



ΠΡΑΞΗ:

**«ΘΑΛΗΣ- Π.Θ.: ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΜΕΣΩ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΠΟΡΩΝ ΜΕ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΣ ΑΣΦΑΛΗ ΝΑΝΟ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ»
MIS 375618**

Επιστημονικός Υπεύθυνος:
Καθ. Παναγιώτης ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ

ΔΡΑΣΗ 4

*Δοκιμές μονοτονικής (τριαξονικής) φόρτισης
σταθεροποιημένων εδαφών*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ:

Τεχνική Έκθεση Πεπραγμένων (Π4)

Ιούλιος 2015 – 2^η Έκδοση
(1^η Έκδοση: Μάιος 2014)



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Περιεχόμενα | 1 |
| Κατάλογος συμβόλων | 2 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 4 |
| 2 ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΣΥΝΗΘΗ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ | 4 |
| 2.1 Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών | 6 |
| 2.2 Αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών | 8 |
| 3. ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ | 20 |
| 3.1 Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών | 20 |
| 3.2 Αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών | 21 |
| 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 52 |
| Βιβλιογραφικές Αναφορές | 53 |
| A. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης σε συνήθη επίπεδα τάσεων (Α.Π.Θ.) | 55 |
| B. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποτελέσματα δοκιμών μονοτονικής φόρτισης (τριαξονικής και στρεπτικής διάτμησης) σε υψηλά επίπεδα τάσεων (Ε.Μ.Π.) | 69 |

Κατάλογος συμβόλων

| | |
|----------------------------------|---|
| CS(%) | Ποσοστό κατά βάρος κolloειδούς πυριτίας |
| C_u | αστράγγιστη διατμητική αντοχή |
| D_r | σχετική πυκνότητα |
| D_{rc} | σχετική πυκνότητα μετά τη στερεοποίηση |
| e | δείκτης πόρων |
| e_c | δείκτης πόρων μετά τη στερεοποίηση |
| e_{cs} | δείκτης πόρων στην κρίσιμη κατάσταση |
| e_{max} | μέγιστος δείκτης πόρων |
| e_{min} | ελάχιστος δείκτης πόρων |
| f_c | ποσοστό λεπτοκόκκων |
| n | ιξώδες |
| ρ' | μέση ενεργός τάση |
| ρ | μέση (ολική) τάση |
| ρ'_{cs} | μέση ενεργός τάση στην κρίσιμη κατάσταση |
| q | αποκλίνουσα τάση |
| q_{cs} | αποκλίνουσα τάση στην κρίσιμη κατάσταση |
| q_{max} | μέγιστη αποκλίνουσα τάση |
| q_{ult} | οριακή αποκλίνουσα τάση |
| s_{cs} | αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην κρίσιμη κατάσταση |
| $S_{u,max}$ | μέγιστη αστράγγιστη διατμητική αντοχή, $S_{u,max} = q_{max} / 2$ |
| $S_{u,ult}$ | αστράγγιστη διατμητική αντοχή που αντιστοιχεί στην τιμή q_{ult} , $S_{u,ult} = q_{ult} / 2$ |
| u | πίεση του υγρού των πόρων |
| Δu | υπερπίεση του υγρού των πόρων |
| w | φυσική υγρασία |
| B | παράμετρος Skempton |
| Γ_{cs} | παράμετρος κρίσιμης κατάστασης |
| γ_d | ξηρό ειδικό βάρος |
| Δu | υπερπίεση του υγρού των πόρων |
| ϵ_α ή ϵ_z | αξονική παραμόρφωση |
| λ_{cs} | κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης |
| M_{cs} | λόγος της αποκλίνουσας προς την μέση ενεργό τάση στην κρίσιμη κατάσταση |
| ρ_d | ξηρή πυκνότητα |
| σ_o ή ρ_i | ολική ισότροπη τάση εγκιβωτισμού |
| σ'_o ή ρ'_i | ενεργός ισότροπη τάση εγκιβωτισμού (ή στερεοποίησης) |

| | |
|----------------------|--|
| σ_1, σ_3 | μέγιστη και ελάχιστη κύρια θλιπτική τάση |
| φ'_{cs} | γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση |
| φ' | μέγιστη γωνία τριβής |
| φ'_{PTL} | γωνία τριβής στην αλλαγή φάσης |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί την 2^η Έκδοση του Παραδοτέου 4 του Ερευνητικού Προγράμματος:

**ΘΑΛΗΣ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ - «Αποτροπή σεισμικής
ρευστοποίησης εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών μέσω
εμπλουτισμού του υγρού πόρων με περιβαλλοντικώς ασφαλή νάνο-
σωματίδια»**

Το εν λόγω Ερευνητικό Πρόγραμμα έχει κωδικό **MIS 375618**, και εκπονείται υπό το συντονισμό του Καθηγητή **Παναγιώτη Ντακούλα** (Επιστημονικός Υπεύθυνος Ε.Υ.), με τη στενή συνεργασία του πρώην Ε.Υ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Επίκ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. (παραιτήθηκε από το Π.Θ. τον Αύγουστο 2014).

Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω Παραδοτέο σχετίζεται με τη **Δράση 4** του Προγράμματος, η οποία έχει τίτλο **Δοκιμές μονοτονικής (τριαξονικής) φόρτισης σταθεροποιημένων εδαφών**. Όπως προκύπτει από τον τίτλο της, και όπως αναφέρεται στην εγκεκριμένη απόφαση εκτέλεσης με ίδια μέσα, στη Δράση 4 έχει εκτελεσθεί *«ικανό πλήθος τριαξονικών δοκιμών σε συνήθεις και μεγάλες τάσεις στερεοποίησης, με στόχο την κατοχύρωση της μονοτονικής συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους»*.

Με βάση την ίδια απόφαση, το **Παραδοτέο 4** συνίσταται από μία *«Τεχνική Έκθεση επί των αποτελεσμάτων από μονοτονικές δοκιμές: (α) διαδικασίες δοκιμών και βαθμονόμηση συσκευών, (β) πειραματικά αποτελέσματα από τριαξονικές δοκιμές σε 2 σταθεροποιημένα εδάφη υπό συνήθη και υψηλά επίπεδα τάσεων, συμπεριλαμβάνοντας δοκιμές αναφοράς σε μη-σταθεροποιημένα δοκίμια»*.

Έτσι, στο Κεφάλαιο 2 του παρόντος παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις, οι διαδικασίες εκτέλεσης και κυρίως τα αποτελέσματα από μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές σε συνήθη επίπεδα τάσεων (μέχρι 300kPa), ενώ στο Κεφάλαιο 3 γίνεται το ίδιο για αντίστοιχες δοκιμές (τριαξονικής και στρεπτικής διάτμησης) σε υψηλά επίπεδα τάσεων (μέχρι 2000kPa).

Στόχος των πρώτων δοκιμών ήταν να κατοχυρωθεί η μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφών στα συνήθη επίπεδα τάσεων (κάτω από κτίρια με αβαθείς θεμελιώσεις), ενώ στις δεύτερες διερευνάται κατά πόσο η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών αυτών διαφοροποιείται ποιοτικά σε υψηλά επίπεδα τάσεων (π.χ. κάτω από την αιχμή πασσάλων). Υπογραμμίζεται ότι εκτελέστηκε επιπλέον μεγάλος αριθμός μονοτονικών δοκιμών σε μη-σταθεροποιημένα εδάφη, ώστε να εκτιμηθεί άμεσα η επίδραση της σταθεροποίησης στη μηχανική συμπεριφορά μη-συνεκτικών εδαφών.

Συγκριτικά με την 1^η Έκδοση, η παρούσα 2^η Έκδοση του Παραδοτέου 4 συμπεριλαμβάνει επιπλέον μονοτονικές δοκιμές (τριαξονικές και αλλά και στρεπτικής διάτμησης) για μη-σταθεροποιημένα εδάφη υπό στραγγιζόμενες

συνθήκες (κυρίως), που έχουν ενσωματωθεί στο Κεφ. 3 και στο εμπλουτισμένο Παράρτημα Β.

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ προέκυψαν από δοκιμές που εκτελέστηκαν στα κάτωθι εργαστήρια μέλων ΚΕΟ:

- Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής (ΕΕΘΓΣΜ) του Α.Π.Θ.
- Εργαστήριο Εδαφομηχανικής (ΕΕ) του Ε.Μ.Π.

Οι ερευνητικές δραστηριότητες της Δράσης 4, και η καταγραφή τους στο Παραδοτέο 4, εκτελέστηκαν με την πολύτιμη συνδρομή των κάτωθι:

Μέλη ΚΕΟ

- **Θεοδώρα Τίκα**, Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- **Βασιλική Γεωργιάννου**, Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- **Δημήτριος Αχιλιάς**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Χημείας, Α.Π.Θ.
- **Αχιλλέας Παπαδημητρίου**, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ.

Μέλη ΟΕΣ

- **Αντιγόνη Βράννα**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.
- **Γεώργιος Κονίνης**, Πολιτικός Μηχανικός, Συνεργάτης Α.Π.Θ.
- **Παναγιώτης Τριαντάφυλλος**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.
- **Μαρία Κωνσταντίνου**, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Συνεργάτης Ε.Μ.Π.
- **Ιωάννης-Ορέστης Γεωργόπουλος**, Δρ. Πολ. Μηχανικός, Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

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.



2. ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΣΥΝΗΘΗ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ

2.1 Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών

Οι τριαξονικές μονοτονικές δοκιμές σε συνήθη επίπεδα τάσεων πραγματοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή ανακυκλικής φόρτισης (M.T.S. Systems Corporation) που βρίσκεται στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής (Ε.Ε.Θ-Γ.Σ.Μ.) του Α.Π.Θ. Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης συσκευής βασίζεται στη συνεργασία των δύο κύριων συστημάτων της, του σερβο-υδραυλικού και του ηλεκτρονικού, με την εφαρμογή αδιάλλειπτου και πολύ μεγάλης συχνότητας ελέγχου κλειστού βρόγχου, για τον έλεγχο της κίνησης του εμβόλου φόρτισης με ελεγχόμενη μετατόπιση ή δύναμη, καθώς και για τη ρύθμιση της πίεσης στο εσωτερικό της τριαξονικής κυψέλης, με πολύ μεγάλη ακρίβεια (Παπαδοπούλου Α., 2008). Στη συσκευή υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών ισότροπης ή ανισότροπης στερεοποίησης, με πλήρη έλεγχο της διαδρομής τάσεων σε συνθήκες μονοτονικής ή/και ανακυκλικής φόρτισης με ελεγχόμενη τάση ή μετατόπιση.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών του παρόντος Κεφαλαίου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, ενώ στην παράγραφο 2.2 δίνονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την επίδραση της σταθεροποίησης μη συνεκτικών εδαφών σε συνήθη επίπεδα τάσεων.

2.1.1 Διαδικασία δοκιμών στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη

Η συμπεριφορά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και στα σταθεροποιημένα δοκίμια με κολλοειδή πυριτία (CS), μελετήθηκε με τη διεξαγωγή δοκιμών τριαξονικής μονοτονικής συμπίεσης υπό αστράγγιστες συνθήκες, έπειτα από ισότροπη στερεοποίηση (CU) στην καθαρή άμμο M31 (σειρά δοκιμών Α, $f_c = 0\%$) καθώς και στο μείγμα της καθαρής άμμου M31 με την ιλυώδη άμμο D6 σε ποσοστά 85% και 15% αντίστοιχα (σειρά δοκιμών Β, $f_c = 10\%$).

Η διαδικασία των δοκιμών περιελάμβανε τα ακόλουθα στάδια: προετοιμασία δοκιμίων, κορεσμός, στερεοποίηση και φόρτιση. Τα κυλινδρικά δοκίμια ($H/D \approx 100\text{mm}/50\text{mm}$) με $f_c = 0\%$ και $f_c = 10\%$ προετοιμάστηκαν σε διάφορες πυκνότητες σύμφωνα με τη μέθοδο της υποσυμπύκνωσης (Ladd, 1978). Η διαμόρφωση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με διάστρωση του εδαφικού υλικού με αρχική υγρασία $w = 5 - 13\%$ σε 9 στρώσεις και σταθερό αριθμό κτύπων ανά στρώση με ειδικά διαμορφωμένο στέλεχος. Με τη μεταβολή του αριθμού των κτύπων ανά στρώση, επιτυγχάνεται η διαμόρφωση δοκιμίων διαφόρων πυκνοτήτων. Ο κορεσμός των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη διοχέτευση στα δοκίμια διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και απαερωμένου νερού αρχικά. Ακολούθως εφαρμόστηκε η μέθοδος διαδοχικής αύξησης της εσωτερικής πίεσης του ύδατος των πόρων των δοκιμίων,

με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης της κυψέλης. Σε όλες τις δοκιμές η παράμετρος της πίεσης του ύδατος των πόρων, B είχε τιμές $B \geq 95\%$. Μετά την ολοκλήρωση του κορεσμού, τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν στο επίπεδο της επιθυμητής ισότροπης ενεργού τάσης, σ_0 , ίσης με 100kPa ή 300kPa. Η επιβολή της φόρτισης πραγματοποιήθηκε μετά από χρονικό διάστημα τουλάχιστον διπλάσιο του χρόνου στερεοποίησης. Τέλος, κατά την επιβολή της μονοτονικής φόρτισης, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες και υπό σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης 0.1% / min.

2.1.2 Διαδικασία δοκιμών στα σταθεροποιημένα εδάφη

Στην περίπτωση των σταθεροποιημένων εδαφών, εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές μονοτονικής συμπίεσης υπό αστράγγιστες συνθήκες και χωρίς στερεοποίηση (UU) σε δοκίμια της καθαρής άμμου M31, σταθεροποιημένα με διάλυμα της CS σε κατά βάρος ποσοστά 6% (σειρά δοκιμών SA6) και 10% (σειρά δοκιμών SA10).

Τα δοκίμια προετοιμάστηκαν με τη μέθοδο της υποσυμπύκνωσης, όπως στην περίπτωση των δοκιμών των εδαφικών υλικών. Μετά τη διοχέτευση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και απαερωμένου νερού στα δοκίμια, ακολούθησε η διοχέτευση διαλύματος CS από τη βάση προς την κορυφή των δοκιμών, με τη βοήθεια του πίνακα ελέγχου. Η παροχή διαλύματος CS στα δοκίμια διαρκεί όσο χρονικό διάστημα απαιτείται ώστε να εξέλθει από το δοκίμιο όγκος διαλύματος CS τετραπλάσιος του όγκου των κενών του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι κατά την παροχή του διαλύματος CS, το ιξώδες του, η , είναι χαμηλό ($\eta < 3.5cP$). Ακολουθώντας και μετά το πέρας του χρόνου γέλης της CS (11 και 10 ώρες για διάλυμα CS = 6% και 10% αντίστοιχα), τα δοκίμια τοποθετήθηκαν για ωρίμανση σε χώρο σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν έπειτα από χρόνο ωρίμανσης των δοκιμών τετραπλάσιο του χρόνου γέλης της CS (για τα διαλύματα CS = 6% και 10%, 55 ώρες και 50 ώρες αντίστοιχα, από τη στιγμή διαμόρφωσης του διαλύματος).

Μετά την ωρίμανση των σταθεροποιημένων δοκιμών, τα κενά των πόρων των δοκιμών ήταν πληρωμένα με CS. Συνεπώς, ο κορεσμός των δοκιμών πριν τη φόρτισή τους θα προκαλούσε διατάραξη και καταστροφή των δεσμών πυριτίας και ως εκ τούτου δεν πραγματοποιήθηκε. Επιπλέον, η μέτρηση της όποιας μεταβολής της πίεσης του ύδατος των πόρων των δοκιμών ήταν αναξιόπιστη, λόγω της έλλειψης του ύδατος των πόρων από τα δοκίμια. Για τον ίδιο λόγο δεν έγινε στερεοποίηση των δοκιμών, ενώ η φόρτισή τους πραγματοποιήθηκε υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η επιβολή της μονοτονικής φόρτισης έγινε μετά την εφαρμογή πίεσης στην κυψέλη, σ_0 , ίσης με 100kPa ή 300kPa, υπό σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης 0.1% / min.

2.2 Αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών

2.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη

Οι εκτελεσθείσες τριαξονικές δοκιμές (CU) συνοψίζονται στον Πίνακα **2.1**. Για κάθε δοκιμή δίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων κατά τα στάδια κορεσμού, στερεοποίησης και μονοτονικής φόρτισης.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων αναφορικά με την επίδραση της πυκνότητας, της ενεργού τάσης και του ποσοστού λεπτοκόκκων, καθώς και με την κρίσιμη κατάσταση των μη-σταθεροποιημένων δοκιμών.

Επίδραση πυκνότητας, ενεργού τάσης και ποσοστού λεπτοκόκκων

Η επίδραση της πυκνότητας και της ενεργού τάσης στη μονοτονική συμπεριφορά των μη-σταθεροποιημένων δοκιμών παρουσιάζεται στα Σχήματα **2.1-2.2**. Για κάθε έδαφος, το είδος της συμπεριφοράς εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα όσο και από την ενεργό τάση. Για δεδομένη ενεργό τάση, η αύξηση της πυκνότητας έχει ως συνέπεια την αύξηση της διαστολικής τάσης του εδάφους. Η αλλαγή της συμπεριφοράς από καθαρή συστολική σε συστολική/διαστολική και γενικότερα η ενίσχυση της διαστολικής τάσης με την αύξηση της πυκνότητας, πραγματοποιείται σε σχετικές πυκνότητες $D_r \approx 31\%$, τόσο στην καθαρή άμμο ($f_c = 0\%$) όσο και στο μείγμα άμμου - ιλύος με $f_c = 10\%$.

Όσον αφορά στην επίδραση της ενεργού τάσης στη συμπεριφορά των μη-σταθεροποιημένων εδαφών σε δεδομένη σχετική πυκνότητα, τόσο για την καθαρή άμμο με $f_c = 0\%$ όσο και για το μείγμα άμμου - ιλύος με $f_c = 10\%$, δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική επίδραση στο είδος της συμπεριφοράς.

Στο Σχήμα **2.3** παρουσιάζεται η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων στη συμπεριφορά της άμμου με σχετική πυκνότητα $D_r = 24.1 \div 31.2\%$. Προκύπτει ότι η παρουσία λεπτοκόκκων στην άμμο M31 σε ποσοστό $f_c = 10\%$ οδηγεί σε αύξηση της διαστολικότητας του εδάφους και για τις δύο τάσεις στερεοποίησης, $\sigma'_o = 100\text{kPa}$ και 300kPa . Το συμπέρασμα αυτό παρατηρήθηκε και για μεγαλύτερες σχετικές πυκνότητες.

Κρίσιμη Κατάσταση

Για τις αστράγγιστες δοκιμές μονοτονικής φόρτισης θεωρήθηκε ότι η ενεργοποίηση της κρίσιμης κατάστασης αντιστοιχεί στα σημεία εκείνα της διαδρομής των τάσεων, στα οποία η διατμητική τάση, η μέση ενεργός τάση, καθώς και η πίεση του ύδατος των πόρων παρέμειναν πρακτικώς σταθερές με συνεχιζόμενη αξονική παραμόρφωση.

Όπως είναι γνωστό, στην κρίσιμη κατάσταση η μονοσήμαντη σχέση μεταξύ του δείκτη πόρων, e_{cs} , της μέσης ενεργού τάσης, p'_{cs} και της αποκλίνουσας τάσης, q_{cs} ,

στα επίπεδα των $e_{cs} - p'_{cs}$ και $q_{cs} - p'_{cs}$, εκφάζεται από τις γραμμές κρίσιμης κατάστασης (ΓΚΣ) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$e_{cs} = \Gamma_{cs} - \lambda_{cs} \cdot \ln p'_{cs} \quad (2.1)$$

όπου Γ_{cs} είναι η τιμή του e_{cs} για $p'_{cs} = 1\text{kPa}$, λ_{cs} είναι η κλίση της ΓΚΣ

$$q_{cs} = M_{cs} \cdot p'_{cs} \quad (2.2)$$

όπου M_{cs} είναι σταθερά για κάθε εδαφικό υλικό εξαρτώμενη από τη γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση, φ'_{cs} , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$M_{cs} = 6 \sin \varphi'_{cs} / (3 - \sin \varphi'_{cs}) \quad (2.3)$$

Στον Πίνακα **2.2** παρουσιάζονται οι παράμετροι κρίσιμης κατάστασης για τα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και 10% .

Στο Σχήμα **2.4** παρουσιάζονται οι ΓΚΣ των μη-σταθεροποιημένων εδαφών με $f_c = 0\%$ και $f_c = 10\%$. Όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα, οι ΓΚΣ μετακινούνται προς τα κάτω με αυξανόμενο ποσοστό f_c . Επίσης για τιμές $p'_{cs} \leq 1000\text{kPa}$, οι ΓΚΣ για τα εδάφη με $f_c = 0\%$ και 10% είναι σχεδόν παράλληλες, ενώ συγκλίνουν για μεγαλύτερες τιμές της p'_{cs} .

Στο Σχήμα **2.5α** παρουσιάζεται η μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην κρίσιμη κατάσταση, $s_{cs} = q_{cs} / 2 = (p'_{cs} M_{cs}) / 2$, με το e_{cs} . Για δεδομένη ενεργό τάση, και για τα δύο μελετηθέντα εδάφη με $f_c = 0\%$ και 10% παρατηρείται μείωση της s_{cs} με αύξηση του e_{cs} . Το Σχήμα **2.5β** παρουσιάζει τη μεταβολή της κανονικοποιημένης προς την ενεργό τάση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στην κρίσιμη κατάσταση, με το e_{cs} .

2.2.2 Αποτελέσματα δοκιμών στα σταθεροποιημένα εδάφη

Οι εκτελεσθείσες τριαξονικές δοκιμές (UU) συνοψίζονται στον Πίνακα **2.3**. Για κάθε δοκιμή δίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων πριν την έναρξη της δοκιμής και κατά τη μονοτονική φόρτιση. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων αναφορικά με την επίδραση της πυκνότητας, της ενεργού τάσης και του ποσοστού CS στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή των σταθεροποιημένων δοκιμών καθαρής άμμου ($f_c = 0\%$).

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα $q - \varepsilon_a$, η αποκλίνουσα τάση αυξάνεται αρχικά με αυξανόμενη αξονική παραμόρφωση έως $\varepsilon_a = 4\div 7.9\%$ μέχρι μια μέγιστη τιμή q_{max} . Ακολουθεί μία μικρή απομείωση της q της τάξης του $6\div 30\%$ και στη συνέχεια παρατηρείται η σταθεροποίησή της σε τιμές μικρότερες ή και μεγαλύτερες ακόμη από την q_{max} (αναφέρεται ως q_{ult}) με αυξανόμενη παραμόρφωση από 10 έως 16% .

Στο Σχήμα **2.6** παρουσιάζονται οι κύκλοι Mohr για τα σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$. Παρατηρείται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση, καθώς και από την πυκνότητα των δοκιμών.

Το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει τη μεταβολή της μέγιστης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, $s_{u,max} = q_{max}/2$ καθώς και της οριακής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $s_{u,ult} = q_{ult}/2$, όπου αυτή διαφοροποιείται από την $s_{u,max}$, με το δείκτη πόρων, e των σταθεροποιημένων δοκιμών με $f_c = 0\%$ και $CS = 6\%$ και 10% . Επιπλέον, για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται οι τιμές s_u που προέκυψαν από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (q_u) στα σταθεροποιημένα δοκίμια με $f_c = 0\%$ και $CS = 6\%$ και 10% . Για τα σταθεροποιημένα δοκίμια με διάλυμα $CS = 10\%$, παρατηρείται μία σχετική μικρή μείωση της $s_{u,max}$ με αυξανόμενη τιμή του e , στο εύρος των μελετηθέντων τιμών $e = 0.684 \div 0.744$ ($D_r = 24.81 \div 48.95\%$) στην ενεργή τάση των 100kPa.

Για τα δοκίμια με $f_c = 0\%$ σταθεροποιημένα με $CS = 6\%$ και 10% , η αύξηση της περιβάλλουσας τάσης από 0kPa στα 100kPa συνεπάγεται τη σημαντική αύξηση της $s_{u,max}$ (εννιαπλάσια και πενταπλάσια περίπου, αντίστοιχα). Η αύξηση της τάσης από 100kPa στα 300kPa συνεπάγεται το διπλασιασμό περίπου της $s_{u,max}$ των σταθεροποιημένων δοκιμών με $CS = 10\%$. Η μείωση του ποσοστού CS στο διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση των δοκιμών με $CS = 6\%$ και 10% έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση περίπου κατά 26.7% της $s_{u,max}$. Σημειώνεται τέλος ότι η τιμή $s_{u,max}$ παρατηρήθηκε σε αξονική παραμόρφωση της τάξης του $4 \div 20\%$.

Το Σχήμα 2.8 παρουσιάζει τη μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το δείκτη πόρων, e , των δοκιμών με $f_c = 0\%$ και $CS = 0\%$, 6% και 10% . Στην περίπτωση των μη-σταθεροποιημένων δοκιμών ($CS = 0\%$), η αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά την κρίσιμη κατάσταση αναφέρεται σε πολύ μεγάλες αξονικές παραμορφώσεις, της τάξης του $10 \div 30\%$. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην αλλαγή φάσης της εδαφικής συμπεριφοράς (αλλαγή της συμπεριφοράς από συστολική σε διαστολική, η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενεργό τάση), $s_{u,PT} = q_{PT} / 2$, προς σύγκριση με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, $s_{u,max}$, των σταθεροποιημένων δοκιμών. Τόσο η $s_{u,PT}$ όσο και η $s_{u,max}$ αναφέρονται σε αξονικές παραμορφώσεις μικρότερες του 10%. Προκύπτει τετραπλάσια αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στα σταθεροποιημένα δοκίμια με $CS = 6\%$ σε σχέση με τα μη-σταθεροποιημένα, για ολική τάση 100kPa. Αντίστοιχα, η αύξηση για τα σταθεροποιημένα δοκίμια με $CS = 10\%$ είναι πενταπλάσια στα 100kPa και εννιαπλάσια στα 300kPa, σε σύγκριση με τα μη-σταθεροποιημένα δοκίμια.

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης (CU) των μη-σταθεροποιημένων εδαφών

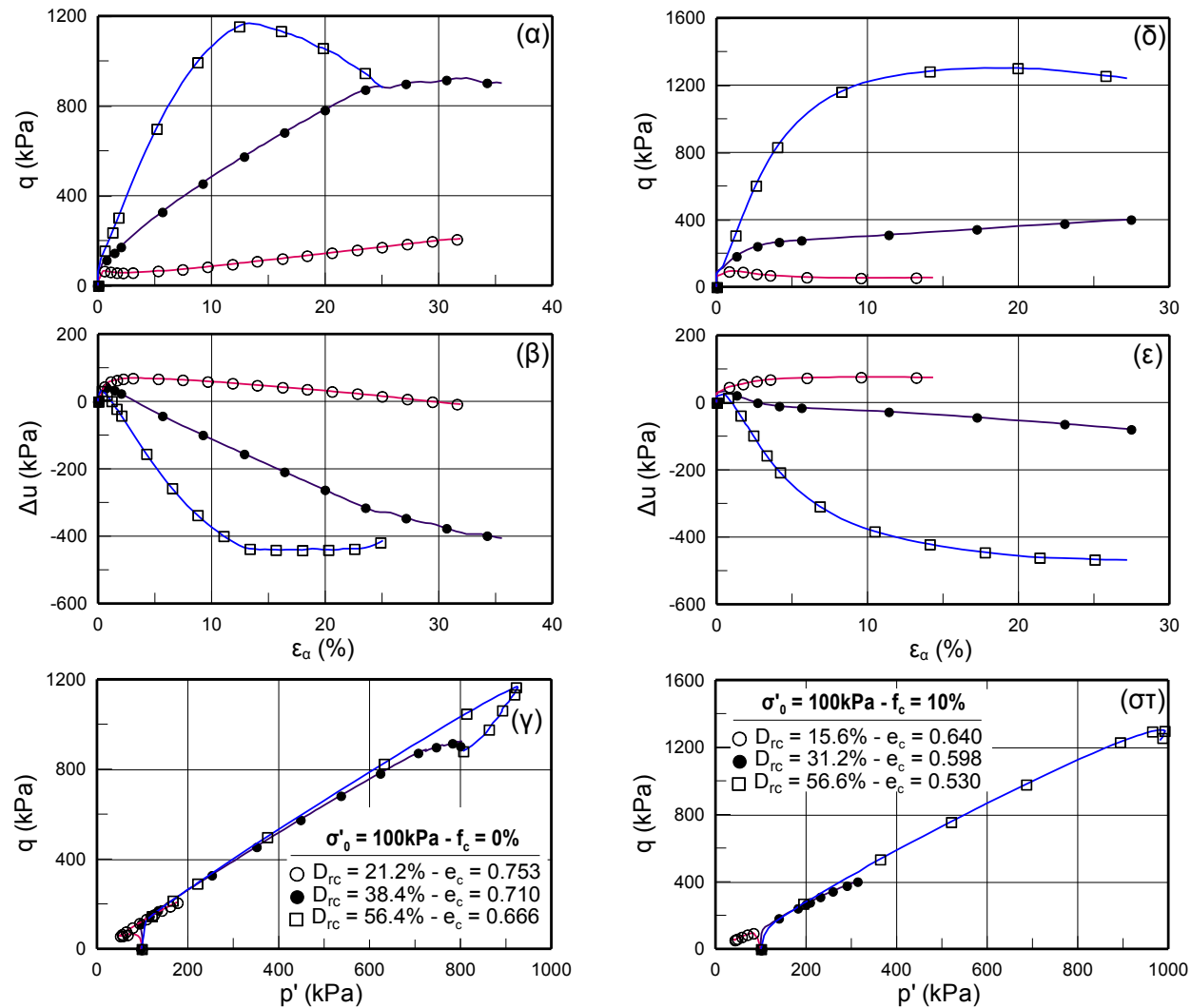
| δοκιμή | Κορεσμός | | Στερεοποίηση | Μετά τη στερεοποίηση | | | | | | | Μονοτονική φόρτιση |
|---------|-----------|-------------|--------------|----------------------|-------------------|--------|--------|-------|-----------|-------------------------------|--------------------|
| | f_c (%) | u_b (kPa) | | B (%) | σ'_0 (kPa) | H (mm) | D (mm) | e_c | D_r (%) | ρ_d (kg/m ³) | |
| A-50-1 | 0 | 499 | 98 | 50 | 107.83 | 49.02 | 0.747 | 23.5 | 1519.8 | 14.91 | 39.4 |
| A-100-1 | 0 | 501 | 98 | 100 | 109.47 | 49.49 | 0.753 | 21.2 | 1514.8 | 14.86 | 168.6 |
| A-100-2 | 0 | 497 | 98 | 100 | 109.63 | 49.14 | 0.741 | 25.8 | 1524.7 | 14.96 | 210.8 |
| A-100-3 | 0 | 583 | 100 | 100 | 110.7 | 49.28 | 0.737 | 27.6 | 1528.7 | 15.00 | 356.9 |
| A-100-4 | 0 | 700 | 100 | 100 | 110.55 | 49.45 | 0.710 | 38.4 | 1552.4 | 15.23 | 723.3 |
| A-100-5 | 0 | 492 | 98 | 100 | 110.00 | 49.40 | 0.706 | 40.2 | 1556.5 | 15.27 | 750.5 |
| A-100-6 | 0 | 692 | 100 | 100 | 110.08 | 49.45 | 0.666 | 56.4 | 1594.0 | 15.64 | 921.3 |
| A-300-1 | 0 | 508 | 100 | 300 | 109.86 | 48.32 | 0.746 | 24.1 | 1521.0 | 14.92 | 222.2 |
| A-300-2 | 0 | 606 | 100 | 300 | 109.20 | 48.90 | 0.686 | 48.1 | 1574.5 | 15.45 | 760.3 |
| A-300-3 | 0 | 606 | 100 | 300 | 110.78 | 48.79 | 0.662 | 57.8 | 1597.2 | 15.67 | 908.8 |
| B-100-1 | 10 | 495 | 98 | 100 | 111.11 | 49.33 | 0.659 | 8.6 | 1599.2 | 15.69 | 27.8 |
| B-100-2 | 10 | 489 | 100 | 100 | 110.86 | 49.13 | 0.643 | 14.5 | 1614.7 | 15.84 | 35.7 |
| B-100-3 | 10 | 498 | 100 | 100 | 111.67 | 48.64 | 0.640 | 15.6 | 1617.6 | 15.87 | 42.2 |
| B-100-4 | 10 | 491 | 100 | 100 | 110.20 | 49.29 | 0.630 | 19.2 | 1627.1 | 15.96 | 91.5 |
| B-100-5 | 10 | 500 | 98 | 100 | 111.35 | 49.09 | 0.598 | 31.2 | 1659.9 | 16.28 | 305.0 |
| B-100-6 | 10 | 494 | 100 | 100 | 111.38 | 49.09 | 0.597 | 31.9 | 1661.7 | 16.30 | 332.8 |
| B-100-7 | 10 | 593 | 96 | 100 | 111.47 | 49.74 | 0.530 | 56.6 | 1733.7 | 17.01 | 985.5 |
| B-300-1 | 10 | 605 | 98 | 300 | 111.63 | 49.16 | 0.614 | 25.4 | 1643.9 | 16.13 | 357.9 |
| B-300-2 | 10 | 504 | 98 | 300 | 111.65 | 48.99 | 0.606 | 28.4 | 1652.0 | 16.21 | 256.4 |
| B-300-3 | 10 | 602 | 100 | 300 | 111.768 | 49.00 | 0.594 | 32.7 | 1664.0 | 16.32 | 430.1 |
| B-300-4 | 10 | 502 | 98 | 300 | 110.58 | 48.79 | 0.591 | 34.1 | 1668.0 | 16.36 | 462.7 |
| B-300-5 | 10 | 507 | 98 | 300 | 110.80 | 48.86 | 0.571 | 41.3 | 1688.3 | 16.56 | 502.7 |
| B-300-6 | 10 | 608 | 96 | 300 | 111.15 | 49.09 | 0.528 | 57.6 | 1736.6 | 17.04 | 837.5 |
| B-300-7 | 10 | 499 | 97 | 300 | 110.87 | 48.98 | 0.491 | 71.2 | 1779.0 | 17.45 | 1101.7 |

Πίνακας 2.2. Παράμετροι γραμμής κρίσιμης κατάστασης των φυσικών εδαφών

| 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 |

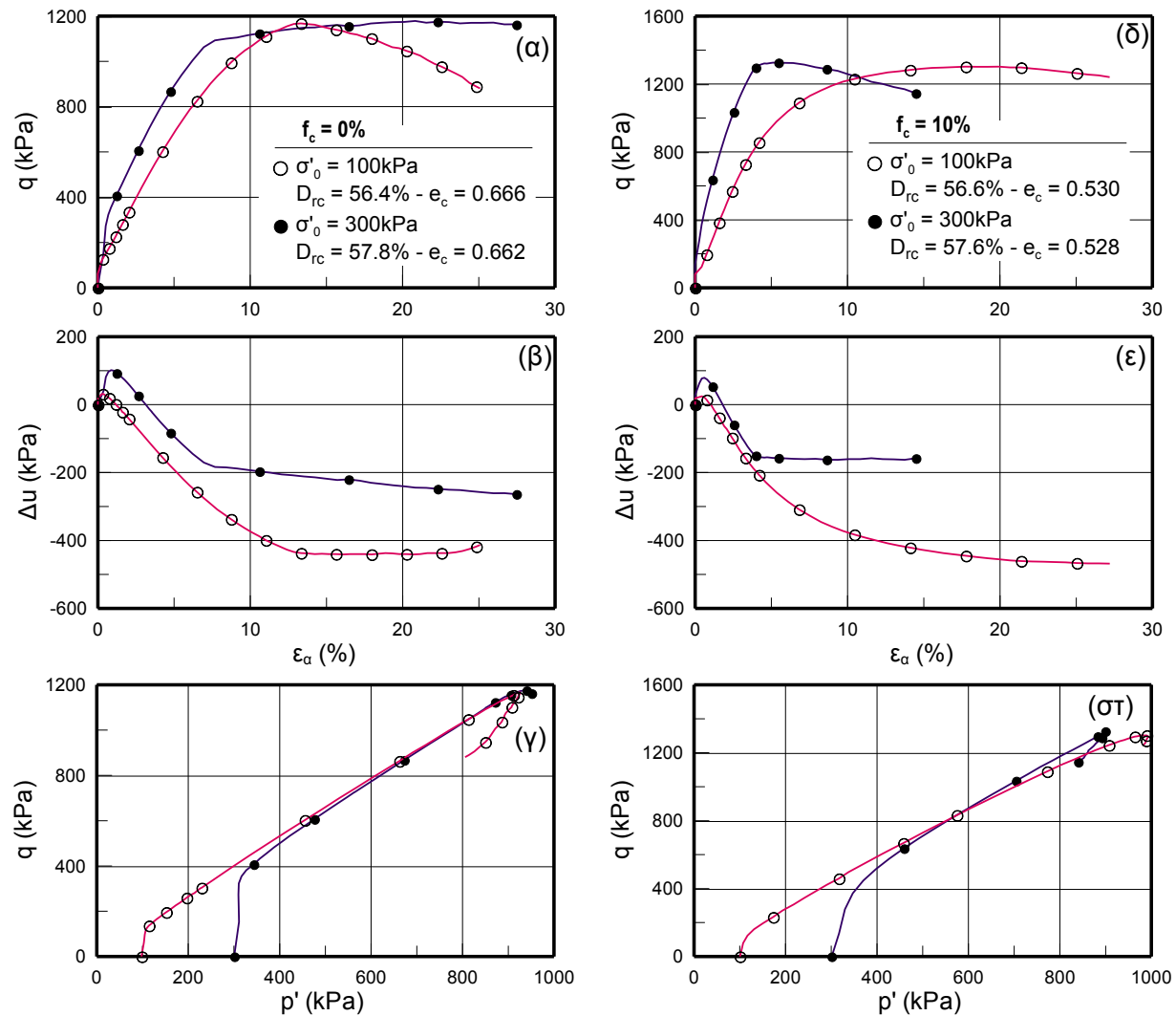
Πίνακας 2.3. Χαρακτηριστικά τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης (UU) των σταθεροποιημένων εδαφών

| δοκιμή | CS % | σ_0 (kPa) | H (mm) | D (mm) | e | D_r (%) | ρ_d (kg/m ³) | γ_d (kN/m ³) | Μονοτονική φόρτιση | |
|------------|---------|---------------------|-----------|-----------|-------|--------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | | | | | | $S_{u,max}$ (kPa) | $S_{u,ult}$ (kPa) |
| SA6-100-1 | 6 | 100 | 107.75 | 49.32 | 0.723 | 33.36 | 1541.3 | 15.12 | 166.25 | 165.70 |
| SA6-100-2 | 6 | 100 | 108.65 | 49.52 | 0.720 | 34.45 | 1543.7 | 15.14 | 149.31 | 149.31 |
| SA10-100-1 | 10 | 100 | 112.025 | 49.433 | 0.744 | 24.81 | 1522.6 | 14.94 | 205.09 | 205.09 |
| SA10-100-2 | 10 | 100 | 109.78 | 48.74 | 0.735 | 28.38 | 1530.3 | 15.01 | 218.16 | 205.2 |
| SA10-100-3 | 10 | 100 | 111.94 | 49.37 | 0.732 | 29.69 | 1533.2 | 15.04 | 194.25 | 184.55 |
| SA10-100-4 | 10 | 100 | 112.65 | 49.73 | 0.718 | 35.31 | 1545.6 | 15.16 | 217.3 | 198.85 |
| SA10-100-5 | 10 | 100 | 110.025 | 48.091 | 0.710 | 38.51 | 1552.7 | 15.23 | 195.84 | 195.84 |
| SA10-100-6 | 10 | 100 | 109.88 | 49.016 | 0.710 | 38.36 | 1552.4 | 15.23 | 179.35 | 176.65 |
| SA10-100-7 | 10 | 100 | 110.18 | 49.76 | 0.684 | 48.95 | 1576.5 | 15.47 | 244.2 | 186.85 |
| SA10-300-1 | 10 | 300 | 112.3 | 49.03 | 0.735 | 28.43 | 1530.5 | 15.01 | 431.82 | 431.82 |
| SA10-300-2 | 10 | 300 | 110.67 | 49.35 | 0.733 | 29.18 | 1532.1 | 15.03 | 374.36 | 367.12 |
| SA10-300-3 | 10 | 300 | 112.58 | 49.76 | 0.72 | 34.59 | 1544.0 | 15.15 | 464.31 | 429.53 |

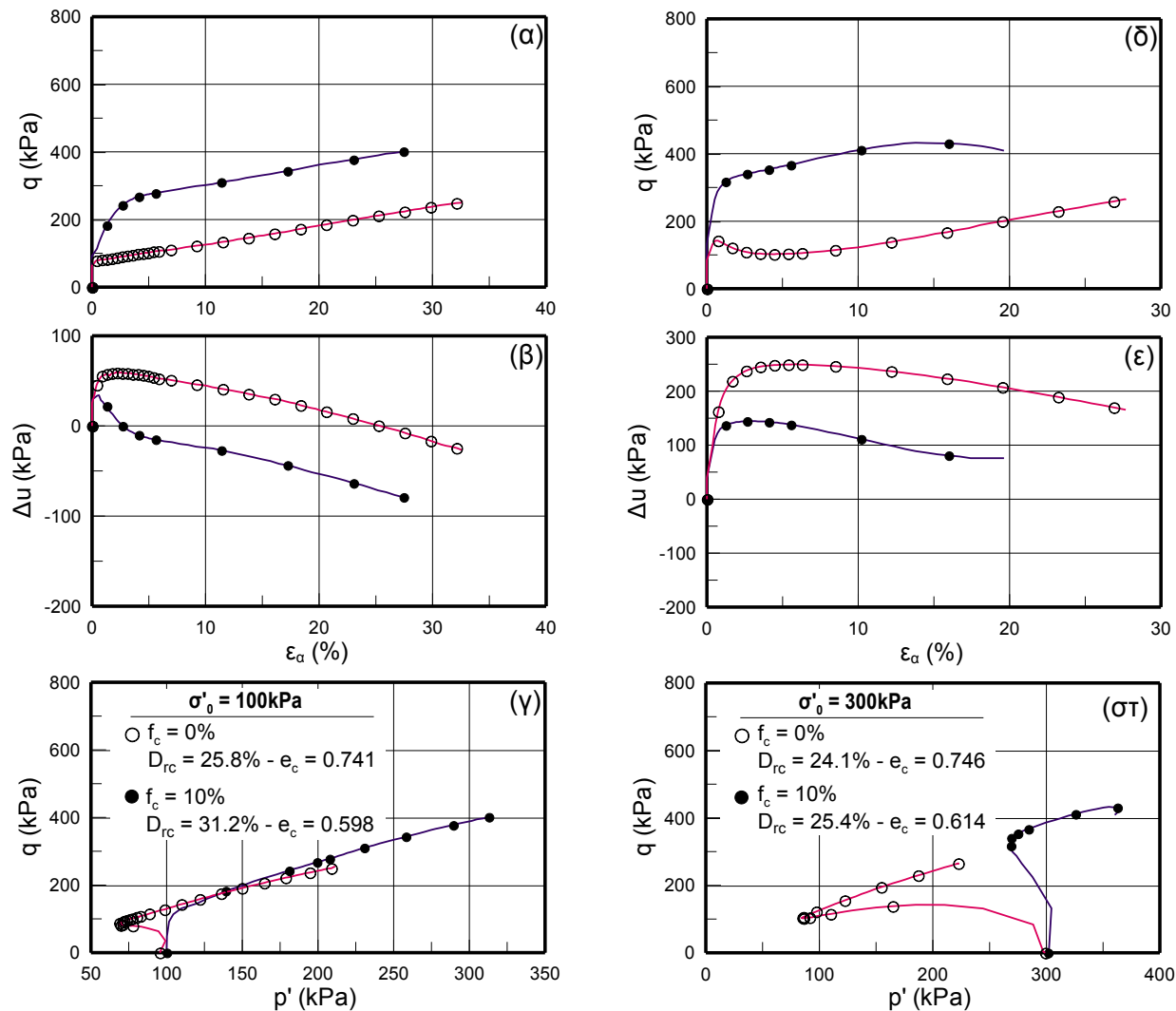


Σχήμα 2.1. Επίδραση της πυκνότητας στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ (α, β, γ) και $f_c = 10\%$ (δ, ε, στ) υπό ενεργό τάση στερεοποίησης, $\sigma'_0 = 100\text{kPa}$.

