότερο τονισμένες από ότι στη θετική φορά, διότι το έμβολο επιμένει περισσότερο. Η ασύμμετρη μορφή των βρόχων υστέρησης $\tau - \gamma$ λόγω της ανισότροπης λειτουργίας της συσκευής στρεπτικής διάτμησης εμφανίζεται και στα διαγράμματα που παρουσιάζουν οι Kodaka et al. και ο Towhata. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.61. Η συσσώρευση παραμορφώσεων δεν είναι τόσο τονισμένη όσο στο Σχήμα 2.60 διότι το εύρος των παραμορφώσεων είναι μικρότερο.

Στη δοκιμή SA6-300-2, όπως και σε όλες τις υπόλοιπες που αφορούν σταθεροποιημένα εδάφη, δεν εκδηλώθηκε κατάρρευση της δομής του δοκιμίου, παρά τις πολύ υψηλές τιμές παραμόρφωσης και πίεσης πόρων. Το πείραμα τερματίζεται αναγκαστικά διότι εξαντλείται η ωφέλιμη διαδρομή του εμβόλου φόρτισης και των μετρητικών οργάνων. Φαίνεται, δηλαδή, ότι το σταθεροποιημένο έδαφος διατηρεί τη δομή του επειδή παραμένει άθικτο ένα πλήθος από δεσμούς στον ιστό της γέλης ή δημιουργούνται συνεχώς νέοι. Αυτός ο ιστός ενθυλακώνει τους κόκκους του εδάφους και αποτρέπει την κλασική κατάρρευση κατά τη ρευστοποίηση. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν και οι Kodaka et al. [21]. Συγκεκριμένα αναφέρουν ότι οι μεγάλες παραμορφώσεις και η μείωση της ενεργού τάσης δεν επέφεραν κατάρρευση ή ρευστοποίηση. Υπάρχει, όμως, μία σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν στο εργαστήριό μας και σε αυτά που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Τα σταθεροποιημένο έδαφος, στις δοκιμές που εκτελέσαμε, δεν εμφάνισε κατά κανόνα μειωμένες παραμορφώσεις συγκριτικά με το φυσικό έδαφος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, αναπτύχθηκαν νωρίτερα μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Το Σχήμα 2.62 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης φυσικής άμμου M31, με κωδικό A-300-5. Η αρχική ισότροπη ενεργός τάση είναι $p_o'=300$ kPa, η επιβαλλόμενη διατμητική τάση έχει πλάτος $\Delta\tau=64$ kPa και περίοδο $T=10$ s, ο λόγος ανακυκλικής τάσης είναι $CSR=0.21$ και η πυκνότητα του δοκιμίου είναι $D_r=41.3\%$. Πρόκειται, δηλαδή, για δοκιμή αντίστοιχη της SA6-300-2 που αφορά σταθεροποιημένο έδαφος. Όπως φαίνεται από στο Σχήμα 2.62 το φυσικό έδαφος στους 9 πρώτους κύκλους διατηρεί εύρος διατμητικής παραμόρφωσης μικρότερο από 1%, ενώ στον δέκατο κύκλο οι παραμορφώσεις αυξάνουν απότομα και το δοκίμιο καταρρέει πριν ολοκληρωθεί ο ενδέκατος κύκλος. Οφείλουμε να αναρωτηθούμε ποιος είναι ο λόγος που το σταθεροποιημένο δοκίμιο δεν εμφανίζει στους πρώτους κύκλους δυσμησία ανάλογη με το φυσικό δοκίμιο. Η πιθανή καταστροφή των δεσμών της γέλης κατά τη στερεοποίηση θα αναιρούσε μερικώς τα ευεργετικά αποτελέσματα της ενθυλάκωσης των κόκκων. Το σταθεροποιημένο έδαφος σε αυτήν την περίπτωση θα εμφάνιζε παραμορφώσεις που θα εξελίσσονταν παρόμοια με το φυσικό έδαφος. Οι αυξημένες παραμορφώσεις από τους πρώτους κύκλους, επομένως, δεν δικαιολογούνται από την καταστροφή των δεσμών. Αντιθέτως, μάλιστα, έχουμε την πεποίθηση ότι σχετίζονται με τον μηχανισμό δημιουργίας δεσμών.

Ο μηχανισμός δημιουργίας δεσμών στη γέλη είναι η αντίδραση της συμπύκνωσης(condensation reaction). Όπως αποκαλύπτει η ονομασία, κατά τη συμπύκνωση η στερεά φάση συρρικνώνεται([5] p.374). Στην Ενότητα 2.2.2 και στο Σχήμα 2.40 παρουσιάστηκε ο μηχανισμός της συναίρεσης(syneresis), ο οποίος αφορά τη συρρίκνωση κατά τον σχηματισμό του δεσμού σιλοξάνης. Έχει ήδη αναφερθεί ότι η γέλη κολλοειδούς πυριτίας Ludox® – SM εμφανίζει *μειωμένη συναίρεση* σε σύγκριση, για παράδειγμα, με το πυριτικό νάτριο(sodium silicate) ή με τη γέλη τιτανίου του Σχήματος 2.40. Το Σχήμα 2.63 παρουσιάζει τη συναίρεση που υπόκειται η γέλη πυριτικού νατρίου. Παρατηρούμε ότι, με τον χαρακτηρισμό «έντονη συναίρεση» νοείται μεταβολή στον όγκο της *σχηματισμένης γέλης* της τάξεως του 10 – 15% και άνω. Ας δεχτούμε ότι η μειωμένη συναίρεση της γέλης κολλοειδούς πυριτίας προκαλεί συστολή της τάξεως του 1%. Αυτή η συστολή αφορά τον όγκο των κενών μέσα στο έδαφος, άρα στον συνολικό όγκο του δοκιμίου η τάξη μεγέθους της παραμόρφωσης εκτιμάται ότι είναι 0.1%. Αναζητούμε τώρα τις συνέπειες που μπορεί να έχει μία τέτοιας τάξης συρρίκνωση όταν υφίσταται μέσα στην άτονη εδαφική μάζα. Θα θεωρήσουμε τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στο εργαστήριό μας για την παρασκευή σταθεροποιημένων δοκιμίων. Το εδαφικό υλικό εμβαπτίζεται σε καλούπι με υγρόλυμα πυριτίας. Στη συνέχεια το καλούπι σφραγίζεται και το δοκίμιο αφήνεται να ωριμάσει διατηρώντας την υγρασία του. Ο σχηματισμός της γέλης μέσα στο πορώδες του δοκιμίου γίνεται, επομένως, με τον εδαφικό σκελετό να βρίσκεται υπό μηδενική πρακτικά ενεργό τάση. Τα σωματίδια της πυριτίας συγκρούονται και αγκυρώνονται στους εδαφικούς κόκκους. Οι επιφάνειες των κόκκων λειτουργούν ως πυρήνες που επιταχύνουν την ανάπτυξη των πυριτικών αλυσίδων. Οι αλυσίδες αυτές καθώς αναπτύσσονται σε μέγεθος είναι περισσότερο πιθανό να καμφθούν προς τα πίσω, παρά να συνεχίσουν να αναπτύσσονται προς το κέντρο του εδαφικού πόρου. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη συστολή λόγω συμπύκνωσης και στην αγκύρωση των πυριτικών αλυσίδων πάνω στους εδαφικούς κόκκους. Γύρω από τους εδαφικούς κόκκους δημιουργείται μία περιοχή όπου το στερεό δίκτυο της γέλης έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πυριτία, σε σύγκριση με τις περιοχές στο κέντρο των πόρων. Σε αυτήν την *πλάκα(plaque)* υψηλής περιεκτικότητας, η συρρίκνωση λόγω συμπύκνωσης είναι περισσότερο έντονη. Οι Brinker και Scherer([5] p.379) αναφέρουν ότι η μειωμένη συναίρεση σε γέλες με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά, ίσως οφείλεται στη χαμηλή στιβαρότητα του δικτύου, το οποίο αδυνατεί να εκτοπίσει το νερό. Το αντίθετο αναμένεται να συμβαίνει όταν η περιεκτικότητα αυξάνεται και για όσο διάστημα το δίκτυο δεν έχει γίνει πάρα πολύ δύσκαμπτο και πυκνό. Είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι οι αλυσίδες της πυριτίας ασκούν δυνάμεις στους κόκκους αγκύρωσης, κατά τη συρρίκνωση τους. Οι εδαφικοί κόκκοι δεν βρίσκονται σε ισχυρή επαφή μεταξύ τους, δεδομένου ότι δεν υφίσταται σημαντική ενεργός τάση. Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στους κόκκους ίσως είναι ικανές να προκαλέσουν μετακινήσεις και να διαταράξουν τις επαφές που δημιούργησε η *απόθεση με τη βαρύτητα(gravity deposition)*. Ο σχηματισμός της γέλης, που ενθυλακώνει τους εδαφικούς κόκκους, ενδέχεται να προκαλεί ένα είδος στερεοποίησης(consolidation) και να σχηματίζει *δομές μεταξύ των κόκκων(force chains – force network)*, οι οποίες ανθίστανται στις τάσεις συστολής. Παρατηρούμε ότι η τελική ογκομετρική παραμόρφωση κατά τη στερεοποίηση της φυσικής άμμου M31, σε ενεργό τάση 300 kPa, έχει τυπικές τιμές στο εύρος 0.65 – 0.80%. Αν μπορεί να εκδηλωθεί συστολή λόγω συναίρεσης της ίδιας τάξης μεγέθους(δηλαδή 0.10%), τότε θεωρητικά δικαιολογείται ο μηχανισμός στερεοποίησης που περιγράψαμε. Οι τάσεις από τη συρρίκνωση της γέλης, οι οποίες ισοδυναμούν με τάσεις στερεοποίησης πάνω στον εδαφικό σκελετό, μπορεί να είναι μικρές σε τάξη μεγέθους, δημιουργούν όμως μία *προδιάθεση(predisposition)* για τη μελλοντική *εξέλιξη(evolution)* του εδαφικού ιστού. Όταν θα ακολουθήσει στη συνέχεια η ισότροπη στερεοποίηση του σταθεροποιημένου εδάφους, το νέο δίκτυο επαφών και δομών θα αναπτυχθεί με διαφορετικό τρόπο από ότι στο φυσικό έδαφος. Η προδιάθεση που έχει δημιουργηθεί από την *αυτό – στερεοποίηση(self – consolidation)* χειραγωγεί την ανάπτυξη του νέου δικτύου. Η εδαφική δομή που προκύπτει φαίνεται, από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, να είναι

λιγότερο δύσμητη από αυτήν του φυσικού εδάφους, που έχει υποστεί ισότροπη στερεοποίηση κατά τα γνωστά. Η μειωμένη δυσμησία του σταθεροποιημένου εδάφους, στο οποίο η γέλη σχηματίστηκε και ωρίμασε υπό μηδενική πρακτικά ενεργό τάση, είναι ιδιαίτερα τονισμένη στις ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης, παρά στις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης. Πιστεύουμε ότι αυτό εξηγείται από τη στροφή των κυρίων τάσεων που επιβάλλεται στη δοκιμή στρεπτικής διάτμησης. Αντίθετα, στην κλασική δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης η μεγάλη κύρια τάση σ_1 αυξάνεται και παραμένει πάντα στη διεύθυνση της κατακορύφου. Η διεύθυνση της κατακορύφου είναι ταυτόχρονα και η διεύθυνση της βαρύτητας, που καθορίζει την ανάπτυξη των επαφών των κόκκων κατά την έγχυση τους στο καλούπι.

Επιστρέφουμε στη δεύτερη μεθοδολογία ελέγχου της δυνατότητας αυτό – ίασης της γέλης, χωρίς να επέλθει συστολή. Στο Σχήμα 2.60 παρατηρούμε ότι στις μεγάλες παραμορφώσεις, η εκδήλωση των μεταβολών της πίεσης των πόρων στον μετρητή είναι άμεση και δεν παρουσιάζει υστέρηση. Ο στερεός ιστός της γέλης έχει υποστεί σημαντικό τραυματισμό και υπάρχει ανεμπόδιστη επικοινωνία του νερού των πόρων του δοκιμίου, με το νερό στις σωληνώσεις. Μπορούμε να αποφανθούμε ότι η γέλη έχει υποστεί *διατμητική λέπτυνση* (*shear thinning*) και το ιξώδες της έχει μειωθεί. Η συμπεριφορά αυτή είναι σύμφωνη με όσα αναφέρουν οι Sacks και Sheu (βλέπετε Ενότητα 2.2.1 και Σχήματα 2.11, 2.12). Η μερική καταστροφή του ιστού της γέλης, που ισοδυναμεί με μείωση του ιξώδους της, εντοπίζεται και με τον εξής απλό τρόπο. Ακριβώς μετά το πέρας της ανακυκλικής δοκιμής η μετρούμενη πίεση πόρων έχει εξισωθεί με την πίεση περίσφιξης (αλλά το δοκίμιο δεν καταρρέει). Επιβάλλεται μία μεταβολή της πίεσης περίσφιξης και καταγράφεται η απόκριση στη μεταβολή της πίεσης πόρων. Η υστέρηση της απόκρισης είναι δείκτης της υγείας του στερεού ιστού της γέλης. Το Σχήμα 2.64 απεικονίζει αυτήν τη διαδικασία. Η άμεση απόκριση χωρίς υστέρηση που παρατηρείται υποδηλώνει ότι το στερεό δίκτυο της γέλης έχει όντως τραυματιστεί και το ιξώδες έχει μειωθεί. Στη συνέχεια το δοκίμιο αφήνεται για κάποιο χρονικό διάστημα, σε *συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης*, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Το Σχήμα 2.65 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής ύστερα από χρονικό διάστημα 12 ωρών. Η απόκριση παραμένει άμεση, χωρίς να παρουσιάζεται υστέρηση. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί ανιχνεύσιμη αποκατάσταση του ιστού της γέλης, στο δεδομένο χρονικό διάστημα και με απαγόρευση της συστολής λόγω στράγγισης.

Η ιδανική εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου απαιτεί την επανάληψη του πειράματος σε χρονικό ορίζοντα ημερών και όχι ωρών. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να επιτραπεί η στράγγιση του νερού των πόρων και να επαναληφθεί ο έλεγχος. Η στράγγιση του νερού μετά από την εκτέλεση της δοκιμής διάτμησης, θα επέτρεπε τη συστολή και άρα τη σύγκλιση των πυριτικών αλυσίδων. Η εκροή, όμως, του νερού μέσα από τους πόρους της τραυματισμένης γέλης ενέχει τον κίνδυνο να προκαλέσει εκτεταμένη κυκλοφορία της κολλοειδούς ουσίας στις σωληνώσεις της συσκευής. Η απόθεση των κολλοειδών, σε συνδυασμό με την καθυστέρηση του καθαρισμού των γραμμών κυκλοφορίας του νερού, προκάλεσε προβλήματα απόφραξης στη τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων. Για αυτόν τον λόγο σταμάτησε η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου. Δεν υπάρχουν, επομένως, μετρήσεις που να επαληθεύουν, ότι η συστολή λόγω της στράγγισης του νερού, μετά την επιβολή των διατμητικών παραμορφώσεων, είναι ικανή να επιφέρει μερική αποκατάσταση του τραυματισμένου στερεού δικτύου της γέλης.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στερεοποίησης ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου M31, με γέλη πυριτίας 10% wt. Η στερεοποίηση αφορά συμπαγές κυλινδρικό δοκίμιο και έγινε στην τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων. Η ενεργός τάση της ισότροπης στερεοποίησης είναι 1000 kPa. Η δοκιμή σχετίζεται με τα πειράματα αστράγγισης,

τριαξονικής συμπίεσης σε καθεστώς υψηλών ενεργών τάσεων, που εκτελέστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ. MIS 375618. Στη συγκεκριμένη δοκιμή η στερεοποίηση πραγματοποιήθηκε με καταγραφή του όγκου του νερού που εκρέει. Η διαδικασία αυτή οδηγεί αναπόφευκτα σε παρατεταμένη κυκλοφορία της κολλοειδούς ουσίας μέσα στις σωληνώσεις της συσκευής. Κατά κανόνα η στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμών έγινε με εκροή του νερού σε ειδική εξωτερική δεξαμενή και όχι στη φούσκα μέτρησης των μεταβολών όγκου. Σε όλες τις δοκιμές που η εκροή έγινε χωρίς μέτρηση της μεταβολής όγκου, ο δείκτης πόρων του εδάφους μετά τη στερεοποίηση προσδιορίστηκε έμμεσα. Συγκεκριμένα, έγινε απλή αναλογική αντιστοιχία της αξονικής και της ογκομετρικής παραμόρφωσης των φυσικών δοκιμών, με την αξονική παραμόρφωση των σταθεροποιημένων, για να προκύψει η μη μετρούμενη ογκομετρική παραμόρφωση των δεύτερων. Επιπλέον, εφαρμόστηκε μία τυποποιημένη διαδικασία ελέγχου του βαθμού ολοκλήρωσης της στερεοποίησης, η οποία θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα. Το Σχήμα 2.66 απεικονίζει τη στερεοποίηση του σταθεροποιημένου εδάφους κατά τη δοκιμή SA10-1000-9. Γίνεται η συγκριτική παράθεση και της στερεοποίησης του φυσικού εδάφους κατά τη δοκιμή A-1000-1. Παρατηρούμε ότι η εκροή νερού μέσα από το σταθεροποιημένο δοκίμιο γίνεται αργά, αφού το στερεό δίκτυο της γέλης παρεμποδίζει τη μετακίνηση του νερού. Μακροπρόθεσμα, όμως, ο όγκος νερού που εκρέει είναι παρόμοιος με αυτόν που εκρέει μέσα από ένα φυσικό δοκίμιο. Θεωρούμε, επομένως, ότι η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου εδάφους έχει ολοκληρωθεί και το φορτίο περίσφιγξης έχει μεταβιβαστεί στον εδαφικό σκελετό.

2.2.5.2 Μηχανισμός πυρηνοποίησης κατά τον σχηματισμό της γέλης μέσα στο εδαφικό πορώδες (*nucleation mechanism during gelation inside the pores of the soil*)

Ας φανταστούμε ένα αποσταθεροποιημένο υγρόλυμα με μικρή περιεκτικότητα ($\leq 10\%$ wt.) σε κολλοειδή σωματίδια μέσα σε ένα μεγάλο δοχείο. Τα κολλοειδή σωματίδια, όπως έχουμε ήδη περιγράψει, εμφανίζουν συνάφεια με τα ξένα σώματα και προσκολλώνται πάνω τους. Επίσης, εμφανίζουν συνοχή μέσω ασθενών δυνάμεων van der Waals και αν έρθουν αρκετά κοντά μετά από μία σύγκρουση που υπερνικά τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις, σχηματίζεται ο χημικός δεσμός σιλοξάνης. Ο διαδοχικός σχηματισμός δεσμών σιλοξάνης οδηγεί στην ανάπτυξη του τρισδιάστατου στερεού δικτύου της γέλης. Το δίκτυο αγκυρώνεται πάνω στα τοιχώματα του δοχείου (βλέπετε Ενότητα 2.2.1). Η διαδικασία της γελοποίησης επιταχύνεται από παράγοντες που προάγουν τις συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων, την κινητικότητα τους και την εξασθένιση των απωστικών δυνάμεων. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των κολλοειδών στερεών, αυξάνεται η πιθανότητα συγκρούσεων. Καθώς ένα κολλοειδές σφαιρίδιο βαδίζει τον τυχαίο περίπατό του, που χαρακτηρίζεται ως «κίνηση Brown», συγκρούεται βραχυχρόνια με τα μόρια του υγρού διασπορέα. Μακροχρόνια θα συναντήσει ένα άλλο κολλοειδές σφαιρίδιο και αν η σύγκρουση είναι αρκετά βίαιη θα σχηματιστεί δεσμός σιλοξάνης.

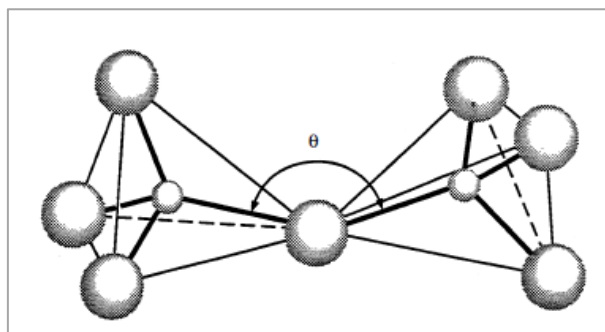
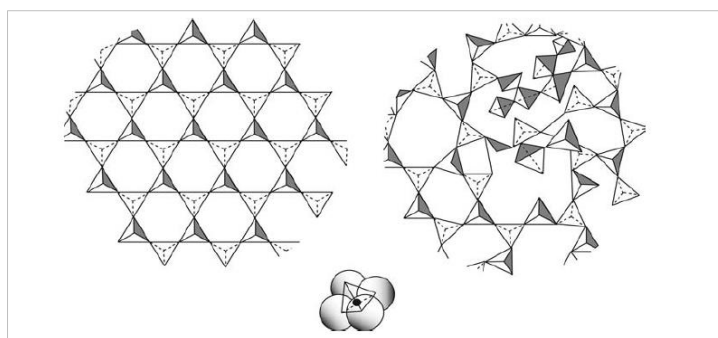
Ο χαρακτηρισμός «μακροχρόνια» είναι σχετικός και εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα των κολλοειδών σωματιδίων [Lowent]. Εξαρτάται, όμως, και από την *επίδραση του στερεού συνόρου (boundary effect)* που αποτελεί το δοχείο. Η επιφάνεια του δοχείου περιέχει ατέλειες που λειτουργούν ως *πυρήνες (nuclei)* προσκόλλησης και συγκέντρωσης των κολλοειδών στερεών. Η περιοχή γύρω από τους πυρήνες προσελκύει όλο και περισσότερα σωματίδια, καθώς ο ιστός αναπτύσσεται σε μέγεθος και απλώνεται μακριά από το σημείο εκκίνησης. Όταν το δοχείο είναι αρκετά μεγάλο, η επίδραση του συνόρου είναι ασθενής. Σε αυτήν την περίπτωση, ως πυρήνες λειτουργούν κατά κύριο λόγο τα ίδια τα συμπλέγματα κολλοειδών, που αναπτύσσονται σε μέγεθος και προσελκύουν όλο και περισσότερα σωματίδια. Μόλις τα συμπλέγματα αποκτήσουν επαρκώς μεγάλο μέγεθος, ο αριθμός των νέων κολλοειδών που παγιδεύουν αυξάνεται δυσανάλογα. Αυτή η κατάσταση εντοπίζεται στα διαγράμματα μεταβολής του ιξώδους ενός υγρολύματος με την πάροδο

του χρόνου(βλέπετε Σχήματα 2.16 έως 2.25), στο σημείο όπου η καμπύλη αρχίζει να αυξάνεται εκθετικά.

Όταν το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας βρίσκεται μέσα στο πορώδες του εδάφους, η μικρή διάσταση των πόρων ενισχύει την επίδραση του συνόρου. Οι εδαφικοί κόκκοι προσφέρουν ένα μεγάλο ανάπτυγμα επιφανειών και εσοχών, πλούσιο σε περιοχές που μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες. Οι περιοχές αυτές προοδευτικά γεμίζουν με κολλοειδή σωματίδια που σχηματίζουν αλυσίδες. Οι αλυσίδες κοντά στο στερεό σύνορο αναπτύσσονται σε μέγεθος γρηγορότερα από τις αντίστοιχες στο κέντρο του πόρου. Δημιουργείται, με αυτόν τον τρόπο, μία ανομοιογενής κατανομή της περιεκτικότητας των κολλοειδών στερεών, μέσα στον εδαφικό πόρο. Γύρω από τους εδαφικούς κόκκους σχηματίζεται μία *πλάκα (plaque)* αυξημένης περιεκτικότητας σε πυριτία. Η ανομοιογένεια ενισχύεται περαιτέρω από τη συστολή λόγω συμπύκνωσης. Ο στερεός ιστός, καθώς αναπτύσσεται προς το κέντρο του πόρου, κάμπτεται λόγω συστολής και επιστρέφει προς το σημείο αγκύρωσης.

Στην Ενότητα 2.2.4.1 και στο Σχήμα 2.52 έχουμε παρουσιάσει πειραματικά αποτελέσματα τα οποία μπορούν να ερμηνευτούν από τον μηχανισμό πυρηνοποίησης κατά τον σχηματισμό της γέλης. Σε επόμενη ενότητα θα παρουσιαστούν και άλλα, που σχετίζονται με την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη σταθεροποιημένων εδαφών. Επίσης, έχουμε παραθέσει την εργαστηριακή παρατήρηση ότι η διαλυτότητα του αλατιού μειώνεται, όταν προστεθεί σε υγρόλυμα πυριτίας και όχι σε καθαρό νερό. Θα παραθέσουμε ακόμα μία εργαστηριακή παρατήρηση που αποδεικνύει την επίδραση του συνόρου πάνω στον σχηματισμό της γέλης. Υγρόλυμα με περιεκτικότητα 10% wt. σε πυριτία παρασκευάστηκε και αφέθηκε να ωριμάσει μέσα σε ένα μεγάλο δοχείο, όπως αυτό του Σχήματος 2.8. Μέσα στο δοχείο βυθίστηκε και αφέθηκε μία προχοΐδα μικρής διαμέτρου. Το υγρόλυμα μέσα στην προχοΐδα μετατράπηκε σε γέλη γρηγορότερα από το υγρόλυμα μέσα στο δοχείο.

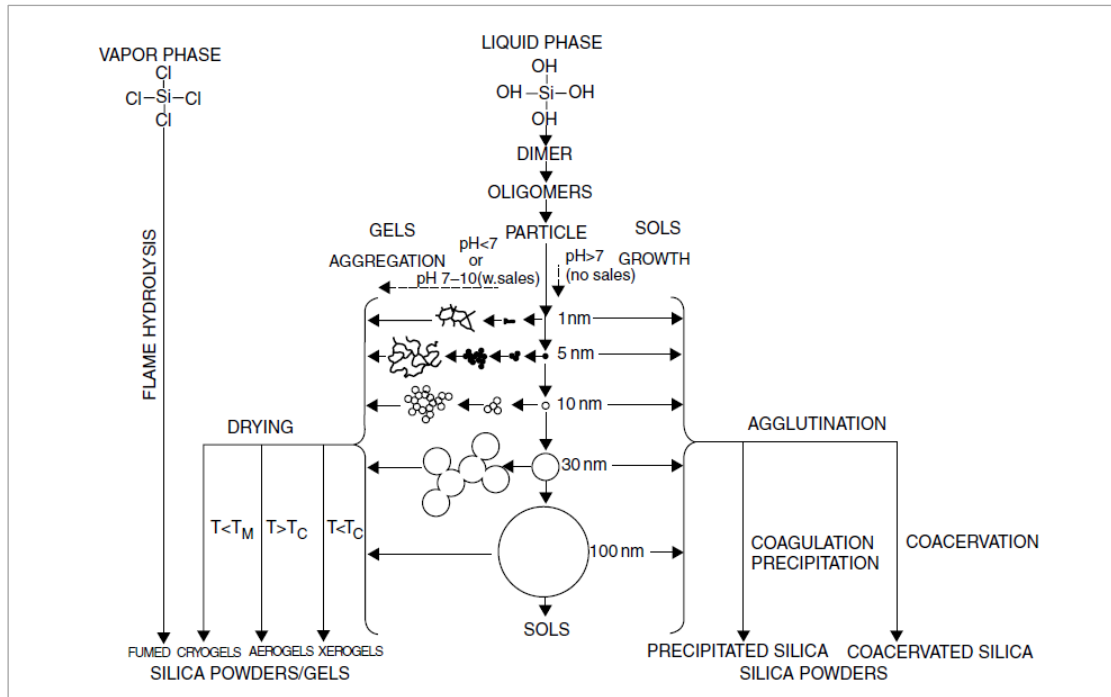
2.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2



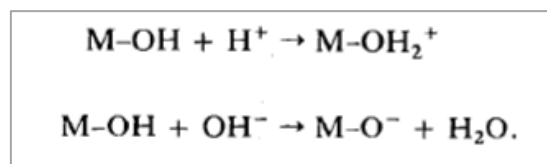
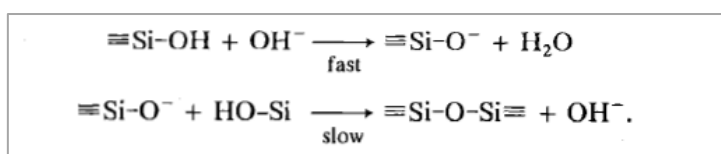
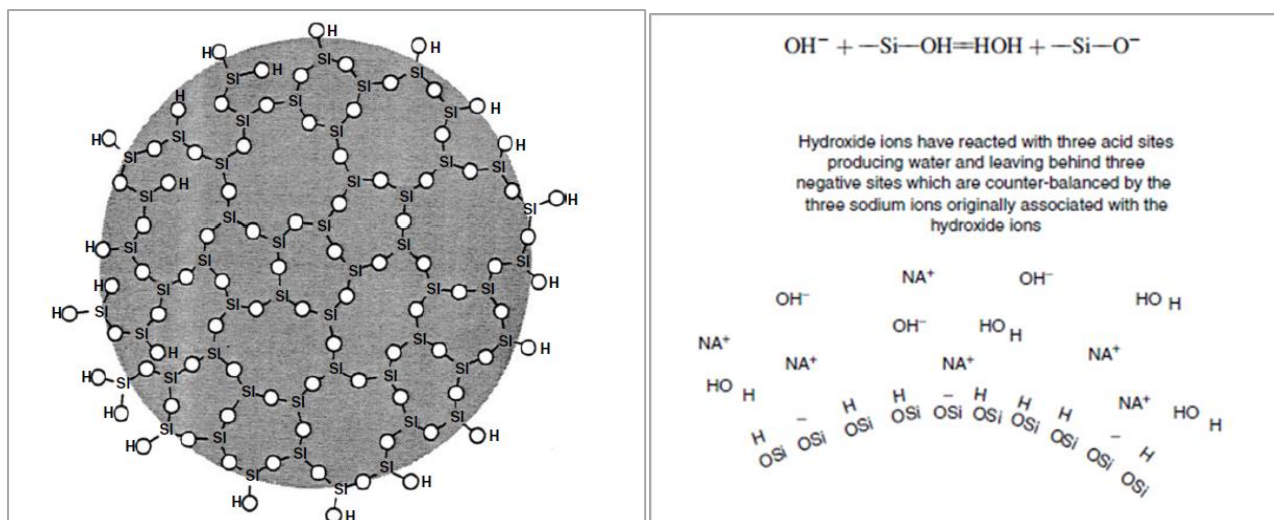
Density (<i>d</i>) of Crystalline and Amorphous Silicas	
Silica	Density (g/ml at 273 K)
Coesite	3.01
α-Quartz	2.65
β-Quartz	2.53
β-Tridymite	2.26
β-Cristobalite	2.21
Amorphous silica	2.20

<p>Structural motif found in α-quartz, but also found in almost all forms of silicon dioxide.</p>

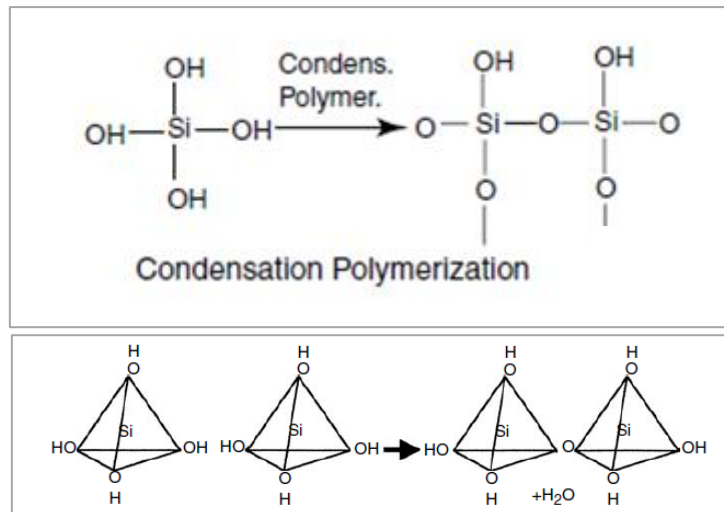
Σχήμα 2.1. Πάνω: κρυσταλλική και άμορφη διάταξη της βασικής τετραεδρικής δομικής ιοντικής μονάδας $[\text{SiO}_4]^{4-}$. **Μέση:** δύο γειτονικά τετράεδρα συνδεδεμένα με δεσμό σιλοξάνης Si-O-Si. Στην άμορφη πυριτία η γωνία του δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si ποικίλει, η απόσταση όμως πυριτίου – οξυγόνου Si-O είναι σταθερή. Στην κρυσταλλική μορφή α-quartz το μήκος του δεσμού Si-O είναι ίσο περίπου με 0.162 nm και η γωνία του δεσμού Si-O-Si είναι 144 μοίρες. Η πυκνότητα της κρυσταλλικής μορφής α-quartz είναι 2.65 g/cc(στους 273 K), ενώ η άμορφη πυριτία έχει πυκνότητα 2.20 g/cc(στους 273 K). Η μικρή απόσταση κάνει τον δεσμό Si-O να έχει υψηλή σταθερότητα. Η ενθαλπία του δεσμού Si-O έχει τιμή 460 kJ/mol και μπορεί να συγκριθεί με την ενθαλπία του δεσμού C-C στο διαμάντι(μήκους 0.154 nm), που έχει τιμή 348 kJ/mol. Δηλαδή, η δημιουργία δεσμών Si-O απελευθερώνει ενέργεια 460 kJ/mol(εξώθερμη αντίδραση) και αντίστροφα, η καταστροφή των δεσμών απαιτεί την ίδια ενέργεια(ενδόθερμη). Ο δεσμός Si-O κατά κανόνα χαρακτηρίζεται ως πολωμένος ομοιοπολικός(polar covalent), διότι τα ηλεκτρόνια που μοιράζονται περνούν περισσότερο χρόνο κοντά στο έντονα ηλεκτρο-αρνητικό(electronegative) άτομο οξυγόνου. Οι Bergna και Roberts [4] χαρακτηρίζουν το δεσμό και ως μερικώς ιοντικό(partial ionic), αφού το μήκος 0.162 nm είναι μικρότερο από το άθροισμα των ομοιοπολικών ακτινών του πυριτίου και του οξυγόνου(0.191 nm). **Κάτω αριστερά:** η τετραεδρική δομή στην κρυσταλλική μορφή α-quartz. **Κάτω δεξιά:** Η πυκνότητα της κρυσταλλικής και άμορφης πυριτίας. Τα σχήματα είναι από Bergna και Roberts [4] με εξαίρεση το σχήμα κάτω αριστερά, το οποίο είναι από Wikipedia.



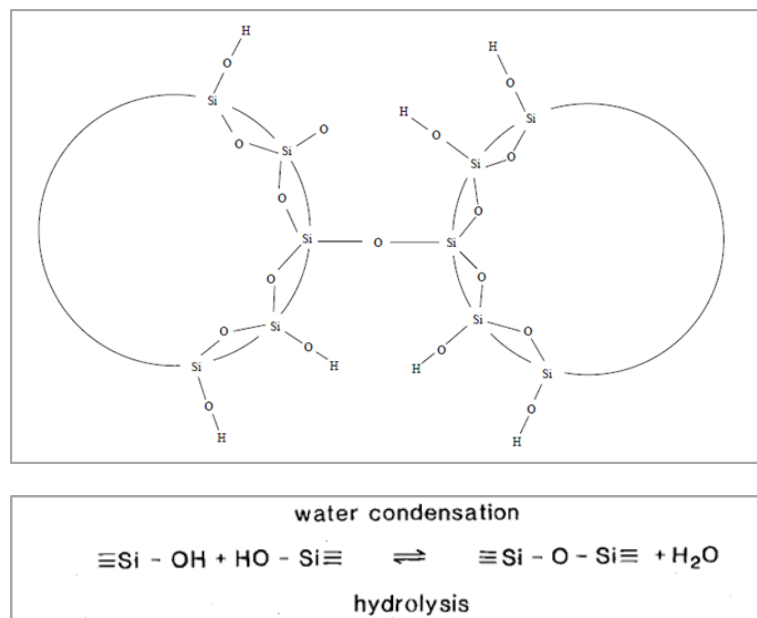
Σχήμα 2.2. Το διευρυμένο (σε σχέση με το διάγραμμα του Iler) γενεαλογικό δέντρο των διάφορων ειδών κολλοειδούς πυριτίας. Παρουσιάζεται ο σχηματισμός των πυριτικών υγρών διασπορών, γελών και σκονών. Ο σχηματισμός σωματιδίων γίνεται με συμπύκνωση και πολυμερισμό (condensation and polymerization) του ορθοπυριτικού οξέως. Ανάλογα με τις συνθήκες PH και την παρουσία ή όχι αλάτων ακολουθεί η ανάπτυξη των σωματιδίων ή η συσσωμάτωση προς σχηματισμό γέλης. Η ανάπτυξη των κολλοειδών σωματιδίων (growth of particles) λαμβάνει χώρα σε βασικά διαλύματα με απουσία ηλεκτρολυτών - αλάτων. Σε όξινα διαλύματα ή / και με την παρουσία ηλεκτρολυτών - αλάτων τα κολλοειδή σωματίδια συσσωματώνονται (aggregation of particles) σε έναν τρισδιάστατο σκελετό που περικλείει την υγρή φάση. Το διφασικό αυτό υλικό αποτελεί τη γέλη (gel). Σχήμα από Bergna και Roberts [4].



Σχήμα 2.3. Πάνω αριστερά: Διοδιάστατη απεικόνιση ενός σφαιρικού σωματιδίου κολλοειδούς πυριτίας. Το τέταρτο οξυγόνο της βασικής τετραεδρικής μονάδας SiO₄ 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 συσσώματωση και τη γελοποίηση, δηλαδή σταθεροποιεί το υγρόλυμα [4], [5], [32]. Σχήμα από Gallagher [11]. Πάνω δεξιά: Σταθεροποίηση του υγρολύματος 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 *διπλό ρόλο* [4]. Σε υψηλές τιμές PH βοηθά να εμφανιστούν αρνητικά φορτισμένες περιοχές στην επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων και αποτρέπει τον σχηματισμό γέλης. Σχήμα από Bergna [4]. Μέση: Σε ενδιάμεσες τιμές PH το ιόν υδροξυλίου λειτουργεί ως *καταλύτης*(*catalyst*) στην αντίδραση της συμπύκνωσης και προάγει τον σχηματισμό γέλης [4]. Σχήμα από [5]. Κάτω: Οι επιφανειακές ομάδες σιλανόλης προσλαμβάνουν πρωτόνια από ένα έντονα όξινο περιβάλλον και φορτίζονται θετικά, ενώ αποβάλλουν πρωτόνια σε ένα αλκαλικό περιβάλλον και φορτίζονται αρνητικά. Το μέταλλο M είναι το πυρίτιο Si. Το Σχήμα είναι από Brinker και Scherer [5].



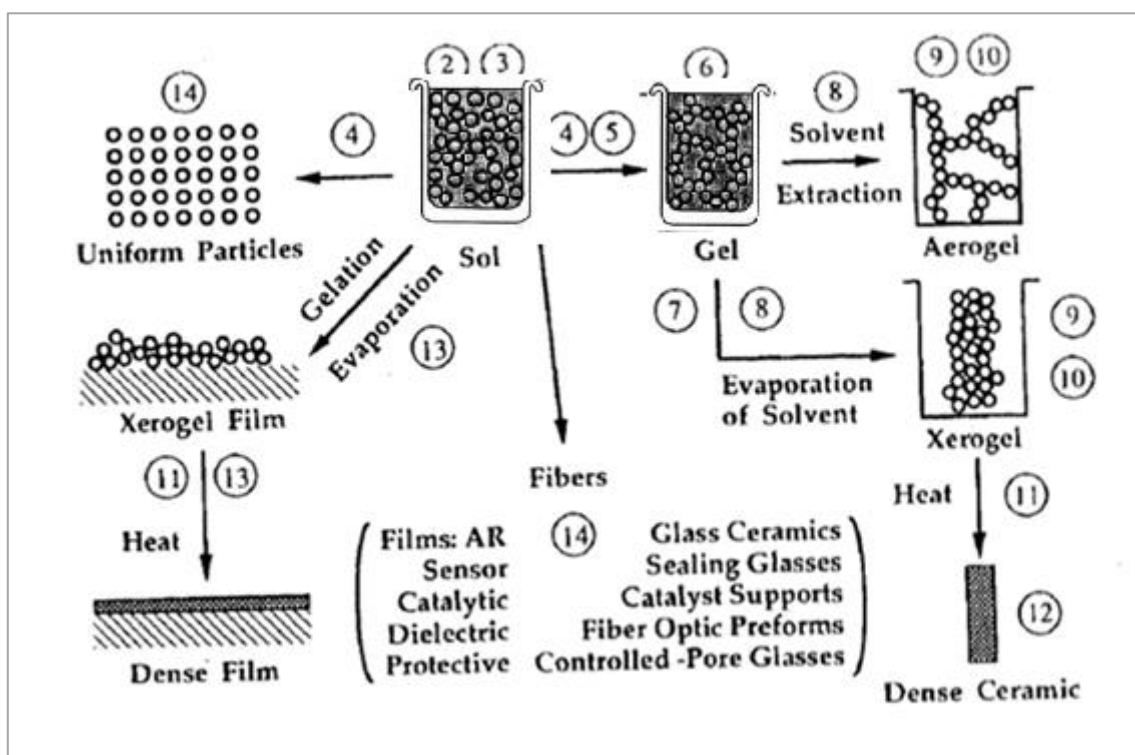
Σχήμα 2.4. Συμπύκνωση και πολυμερισμός του ορθοπυριτικού οξέος H_4SiO_4 ή πιο σωστά του υδροξο - σύνθετου πυριτίου $Si(OH)_4$, το οποίο μπορεί να παγιδεύει ιόντα υδρογόνου H^+ και να συμπεριφέρεται ως οξύ [29]. Συμπύκνωση(condensation) είναι η χημική αντίδραση κατά την οποία δύο μόρια ή ομάδες μορίων ενώνονται σε μία μεγαλύτερη δομή, με ταυτόχρονη αποβολή ενός μικρότερου μορίου(π.χ. νερού). Σχηματίζονται τα πρώτα ολιγομερή με ομάδες σιλανόλης στην επιφάνειά τους. Περαιτέρω πολυμερισμός και συμπύκνωση των τετραέδρων SiO_4 οδηγεί στο σχηματισμό του σωματιδίου του Σχήματος 2.3. Η σύνδεση - συμπύκνωση τέτοιων σωματιδίων(κατά τη γελοποίηση) γίνεται με τον σχηματισμό δεσμού σιλοξάνης $Si-O-Si$ μεταξύ τους και την απομάκρυνση ενός μορίου νερού H_2O , κατά το Σχήμα 2.5. Το Σχήμα 2.4 είναι από τους Bergna και Roberts [4].



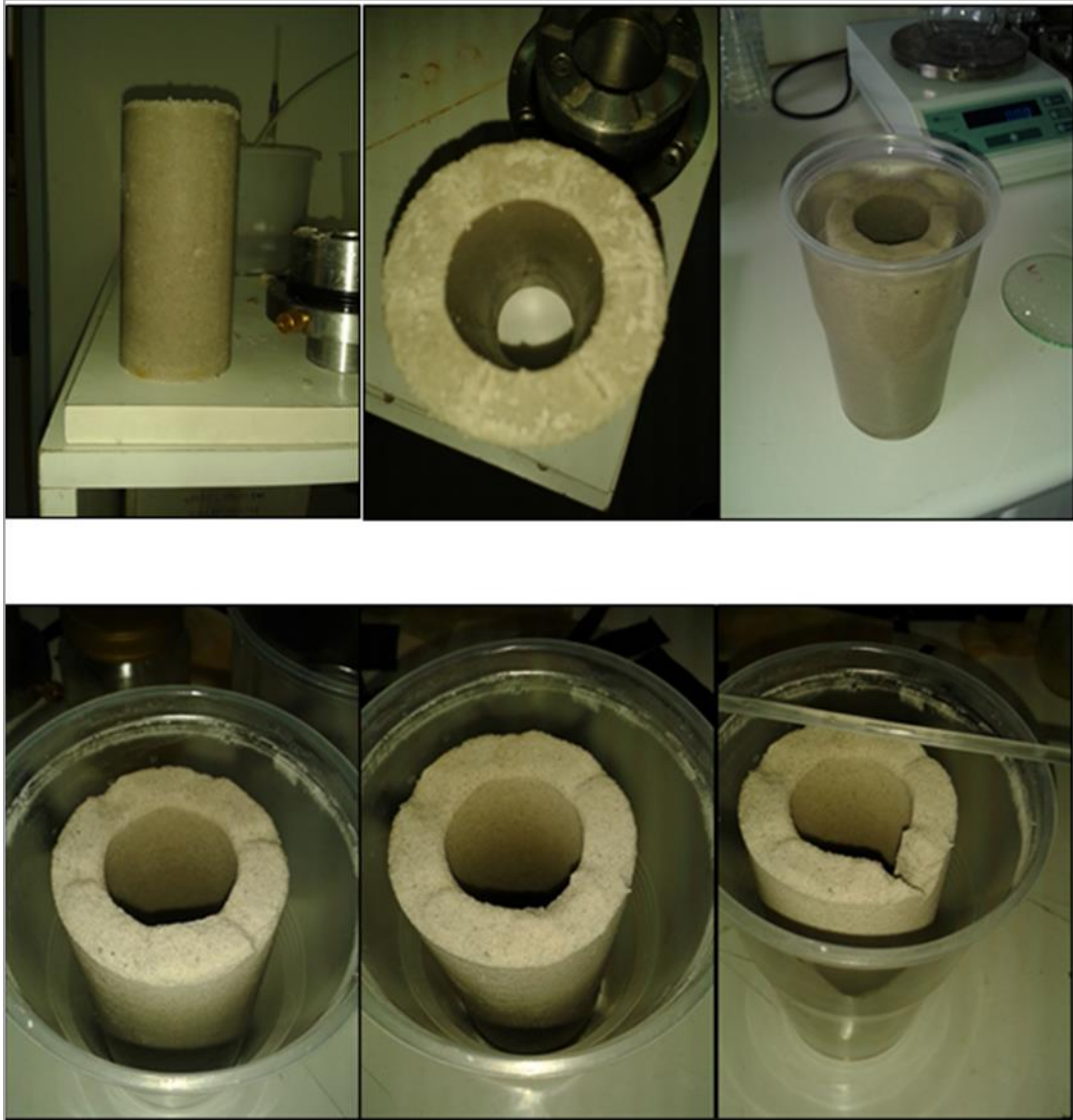
Σχήμα 2.5. Πάνω: σύνδεση δύο σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας κατά τη γελοποίηση. Κάτω: η χημική αντίδραση της συμπύκνωσης(condensation) που περιγράφει αυτήν τη σύνδεση με τη δημιουργία δεσμού σιλοξάνης $Si-O-Si$ και την αποβολή ενός μορίου νερού. Το αποβαλλόμενο νερό παραμένει μέσα στους πόρους της σχηματιζόμενης γέλης. Ο σχηματισμός του δεσμού σιλοξάνης είναι μη αναστρέψιμος χημικά, όταν δεν προάγεται ο από - πολυμερισμός(depolymerization). Άνω σχήμα από Gallagher [11], κάτω σχήμα από Brinker και Scherer [5].

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας Ludox-SM (ερευνητικό MIS 375618, Θαλής - Π.Θ.).

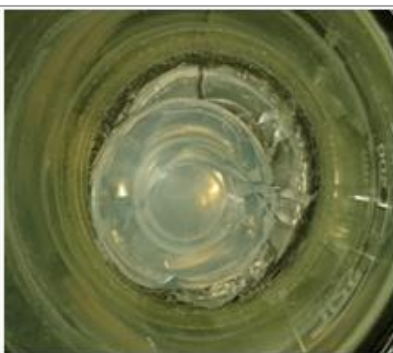
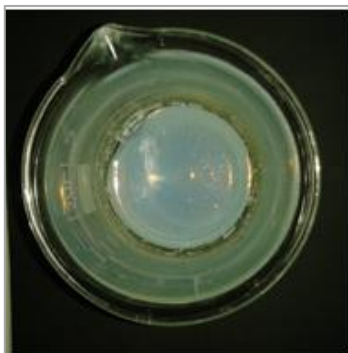
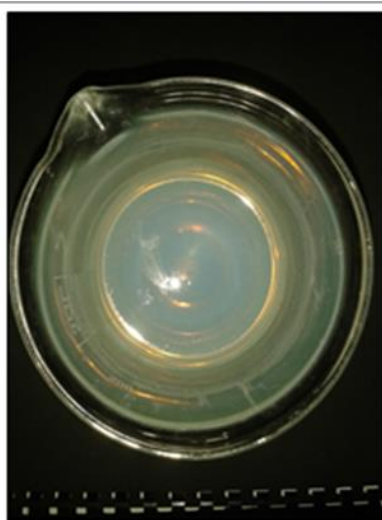
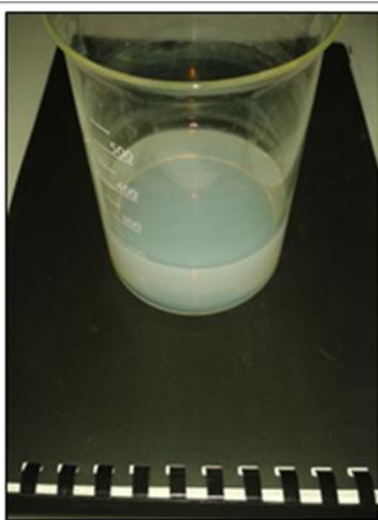
Είδος πυριτίας	Ludox®-SM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50
Σταθεροποιητής	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30
Ιξώδες (cP)	5.5
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345



Σχήμα 2.6. Σύνοψη των φυσικοχημικών διαδικασιών των υγρών διασπορών και των γελών(sol - gel processing). (2), (3) : υδρόλυση και συμπύκνωση (hydrolysis and condensation), (4) : δημιουργία σωματιδίων από υγρές διασπορές και γέλες(particulate sols and gels), (5) : γελοποίηση (gelation), (6) : ωρίμανση γελών (aging of gels), (7) : θεωρία παραμορφώσεων και ροής στις γέλες(theory of deformation and flow in gels), (8) : ξήρανση(drying), (9) : ανάπτυξη δομής κατά την στερεοποίηση(structural evolution during consolidation), (10) : χημεία επιφανειών και χημικές τροποποιήσεις(surface chemistry and chemical modifications), (11) : συσσωμάτωση και συμπύκνωση με μείωση της διεπιφάνειας στερεής – αέριας φάσης, υπό καθεστώς υψηλών θερμοκρασιών(sintering), (12) : σύγκριση κεραμικών που παρήχθησαν από γέλη και συμβατικών κεραμικών(comparison of gel – derived ceramics and conventional ceramics), (13) : σχηματισμός φιλμ(film formation), (14) : εφαρμογές(applications). Από Brinker και Scherer [5].

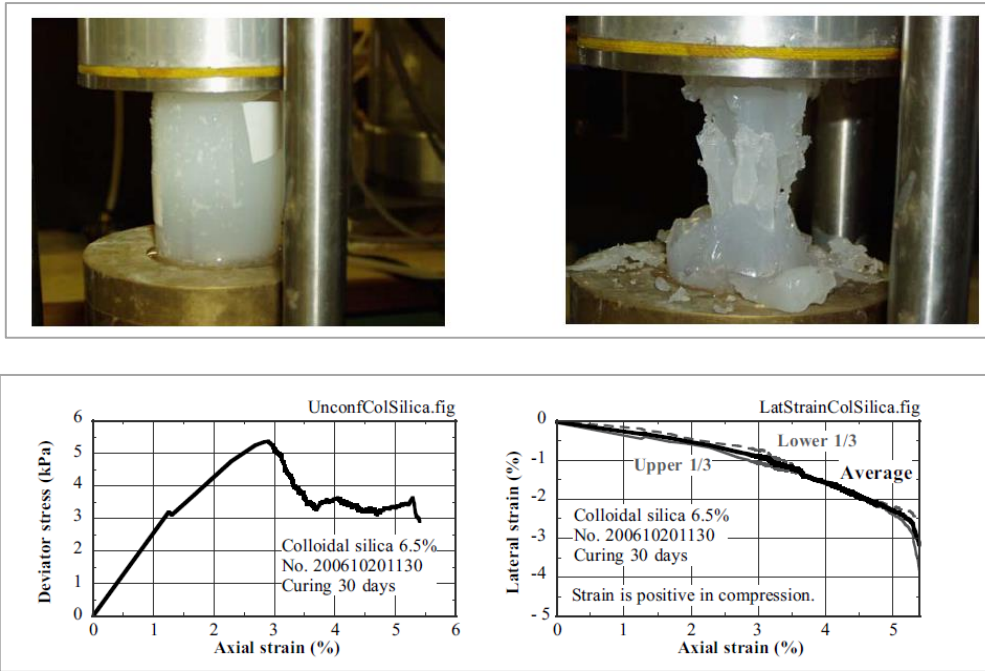


Σχήμα 2.7. Σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου με CS=10%wt. **Πάνω αριστερά και στη μέση:** το δοκίμιο αμέσως μετά την ωρίμανση των 30 ημερών, χωρίς να υποστεί διάτμηση. **Πάνω δεξιά:** το δοκίμιο μετά την αποθήκευση μέσα σε νερό για 45 ημέρες. **Κάτω αριστερά:** το δοκίμιο εκτεθειμένο στον αέρα για 8 ώρες. **Κάτω στη μέση και δεξιά:** Το δοκίμιο εκτεθειμένο στον αέρα για 3 ημέρες. Η άμμος καταρρέει με το άγγιγμα.

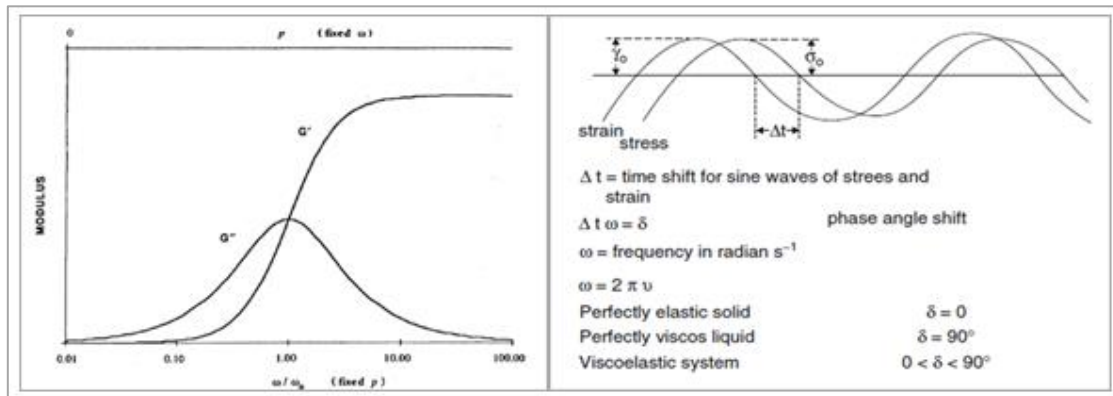




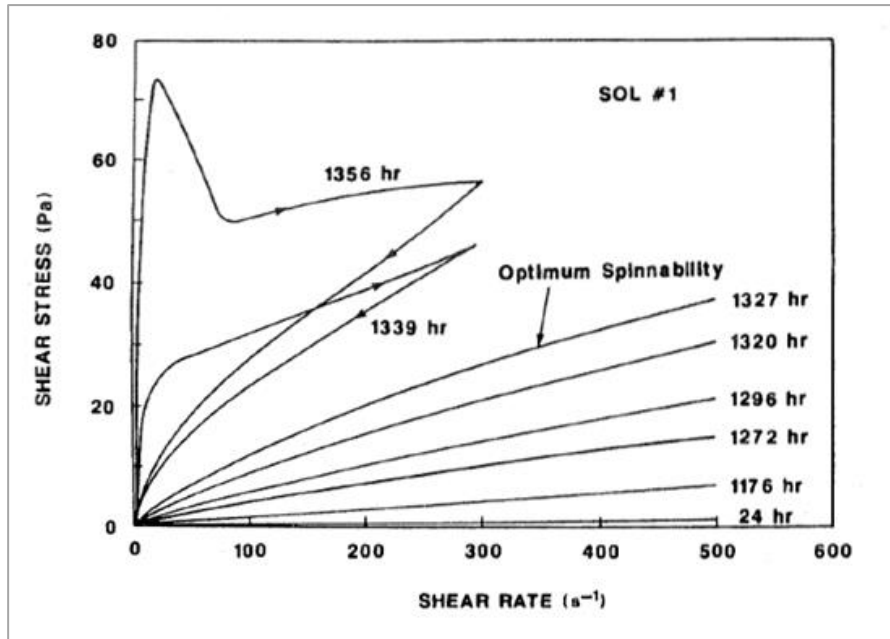
Σχήμα 2.8. Πρώτη σειρά: δοκίμια καθαρής κολλοειδούς πυριτίας CS=10%(Ludox SM) τα οποία ωρίμασαν για 50 ώρες και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε ισότροπη συμπίεση, στα πλαίσια δοκιμών συμπιεστότητας. Η υγρασία εντός της μεμβράνης προέρχεται από τους πόρους της πυριτίας. Το σύνολο της δομής της γέλης είναι *πρακτικά ασυμπιεστο* όταν παρεμποδίζεται η στράγγιση, όπως ακριβώς και το νερό. Η υγρασία έξω από τη μεμβράνη προέρχεται από το νερό της κυψέλης. Το υγρό των πόρων αποτελεί ένα μεγάλο κλάσμα της μάζας της γέλης(περιεκτικότητα πυριτίας 10% wt), γεγονός που αποδεικνύεται από την υδαρή μορφή πριν την ξήρανση και από την έντονη συστολή μετά την ξήρανση. Το υγρό των πόρων αποτελείται από ασυμπιεστο πρακτικά νερό, με μία ποσότητα πυριτίας που αιωρείται ακόμη, αφού δεν έχει ενωθεί με τον στερεό σκελετό. Ο σκελετός είναι ελαστικός και ενδοτικός [33], [5] όταν μπορεί να διαφύγει το υγρό των πόρων. Είναι, όμως, πρακτικά ασυμπιεστος υπό αστράγγιστες συνθήκες, δεδομένου ότι οι αλυσίδες των πολυμερών αποτελούνται από *συμπαγή* σωματίδια με *πυκνή* διάταξη SiO₂ στο εσωτερικό τους. **Δεύτερη σειρά από αριστερά προς τα δεξιά:** το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας CS=10% wt. τη στιγμή που παρασκευάζεται, τη στιγμή που μετατρέπεται σε ελαστική γέλη και έπειτα, κατά την ωρίμανση. **Τρίτη σειρά:** συστολή ξήρανσης της γέλης. **Τέταρτη σειρά αριστερά:** καθαρή κολλοειδής πυριτία CS=10% wt. μετά από *μερική ξήρανση* σε θερμοκρασία δωματίου. Ο σκελετός έχει σφίξει υπό την επίδραση της τριχοειδούς πίεσης(capillary pressure) που κλείνει τους πόρους, καθώς το υγρό εξατμίζεται και αποβάλλεται [5]. Η γέλη έχει λιγότερο μαλακή υφή και είναι λιγότερο υδαρής. Το νερό που έχει παραμείνει στους πόρους αποκαλύπτεται αν διαλυθεί ένα κομμάτι γέλης με τριβή. **Τέταρτη σειρά στη μέση:** η πυριτία(CS=6% και 10% wt.) μετά από *πλήρη ξήρανση* σε θερμοκρασία δωματίου μοιάζει με ψαθυρό πλαστικό. Το νερό των πόρων έχει απομακρυνθεί με εξάτμιση κοντά στην εξωτερική επιφάνεια, ενώ μεταφορά νερού από τους εσωτερικούς πόρους προς την επιφάνεια μπορεί να συμβεί λόγω της επιφανειακής τάσης και λόγω διάχυσης [5]. Μόνο *χημικά δεσμευμένο νερό*(*chemical bound water*) έχει παραμείνει στην πυριτία, το οποίο μπορεί να απομακρυνθεί με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες(consolidation, sintering) [4], [5]. **Τέταρτη σειρά δεξιά:** η κολλοειδής πυριτία σε μερική και πλήρη ξήρανση της γέλης.



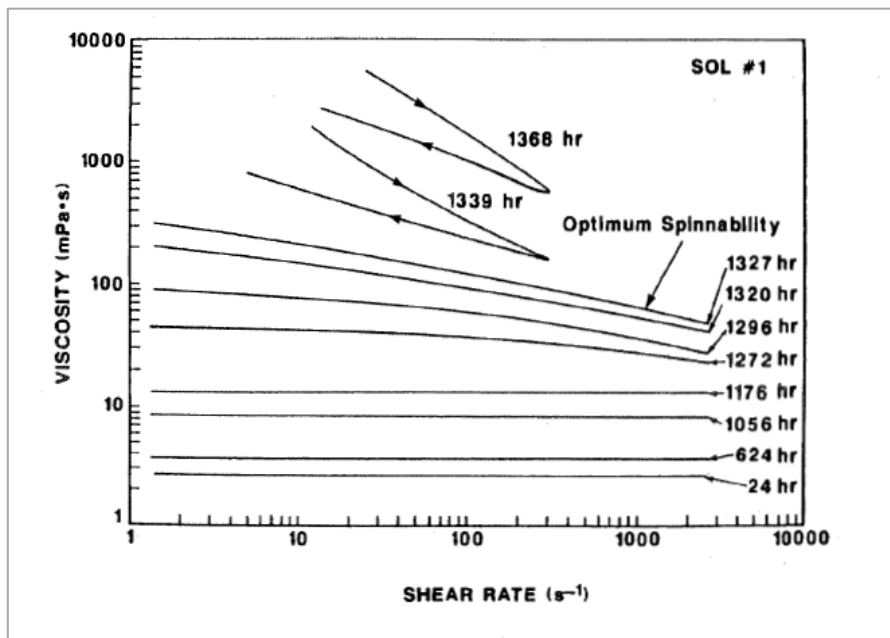
Σχήμα 2.9. Πάνω: ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίου καθαρής πυριτίας CS=6.5%(άγνωστης εμπορικής ονομασίας), ύστερα από ωρίμανση 30 ημερών μέσα σε νερό για να αποτραπεί η ξήρανση. Ταινίες έχουν τοποθετηθεί στο 1/3 και στα 2/3 του ύψους του δοκιμίου, ώστε να μετράται η εγκάρσια παραμόρφωση του δοκιμίου με αισθητήρα ακτινών laser. Κάτω: αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης. Ο λόγος του Poisson για την πυριτία μετρήθηκε περίπου ίσος με 1/3. Σχήματα από Towhata [37].



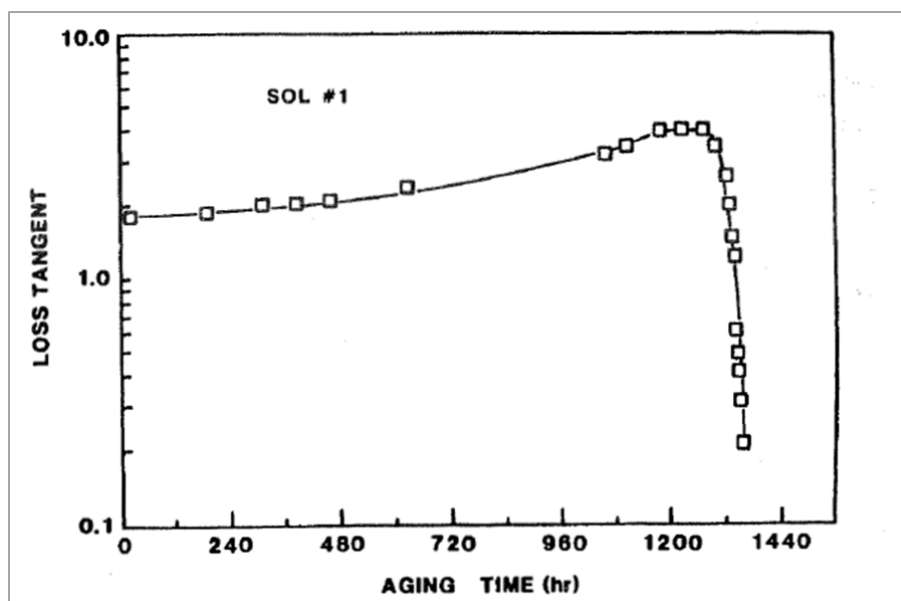
Σχήμα 2.10. Αριστερά: το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μιγαδικού μέτρου διάτμησης $G^* = G' + iG''$ σε συνάρτηση με την κανονικοποιημένη συχνότητα ταλάντωσης ω / ω_0 του κυλίνδρου του ιξωδόμετρου και σε συνάρτηση με τον βαθμό προόδου p του φαινομένου της γελοποίησης. Το πραγματικό μέρος G' συνδέεται με την αποθήκευση ελαστικής ενέργειας και ονομάζεται μέτρο αποθήκευσης(storage modulus), ενώ το φανταστικό μέρος G'' συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας λόγω τριβών κατά την ιξώδη ροή και ονομάζεται μέτρο απώλειας(loss modulus). Το υγρόλιμα είναι ένα ιξώδες υγρό που μετατρέπεται σταδιακά σε ελαστική γέλη. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου συμπεριφέρεται ιξωδοελαστικά. Σχήμα από Brinker και Scherer [5]. Δεξιά: η διαφορά φάσης δ μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Ορίζονται τα μεγέθη: διατμητική τάση $\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$, διατμητική παραμόρφωση $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$, γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης παραμόρφωσης $\omega = 2\pi f$, μέτρο αποθήκευσης $G' = (\tau_0/\gamma_0) \cos\delta$ (storage modulus), μέτρο κατανάλωσης $G'' = (\tau_0/\gamma_0) \sin\delta$ (loss modulus), εφαπτομένη κατανάλωσης $\tan\delta = G''/G'$ (loss tangent). Σχήμα από Tarwat Tadros [36].



Σχήμα 2.11. Διάγραμμα διατμητικής τάσης και ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$ κατά την περιστροφή του στελέχους του ιξωδόμετρου (narrow gap viscometer). Ο ρυθμός περιστροφής αυξάνεται και μετά μειώνεται. Οι πυριτικές γέλες παρασκευάστηκαν από τετρααιθοξυσιλάνιο (tetraethoxysilane - TEOS) με συνθήκες που να εξασφαλίζουν πολύ αργό ρυθμό γελοποίησης, ώστε να ξεχωρίζουν οι διάφορες φάσεις μετάπτωσης της υγρής διασποράς σε γέλη. Σχήμα από Brinker και Scherer [5] όπου περιγράφεται η έρευνα των Sacks και Sheu (1986, 1987).



Σχήμα 2.12. Διάγραμμα ιξώδους και ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$ κατά την περιστροφή του στελέχους του ιξωδόμετρου (narrow gap viscometer). Ο ρυθμός περιστροφής αυξάνεται και μετά μειώνεται. Οι πυριτικές γέλες παρασκευάστηκαν από τετρααιθοξυσιλάνιο (tetraethoxysilane - TEOS) με συνθήκες που να εξασφαλίζουν πολύ αργό ρυθμό γελοποίησης, ώστε να ξεχωρίζουν οι διάφορες φάσεις μετάπτωσης του υγρολύματος σε γέλη. Σχήμα από Brinker και Scherer [5] όπου περιγράφεται η έρευνα των Sacks και Sheu (1986, 1987). Όπου 1368 h να διορθωθεί σε 1356 h.



Σχήμα 2.13. Ο προσδιορισμός του χρόνου γέλης κατά Sacks και Sheu (1986, 1987). Καθώς το υγρόλυμα(sol) μεταπίπτει από την κατάσταση του ιζώδους ρευστού στην κατάσταση της ελαστικής γέλης παρατηρείται μία μέγιστη τιμή της εφαπτομένης $\tan\delta$ (loss tangent). Σχήμα από Brinker και Scherer [5].

Πίνακας 2.2. Πρόοδος διαδικασίας μετατροπής του υγρολύματος σε γέλη. Καθώς το φαινόμενο προοδεύει αυξάνεται το ιζώδες του υγρολύματος μέχρι να μετατραπεί σε ελαστική γέλη. Πρώτη αναφορά Sydansk(1990), επόμενες αναφορές Gallagher [11], Persoff et al. [26]. Σχήμα από Gallagher [11].

Gel State	Description
1	No detectable gel formed. Gel appears to have same viscosity (fluidity) as original polymer solution and no gel is visually detectable.
2	Highly flowing gel. Gel appears only slightly more viscous than original polymer solution.
3	Flowing gel. Most of obviously detectable gel flows to bottle cap upon inversion.
4	Moderately flowing gel. Small portion (5-15%) of gel does not readily flow to bottle cap upon inversion.
5	Barely flowing gel. Gel slowly flows to bottle cap and/or significant portion (>15%) of gel does not flow upon inversion.
6	Highly deformable non-flowing gel. Gel does not flow to bottle cap upon inversion (gel flows to just short of reaching bottle cap).
7	Moderately deformable non-flowing gel. Gel flows about halfway down bottle upon inversion.
8	Slightly deformable non-flowing gel. Only gel surface deforms slightly during inversion.
9	Rigid gel. There is no gel-surface deformation upon inversion.
10	Rigid ringing gel. Tuning-fork-like mechanical vibration can be felt or heard after bottle is tapped.
11	Rigid gel no longer ringing. No tone or vibration can be felt or heard, because natural frequency of gel has increased.



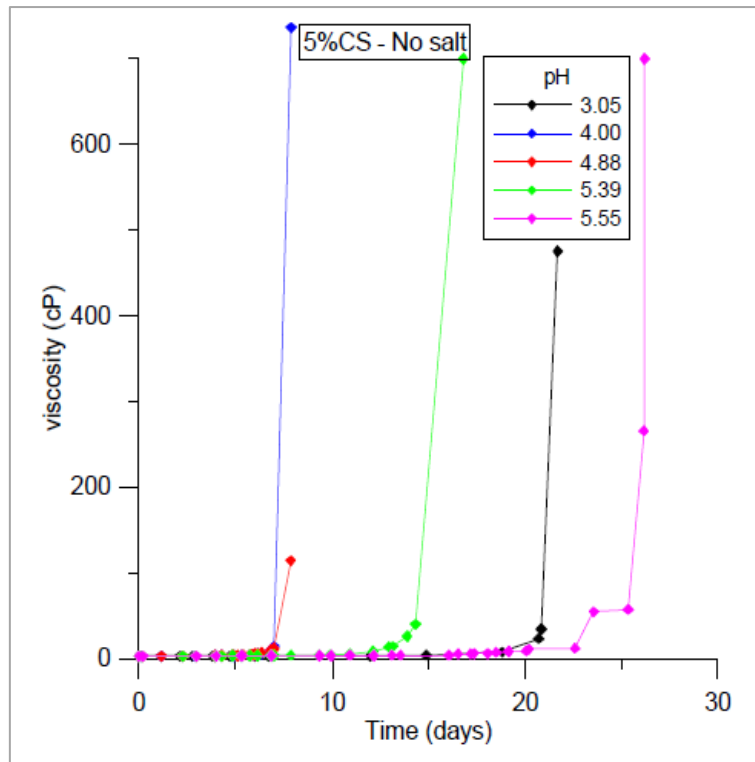
Σχήμα 2.14. Περιστροφικό ιξωδόμετρο Brookfield LVDV-II+PX. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



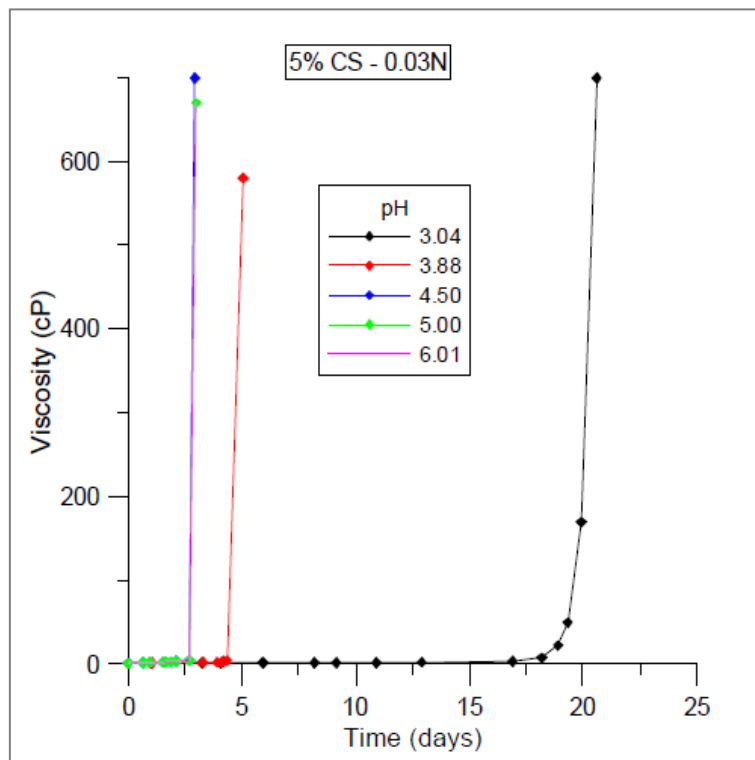
Σχήμα 2.15. Υδατόλουτρο TC-150 του οίκου Brookfield. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618)

Πίνακας 2.3. Περιεκτικότητα κολλοειδούς πυριτίας CS(% wt), αλάτων NaCl και pH των υγρολυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές προσδιορισμού της μεταβολής του ιζώδους με τον χρόνο. Πίνακας από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).

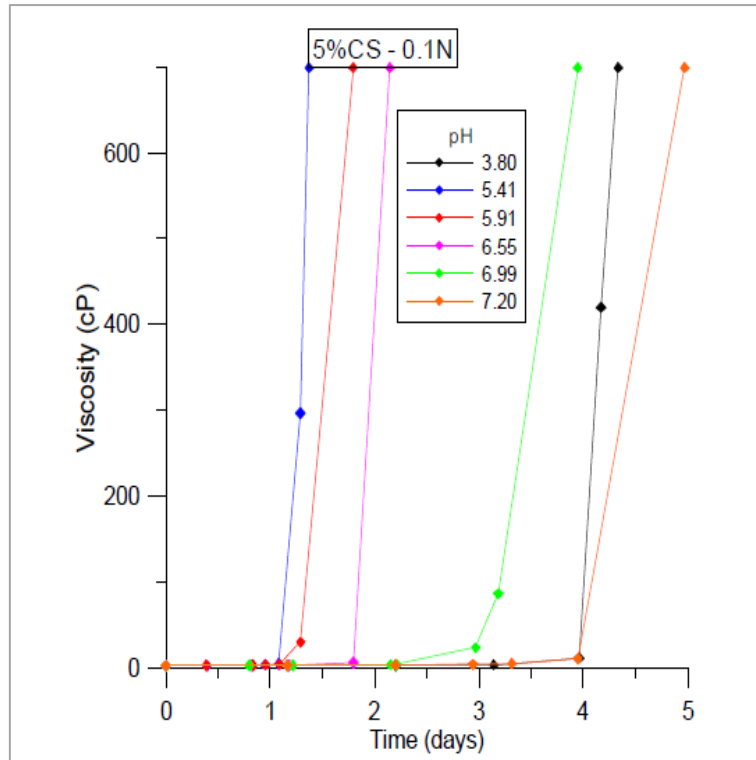
Συγκέντρωση CS (%)	Συγκέντρωση NaCl (σε όρους κανονικότητας)	Εύρος pH
5	0	3.00 - 5.55
	0.03N	3.00 – 6.00
	0.1N	4.00 – 7.50
7.5	0	3.00 – 6.55
	0.03N	5.00 – 6.50
	0.1N	5.00 – 7.30
10	0	2.80 – 6.88
	0.03N	3.00 – 7.55
	0.1N	3.80 – 7.50



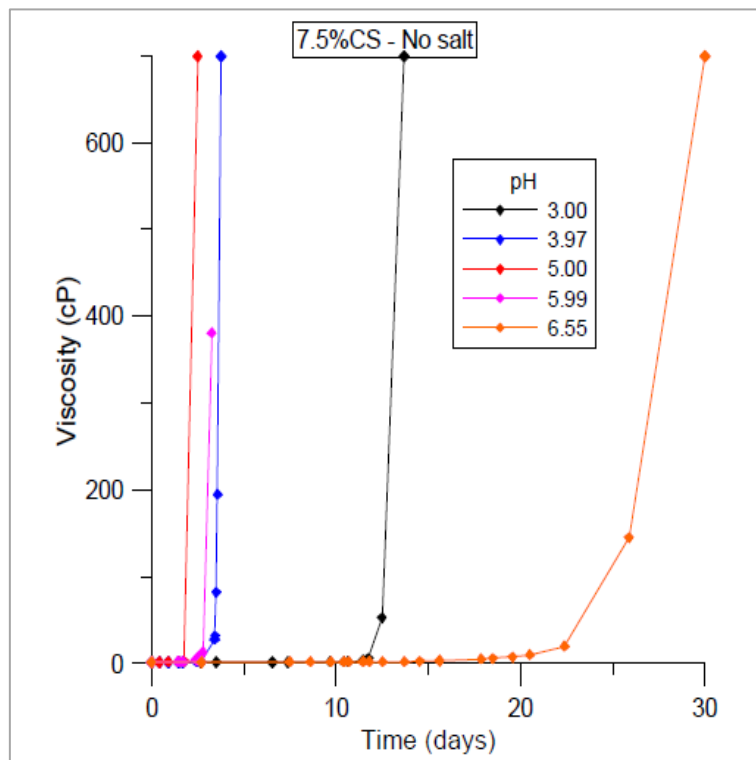
Σχήμα 2.16. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% wt και κανονικότητα 0 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλάς – Π.Θ.(MIS 375618).



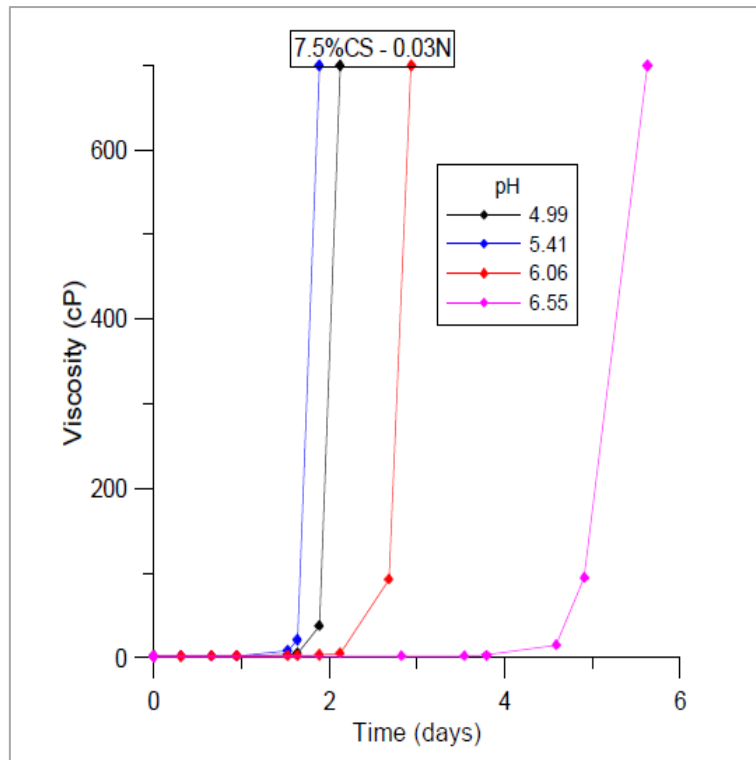
Σχήμα 2.17. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% wt και κανονικότητα 0.03 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλάς – Π.Θ.(MIS 375618).



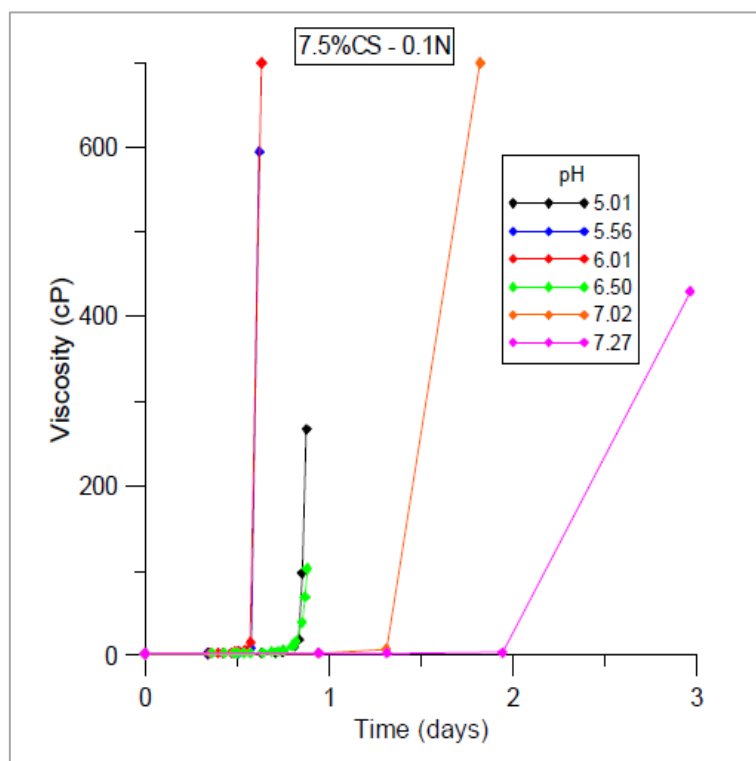
Σχήμα 2.18. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=5% wt και κανονικότητα 0.1 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



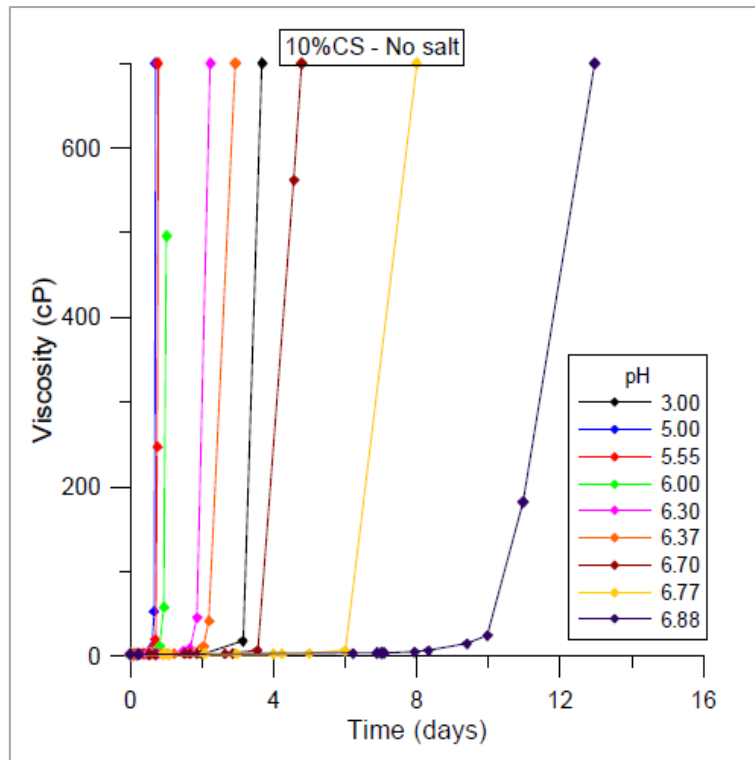
Σχήμα 2.19. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5% wt και κανονικότητα 0 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



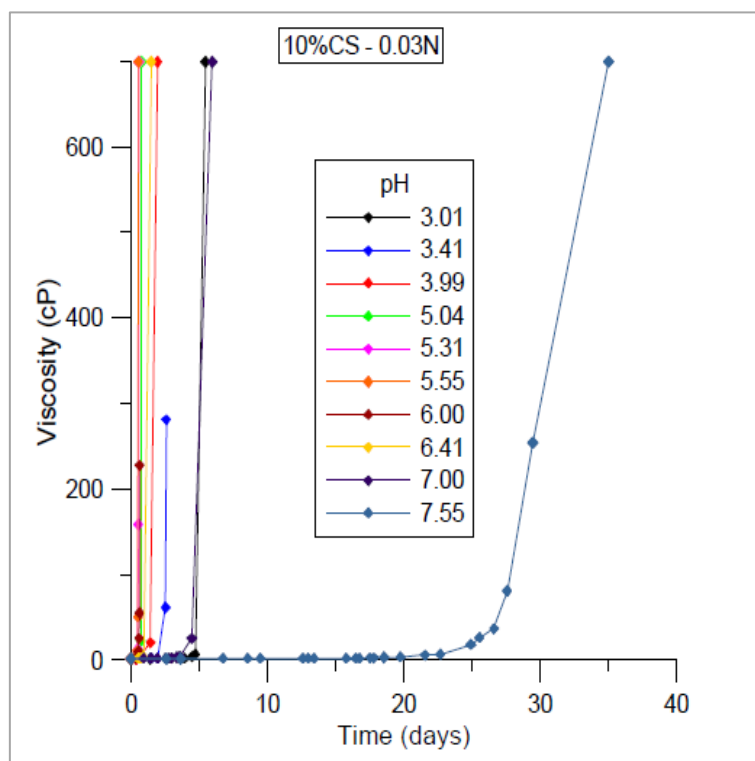
Σχήμα 2.20. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5% wt και κανονικότητα 0.03 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλάς – Π.Θ.(MIS 375618).



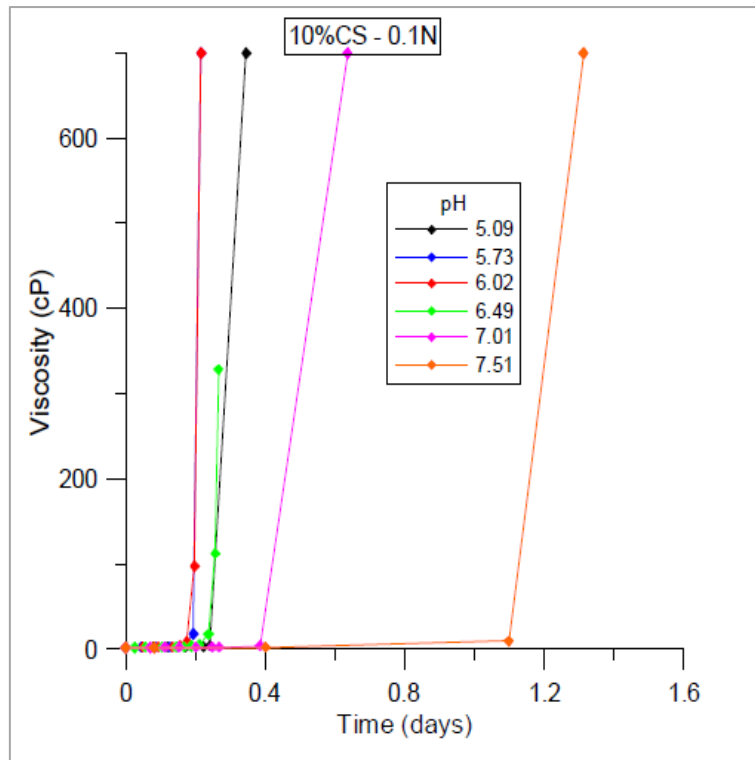
Σχήμα 2.21. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλυμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=7.5% wt και κανονικότητα 0.1 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλάς – Π.Θ.(MIS 375618).



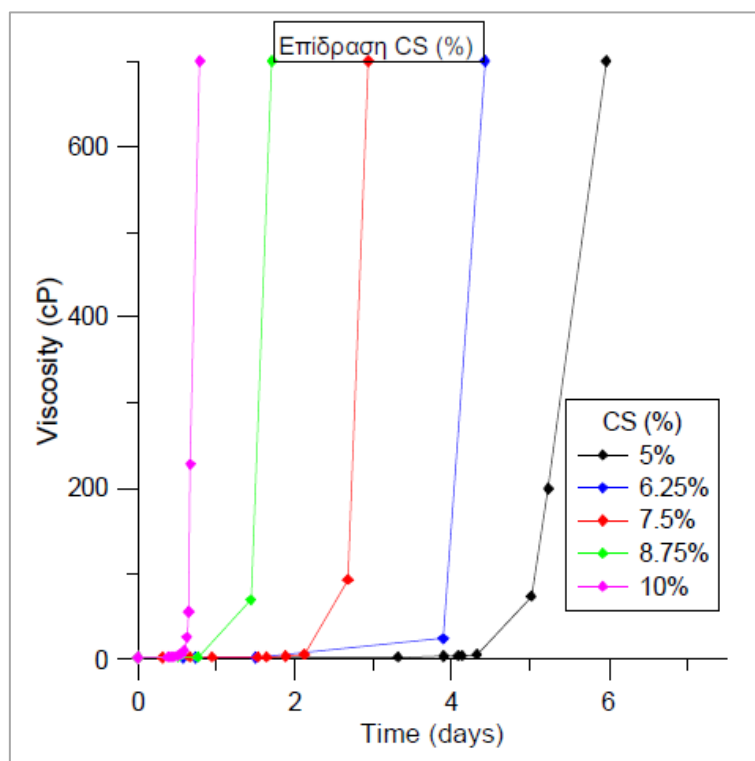
Σχήμα 2.22. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλιμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=10% wt και κανονικότητα 0 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλάσ – Π.Θ.(MIS 375618).



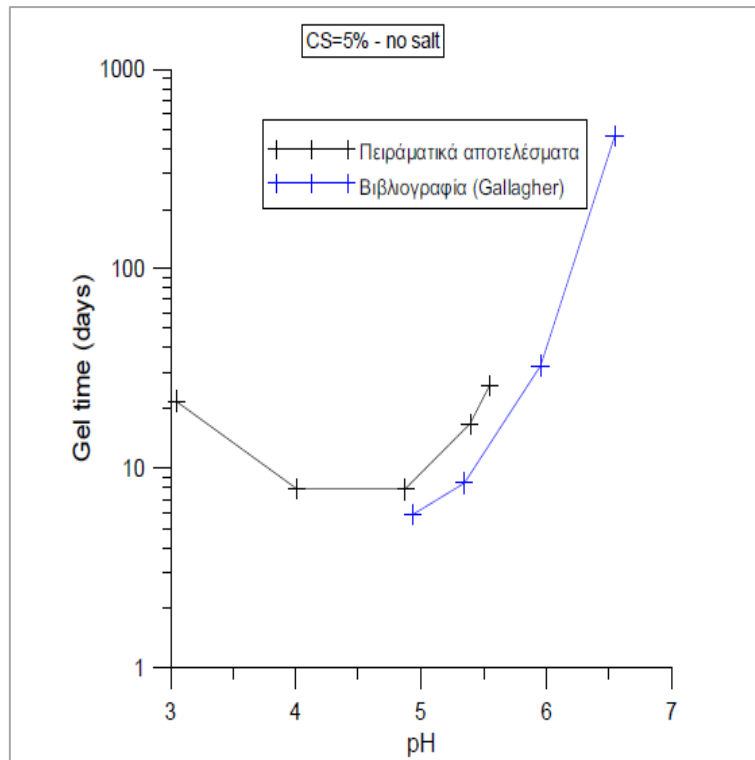
Σχήμα 2.23. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλιμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=10% wt και κανονικότητα 0.03 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλάσ – Π.Θ.(MIS 375618).



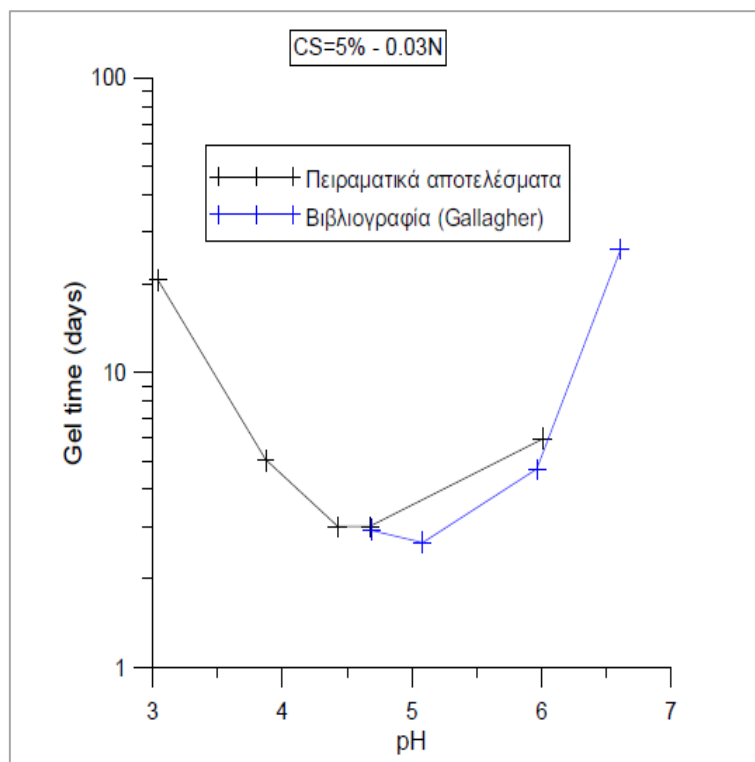
Σχήμα 2.24. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρόλιμα με περιεκτικότητα πυριτίας CS=10% wt και κανονικότητα 0.1 N. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



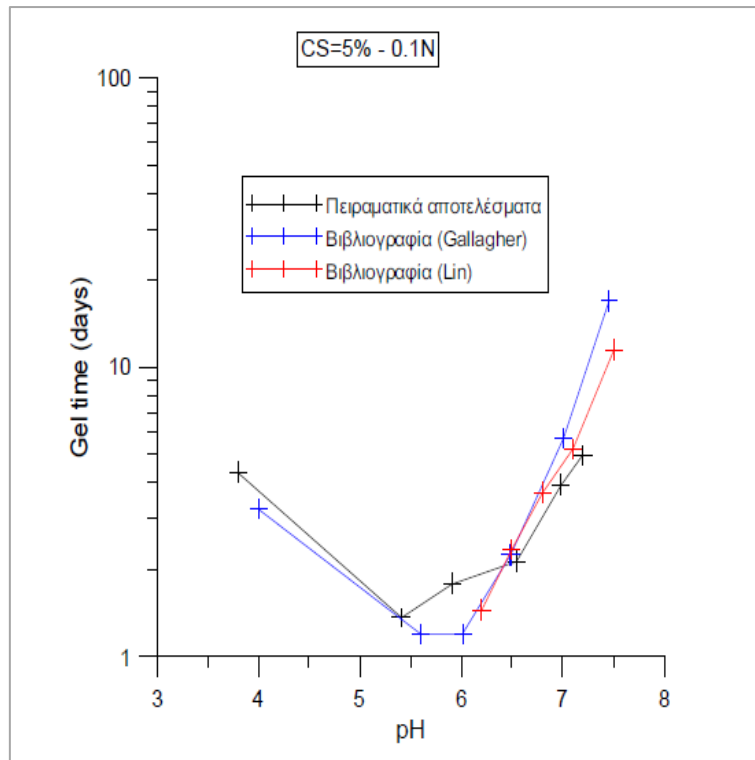
Σχήμα 2.25. Καμπύλες ιξώδους – χρόνου για υγρολύματα με pH=6.00, με κανονικότητα 0.03 N και με διάφορες περιεκτικότητες CS (%). Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



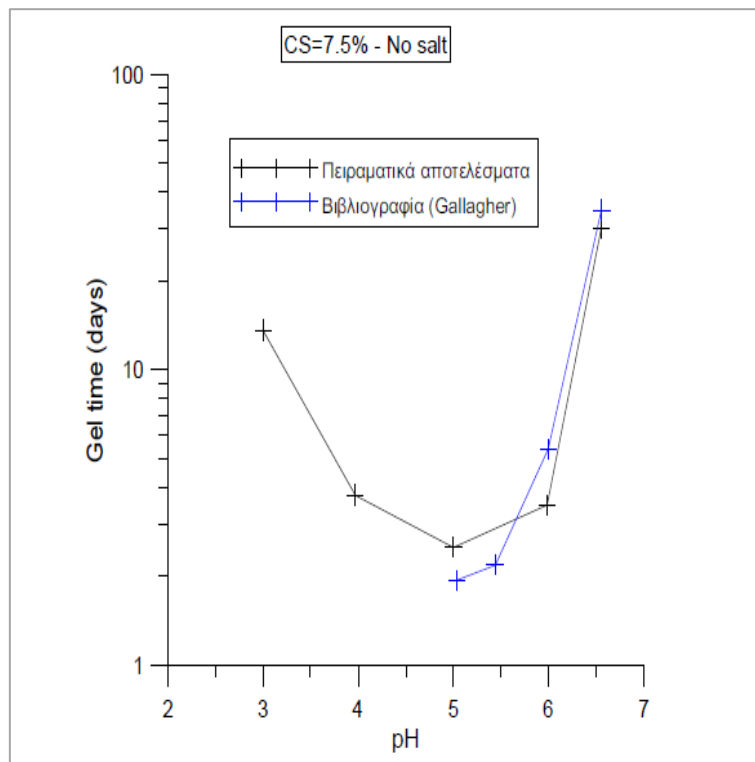
Σχήμα 2.26. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=5% και κανονικότητα 0 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



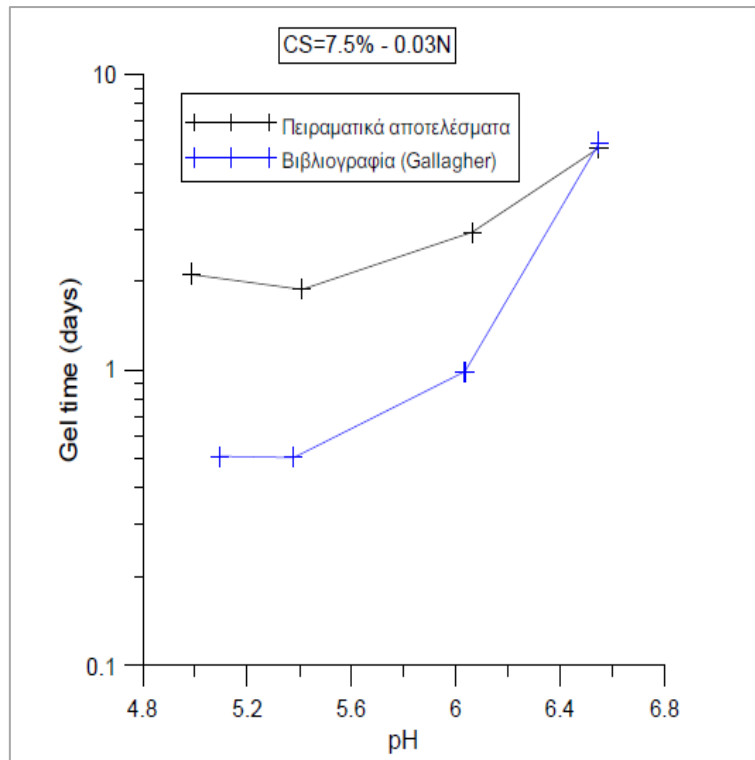
Σχήμα 2.27. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=5% και κανονικότητα 0.03 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



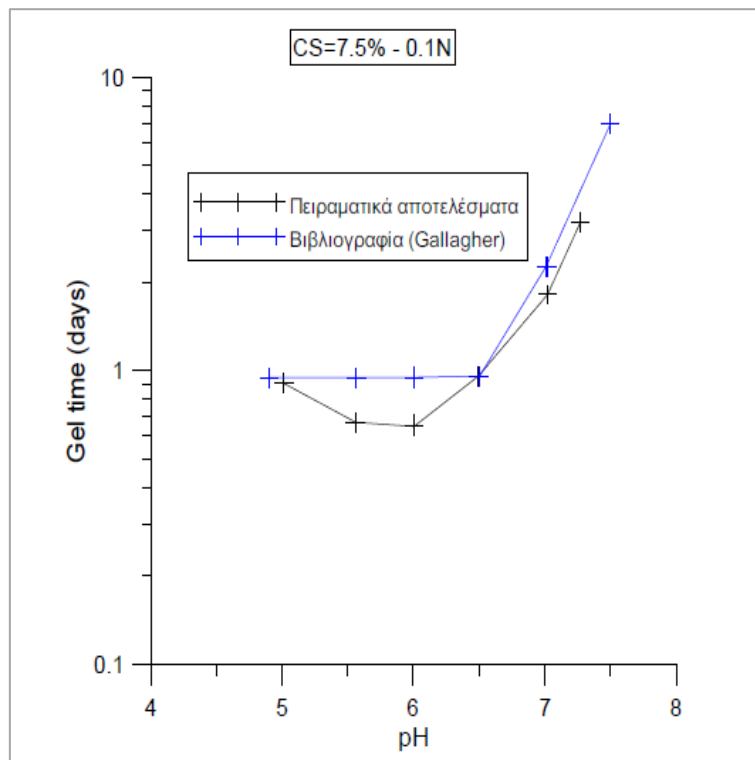
Σχήμα 2.28. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=5% και κανονικότητα 0.1 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



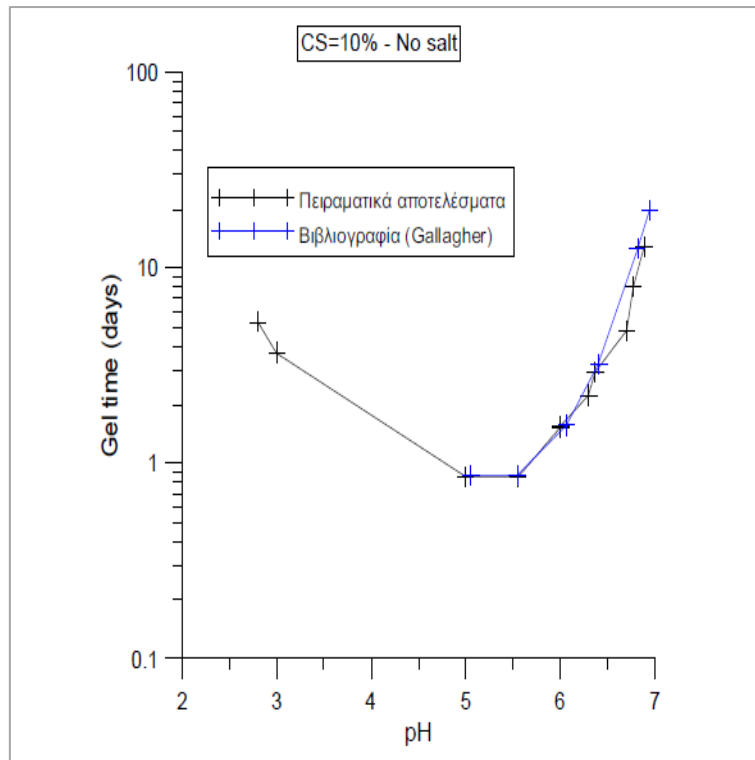
Σχήμα 2.29. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=7.5% και κανονικότητα 0 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



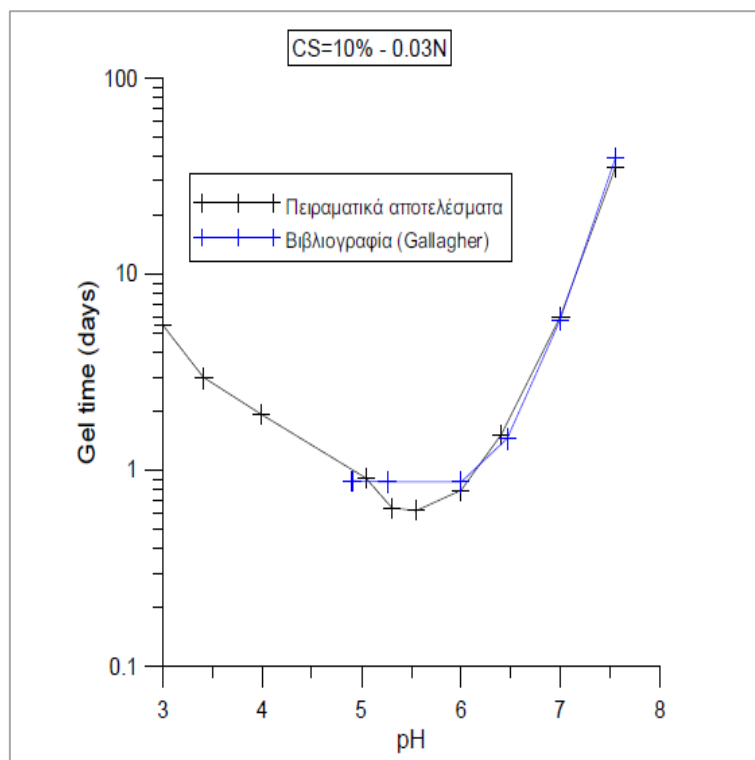
Σχήμα 2.30. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=7.5% και κανονικότητα 0.03 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



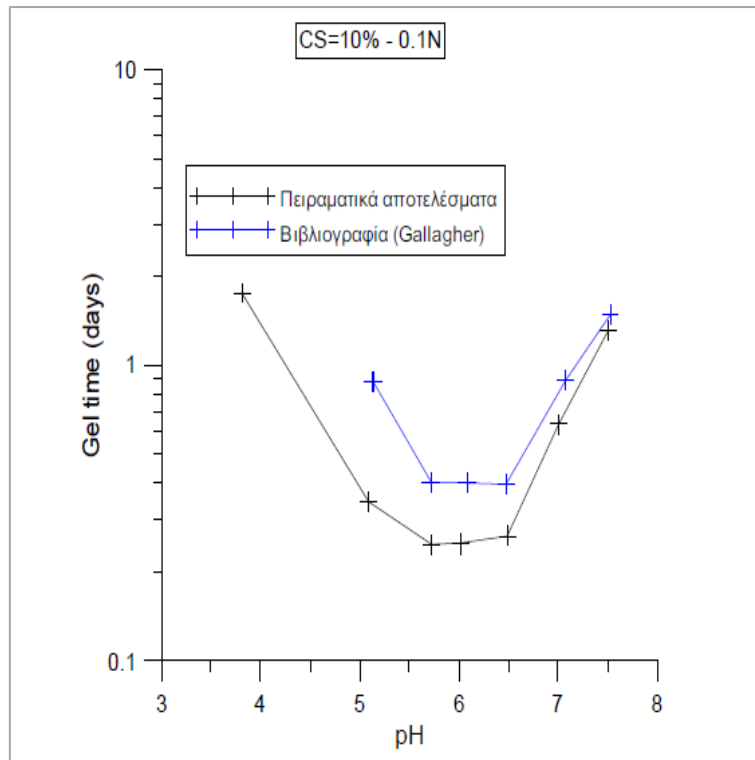
Σχήμα 2.31. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=7.5% και κανονικότητα 0.1 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



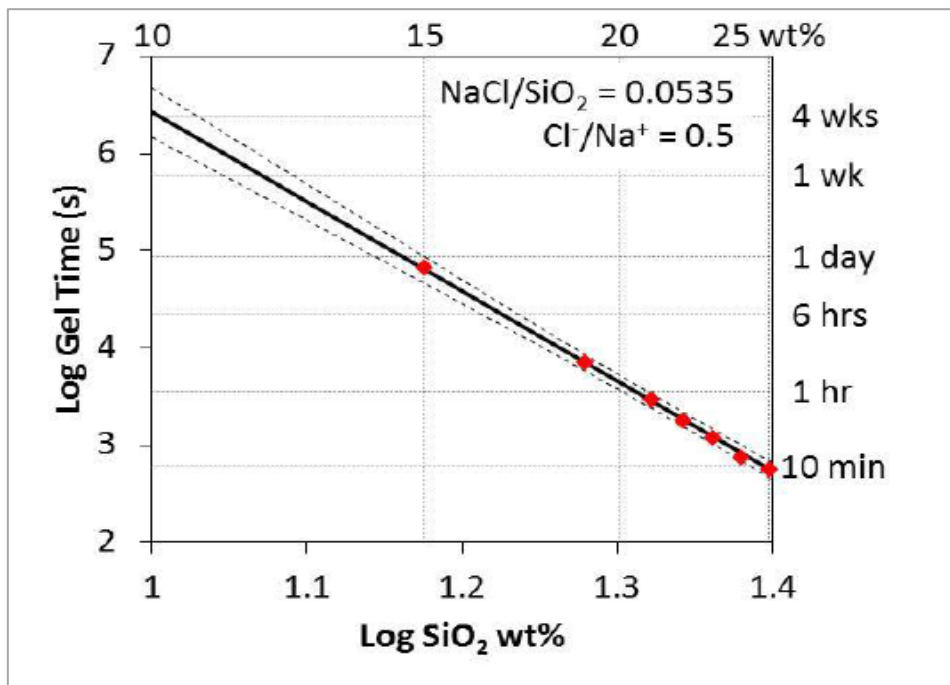
Σχήμα 2.32. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=10% και κανονικότητα 0 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



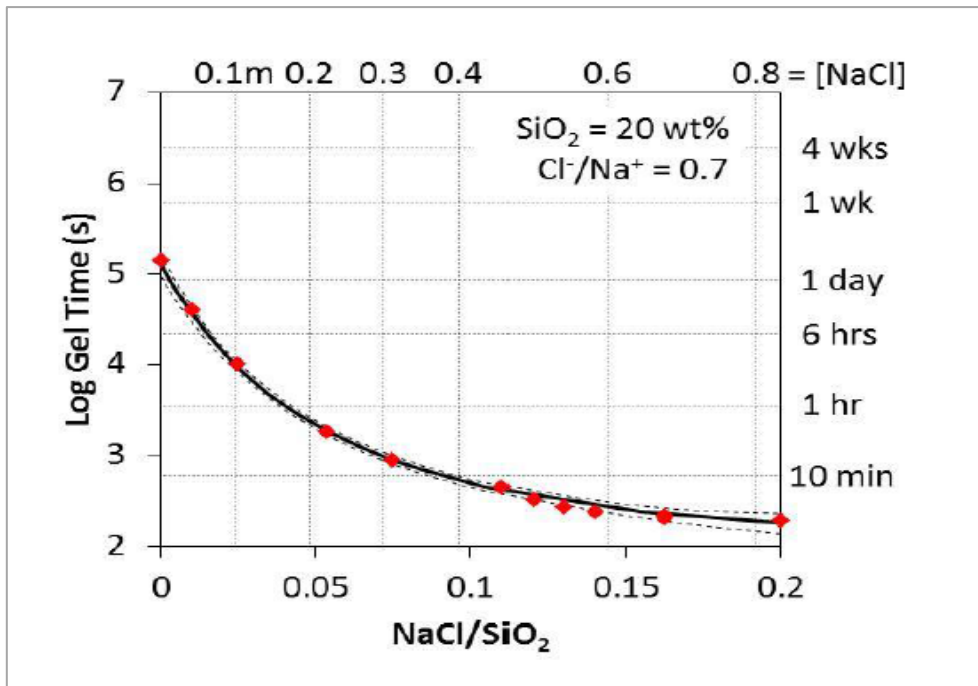
Σχήμα 2.33. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=10% και κανονικότητα 0.03 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



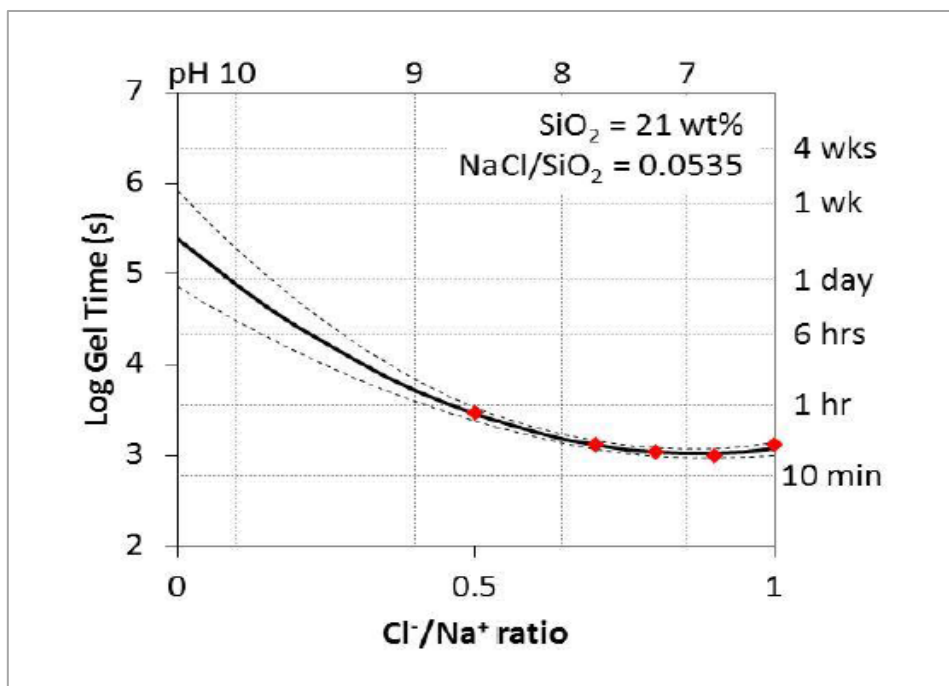
Σχήμα 2.34. Καμπύλη χρόνου γέλης – pH για περιεκτικότητα CS=10% και κανονικότητα 0.1 N. Γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σχήμα από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



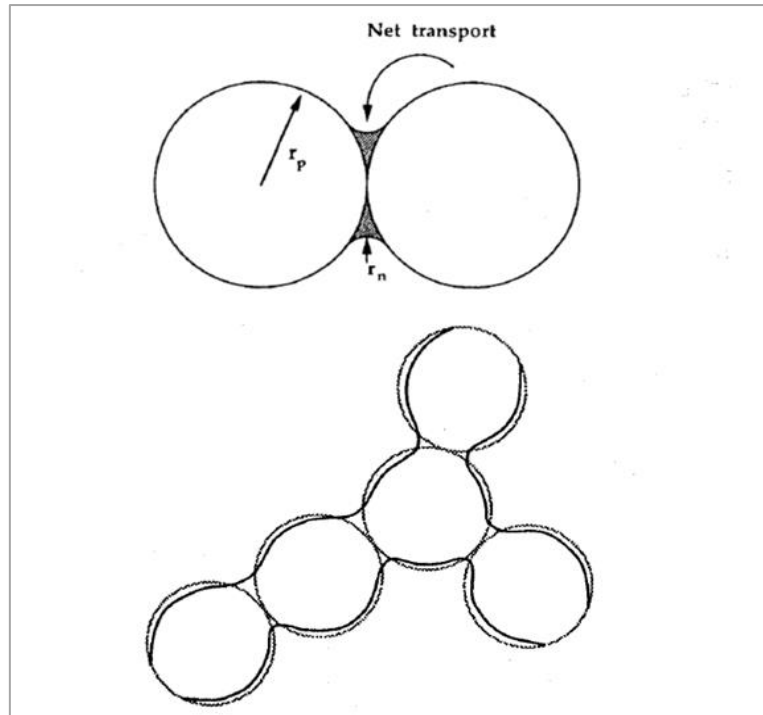
Σχήμα 2.35. Οι Hunt et al [19] κρατώντας σταθερούς τους μοριακούς λόγους NaCl / SiO₂ και Cl⁻ / Na⁺ και αραιώνοντας το υγρόλυμα με προσθήκη νερού αποκάλυψαν μία γραμμική σχέση μεταξύ του λογαρίθμου του χρόνου γέλης και του λογαρίθμου της περιεκτικότητας πυριτίας. Οι διακεκομμένες γραμμές εκφράζουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95%. Σχήμα από Hunt et al [19].