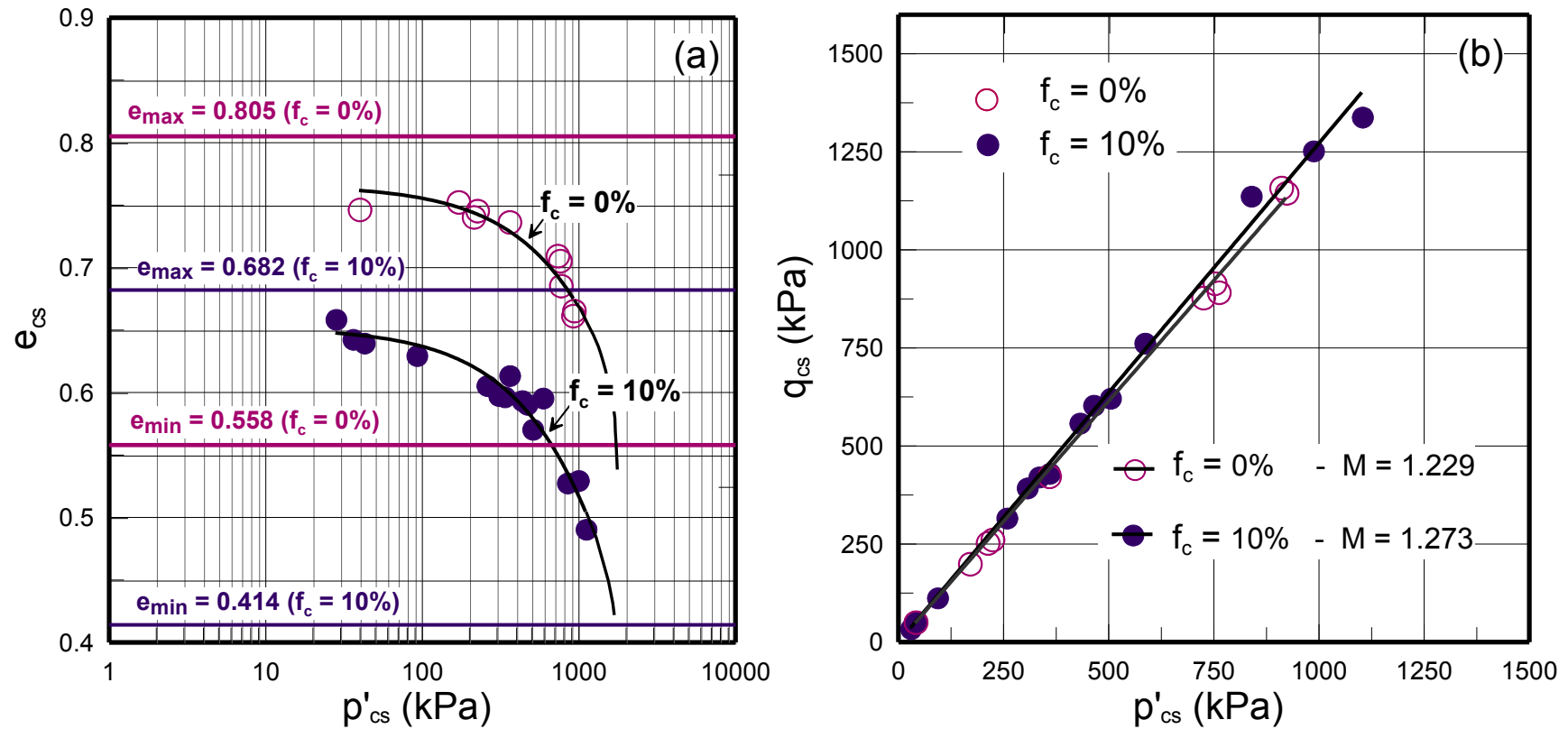
Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές



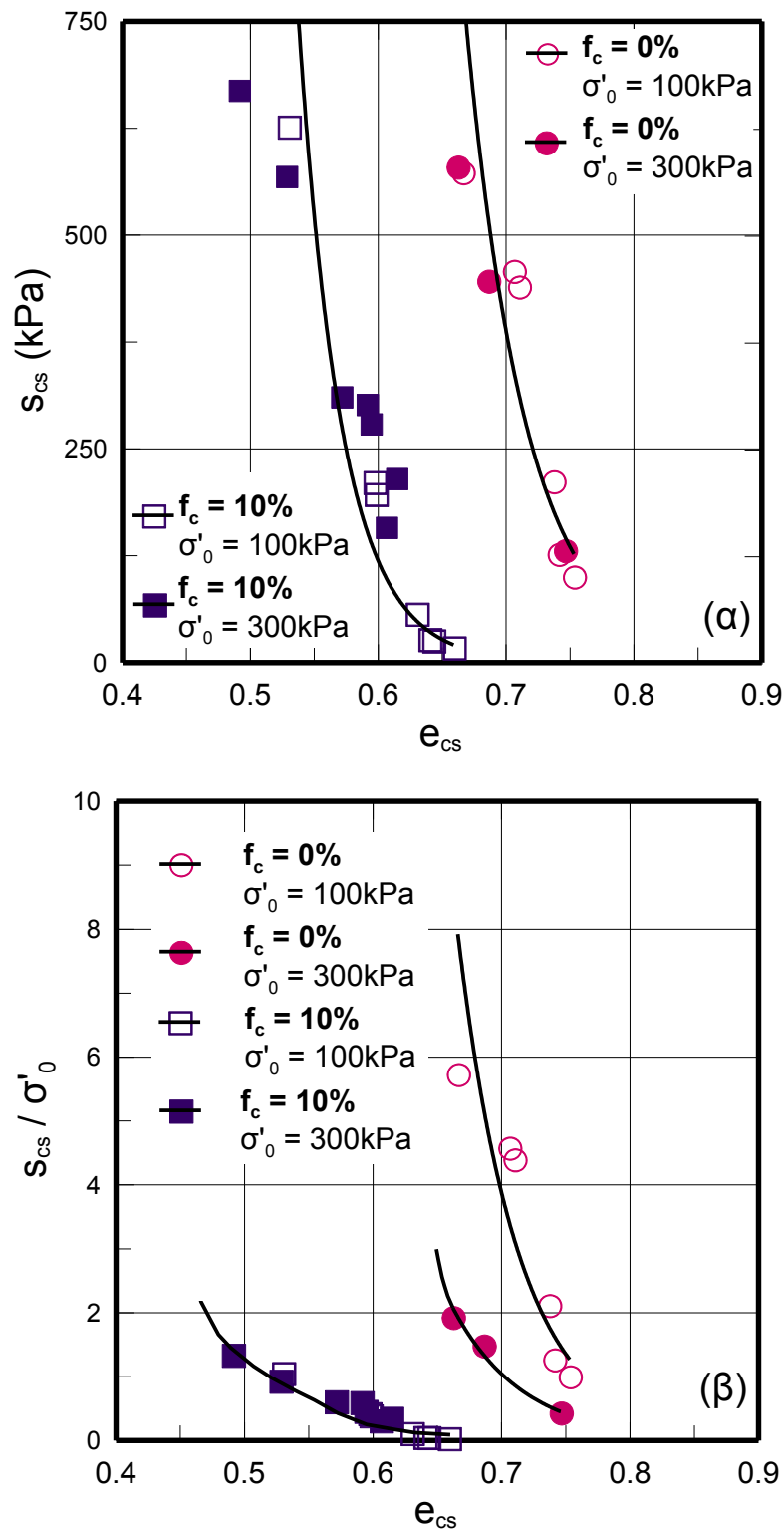
Σχήμα 2.2. Επίδραση της ενεργού τάσης στερεοποίησης, σ'_0 , στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ (α, β, γ) και $f_c = 10\%$ (δ, ε, στ), παρόμοιας σχετικής πυκνότητας.



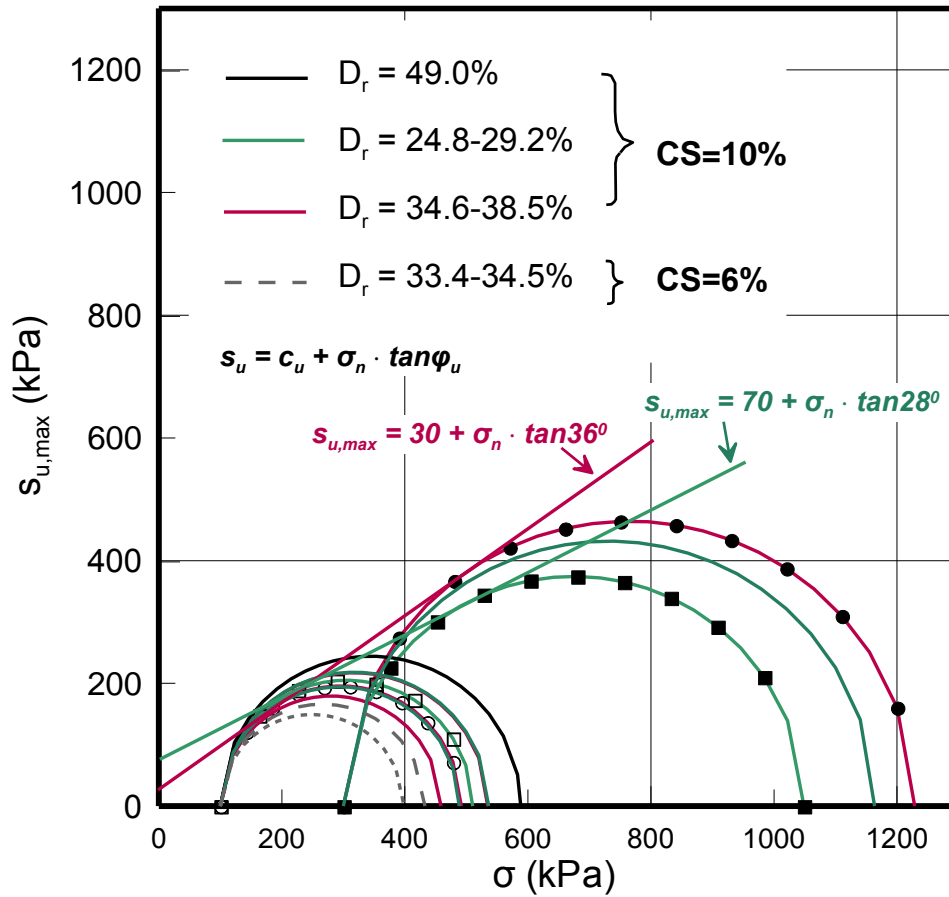
Σχήμα 2.3. Επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη παρόμοιας σχετικής πυκνότητας, σε ενεργό τάση στερεοποίησης, $\sigma'_0 = 100$ kPa (α, β, γ) και 300 kPa (δ, ε, στ).



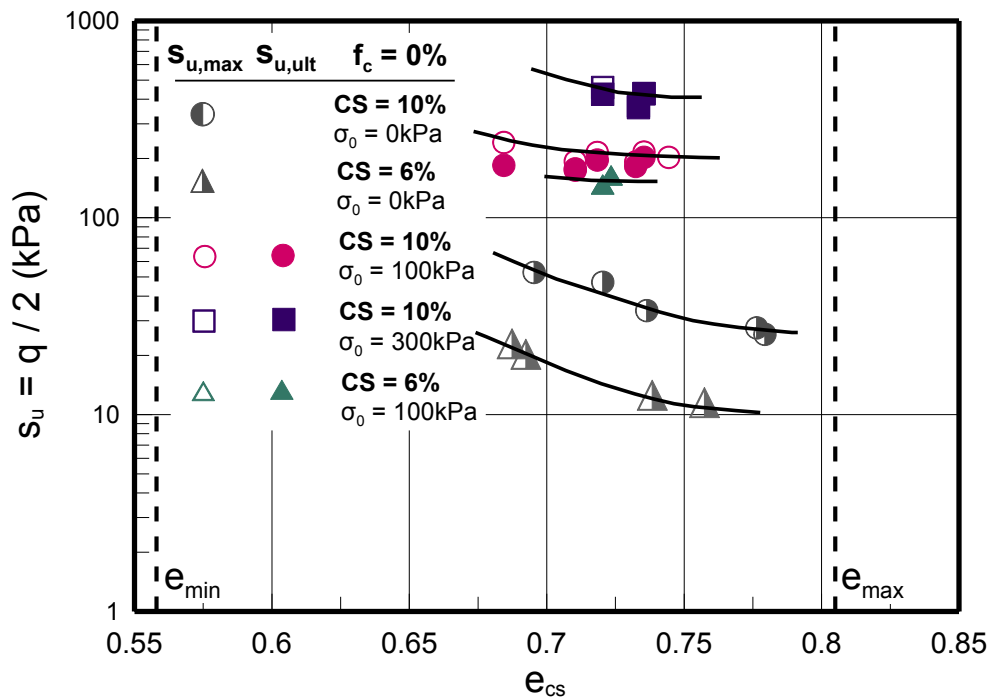
Σχήμα 2.4. Γραμμές κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο (a) $e_{cs} - p'_{cs}$ και (b) $q_{cs} - p'_{cs}$ των μη-σταθεροποιημένων εδαφών με $f_c = 0\%$ και $f_c = 10\%$.



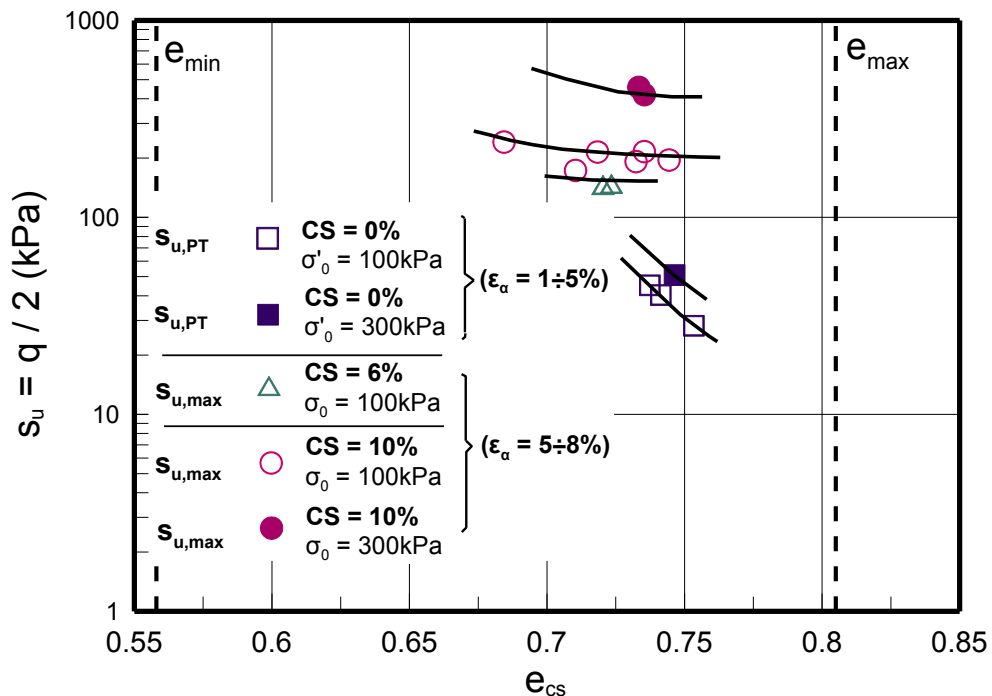
Σχήμα 2.5 α). Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, s_{cs} στην κρίσιμη κατάσταση με το δείκτη πόρων, e για τα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και $f_c = 10\%$. **β).** Μεταβολή της κανονικοποιημένης προς την ενεργό τάση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, s_{cs} στην κρίσιμη κατάσταση με το δείκτη πόρων, e για τα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και $f_c = 10\%$.



Σχήμα 2.6. Κύκλοι Mohr για τα σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου ($f_c = 0\%$) με CS = 6% και 10%.



Σχήμα 2.7. Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, $s_{u,max}$ και $s_{u,ult}$ με το δείκτη πόρων, e , για τα σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και $CS = 6\%$ και 10% , στις τάσεις $\sigma_0 = 0\text{kPa}$ (q_u δοκιμές), 100kPa και 300kPa (UU δοκιμές).



Σχήμα 2.8. Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το δείκτη πόρων, e , για τα μη-σταθεροποιημένα εδάφη ($CS = 0\%$) με $f_c = 0\%$ και τα σταθεροποιημένα με $CS = 6\%$ και 10% , στις τάσεις $\sigma_0 = 100\text{kPa}$ και 300kPa .

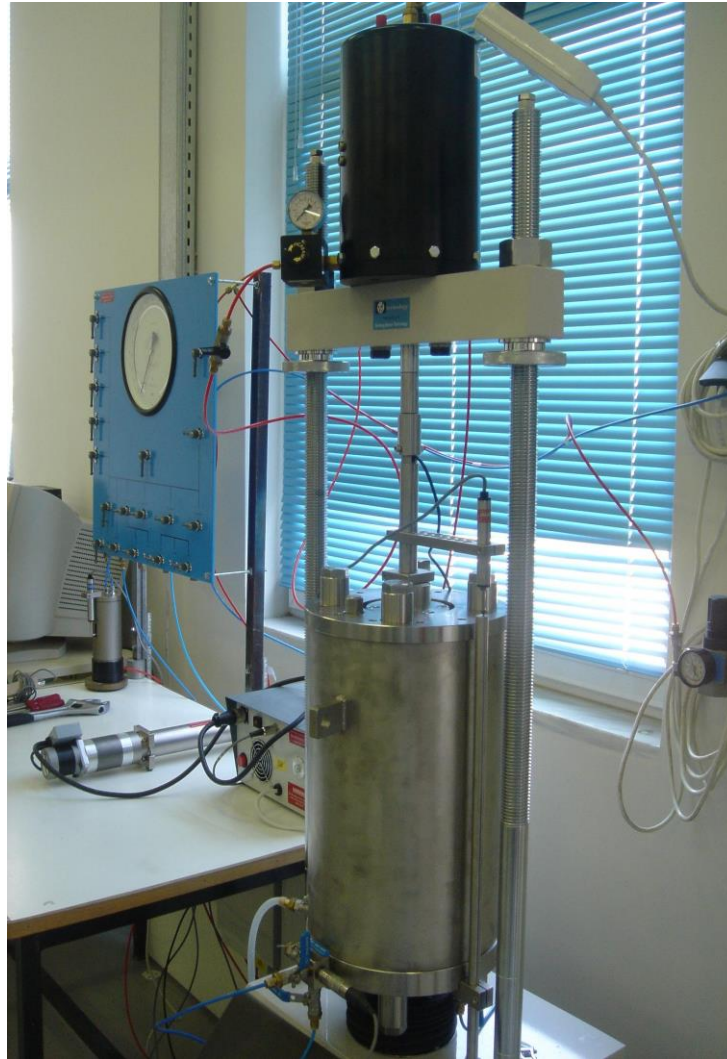
3. ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ

3.1 Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται 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 εδάφη αυτά στη συνέχεια σταθεροποιήθηκαν με το κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου(colloidal silica LUDOX SM-30), (π.χ. Gallagher 2000, Gallagher & Mitchell 2002, Gallagher et al 2007, Spencer et al 2008) σε ποσοστά σταθεροποιητή CS=6 και 10% κ.β., και 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). 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, ώστε να ελεγχθεί ο χρόνος σχηματισμού της γέλης και η συνεπαγόμενη αύξηση του ιξώδους (Gallagher et al 2007). Τα σταθεροποιημένα δοκίμια αφέθηκαν να ωριμάσουν σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια, υπό αεροστεγείς συνθήκες. Ο συνολικός χρόνος ωρίμανσης για ποσοστό σταθεροποιητή CS=6% ήταν 55 ώρες, 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), ενώ εκτελέστηκαν και δοκιμές σε χαμηλότερη τάση $p_i'=300$ kPa για αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων με εκείνα του Κεφαλαίου 2. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των δοκιμών του παρόντος Κεφαλαίου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β, ενώ στην παράγραφο 3.2 δίνονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την επίδραση της σταθεροποίησης μη συνεκτικών εδαφών σε υψηλά επίπεδα τάσεων.

Οι σχετικές πυκνότητες των δοκιμών φυσικής και σταθεροποιημένης άμμου M31 ήταν στο εύρος $D_r = 30$ έως 40% , ενώ των δοκιμών φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος M31-D6 το εύρος της $D_r = 25$ έως 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 (βλέπε Σχήμα 3.1). 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.



Σχήμα 3.1. Τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων που βρίσκεται στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής Ε.Μ.Π. και χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές του παρόντος κεφαλαίου

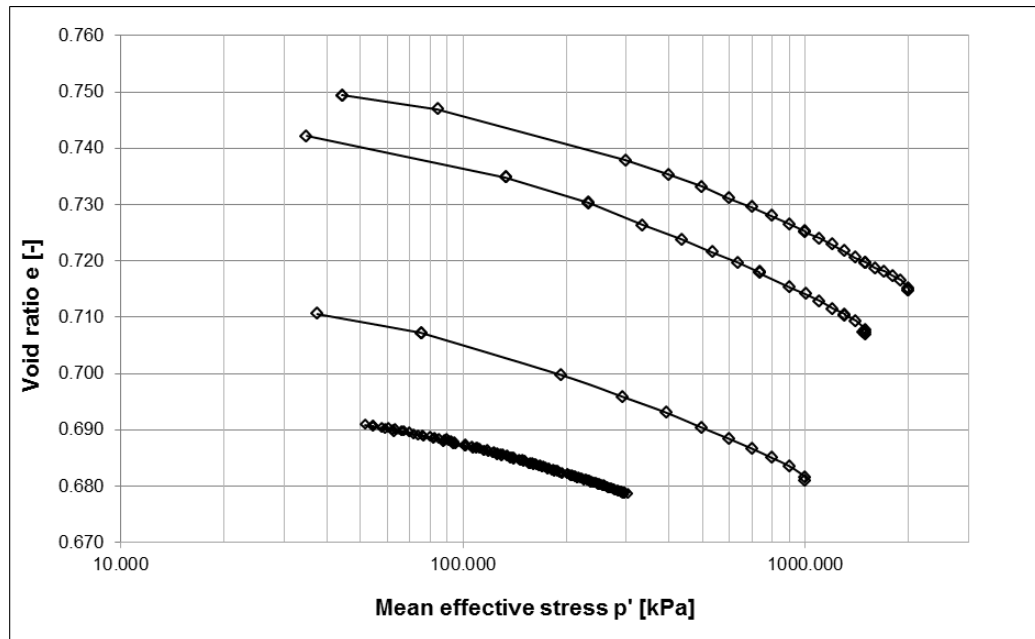
Συμπληρωματικά, εκτός από τις μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες, εκτελέστηκαν και ενδεικτικές μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε καθαρή άμμο, υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, καθώς και μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης καθαρής άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

3.2 Αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών

3.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη

Παρουσιάζονται αρχικώς τα πειράματα που έγιναν σε δοκίμια καθαρής άμμου M31 τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχικές ενεργές τάσεις $p'_i=1000, 1500, 2000$ και 300 kPa και στη συνέχεια ακολούθησε περίοδος ηρεμίας 1.5 ώρας. Η

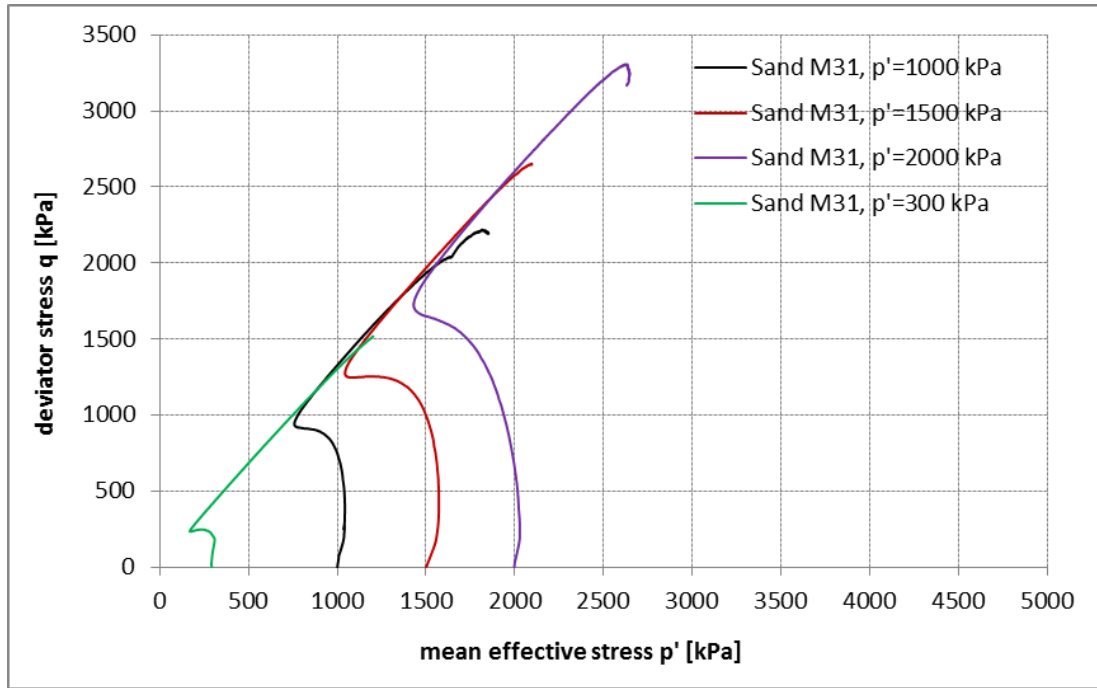
περίοδος ηρεμίας επιλέχθηκε τόσο εκτενής, ώστε να είναι συγκρίσιμη με τη χρονική διάρκεια στράγγισης του νερού από τους πόρους των σταθεροποιημένων δοκιμίων. Οι σχετικές πυκνότητες που προέκυψαν είναι στο εύρος $D_r = 30$ έως 40% , ενώ τα διαγράμματα στερεοποίησης $e-\log p'$ φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 3.2. Παρατηρείται τυπική συμπεριφορά άμμου με παράλληλες τις (σχεδόν) ευθείες καμπύλες στερεοποίησης στην ημιλογαριθμική κλίμακα.



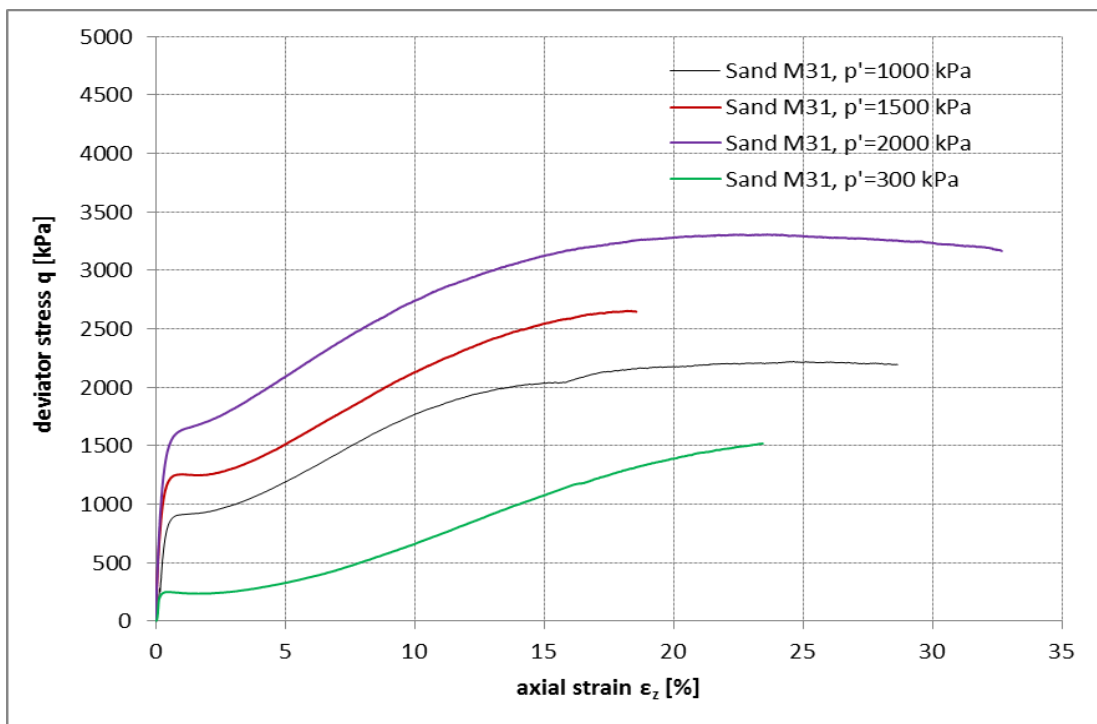
Σχήμα 3.2. Καμπύλες ισότροπης στερεοποίησης δοκιμίων άμμου M31 για διάφορες αρχικές πυκνότητες

Μετά από την ισότροπη στερεοποίηση η άμμος M31 φορτίστηκε σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Οι ενεργές διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q-p'$ φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 3.3. Όπως προκύπτει, η συστολική συμπεριφορά της άμμου είναι εντονότερη όσο η αρχική ενεργός τάση αυξάνεται. Σε όλα τα επίπεδα ενεργών τάσεων η άμμος εμφανίζει αλλαγή φάσης και στη συνέχεια τάση για διαστολή κατά μήκος μιας κοινής περιβάλλουσας αστοχίας. Η γωνία αλλαγής φάσης βρέθηκε $\phi'_{PTL} = 31^\circ$, ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 33^\circ$.

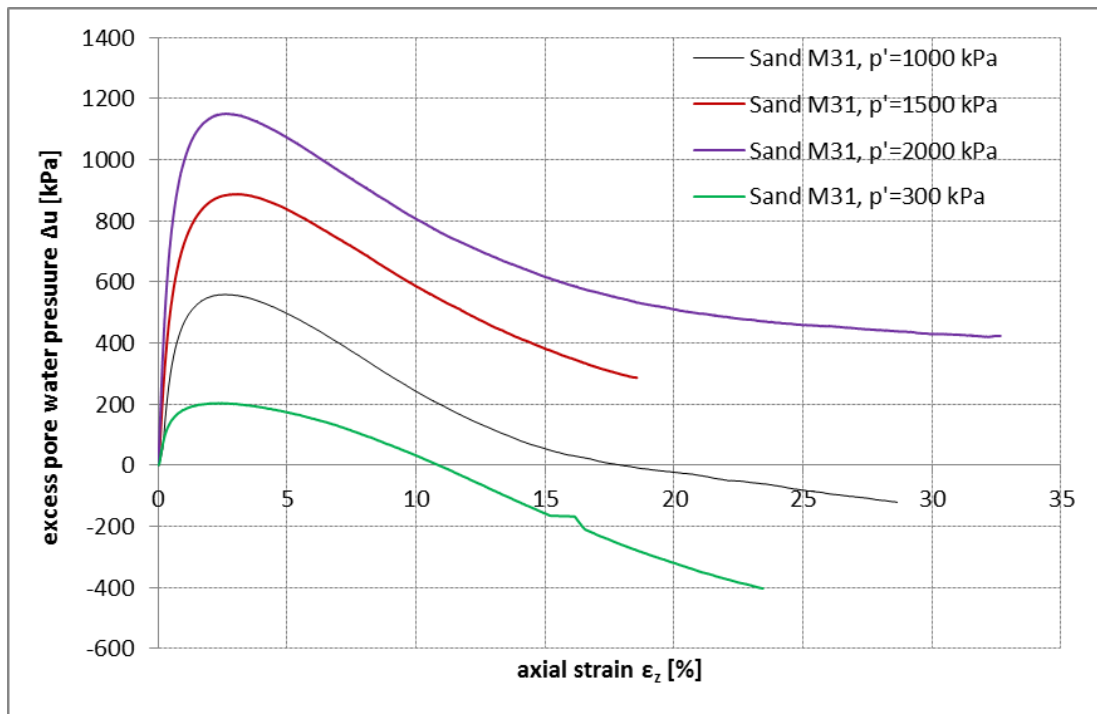
Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες αποκλινουσών τάσεων-παραμορφώσεων $q-e_z$ (όπου e_z η αξονική παραμόρφωση). Στις υψηλές ενεργές τάσεις στερεοποίησης (1000 , 1500 και 2000 kPa) η άμμος φαίνεται να εγκαταλείπει τη διαστολική συμπεριφορά για αξονικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 20% και να σταθεροποιεί την αποκλίνουσα τάση q . Αντίθετα, για ενεργό τάση 300 kPa η άμμος παραμένει εντόνως διαστολική και στις υψηλές αξονικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.3. Ενεργές διαδρομές τάσεων άμμου M31 από αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης



Σχήμα 3.4. Σχέση αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων άμμου M31 από αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης



Σχήμα 3.5. Σχέση υπερπίεσης ύδατος πόρων – αξονικών παραμορφώσεων άμμου M31 από αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης

Οι υπερπίεσεις του ύδατος των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται στο Σχήμα 3.5. 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 συγκέντρωση διαμηθικών παραμορφώσεων σε επίπεδο. Επισημαίνεται ότι ο οπτικός έλεγχος των δοκιμών έγινε μετά το πέρας των δοκιμών, αφού η κυψέλη έχει αδιαφανές περίβλημα.

Για να εξεταστεί η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης στην απόκριση, τα διαγράμματα αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων και υπερπίεσεων ύδατος πόρων – αξονικών παραμορφώσεων κανονικοποιήθηκαν ως προς την αρχική ενεργό τάση και παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.6 και 3.7 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 αποδίδεται 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

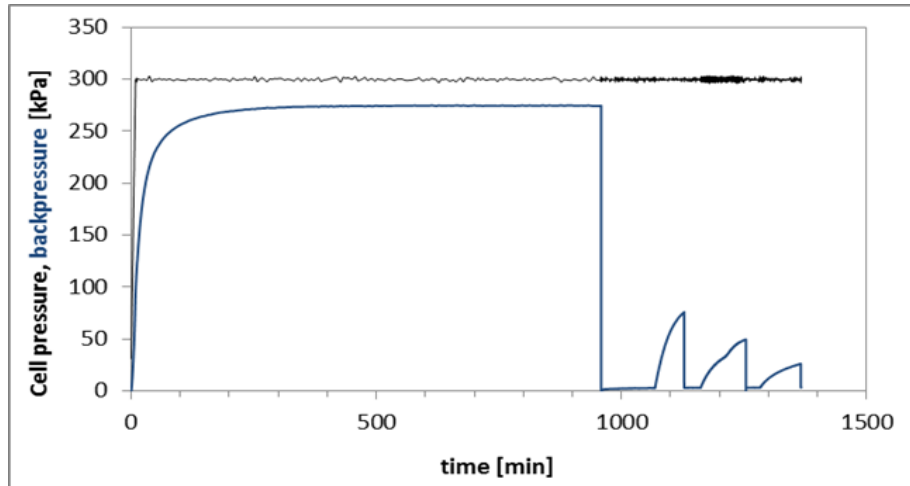
τάσης 300 kPa διαχωρίζεται από τις υπόλοιπες για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5%, καθώς το δοκίμιο αυτό ήταν εντόνως διαστολικό μέχρι τα υψηλά επίπεδα παραμορφώσεων. Η κανονικοποιημένη τιμή q/p' για αξονική παραμόρφωση 5% κυμαίνεται από 1.0 έως 1.1 για όλα τα επίπεδα τάσεων. Όσον αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες $\Delta u/p' - \epsilon_z$, 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 στερεοποίησης.

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων έγινε σε δοκίμια άμμου M31 σταθεροποιημένα με κολλοειδή πυριτία (colloidal silica) σε ποσοστά 6 και 10% κ.β., ύστερα από έναν χρόνο ωρίμανσης 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 αφέθηκαν να στραγγίζουν, μέσω δεύτερης σωλήνωσης στη βάση του δοκιμίου, σε δεξαμενή πληρωμένη με νερό η οποία επέβαλε υδροστατική πίεση περίπου 10 kPa. Μετά την αύξηση της πίεσης της κυψέλης στα επίπεδα τάσεων 1000, 1500, 2000 και 300 kPa ακολούθησε περίοδος στράγγισης τουλάχιστον 1.5 ώρας.

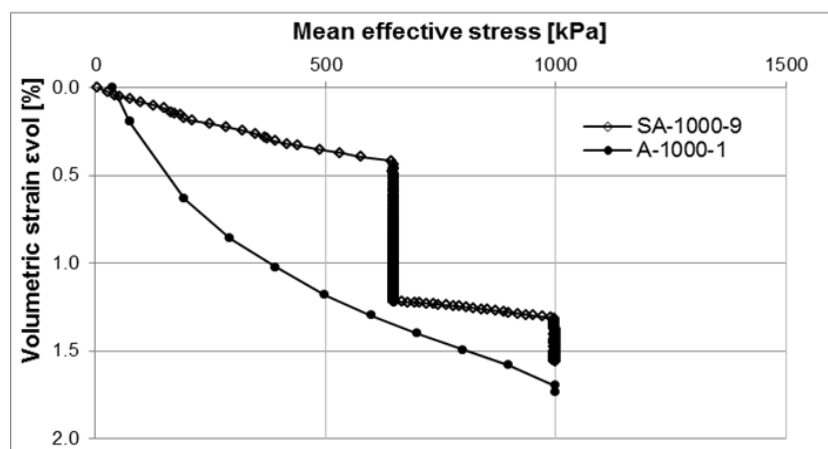
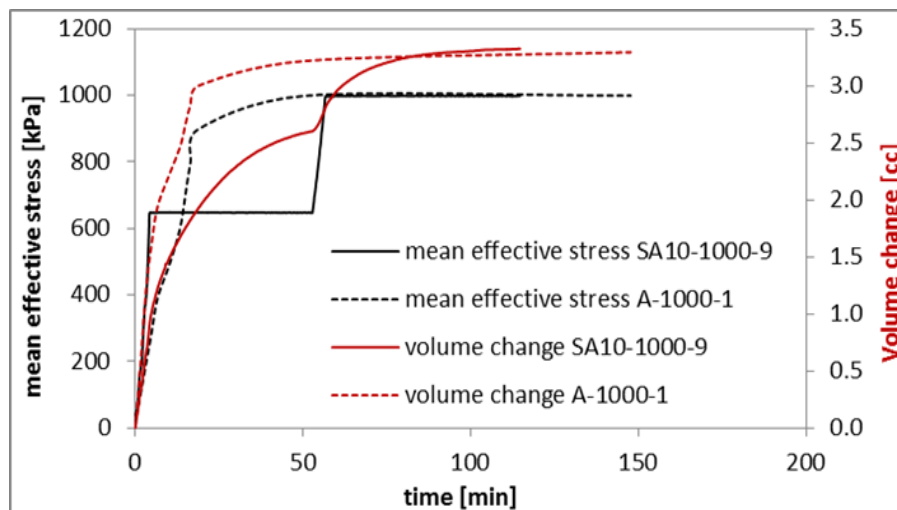
Η στράγγιση του νερού μέσα από τους πόρους της πυριτίας είναι αργή διαδικασία και για να εξακριβωθεί αν έχει ολοκληρωθεί, εκτελέστηκε ο εξής έλεγχος. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα διακόπτεται η στράγγιση με κλείσιμο της βάνας εκροής. Το νερό μέσα στους πόρους της πυριτίας βρίσκεται υπό πίεση και τείνει να εκτονωθεί προς το νερό που πληρώνει τις σωληνώσεις μέχρι τον μετρητή πίεσης. Η εκτόνωση δεν γίνεται ακαριαία διότι η υγρή φάση της γέλης πυριτίας αλληλεπιδρά με τη στερεή. Η πίεση που μετράται εκτός δοκιμίου αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό μέχρι να σταθεροποιηθεί σε ένα «πλατώ», 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 «πλατώ» 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 3.8. 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 «πλατώ» 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 $B \geq 0.95$.

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 3.9 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 (Bergna and Roberts p.22, p.26, Brinker and Scherer p.408).



Σχήμα 3.8. Σύγκριση της ανάπτυξης της πίεσης ισορροπίας όταν παρεμποδίζεται η στράγγιση, με το τι μετράται κατά την στερεοποίηση σταθεροποιημένου δοκιμίου άμμου όταν επιτρέπεται η στράγγιση

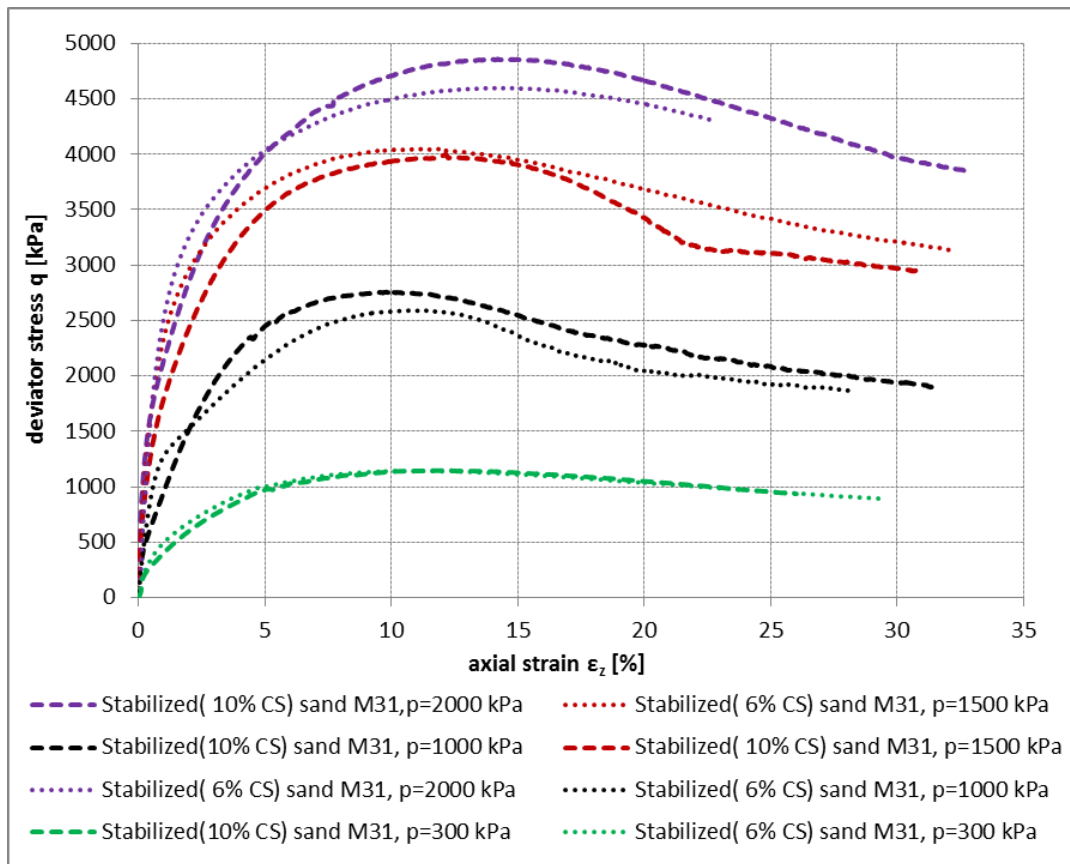


Σχήμα 3.9. Σύγκριση της στερεοποίησης της φυσικής (πριν τη δοκιμή A-1000-1) και της σταθεροποιημένης άμμου (πριν τη δοκιμή SA-1000-9).

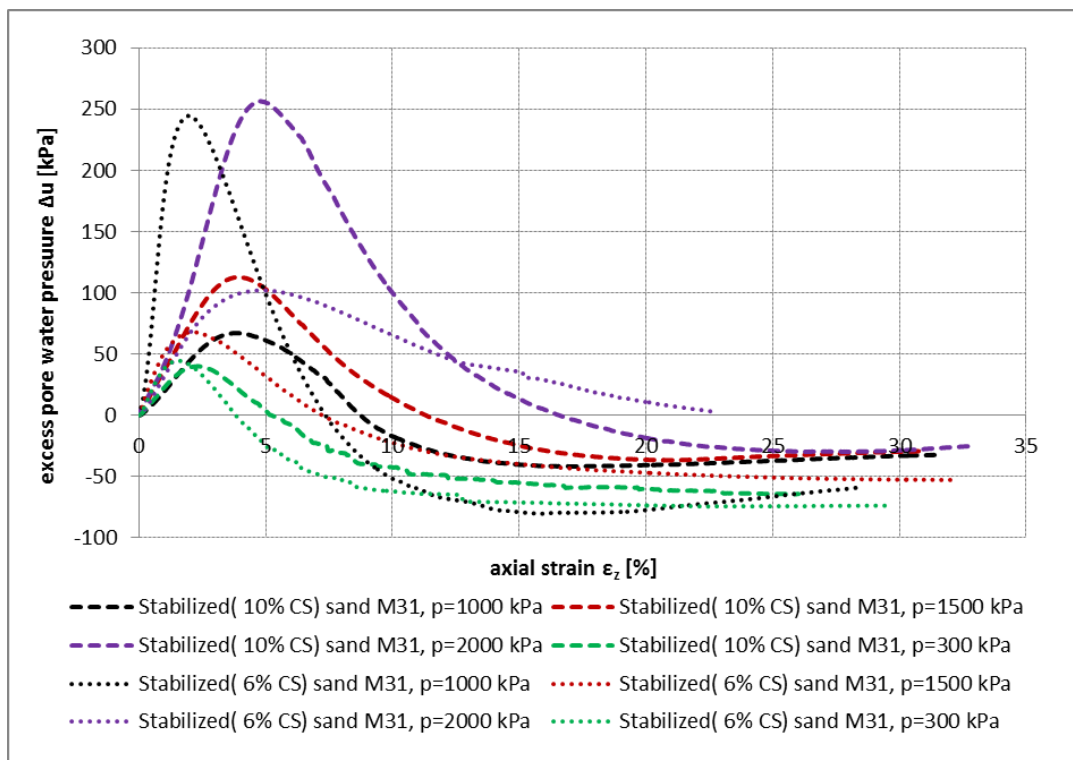
Μετά το πέρας της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια της σταθεροποιημένης άμμου M31 υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα **3.10** απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων q - ϵ_z για τα δοκίμια σταθεροποιημένης 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.

Οι υπερπιέσεις του υγρού των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα **3.11**, με όλες τις αμφιβολίες σχετικά με τις μετρούμενες τιμές δεδομένης της φύσης της πυριτίας και του εξοπλισμού μέτρησης πίεσης πόρων που χρησιμοποιήθηκε. 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 υπερπιέσεις 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 αναπτύσσονται παρακάτω. 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 2008). Όμως, 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 (Brinker and Scherer p.387, Baek and Pence, Treloar). Αν η κορεσμένη γέλη ήταν όντως συμπιεστή (υπό αστράγγιστες συνθήκες), τότε η καμπύλη αντί-πίεσης του Σχήματος **3.8** θα είχε πολύ χαμηλότερη τιμή στο «πλατώ» (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. Όμως, η υψηλή τιμή της παραμέτρου B υποδηλώνει καλό κορεσμό.



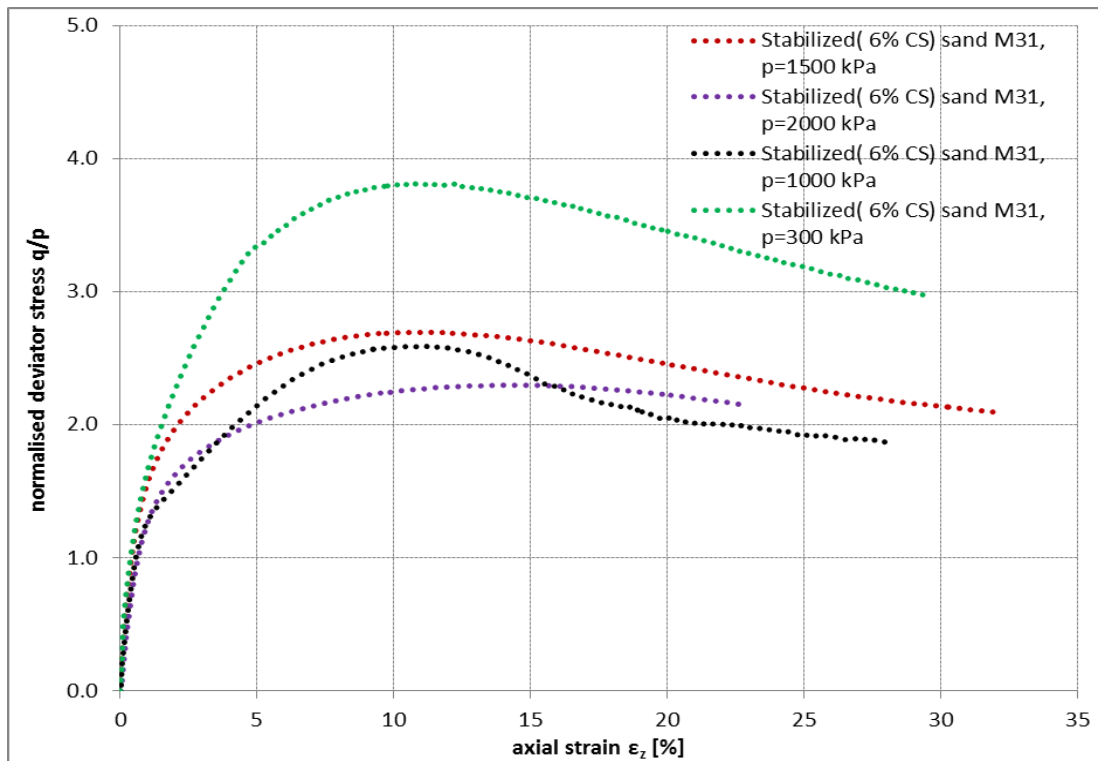
Σχήμα 3.10. Σχέση αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 & 10%) για διάφορες αρχικές τάσεις.



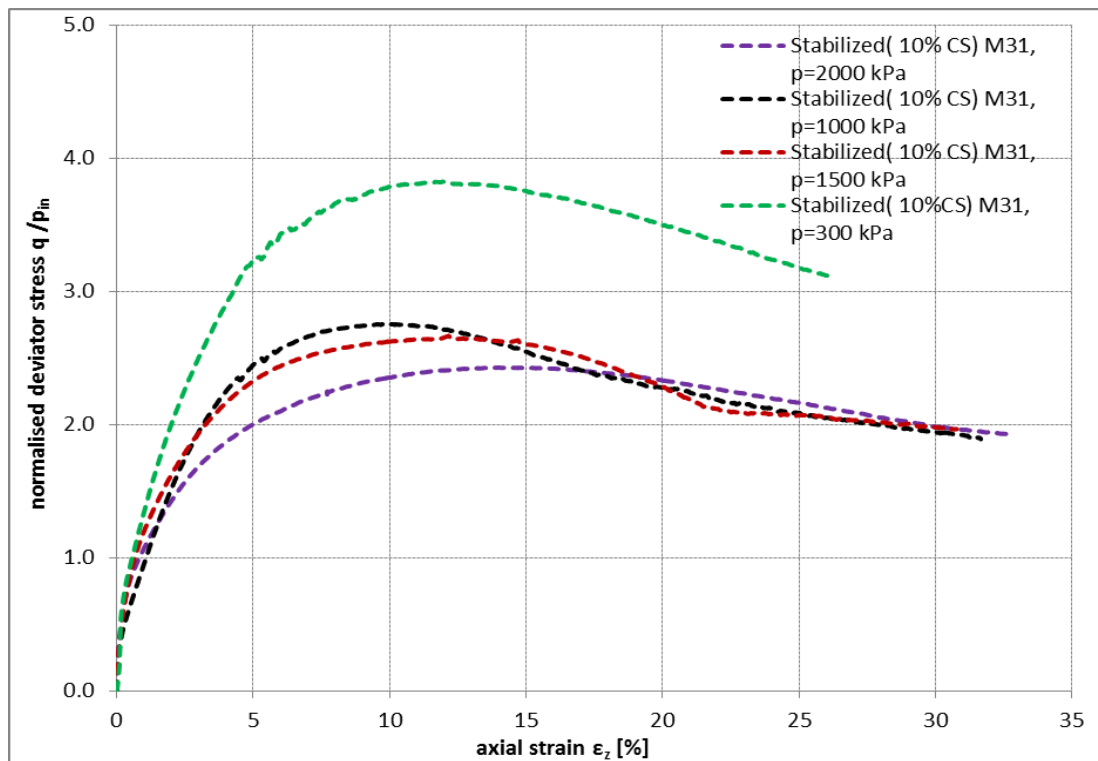
Σχήμα 3.11. Σχέση υπερπίεσης υγρού πόρων – αξονικών παραμορφώσεων σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 & 10%) για διάφορες αρχικές τάσεις

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 **3.8** 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. Μάλιστα, 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 προφανής αιτία ώστε να μην αναπτύσσει (μεγάλη) πίεση στους πόρους της.

Στα Σχήματα **3.12** και **3.13** παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ολική τάση εγκιβωτισμού καμπύλες $q/p_i - e_z$ για τα σταθεροποιημένα δοκίμια M31 (6%CS) και M31 (10%CS) αντίστοιχα. Στις υψηλές τάσεις 1000, 1500 και 2000 kPa οι κανονικοποιημένες καμπύλες $q/p_i' - e_z$ 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. Πιθανώς αυτό σημαίνει 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.

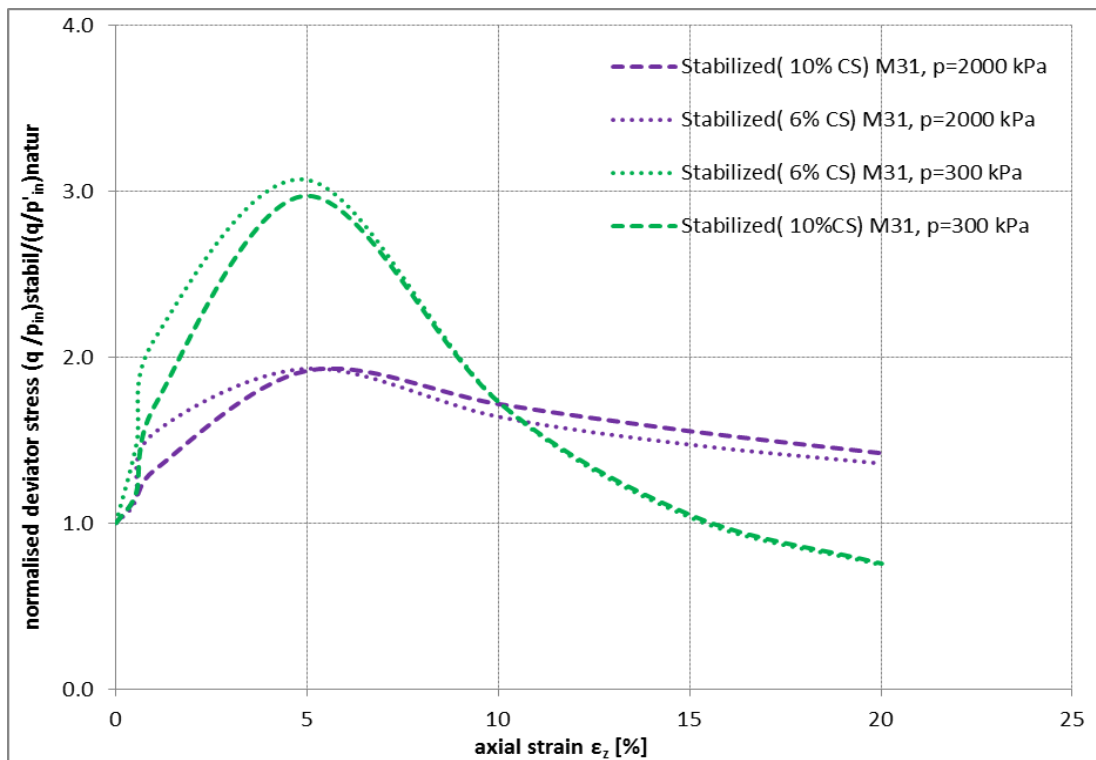


Σχήμα 3.12 Σχέση κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS = 6%) για διάφορες αρχικές τάσεις



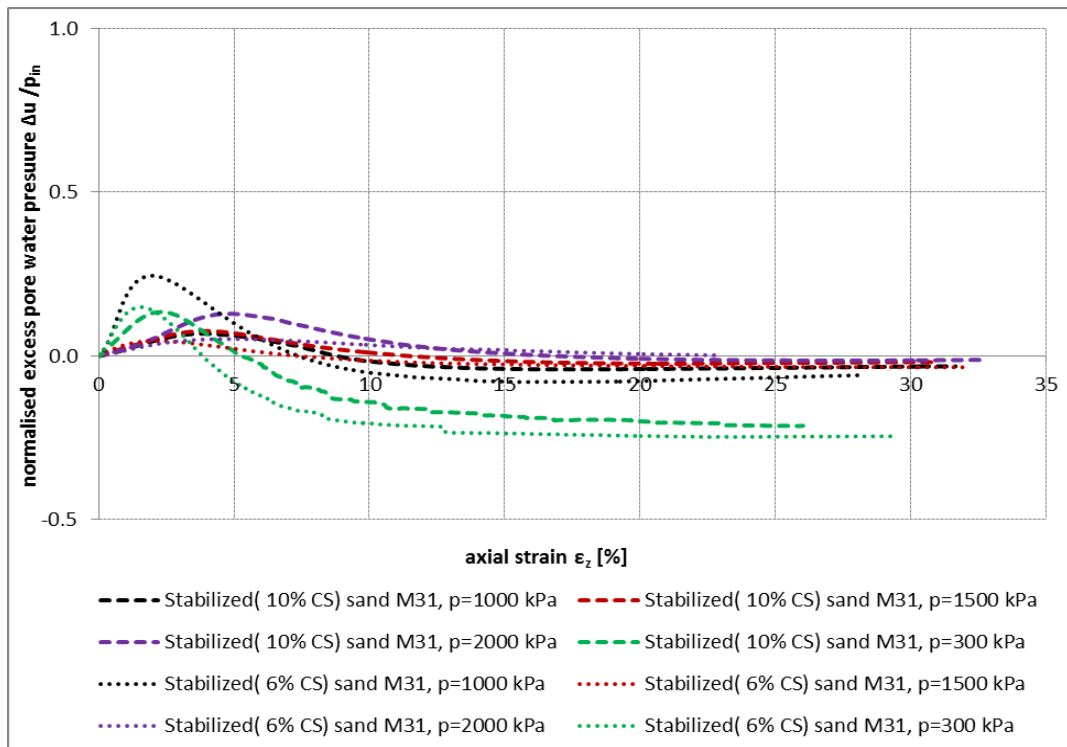
Σχήμα 3.13 Σχέση κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων σε δοκίμια σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS = 10%) για διάφορες αρχικές τάσεις

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 3.14 παρουσιάζει αυτήν τη βελτίωση μέσω της διπλής κανονικοποίησης $(q/p_i)_{stabil} / (q/p_i)_{natur}$ 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.



Σχήμα 3.14. Επίδραση της σταθεροποίησης στη σχέση κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, για διαφορετικές τιμές CS(%) και αρχικής τάσης της άμμου M31

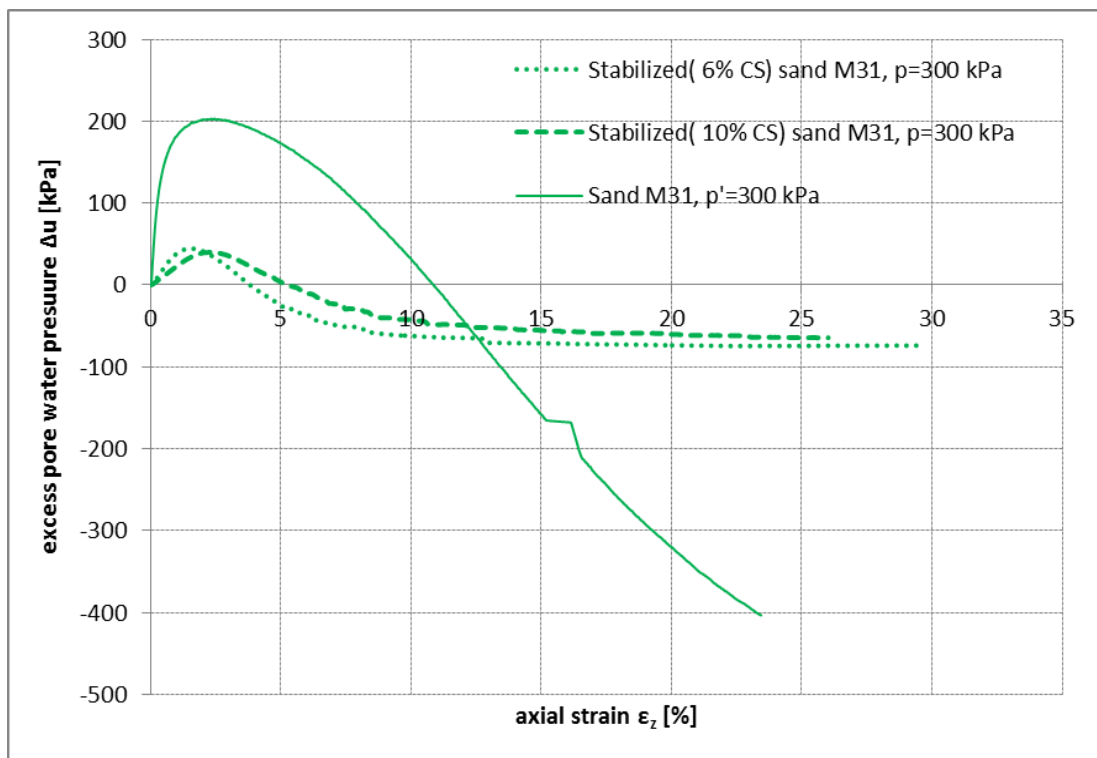
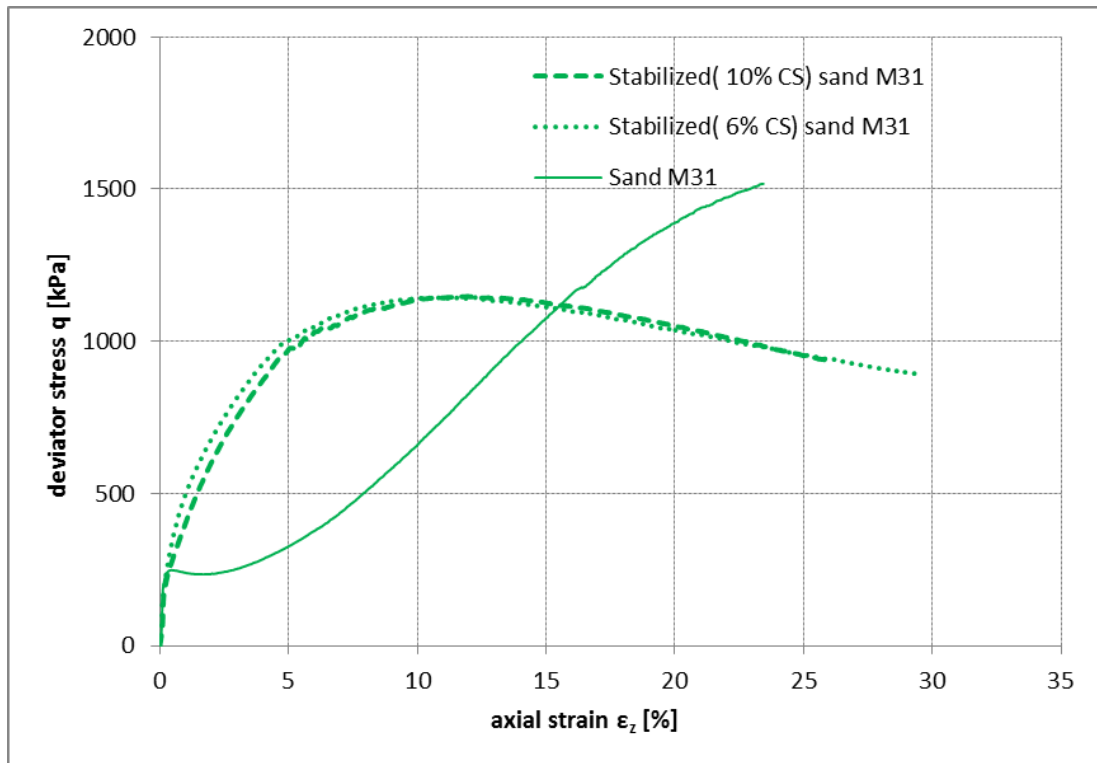
Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες υπερπίεσεις του ρευστού πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση για τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Οι κανονικοποιημένες τιμές σε παραμόρφωση 5% είναι από 0.6 έως 0.7 για τα φυσικά εδάφη, ενώ για τα σταθεροποιημένα είναι από -0.10 έως 0.10.



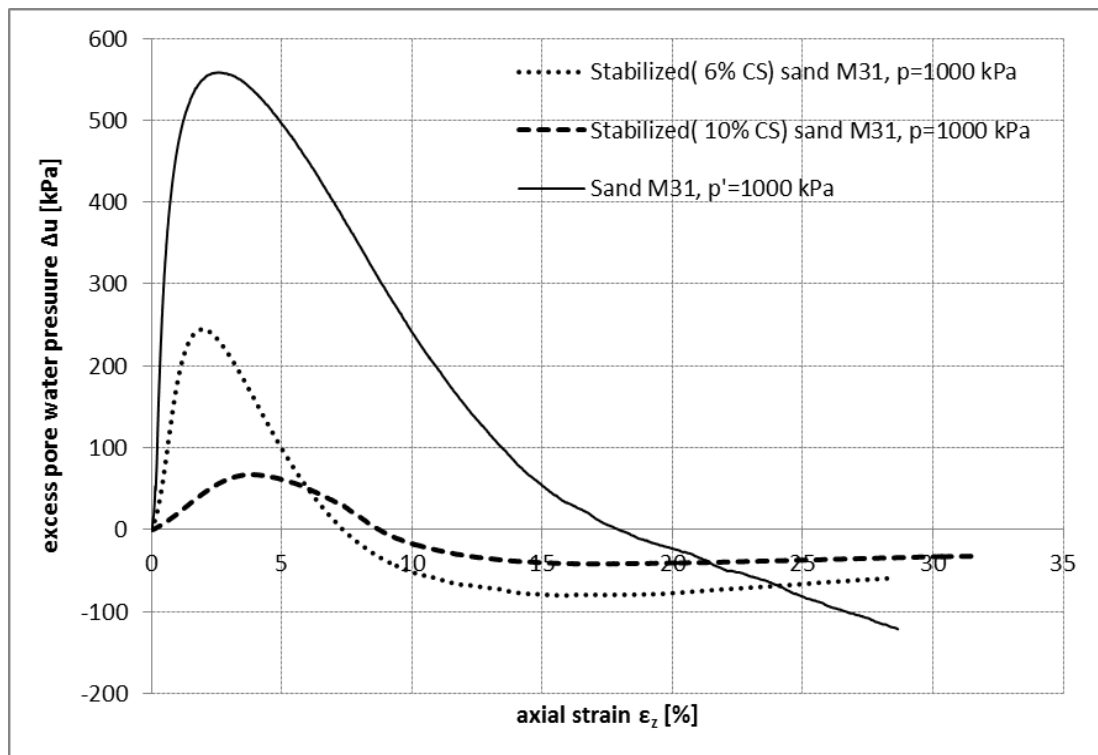
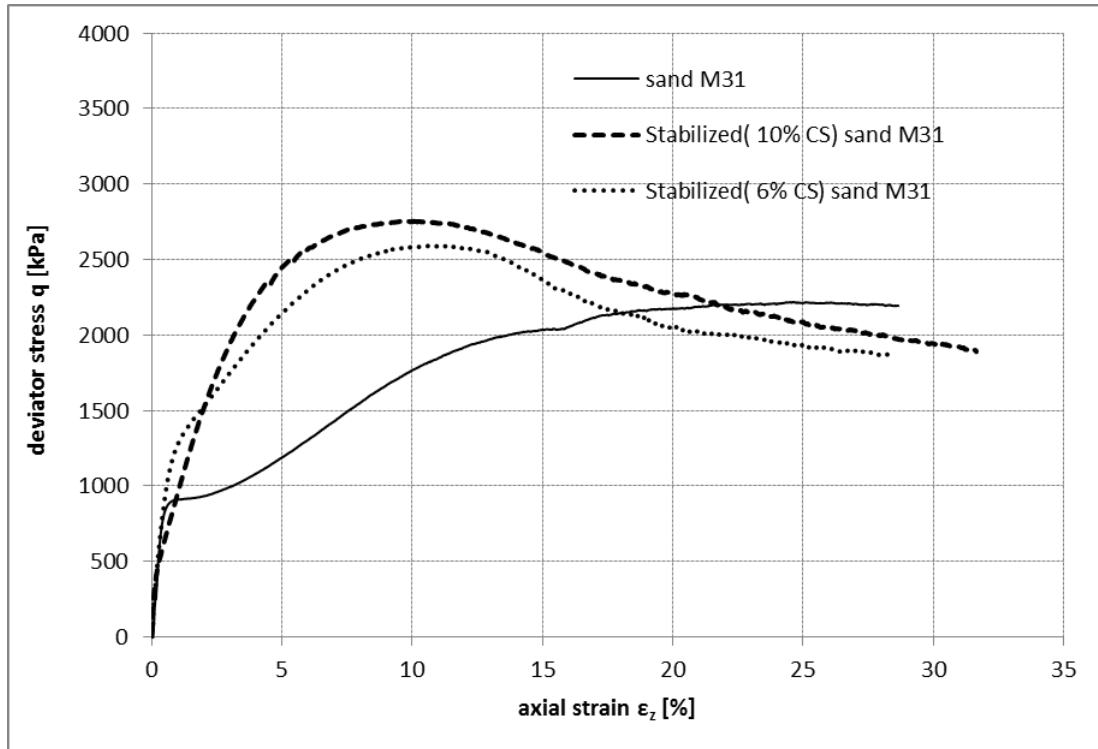
Σχήμα 3.15. Σχέση κανονικοποιημένων υπερπίεσεων ρευστού πόρων - παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου M31 (CS=6 και 10%) για διάφορες αρχικές τάσεις.

Πιο αναλυτικά, η σύγκριση απόκρισης σε τριαξονική θλίψη μεταξύ της φυσικής άμμου M31 (υπό αστράγγιστες συνθήκες) και της σταθεροποιημένης εκδοχής της με CS = 6% και 10% για διαφορετικές τάσεις εγκιβωτισμού παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.16 έως 3.19 που ακολουθούν.

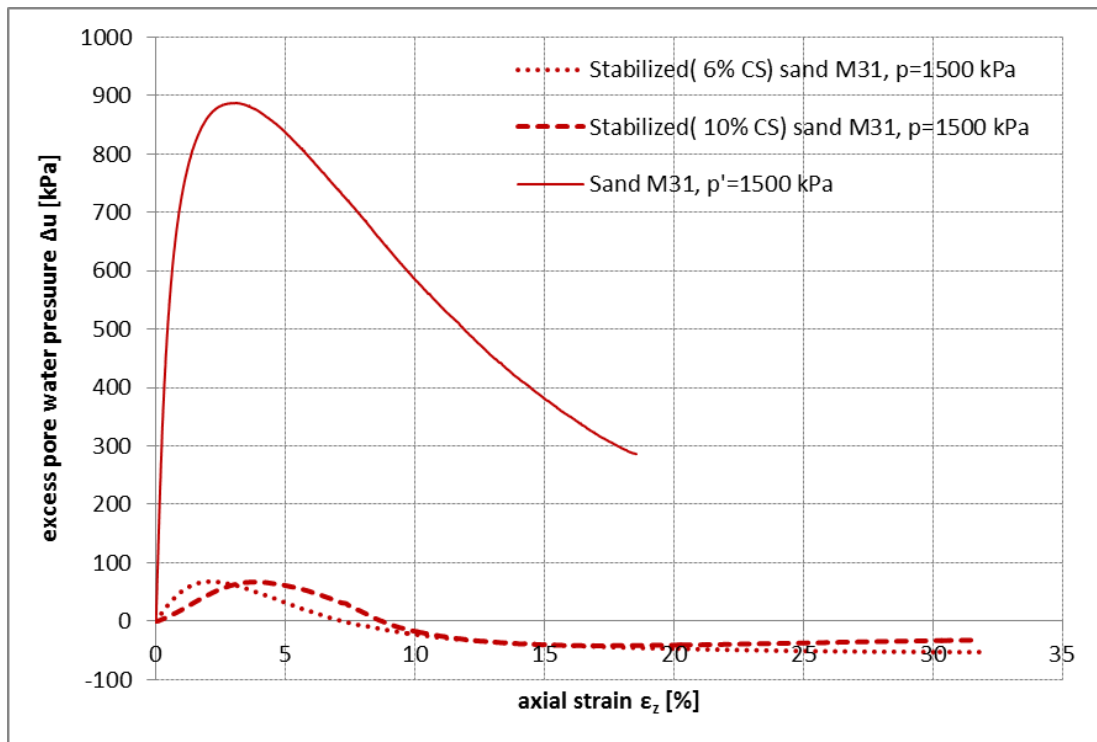
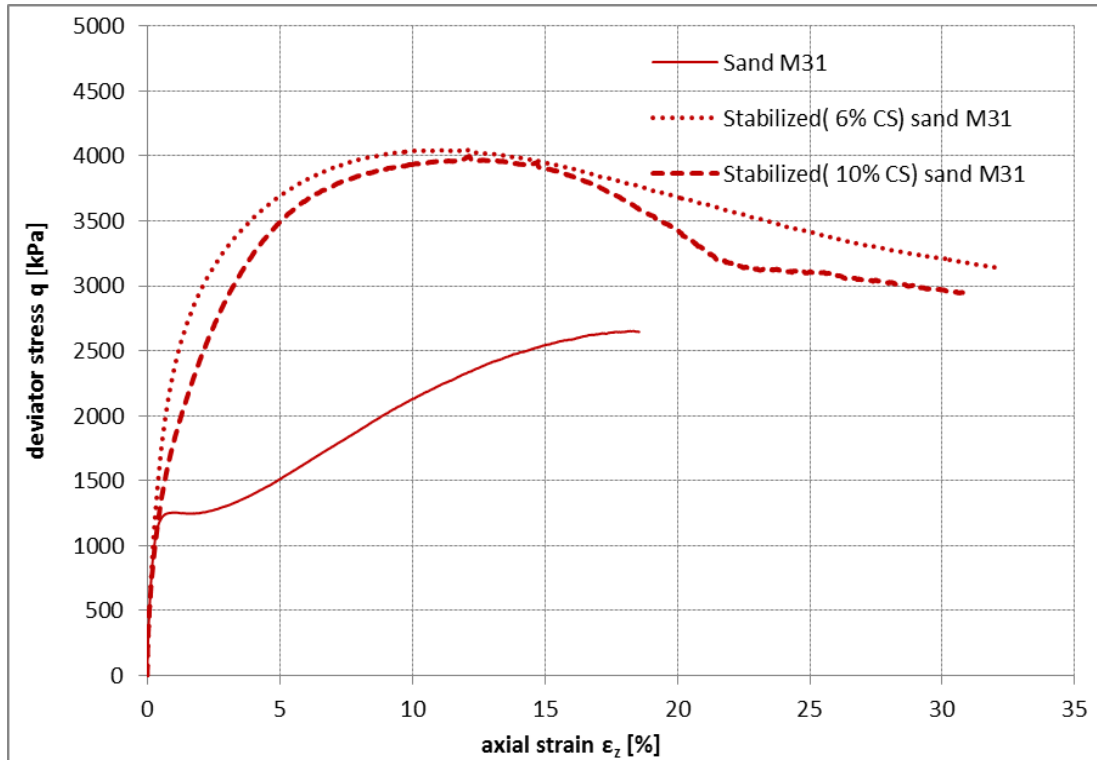
Τέλος, οι περιβάλλουσες αστοχίας Mohr-Coulomb για τη φυσική και τη σταθεροποιημένη (10% CS) άμμο M3 απεικονίζονται στα Σχήματα 3.20 και 3.21. Το σταθεροποιημένο έδαφος συνεχίζει να υπακούει σε νόμο τριβής και εμφανίζει αυξημένη, σε σχέση με το φυσικό έδαφος ίδιας σχετικής πυκνότητας, γωνία διατμητικής 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.



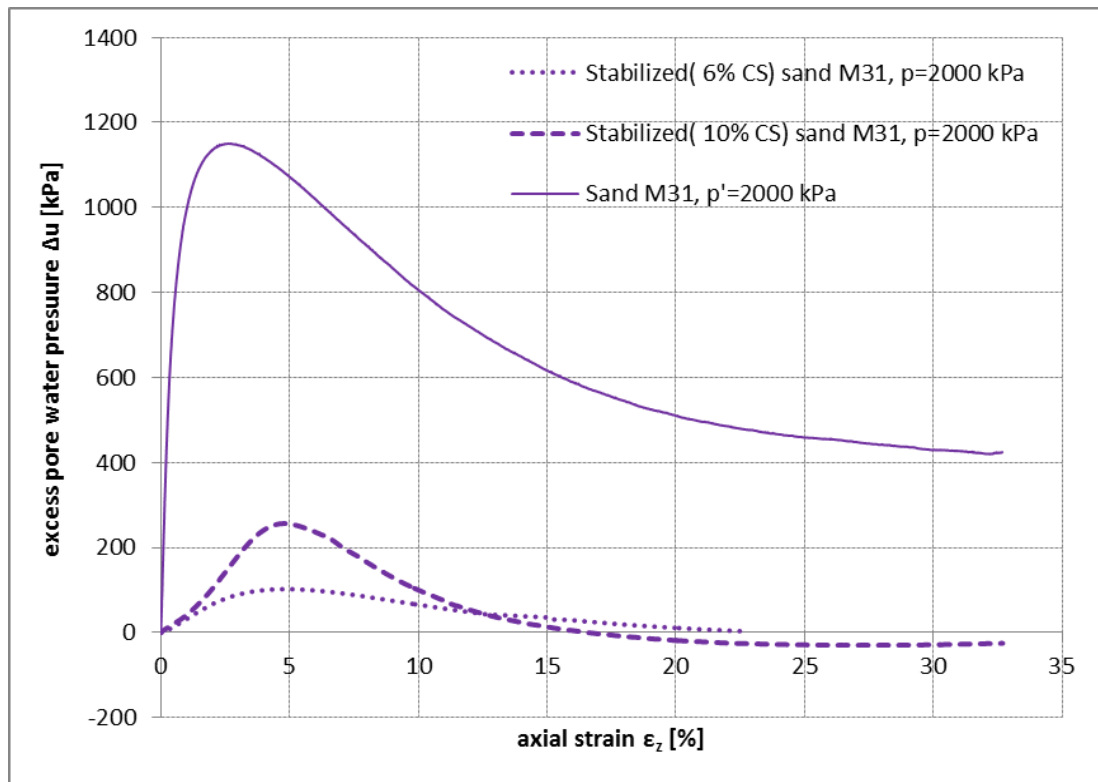
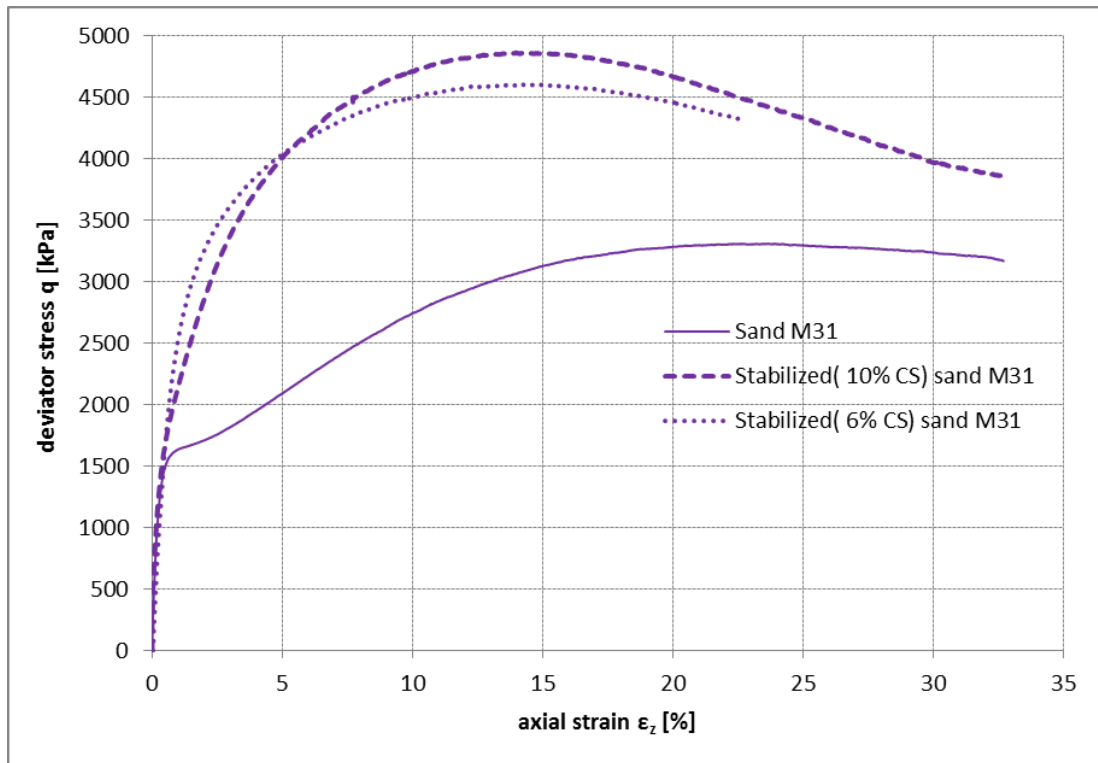
Σχήμα 3.16. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένης (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 300$ kPa, σε όρους: α) σχέσης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, β) σχέσης υπερπλίσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης



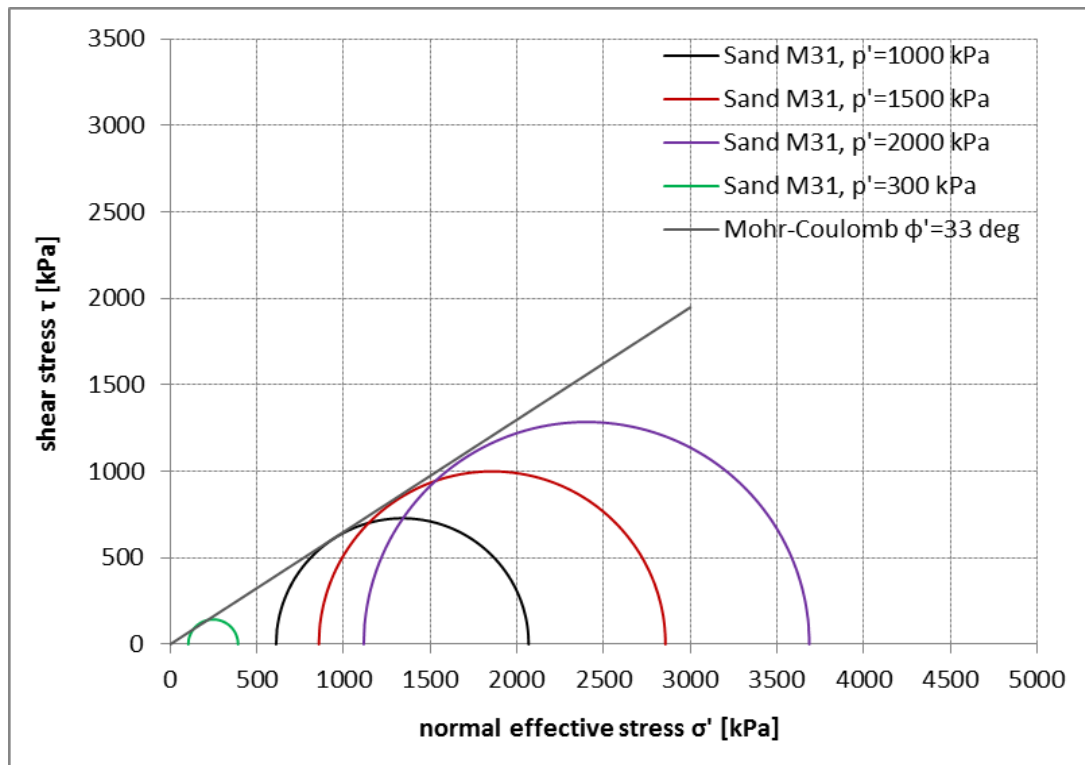
Σχήμα 3.17. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένης (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 1000$ kPa, σε όρους: α) σχέσης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, β) σχέσης υπερπίεσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης



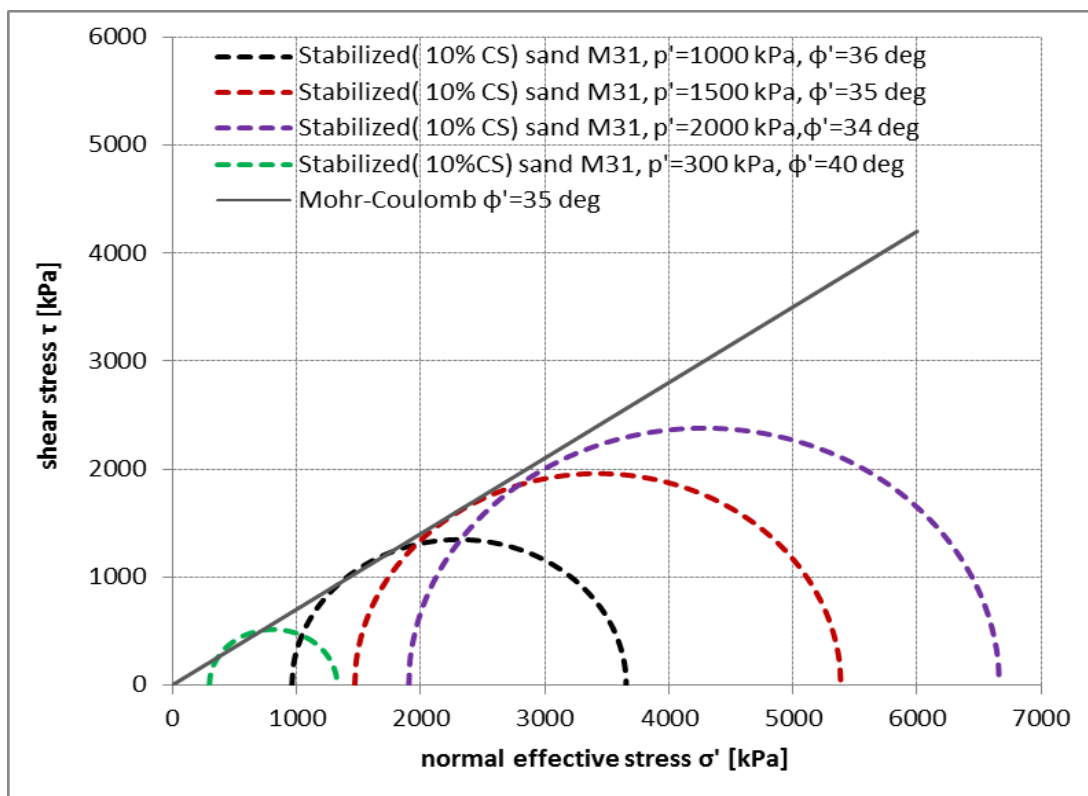
Σχήμα 3.18. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένης (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 1500$ kPa, σε όρους: α) σχέσης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, β) σχέσης υπερπίεσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης



Σχήμα 3.19. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένης (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένης άμμου M31 σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 2000$ kPa, σε όρους: α) σχέσης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, β) σχέσης υπερπίεσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης

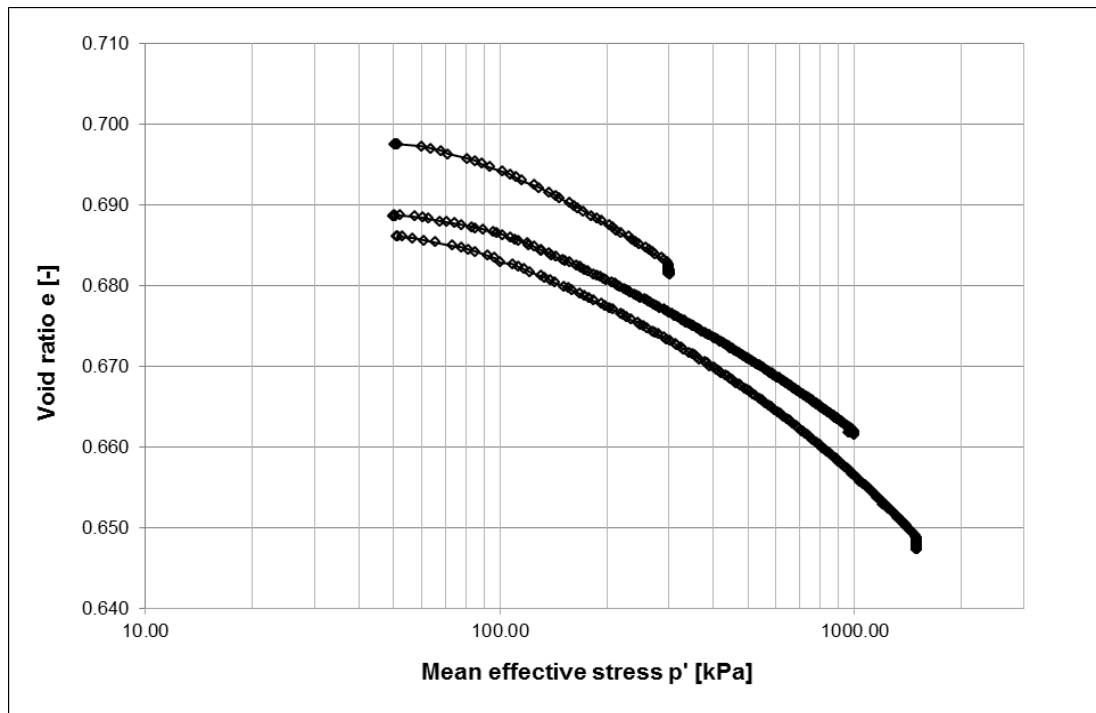


Σχήμα 3.20. Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb φυσικής άμμου M31



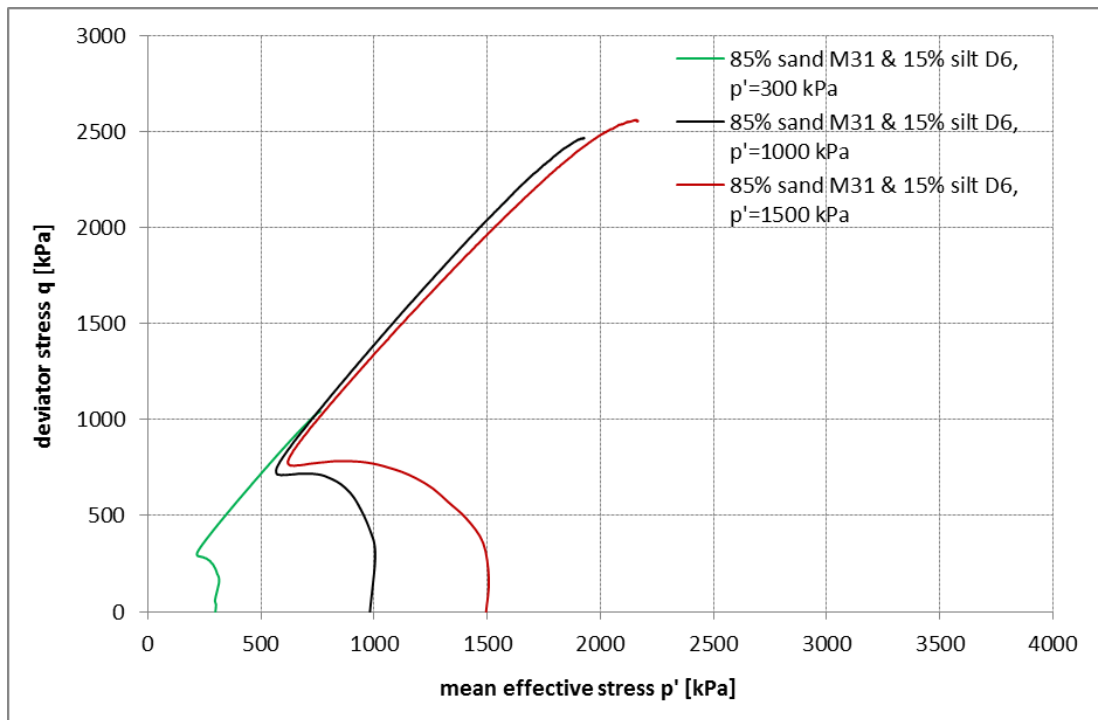
Σχήμα 3.21. Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb σταθεροποιημένης (CS = 10%) άμμου M31.