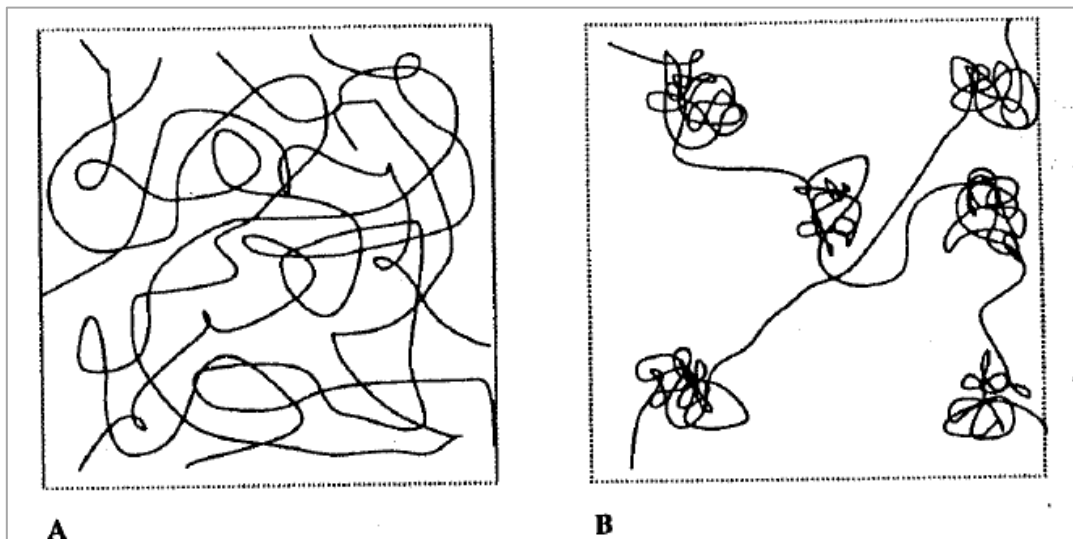
Σχήμα 2.36. Οι Hunt et al [19] κρατώντας σταθερή την περιεκτικότητα της πυριτίας και τον μοριακό λόγο $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ και μεταβάλλοντας τον μοριακό λόγο $\text{NaCl} / \text{SiO}_2$ αποκάλυψαν μία υπερβολική σχέση μεταξύ του λογαρίθμου του χρόνου γέλης και του λόγου $\text{NaCl} / \text{SiO}_2$. Οι διακεκομμένες γραμμές εκφράζουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95%. Σχήμα από Hunt et al [19].



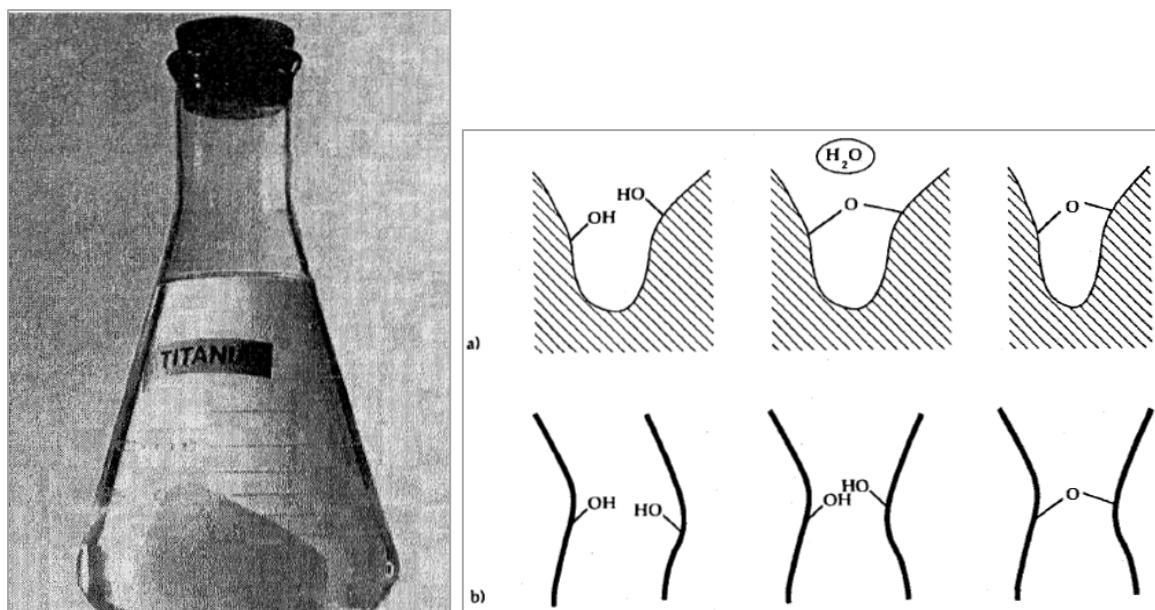
Σχήμα 2.37. Οι Hunt et al [19] κρατώντας σταθερή την περιεκτικότητα της πυριτίας και τον μοριακό λόγο $\text{NaCl} / \text{SiO}_2$ και μεταβάλλοντας τον μοριακό λόγο $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ αποκάλυψαν μία παραβολική σχέση μεταξύ του λογαρίθμου του χρόνου γέλης και του λόγου $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$. Η προέκταση της παραβολής θα αποκάλυπτε την χαρακτηριστική μορφή “U”. Οι διακεκομμένες γραμμές εκφράζουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95%. Σχήμα από Hunt et al [19].



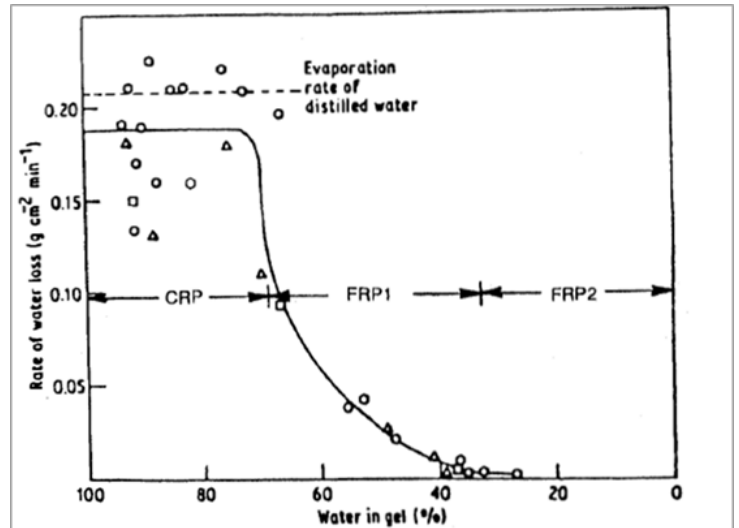
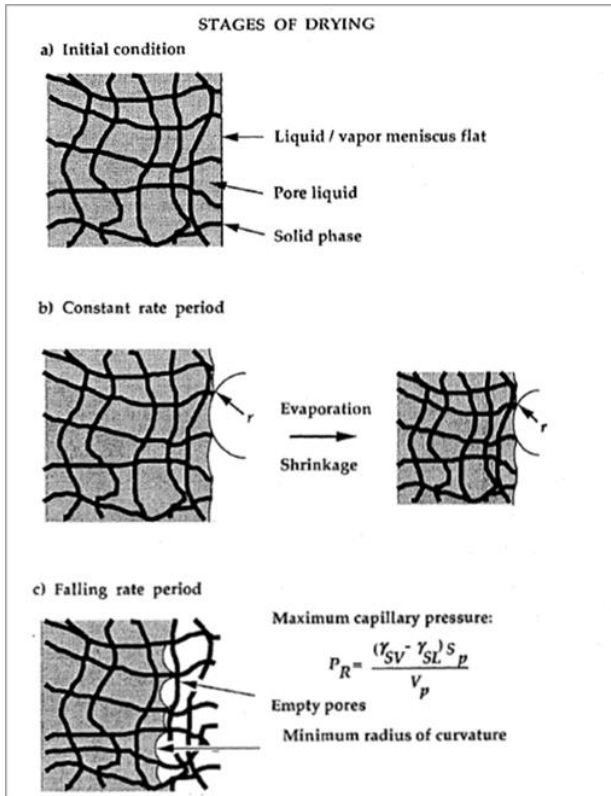
Σχήμα 2.38. Η διαδικασία της εκτράχυνσης(coarsening) της γέλης. Το υλικό της στερεάς φάσης διαλύεται(dissolves) και μεταφέρεται από περιοχές υψηλής διαλυτότητας(θετικής ακτίνας καμπυλότητας, με το κέντρο του κύκλου μέσα στη στερεά φάση) σε περιοχές χαμηλής διαλυτότητας(αρνητικής ακτίνας καμπυλότητας, με το κέντρο του κύκλου έξω από τη στερεά φάση). Στους «λαιμούς» μεταξύ των σωματιδίων συσσωρεύεται υλικό με αποτέλεσμα το στερεό σκελετικό δίκτυο να γίνεται πιο στιβαρό, χωρίς να συρρικνώνεται. Σχήμα από Brinker και Scherer [5].



Σχήμα 2.39. Η διαδικασία της μικρό - συναίρεσης(microsyneresis). Η στερεά φάση διαχωρίζεται από την υγρή σε τοπικό επίπεδο. Οι αλυσίδες πολυμερών συγκλίνουν λόγω συγγένειας(affinity) και εκτοπίζουν το υγρό. Η κολλοειδής πυριπία Ludox – SM δεν εμφανίζει έντονη μικρό - συναίρεση. Σχήμα από Brinker και Scherer [5].

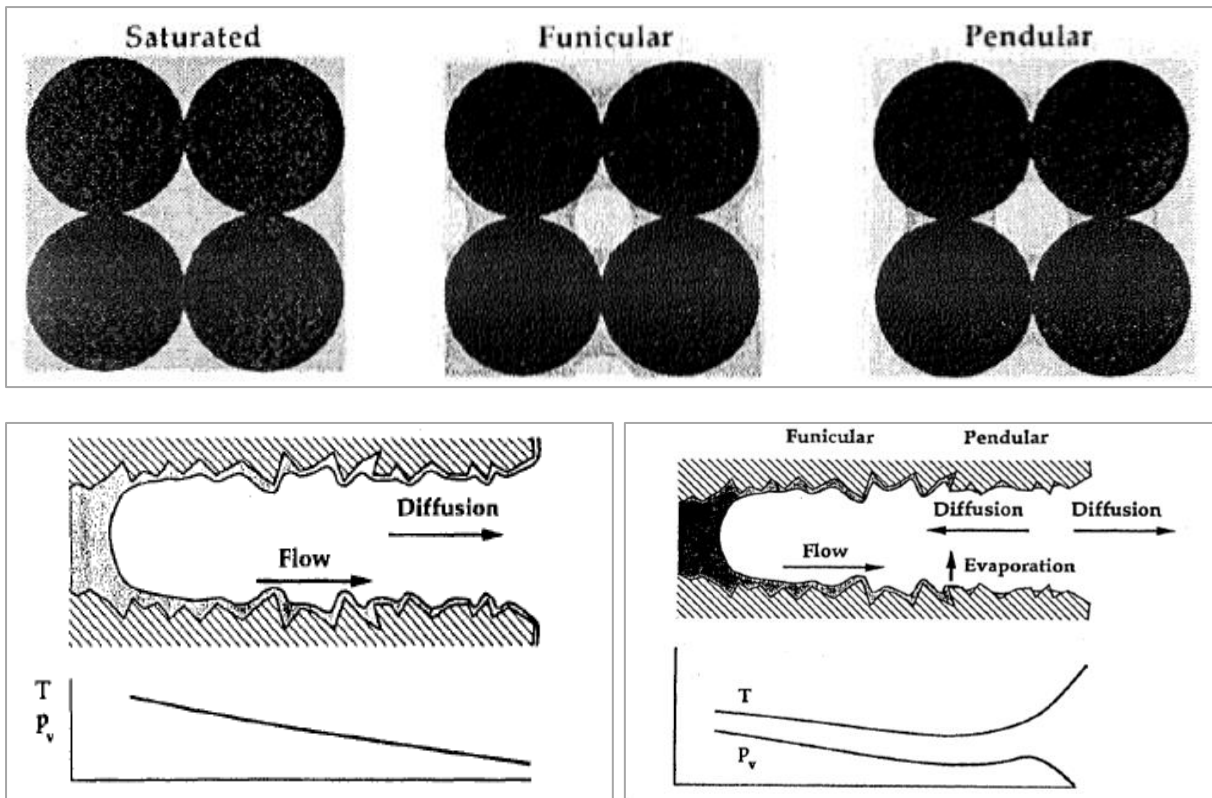


Σχήμα 2.40. Αριστερά: η διαδικασία της μακρό - συναίρεσης(macrosyneresis) ή απλά συναίρεσης. Η στερεά φάση διαχωρίζεται από την υγρή λόγω της περαιτέρω συμπύκνωσης(condensation) μετά τη γελοποίηση. Η γέλη τιτανίου που φαίνεται συρρικνωμένη στον πάτο του δοχείου αρχικά καταλάμβανε τον όγκο που καταλαμβάνει τώρα το υγρό. Η κolloειδής πυριτία Ludox – SM δεν εμφανίζει έντονη μακρο-συναίρεση. **Δεξιά:** η αντίδραση της συμπύκνωσης(condensation) οδηγεί σε μείωση του όγκου της στερεάς φάσης με ταυτόχρονη αποβολή νερού. Η συρρίκνωση οφείλεται στο γεγονός ότι ο σχηματιζόμενος δεσμός σιλοξάνης Si-O-Si καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από τις δύο ομάδες σιλανόλης Si-OH που τον δημιούργησαν. Μεγαλύτερη συρρίκνωση προκαλείται όταν οι αλυσίδες της στερεάς φάσης είναι εύκαμπτες. Όταν μία μετακίνηση φέρει κοντά δύο αλυσίδες με ενεργές ομάδες σιλανόλης στην επιφάνεια τους, σχηματίζεται δεσμός σιλοξάνης με περαιτέρω συμπύκνωση και μη αναστρέψιμη συρρίκνωση. Η συναίρεση παρεμποδίζεται όταν ο στερεός ιστός της γέλης είναι είτε πολύ αραιός, είτε πολύ πυκνός. Στην πρώτη περίπτωση ο ιστός δεν είναι αρκετά στιβαρός ώστε να εκτοπίσει το υγρό. Στη δεύτερη είναι πολύ στιβαρός και πυκνός και δεν μπορεί να συρρικνωθεί περισσότερο, ώστε να διαφύγει το υγρό. Σχήματα από Brinker και Scherer [5].

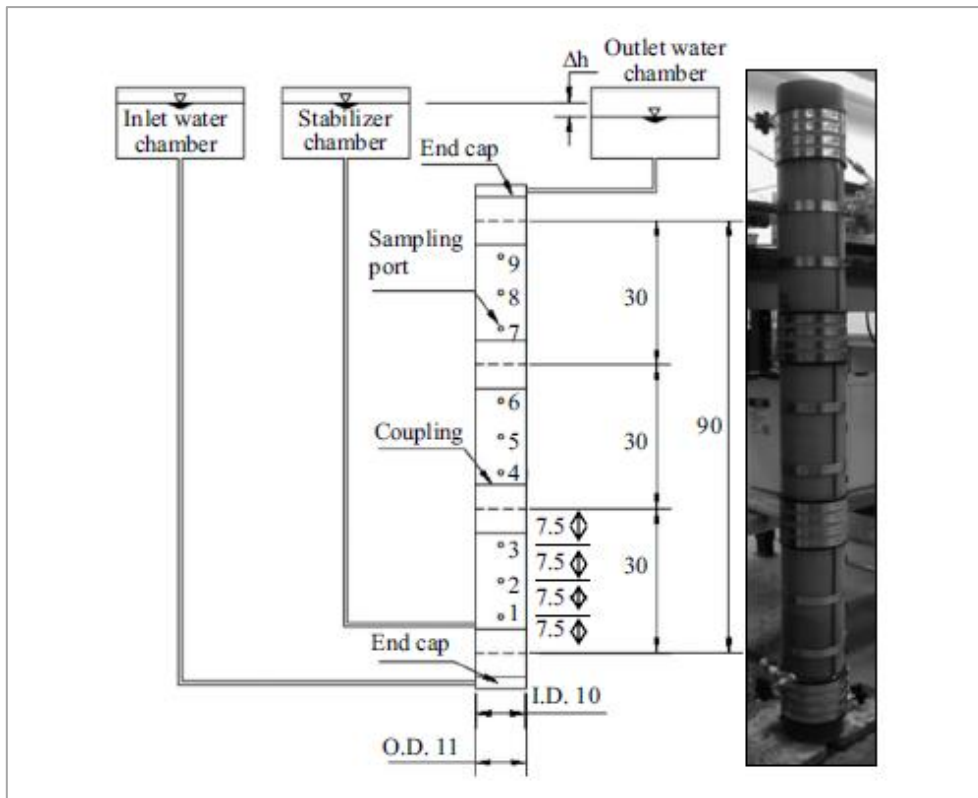


Σχήμα 2.41.(αριστερά) Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξη της ξήρανσης της γέλης. Το νερό εξατμίζεται από την επιφάνεια της γέλης. Αναπτύσσεται επιφανειακή τάση που εφελκύει το νερό ώστε να μην εκτεθεί η στερεά φάση. Ταυτόχρονα ο στερεός σκελετός θλίβεται, συρρικνώνεται, γίνεται πιο στιβαρός και υποχωρεί μέσα στο υγρό. Καθώς η ακτίνα καμπυλότητας των μηνίσκων μειώνεται, η τριχοειδής πίεση στον σκελετό αυξάνεται. Στο κρίσιμο σημείο η ακτίνα καμπυλότητας γίνεται ίση με την ακτίνα του πόρου. Έχει ολοκληρωθεί η περίοδος εξάτμισης σταθερού ρυθμού(constant rate period) και ξεκινά η περίοδος μειούμενου ρυθμού(falling rate period). Η συρρίκνωση σταματά και η περαιτέρω εξάτμιση κάνει τους μηνίσκους να υποχωρήσουν στο εσωτερικό της γέλης. Κοντά στην επιφάνεια εμφανίζονται πόροι γεμάτοι με αέρα. Σχήμα από Brinker και Scherer [5].

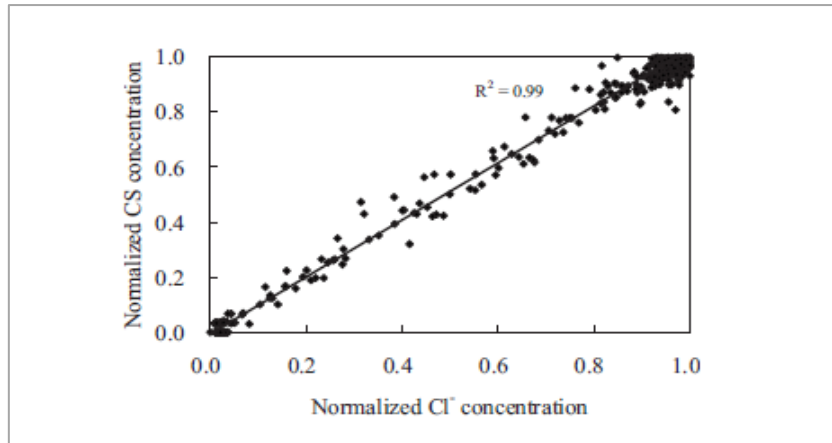
Σχήμα 2.42.(δεξιά) Ο ρυθμός απώλειας νερού από γέλη αλουμίνας σε συνάρτηση με την περιεχόμενη υγρασία για διάφορα πάχη(από 0.8 mm έως 7.5 mm). Κατά τη διάρκεια της περιόδου εξάτμισης σταθερού ρυθμού(constant rate period CRP), ο ρυθμός εξάτμισης από την επιφάνεια της γέλης είναι σταθερός και ίσος περίπου με τον ρυθμό εξάτμισης από την επιφάνεια ενός πιάτου με νερό. Τιμές μεγαλύτερες οφείλονται στην αύξηση της επιφάνειας καθώς η υγρή μεμβράνη αγκαλιάζει την στερεή φάση. Κατά την πρώτη περίοδο μειούμενου ρυθμού(first falling rate period FRP1) το νερό ρέει από τους εσωτερικούς πόρους προς τους εξωτερικούς πόρους, ενώ ταυτόχρονα οι υδρατμοί διαχέονται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό. Κατά τη δεύτερη περίοδο μειούμενου ρυθμού(second falling rate period FRP2) η απόσταση των εσωτερικών υγρών πόρων από την εξωτερική επιφάνεια της γέλης γίνεται μεγάλη και δεν μπορεί να συντηρηθεί ροή. Οι υδρατμοί συνεχίζουν να διαχέονται προς τους εξωτερικούς πόρους. Σχήμα από Brinker και Scherer [5] με αναφορά στο έργο του Dwivedi.



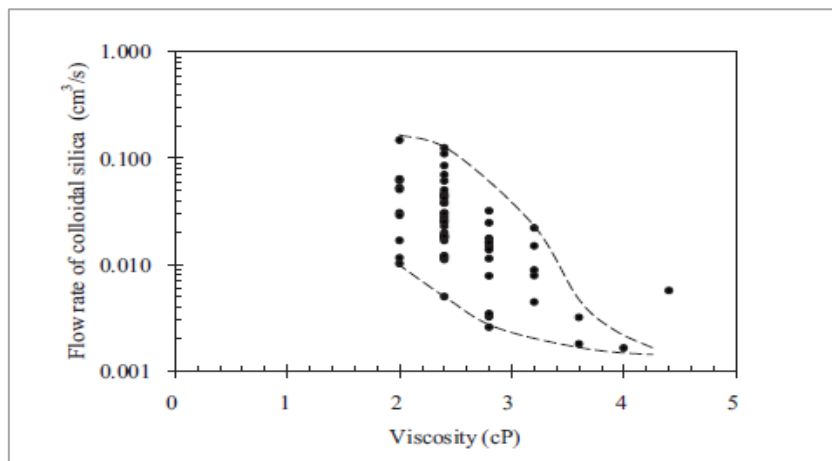
Σχήμα 2.43. Πάνω: βαθμός κορεσμού ενός πορώδους μέσου. Πάνω αριστερά: πλήρης κορεσμός πόρων. Πάνω και στη μέση: μερικός κορεσμός που ονομάζεται «κατάσταση τελεφερίκ»(funicular state). Η υγρή φάση είναι συνεχής μέσα στους πόρους αλλά δεν τους πληρώνει. Πάνω και δεξιά: μερικός κορεσμός που ονομάζεται «κατάσταση εκκρεμούς»(pendular state). Η υγρή φάση είναι ασυνεχής μέσα στους πόρους και συγκεντρώνεται στις εσοχές μεταξύ των σωματιδίων, σε περιοχές με αρνητική ακτίνα καμπυλότητας. Κάτω και αριστερά: ροή νερού και διάχυση υδρατμών από το εσωτερικό υγρό μέτωπο προς την εξωτερική επιφάνεια. Η ροή εξασφαλίζεται όταν η διαδρομή έχει πόρους με κορεσμό τύπου «τελεφερίκ». Κάτω και δεξιά: το μέτωπο ξήρανσης(διεπιφάνεια υγρού-ατμών) βρίσκεται πλέον στο εσωτερικό της γέλης. Η ροή νερού περιορίζεται μόνο στους πόρους με κορεσμό τύπου «τελεφερίκ». Η διάχυση υδρατμών είναι κυρίως προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η πτώση της θερμοκρασίας λόγω εξάτμισης και η συνεπαγόμενη τοπική μείωση της πίεσης υδρατμών δημιουργεί μία δευτερεύουσα πορεία διάχυσης προς το εσωτερικό. Σχήμα από Brinker και Scherer [5].



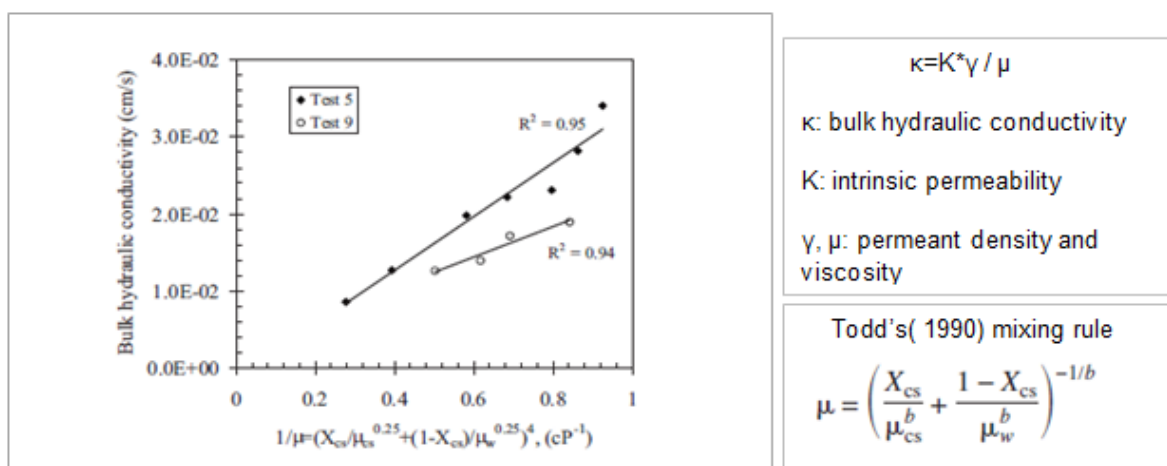
Σχήμα 2.44. Εδαφική στήλη ύψους 0.9 m και σκαρίφημα πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε από τους Gallagher και Lin [14] για τη μελέτη της μεταφοράς υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας στους πόρους του εδαφικού υλικού. Το υγρόλυμα διοχετεύεται από τη βάση της στήλης υπό χαμηλές υδραυλικές κλίσεις (0.04 - 0.18) και εκρέει από την κορυφή. Σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος υπάρχουν σημεία δειγματοληψίας υγρού. Στα δείγματα υγρού που συλλέγονται κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς προωθείται το χρωματισμένο μέτωπο του υγρολύματος, γίνονται μετρήσεις της περιεκτικότητας των ιόντων χλωρίου, του PH και του ιζώδους. Μετά το πέρας των δοκιμών διοχέτευσης της πυριτίας και του σχηματισμού γέλης αποσπίαστηκαν δοκίμια σταθεροποιημένου εδάφους από τις στήλες, ώστε να προσδιοριστεί η αντοχή τους σε ανεμπόδιση θλίψη. Σχήμα από Gallagher και Lin [14].



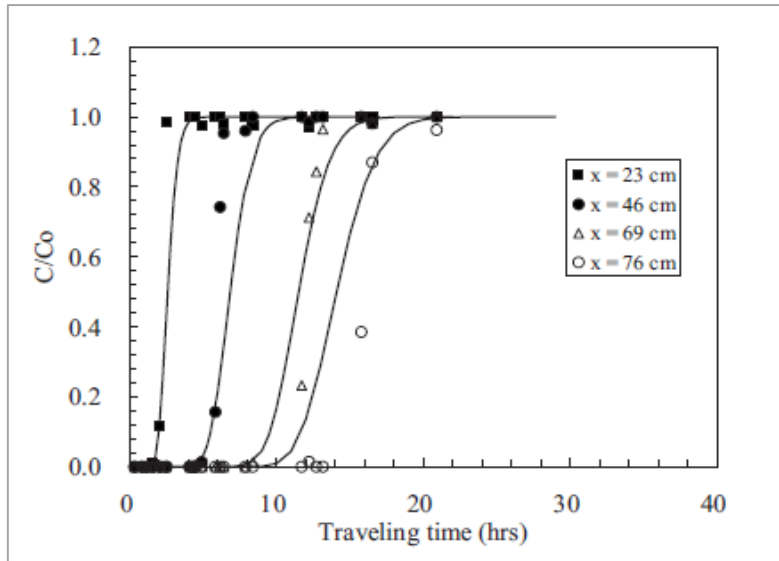
Σχήμα 2.45. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας του υγρού των πόρων σε ιόντα χλωρίου και σε σωματίδια πυριτίας. Σχήμα από Gallagher και Lin 2009 [14].



Σχήμα 2.46. Μεταβολή της παροχής υγρολύματος μέσα από τις εδαφικές στήλες σε συνάρτηση με το ιξώδες του υγρολύματος. Σχήμα από Gallagher και Lin 2009 [14].



Σχήμα 2.47. Μεταβολή της διαπερατότητας του εδάφους σε συνάρτηση με το ιξώδες του υγρολύματος που αντικαθιστά το νερό των πόρων. Στον κανόνα του Todd, X_{CS} είναι το ποσοστό μάζας της πυριτίας στο υγρό των πόρων, μ_{CS} είναι το ιξώδες του υγρολύματος και ο εκθέτης $b=0.25$. Ο δείκτης w αφορά το νερό των πόρων που αντικαθίσταται. Σχήμα από Gallagher και Lin [14].



$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_s t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left(\frac{v_s x}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + v_s t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right]$$

for the boundary and initial conditions of

$$\begin{cases} C(0, t) = C_0, & t \geq 0 \\ C(x, 0) = 0, & t \geq 0 \\ C(\infty, t) = 0, & t \geq 0 \end{cases}$$

where C_0 = concentration of source colloidal silica solution.

Distance, x (cm)	Average seepage velocity, v_s (cm/s)
22.86	2.46×10^{-03}
45.72	1.85×10^{-03}
68.58	1.65×10^{-03}
75.90	1.50×10^{-03}
Overall average	1.50×10^{-03}

Σχήμα 2.48. Πάνω: Χρόνος άφιξης της διοχετευόμενης πυριτίας στις διάφορες θέσεις καθ' ύψος της εδαφικής στήλης. Οι συνεχείς γραμμές είναι οι προβλέψεις της υβριδικής αναλυτικής – αριθμητικής μεθόδου, ενώ τα σημεία είναι τα πειραματικά δεδομένα. **Μέση:** Η εξίσωση της μονοδιάστατης μεταγωγής – διασποράς (one dimensional advection – dispersion equation), η αναλυτική λύση της και οι συνοριακές και αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Όπου C είναι η συγκέντρωση της πυριτίας στο υγρόλυμα, D_L είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς, x είναι η απόσταση από το σημείο εισπίεσης, t είναι ο χρόνος και v_s είναι η μέση ταχύτητα ροής. Για να ληφθεί υπόψη μεταβαλλόμενη ταχύτητα ροής η αναλυτική σχέση συνδυάζεται με αριθμητικές διαδικασίες. **Κάτω:** Μέση ταχύτητα ροής σε κάθε τμήμα της εδαφικής στήλης ύψους 0.9 m και συνολικός μέσος όρος. Σχήματα και πίνακας από Gallagher και Lin [14].



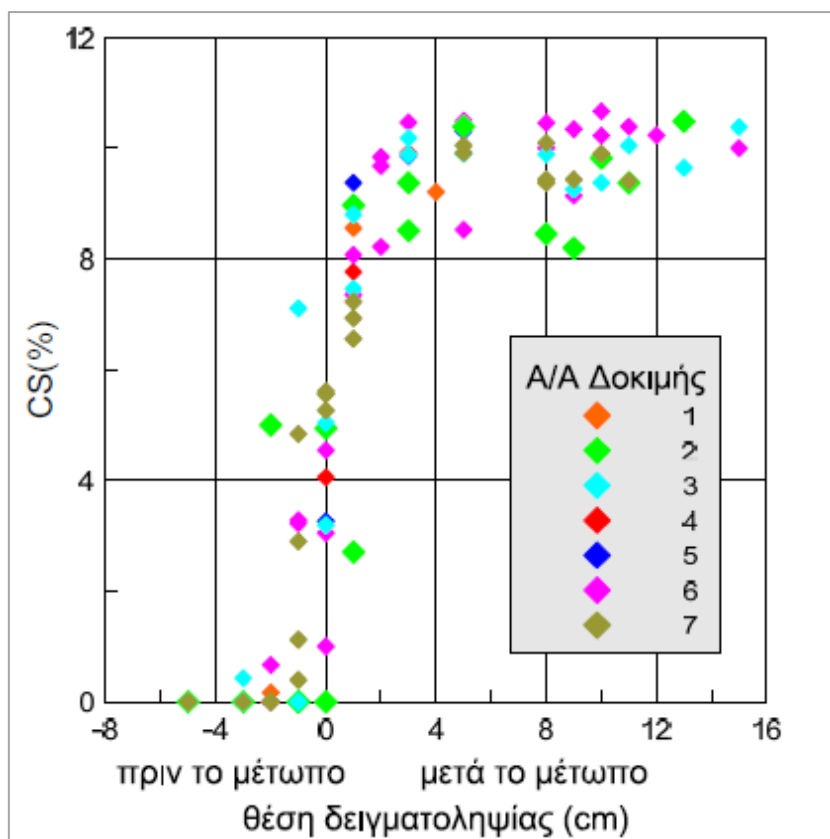
Σχήμα 2.49. Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές εισπίεσης υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας σε εδαφικά δοκίμια άμμου M31 και ιλυώδους άμμου M31 - D6. Στο σχήμα φαίνεται ένα δοκίμιο άμμου M31 ύψους 20 cm, καθώς το χρωματισμένο υγρόλυμα εισρέει από τη βάση της στήλης και εκρέει από την κορυφή. Η εισπίεση έγινε υπό χαμηλή υδραυλική κλίση 0.05 και διαπιστώθηκε ότι το πυκνότερο υγρόλυμα αντικαθιστά το ελαφρύτερο νερό των πόρων. Το Σχήμα είναι από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).

Πίνακας 2.4. Χαρακτηριστικά δοκιμών άμμου M31 που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα εισπίεσης υγρολύματος πυριτίας. Πίνακας από παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).

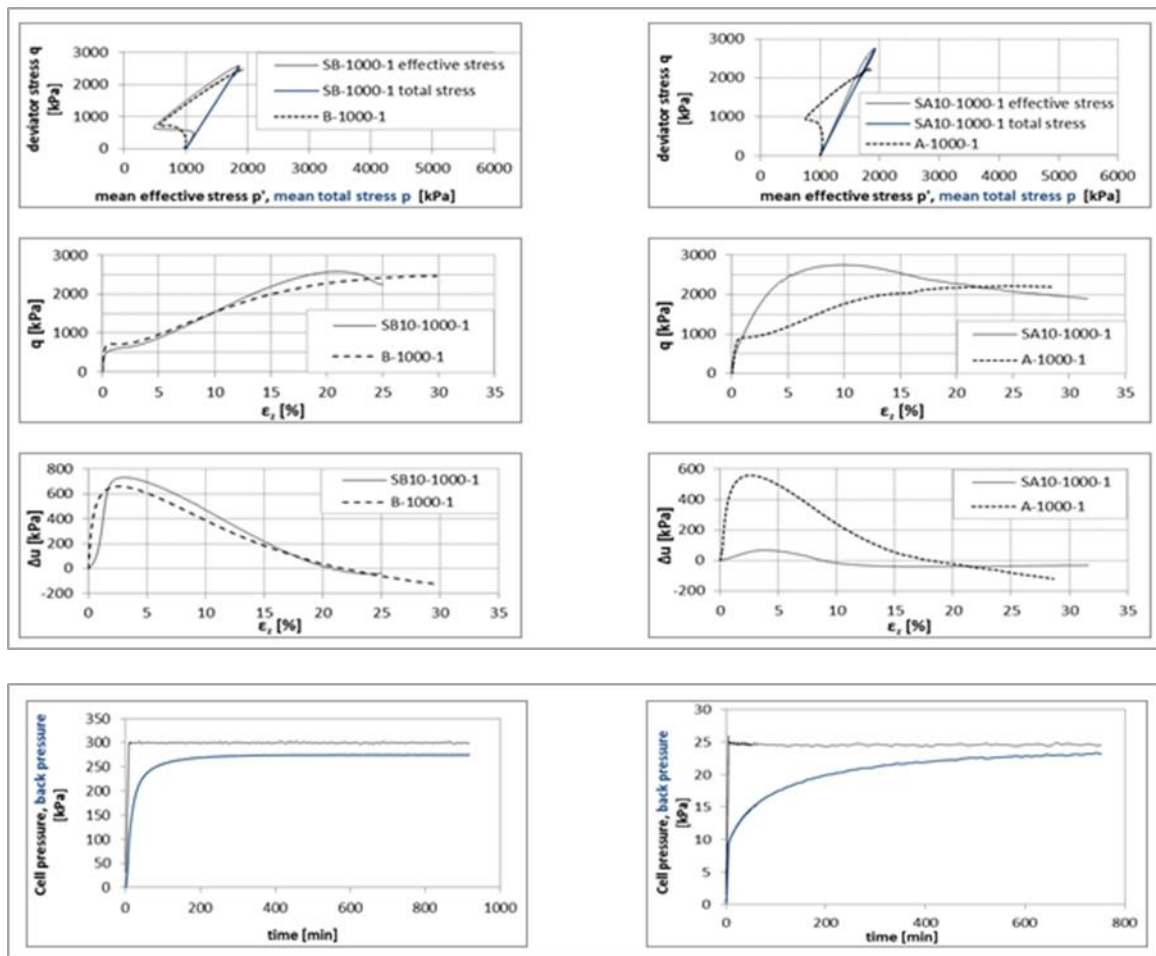
A/A δοκιμής	Ύψος δοκιμίου (cm)	Δείκτης πόρων (e)	Διαπερατότητα (k, m/s)
1	20	0.597	$1.09 \cdot 10^{-4}$
2	20	0.597	$2.25 \cdot 10^{-4}$
3	20	0.597	$2.48 \cdot 10^{-4}$
4	20	0.603	$2.84 \cdot 10^{-4}$
5	20	0.613	$3.17 \cdot 10^{-4}$
6	40	0.622	$3.40 \cdot 10^{-4}$



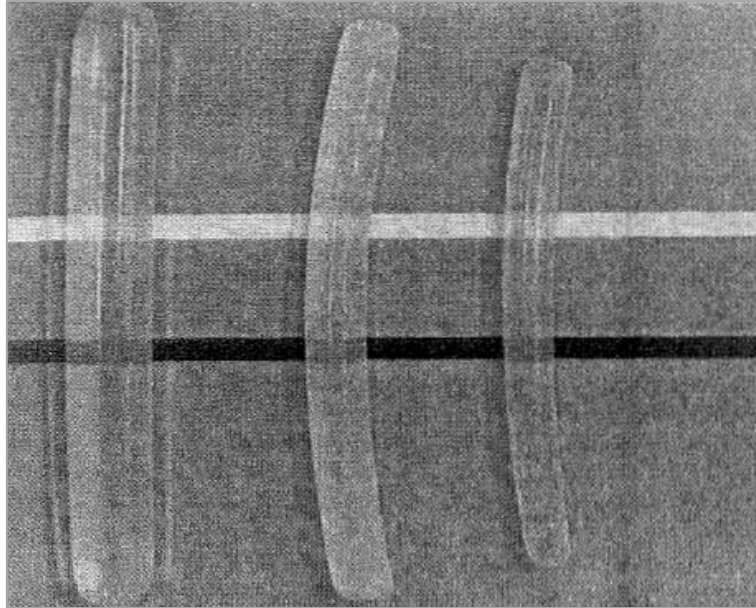
Σχήμα 2.50. Αριστερά: Δειγματοληψία υγρού πόρων σε δοκίμιο άμμου M31 ύψους 20 cm κατά την εισπίεση υγρολύματος πυριτίας 10% wt. Η θέση δειγματοληψίας είναι μπροστά από το ανερχόμενο μέτωπο υγρολύματος. Η θέση του μετώπου εντοπίζεται οπτικά από το μπλε χρώμα ζαχαροπλαστικής. Η περιεκτικότητα πυριτίας στις διάφορες θέσεις, σε σχέση με τη θέση του μετώπου, αποκαλύπτει αν υπάρχει μηχανισμός διάχυσης ή μόνο μεταγωγής της κολλοειδούς ουσίας. **Δεξιά:** Αδυναμία σαφούς εντοπισμού του μετώπου υγρολύματος πυριτίας κατά την εισπίεση σε δοκίμιο ιλυώδους άμμου. Το κάτω τμήμα του δοκιμίου έχει χρωματιστεί λιγότερο έντονα σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο άμμου. Η παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου μοιάζει με οθόνη με πολλά κατεστραμμένα pixels, διότι η πυριτία και η χρωστική ουσία έχουν συσσωρευτεί γύρω από την λεπτόκοκκη εδαφική φάση, αφήνοντας το κέντρο των πόρων γυμνό. Τα Σχήματα είναι από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



Σχήμα 2.51. Τυπική μορφή “S” των καμπυλών περιεκτικότητας πυριτίας κατά βάρος σε συνάρτηση με τη σχετική θέση δειγματοληψίας – μετώπου. Η θέση του μετώπου εντοπίζεται οπτικά από το μπλε χρώμα ζαχαροπλαστικής και έχει τετμημένη $x=0$ cm. Οι θέσεις μπροστά από το μέτωπο κατά την κίνησή του(θέσεις «πριν από το μέτωπο» στο σχήμα) έχουν αρνητική τετμημένη και το ποσοστό πυριτίας είναι πρακτικά αμελητέο για $x < -2$ cm. Οι θέσεις πίσω από το μέτωπο κατά την κίνησή του(θέσεις «μετά από το μέτωπο» στο σχήμα) έχουν θετική τετμημένη και το ποσοστό πυριτίας είναι πρακτικά ίσο με την ονομαστική τιμή 10% wt για $x > 2$ cm. Υπάρχει μία μεταβατική ζώνη στις τιμές περιεκτικότητας της πυριτίας, με πάχος 4 cm(2 cm μπροστά από το μέτωπο και 2 cm πίσω από αυτό) με μέση τιμή περιεκτικότητας 5% wt, δηλαδή όσο η μισή της ονομαστικής τιμής. Το Σχήμα είναι από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



Σχήμα 2.52. Επάνω αριστερή στήλη: σύγκριση των αποτελεσμάτων αστράγγιστης δοκιμής μονοτονικής τριαξονικής θλίψης σε σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο(SB10-1000-1) και σε φυσική ιλυώδη άμμο(B-1000-1). Η συμπεριφορά των δύο δοκιμών είναι παρόμοια. Οι πιέσεις του υγρού που καταγράφονται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο είναι ίδιας τάξης μεγέθους και δεν εμφανίζουν ιδιαίτερη υστέρηση σε σχέση με αυτές στο φυσικό δοκίμιο. Η αντίσταση q σε κάποιο επίπεδο αξονικής παραμόρφωσης ϵ_z είναι παρόμοια για το σταθεροποιημένο και το φυσικό έδαφος. Το υγρόλυμα μέσα στο πορώδες του εδάφους έχει σίγουρα μετατραπεί σε γέλη. Η στερεά φάση της γέλης, όμως, ενδέχεται να μην καλύπτει ομοιόμορφα το πορώδες λόγω πυρηνοποίησης. **Επάνω δεξιά στήλη:** σύγκριση των αποτελεσμάτων αστράγγιστης δοκιμής μονοτονικής τριαξονικής θλίψης σε σταθεροποιημένη άμμο(SA10-1000-1) και σε φυσική άμμο(A-1000-1). Η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου δοκιμίου είναι σαφώς βελτιωμένη. Οι πιέσεις του υγρού που καταγράφονται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο είναι πολύ μικρότερες και εμφανίζουν υστέρηση σε σχέση με αυτές στο φυσικό δοκίμιο. Η αντίσταση q σε κάποιο επίπεδο αξονικής παραμόρφωσης ϵ_z για το σταθεροποιημένο έδαφος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του φυσικού εδάφους. Η στερεά φάση της γέλης καλύπτει περισσότερο ομοιόμορφα το εδαφικό πορώδες και οδηγεί στη μείωση της διαπερατότητας και στην αύξηση της αντοχής. **Κάτω:** Αργή εκδήλωση της πίεσης νερού στον μετρητή(pressure transducer) κατά τον έλεγχο κορεσμού(B - test) δοκιμίου σταθεροποιημένης(CS=10% wt.) άμμου M31. Όταν η πίεση της κυψέλης αυξάνεται και εμποδίζεται η στράγγιση, το φορτίο το παραλαμβάνει η υγρή, ασυμπύεστη πρακτικά φάση μέσα στους πόρους της γέλης και του εδάφους. Η πίεση, όμως, που έχει αναπτυχθεί στο πορώδες του σταθεροποιημένου εδάφους δεν εκδηλώνεται ακαριαία στον μετρητή(pressure transducer). Το νερό αλληλεπιδρά με τη στερεή φάση της γέλης και δεν ισχύει η Αρχή του Pascal, όπως υφίσταται στα καθαρά υγρά.

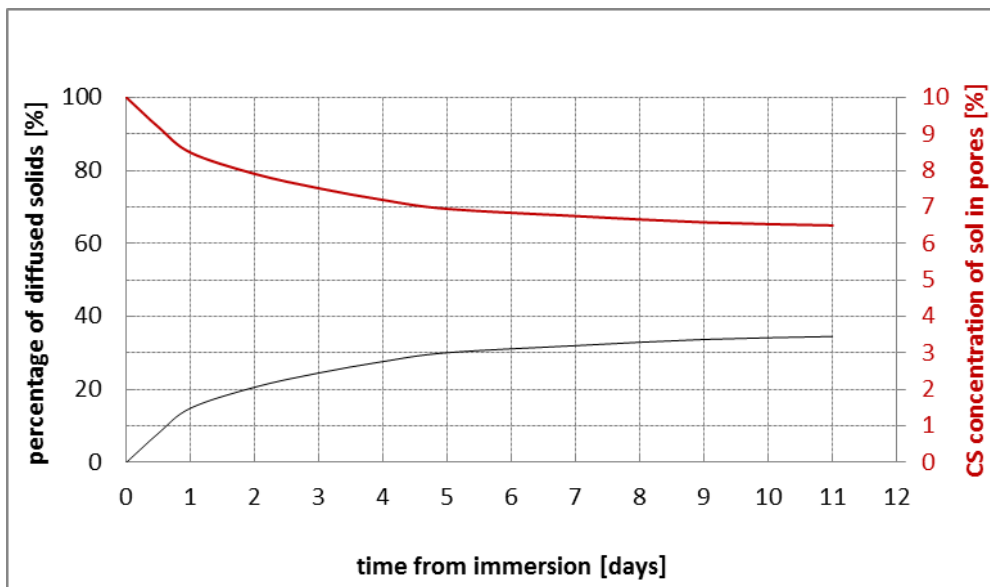
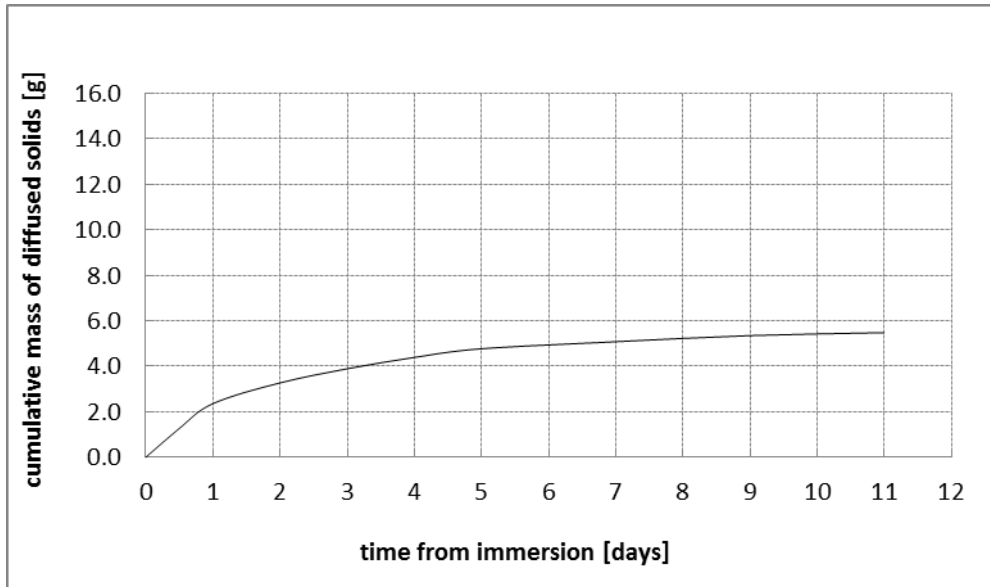


Σχήμα 2.53. Το πείραμα του Yoldas όπως περιγράφεται στο κείμενο των Brinker και Scherer [5]. Υγρόλυμα αλουμίνας τοποθετήθηκε σε μία σακούλα που ήταν φτιαγμένη από ημί - διαπερατή μεμβράνη διάλυσης(semipermeable dialysis membrane). Στη συνέχεια η σακούλα βυθίστηκε σε λουτρό οινόπνεύματος. Καθώς τα μόρια νερού διαχύθηκαν από το υγρόλυμα προς το λουτρό οινόπνεύματος, το υγρόλυμα συρρικνώθηκε ταχύτητα προς σχηματισμό γέλης. Σχήμα από Brinker και Scherer [5] με αναφορά στο έργο του Yoldas.

hollow cylinder stabilized specimen		SOL 10% CS, 0.03 N NaCl, PH≈6	
dry mass of sand M31	560.69 g	mass of water	266.67 g
height	138.60 mm	mass of 30%CS sol	133.34 g
internal diameter	40.00 mm	mass of NaCl	0.64 g
external diameter	70.03 mm	mass of HCl	4.40 g
total volume	359.68 cc	PH of sol	5.97
volume of sand particles	210.79 cc	temperature	23.1 C
volume of voids	148.90 cc	sol density	1.05 g/cc
void ratio	0.706	gel time	10 h
total surface of specimen	53100 mm ²	estimated viscosity at gel time	>100 cP
volume over surface ratio	6.77 mm		
mass of sol in the pores	156.34 g		
mass of CS particles in the pores	15.63 g		
mass of salt in the pores	0.25 g		
mass of CS and salt in the pores	15.88 g		
mass of water bath	490.00 g		
age of sol at first immersion	25 h		
dry mass of specimen after test	570.87 g		
theoretical dry mass of specimen after test	571.09 g		

diffusion of silica particles and salt					
time [h]	No of immersion	mass of diffused solids [g]	cumulative mass of diffused solids [g]	percentage of diffused solids [%]	CS concentration of sol in pores [%]
0	1	1.27	1.27	8.00	10.00
12					9.19
12	2	1.09	2.36	14.86	9.19
24					8.49
24	3	0.91	3.27	20.59	8.49
48					7.91
48	4	0.62	3.89	24.49	7.91
72					7.51
72	5	0.50	4.39	27.64	7.51
96					7.19
96	6	0.38	4.77	30.04	7.19
120					6.95
120	7	0.31	5.08	31.99	6.95
168					6.75
168	8	0.27	5.35	33.69	6.75
216					6.58
216	9	0.13	5.48	34.51	6.58
264					6.49

Πίνακας 2.5. Πρώτη δοκιμή εμφάνισης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου M31 σε λουτρό καθαρού νερού. Στους πίνακες παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου, του υγρολύματος και οι μετρήσεις της διαχεόμενης μάζας πυριτίας και αλάτων στο λουτρό. Η ηλικία του δοκιμίου κατά την πρώτη εμφάνιση είναι 25 ώρες. Ο χρόνος γέλης του υγρολύματος είναι 10 ώρες και η εκτιμώμενη τιμή του ιξώδους σε αυτόν τον χρόνο είναι >100 cP.



Σχήμα 2.54. Πρώτη δοκιμή εμβάπτισης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου M31 σε λουτρό καθαρού νερού. Η ηλικία του δοκιμίου κατά την πρώτη εμβάπτιση ήταν 25 ώρες. **Επάνω:** διάγραμμα αθροιστικής μάζας διαχεόμενων στερεών σωματιδίων σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η συνολική αρχική μάζα πυριτίας και αλατιού στους πόρους του δοκιμίου εκτιμάται ίση με 15.88 g. Μετά από 11 ημέρες εμβάπτισης 5.48 g πυριτίας και αλατιού διαχύθηκαν προς το λουτρό καθαρού, αφαλατωμένου νερού. **Κάτω:** διάγραμμα αθροιστικού ποσοστού διαχεόμενων στερεών σωματιδίων και ποσοστού πυριτίας που παραμένει στη γέλη, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Μετά από 11 ημέρες εμβάπτισης το 34.51% wt. των σωματιδίων πυριτίας(και αλατιού) έχει απομακρυνθεί από τους πόρους μέσω διάχυσης. Η γέλη των πόρων έχει παραμένουσα περιεκτικότητα σε πυριτία 6.49% wt. Το δοκίμιο υπέστη σταδιακή αποσύνθεση, η οποία ξεκίνησε με εξαλλοίωση της εξωτερικής επιφάνειας, συνέχισε με την απώλεια της στιβαρότητας και ολοκληρώθηκε με την εμφάνιση ρωγμών. Οι εμβαπτίσεις σταμάτησαν όταν το δοκίμιο διαλύθηκε ολοκληρωτικά.

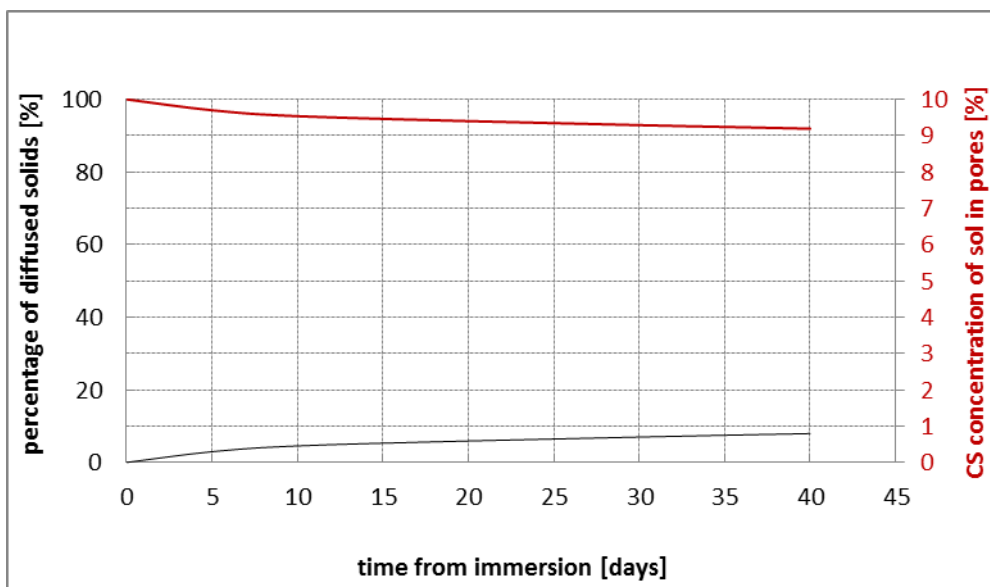
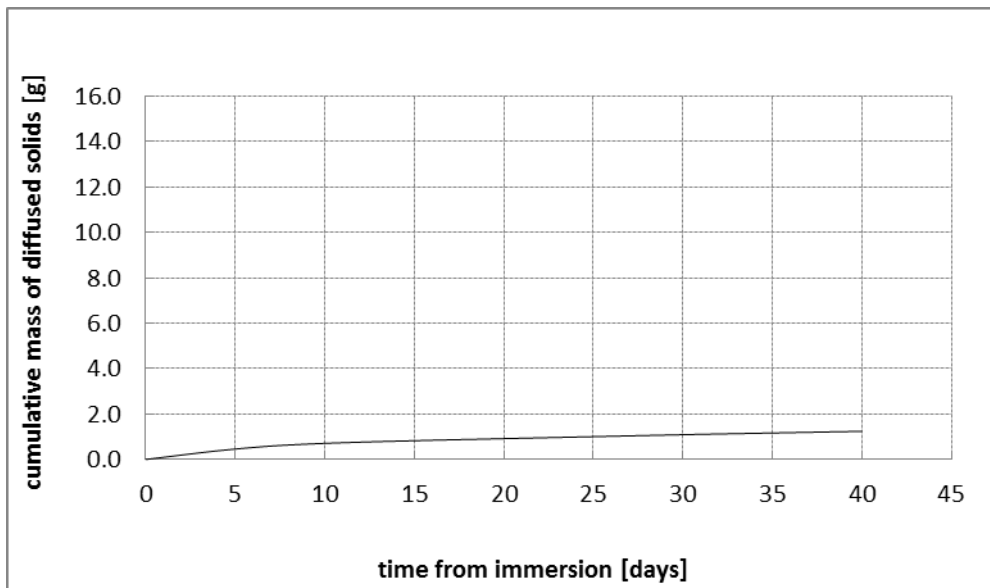


Σχήμα 2.55. Η εξέλιξη της αποσύνθεσης του σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου M31 κατά την πρώτη δοκιμή εμφάπτισης. Η αναχαίτιση της ωρίμανσης οφείλεται στη διάχυση της πυριτίας και του αλατιού, ενώ η αποσύνθεση πιθανώς να προκύπτει από την οσμωτική πίεση. **Επάνω αριστερά:** εξαλλοίωση της εξωτερικής επιφάνειας και απώλεια σιβαρότητας μετά το πέρας της πέμπτης εμφάπτισης. **Επάνω στη μέση:** εμφάνιση ρωγμής στο δοκίμιο κατά την αφαίρεση του νερού στο τέλος της έβδομης εμφάπτισης. **Επάνω δεξιά:** ολοκληρωτική διάλυση δοκιμίου στο πέρας της ένατης εμφάπτισης. **Κάτω:** Η διαχεόμενη πυριτία και το αλάτι που αποκαλύπτεται μετά την απομάκρυνση του νερού.

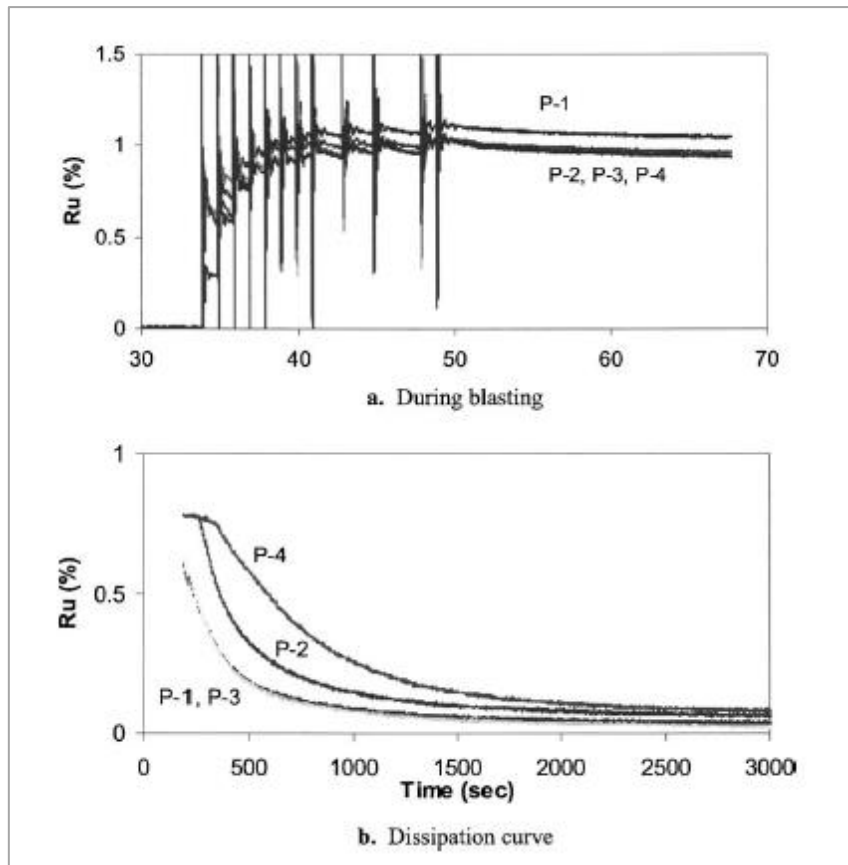
hollow cylinder stabilized specimen		SOL 10% CS, 0.03 N NaCl, PH≈6	
dry mass of sand M31	565.22 g	mass of water	266.67 g
height	138.98 mm	mass of 30%CS sol	133.33 g
internal diameter	40.00 mm	mass of NaCl	0.64 g
external diameter	69.89 mm	mass of HCl	4.40 g
total volume	358.53 cc	PH of sol	5.95
volume of sand particles	212.49 cc	temperature	23.3 C
volume of voids	146.04 cc	sol density	1.05 g/cc
void ratio	0.687	gel time	10 h
total surface of specimen	53139 mm ²	estimated viscosity at gel time	>100 cP
volume over surface ratio	6.75 mm		
mass of sol in the pores	153.34 g		
mass of CS particles in the pores	15.33 g		
mass of salt in the pores	0.24 g		
mass of CS and salt in the pores	15.58 g		
mass of water bath	490.00 g		
age of sol at first immersion	50 h		
dry mass of specimen after test	579.31 g		
theoretical dry mass of specimen after test	579.56 g		

diffusion of silica particles and salt					
time [days]	No of immersion	mass of diffused solids [g]	cumulative mass of diffused solids [g]	percentage of diffused solids [%]	CS concentration of sol in pores [%]
0	1	0.46	0.46	2.95	10.00
5					9.70
5	2	0.25	0.71	4.56	9.70
10					9.54
10	3	0.21	0.92	5.91	9.54
20					9.40
20	4	0.17	1.09	7.00	9.40
30					9.29
30	5	0.15	1.24	7.96	9.29
40					9.19

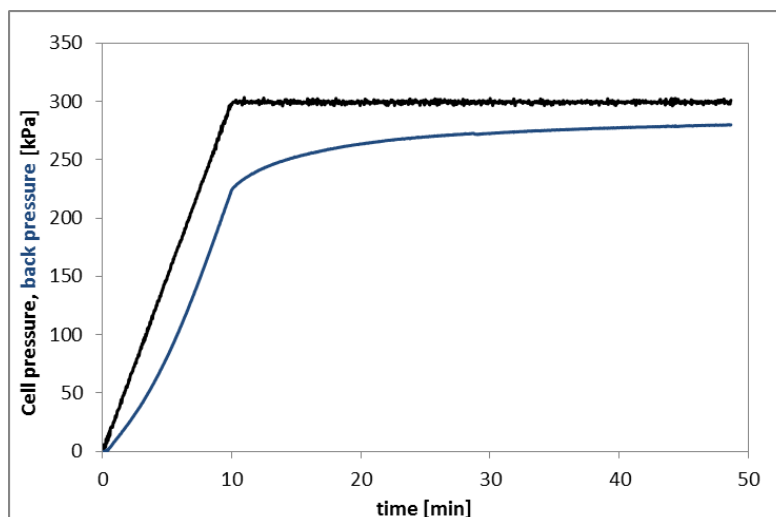
Πίνακας 2.6. Δεύτερη δοκιμή εμφάνισης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου M31 σε λουτρό καθαρού νερού. Στους πίνακες παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου, του υγρολύματος και οι μετρήσεις της διαχεόμενης μάζας πυριτίας και αλάτων στο λουτρό. Η ηλικία του δοκιμίου κατά την πρώτη εμφάνιση είναι 50 ώρες. Ο χρόνος γέλης του υγρολύματος είναι 10 ώρες και η εκτιμώμενη τιμή του ιξώδους σε αυτόν τον χρόνο είναι >100 cP.



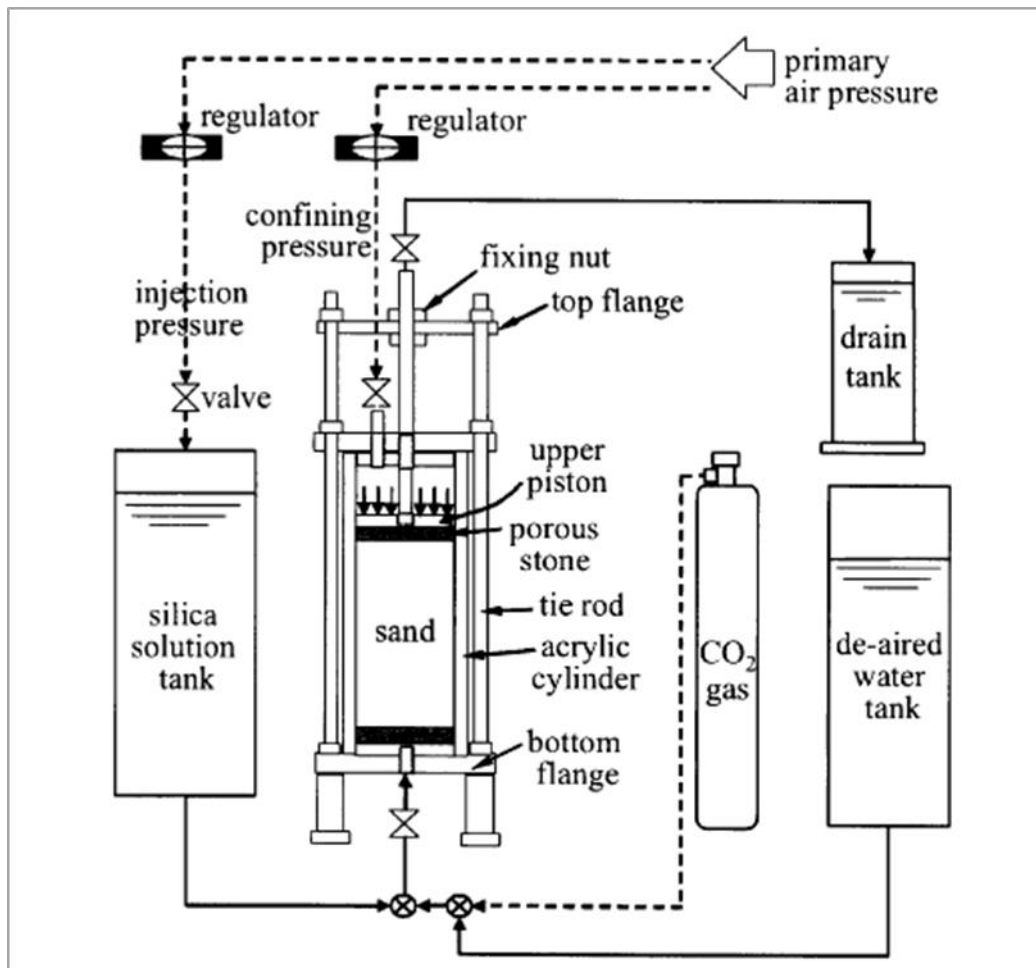
Σχήμα 2.56. Δεύτερη δοκιμή εμβάπτισης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου M31 σε λουτρό καθαρού νερού. Η ηλικία του δοκιμίου κατά την πρώτη εμβάπτιση ήταν 50 ώρες. **Επάνω:** διάγραμμα αθροιστικής μάζας διαχεόμενων στερεών σωματιδίων σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η συνολική αρχική μάζα πυριτίας και αλατιού στους πόρους του δοκιμίου εκτιμάται ίση με 15.58 g. Μετά από 40 ημέρες εμβάπτισης 1.24 g πυριτίας και αλατιού διαχύθηκαν προς το λουτρό καθαρού, αφαλατωμένου νερού. **Κάτω:** διάγραμμα αθροιστικού ποσοστού διαχεόμενων στερεών σωματιδίων και ποσοστού πυριτίας που παραμένει στη γέλη, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Μετά από 40 ημέρες εμβάπτισης το 7.96% wt. των σωματιδίων πυριτίας(και αλατιού) έχει απομακρυνθεί από τους πόρους μέσω διάχυσης. Η γέλη των πόρων έχει παραμένουσα περιεκτικότητα σε πυριτία 9.19% wt. Το δοκίμιο παρέμεινε στιβαρό και δεν υπέστη αισθητή αποσύνθεση.



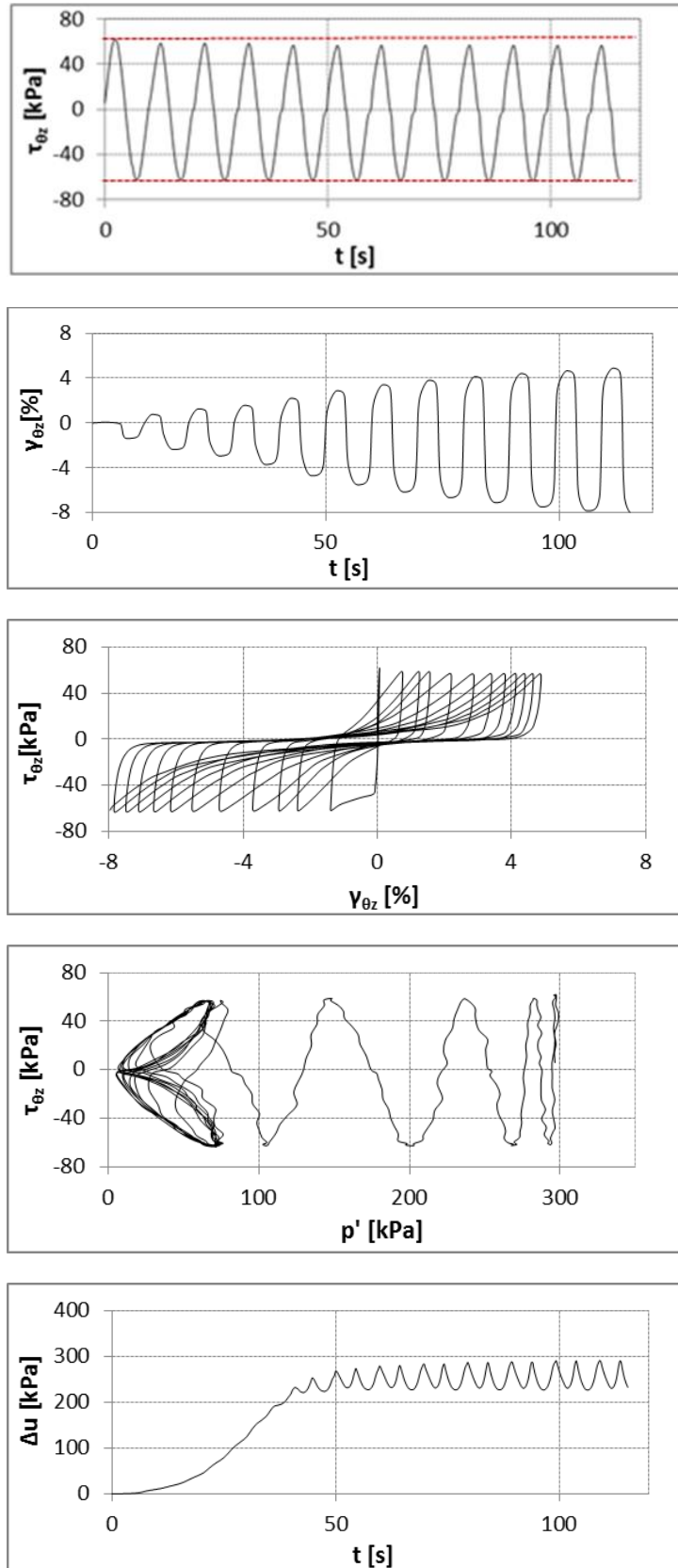
Σχήμα 2.57. Επάνω: ανάπτυξη πίεσης στο νερό των πόρων κατά τη διάρκεια τεχνητών εκρήξεων. Οι μετρητές πίεσης P2 και P4 τοποθετήθηκαν, μετά τον σχηματισμό της γέλης, μέσα στη σταθεροποιημένη εδαφική μάζα. Οι μετρητές P1 και P3 τοποθετήθηκαν στο φυσικό έδαφος ακριβώς κάτω από την σταθεροποιημένη περιοχή. **Κάτω:** εκτόνωση της πίεσης πόρων μετά τις εκρήξεις. Σχήμα από Gallagher et al. [13].



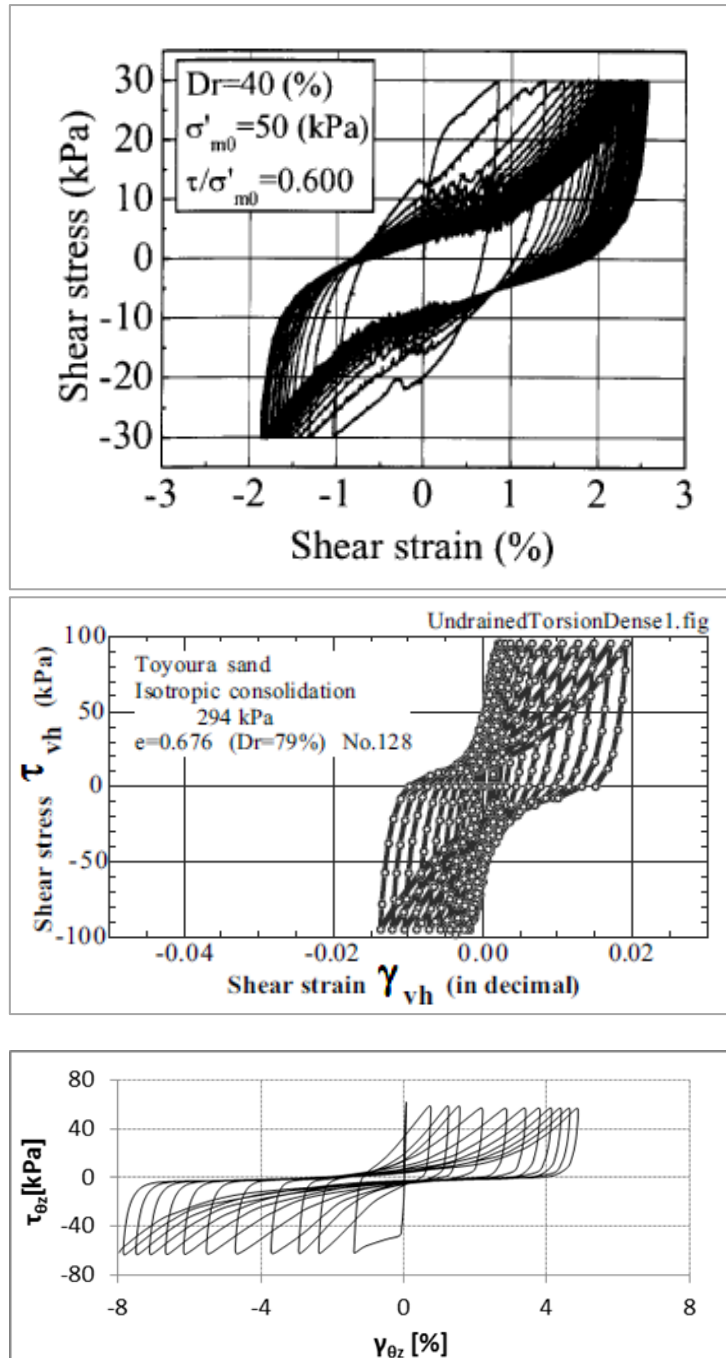
Σχήμα 2.58. Υστέρηση στην εκδήλωση της πίεσης του νερού των πόρων στον μετρητή που βρίσκεται εκτός δοκιμίου. Το σχήμα αφορά σταθεροποιημένο δοκίμιο άμμου με γέλη περιεκτικότητας 6% wt σε πυριτία. Η σύγκριση με το Σχήμα 2.52, που αφορά αντίστοιχο δοκίμιο με γέλη περιεκτικότητας 10% wt., φανερώνει ότι η υστέρηση είναι εντονότερη όταν το στερεό δίκτυο της γέλης είναι πυκνότερο.



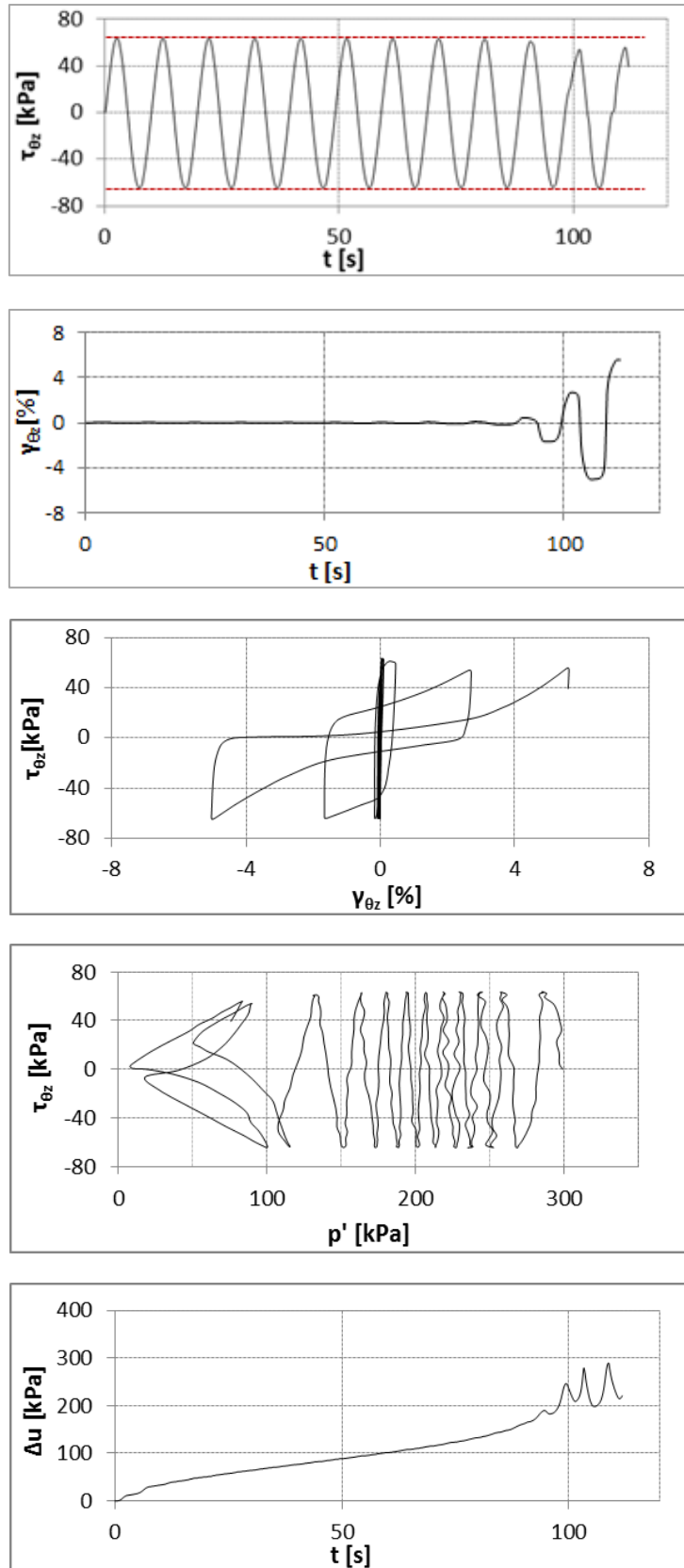
Σχήμα 2.59. Ο ειδικός εξοπλισμός που χρησιμοποίησαν οι Kodaka et al. [21] για να παρασκευάζουν σταθεροποιημένα δοκίμια για τη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κούλου κυλίνδρου. Το υγρόλυμα πυριτίας διοχετεύεται σε άμμο που βρίσκεται υπό ενεργό τάση. Η ενεργός τάση επιβάλλεται με έμβολο στην κατακόρυφο διεύθυνση, ενώ το καλούπι εξασφαλίζει την πλευρική παρεμπόδιση της παραμόρφωσης(συνθήκες K_0). Η ενεργός περίσφιγξη διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα ωριμάζει η γέλη μέσα στο πορώδες του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο η γέλη ενθυλακώνει τον εδαφικό σκελετό που έχει ήδη αναπτύξει τις επαφές μεταξύ των κόκκων(intergranular contacts) και το δίκτυο μεταβίβασης δυνάμεων(force network). Αποφεύγεται, επομένως, η στερεοποίηση του εδάφους μετά τον σχηματισμό της γέλης, η οποία πιθανώς θα τραυμάτιζε το στερεό δίκτυο της πυριτίας. Σχήμα από Kodaka et al. [21].



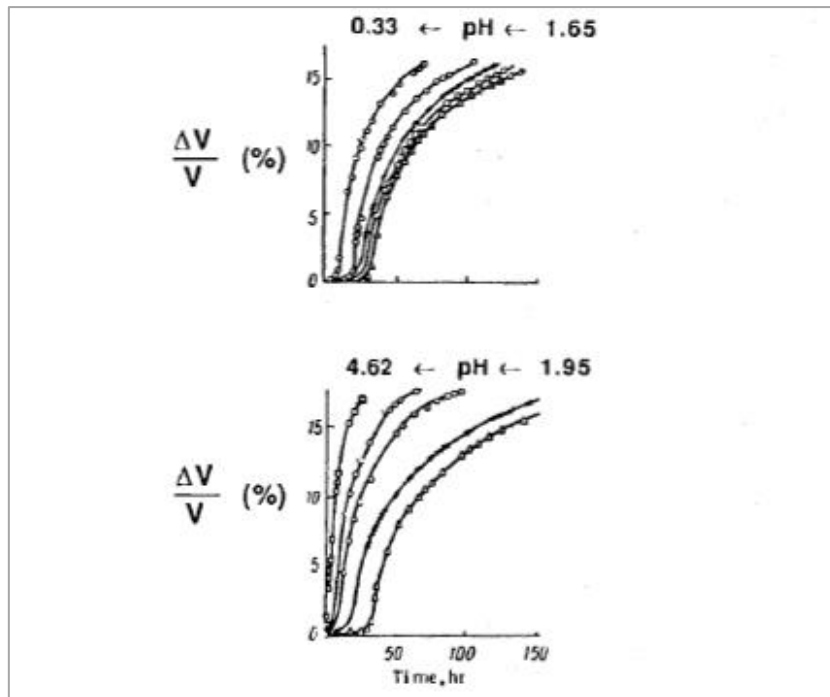
Σχήμα 2.60. Δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό αστράγγιστες συνθήκες, με κωδικό SA6-300-2. Η δοκιμή αφορά σταθεροποιημένη άμμο M31 με γέλη πυριτίας 6% wt. Η αρχική ισότροπη ενεργός τάση είναι $p_o'=300$ kPa, η πυκνότητα του δοκιμίου είναι $D_r=40.9\%$ και ο λόγος ανακυκλικής τάσης είναι $CSR=0.21$.



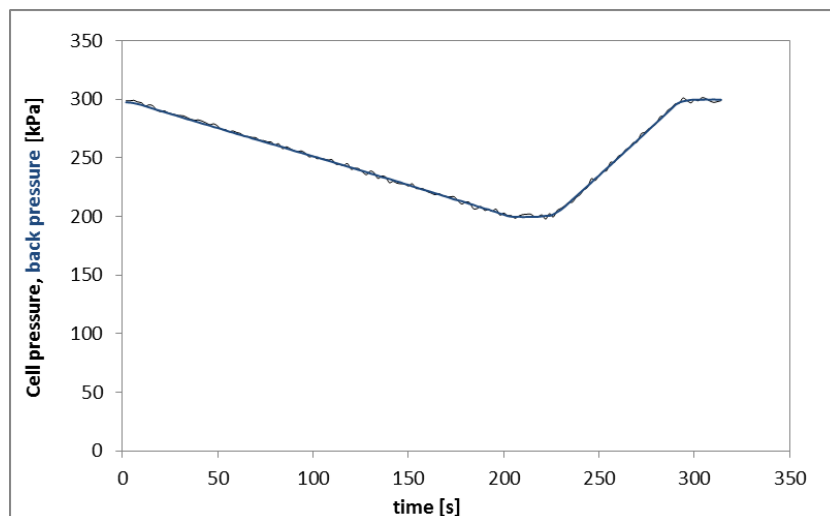
Σχήμα 2.61. Η ασύμμετρη μορφή των βρόχων υστέρησης διατμητικών τάσεων – παραμορφώσεων πιθανώς να οφείλεται στις δύο συνθήκες που προσπαθεί να ικανοποιήσει ταυτόχρονα η συσκευή στρεπτικής διάτμησης. Η πρώτη συνθήκη αφορά την επιβολή του προκαθορισμένου πλάτους διατμητικής τάσης (stress control) και η δεύτερη αφορά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου φόρτισης σε προκαθορισμένο χρόνο μίας περιόδου. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της διατμητικής παραμόρφωσης και το πλήθος των κύκλων, τόσο περισσότερο ενισχύεται η συσσώρευση παραμορφώσεων προς τη μία φορά φόρτισης. Το πάνω διάγραμμα είναι από τους Kodaka et al. [21] και παρουσιάζει τους βρόχους υστέρησης σταθεροποιημένης άμμου Toyoura, το μεσαίο διάγραμμα είναι από τον Towhata [37] και παρουσιάζει τους βρόχους υστέρησης φυσικής πυκνής άμμου Toyoura και το κάτω διάγραμμα παρουσιάζει τους βρόχους υστέρησης σταθεροποιημένης άμμου M31, σε πείραμα που εκτελέστηκε στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης του ΕΜΠ. Όλες οι δοκιμές είναι υπό αστραγγιστές συνθήκες.



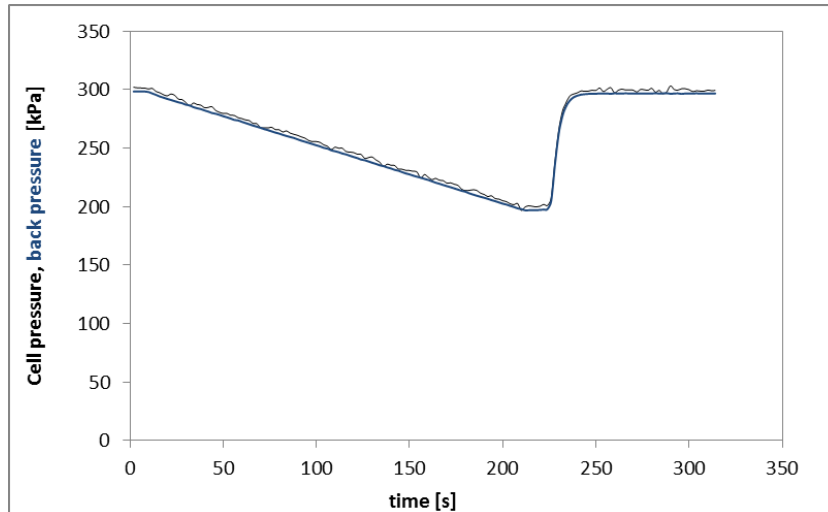
Σχήμα 2.62. Δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό αστράγγιστες συνθήκες, με κωδικό A-300-5. Η δοκιμή αφορά φυσική άμμο M31. Η αρχική ισότροπη ενεργός τάση είναι $p'_o=300$ kPa, η πυκνότητα του δοκιμίου είναι $D_r=41.3\%$ και ο λόγος ανακυκλικής τάσης είναι $CSR=0.21$.



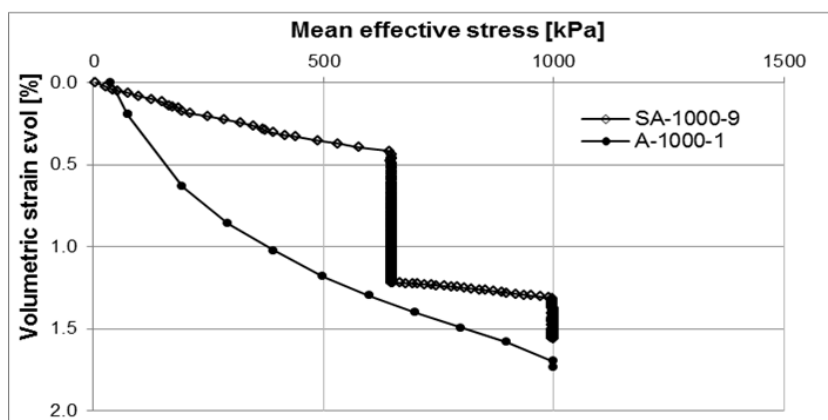
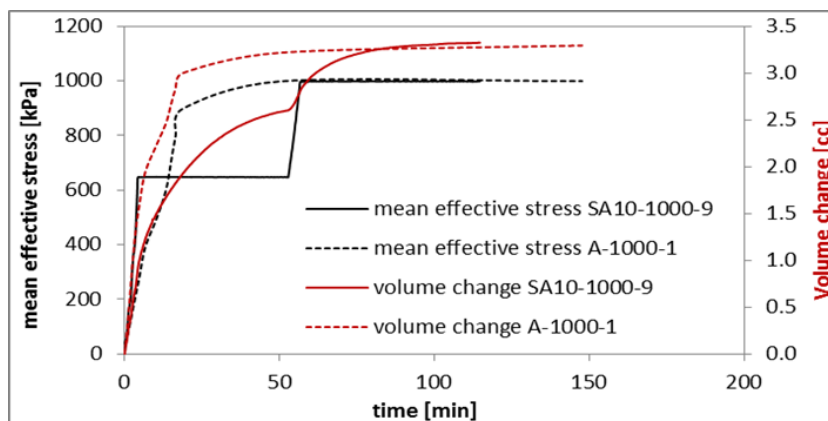
Σχήμα 2.63. Η γέλη πυριτικού νατρίου(sodium silicate gel) εμφανίζει έντονη συναίρεση. Η συρρίκνωση του στερεού ιστού κατά τον σχηματισμό νέων δεσμών σιλοξάνης οδηγεί σε ογκομετρικές παραμορφώσεις της τάξεως 10 - 15%. Το Σχήμα είναι από τους Brinker και Scherer [5] και αναφέρεται στο έργο των Klimentova et al.



Σχήμα 2.64. Μεταβολή της πίεσης περίσφιγξης και καταγραφή της απόκρισης της πίεσης πόρων, ακριβώς μετά το πέρας της ανακυκλικής δοκιμής στρεπτικής διάτμησης, με κωδικό SA6-300-2. Η άμεση απόκριση χωρίς υστέρηση υποδηλώνει ότι το στερεό δίκτυο της γέλης έχει τραυματιστεί και το ιξώδες έχει μειωθεί(διατμητική λέπτυνση – shear thinning).



Σχήμα 2.65 Μεταβολή της πίεσης περίσφιγξης και καταγραφή της απόκρισης της πίεσης πόρων, 12 ώρες μετά το πέρας της ανακυκλικής δοκιμής στρεπτικής διάτμησης, με κωδικό SA6-300-2. Στο διάστημα των 12 ωρών η στράγγιση ήταν εμποδιζόμενη. Η απόκριση της πίεσης πόρων παραμένει άμεση και χωρίς υστέρηση. Το στερεό δίκτυο της γέλης δεν έχει παρουσιάσει ανιχνεύσιμη αύξηση, στο δεδομένο χρονικό διάστημα και με απαγόρευση της συστολής λόγω στράγγισης.



Σχήμα 2.66. Στερεοποίηση της σταθεροποιημένης άμμου M31 με γέλη πυριτίας 10% wt. σε σύγκριση με τη φυσική άμμο M31. Η στερεοποίηση αφορά συμπαγή κυλινδρικά δοκίμια και πραγματοποιήθηκε στην τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων. Η εκροή νερού μέσα από τους πόρους του σταθεροποιημένου δοκιμίου γίνεται αργά, αλλά μακροπρόθεσμα ο όγκος που εκρέει είναι αντίστοιχος με αυτόν που εκρέει από το φυσικό δοκίμιο.

2.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2:

A) ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- [1] Asomoza M., Domínguez M. P., Solís S., López T., “Calorimetric study of the sol-gel silica gelation stage: effect of gelation PH”, *Materials Letters* 33 (1997) 153-160
- [2] Baek S., Pence T. J., “Inhomogeneous deformations of elastomer gels in equilibrium under saturated and unsaturated conditions”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59 (2011) 561-582
- [3] Bardet Jean-Pierre, “Experimental soil mechanics”, Prentice Hall, 1997
- [4] Bergna H. E.(ed.), Roberts W. O.(ed.), “Colloidal silica: fundamentals and applications”, CRC, Taylor & Francis, 2006
- [5] Brinker C. J., Scherer G. W., “Sol - gel science: the physics and chemistry of sol – gel processing”, Academic Press, 1990
- [6] Cervera M., Chiumenti M., Valverde Q., Agelet de Saracibar C., “Mixed linear / linear simplicial elements for incompressible elasticity and plasticity”, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 192 (2003) 5249–5263, DOI:10.1016/j.cma.2003.07.007
- [7] DeNovio N. M., Saiers J. E., Rayan J. N., “Colloid movement in unsaturated porous media: recent advances and future directions”, *Vadose Zone Journal*, 3:338–351 (2004), Soil Science Society of America
- [8] Díaz-Rodríguez J. A., Antonio-Izarraras V. M., Bandini P., and López-Molina J. A. (2008), “Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout”, *Canadian Geotechnical Journal*, 45: 1345-1355 (2008)
- [9] DuPont. (1997), “Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling”. Product information, DuPont, Wilmington, DE.
- [10] Einstein A., “Investigations on the theory of the Brownian Movement”, translated by Cowper A. D., Dover Publications, 1956, Original text: *Annalen der Physik*, 1905
- [11] Gallagher P. M. (2000), “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- [12] Gallagher P. M., Pamuk A., Abdoun T. (2007), “Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No.1, 0899-1561
- [13] Gallagher P. M., Conlee C. T., Rollins K. M., “Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, 2007; DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(186)
- [14] Gallagher P. M., Lin Y., “Colloidal silica transport through liquefiable porous media”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, 2009; DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000123
- [15] Gallagher P. M., Mitchell J. K. (2002), “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 1017-1026

- [16] Gerard G., Wildhorn S., "A study of Poisson's ratio in the yield region", *NACA TN 2561*, 1952
- [17] Goodwin J., "Colloids and interfaces with surfactants and polymers", Wiley, 2009(2nd edition)
- [18] Head K. H., "Manual of soil laboratory testing. Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests", Halsted Press: an imprint of John Wiley and Sons, inc., New York – Toronto, 1994(2nd edition)
- [19] Hunt J. D., Ezzedine S. M., Bourcier W., Roberts S., "Kinetics of the gelation of colloidal silica at geothermal conditions, and implications for reservoir modification and management", PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013 SGP-TR-198
- [20] Iler R. K., "The Chemistry of Silica", John Wiley and Sons, New York, 1979
- [21] Kodaka T., Oka F., Ohno Y., Takyu T., and Yamasaki N., "Modelling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand", *Geomechanics, ASCE (2005)*, 10.1061/40797(172)11
- [22] Löwent H., Szamel G., "Long time self-diffusion coefficient in colloidal suspensions: theory versus simulation", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 5 (1993) 22954.306.
- [23] Meegoda J. N., Tantemsapya N., "Microscopic modelling of colloidal silica stabilized granular contaminated soils", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No.1, DOI: 10.1061/ASCE/0899-1561/2007/19:1/91
- [24] Mott P. H., Dorgan J. R., Roland C. M., "The bulk modulus and Poisson's ratio of "incompressible" materials", *Journal of Sound and Vibration* 312 (2008) 572–575, DOI:10.1016/j.jsv.2008.01.026
- [25] Mott P. H., Roland C. M., "Limits to Poisson's ratio in isotropic materials", *Physical Review B* 80, 132104, 2009, DOI: 10.1103/PhysRevB.80.132104
- [26] Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J. M., "Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, 1999; 125(6):461–469.
- [27] Prédélus D., Lassabatere L., Coutinho A. P., Louis C., Brichtart T., Slimène E. B., Winiarski T., Jaramillo R. A., "Tracing water flow and colloidal particles transfer in an unsaturated soil", *Journal of Water Resource and Protection*, 2014, 6, 696-709, DOI.org/10.4236/jwarp.2014.67067
- [28] Petsev D. N., Denkov N. D., "Diffusion of charged colloidal particles at low volume fraction: Theoretical model and light scattering experiments", *Journal of colloid and interface science*, Vol. 149, No. 2, 1992
- [29] Railsback L. B., "Some fundamentals of Mineralogy and Geochemistry", document in open website, 2006
- [30] Rees D. W. A., "Basic engineering plasticity. An introduction with engineering and manufacturing applications", Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2006
- [31] Silver D. M., Farrel R. A., "Validity of pulsatile ocular blood flow measurements", *Survey of Ophthalmology, Volume 38, supplement, 1994*

- [32] Spencer L., Rix G. J., Gallagher P. M. (2008), “Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties”, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, ASCE (2008)*, 10.1061/40975(318)101
- [33] Style R. W., Peppin S.L., “Crust formation in drying colloidal suspensions”, *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, DOI:10.1098/rspa.2010.0039
- [34] Tabor D., “The bulk modulus of rubber”, *POLYMER, volume 35, number 13, 1994, 2759*
- [35] Tabor D., “Gases, liquids and solids”, Penguin Books, 1969
- [36] Tharwat Tadros, “Encyclopedia of colloid and interface science”, Springer, 2013
- [37] Towhata I., “Geotechnical Earthquake Engineering”, Springer, 2008
- [38] Treloar L. R. G., “The Physics of rubber elasticity”, Oxford University Press, 2005(3rd edition)
- [39] Van Blaaderen A., Peetermans J., Maret G., Dhont L. K. G., “Long time self-diffusion of spherical colloidal particles measured with fluorescence recovery after photo bleaching”, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 96 (6), 1992
- [40] Wei Hong, Xuanhe Zhao, Jinxiong Zhou, Zhigang Suo, “A theory of coupled diffusion and large deformation in polymeric gels”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56 (2008) 1779–1793, DOI:10.1016/j.jmps.2007.11.010
- [41] Yonekura R., Miwa M., “Fundamental properties of sodium silicate based grout”, Eleventh Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore, 1993, p.439-44
- [42] Yuhang Hu, Zhigang Suo, “Viscoelasticity and poroelasticity in elastomeric gels”, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 25, No. 5, October, 2012, Published by AMSS Press, Wuhan, China, ISSN 0894-9166

B) ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ

- [43] Καραϊσκάκης Σ. Γ., «Φυσικοχημεία», Εκδοτικός οίκος: Τραυλός Π., 1998

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

3.1 ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές της παρούσας εργασίας είναι η άμμος M31 και η ιλυώδης άμμος, που προκύπτει από το μίγμα 85% wt. άμμου M31 και 15% wt. ιλύος D6. Η ιλυώδης άμμος έχει λεπτόκοκκο υλικό σε ποσοστό $f_c=10\%$.

3.1.1 Η φυσική άμμος M31

Οι συνεργάτες στο ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. MIS 375618 μελέτησαν τα εδαφικά υλικά σε μικροσκόπιο. Η άμμος M31 είναι χαλαζιακή με προέλευση από το Βέλγιο. Η ανάλυση έδειξε ότι 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). Υπάρχει απειροελάχιστη ποσότητα (<0.001) μαύρων κόκκων σιδηροξειδίων άγνωστης προέλευσης. Το Σχήμα 3.1 απεικονίζει τους κόκκους της άμμου M31.

Στο εργαστήριο του ΕΜΠ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της άμμου M31. Το ειδικό βάρος έχει τιμή $G_s=2.66$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι $e_{max}=0.80$ και $e_{min}=0.50$ και τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι $D_{10}=0.213$ mm, $D_{30}=0.258$ mm $D_{60}=0.336$ mm και $C_u=1.58$ (βλέπετε Πίνακα 3.1). Στα εργαστήρια των συνεργατών προσδιορίστηκαν συντελεστές διαπερατότητας στο εύρος $k=(1.09-3.40)*10^{-4}$ m/s, για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές εισπίεσης (βλέπετε Πίνακα 2.4). Σε ανεξάρτητες δοκιμές διαπερατότητας προέκυψαν και μεγαλύτερες τιμές, π.χ. $k=5.16*10^{-4}$ m/s. Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.

3.1.2 Η φυσική ιλύς D6

Σύμφωνα με την ανάλυση που εκτέλεσαν οι συνεργάτες στο μικροσκόπιο, η ιλύς D6 είναι προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου, με απειροελάχιστη ποσότητα (<0.0001) μαύρων κόκκων, που οφείλονται πιθανόν σε ανθρώπινη επιμόλυνση. Οι κόκκοι της D6 είναι διαυγείς και, σε αντίθεση με την άμμο M31, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στίλβωση, γεγονός που αποδίδεται στην κογχώδη θραύση τους. Η ιλύς D6 είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερο PH (ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. MIS 375618). Οι κόκκοι της ιλύος D6 απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2.

Στο εργαστήριο του ΕΜΠ προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της ιλύος D6. Το ειδικό βάρος έχει τιμή $G_s=2.62$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι $e_{max}=1.06$ και $e_{min}=0.66$ και τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι $D_{10}=0.026$ mm, $D_{30}=0.040$ mm, $D_{60}=0.066$ mm και $C_u=2.54$ (βλέπετε Πίνακα 3.1). Η κοκκομετρική καμπύλη της ιλύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.

3.1.3 Η ιλυώδης άμμος M31 – D6

Δοκιμές εκτελέστηκαν σε καθαρή άμμο M31, αλλά και σε ένα μίγμα άμμου M31 και ιλύος D6. Η ιλυώδης άμμος παρασκευάστηκε με ποσοστά 85% wt. σε άμμο M31 και 15% wt. σε ιλύ D6, που οδηγεί σε λεπτόκοκκο κλάσμα $f_c=10\%$ wt. Το ειδικό βάρος του μίγματος έχει τιμή $G_s=2.66$, ο μέγιστος και ο ελάχιστος λόγος κενών είναι $e_{max}=0.75$ και $e_{min}=0.40$ και τα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι $D_{10}=0.067$ mm, $D_{30}=0.234$ mm $D_{60}=0.320$ mm και $C_u=4.78$ (βλέπετε Πίνακα 3.1). Στα εργαστήρια των συνεργατών προσδιορίστηκαν συντελεστές διαπερατότητας στο εύρος $k=(0.96-1.33)*10^{-4}$ m/s. Η κοκκομετρική καμπύλη της ιλυώδους άμμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.

3.1.4 Παράμετροι γραμμής κρίσιμης κατάστασης φυσικών εδαφών

Η κρίσιμη κατάσταση (*critical state*) των εδαφικών υλικών περιγράφει την πλαστική συμπεριφορά κατά την οποία η διάτμηση μπορεί να συνεχίζεται επ' αόριστον, χωρίς αλλαγή στον όγκο ή στην ενεργό τάση [8]. Σε μία δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης υπό αστράγγιστες συνθήκες, η κρίσιμη κατάσταση εντοπίζεται όταν η διατμητική παραμόρφωση αυξάνεται με σταθερή την αποκλίνουσα τάση, σταθερή τη μέση ενεργό τάση και με μηδενική τη μεταβολή της πίεσης πόρων. Στην κρίσιμη κατάσταση ο λόγος κενών e συνδέεται με τη μέση ενεργό τάση p' σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_{cs} = \Gamma - \lambda \cdot \ln p_{cs}' \quad (3.1)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης (*critical state line*) στο επίπεδο $e - \ln p'$. Η παράμετρος λ είναι η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης και Γ είναι η τιμή του λόγου κενών για $p'=1$ kPa. Η αποκλίνουσα τάση q συνδέεται με τη μέση ενεργό τάση p' σύμφωνα με τη σχέση:

$$q_{cs} = M \cdot p_{cs}' \quad (3.2)$$

όπου η παράμετρος M συνδέεται με τη γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση σύμφωνα με τη σχέση:

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi_{cs}}{3 - \sin \varphi_{cs}} \quad (3.3)$$

Οι συνεργάτες στο ερευνητικό προσδιόρισαν τις παραμέτρους της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για τη φυσική άμμο M31 και την ιλυώδη άμμο M31 – D6. Οι παράμετροι αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο $e - p'$ και στο επίπεδο $q - p'$.

3.2 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

(UNCONFINED COMPRESSION TESTS) – ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Η βελτίωση των ρευστοποιήσιμων εδαφικών μαζών στο πεδίο, με τη μέθοδο της παθητικής σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτρία, βασίζεται στην επιτυχή διοχέτευση της κολλοειδούς ουσίας μέσα στο έδαφος. Το υγρόλυμα πυριτίας οφείλει να αντικαταστήσει το νερό των πόρων στο χρονικό διάστημα που το ιξώδες του είναι χαμηλό και εξελίσσεται η εισπίεση (βλέπετε Ενότητα 2.2.4). Ύστερα ακολουθεί ο ταχύς σχηματισμός της γέλης που συνοδεύεται από μία εκθετική αύξηση του ιξώδους του υγρούλυματος (βλέπετε Ενότητα 2.2.1). Η ωρίμανση της γέλης και η πύκνωση του στερεού δικτύου συνεχίζεται για ένα πάρα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, μετά από τον σχηματισμό της γέλης (βλέπετε Ενότητα 2.2.2). Συγκεκριμένα, συνεχίζεται για όσο χρονικό διάστημα υπάρχουν αιωρούμενα κολλοειδή στερεά, τα οποία δεν έχουν ενσωματωθεί στον στερεό σκελετό. Ένας ακόμα παράγοντας που προάγει τον σχηματισμό νέων δεσμών πυριτίας είναι η σύγκλιση των αλυσίδων του στερεού ιστού της γέλης (βλέπετε Ενότητα 2.2.5). Η σύγκλιση αυτή μπορεί να συμβεί λόγω παραμόρφωσης του εδάφους, λόγω στράγγισης του νερού από τους πόρους και εξαιτίας της συναίρεσης και της ξήρανσης της γέλης. Ο έλεγχος ποιότητας που πραγματοποιείται για να εξακριβωθεί η επιτυχία της διαδικασίας σταθεροποίησης οφείλει να λαμβάνει υπόψη όλους τους παραπάνω παράγοντες.

3.2.1 Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη ως δείκτης επιτυχίας της παθητικής σταθεροποίησης των ρευστοποιήσιμων εδαφών με κολλοειδή πυριτρία

Η πιο χαρακτηριστική διαδικασία ελέγχου ποιότητας είναι η δειγματοληψία πυρήνων σταθεροποιημένου εδαφικού υλικού από το πεδίο και η εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδισης θλίψης (*unconfined compression tests*). Τα αποτελέσματα των δοκιμών από τα δείγματα του πεδίου συγκρίνονται με αυτά, από δοκίμια παρασκευασμένα σε ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου. Όταν

η δειγματοληψία γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εισπίεση αποκαλύπτεται ο βαθμός επιτυχίας της σταθεροποίησης και η αντοχή του σταθεροποιημένου εδάφους πρώιμης ωρίμανσης. Όταν η δειγματοληψία γίνεται μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εξακριβώνεται αν εκδηλώνεται η ευεργετική επίδραση της ωρίμανσης στην αύξηση της αντοχής, σε συνθήκες πεδίου. Επίσης, ελέγχεται η ανθεκτικότητα της γέλης όταν είναι εκτεθειμένη στο φυσικό περιβάλλον. Η δειγματοληψία που πραγματοποιείται μετά από ένα σεισμικό γεγονός βοηθά στην αξιολόγηση της απώλειας αντοχής λόγω του τραυματισμού του σκελετού της γέλης. Τέλος, αν ληφθούν και δοκιμαστούν δείγματα μετά την πάροδο ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος από το σεισμικό γεγονός, είναι δυνατόν να εξακριβωθεί αν υφίσταται κάποιος μηχανισμός αυτό – ίασης, ο οποίος συμβάλλει στη μερική αποκατάσταση του τραυματισμένου ιστού της γέλης.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο αποτελούν, επομένως, τη βάση με την οποία γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές σε δείγματα πεδίου. Στο εργαστήριο ακολουθείται η ίδια λογική. Εκτελούνται δοκιμές σε πρώιμη και σε μεγαλύτερη ηλικία ωρίμανσης. Με αυτόν τον τρόπο αποκαλύπτεται η ευεργετική επίδραση της ωρίμανσης στην αύξηση της αντοχής. Μία ακόμη σκέψη είναι να εκτελεστούν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης μετά από την ολοκλήρωση της ανακυκλικής διάτμησης. Μία τέτοια μεθοδολογία θα αποκάλυπτε τον βαθμό τραυματισμού της γέλης και την παραμένουσα αντοχή του σταθεροποιημένου εδάφους, μετά από τις παραμορφώσεις της ανακυκλικής διέγερσης. Υπάρχει, όμως, μία πρακτική δυσκολία στην εκτέλεση ανεμπόδιστης θλίψης μετά το πέρας της τριαξονικής ανακυκλικής διάτμησης. Η ανακυκλική φόρτιση έχει προκαλέσει την ανάπτυξη μίας θετικής πίεσης πόρων μέσα στο δοκίμιο. Αν επιτραπεί η στράγγιση του νερού μέσα από τους πόρους του δοκιμίου και διατηρηθεί μηδενική πίεση, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πίεση περίσφιγξης, τότε υπάρχει ο κίνδυνος να κυκλοφορήσει μεγάλη ποσότητα κολλοειδούς ουσίας μέσα στις σωληνώσεις της συσκευής. Ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα υψηλός αν ληφθεί υπόψη ότι ο ιστός της γέλης έχει τραυματιστεί. Μία εναλλακτική μεθοδολογία θα ήταν να μειωθεί η πίεση περίσφιγξης, χωρίς να επιτρέπεται η στράγγιση. Κάτι τέτοιο θα μείωνε παράλληλα και την πίεση μέσα στο υγρό των πόρων και είναι πιθανόν να οδηγούσε στην ανάπτυξη μίας αναρροφητικής πίεσης (suction). Η εκτόνωση της αναρροφητικής πίεσης θα γινόταν με εισροή νερού μέσα στο δοκίμιο και θα μείωνε τον κίνδυνο κυκλοφορίας της κολλοειδούς ουσίας στις σωληνώσεις.

Οι συνεργάτες στο ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. MIS 375618 εκτέλεσαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31 και ιλυώδους άμμου M31 – D6. Η σταθεροποίηση έγινε με υγρόλυμα πυριτίας περιεκτικότητας 6% wt. και 10% wt. Το υγρόλυμα περιεκτικότητας CS=6% έχει χρόνο γέλης 11 ώρες (βλέπετε Ενότητα 2.2.1) και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ηλικία 55 ωρών. Τα αντίστοιχα μεγέθη για το υγρόλυμα περιεκτικότητας CS=10% είναι 10 και 50 ώρες. Τα δοκίμια παρήχθησαν με τη βοήθεια της διάταξης και του εξοπλισμού του Σχήματος 3.5. Το υγρόλυμα πυριτίας διοχετεύθηκε από τη βάση προς την κορυφή, αντικαθιστώντας το νερό των πόρων. Ακολούθησε περίοδος ωρίμανσης τετραπλάσια του χρόνου γέλης, μέσα σε χώρο σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας και ύστερα εκτελέστηκαν οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Όλες οι δοκιμές αφορούν σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό σε πρώιμη ηλικία ωρίμανσης. Η σταθεροποίηση προσφέρει ένας είδος συνεκτικότητας στο έδαφος, το οποίο αποκτά αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u . Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει την αποκλίνουσα τάση q σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ϵ_a , για δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31, με ποσοστό πυριτίας CS=6 και 10% wt. και για σχετικές πυκνότητες $D_r=10.6 - 47.6\%$. Η μέγιστη τιμή της αποκλίνουσας τάσης q_u εκδηλώνεται σε παραμορφώσεις $\epsilon_a=1\% \pm 0.25\%$ και παρουσιάζει τιμές από 23.4 kPa έως 106.8 kPa. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή $S_u=q_u/2$ παίρνει τιμές από 11.7 kPa έως 53.4 kPa. Μετά από την ανάπτυξη της κορυφαίας τιμής q παρουσιάζεται μείωση προς μία παραμένουσα αντοχή, περίπου ίση με το 50% της κορυφαίας. Η μείωση αυτή εκδηλώνεται και στα δοκίμια χαμηλής πυκνότητας. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή αυξάνονται με την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και με την αύξηση της περιεκτικότητας σε πυριτία. Το Σχήμα 3.7 παρουσιάζει τα διαγράμματα $q - \epsilon_a$ για δοκίμια σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου M31 – D6, με ποσοστό πυριτίας CS=6 και 10% wt. και για σχετικές πυκνότητες $D_r=10.2 - 36.0\%$. Τα αποτελέσματα είναι ποιοτικώς αντίστοιχα με αυτά της σταθεροποιημένης άμμου. Η αποκλίνουσα τάση αποκτά μία μέγιστη τιμή όταν η αξονική παραμόρφωση είναι περίπου 1% και στη συνέχεια

μειώνεται. Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή αυξάνονται με την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και με την αύξηση της περιεκτικότητας σε πυριτία.

Μία ποσοτική διαφοροποίηση παρατηρείται στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου σε σχέση με τη σταθεροποιημένη άμμο. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό παρατηρούν ότι το ποσοστό CS(%) έχει πιο σημαντική επίδραση σε δοκίμια άμμου, παρά σε δοκίμια ιλυώδους άμμου, και αυτό ανεξαρτήτως δείκτη πόρων ή σχετικής πυκνότητας. Τα Σχήματα 3.8 και 3.9 αποκαλύπτουν αυτήν τη διαφορά. Η προσωπική άποψη του γράφοντος είναι ότι η συμπεριφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στον μηχανισμό πυρηνοποίησης κατά τον σχηματισμό της γέλης. Στις ενότητες 2.2.4.1 και 2.2.5.2 και στο Σχήμα 2.52 έχουν παρουσιαστεί αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου σε σύγκριση με τη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο. Το πλούσιο ανάπτυγμα επιφανειών και η γωνιώδης υφή της λεπτόκοκκης ιλύος ίσως προσφέρει ένα μεγάλο πλήθος περιοχών, που λειτουργούν ως πυρήνες έναρξης της γελοποίησης. Το λεπτόκοκκο υλικό με αυτόν τον τρόπο συγκεντρώνει γύρω του το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων πυριτίας. Αυτή η ανομοιογένεια στον στερεό ιστό της γέλης περιορίζει την ευεργετική επίδρασή της σταθεροποίησης.

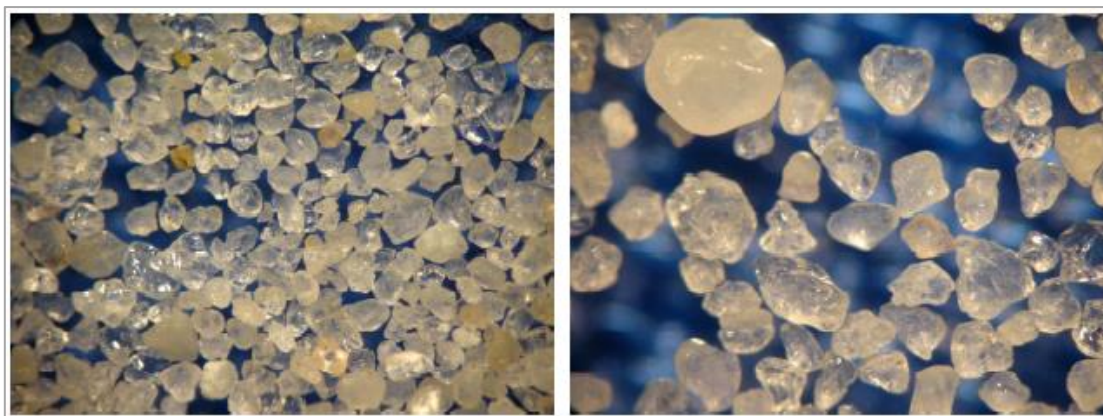
3.2.2 Συγκριτική παράθεση της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη διάφορων μη συνεκτικών εδαφών σταθεροποιημένων με κολλοειδή πυριτία

Οι συνεργάτες στο ερευνητικό συνέκριναν τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτέλεσαν σε σταθεροποιημένη άμμο M31 και ιλυώδη άμμο M31 – D6, με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, που αφορούν άλλα σταθεροποιημένα εδάφη. Συγκεκριμένα, οι Gallagher και Lin [3] εκτέλεσαν δοκιμές σε σταθεροποιημένη άμμο Nevada No. 120, οι Persoff et al. [7], η Gallagher [2] και οι Gallagher και Mitchell [4] χρησιμοποίησαν την άμμο Monterey No. 30, ενώ οι Persoff et al. [7] εκτέλεσαν δοκιμές και στην λεπτόκοκκη άμμο Trevino soil. Οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για τα παραπάνω εδάφη παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10. Το Σχήμα 3.11 παρουσιάζει την αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη των σταθεροποιημένων μη συνεκτικών εδαφών σε συνάρτηση με το ποσοστό της κολλοειδούς πυριτίας CS(%). Τα εδαφικά υλικά είχαν σχετικές πυκνότητες που αναγράφονται στο σχήμα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η πυκνότητα είναι άγνωστη. Η μέση καμπύλη που περιγράφει τα πειραματικά δεδομένα έχει την εκθετική μορφή:

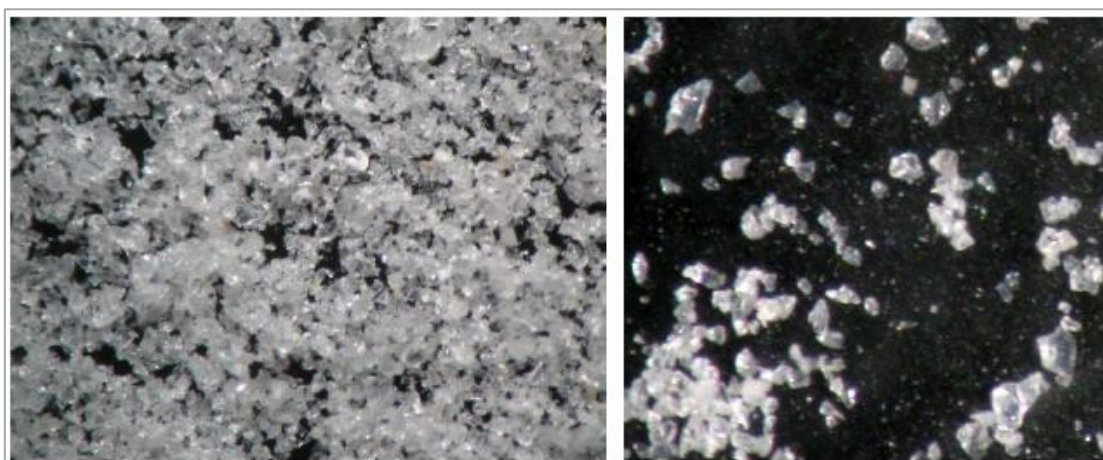
$$q_u(\text{kPa}) = 3.8 * [\text{CS}(\%)]^{1.35} \quad (3.4)$$

Η εκθετική σχέση (3.4) φαίνεται να περιγράφει αδρά τη γενική τάση της αύξησης της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη, όταν αυξάνεται το ποσοστό της πυριτίας CS(%). Υπάρχει μεγάλη διασπορά των πειραματικών δεδομένων σε σχέση με τη στατιστική καμπύλη. Αυτό προφανώς οφείλεται στο μεγάλο πλήθος παραμέτρων που σχετίζονται με τις δοκιμές(σχετική πυκνότητα, κοκκομετρική διαβάθμιση, υφή κόκκων κλπ.). Αξίζει να παρατηρηθεί ότι στο κάτω όριο του νέφους των πειραματικών σημείων βρίσκονται συστηματικά τα σημεία που αφορούν την άμμο Trevino soil. Φαίνεται, δηλαδή, ότι για τα ίδια ποσοστά πυριτίας, η άμμος Trevino soil αποκτά κατά κανόνα μικρότερη αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, συγκριτικά με τα υπόλοιπα εδαφικά υλικά. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην άγνωστη σχετική πυκνότητα του εδάφους, η οποία μπορεί να είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Το γεγονός ότι η αντοχή των δοκιμών Trevino soil είναι πάντα μικρότερη από την αντίστοιχη των υπόλοιπων εδαφών, ακόμα και από τα δοκίμια με πολύ χαμηλή πυκνότητα(πχ. $D_r=10 - 15\%$ για την άμμο M31 και την ιλυώδη άμμο M31 – D6), μάλλον απορρίπτει αυτό το ενδεχόμενο. Ο περιορισμός της ευεργετικής επίδρασης της σταθεροποίησης ίσως σχετίζεται με το μεγάλο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό(βλέπετε Σχήμα 3.11) και στον μηχανισμό της πυρηνοποίησης, που έχουμε περιγράψει.

3.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3



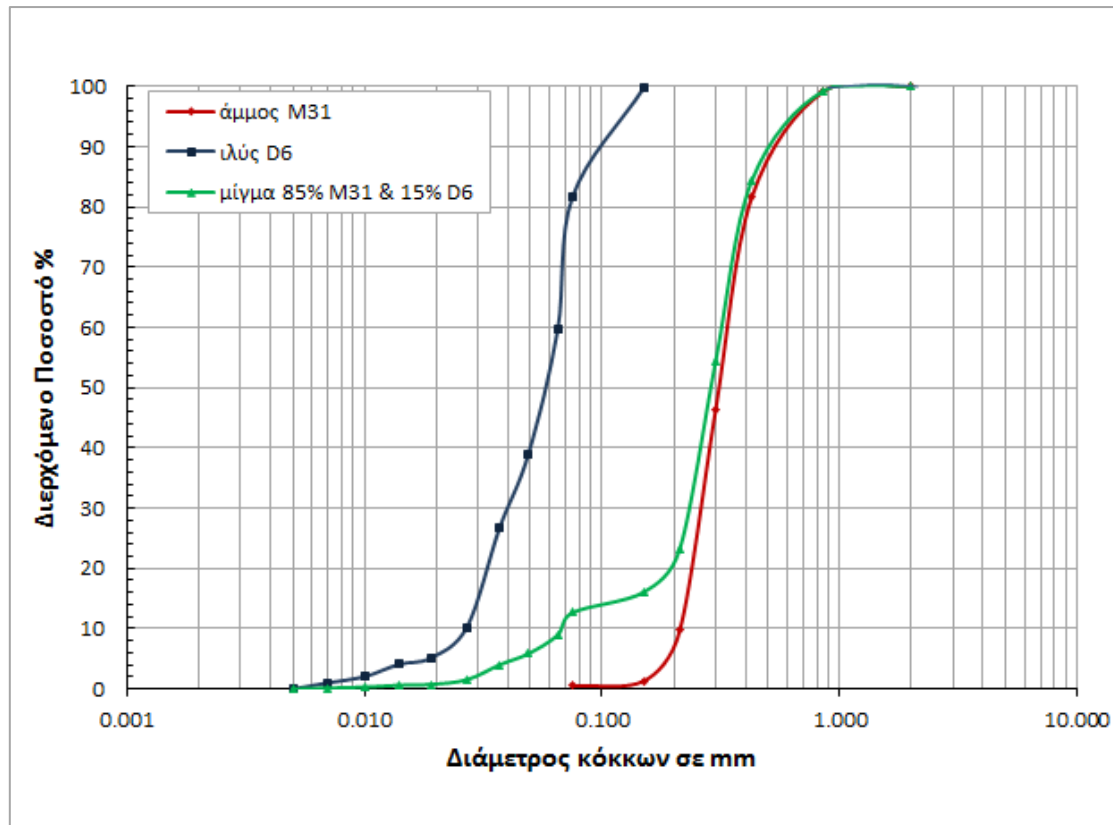
Σχήμα 3.1. Οι κόκκοι της χαλαζιακής άμμου M31, όπως φαίνονται στο μικροσκόπιο. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



Σχήμα 3.2. Οι κόκκοι της ιλύος D6, όπως φαίνονται στο μικροσκόπιο. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά φυσικών εδαφικών υλικών προσδιορισμένα στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του ΕΜΠ .

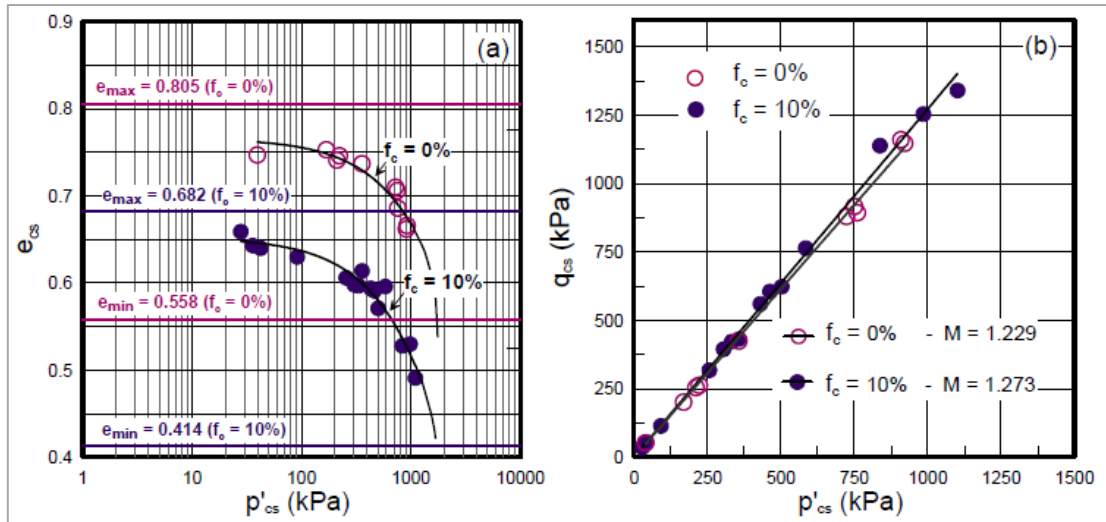
Φυσική ιδιότητα	Άμμος M31	ιλύς D6	Ιλυώδης άμμος 85% wt. M31 & 15% wt. D6
G_s	2.66	2.62	2.65
e_{max}	0.80	1.06	0.75
e_{min}	0.50	0.66	0.40
D_{10} (mm)	0.213	0.026	0.067
D_{30} (mm)	0.258	0.040	0.234
D_{60} (mm)	0.336	0.066	0.320
C_u	1.58	2.54	4.78



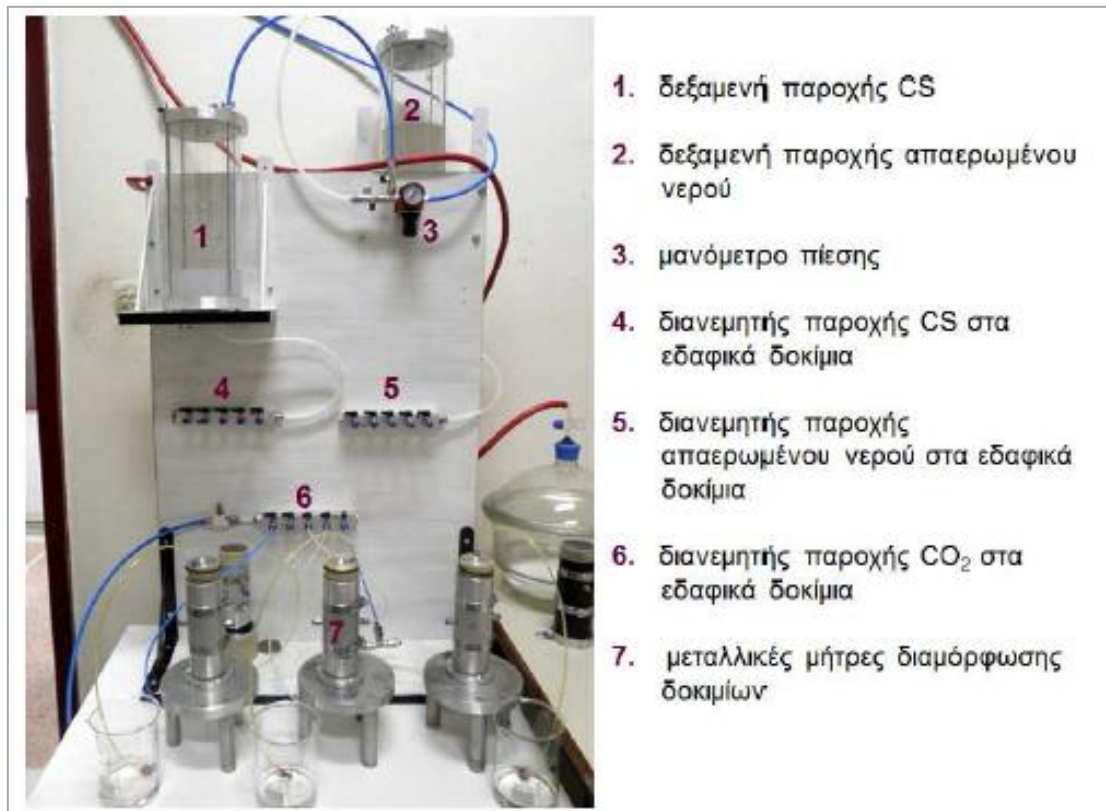
Σχήμα 3.3. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31, ιλύος D6 και ιλυώδους άμμου 85% wt. M31 & 15% wt. D6.

Πίνακας 3.2. Παράμετροι της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για τη φυσική άμμο M31 και τη φυσική ιλυώδη άμμο M31 – D6. Πίνακας από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).

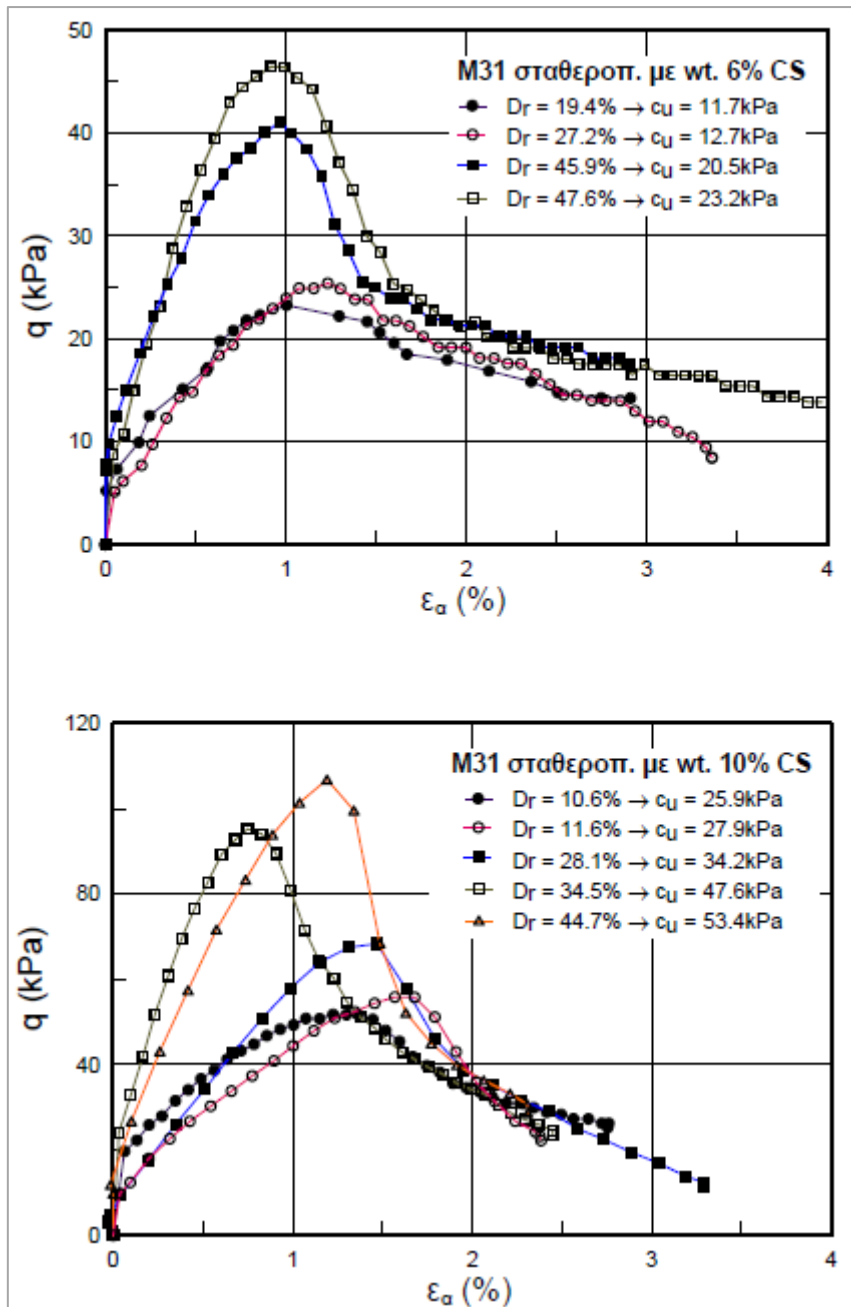
έδαφος	Γ_{cs}	λ_{cs}	M	φ'_{cs} (°)
$f_c = 0\%$	0.9630	0.0420	1.229	30.68
$f_c = 10\%$	0.8389	0.0442	1.273	31.66



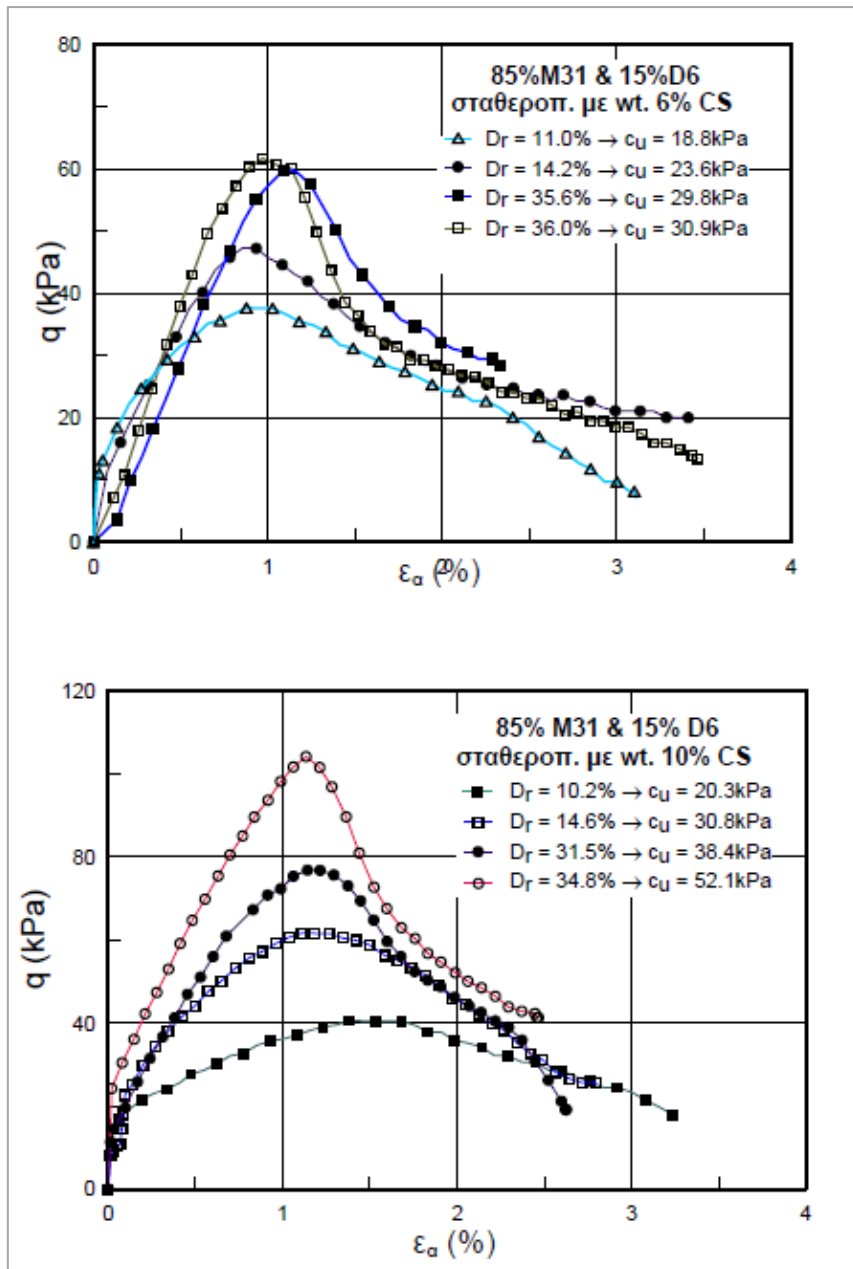
Σχήμα 3.4. Οι γραμμή κρίσιμης κατάστασης(critical state line) στο επίπεδο $e - q$ και στο επίπεδο $q - p'$. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής - Π.Θ.(MIS 375618).



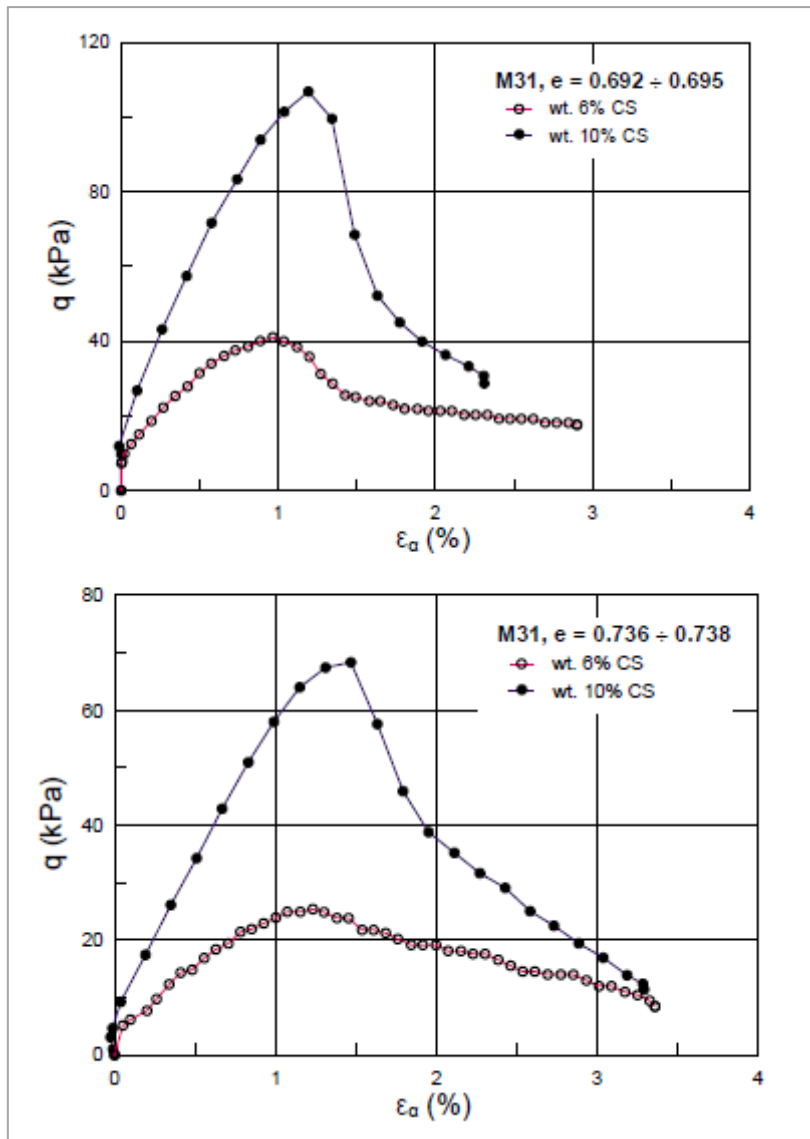
Σχήμα 3.5. Διάταξη και εξοπλισμός για την παρασκευή σταθεροποιημένων κυλινδρικών δοκιμίων άμμου και ιλυώδους άμμου. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής - Π.Θ.(MIS 375618).



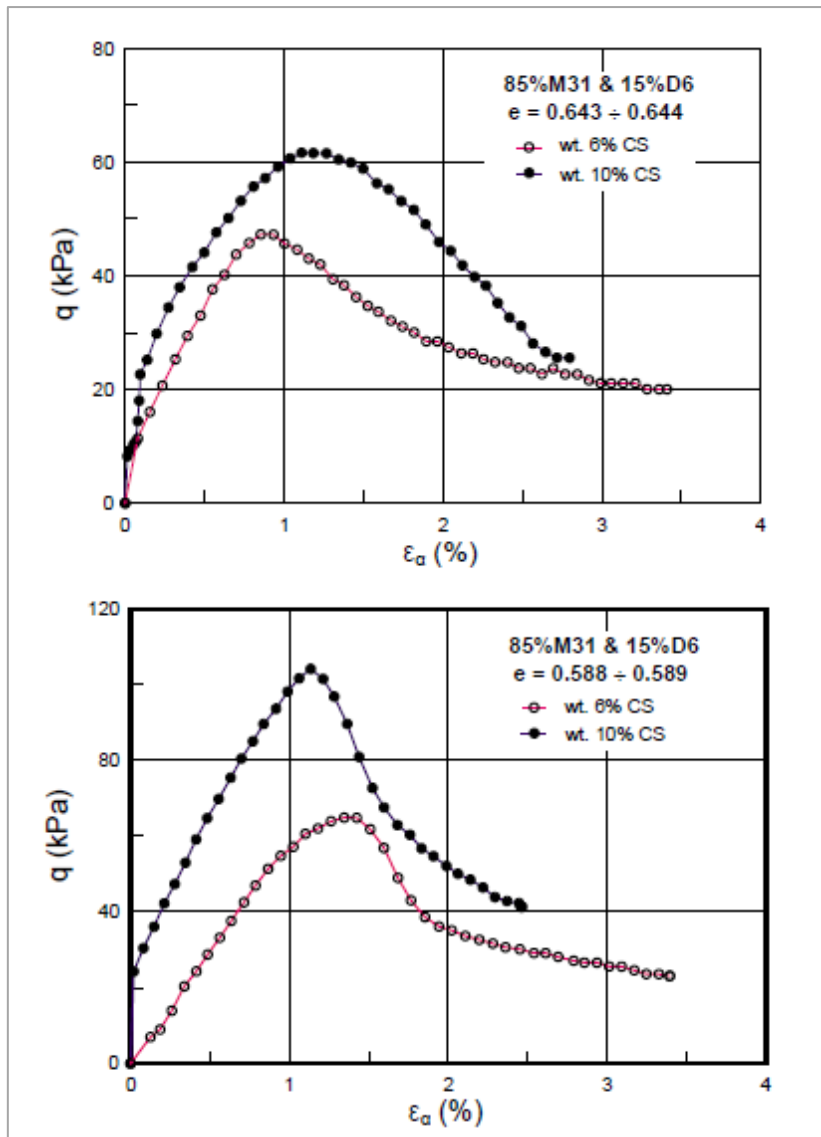
Σχήμα 3.6. Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης(unconfined compression tests) σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31. Το ποσοστό πυριτίας είναι CS=6% και 10%. Η ηλικία των δοκιμών είναι 55 και 50 ώρες, ενώ ο χρόνος γέλης είναι 11 και 10 ώρες, αντίστοιχα. Το σταθεροποιημένο έδαφος αποκτά αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της τάξεως μερικών δεκάδων kPa. Η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και την αύξηση της περιεκτικότητας σε πυριτία. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



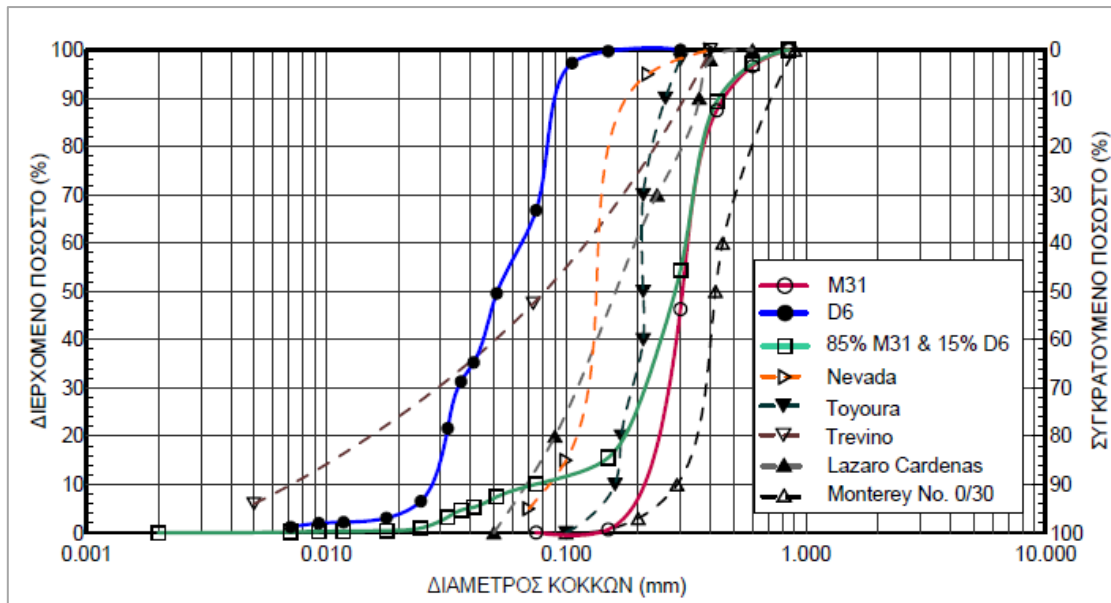
Σχήμα 3.7. Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης(unconfined compression tests) σε σταθεροποιημένα δοκίμια ιλυώδους άμμου M31 – D6. Το ποσοστό πυριτίας είναι CS=6% και 10%. Η ηλικία των δοκιμών είναι 55 και 50 ώρες, ενώ ο χρόνος γέλης είναι 11 και 10 ώρες, αντίστοιχα. Το σταθεροποιημένο έδαφος αποκτά αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της τάξεως μερικών δεκάδων kPa. Η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και την αύξηση της περιεκτικότητας σε πυριτία. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



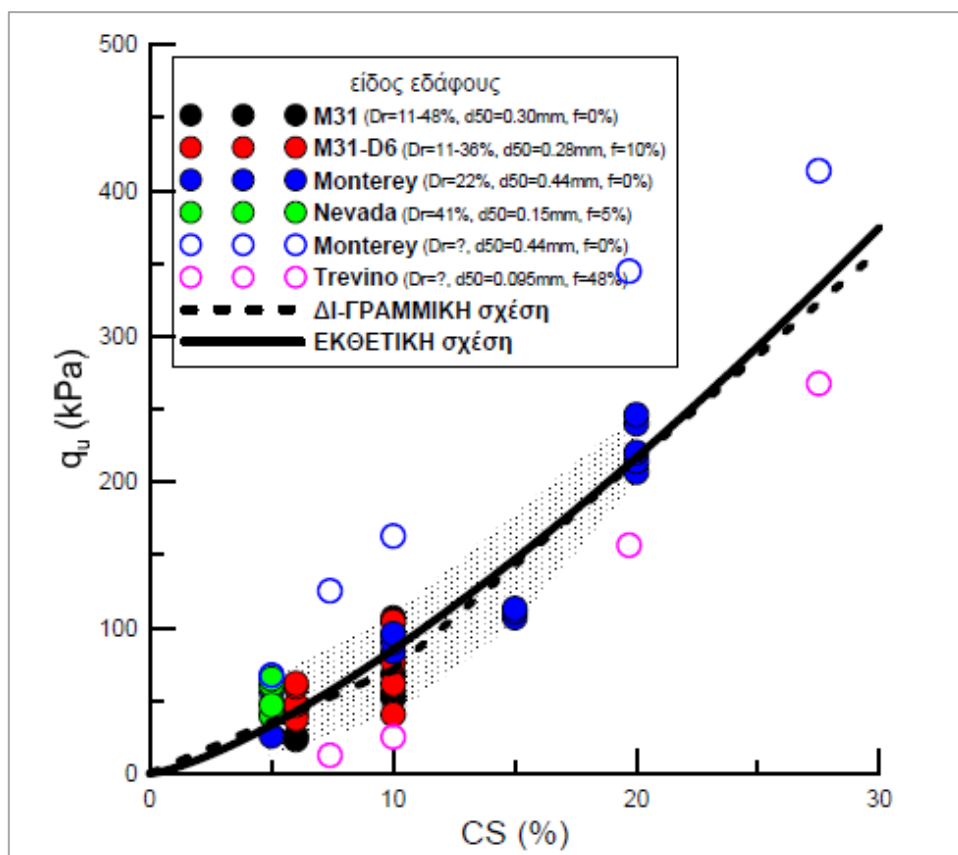
Σχήμα 3.8. Η αύξηση του ποσοστού πυριτίας CS(%) οδηγεί σε αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Η επίδραση του ποσοστού CS(%) είναι αρκετά τονισμένη στη σταθεροποιημένη άμμο M31. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



Σχήμα 3.9. Η αύξηση του ποσοστού πυριτίας CS(%) οδηγεί σε αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Η επίδραση του ποσοστού CS(%) είναι λιγότερο τονισμένη στη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο M31 – D6. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



Σχήμα 3.10. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για τις άμμους που έχουν σταθεροποιηθεί και δοκιμαστεί σε ανεμπόδιστη θλίψη, σε διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).



Σχήμα 3.11. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη σταθεροποιημένων μη συνεκτικών εδαφών σε συνάρτηση με το ποσοστό πυριτίας CS(%). Οι δοκιμές έγιναν σε πρώιμη ηλικία ωρίμανσης. Τα δεδομένα είναι από τους Persoff et al. [7], Gallagher [2], Gallagher και Mitchell [4], Gallagher και Lin [3] και τους συνεργάτες στο ερευνητικό. Σχήμα από το παραδοτέο του ερευνητικού Θαλής – Π.Θ.(MIS 375618).

3.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3:

A) ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- [1] Bardet Jean-Pierre, “Experimental soil mechanics”, Prentice Hall, 1997
- [2] Gallagher P. M. (2000), “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- [3] Gallagher P. M., Lin Y., “Colloidal silica transport through liquefiable porous media”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, 2009; DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000123
- [4] Gallagher P. M., Mitchell J. K. (2002), “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 1017-1026
- [5] Head K. H., “Manual of soil laboratory testing. Volume 1: Soil classification and compaction tests”, CRC Press, 2006(3rd edition)
- [6] Head K. H., “Manual of soil laboratory testing. Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests”, Halsted Press: an imprint of John Wiley and Sons, inc., New York – Toronto, 1994(2nd edition)
- [7] Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J. M., “Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, 1999; 125(6):461–469.
- [8] Wood D. M., “Soil behaviour and Critical State soil mechanics”, Cambridge University Press, 1990

B) ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ

- [9] Παπαχαρίσης Ν., Μάνου – Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος Ι., «Γεωτεχνική Μηχανική: Έρευνα, Γεωτρήσεις, Εργαστήριο», Εκδοτικός οίκος: Αφοί Κυριακίδη, 2010

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η παρούσα τεχνική έκθεση περιγράφει τα αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης, φυσικών και σταθεροποιημένων εδαφών, σε υψηλά επίπεδα τάσεων. Τα φυσικά εδαφικά υλικά που δοκιμάστηκαν είναι η καθαρή άμμος M31 και το μίγμα 85% κ.β. άμμου M31 και 15% κ.β. ιλύος D6(λεπτόκοκκα $f_c=10\%$). Τα εδαφικά υλικά αυτά στη συνέχεια σταθεροποιήθηκαν με το κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου(colloidal silica LUDOX SM-30), (π.χ. Gallagher 2000 [6], Gallagher & Mitchell 2002 [8], Gallagher et al 2007 [7], Spencer et al 2008 [10]) σε ποσοστά σταθεροποιητή CS=6 και 10% κ.β., και αμέσως μετά φορτίστηκαν. Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 50 mm και ύψος 100 mm και παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε νερό ή σε υγρόλυμα εμπλουτισμένο με σταθεροποιητή(Gallagher & Mitchell 2002 [8]). Το υγρόλυμα περιείχε κατάλληλο ποσοστό αλάτων(0.03 N NaCl και 0.18 N NaCl για CS=10 και 6% αντίστοιχα) και το PH του ρυθμίστηκε στην τιμή 6 με χρήση όξινου διαλύματος HCl. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται ο χρόνος σχηματισμού της γέλης και η συνεπαγόμενη αύξηση του ιξώδους. Ο χρόνος γέλης για το υγρόλυμα CS=6% είναι 11 ώρες και για το υγρόλυμα CS=10% είναι 10 ώρες(βλέπετε Ενότητα 2.2.1). Τα σταθεροποιημένα δοκίμια αφέθηκαν να ωριμάσουν σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια, υπό αεροστεγείς συνθήκες. Η ηλικία των σταθεροποιημένων εδαφών κατά τη δοκιμή ήταν 55 ώρες, για ποσοστό σταθεροποιητή CS=6%, ενώ για ποσοστό CS=10% ήταν 50 ώρες. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε υψηλά επίπεδα τάσεων μετά το πέρας της ισότροπης στερεοποίησης $p_i'=1000$, 1500 και 2000 kPa, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των υψηλών τάσεων πάνω στους χημικούς δεσμούς των σταθεροποιημένων εδαφών(Gallagher et al 2007 [7] , Towhata [12]). Συμπληρωματικά, εκτελέστηκαν και δοκιμές σε χαμηλότερη τάση $p_i'=300$ kPa για συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων των συνεργατών. Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμών φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 ήταν στο εύρος $D_r=30-40\%$, ενώ των δοκιμών φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος M31-D6 ήταν $D_r=25-35\%$. Οι δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης εκτελέστηκαν υπό αστράγγιστες συνθήκες με ρυθμό διάτμησης 0.30 mm/min. Χρησιμοποιήθηκε η τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία διαθέτει κυψέλη μέγιστης πίεσης 7 MPa και πλαίσιο μέγιστου αξονικού φορτίου 50 kN(Σχήμα 4.1). Η μέτρηση των αξονικών μετακινήσεων έγινε με εξωτερικό μετρητή αλλά και με εσωτερικούς μετρητές επί του δοκιμίου. Όλα τα μετρητικά όργανα βαθμονομήθηκαν στο εύρος των επιβαλλόμενων φυσικών μεγεθών.

Συμπληρωματικά, εκτός από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες, εκτελέστηκαν και ενδεικτικές μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε καθαρή άμμο, υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, καθώς και μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης καθαρής άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες(στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλίνδρου). Τα αποτελέσματα των τελευταίων παρουσιάζονται μόνο στο παράρτημα.

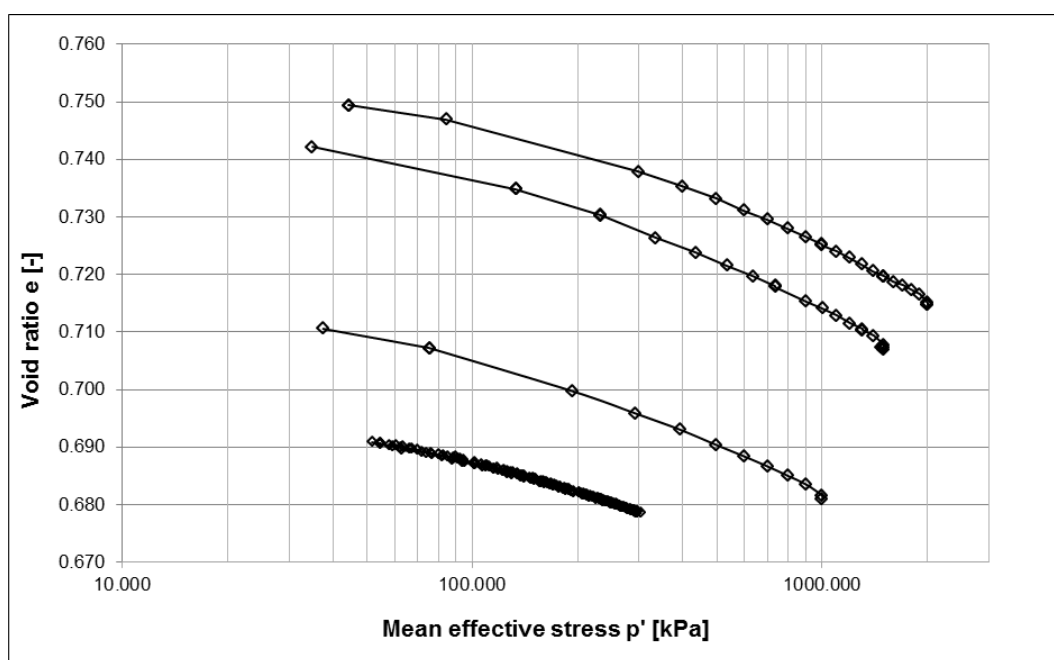
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης που εκτελέστηκαν σε φυσικά και σε σταθεροποιημένα δοκίμια. Αυτές κατηγοριοποιούνται σε πέντε ομάδες. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε φυσική άμμο M31. Στη δεύτερη ανήκουν οι αντίστοιχες δοκιμές που εκτελέστηκαν σε σταθεροποιημένη άμμο M31. Η τρίτη και η τέταρτη ομάδα αφορούν την αστράγγιστη μονοτονική τριαξονική θλίψη φυσικών και σταθεροποιημένων δοκιμών ιλυώδους άμμου M31 – D6. Συμπληρωματικά με τις δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν και

ορισμένες υπό στραγγιζόμενες, σε φυσική άμμο M31. Η σύγκριση της συμπεριφοράς της σταθεροποιημένης άμμου υπό αστράγγιστες συνθήκες, με αυτήν της φυσικής άμμου υπό στραγγιζόμενες, αποκαλύπτει μία πολύ ενδιαφέρουσα ποιοτική αντιστοιχία. Τα Παραρτήματα 4-1 έως 4-4 παρουσιάζουν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών.

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

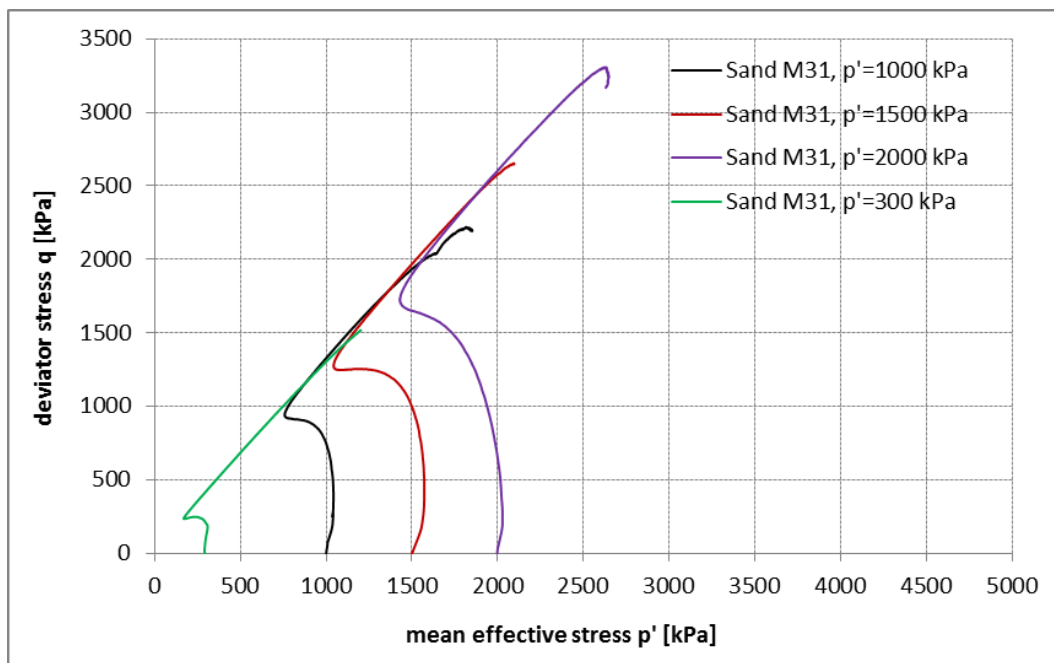
Η πρώτη σειρά πειραμάτων έγινε σε δοκίμια καθαρής άμμου M31 τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ενεργές τάσεις $p'_i=1000, 1500, 2000$ και 300 kPa και στη συνέχεια ακολούθησε περίοδος ηρεμίας 1.5 ώρας. Η περίοδος ηρεμίας επιλέχθηκε τόσο εκτενής, ώστε να είναι συγκρίσιμη με τη χρονική διάρκεια στράγγισης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



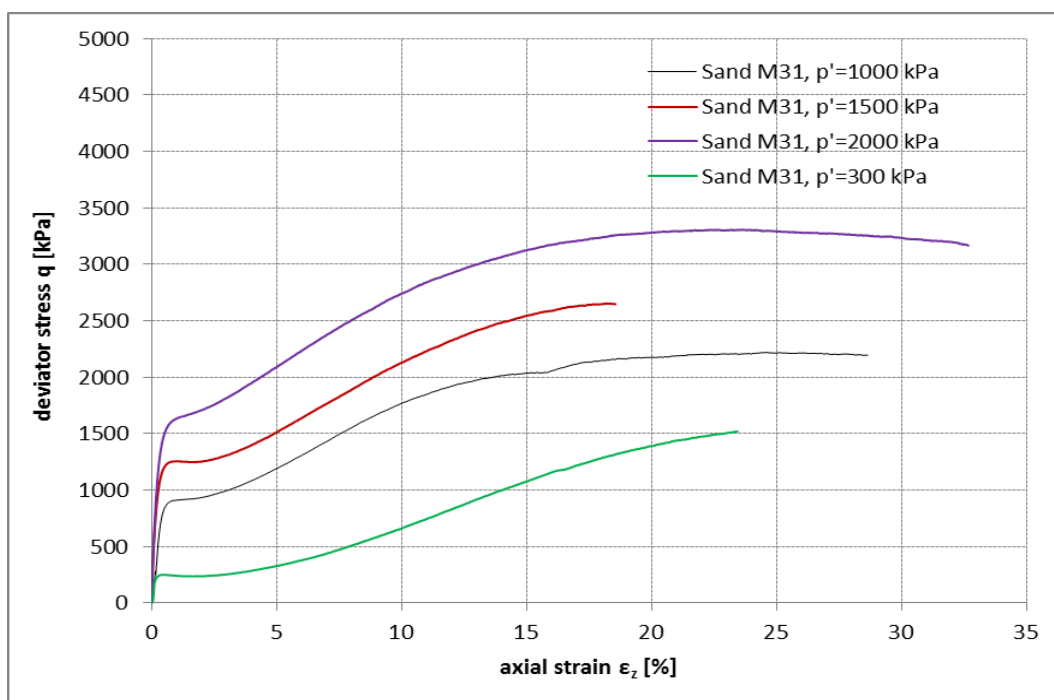
Σχήμα 4.2. Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης άμμου M31

Μετά από την ισότροπη στερεοποίηση η άμμος M31 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$ φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.3. Η συστολική συμπεριφορά της άμμου είναι εντονότερη όσο η αρχική ενεργός τάση αυξάνεται. Σε όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων η άμμος εμφανίζει αλλαγή φάσης και στη συνέχεια τάση για διαστολή κατά μήκος μιας κοινής περιβάλλουσας αστοχίας. Η γωνία αλλαγής φάσης βρέθηκε $\varphi'_{PTL} = 31^\circ$ ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi' = 33^\circ$. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων $q - \varepsilon_z$. Στις υψηλές ενεργές τάσεις περίσφιγξης ($1000, 1500$ και 2000 kPa) η άμμος φαίνεται να εγκαταλείπει τη διαστολική συμπεριφορά για αξονικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 20% και να σταθεροποιεί την αποκλίνουσα τάση q . Αντίθετα, για ενεργό τάση 300 kPa η άμμος παραμένει εντόνως διαστολική και στις υψηλές αξονικές παραμορφώσεις. Οι υπερπίεσεις του ύδατος των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5. Παρατηρείται ότι η αλλαγή φάσης εμφανίζεται περίπου σε αξονική παραμόρφωση $2-3\%$ για όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων εγκιβωτισμού, ενώ η διαστολική συμπεριφορά της άμμου διακόπτεται στην περίπτωση των υψηλών

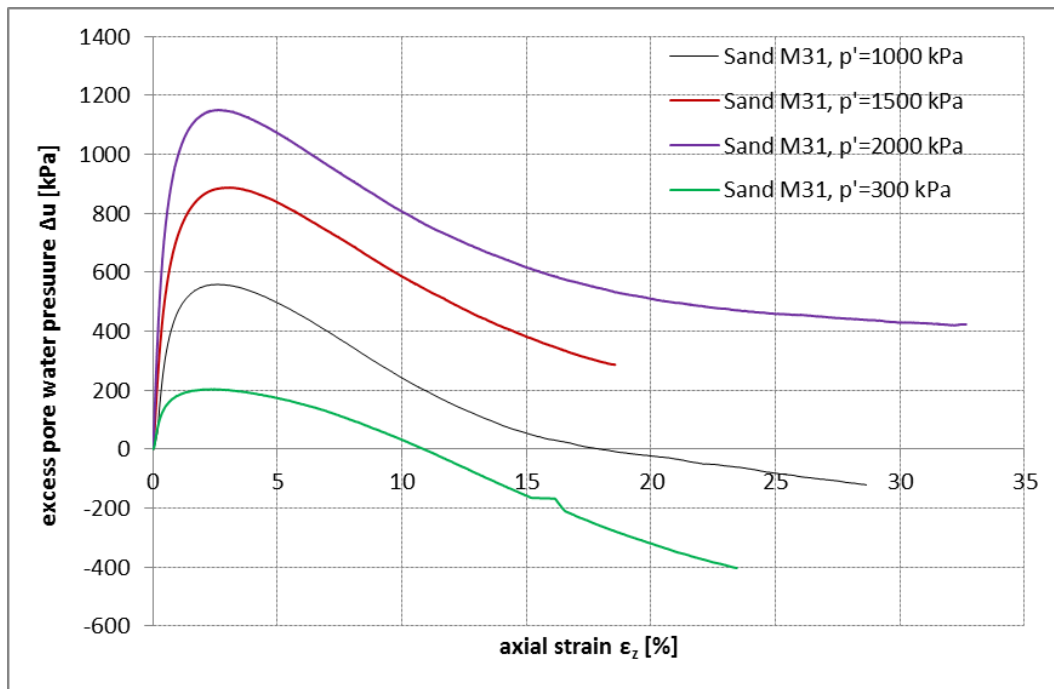
τάσεων, καθώς οι καμπύλες υπερπίεσης τείνουν να οριζοντιωθούν. Αντίθετα, στην περίπτωση χαμηλής τάσης η καμπύλη υπερπίεσης δείχνει έναν φθίνοντα κλάδο που συνεχίζει και στα υψηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Παρατηρούμε ότι, σε καμία περίπτωση δεν προέκυψε εμφανής συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων σε επίπεδο. Η αστοχία εκδηλώθηκε με την πλευρική διόγκωση (bulging) που προσδίδει στο δοκίμιο μορφή βαρελιού. Ο οπτικός έλεγχος των δοκιμών έγινε μετά το πέρας των δοκιμών, αφού η κυψέλη έχει αδιαφανές περίβλημα.



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



Σχήμα 4.4. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων άμμου M31



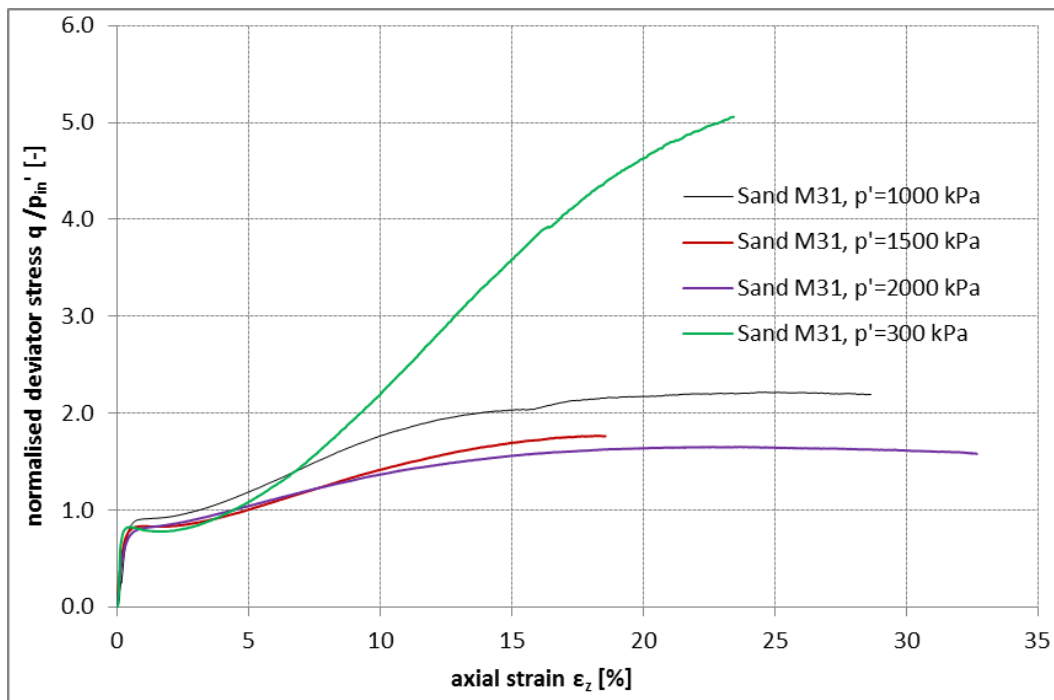
Σχήμα 4.5. Διάγραμμα υπερπίεσης ύδατος πόρων - αξονικών παραμορφώσεων άμμου M31

Για να εξεταστεί η επίδραση του παράγοντα της αρχικής ενεργού τάσης, τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων και υπερπίεσεων ύδατος πόρων – παραμορφώσεων κανονικοποιήθηκαν ως προς την αρχική ενεργό τάση και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.6 και 4.7, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, στις υψηλές ενεργές τάσεις 1500 και 2000 kPa οι κανονικοποιημένες καμπύλες $q/p'_i - \epsilon_z$ ταυτίζονται, ενώ η καμπύλη των 1000 kPa υπερέχει ελαφρώς, γεγονός που ίσως οφείλεται στην πυκνότερη δομή της άμμου. Αναφέρουμε ότι, το δοκίμιο που εξετάστηκε σε αρχική ενεργό τάση 1000 kPa είχε σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$, ενώ τα δοκίμια των ενεργών τάσεων 1500 και 2000 kPa είχαν σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$. Η κανονικοποιημένη καμπύλη της ενεργού τάσης 300 kPa διαχωρίζεται από τις υπόλοιπες για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%, καθώς το δοκίμιο αυτό ήταν εντόνως διαστολικό μέχρι τα υψηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Η κανονικοποιημένη τιμή q/p'_i για αξονική παραμόρφωση 5% κυμαίνεται από 1.0 έως 1.1 για όλα τα επίπεδα τάσεων. Όσον αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες $\Delta u/p'_i - \epsilon_z$, δείχνουν σύγκλιση για τις ενεργές τάσεις 1500 και 2000 kPa, η καμπύλη των 1000 kPa αποκλίνει ελαφρώς προς εντονότερη διαστολή λόγω υψηλότερης πυκνότητας, ενώ η καμπύλη των 300 kPa διαχωρίζεται αισθητά λόγω της έντονης διαστολικότητας, η οποία εκδηλώνεται στις χαμηλότερες τάσεις περίσφιγξης.

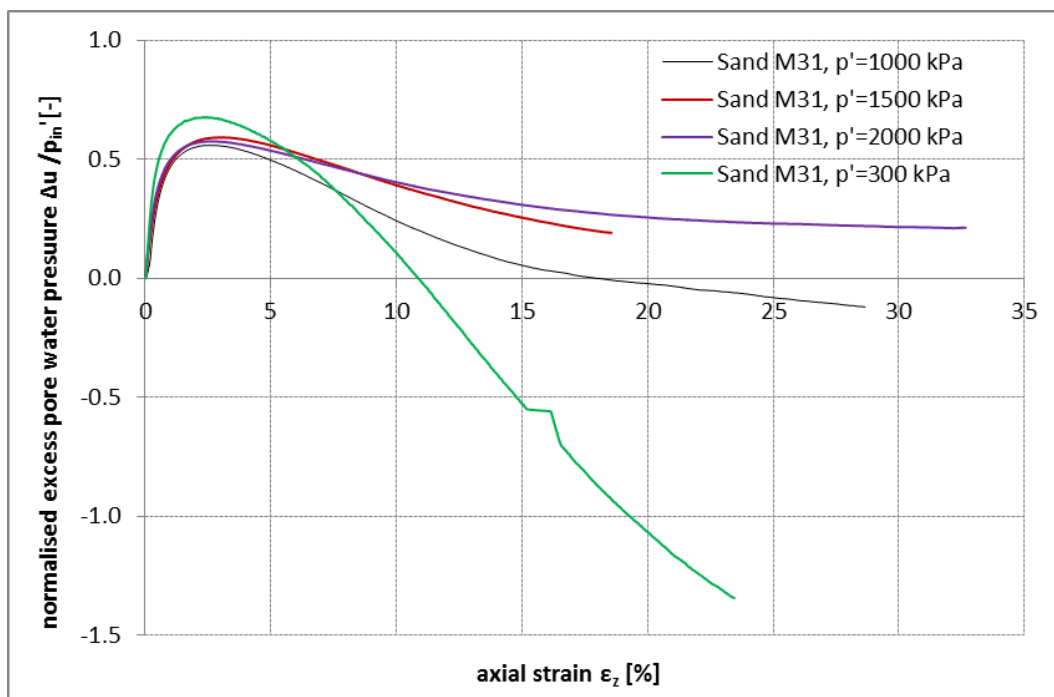
4.2.2 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σταθεροποιημένη άμμο M31

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων έγινε σε δοκίμια άμμου M31 σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία (colloidal silica) σε ποσοστά 6 και 10% κ.β., ηλικίας 55 και 50 ωρών, αντίστοιχα. Τα δοκίμια μετά το πέρας της ωρίμανσης αποσπίαστηκαν από τα καλούπια και τοποθετήθηκαν στην τριαξονική συσκευή. Ακολούθησε η ισότροπη στερεοποίηση τους η οποία έγινε με μέτρηση της πίεσης πόρων (με χρήση εξωτερικού μετρητή στη γραμμή αμέσως μετά τη βάση του δοκιμίου), αλλά χωρίς μέτρηση της μεταβολής όγκου, καθώς υπήρχε ο κίνδυνος εκτεταμένης κυκλοφορίας του κολλοειδούς ρευστού στις σωληνώσεις της συσκευής (απομακρυσμένος ο μετρητής μεταβολής όγκου). Τα δοκίμια κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης αφήθηκαν να στραγγίζουν, μέσω δεύτερης σωλήνωσης στη βάση του δοκιμίου, σε δεξαμενή πληρωμένη με νερό η οποία επέβαλε υδροστατική πίεση

περίπου 10 kPa. Μετά την αύξηση της πίεσης της κυψέλης στα επίπεδα τάσεων 1000, 1500, 2000 και 300 kPa ακολούθησε περίοδος στράγγισης τουλάχιστον 1.5 ώρας.



Σχήμα 4.6. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων – παραμορφώσεων άμμου M31



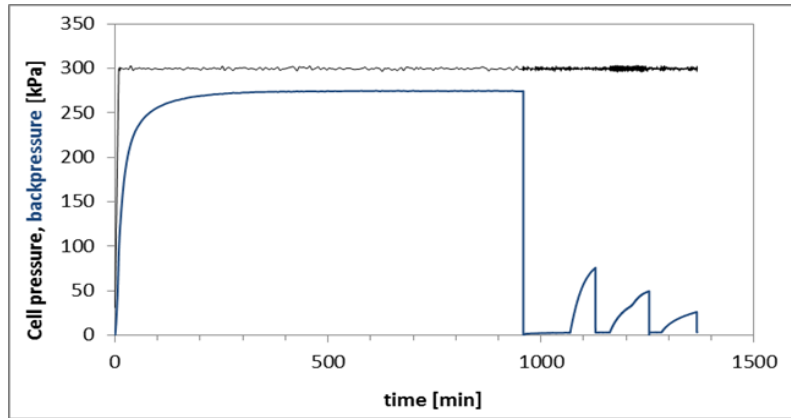
Σχήμα 4.7. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπιέσεων ύδατος πόρων - παραμορφώσεων άμμου M31

Η στράγγιση του νερού μέσα από τους πόρους της πυριτίας είναι αργή διαδικασία και για να εξακριβωθεί αν έχει ολοκληρωθεί, εκτελέστηκε ο εξής έλεγχος. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα διακόπτεται η στράγγιση με κλείσιμο της βάνας εκροής. Το νερό μέσα στους πόρους της πυριτίας βρίσκεται υπό πίεση και τείνει να εκτονωθεί προς το νερό που πληρώνει τις σωληνώσεις μέχρι τον

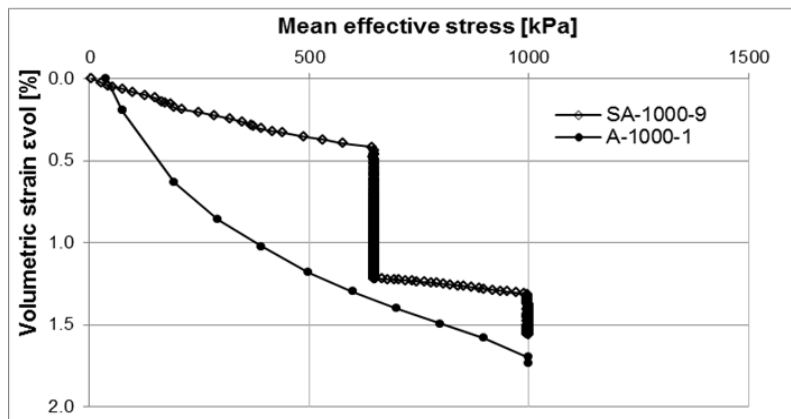
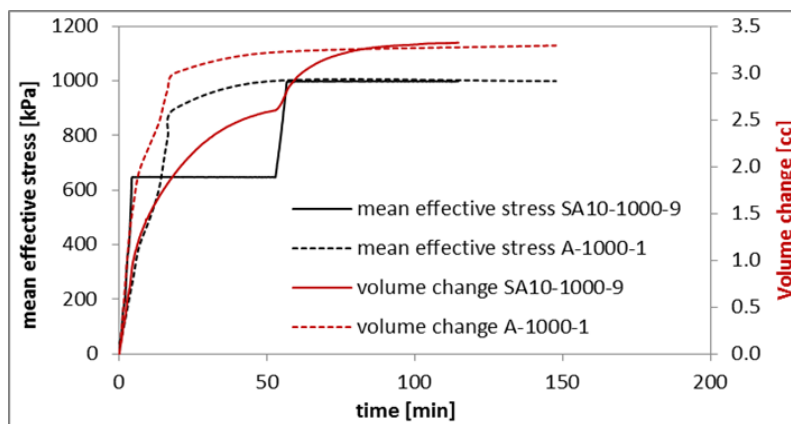
μετρητή πίεσης. Η εκτόνωση δεν γίνεται ακαριαία διότι η υγρή φάση της γέλης αλληλεπιδρά με τη στερεή. Η πίεση που μετράται εκτός δοκιμίου αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό μέχρι να σταθεροποιηθεί σε ένα πλατό, που εκφράζει την πίεση ισορροπίας των δύο συγκοινωνούντων δοχείων. Η πίεση ισορροπίας έχει επέλθει ύστερα από μεταφορά μικροποσότητας υγρής μάζας από το ένα δοχείο(πορώδες σταθεροποιημένου δοκιμίου) στο άλλο(νερό σωληνώσεων μέχρι τον μετρητή). Ανοίγοντας τη βάνα εκροής μία ποσότητα πεπιεσμένου νερού εκρέει από τους πόρους της γέλης και του εδάφους και το φορτίο του μεταβιβάζεται στη στερεή φάση. Κάθε επόμενη φορά που κλείνει η βάνα εκροής η τιμή του ρυθμού ανάπτυξης της πίεσης και του πλατό ισορροπίας είναι μικρότερη, υποδηλώνοντας ότι μεγαλύτερος όγκος νερού έχει απομακρυνθεί από τους πόρους της γέλης και η παγιδευμένη πίεση έχει μερικώς εκτονωθεί. Όταν η τιμές των δύο αυτών μεγεθών γίνουν αρκετά μικρές θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου δοκιμίου.

Η παραπάνω διαδικασία ελέγχου του βαθμού ολοκλήρωσης της στερεοποίησης, μέσω παρεμπόδισης της στράγγισης και παρακολούθησης της ανάπτυξης της πίεσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8. Το σχήμα παρουσιάζει τη διαδικασία αυτή σε ένα κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης. Στερεοποίηση του δοκιμίου εξελίσσεται όταν η αντί - πίεση (backpressure, μπλε γραμμή) είναι σταθερή και ίση με την υδροστατική πίεση που επιβάλλει η δεξαμενή εκτόνωσης, δηλαδή όταν υπάρχει ελεύθερη στράγγιση προς τη δεξαμενή. Όσο προοδεύει η στερεοποίηση τόσο ο ρυθμός ανάπτυξης πίεσης και η πίεση ισορροπίας παίρνουν μικρότερη τιμή, σε επόμενο στάδιο παρεμπόδισης της στράγγισης. Παρατηρούμε ότι, αν η στράγγιση αποτραπεί εξ αρχής και αναπτυχθεί σε βάθος χρόνου το πλήρες πλατό πίεσης για ένα βήμα αύξησης της πίεσης κυψέλης, τότε είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η παράμετρος B που φανερώνει τον κορεσμό του δοκιμίου και των σωληνώσεων. Ο βαθμός κορεσμού που μετρήθηκε ήταν της τάξης $B \geq 0.95$ (βλέπετε Σχήμα 2.52).

Σε ένα ενδεικτικό πείραμα στην τριαξονική συσκευή(SA-1000-9) η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου δοκιμίου πραγματοποιήθηκε με καταγραφή του όγκου νερού που εξέρρευσε. Το Σχήμα 4.9 παρουσιάζει τη στερεοποίηση στη τριαξονική συσκευή ενός δοκιμίου καθαρής άμμου σε ενεργό τάση 1000 kPa, με τελική σχετική πυκνότητα $D_r=39.7\%$ (πείραμα A-1000-1), σε σύγκριση με τη στερεοποίηση ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου σε ενεργό τάση 1000 kPa, με τελική σχετική πυκνότητα $D_r=32.1\%$ (πείραμα SA-1000-9). Το σταθεροποιημένο δοκίμιο αφέθηκε να ωριμάσει για 815 ώρες, ώστε να έχει σχηματιστεί στους εδαφικούς πόρους γέλη με πυκνό στερεό σκελετό και να μην υπάρχει αμφιβολία για τη δυσρευστότητα του υγρολύματος. Η καθαρή, φυσική άμμος αποβάλλει ταχύτατα το νερό από τους πόρους της, όταν αυξάνεται η πίεση περίσφιγξης. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος στραγγίζει πολύ αργά, αλλά μακροπρόθεσμα καταλήγει σε ογκομετρικές παραμορφώσεις αντίστοιχες της φυσικής άμμου. Η εκροή νερού μέσα από το σταθεροποιημένο δοκίμιο σημαίνει ότι η γέλη, ως διφασικό υλικό, αποβάλλει το νερό μέσα από τους πόρους της, με ταυτόχρονη συστολή της στερεάς φάσης(αλυσίδες σωματιδίων πυριτίας). Αυτή η συστολή του στερεού σκελετού της γέλης πιθανότατα να καταστρέφει έναν αριθμό από τους δεσμούς σιλοξάνης μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων πυριτίας και να οδηγεί σε θραύση μερικών αλυσίδων της σκελετικής δομής. Ταυτόχρονα, δημιουργούνται νέοι δεσμοί σιλοξάνης και νέες αλυσίδες στον στερεό σκελετό της γέλης, καθώς συγκλίνουν σωματίδια με μεγάλο πλήθος ενεργών ομάδων σιλανόλης στην επιφάνειά τους. Η γέλη κολλοειδούς πυριτίας παρουσιάζει αυτό - ίαση λόγω της πλούσιας σε ομάδες σιλανόλης επιφάνειας των μικροσκοπικών σωματιδίων(βλέπετε Ενότητα 2.2.5.1, Bergna and Roberts [2] p.22, p.26, Brinker and Scherer [3] p.408).



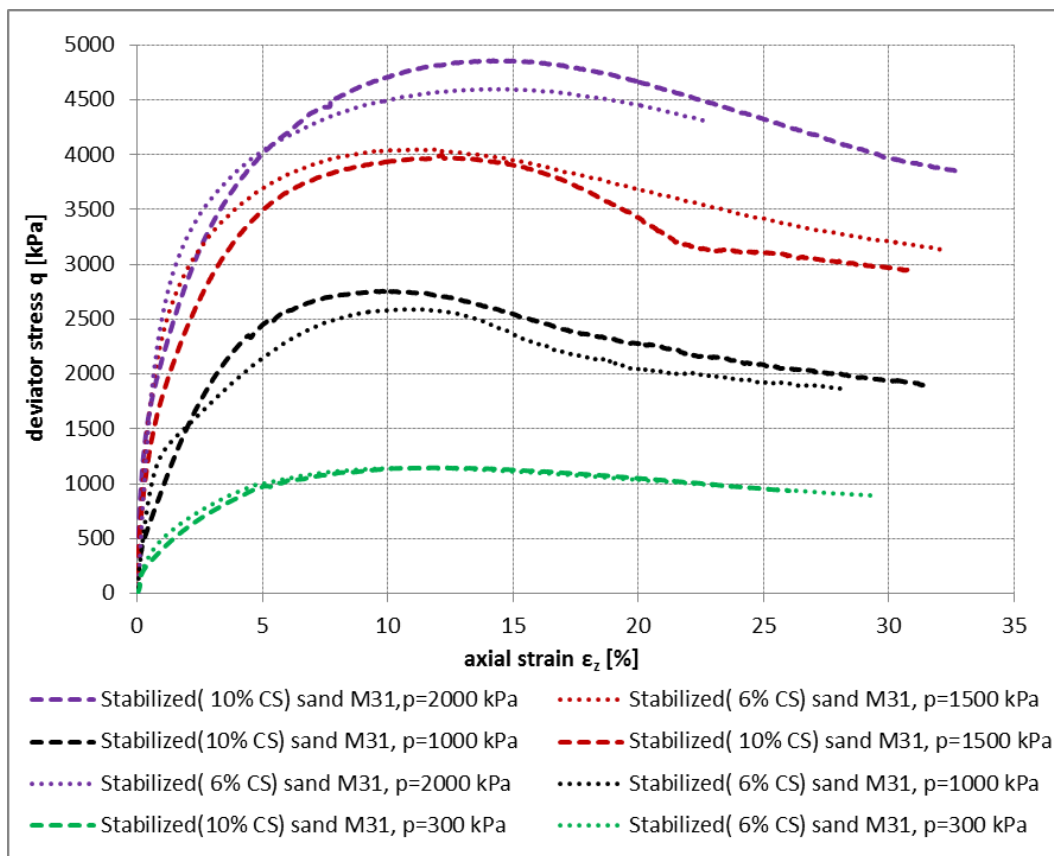
Σχήμα 4.8. Ανάπτυξη της πίεσης ισορροπίας όταν παρεμποδίζεται η στράγγιση και στερεοποίηση σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου όταν επιτρέπεται η στράγγιση



Σχήμα 4.9. Η στερεοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου κατά τις δοκιμές SA10-1000-9 και A-1000-1

Μετά το πέρας της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου M31 υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων $\sigma - \varepsilon_z$ για τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου. Οι καμπύλες είναι ομοιόθετες υποδηλώνοντας σαφή και έντονη εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους από το επίπεδο της τάσης εγκιβωτισμού. Σε όλα τα επίπεδα τάσης και για τα δύο ποσοστά σταθεροποιητή, η αποκλίνουσα τάση μεγιστοποιείται και παραμένει σταθερή στο εύρος των αξονικών παραμορφώσεων 8-12% και στη συνέχεια ακολουθεί μία ομαλή μείωση προς μία παραμένουσα τιμή. Επισημαίνουμε ότι, στα περισσότερα σταθεροποιημένα δοκίμια προέκυψε

συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων σε επίπεδο(shear band). Η συγκέντρωση του σταθεροποιητή δεν φαίνεται να μεταβάλλει έντονα τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών.



Σχήμα 4.10. Διάγραμμα τάσεων -παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου M31(CS=6 & 10%)

Οι υπερπίεσεις του υγρού των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.11. Παρατηρούμε ότι, η σταθεροποιημένη άμμος M31 παρουσιάζει πρώτα συστολική και ύστερα διαστολική συμπεριφορά και υπάρχει μεγάλη διακύμανση στην τιμή της αξονικής παραμόρφωσης που οριοθετεί την έναρξη της διαστολής(2-5%). Σε κάθε περίπτωση οι υπερπίεσεις ύδατος πόρων που αναπτύσσονται στα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου είναι πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται στα δοκίμια φυσικής άμμου. Οι πιθανοί λόγοι πίσω από αυτήν τη συμπεριφορά είναι οι εξής. Πρώτον, η κορεσμένη γέλη κολλοειδούς πυριτίας είναι συμπιεστή ως υλικό, επομένως κατά τη διάτμηση του σταθεροποιημένου εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες μειώνει τον όγκο της και αναπτύσσει μικρότερη πίεση, σε σχέση με το φυσικό έδαφος που έχει νερό στους πόρους του(Towhata [12]). Δεδομένου ότι, η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από τον πρακτικά ασυμπίεστο στερεό σκελετό σωματιδίων πυριτίας και από το, επίσης, πρακτικά ασυμπίεστο νερό που συγκρατείται στους πόρους της, το σύνολο είναι πρακτικά ασυμπίεστο υπό αστράγγιστες συνθήκες. Κάθε σημαντική μεταβολή όγκου της γέλης συνοδεύεται από εκροή ή εισροή νερού μέσα στους πόρους της(βλέπετε Ενότητα 2.2, Brinker and Scherer [3] p.387, Baek and Pence [1]). Αν η κορεσμένη γέλη ήταν όντως συμπιεστή(υπό αστράγγιστες συνθήκες), τότε η καμπύλη αντί - πίεσης του Σχήματος 4.8 θα είχε πολύ χαμηλότερη τιμή στο πλατό(χαμηλή τιμή B). Δεύτερος πιθανός λόγος που εξηγεί την ανάπτυξη μικρότερης πίεσης στο νερό των πόρων του σταθεροποιημένου εδάφους είναι η περίπτωση να υφίσταται κακός κορεσμός στο δοκίμιο ή/και στις σωληνώσεις. Η υψηλή τιμή της παραμέτρου B υποδηλώνει καλό κορεσμό. Η εξήγηση που απομένει είναι ότι η πίεση μέσα στους πόρους της

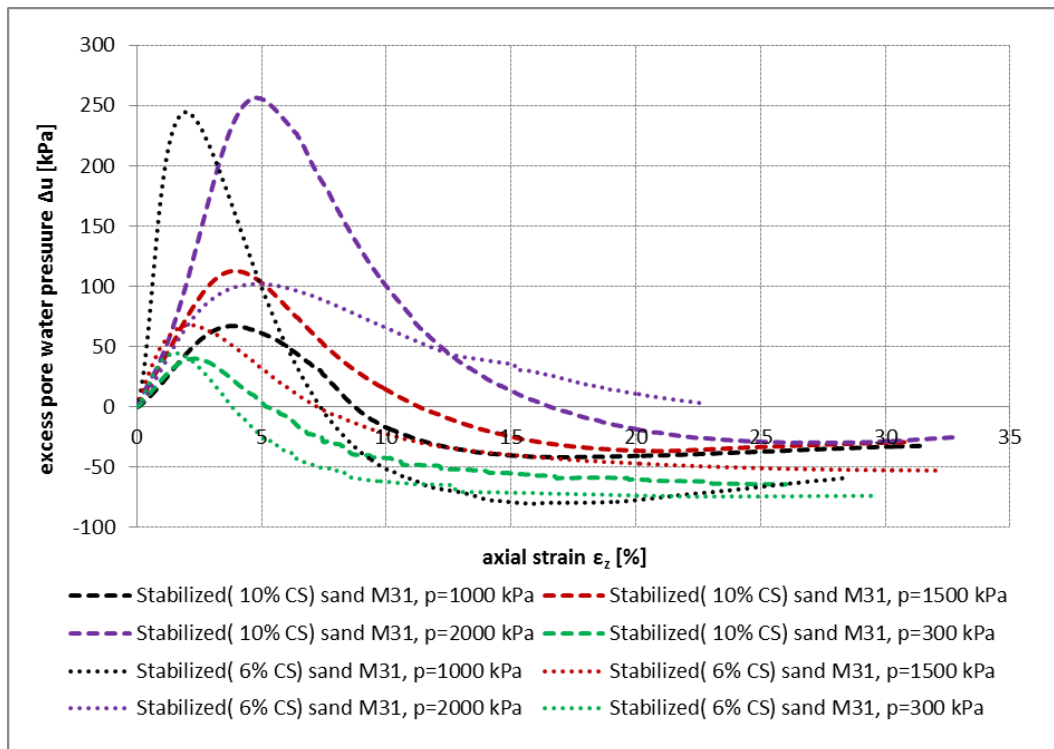
γέλης είναι υψηλή αλλά δεν εκδηλώνεται στον μετρητή πίεσης, επειδή ο ρυθμός διάτμησης είναι γρήγορος(για να προστατευτεί η συσκευή από την κυκλοφορία της κολλοειδούς ουσίας). Το στερεό σκελετικό δίκτυο της πυριτίας είναι σχετικά άθικτο στην αρχή της διάτμησης και καλύπτει τους πόρους του εδάφους δυσκολεύοντας την κίνηση του νερού. Το φαινόμενο είναι ίδιο με αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8 και περιγράφηκε παραπάνω. Όταν η αντί - πίεση που καταγράφεται στο σταθεροποιημένο δοκίμιο είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη στο φυσικό, αυτό υποδηλώνει ότι το στερεό σκελετικό δίκτυο της πυριτίας είναι υγιές και καλύπτει σχεδόν ομοιόμορφα όλον τον χώρο στους πόρους μεταξύ των κόκκων. Αντίθετα, όταν είναι συγκρίσιμη με την πίεση πόρων του φυσικού δοκιμίου, αυτό σημαίνει ότι το στερεό σκελετικό δίκτυο της γέλης έχει τραυματιστεί εκτεταμένα ή δεν αναπτύσσεται σε όλο το εδαφικό πορώδες. Για παράδειγμα, η λεπτόκοκκη ιλύς είναι πιθανόν να συγκεντρώνει γύρω της με κάποιον μηχανισμό πυρηνοποίησης πολλά σωματίδια πυριτίας που συνδέονται σε αλυσίδες κατά τον σχηματισμό της γέλης, αφήνοντας τον υπόλοιπο εδαφικό πόρο με αραιό δίκτυο πυριτικών ινών(βλέπετε Ενότητα 2.2.5.2). Αρκετά δοκίμια σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου επέδειξαν συμπεριφορά παρόμοια με αυτήν της φυσικής ιλυώδους άμμου, ίσως λόγω της επιλεκτικής συγκέντρωσης των σωματιδίων πυριτίας γύρω από το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό(δοκιμές SB10-1000-1, SB10-1000-4, SB10-1000-5, SB10-1000-6). Είναι πολύ πιθανό η αύξηση της αντοχής του σταθεροποιημένου εδάφους να οφείλεται στην αλληλεπίδραση της στερεάς φάσης της πυριτίας με τη στερεά εδαφική φάση και όχι στις μειωμένες πιέσεις στο νερό των πόρων της γέλης. Η γέλη αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό κατά μάζα και κατ' όγκο από νερό και δεν υφίσταται κάποια λογική αιτία ώστε να μην αναπτύσσει(μεγάλη) πίεση στους πόρους της.

Στα Σχήματα 4.12 και 4.13 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ολική τάση εγκιβωτισμού καμπύλες $q/p_i - \epsilon_z$ για τα σταθεροποιημένα δοκίμια M31(6%CS) και M31(10%CS) αντίστοιχα. Στις υψηλές τάσεις 1000, 1500 και 2000 kPa οι κανονικοποιημένες καμπύλες $q/p_i' - \epsilon_z$ συγκλίνουν ικανοποιητικά σε μία δέσμη, ενώ για την τάση των 300 kPa η καμπύλη υπερέχει αισθητά. Αυτό οφείλεται στην περισσότερο διαστολική συμπεριφορά λόγω χαμηλότερης περίσφιγξης και ίσως να οφείλεται επίσης στον τραυματισμό των δεσμών του σταθεροποιητή στις υψηλές τάσεις στερεοποίησης. Παρατηρούμε επίσης, ότι σε πολύ υψηλές παραμορφώσεις(>20%) οι κανονικοποιημένες καμπύλες της σταθεροποιημένης άμμου(στα επίπεδα υψηλών τάσεων) τείνουν στην τιμή 2.0, ενώ της φυσικής άμμου στην τιμή 1.8. Μπορούμε να αποφανθούμε ότι, καθώς οι δεσμοί του σταθεροποιητή καταστρέφονται με την προοδευτική αύξηση των παραμορφώσεων, η παραμένουσα αντοχή των σταθεροποιημένων εδαφών είναι ελαφρώς βελτιωμένη αλλά προσεγγίζει την αντοχή των φυσικών εδαφών. Επιπλέον, επειδή τα σταθεροποιημένα δοκίμια στα περισσότερα πειράματα είχαν χαμηλή αρχική πίεση στο νερό των πόρων, εμφάνισαν μικρότερες αναρροφητικές πιέσεις σε σύγκριση με τα φυσικά δοκίμια, κατά τη φάση της διαστολής.

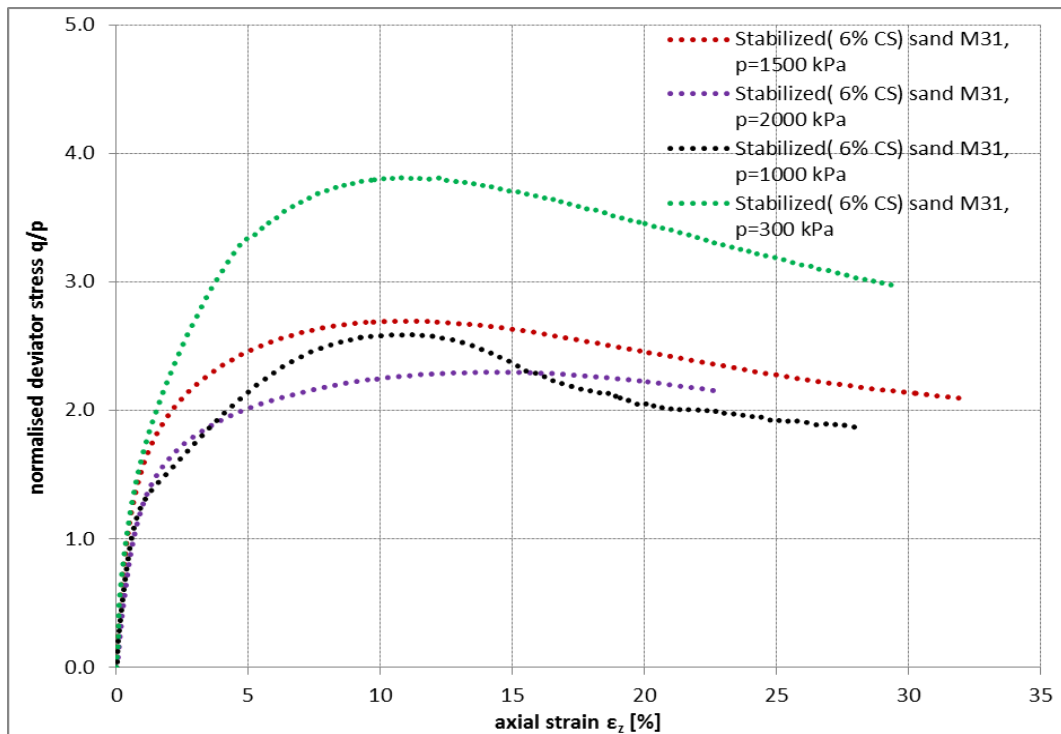
Συγκρίνοντας τα κανονικοποιημένα διαγράμματα της αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο M31, προκύπτει ότι η σταθεροποιημένη άμμος υπερέχει αισθητά δίνοντας στις ίδιες παραμορφώσεις μεγαλύτερες τάσεις. Για παράδειγμα σε παραμόρφωση 5% η κανονικοποιημένη τιμή q/p_i' της φυσικής άμμου κυμαίνεται από 1.0 έως 1.1, ενώ της σταθεροποιημένης άμμου από 2.0 έως 3.3. Το Σχήμα 4.14 παρουσιάζει αυτήν τη βελτίωση μέσω της διπλής κανονικοποίησης $(q/p_i)_{\text{stabil}} / (q/p_i')_{\text{natur}}$ των ήδη κανονικοποιημένων αποκλινουσών τάσεων για τη σταθεροποιημένη και τη φυσική άμμο M31, στα δύο ακραία επίπεδα τάσεων(300 και 2000 kPa). Αξίζει να σημειωθεί ότι στη χαμηλή τάση εγκιβωτισμού η επίδραση του σταθεροποιητή φαίνεται να είναι περισσότερο τονισμένη, δίνοντας υψηλότερη τιμή(περίπου 3.0 αντί 1.9 σε παραμόρφωση 5%) στον αδιάστατο παράγοντα βελτίωσης. Αυτό ίσως υποδεικνύει μία εξασθένιση των δεσμών του σταθεροποιητή στις υψηλές τάσεις. Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες υπερπιέσεις του ρευστού πόρων σε

συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Οι κανονικοποιημένες τιμές σε παραμόρφωση 5% είναι από 0.6 έως 0.7 για τα φυσικά εδάφη, ενώ για τα σταθεροποιημένα είναι από -0.10 έως 0.10.

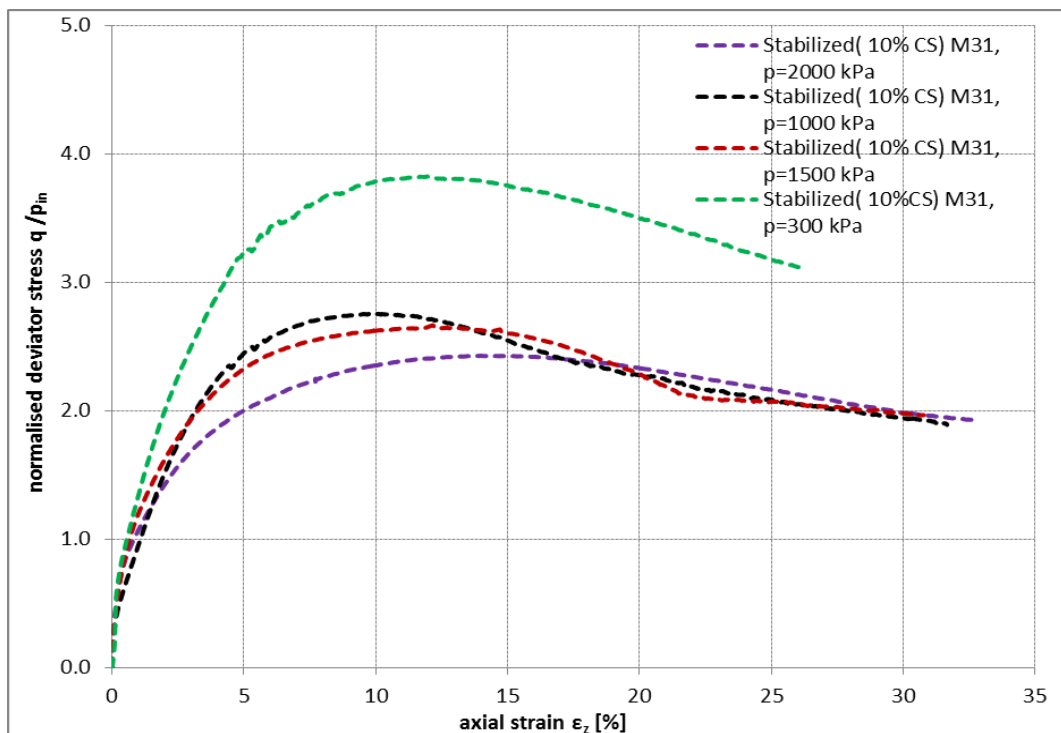
Οι περιβάλλουσες αστοχίας Mohr - Coulomb για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη (10% CS) άμμο M3 απεικονίζονται στα Σχήματα 4.16 και 4.17. Το σταθεροποιημένο έδαφος συνεχίζει να υπακούει σε νόμο τριβής και εμφανίζει αυξημένη, σε σχέση με το φυσικό έδαφος ίδιας σχετικής πυκνότητας, γωνία διατμητικής αντοχής, η οποία μειώνεται με την αύξηση της τάσης εγκιβωτισμού ($\phi'=40^\circ, 36^\circ, 35^\circ, 34^\circ$ για τάση 300, 1000, 1500 και 2000 kPa αντίστοιχα). Η μείωση αυτή πιθανόν να οφείλεται στην εξασθένηση των δεσμών του σταθεροποιητή στις υψηλές τάσεις.