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 3.22. 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.

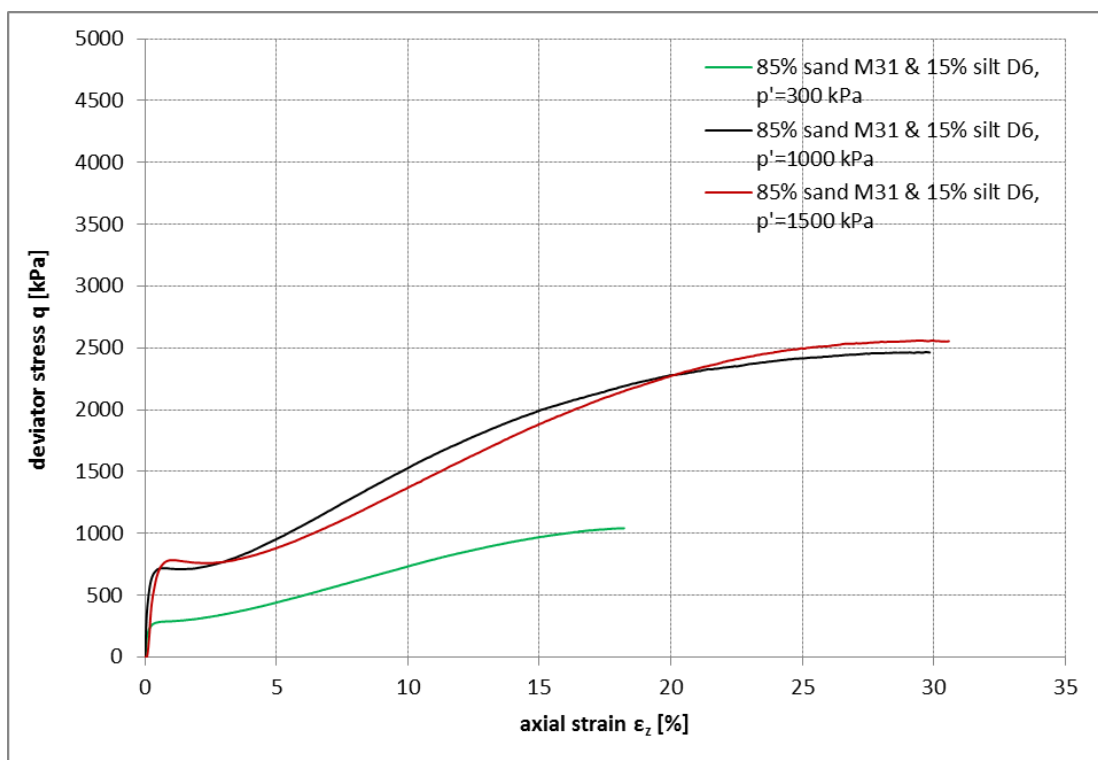


Σχήμα 3.22. Καμπύλες στερεοποίησης μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6 με διαφορετικές αρχικές πυκνότητες.

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 3.23. 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 $\varphi'_{PTL} = 33^\circ$, ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi' = 34^\circ$, δηλαδή η περιβάλλουσα αστοχίας του μίγματος είναι ίδια με αυτήν της καθαρής άμμου.

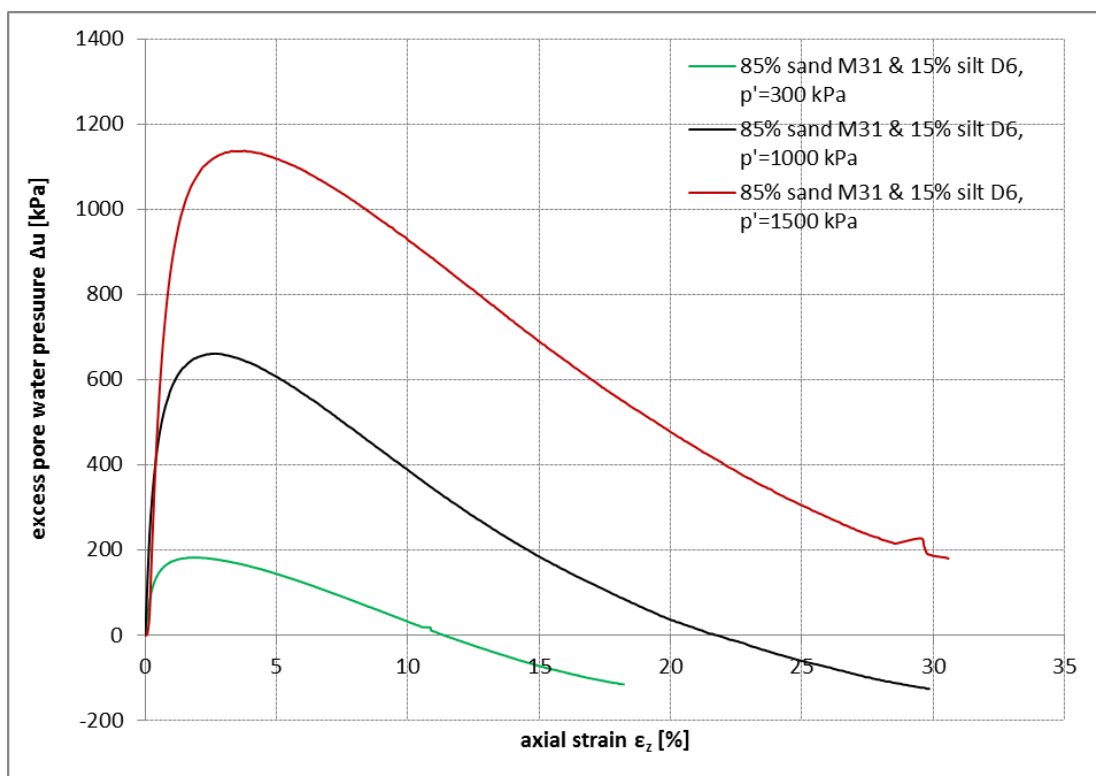


Σχήμα 3.23. Ενεργές διαδρομές τάσεων μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6 σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές υπό διαφορετικές αρχικές τάσεις.



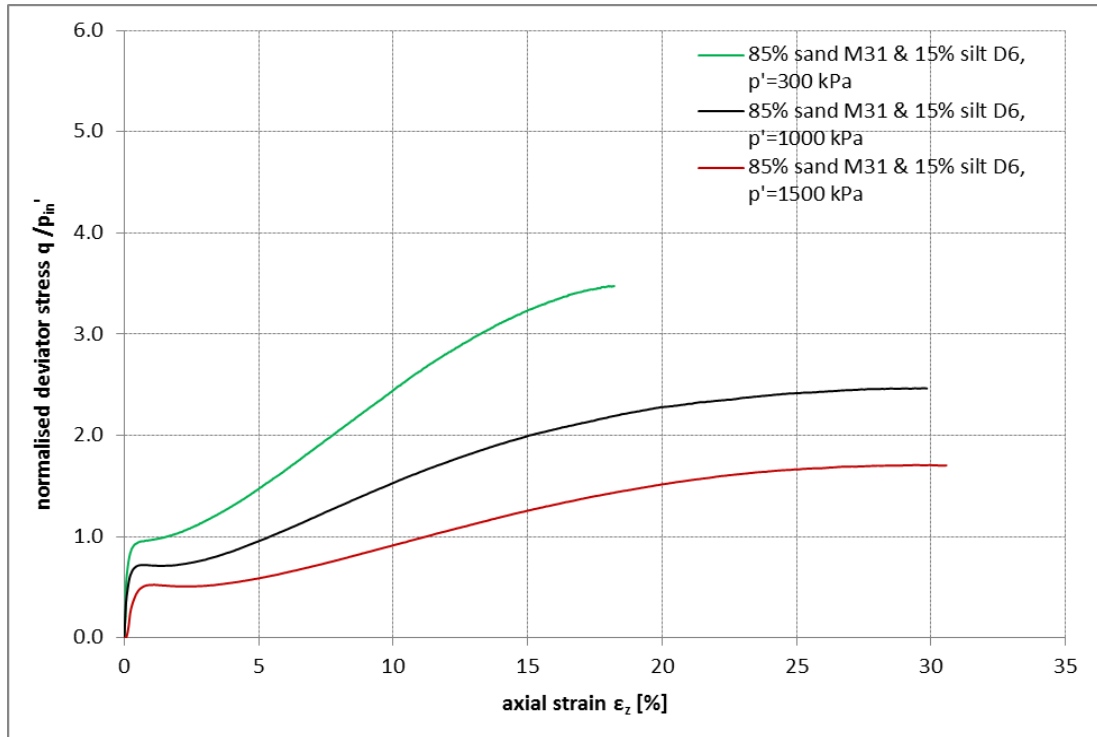
Σχήμα 3.24. Σχέση αποκλινουσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31 - ιλύος D6 σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές υπό διαφορετικές αρχικές τάσεις

Στο Σχήμα 3.24 απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων q - ϵ_z . Η εντονότερη συστολική συμπεριφορά του μίγματος σε σύγκριση με την καθαρή άμμο και οι συνεπαγόμενες μεγεθυμένες υπερπιέσεις πόρων καθιστούν τη διατμητική αντίσταση του μίγματος υποβιβασμένη συγκριτικά. 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 υπερπιέσεις του ύδατος των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται στο Σχήμα 3.25. Είναι σαφώς μεγεθυμένες κατά τη συστολή σε σχέση με τις αντίστοιχες της καθαρής άμμου και αργούν να σταθεροποιηθούν.

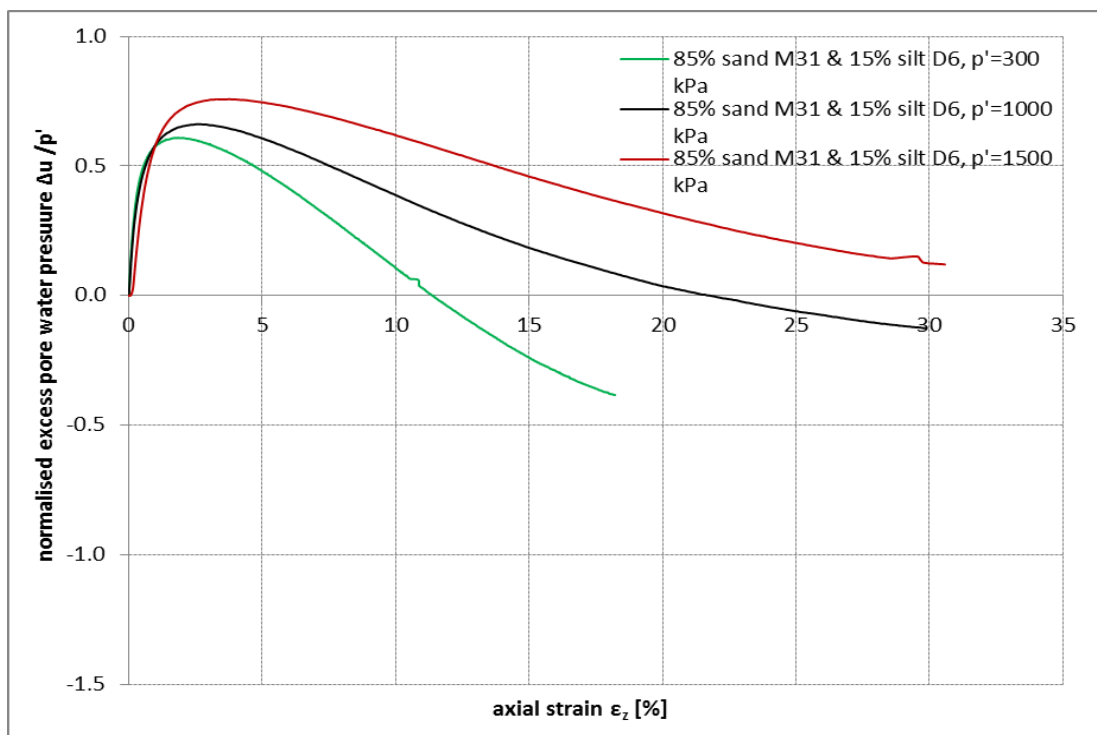


Σχήμα 3.25. Σχέση υπερπίεσης ύδατος πόρων – αξονικών παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31-ιλύος D6 σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές υπό διαφορετικές αρχικές τάσεις

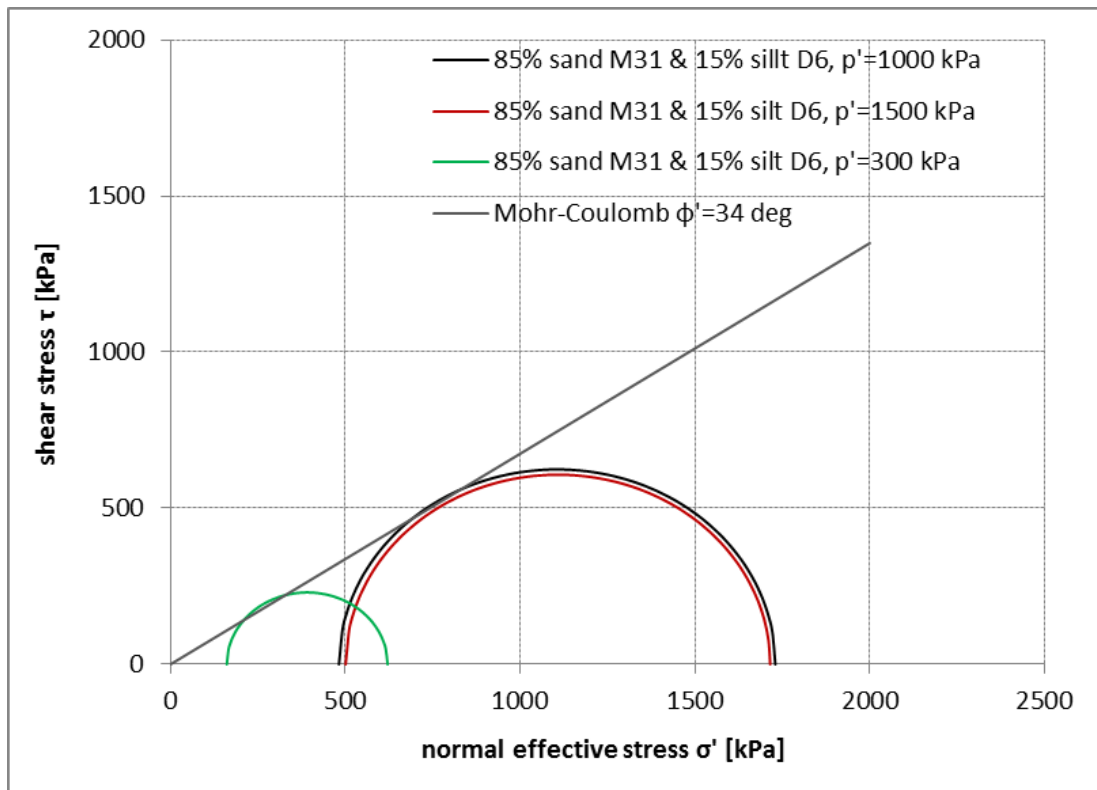
Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων ($q/p_i' - \epsilon_z$) και υπερπιέσεων-παραμορφώσεων ($\Delta u/p_i' - \epsilon_z$) παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.26 και 3.27 αντίστοιχα. Οι κανονικοποιημένες καμπύλες δεν συγκλίνουν καθώς η συστολική συμπεριφορά ενισχύεται δυσανάλογα με την αύξηση της ενεργού τάσης. Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb φαίνεται στο Σχήμα 3.28 και παρατηρείται ταύτιση των οριακών κύκλων για τις τάσεις των 1000 και 1500 kPa.



Σχήμα 3.26. Σχέση κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31-ιλύος D6 σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές υπό διαφορετικές αρχικές τάσεις



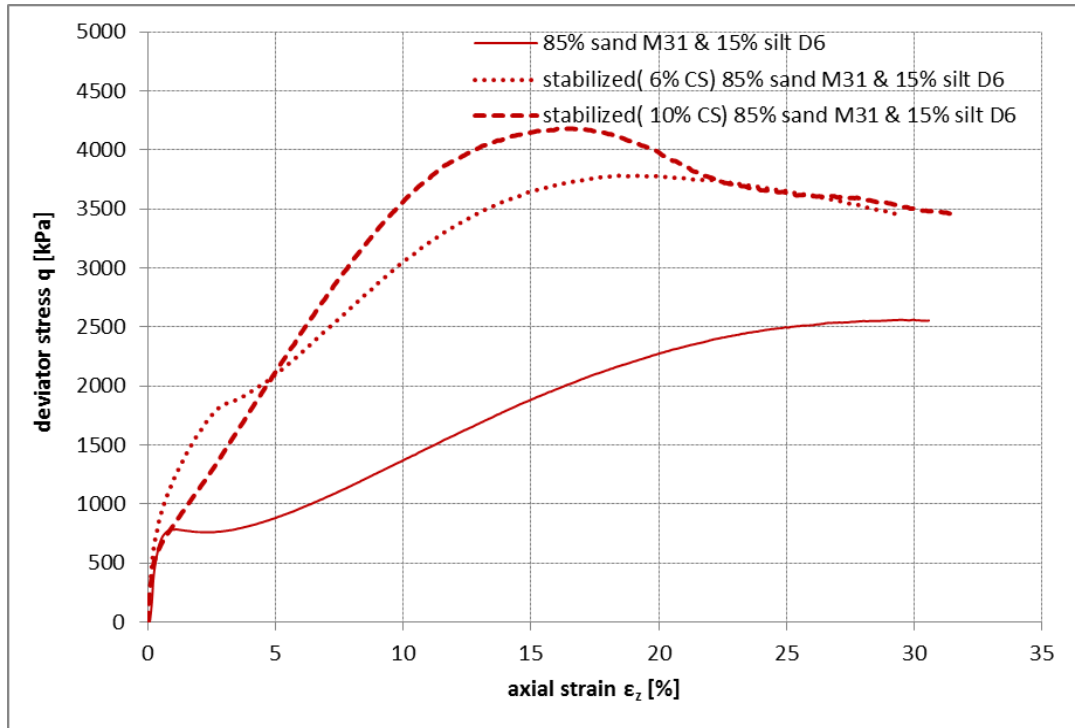
Σχήμα 3.27. Σχέση κανονικοποιημένων υπερπίεσεων ύδατος πόρων – αξονικών παραμορφώσεων μίγματος άμμου M31-ιλύος D6 σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές υπό διαφορετικές αρχικές τάσεις



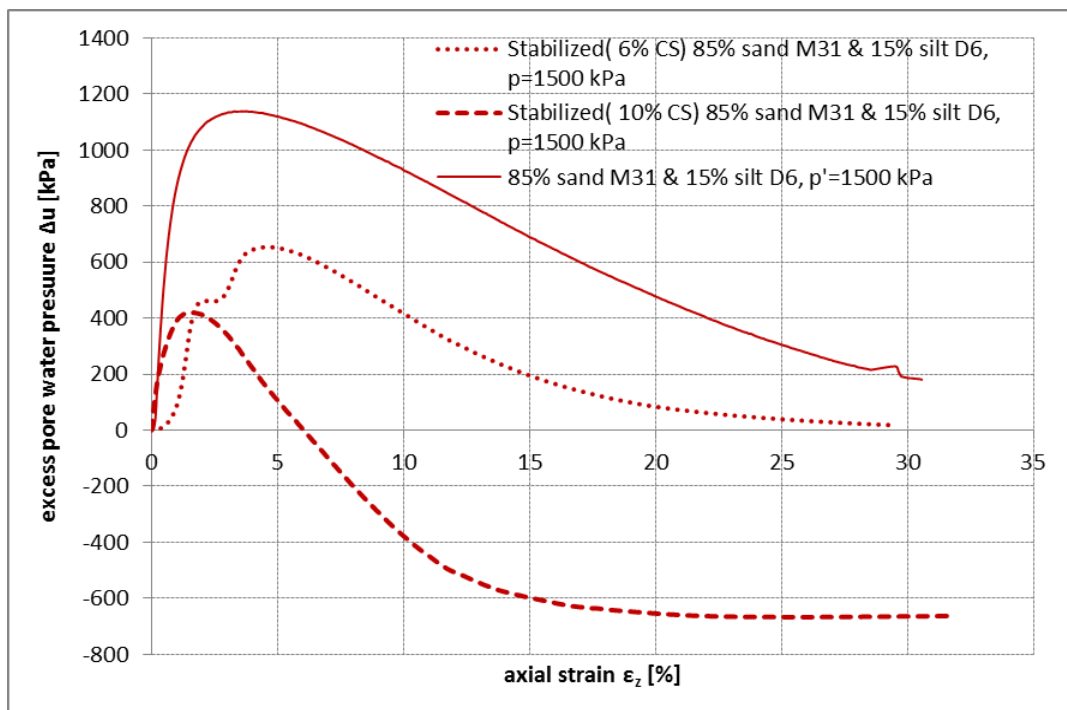
Σχήμα 3.28. Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb μίγματος άμμου M31-ιλύος D6

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.

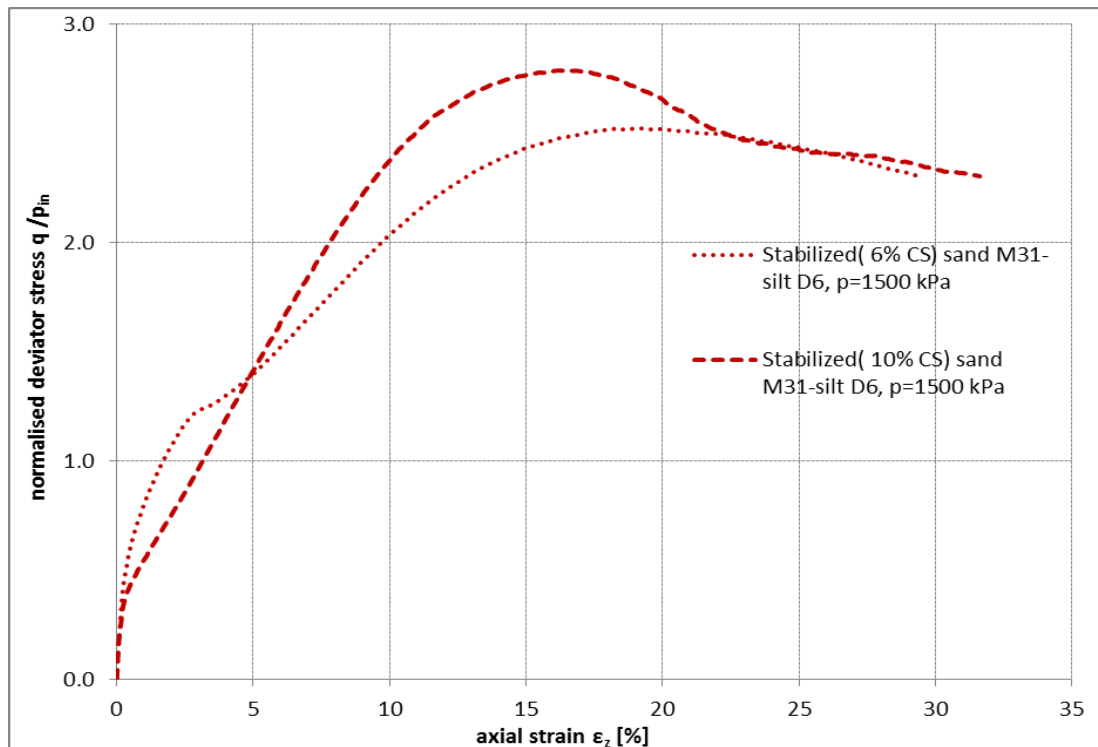
Μετά το πέρας της ισότροπης στερεοποίησης τα δοκίμια του σταθεροποιημένου μίγματος υποβλήθηκαν σε τριαξονική συμπίεση υπό αστράγγιστες συνθήκες, με ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης 0.30 mm/min. Στο Σχήμα 3.29 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων q - e_z για τα δοκίμια με ποσοστό σταθεροποιητή 6 και 10%, σε τάση 1500 kPa, μαζί με εκείνη του φυσικού, απ' όπου προκύπτει ότι η διατμητική αντίσταση του σταθεροποιημένου εδάφους είναι σαφώς μεγαλύτερη. Οι υπερπίεσεις του ρευστού των πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση απεικονίζονται στο Σχήμα 3.30. 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 εκτονώθηκε 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.



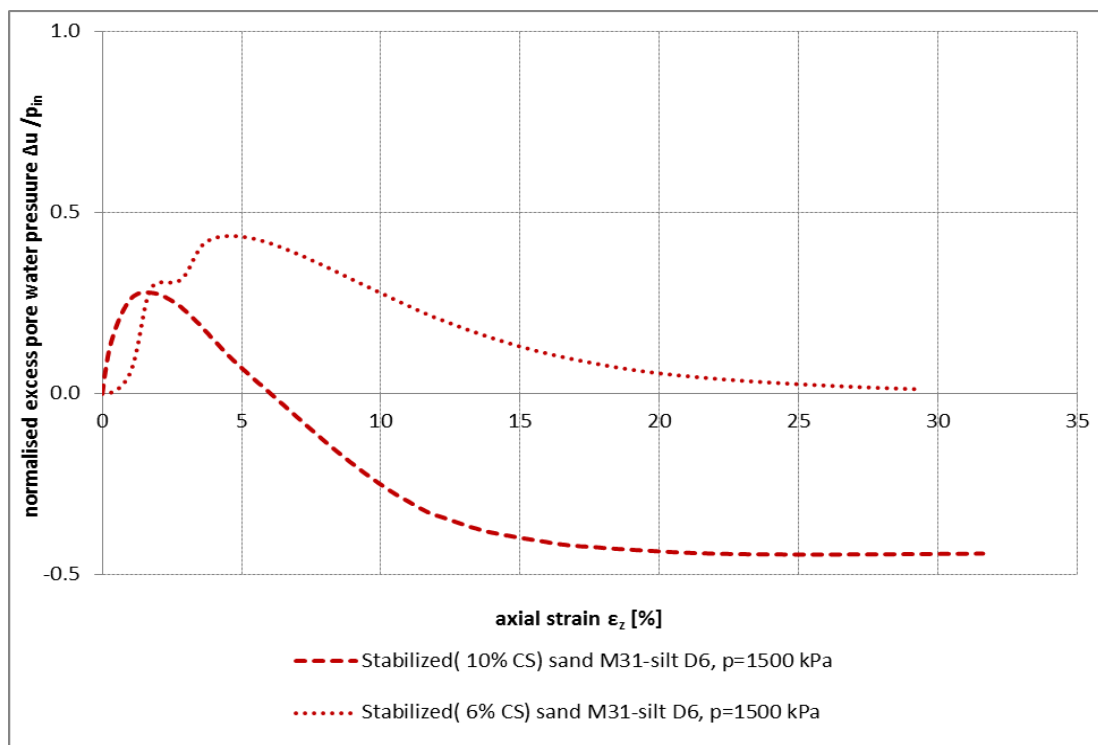
Σχήμα 3.29. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένου (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 (85% κ.β.) – ιλύος D6 (15% κ.β.) σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 1500\text{kPa}$, σε όρους σχέσης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης



Σχήμα 3.30. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένου (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 (85% κ.β.) – ιλύος D6 (15% κ.β.) σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 1500\text{kPa}$, σε όρους σχέσης υπερπιέσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης

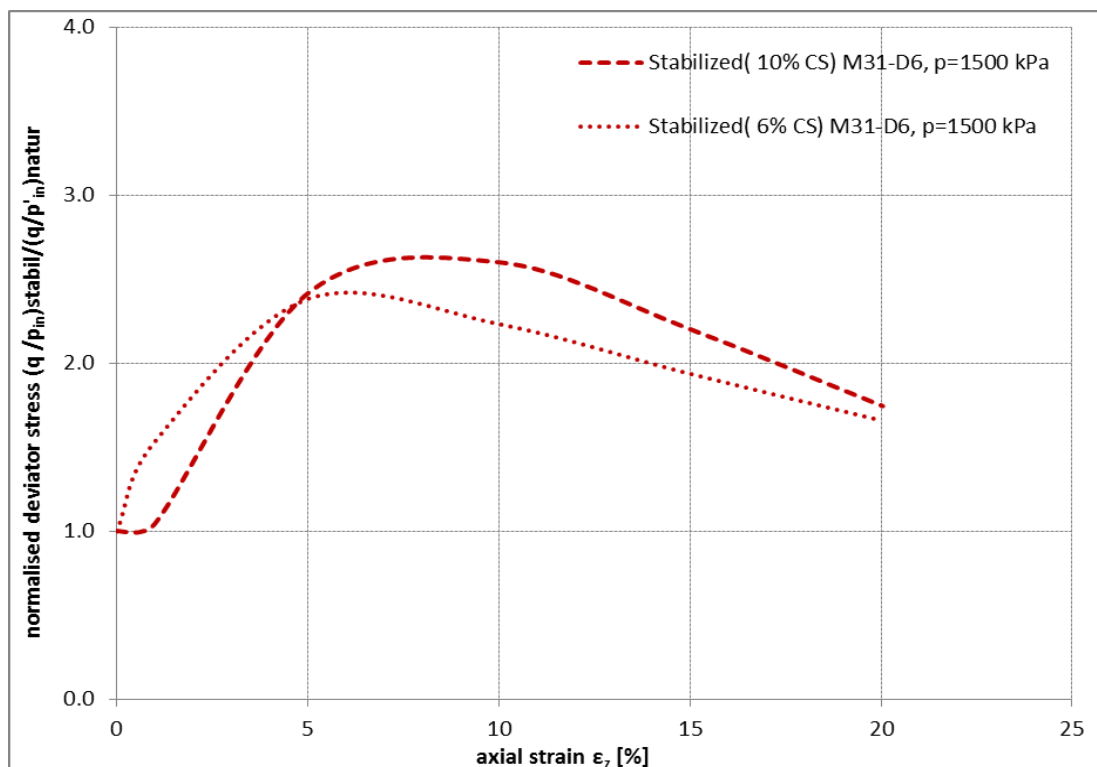


Σχήματα 3.31. Σχέση κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31-ιλύος D6 (CS=6 & 10%) στην ίδια τάση 1500kPa



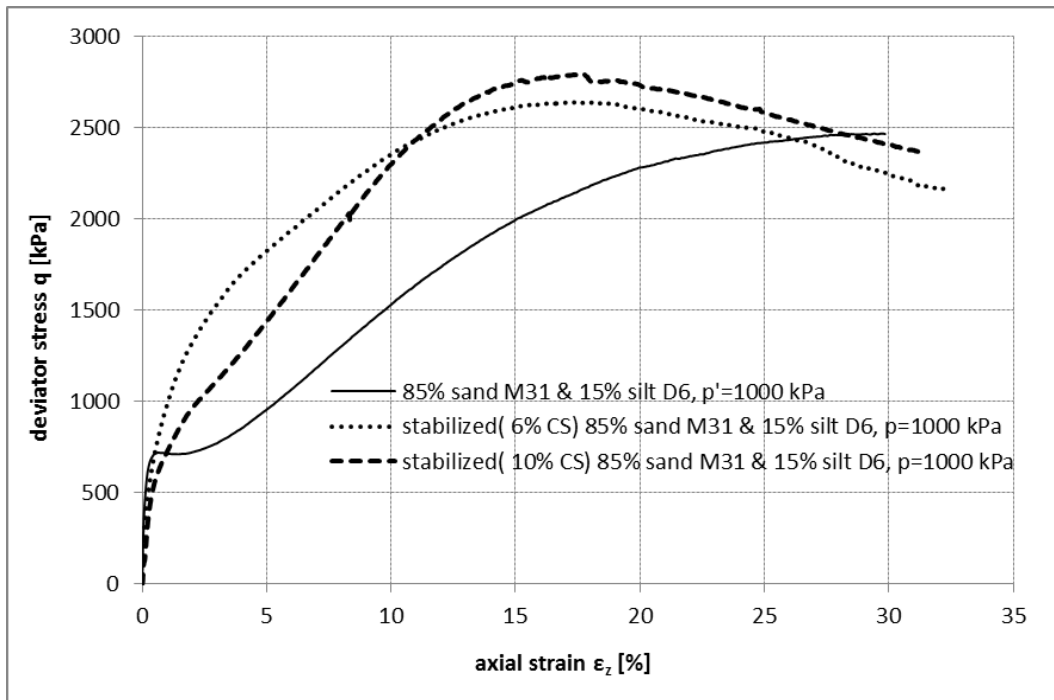
Σχήματα 3.32. Σχέση κανονικοποιημένων υπερπίεσεων ρευστού πόρων – αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31-ιλύος D6 (CS=6 & 10%) στην ίδια τάση 1500kPa

Στα Σχήματα 3.31 και 3.32 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ολική τάση εγκιβωτισμού καμπύλες $q/p_i - \varepsilon_z$ και $\Delta u/p_i - \varepsilon_z$ 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 3.33 απεικονίζει τον αδιάστατο παράγοντα βελτίωσης $(q/p_i)_{stabil} / (q/p_i)_{natur}$ σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα για το σταθεροποιημένο μίγμα άμμου-ιλύος είναι ανάλογα με αυτά για τη σταθεροποιημένη άμμο.

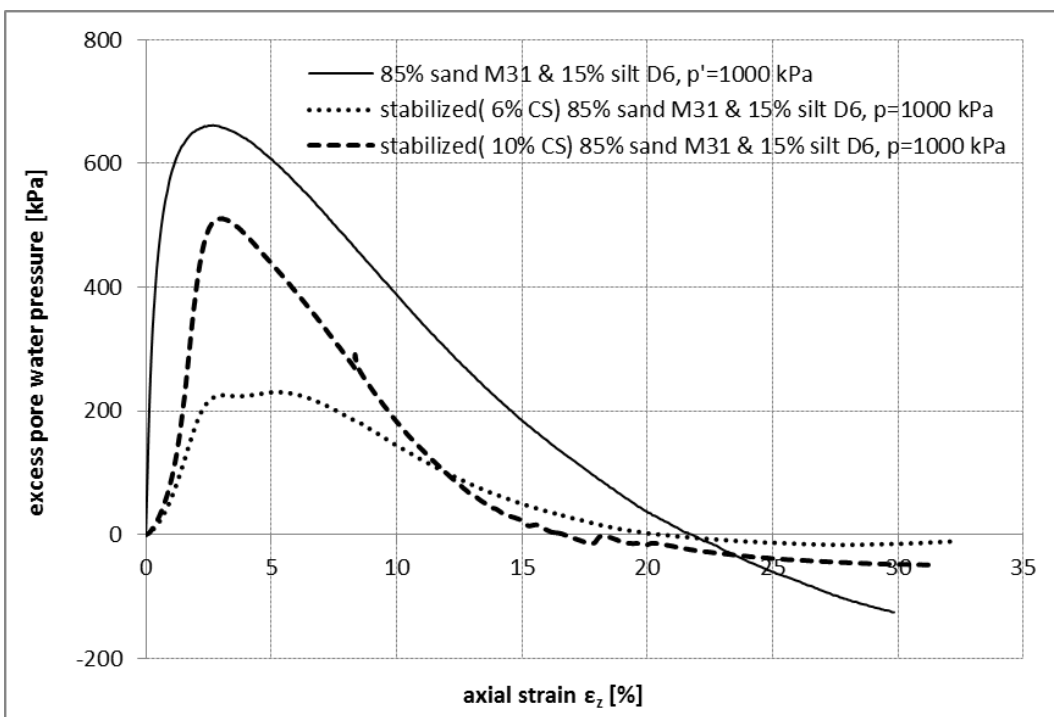


Σχήμα 3.33. Επίδραση της σταθεροποίησης στη σχέση κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, για διαφορετικές τιμές CS(%) και αρχικής τάσης του μίγματος άμμου M31-ιλύος D6 (CS=6 & 10%) στην ίδια τάση 1500kPa

Αντίστοιχα αποτελέσματα σύγκρισης απόκρισης της φυσικού και σταθεροποιημένου μίγματος, αλλά για τάση 1000kPa παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.34 και 3.35. Η επίδραση της σταθεροποίησης στην απόκριση είναι αντίστοιχη, αλλά λιγότερη έντονη απ' ό,τι για τάση 1500kPa.