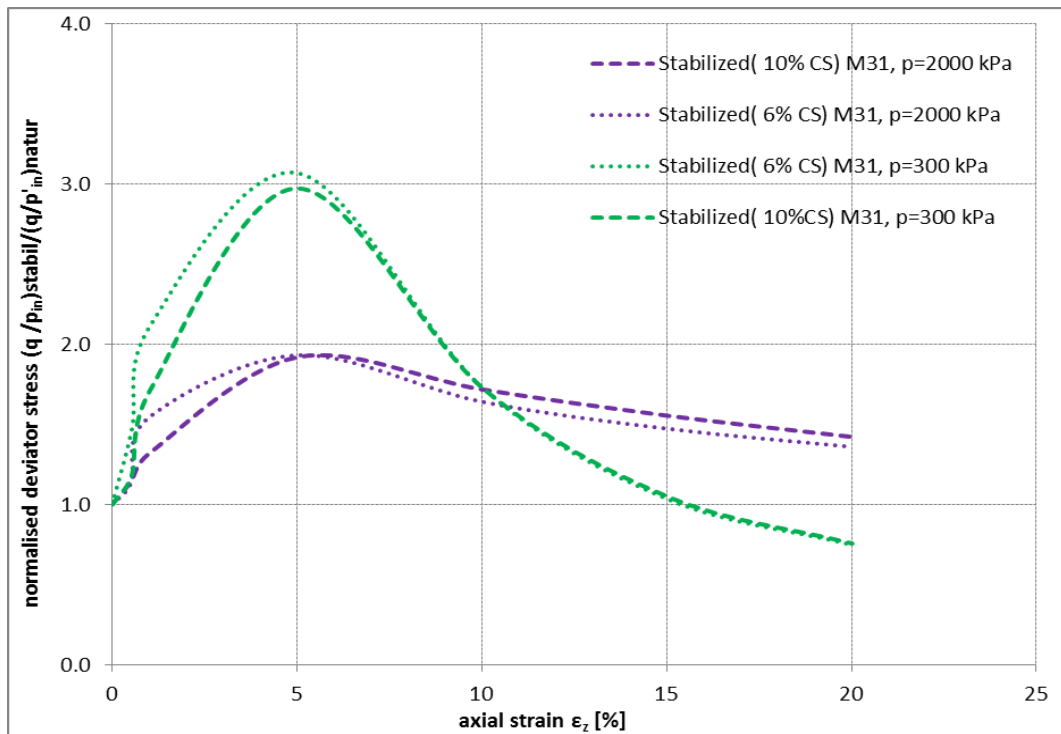
Σχήμα 4.11. Διάγραμμα υπερπίεσης υγρού πόρων - αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου M31, για ποσοστά CS=6 & 10%



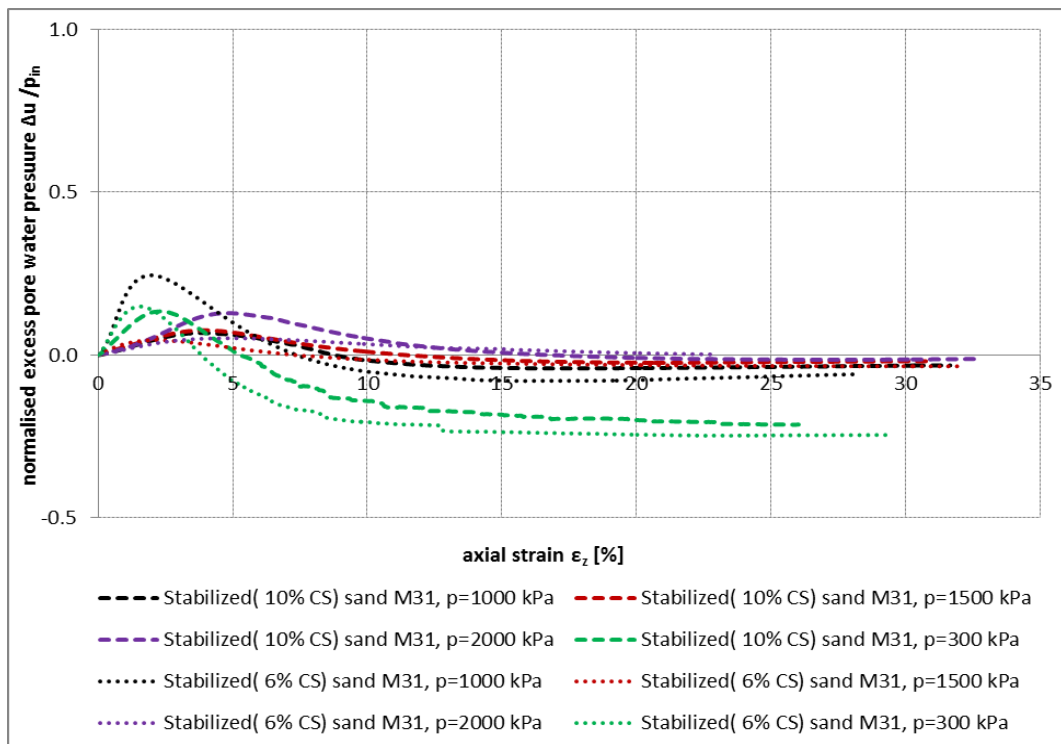
Σχήματα 4.12. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου M31(6%CS)



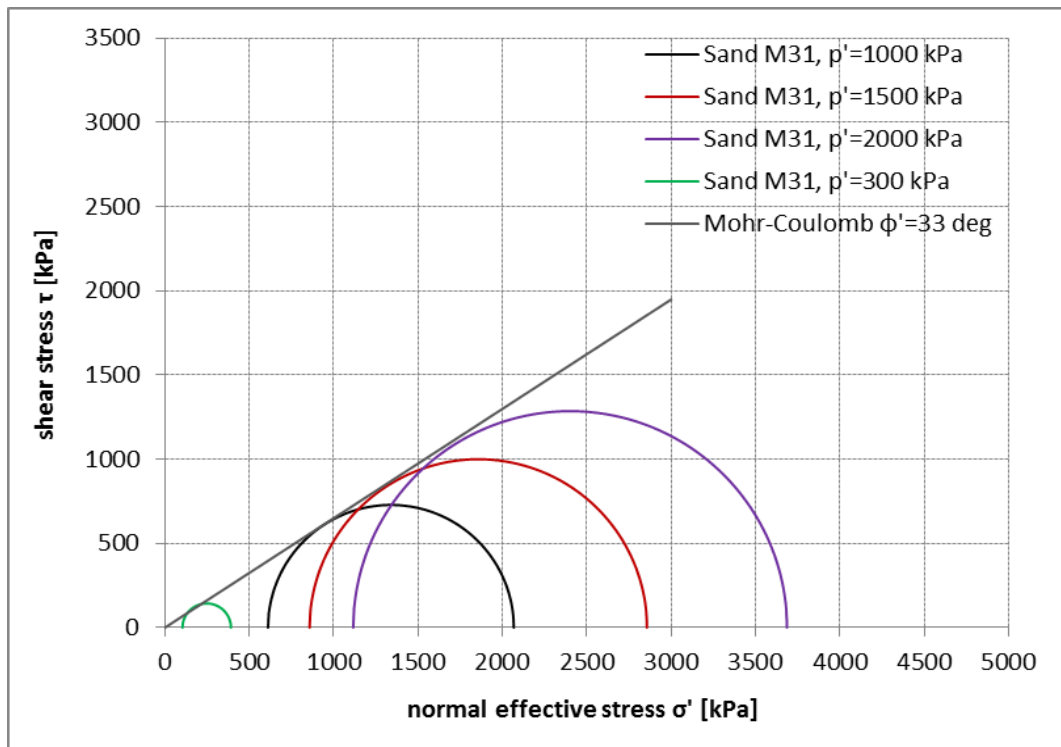
Σχήματα 4.13. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου M31(10% CS)



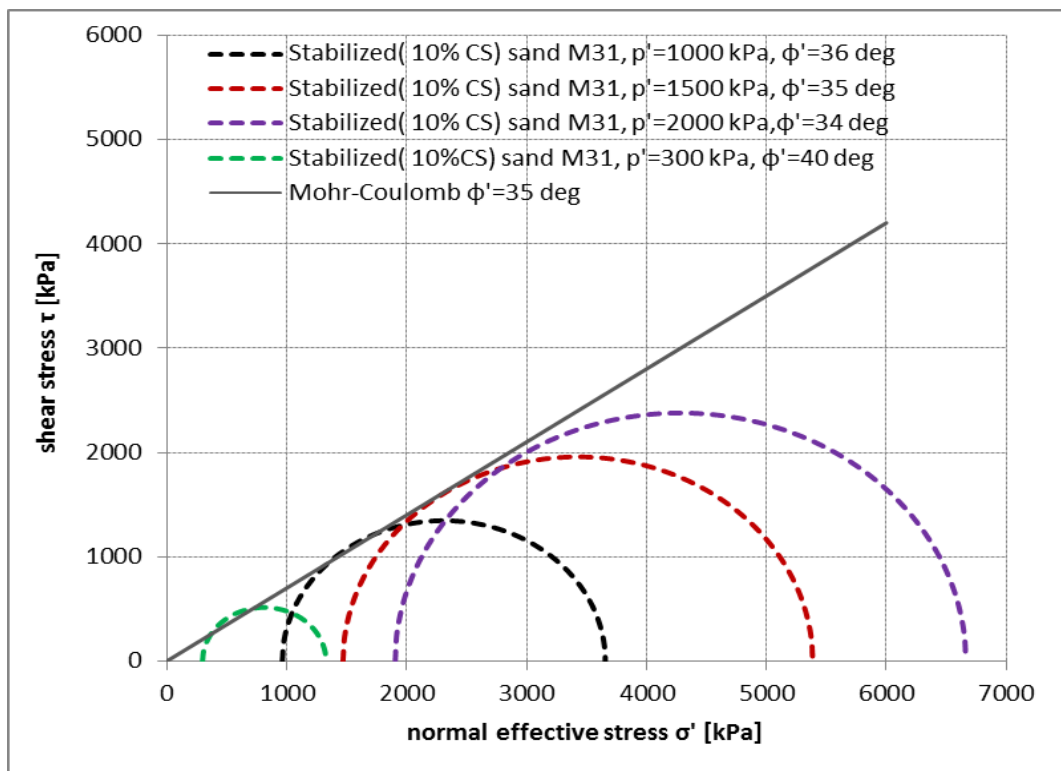
Σχήμα 4.14. Αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης διατμητικής αντίστασης άμμου M31



Σχήμα 4.15. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπλίσεων ρευστού πόρων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου M31(CS=6 και 10%)



Σχήμα 4.16. Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb φυσικής άμμου M31

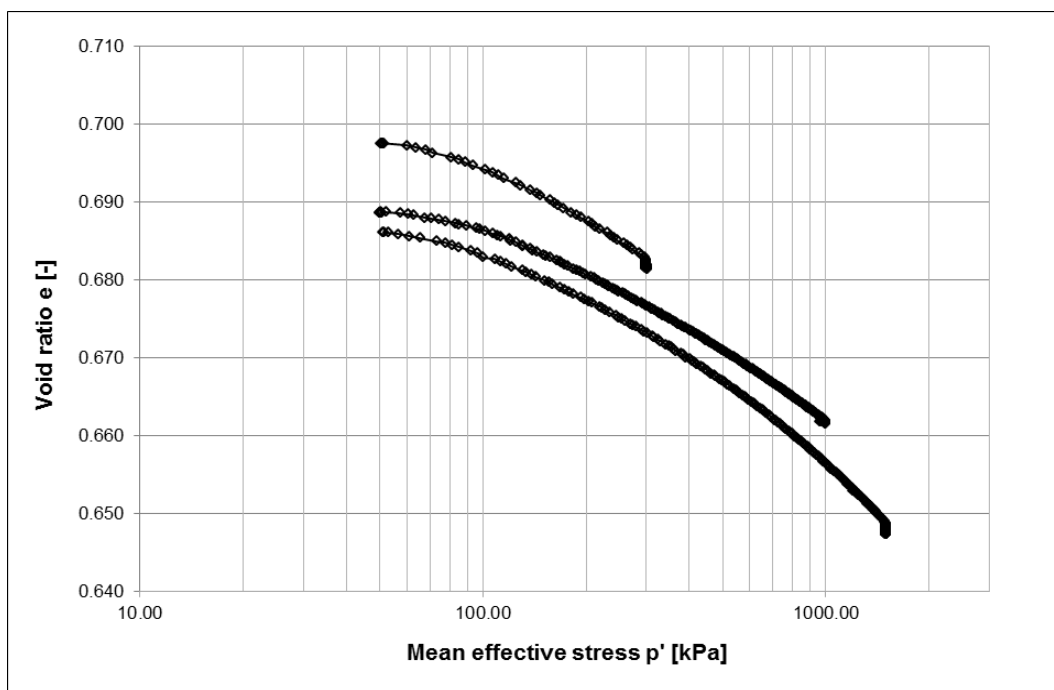


Σχήμα 4.17. Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb σταθεροποιημένης(10%CS) άμμου M31

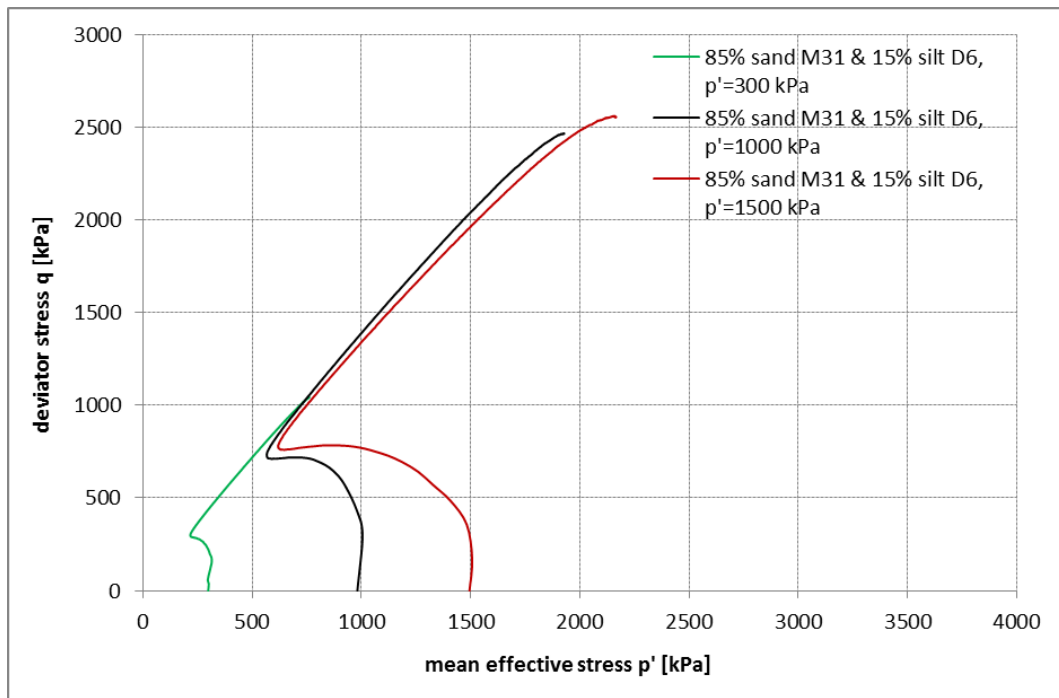
4.2.3 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική ιλυώδη άμμο M31 – D6

Η τρίτη σειρά πειραμάτων έγινε σε δοκίμια μίγματος 85% κ.β. άμμου M31 και 15% κ.β. ιλύος D6 τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε ενεργές τάσεις $p'_i=1000, 1500, 2000$ και 300 kPa και στη συνέχεια ακολούθησε περίοδος ηρεμίας 1.5 ώρας. Οι σχετικές πυκνότητες που προέκυψαν είναι στο εύρος $D_r=20-30\%$, ενώ τα διαγράμματα στερεοποίησης $e - \log p'$ φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.18. Το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 2000 kPa(δοκιμή B-2000-3) είχε σχετική πυκνότητα στο τέλος της στερεοποίησης $D_r=40\%$ και η δοκιμή αυτή δεν παρουσιάζεται συγκριτικά με τις υπόλοιπες στα διαγράμματα. Η συμπεριφορά του μίγματος κατά τη στερεοποίηση είναι παρόμοια με αυτήν της καθαρής άμμου.

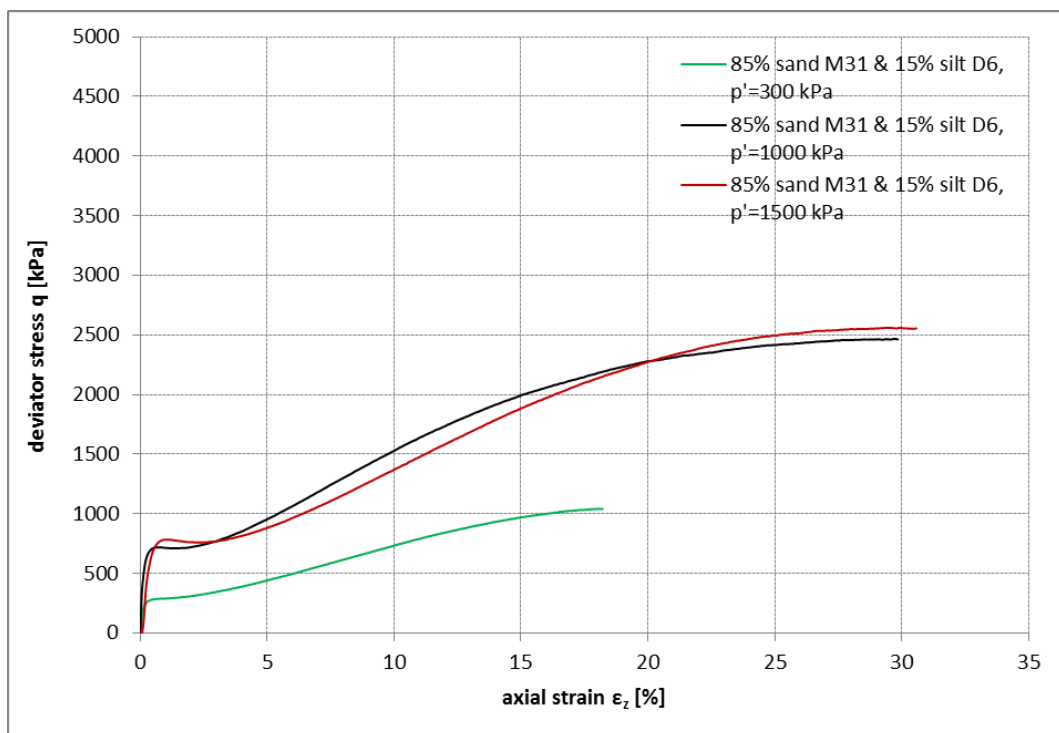
Μετά από την ισότροπη στερεοποίηση το μίγμα άμμου M31 - ιλύος D6 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$ φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4.19. Η συστολική συμπεριφορά του μίγματος είναι εντονότερη από αυτήν της καθαρής άμμου και περισσότερο τονισμένη στις υψηλές ενεργές τάσεις εγκιβωτισμού. Σε όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων το μίγμα εμφανίζει αλλαγή φάσης και στη συνέχεια τάση για διαστολή κατά μήκος μιας κοινής περιβάλλουσας αστοχίας. Η γωνία αλλαγής φάσης βρέθηκε $\phi'_{PTL} = 33^\circ$, ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 34^\circ$, δηλαδή η περιβάλλουσα αστοχίας του μίγματος είναι ποιοτικώς ίδια με αυτήν της καθαρής άμμου. Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων $q - \epsilon_z$. Η εντονότερη συστολική συμπεριφορά του μίγματος σε σύγκριση με την καθαρή άμμο και οι συνεπαγόμενες μεγεθυμένες υπερπίεσεις πόρων καθιστούν τη διατμητική αντίσταση του μίγματος υποβιβασμένη συγκριτικά.



Σχήμα 4.18. Καμπύλες στερεοποίησης μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6



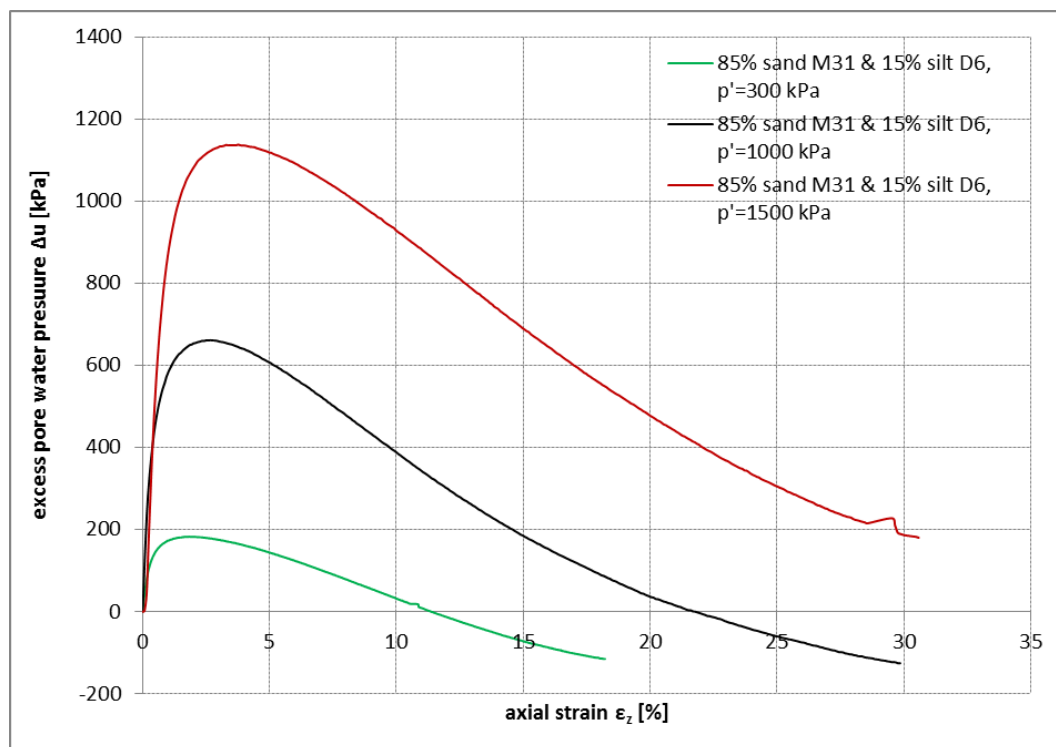
Σχήμα 4.19. Διαδρομές τάσεων μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6



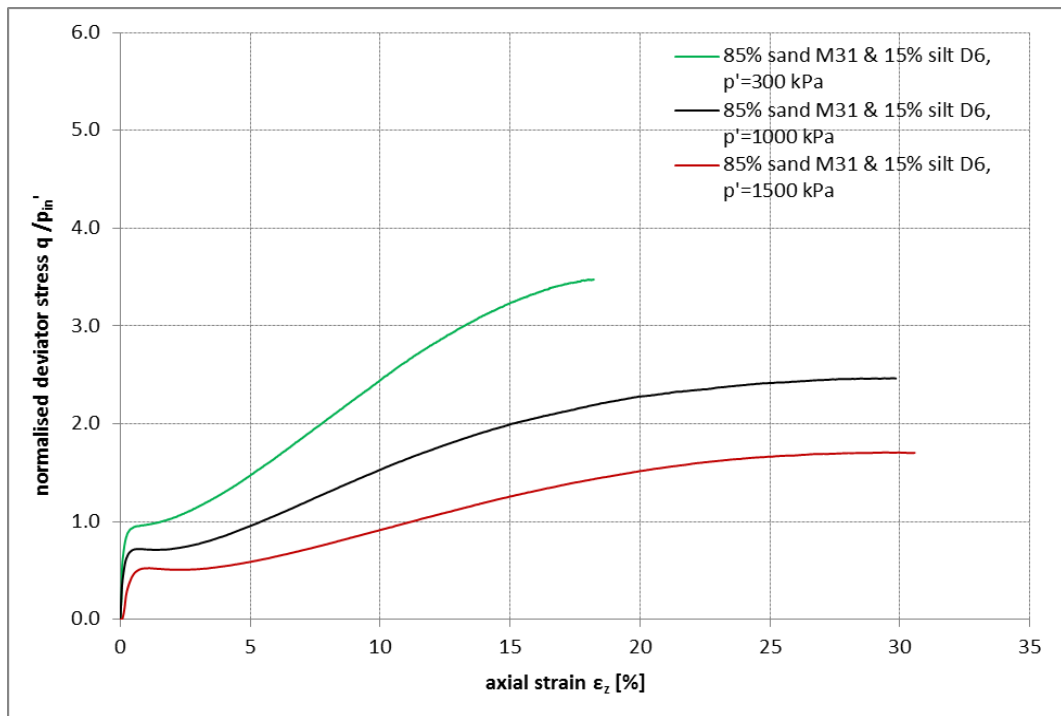
Σχήμα 4.20. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6

Τα δοκίμια μίγματος παραμένουν διαστολικά σε πιο προχωρημένες παραμορφώσεις από ότι η καθαρή άμμος. Σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 25% η αποκλίνουσα τάση q σταθεροποιείται. Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με ενεργό τάση εγκιβωτισμού 1000 και 1500 kPa δεν αστόχησαν με

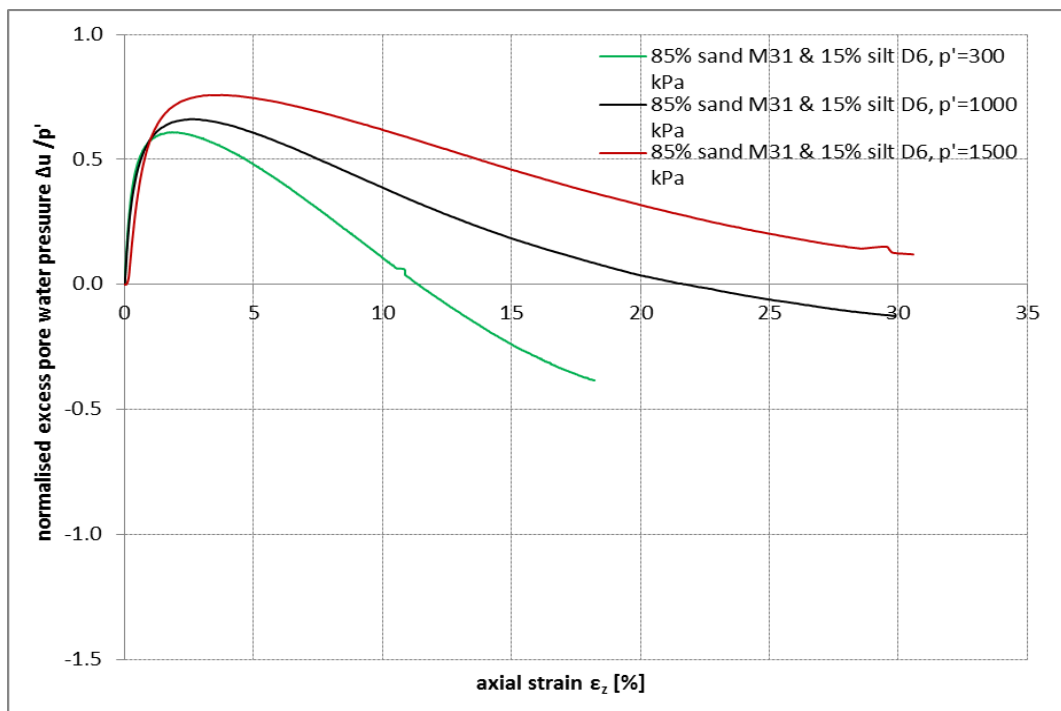
εμφάνιση επιπέδου, ενώ το δοκίμιο των 300 kPa εμφάνισε επίπεδο. Οι υπερπίεσεις του ύδατος των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται στο Σχήμα 4.21. Είναι σαφώς μεγεθυμένες κατά τη συστολή σε σχέση με τις αντίστοιχες της καθαρής άμμου και αργού να σταθεροποιηθούν. Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων $q/p_i' - \epsilon_z$ και υπερπίεσεων - παραμορφώσεων $\Delta u/p_i' - \epsilon_z$ παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.22 και 4.23, αντίστοιχα. Οι κανονικοποιημένες καμπύλες δεν συγκλίνουν καθώς η συστολική συμπεριφορά ενισχύεται δυσανάλογα με την αύξηση της ενεργού τάσης. Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb φαίνεται στο Σχήμα 4.24 και παρατηρείται ταύτιση των οριακών κύκλων για τις τάσεις των 1000 και 1500 kPa.



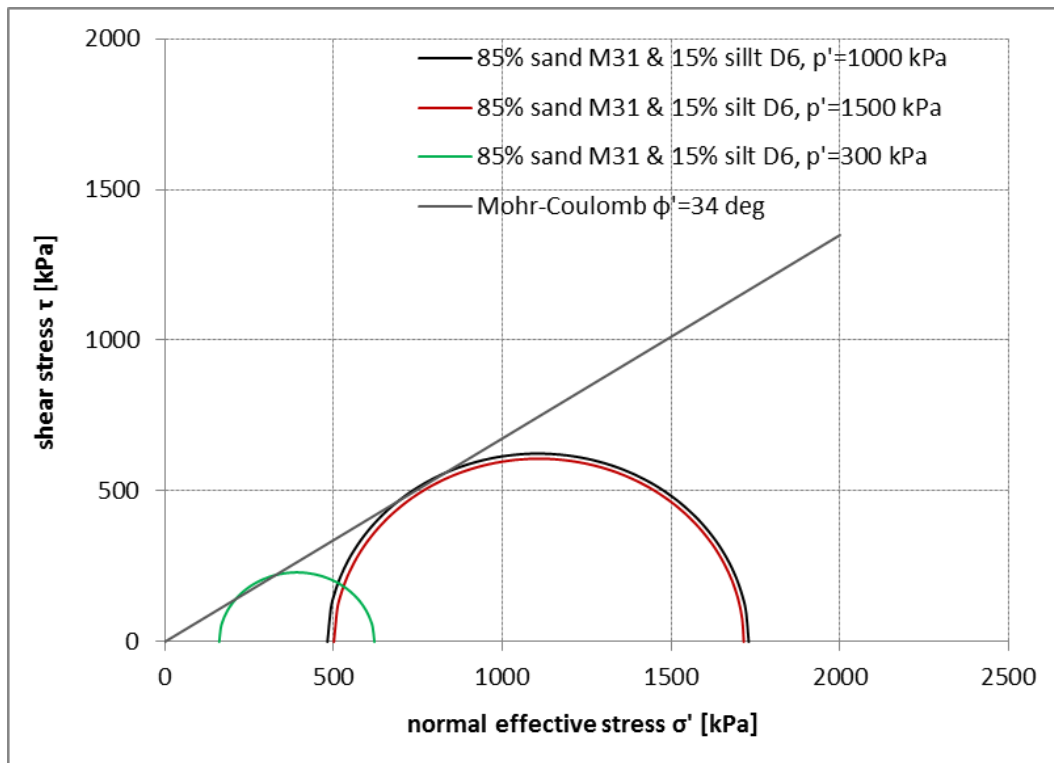
Σχήμα 4.21. Διάγραμμα υπερπίεσης ύδατος πόρων - αξονικών παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31-ιλύος D6



Σχήμα 4.22. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31-ιλύος D6



Σχήμα 4.23. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερπιέσεων ύδατος πόρων - παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31-ιλύος D6



Σχήμα 4.24. Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb μίγματος άμμου M31-ιλύος D6

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

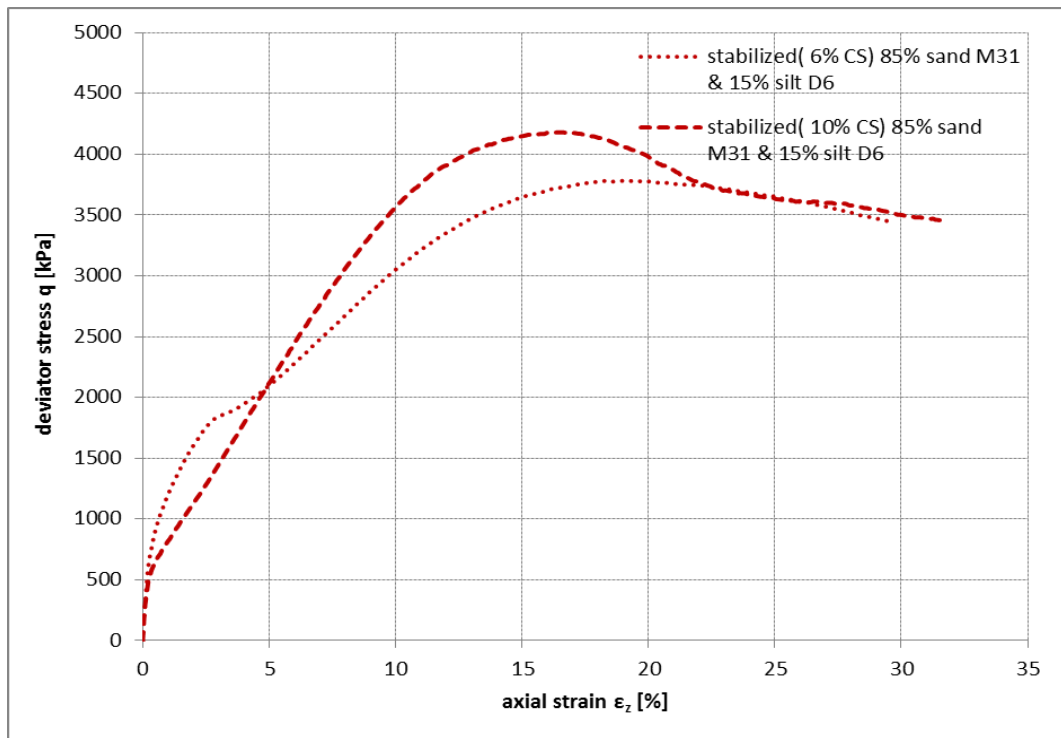
Η τέταρτη σειρά πειραμάτων έγινε σε σταθεροποιημένα (CS=6 και 10%) δοκίμια μίγματος 85% κ.β. άμμου M31 και 15% κ.β. ιλύος D6 τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε τάσεις 1000 kPa και 1500 kPa και φορτίστηκαν σε διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία στερεοποίησης με τα δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου.

Μετά το πέρας της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια του σταθεροποιημένου μίγματος υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα 4.25 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων $q - \epsilon_z$ για τα δοκίμια με ποσοστό σταθεροποιητή 6 και 10%, σε τάση 1500 kPa. Η διατμητική αντίσταση του σταθεροποιημένου εδάφους είναι σαφώς μεγαλύτερη από του φυσικού. Οι υπερπιέσεις του ρευστού των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται στο Σχήμα 4.26. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο με αρχική ολική τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa και ποσοστό σταθεροποιητή 10% CS, είχε στην αρχή της διάτμησης πίεση υγρού πόρων 680 kPa την οποία δεν εκτόνωσε κατά τη στερεοποίηση, πιθανόν λόγω απόφραξης του σωληνίσκου εκροής προς τη δεξαμενή εκτόνωσης. Η αρχική αυτή πίεση ρευστού πόρων δικαιολογεί τη μεταβολή πίεσης $\Delta u = -665$ kPa στο τέλος του πειράματος. Στα Σχήματα 4.27 και 4.28 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ολική τάση εγκιβωτισμού καμπύλες $q/p_i - \epsilon_z$ και $\Delta u/p_i - \epsilon_z$ για τα σταθεροποιημένα δοκίμια μίγματος. Σε παραμόρφωση 5% η κανονικοποιημένη τιμή q/p_i του σταθεροποιημένου μίγματος για ολική τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa είναι 1.4 (για CS=6 και 10%), ενώ η αντίστοιχη τιμή για το φυσικό μίγμα είναι 0.6. Ο αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης της διατμητικής αντίστασης προκύπτει 2.3. Το Σχήμα 4.29 απεικονίζει τον αδιάστατο παράγοντα βελτίωσης $(q/p_i)_{\text{stabil}} / (q/p_i)_{\text{natur}}$ σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα για το

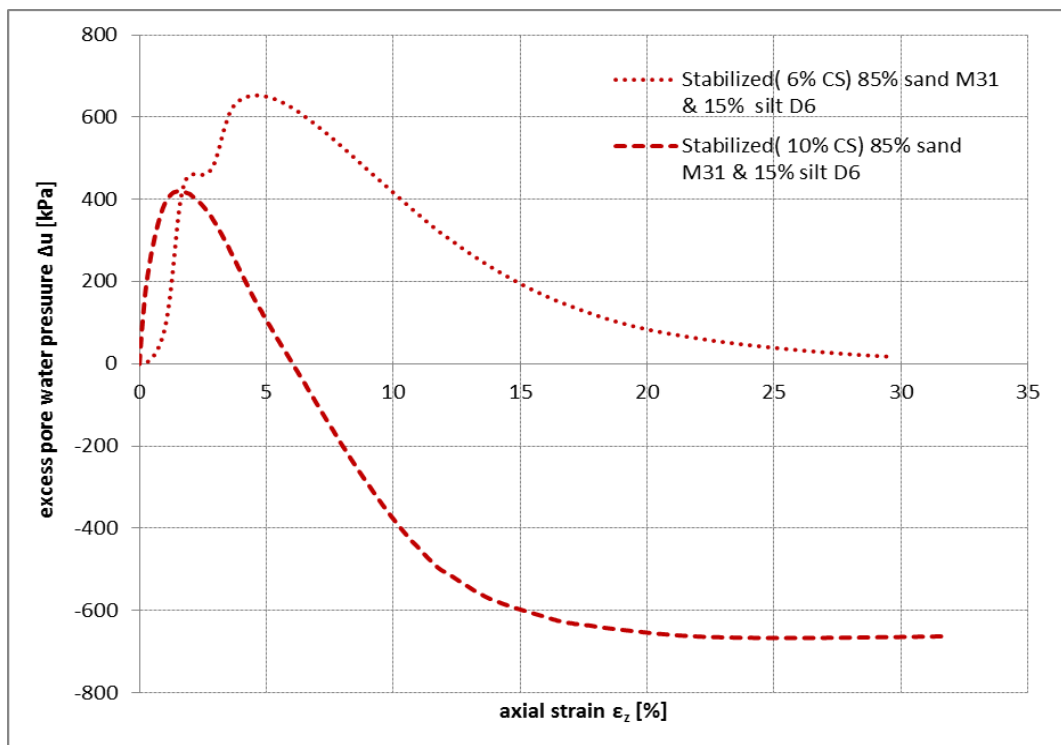
σταθεροποιημένο μίγμα άμμου - ιλύος είναι ποιοτικά ανάλογα με αυτά για τη σταθεροποιημένη άμμο.

Μία συμπεριφορά που οφείλουμε να σχολιάσουμε είναι ότι υπήρξαν αρκετά δοκίμια σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου τα οποία δεν απήλυσαν την ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης. Στο Παράρτημα Π4-2, οι κωδικοί SB10-1000-1, SB10-1000-4, SB10-1000-5, SB10-1000-6 αφορούν τέτοια δοκίμια. Η απόκριση της σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου ήταν παρόμοια με αυτήν της φυσικής. Η καταγραφή της πίεσης υγρού πόρων ήταν άμεση, χωρίς έντονη υστέρηση και ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή των φυσικών δοκιμίων. Οι τασικές οδεύσεις στο επίπεδο $q - p'$ και οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων $q - \varepsilon_z$ για τα δύο εδαφικά υλικά ήταν ποιοτικά οι ίδιες. Μία πιθανή εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι το υγρόλυμα μέσα στους πόρους του δοκιμίου δεν είχε μετατραπεί σε γέλη. Κάτι τέτοιο εξακριβώθηκε με σχολαστικούς ελέγχους ότι δεν ήταν η αιτία. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι οι δοκιμές με κωδικούς SB10-1000-4 και SB10-1000-6 εκτελέστηκαν σε ηλικία 337 και 1515 ωρών, αντίστοιχα(βλέπετε Πίνακα Π4-2.1 στο Παράρτημα Π4-2). Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από τον τυπικό χρόνο εκτέλεσης δοκιμών, δηλαδή τις 50 ώρες, οπότε δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η γέλη είχε σχηματιστεί. Κάποιο πιθανό λάθος στις αναλογίες των συστατικών που συνθέτουν το υγρόλυμα(αφαλατωμένο νερό, αλάτι, πυκνό υγρόλυμα 30% wt., διάλυμα υδροχλωρικού οξέως HCl), το οποίο θα οδηγούσε σε πολύ μεγάλο χρόνο πήξης, επίσης απορρίπτεται. Ένα τέτοιο λάθος θα αποκαλυπτόταν στην καθυστέρηση του σχηματισμού της γέλης στο περίσσειμα του υγρολύματος που αφήνεται στο δοχείο του, γεγονός που δεν συνέβη. Ο μη σχηματισμός της γέλης σε τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα δεν μπορεί να αποδοθεί ούτε στις θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς δεν υπάρχει τόσο ακραία διακύμανση και κάτι τέτοιο θα εντοπιζόταν και στο υγρόλυμα του δοχείου.

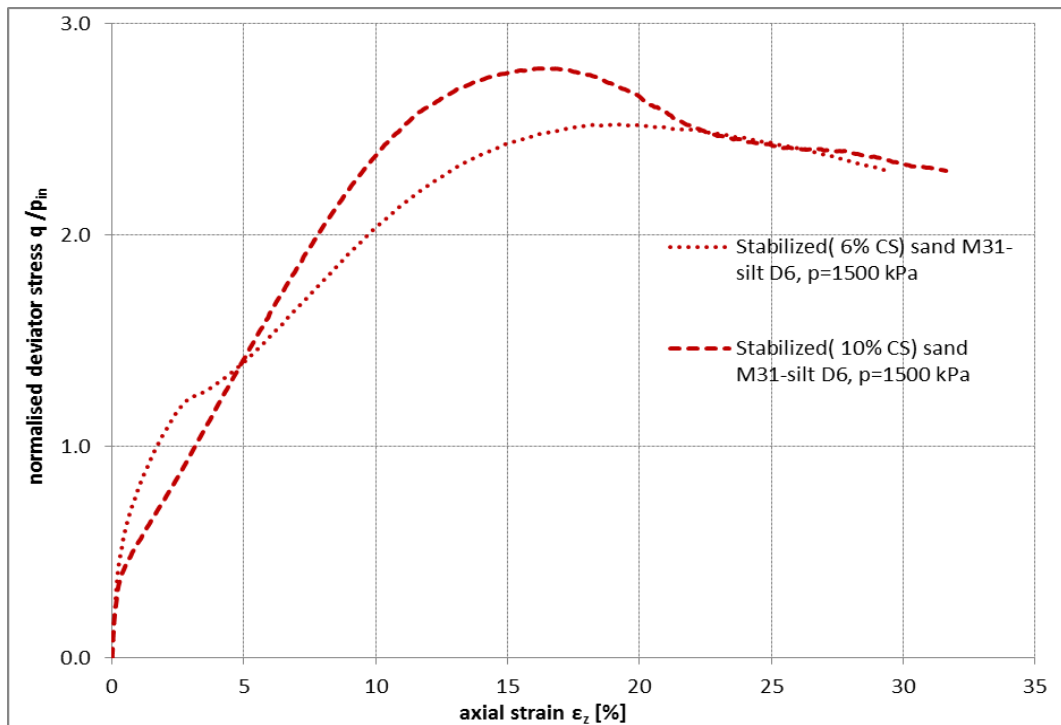
Η εξήγηση που μπορούμε να δώσουμε έχει παρουσιαστεί στις Ενότητες 2.2.4.1, 2.2.5.2, 3.2.1 και 3.2.2. Σύμφωνα με τον μηχανισμό πυρηνοποίησης(nucleation mechanism) που έχει περιγραφεί, το λεπτόκοκκο γωνιώδες εδαφικό υλικό της ιλύος επιταχύνει τον σχηματισμό της γέλης γύρω του. Οι πυριτικές αλυσίδες, που είναι αγκυρωμένες πάνω στους εδαφικούς κόκκους, προσελκύουν και άλλα κολλοειδή σωματίδια και αναπτύσσονται προς το κέντρο του πόρου. Η συστολή λόγω συμπύκνωσης είναι εντονότερη κοντά στους κόκκους, διότι εκεί είναι εντονότερος ο ρυθμός συμπύκνωσης. Αυτή η διαφορική συστολή προκαλεί μία κάμψη προς τα πίσω των αλυσίδων που οδεύουν προς το κέντρο του πορώδους, και με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται μία πλάκα(plaque) γύρω από το λεπτόκοκκο υλικό. Η γέλη που σχηματίζεται στο πορώδες του εδάφους το οποίο είναι πλούσιο σε λεπτόκοκκο υλικό ενδέχεται να είναι ανομοιογενής, όσον αφορά την πυκνότητα των πυριτικών αλυσίδων. Το κέντρο του πορώδους έχει αραιό ιστό γέλης, κάτι το οποίο μπορεί να δικαιολογήσει την άμεση εκδήλωση της πίεσης των πόρων στον μετρητή, μετά από μία μόνο μικρή υστέρηση στις μικρές παραμορφώσεις(βλέπετε στο Παράρτημα Π4-2 τις δοκιμές SB10-1000-1, SB10-1000-4, SB10-1000-5, SB10-1000-6). Οι κόκκοι της άμμου, οι οποίοι λόγω μεγαλύτερου ποσοστού και μεγέθους αποτελούν το σκελετικό εδαφικό δίκτυο που παραλαμβάνει τη φόρτιση(force network), απολαμβάνουν χειρότερη ενθυλάκωση μέσα στον ιστό της γέλης. Οι περισσότερες πυριτικές αλυσίδες αγκαλιάζουν τους κόκκους της ιλύος, ενώ είναι σπανιότερες οι διαμπερείς αλυσίδες που ενώνουν αντικριστούς κόκκους μέσα σε έναν πόρο. Αυτή η ανομοιογένεια στον ιστό της γέλης ίσως ευθύνεται για την ταυτόσημη απόκριση, σε όρους τάσης – παραμόρφωσης, της σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου και της φυσικής ιλυώδους άμμου. Αντίστοιχα προβλήματα με σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά που περιείχαν πλούσιο λεπτόκοκκο κλάσμα έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία(βλέπετε Ενότητες 2.2.4.1, 2.2.5.2, 3.2.1 και 3.2.2).



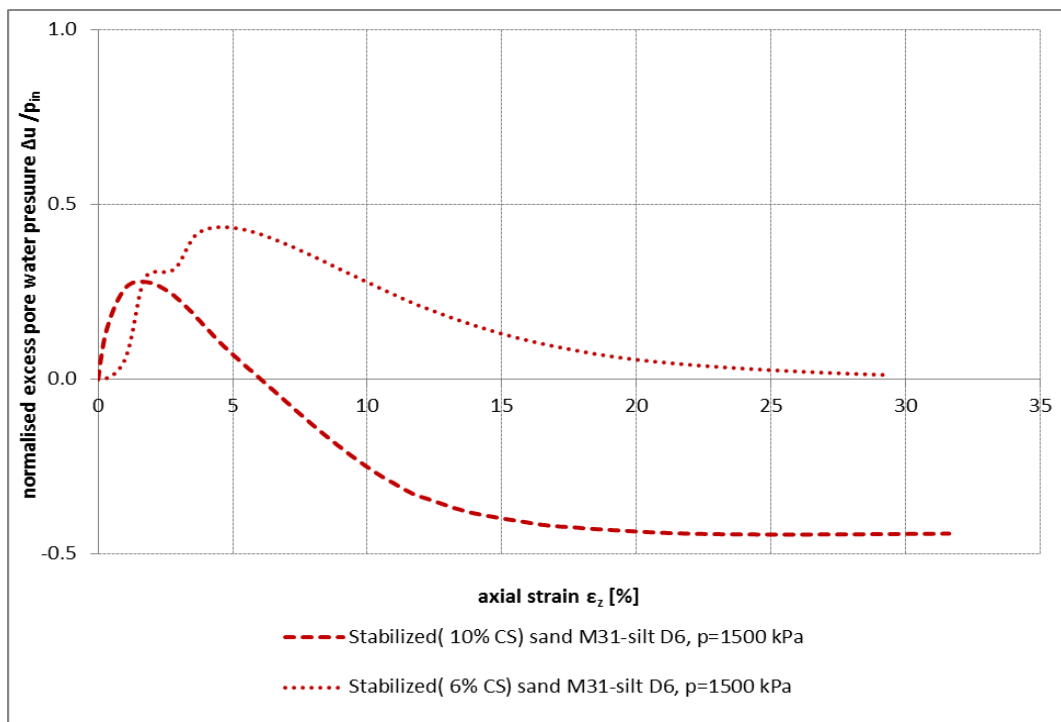
Σχήμα 4.25. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 – ιλύος D6(CS=6 & 10%)



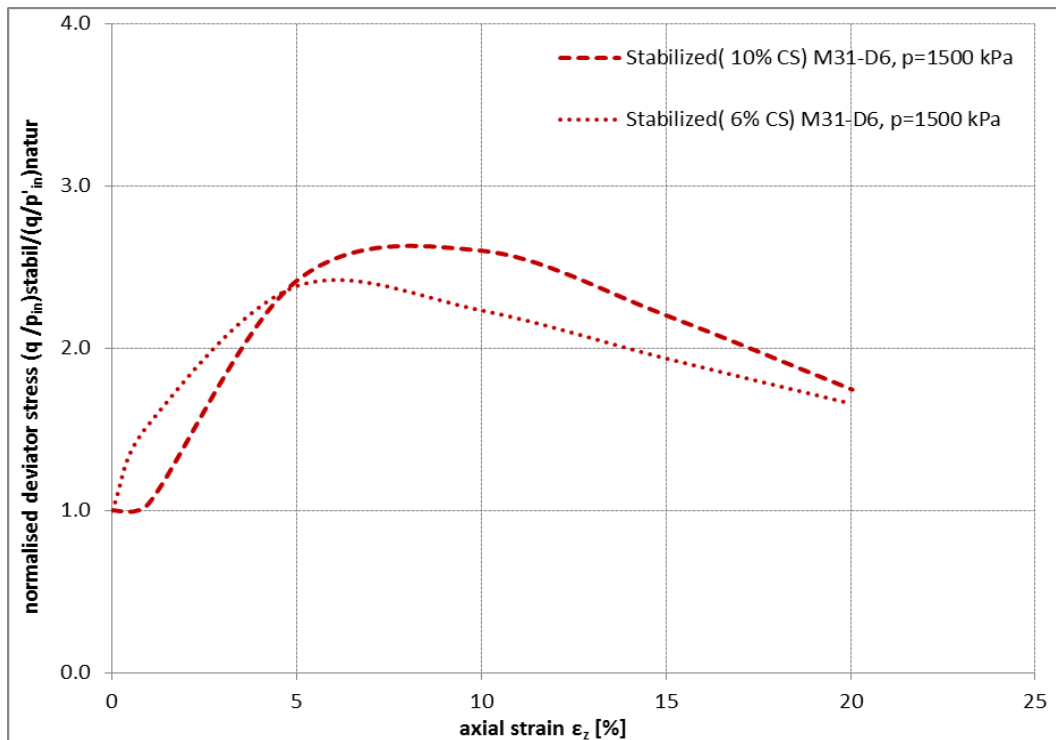
Σχήμα 4.26. Διάγραμμα υπερπίεσης υγρού πόρων - αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου - ιλύος(CS=6 & 10%)



Σχήματα 4.27. Διάγραμμα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6(CS=6 & 10%)



Σχήματα 4.28. Διάγραμμα κανονικοποιημένων υπερτιέσεων ρευστού πόρων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 – ιλύος D6(CS=6 & 10%)

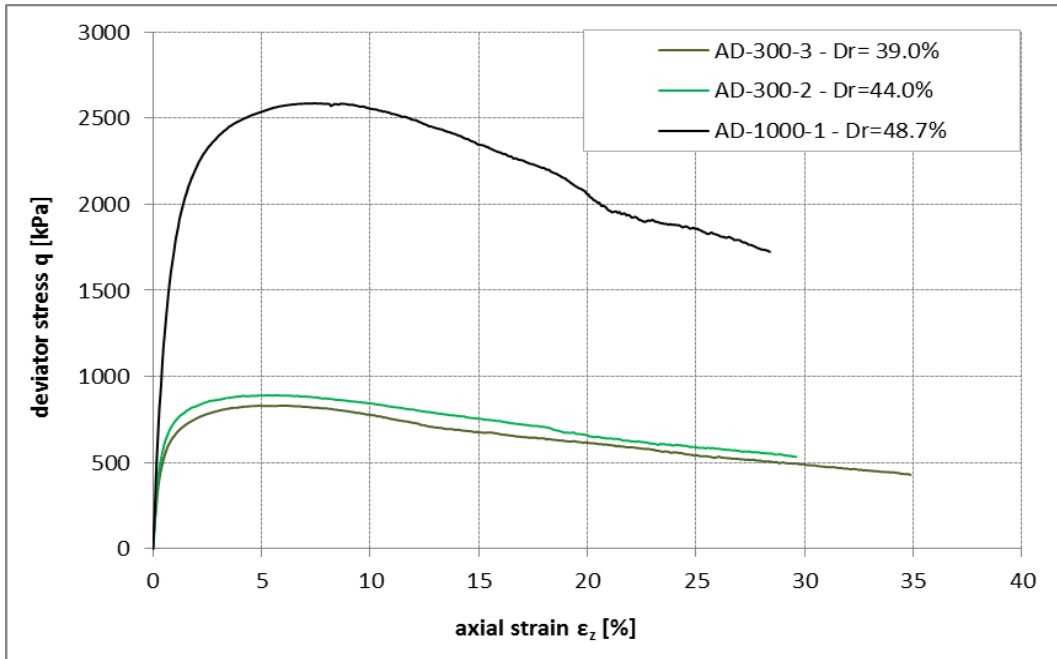


Σχήμα 4.29. Αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης διατμητικής αντίστασης ιλυώδους άμμου M31 – D6

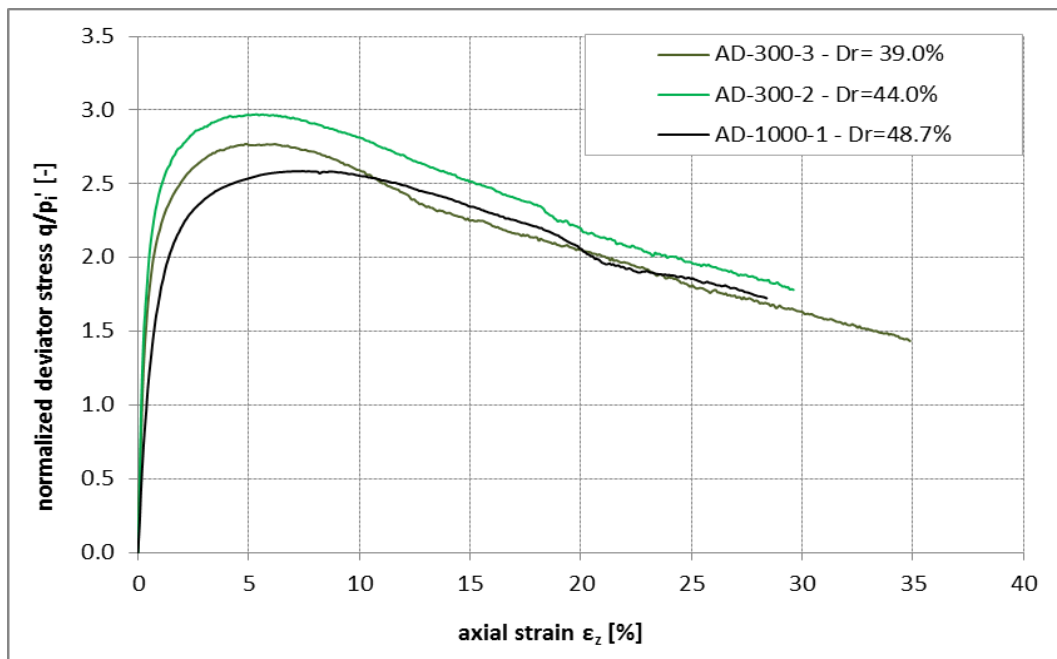
4.2.5 Μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες σε φυσική άμμο M31

Συμπληρωματικά με τις παραπάνω μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν και μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε φυσική άμμο υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων $q - \epsilon_z$ απεικονίζονται στο Σχήμα 4.30 και τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα $q/p'_i - \epsilon_z$ στο Σχήμα 4.31. Η εξέλιξη των ογκομετρικών παραμορφώσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.32. Για τη δοκιμή AD-300-4 παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα $\epsilon_{vol}-\epsilon_{ax}$ και $e - \epsilon_{ax}$ λόγω προβλήματος στην καταγραφή των υπόλοιπων μεγεθών. Το Σχήμα 4.33 απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου κενών e σε συνάρτηση με τις αξονικές παραμορφώσεις ϵ_z για την άμμο σε διάφορες πυκνότητες και σε ενεργό τάση 300 kPa. Σε πολύ υψηλές παραμορφώσεις ο κρίσιμος λόγος κενών φαίνεται να έχει τιμή 0.70-0.71.

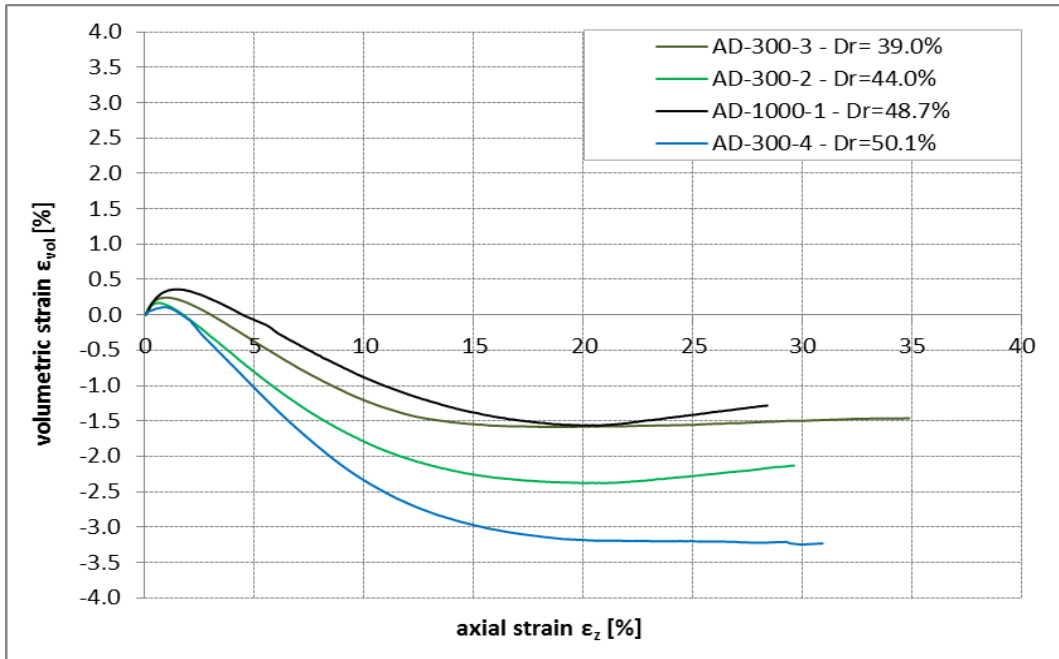
Μία πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση προκύπτει από τα Σχήματα 4.34 και 4.35, τα οποία απεικονίζουν τα διαγράμματα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων της σταθεροποιημένης άμμου υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σύγκριση με αυτά της φυσικής άμμου στην ίδια ενεργό τάση αλλά υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Φαίνεται ότι η σταθεροποιημένη άμμος που διατέμνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη φυσική άμμο, πυκνότερης δομής, που διατέμνεται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.



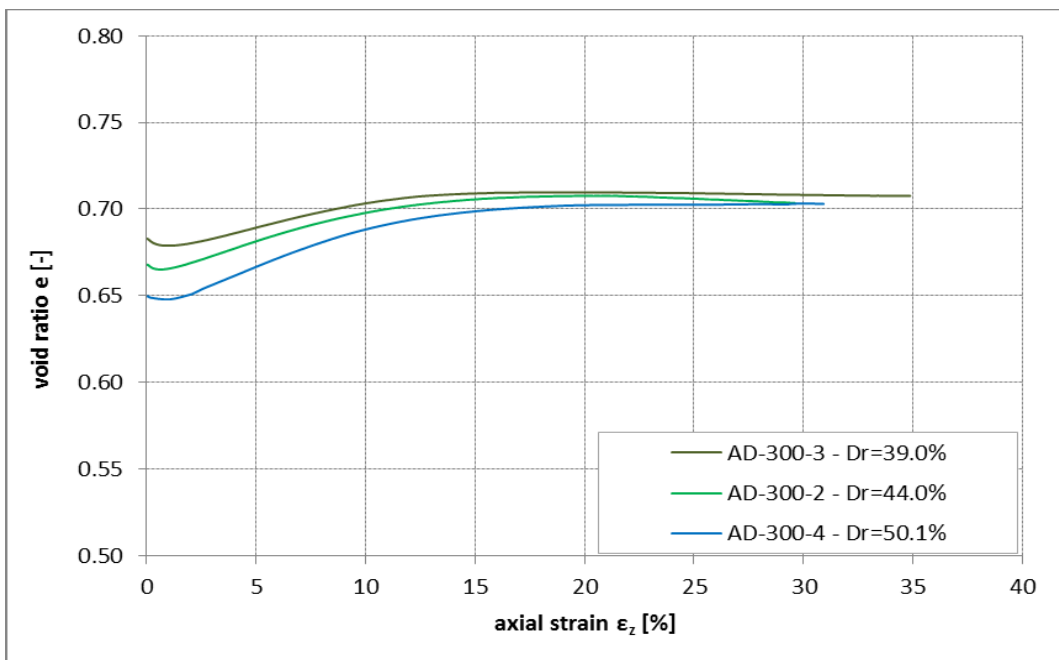
Σχήμα 4.30. Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης



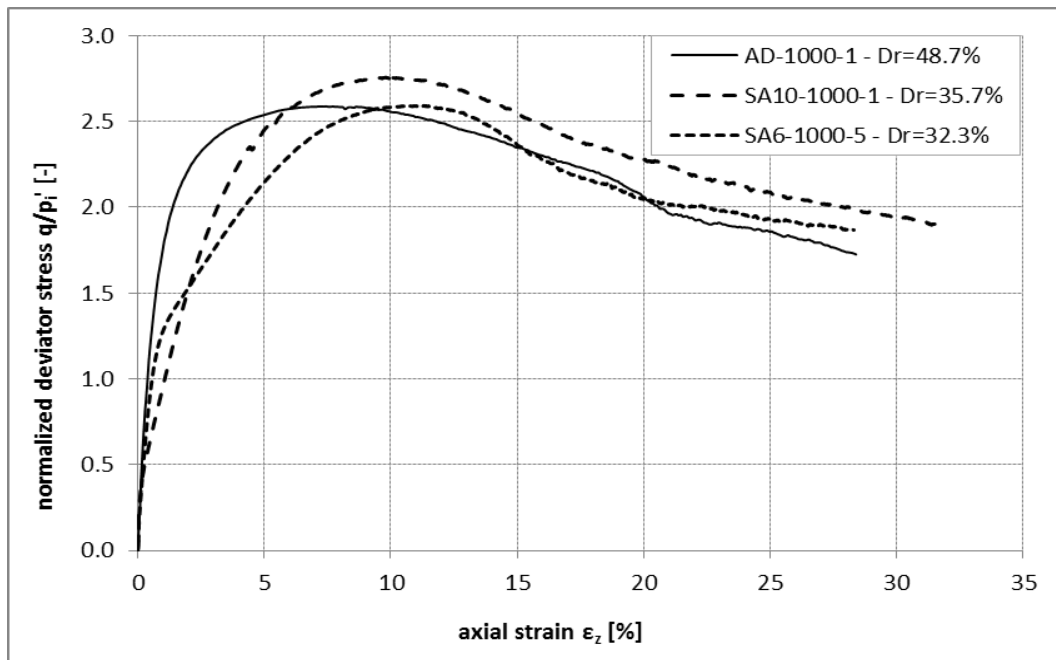
Σχήμα 4.31. Διαγράμματα κανονικοποιημένων τάσεων - παραμορφώσεων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης



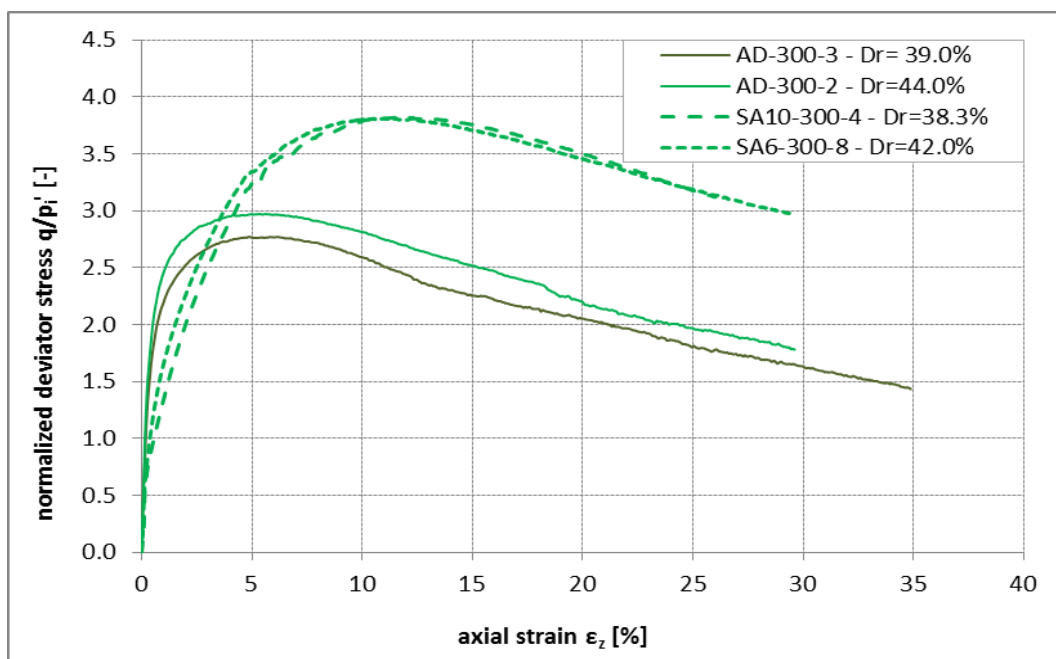
Σχήμα 4.32. Διαγράμματα εξέλιξης ογκομετρικών παραμορφώσεων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης



Σχήμα 4.33. Διαγράμματα μεταβολής του δείκτη πόρων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης

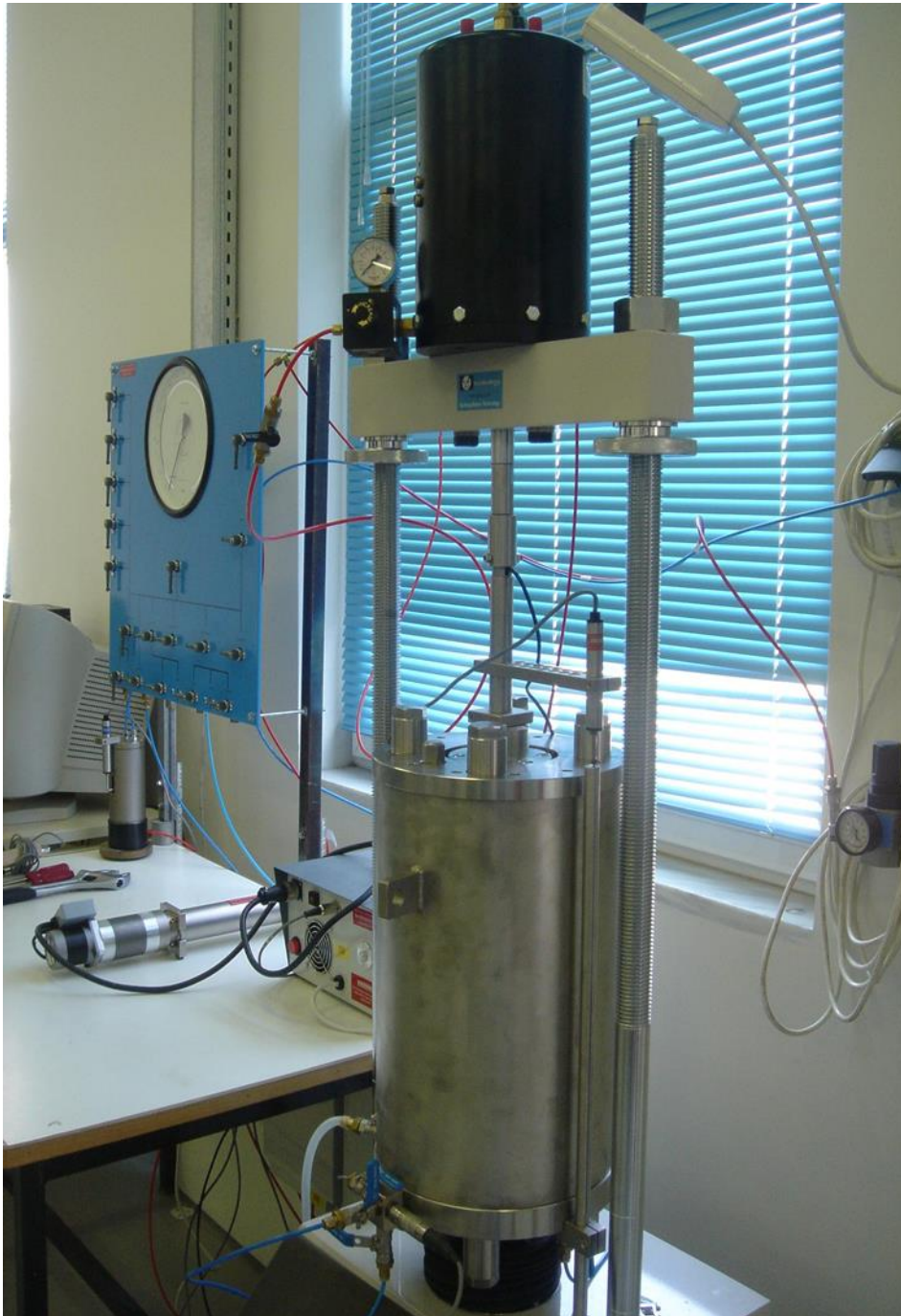


Σχήμα 4.34. Καμπύλες κανονικοποιημένων τάσεων – παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου σε δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες και φυσικής άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες

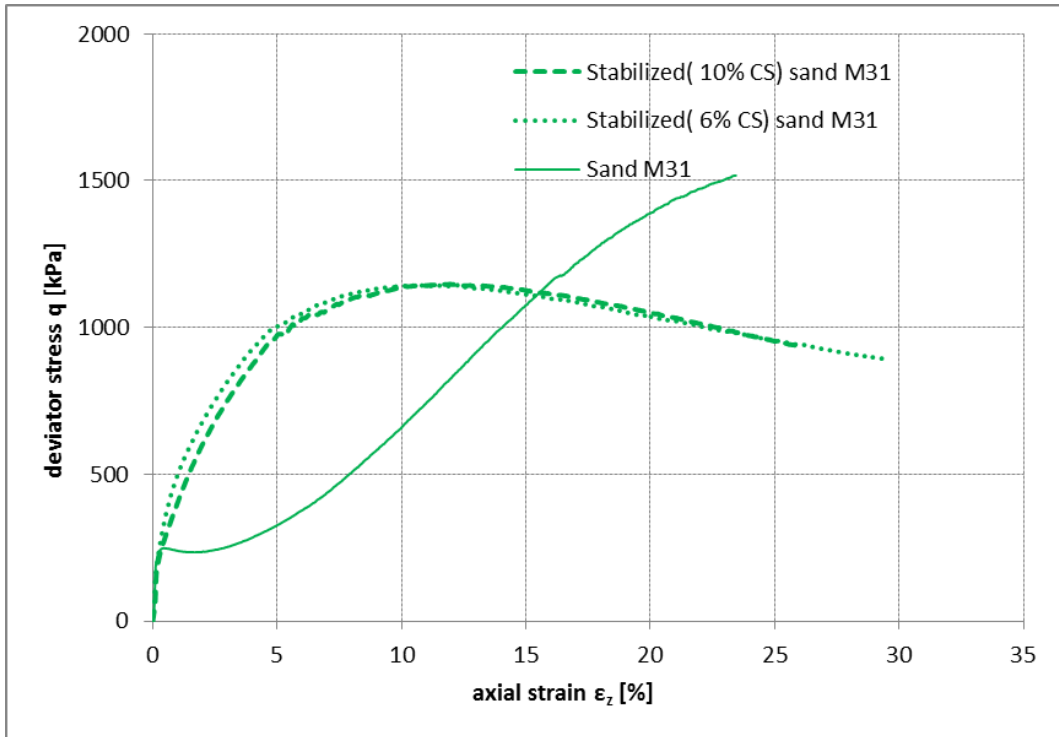


Σχήμα 4.35. Καμπύλες κανονικοποιημένων τάσεων – παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου σε δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες και φυσικής άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες

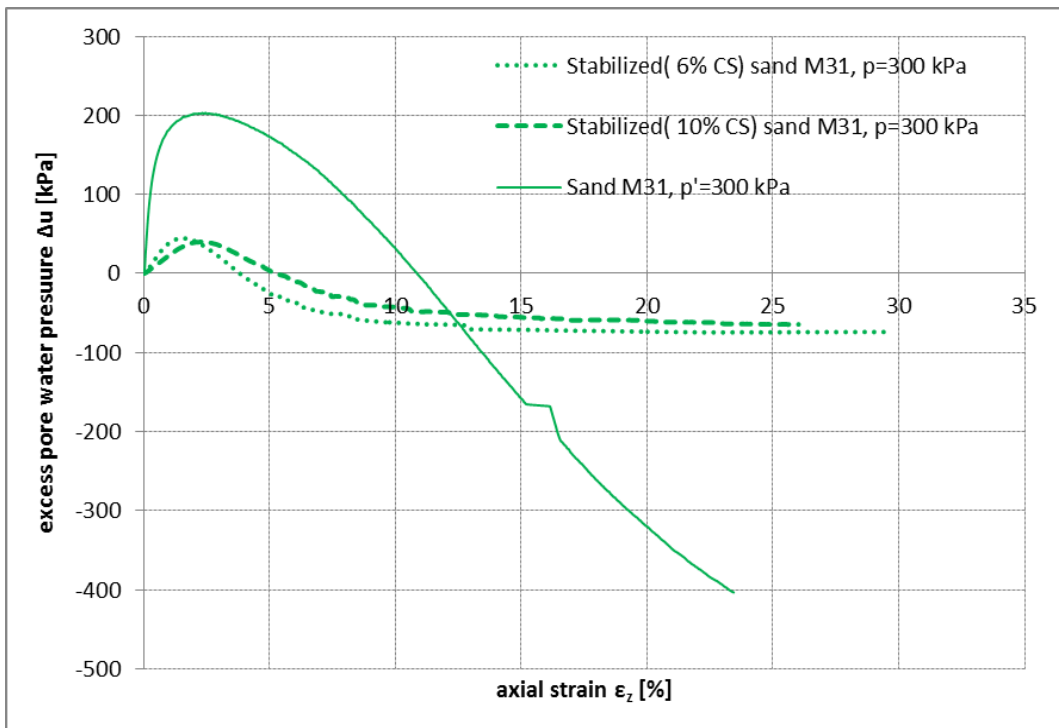
4.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4(ΕΚΤΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ Π4-1 ΕΩΣ Π4-4):



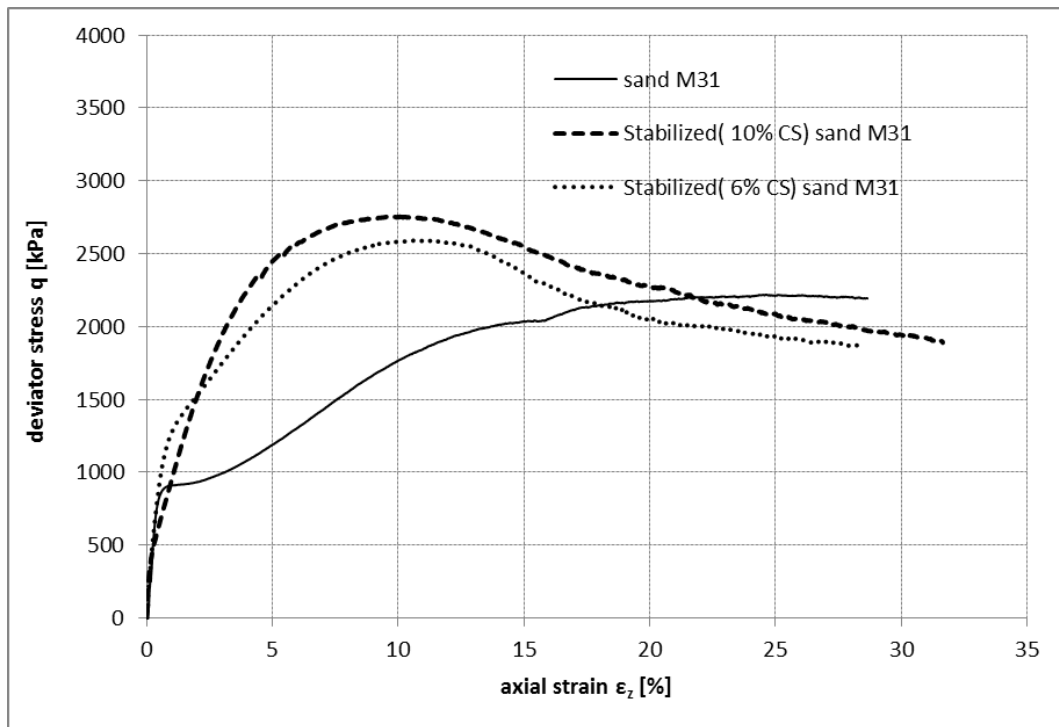
Σχήμα 4.1. Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου



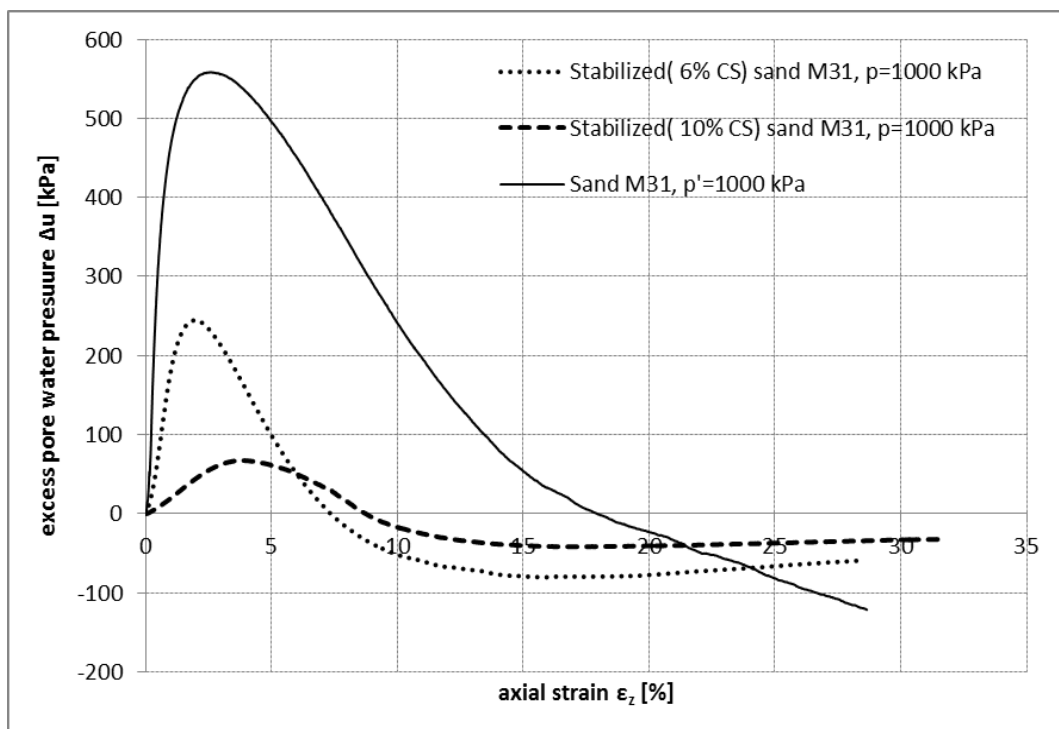
Σχήμα 4.36. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 300 kPa



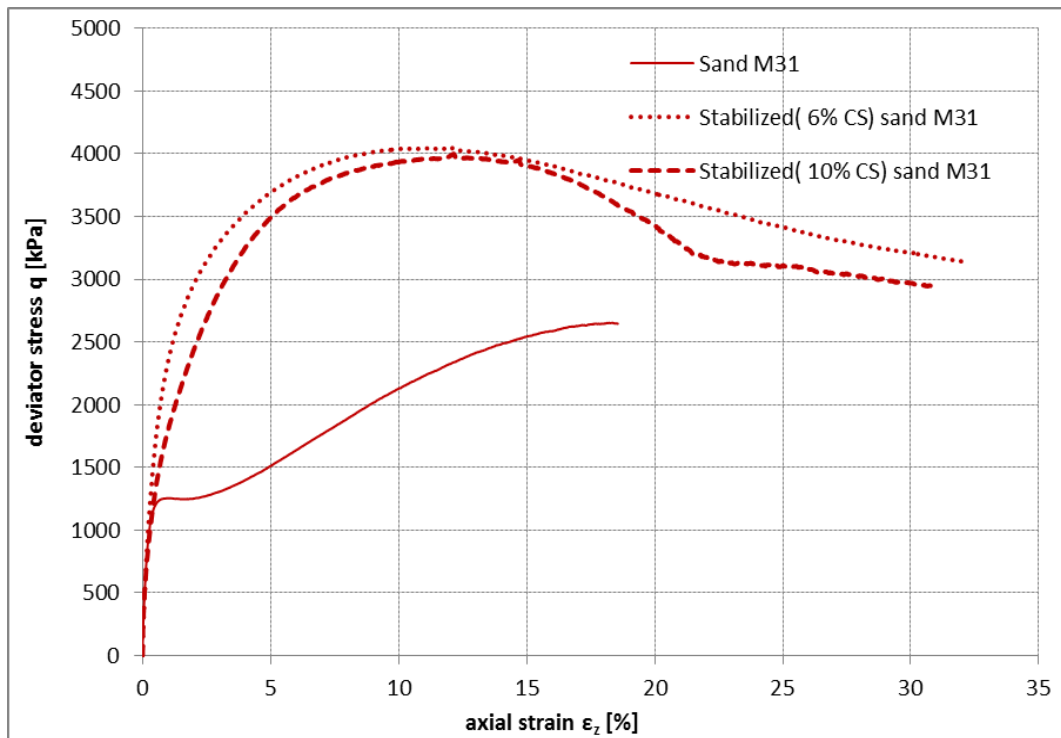
Σχήμα 4.37. Διάγραμμα υπερπίεσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 300 kPa



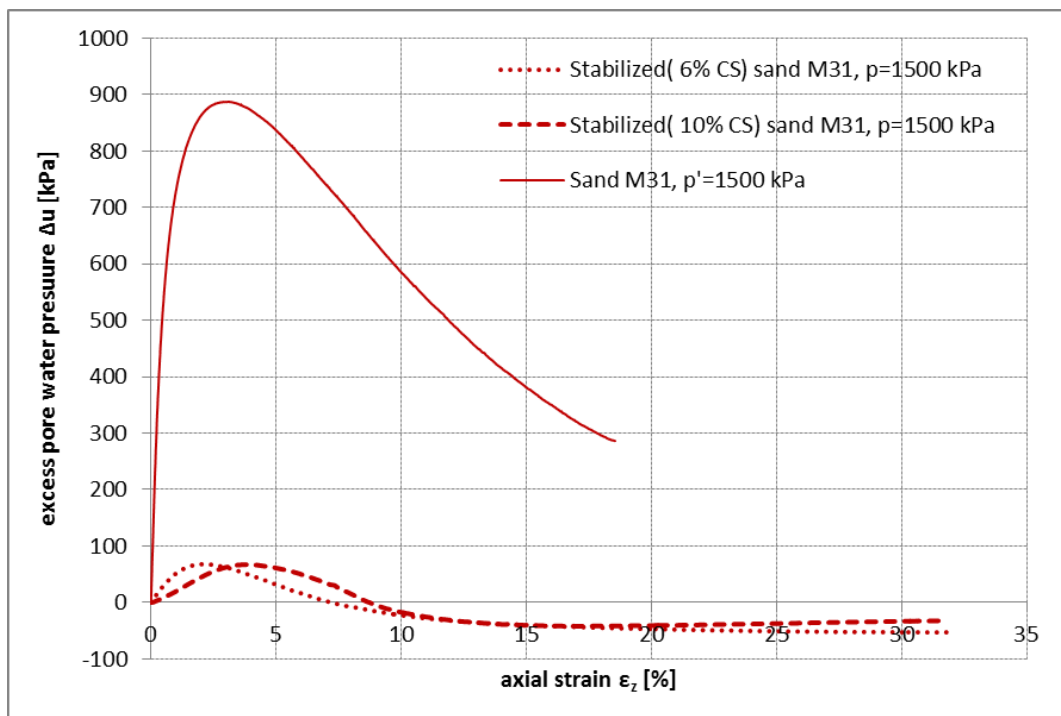
Σχήμα 4.38. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa



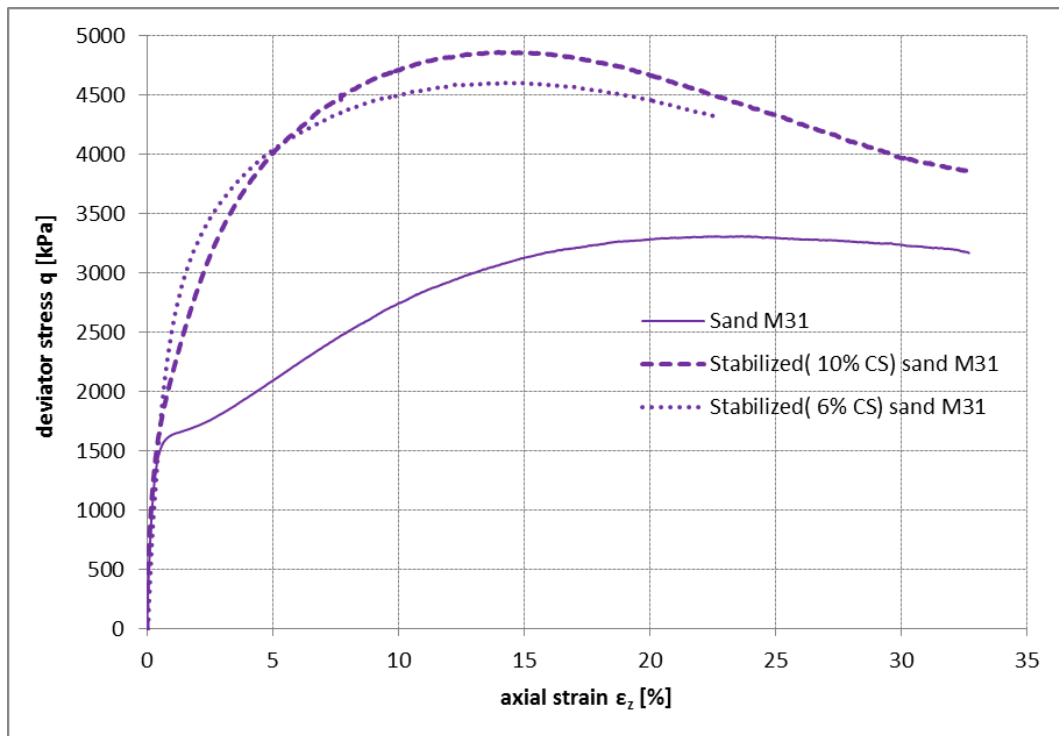
Σχήμα 4.39. Διάγραμμα υπερτιέσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa



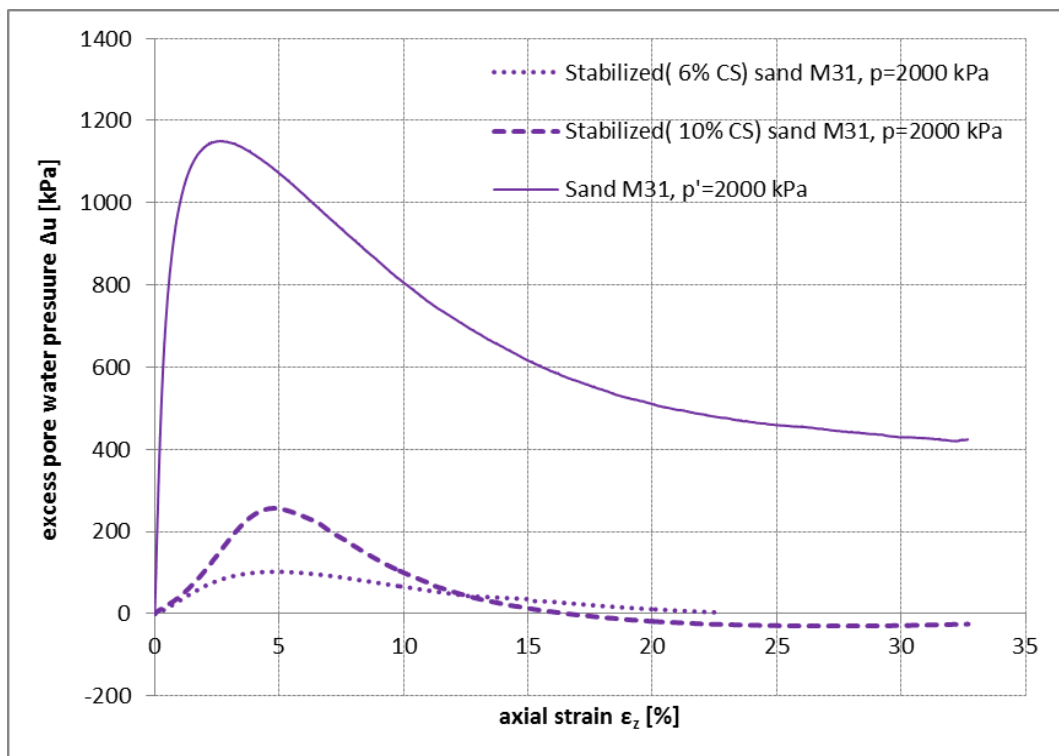
Σχήμα 4.40. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa



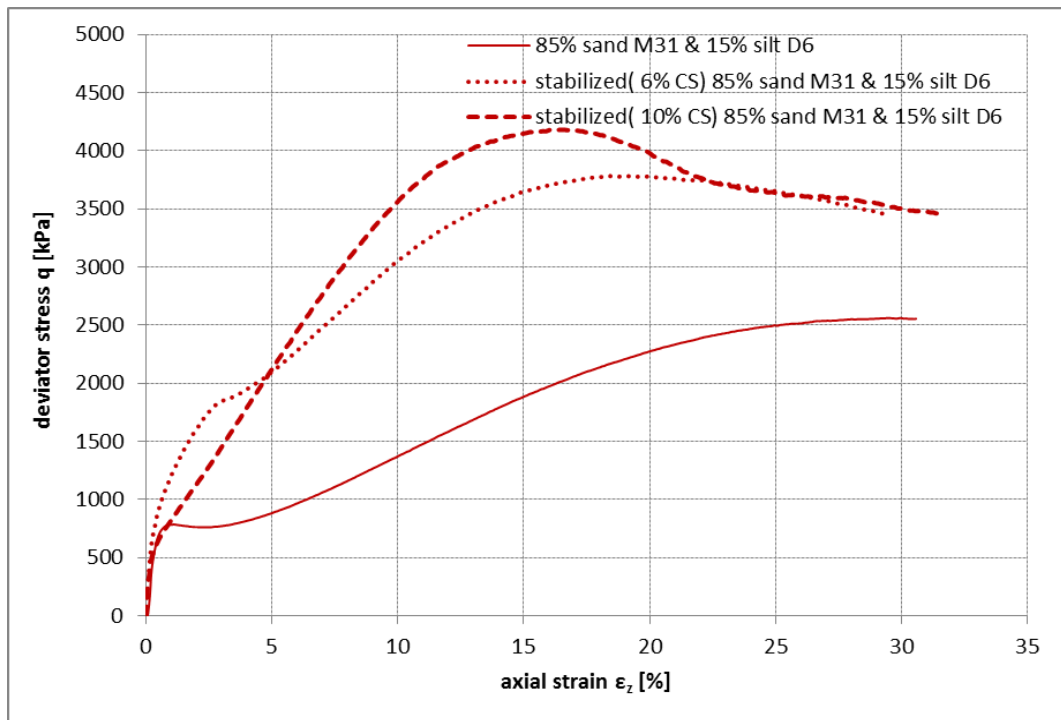
Σχήμα 4.41. Διάγραμμα υπερτιέσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa



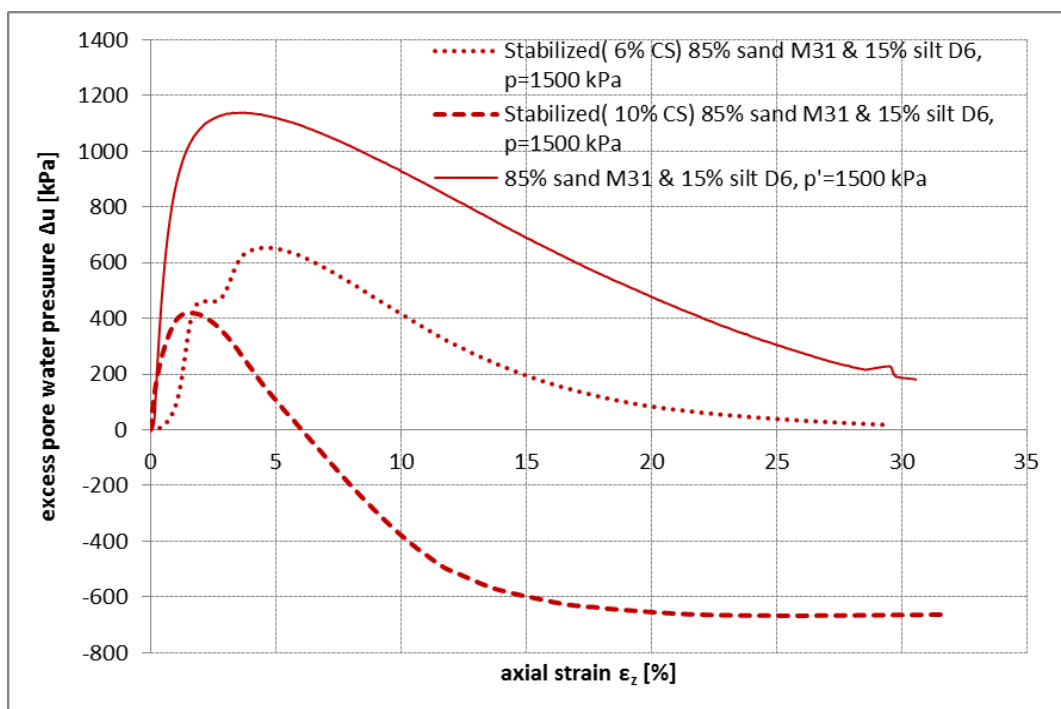
Σχήμα 4.42. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 2000 kPa



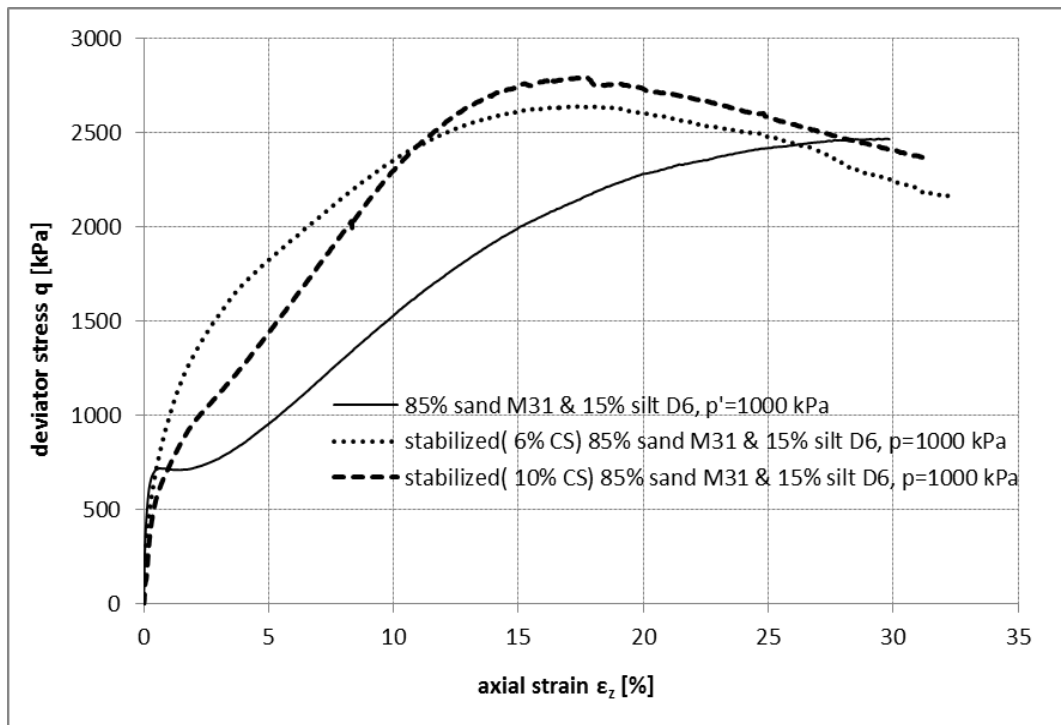
Σχήμα 4.43. Διάγραμμα υπερτιέσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τάση εγκιβωτισμού 2000 kPa



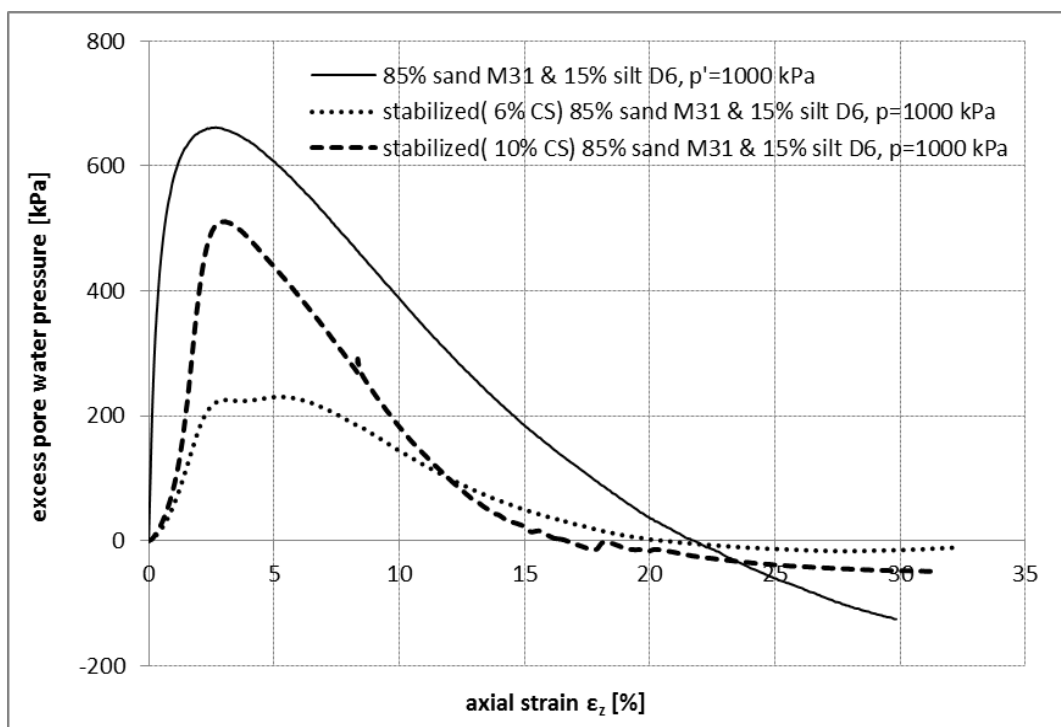
Σχήμα 4.44. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa



Σχήμα 4.45. Διάγραμμα υπερπίεσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1500 kPa



Σχήμα 4.46. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa



Σχήμα 4.47. Διάγραμμα υπερτιέσεων υγρού πόρων - παραμορφώσεων φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 & ιλύος D6 σε τάση εγκιβωτισμού 1000 kPa

4.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4:

A) ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- [1] Baek S., Pence T. J., “Inhomogeneous deformations of elastomer gels in equilibrium under saturated and unsaturated conditions”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59 (2011) 561-582
- [2] Bergna H. E.(ed.), Roberts W. O.(ed.), “Colloidal silica: fundamentals and applications”, CRC, Taylor & Francis, 2006
- [3] Brinker C. J., Scherer G. W., “Sol - gel science: the physics and chemistry of sol – gel processing”, Academic Press, 1990
- [4] Díaz-Rodríguez J. A., Antonio-Izarraras V. M., Bandini P., and López-Molina J. A. (2008), “Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout”, *Canadian Geotechnical Journal*, 45: 1345-1355 (2008)
- [5] DuPont. (1997), “Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling”. Product information, DuPont, Wilmington, DE.
- [6] Gallagher P. M. (2000), “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- [7] Gallagher P. M., Pamuk A., Abdoun T. (2007), “Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No.1, 0899-1561
- [8] Gallagher P. M., Mitchell J. K. (2002), “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 1017-1026
- [9] Kodaka T., Oka F., Ohno Y., Takyu T., and Yamasaki N., “Modelling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand”, *Geomechanics, ASCE (2005)*, 10.1061/40797(172)11
- [9] Silver D. M., Farrel R. A., “Validity of pulsatile ocular blood flow measurements”, *Survey of Ophthalmology, Volume 38, supplement, 1994*
- [10] Spencer L., Rix G. J., Gallagher P. M. (2008), “Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties”, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, ASCE (2008)*, 10.1061/40975(318)101
- [11] Style R. W., Peppin S.L., “Crust formation in drying colloidal suspensions”, *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, DOI:10.1098/rspa.2010.0039
- [12] Towhata I., “Geotechnical Earthquake Engineering”, Springer, 2008

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

5.1.1 Περιγραφή εξοπλισμού

Η παρούσα τεχνική έκθεση περιγράφει τα αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης κοίλων κυλινδρικών εδαφικών δοκιμίων. Τα εδαφικά υλικά που φορτίστηκαν είναι καθαρή άμμος M31 και σταθεροποιημένη άμμος M31 με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% και 6% κατά βάρος. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου(Seiken inc.) του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το τυπικό δοκίμιο έχει κοίλο κυλινδρικό σχήμα εσωτερικής διαμέτρου 40 mm, εξωτερικής διαμέτρου 70 mm και ύψους 140 mm. Το δοκίμιο εδράζεται σε βάση(pedestal) που διαθέτει δακτυλιωτό πορόλιθο με ενσωματωμένα μεταλλικά πτερύγια. Στην κορυφή του δοκιμίου τοποθετείται καπάκι(top cap) που διαθέτει δακτυλιωτό πορόλιθο με ενσωματωμένα μεταλλικά πτερύγια. Το καπάκι βιδώνεται στη συνέχεια σε κατακόρυφο άξονα που επιβάλλει τη στρεπτική ροπή ή/και το αξονικό φορτίο. Το αξονικό φορτίο του εμβόλου προκαλεί μία πρόσθετη αξονική τάση, η οποία αθροίζεται με την πίεση της κυψέλης για να δώσει την ολική αξονική τάση. Ο άξονας έχει ενσωματωμένη κυψέλη μέτρησης της στρεπτικής ροπής και του αξονικού φορτίου(torque/load cell), που βρίσκεται μέσα στην τριαξονική κυψέλη(triaxial cell), ακριβώς πάνω από το καπάκι. Ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο έκκεντρο έμβολο είναι συνδεδεμένα με τον κατακόρυφο άξονα και του επιβάλλουν, μέσω ηλεκτροπνευματικού μηχανισμού, το αξονικό φορτίο και τη ροπή στρέψης. Δύο σερβοελεγκτές καθορίζουν το επίπεδο φόρτισης μέσω σερβοβαλβίδων και υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των τάσεων ή των παραμορφώσεων. Η τριαξονική κυψέλη πληρώνεται μέχρι ενός σημείου με νερό και δέχεται στο επάνω μέρος παροχή αέρα μέσω ηλεκτροπνευματικού μηχανισμού με σερβοβαλβίδα. Ένας σερβοελεγκτής καθορίζει το επίπεδο της πίεσης της κυψέλης(cell pressure). Στα πειράματα που διεξήχθησαν, τα περιβάλλοντα(εκτός μεμβρανών) μέσα στον κοίλο κύλινδρο και έξω από τον κοίλο κύλινδρο επικοινωνούν μέσω οπής και δέχονται κοινή πίεση κυψέλης, ενώ γενικά η συσκευή παρέχει τη δυνατότητα διαχωρισμού της πίεσης εντός του κυλίνδρου(inner cell pressure) και εκτός του κυλίνδρου(outer cell pressure). Μία δεξαμενή αντιπίεσης(back pressure tank) πληρώνεται με απαερωμένο νερό και διαθέτει ελαστική φούσκα, η οποία δέχεται στο εσωτερικό της παροχή αέρα. Η παροχή αέρα και επομένως η πίεση στη δεξαμενή, καθορίζεται μέσω σερβοελεγκτή και σερβοβαλβίδας. Η δεξαμενή αντιπίεσης επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με το εσωτερικό περιβάλλον του δοκιμίου(εντός των μεμβρανών) και μ' αυτόν τον τρόπο γίνεται αυτοματοποιημένα ο έλεγχος της πίεσης του ύδατος πόρων του δοκιμίου, παράλληλα με τον έλεγχο της πίεσης της κυψέλης, κατά το στάδιο του κορεσμού. Η παροχή πεπιεσμένου αέρα που καταλήγει στη φούσκα της δεξαμενής αντιπίεσης διοχετεύεται επίσης και στην κορυφή της προχοϊδας μέτρησης των μεταβολών όγκου(volume change burette). Η προχοϊδα είναι γεμάτη με νερό μέχρι ενός σημείου και στη βάση της επικοινωνεί μέσω βαλβίδας με το εσωτερικό του δοκιμίου. Το νερό στη βάση της προχοϊδας και το νερό των πόρων του δοκιμίου έχουν μία διαφορά υδροστατικής πίεσης, η οποία μετράται με διαφορικό αισθητήρα πίεσης(differential pressure transducer). Με αυτόν τον τρόπο μετράται έμμεσα η μεταβολή του όγκου του νερού μέσα στην προχοϊδα και άρα ο όγκος του νερού που εκρέει από ή εισρέει στο δοκίμιο(στάδιο στερεοποίησης). Τα μεγέθη παραμόρφωσης που μετρώνται είναι η αξονική μετατόπιση και η γωνιακή μετατόπιση - στροφή. Η

μέτρηση της αξονικής μετατόπισης γίνεται με εξωτερικό αισθητήρα(dial gauge) και η μέτρηση της στροφής της κορυφής του δοκιμίου σε σχέση με τη βάση γίνεται με εσωτερικό αισθητήρα, που διαθέτει έναν κυκλικό δίσκο σε επαφή στατικής τριβής με το καπάκι του δοκιμίου. Όλοι οι αισθητήρες(transducers) βαθμονομήθηκαν στο εύρος των επιβαλλόμενων φυσικών μεγεθών.

5.1.2 Περιγραφή ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης στα μη σταθεροποιημένα εδάφη

Δοκίμια καθαρής άμμου M31 φορτίστηκαν σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες με σκοπό να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και η αντίσταση του σε ρευστοποίηση. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμφύσηση ξηρής άμμου σε απαερωμένο νερό και στη συνέχεια συμπυκνώθηκαν με συγκεκριμένο αριθμό κτύπων, ώστε να επιτευχθούν δομές σε διάφορες πυκνότητες. Με τη βοήθεια αντλίας κενού επιβλήθηκε αναρροφητική πίεση, διαμορφώθηκε μία αρχική ενεργός τάση ίση με 40 kPa και έγινε η κυκλοφορία απαερωμένου νερού στις σωληνώσεις και στο δοκίμιο. Στη συνέχεια αυξήθηκε η πίεση της κυψέλης, ενώ η πίεση του ύδατος πόρων μεταβλήθηκε από αρνητικές σε θετικές τιμές μέσω της δεξαμενής αντιπίεσης(back pressure tank). Η ενεργός τάση του δοκιμίου κατά τη μετάβαση από το σύστημα της αντλίας κενού στο σύστημα της δεξαμενής αντιπίεσης διατηρήθηκε στο εύρος 40-50 kPa. Ακολούθησε ο κορεσμός του δοκιμίου με παράλληλη αύξηση της πίεσης του ύδατος πόρων και της πίεσης της κυψέλης, η οποία επιτυγχάνεται αυτοματοποιημένα με χρήση δύο σερβοελεγκτών ώστε να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή ενεργός τάση ίση με 50 kPa. Ο έλεγχος της παραμέτρου B έδειξε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες από 0.97, με πίεση ύδατος πόρων στην αρχή της στερεοποίησης ίση με 300 kPa. Εν συνεχεία η στερεοποίηση του δοκιμίου έγινε διατηρώντας σταθερή την πίεση του ύδατος πόρων στα 300 kPa και αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την πίεση της κυψέλης μέχρι την τιμή των 600 kPa, ώστε να διαμορφωθεί αρχική ισότροπη ενεργός τάση $p_i' = 300$ kPa. Οι συνθήκες ισότροπης στερεοποίησης επιτυγχάνονται διατηρώντας, με τη βοήθεια σερβοελεγκτή, την αξονική δύναμη του εμβόλου σταθερή και ίση με μηδέν, έτσι ώστε η αξονική ολική τάση να ισούται με την πίεση της κυψέλης. Ο ρόλος του σερβοελεγκτή είναι να εξουδετερώνει διαρκώς τη μεταβλητή δύναμη της ανώσεως που ασκείται στον άξονα, λόγω της διαφοράς πίεσης μέσα και έξω από την κυψέλη. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται να περάσει αυτή η δύναμη, μέσω της κοχλίωσης του άξονα με το καπάκι, στο δοκίμιο. Η περίοδος ηρεμίας μετά την στερεοποίηση ήταν 90 min και έπειτα ακολούθησε η διάτμηση. Η ανακυκλική στρεπτική διάτμηση έγινε υπό αστράγγιστες συνθήκες, διατηρώντας την πίεση της κυψέλης σταθερή και την αξονική δύναμη του εμβόλου σταθερή και ίση με μηδέν. Η πίεση της κυψέλης μέσα και έξω από τον κοίλο κύλινδρο ήταν κοινή. Επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με συχνότητα $f=0.10$ Hz και ημιεύρος $\Delta\tau_{\theta z}$ (έλεγχος τάσεων). Τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη ήταν η ροπή στρέψης, το αξονικό φορτίο, η πίεση της κυψέλης, η πίεση του υγρού των πόρων, η γωνία στροφής, η αξονική μετατόπιση και ο χρόνος. Για να προσδιοριστεί η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση εκτελέστηκαν δοκιμές σε διάφορους λόγους ανακυκλικής τάσης $CSR = \Delta\tau_{\theta z} / p_i'$ και προσδιορίστηκαν οι κύκλοι φόρτισης $N_{1\%}$, $N_{2.5\%}$ και $N_{5\%}$ που απαιτούνται για την ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=1\%$, 2.5% και 5% , αντίστοιχα. Κριτήριο ρευστοποίησης θεωρήθηκε η ανάπτυξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους ίσης με $\gamma_{DA}=5\%$. Τα πειράματα σε δοκίμια παρόμοιας πυκνότητας μετά την στερεοποίηση ορίζουν μία καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση στον χώρο CSR - N. Τα σημεία της καμπύλης είναι οι οριακοί λόγοι ανακυκλικής τάσης $CSR_{lim} \equiv CRR$ και χωρίζουν το επίπεδο σε δύο περιοχές. Η μία περιοχή αποτελείται από ασφαλείς(για τη δεδομένη πυκνότητα εδάφους) συνδυασμούς N κύκλων με λόγο ανακυκλικής τάσης CSR, ενώ η άλλη ορίζει τους συνδυασμούς που προκαλούν ρευστοποίηση. Η εξίσωση της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει στατιστικά τα δεδομένα των πειραμάτων είναι φθίνουσα συνάρτηση δύναμης. Από αυτήν την καμπύλη για $N_{5\%}=15$ προκύπτει ο λόγος ανακυκλικής τάσης(cyclic stress ratio) που προκαλεί ρευστοποίηση σε 15

κύκλους φόρτισης και ορίζεται ως ο λόγος αντίστασης σε ρευστοποίηση CRR(cyclic resistance ratio), δηλαδή $CRR_{15}=CSR_{Dr}(N_{5\%}=15)$. Απεικονίζεται με αυτόν τον τρόπο μία εναλλακτική καμπύλη αντίστασης σε ρευστοποίηση στον χώρο $CRR_{15} - D_r$, η οποία είναι αύξουσας μορφής.