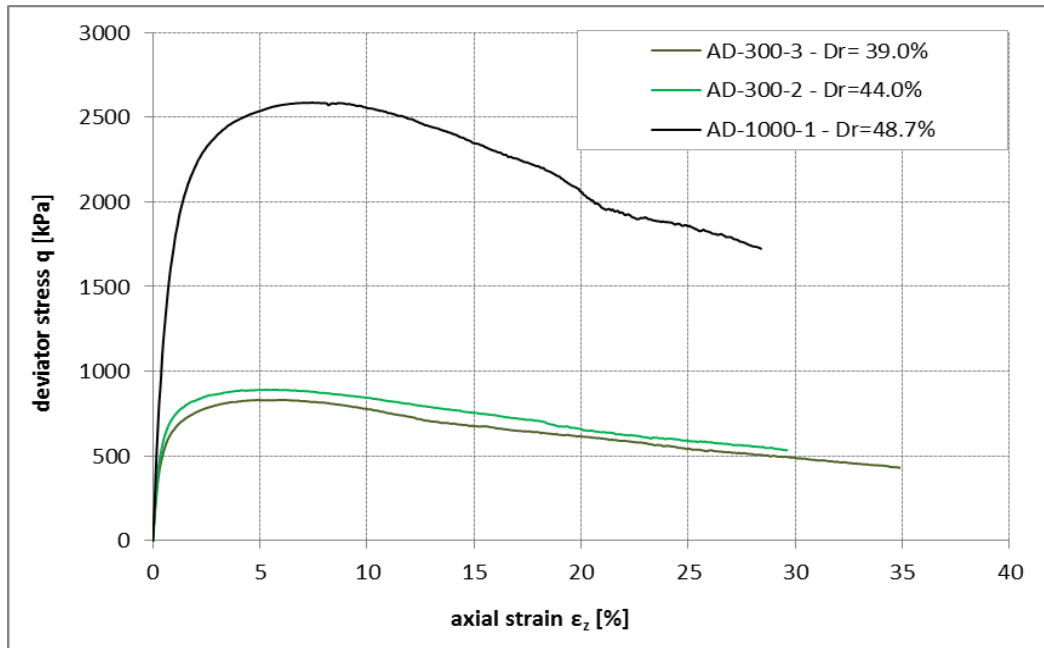


Σχήμα 3.34. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένου (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 (85% κ.β.) – ιλύος D6 (15% κ.β.) σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 1000\text{kPa}$, σε όρους σχέσης αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης

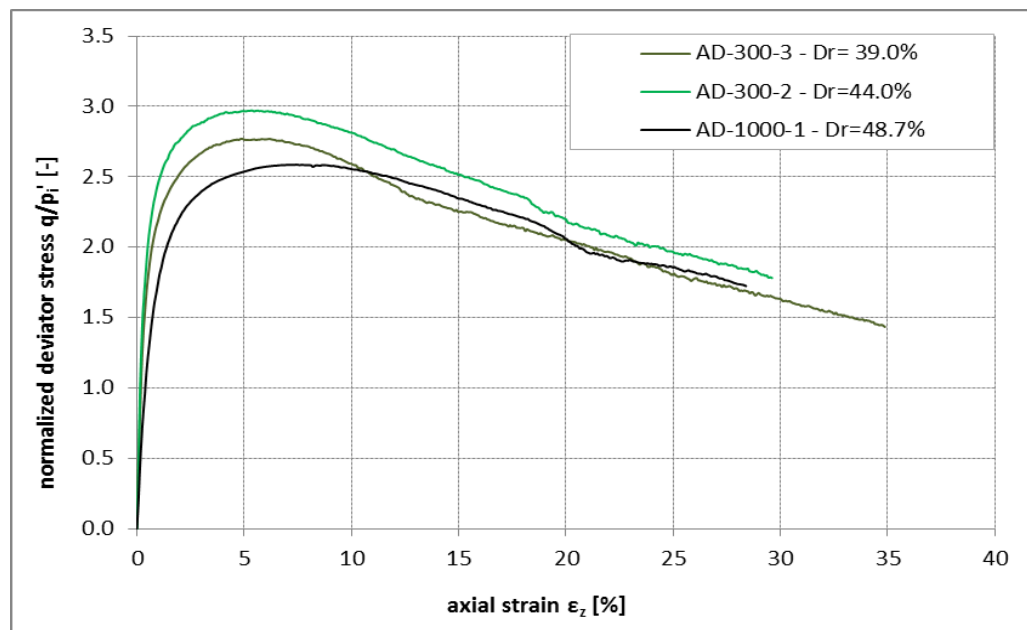


Σχήμα 3.35. Σύγκριση απόκρισης σταθεροποιημένου (με CS = 6 & 10%) και μη-σταθεροποιημένου μίγματος άμμου M31 (85% κ.β.) – ιλύος D6 (15% κ.β.) σε τριαξονική θλίψη υπό αρχική τάση εγκιβωτισμού $p_i = 1000\text{kPa}$, σε όρους σχέσης υπερπιέσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης

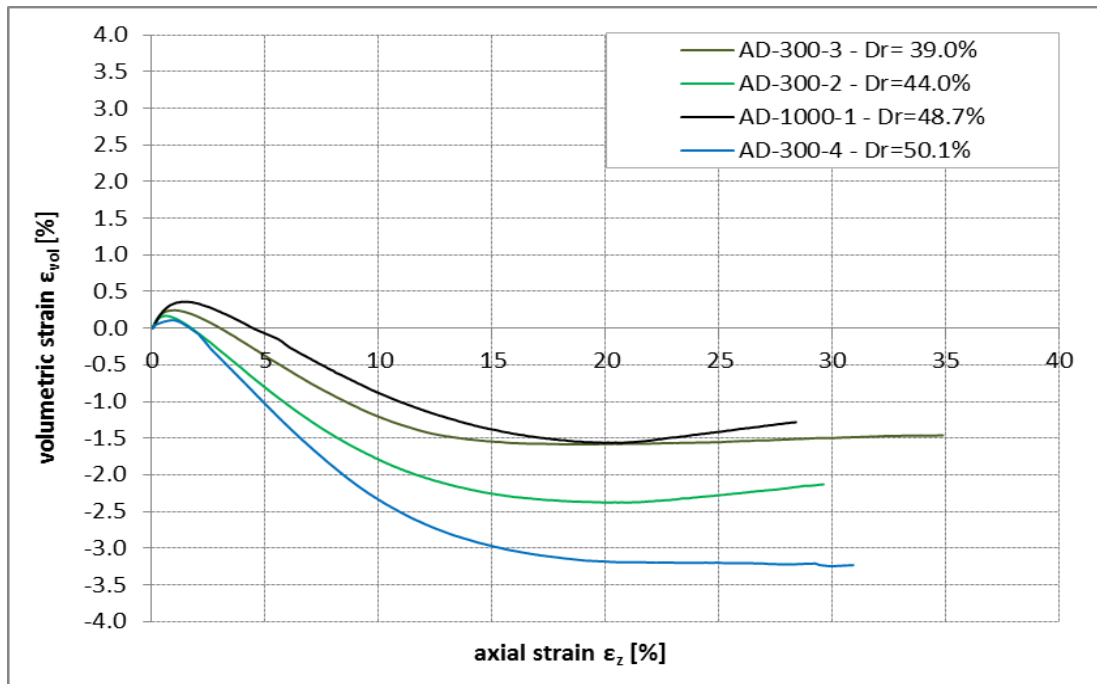
Συμπληρωματικά με τις παραπάνω μονοτονικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες εκτελέστηκαν και αντίστοιχες δοκιμές σε φυσική άμμο υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων q - ϵ_z απεικονίζονται στο Σχήμα 3.36 και τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα q/p'_i - ϵ_z στο Σχήμα 3.37. Η εξέλιξη των ογκομετρικών παραμορφώσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.38. Για τη δοκιμή AD-300-4 παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα ϵ_{vol} - ϵ_z και e - ϵ_z λόγω προβλήματος στην καταγραφή.



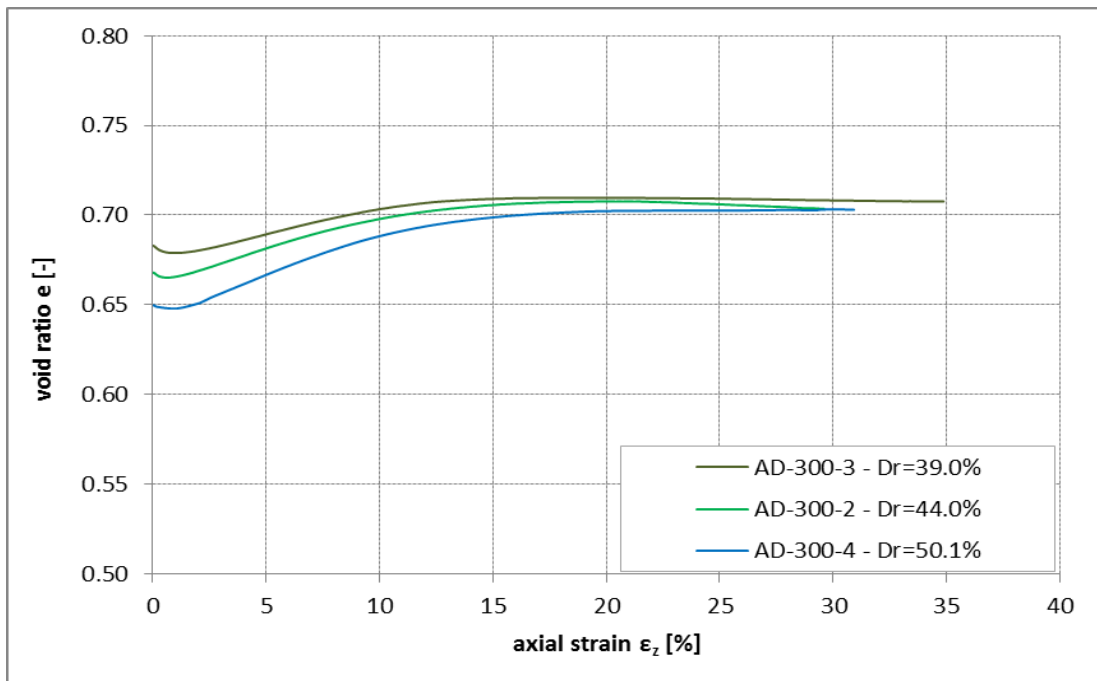
Σχήμα 3.36. Σχέση αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης στα 300, 1000kPa.



Σχήμα 3.37. Σχέση κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης στα 300 και 1000kPa.



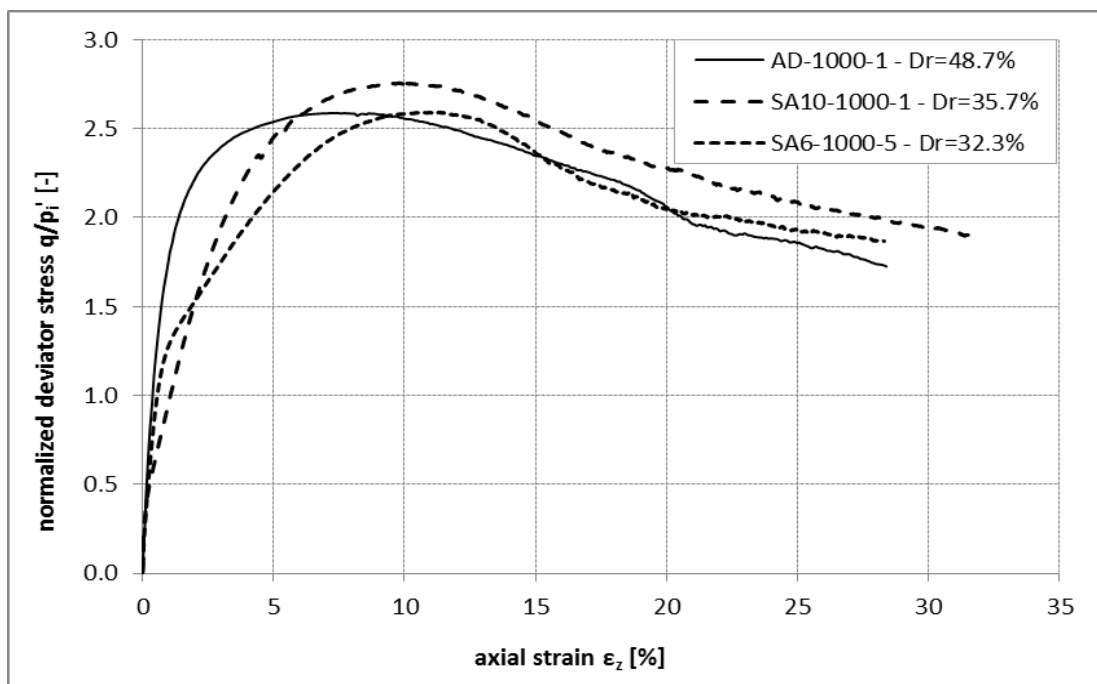
Σχήμα 3.38. Σχέση ογκομετρικών – αξονικών παραμορφώσεων άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης σε τάσεις 300 και 1000kPa.



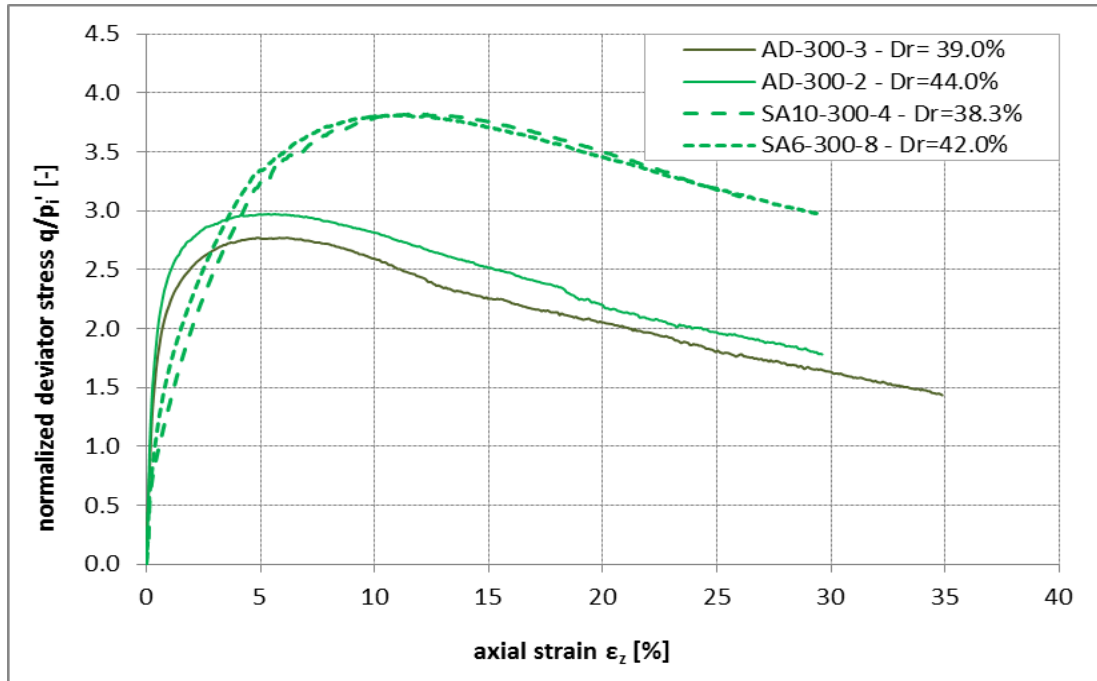
Σχήμα 3.39. Σχέση δείκτη πόρων – αξονικής παραμόρφωσης άμμου M31 σε δοκιμές στραγγιζόμενης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης σε τάσεις 300 και 1000kPa.

Το Σχήμα 3.39 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 για τη δεδομένη τάση φαίνεται να έχει τιμή 0.70-0.71.

Μία πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση προκύπτει από τα Σχήματα 3.40 και 3.41, τα οποία απεικονίζουν τα διαγράμματα κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων της σταθεροποιημένης άμμου υπό αστράγγιστες συνθήκες σε σύγκριση με αυτά της φυσικής άμμου στην ίδια ενεργό τάση αλλά υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Προκύπτει αδρά ότι η σταθεροποιημένη άμμος (που διατέμνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες) παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη φυσική άμμο πυκνότερης δομής που διατέμνεται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Υπενθυμίζεται ότι η σύγκριση με τα διαγράμματα για την άμμο υπό αστράγγιστες συνθήκες (σε προηγούμενες σελίδες) δίνουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά.



Σχήμα 3.40. Καμπύλες κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου σε δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης (υπό αστράγγιστες συνθήκες) και φυσικής άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, για αρχική τάση 1000kPa.



Σχήμα 3.41. Καμπύλες κανονικοποιημένων αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων σταθεροποιημένης άμμου σε δοκιμές μονοτονικής τριαξονικής θλίψης (υπό αστράγγιστες συνθήκες) και φυσικής άμμου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, για αρχική τάση 300kPa.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας προκύπτει ότι η σταθεροποίηση ενός μη συνεκτικού εδάφους (είτε καθαρής ή ιλυώδους άμμου) δημιουργεί ένα νέο γεωϋλικό το οποίο υπακούει και αυτό σε νόμο τριβής που έχει σημαντική εξάρτηση από την τάση εγκιβωτισμού. Όμως, συγκριτικά με το μη-σταθεροποιημένο έδαφος, η διατμητική αντίσταση είναι εν γένει σημαντικά αυξημένη. Η αύξηση της διατμητικής αντίστασης συνδέεται κυρίως με τη μικρή (ή μηδενική) ανάπτυξη πιέσεων στο υγρό των πόρων και δευτερευόντως με μικρή αύξηση της γωνίας διατμητικής αντοχής.

Πρακτικά, το σταθεροποιημένο μη συνεκτικό έδαφος (που διατέμνεται υπό αναγκαστικά αστράγγιστες συνθήκες δεδομένου ότι η υψηλού ιξώδους πυριτία αδυνατεί να στραγγίξει) παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το φυσικό μη συνεκτικό έδαφος πυκνότερης δομής που διατέμνεται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

Σε κάθε περίπτωση, η σχέση αποκλινοσών τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων δεν παρουσιάζει την κράτυνση των φυσικών εδαφών (λόγω διαστολικότητας), αλλά αντίθετα παρουσιάζει μικρή χαλάρωση και αυτή για κάθε επίπεδο τάσεων εγκιβωτισμού. Η ευεργετική δράση του σταθεροποιητή, όσον αφορά την αύξηση της γωνίας τριβής και κυρίως την αύξηση της διατμητικής αντίστασης, φαίνεται να εξασθενεί όσο αυξάνει η τάση εγκιβωτισμού. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πιθανώς ότι οι χημικοί δεσμοί του σταθεροποιητή εξασθενούν στις υψηλές τάσεις. Οι δεσμοί αυτοί καταστρέφονται με την προοδευτική αύξηση των παραμορφώσεων, αφού η παραμένουσα αντοχή των σταθεροποιημένων εδαφών τείνει προς την αντοχή των φυσικών στις πολύ μεγάλες παραμορφώσεις.

Τέλος, το ποσοστό του σταθεροποιητή δεν μεταβάλλει έντονα τη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους, καθιστώντας έτσι το οικονομικότερο ποσοστό CS = 6% προτιμητέο σε πρακτικές εφαρμογές.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- 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
- Bergna, H. E. (ed.), Roberts, W. O. (ed.), “Colloidal silica: fundamentals and applications”, CRC, Taylor & Francis
- Bolisetti, T., Reitsma, S. & Balachandar, R. (2009). ‘Experimental investigations of colloidal silica grouting in porous media’. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 5, 697-700.
- Brinker, C. J., Scherer G. W., “Sol - gel science: the physics and chemistry of sol – gel processing”, Academic Press
- British Standards 1377: Part 5: 1990 Standard methods of test for soils for civil engineering purposes, *British Standards Institution*, Test 12, Compressibility, permeability and durability tests, pp. 1-33.
- British Standards 1377: Part 7: 1990 Standard methods of test for soils for civil engineering purposes, *British Standards Institution*, Test 12, Shear strength tests, pp. 1-48.
- Conlee, C. T. (2010). ‘Dynamic properties of colloidal silica soils using centrifuge model tests and a full-scale field test’. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Antonio-Izarraras, V. M., Bandini, P. & López-Molina, J. A. (2008). ‘Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout’. *Can. Geotech. Journal*, 45, 1345-1355.
- DuPont. (1997). Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling. *product information*.
- El Mohtar C. S. (2008), “Pore fluid engineering: An autoadaptive design for liquefaction mitigation”, PhD Thesis, Purdue University
- Gallagher, P. M. (2000). ‘Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk’. *Ph.D. dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Gallagher, P. M., Conlee, S. T. & Rollins, K. M. (2007). ‘Full-Scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk’. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 2, 186–196.
- Gallagher, P. M. & Mitchell, J. K. (2002). ‘Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand’. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 9–12, 1017–1026.
- Gallagher, P. M., Pamuk, A., and Abdoun, T. (2007), “Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No.1, 0899-1561
- Gratchev, I. B. & Sassa, K. (2007). ‘Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values’. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 2, 271-279.
- Hunt, J., Ezzedine, S., Bourcier, W., Roberts, S. & Roberts, J. (2012). ‘Silica gel behavior under different EGS chemical and thermal conditions: an experimental study’. *Proceedings of the 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, SGP-TR-194.

- Kabashima, Y. & Towhata, I. (2000). 'Improvement of dynamic strength of sand by means of infiltration grouting'. *3rd International Conference on ground improvement techniques*, Singapore, 25-26 September.
- Kodaka, T., Ohno, Y. & Takyu, T. (2005). 'Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout'. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Conf. 16, Vol. 2, 401-404.
- Kodaka, T., Oka, F., Ohno, Y., Takyu, T. & Yamasaki, N. (2005). 'Modeling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand'. *Geomechanics, Testing, Modeling and Simulation, Geotechnical Special Publication No. 143*, ASCE, 205-216.
- Ladd, R.S. (1974) 'Specimen preparation and liquefaction of sands'. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100, No.GT10, pp. 1180-1184.
- Lin, Y. (2006). 'Colloidal silica transport mechanisms for passive site stabilization of liquefied soils'. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- Mollamahmutoglu, M. & Yilmaz, Y. (2010). 'Pre- and post-cyclic loading strength of silica-grouted sand'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 163, Issue GE6, 343-348.
- Papadopoulou, A. I. (2008). 'Laboratory investigation into the behaviour of silty sands under monotonic and cyclic loading'. *PhD dissertation*, Civil Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- Persoff, P., Moridis, J., Apps, J. A. & Pruess, K. (1998). 'Evaluation tests for colloidal silica for use in grouting applications'. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 21, No. 3, September, 264-269.
- Persoff, P., Apps, J., Moridis, J. & Whang, J. M. (1999). 'Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 6, Paper No. 16545
- Silco International. (2005). Colloidal Silica Technical Information.
- Spencer, L. M., Rix, G. J. & Gallagher, P. (2008), 'Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties'. *Proceedings, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (GSP 181), Sacramento, CA.
- 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
- Tabor, D., "The bulk modulus of rubber", *POLYMER*, volume 35, number 13, 1994, 2759
- Towhata, I. (2007). 'Developments of soil improvement technologies for mitigation of liquefaction risk'. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering - Invited Lectures*, 355-383, Springer.
- Treloar, L. R. G., "The Physics of rubber elasticity", Oxford University Press, 2005(3rd edition)
- Vipulanandan, C. & Ata, A. (2000). 'Cyclic and damping properties of silicate-grouted sand'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 7, 650-656.

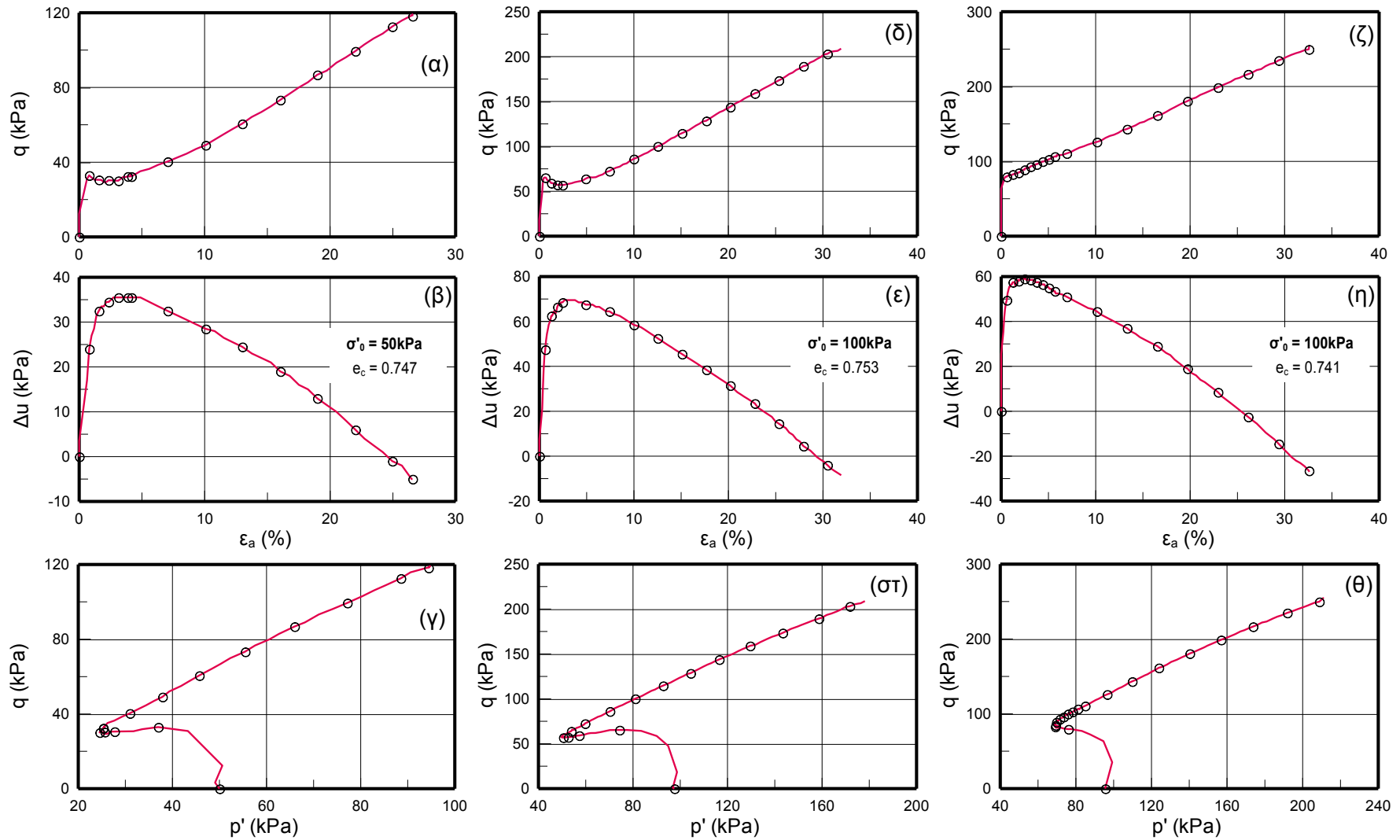
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

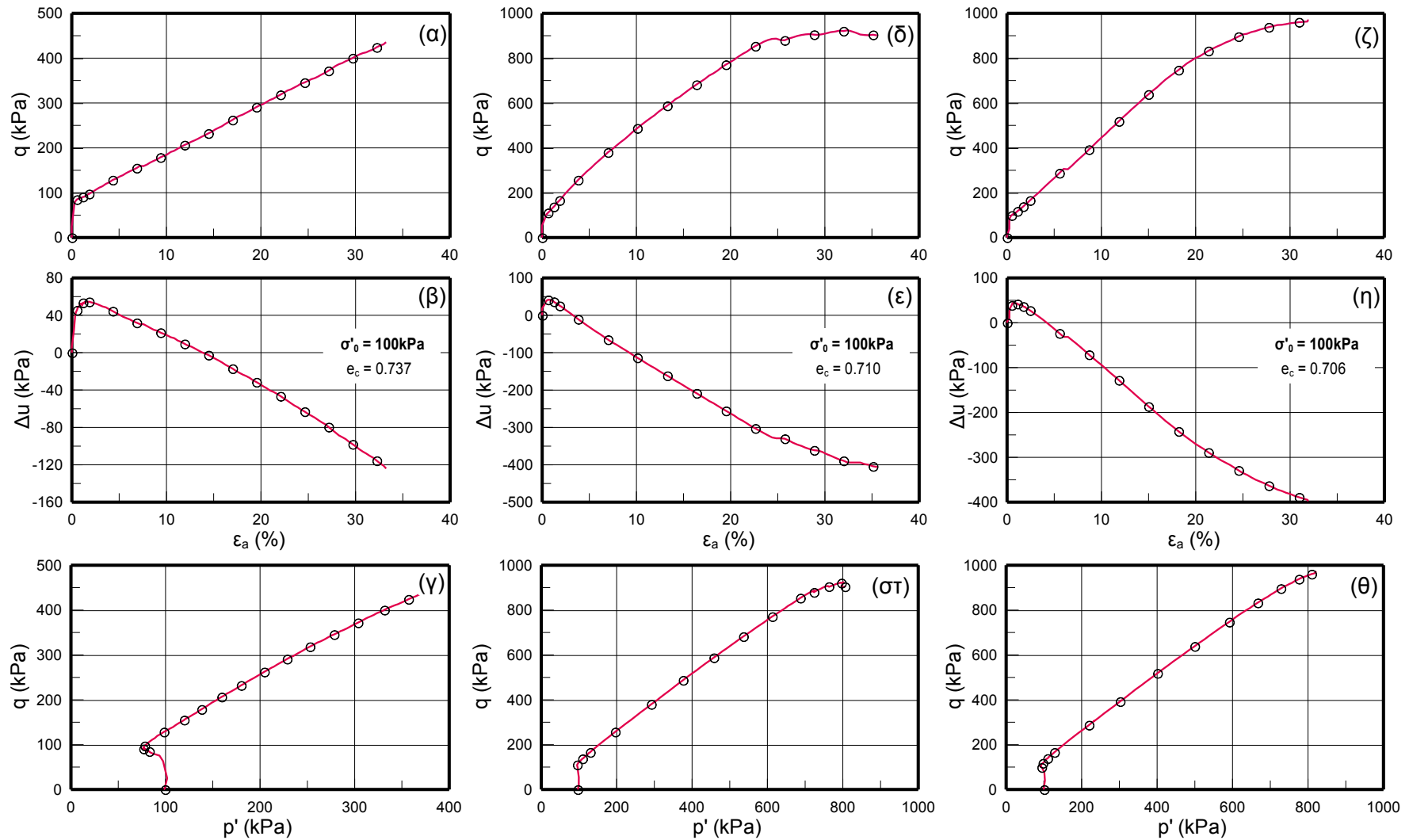
ΣΕ ΣΥΝΗΘΗ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ

(Α.Π.Θ.)



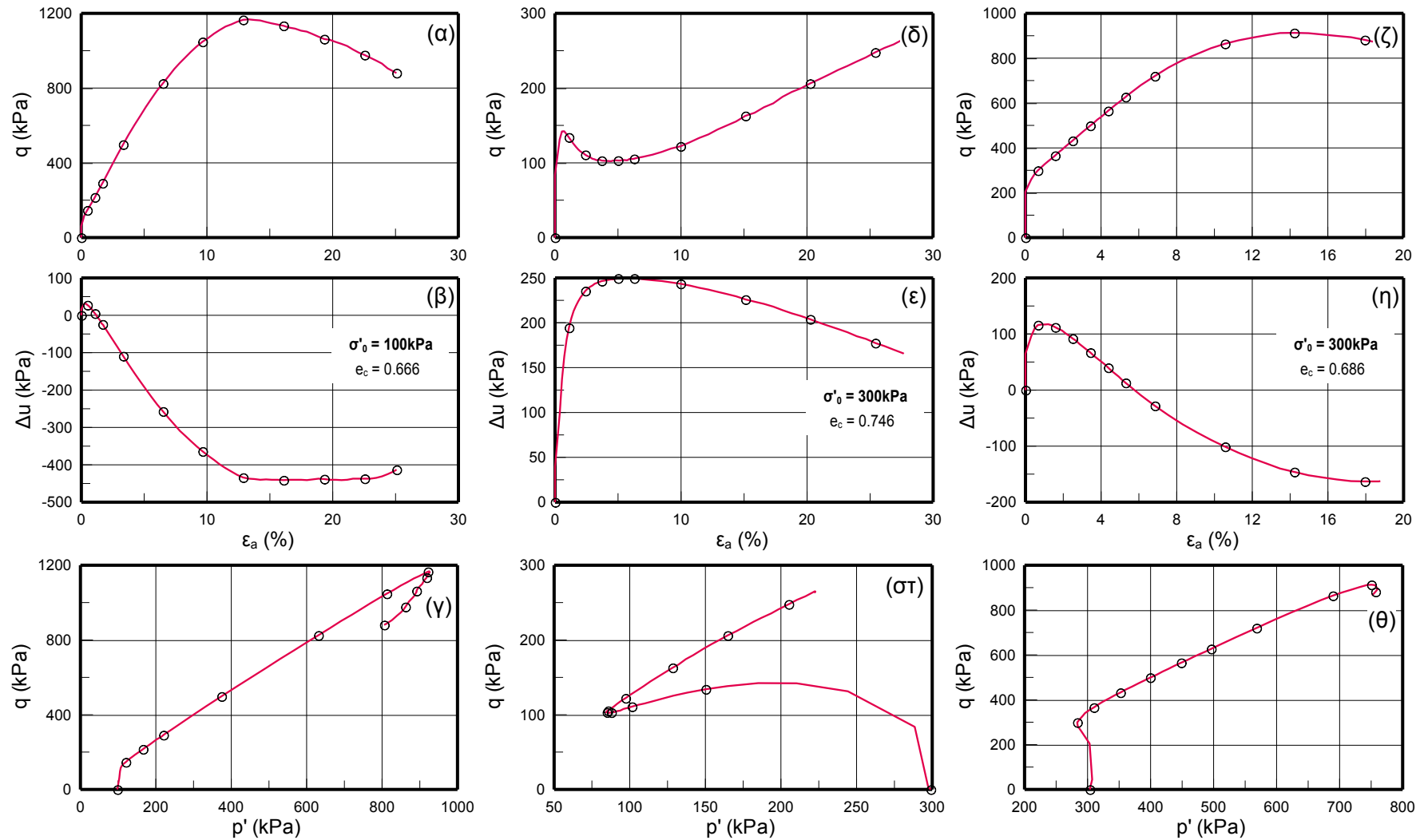
Σχήμα Α.1: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$: A-50-1 (α, β, γ), A-100-1 (δ, ε, στ) και A-100-2 (ζ, η, θ)

Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές



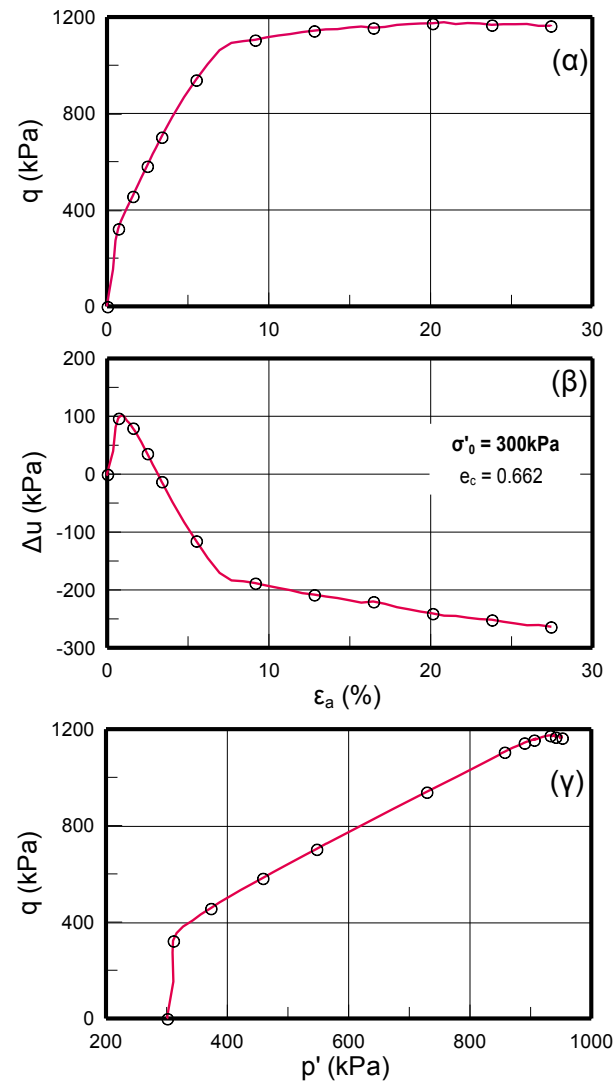
Σχήμα Α.2: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$:

A-100-3 (α, β, γ), A-100-4 (δ, ε, στ) και A-100-5 (ζ, η, θ)

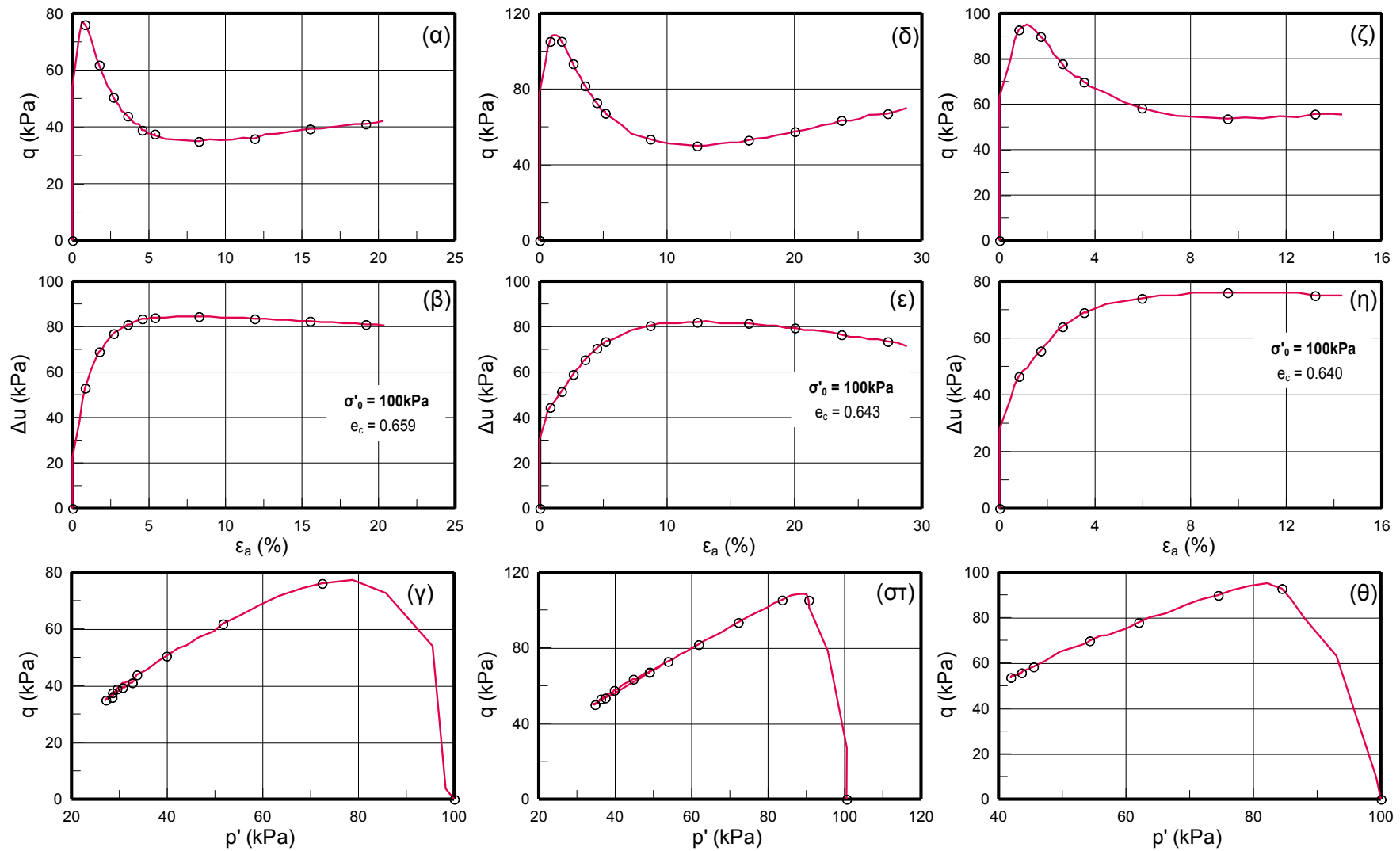


Σχήμα Α.3: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$:

A-100-6 (α, β, γ), A-300-1 (δ, ε, στ) και A-300-2 (ζ, η, θ)

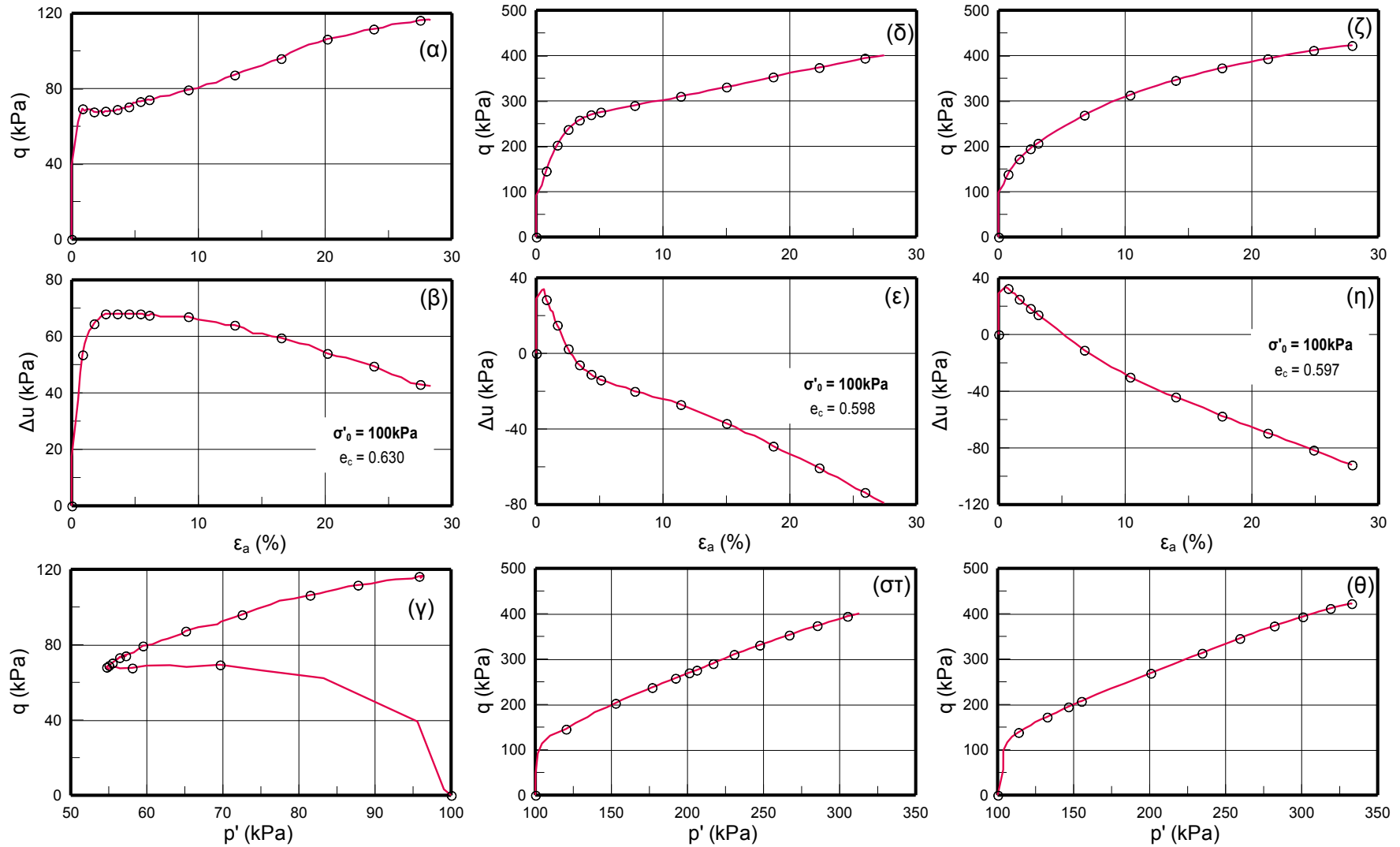


Σχήμα Α.4: Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής μονοτονικής φόρτισης στο μη-σταθεροποιημένο έδαφος με $f_c = 0\%$: A-300-3 (α,β,γ)