5.1.3 Περιγραφή ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης στα σταθεροποιημένα εδάφη

Δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 10% και 6% κατά βάρος φορτίστηκαν σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες με σκοπό να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και η αντίσταση του σε ρευστοποίηση. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρής άμμου στο υγρόλυμα και στη συνέχεια συμπυκνώθηκαν με συγκεκριμένο αριθμό κτύπων, ώστε να επιτευχθούν δομές σε διάφορες πυκνότητες. Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε υπό αεροστεγείς συνθήκες για χρονική διάρκεια κατά κανόνα 40 ωρών ή 44 ωρών μετά το πέρας του χρόνου γέλης, για υγρόλυμα περιεκτικότητας CS=10% ή 6%, αντίστοιχα. Ο χρόνος γέλης του υγρολύματος, πέραν του οποίου το ιξώδες αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό, είναι 10 ή 11 ώρες(βλέπετε Ενότητα 2.2.1). Δοκιμές εκτελέστηκαν και σε δοκίμια με μεγαλύτερο χρόνο ωρίμανσης, για να εξεταστεί η επίδραση αυτού του παράγοντα και για λόγους που σχετίζονται με τη στερεοποίηση των δοκιμίων και έχουν αναλυθεί στην Ενότητα 4.2.2. Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε πάνω σε τροποποιημένη βάση(pedestal) με μεταλλικό δακτύλιο εφοδιασμένο με μεταλλικά περύγια, ώστε να αποφευχθεί η αχρήστευση των πορολίθων από τη γελοποίηση του υγρολύματος. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται ο τραυματισμός του κοίλου δοκιμίου κατά τη μεταφορά από εξωτερικό καλούπι πάνω στη συσκευή, καθώς τα δοκίμια παρασκευάζονται πάνω στην ίδια τη συσκευή. Επίσης, δεν τοποθετούνται μεμβράνες εκ των υστέρων, οπότε αποφεύγεται και η παγίδευση αέρα μεταξύ δοκιμίου και μεμβράνης. Οι γραμμές της βάσης(pedestal) σφραγίστηκαν και έγινε κατάλληλη τροποποίηση των σωληνώσεων στο καπάκι(top cap) και στη συσκευή. Το καπάκι τοποθετείται μετά την ωρίμανση του δοκιμίου και διαθέτει πορολίθο με περύγια και δύο αντιδιαμετρικές σωλήνες. Η μία σωλήνα συνδέεται με τη γραμμή που οδηγεί στη δεξαμενή απαερωμένου νερού και περνάει από τον αισθητήρα πίεσης(pressure transducer) και η δεύτερη σωλήνα συνδέεται με τη δεξαμενή αναρρόφησης. Με αυτήν τη συνδεσμολογία επιτρέπεται η κυκλοφορία απαερωμένου νερού για την απομάκρυνση του αέρα από τις γραμμές, χωρίς το νερό να κυκλοφορήσει μέσα από το δοκίμιο. Ταυτόχρονα, ελέγχεται η ανθεκτικότητα του σταθεροποιημένου εδάφους έναντι διάλυσης της γέλης λόγω διάχυσης και όσμωσης, όταν έρθει σε επαφή(μέσω του πορολίθου) με ροή καθαρού νερού, όπως αναμένεται να συμβεί στη φύση(βλέπετε Ενότητα 2.2.4.2).

Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε αυτήν τη διαδικασία και αφαιρέθηκαν από τη συσκευή χωρίς να φορτιστούν σε διάτμηση, έδειξαν ότι η γέλη στη διεπιφάνεια δοκιμίου πορολίθου παρέμεινε ανεπηρέαστη από τη ροή νερού. Στη συνέχεια βυθίστηκαν σε νερό και αποθηκεύτηκαν. Ο έλεγχος ανά τακτά χρονικά διαστήματα δείχνει ότι η γέλη είναι ανθεκτική στην επαφή με νερό καθώς τα δοκίμια διατηρούν το σχήμα τους και τη σκληρότητά τους, ενώ δε διαλύονται εύκολα κατά τη τριβή. Το νερό του λουτρού αποθήκευσης ανανεώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να εξεταστεί πιθανή διάλυση της γέλης λόγω διάχυσης και όσμωσης κατά την επαφή με καθαρό νερό. Στην Ενότητα 2.2.4.2 έχει περιγραφεί το πώς η διάχυση και η οσμωτική πίεση μπορεί να αποσυνθέσουν ένα σταθεροποιημένο κυλινδρικό δοκίμιο άμμου, με γέλη πρώιμης ωρίμανσης στους πόρους του(βλέπετε Σχήμα 2.55). Τα σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά προχωρημένης ωρίμανσης είναι περισσότερο ανθεκτικά. Επίσης, η σταθεροποιημένη εδαφική μάζα στο πεδίο αναμένεται να έχει πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με τον κοίλο κύλινδρο, επομένως η απομάκρυνση των κολλοειδών μέσω διάχυσης δεν αναμένεται τόσο έντονη. Μη ανάλογη συμπεριφορά και μικρή ανθεκτικότητα παρουσίασαν δοκίμια τα οποία αφέθηκαν στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η εκτεθειμένη στον αέρα γέλη, είτε βρίσκεται σε καθαρή μορφή είτε βρίσκεται στους πόρους ενός

σταθεροποιημένου εδαφικού δοκιμίου, ξηραίνεται αποβάλλοντας ταχέως την υγρασία της και μετατρέπεται σε ένα στερεό που μοιάζει με πλαστικό. Το σταθεροποιημένο έδαφος με ξηραμένη πυριτία στους πόρους του είναι ιδιαίτερα ψαθυρό, τρίβεται και χάνει τη μορφή του πολύ εύκολα, ενώ διαλύεται όταν βυθιστεί στο νερό(βλέπετε Σχήματα 2.7 και 2.8).

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

Είναι πολύ σημαντικό, επομένως, να γίνεται καταγραφή της αντί – πίεσης(backpressure) των σταθεροποιημένων δοκιμίων, ακόμα και αν η πίεση του νερού που εκδηλώνεται στον μετρητή δεν είναι ταυτόσημη με την πίεση του νερού μέσα στους πόρους της γέλης και του δοκιμίου. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διασπαστικό υλικό που αποτελείται από τον στερεό ιστό πυριτικών αλυσίδων, ο οποίος περικλείει μία συνεχή υγρή φάση νερού(βλέπετε Ενότητες 2.2.1, 2.2.3, 2.2.4.2). Η στερεά φάση της γέλης, παρόλο το γεγονός ότι είναι πολύ αραιή(για CS=10% ή 6%), αλληλεπιδρά έντονα με την υγρή φάση, μέσω τριχοειδών δυνάμεων, απορροφητικής – προσροφητικής δράσης και τριβής κατά τη σχετική κίνηση(βλέπετε Ενότητα 2.2). Όταν ο στερεός σκελετός της γέλης είναι υγιής και καλύπτει κατά το δυνατόν ομοιόμορφα το εδαφικό πορώδες, παρεμποδίζονται οι μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται, για να εκδηλωθεί στον μετρητή η πίεση του υγρού μέσα στο πορώδες του δοκιμίου. Η εκδήλωση της πίεσης γίνεται με υστέρηση, όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα 5.1. Το σχήμα αυτό απεικονίζει την αργή εκδήλωση στον μετρητή, της πίεσης που έχει αναπτυχθεί μέσα στο υγρό των πόρων, όταν επιβάλλεται πίεση περισφιγξης στην κυψέλη, με συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Αντίθετα, ο τραυματισμός του στερεού σκελετού της γέλης, που προκαλείται κυρίως από τη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους, επιτρέπει την άμεση επικοινωνία του υγρού των πόρων με τον μετρητή πίεσης(βλέπετε Ενότητα 2.2.4.1). Η υστέρηση στην εκδήλωση της πίεσης γίνεται μικρότερη, όσο αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Το σχήμα παρουσιάζει την καταγραφή της υπέρ – πίεσης που αναπτύσσεται στο υγρό των πόρων ενός φυσικού και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου, τα οποία υπόκεινται σε αστράγγιστη ανακυκλική στρεπτική διάτμηση. Στο σταθεροποιημένο δοκίμιο υπάρχει μία υστέρηση της εκδήλωσης της πίεσης στους πρώτους κύκλους φόρτισης, η οποία περιορίζεται στους επόμενους κύκλους. Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει, επίσης, τις διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα δύο δοκίμια. Παρατηρούμε ότι το σταθεροποιημένο έδαφος, σε αντίθεση με το φυσικό, αναπτύσσει μεγάλες παραμορφώσεις από τους πρώτους κύκλους, όταν υπόκειται σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με έλεγχο τάσεων(stress control). Το

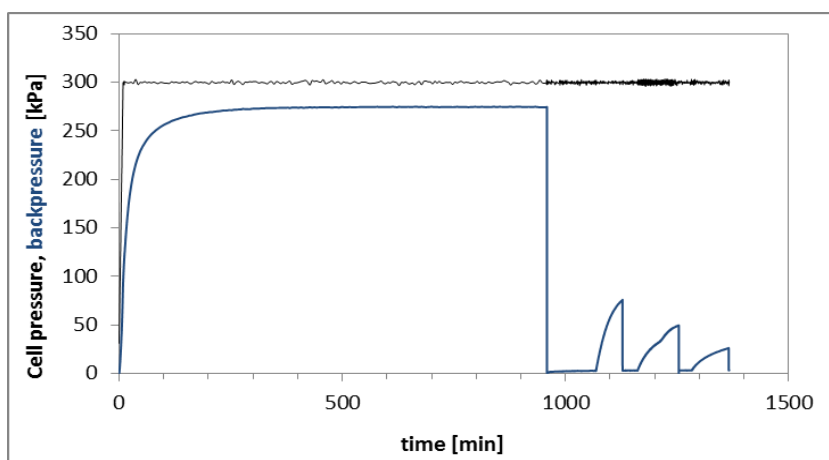
αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία(πχ. Gallagher 2000 [2], Gallagher and Mitcell [4], Kodaka et al. [5]), στην οποία αναφέρεται ότι το σταθεροποιημένο έδαφος παρουσιάζει πολύ μικρές παραμορφώσεις σε σχέση με το φυσικό. Μία πιθανή εξήγηση αυτής της συμπεριφοράς έχει δοθεί στην Ενότητα 2.2.5.1 και σχετίζεται με την ωρίμανση της γέλης μέσα στο πορώδες άτονων δοκιμίων. Αντίθετα, οι Kodaka et al. [5] άφησαν τη γέλη να ωριμάσει μέσα στο πορώδες του εδάφους που βρίσκεται υπό ενεργό τάση και εκτέλεσαν δοκιμές ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης. Οι παραμορφώσεις που εκδήλωσαν τα σταθεροποιημένα δοκίμια ήταν πολύ μικρότερες των φυσικών, για τις ίδιες ανακυκλικές τάσεις και πυκνότητες.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια, μετά το πέρας της περιόδου ωρίμανσης, υποβλήθηκαν σε ισότροπη στερεοποίηση. Η διαδικασία είναι ανάλογη με αυτήν που εκτελέστηκε στην τριαξονική συσκευή και έχει περιγραφεί στην Ενότητα 4.2.2. Τα Σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζουν έναν πρακτικό έλεγχο του βαθμού ολοκλήρωσης της αργής εκροής του νερού μέσα από το σταθεροποιημένο δοκίμιο. Η μέτρηση του όγκου εκροής αποφεύχθηκε, για να μην υπάρξει εκτεταμένη κυκλοφορία της κολλοειδούς ουσίας στις σωληνώσεις και γιατί απαιτούσε τροποποιήσεις στις γραμμές κυκλοφορίας, που θα καθιστούσαν τη συσκευή μη λειτουργική για τις κλασικές δοκιμές φυσικών εδαφών. Στην δοκιμή μονοτονικής τριαξονικής συμπίεσης με κωδικό SA10-1000-9, το σταθεροποιημένο δοκίμιο στερεοποιήθηκε με μέτρηση του όγκου του νερού που εκρέει. Τα Σχήματα 5.3 και 5.4 είναι αναπαραγωγή του Σχήματος 4.9 και απεικονίζουν συγκριτικά τις καμπύλες στερεοποίησης για τη φυσική και την σταθεροποιημένη άμμο. Όπως έχουμε περιγράψει στην Ενότητα 4.2.2, η καθαρή, φυσική άμμος αποβάλλει ταχύτατα το νερό από τους πόρους της, όταν αυξάνεται η πίεση περίσφιξης. Αντίθετα, η σταθεροποιημένη άμμος στραγγίζει πολύ αργά, αλλά μακροπρόθεσμα καταλήγει σε ογκομετρικές παραμορφώσεις αντίστοιχες της φυσικής άμμου.

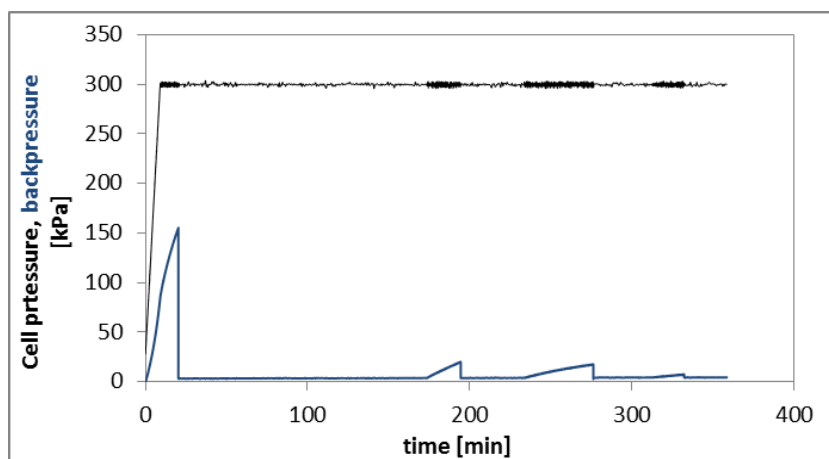
Μετά την στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων ακολούθησε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες, διατηρώντας την πίεση της κυψέλης σταθερή και την αξονική δύναμη του εμβόλου σταθερή και ίση με μηδέν. Η πίεση της κυψέλης μέσα και έξω από τον κοίλο κύλινδρο ήταν κοινή. Επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με συχνότητα $f=0.10$ Hz και ημιεύρος $\Delta\tau_{\theta z}$ (έλεγχος τάσεων). Τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη ήταν τα ίδια όπως και στην περίπτωση των φυσικών δοκιμίων και παρήχθησαν οι αντίστοιχες καμπύλες CSR - N και CRR - D_r. Ο μετρητής της αντί - πίεσης βρίσκεται εκτός δοκιμίου και γι' αυτό η πίεση του υγρού των πόρων αργεί να εκδηλωθεί. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η ανάπτυξη υπέρ - πίεσης του υγρού πόρων σε συνάρτηση με το χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31(κόκκινη καμπύλη) και ενός σταθεροποιημένου(CS=10%) δοκιμίου άμμου M31(μπλε καμπύλη). Τα δοκίμια είχαν σχετικές πυκνότητες $D_r=42.3\%$ και 38.0% αντίστοιχα, και ίδιους λόγους ανακυκλικής τάσης CSR=0.25. Παρατηρούμε ότι, το φυσικό δοκίμιο με νερό στους πόρους αναπτύσσει υπέρ - πίεση αμέσως μετά την έναρξη της διάτμησης, ενώ το σταθεροποιημένο δοκίμιο με γέλη στους πόρους παρουσιάζει μία υστέρηση μερικών κύκλων στην εκδήλωση της υπέρ - πίεσης. Εκφράζουμε την πεποίθηση ότι πρόκειται για υποβαθμισμένη εκδήλωση της πραγματικής πίεσης και όχι για μειωμένη πραγματική πίεση, όπως ακριβώς συμβαίνει στην ισότροπη συμπίεση του δοκιμίου, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Αν η πραγματική πίεση στο υγρό των πόρων ήταν μικρή, όταν η πίεση της κυψέλης αυξήθηκε στα 300 kPa, τότε η ισορροπία δυνάμεων απαιτεί το φορτίο να το έχει παραλάβει ο εδαφικός σκελετός. Ας δεχτούμε ότι η γέλη είναι όντως συμπιεστή(Towhata [7]) και επέτρεψε στους εδαφικούς κόκκους να αναδιαταχθούν, ώστε να παραλάβουν το φορτίο. Σε αυτήν την περίπτωση αδυνατούμε να εξηγήσουμε γιατί με την πάροδο του χρόνου το φορτίο περίσφιξης μεταβιβάζεται από τον εδαφικό σκελετό στην υγρή φάση, η οποία αυξάνει την πίεσή της. Ούτε μπορούμε να αιτιολογήσουμε γιατί η συμπιεστή γέλη στο εδαφικό πορώδες αποκτά μακροχρόνια τόσο υψηλή πίεση. Άλλος ένας λόγος που ενισχύει την τοποθέτηση ότι η πίεση του

υγρού των πόρων είναι υψηλή, αλλά δεν εκδηλώνεται αμέσως στον μετρητή, είναι οι μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις του σταθεροποιημένου εδάφους, στους πρώτους κύκλους, κατά τους οποίους η πίεση υγρού που καταγράφεται είναι χαμηλή.

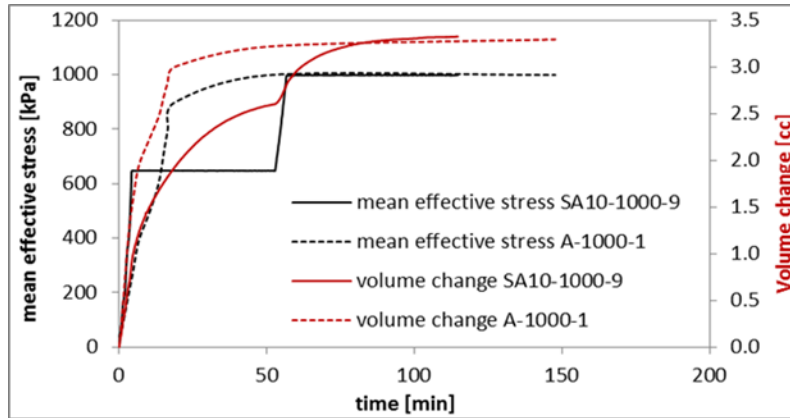
Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει την εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων ενός φυσικού και ενός σταθεροποιημένου δοκίμιου, που υποβάλλονται σε ανακυκλική διάτμηση. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο, παρά τις μεγάλες παραμορφώσεις και την υψηλή πίεση πόρων στους προχωρημένους κύκλους φόρτισης, δεν παρουσιάζει την κλασική κατάρρευση λόγω ρευστοποίησης. Η ευεργετική δράση της γέλης φαίνεται να έγκειται στο γεγονός ότι ενθυλακώνει και συγκρατεί σε μία σταθερή δομή τους κόκκους της άμμου, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται πλήρης κατάρρευση του εδαφικού σκελετού. Η ευεργετική αυτή δράση παραμένει ακόμα και όταν η διάτμηση καταστρέψει μεγάλο μέρος των δεσμών του ιστού της γέλης, αφού κανένα σταθεροποιημένο δοκίμιο δεν παρουσίασε πλήρη κατάρρευση, σε όσους κύκλους και αν φορτίστηκε.



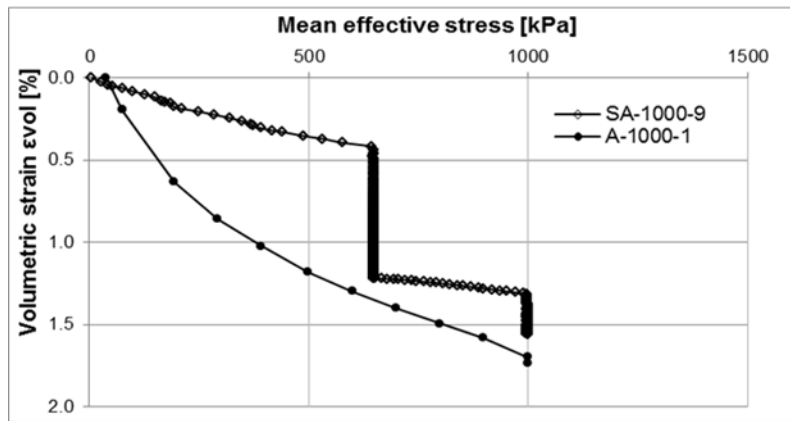
Σχήμα 5.1. Αργή εκδήλωση της πίεσης(πλήρες πλατό) του υγρού των πόρων στον μετρητή, όταν παρεμποδίζεται η στράγγιση και επιβάλλεται πίεση περίσφιγξης. Στη συνέχεια επιτρέπεται η στράγγιση και η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου CS=10% κοίλου δοκίμιου άμμου M31. Ο νέος ρυθμός ανάπτυξης πίεσης και η νέα τιμή του πλατό μετά τη στερεοποίηση είναι σαφώς μειωμένα.



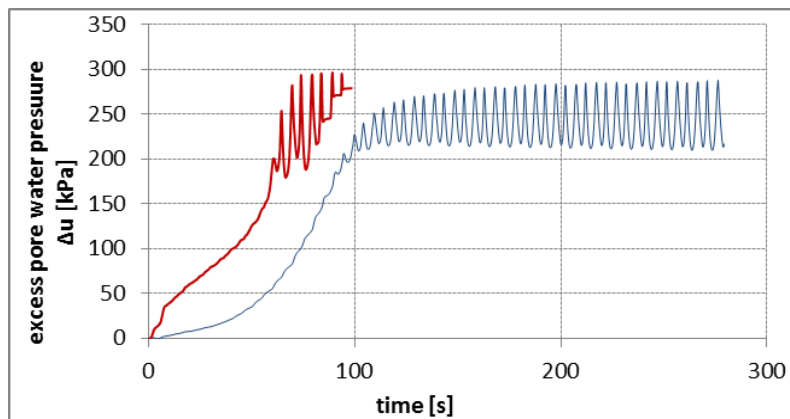
Σχήμα 5.2. Αργή εκδήλωση της πίεσης(μη πλήρες πλατό) του υγρού των πόρων στον μετρητή, όταν παρεμποδίζεται η στράγγιση και επιβάλλεται πίεση περίσφιγξης. Στη συνέχεια επιτρέπεται η στράγγιση και η στερεοποίηση του σταθεροποιημένου CS=10% κοίλου δοκίμιου άμμου M31. Όταν ο ρυθμός ανάπτυξης της πίεσης και η τιμή του πλατό ισορροπίας πάρουν μικρή τιμή θεωρείται ότι ολοκληρώθηκε η στερεοποίηση.



Σχήμα 5.3. Αργή εκροή του νερού από τους πόρους δοκιμίου σταθεροποιημένης άμμου M31(CS=10%), ηλικίας 815 ωρών, με ελεύθερη στράγγιση προς τον μετρητή μεταβολής όγκου, υπό σταθερή αντιπίεση 50 kPa. Σύγκριση με την ταχεία εκροή νερού μέσα από τη φυσική άμμο. Καταγραφή στην τριαξονική συσκευή.

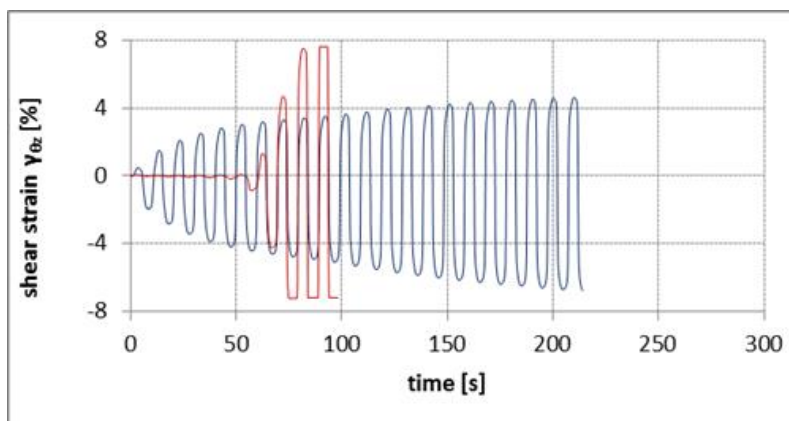


Σχήμα 5.4. Καμπύλη στερεοποίησης σταθεροποιημένης άμμου M31(CS=10%), ηλικίας 815 ωρών, με ελεύθερη στράγγιση προς τον μετρητή μεταβολής όγκου, υπό σταθερή αντιπίεση 50 kPa. Σύγκριση με την καμπύλη της φυσικής άμμου. Καταγραφή στην τριαξονική συσκευή.



Σχήμα 5.5. Ανάπτυξη υπέρ - πίεσης ρευστού πόρων σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31, σχετικής πυκνότητας $D_r=42.3\%$, με λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.25$ (κόκκινη καμπύλη) και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου

CS=10% άμμου M31, ηλικίας ωρίμανσης 115 ωρών , σχετικής πυκνότητας $D_r=38.0\%$, με λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.25$ (μπλε καμπύλη).



Σχήμα 5.6. Εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση ενός φυσικού δοκιμίου άμμου M31, σχετικής πυκνότητας $D_r=42.3\%$, με λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.25$ (κόκκινη καμπύλη) και ενός σταθεροποιημένου δοκιμίου CS=10% άμμου M31, ηλικίας ωρίμανσης 115 ωρών , σχετικής πυκνότητας $D_r=38.0\%$, με λόγο ανακυκλικής τάσης $CSR=0.25$ (μπλε καμπύλη).

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

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

Οι αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια άμμου M31 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.1 του παραρτήματος Π5-1. Ο πίνακας περιέχει τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμής και τον κωδικό της. Ο κωδικός A-300-5 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή μη σταθεροποιημένης, καθαρής άμμου M31(κατηγορία δοκιμών A), με αρχική ισότροπη ενεργό τάση $p'_i=300$ kPa και με αριθμό δοκιμής 5. Στο παράρτημα Π5-1 παρουσιάζονται, επίσης, τα διαγράμματα $\tau_{\theta z} - t$, $\gamma_{\theta z} - t$, $\epsilon_{zz} - t$, $\Delta u - t$, $\tau_{\theta z} - \gamma_{\theta z}$ και $\tau_{\theta z} - p'$. Τα δοκίμια χωρίζονται με βάση την πυκνότητά τους σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν δοκίμια με σχετική πυκνότητα στο εύρος $D_r=25.3 - 29.3\%$ και δείκτη πόρων $e=0.712 - 0.724$, και στη δεύτερη ανήκουν τα δοκίμια με $D_r=41.3 - 42.6\%$ και $e=0.672 - 0.676$. Στα δοκίμια που ανήκουν στην ίδια κατηγορία πυκνότητας επιβλήθηκε ημιτονοειδής διατμητική τάση με διάφορα πλάτη $\Delta \tau_{\theta z}$ και προέκυψαν λόγοι ανακυκλικής τάσης στο εύρος $CSR=0.12 - 0.25$. Το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει τις καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης $N_{5\%}$ που απαιτείται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$, για τις δύο κατηγορίες πυκνοτήτων. Οι καμπύλες είναι φθίνουσες και μετατοπίζονται προς τα δεξιά όταν η σχετική πυκνότητα αυξάνεται. Αυτό συνεπάγεται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος CSR τόσο λιγότεροι κύκλοι φόρτισης απαιτούνται για τη ρευστοποίηση, και για δεδομένο λόγο CSR η ρευστοποίηση πυκνότερων εδαφών απαιτεί περισσότερους κύκλους. Τα Σχήματα 5.8 και 5.9 απεικονίζουν για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων ξεχωριστά τις καμπύλες CSR - N, όπου N είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης $\gamma_{DA}=1\%$, 2.5% και 5% . Παρατηρούμε ότι οι 3 καμπύλες ταυτίζονται πρακτικά για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων, κάτι που σημαίνει ότι η μη σταθεροποιημένη άμμος αναπτύσσει στον ίδιο κύκλο παραμορφώσεις $\gamma_{DA}=1\%$, 2.5% και 5% , δηλαδή το δοκίμιο καταρρέει απότομα.

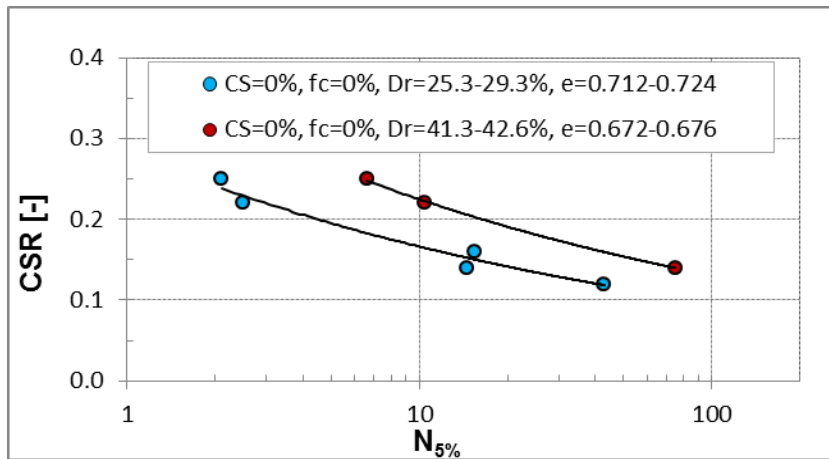
5.2.2 Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες στα σταθεροποιημένα εδάφη

Οι αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2.1 του παραρτήματος Π5-2. Ο πίνακας περιέχει τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμής και τον κωδικό της. Ο κωδικός SA10-300-5 σημαίνει ότι πρόκειται για δοκιμή σταθεροποιημένης CS=10%, καθαρής άμμου M31(κατηγορία δοκιμών SA10), με αρχική ισότροπη ενεργό τάση $p_i=300$ kPa και με αριθμό δοκιμής 5. Στο παράρτημα Π5-2 παρουσιάζονται, επίσης, τα διαγράμματα $\tau_{\theta z} - t$, $\gamma_{\theta z} - t$, $\varepsilon_{zz} - t$, $\Delta u - t$, $\tau_{\theta z} - \gamma_{\theta z}$ και $\tau_{\theta z} - p'$. Τα δοκίμια χωρίζονται με βάση την πυκνότητά τους σε τέσσερις κατηγορίες με σχετική πυκνότητα και δείκτη πόρων στο εύρος $D_r=8.7 - 11.3\%$ και $e=0.766 - 0.774$ για την πρώτη, $D_r=12.3 - 16.7\%$ και $e=0.750 - 0.763$ για τη δεύτερη, $D_r=25.0 - 28.0\%$ και $e=0.716 - 0.725$ για την τρίτη και $D_r=33.3 - 38.0\%$ και $e=0.686 - 0.700$ για την τέταρτη. Το Σχήμα 5.10 παρουσιάζει τις καμπύλες του λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης $N_{5\%}$ που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$, για τις τέσσερις κατηγορίες πυκνοτήτων. Παρατηρούμε ότι, για τις δύο καμπύλες των χαμηλότερων πυκνοτήτων υπάρχει σαφής διαχωρισμός, με την καμπύλη της υψηλότερης πυκνότητας να μετατοπίζεται προς τα δεξιά, ενώ οι δύο καμπύλες των υψηλότερων πυκνοτήτων πρακτικά ταυτίζονται. Η δέσμη των τεσσάρων καμπυλών συγκλίνει για μικρούς λόγους CSR και υψηλούς αριθμούς κύκλων $N_{5\%}$. Τα Σχήματα 5.11 έως 5.14 απεικονίζουν για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων ξεχωριστά τις καμπύλες CSR – N, όπου N είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την ανάπτυξη παραμόρφωσης $\gamma_{DA}=1\%$, 2.5% και 5% . Παρατηρούμε ότι οι 3 καμπύλες διαχωρίζονται για την κάθε κατηγορία πυκνοτήτων, δηλαδή το δοκίμιο αναπτύσσει προοδευτικά παραμόρφωση με αυξανόμενο εύρος. Τα Σχήματα 5.15 και 5.16 αφορούν σταθεροποιημένη άμμο M31 με CS=6% και απεικονίζουν τις καμπύλες CSR – N. Στο Σχήμα 5.17 γίνεται η σύγκριση των καμπύλων αντίστασης σε ρευστοποίηση για τη σταθεροποιημένη άμμο με CS=10% και 6% και για παρόμοιες πυκνότητες. Για τους μεγάλους λόγους ανακυκλικής τάσης CSR το σταθεροποιημένο έδαφος απαιτεί ουσιαστικά τον ίδιο αριθμό κύκλων για να αναπτύξει παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Για λόγο ανακυκλικής τάσης CSR=0.14, το σταθεροποιημένο δοκίμιο με CS=6% και σχετική πυκνότητα $D_r=35.6\%$ χρειάστηκε πλήθος κύκλων $N_{5\%}=159$ μέχρι τη ρευστοποίηση($\gamma_{DA}=5\%$), ενώ το δοκίμιο με CS=10% και σχετική πυκνότητα $D_r=33.3\%$ χρειάστηκε $N_{5\%}=49.5$ κύκλους. Το ποσοστό της πυριτιάς δεν φαίνεται να έχει έντονη επίδραση στην αντίσταση σε ρευστοποίηση, τουλάχιστον στους υψηλούς λόγους CSR. Οφείλουμε να είμαστε, όμως, επιφυλακτικοί προτού εξάγουμε συμπεράσματα, διότι εκτελέστηκαν μόνο 3 δοκιμές σε σταθεροποιημένη άμμο M31 με CS=6%.

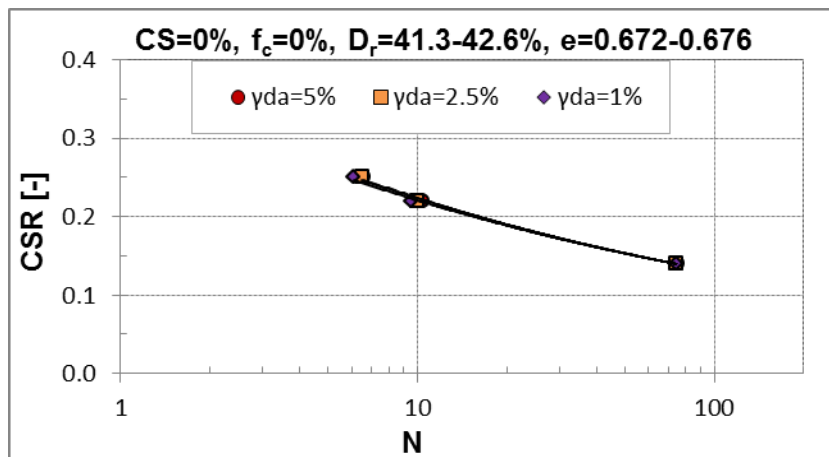
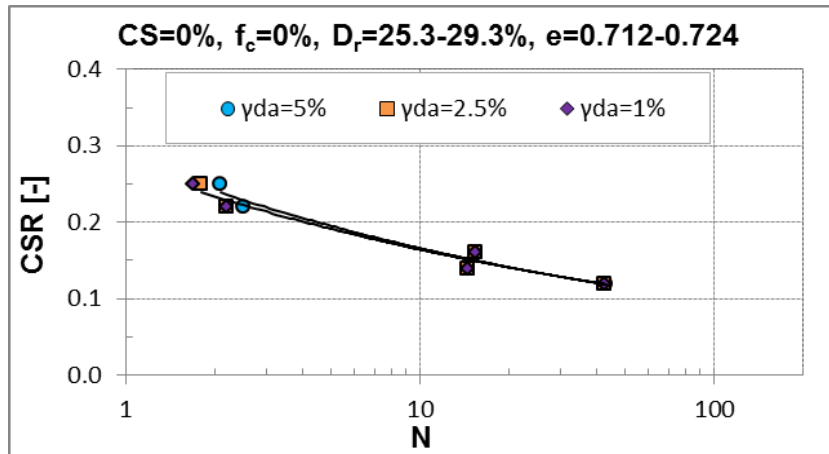
Τα Σχήματα 5.18 και 5.19 παρουσιάζουν τις καμπύλες CSR – $N_{5\%}$ για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα εδάφη παρόμοιων πυκνοτήτων. Στο εύρος πυκνοτήτων $D_r=25.0 - 28.0\%$ η καμπύλη των σταθεροποιημένων εδαφών είναι δεξιότερα της καμπύλης των μη σταθεροποιημένων, δηλαδή για δεδομένο λόγο CSR απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να αναπτυχθεί παραμόρφωση $\gamma_{DA}=5\%$ σε ένα σταθεροποιημένο δοκίμιο. Η εικόνα αντιστρέφεται για τις καμπύλες στο εύρος πυκνοτήτων $D_r=33.3 - 42.6\%$, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στις ελαφρώς μικρότερες πυκνότητες των σταθεροποιημένων εδαφών. Τα Σχήματα 5.20 και 5.21 παρουσιάζουν μία εναλλαγή των θέσεων των καμπυλών του Σχήματος 5.18, όταν στον οριζόντιο άξονα τοποθετηθεί το πλήθος των κύκλων που απαιτούνται για ανάπτυξη παραμόρφωσης $\gamma_{DA}=1\%$ και 2.5% . Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι τα σταθεροποιημένα εδάφη είναι ιδιαίτερα ευπαραμόρφωτα και εκδηλώνουν από τους πρώτους κιάλας κύκλους υψηλές παραμορφώσεις, που αυξάνονται προοδευτικά. Στο Σχήμα 5.6 μπορεί να γίνει φανερό ότι στο σταθεροποιημένο έδαφος απουσιάζουν οι πρώτοι κύκλοι μικρής παραμόρφωσης, οι οποίοι παρατηρούνται στο φυσικό έδαφος. Παραπέμπουμε τον αναγνώστη στην Ενότητα 2.2.5.1, όπου περιγράφεται ένας πιθανός μηχανισμός που μπορεί να οδηγήσει σε αυτήν τη

συμπεριφορά. Το σταθεροποιημένο έδαφος, μπορεί μεν να εκδηλώνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το φυσικό στους πρώτους κύκλους φόρτισης, συνεχίζει όμως να διατηρεί τη δομή του χωρίς να καταρρέει, για όσους κύκλους και αν συνεχιστεί η φόρτιση. Οι δοκιμές ουσιαστικά τερματίζονται διότι τα μετρητικά όργανα φτάνουν στα όρια τους. Το Σχήμα 5.22 απεικονίζει τις καμπύλες του λόγου αντίστασης σε ρευστοποίηση CRR_{15} σε συνάρτηση με τη σχετική πυκνότητα D_r για τα φυσικά και τα σταθεροποιημένα εδάφη. Οι δύο καμπύλες δεν φαίνεται να διαφέρουν ουσιαστικά.

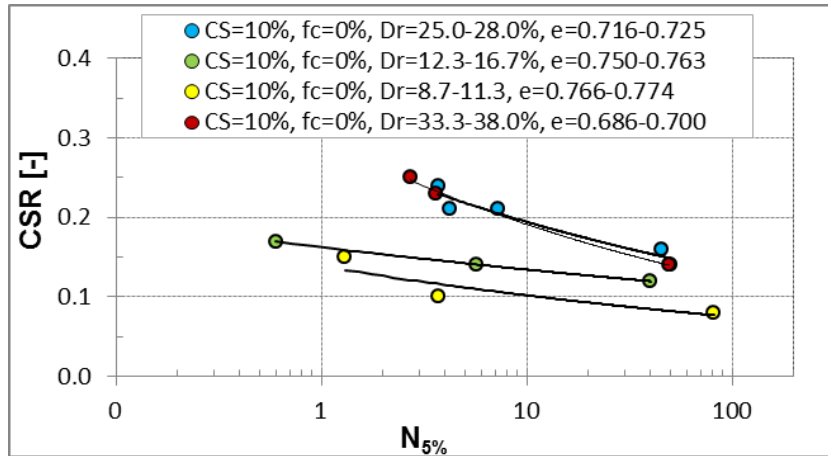
5.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5 (ΕΚΤΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ Π5-1 ΚΑΙ Π5-2):



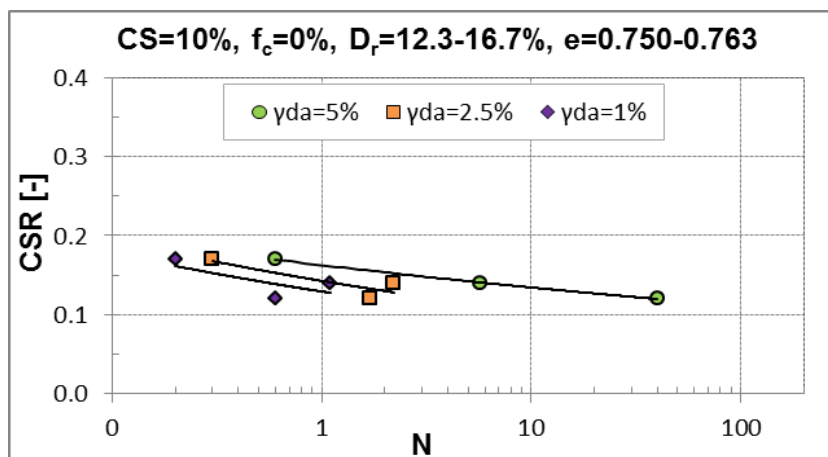
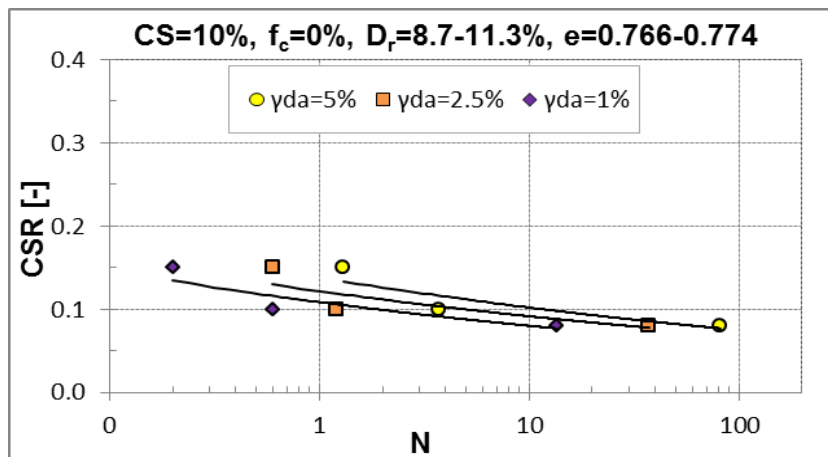
Σχήμα 5.7. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Μη σταθεροποιημένη καθαρή άμμος M31.



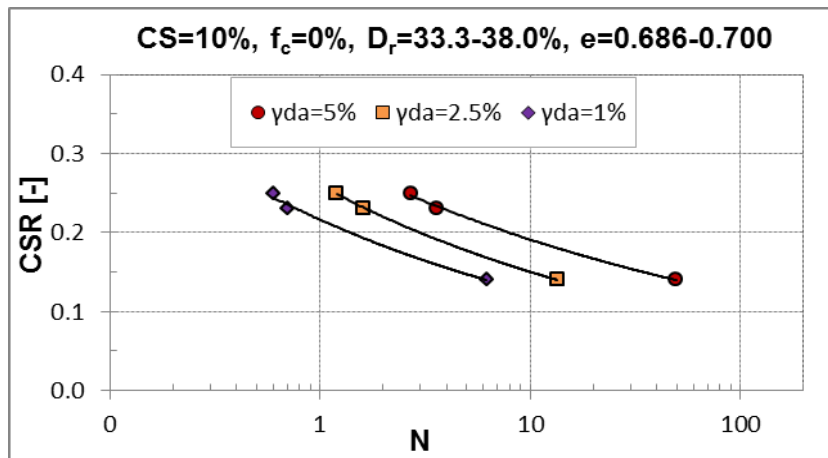
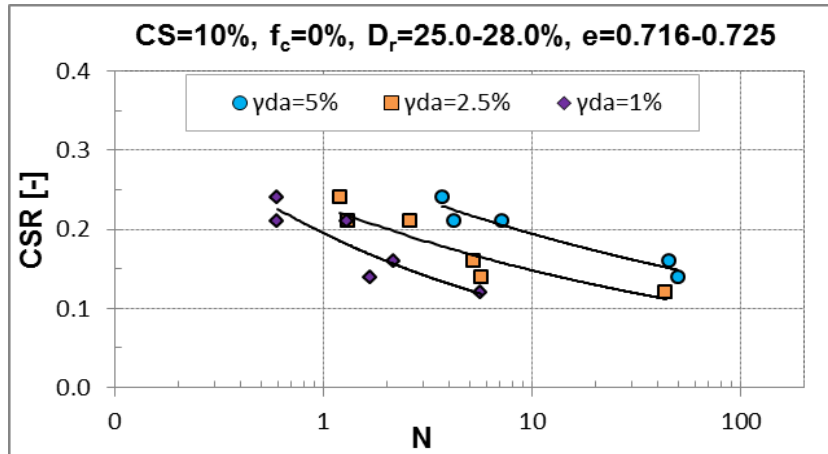
Σχήματα 5.8 και 5.9. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=1\%, 2.5\%$ και 5% . Μη σταθεροποιημένη καθαρή άμμος M31.



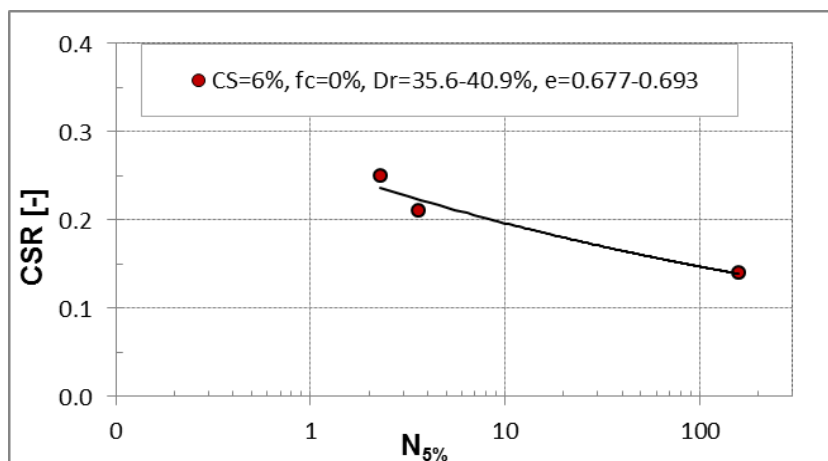
Σχήμα 5.10. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Σταθεροποιημένη CS=10% καθαρή άμμος M31.



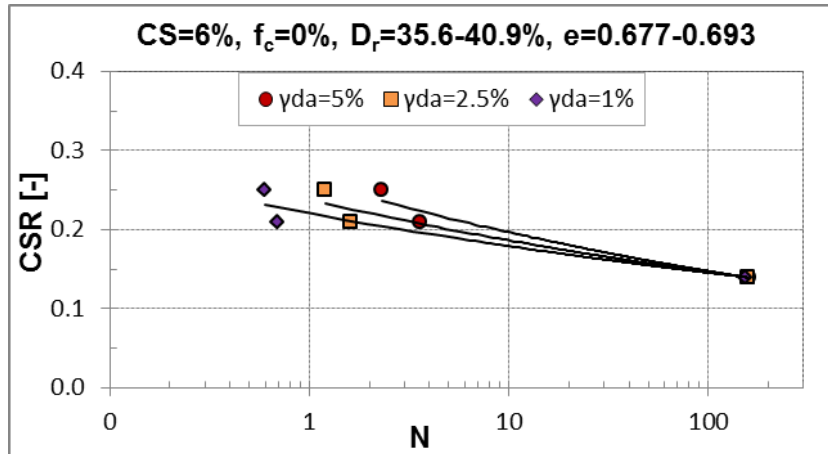
Σχήματα 5.11 και 5.12. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=1\%$, 2.5% και 5% . Σταθεροποιημένη CS=10% καθαρή άμμος M31.



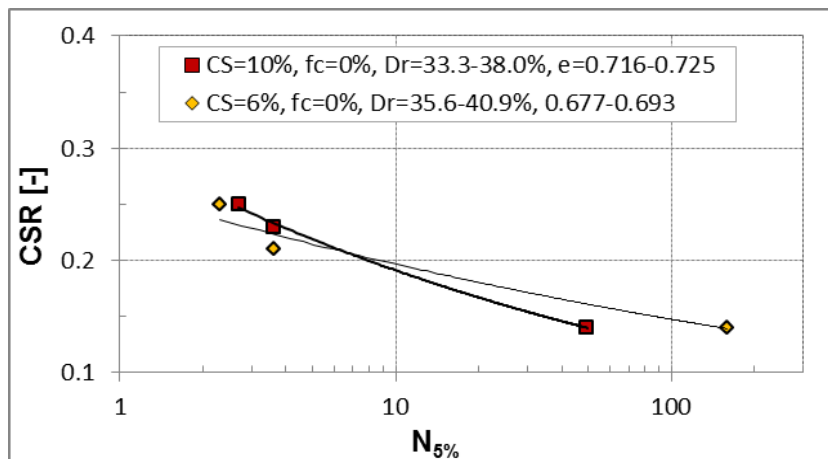
Σχήματα 5.13 και 5.14. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=1\%, 2.5\%$ και 5% . Σταθεροποιημένη $CS=10\%$ καθαρή άμμος M31.



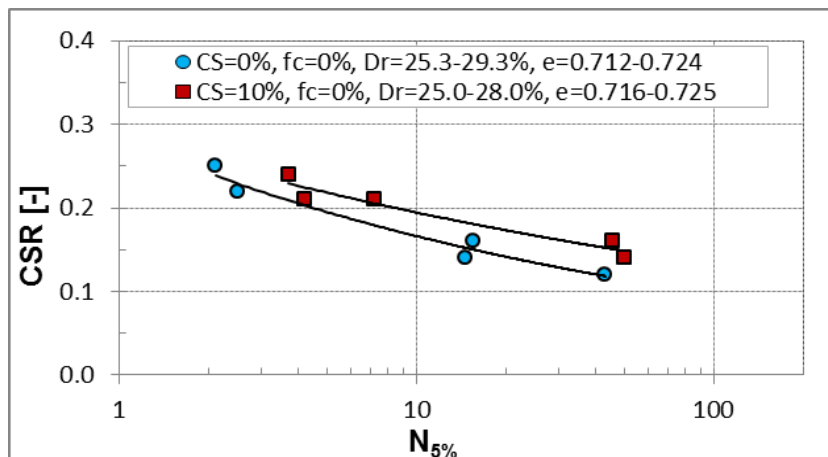
Σχήμα 5.15. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Σταθεροποιημένη $CS=6\%$ καθαρή άμμος M31.



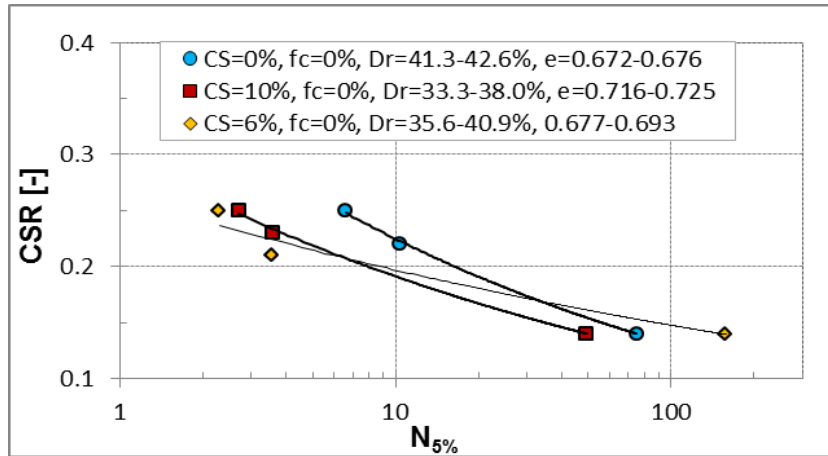
Σχήματα 5.16. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=1\%$, 2.5% και 5% . Σταθεροποιημένη $CS=6\%$ καθαρή άμμος M31.



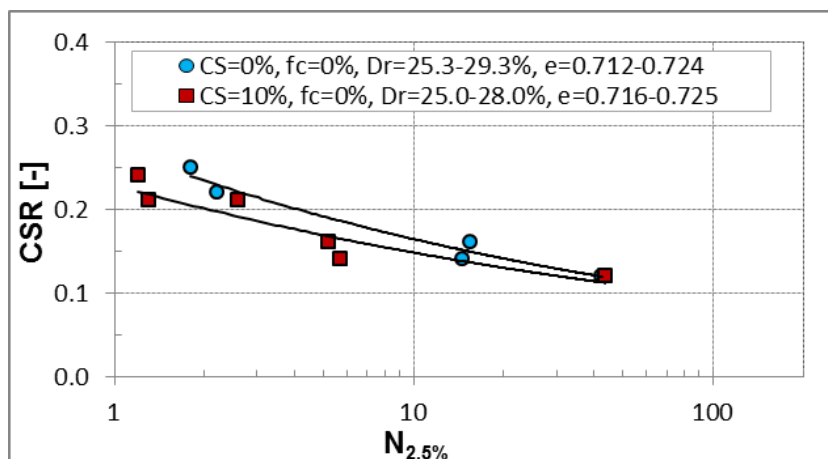
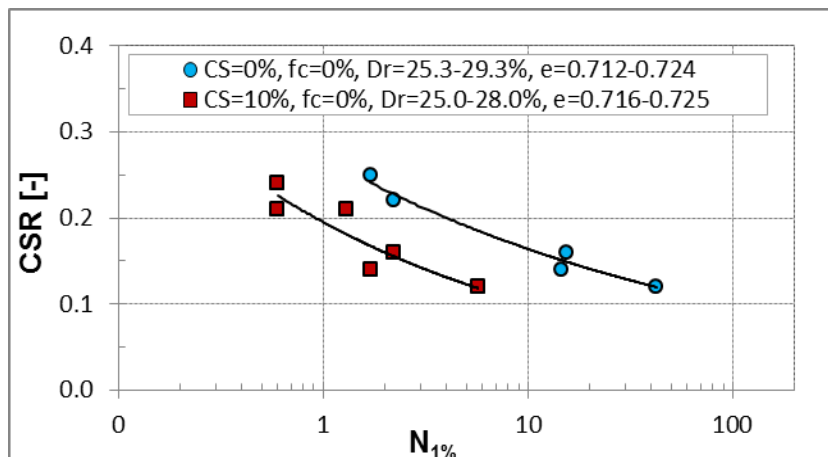
Σχήμα 5.17. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Σύγκριση σταθεροποιημένης καθαρής άμμου M31 με $CS=6\%$ και $CS=10\%$ για παρόμοιες πυκνότητες.



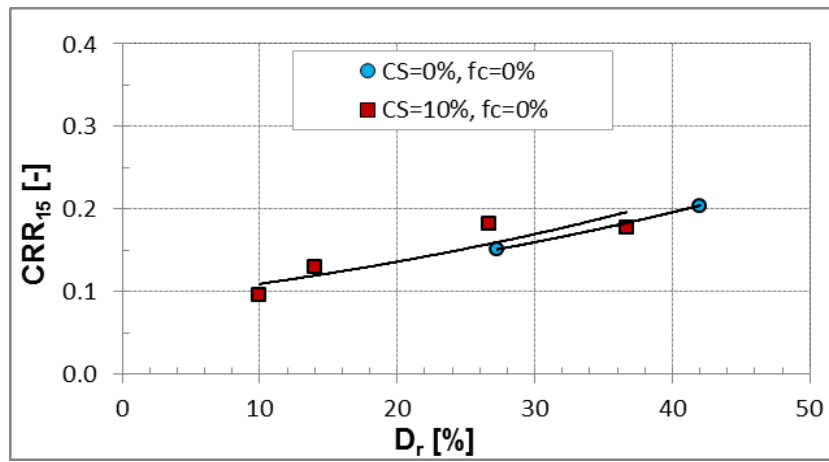
Σχήματα 5.18. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης $CS=10\%$ καθαρής άμμου M31 σε παρόμοιες πυκνότητες.



Σχήματα 5.19. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=6% και 10% καθαρής άμμου M31 σε παρόμοιες πυκνότητες.



Σχήματα 5.20 και 5.21. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αναπτυχθεί διαμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=1\%$ και 2.5% . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης CS=10% καθαρής άμμου σε παρόμοιες πυκνότητες.



Σχήμα 5.22. Λόγος αντίστασης σε ρευστοποίηση CRR_{15} σε συνάρτηση με τη σχετική πικνότητα D_r . Σύγκριση φυσικής και σταθεροποιημένης $CS=10\%$ καθαρής άμμου.

5.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5:

Α) ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- [1] Díaz-Rodríguez J. A., Antonio-Izarraras V. M., Bandini P., and López-Molina J. A. (2008), "Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout", *Canadian Geotechnical Journal*, 45: 1345-1355 (2008)
- [2] Gallagher P. M. (2000), "Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk", PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- [3] Gallagher P. M., Pamuk A., Abdoun T. (2007), "Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No.1, 0899-1561
- [4] Gallagher P. M., Mitchell J. K. (2002), "Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 1017-1026
- [5] Kodaka T., Oka F., Ohno Y., Takyu T., and Yamasaki N., "Modelling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand", *Geomechanics, ASCE (2005)*, 10.1061/40797(172)11
- [6] Spencer L., Rix G. J., Gallagher P. M. (2008), "Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, ASCE (2008)*, 10.1061/40975(318)101
- [7] Towhata I., "Geotechnical Earthquake Engineering", Springer, 2008

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ

6.1 ΓΙΑΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΛΚΥΣΤΙΚΗ Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΠΥΡΙΤΙΑ

Η βελτίωση των ρευστοποιήσιμων εδαφών γίνεται με ένα πλήθος μεθόδων και τεχνικών. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η *συμπύκνωση* (*densification*) των χαλαρών, κορεσμένων, μη συνεκτικών εδαφικών αποθέσεων. Η συμπύκνωση μπορεί να γίνει με επαναλαμβανόμενη πτώση βαρών από μεγάλο ύψος (*deep dynamic compaction*), με πρόκληση τεχνητών εκρήξεων μέσα στο έδαφος (*explosive compaction*) ή με πρόκληση δονήσεων μέσα σε γεωτρήσεις (*vibrocompaction*). Αρκετές φορές οι γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για τη διείσδυση του δονητή πληρώνονται με σπασμένο πετρώδες υλικό ή ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, σχηματίζοντας φρεάτια από πυκνό πετρώδες υλικό (*stone columns*). Άλλη μία μέθοδος που προηγείται της κατασκευής των υπέργειων υποδομών είναι η ανάμιξη του εδαφικού υλικού με τσιμέντο (*soil mixing*) με κάποιον μηχανικό τρόπο και η δημιουργία φρεατίων μίγματος εδαφικού υλικού και τσιμέντου (*soil cement columns*). Η βελτίωση του εδάφους κάτω από υφιστάμενα κτήρια ή υποδομές ευαίσθητες σε δονήσεις και καθιζήσεις γίνεται παραδοσιακά με τη διείσδυση μικρό – πασσάλων (*micro - piles*) στο έδαφος θεμελίωσης ή με την εισπίεση ενέματος υπό χαμηλή ή υψηλή πίεση (*permeation or jet grouting*). Οι μέθοδοι αυτοί χαρακτηρίζονται ως *τεχνικές υποθεμελίωσης* (*underpinning*). Στα Σχήματα 6.1 έως 6.4 απεικονίζονται μερικές από τις παραδοσιακές τεχνικές βελτίωσης των ρευστοποιήσιμων εδαφών.

Η *παθητική σταθεροποίηση* (*passive stabilization*) είναι μία εναλλακτική μεθοδολογία βελτίωσης των ρευστοποιήσιμων εδαφών. Το πλεονέκτημα της έναντι των άλλων μεθόδων είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη κάτω από υφιστάμενες υποδομές, χωρίς να προκαλέσει διατάραξη του εδάφους ή να παρεμποδίσει τη φυσιολογική λειτουργία των υποδομών (Gallagher 2000). Επίσης, δεν απαιτείται πρόσβαση κάτω από εκτεταμένες θεμελιώσεις. Η παθητική σταθεροποίηση βασίζεται στη γενική ιδέα της αργής εισπίεσης του σταθεροποιητικού παράγοντα (π.χ. υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας) μέσα στο έδαφος. Ο σταθεροποιητικός παράγοντας μεταφέρεται με τη φυσική υπόγεια ροή νερού στην επιθυμητή τοποθεσία. Αν δεν υφίσταται φυσική ροή ή είναι ασθενής, τότε η ροή ενισχύεται με τεχνητά πηγάδια παροχής και άντλησης, τα οποία εξασφαλίζουν χαμηλή υδραυλική κλίση. Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας έχει χαμηλό ιξώδες στην αρχή της εισπίεσης, γεγονός που βοηθά ιδιαίτερα τη διοχέτευση. Ρυθμίζοντας τους κατάλληλους παράγοντες, όπως το PH και η περιεκτικότητα σε αλάτι, το υγρόλυμα υφίσταται ελεγχόμενη μετατροπή σε γέλη. Η κολλοειδής πυριτία είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευσή της στο πεδίο όσο και μετά το πέρας αυτής. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα ανθεκτική στον χρόνο και στους φυσικοχημικούς παράγοντες (Persoff et al. 1999, Gallagher 2000). Η Gallagher (2000 p.27) αναφέρει ότι η γέλη πυριτίας που διατηρείται κορεσμένη αναμένεται να παραμείνει υγιής για 25 έτη στο πεδίο. Αναφέρει, επίσης, ότι αποτελεί μία λύση οικονομικά ελκυστική με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των παραδοσιακών μεθόδων βελτίωσης. Για παράδειγμα, για ένα έδαφος με πορώδες 35%, το κόστος σταθεροποίησης με υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιεκτικότητας 5%, 10% και 15% αναμένεται να είναι περίπου \$60, \$120 και \$180 ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους, αντίστοιχα (Gallagher 2000, p.27). Το αντίστοιχο κόστος για εισπίεση μικρό – τσιμέντου (*micro cement*) κυμαίνεται στο εύρος \$100 -

\$200(Gallagher 2000, p.21). Το Σχήμα 6.5 παρουσιάζει την τεχνική της παθητικής σταθεροποίησης των ρευστοποιήσιμων εδαφών, κάτω από υφιστάμενες κατασκευές.

6.2 ΥΓΡΟΛΥΜΑ ΚΑΙ ΓΕΛΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ

Το υγρόλυμα κολλοειδούς πυριτίας με την εμπορική ονομασία Ludox® SM(προϊόν της Sigma - Aldrich®) είναι μία υδάτινη διασπορά(water dispersion ή aquasol) διακριτών, σφαιρικών, συμπαγών σωματιδίων άμορφης πυριτίας, με μέγεθος στο κάτω όριο του κολλοειδούς εύρους. Τα σωματίδια έχουν διάμετρο ίση με 7 nm και ειδική επιφάνεια ίση με 345 m²/g. Η επιφάνεια των κολλοειδών σφαιρών είναι πλούσια σε ομάδες σιλανόλης Si-OH, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του υγρολύματος και της γέλης. Στη μορφή που διατίθεται στο εμπόριο, το υγρόλυμα πυριτίας Ludox® SM έχει συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO₂ 30% wt. και είναι σταθεροποιημένο σε βασικό pH=10, με χρήση του αλκαλικού παράγοντα οξειδίου του νατρίου Na₂O(άνυδρο υδροξείδιο του νατρίου NaOH). Το *ιξώδες(viscosity)* του σταθεροποιημένου πυκνού υγρολύματος είναι 5.5 cP. Η τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτήν του νερού, το οποίο ισούται με 1 cP σε συνήθη θερμοκρασία. Μετά την αραιώση του υγρολύματος, το *ιξώδες* του παίρνει ακόμα μικρότερη τιμή. Με τον όρο σταθεροποιημένο υγρόλυμα εννοούμε ότι οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις αποτρέπουν τη συσσωμάτωση των κολλοειδών σφαιριδίων και τη γελοποίηση, ενώ με τον όρο σταθεροποιημένο έδαφος εννοούμε το έδαφος που έχει στους πόρους του γέλη πυριτίας. Τα σωματίδια πυριτίας αποκτούν ηλεκτροστατικό φορτίο όταν οι επιφανειακές ομάδες σιλανόλης προσλαμβάνουν ή αποβάλλουν πρωτόνια H⁺ σε επαρκώς όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον. Το Σχήμα 6.6 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του σταθεροποιημένου υγρολύματος κολλοειδών σωματιδίων πυριτίας, σε αλκαλικό περιβάλλον και με απουσία αλάτων.

Το υγρόλυμα πυριτίας είναι ένα υγρό το οποίο, όταν αποσταθεροποιείται, γίνεται προοδευτικά περισσότερο παχύρευστο μέχρι που μετατρέπεται σε γέλη με ελαστικές ιδιότητες. Η γέλη σχηματίζεται όταν τα σωματίδια πυριτίας ενώνονται με *δεσμούς σιλοξάνης* Si-O-Si και δημιουργούν ένα τρισδιάστατο στερεό σκελετό από αλυσίδες πυριτίας. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που περικλείει νερό μέσα στον στερεό σκελετό. Ο στερεός ιστός, παρόλο που είναι αραιός όταν η περιεκτικότητα σε πυριτία είναι χαμηλή, αλληλεπιδρά έντονα με την υγρή φάση. Η αλληλεπίδραση γίνεται με τριχοειδείς δυνάμεις, με απορροφητική – προσροφητική δράση και με τριβή κατά τη σχετική κίνηση. Αν η γέλη υποβληθεί σε τάσεις πέραν ενός ορίου, ορισμένοι δεσμοί πυριτίας καταστρέφονται, η παγιδευμένη υγρή φάση απελευθερώνεται και μπορεί να προκύψει μετάπτωση της ελαστικής γέλης σε υγρό υψηλού *ιξώδους*. Η τραυματισμένη γέλη μπορεί υπό συνθήκες να ανακάμψει και να αποκτήσει ξανά μία στιβαρή, ελαστική δομή. Το Σχήμα 6.7 παρουσιάζει τον σχηματισμό ενός δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si μεταξύ δύο σωματιδίων πυριτίας, κατά *τη χημική αντίδραση της συμπύκνωσης(condensation reaction)*. Η συμπύκνωση οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή ενός μορίου νερού.

Οι Sacks και Sheu(1986, 1987) μελέτησαν την *ιξωδοελαστική συμπεριφορά(viscoelastic behavior)* του υγρολύματος και της γέλης πυριτίας. Χρησιμοποίησαν ένα *κυλινδρικό ιξωδόμετρο στενού διάκενου(narrow gap cylindrical viscometer)* για να προκαλέσουν ταλαντώσεις με μεταβλητή συχνότητα, σε ένα υγρόλυμα με πολύ αργό ρυθμό γελοποίησης. Μέτρησαν το *μιγαδικό μέτρο διάτμησης(complex shear modulus)*, το οποίο έχει για πραγματικό μέρος, το *μέτρο αποθήκευσης G'(storage modulus)* και για φανταστικό μέρος, το *μέτρο απώλειας G''(loss modulus)*. Καθώς το φαινόμενο *της γελοποίησης(gelation)* προοδεύει, το *ιξώδες* και η κατανάλωση ενέργειας αυξάνονται, μέχρι που το παχύρευστο υγρό μεταπίπτει σε ελαστική γέλη. Η γέλη παύει να ρέει αλλά μπορεί να τραυματιστεί και να αποκτήσει ξανά ιδιότητες ρευστού. Οι Sacks και Sheu κατάφεραν να ορίσουν με απόλυτο τρόπο τον *χρόνο γέλης(gel time)*, ανεξάρτητα από τους παράγοντες που

επηρεάζουν τον ρυθμό γέλης εντοπίζεται λίγο μετά από το μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη της *εφαπτομένης απωλειών* $\tan\delta=G'' / G'$ (*loss tangent*) σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η έρευνα των Sacks και Sheu κατέληξε και σε άλλα σημαντικά συμπεράσματα. Το υγρόλυμα αυξάνει το ιξώδες του λόγω του σχηματισμού συσσωματωμάτων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με την υγρή φάση. Το νερό που παγιδεύεται μέσα στα συμπλέγματα πυριτίας δεν δύναται να εκδηλώσει ροή και το υγρόλυμα γίνεται μακροσκοπικά περισσότερο παχύρρευστο. Σε χαμηλές τιμές ιξώδους η συμπεριφορά ακολουθεί το μοντέλο του *Νευτώνειου υγρού* (*Newtonian liquid*), δηλαδή το ιξώδες είναι σταθερό και ανεξάρτητο του *ρυθμού παραμόρφωσης* (*strain rate*). Όταν το ιξώδες αυξηθεί αρκετά, τα συμπλέγματα σωματιδίων έχουν αποκτήσει μεγάλο μέγεθος και σπάνε από την επιβαλλόμενη διάτμηση. Το αποτέλεσμα είναι το υγρόλυμα να υπόκειται *διατμητική λέπτυνση* (*shear thinning*), δηλαδή το ιξώδες να μειώνεται όταν αυξάνεται ο *ρυθμός διάτμησης* (*shear rate*). Με την πάροδο του χρόνου τα ανεπτυγμένα συμπλέγματα σωματιδίων είναι πάρα πολλά και ο ενεργός όγκος που επηρεάζουν είναι μεγάλος. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ των συμπλεγμάτων εκτινάσσεται λόγω *γεωμετρικών συνθηκών* και ακολουθεί μία ραγδαία αύξηση στον ρυθμό σχηματισμού δεσμών. Οι ελαστικές ιδιότητες του στερεού ιστού αυξάνουν ταχύτερα από το ιξώδες και η εφαπτομένη απωλειών διέρχεται από ένα μέγιστο στο διάγραμμα με τον χρόνο. Ο στερεός σκελετός της γέλης πυκνώνει και μπορεί να παραλάβει διατμητική τάση χωρίς να ρέει. Η αύξηση της τάσης μπορεί να τραυματίσει τον ιστό και να προκληθεί ξανά ροή. Τα Σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της έρευνας των Sacks και Sheu.

Η μελέτη της *ρεολογικής συμπεριφοράς* (*rheological behavior*) του υγρούλυματος κολλοειδούς πυριτίας είναι καθοριστικής σημασίας, διότι η επιτυχία της παθητικής σταθεροποίησης κρίνεται από τη δυνατότητα ομοιόμορφης διοχέτευσης του σταθεροποιητή στο έδαφος. Η διοχέτευση του υγρούλυματος γίνεται υπό χαμηλή υδραυλική κλίση και διαρκεί για όσο χρόνο το ιξώδες έχει χαμηλή τιμή. Η Gallagher 2000 και οι συνεργάτες στο ερευνητικό Θαλής – Π.Θ. (MIS 375618) μελέτησαν την ποσοτική επίδραση διαφόρων παραγόντων πάνω στην προοδευτική αύξηση του ιξώδους του υγρούλυματος και στον χρόνο γέλης. Ο χρόνος γέλης σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές αντιστοιχίζεται για πρακτικούς λόγους σε μία τιμή ιξώδους ή συνδέεται με τον σχηματισμό στιβαρής γέλης. Θεωρητικά, κάθε παράγοντας που προάγει τις βίαιες συγκρούσεις μεταξύ των κολλοειδών σφαιρών και εξασθενεί τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις, επιδρά καταλυτικά στον σχηματισμό της γέλης. Η υψηλή περιεκτικότητα σε κολλοειδή σωματίδια αυξάνει την πιθανότητα συγκρούσεων. Η υψηλή θερμοκρασία καθιστά τα σωματίδια περισσότερο κινητικά και τις συγκρούσεις πιο βίαιες. Οι δύο αυτοί παράγοντες αναμένεται να επιδρούν μονότονα στον χρόνο γέλης. Άλλος ένας παράγοντας με μονότονη επίδραση προβλέπεται να είναι η παρουσία αλάτων στο υγρόλυμα. Τα άλατα διαλύονται σε ιόντα τα οποία *επισκιάζουν* (*screen*) την επιφανειακή ηλεκτρικά φορτισμένη στρώση των σωματιδίων. Με αυτόν τον τρόπο εξασθενούν τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις και προάγουν τον σχηματισμό δεσμών. Η επίδραση του PH είναι περισσότερο σύνθετη και όχι μονότονη. Στις χαμηλές τιμές $\text{PH} < 5$ οι ομάδες σιλανόλης Si-OH στην επιφάνεια των κολλοειδών σφαιρών προσλαμβάνουν πρωτόνια H^+ και φορτίζονται θετικά. Οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις παρακωλύουν τον σχηματισμό δεσμών και επιμηκύνουν τον χρόνο γέλης. Σε ενδιάμεσες τιμές $5 < \text{PH} < 7$, το θετικό επιφανειακό ηλεκτροστατικό φορτίο μειώνεται και οι ομάδες υδροξυλίου OH του υγρούλυματος λειτουργούν καταλυτικά στην αντίδραση της συμπύκνωσης (Bergna and Roberts, p.748). Ο χρόνος γέλης παρουσιάζει ελάχιστο σε αυτό το εύρος τιμών PH. Σε αλκαλικά περιβάλλοντα με $\text{PH} > 7$, οι επιφανειακές ομάδες σιλανόλης Si-OH αποβάλλουν πρωτόνια H^+ και φορτίζονται αρνητικά, σταθεροποιώντας ξανά το υγρόλυμα.

Οι παραπάνω θεωρητικές προβλέψεις επαληθεύθηκαν πειραματικά από την Gallagher 2000, τους συνεργάτες στο ερευνητικό και τους Hunt et al. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό κατέστρωσαν καμπύλες εξέλιξης του δυναμικού ιξώδους μ σε συνάρτηση με τον χρόνο t , για υγρολύματα με διαφορετικές:

- συγκεντρώσεις CS% wt. κατά βάρος του κολλοειδούς παράγοντα SiO₂,
- τιμές κανονικότητας N λόγω παρουσίας αλάτων NaCl,
- τιμές pH.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποίησαν ήταν το περιστροφικό ιξωδόμετρο Brookfield LVDV-II+PX(Σχήμα 2.14) και το υδατόλουτρο Brookfield TC-150(Σχήμα 2.15), με το οποίο διατηρούταν σταθερή θερμοκρασία 25°C. Τα Σχήματα 6.10, 6.11 και 6.12 παρουσιάζουν συνοπτικά τα αποτελέσματα της έρευνας των συνεργατών, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της Gallagher 2000. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι συνεργάτες ήταν τα εξής:

- το υγρόλυμα μετά την αραίωση από περιεκτικότητα πυριτίας 30% wt.(αρχικό προϊόν) σε τιμές 5%, 7.5% και 10%(οικονομικά ελκυστικές) έχει μία αρχική τιμή ιξώδους λίγο μεγαλύτερη εκείνης του νερού(1cP). Το ιξώδες αυξάνεται ήπια και σχεδόν γραμμικά μέχρι τιμές 3 έως 6 cP και έπειτα αυξάνεται ραγδαία(εκθετικά), καθώς το υγρόλυμα μετατρέπεται ταχύτατα σε γέλη. Η συμπεριφορά αυτή είναι γενική και παρατηρείται για όλους τους συνδυασμούς CS(%) – N – pH,
- η επίδραση της περιεκτικότητας πυριτίας είναι μονότονη, δηλαδή η αύξηση του CS(%) οδηγεί πάντα σε μείωση του χρόνου γέλης για τον ίδιο συνδυασμό N – pH,
- η επίδραση της περιεκτικότητας αλάτων είναι μονότονη, δηλαδή η αύξηση του N οδηγεί πάντα σε μείωση του χρόνου γέλης για τον ίδιο συνδυασμό CS(%) – pH,
- η επίδραση του pH δεν είναι μονότονη, δηλαδή ο χρόνος γέλης φαίνεται να παρουσιάζει ελάχιστο σε κάποιο εύρος τιμών pH και να αυξάνεται για τιμές pH μικρότερες ή μεγαλύτερες, για δεδομένο συνδυασμό CS(%) – N,
- οι χρόνοι γέλης που μετρήθηκαν κυμαίνονται από μερικές ώρες μέχρι περίπου έναν μήνα, καλύπτοντας όλες τις περιπτώσεις πρακτικής εφαρμογής.

Η αντίδραση της συμπύκνωσης και η δημιουργία νέων δεσμών σιλοξάνης συνεχίζεται για πάρα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μετά από τον σχηματισμό του πρώιμου στερεού ιστού της γέλης. Η διαδικασία ονομάζεται *ωρίμανση(aging)* και οδηγεί στην πύκνωση του στερεού ιστού. Πολλά σωματίδια πυριτίας αιωρούνται στην υγρή φάση για παρατεταμένο χρονικό διάστημα μέχρι να προσκολληθούν στον βασικό ιστό. Ένας ακόμη παράγοντας που ευνοεί τη δημιουργία νέων δεσμών πυριτίας είναι η συστολή της στερεάς φάσης, που προκαλείται κατά την αντίδραση της συμπύκνωσης. Η επιφανειακή πυκνότητα ενεργών ομάδων σιλανόλης Si-OH είναι τουλάχιστον 4.6 ομάδες ανά τετραγωνικό νανόμετρο. Κάθε σύγκλιση μεταξύ σωματιδίων πυριτίας που δεν εμφανίζουν υψηλό ηλεκτροστατικό φορτίο προκαλεί τον σχηματισμό ενός νέου δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si. Με αυτόν τον τρόπο η συστολή λόγω συμπύκνωσης προκαλεί περαιτέρω συμπύκνωση. Το φαινόμενο σταματά όταν ο στερεός ιστός γίνει αρκετά στιβαρός και πυκνός. Η υψηλή στιβαρότητα δυσκολεύει την συρρίκνωση και η μεγάλη πυκνότητα παρεμποδίζει την απομάκρυνση του νερού, ώστε να εκδηλωθεί η συρρίκνωση.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η κορεσμένη γέλη πυριτίας είναι ένα διφασικό υλικό. Αν η γέλη εκτεθεί σε ξηρές συνθήκες αποβάλλει την υγρασία της και υπόκειται *ξηρανση(drying)*. Στα αρχικά στάδια ξήρανσης, οι τριχοειδείς δυνάμεις στην επιφάνεια της γέλης διατηρούν βυθισμένο τον στερεό ιστό μέσα στην υγρή φάση. Σε προχωρημένο στάδιο ξήρανσης εμφανίζονται πόροι γεμάτοι με αέρα

κοντά στην επιφάνεια της γέλης(Brinker and Scherer, p.458-459). Η ακόρεστη γέλη μεταπίπτει με αυτόν τον τρόπο σε τριφασικό υλικό. Η ύπαρξη αέρα μέσα στους ακόρεστους πόρους, ίσως δικαιολογεί την τοποθέτηση της βιβλιογραφίας περί υψηλής συμπίεσότητας της γέλης(Towhata). Αν αποβληθεί όλη η ελεύθερη χημικά υγρή φάση, παραμένει μία ξηρό – γέλη(xerogel) που αποτελείται από τον στερεό σκελετό πυριτίας και τον αέρα μέσα στους πόρους. Μία ποσότητα νερού παραμένει χημικά δεσμευμένη. Είναι πολύ σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η συστολή λόγω ξήρανσης οδηγεί σε εξαιρετικά έντονη σύγκλιση των στερεών αλυσίδων πυριτίας. Σχηματίζονται με αυτόν τον τρόπο πάρα πολλοί νέοι δεσμοί σιλοξάνης και η γέλη μεταπίπτει σε ένα σκληρό, πορώδες, ψαθυρό στερεό, το οποίο μοιάζει με πλαστικό. Η Gallagher (2000 p.27) παραθέτει τη διατύπωση του Whang(1995), ότι η κολλοειδής πυριτία θρυμματίζεται όταν ξηραίνεται απότομα, ενώ είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στον χρόνο, αν διατηρείται κορεσμένη. Η ακραία διακύμανση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μπορεί, επομένως, να βλάψει μία σταθεροποιημένη εδαφική μάζα, αν επικρατήσουν συνθήκες έντονης ξηρασίας. Το Σχήμα 6.13 παρουσιάζει τα στάδια ξήρανσης της γέλης κολλοειδούς πυριτίας.

Οι *μηχανισμοί μεταφοράς(transport mechanisms)* των σωματιδίων κολλοειδούς πυριτίας είναι ιδιαίτερα κρίσιμοι για την επιτυχία της μεθόδου παθητικής σταθεροποίησης ρευστοποιήσιμων εδαφών. Οι Gallagher και Lin(2009) και οι συνεργάτες στο ερευνητικό εκτέλεσαν δοκιμές εισπίεσης του υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας, σε στήλες κορεσμένου εδαφικού υλικού. Η πρώτη ομάδα ερευνητών εκτέλεσε δοκιμές εισπίεσης σε στήλες ύψους 0.90 m. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποίησαν ήταν άμμος Nevada No. 120, άμμος Ottawa 20/30 και ιλυώδης άμμος 5% και 10% wt. Το αραιωμένο υγρόλυμα είχε περιεκτικότητα σε κολλοειδή πυριτία 5% wt. Η εισπίεση έγινε υπό χαμηλές υδραυλικές κλίσεις(0.04 – 0.18), με εισροή από τη βάση της στήλης και εκροή από την κορυφή. Σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος της στήλης υπήρχαν σημεία δειγματοληψίας υγρού. Στα δείγματα υγρού που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς προωθείτο το χρωματισμένο μέτωπο του υγρολύματος, έγιναν μετρήσεις της περιεκτικότητας των ιόντων χλωρίου, της πυριτίας, του PH και του ιξώδους. Οι ίδιες μετρήσεις έγιναν και στο παρεχόμενο υγρόλυμα. Με την τεχνική αυτήν προσδιορίζεται η περιεκτικότητα της πυριτίας μέσα στο εδαφικό πορώδες, καθώς με την πάροδο του χρόνου το υγρόλυμα αντικαθιστά το νερό. Μετά το πέρας των δοκιμών διοχέτευσης της πυριτίας και του σχηματισμού γέλης αποσπάστηκαν δοκίμια σταθεροποιημένου εδάφους από τις στήλες, ώστε να προσδιοριστεί η αντοχή τους σε ανεμπόδιση θλίψη. Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη είναι ένας έμμεσος τρόπος ελέγχου της επιτυχίας της εισπίεσης.

Οι Gallagher και Lin(2009) συμπέραναν ότι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μεταφορά υγρολύματος στους πόρους του εδάφους είναι το ιξώδες. Στις δοκιμές που εκτέλεσαν, το υγρόλυμα έπαψε να κινείται υπό υδραυλική κλίση 0.04, όταν το ιξώδες του αυξήθηκε πάνω από την τιμή 4 cP. Ιδιαίτερα προβλήματα αντιμετώπισαν με την εισπίεση πυριτίας μέσα από δοκίμια ιλυώδους άμμου. Οι ερευνητές αποδίδουν τα προβλήματα αυτά στην χαμηλή διαπερατότητα του εδάφους. Ο γράφων εκφράζει την προσωπική πεποίθηση ότι η παρουσία λεπτόκοκκου υλικού επηρεάζει τον μηχανισμό συμπύκνωσης και επιταχύνει τον σχηματισμό της γέλης, γύρω από την λεπτόκοκκη φάση. Επίσης, προκαλεί ανομοιόμορφη πυκνότητα των πυριτικών αλυσίδων μέσα στους εδαφικούς πόρους. Ένα ακόμα συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι Gallagher και Lin είναι ότι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς της πυριτίας είναι η *μεταγωγή(advection)*, ενώ η *υδροδυναμική διασπορά(hydrodynamic dispersion)* παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Η ροή του υγρολύματος μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy, δεδομένου ότι λαμβάνεται υπόψη η αύξηση του ιξώδους. Η αύξηση του ιξώδους και η αντικατάσταση του νερού των πόρων μπορεί να περιγραφεί με την ενσωμάτωση του κανόνα του Todd στην εξίσωση των Kozeny – Carman. Επιπλέον, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν *αναλυτικές λύσεις* της εξίσωσης

μονοδιάστατης μεταγωγής – διασποράς(one dimensional advection – dispersion equation) για να προβλεφθεί ο χρόνος μεταφοράς της πυριτίας σε μία εδαφική μάζα στο πεδίο. Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησαν οι Gallagher και Lin για τις δοκιμές εισπίεσης και η πειραματική επαλήθευση του υβριδικού αναλυτικού – αριθμητικού προσομοιώματος μεταφοράς της κολλοειδούς ουσίας, με μηχανισμό μεταγωγής και υδροδυναμικής διασποράς.

Σε παρόμοια συμπεράσματα με τους Gallagher και Lin κατέληξαν και οι συνεργάτες στο ερευνητικό. Συγκεκριμένα, εκτέλεσαν δοκιμές εισπίεσης υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας Ludox – SM περιεκτικότητας 10% wt. σε εδαφικές στήλες άμμου M31 και ιλυώδους άμμου M31 – D6. Οι στήλες είχαν ύψος 20 και 40 cm και η εισπίεση έγινε υπό χαμηλή υδραυλική κλίση 0.05, με εισροή από τη βάση και εκροή από την κορυφή της στήλης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με αυτή των Gallagher και Lin. Το υγρόλυμα πυριτίας χρωματίστηκε με χρώμα ζαχαροπλαστικής, ώστε να υπάρχει οπτική παρατήρηση της θέσης του ανερχόμενου μετώπου. Από ειδικά διαμορφωμένες οπές ελήφθησαν δείγματα υγρού από το εδαφικό πορώδες, κατά τη διάρκεια της ανόδου του μετώπου πυριτίας. Παρήχθησαν καμπύλες περιεκτικότητας πυριτίας, για τις διάφορες θέσεις και με την πάροδο του χρόνου, παρόμοιες με αυτές του Σχήματος 6.14. Επίσης, βρέθηκε ικανοποιητική σύγκλιση των πειραματικών μετρήσεων με το προσομοίωμα ροής του υγρολύματος. Η πρόβλεψη του προσομοιώματος για την παροχή έγινε σύμφωνα με το Νόμο του Darcy και με συνυπολογισμό της αύξησης του ιξώδους εν τω χρόνω. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διαφορά πυκνοτήτων νερού – υγρολύματος, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των υδραυλικών κλίσεων. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό διαπίστωσαν και αυτοί ότι το ιξώδες είναι ο κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει τη δυνατότητα εισπίεσης υγρολύματος υπό χαμηλή υδραυλική κλίση. Η εισπίεση υπό κλίση 0.05 πρακτικά διακόπτεται όταν το ιξώδες πάρει τιμή μεγαλύτερη από 3.5 – 4.0 cP. Τέλος, αντιμετώπισαν και αυτοί προβλήματα με την εισπίεση υγρολύματος μέσα σε δοκίμια ιλυώδους άμμου.

Όταν στο πεδίο πάψει να υφίσταται *μαζική ροή*(*bulk flow*) του υγρολύματος, λόγω της αύξησης του ιξώδους, τα κολλοειδή σωματίδια μπορούν ακόμα να μεταφέρονται μέσω *διάχυσης*(*diffusion*). Η διάχυση ενεργοποιείται από τη *βαθμίδα της περιεκτικότητας των σωματιδίων*(*concentration gradient*). Η διαχυτική κίνηση των κολλοειδών στερεών μπορεί να τα απομακρύνει από το πορώδες του προς σταθεροποίηση εδάφους, προς το νερό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Επειδή πολλά κολλοειδή παραμένουν αιωρούμενα στο υγρό των πόρων της γέλης για πάρα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, μέχρι να ενωθούν με τον στερεό ιστό, η απομάκρυνσή τους μπορεί να αναχαιτίσει μερικώς την ωρίμανση της γέλης. Η μακροχρόνια ωρίμανση μπορεί να αναχαιτιστεί και από τη διάχυση των διαλυμένων αλάτων του υγρολύματος, τα οποία είναι πολύ πιο κινητικά από τα κολλοειδή σωματίδια. Εργαστηριακά και σε μικρή κλίμακα διαπιστώσαμε ότι η διάχυση των κολλοειδών και των αλάτων μπορεί να αναχαιτίσει την ωρίμανση ενός σταθεροποιημένου εδαφικού δοκιμίου, με πρώιμη γέλη στους πόρους του. Όσο ο στερεός ιστός της γέλης πυκνώνει γίνεται περισσότερο δεσμευτικός και συγκρατεί τα κολλοειδή που τείνουν να απομακρυνθούν. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, μία εδαφική μάζα που σταθεροποιείται στο πεδίο έχει διαστάσεις αρκετά μεγάλες. Οι μετατοπίσεις των κολλοειδών σωματιδίων λόγω διάχυσης σε χρονικό διάστημα συγκρίσιμο με τον χρόνο γέλης είναι κατά κανόνα πολύ μικρές. Επομένως, μόνο ένας λεπτός φλοιός στην περιφέρεια της σταθεροποιημένης εδαφικής μάζας αναμένεται να επηρεαστεί. Στο πεδίο ή σε κλίμακα πεδίου δεν έχει ελεγχθεί άμεσα η επιτυχία της παθητικής σταθεροποίησης εδαφικών μαζών, με ακριβή μέτρηση της περιεκτικότητας πυριτίας. Ο έλεγχος ποιότητας γίνεται έμμεσα με εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης.

Προτού παρουσιάσουμε συνοπτικά τα συμπεράσματα από τις δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής των σταθεροποιημένων εδαφών, κρίνουμε απαραίτητο να παραθέσουμε μερικές σκέψεις,

για το πώς ενδέχεται να εξελίσσεται η χημική αντίδραση της συμπύκνωσης μέσα στο εδαφικό πορώδες. Οι σκέψεις αυτές γεννήθηκαν από μερικές αξιοσημείωτες πειραματικές παρατηρήσεις. Οι Gallagher και Lin (2009) και οι συνεργάτες στο ερευνητικό αντιμετώπισαν προβλήματα κατά τις δοκιμές εισπίεσης του υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας μέσα σε εδαφικές στήλες ιλυώδους άμμου. Η πρώτη ομάδα ερευνητών παρατήρησε ότι το υγρόλυμα πυριτίας σταματούσε κατά κανόνα να ανέρχεται, προτού κατακλύσει όλο το ύψος της εδαφικής στήλης. Το πρόβλημα αποδόθηκε στη χαμηλή διαπερατότητα λόγω της ύπαρξης της ιλύος. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό παρατήρησαν ότι αδυνατούσαν να εντοπίσουν την ακριβή θέση του ανερχόμενου χρωματισμένου μετώπου του υγρολύματος πυριτίας, μέσα στα δοκίμια ιλυώδους άμμου. Επίσης, δεν κατάφεραν να λάβουν ποσότητα υγρού από τις οπές δειγματοληψίας. Η ιλυώδης άμμος που χρησιμοποίησαν οι συνεργάτες είχε συντελεστή διαπερατότητας της τάξης 10^{-2} cm/s. Οι Gallagher και Lin κατάφεραν να διοχετεύσουν με επιτυχία, υπό την ίδια υδραυλική κλίση, το ίδιο υγρόλυμα πυριτίας σε υψηλότερες στήλες καθαρής άμμου με συντελεστή διαπερατότητας της τάξης 10^{-3} cm/s. Υποψιαζόμαστε, επομένως, ότι η ύπαρξη λεπτόκοκκου υλικού δημιουργεί προβλήματα, τα οποία δεν σχετίζονται με τη διαπερατότητα.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό παρουσίασαν παρόμοια προβληματική συμπεριφορά. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό παρατήρησαν ότι η αύξηση του ποσοστού πυριτίας από 6% wt. σε 10% wt. έχει πιο σημαντική επίδραση στην αύξηση της αντοχής σε δοκίμια άμμου M31, παρά σε δοκίμια ιλυώδους άμμου M31 – D6, και αυτό ανεξαρτήτως δείκτη πόρων ή σχετικής πυκνότητας. Παρόμοια συμπεριφορά παρατήρησαν οι Persoff et al. (1999), οι οποίοι εκτέλεσαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια της πολύ λεπτόκοκκης άμμου Trevino soil. Η εμπειρία της ομάδας μας είναι ανάλογη. Σε αρκετές δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής συμπίεσης σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου M31 – D6, η συμπεριφορά του εδάφους ήταν ποιοτικά ταυτόσημη με αυτήν της φυσικής ιλυώδους άμμου.

Έχουμε την πεποίθηση ότι η ύπαρξη λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού προσφέρει ένα μεγάλο ανάπτυγμα επιφανειών, πλούσιο σε περιοχές που μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες (*nuclei*) επιτάχυνσης της αντίδρασης της συμπύκνωσης. Ο ρυθμός συμπύκνωσης είναι εντονότερος στις περιοχές γύρω από το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό, παρά στις περιοχές στο κέντρο των εδαφικών πόρων. Η αντίδραση της συμπύκνωσης προκαλεί συρρίκνωση της στερεάς πυριτικής φάσης. Επομένως, η συστολή της στερεάς φάσης της γέλης είναι εντονότερη γύρω από το λεπτόκοκκο κλάσμα και προκαλεί περαιτέρω αντιδράσεις συμπύκνωσης. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μία ανομοιόμορφη κάλυψη του εδαφικού πορώδους από τον στερεό ιστό της γέλης. Επίσης, οι μεγαλύτεροι εδαφικοί κόκκοι, οι οποίοι σχηματίζουν το βασικό δίκτυο μεταβίβασης δυνάμεων (*force network*), απολαμβάνουν χειρότερη ενθυσάλκωση από τις πυριτικές αλυσίδες, σε σχέση με τους μικρότερους κόκκους. Έχοντας αυτόν τον μηχανισμό κατά νου μπορούμε να ερμηνεύσουμε τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα. Το λεπτόκοκκο εδαφικό κλάσμα επιταχύνει μέσω ενός μηχανισμού πυρηνοποίησης (*nucleation mechanism*) τον σχηματισμό της γέλης και δημιουργεί προβλήματα στις δοκιμές εισπίεσης. Το ιξώδες μέσα στο δοκίμιο ιλυώδους άμμου είναι κατά τόπους μεγαλύτερο από αυτό που μετράται στο αφαιρούμενο δείγμα υγρού ή στην ποσότητα υγρολύματος στο δοχείο εκτός δοκιμίου. Η λογική αυτή είναι σύμφωνη με την έρευνα των Sacks των Sheu, οι οποίοι αποδίδουν την μακροσκοπική ιδιότητα της δυσρευστότητας στην αλληλεπίδραση των πυριτικών αλυσίδων με την υγρή φάση. Επιπλέον, η επιλεκτική ενθυσάλκωση των μικρότερων κόκκων μπορεί να ερμηνεύσει τον περιορισμό των ευεργετικών αποτελεσμάτων της σταθεροποίησης, πάνω στην αντοχή των εδαφών με λεπτόκοκκο κλάσμα.

Η εξέλιξη της χημικής αντίδρασης της συμπύκνωσης μέσα στο εδαφικό πορώδες πιθανώς να έχει ακόμα δύο σημαντικές συνέπειες. Πρώτον, αιτιολογεί θεωρητικά τη δυνατότητα αυτό – *ίσης*(

self – healing) της τραυματισμένης γέλης, μετά από την επιβολή διατμητικών παραμορφώσεων. Η απομάκρυνση του νερού μέσα από τους πόρους του σταθεροποιημένου εδάφους θα οδηγήσει σε σύγκλιση ορισμένων πυριτικών αλυσίδων και σε σχηματισμό νέων δεσμών σιλοξάνης. Στο εργαστήριο υπήρξαν ενδείξεις μερικής αποκατάστασης του τραυματισμένου ιστού της γέλης, μέσα στο πορώδες εδαφικών δοκιμίων. Δυστυχώς, δεν καταφέραμε να πάρουμε τις απαιτούμενες πειραματικές μετρήσεις που θα επαλήθευαν την εκδήλωση μηχανισμού αυτό – ίασης, μετά από στράγγιση του νερού των πόρων σταθεροποιημένου δοκιμίου. Οι παράγοντες που αποδείχτηκαν απαγορευτικοί ήταν η απαιτούμενη χρονική διάρκεια αναμονής και η διοχέτευση του υγρού των πόρων στις σωληνώσεις της συσκευής.

Η δεύτερη πιθανή συνέπεια της συμπύκνωσης μέσα στο εδαφικό πορώδες σχετίζεται με τη διαδικασία παρασκευής σταθεροποιημένων δοκιμίων που ακολουθήσαμε στο εργαστήριό μας. Απουσία ειδικού εξοπλισμού, παρόμοιου με αυτόν που χρησιμοποιήσαν οι Kodaka et al. για την παρασκευή σταθεροποιημένων δοκιμίων(βλέπετε Σχήμα 2.59), ο σχηματισμός της γέλης και η ωρίμανσή της έγινε μέσα σε άτονα εδαφικά δοκίμια [Gallagher 2000]. Η συστολή των πυριτικών αλυσίδων κατά τη συμπύκνωση πιθανόν να ασκεί δυνάμεις στους εδαφικούς κόκκους αγκύρωσης. Επειδή οι κόκκοι δεν είναι σε ισχυρή επαφή μεταξύ τους ενδέχεται να αναδιοργανώνονται σε νέες δομές, ώστε να παραλάβουν τις δυνάμεις συστολής. Οι επαφές και οι δομές αυτές μπορεί να χειραγωγούν τις επόμενες που θα δημιουργηθούν κατά την στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Αυτός ο μηχανισμός πιθανόν να αιτιολογεί τη χαμηλή δυστημήςια που παρουσίασαν τα σταθεροποιημένα εδαφικά δοκίμια, όταν υποβλήθηκαν σε στρεπτική διάτμηση. Η συμπεριφορά αυτή δεν είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [Kodaka], που αναφέρει ότι το σταθεροποιημένο έδαφος αναπτύσσει πολύ μικρότερες παραμορφώσεις, όταν υπόκειται σε στρεπτική διάτμηση.

6.3 ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Ο ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές της παρούσας εργασίας είναι η άμμος M31 και η ιλυώδης άμμος, που προκύπτει από το μίγμα 85% wt. άμμου M31 και 15% wt. ιλύος D6. Η ιλυώδης άμμος έχει λεπτόκοκκο υλικό σε ποσοστό $f_c=10\%$. Το Σχήμα 6.15 παρουσιάζει τις κοκκομετρικές καμπύλες και τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών. Τα σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά αποκτούν ένα είδος συνεκτικότητας λόγω της ενθυλάκωσης των κόκκων από τη γέλη. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη που παρουσιάζουν είναι ένας έμμεσος τρόπος ποιοτικού ελέγχου της επιτυχίας της σταθεροποίησης. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό προσδιόρισαν αντοχή στο εύρος 25 - 105 kPa. Η αύξηση της σχετικής πυκνότητας του εδάφους και η αύξηση του ποσοστού πυριτίας οδηγούν σε αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Οι συνεργάτες στο ερευνητικό παρατήρησαν ότι η ευεργετική επίδραση της περιεκτικότητας σε πυριτία είναι λιγότερο έντονη στην ιλυώδη άμμο. Πιστεύουμε ότι αυτό οφείλεται στην επιλεκτική ενθυλάκωση των λεπτότερων εδαφικών κόκκων, οι οποίοι προσφέρουν περιοχές πλούσιες σε πυρήνες επιτάχυνσης της συμπύκνωσης. Το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης στα σταθεροποιημένα εδάφη.

6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε άμμο M31 και σε ιλυώδη άμμο 85% wt. M31 & 15% wt. D6. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εμβάπτιση ξηρού εδαφικού υλικού σε υγρόλυμα πυριτίας(CS=6% και 10% wt.). Τα καλούπια σφραγίστηκαν και ο σχηματισμός της γέλης έγινε μέσα σε άτονο εδαφικό σκελετό. Μετά από την ωρίμανση τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη συσκευή και ακολούθησε η στερεοποίησή τους. Η εκροή του υγρού των πόρων

γίνεται αργά, διότι το νερό αλληλεπιδρά με τον στερεό ιστό της γέλης. Το σταθεροποιημένο έδαφος μακροχρόνια υπόκειται ογκομετρικές παραμορφώσεις αντίστοιχες με το φυσικό. Το Σχήμα 6.17 παρουσιάζει τη στερεοποίηση του φυσικού και του σταθεροποιημένου εδάφους. Η εκροή νερού και οι συνεπαγόμενες ογκομετρικές παραμορφώσεις ενδέχεται να τραυματίζουν ελαφρώς τον στερεό ιστό της γέλης.

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

Το Σχήμα 6.18 παρουσιάζει την τυπική συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου M31 σε σύγκριση με τη φυσική, σε δοκιμή μονοτονικής τριαξονικής θλίψης με αρχική ενεργό τάση 1000 kPa, υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερη αποκλίνουσα τάση από τη φυσική, στις ίδιες παραμορφώσεις. Για να περιγράψουμε τη βελτίωση της αντοχής λόγω σταθεροποίησης ορίσαμε τον αδιάστατο παράγοντα βελτίωσης: $(q / p'_{in})_{stabil} / (q / p'_{in})_{natur}$, όπου q είναι η αποκλίνουσα τάση και p'_{in} η μέση ενεργός τάση στην αρχή της διάτμησης. Το Σχήμα 6.19 παρουσιάζει τον αδιάστατο παράγοντα βελτίωσης της αντοχής της άμμου σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση, για δοκιμές στις ακραίες τιμές ενεργού τάσεως 300 kPa και 2000 kPa. Παρατηρούμε ότι η βελτίωση της αντοχής γίνεται με έναν παράγοντα από 2 έως 3, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στις χαμηλές ενεργές τάσεις. Αυτό ίσως υποδηλώνει τον μεγαλύτερο τραυματισμό του ιστού της γέλης κατά την στερεοποίηση σε υψηλότερες τάσεις. Επίσης, παρατηρούμε ότι στις μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων ο παράγοντας βελτίωσης φθίνει προς τη μονάδα. Αυτό ίσως οφείλεται ξανά στον τραυματισμό της γέλης στις μεγάλες παραμορφώσεις. Σίγουρα, πάντως, οφείλεται και στην χαμηλή πίεση υγρού πόρων (10 – 50 kPa) που είχαν τα σταθεροποιημένα εδάφη στην αρχή της διάτμησης. Στη φάση της διαστολής η σταθεροποιημένη άμμος δεν μπορεί να αναπτύξει πολύ μεγάλες αναρροφητικές πιέσεις, οπότε υστερεί του φυσικού εδάφους. Για αυτόν τον λόγο, η εντονότερη διαστολή της φυσικής άμμου στα 300 kPa κάνει τον παράγοντα βελτίωσης να πέσει κάτω από τη μονάδα, σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 15%. Το Σχήμα 6.20 αποκαλύπτει ότι η σταθεροποιημένη άμμος που συμπιέζεται τριαξονικά υπό αστράγγιστες συνθήκες συμπεριφέρεται παρόμοια στο επίπεδο $q - \varepsilon_{ax}$ με τη φυσική άμμο πυκνότερης δομής, η οποία συμπιέζεται με ελεύθερη στράγγιση.

Οι δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε ιλυώδη άμμο M31 - D6, έδειξαν αποτελέσματα ποιοτικώς ανάλογα με αυτά της άμμου M31. Η βελτίωση, όμως, της αντοχής ήταν μικρότερη. Το 6.21 παρουσιάζει την τυπική συμπεριφορά της ιλυώδους άμμου σε δοκιμή με ενεργό τάση 1000 kPa. Στο Σχήμα 6.22 φαίνεται ο αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης της αντοχής, ο οποίος παίρνει τιμές 1.5 – 2.0. Οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι υπήρξαν και δοκιμές στις οποίες η βελτίωση ήταν μηδενική και η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος συμπεριφέρθηκε όπως η φυσική. Μία τέτοια δοκιμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.23. Ο σχηματισμός γέλης μέσα στο πορώδες του εδάφους ελέγχθηκε σχολαστικά. Εκφράζουμε την πεποίθηση ότι η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο λεπτόκοκκο ιλυώδες κλάσμα, το οποίο εγείρει έναν μηχανισμό πυρηνοποίησης. Το

μεγαλύτερο ποσοστό πυριτίας συσσωρεύεται γύρω από το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό, αφήνοντας το κέντρο του πόρου με αραιό δίκτυο γέλης. Έτσι δικαιολογείται η άμεση εκδήλωση της πίεσης του υγρού των πόρων στον μετρητή. Επίσης, οι μεγαλύτεροι εδαφικοί κόκκοι απολαμβάνουν χειρότερη ενθυλάκωση από τις πυριτικές αλυσίδες. Με αυτόν τον τρόπο δικαιολογείται η ταύτιση των καμπυλών $q - \varepsilon$ του φυσικού και του σταθεροποιημένου εδάφους.

6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Ανακυκλικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν σε φυσική και σε σταθεροποιημένη($CS=6\%$ και 10% wt.) άμμο M31. Η διαδικασία παρασκευής σταθεροποιημένων δοκιμών ήταν η ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε στα δοκίμια της τριαξονικής συσκευής. Η στερεοποίηση των σταθεροποιημένων δοκιμών έγινε με την ίδια αργή διαδικασία. Επειδή οι γραμμές κυκλοφορίας του νερού στη βάση(pedestal) που τοποθετείται το δοκίμιο είναι σφραγισμένες(βλέπετε Ενότητα 5.1.3), η μέτρηση του όγκου που εκρέει κατά την στερεοποίηση απαιτεί περαιτέρω τροποποίηση της συσκευής. Επίσης, η κυκλοφορία της κολλοειδούς ουσίας δημιούργησε προβλήματα απόφραξης στην τριαξονική συσκευή και γι' αυτό αποφεύχθηκε η μέτρηση του όγκου νερού που εκρέει, στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης. Οι ογκομετρικές παραμορφώσεις στερεοποίησης προσδιορίστηκαν έμμεσα από απλή αναλογία με τις μετρούμενες αξονικές παραμορφώσεις. Εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.1.3 για τον πρακτικό έλεγχο του βαθμού ολοκλήρωσης της στερεοποίησης. Αν η στερεοποίηση δεν έχει ολοκληρωθεί και κλείσει η βάνα που επιτρέπει τη στράγγιση, στον μετρητή εκδηλώνεται αργά ένα μέτωπο πίεσης. Όταν το νερό καταφέρει να πραγματοποιήσει τις μικρό - μετακινήσεις που επιβάλλει η διαφορά πίεσης, μέσα στους πόρους της γέλης και στο νερό των σωληνώσεων, ένα πλατό σταθερής πίεσης καταγράφεται. Αν επιτραπεί εκ νέου η στράγγιση τότε από τους πόρους της γέλης εκρέει περισσότερη ποσότητα νερού. Μέσα στους πόρους της γέλης υπάρχει αδρανοποιημένο νερό υπό πίεση, διότι ο στερεός πυριτικός ιστός λειτουργεί ως *ηλεκτροχημική απόχλη*. Η πίεση αυτή δεν εκδηλώνεται αμέσως στο νερό γύρω από τον μετρητή, διότι δεν ισχύει η Αρχή του Pascal στη διφασική γέλη. Η στερεοποίηση θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί όταν, με απαγόρευση της στράγγισης, δεν εκδηλώνεται σημαντική αύξηση πίεσης στον μετρητή. Το Σχήμα 6.24 παρουσιάζει αυτήν τη διαδικασία.

Η εκτέλεση των δοκιμών ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης έγινε με επιβολή ημιτονοειδούς διατμητικής τάσης, με περίοδο $T=10$ s(stress control). Η πίεση του υγρού των πόρων καταγράφονταν και στα σταθεροποιημένα δοκίμια. Η καταγραφή χρήζει κριτικής αξιολόγησης διότι όταν ο ιστός της γέλης είναι υγιής, τα μέτωπα πίεσης εκδηλώνονται με υστέρηση στον μετρητή. Κριτήριο ρευστοποίησης θεωρήθηκε η ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους ίση με $\gamma_{DA}=5\%$. Σημειώθηκε το πλήθος των κύκλων $N_{5\%}$ που απαιτείται για την ανάπτυξη αυτής της παραμόρφωσης και παρήχθησαν οι καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση στο επίπεδο $CSR - N_{5\%}$. Μία εναλλακτική παρουσίαση των καμπύλων αντίστασης σε συνάρτηση με τη σχετική πυκνότητα του εδάφους γίνεται στο επίπεδο $CRR_{15} - D_r$. Ο λόγος ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως $CSR = \Delta t_{\theta z} / \rho'_{in}$ (πλάτος διατμητικής τάσης διά τη μέση ενεργό τάση στην αρχή της διάτμησης). Ο λόγος ανακυκλικής αντίστασης ορίζεται ως ο λόγος ανακυκλικής τάσης(για δεδομένη πυκνότητα) που προκαλεί παραμόρφωση $\gamma_{DA}=5\%$, σε $N_{5\%}=15$ κύκλους φόρτισης, δηλαδή $CRR_{15}=CSR_{Dr}(N_{5\%}=15)$.

Η τυπική συμπεριφορά της φυσικής άμμου M31 σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.25. Παρατηρούμε ότι στους πρώτους κύκλους φόρτισης η φυσική άμμος εμφανίζει πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ - πίεσης του υγρού πόρων αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή $R_u=0.65$. Κατά τον δέκατο

τέταρτο κύκλο η υπέρ – πίεση του υγρού των πόρων εκτινάσσεται και το δοκίμιο εμφανίζει απότομα πάρα πολύ υψηλές παραμορφώσεις και καταρρέει.