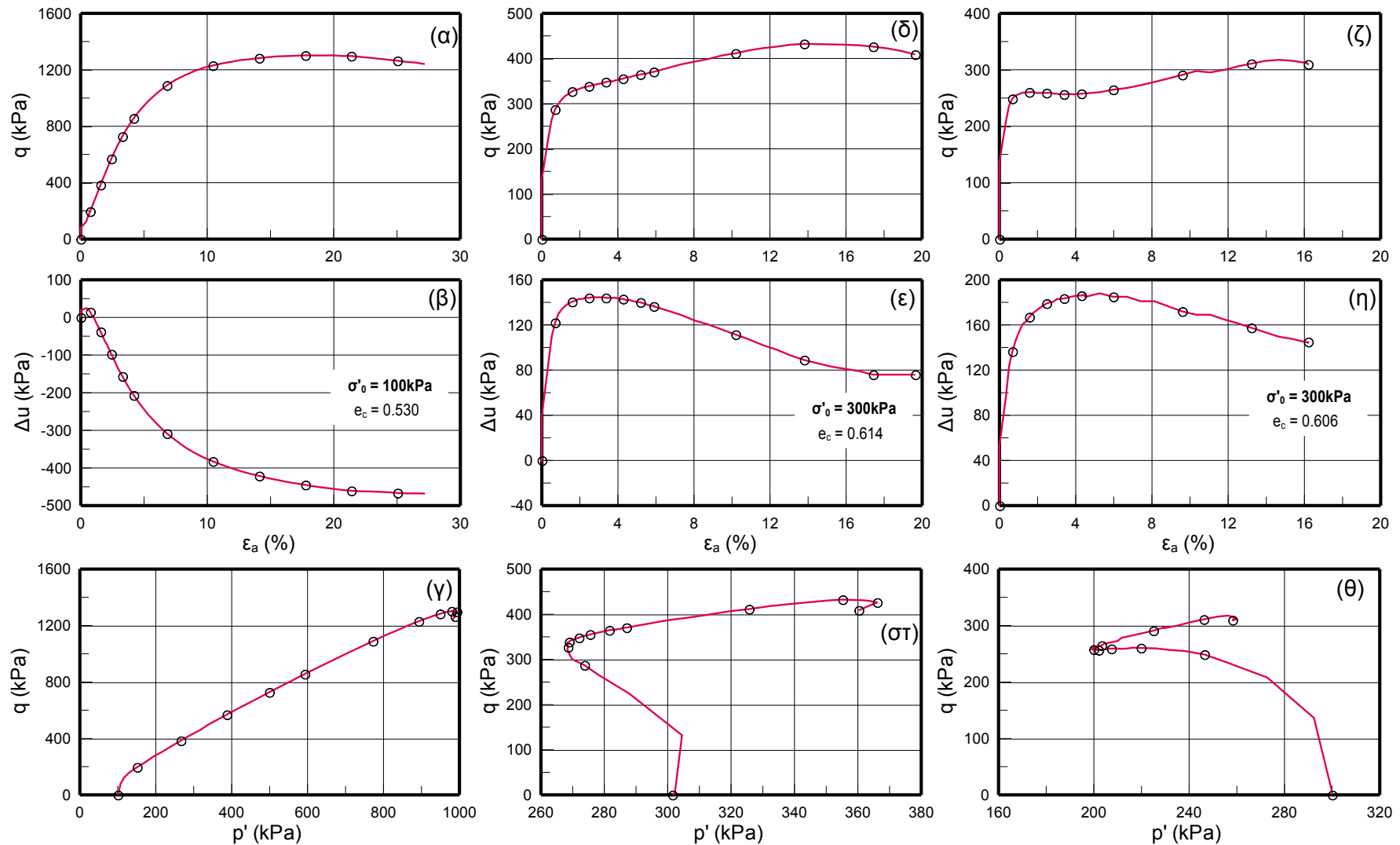
Σχήμα Α.5: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 10\%$: B-100-1 (α, β, γ), B-100-2 (δ, ε, στ) και B-100-3 (ζ, η, θ)

Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές



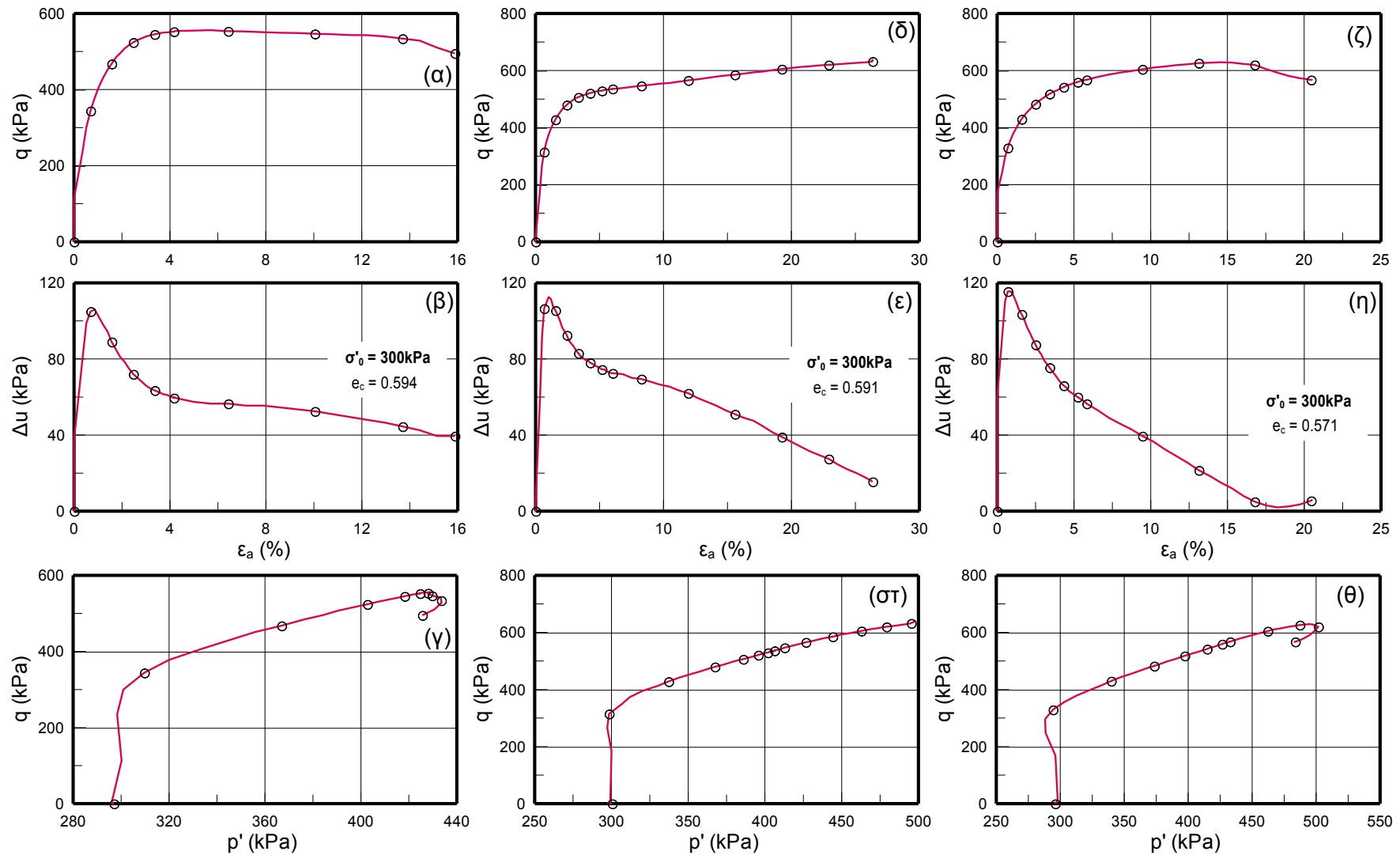
Σχήμα Α.6: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 10\%$: B-100-4 (α, β, γ), B-100-5 (δ, ε, στ) και B-100-6 (ζ, η, θ)

Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές

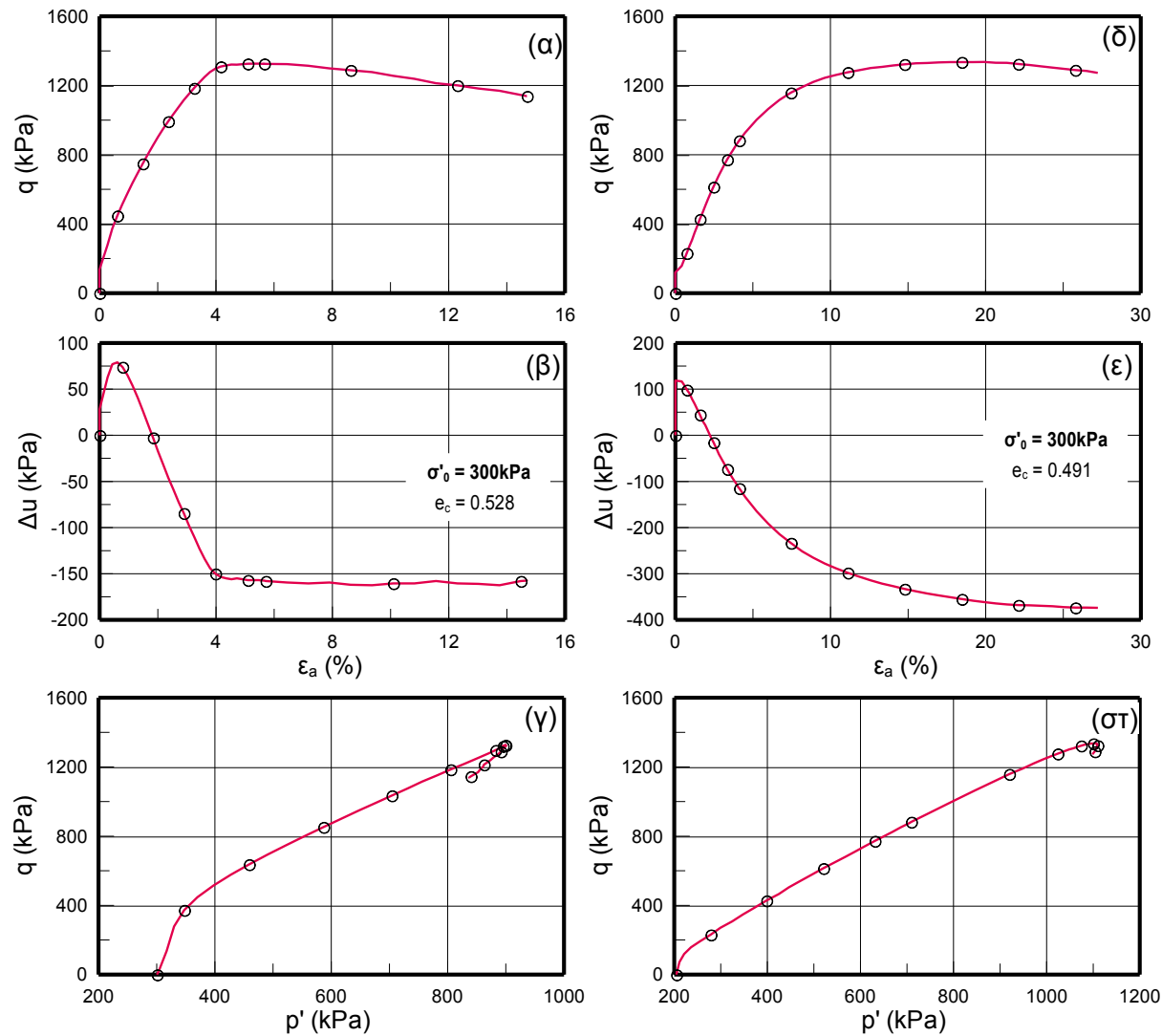


Σχήμα Α.7: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 10\%$:
B-100-7 (α, β, γ), B-300-1 (δ, ε, στ) και B-300-2 (ζ, η, θ)

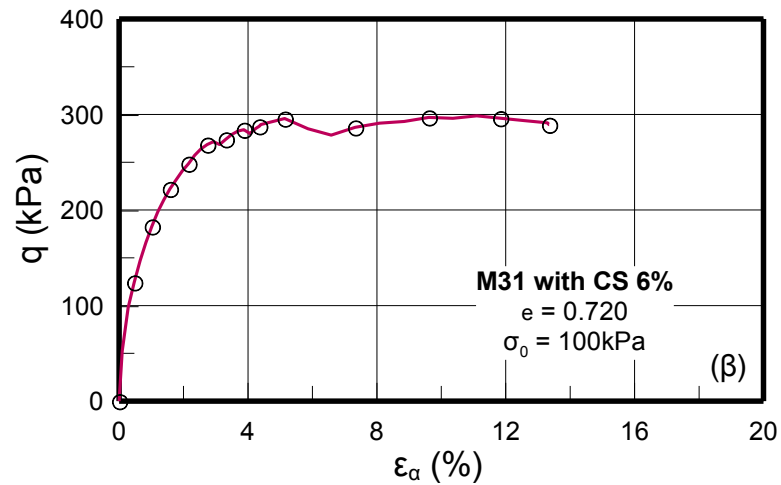
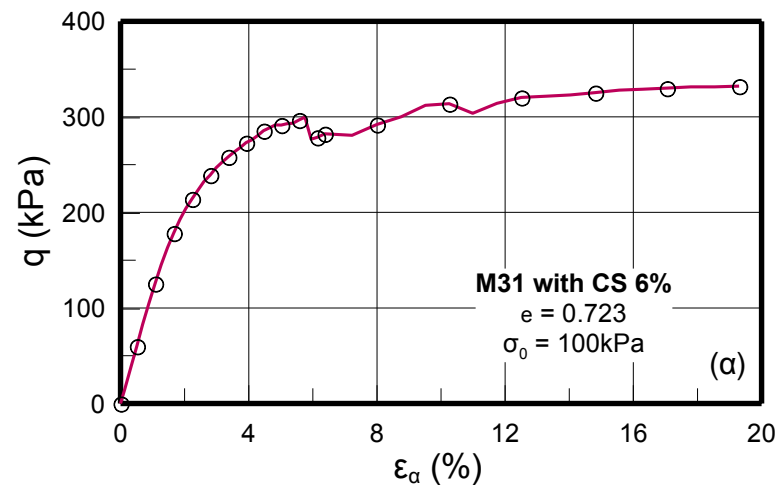
Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές



Σχήμα Α.8: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 10\%$:
B-300-3 (α, β, γ), B-300-4 (δ, ε, στ) και B-300-5 (ζ, η, θ)

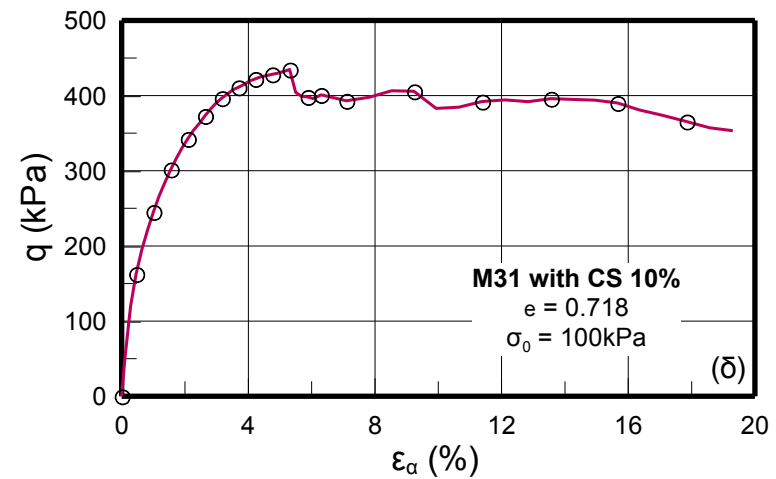
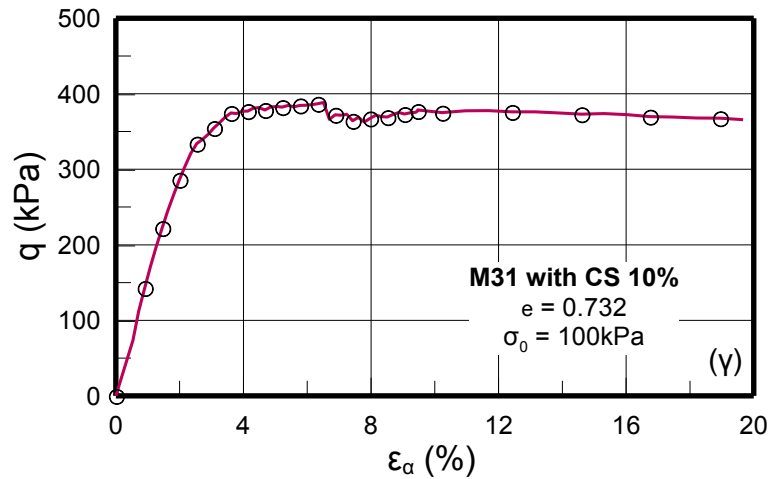
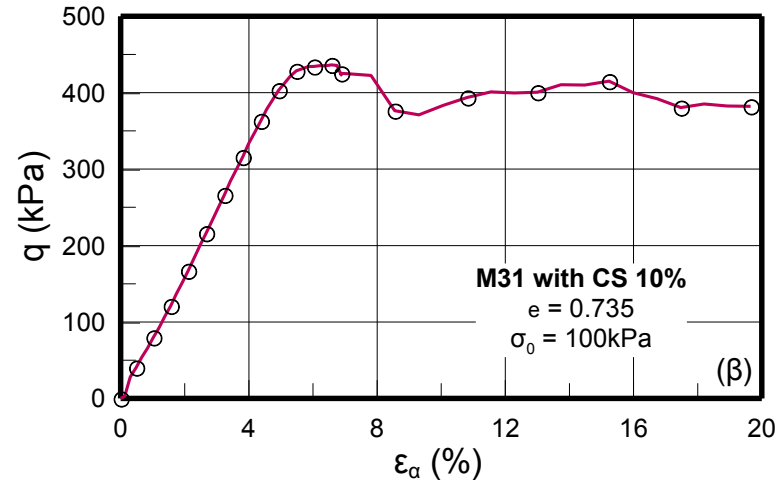
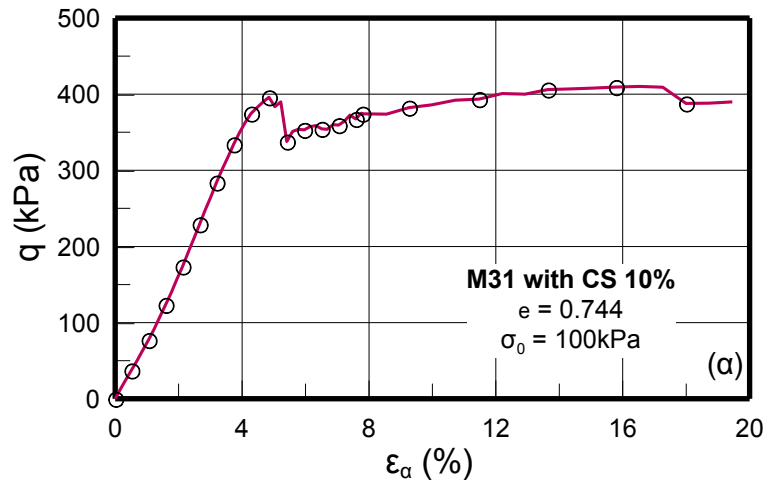


Σχήμα Α.9: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα μη-σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 10\%$: B-300-6 (α, β, γ) και B-300-7 (δ, ε, στ)



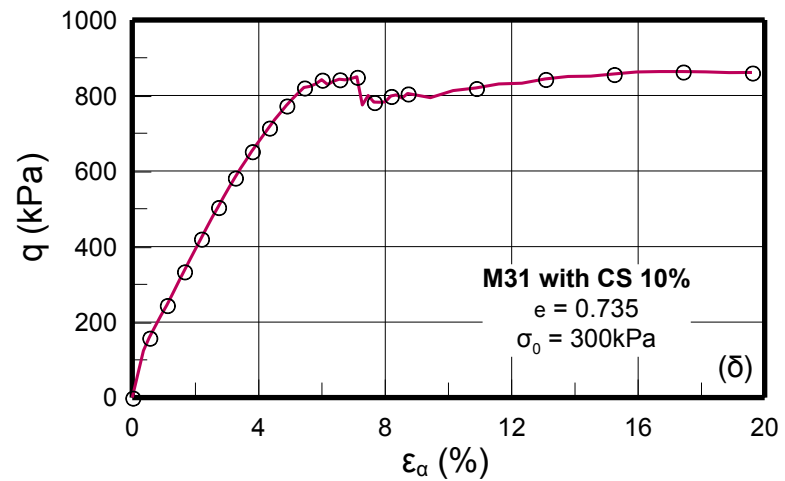
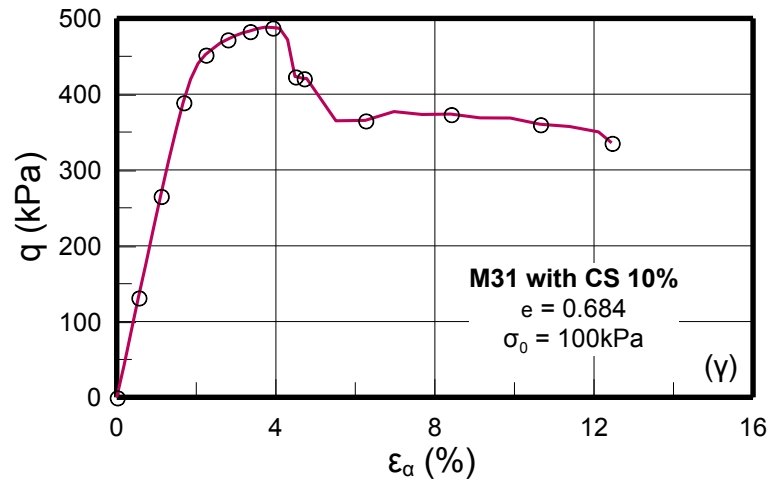
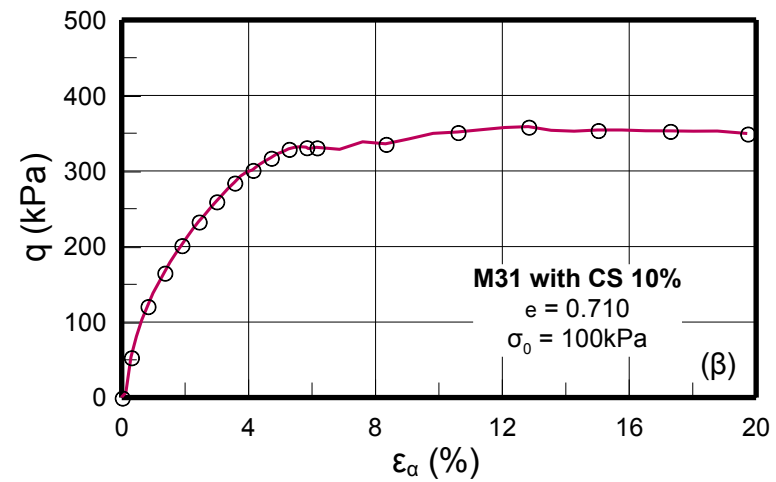
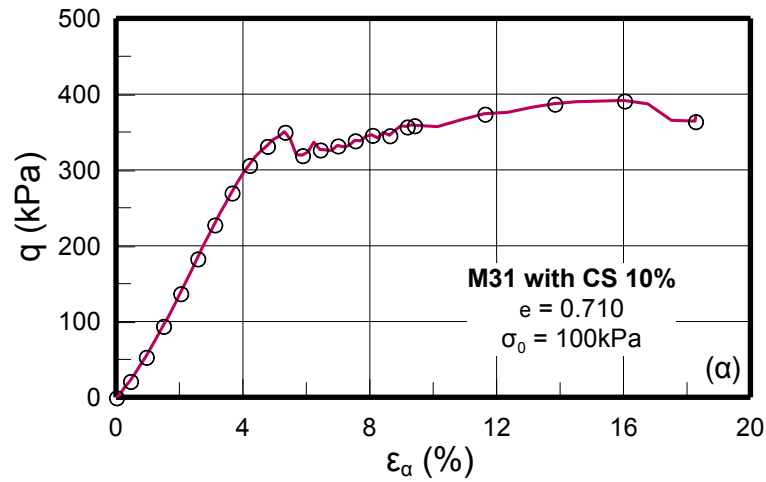
Σχήμα A.10: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και $CS = 6\%$: SA6-100-1 (α) και SA6-100-2 (β)

Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές

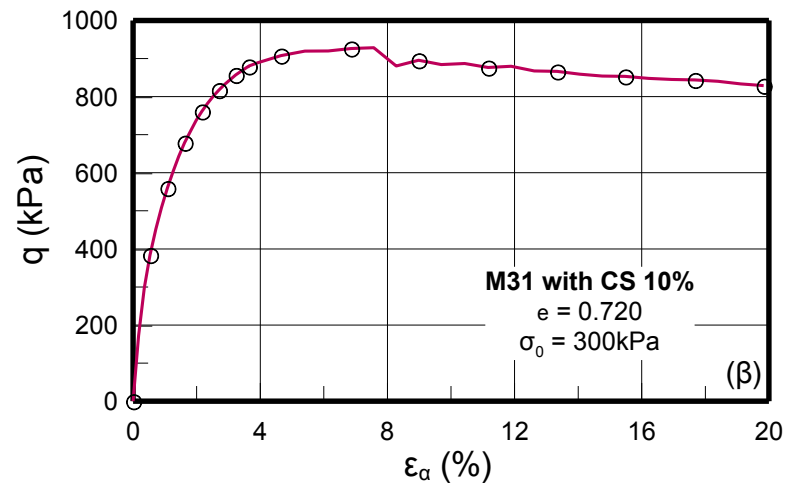
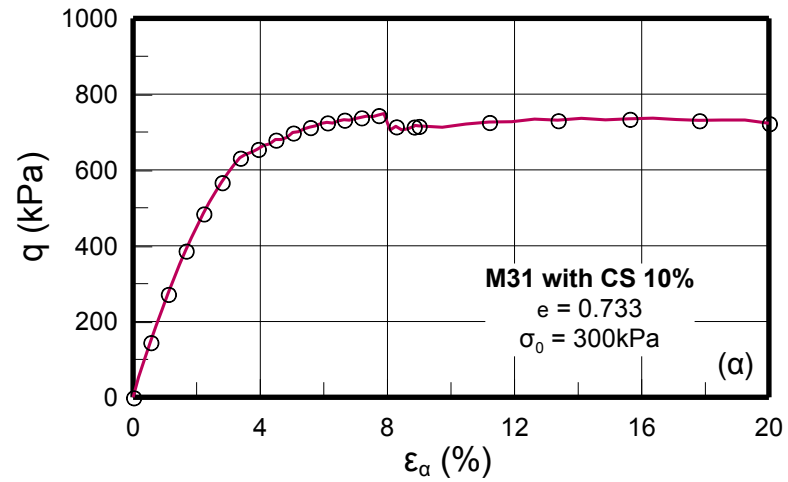


Σχήμα Α.11: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και $CS = 10\%$: SA10-100-1 (α), SA10-100-2 (β), SA10-100-3 (γ) και SA10-100-4 (δ)

Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές



Σχήμα A.12: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και $CS = 10\%$: SA10-100-5 (α), SA10-100-6 (β), SA10-100-7 (γ) και SA10-300-1 (δ)



Σχήμα A.13: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών μονοτονικής φόρτισης στα σταθεροποιημένα εδάφη με $f_c = 0\%$ και CS = 10% : SA10-300-2 (α) και SA10-300-3 (β)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

(ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ)

ΣΕ ΥΨΗΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΑΣΕΩΝ

(Ε.Μ.Π.)

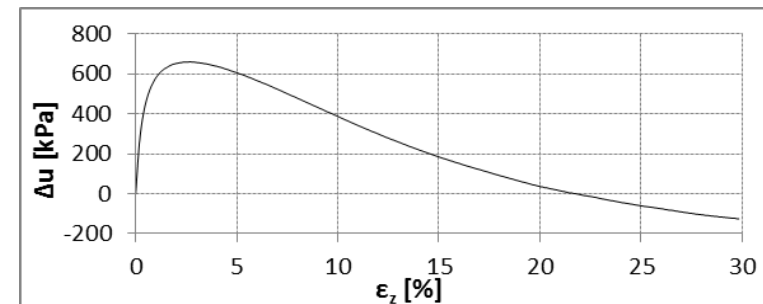
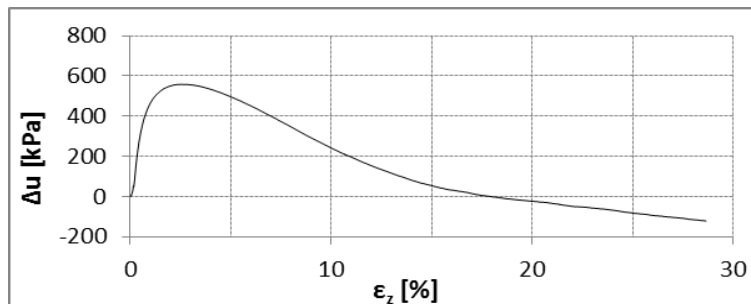
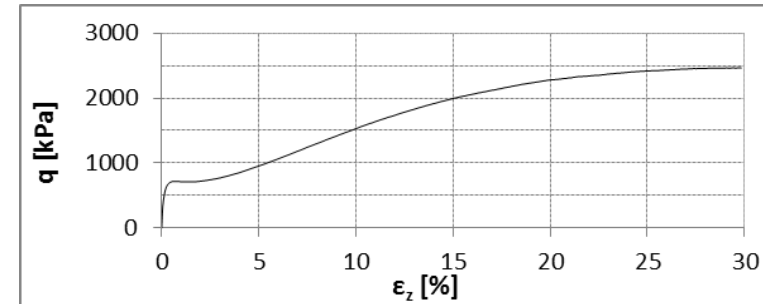
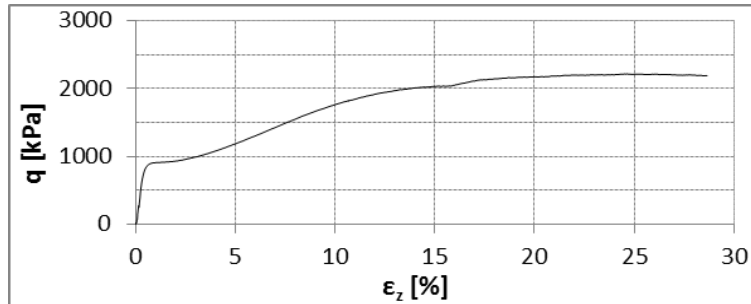
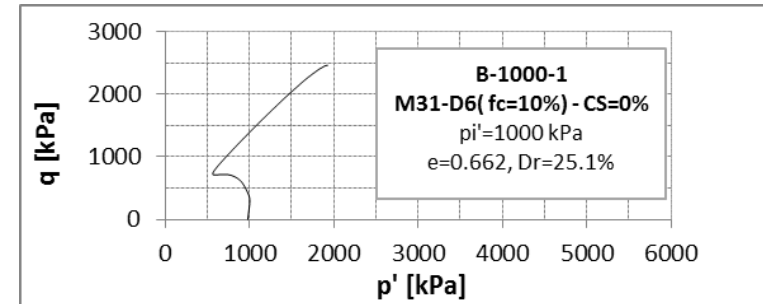
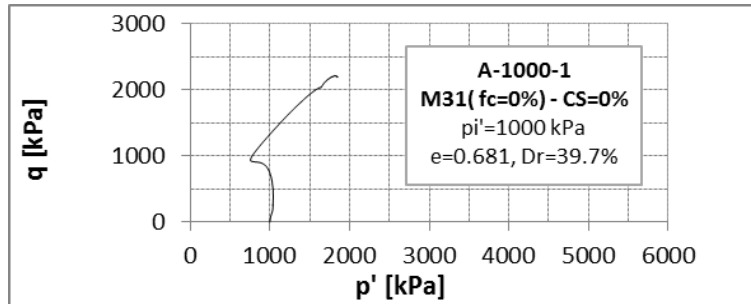
Παράρτημα Β1

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CU** ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ
ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Β1-1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CU τριαξονικής θλίψης σε μη σταθεροποιημένη άμμο Μ31 ($f_c=0\%$) και σε μη σταθεροποιημένη ιλυώδη άμμο ($f_c=10\%$)

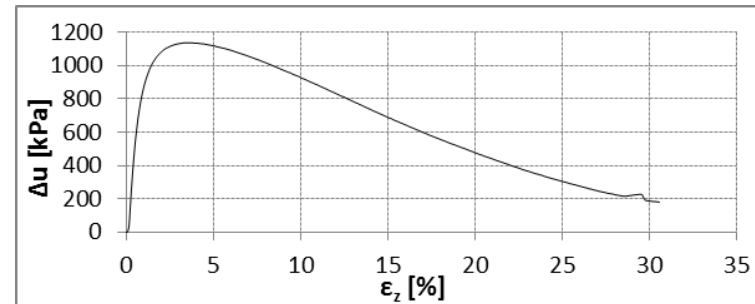
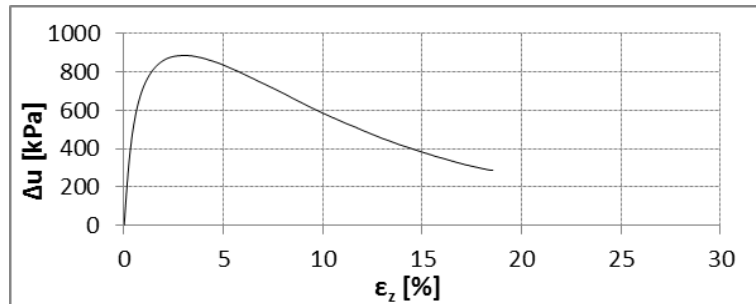
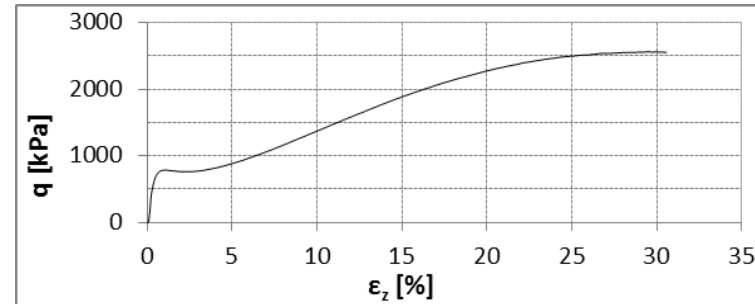
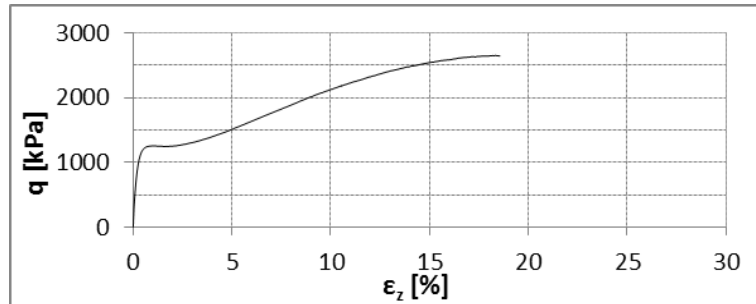
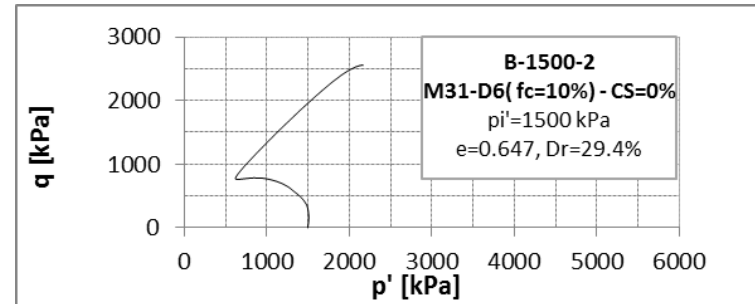
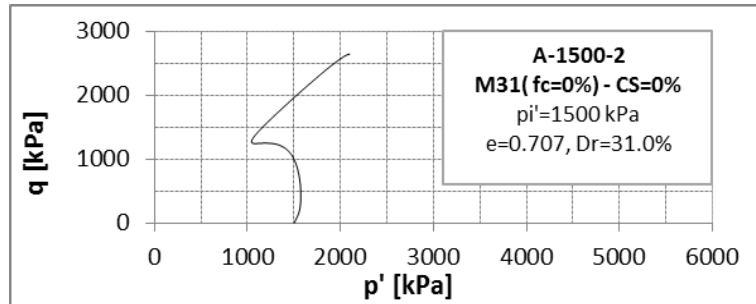
| δοκιμή | f_c (%) | p_i' (kPa) | e (-) | D_r (%) |
|----------|-----------|--------------|---------|-----------|
| A-1000-1 | 0 | 1000 | 0.681 | 39.7 |
| A-1500-2 | 0 | 1500 | 0.707 | 31.0 |
| A-2000-3 | 0 | 2000 | 0.715 | 28.4 |
| A-300-4 | 0 | 300 | 0.679 | 40.3 |
| B-1000-1 | 10 | 1000 | 0.662 |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

Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές

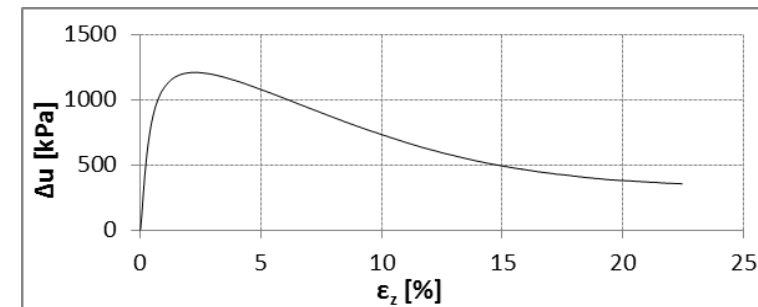
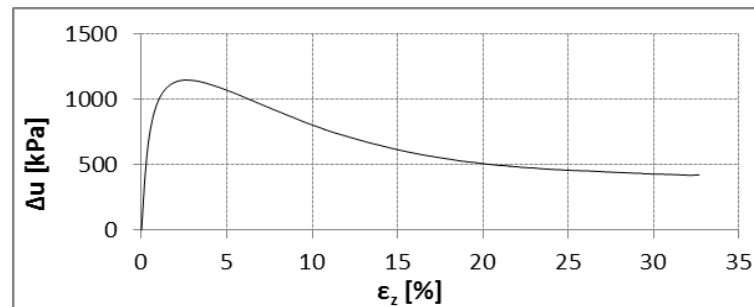
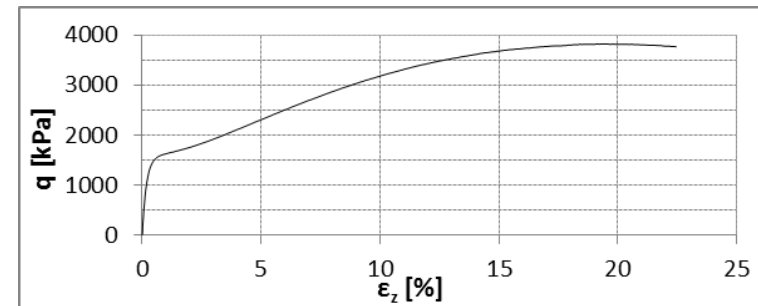
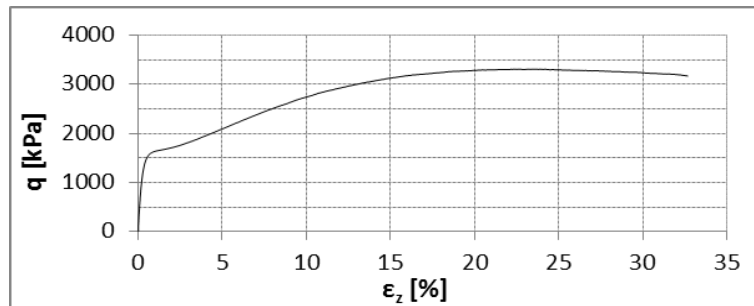
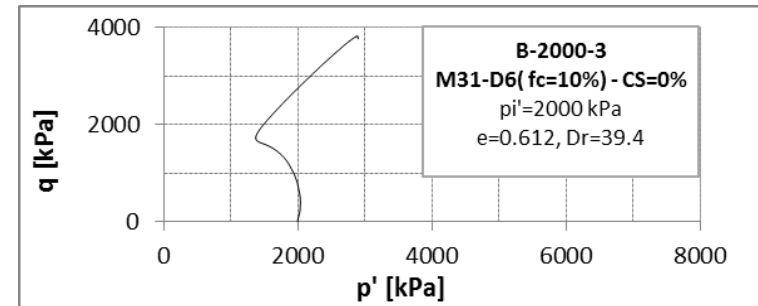
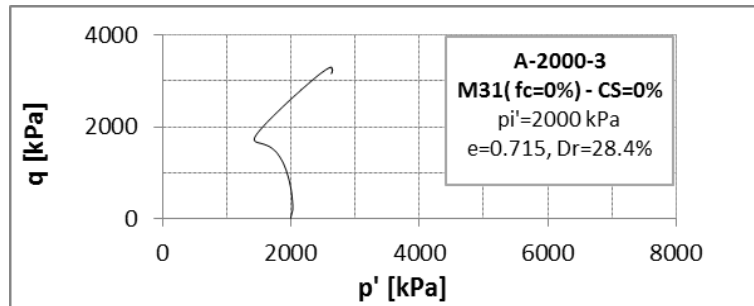


Σχήμα B1-1. Δοκιμή A-1000-1(αριστερή στήλη) και B-1000-1(δεξιά στήλη)

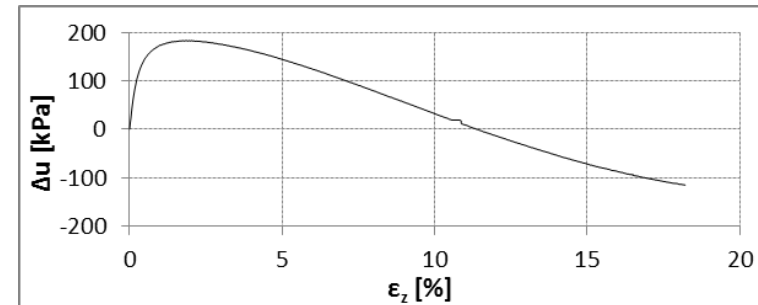
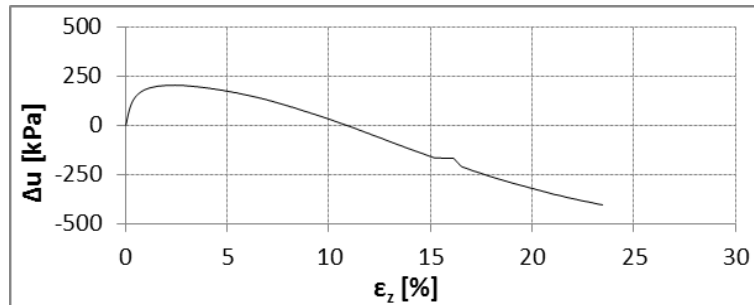
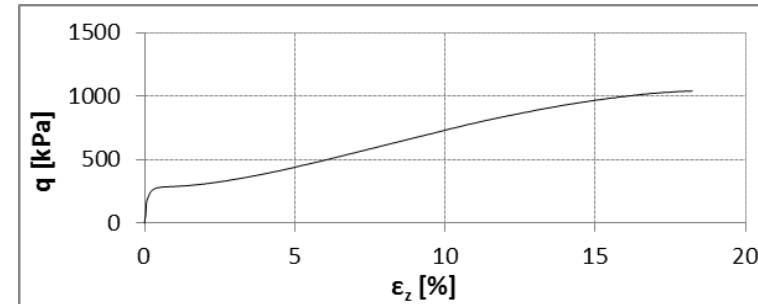
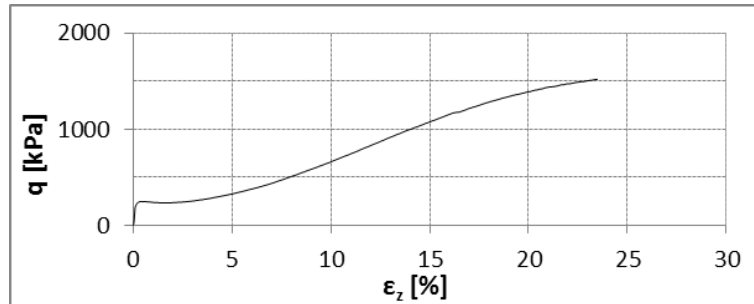
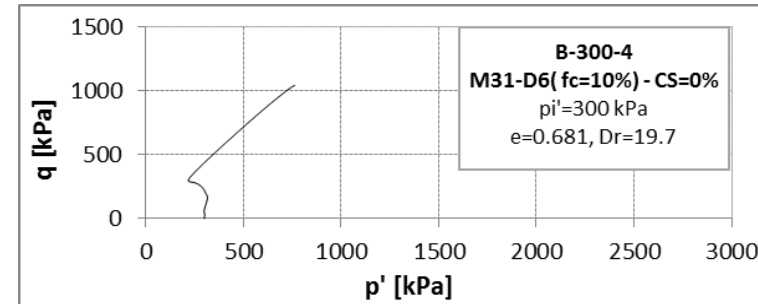
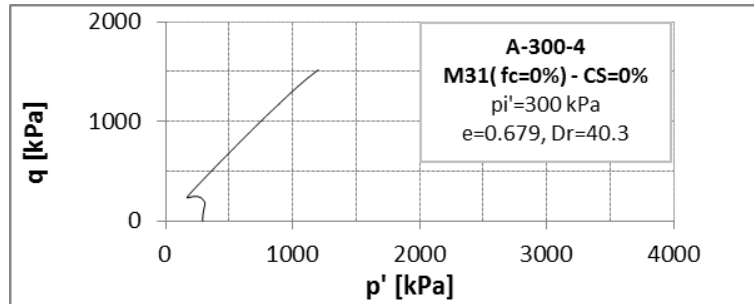
Παραδοτέο Π4: Τεχνική Έκθεση: Μονοτονικές (τριαξονικές) δοκιμές