Η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης(CS=10%) άμμου M31 σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.26 και διαφέρει ριζικά από αυτήν της φυσικής. Η σταθεροποιημένη άμμος διατηρεί τη δομή της χωρίς να καταρρέει ακόμα και όταν οι παραμορφώσεις και ο συντελεστής υπέρ – πίεσης του υγρού πόρων λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές. Η συμπεριφορά αυτή συνεχίζεται για πάρα πολλούς κύκλους και η δοκιμή ολοκληρώνεται αναγκαστικά, διότι τερματίζεται η ωφέλιμη διαδρομή των μετρητικών οργάνων. Η σταθεροποιημένη άμμος, σε αντίθεση με τη φυσική, εμφανίζει στους πρώτους κύκλους φόρτισης ιδιαίτερα υψηλές παραμορφώσεις. Η πίεση του υγρού των πόρων σε αυτούς τους κύκλους καταγράφεται πολύ χαμηλή. Έχουμε την πεποίθηση ότι η πραγματική πίεση μέσα στο υγρό των πόρων της γέλης είναι υψηλή, αφού και οι παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές, αλλά δεν εκδηλώνεται άμεσα στον μετρητή. Ο στερεός ιστός της γέλης είναι σχετικά υγιής και αδραντοποιεί το νερό των πόρων, οπότε καθυστερεί τις μικρό - μετακινήσεις που απαιτούνται για να εκδηλωθεί το μέτωπο πίεσης στο νερό εκτός του δοκιμίου. Σε προχωρημένους κύκλους, ο ιστός της γέλης έχει υποστεί σοβαρό τραυματισμό και το ιξώδες του συστήματος έχει μειωθεί σημαντικά. Η εκδήλωση της πίεσης του υγρού πόρων είναι περισσότερο άμεση και ακολουθεί πρακτικά τους κύκλους φόρτισης. Το Σχήμα 6.27 απεικονίζει την ανάπτυξη της υπέρ – πίεσης του υγρού των πόρων στη φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο. Η ανάπτυξη των παραμορφώσεων με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.28. Η πολύ μικρή δυσμνησία του σταθεροποιημένου εδάφους που ευθύνεται για τις μεγάλες παραμορφώσεις στους πρώτους κύκλους φόρτισης, έχουμε την πεποίθηση αποκαλύπτει ένα αναποτελεσματικό δίκτυο επαφών των εδαφικών κόκκων. Η παρασκευή των σταθεροποιημένων δοκιμίων με σχηματισμό της γέλης μέσα στους πόρους άτονου εδάφους θεωρούμε ότι δημιουργεί ανορθόδοξες επαφές, που χειραγωγούν την ανάπτυξη των επόμενων επαφών στερεοποίησης. Φαίνεται ότι η συστολή συμπύκνωσης των πυριτικών αλυσίδων που είναι αγκυρωμένες στους εδαφικούς κόκκους μπορεί να επηρεάσει τη δομή του εδάφους.

Οι καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης(CS=10%) άμμου M31 στο επίπεδο CSR – N_{5%} και CSR – N_{1%} απεικονίζονται στο Σχήμα 6.29. Παρατηρούμε ότι με κριτήριο ρευστοποίησης την ανάπτυξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους γ_{DA}=5% η σταθεροποιημένη άμμος εμφανίζει καμπύλη στο επίπεδο CSR - N πιο πάνω και δεξιότερα από αυτήν της φυσικής. Αυτό σημαίνει ότι για τον ίδιο λόγο ανακυκλικής τάσης απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης στη σταθεροποιημένη άμμο, σε σύγκριση με τη φυσική παρόμοιας πυκνότητας, για να αναπτυχθεί παραμόρφωση διπλού πλάτους 5%. Η εικόνα αντιστρέφεται όταν θέτουμε ως κριτήριο την ανάπτυξη παραμόρφωσης διπλού πλάτους ίσης με 1%. Το σταθεροποιημένο έδαφος αναπτύσσει σε πολύ λιγότερους κύκλους παραμόρφωση ίση με 1%. Τέλος, στο Σχήμα 6.30 παρουσιάζονται οι καμπύλες CRR₁₅ – D_r για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη άμμο.

6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΩΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

- Η αργή εισπίεση υγρολύματος κολλοειδούς πυριτίας, υπό χαμηλή υδραυλική κλίση, σε ρευστοποιήσιμα εδάφη κάτω από υφιστάμενες κατασκευές είναι μία εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης του εδάφους. Η παθητική σταθεροποίηση(passive stabilization) με πυριτία είναι ελκυστική διότι δε διαταράσσει έντονα το έδαφος, ούτε διακόπτει την κανονική λειτουργία των υποδομών. Για την εισπίεση δεν απαιτείται πρόσβαση κάτω από εκτεταμένες θεμελιώσεις. Η γέλη πυριτίας είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής(με ξένες ουσίες), άοσμη, μη εύφλεκτη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά τη διοχέτευσή της στο πεδίο, όσο και

μετά το πέρας αυτής. Αν διατηρηθεί κορεσμένη είναι και ιδιαίτερα ανθεκτική στον χρόνο. Το κόστος της παθητικής σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτίτα είναι ελκυστικό και συγκρίσιμο με αυτό των παραδοσιακών μεθόδων βελτίωσης(Gallagher 2000).

- Τα σωματίδια της πυριτίας είναι σφαιρικά με διάμετρο ίση με 7nm, δηλαδή ανήκουν στο κάτω όριο της κολλοειδούς κλίμακας. Η ειδική επιφάνεια των κολλοειδών σφαιρών είναι ίση με 345 m²/g. Στην επιφάνεια των σωματιδίων υπάρχουν τουλάχιστον 4.6 ομάδες σιλανόλης Si – OH ανά τετραγωνικό νανόμετρο. Οι ιδιότητές και η δομή της επιφάνειας καθορίζουν όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες του υγρού υδρολύματος και της γέλης. Κατ' επέκταση καθορίζουν και την ιδιαίτερη μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών. Η επιφανειακή δομή συνδέεται με τον ρυθμό σχηματισμού δεσμών σιλοξάνης, με τη συστολή κατά τη χημική αντίδραση της συμπύκνωσης και τη δυνατότητα σχηματισμού δεσμών όταν υπάρχει σύγκλιση πυριτικών αλυσίδων. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει τη μακροχρόνια ωρίμανση αλλά και την αυτό – ίαση της γέλης. Επίσης, η επιφανειακή δομή των κολλοειδών σωματιδίων είναι υπεύθυνη για την ισχυρή αλληλεπίδραση των πυριτικών αλυσίδων με το νερό.
- Η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης έγκειται στην αλληλεπίδραση της στερεάς εδαφικής φάσης με τον στερεό ιστό της γέλης και όχι στις μειωμένες πιέσεις στο υγρό των πόρων. Η κορεσμένη γέλη είναι ένα διφασικό υλικό που αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό κατ' όγκο και κατά βάρος από νερό. Το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστο και θα εμφανίζει υψηλή πίεση, όταν ο εδαφικός σκελετός διατέμνεται και τείνει, αλλά δεν μπορεί να το εκτοπίσει. Επειδή υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ του στερεού ιστού της γέλης με το νερό, η υγρή φάση παγιδεύεται από τις πυριτικές αλυσίδες. Ο ιστός της γέλης λειτουργεί ως ηλεκτροχημική απόχη που αδρανοποιεί το νερό και καθυστερεί τη μεταφορά υγρής μάζας ή τη μετάδοση ενός μετώπου πίεσης ύδατος.
- Η *ενθυλάκωση*(*encapsulation*) των εδαφικών κόκκων από τον στερεό ιστό της γέλης έχει ευεργετική επίδραση πάνω στην αντοχή του εδάφους. Σε δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής συμπίεσης υπό αστράγγιστες συνθήκες, η αντοχή του σταθεροποιημένου εδάφους βελτιώθηκε κατά έναν παράγοντα 1.5 – 3.0. Η αύξηση της αντοχής ίσως οφείλεται στη θραύση των δεσμών του ιστού της γέλης που πραγματοποιείται, καθώς το έδαφος συμπιέζεται. Η καθαρή γέλη είναι πολύ μαλακή καθώς ο πυριτικός σκελετός είναι πολύ αραιός. Μέσα στο πορώδες του εδάφους οι πυριτικές αλυσίδες ενδέχεται να σχηματίζουν μία *πλάκα*(*plaque*) υψηλής περιεκτικότητας γύρω από τους εδαφικούς κόκκους, οι οποίοι προσφέρουν πυρήνες επιτάχυνσης της συμπύκνωσης. Η θραύση αυτής της πλάκας μπορεί να απαιτεί επιπλέον τάση για να συμβεί. Ο ομοιοπολικός δεσμός πυριτίου – οξυγόνου είναι ιδιαίτερα ισχυρός. Έχει μήκος 0.162 nm και ενθαλπία 460 kJ/mol. Συγκριτικά, ο ισχυρός δεσμός άνθρακα – άνθρακα στο διαμάντι έχει μήκος 0.154 nm και ενθαλπία 348 kJ/mol. Όταν ένα υλικό θραύεται αυτό που συμβαίνει ουσιαστικά είναι η καταστροφή ορισμένων δεσμών μεταξύ των δομικών μονάδων του. Η ενθαλπία, επομένως, του δεσμού Si - O μπορεί να θεωρηθεί ως δείκτης δυσκολίας της καταστροφής του. Ο τραυματισμός του ιστού της γέλης μέσα στο πορώδες του εδάφους ενδέχεται να απαιτεί πολύ μεγαλύτερη προσπάθεια από ότι στην καθαρή γέλη. Η θραύση της πλάκας πυριτίας μπορεί να αιτιολογεί την αυξημένη αποκλίνουσα τάση που εμφανίζει το σταθεροποιημένο έδαφος σε σχέση με το φυσικό, στις ίδιες αξονικές παραμορφώσεις. Υπενθυμίζουμε ότι η πυριτία συγκεντρωμένη σε υψηλή περιεκτικότητα μοιάζει με σκληρό πλαστικό.
- Οι πυριτικοί θύλακες εκτός από τους εδαφικούς κόκκους εγκλείουν και την υγρή φάση, την οποία και αδρανοποιούν(Sacks and Sheu 1986,1987). Το υγρό της γέλης αναπτύσσει πίεση αλλά οι εδαφικοί κόκκοι φαίνεται να είναι μονωμένοι. Η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους σε μονοτονική τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες μοιάζει με τη συμπεριφορά του πυκνότερου φυσικού εδάφους υπό στραγγιζόμενες. Το νερό κοντά στις πυριτικές ίνες εμφανίζει

τροποποιημένες ιδιότητες, όπως για παράδειγμα αυξημένο ιξώδες(Brinker and Scherer, p.463). Η διαστρωμάτωση των ιδιοτήτων της υγρής φάσης κοντά και μακριά από τον στερεό ιστό της πυριτίας μπορεί να οδηγεί ακόμα και σε σημαντικές *επιφανειακές τάσεις*(*surface tension*), χωρίς την παρουσία αέριας φάσης. Η επιφανειακή τάση, αν υφίσταται, είναι ένας παράγοντας που αιτιολογεί την αυξημένη αντοχή του σταθεροποιημένου εδάφους.

- Η σταθεροποιημένη εδαφική μάζα αποκτά ένα είδος συνεκτικότητας, η οποία αποτρέπει την κλασική κατάρρευση υπό ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης. Πάλι οι εδαφικοί κόκκοι μοιάζουν να είναι μονωμένοι και προστατευμένοι από την υψηλή πίεση του υγρού των πόρων. Το σταθεροποιημένο κοκκώδες εδαφικό υλικό δεν μπορεί να υποστεί ρευστοποίηση με την κλασική έννοια.
- Η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης είναι λιγότερο έντονη όταν το εδαφικό υλικό περιέχει λεπτόκοκκο κλάσμα. Αυτή η παρατήρηση έγινε στις τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο μας, στις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτέλεσαν οι συνεργάτες στο ερευνητικό και στις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτέλεσαν οι Persoff et al.(1999) στο Trevino soil. Επίσης, οι συνεργάτες στο ερευνητικό και οι Gallagher and Lin(2009) αντιμετώπισαν προβλήματα στην εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας μέσα σε εδαφικές στήλες ιλυώδους άμμου, παρόλο που η διαπερατότητα δεν ήταν ιδιαίτερα χαμηλή. Έχουμε την πεποίθηση το λεπτόκοκκο υλικό εγείρει έναν μηχανισμό πυρηνοποίησης(nucleation mechanism), επιταχύνει τον σχηματισμό της γέλης και συσσωρεύει γύρω του ένα μεγάλο ποσοστό πυριτίας. Οι μεγαλύτεροι εδαφικοί κόκκοι απολαμβάνουν χειρότερη ενθυλάκωση και η βελτίωση της αντοχής είναι μικρότερη.

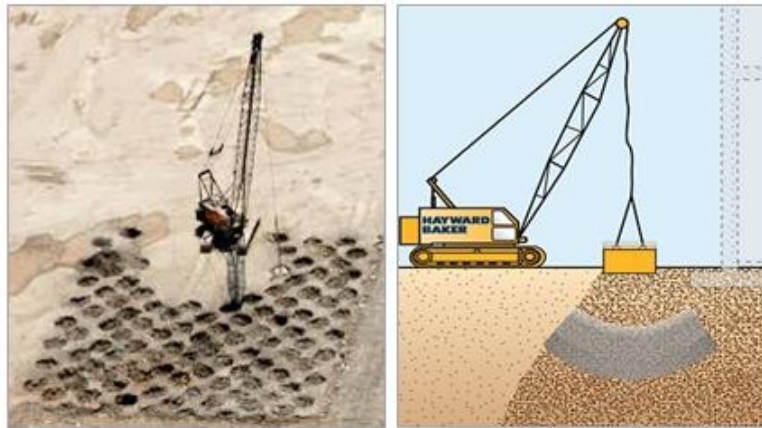
6.7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα εργασία είχε ως βασικό άξονα την κατανόηση των φυσικοχημικών διαδικασιών του υγρολύματος και της γέλης πυριτίας, με σκοπό να ερμηνευτεί η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών, μέσα από μία φυσικοχημική σκοπιά. Προσπαθήσαμε με μία ορθολογική συλλογιστική να ανιχνεύσουμε πιθανούς μηχανισμούς, που να ερμηνεύουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Δύο από αυτούς τους μηχανισμούς θεωρούμε ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση, διότι σχετίζονται με μειωμένη αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης.

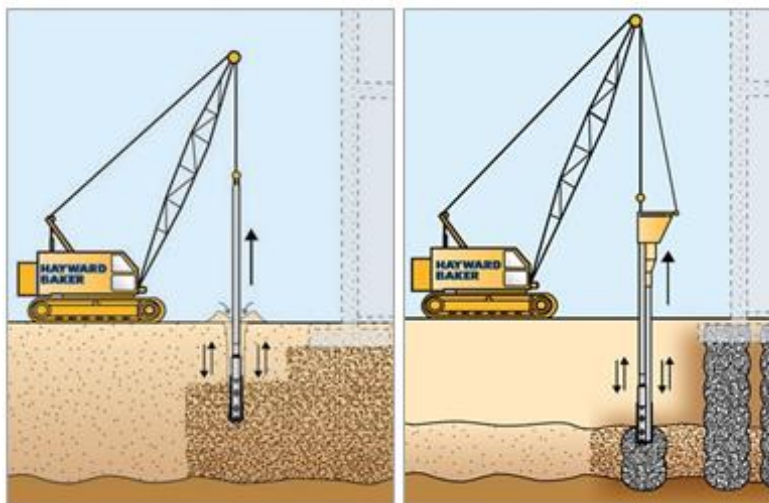
Ο σχηματισμός της γέλης μέσα στο εδαφικό πορώδες φαίνεται να οδηγεί σε μία ιδιάζουσα αλληλεπίδραση των πυριτικών αλυσίδων με τους εδαφικούς κόκκους. Κρίνουμε αναγκαίο να διερευνηθεί, πρώτον, η επίδραση της μεθόδου παρασκευής των σταθεροποιημένων δοκιμίων, πάνω στη μηχανική συμπεριφορά. Όταν η γέλη σχηματίζεται μέσα σε άτονο εδαφικό σκελετό και στη συνέχεια το σταθεροποιημένο δοκίμιο στερεοποιείται, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση είναι πολύ μεγάλες, από τους πρώτους κιόλας κύκλους. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με την έρευνα των Kodaka et al. Οι ερευνητές αυτοί διοχέτευαν το υγρόλυμα πυριτίας σε εδαφικό σκελετό που βρισκόταν υπό ενεργό τάση, σε γεωστατικές συνθήκες K_0 . Είναι χρήσιμο να διερευνηθεί σε μελλοντική έρευνα αν οι μεγάλες παραμορφώσεις οφείλονται στη συστολή των πυριτικών ινών λόγω συμπίκνωσης, που αποδιοργανώνει τους κόκκους του άτονου εδάφους, στον τραυματισμό της γέλης λόγω στερεοποίησης ή σε κάποιον άλλο μηχανισμό.

Ένας δεύτερος άξονας στον οποίο μπορεί να προσανατολιστεί η μελλοντική έρευνα είναι η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης της πυριτίας με το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό. Η μειωμένη ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης πάνω στην αντοχή εδαφών με λεπτόκοκκο κλάσμα και τα προβλήματα εισπίεσης, ίσως να συνδέονται με κάποιον μηχανισμό πυρηνοποίησης. Είναι, επομένως, αναγκαίο να εξακριβωθεί αν ένας τέτοιος μηχανισμός υφίσταται.

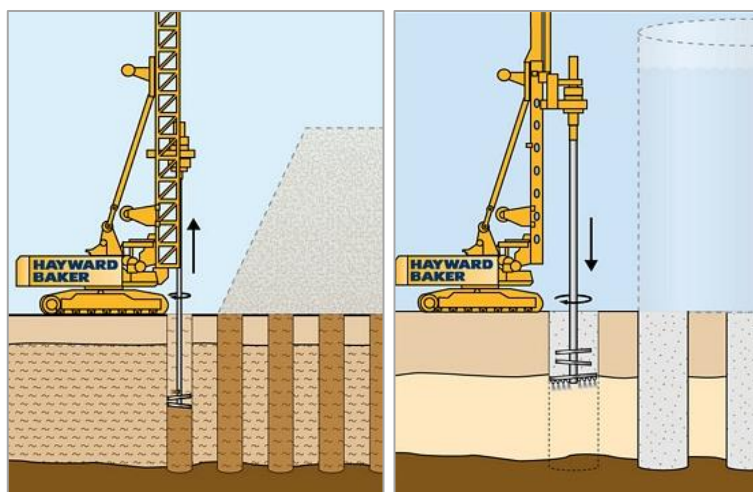
6.8. ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6



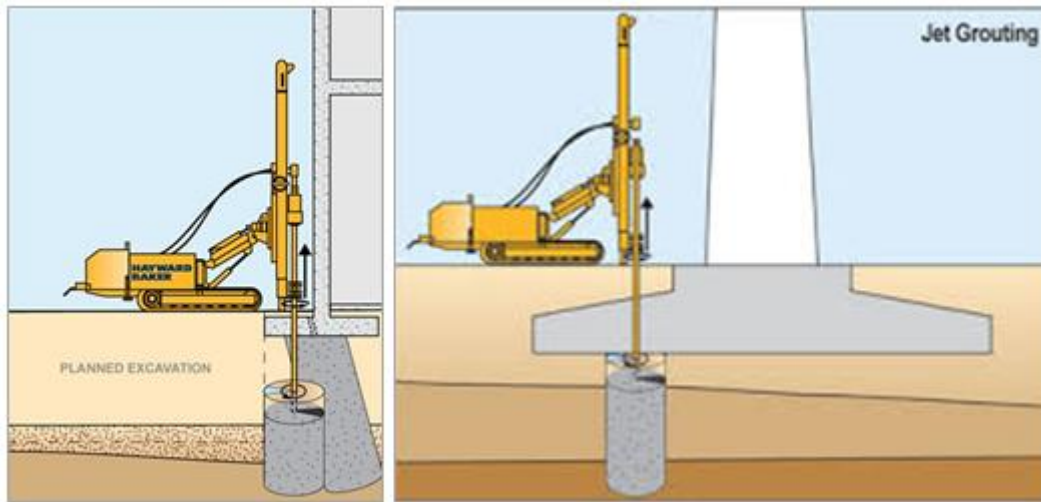
Σχήμα 6.1. Συμπύκνωση(densification) εδάφους με επαναλαμβανόμενη πτώση βαρών από μεγάλο ύψος(deep dynamic compaction).



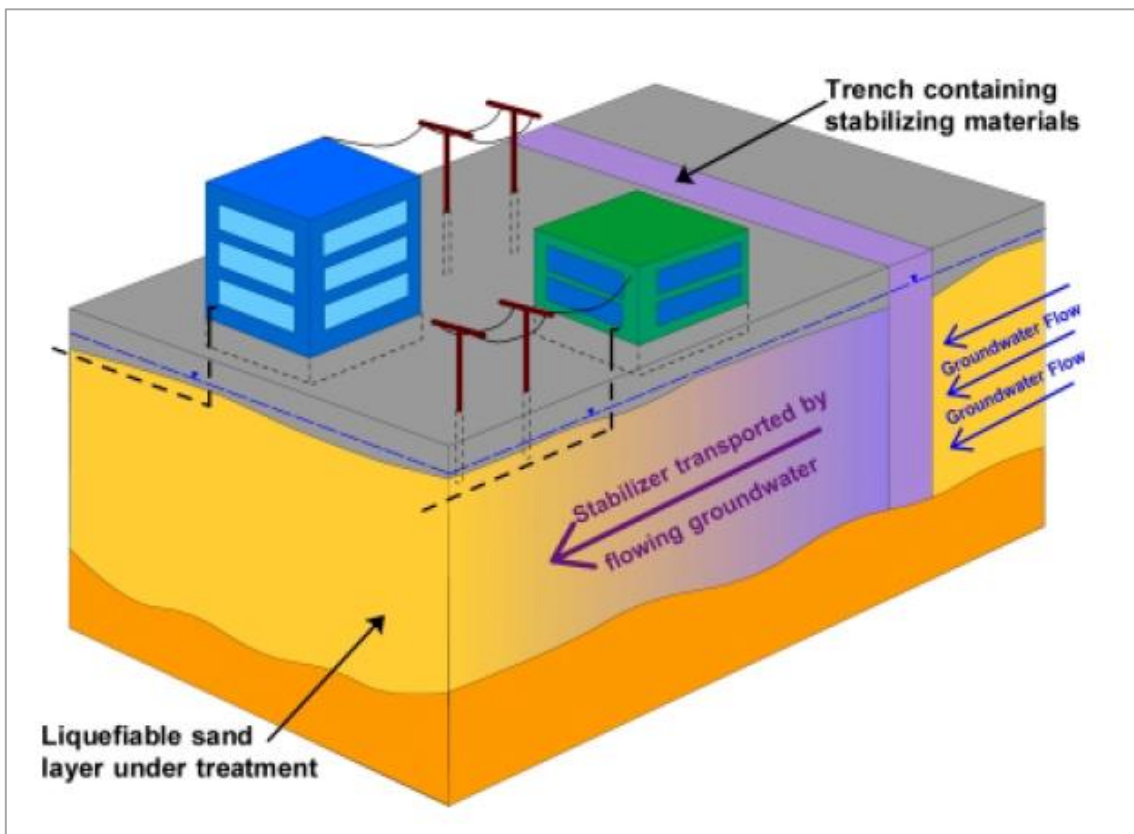
Σχήμα 6.2. Συμπύκνωση(densification) εδάφους με πρόκληση δονήσεων μέσα σε γεώτρηση(vibrocompaction) και κατασκευή φρεατίων με πετρώδες υλικό(stone columns).



Σχήμα 6.3. Βελτίωση εδάφους με μηχανική ανάμιξη εδάφους με τσιμέντο(soil mixing).

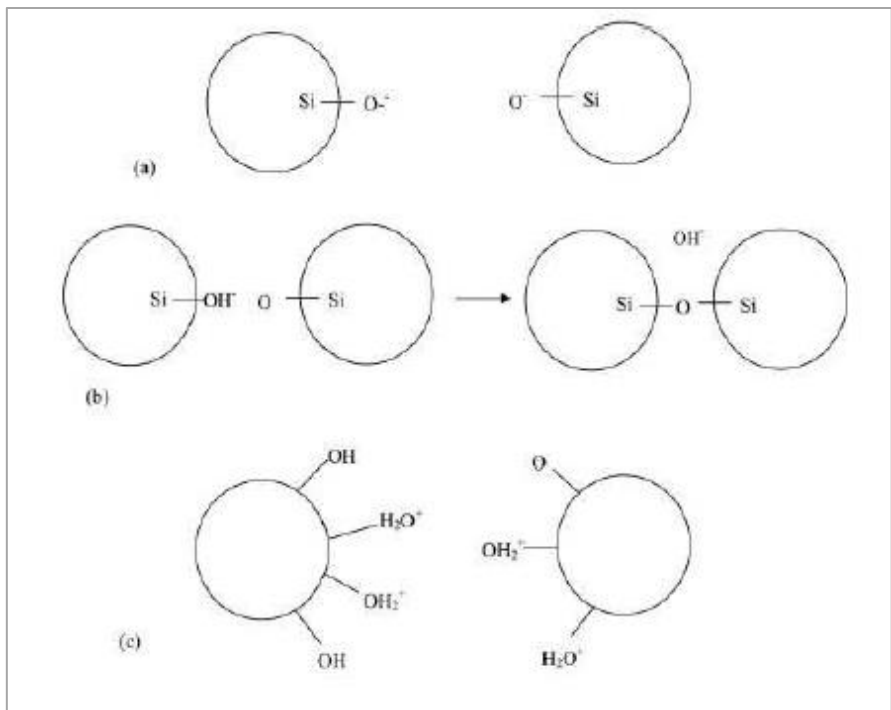
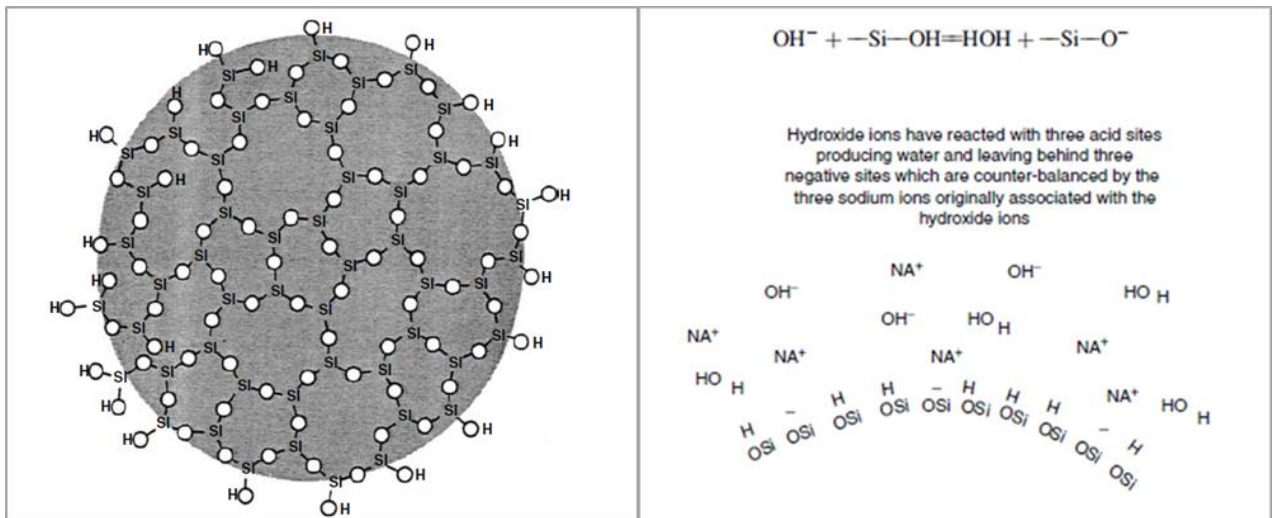


Σχήμα 6.4. Βελτίωση εδάφους με εισπίεση ενέματος σε γεώτρηση(jet grouting) ως μέθοδος υπό – θεμελίωσης(underpinning) υφιστάμενης κατασκευής.

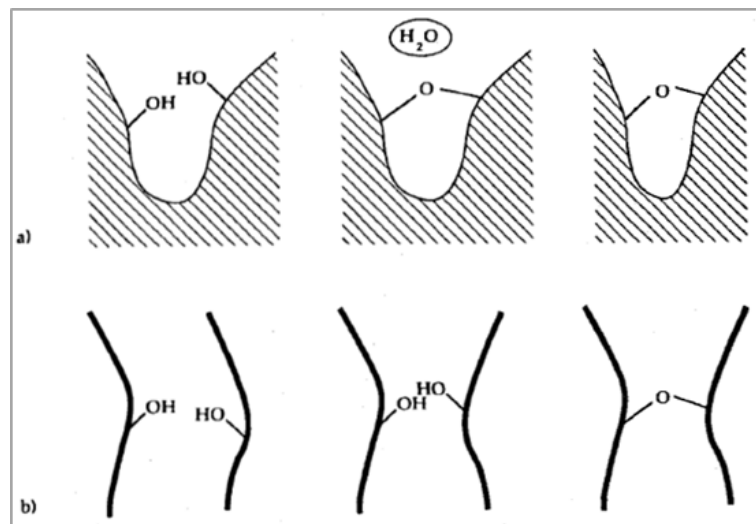
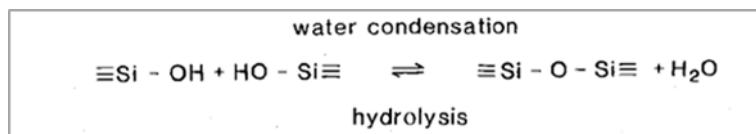
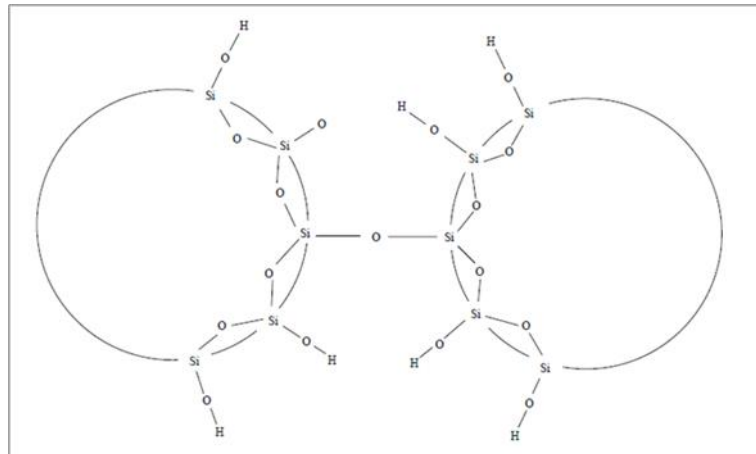


Σχήμα 6.5. Παθητική σταθεροποίηση(passive stabilization) ρευστοποιήσιμου εδάφους κάτω από υφιστάμενη κατασκευή, για τον περιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης. Σχήμα από Gallagher 2000.

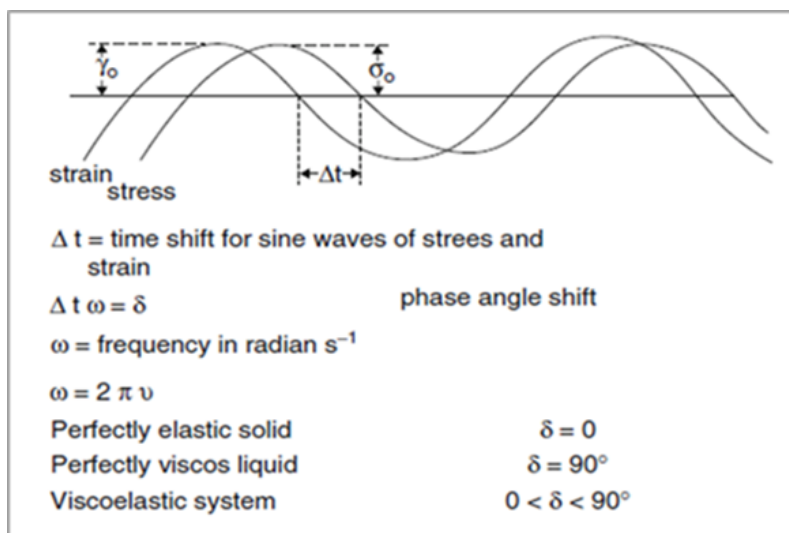
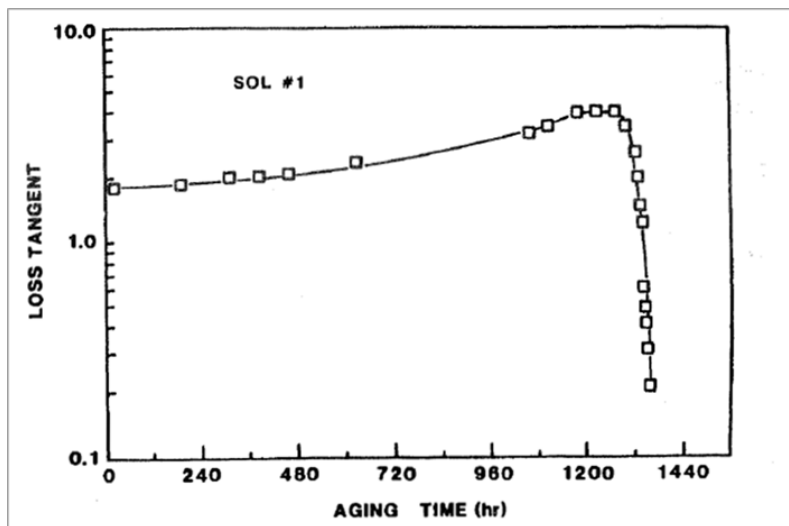
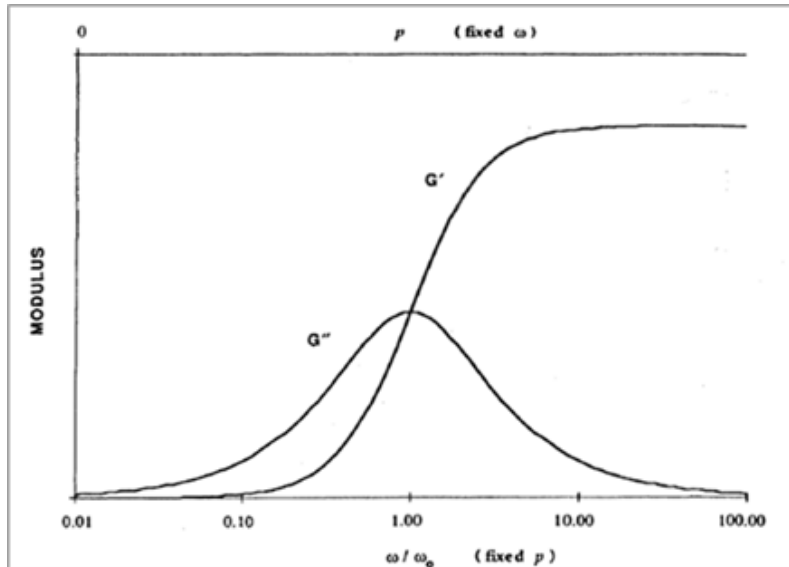
Είδος πυριτίας	Ludox®-SM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50
Σταθεροποιητής	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30
Ιξώδες (cP)	5.5
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345



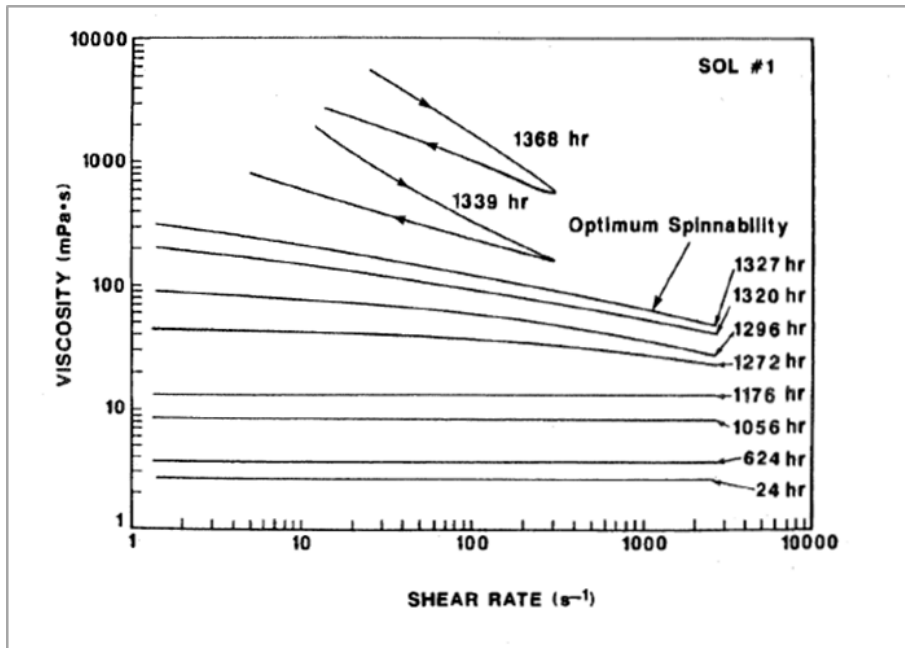
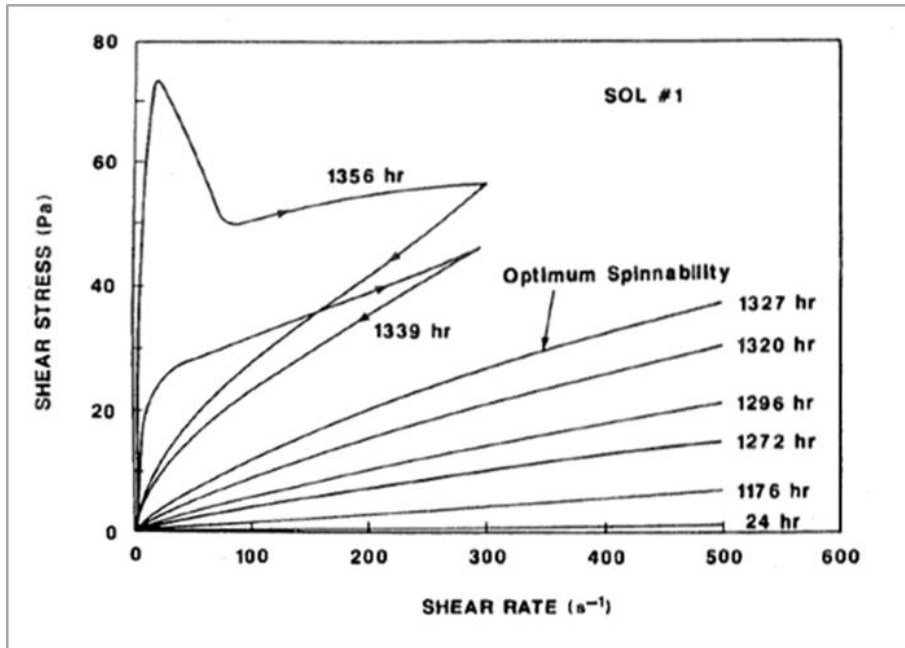
Σχήμα 6.6. Σταθεροποιημένο υγρόλυμα κολλοειδών σωματιδίων πυριτίας, σε αλκαλικό περιβάλλον και με απουσία αλάτων.



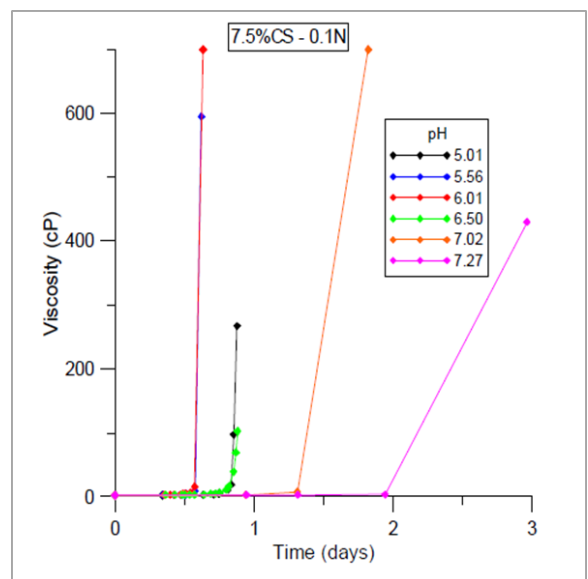
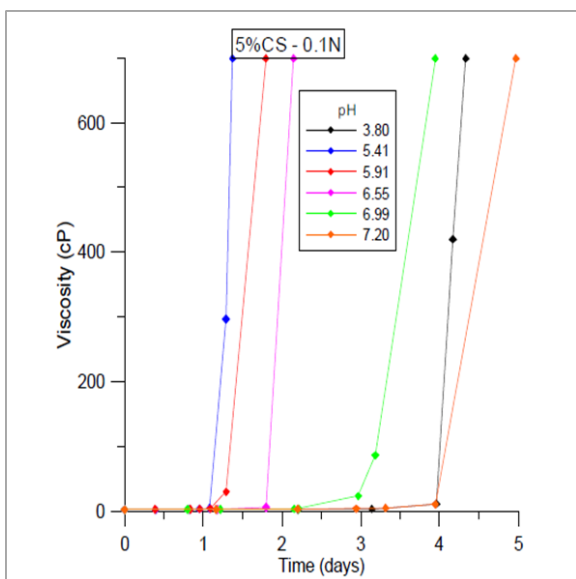
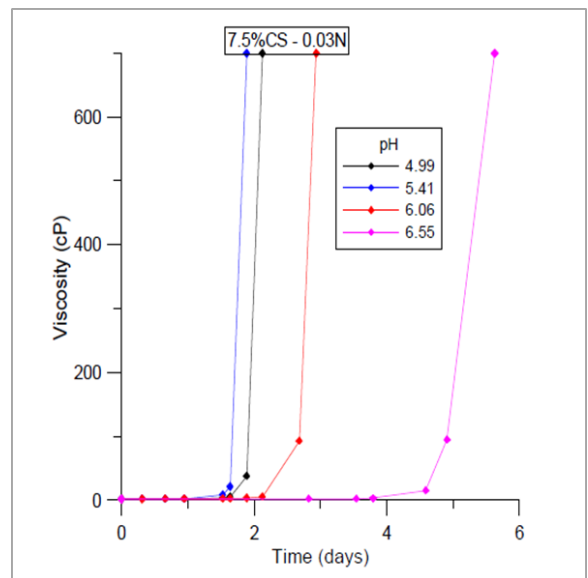
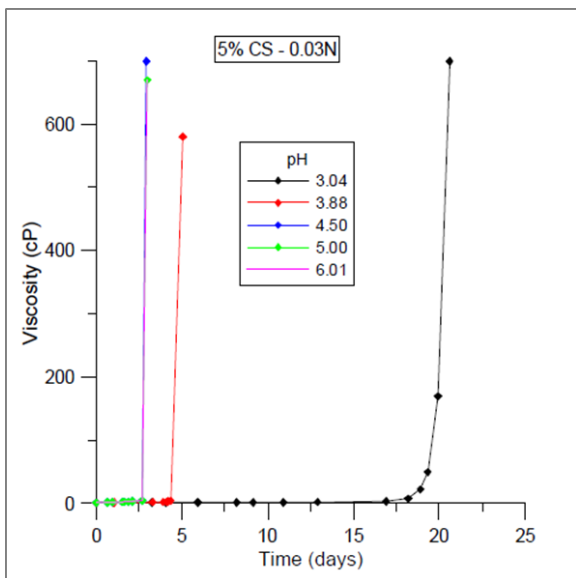
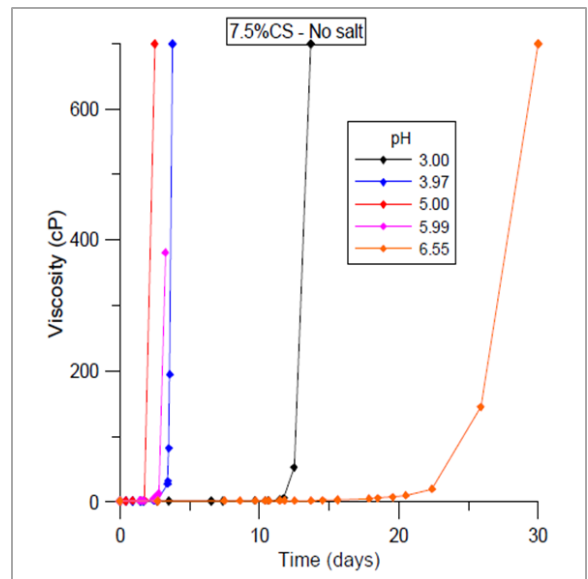
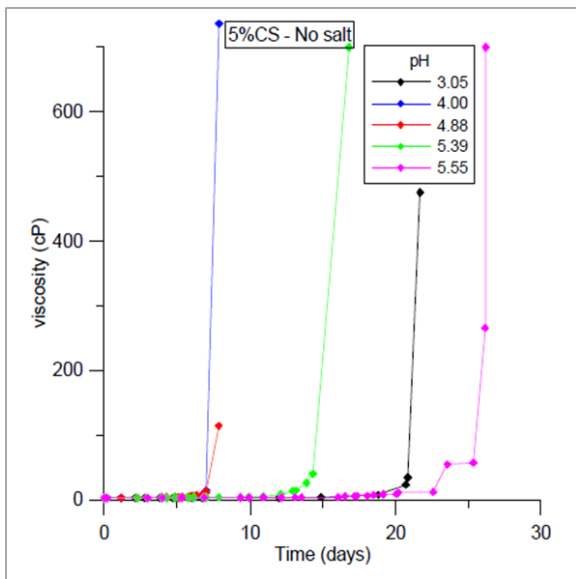
Σχήμα 6.7. Ο σχηματισμός ενός δεσμού σιλοξάνης Si-O-Si μεταξύ δύο σωματιδίων πυριτίας κατά τη χημική αντίδραση της συμπύκνωσης. Η συμπύκνωση οδηγεί σε συστολή της στερεάς πυριτικής φάσης και σε αποβολή ενός μορίου νερού.



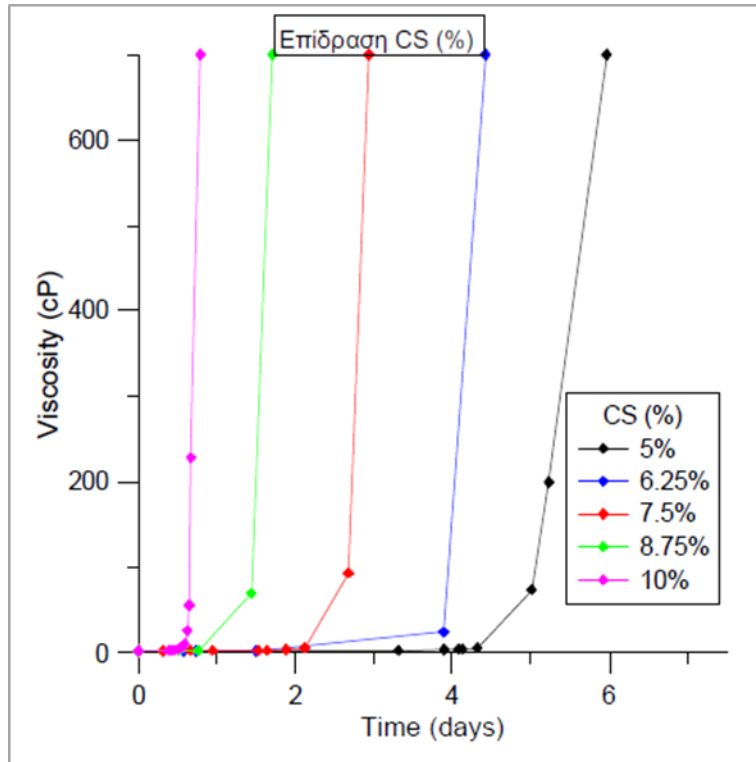
Σχήμα 6.8. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υγρολύματος και της γέλης πυριτίας, όπως μελετήθηκε από τους Sacks και Sheu (1986,1987). Απόλυτος ορισμός του χρόνου γέλης.



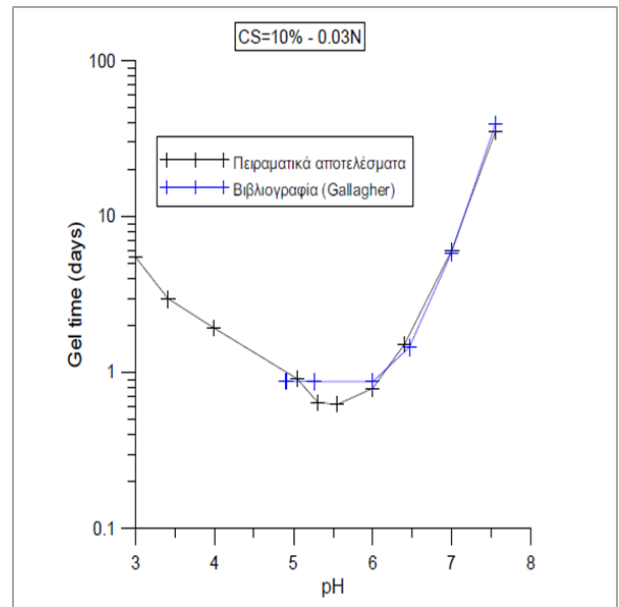
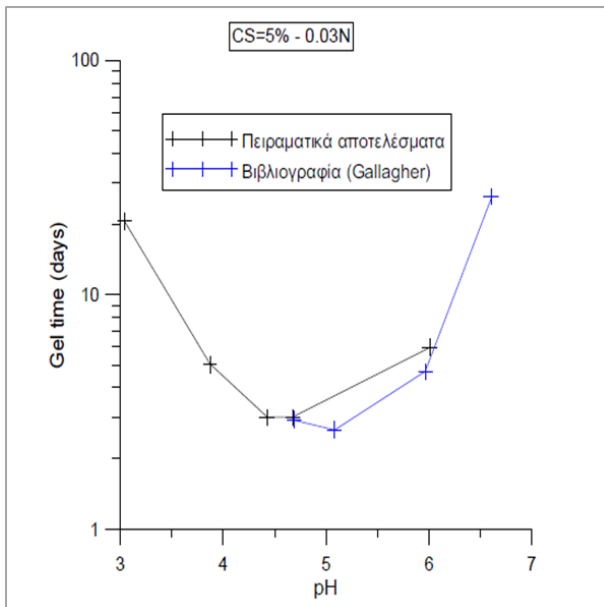
Σχήμα 6.9. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υγρούματος και της γέλης πυριτίας, όπως μελετήθηκε από τους Sacks και Sheu(1986,1987).



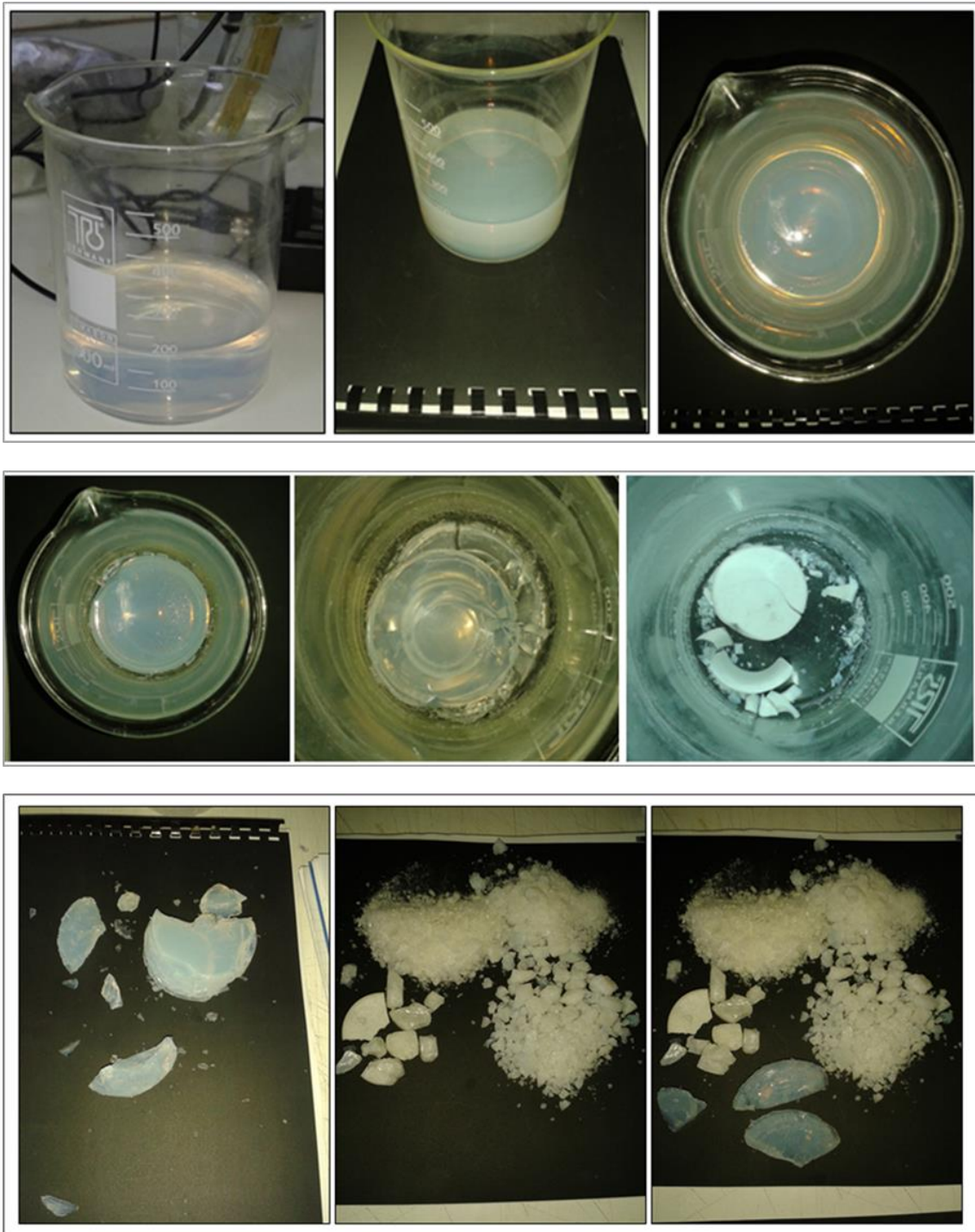
Σχήμα 6.10. Καμπύλες εξέλιξης του ιξώδους με τον χρόνο. Επίδραση της περιεκτικότητας αλάτων.



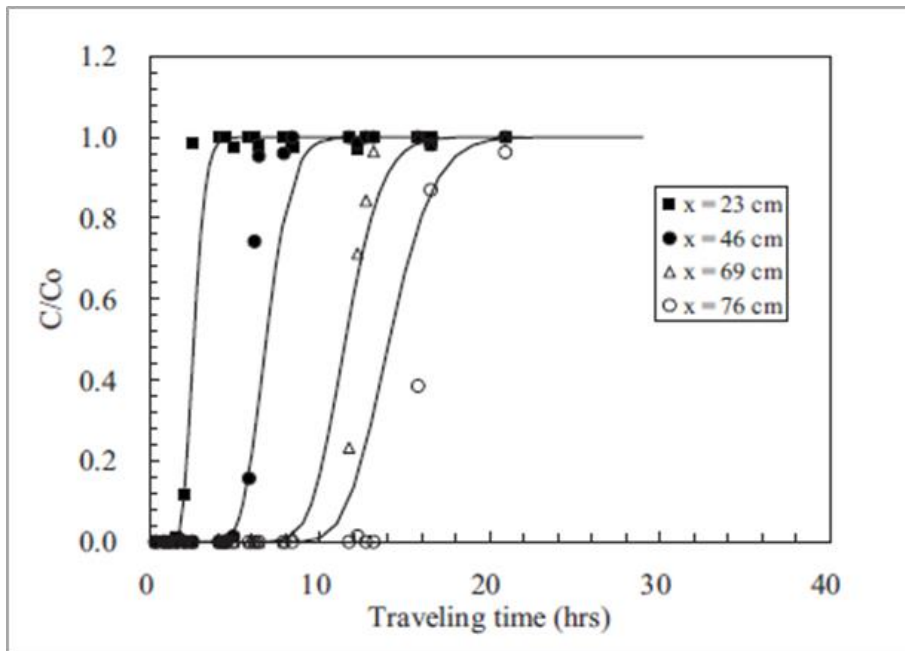
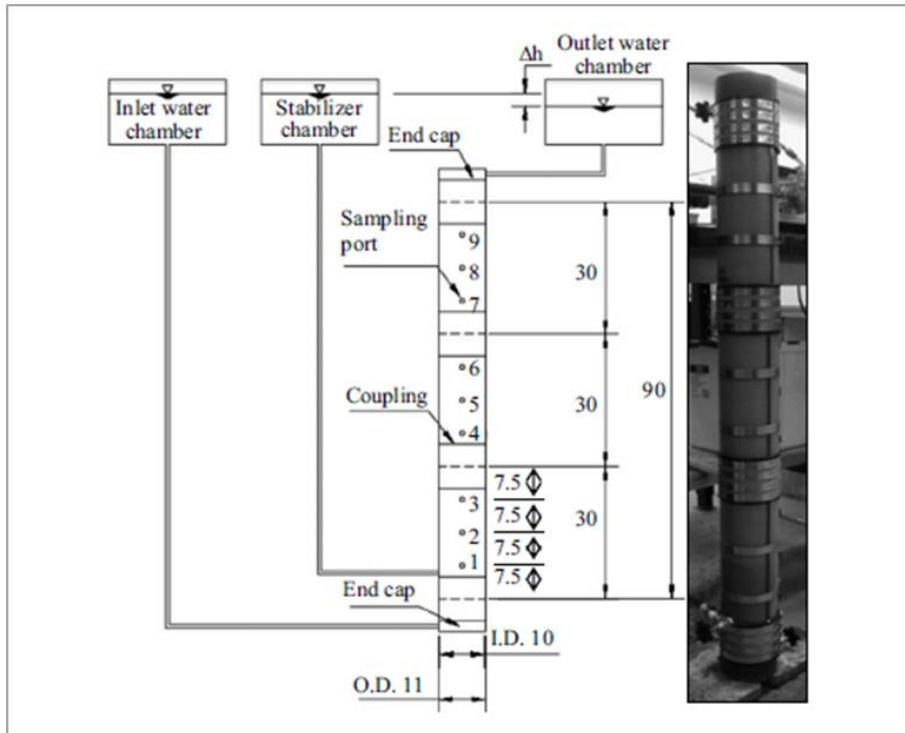
Σχήμα 6.11. Καμπύλες εξέλιξης του ιξώδους με τον χρόνο. Επίδραση του ποσοστού περιεκτικότητας πυριτίας CS(%), για PH=6 και κανονικότητα 0.03 N.



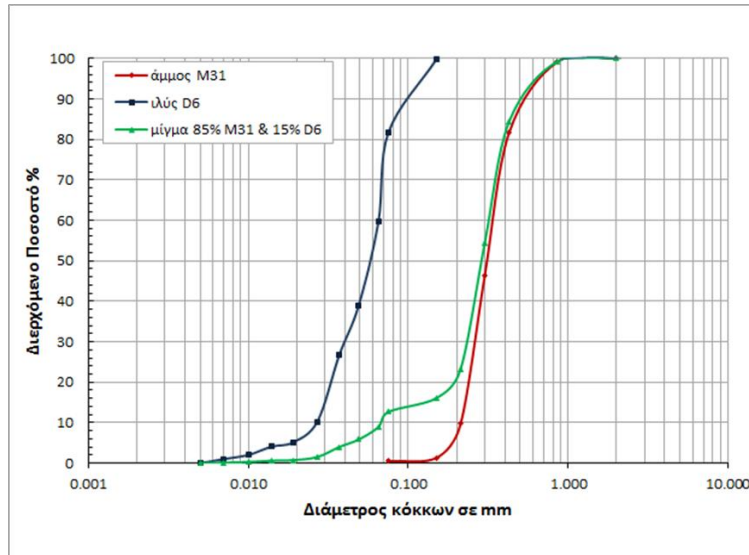
Σχήμα 6.12. Καμπύλες εξέλιξης του ιξώδους με τον χρόνο. Επίδραση του PH, για κανονικότητα 0.03 N και περιεκτικότητες πυριτίας CS=5% και CS=10%.



Σχήμα 6.13. Στάδια ξήρανσης της γέλης κολλοειδούς πυριτίας. Η γέλη μεταπίπτει σε ένα σκληρό, πορώδες, ψαθυρό στερεό που μοιάζει με πλαστικό.

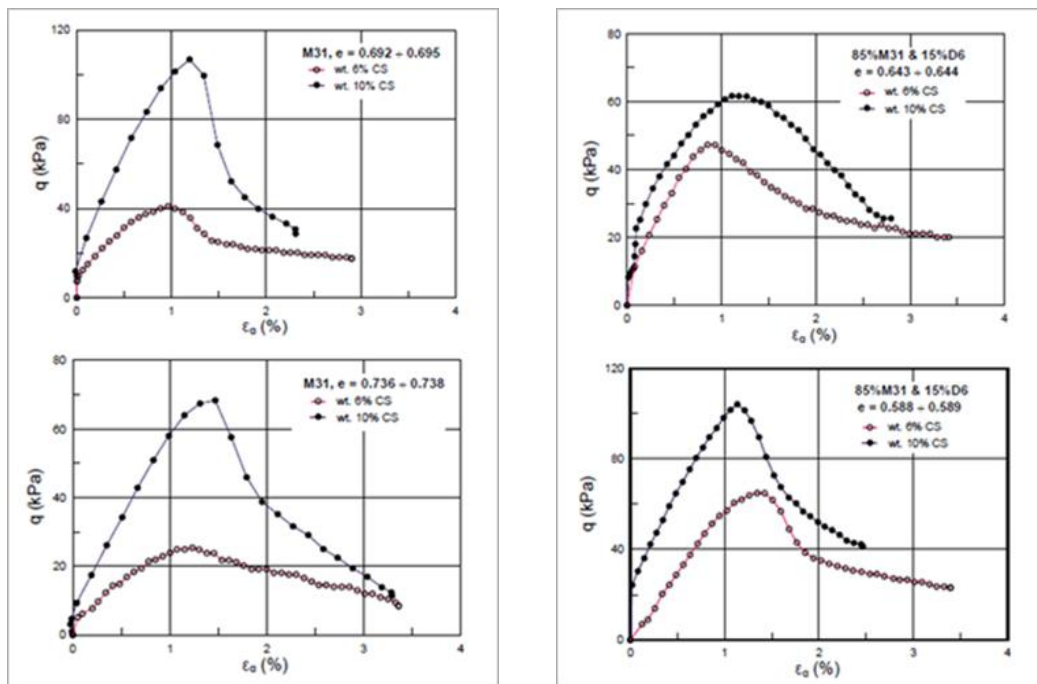


Σχήμα 6.14. Πάνω: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησαν οι Gallagher και Lin για την εισπίεση υγρούματος κολλοειδούς πυριτίας σε εδαφικές στήλες ύψους 0.90 m. Κάτω: Πειραματική επαλήθευση του υβριδικού αναλυτικού – αριθμητικού προσομοιώματος μεταφοράς της κολλοειδούς ουσίας, με μηχανισμό μεταγωγής και υδροδυναμικής διασποράς.

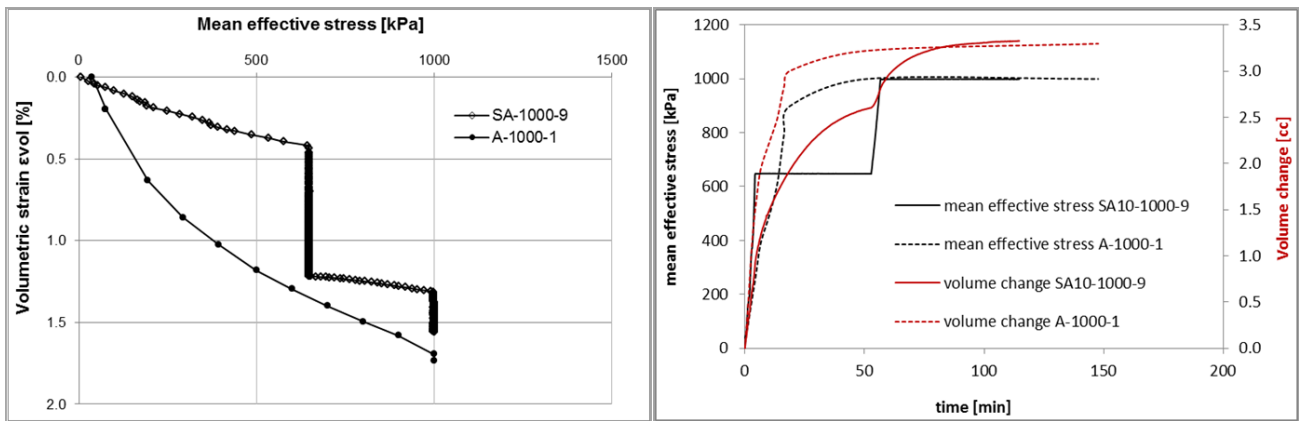


Φυσική ιδιότητα	Άμμος M31	Ιλύς D6	Ιλυώδης άμμος 85% wt. M31 & 15% wt. D6
G_s	2.66	2.62	2.65
e_{max}	0.80	1.06	0.75
e_{min}	0.50	0.66	0.40
D_{10} (mm)	0.213	0.026	0.067
D_{30} (mm)	0.258	0.040	0.234
D_{50} (mm)	0.310	0.058	0.280
D_{60} (mm)	0.336	0.066	0.320
C_u	1.58	2.54	4.78

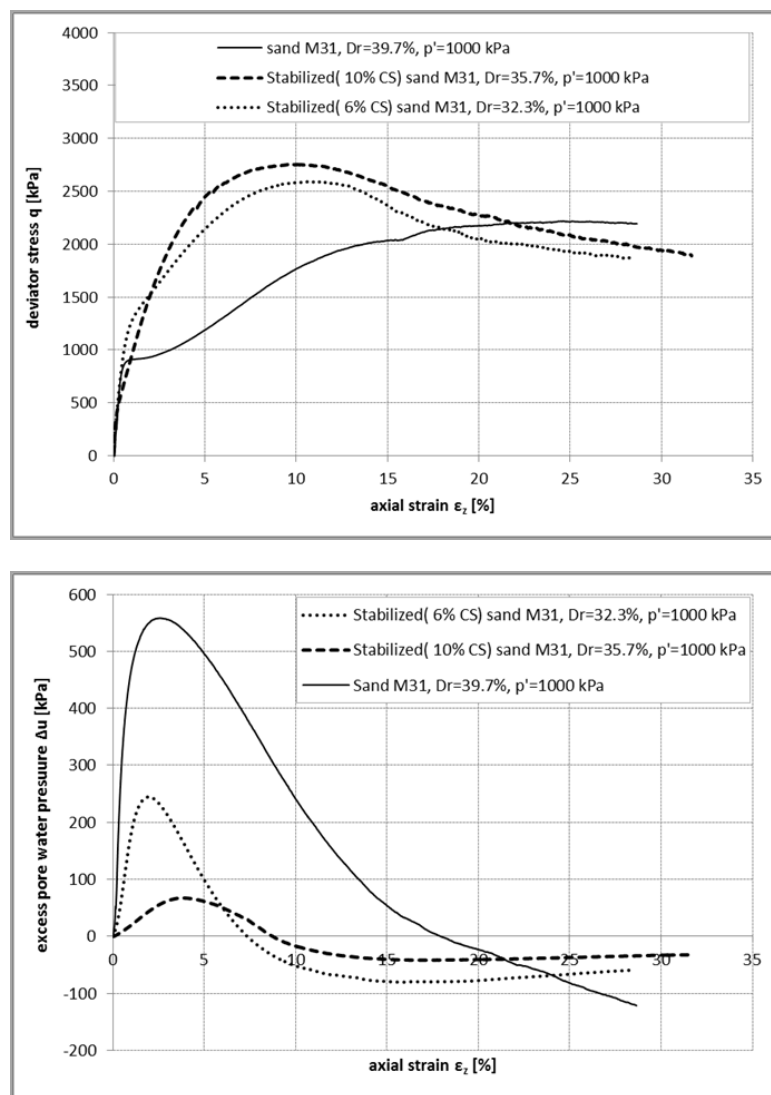
Σχήμα 6.15. Κοκκομετρικές καμπύλες και φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών.



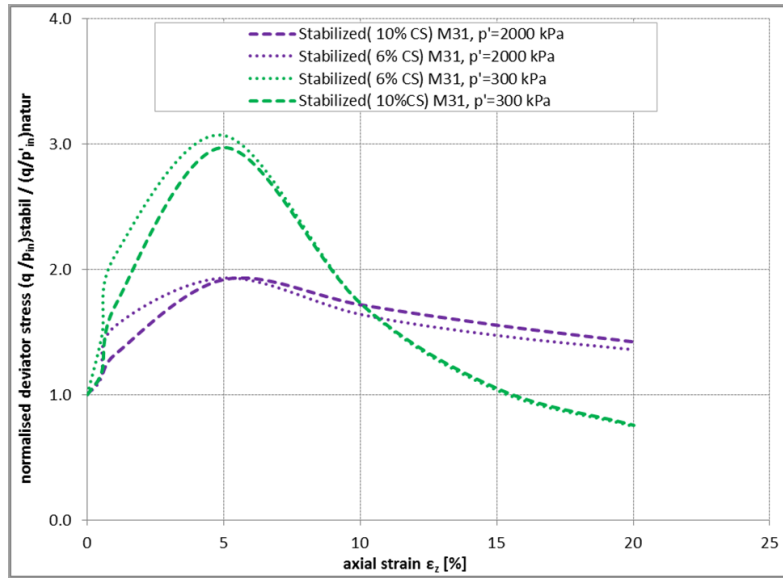
Σχήμα 6.16. Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα εδάφη.



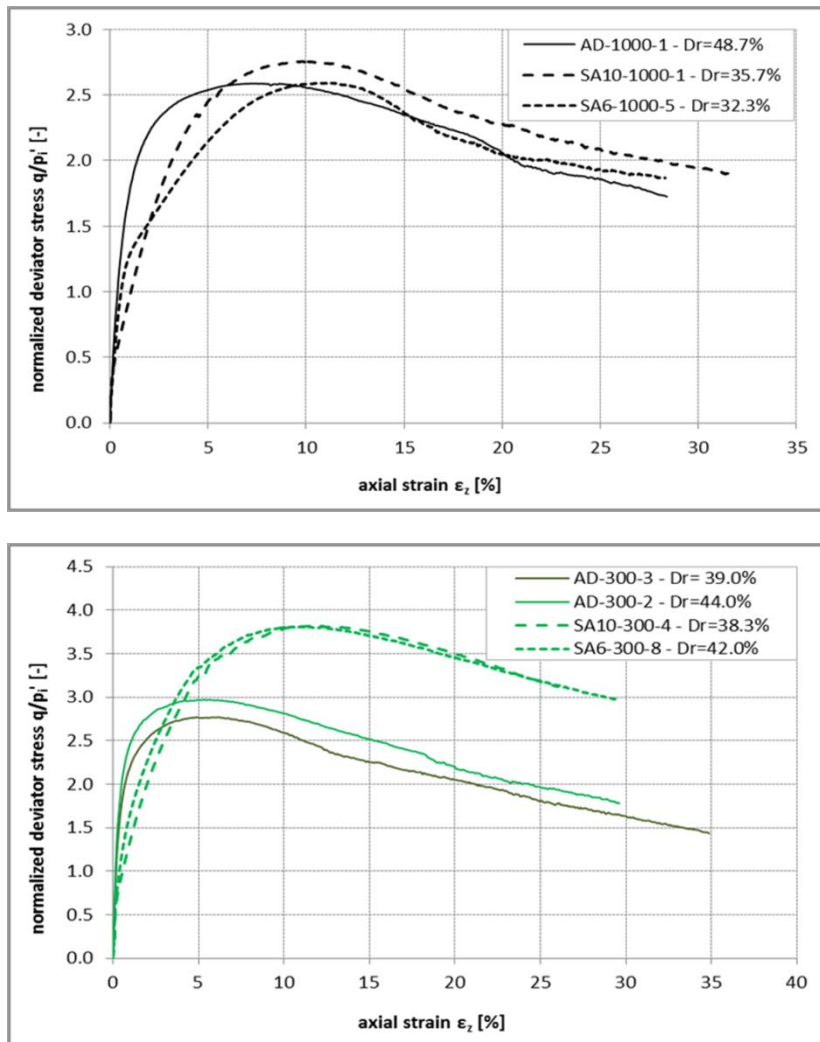
Σχήμα 6.17. Στερεοποίηση φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31.



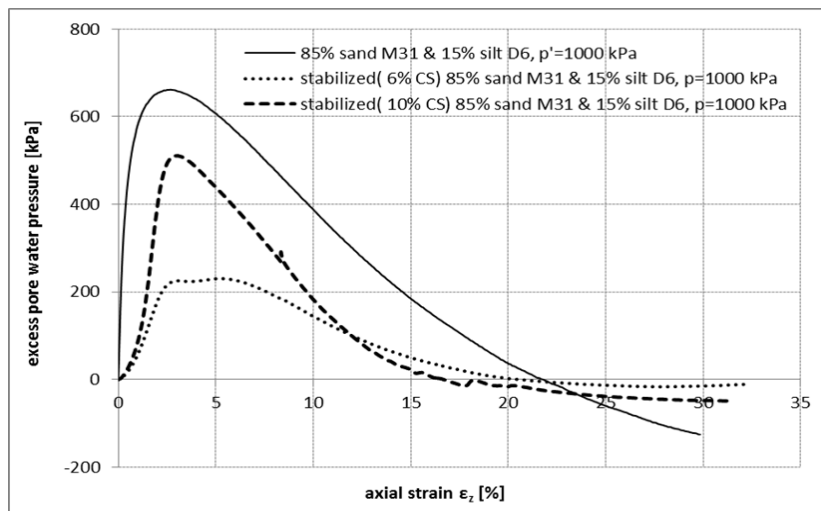
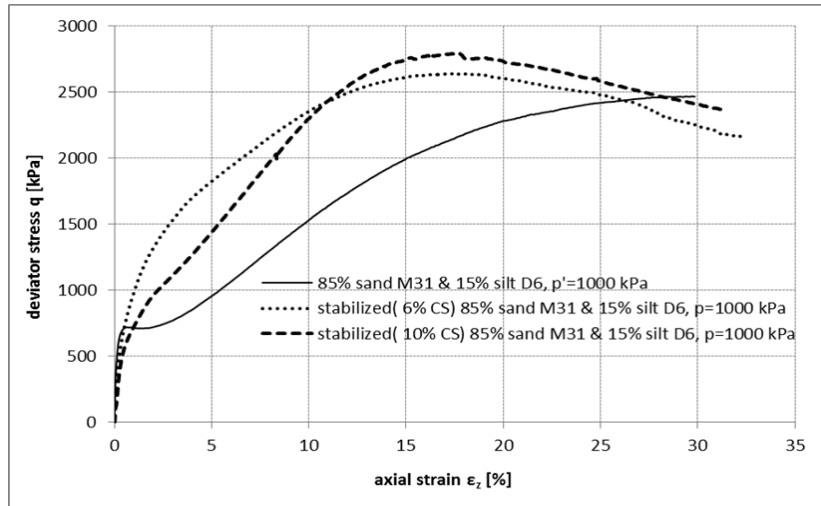
Σχήμα 6.18. Μονοτονική τριαξονική θλίψη φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31, με αρχική ενεργό τάση 1000 kPa, υπό αστράγγιστες συνθήκες.



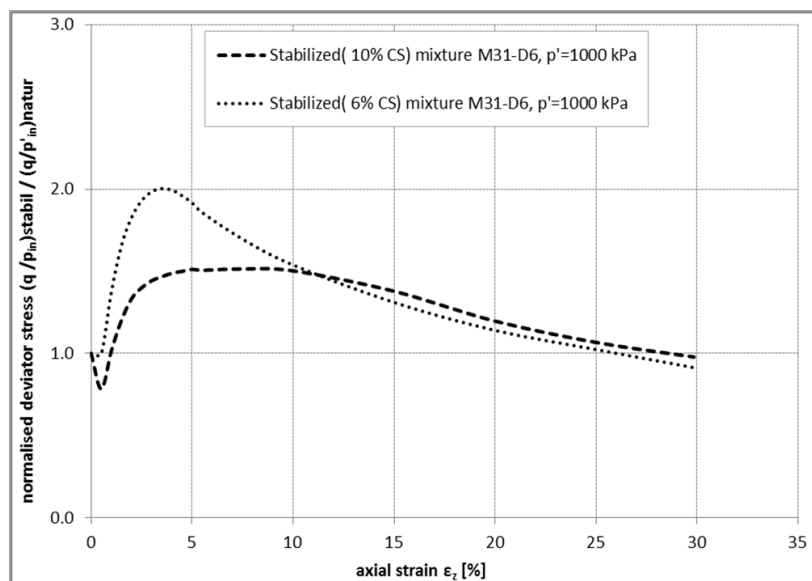
Σχήμα 6.19. Αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης αντοχής σταθεροποιημένης άμμου M31.



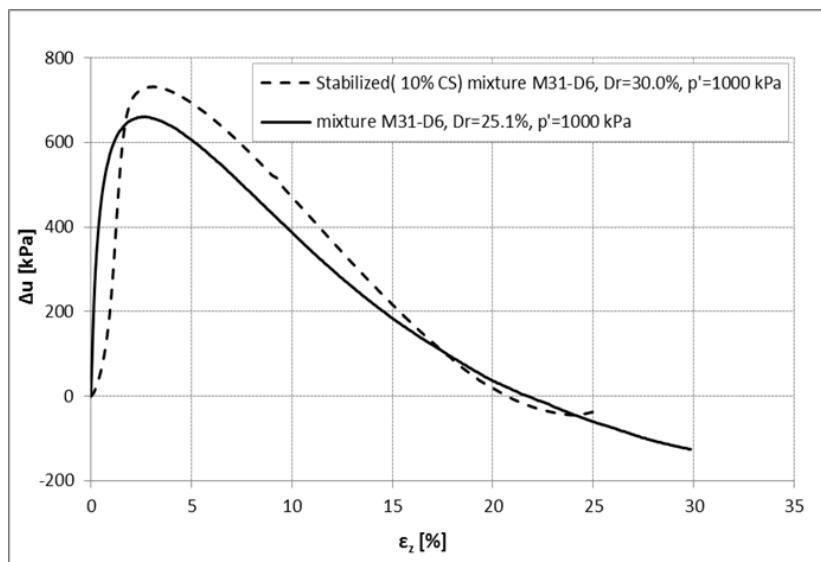
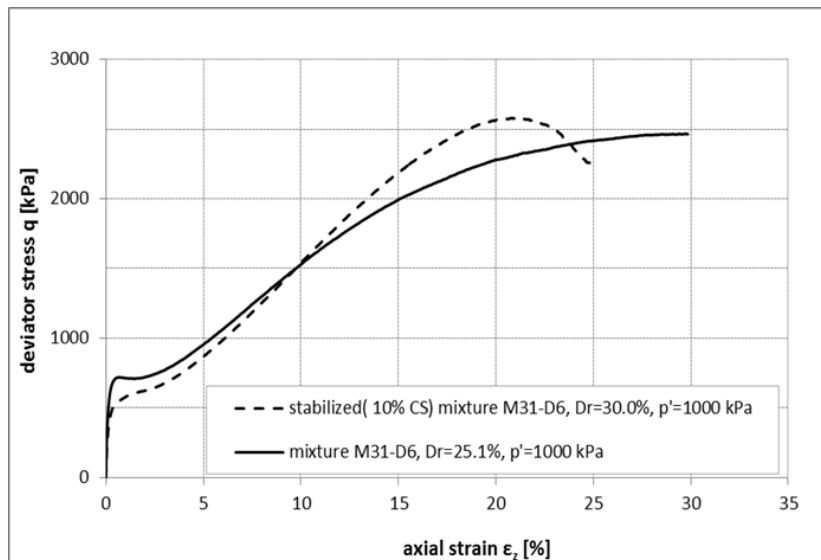
Σχήμα 6.20. Σύγκριση συμπεριφοράς σταθεροποιημένης άμμου M31 σε μονοτονική τριαξονική θλίψη υπό αστάργγιστες συνθήκες(διακεκομμένες γραμμές) και φυσικής άμμου M31 υπό στραγγιζόμενες συνθήκες(συμπαγείς γραμμές).



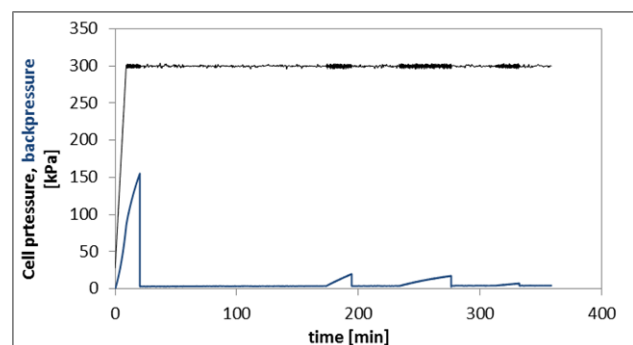
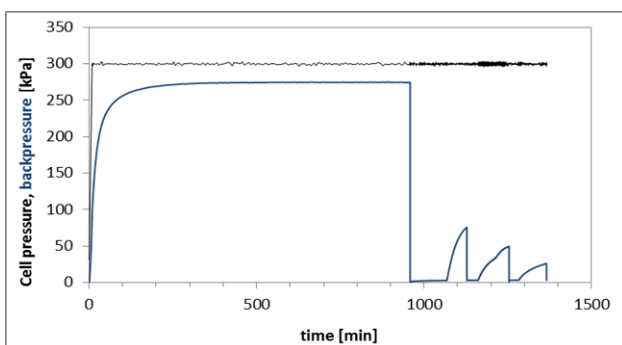
Σχήμα 6.21. Μονοτονική τριαξονική θλίψη φυσικής και σταθεροποιημένης ιλυώδους άμμου M31 – D6, με αρχική ενεργό τάση 1000 kPa, υπό αστράγγιστες συνθήκες.



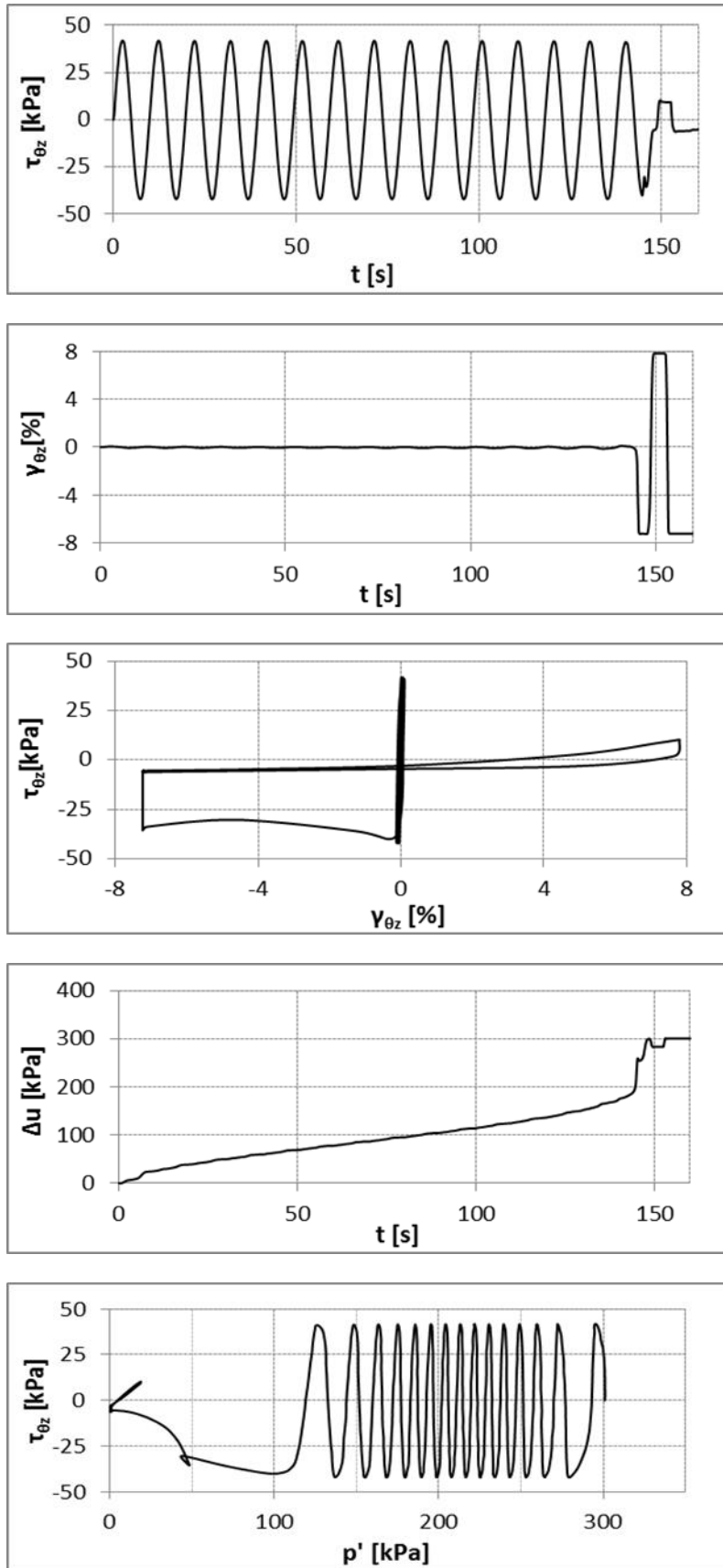
Σχήμα 6.22. Αδιάστατος παράγοντας βελτίωσης αντοχής σταθεροποιημένου μίγματος M31-D6.



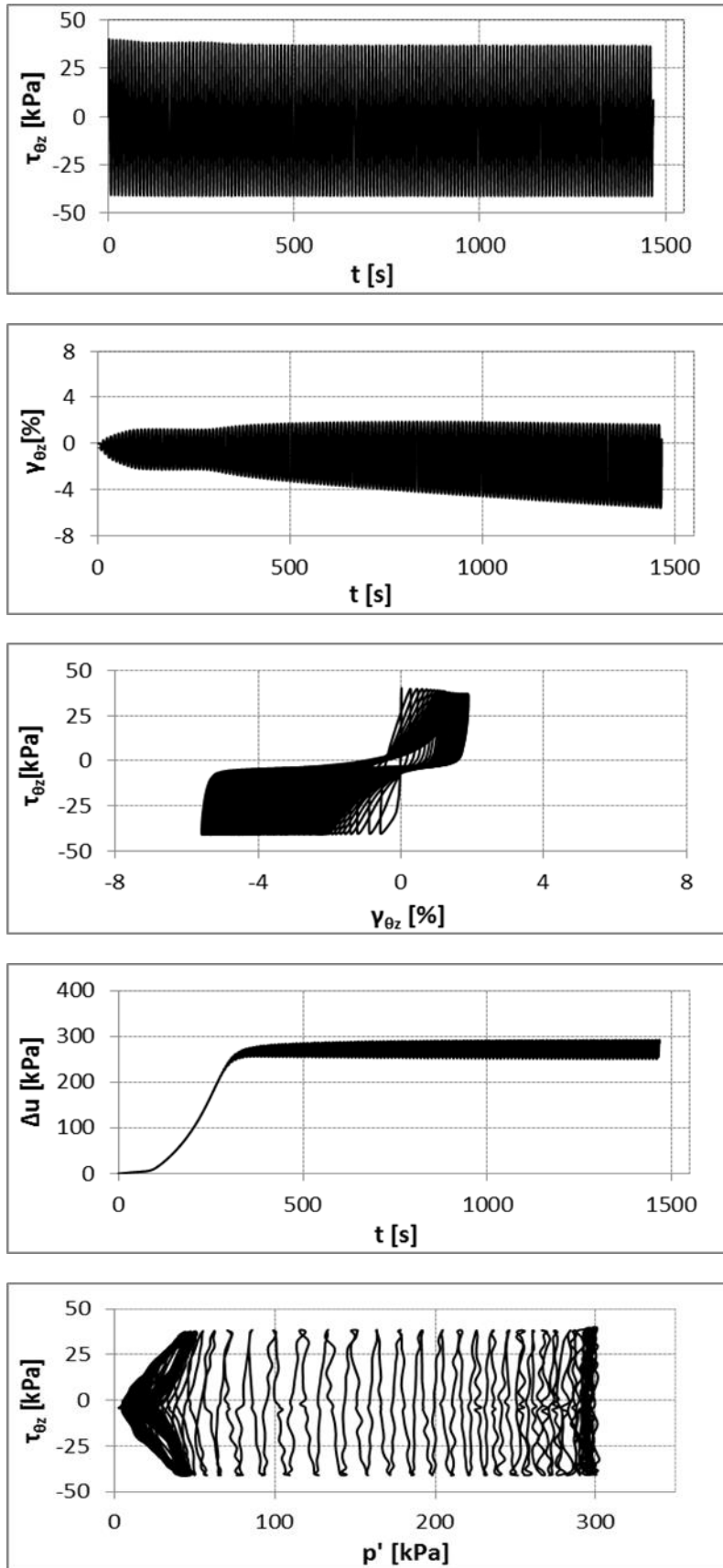
Σχήμα 6.23. Δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης, υπό αστράγγιστες συνθήκες, στις οποίες η σταθεροποιημένη ιλυώδης άμμος συμπεριφέρθηκε όπως η φυσική.



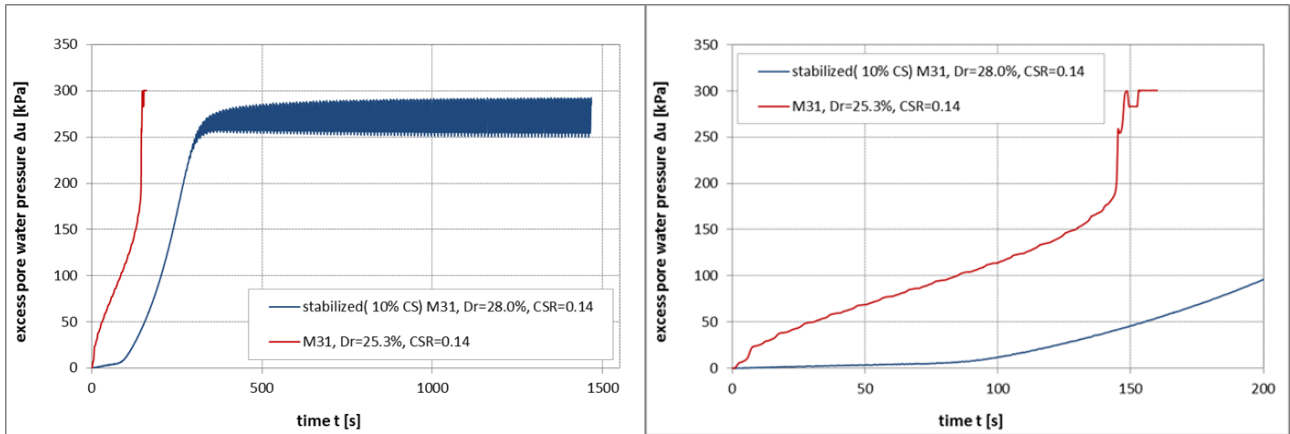
Σχήμα 6.24. Πρακτικός έλεγχος του βαθμού ολοκλήρωσης της στερεοποίησης, όταν δεν μετρείται ο όγκος νερού που εκρέει μέσα από το δοκίμιο. Στα χρονικά διαστήματα που απαγορεύεται η στράγγιση, ένα μέτωπο πίεσης εκδηλώνεται αργά στον μετρητή. Αν αυτό το μέτωπο είναι ασθενές τότε θεωρείται ότι όλο το πεπιεσμένο νερό μέσα από τη γέλη έχει εκρεύσει. Η στερεοποίηση έχει ολοκληρωθεί. Καταγραφή στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης.



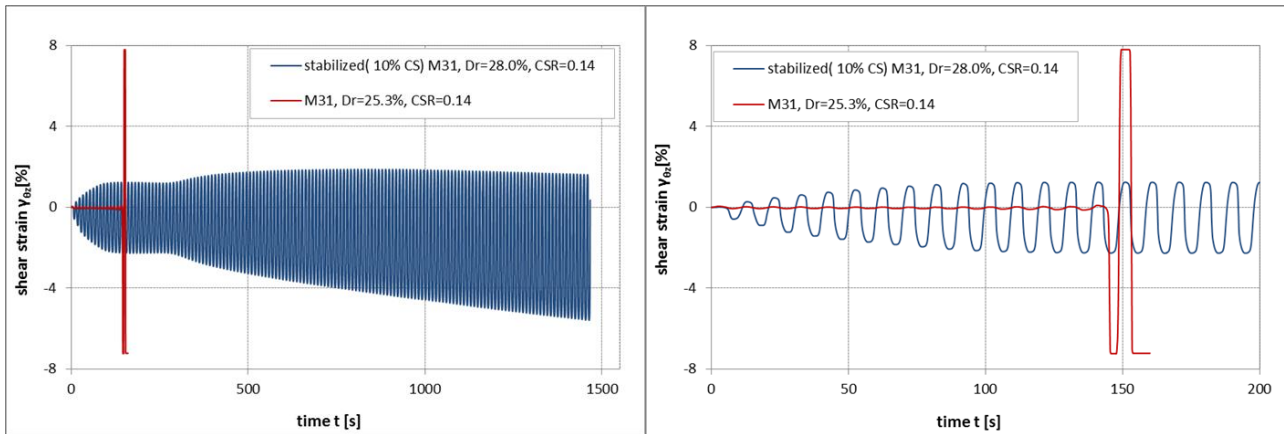
Σχήμα 6.25. Ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες φυσικής άμμου M31. Δοκιμή A-300-3, $D_r=25.3\%$, $CSR=0.14$, $N_{5\%}=14.6$, $N_{1\%}=14.5$.



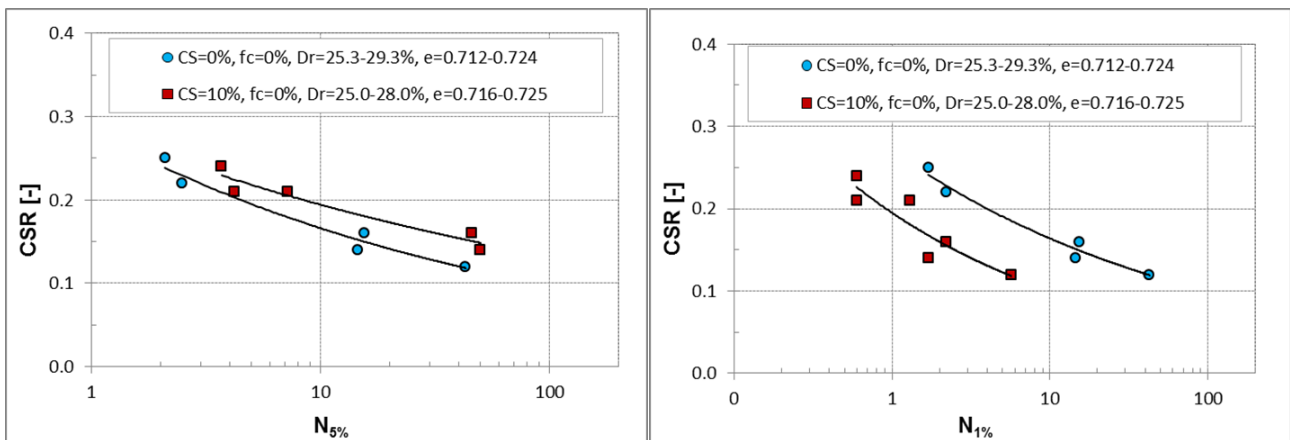
Σχήμα 6.26. Ανακυκλική στρεπτική διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες σταθεροποιημένης άμμου M31. Δοκιμή SA10-300-9, $D_r=28.0\%$, $CSR=0.14$, $N_{5\%}=49.9$, $N_{1\%}=1.7$.



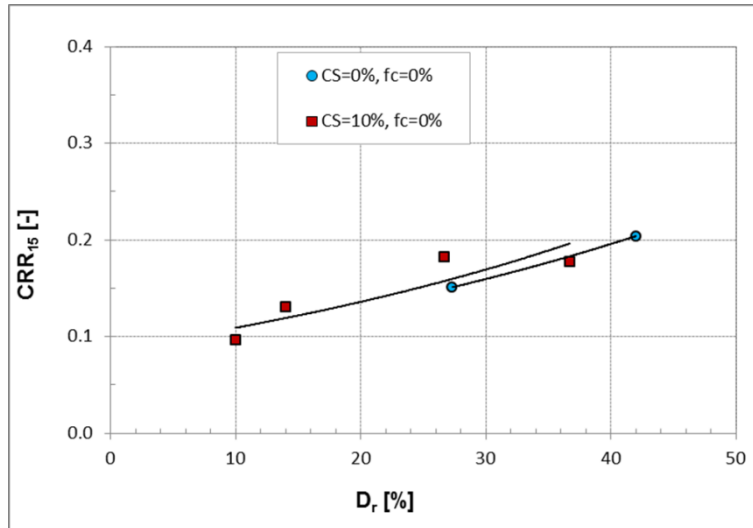
Σχήμα 6.27. Σύγκριση της ανάπτυξης υπέρ – πίεσης στο υγρό των πόρων της φυσικής(κόκκινη γραμμή) και της σταθεροποιημένης(μπλε γραμμή) άμμου. Όταν το στερεό δίκτυο της γέλης είναι σχετικά υγιές αδρανοποιεί το νερό σαν μία ηλεκτροχημική απόχρη και τα μέτωπα πίεσης αργούν να εκδηλωθούν στον μετρητή. Όταν η γέλη τραυματιστεί γίνεται πιο υδαρής και οι αναγνώσεις περισσότερο άμεσες.



Σχήμα 6.28. Σύγκριση της ανάπτυξης των παραμορφώσεων της φυσικής(κόκκινη γραμμή) και της σταθεροποιημένης(μπλε γραμμή) άμμου.



Σχήμα 6.29. Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης(CS=10%) άμμου M31 στο επίπεδο CSR – $N_{5\%}$ και CSR – $N_{1\%}$.



Σχήμα 6.30. Καμπύλες αντίστασης σε ρευστοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης (CS=10%) άμμου M31 στο επίπεδο $CRR_{15} - D_r$.