Σχήμα B1-2. Δοκιμή A-1500-2(αριστερή στήλη) και B-1500-2(δεξιά στήλη)



Σχήμα B1-3. Δοκιμή A-2000-3(αριστερή στήλη) και B-2000-3(δεξιά στήλη)



Σχήμα B1-4. Δοκιμή A-300-4(αριστερή στήλη) και B-300-4(δεξιά στήλη)

Παράρτημα Β2

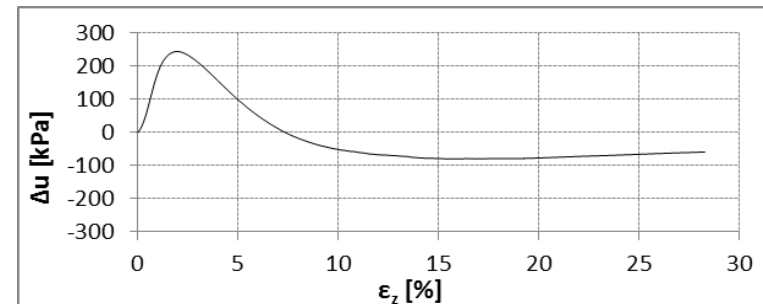
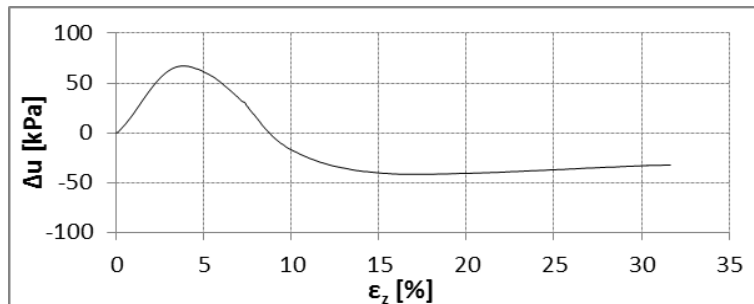
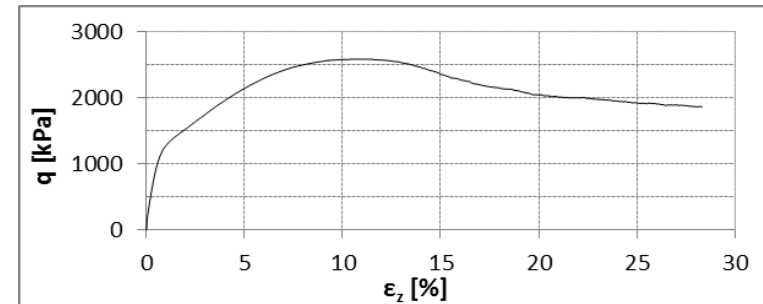
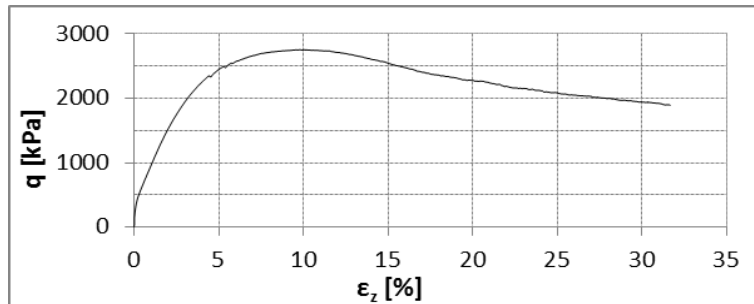
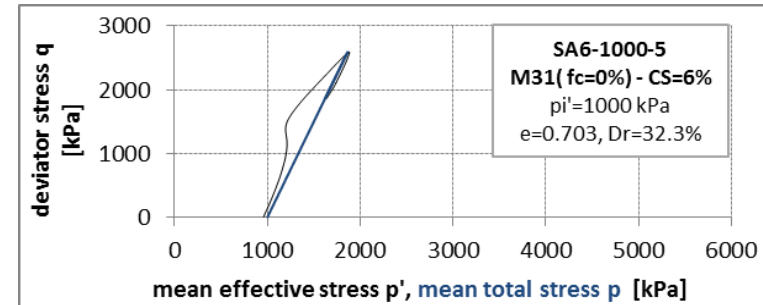
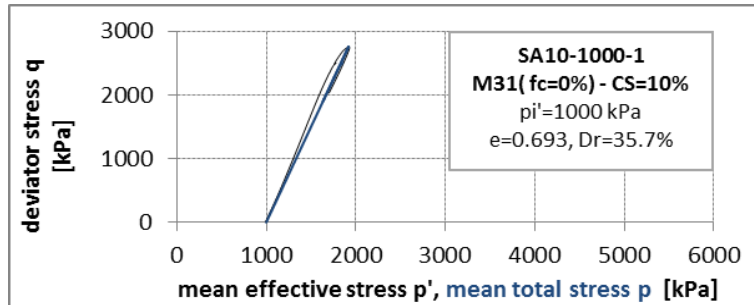
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CU** ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ
ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Β2-1. 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 ($f_c=10\%$)

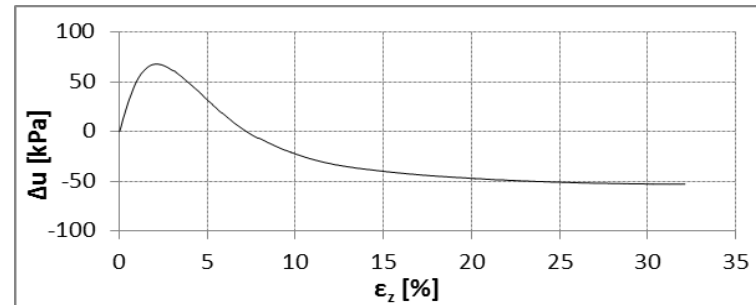
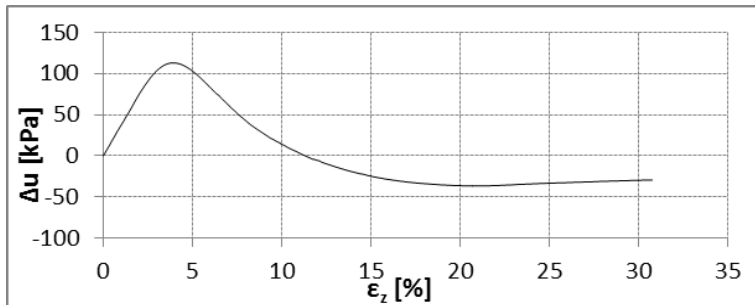
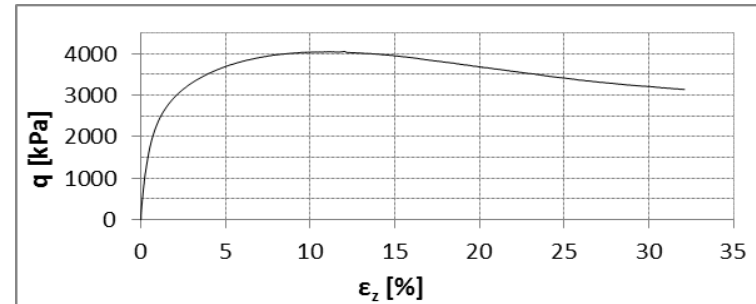
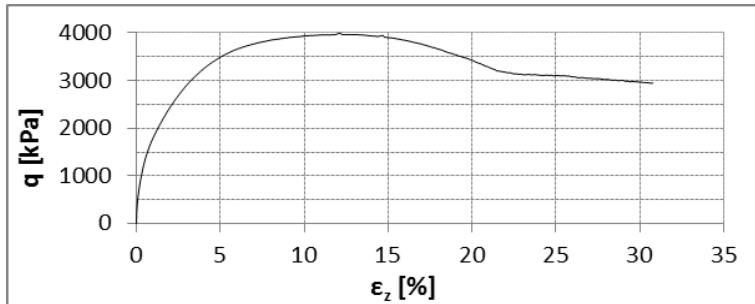
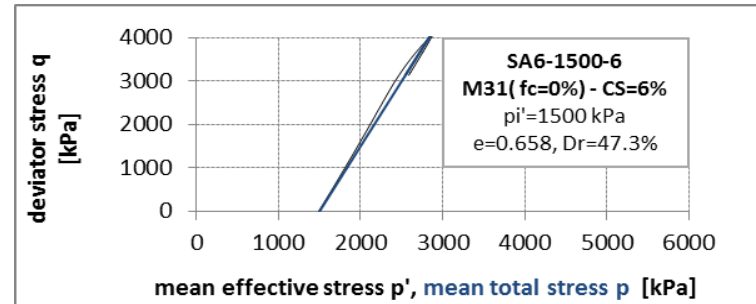
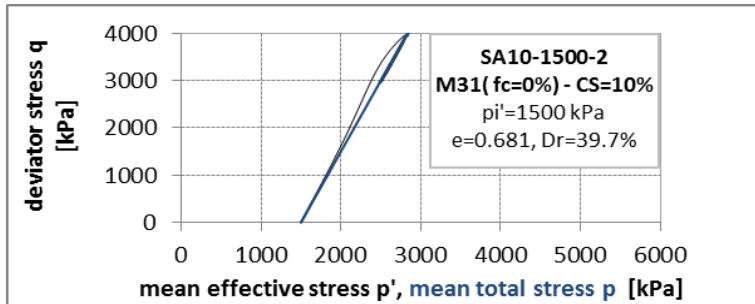
| Δοκιμή | CS (%) | f_c (%) | Ηλικία κατά τη δοκιμή (h) | p_i' (kPa) | u_i (kPa) | e (-) | D_r (%) |
|--------------------------|--------|-----------|---------------------------|--------------|-------------|-------|-----------|
| SA10-1000-1 | 10 | 0 | 50 | 1000 | 10 | 0.693 | 35.7 |
| SA10-1500-2 | 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:

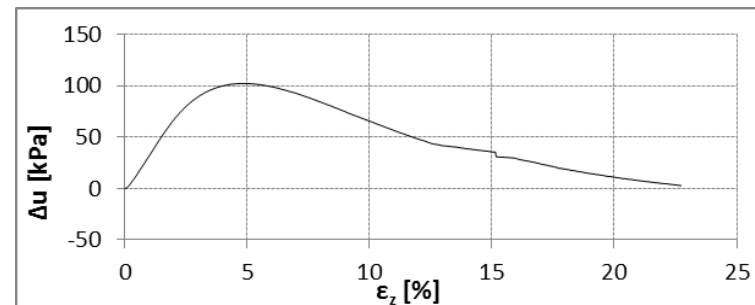
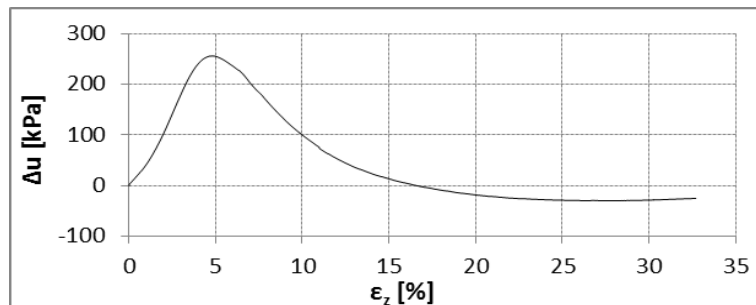
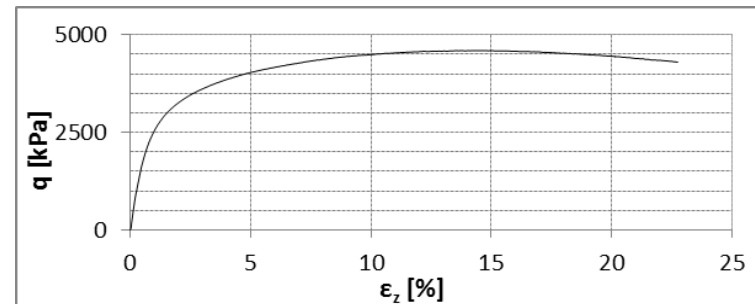
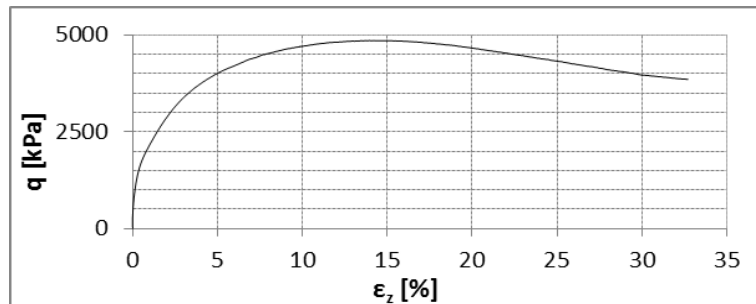
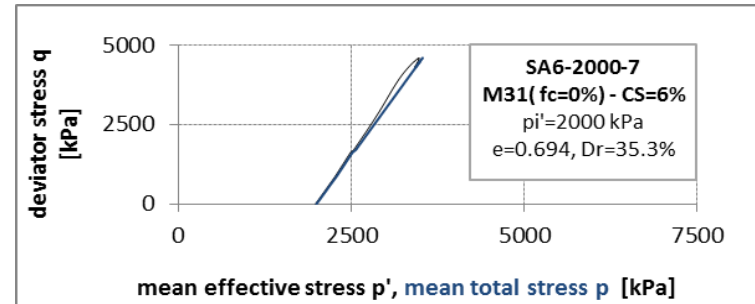
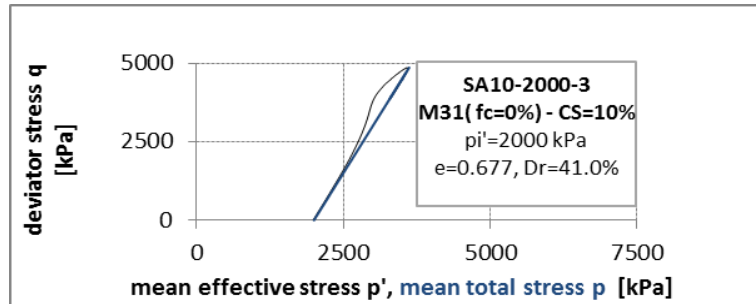
1. Το σταθεροποιημένο δοκίμιο υποβλήθηκε σε ισότροπη στερεοποίηση με μέτρηση του όγκου του νερού που εξέρρευσε από τους πόρους του εδάφους και του στερεού σκελετού της πυριτίας. Μακροπρόθεσμα(σε χρόνο 120 min) η εκροή νερού ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστοιχη του δοκιμίου καθαρής άμμου. Το 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.



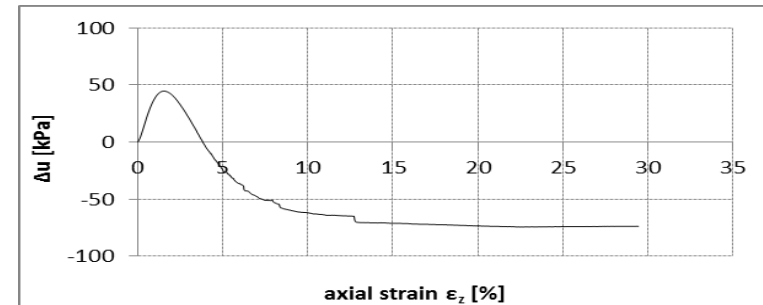
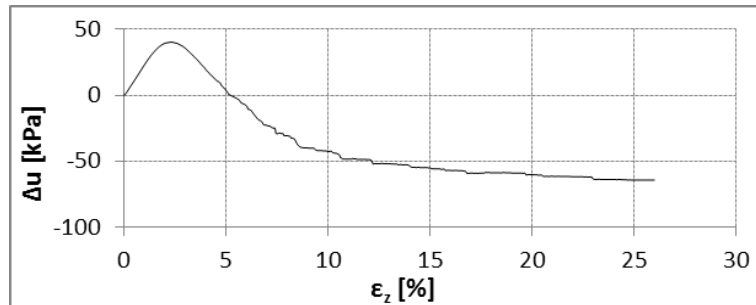
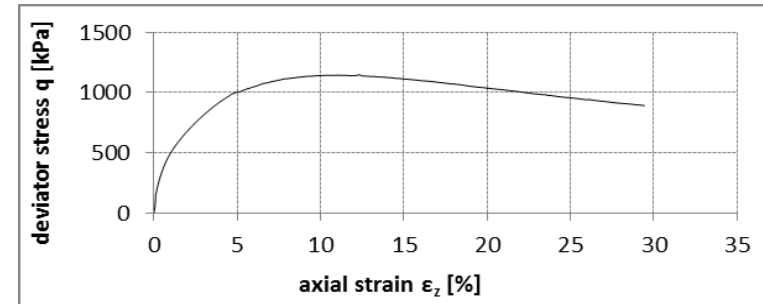
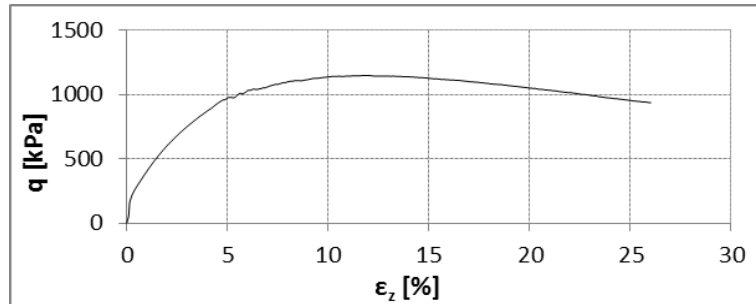
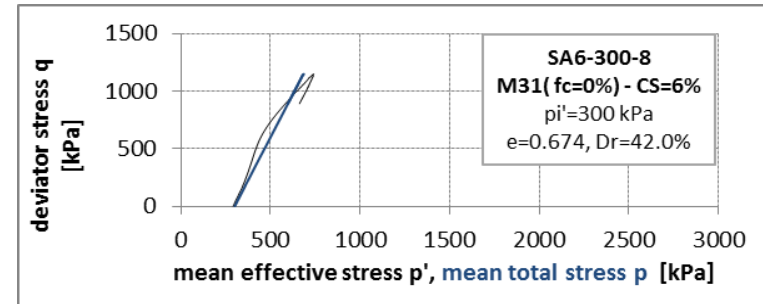
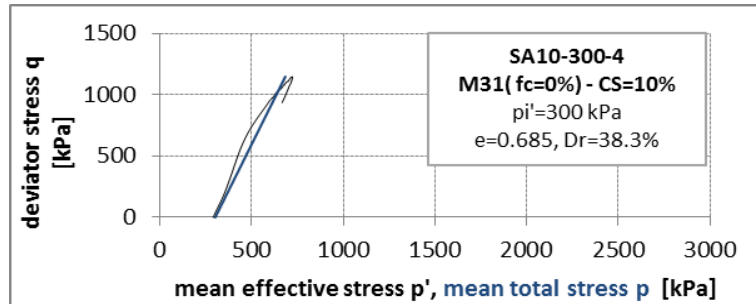
Σχήμα Β2-1. Δοκιμή SA10-1000-1(αριστερή στήλη) και SA6-1000-5(δεξιά στήλη)



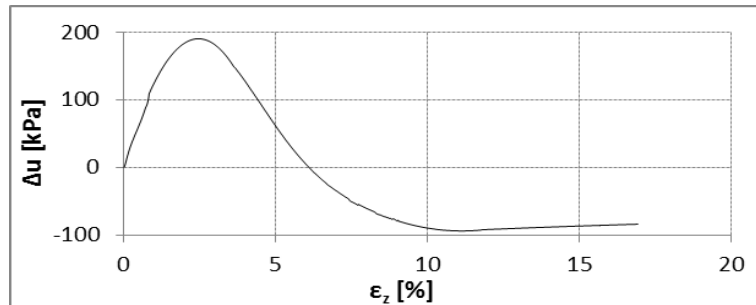
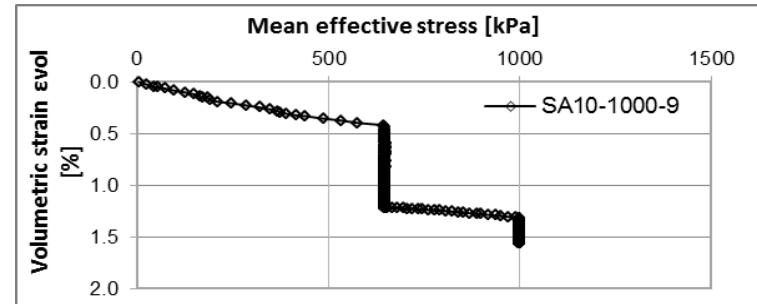
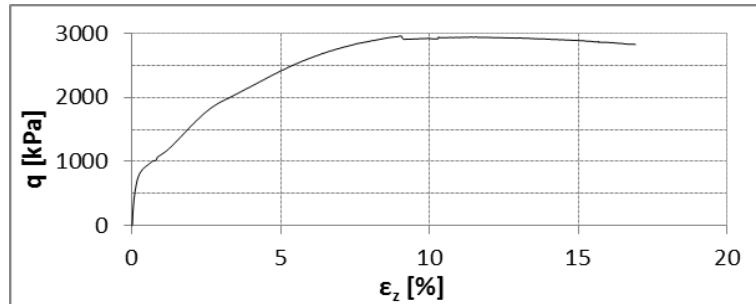
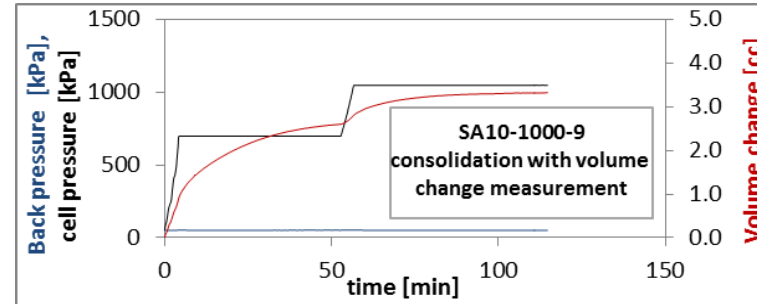
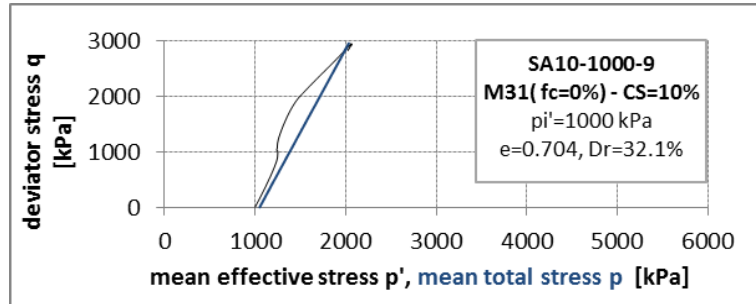
Σχήμα B2-2. Δοκιμή SA10-1500-2(αριστερή στήλη) και SA6-1500-6(δεξιά στήλη)



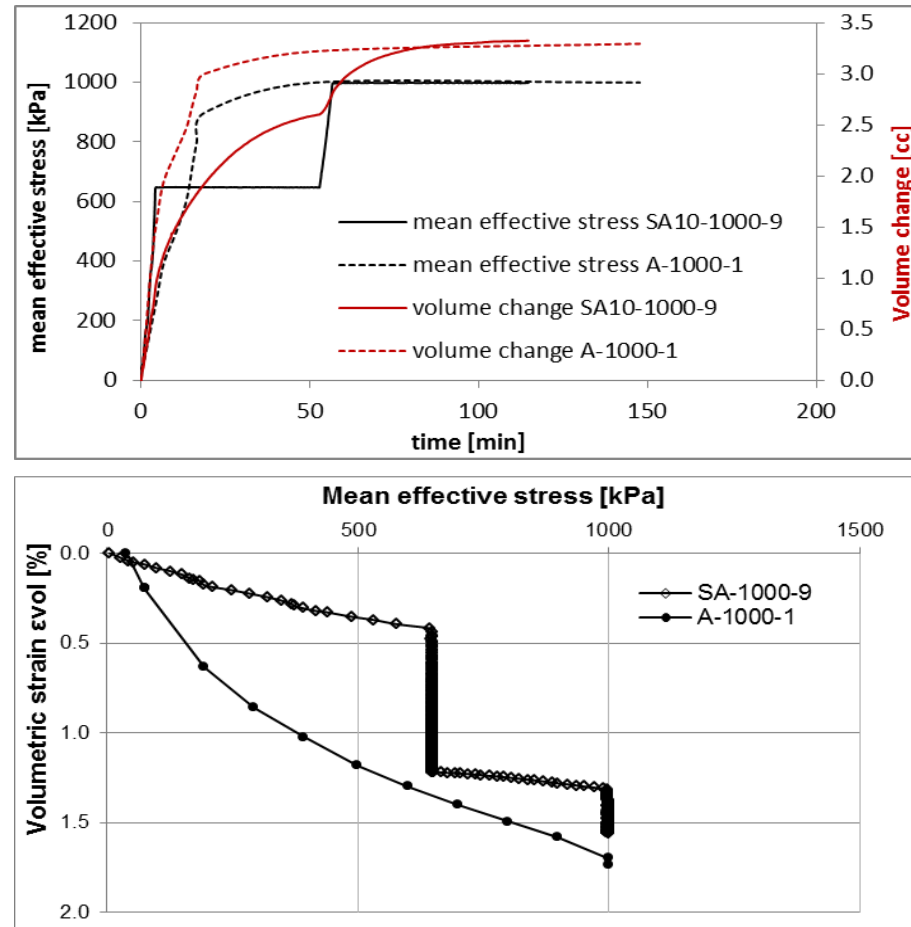
Σχήμα B2-3. Δοκιμή SA10-2000-3(αριστερή στήλη) και SA6-2000-7(δεξιά στήλη)



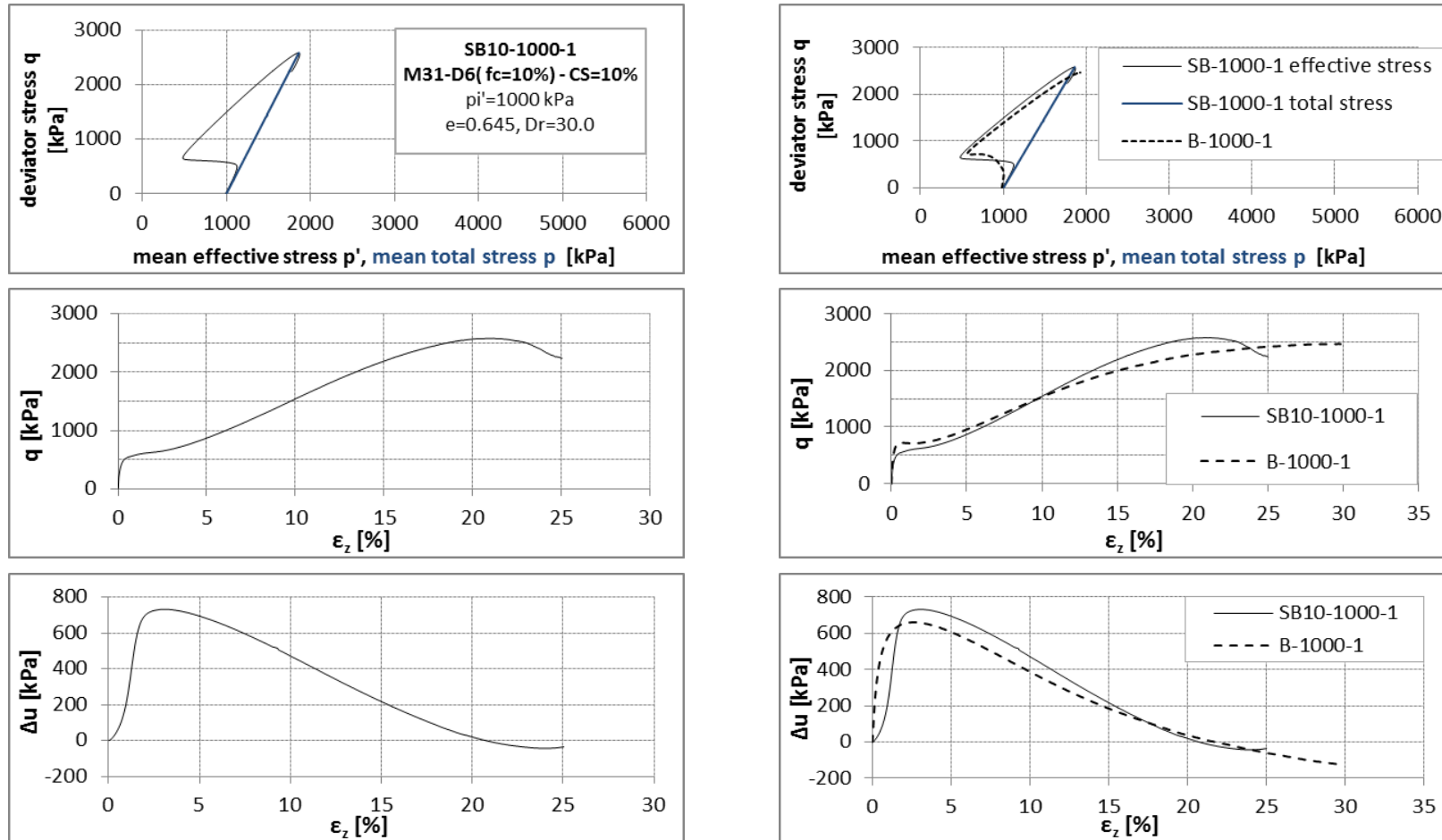
Σχήμα B2-4. Δοκιμή SA10-300-4(αριστερή στήλη) και SA6-300-8(δεξιά στήλη)



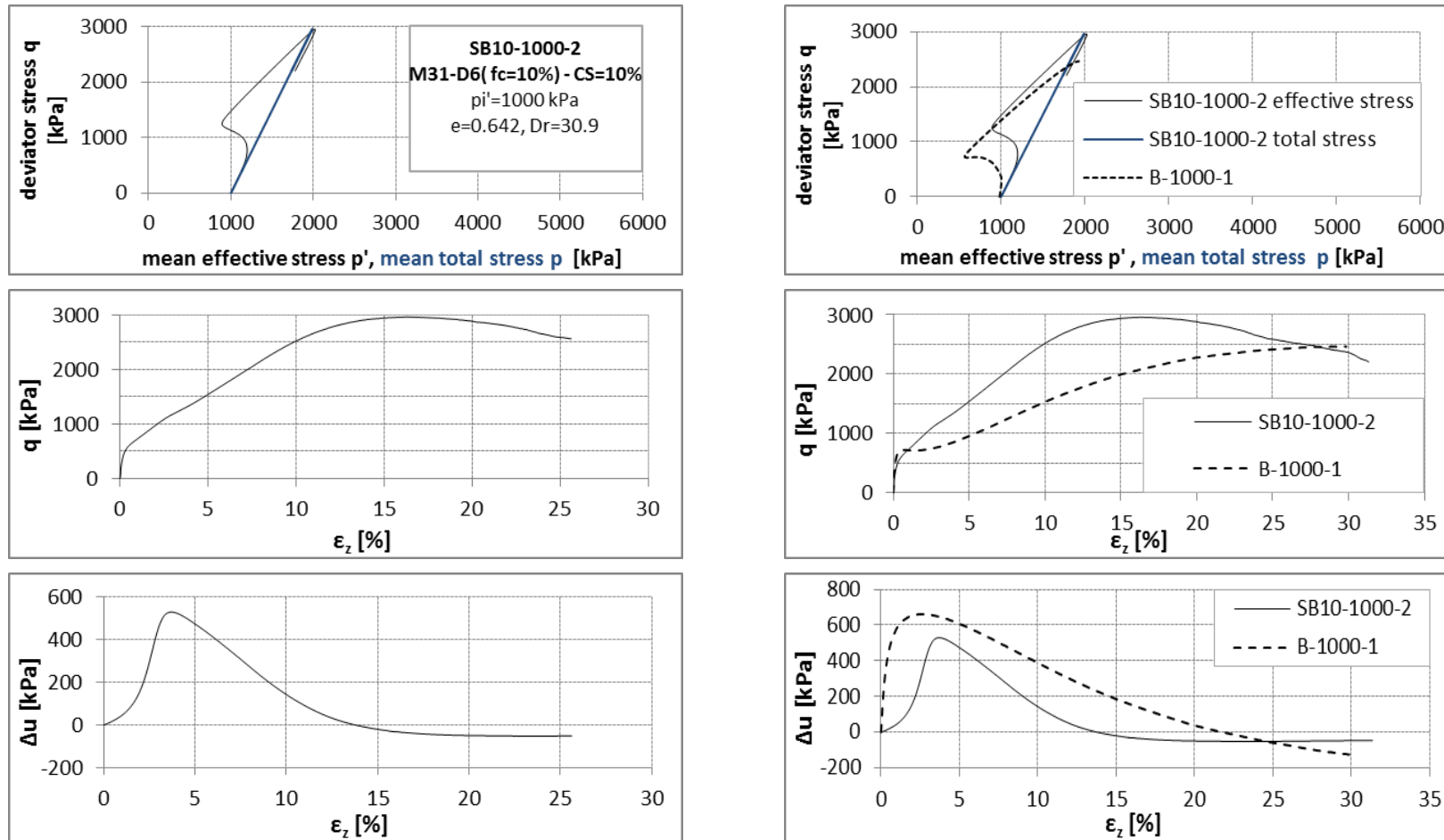
Σχήμα B2-5. Δοκιμή SA10-1000-9: Η στερεοποίηση έγινε με καταγραφή του όγκου νερού που εξέρρευσε από τους πόρους του εδάφους και του στερεού σκελετού της πυριτίας. Η διαδικασία της στράγγισης είναι αργή λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του δοκιμίου.



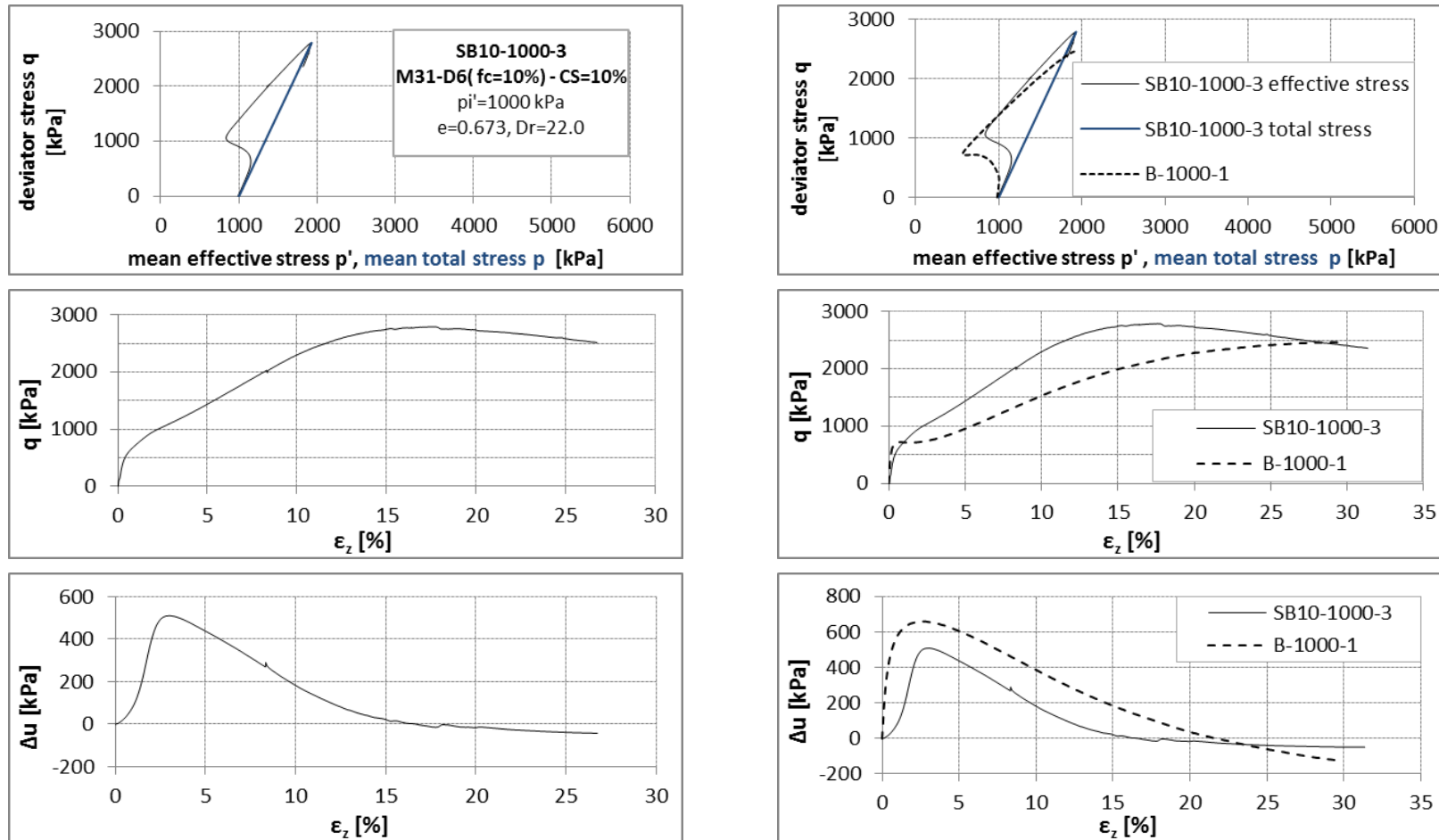
Σχήμα Β2-6. Η στερεοποίηση της φυσικής και της σταθεροποιημένης άμμου κατά τις δοκιμές SA-1000-9 και A-1000-1.