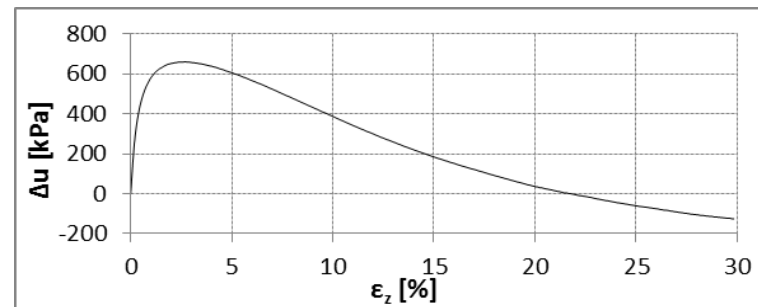
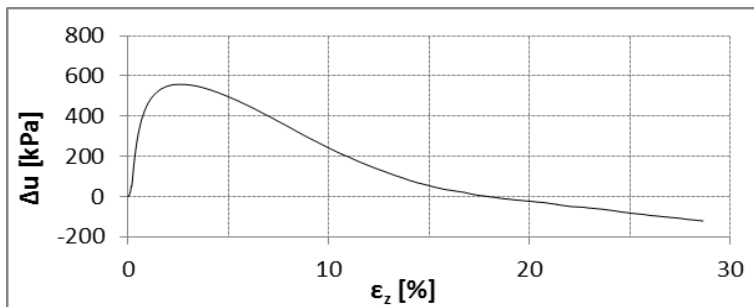
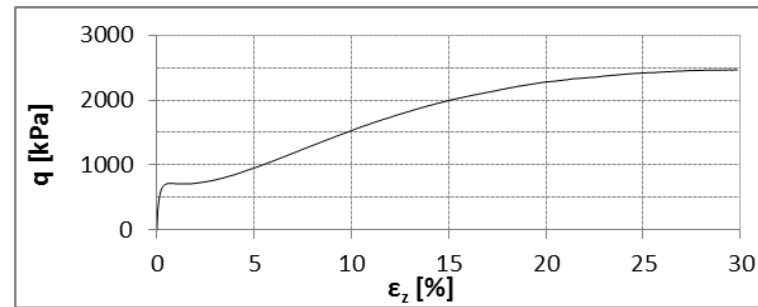
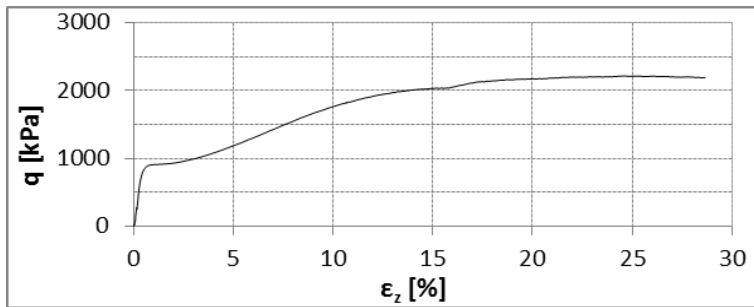
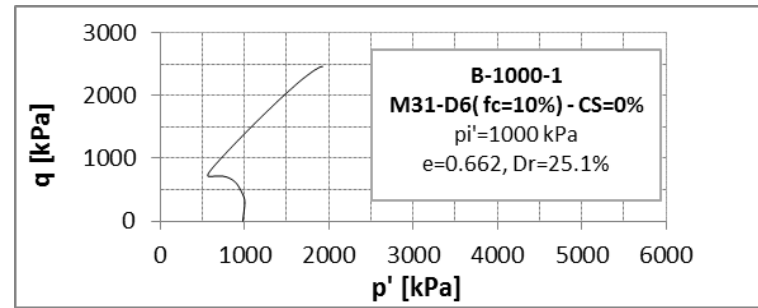
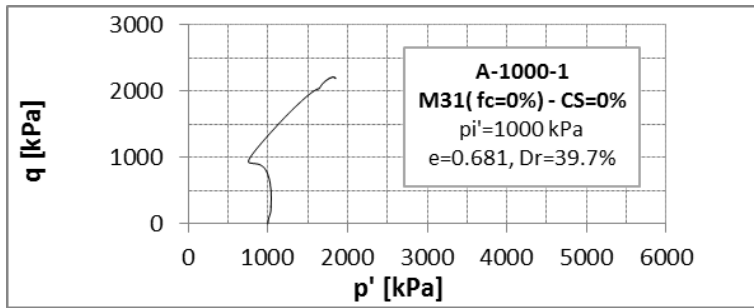
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π4-1

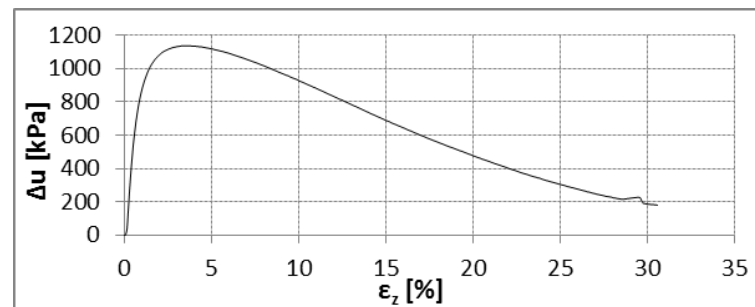
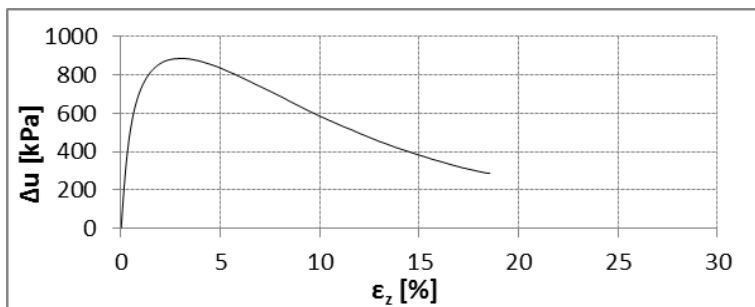
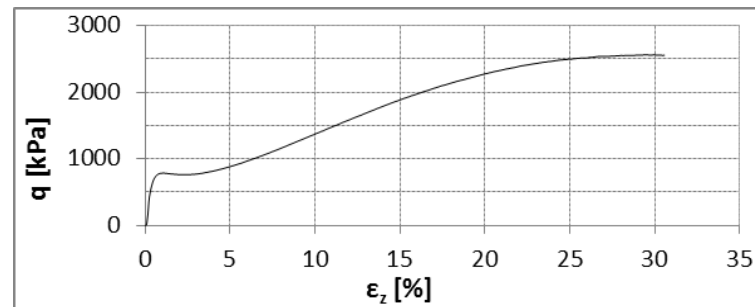
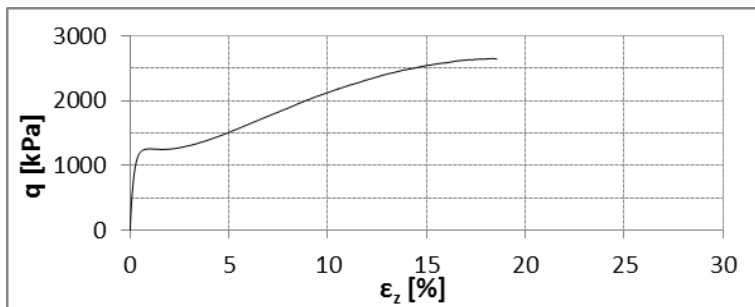
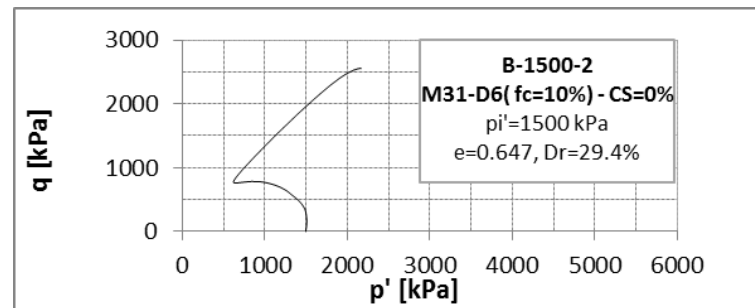
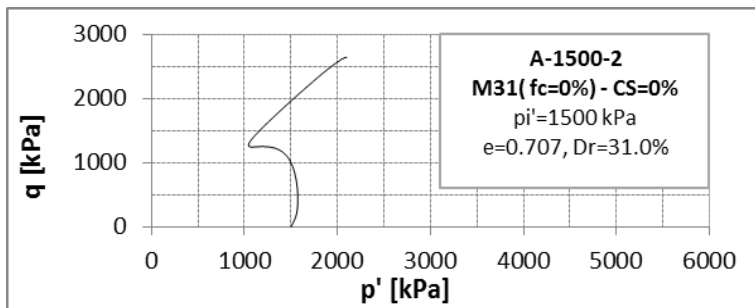
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CU** ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ
ΘΛΙΨΗΣ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΜΗ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Π4-1.1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CU τριαξονικής θλίψης σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31($f_c=0\%$) και σε μη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο($f_c=10\%$)

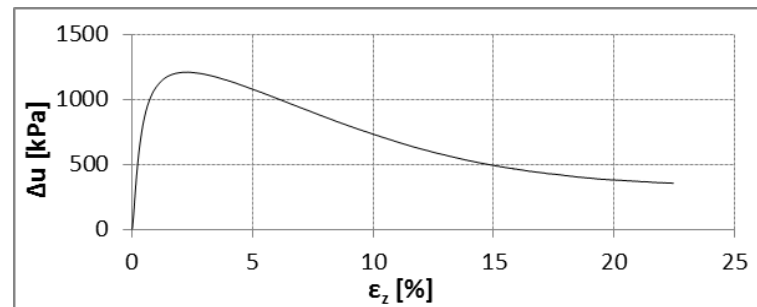
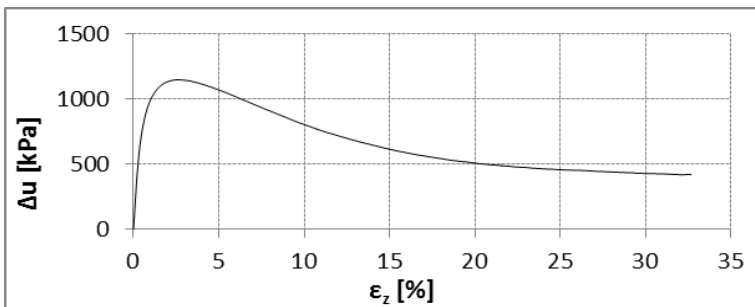
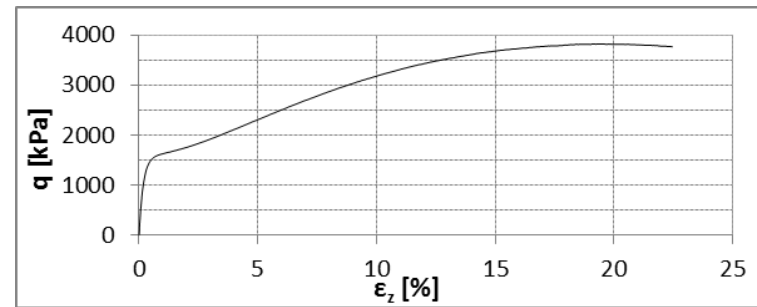
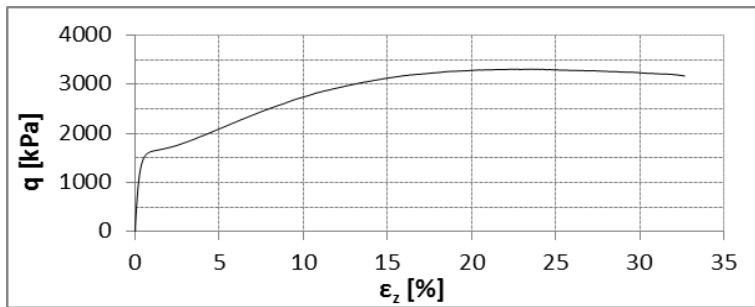
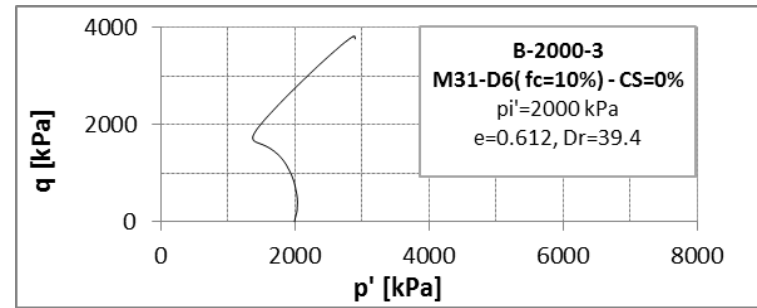
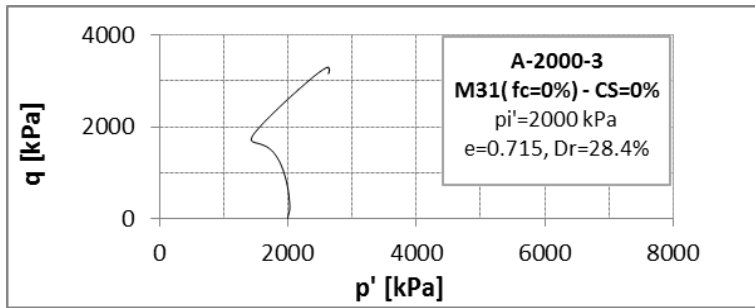
δοκιμή	f_c (%)	p_i' (kPa)	e (-)	D_r (%)
A-1000-1	0	1000	0.681	39.7
A-1500-2	0	1500	0.707	31.0
A-2000-3	0	2000	0.715	28.4
A-300-4	0	300	0.679	40.3
B-1000-1	10	1000	0.662	25.1
B-1500-2	10	1500	0.647	29.4
B-2000-3	10	2000	0.612	39.4
B-300-4	10	300	0.681	19.7



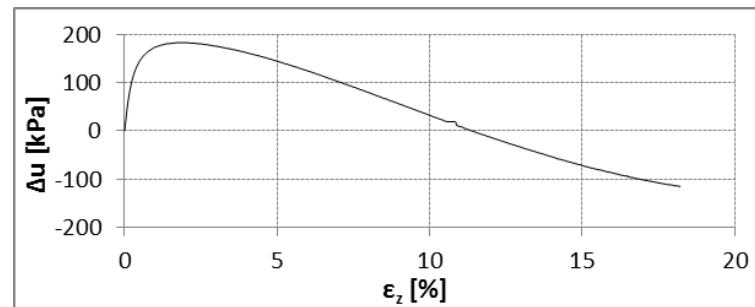
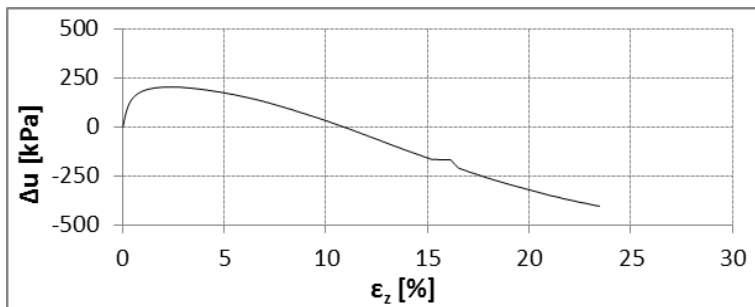
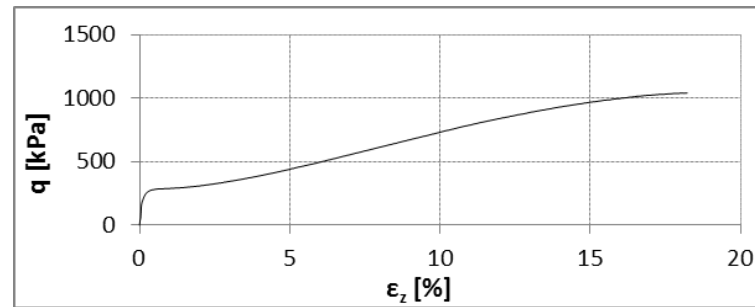
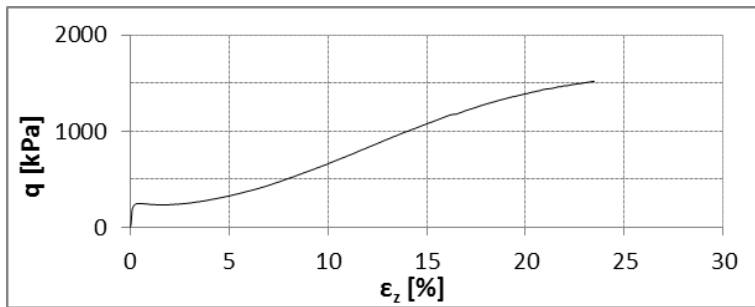
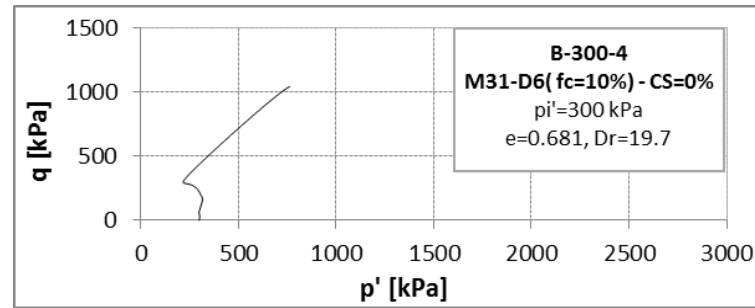
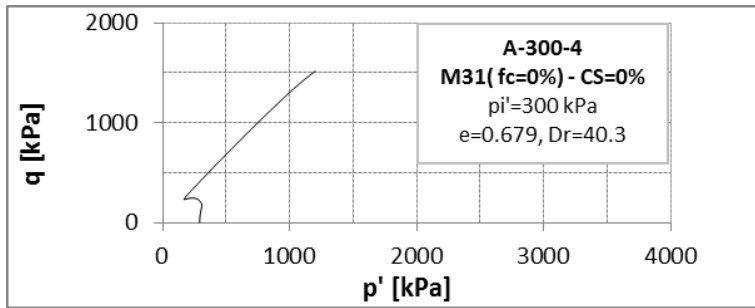
Σχήμα Π4-1.1. Δοκιμή A-1000-1(αριστερή στήλη) και B-1000-1(δεξιά στήλη)



Σχήμα Π4-1.2. Δοκιμή A-1500-2(αριστερή στήλη) και B-1500-2(δεξιά στήλη)



Σχήμα Π4-1.3. Δοκιμή A-2000-3(αριστερή στήλη) και B-2000-3(δεξιά στήλη)



Σχήμα Π4-1.4. Δοκιμή A-300-4(αριστερή στήλη) και B-300-4(δεξιά στήλη)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π4-2

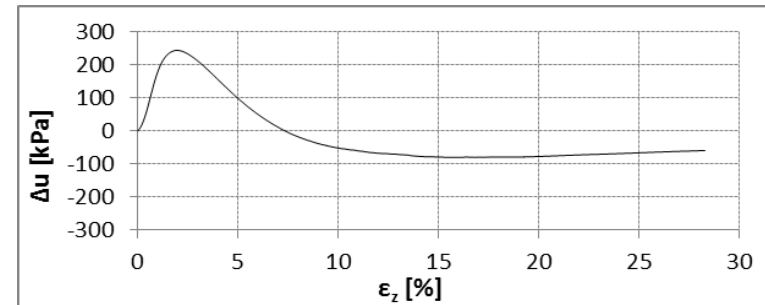
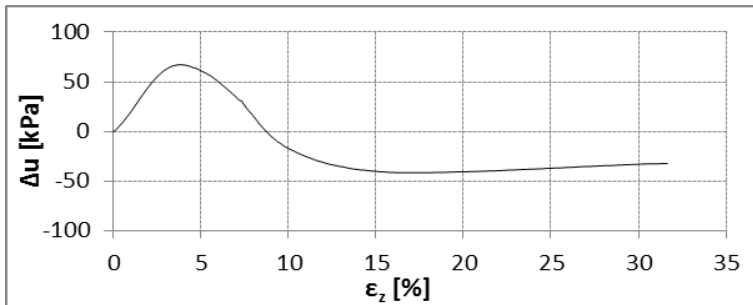
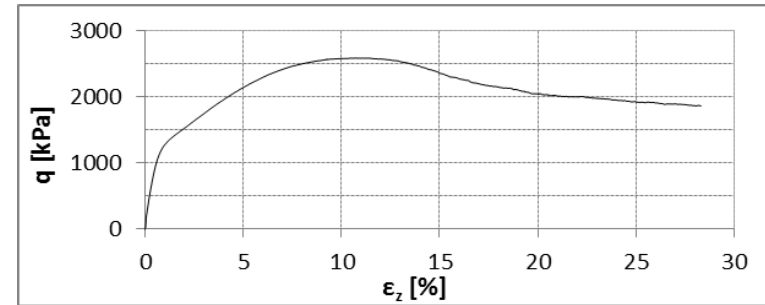
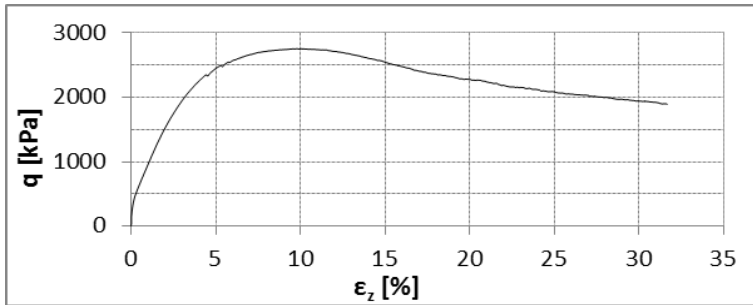
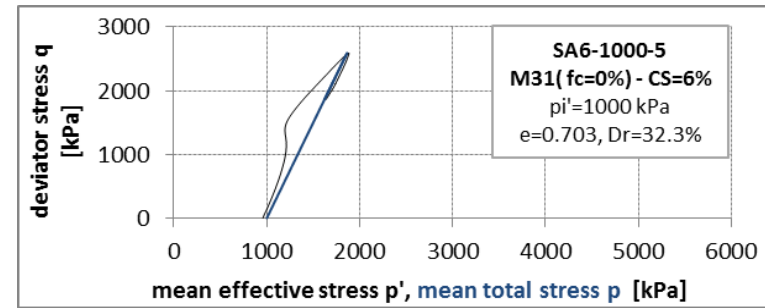
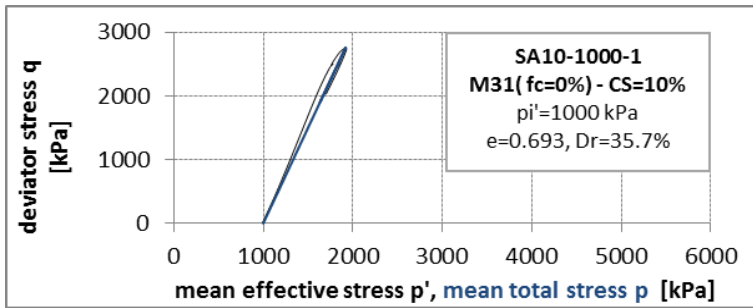
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CU** ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ
ΘΛΙΨΗΣ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Π4-2.1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CU τριαξονικής θλίψης σε σταθεροποιημένη CS=10% και 6% άμμο M31($f_c=0\%$) και σε σταθεροποιημένη CS=10% και 6% ιλυώδη άμμο($f_c=10\%$)

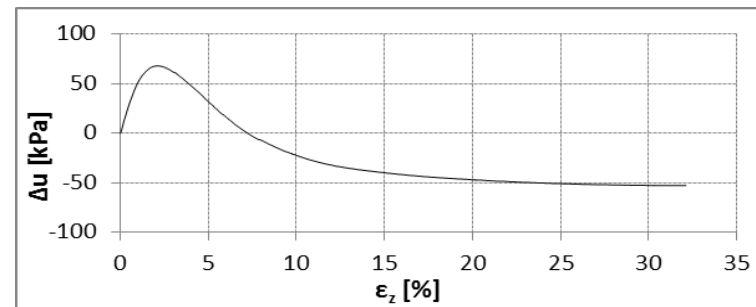
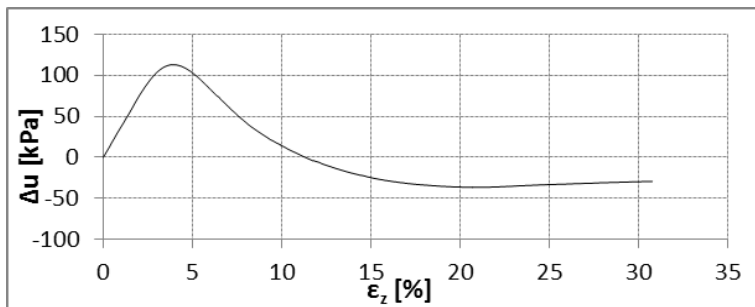
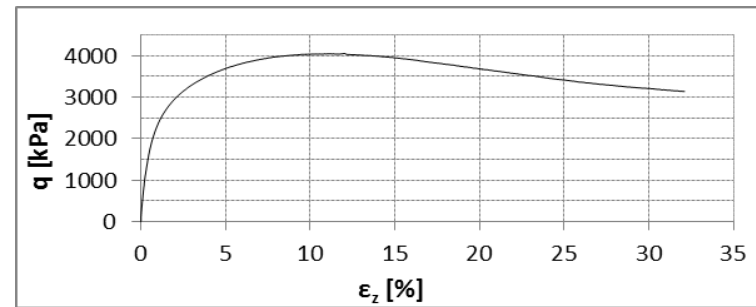
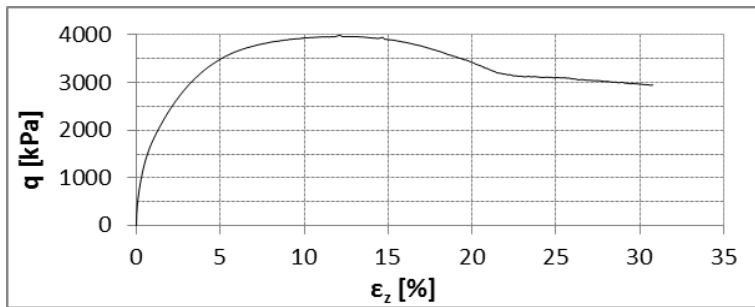
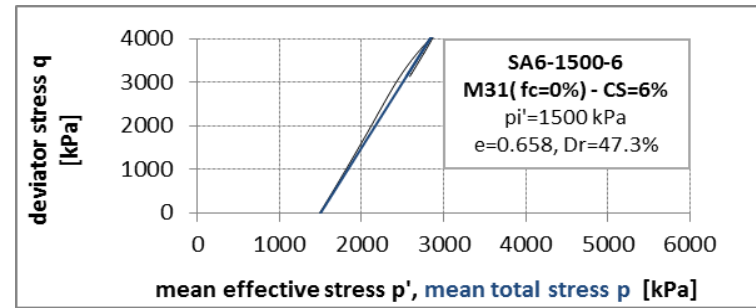
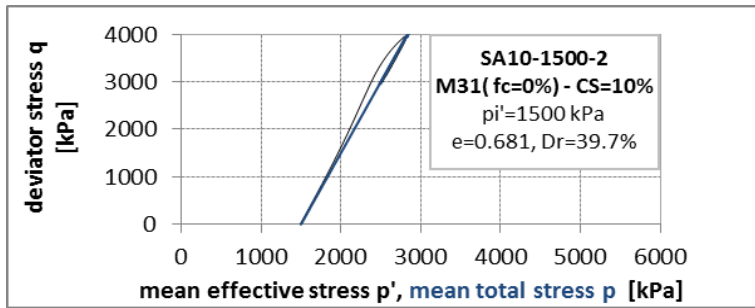
Δοκιμή	CS (%)	f_c (%)	Ηλικία κατά τη δοκιμή (h)	p_i' (kPa)	u_i (kPa)	e (-)	D_r (%)
SA10-1000-1	10	0	50	1000	10	0.693	35.7
SA10-1500-2	10	0	50	1500	10	0.681	39.7
SA10-2000-3	10	0	50	2000	10	0.677	41.0
SA10-300-4	10	0	50	300	10	0.685	38.3
SA6-1000-5	6	0	55	1000	40	0.703	32.3
SA6-1500-6	6	0	55	1500	10	0.658	47.3
SA6-2000-7	6	0	55	2000	10	0.694	35.3
SA6-300-8	6	0	55	300	10	0.674	42.0
SA10-1000-9 ¹	10	0	815	1000	50	0.704	32.1
SB10-1000-1 ²	10	10	50	1000	10	0.645	30.0
SB10-1000-2	10	10	68	1000	0	0.642	30.9
SB10-1000-3	10	10	95	1000	10	0.673	22.0
SB10-1000-4 ²	10	10	337	1000	0	0.663	24.9
SB10-1000-5 ²	10	10	50	1000	10	0.663	24.9
SB10-1000-6 ²	10	10	1515	1000	0	0.656	26.9
SB10-1500-7 ³	10	10	50	820	680	0.627	35.1
SB6-1000-8	6	10	76	1000	0	0.631	34.0
SB6-1000-9	6	10	118	1000	0	0.657	26.6
SB6-1500-10	6	10	55	1500	10	0.651	28.3

Οι αριθμοί στο επάνω, δεξιά μέρος των κωδικών των πειραμάτων SA10-1000-9, SB10-1000-1, SB10-1000-4, SB10-1000-5, SB10-1000-6, SB10-1500-7 αντιστοιχούν στα σχόλια:

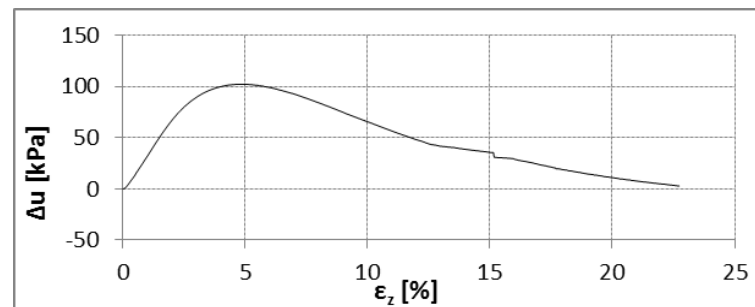
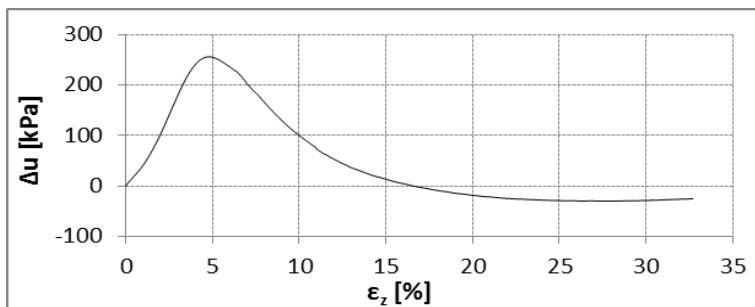
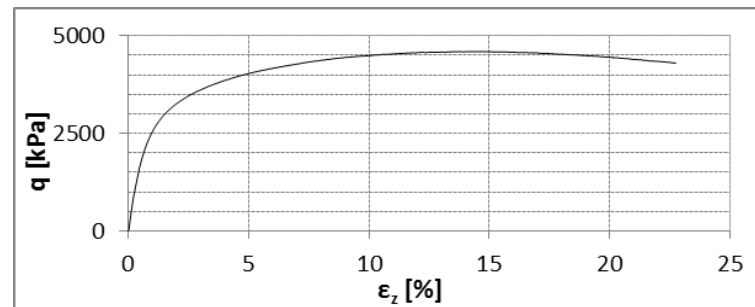
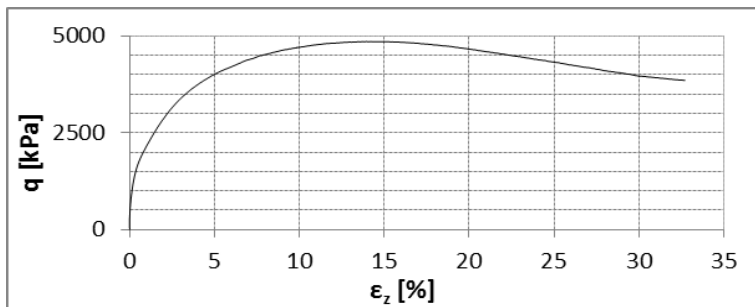
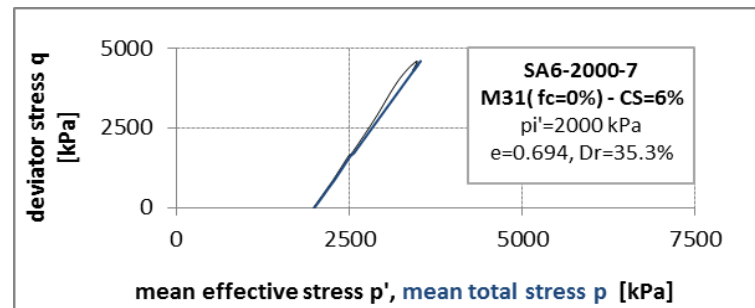
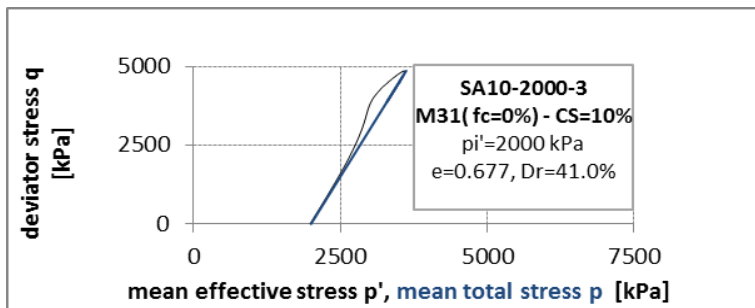
1. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο υποβλήθηκε σε ισότροπη στερεοποίηση με μέτρηση του όγκου του νερού που εξέρρευσε από τους πόρους του εδάφους και του στερεού σκελετού της πυριτίας. Μακροπρόθεσμα(σε χρόνο 120 min) η εκροή νερού ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστοιχη του δοκιμίου καθαρής άμμου. Το δοκίμιο ωρίμασε για 815 ώρες και το υγρόλυμα στους πόρους του εδάφους είχε σίγουρα μετατραπεί σε γέλη.
2. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο επέδειξε συμπεριφορά παρόμοια με το δοκίμιο καθαρής ιλυώδους άμμου.
3. Η πίεση του υγρού των πόρων στην αρχή του πειράματος ήταν 680 kPa καθώς η απόφραξη του σωληνίσκου εκροής κατά την στερεοποίηση απέτρεψε την εκτόνωσή της.



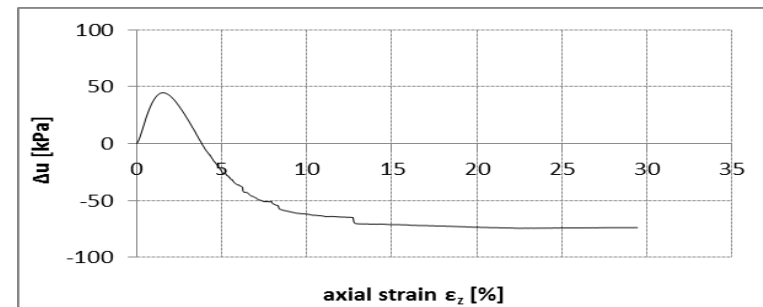
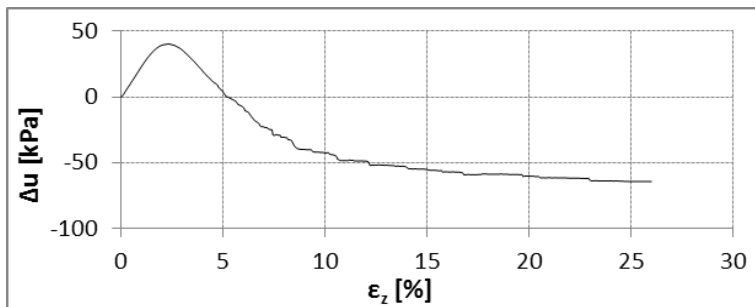
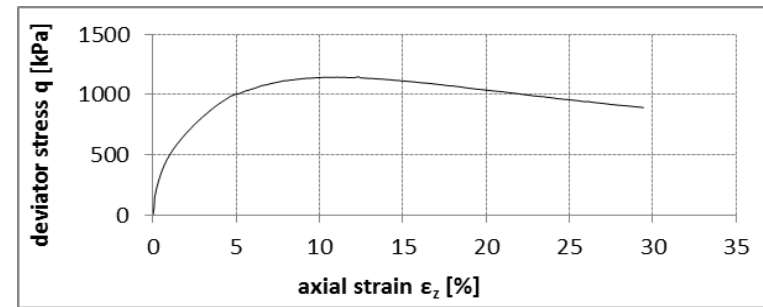
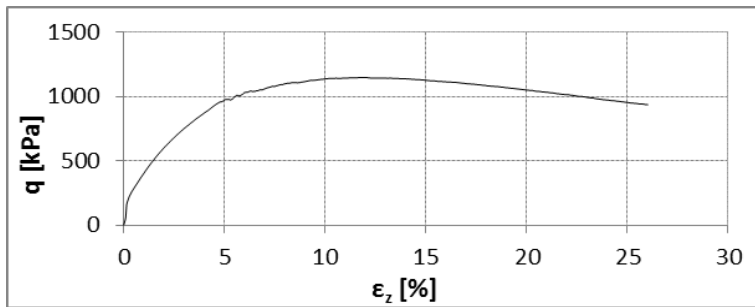
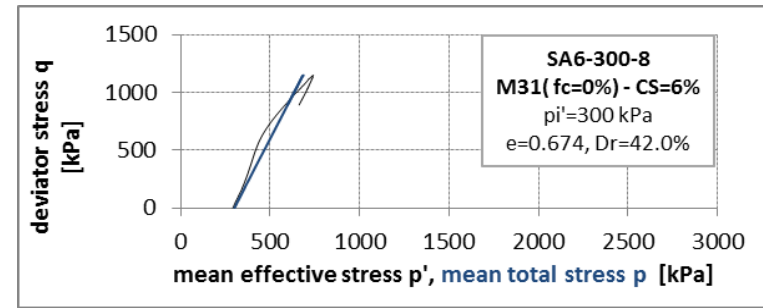
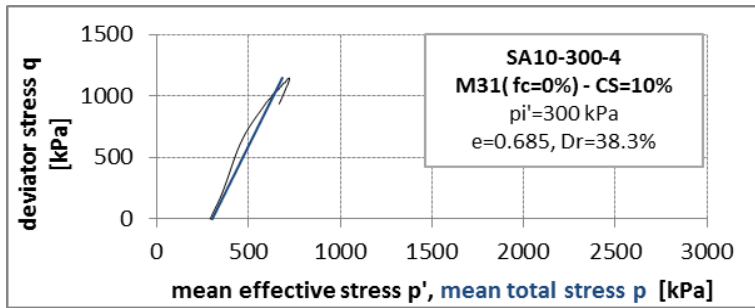
Σχήμα Π4-2.1. Δοκιμή SA10-1000-1(αριστερή στήλη) και SA6-1000-5(δεξιά στήλη)



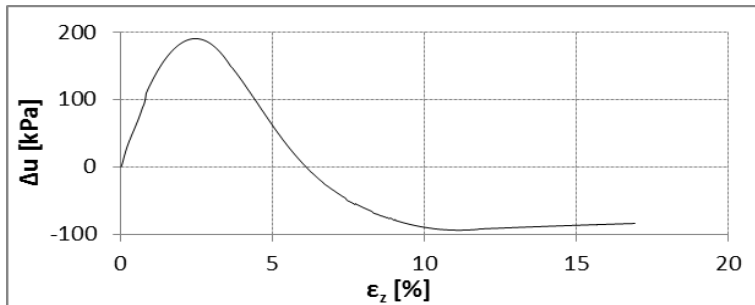
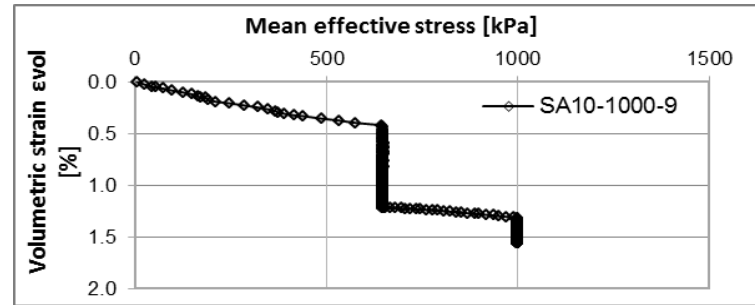
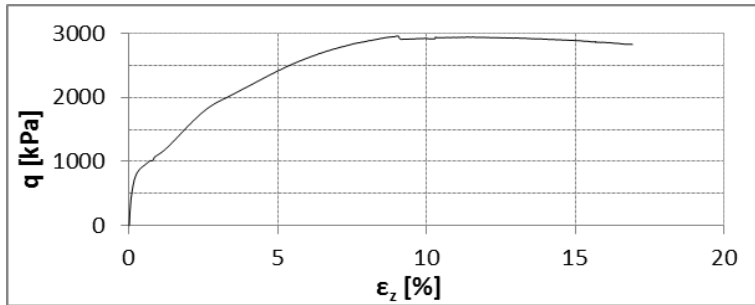
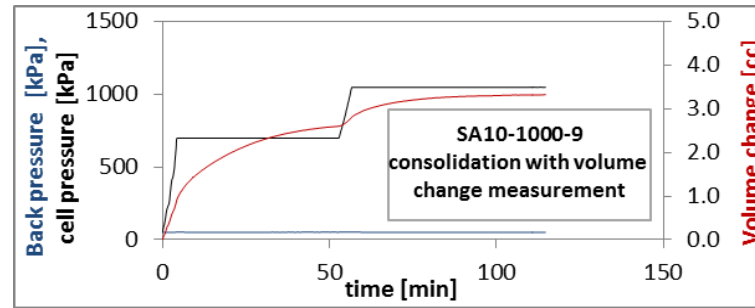
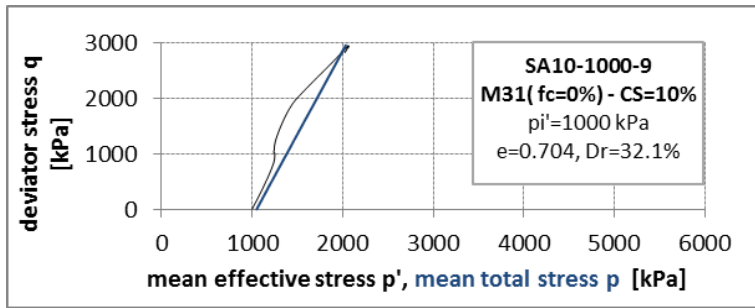
Σχήμα Π4-2.2. Δοκιμή SA10-1500-2(αριστερή στήλη) και SA6-1500-6(δεξιά στήλη)



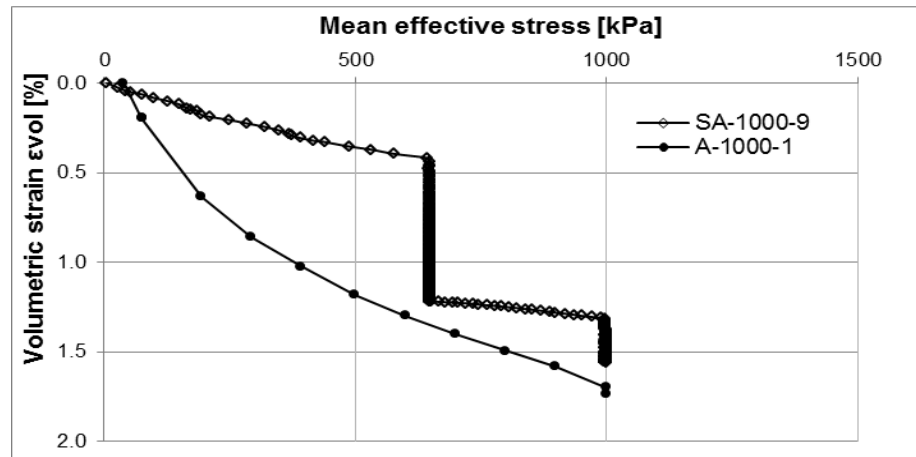
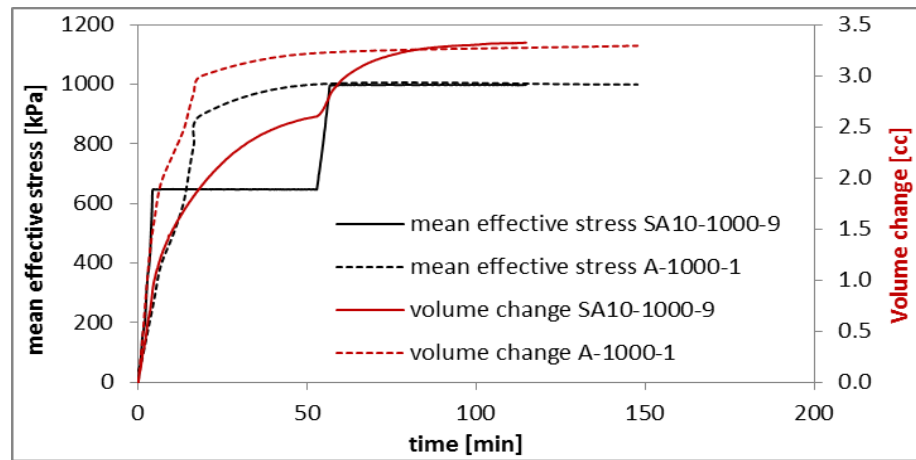
Σχήμα Π4-2.3. Δοκιμή SA10-2000-3(αριστερή στήλη) και SA6-2000-7(δεξιά στήλη)



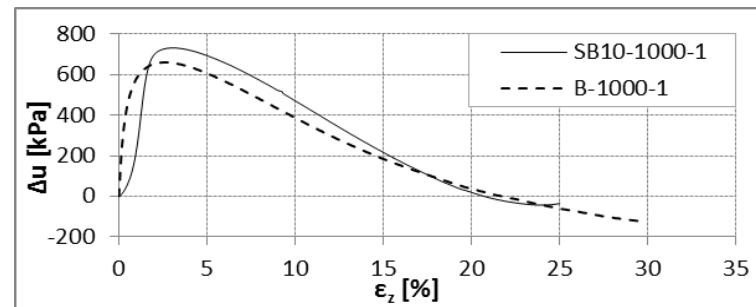
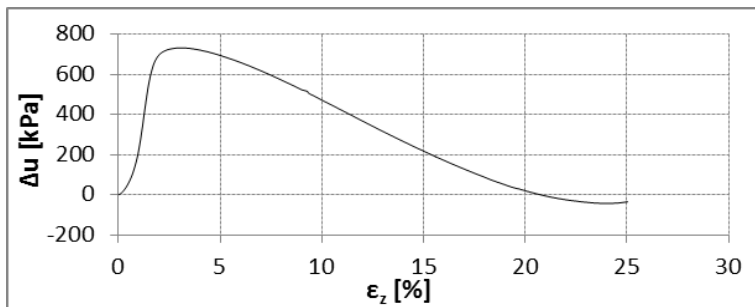
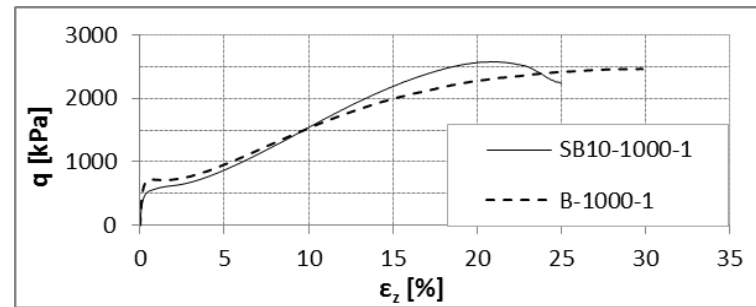
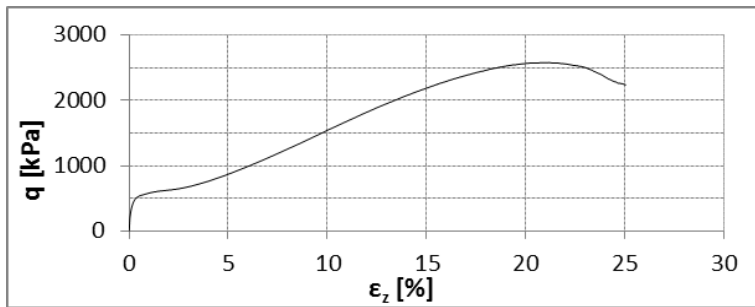
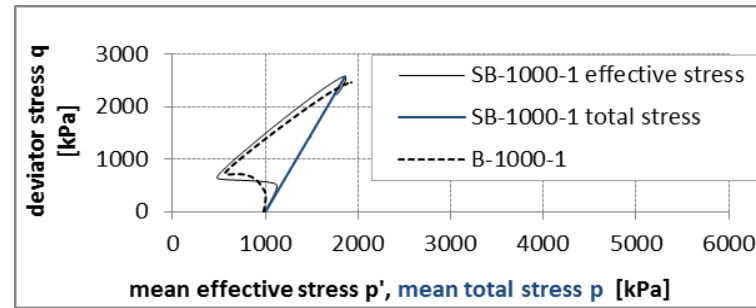
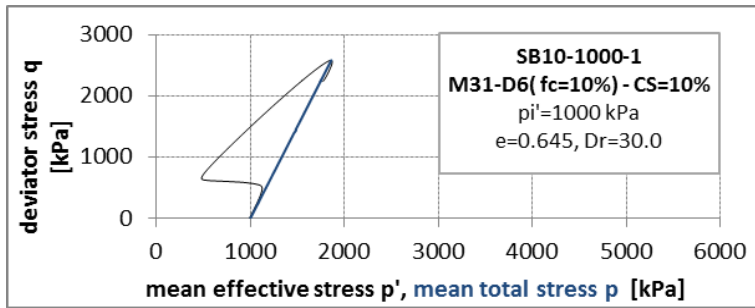
Σχήμα Π4-2.4. Δοκιμή SA10-300-4(αριστερή στήλη) και SA6-300-8(δεξιά στήλη)



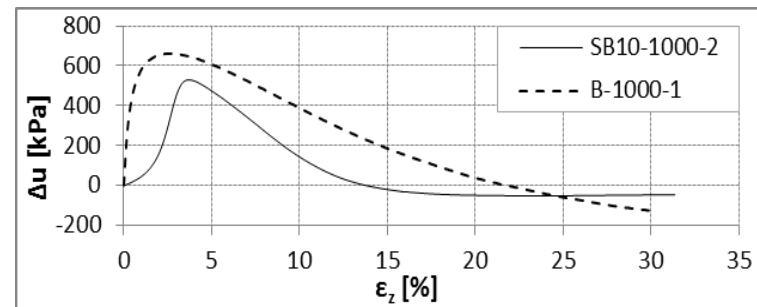
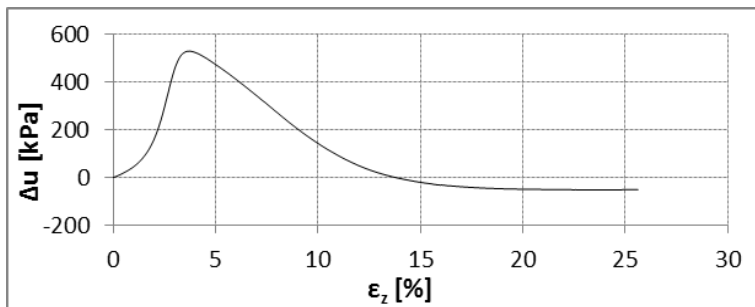
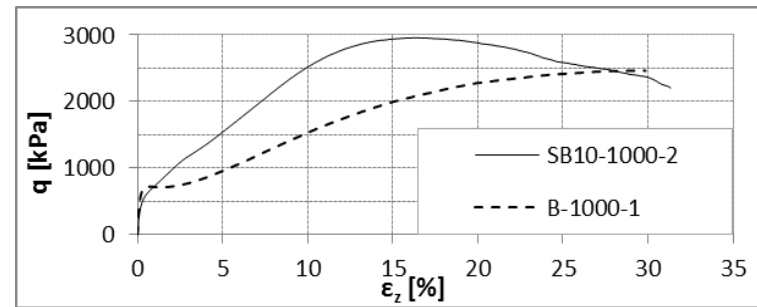
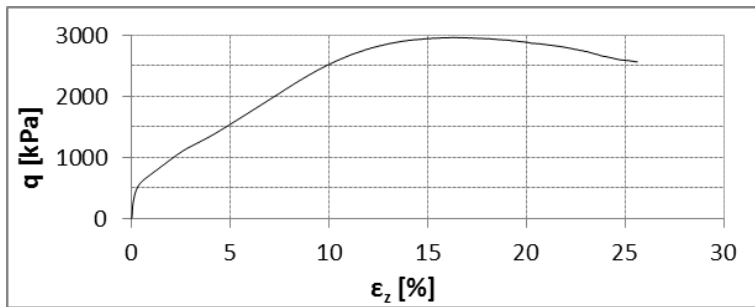
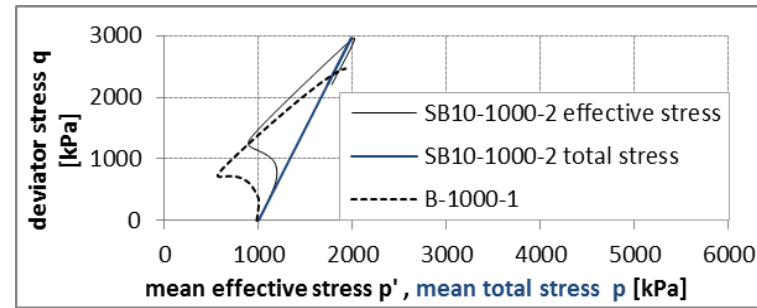
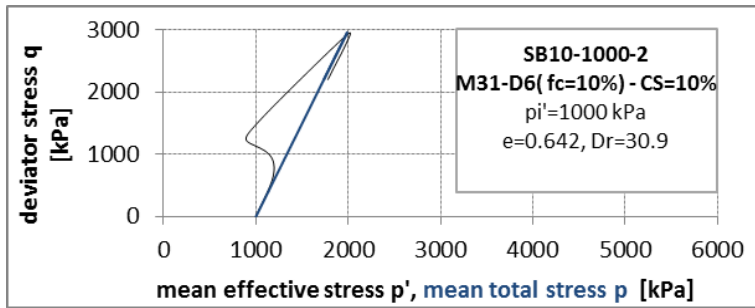
Σχήμα Π4-2.5. Δοκιμή SA10-1000-9: Η στερεοποίηση έγινε με καταγραφή του όγκου νερού που εξέρρευσε από τους πόρους του εδάφους και του στερεού σκελετού της πυριτίας. Η διαδικασία της στράγγισης είναι αργή λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του δοκιμίου.



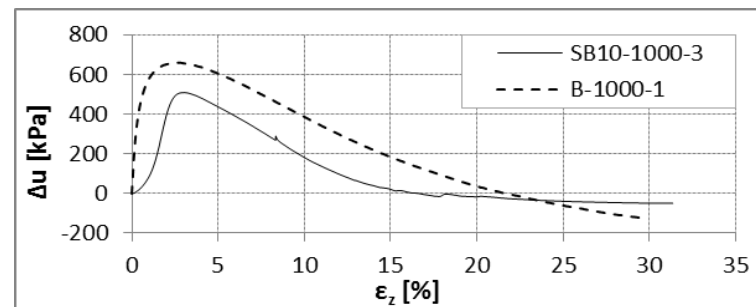
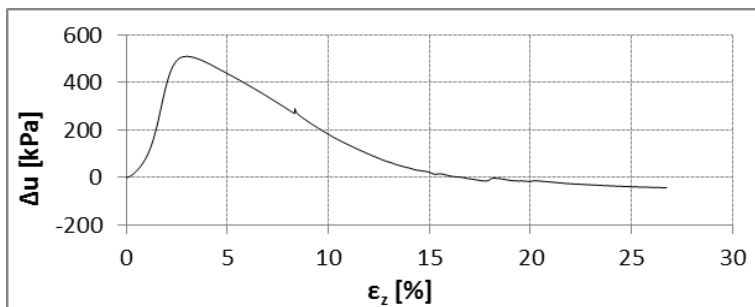
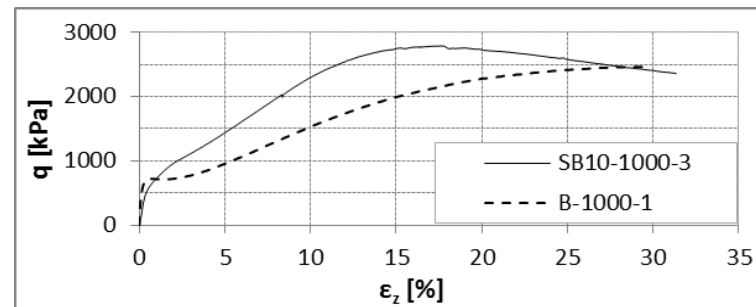
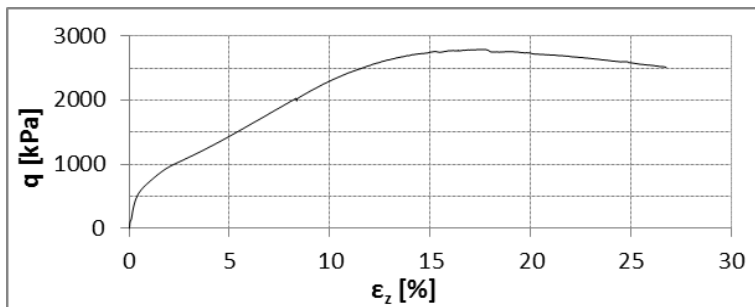
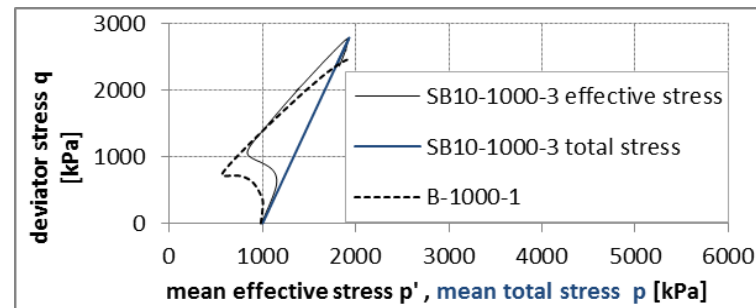
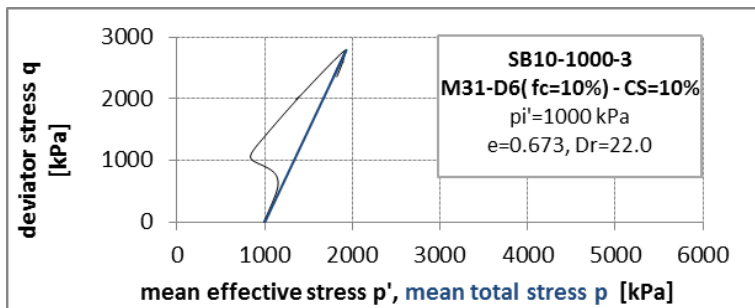
Σχήμα Π4-2.6. Η στερεοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου κατά τις δοκιμές SA10-1000-9 και A-1000-1.



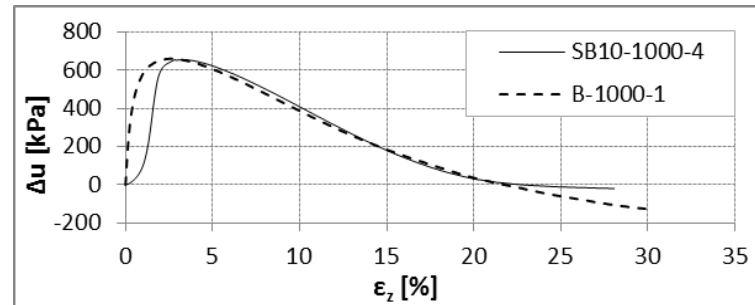
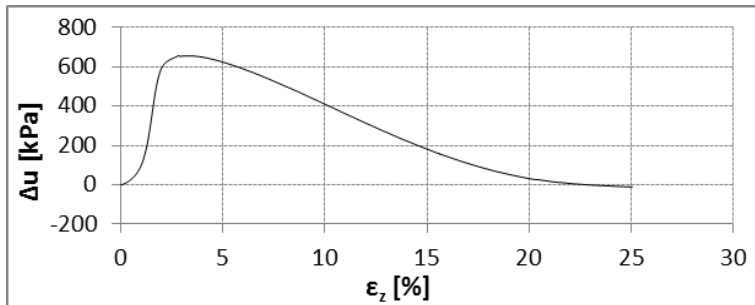
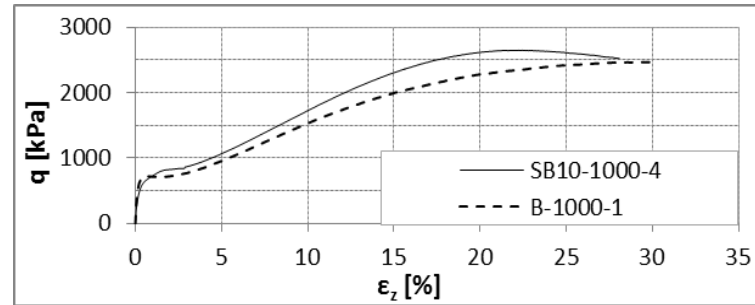
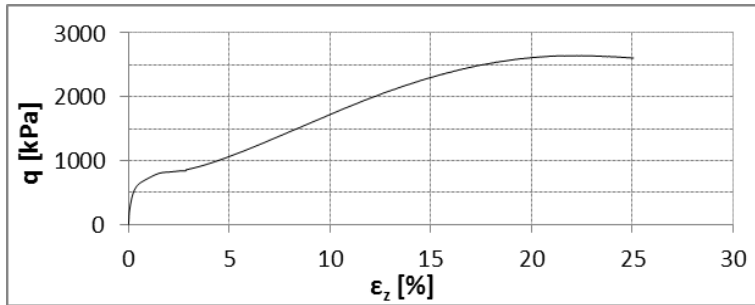
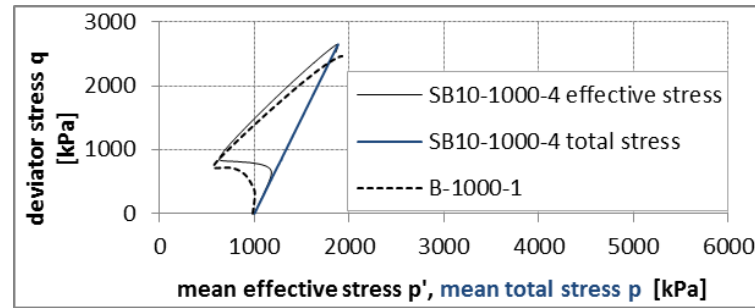
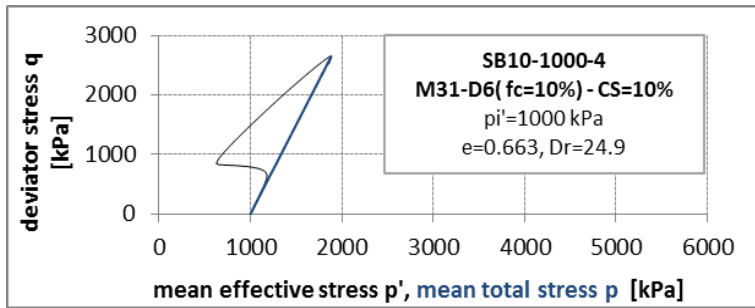
Σχήμα Π4-2.7. Δοκιμή SB10-1000-1(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



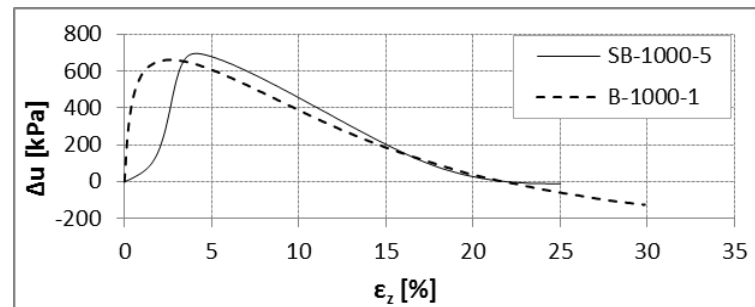
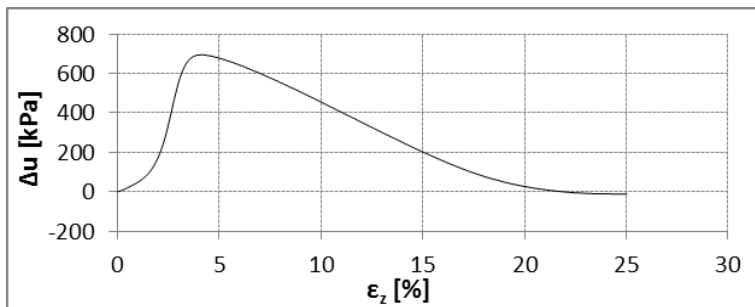
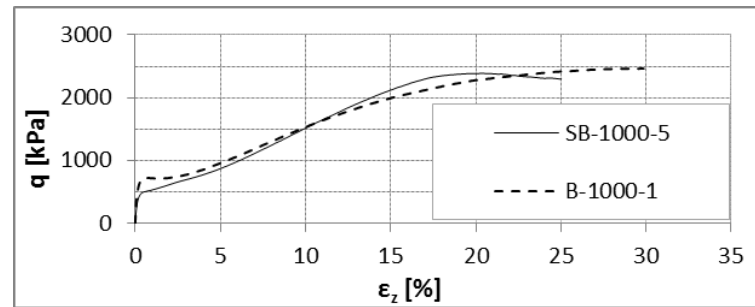
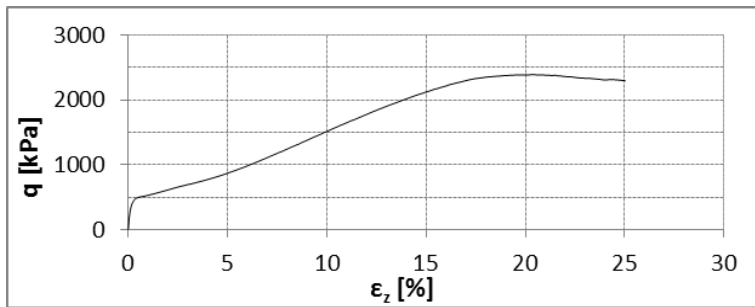
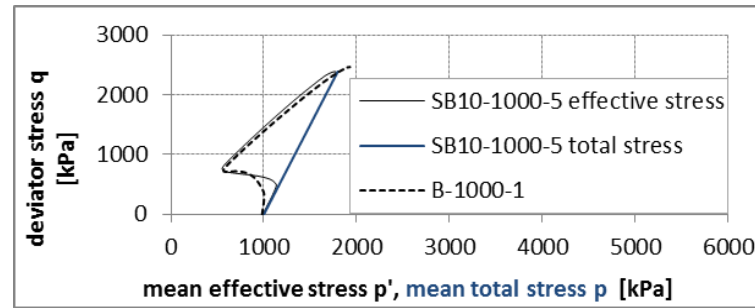
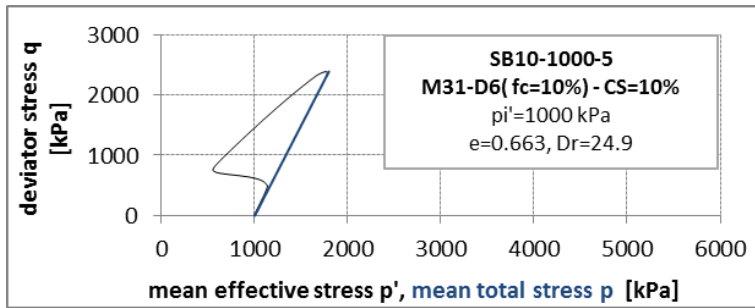
Σχήμα Π4-2.8. Δοκιμή SB10-1000-2(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



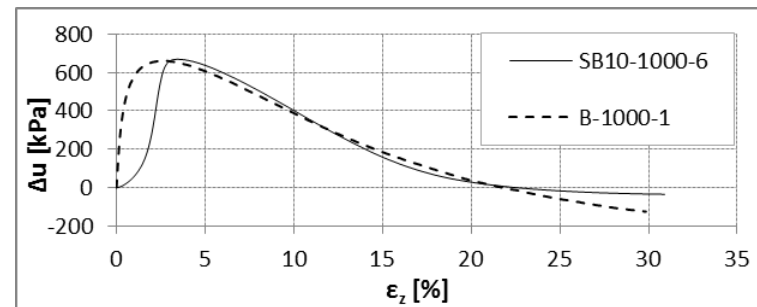
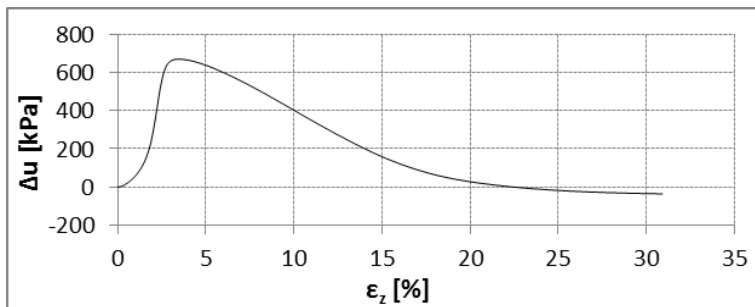
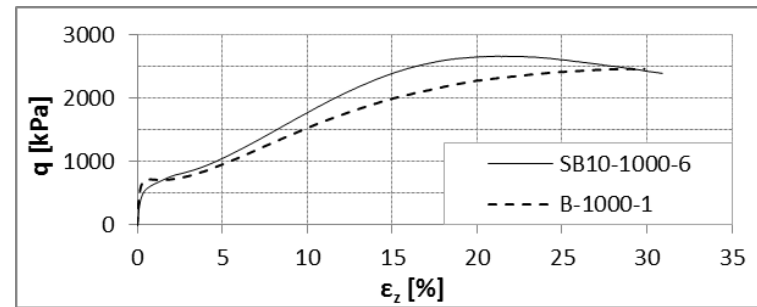
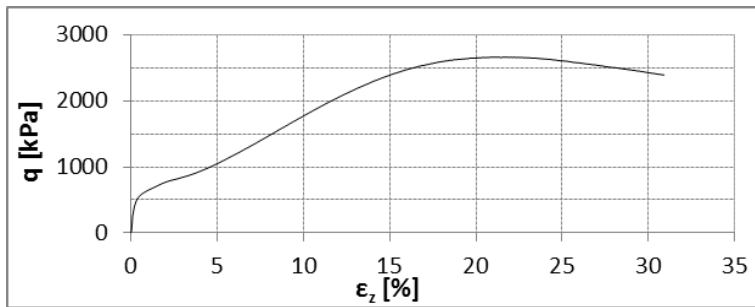
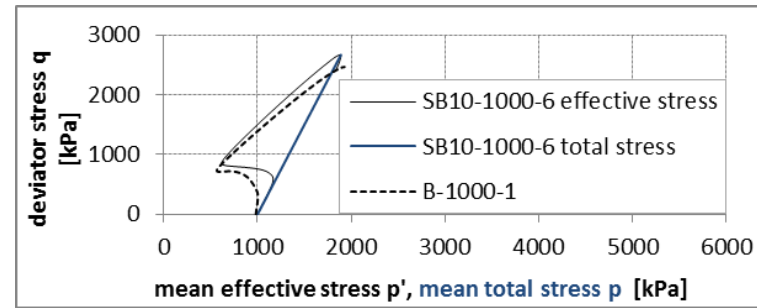
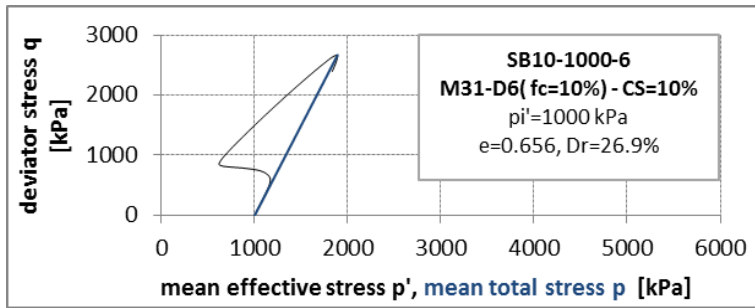
Σχήμα Π4-2.9. Δοκιμή SB10-1000-3(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



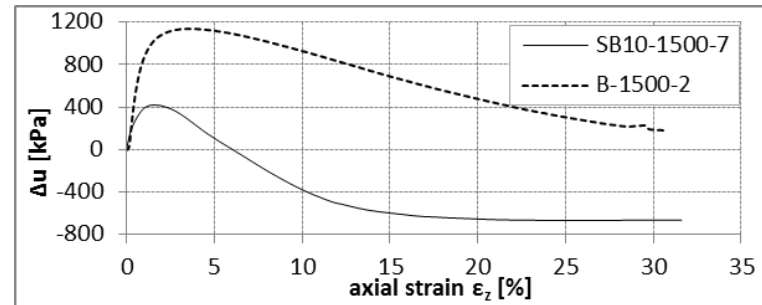
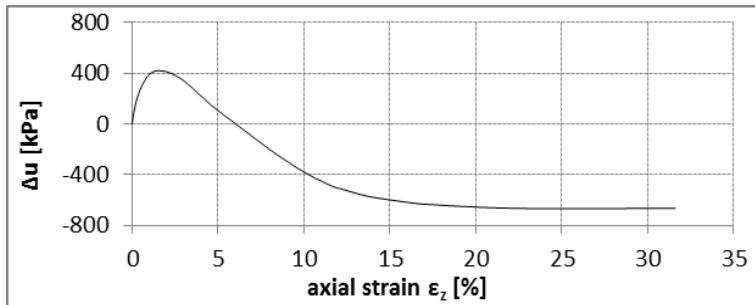
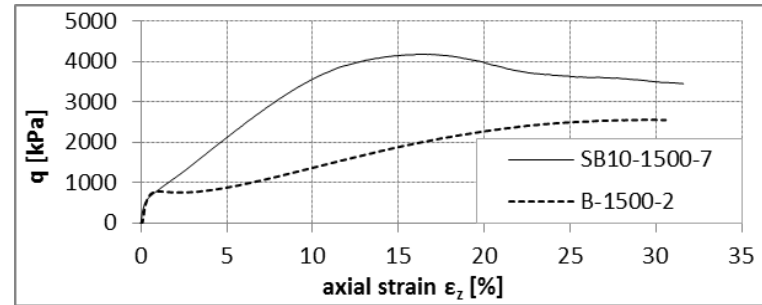
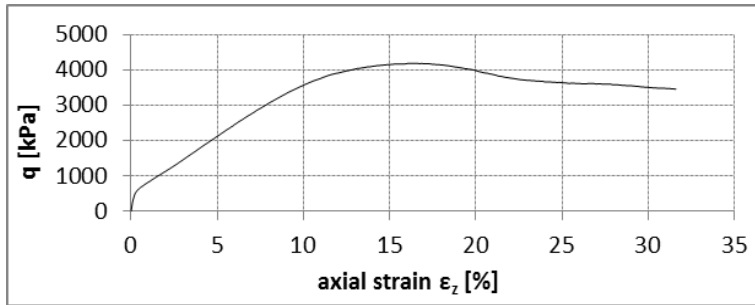
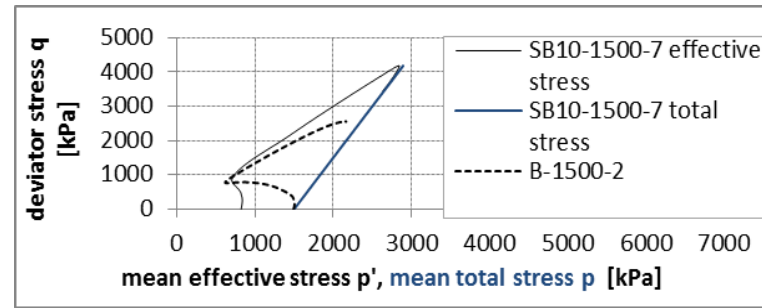
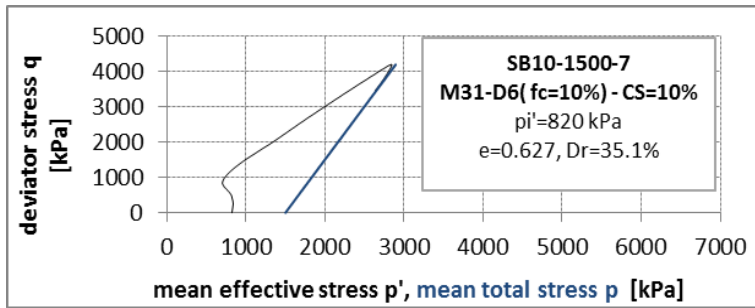
Σχήμα Π4-2.10. Δοκιμή SB10-1000-4(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



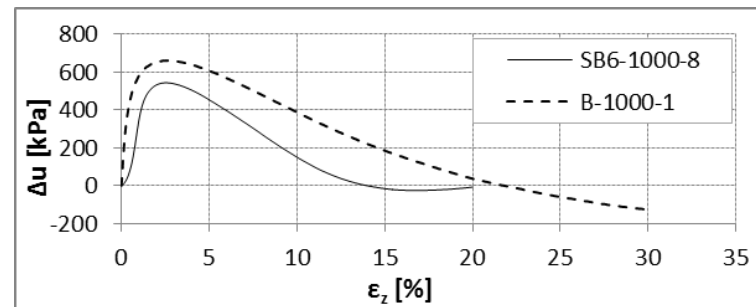
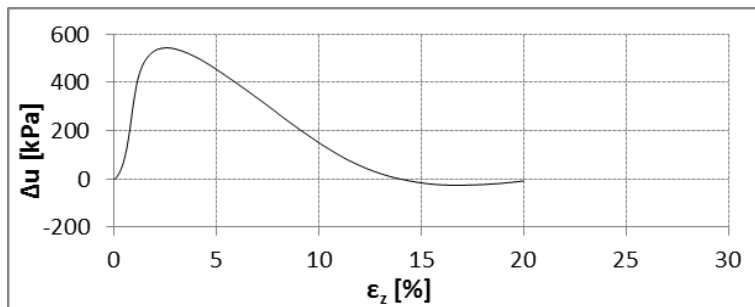
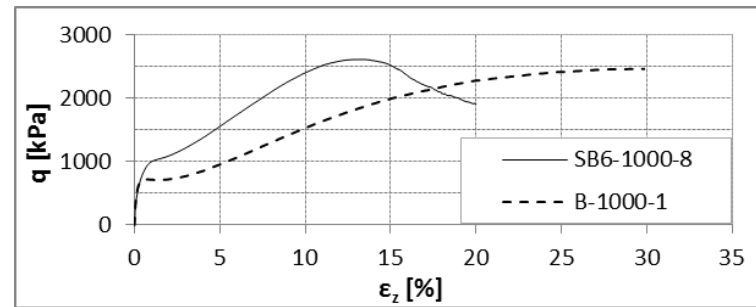
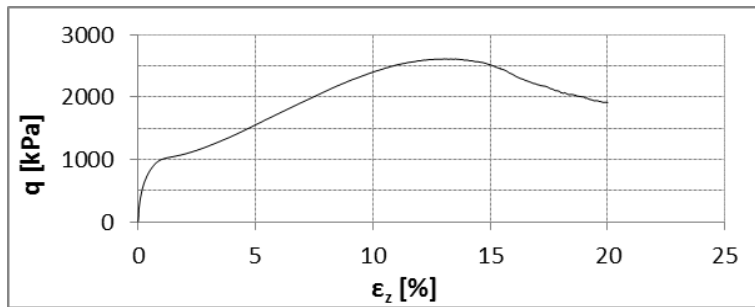
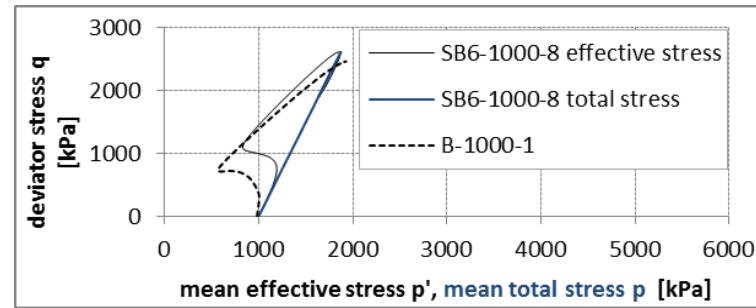
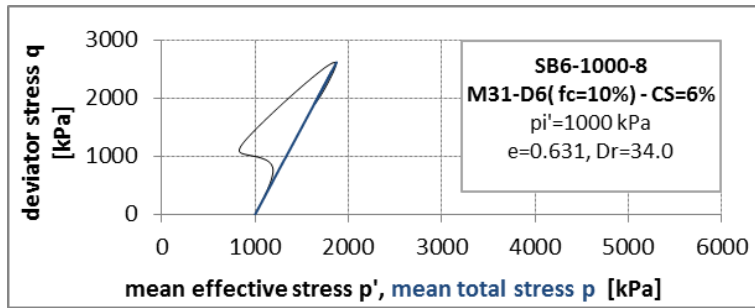
Σχήμα Π4-2.11. Δοκιμή SB10-1000-5(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



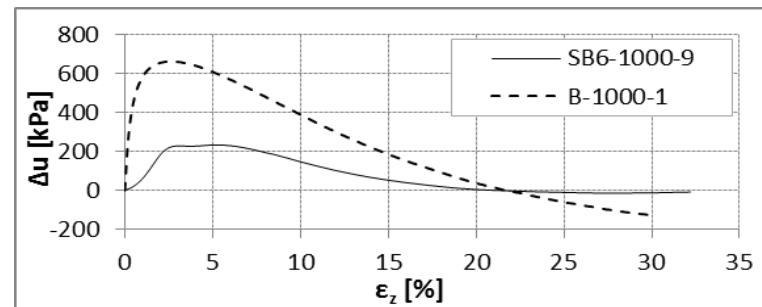
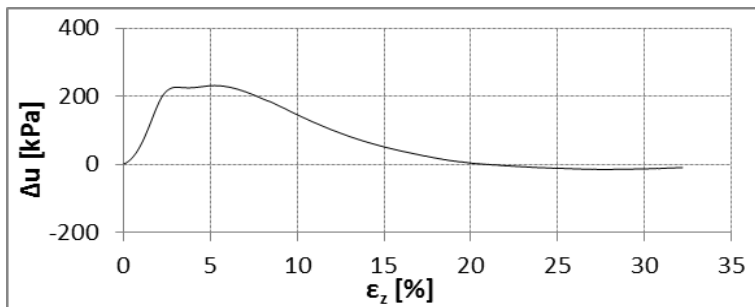
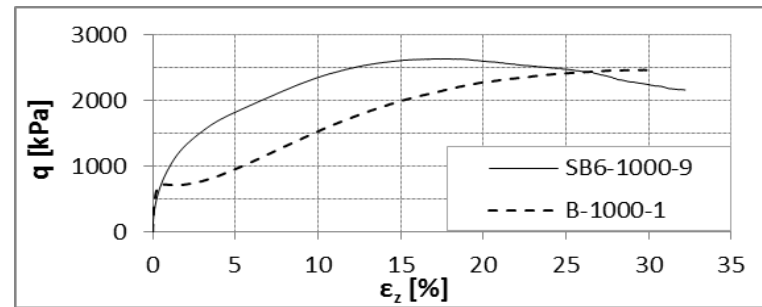
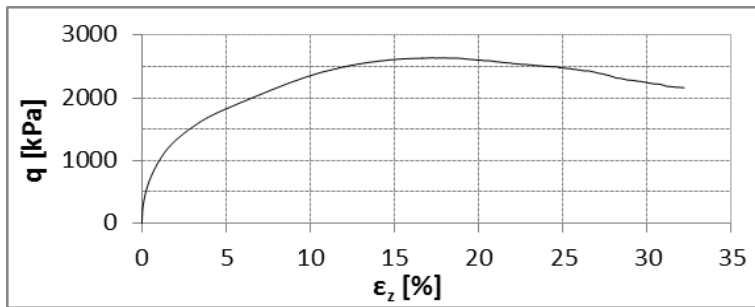
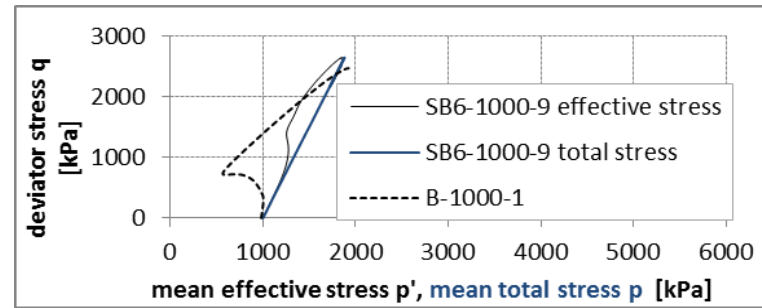
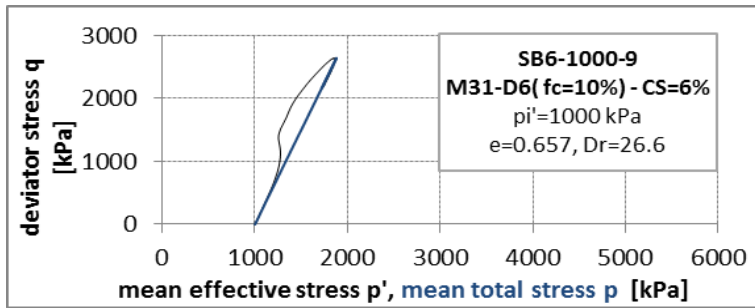
Σχήμα Π4-2.12. Δοκιμή SB10-1000-6(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



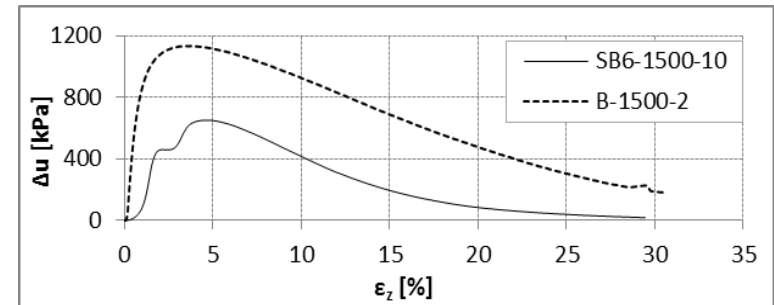
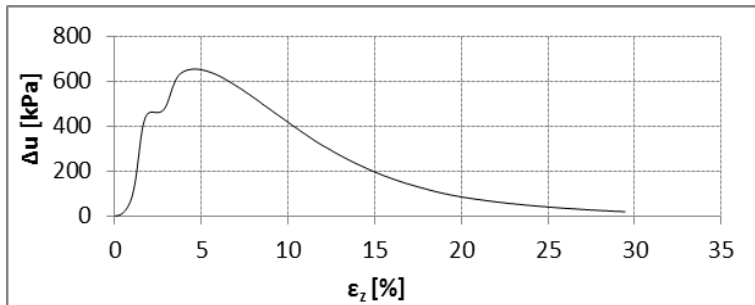
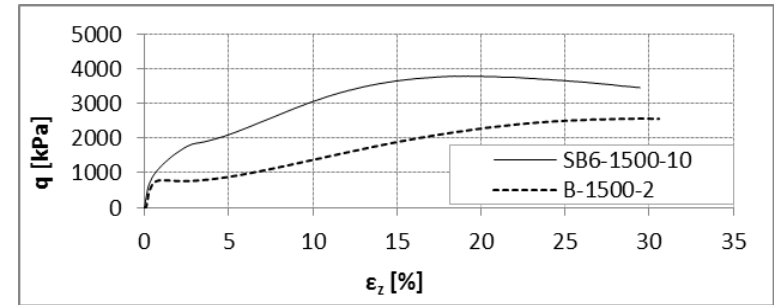
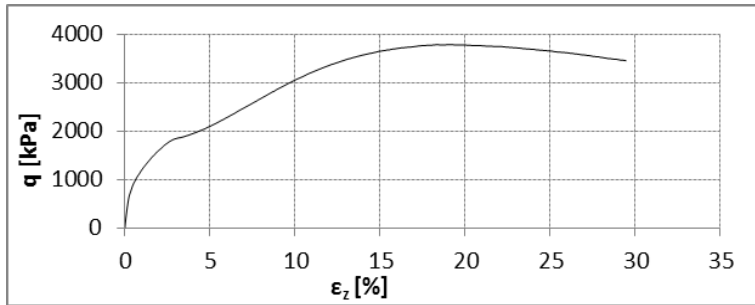
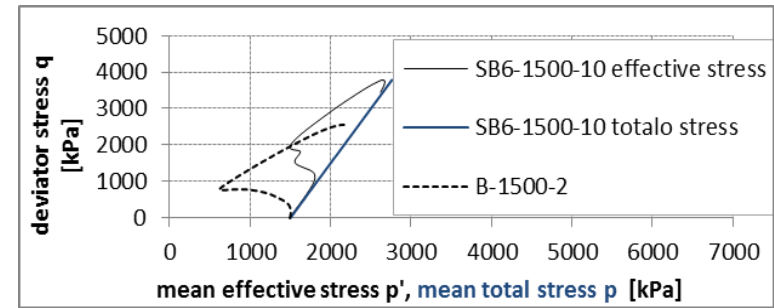
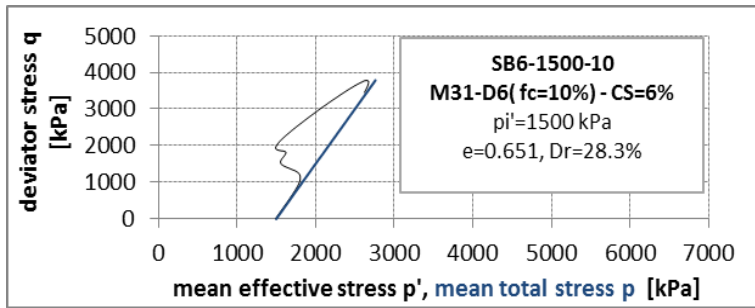
Σχήμα Π4-2.13. Δοκιμή SB10-1000-7(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1500-2(δεξιά).



Σχήμα Π4-2.14. Δοκιμή SB6-1000-8(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



Σχήμα Π4-2.15. Δοκιμή SB6-1000-9(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



Σχήμα Π4-2.16. Δοκιμή SB6-1500-10(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1500-2(δεξιά).

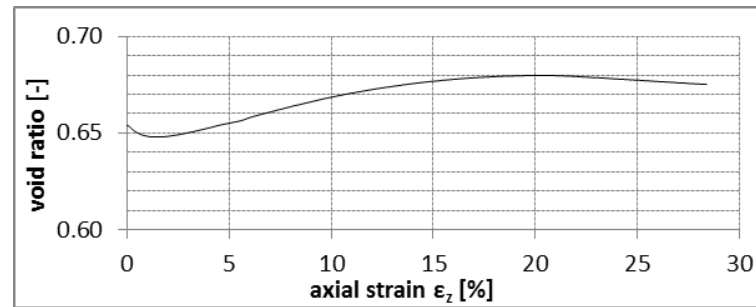
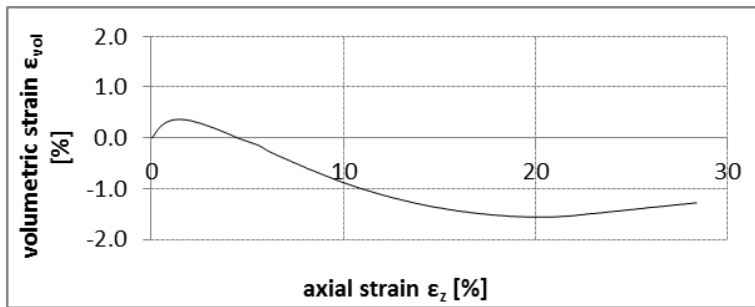
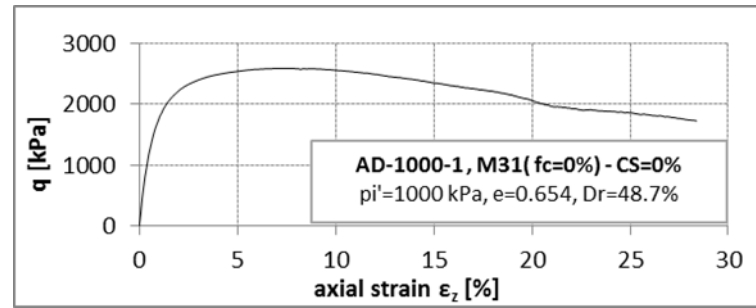
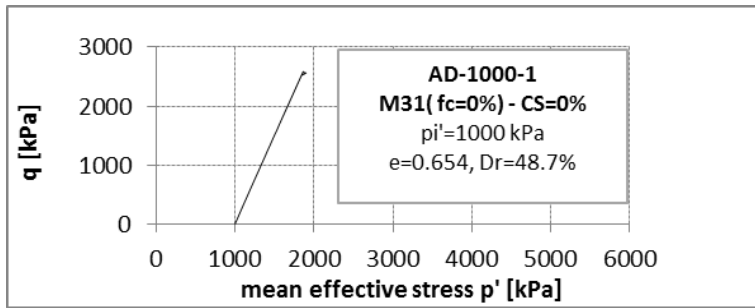
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π4-3

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

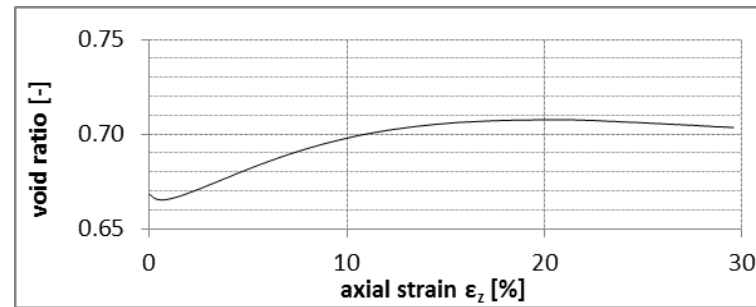
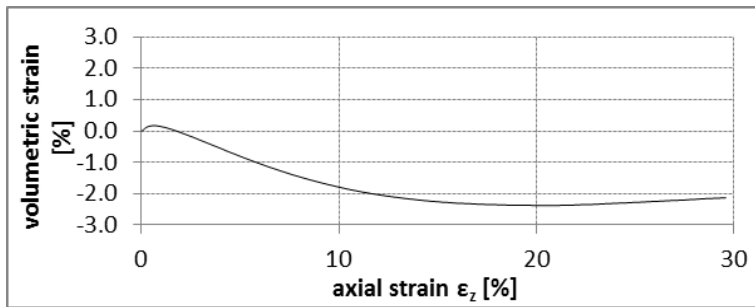
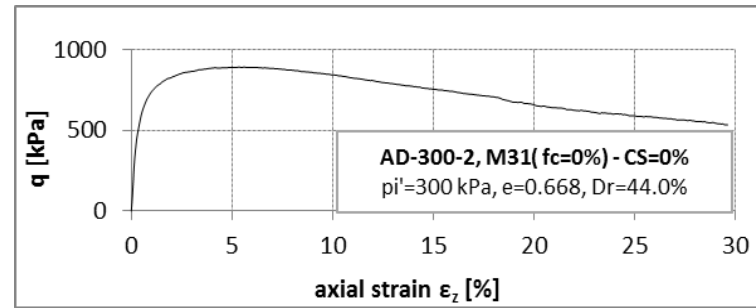
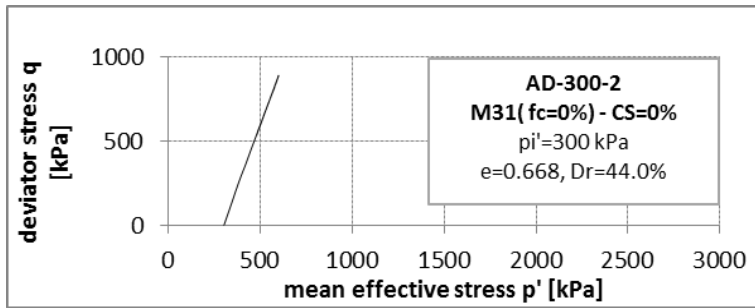
Πίνακας Π4-3.1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CD τριαξονικής θλίψης σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31($f_c=0\%$).

δοκιμή	f_c (%)	p_i' (kPa)	e (-)	D_r (%)
AD-1000-1	0	1000	0.654	48.7
AD-300-2	0	300	0.668	44.0
AD-300-3	0	300	0.683	39.0
AD-300-4 ¹	0	300	0.650	50.1

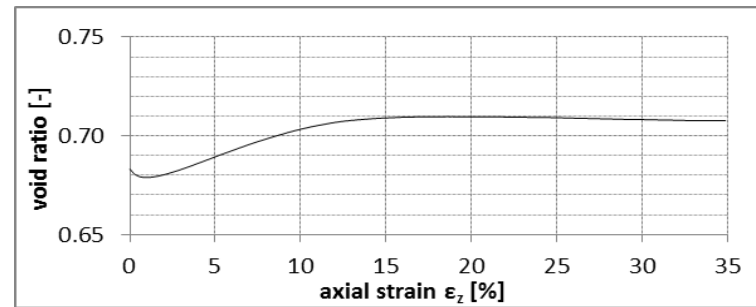
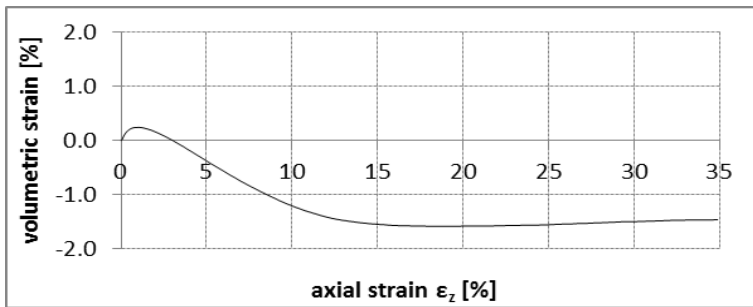
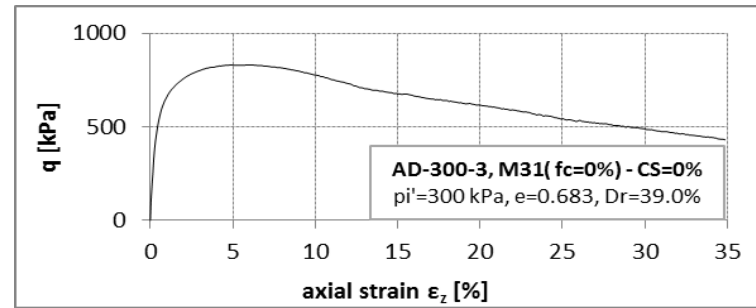
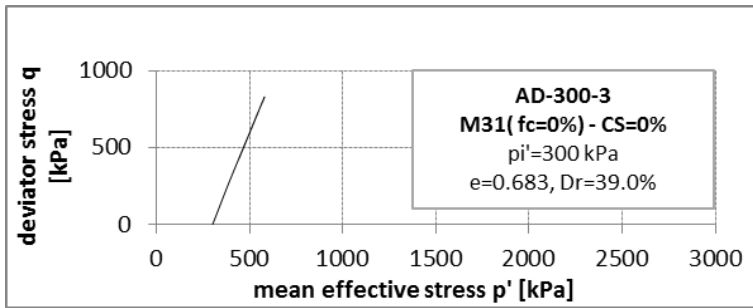
1. Στη δοκιμή με κωδικό AD-300-4 η καταγραφή των δεδομένων ήταν προβληματική και παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα $\varepsilon_{vol} - \varepsilon_{ax}$ και $e - \varepsilon_{ax}$.



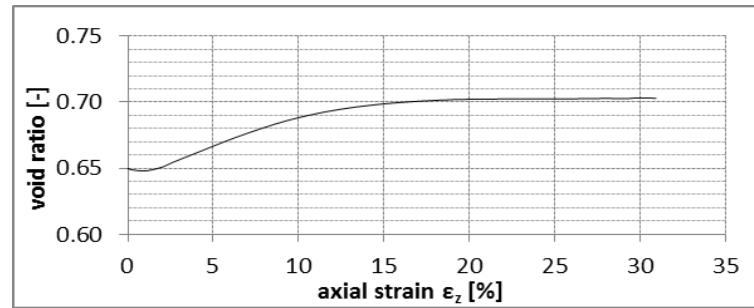
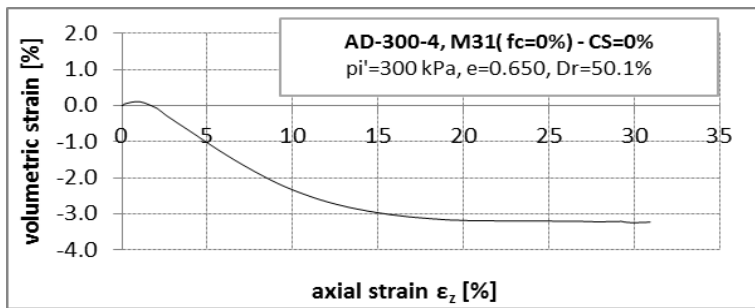
Σχήμα Π4-3.1. Δοκιμή AD-1000-1



Σχήμα Π4-3.2. Δοκιμή AD-300-2



Σχήμα Π4-3.3. Δοκιμή AD-300-3



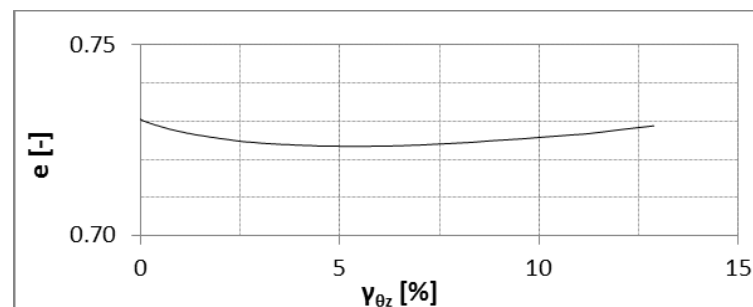
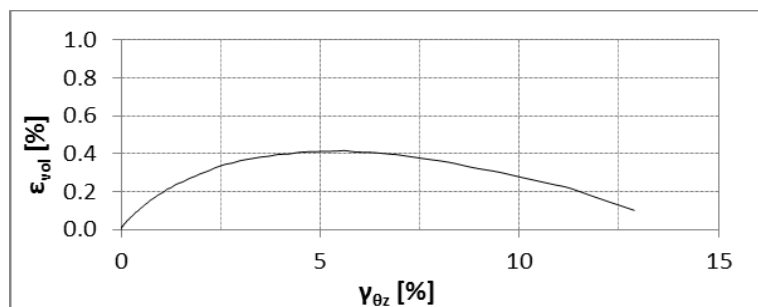
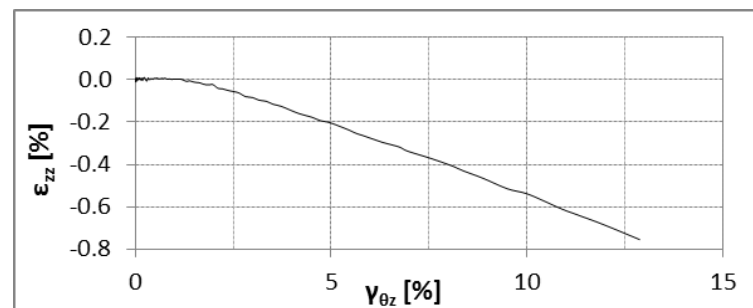
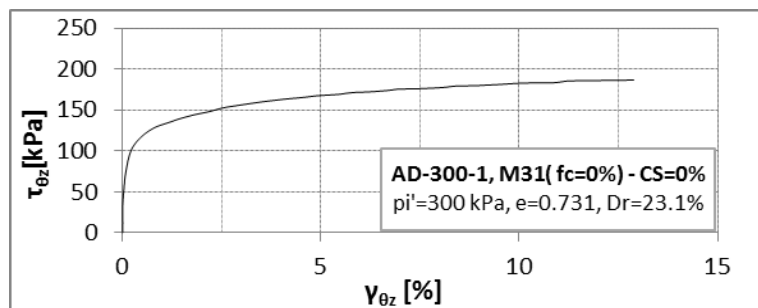
Σχήμα Π4-3.4. Δοκιμή AD-300-4

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π4-4

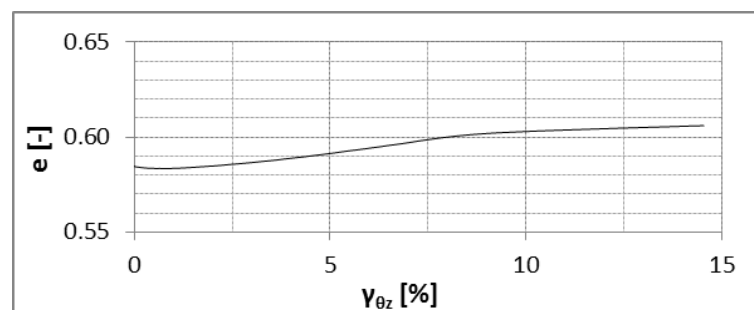
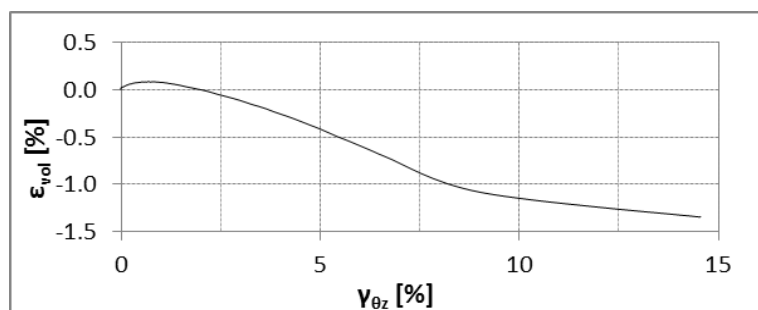
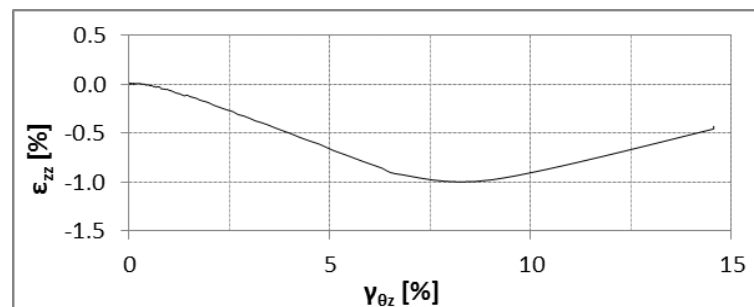
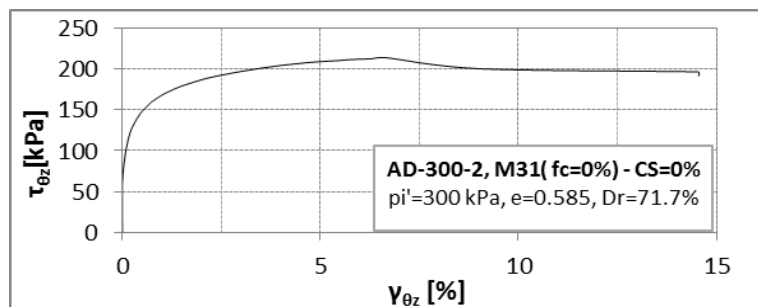
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CD** ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΥΠΟ
ΣΤΡΑΓΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ
ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Π4-4.1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CD στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31($f_c=0\%$).

δοκιμή	f_c (%)	p_i' (kPa)	e (-)	D_r (%)
AD-300-1	0	300	0.731	23.1
AD-300-2	0	300	0.585	71.7



Σχήμα Π4-4.1. Δοκιμή AD-300-1 μονοτονική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου.



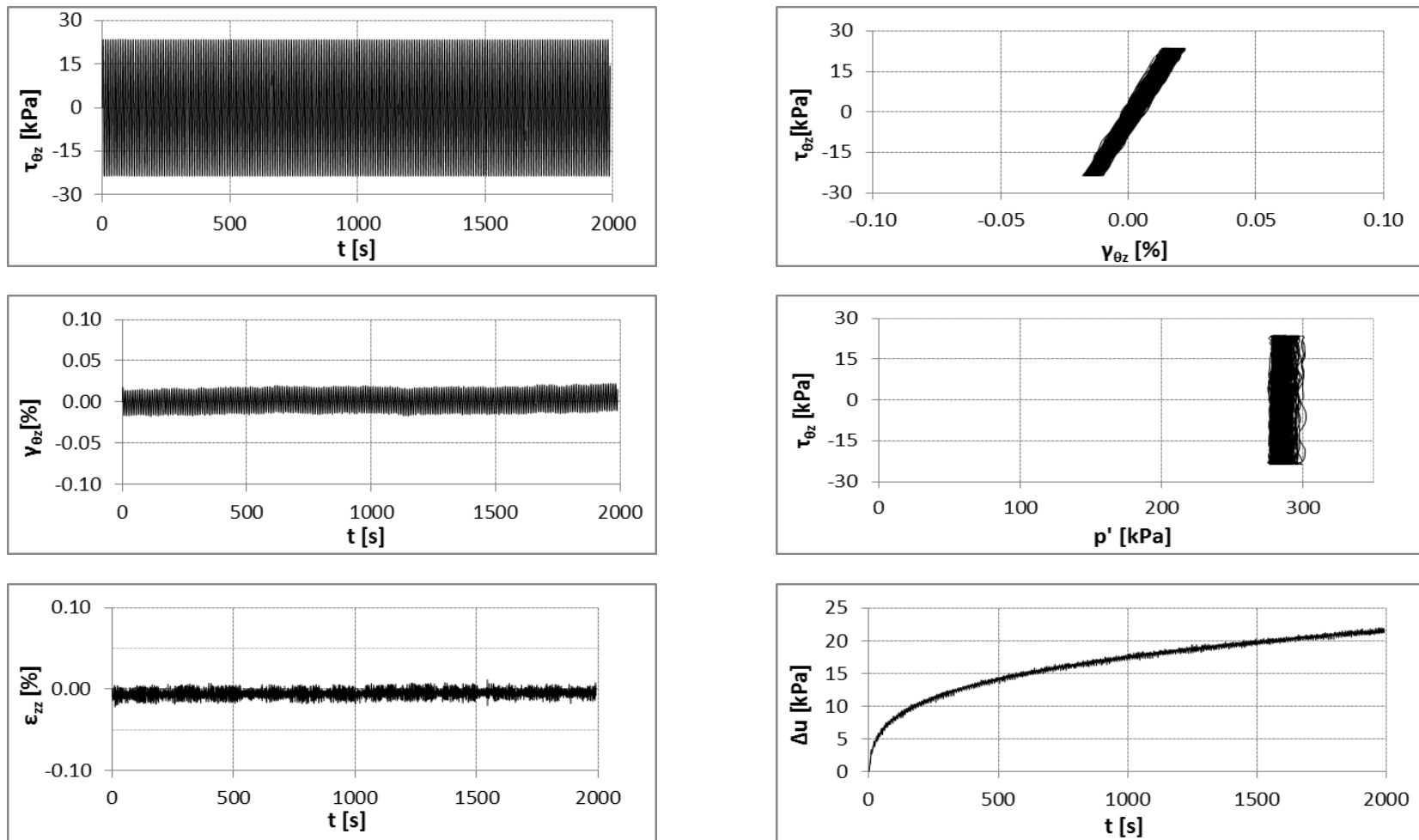
Σχήμα Π4-4.2. Δοκιμή AD-300-2 μονοτονική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π5-1

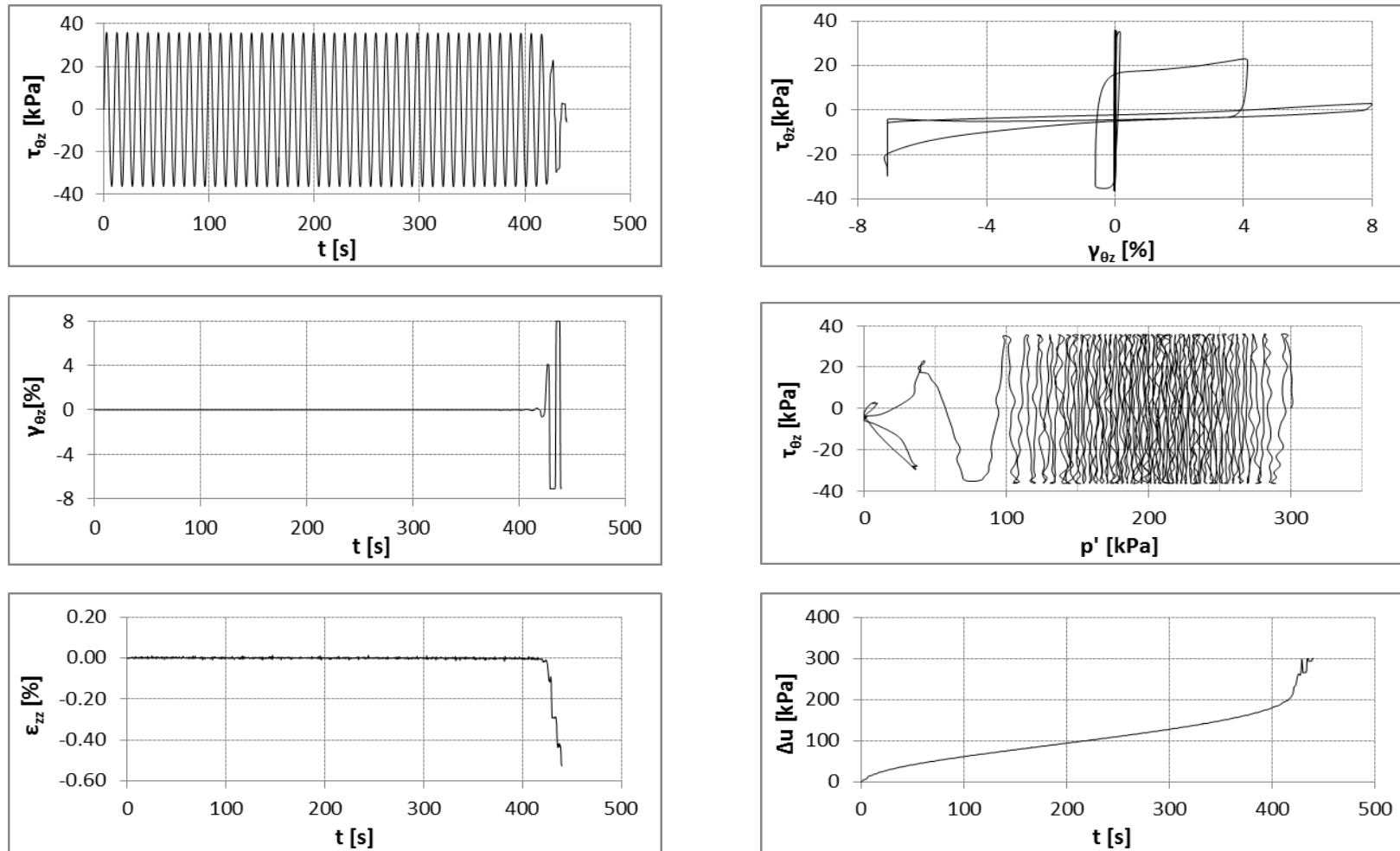
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CU** ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΥΠΟ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Π5-1.1. Σύνοψη ανακυκλικών δοκιμών CU στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου σε μη σταθεροποιημένη άμμο M31($f_c=0\%$)

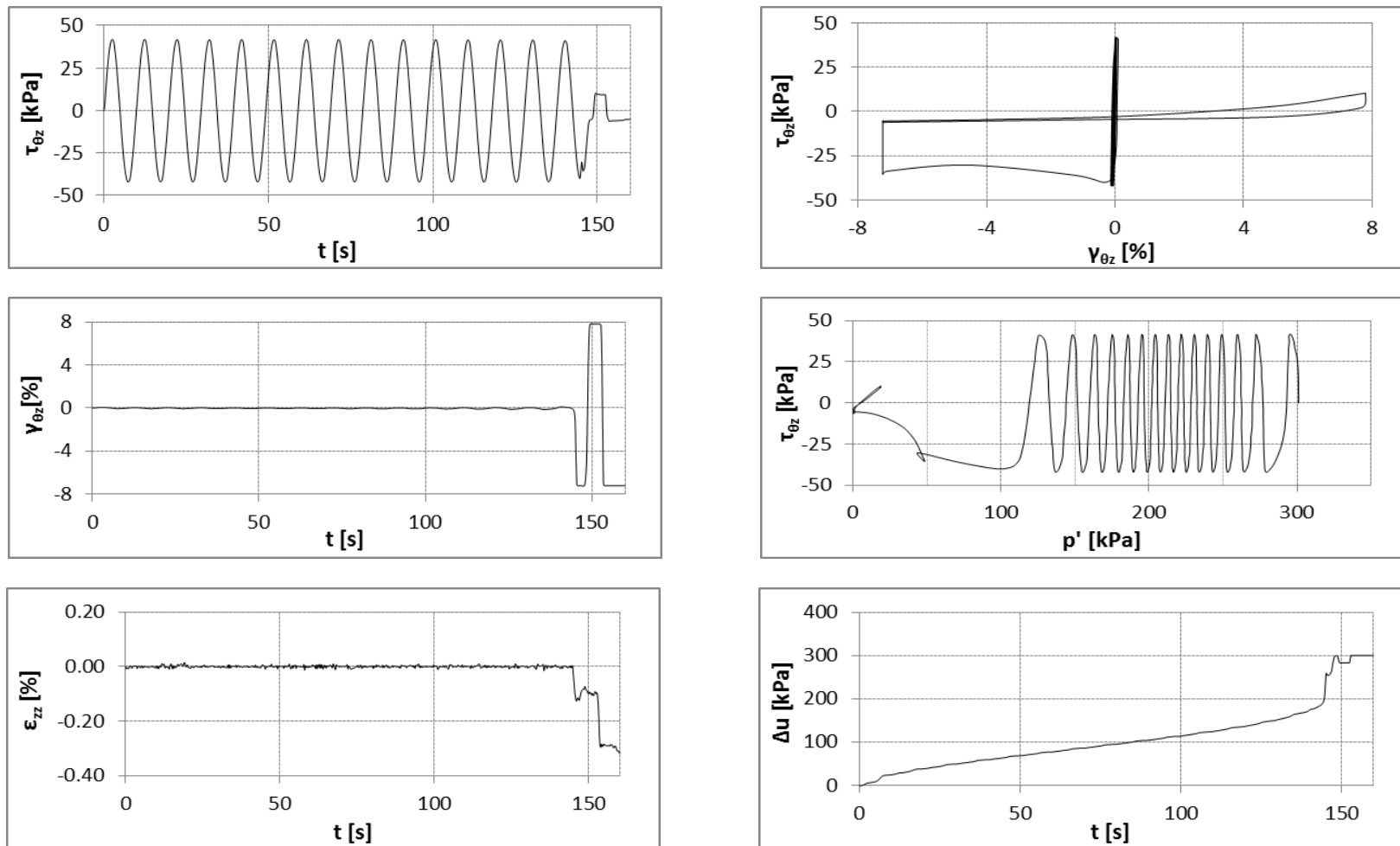
δοκιμή	f_c (%)	p_i' (kPa)	e (-)	D_r (%)	CSR	N_{tot}	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
A-300-1	0	300	0.754	15.3	0.08	199	-	-	-
A-300-2	0	300	0.720	26.7	0.12	44	42.5	42.6	42.9
A-300-3	0	300	0.724	25.3	0.14	15	14.5	14.5	14.6
A-300-4	0	300	0.716	28.0	0.16	17	15.4	15.4	15.5
A-300-5	0	300	0.676	41.3	0.22	11	9.5	10.0	10.4
A-300-6	0	300	0.713	29.0	0.22	3	2.2	2.2	2.5
A-300-7	0	300	0.672	42.6	0.14	76	74.2	74.2	75.1
A-300-8	0	300	0.712	29.3	0.25	3	1.7	1.8	2.1
A-300-9	0	300	0.673	42.3	0.25	9	6.1	6.5	6.6



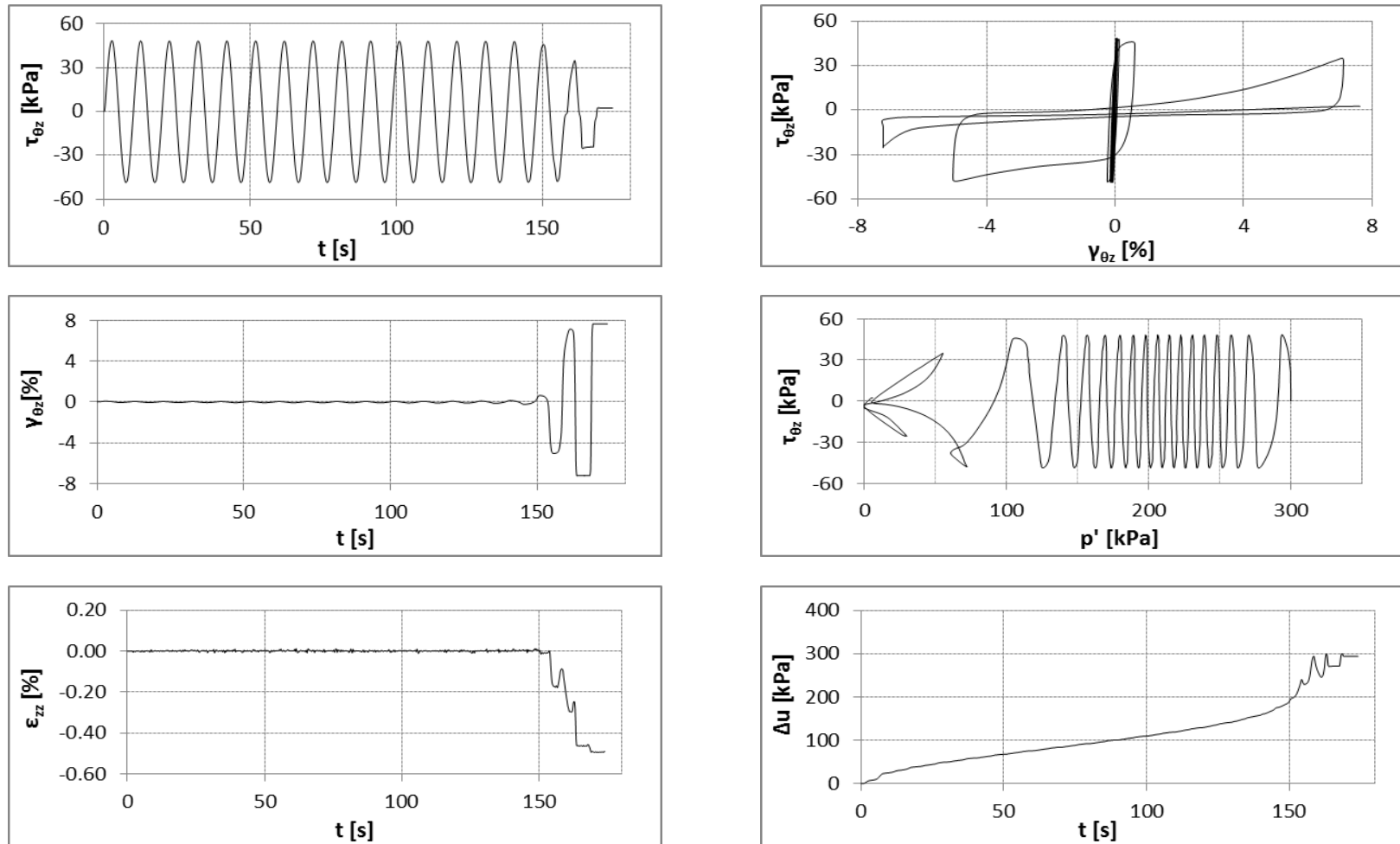
Σχήμα Π5-1.1. Δοκιμή A-300-1: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.08$



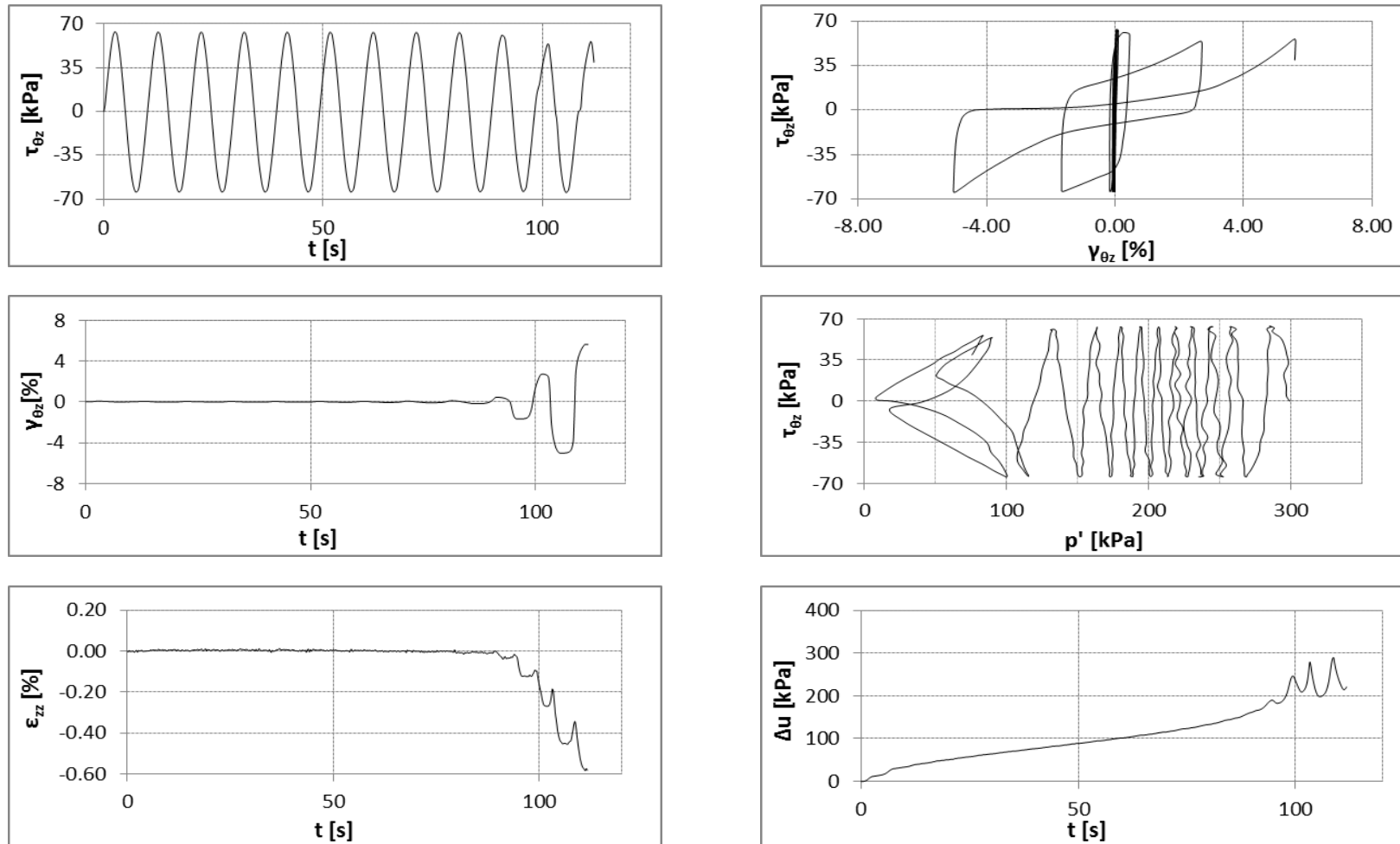
Σχήμα Π5-1.2. Δοκιμή A-300-2: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.12$



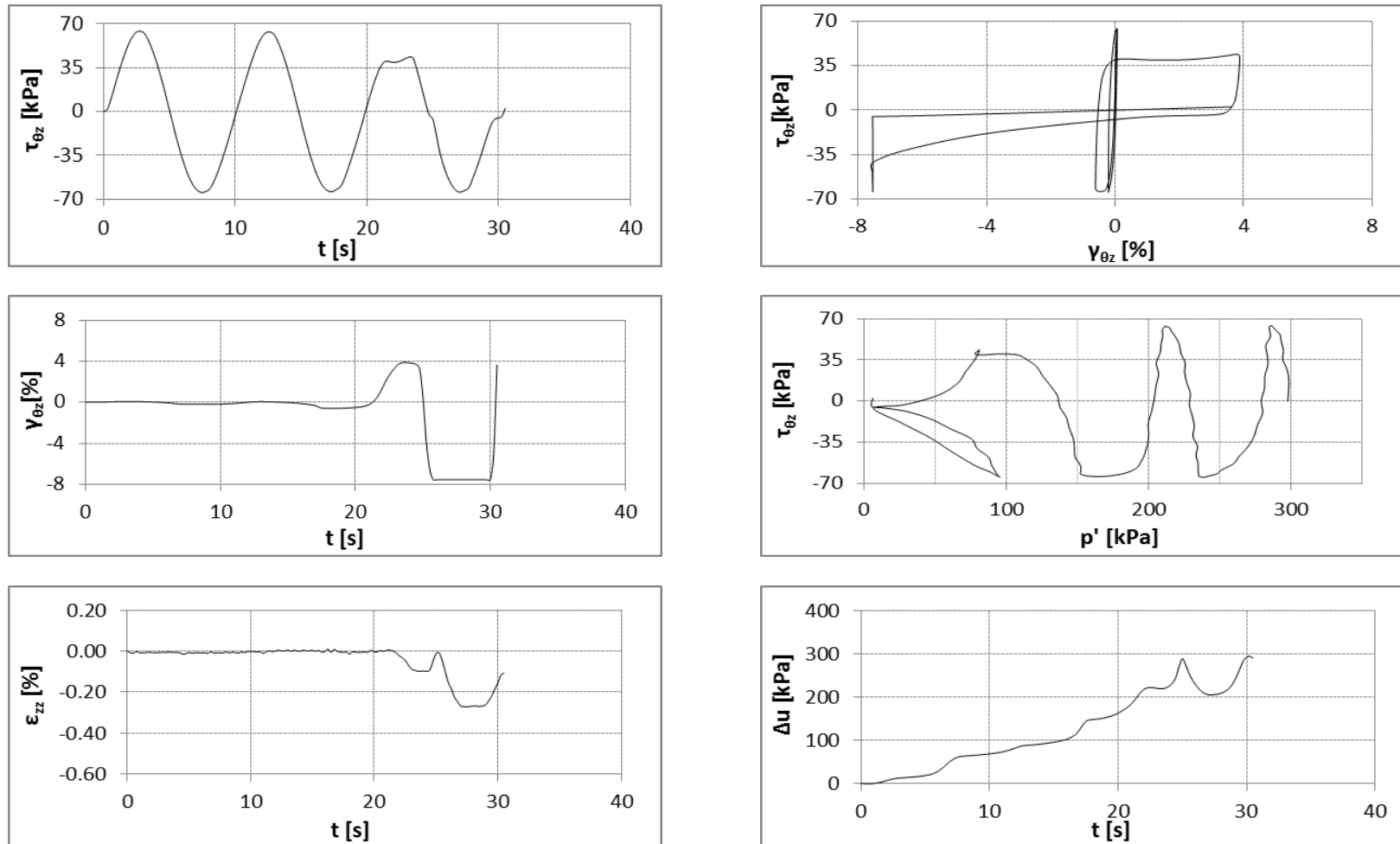
Σχήμα Π5-1.3. Δοκιμή A-300-3: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.14$



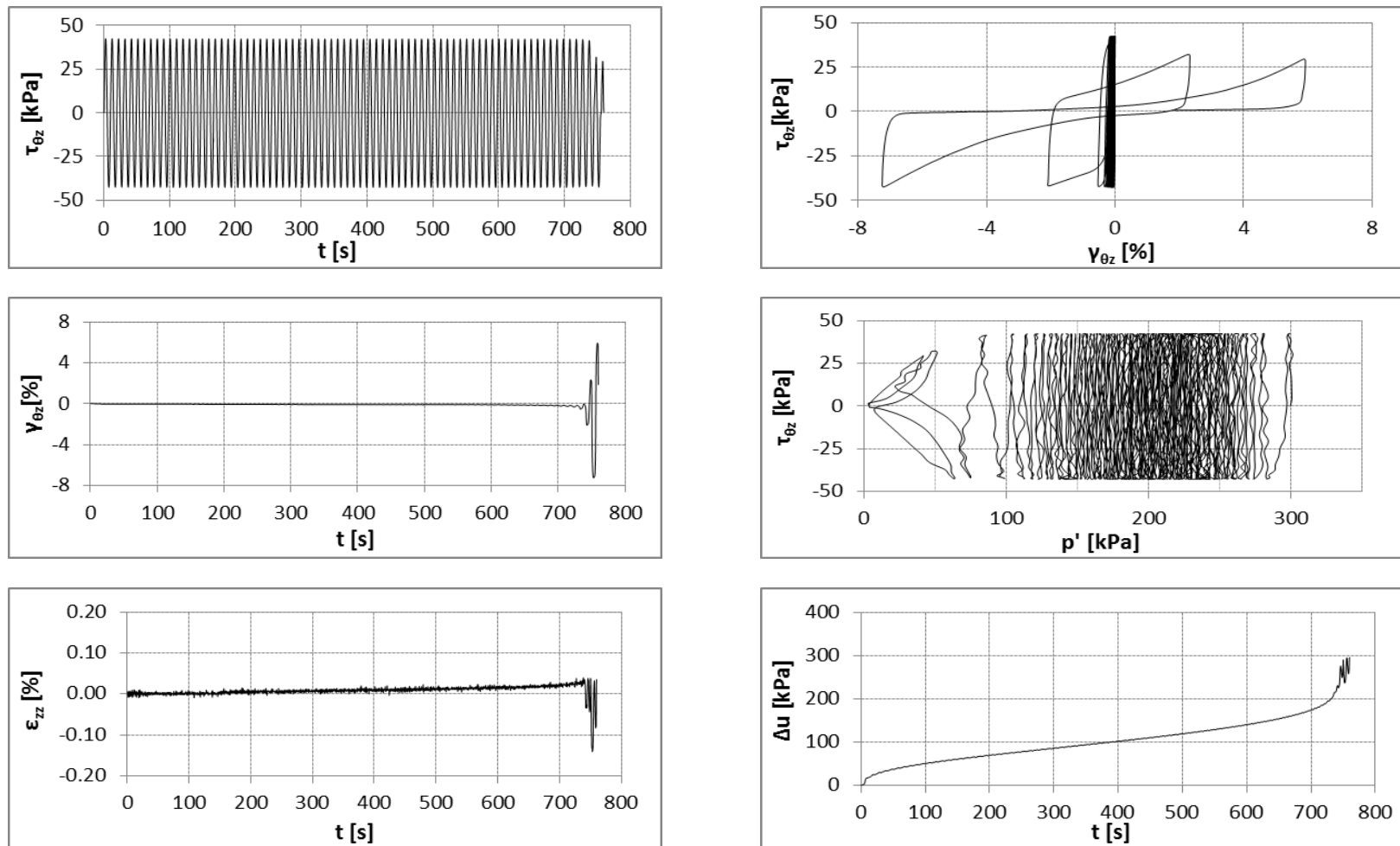
Σχήμα Π5-1.4. Δοκιμή A-300-4: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.16$



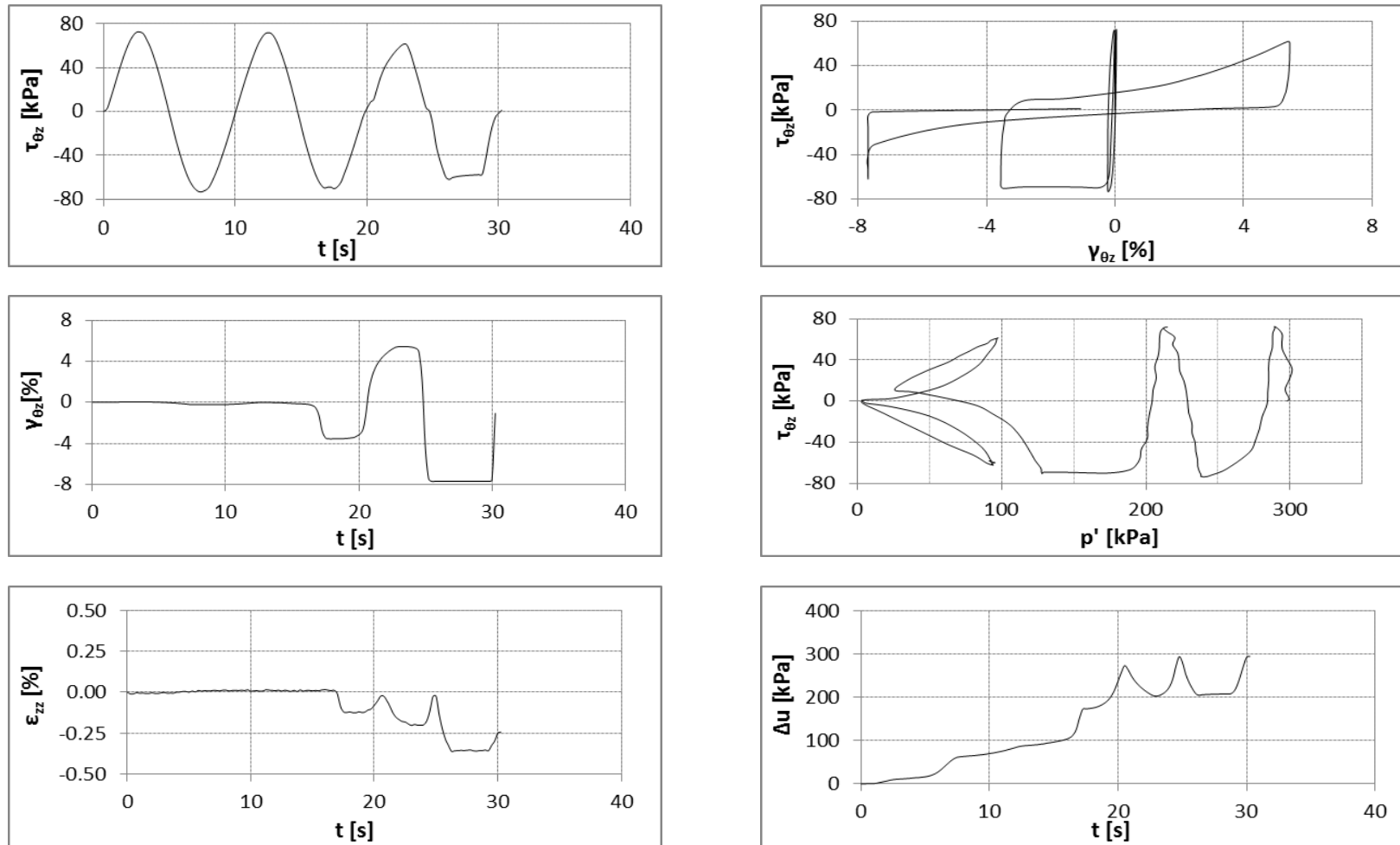
Σχήμα Π5-1.5. Δοκιμή A-300-5: μη σταθεροποιημένη άμμος (f_c=0%) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.22



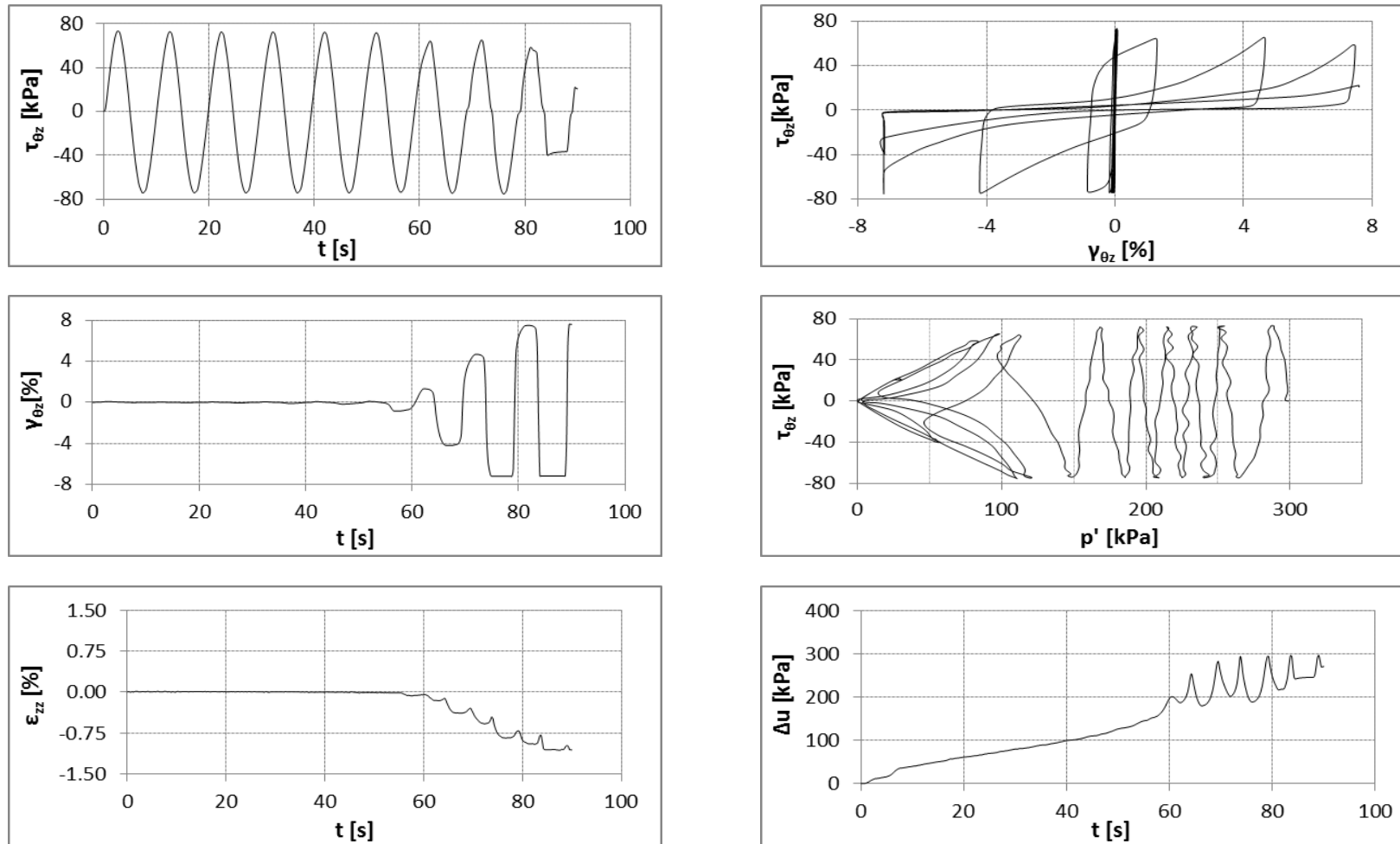
Σχήμα Π5-1.6. Δοκιμή A-300-6: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.22$



Σχήμα Π5-1.7. Δοκιμή A-300-7: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.14$



Σχήμα Π5-1.8. Δοκιμή A-300-8: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.25$



Σχήμα Π5-1.9. Δοκιμή A-300-9: μη σταθεροποιημένη άμμος ($f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.25$

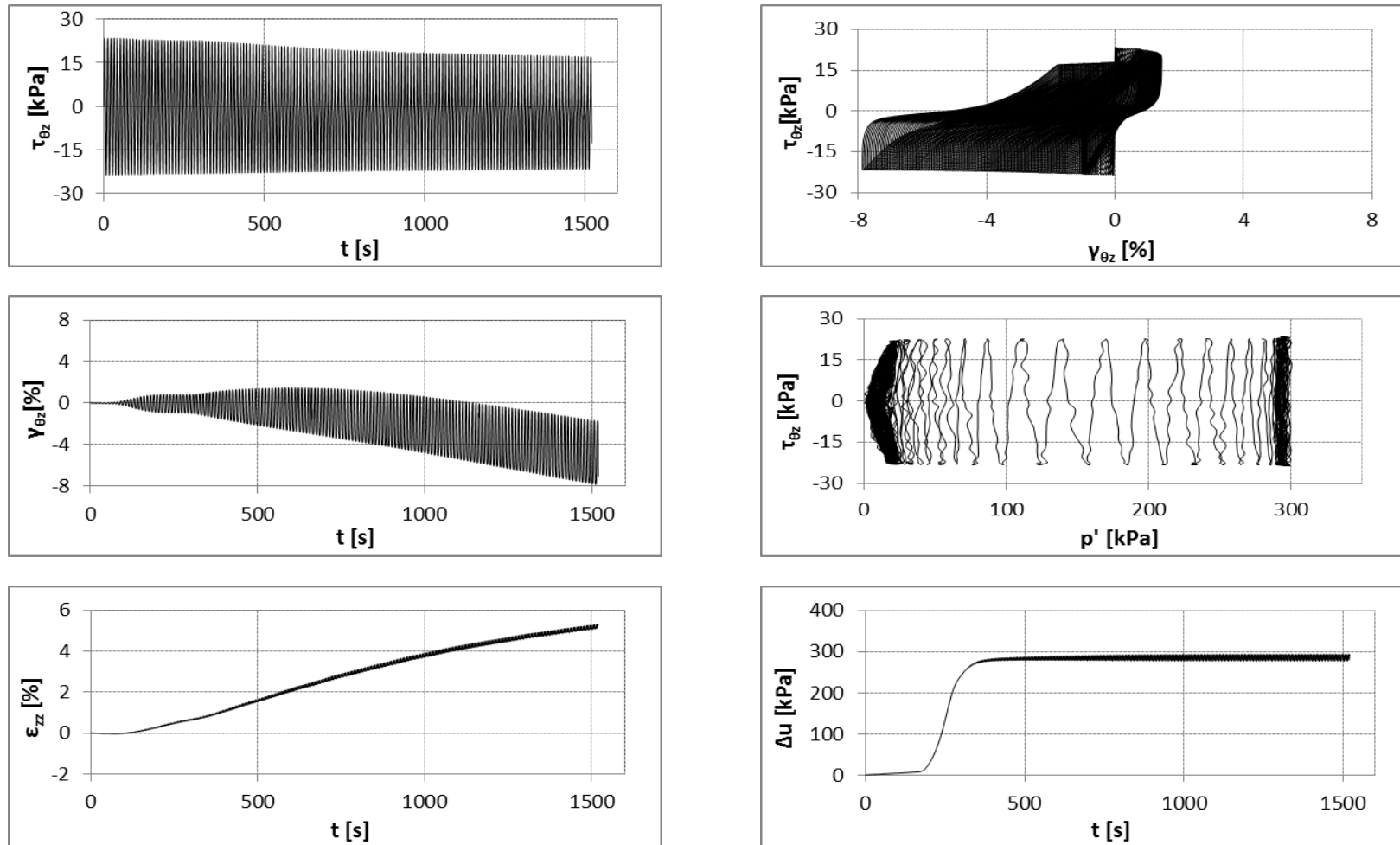
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π5-2

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

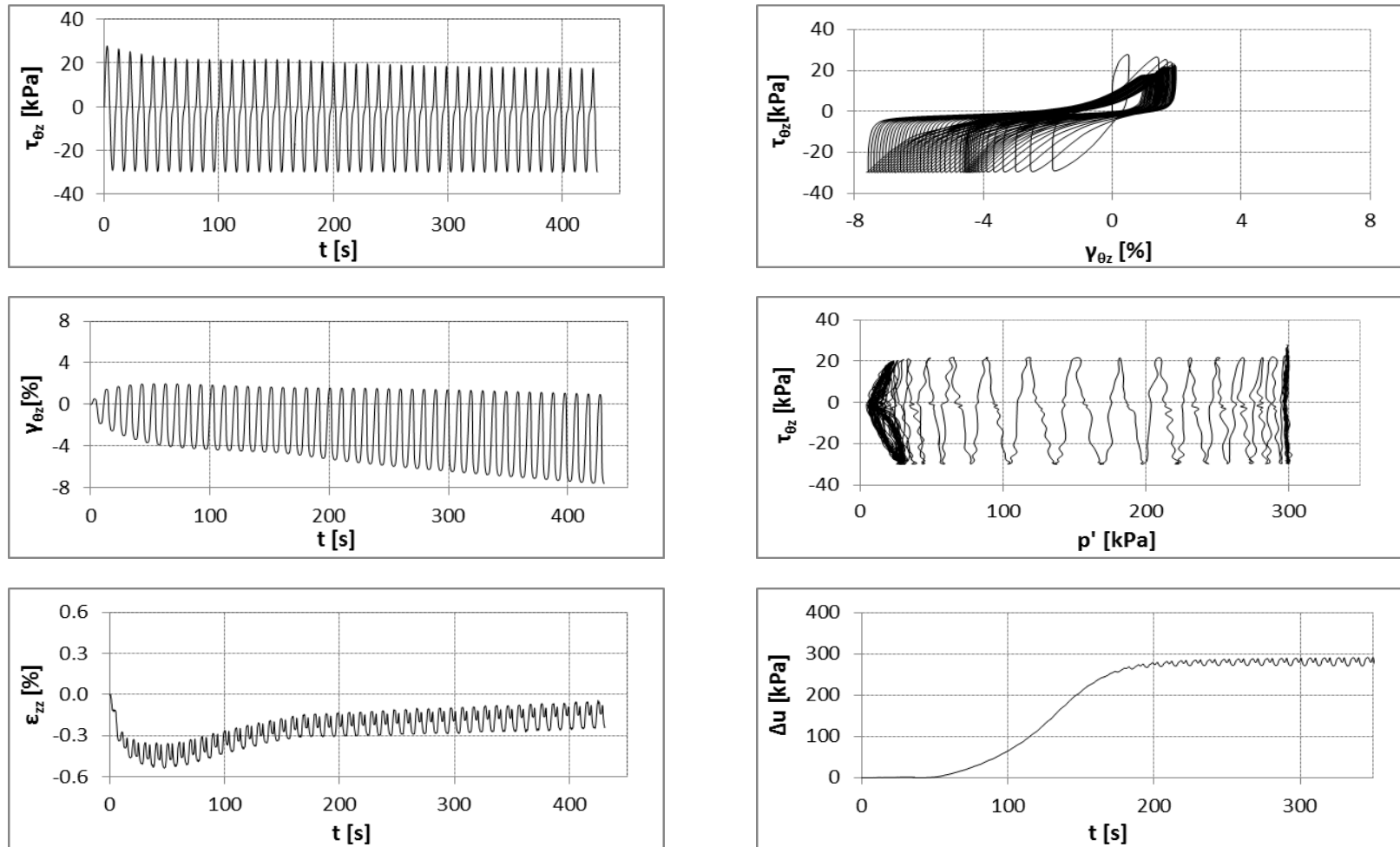
Πίνακας Π5-2.1. Σύνοψη ανακυκλικών δοκιμών CU στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου σε σταθεροποιημένη άμμο M31($f_c=0\%$)

Δοκιμή	f_c (%)	Ηλικία κατά τη δοκιμή (h)	p_i' (kPa)	e (-)	D_r (%)	CSR	N_{tot} ¹	$N_{1\%}$	$N_{2.5\%}$	$N_{5\%}$
SA10-300-1	0	50	300	0.766	11.3	0.08	152	13.5	37.2	81.4
SA10-300-2	0	50	300	0.772	9.3	0.10	43	0.6	1.2	3.7
SA10-300-3	0	50	300	0.753	15.7	0.12	51	0.6	1.7	40.1
SA10-300-4	0	50	300	0.750	16.7	0.14	26	1.1	2.2	5.7
SA10-300-5	0	50	300	0.774	8.7	0.15	15	0.2	0.6	1.3
SA10-300-6	0	90	300	0.734	22.0	0.15	150	13.6	35.2	66.7
SA10-300-7	0	50	300	0.718	27.3	0.16	150	2.2	5.2	45.6
SA10-300-8	0	50	300	0.763	12.3	0.17	2.7	0.2	0.3	0.6
SA10-300-9	0	50	300	0.716	28.0	0.14	150	1.7	5.7	49.9
SA10-300-10	0	50	300	0.724	25.3	0.12	120	5.7	43.6	-
SA10-300-11	0	50	300	0.725	25.0	0.21	41	1.3	2.6	7.2
SA10-300-12	0	50	300	0.719	27.0	0.24	45	0.6	1.2	3.7
SA10-300-13	0	50	300	0.715	28.3	0.21	20	0.6	1.3	4.2
SA10-300-14	0	115	300	0.686	38.0	0.25	22	0.6	1.2	2.7
SA10-300-15	0	90	300	0.620	60.1	0.22	138	4.3	9.2	24.9
SA10-300-16	0	90	300	0.690	36.7	0.23	21	0.7	1.6	3.6
SA10-300-17	0	90	300	0.675	41.7	0.18	53	2.3	3.7	9.6
SA10-300-18	0	50	300	0.700	33.3	0.14	50	6.2	13.5	49.5
SA6-300-1	0	55	300	0.679	40.4	0.25	6.6	0.6	1.2	2.3
SA6-300-2	0	55	300	0.677	40.9	0.21	11.5	0.7	1.6	3.6
SA6-300-3	0	55	300	0.693	35.6	0.14	182	155	157	159

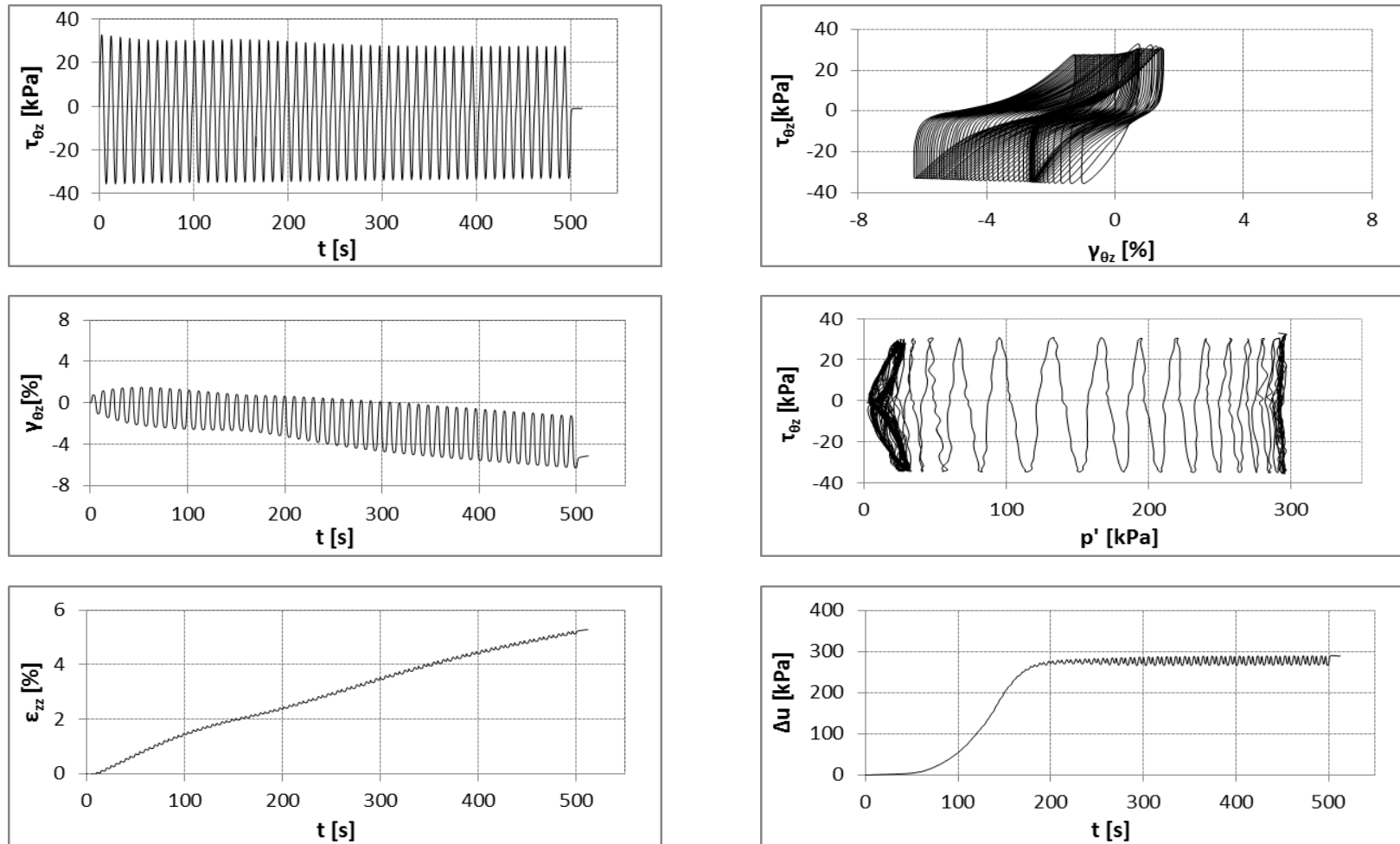
¹ Κανένα σταθεροποιημένο δοκίμιο δεν κατέρρευσε πλήρως στο σύνολο των κύκλων του πειράματος. Ο αναγραφόμενος αριθμός είναι ο κύκλος στον οποίο το όργανο μέτρησης των γωνιών έφτασε στα όριά του.



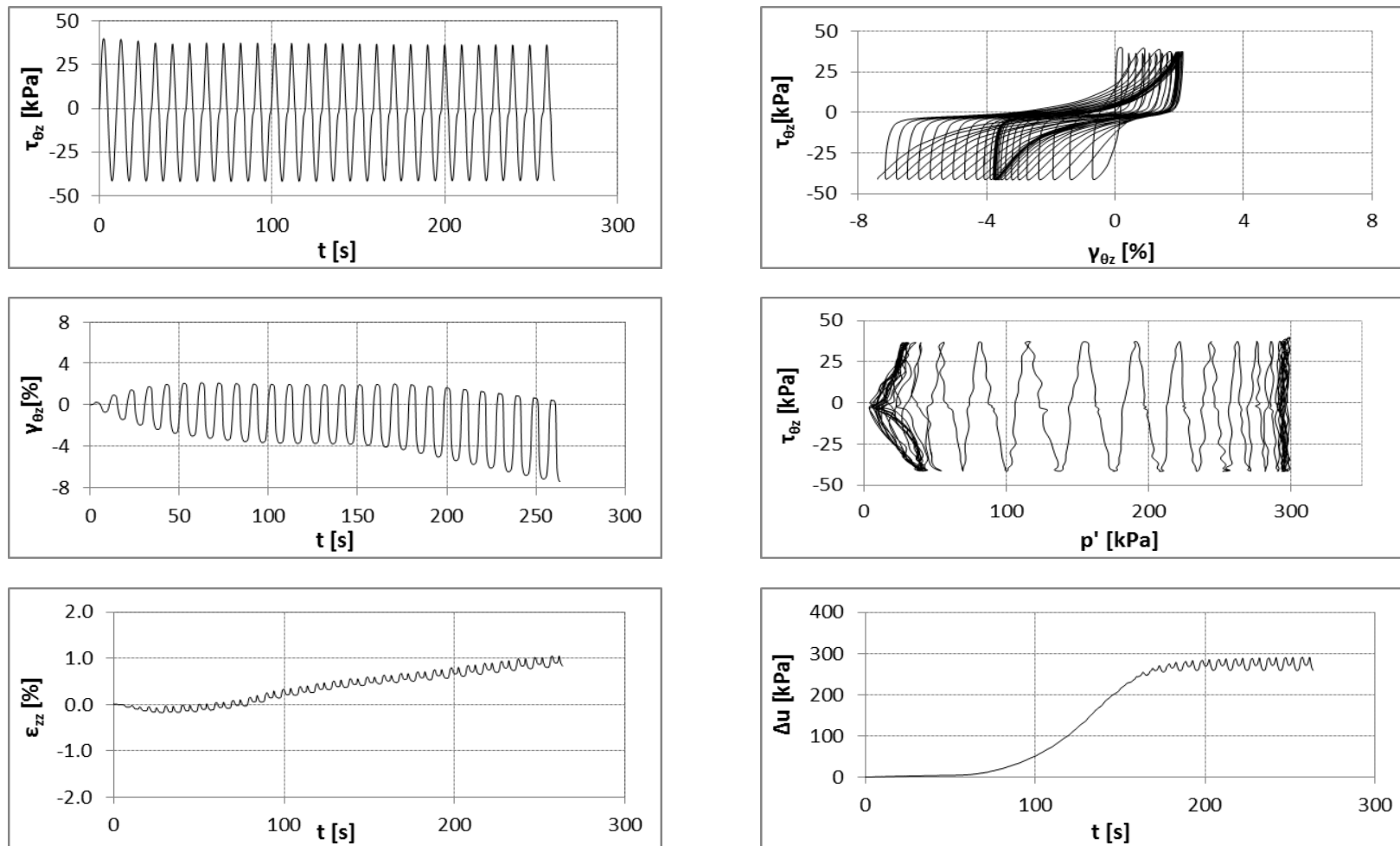
Σχήμα Π5-2.1. Δοκιμή SA10-300-1: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.08$



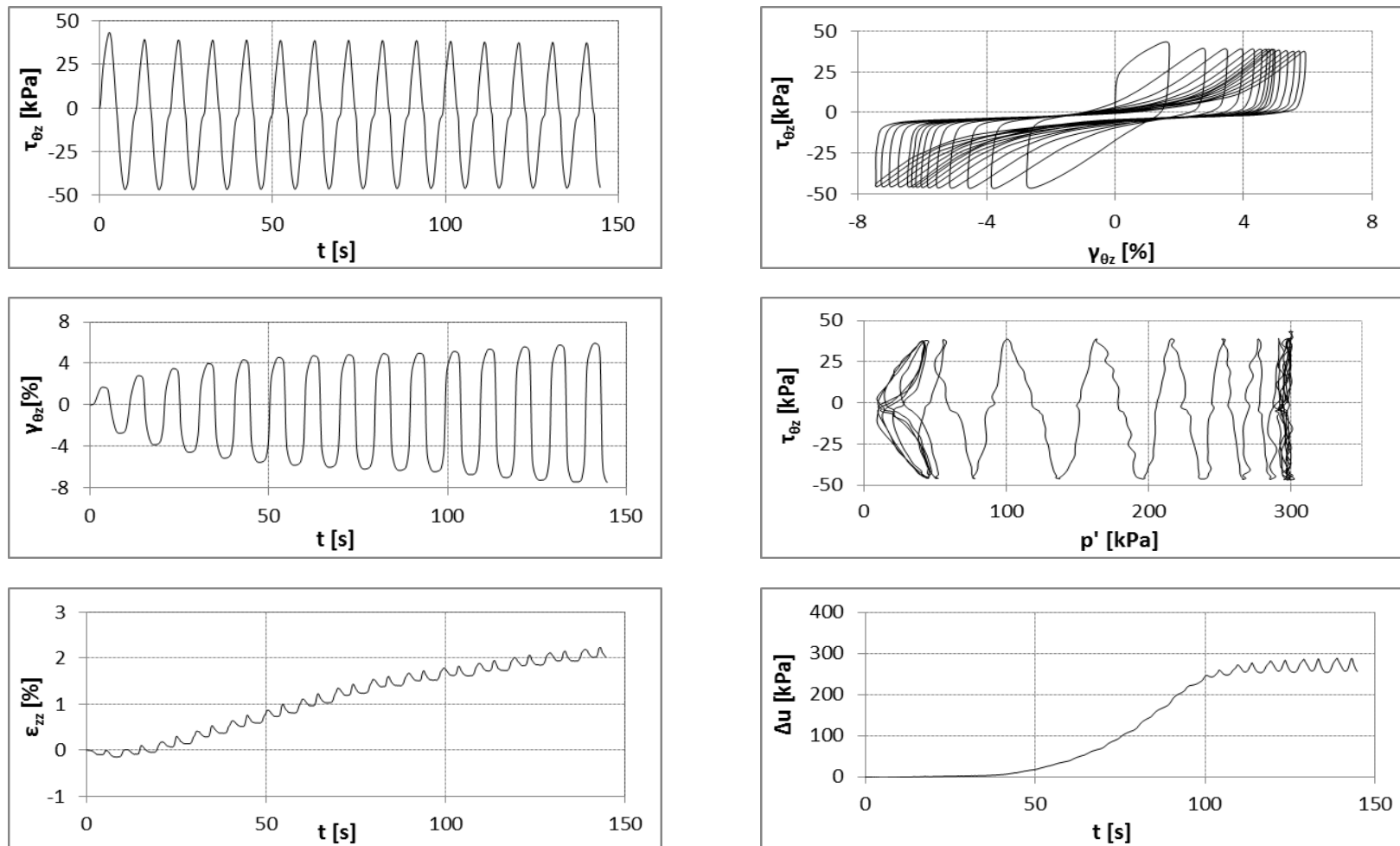
Σχήμα Π5-2.2. Δοκιμή SA10-300-2: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.10$



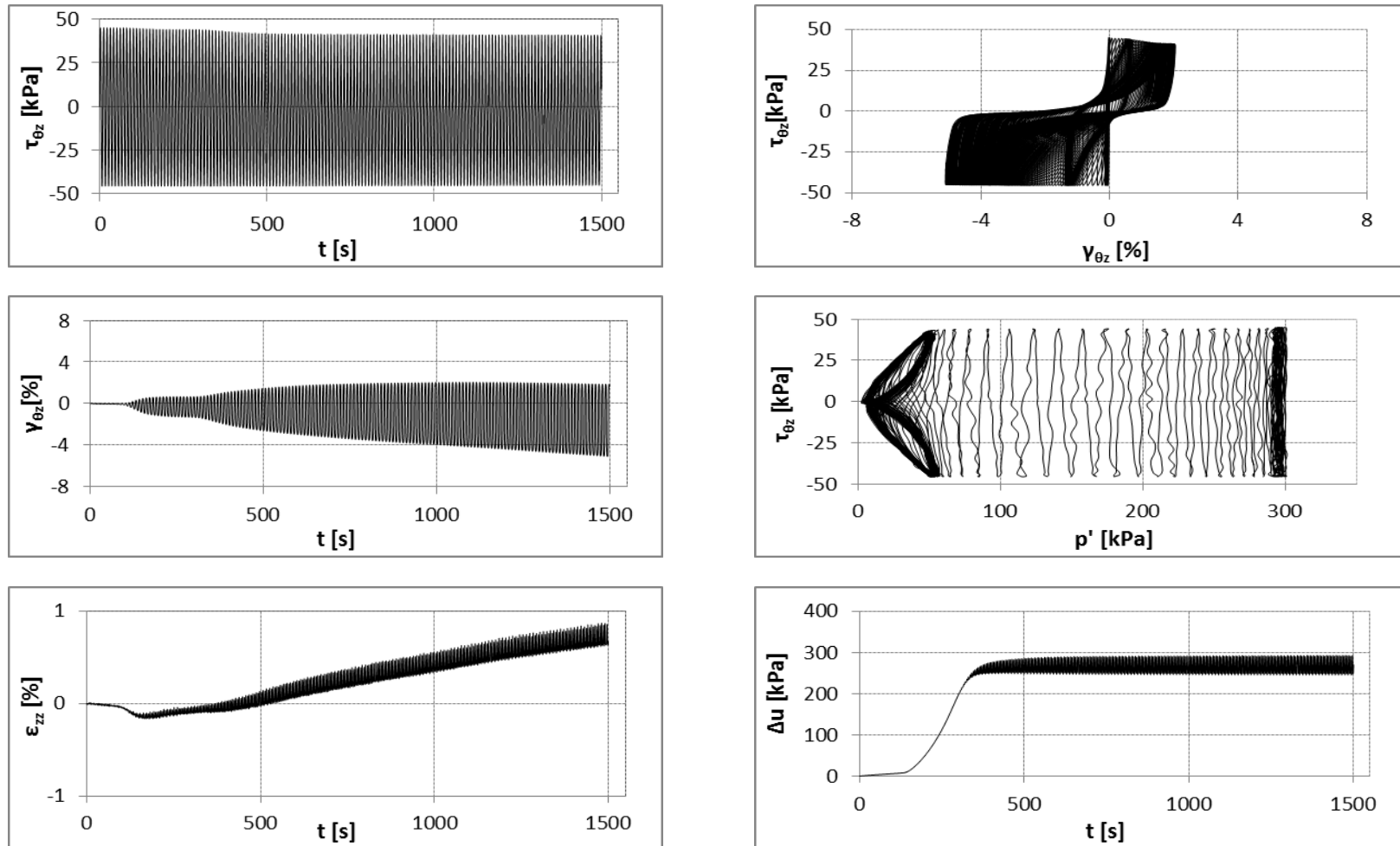
Σχήμα Π5-2.3. Δοκιμή SA10-300-3: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.12$



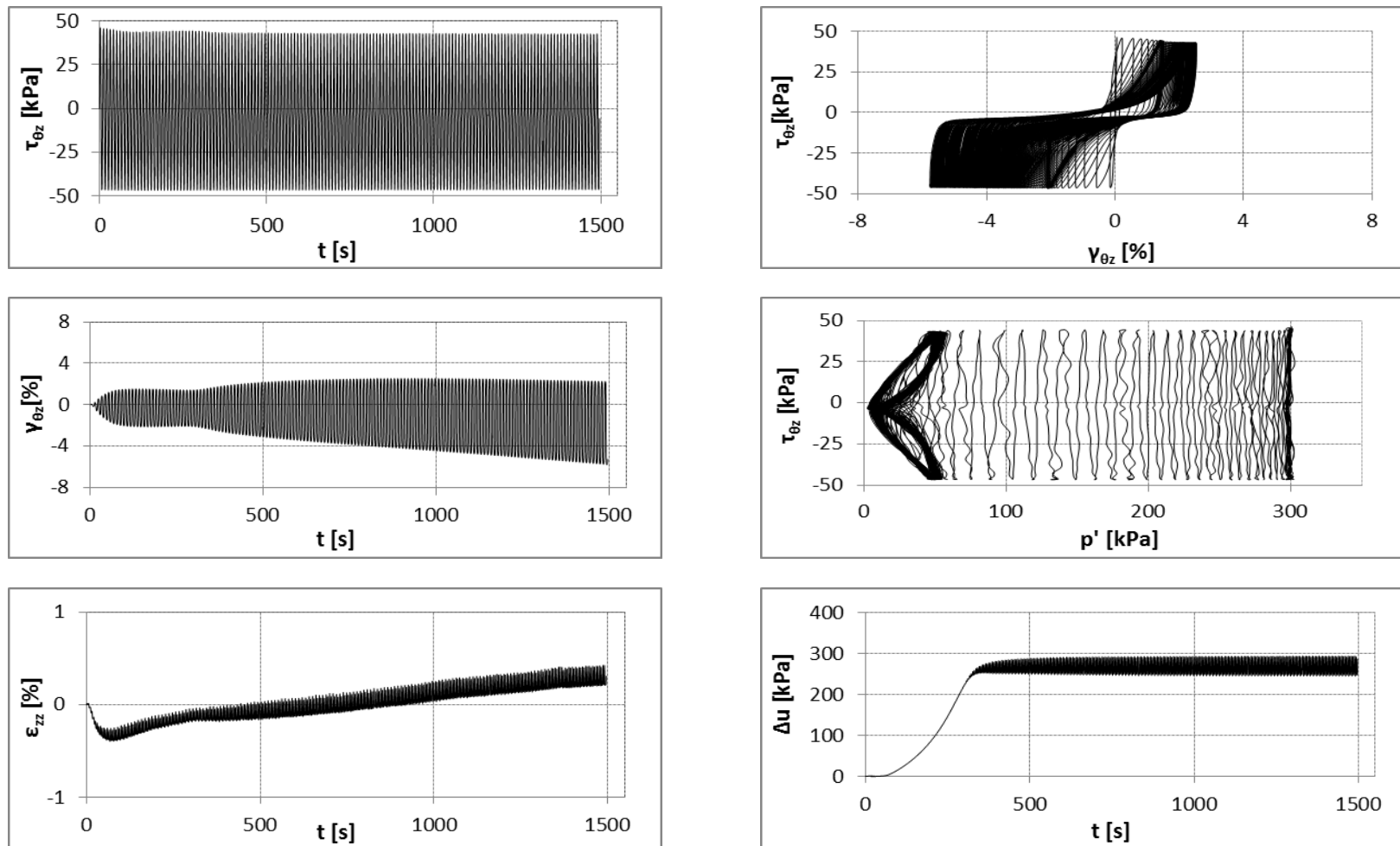
Σχήμα Π5-2.4. Δοκιμή SA10-300-4: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.14$



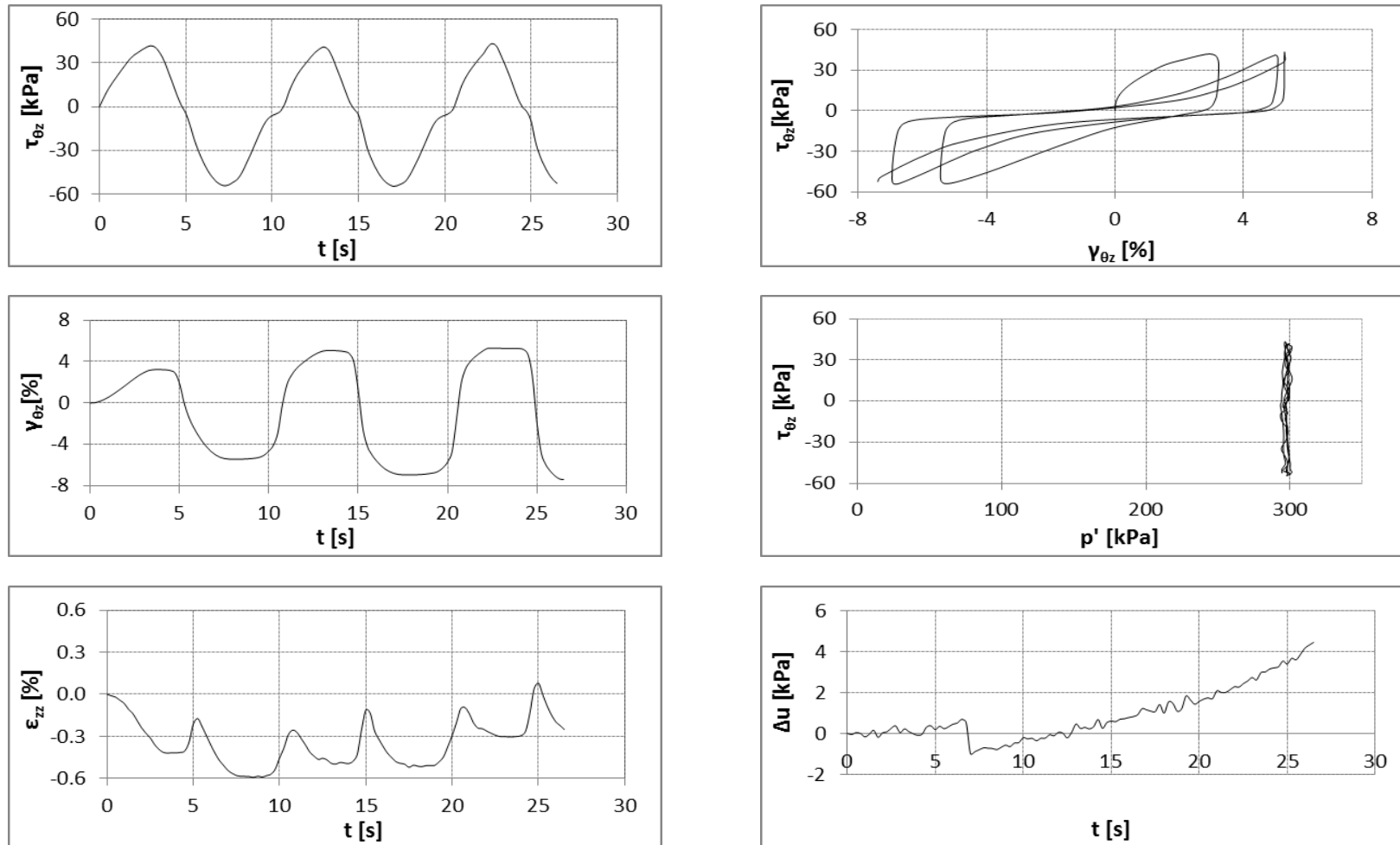
Σχήμα Π5-2.5. Δοκιμή SA10-300-5: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.15$



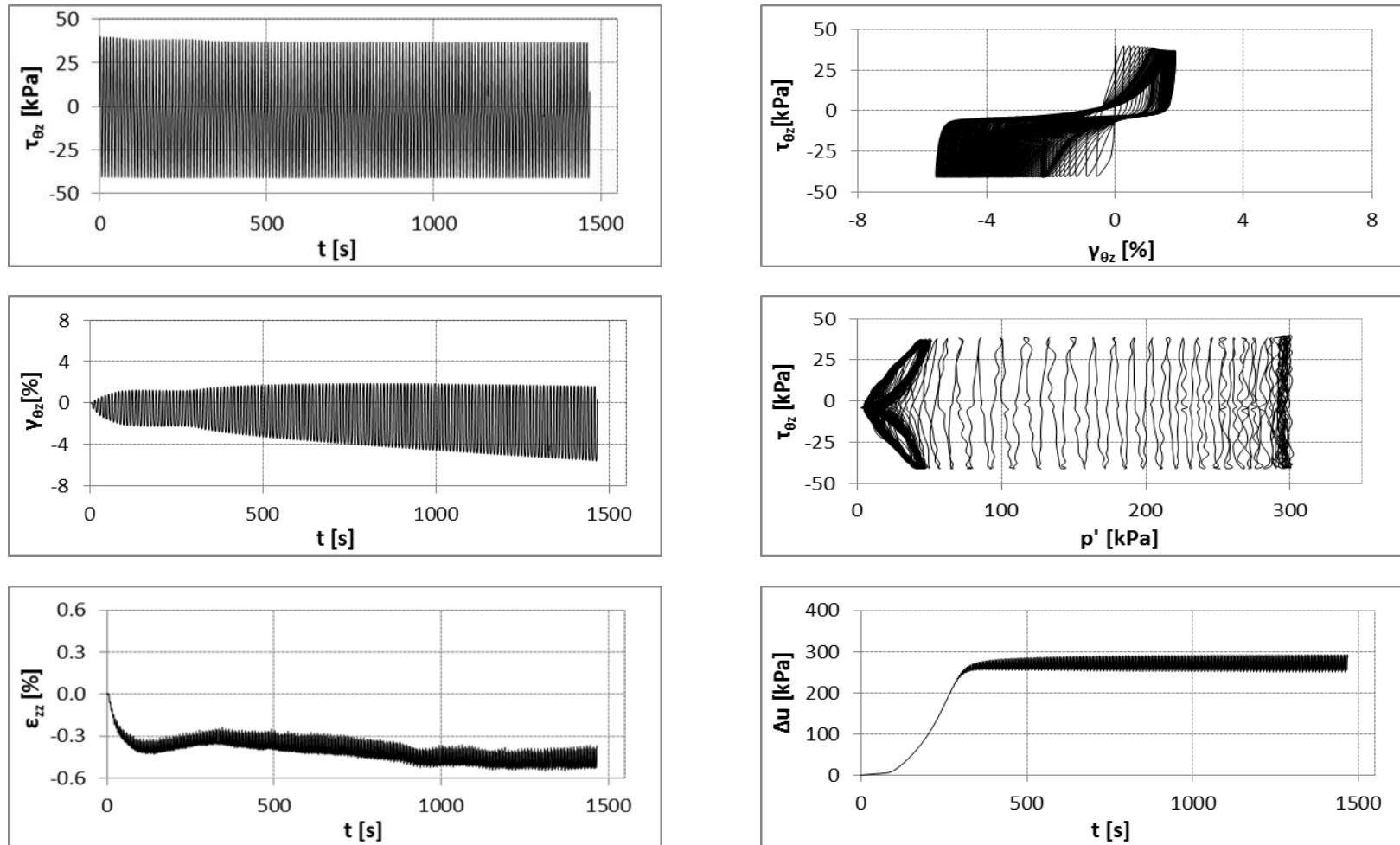
Σχήμα Π5-2.6. Δοκιμή SA10-300-6: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.15$



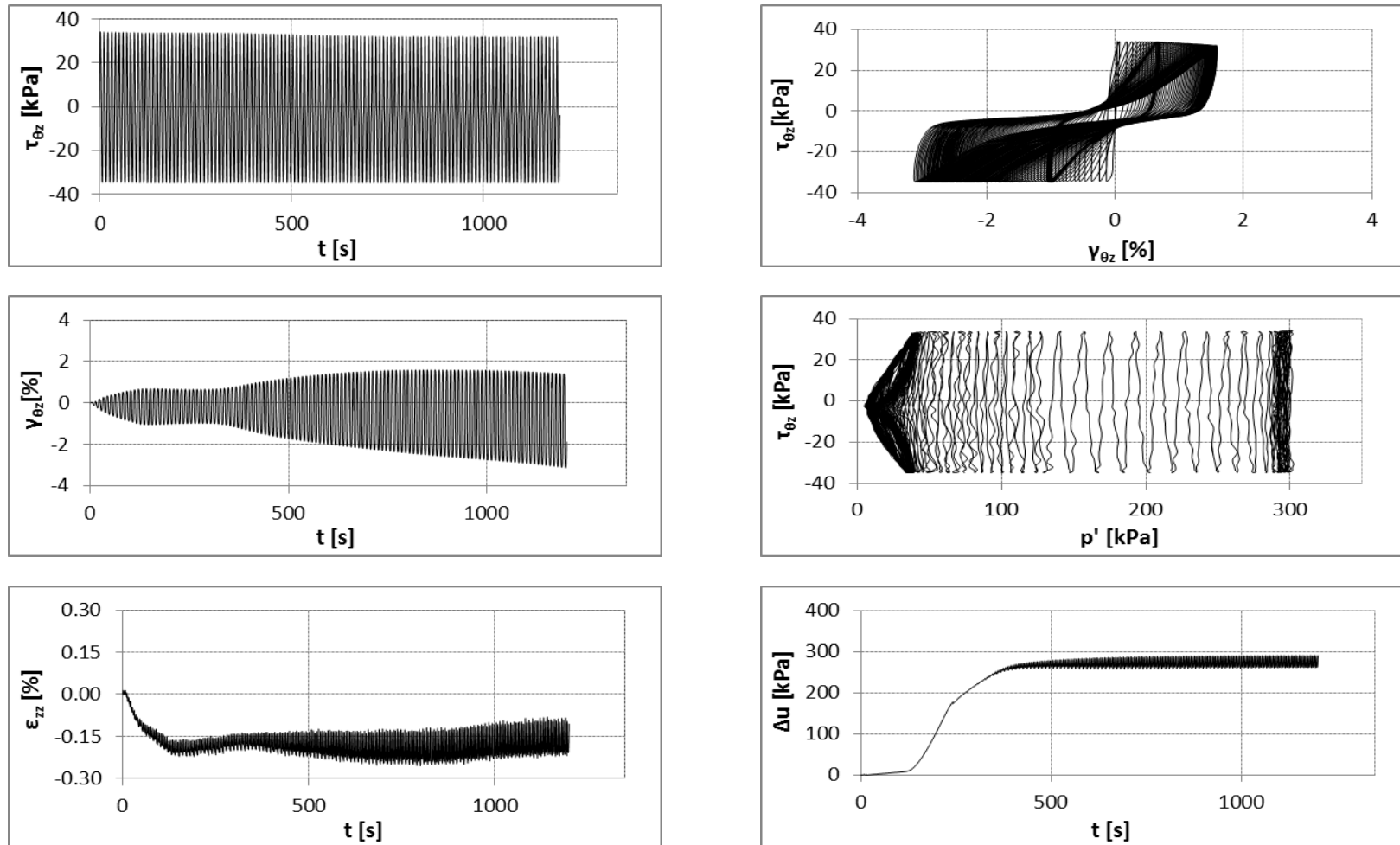
Σχήμα Π5-2.7. Δοκιμή SA10-300-7: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.16$



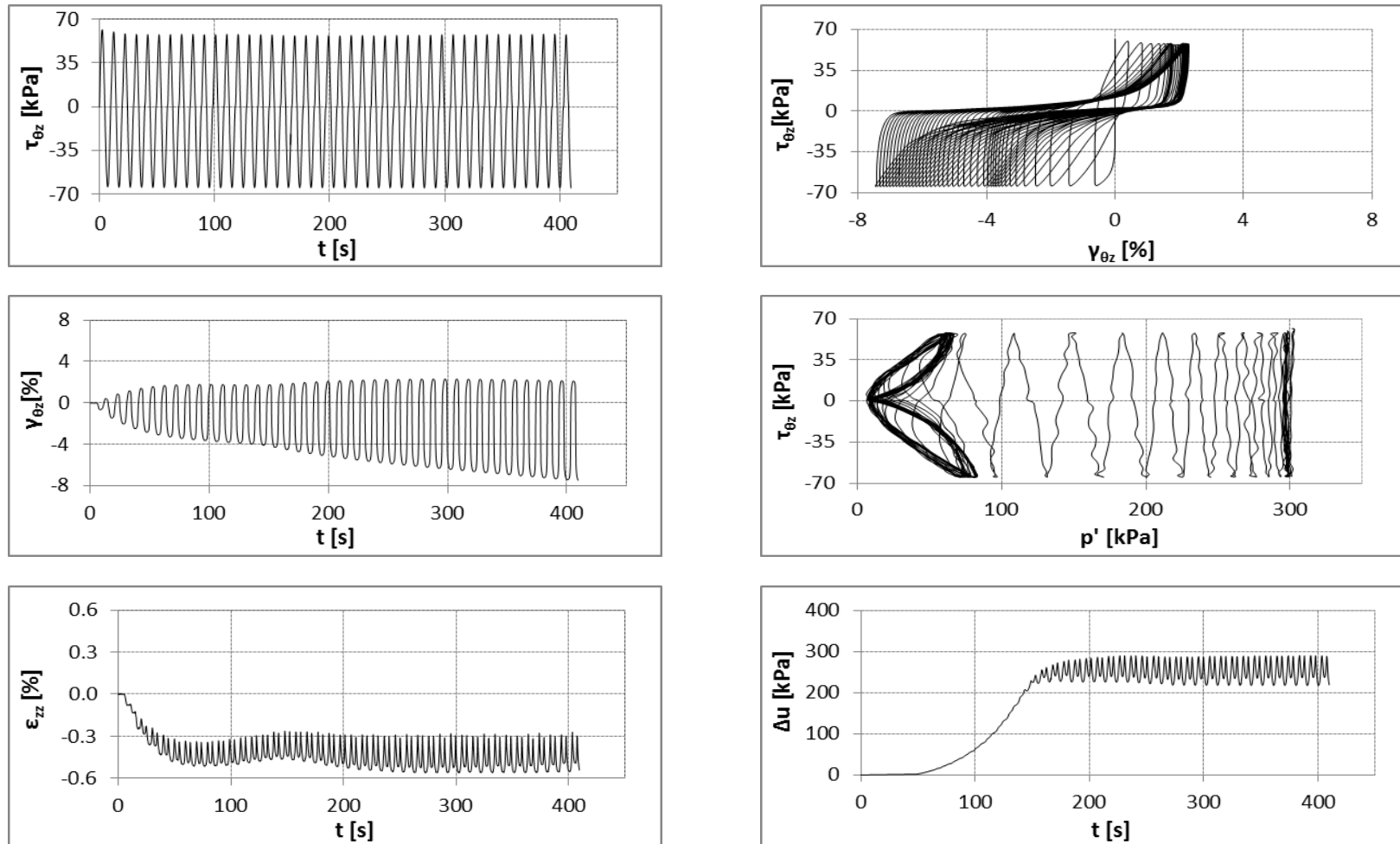
Σχήμα Π5-2.8. Δοκιμή SA10-300-8: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.17$



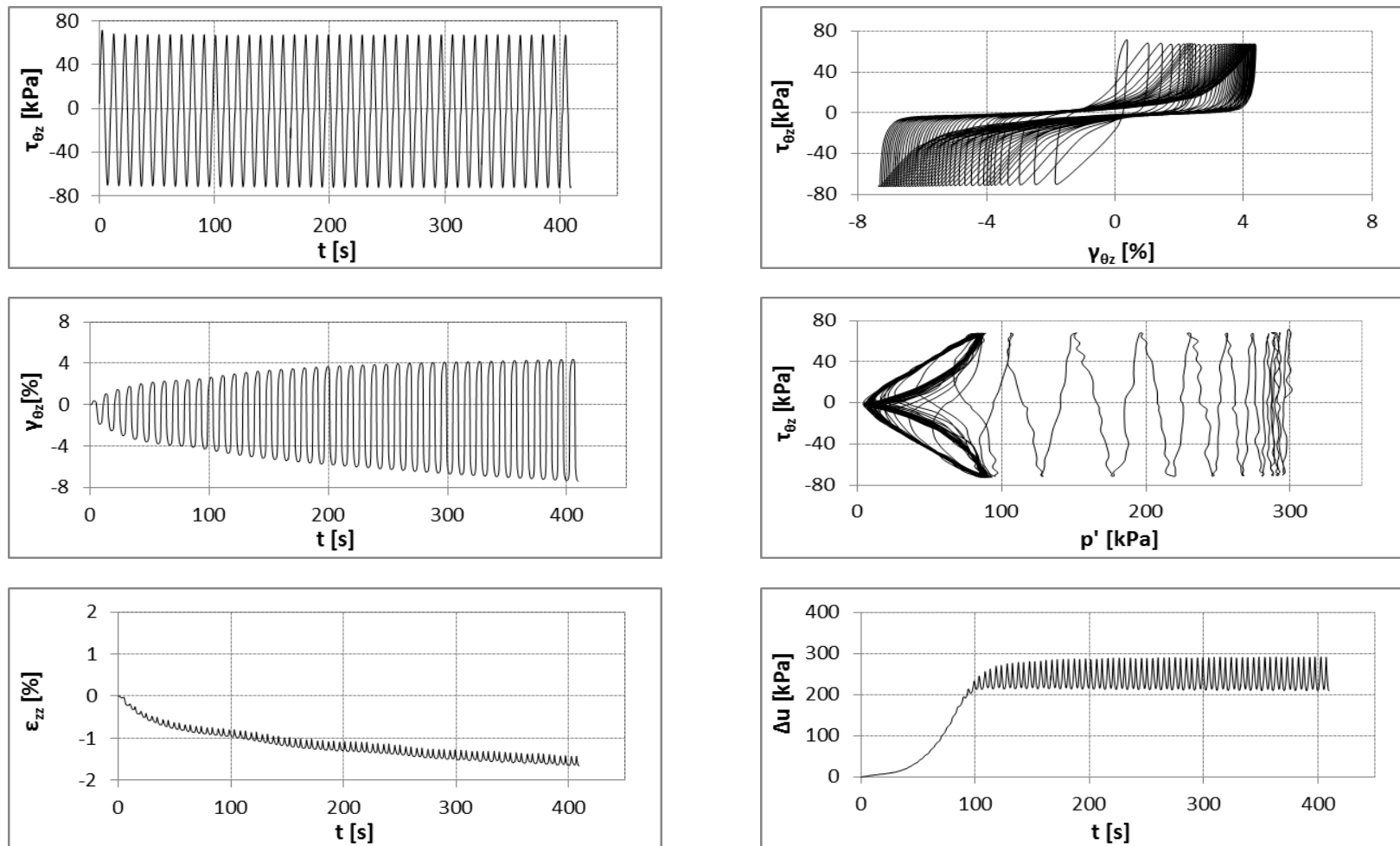
Σχήμα Π5-2.9. Δοκιμή SA10-300-9: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.14$



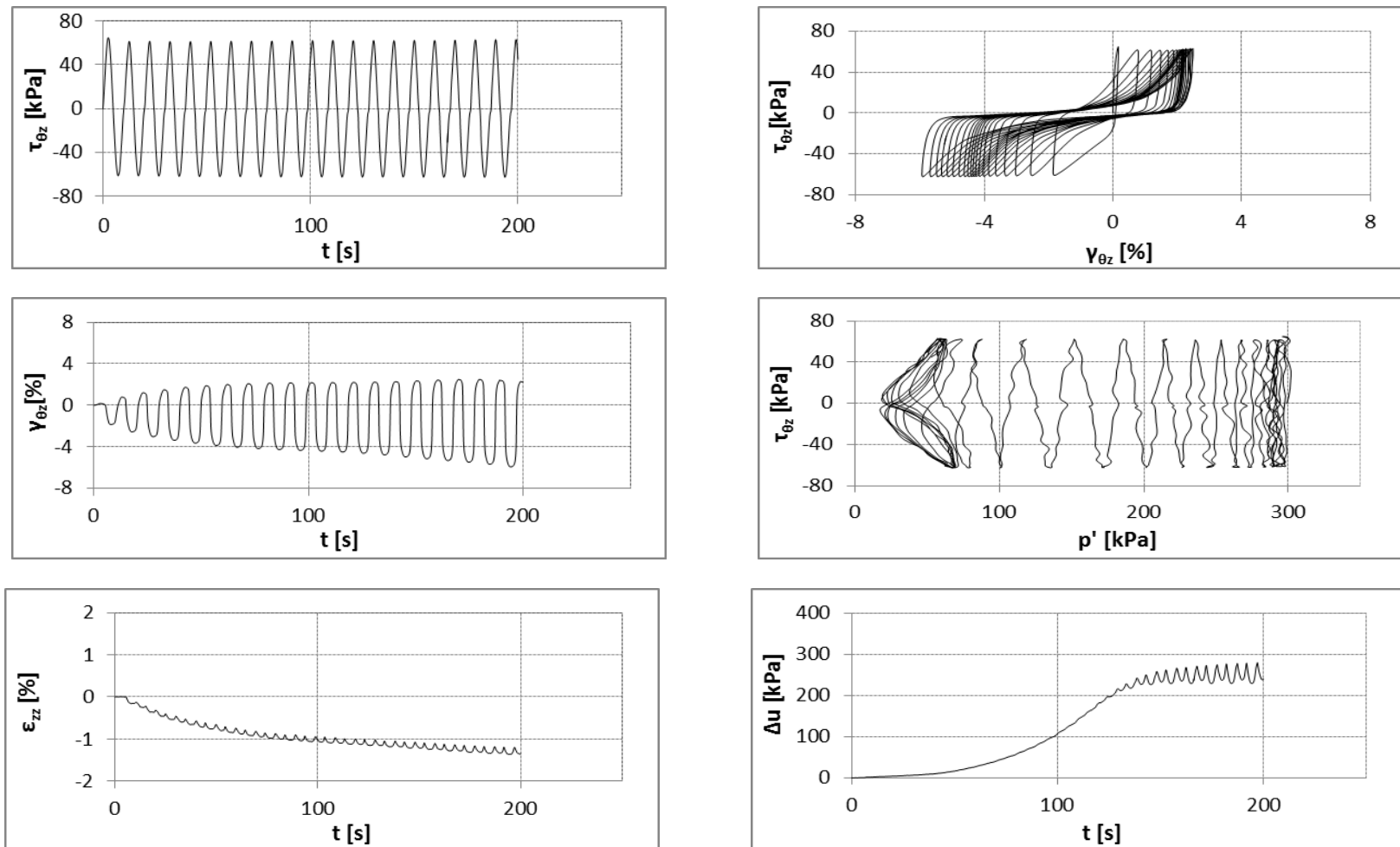
Σχήμα Π5-2.10. Δοκιμή SA10-300-10: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.12$



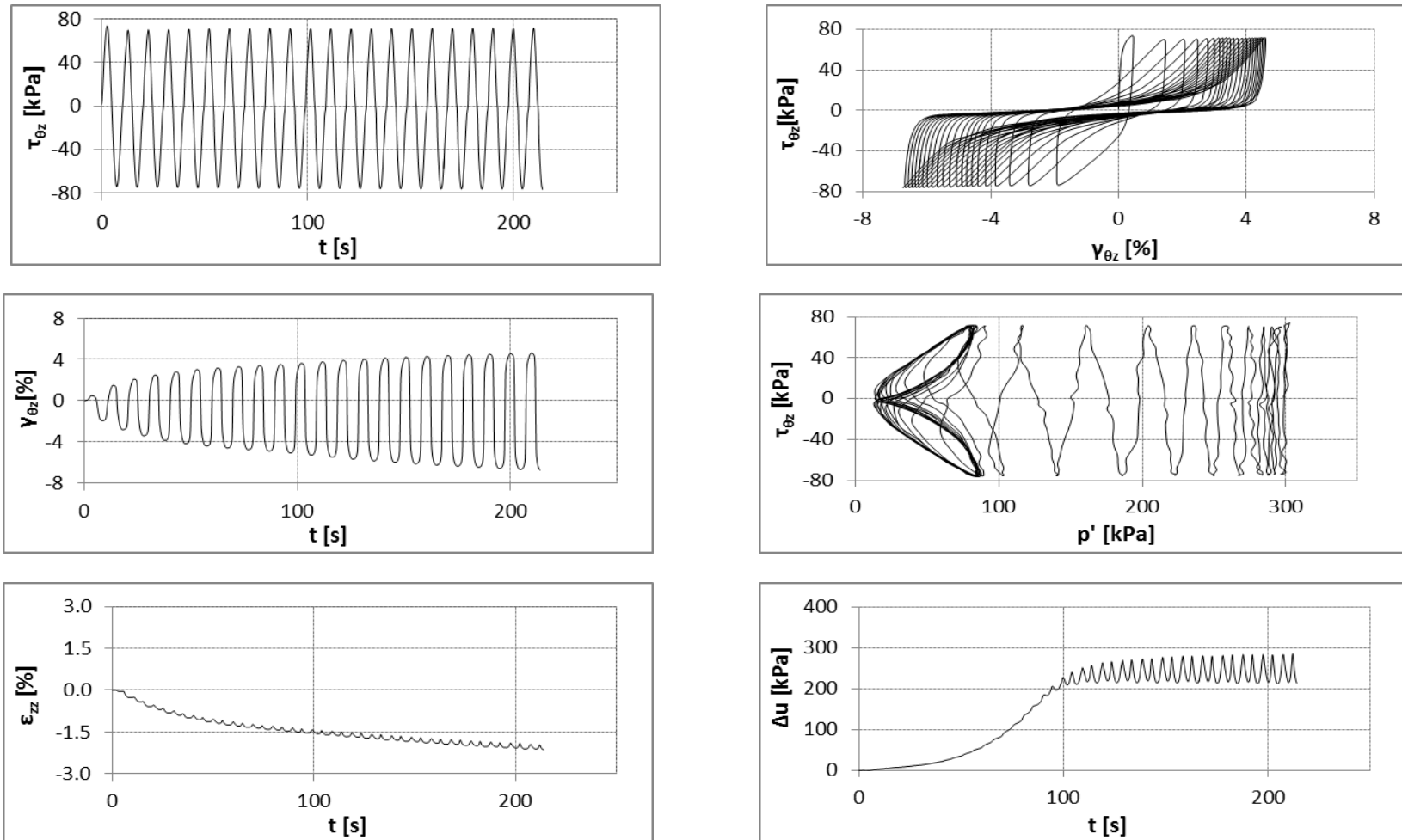
Σχήμα Π5-2.11. Δοκιμή SA10-300-11: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.21$



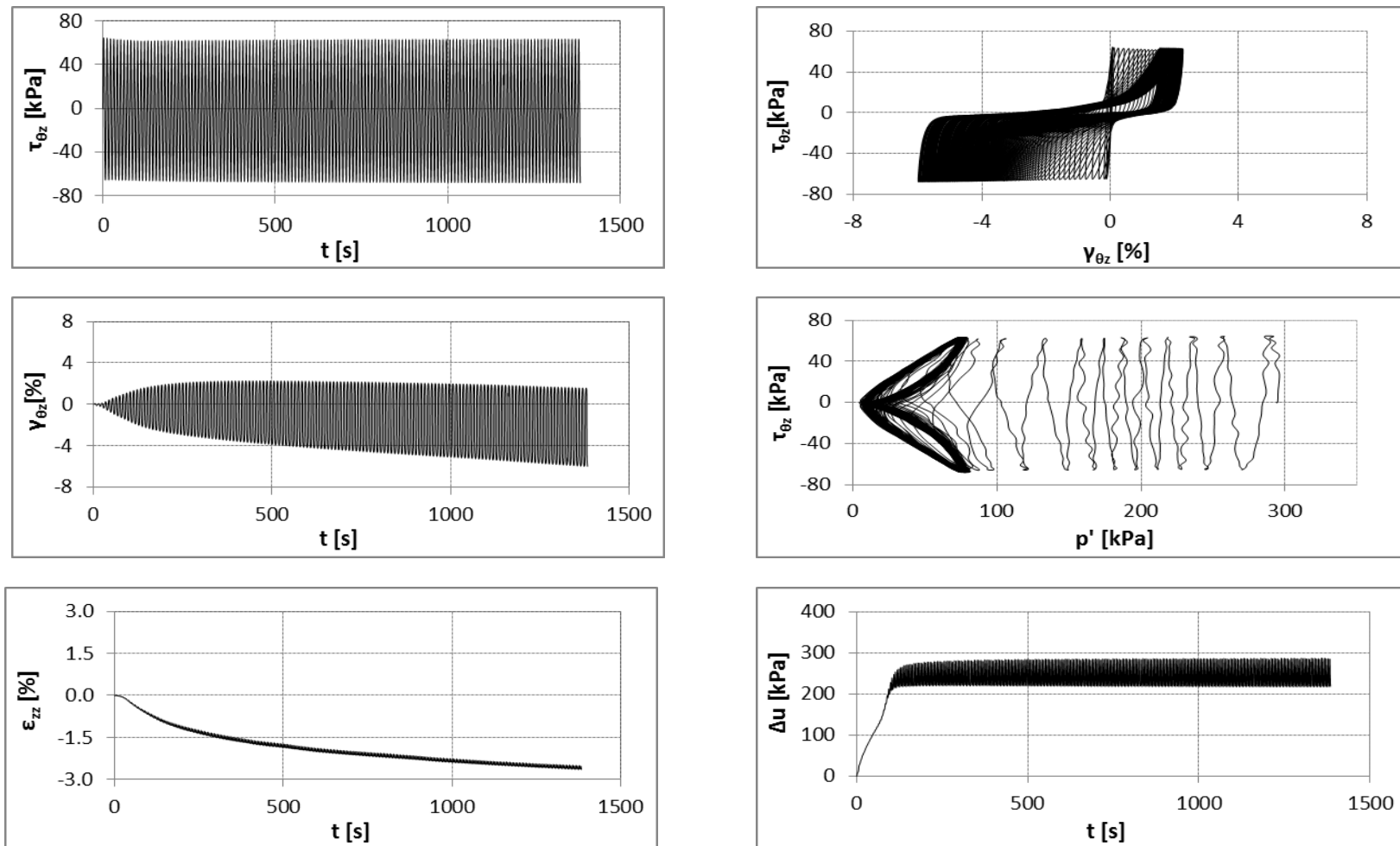
Σχήμα Π5-2.12. Δοκιμή SA10-300-12: σταθεροποιημένη άμμος(CS=10%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.24



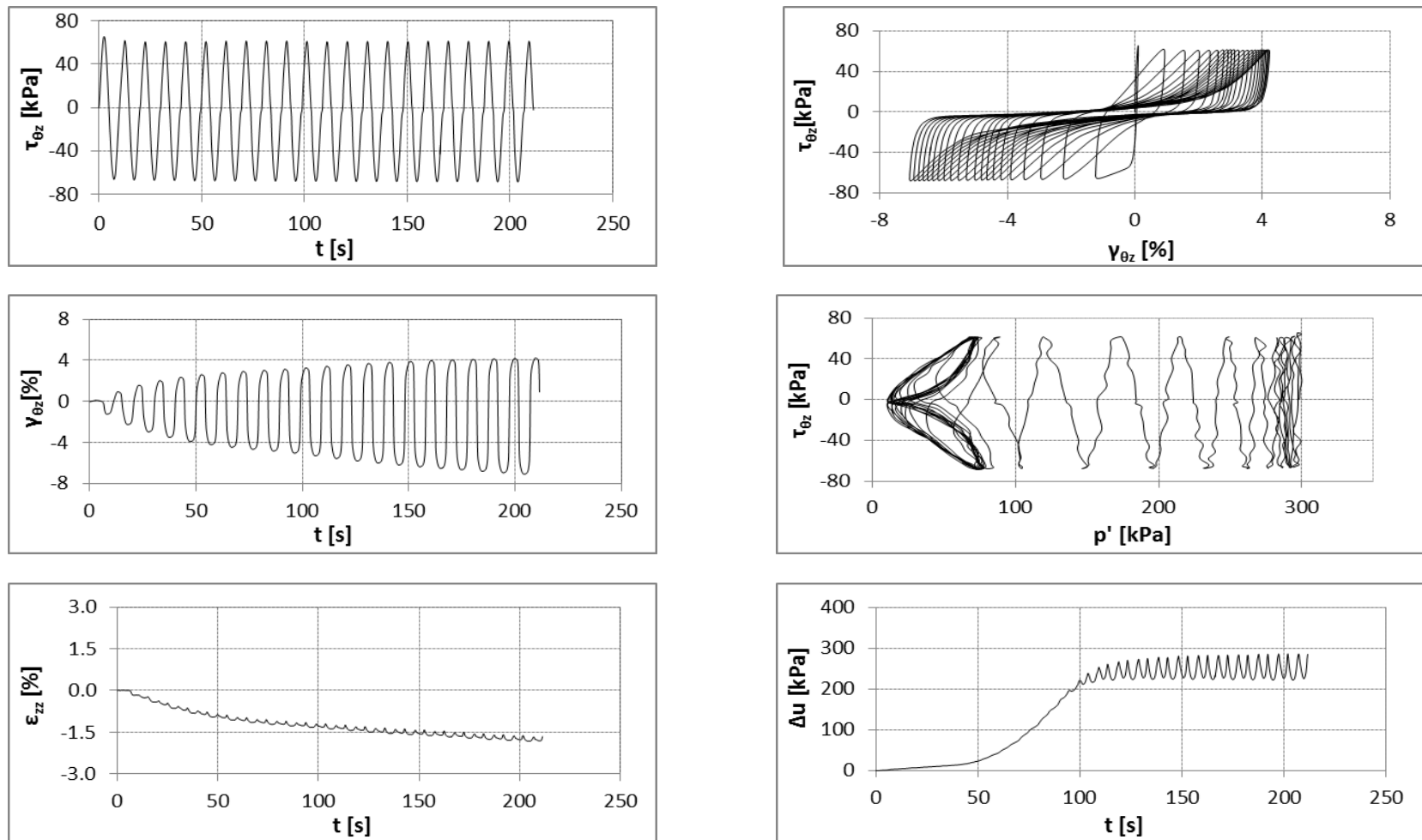
Σχήμα Π5-2.13. Δοκιμή SA10-300-13: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.21$



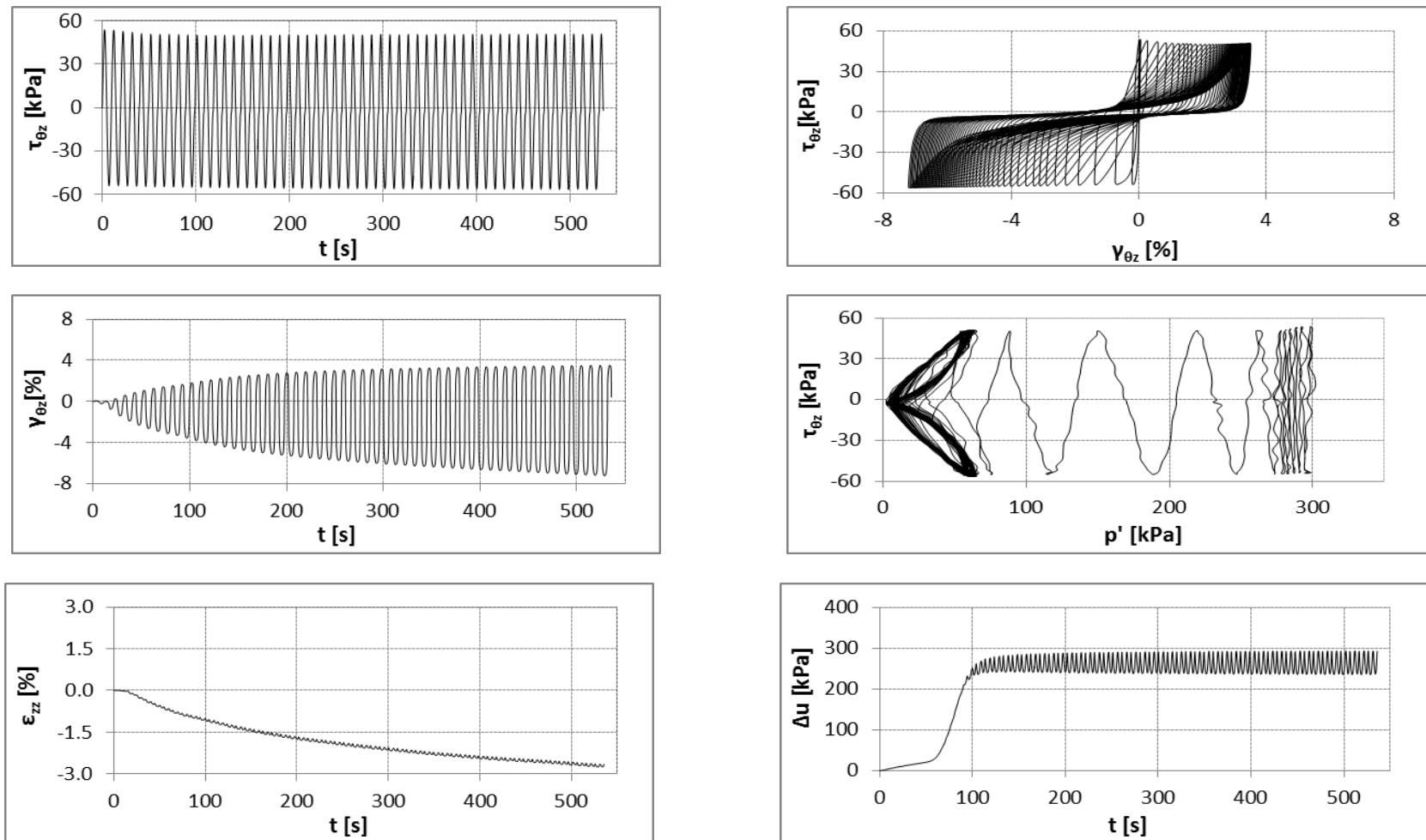
Σχήμα Π5-2.14. Δοκιμή SA10-300-14: σταθεροποιημένη άμμος(CS=10%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.25



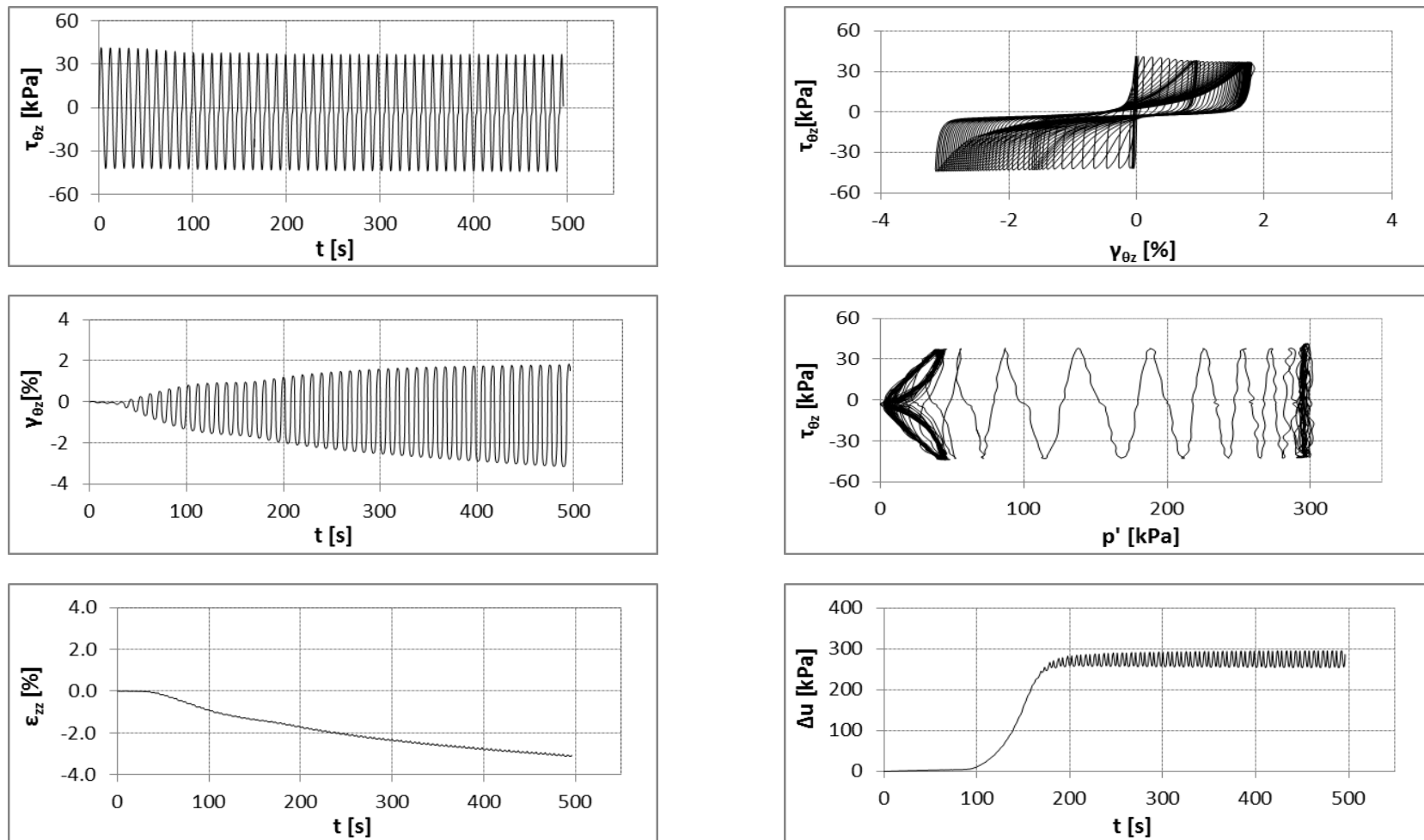
Σχήμα Π5-2.15. Δοκιμή SA10-300-15: σταθεροποιημένη άμμος($CS=10\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.22$



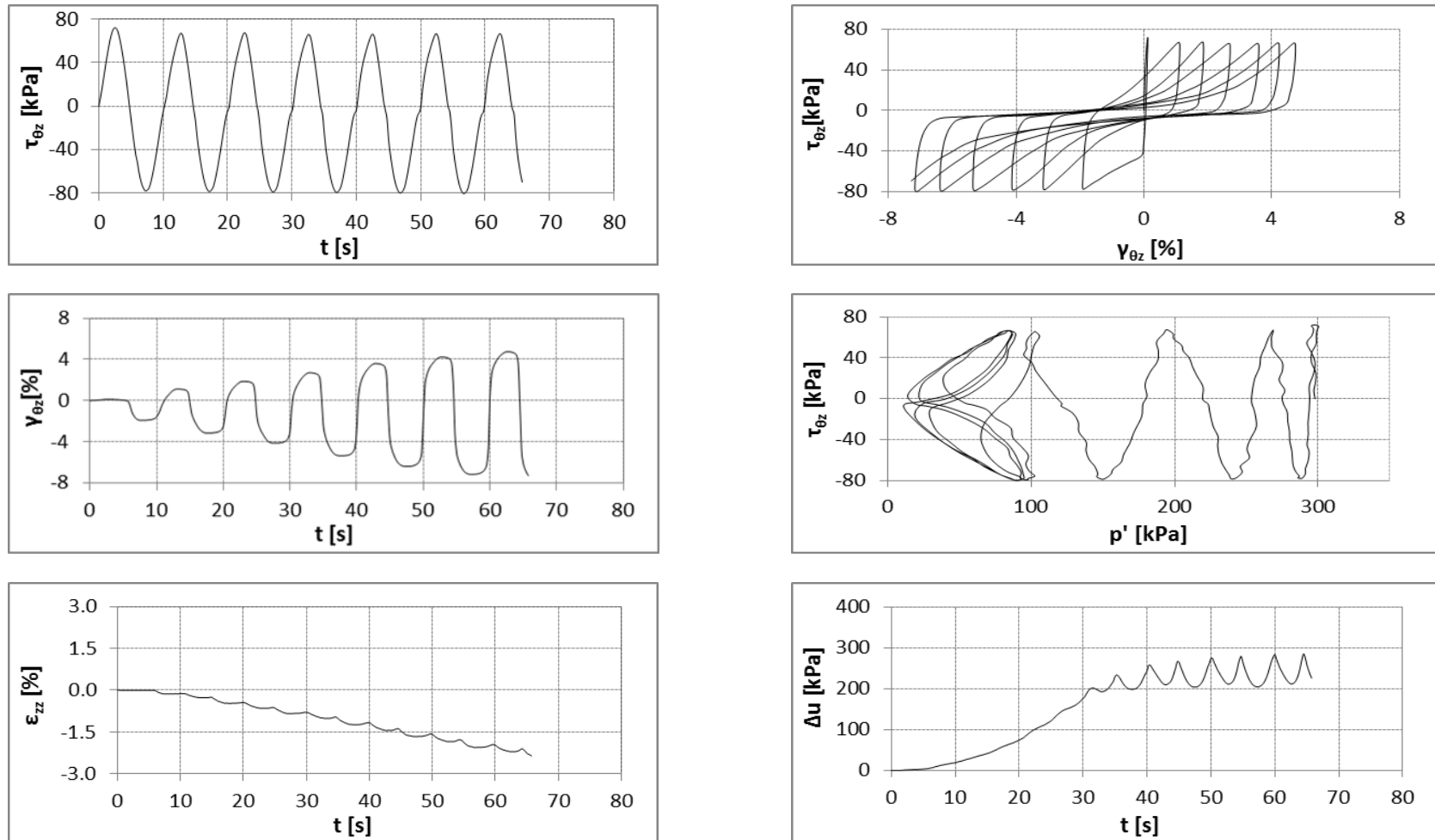
Σχήμα Π5-2.16. Δοκιμή SA10-300-16: σταθεροποιημένη άμμος(CS=10%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.23



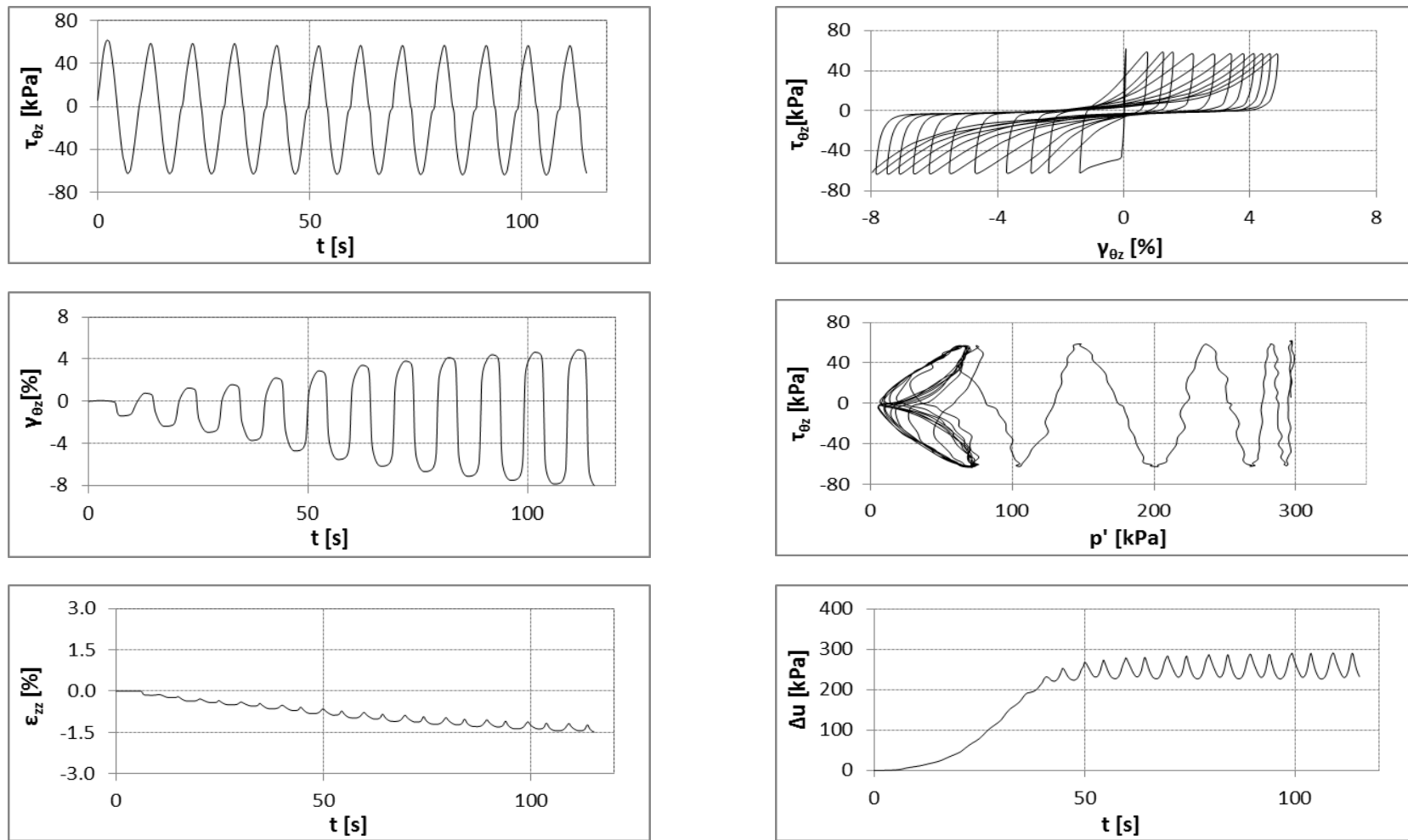
Σχήμα Π5-2.17. Δοκιμή SA10-300-17: σταθεροποιημένη άμμος(CS=10%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.18



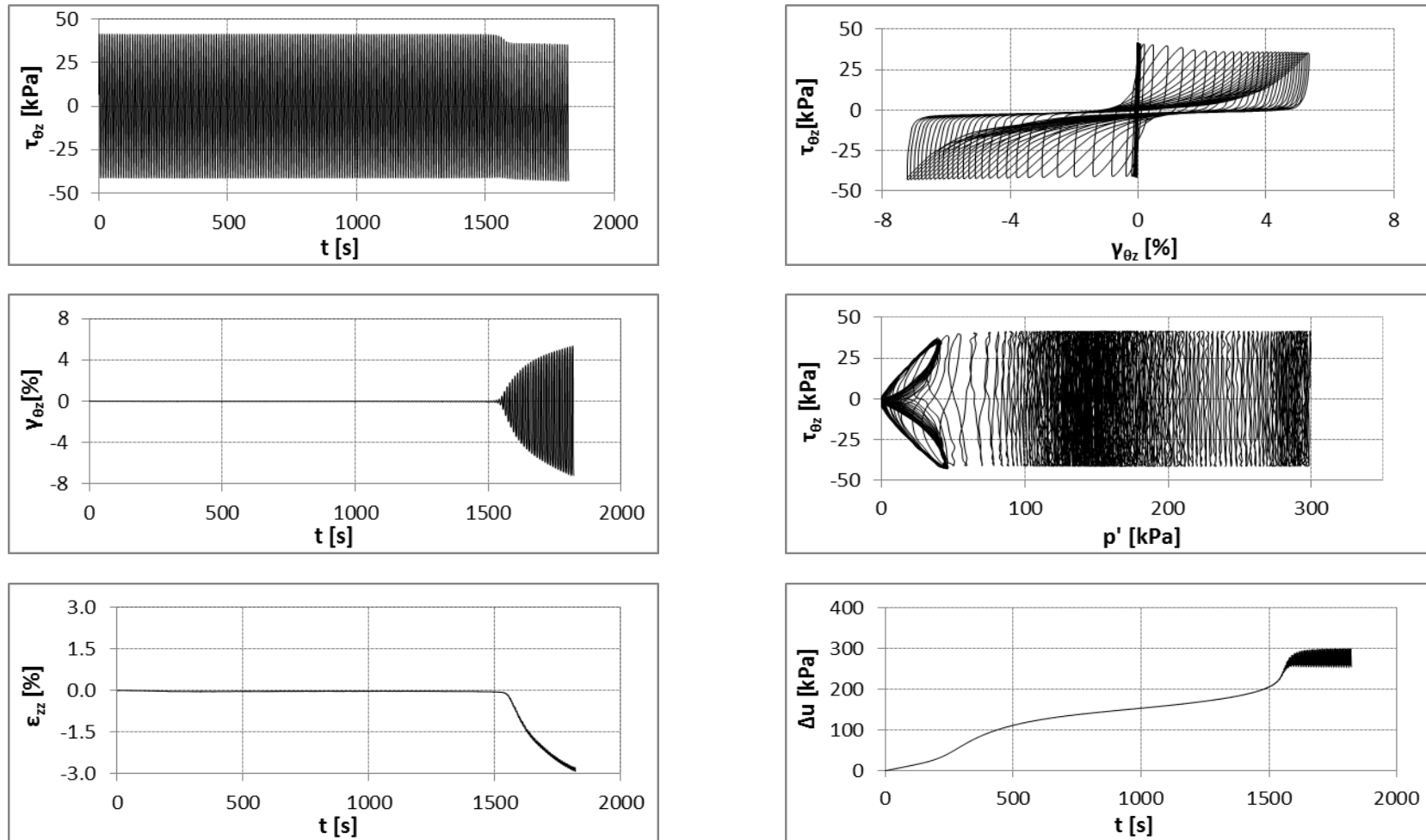
Σχήμα Π5-2.18. Δοκιμή SA10-300-18: σταθεροποιημένη άμμος(CS=10%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.14



Σχήμα Π5-2.19. Δοκιμή SA6-300-1: σταθεροποιημένη άμμος(CS=6%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.25



Σχήμα Π5-2.20. Δοκιμή SA6-300-2: σταθεροποιημένη άμμος($CS=6\%$, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με $CSR=0.21$



Σχήμα Π5-2.21. Δοκιμή SA6-300-3: σταθεροποιημένη άμμος(CS=6%, $f_c=0\%$) υπό ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με CSR=0.14