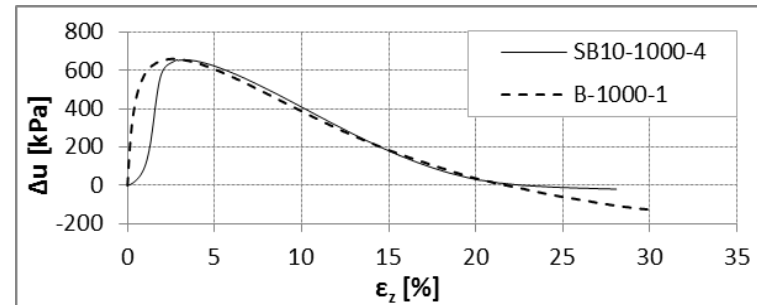
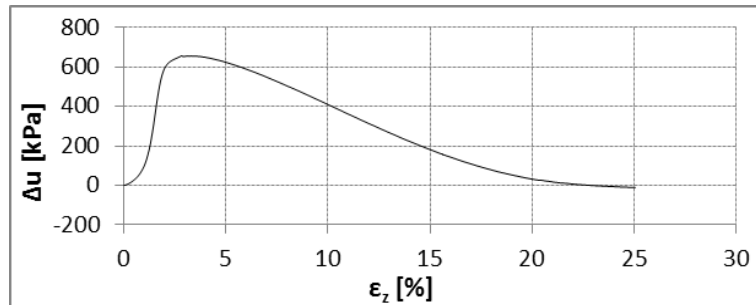
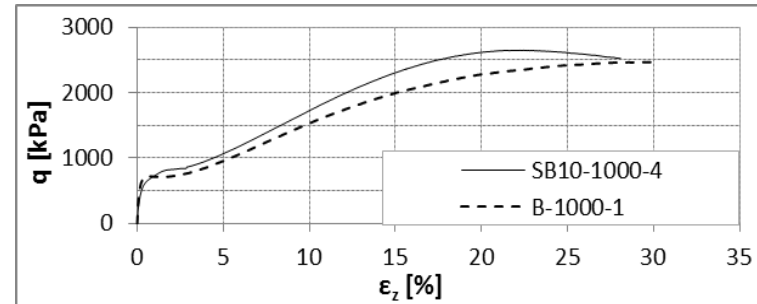
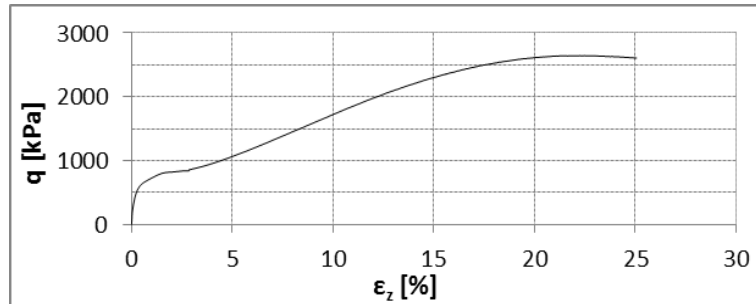
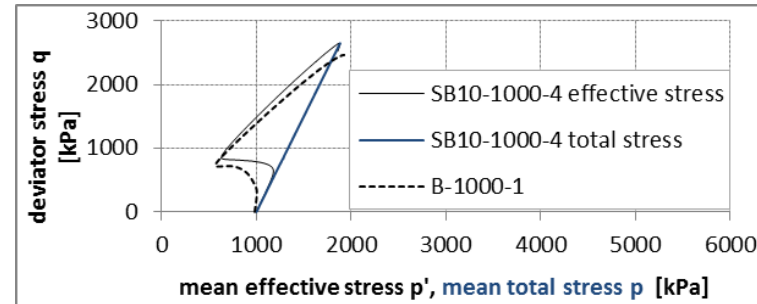
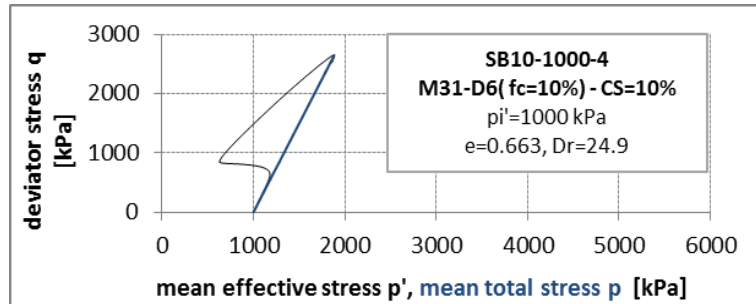
Σχήμα B2-7. Δοκιμή SB10-1000-1(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



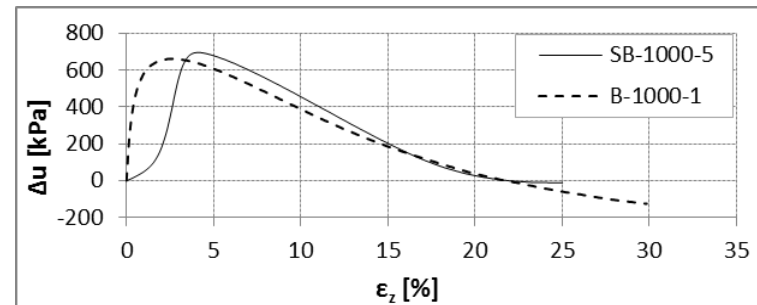
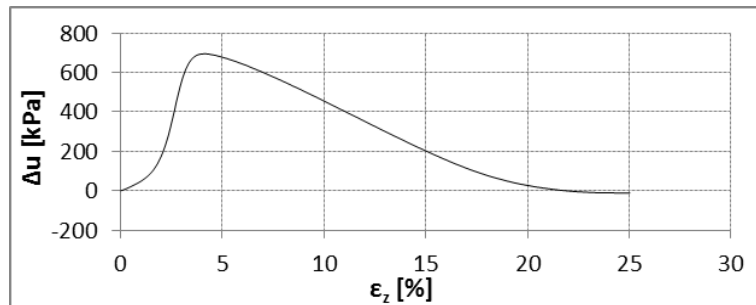
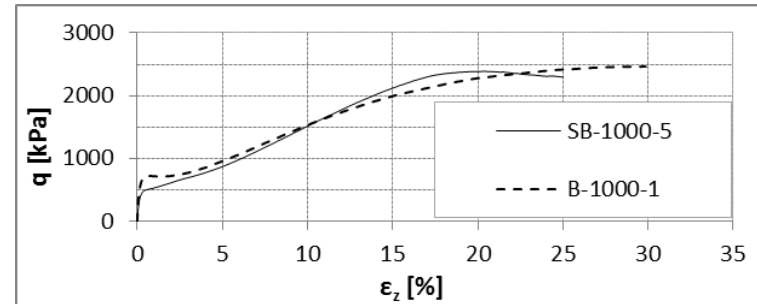
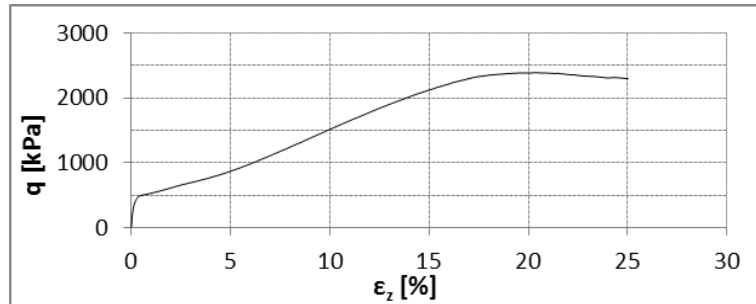
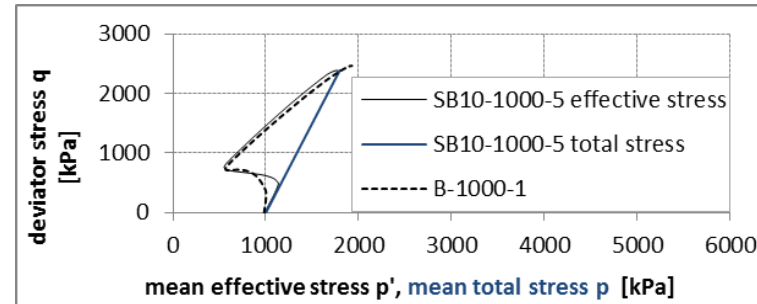
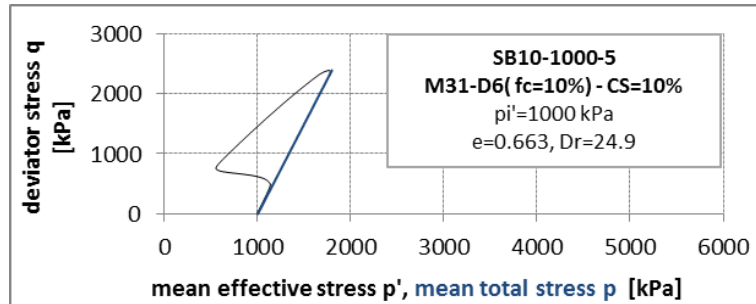
Σχήμα B2-8. Δοκιμή SB10-1000-2(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



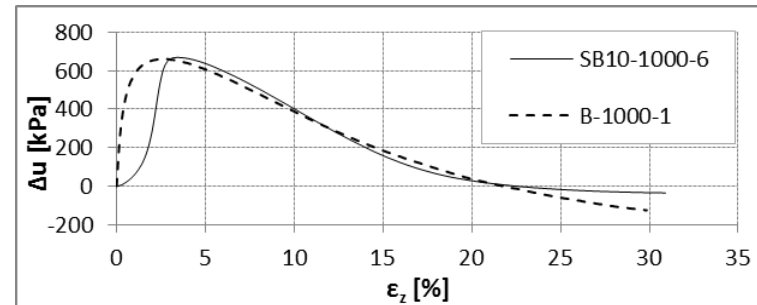
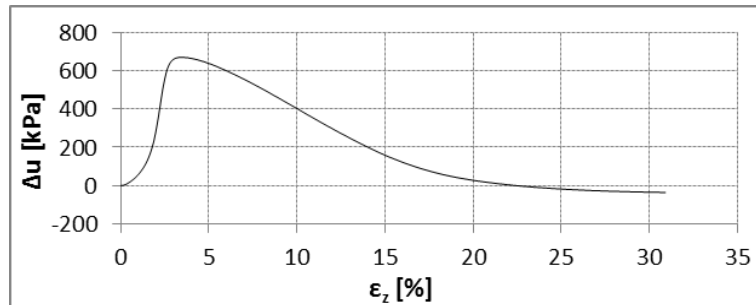
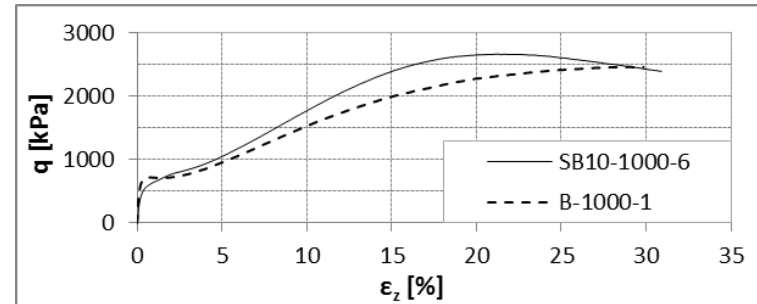
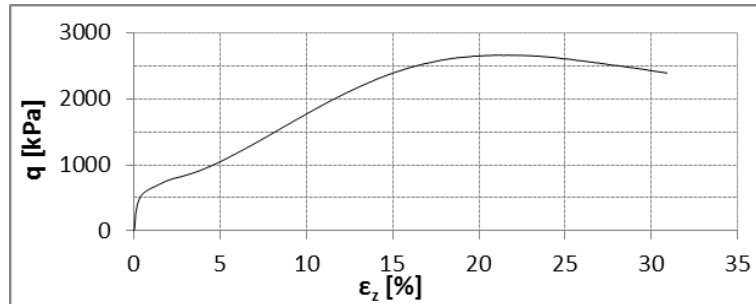
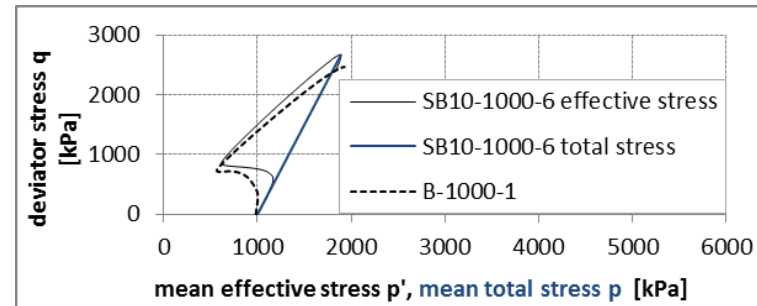
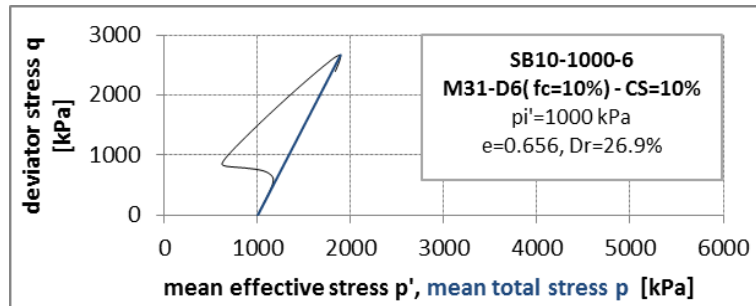
Σχήμα B2-9. Δοκιμή SB10-1000-3(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



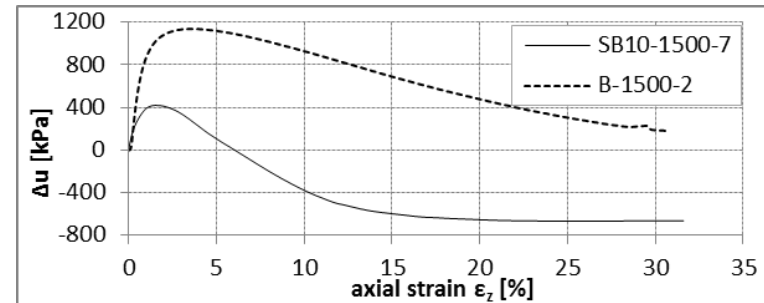
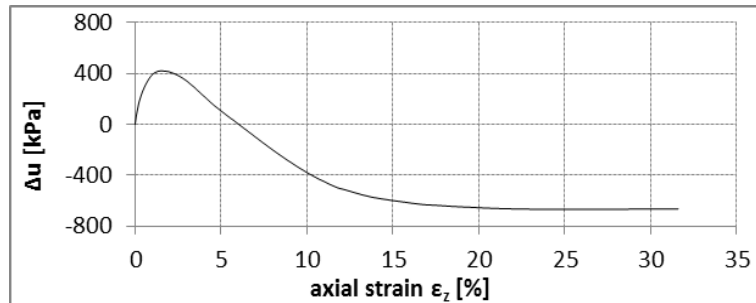
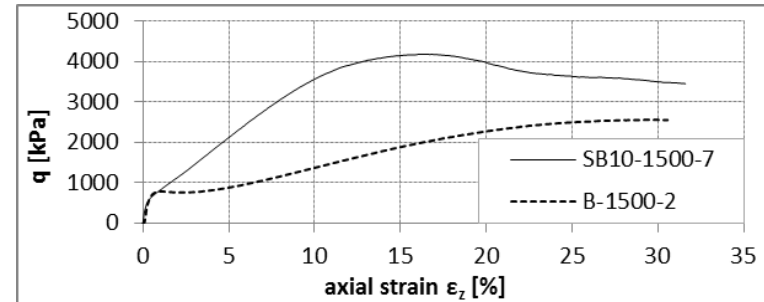
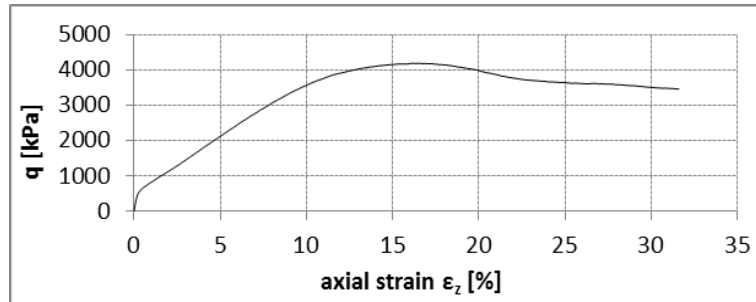
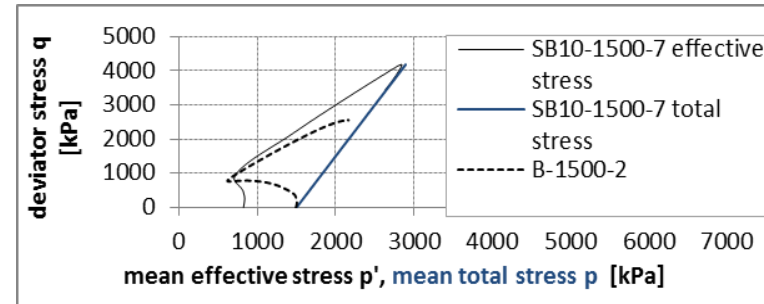
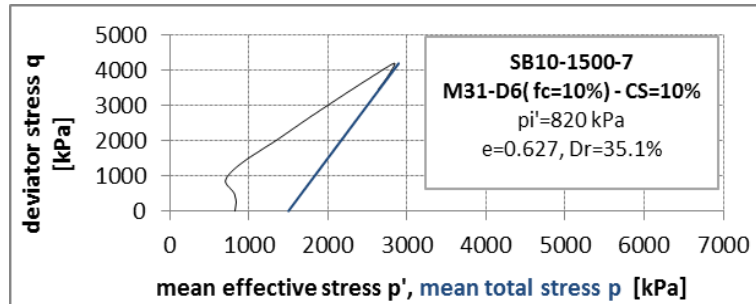
Σχήμα B2-10. Δοκιμή SB10-1000-4(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



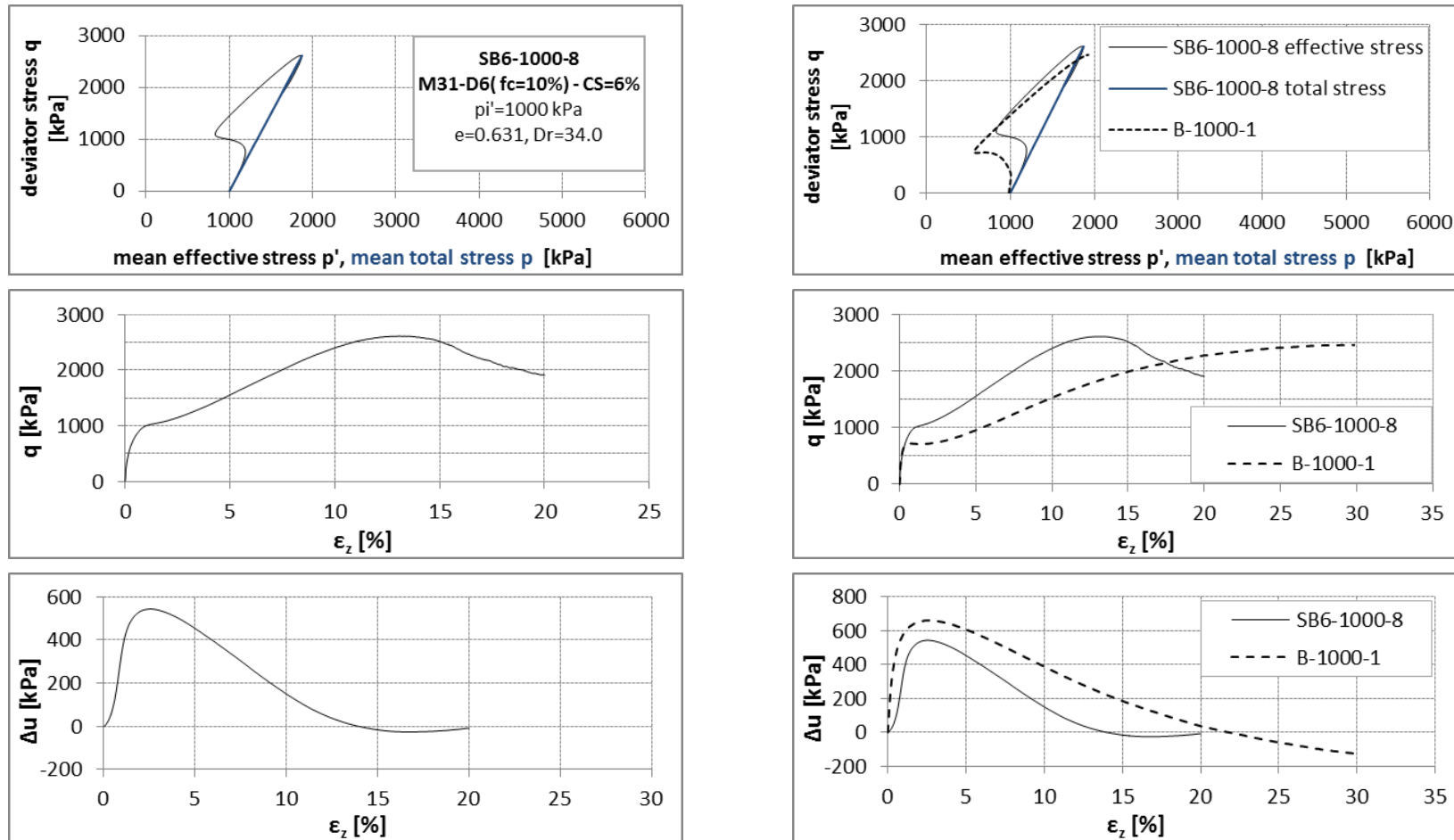
Σχήμα Β2-11. Δοκιμή SB10-1000-5(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή Β-1000-1(δεξιά).



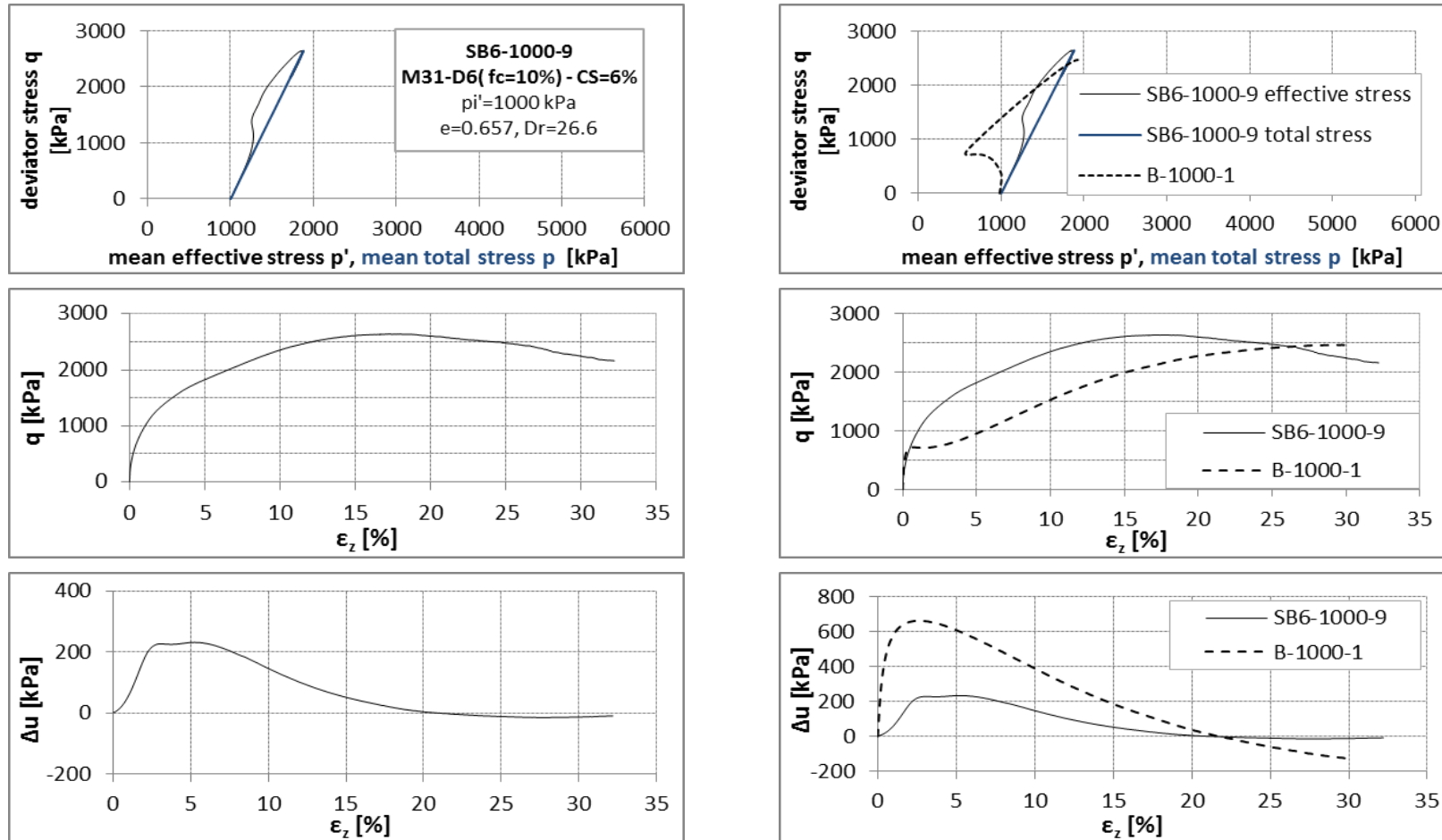
Σχήμα B2-12. Δοκιμή SB10-1000-6(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



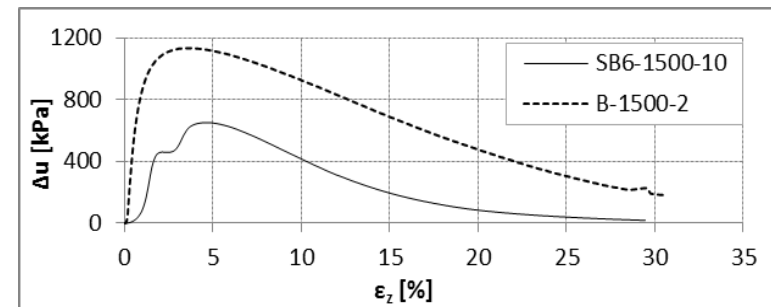
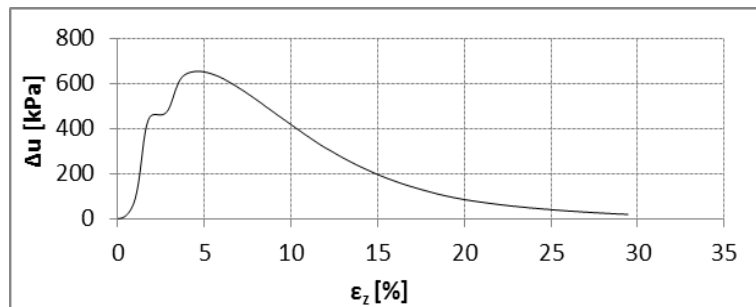
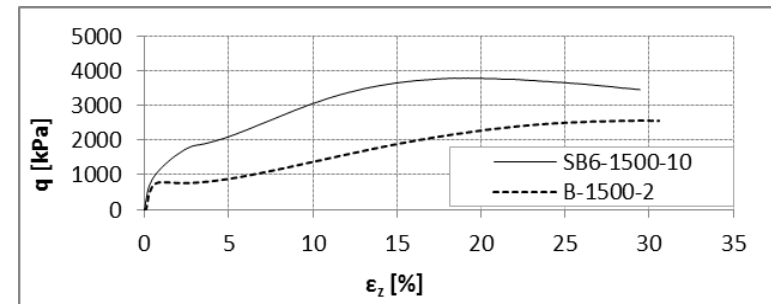
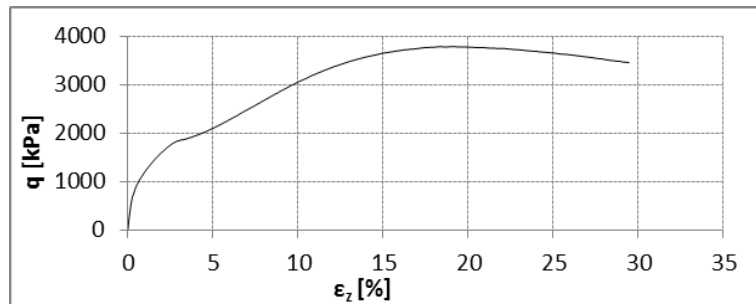
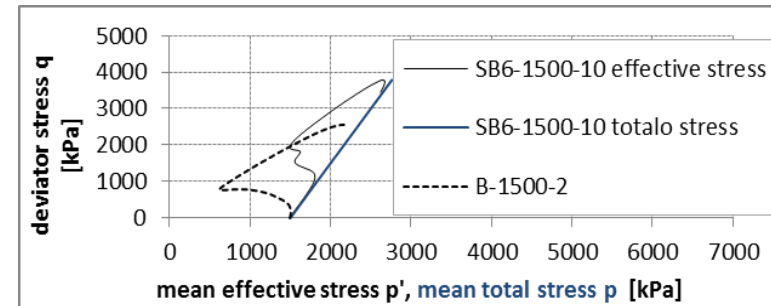
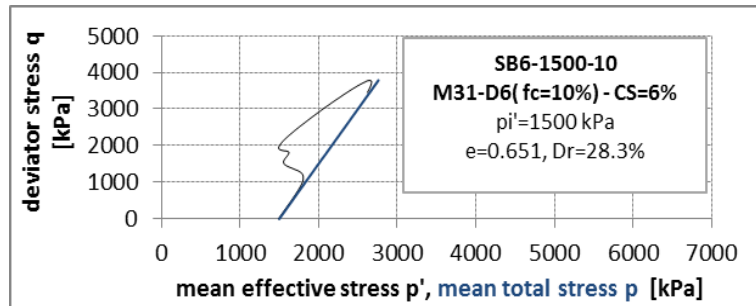
Σχήμα B2-13. Δοκιμή SB10-1000-7(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1500-2(δεξιά).



Σχήμα B2-14. Δοκιμή SB6-1000-8(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



Σχήμα B2-15. Δοκιμή SB6-1000-9(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1000-1(δεξιά).



Σχήμα B2-16. Δοκιμή SB6-1500-10(αριστερά) και σύγκριση με τη δοκιμή B-1500-2(δεξιά).

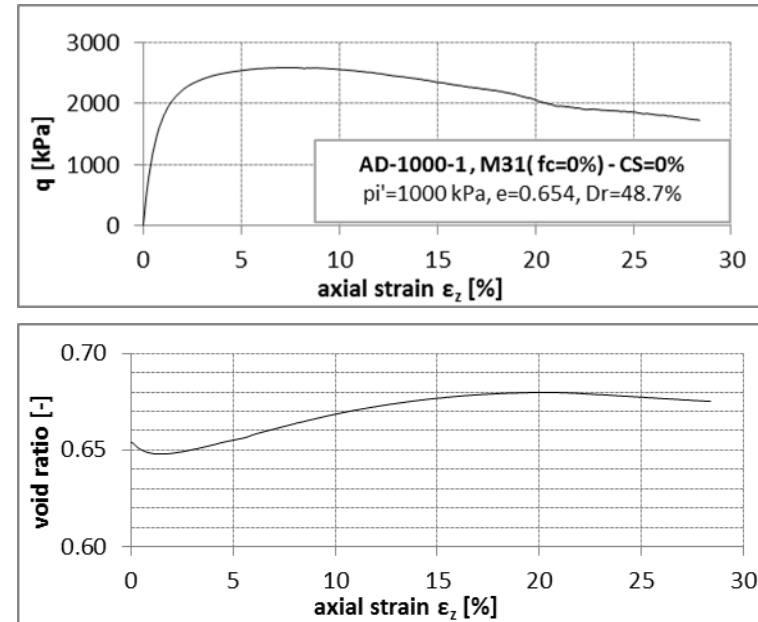
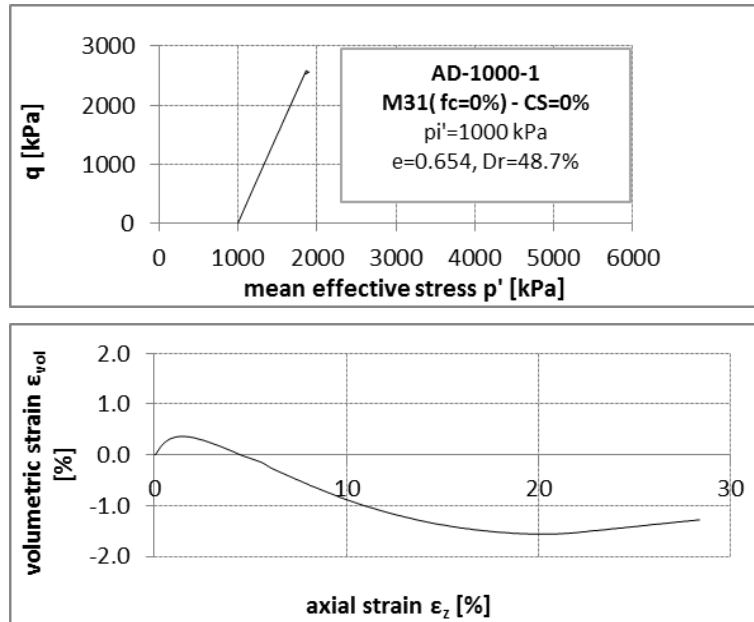
Παράρτημα Β3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CD** ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ
ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

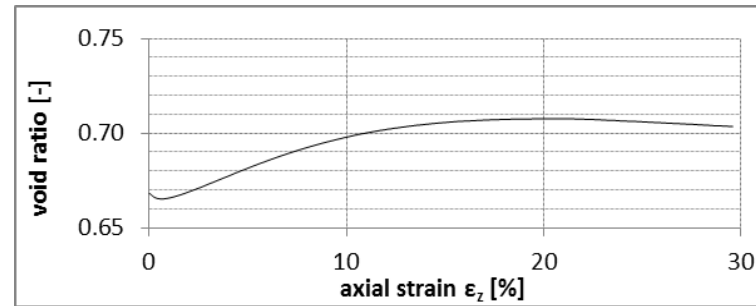
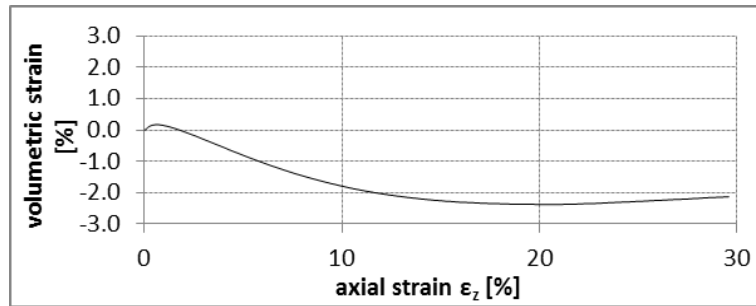
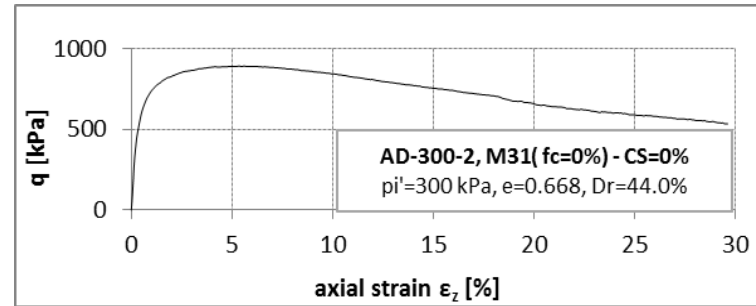
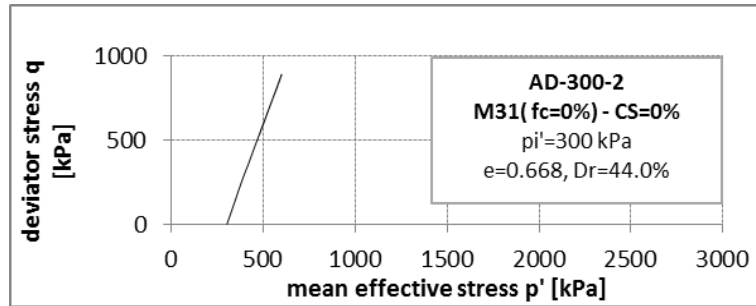
Πίνακας Β3-1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CD τριαξονικής θλίψης σε μη σταθεροποιημένη άμμο Μ31 ($f_c=0\%$).

| 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 |

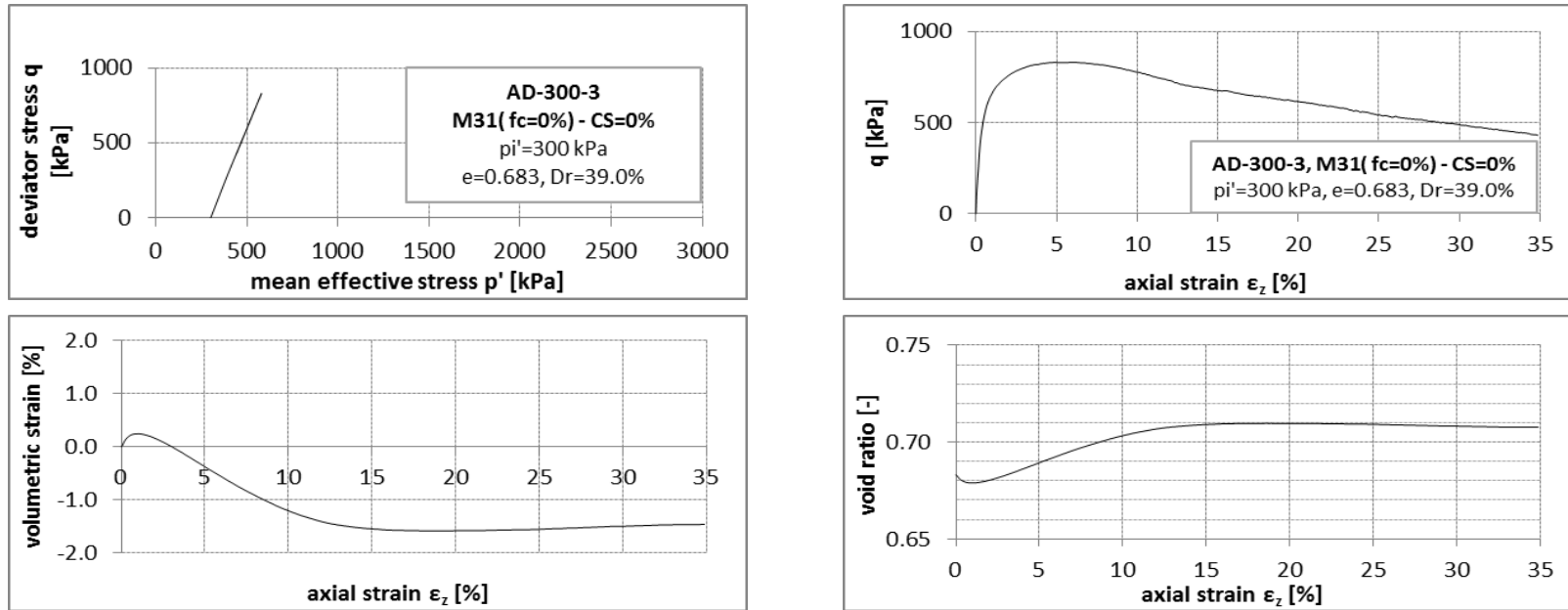
1. Στη δοκιμή με κωδικό AD-300-4 η καταγραφή των δεδομένων ήταν προβληματική και παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα $\varepsilon_{vol} - \varepsilon_z$ και $e - \varepsilon_z$.



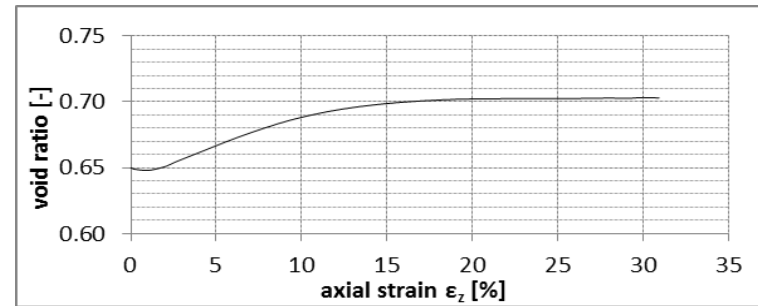
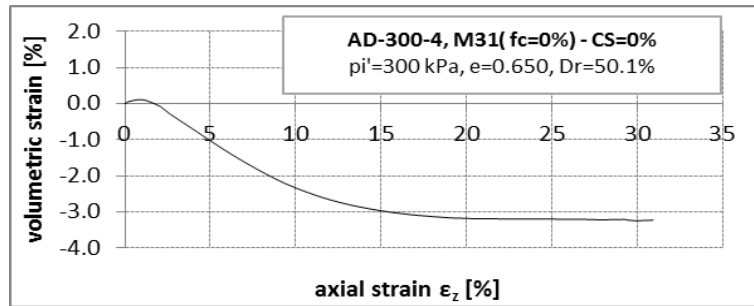
Σχήμα B3-1. Δοκιμή AD-1000-1



Σχήμα Β3-2. Δοκιμή AD-300-2



Σχήμα Β3-3. Δοκιμή AD-300-3



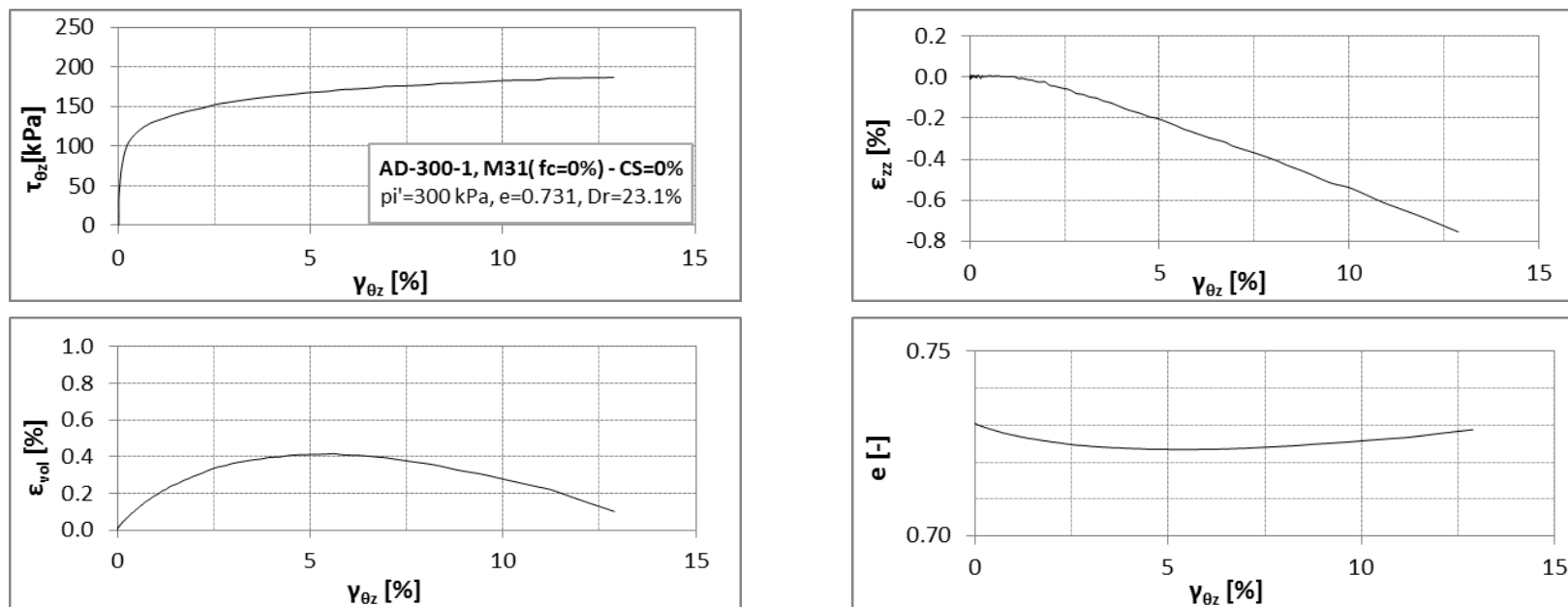
Σχήμα B3-4. Δοκιμή AD-300-4

Παράρτημα Β4

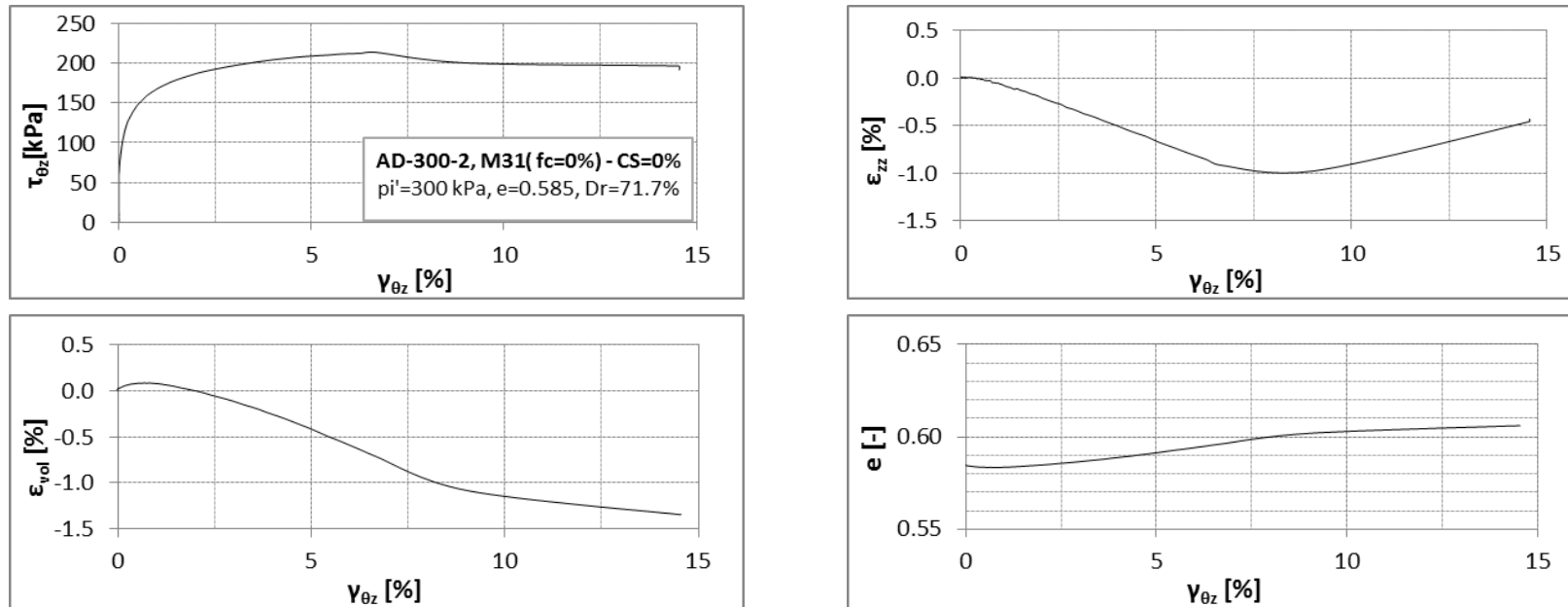
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ **CD** ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΟΙΛΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΕ ΜΗ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Πίνακας Β4-1. Σύνοψη μονοτονικών δοκιμών CD στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου σε μη σταθεροποιημένη άμμο Μ31 ($f_c=0\%$).

| 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 Β4-1. Δοκιμή AD-300-1 μονοτονική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου.



Σχήμα Β4-2. Δοκιμή AD-300-2 μονοτονική δοκιμή στρεπτικής διάτμησης κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου.