

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΜΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΜΜΟΥ-ΙΛΥΟΣ  
ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ  
ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

Κοκαράκη Νικολέτα

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

**Αθήνα, Μάρτιος 2016**



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Β.Ν.Γεωργιάννου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεχή επιστημονική της καθοδήγηση, την αδιάκοπη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την επιμονή της η διπλωματική εργασία να αποκτήσει όσο το δυνατόν καλύτερη μορφή.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κύριο Παναγιώτη Τριαντάφυλλο για τη βοήθειά του και για τα πειράματά του στη Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον τεχνικό του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής κύριο Στέλιο Τσεντίδη, για τις τεχνικές πληροφορίες και την καθοδήγησή του στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου Χαρίλαο και Άννα Κοκαράκη και τις αδερφές μου Ευαγγελία και Βενετία Κοκαράκη, για την ηθική και ψυχική στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ενώ η συμπεριφορά των καθαρών άμμων υπό τριαξονική θλίψη και μονοτονική φόρτιση έχει μελετηθεί εκτενώς, εντούτοις η αντίστοιχη συμπεριφορά των μειγμάτων άμμου-ιλύος δεν είναι σαφής, παρά το πλήθος των διεξαχθεισών ερευνών. Επιπλέον, η μελέτη της συμπεριφοράς τους παρουσιάζει έντονο πρακτικό ενδιαφέρον διότι ιλυώδεις άμμοι απαντώνται συχνότερα στο πεδίο. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και ο προσδιορισμός της επίδρασης μη-πλαστικών λεπτόκοκκων στη συμπεριφορά αμμώδων εδαφών αλλά και η συστηματική μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των εδαφών αυτών, όπως η ενεργός τάση και η πυκνότητα, μέσω των διαφόρων παραμέτρων έκφρασης της (δείκτης πόρων, ισοδύναμος δείκτης πόρων, δείκτης πόρων σκελετού της άμμου ή των λεπτόκοκκων, σχετική πυκνότητα).

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από δύο μέρη: Το πρώτο, ή αλλιώς Θεωρητικό Μέρος, όπου αναλύεται το επιστημονικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση των εδαφών και των παραγόντων που την επηρεάζουν ενώ το δεύτερο, ή αλλιώς Πειραματικό Μέρος, που περιλαμβάνει τη συλλογή, επεξεργασία και εξαγωγή συμπερασμάτων από πλήθος τριαξονικών καθώς και μονοτονικών πειραμάτων στρεπτικής διάτμησης που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις τυπικές μορφές συμπεριφοράς του εδαφικού δοκιμίου ανάλογα με τη μικροδομή του. Ακόμα αναφέρονται ορισμένοι κύριοι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην συμπεριφορά της καθαρής άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά των δοκιμίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι κοκκομετρικές καμπύλες της άμμου M31 και της ιλύος D6 και οι μέγιστοι και ελάχιστοι δείκτες πόρων άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συσκευή τριαξονικής συμπίεσης, τα γεωτεχνικά προβλήματα που προσομοιώνει καθώς και οι σχέσεις που διέπουν τη τριαξονική δοκιμή θλίψης. Ακόμα γίνεται μία εκτενής αναφορά στη Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης και μια προσπάθεια προσέγγισης των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης καθαρής άμμου και μειγμάτων 5% και 10%. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια καθαρής άμμου και σε μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% και 10%.

Εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας, της αρχικής ενεργού τάσης και του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού στη συμπεριφορά του δοκιμίου και στην αντοχή του έναντι ρευστοποίησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου καθώς επίσης και ο τρόπος επιβολής της φόρτισης (μονοτονικά πειράματα). Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα μονοτονικής φόρτισης στην συσκευή, σε δοκίμια καθαρής άμμου και σε μείγματα με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, 10% και 15%. Συνολικά έχουν επεξεργαστεί 33 μονοτονικά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέσα από τα πειράματα εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας, του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού και της αρχικής τάσης στερεοποίησης στην συμπεριφορά του δοκιμίου.

Στο πέμπτο παρατίθενται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα από τις 22 τριαξονικές και τις 33 μονοτονικές δοκιμές στρεπτικής διάτμησης που διεξήχθησαν στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής.

# ABSTRACT

While the behavior of clean sand specimens under triaxial monotonic loading has been studied extensively in the literature, however the behavior of sand and silt mixtures is not clearly understood despite the multitude of undertaken investigations. Furthermore, the study of the behavior of silty sands is of strong practical interest because they are frequently encountered in the field. The aim of this Diploma Thesis is to investigate and determine the influence of non-plastic fines on the behavior of the host clean sand as well as to present a systematic study of the parameters that affect the behavior of these soils, such as the effective stress and the density the latter expressed by various parameters e.g, global void ratio, equivalent void ratio, granular void ratio, relative density.

This Diploma Thesis is organized in two parts. The first, or else Theoretical Part, describes the scientific background on liquefaction resistance based on the literature review. The second, or else Experimental Part includes the analysis of a large number of monotonic triaxial and torsional shearing tests conducted in the Laboratory of Soils Mechanics at N.T.U.A.

In the first chapter reference is made to the typical behavior of granular soils in relation to their microstructure and other factors that strongly affect the observed behavior.

In the second chapter, the materials which were used in this study namely sand M31 and silt D6 are presented. More specifically, the grading curves of the sand and silt and the maximum and minimum global void ratio of sand and sand-silt mixtures were defined.

In the third chapter, a description is made of the triaxial apparatus, the geotechnical problems that it can simulate and the equations that describe the triaxial compression test. This chapter contains the results of triaxial test on specimens of clean sand and sand-silt mixtures with 5% and 10% content of fines. The effect of density, initial effective stress and fine content in the behavior of the specimen is examined. Moreover, the Critical State Lines are defined for the clean sand and the mixtures.

In the fourth chapter the results of monotonic test conducted in the Hollow Cylinder Apparatus on specimens of clean sand and sand-silt mixtures of fine contents 5%, 10% and 15% are presented. In total, thirty three (33) monotonic torsional shear tests were carried out in the Laboratory of Soil Mechanics of National Technical University of Athens (N.T.U.A.).

In this chapter, the effect of density, initial effective stress and fine content is examined in specimens of clean sand and sand-silt mixtures with fine contents ranging from 5% to 15%.

In the fifth chapter, the general conclusions drawn from the triaxial and torsional loading tests are presented and analyzed.

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>i</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>

### **ΜΕΡΟΣ Α' : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

<b>A1. Εισαγωγικά Στοιχεία</b> .....	<b>1</b>
1.1 Γενικά .....	1
1.2 Διατμητική αντοχή του εδάφους.....	3
1.3 Παράγοντες που επιδρούν στη διατμητική αντοχή του εδάφους .....	5
1.3.1 Μικροδομή.....	5
1.3.2 Αρχική δομή – Τρόπος παρασκευής δοκιμίου .....	6
1.3.3 Ποσοστό λεπτόκοκκων στον εδαφικό σκελετό .....	6
1.3.4 Αρχική εντατική κατάσταση.....	6
1.3.5 Κορεσμός δοκιμίου – Ρόλος της υγρής φάσης.....	7
1.3.6 Ένταση και ρυθμός φόρτισης.....	7
1.3.7 Τρόπος και συνθήκες φόρτισης κατά τη δοκιμή .....	8
1.4 Ορισμοί Δεικτών Πόρων .....	9
<b>A2. Υλικά</b> .....	<b>13</b>
2.1 Άμμος.....	13
2.2 Ιλύς.....	14
2.3 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών .....	15



## ΜΕΡΟΣ Β' : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

<b>B3. Συσκευή τριαξονικής συμπίεσης</b> .....	<b>21</b>
3.1 Σύντομη περιγραφή συσκευής.....	21
3.2 Βασικές σχέσεις που διέπουν τη τριαξονική θλίψη.....	23
3.3 Διαγράμματα Τριαξονικής Συσκευής .....	26
3.3.1 Στοιχεία Τριαξονικών Δοκιμών .....	26
3.3.2 Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης .....	27
3.3.3 Επίδραση Της Πυκνότητας.....	46
3.3.4 Επίδραση Του Περιεχόμενου Ποσοστού Λεπτόκοκκων .....	64
3.3.5 Επίδραση Της Τάσης Στερεοποίησης .....	86
<b>B4. Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου</b> .....	<b>97</b>
4.1 Σύντομη περιγραφή συσκευής .....	97
4.2 Βασικές σχέσεις που διέπουν την στρεπτική διάτμηση.....	99
4.3 Διαγράμματα Συσκευής Στρέψης .....	105
4.3.1 Στοιχεία Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης.....	105
4.3.2 Προσδιορισμός της γωνίας τριβής της άμμου M31.....	106
4.3.3 Επίδραση Της Πυκνότητας.....	108
4.3.4 Επίδραση Του Περιεχόμενου Ποσοστού Λεπτόκοκκων .....	121
4.3.5 Κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}$ – Επίδραση του Περιεχόμενου Ποσοστού Λεπτόκοκκων .....	141
4.3.6 Επίδραση Της Τάσης Στερεοποίησης .....	156
4.3.7 Κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}$ – Επίδραση Της Τάσης Στερεοποίησης.....	169
<b>B5. Συμπεράσματα</b> .....	<b>179</b>
5.1 Εισαγωγή.....	179
5.2 Συμπεριφορά ιλυωδών άμμων υπό τριαξονική συμπίεση ....	179
5.3 Συμπεριφορά καθαρής άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος υπό στρεπτική διάτμηση.....	181
5.4 Συγκεντρωτικά Συμπεράσματα ως προς την επίδραση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού .....	183
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>184</b>



# A1

## Εισαγωγικά Στοιχεία

### 1.1 Γενικά

Οι μελέτες για το φαινόμενο της ρευστοποίησης άρχισαν παγκοσμίως τη δεκαετία του '60 λόγω των καταστροφικών επιπτώσεων δύο σεισμών, στην Αλάσκα και στην Νιγκάτα το 1964. Η κατανόηση του φαινομένου της ρευστοποίησης αναθεωρείται διαρκώς καθώς νέα στοιχεία ανακαλύπτονται και μελετώνται τόσο από εργαστηριακές έρευνες όσο και από τεκμήρια που πηγάζουν από γεγονότα στη φύση.

Το έδαφος είναι ένα ανισότροπο υλικό που αποτελείται από κόκκους κροκάλων, χαλίκων, άμμου, ιλύος και αργίλου. Αντίθετα με τα ομοιογενή υλικά που παρουσιάζουν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά, το έδαφος δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο πλαίσιο συμπεριφοράς.

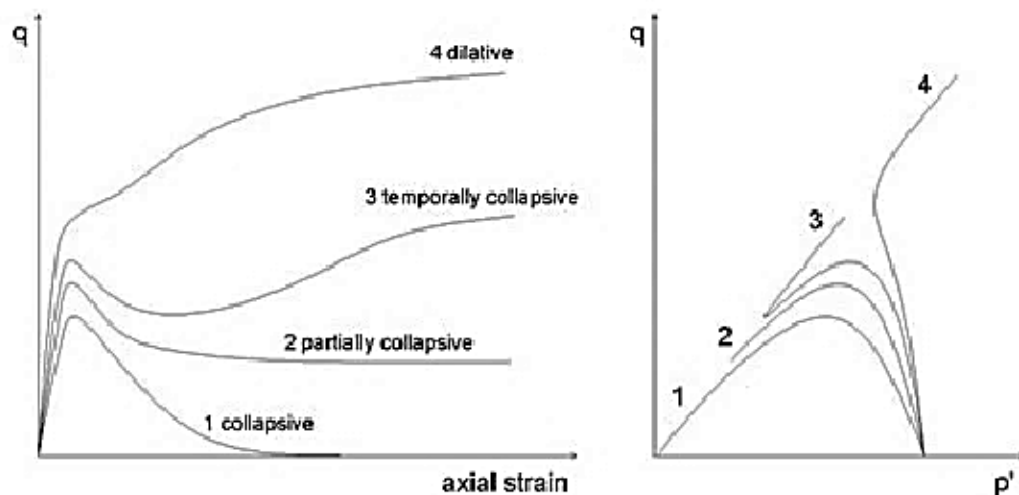
Στις περισσότερες κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού παρουσιάζονται ποικίλα γεωτεχνικά προβλήματα που δε μπορούν να προβλεφθούν διότι οι αρχικές εντατικές καταστάσεις είναι πολύπλοκες και οι συνθήκες φόρτισης σύνθετες και περιλαμβάνουν αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) όσο και στη διεύθυνση τους. Για το λόγο αυτό η ορθή προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους στο εργαστήριο χρήζει σπουδαιότητας και συνεχής μελέτης υπό γενικευμένες εντατικές καταστάσεις.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της άμμου M31 και των μειγμάτων αυτής με διάφορα ποσοστά ιλύος D6. Για το σκοπό αυτό διεξήχθηκε πλήθος πειραμάτων τόσο στη συσκευή τριαξονικής θλίψης (triaxial comparisson test) όσο και στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder monotonic torsional shear test) για καλύτερη προσομοίωση των εντατικών πεδίων που βρίσκονται στη φύση.

Πιο συγκεκριμένα , θα εξετάσουμε την επίδραση του ποσοστού λεπτόκοκκων, της πυκνότητας και της αρχικής εντατικής κατάστασης της άμμου στην αντοχή της σε ρευστοποίηση με σκοπό να εξάγουμε ένα γενικό συμπέρασμα ώστε να μελετηθεί αν συνάδει με τα διάφορα αποτελέσματα της έως τώρα βιβλιογραφικής πορείας.

## 1.2 Διατμητική αντοχή του εδάφους

Όταν σε ένα υλικό επιβληθούν εξωτερικά φορτία, αναπτύσσονται εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει όλες τις πιθανές μορφές της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων που προκύπτουν κατά τη τριαξονική δοκιμή θλίψης.



Σχήμα 1.1 Τέσσερις μορφές συμπεριφοράς μειγμάτος υπό τριαξονική καταπόνηση

Συμπεριφορά 1. Η διατμητική αντοχή αρχικά αυξάνει για μικρή αξονική παραμόρφωση και αφότου φτάσει μία μέγιστη τιμή, δείχνει μία πλήρη απώλεια της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου και το δείγμα καταρρέει. Πέραν του σημείου αυτού το δοκίμιο έχει ρευστοποιηθεί πλήρως και παραμορφώνεται πλέον υπό σταθερή διατμητική τάση (ελάχιστη έως μηδαμινή).

Συμπεριφορά 2. Όταν το έδαφος φτάσει τη μέγιστη διατμητική αντοχή του, συνεχίζει να παραμορφώνεται με τη μείωση της διατμητικής του αντοχής έως ότου φτάσει την παραμένουσα αντοχή που παραμένει περίπου σταθερή με την αύξηση των παραμορφώσεων.

Συμπεριφορά 3. Δείχνει μία προσωρινή απώλεια της αντοχής του δοκιμίου μετά την αρχική μέγιστη αντοχή του. Στη συνέχεια πέφτει σε μία χαμηλότερη, η οποία και διατηρείται περίπου σταθερή για κάποιο εύρος παραμορφώσεων. Πέραν αυτών των παραμορφώσεων, η διατμητική αντίσταση παρουσιάζει και πάλι αύξηση. Το δοκίμιο με αυτή τη συμπεριφορά παρουσιάζει περιορισμένη ρευστοποίηση.

Συμπεριφορά 4. Το δοκίμιο με αυτή τη συμπεριφορά είναι διαστολικό. Σε αυτό το είδος της συμπεριφοράς η δυστημψία του εδάφους μπορεί να μειωθεί προσωρινά μετά το σημείο διαρροής αλλά το έδαφος συνεχίζει να αποκτά διαμητική αντοχή κατά την παραμόρφωσή του και επομένως δεν ρευστοποιείται.

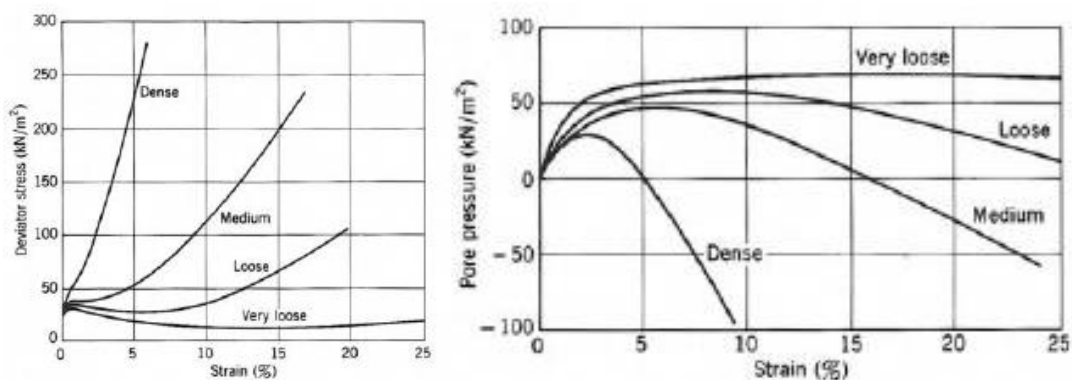
Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και πειραματικά στη διπλωματική εργασία του Castro (1969) από τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε κορεσμένες άμμους με διαφορετικούς συνδυασμούς δείκτη πόρων, αρχικής ενεργού τάσης ( $e, \sigma'_o$ ).

## 1.3 Παράγοντες που επιδρούν στη διατμητική αντοχή του εδάφους

### 1.3.1 Μικροδομή

Ένα γενικό μη αμφισβητίσιμο συμπέρασμα κοινό από τις έως τώρα μελέτες είναι ότι η συμπεριφορά των κοκκώδων υλικών είναι πλήρως συνιφασμένη με την πυκνότητά τους. Πιο αναλυτικά, ένας αμμώδης σχηματισμός με χαλαρή δομή μειώνει τον όγκο του κατά τη διάτμηση και σε αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης που οι πιέσεις πόρων αδυνατούν να απότονωθούν αναπτύσσονται υπερπίεσεις (συστολικότητα). Αντίθετα αν ο αμμώδης σχηματισμός είναι πυκνής δομής στην αρχή τείνει να μειώσει τον όγκο του αναπτύσσοντας μικρές υπερπίεσεις αλλά πολύ γρήγορα αυτό ανατρέπεται αναπτύσσοντας αρνητικές υπερπίεσεις στο σκελετό του (διαστολικότητα).

Έτσι γνωρίζοντας τη σχετική πυκνότητα ή το δείκτη πόρων μίας καθαρής άμμου μπορούμε να εκτιμήσουμε τη συμπεριφορά της κατά τη διάτμηση.



Σχήμα 1.2 Αξονική παραμόρφωση σε συνάρτηση με (α) την αποκλίνουσα τάση και (β) την υπερπίεση πόρων για διάφορες πυκνότητες

Όσον αφορά τα μείγματα άμμου με ποσοστά ιλύος στο σκελετό τους ένα τέτοιο συμπέρασμα δεν είναι ευρέως αποδεκτό γιατί δεν έχει ξεκαθαριστεί πλήρως καθώς επιδρούν και άλλοι παράμετροι όπως τα επιμέρους χαρακτηριστικά των δύο υλικών δηλαδή σχήμα και μέγεθος κόκκων καθώς και το ποσοστό του περιεχόμενου λεπτόκοκκου υλικού.

### **1.3.2 Αρχική δομή – Τρόπος παρασκευής δοκιμίου**

Η αρχική δομή του δείγματος είναι άλλος ένας παράγοντας που δε θα μπορούσε να αμεληθεί καθώς ο τρόπος παρασκευής του δοκιμίου επηρεάζει τη συμπεριφορά του υπό καταπόνηση. Στόχος των διάφορων μεθόδων είναι να προσομοιάσουν καλύτερα τη δομή των φυσικών αποθέσεων των διάφορων εδαφικών σχηματισμών.

Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί με σκοπό να βρεθεί ο ευνοϊκότερος τρόπος παρασκευής δοκιμίου στην διατμητική αντοχή του υλικού όμως δεν επέφεραν κάποιο αποτέλεσμα καθώς τα συμπεράσματα μεταξύ των μελετητών αντικρούονται. Το σίγουρο είναι ότι κάθε μέθοδος επιφέρει διαφορετική πυκνότητα στα δοκίμια.

### **1.3.3 Ποσοστό λεπτόκοκκων στον εδαφικό σκελετό**

Το λεπτόκοκκο υλικό μένεται να επηρεάζει αρνητικά τη διατμητική αντοχή του μίγματος όταν είναι αρκετό ώστε η επαφή μεταξύ των κόκκων να είναι αδύνατη. Ποσοστό λιγότερο της κρίσιμης εκείνης τιμής, δρά θετικά καθώς γεμίζει ελάχιστα τους πόρους και βοηθάει στην αλληλεμπλοκή των κόκκων. Πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στον προσδιορισμό της επίδρασης του λεπτόκοκκου κλάσματος του μίγματος στη διατμητική του αντοχή χωρίς όμως να έχει διεξαχθεί κάποιο γενικό, μη αμφισβητήσιμο, συμπέρασμα καθώς τα αποτελέσματα είναι αντιφατικά.

### **1.3.4 Αρχική εντατική κατάσταση**

Είναι σημαντικό να προσομοιάσουμε το έδαφος στις πιθανές φυσικές του αποθέσεις. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να εξετάσουμε πλήθος δοκιμίων με διαφορετικές εντατικές καταστάσεις. Από πειράματα έχει γίνει γνωστό ότι η ενεργός τάση οδηγεί με την αύξηση της σε περισσότερο συστολική συμπεριφορά και σε μείωση της διατμητικής αντοχής γενικότερα.



Όμως αυτά τα πειράματα δεν είναι αρκετά καθώς είναι συνηθισμένο στη φύση ένας εδαφικός σχηματισμός να βρίσκεται υπό διατμητική τάση ακόμα και δίχως να έχει επέλθει εξωτερική φόρτιση από μία κατασκευή ή λόγω σεισμικής διέγερσης. Για το λόγο αυτό η απόκριση του εδαφικού σχηματισμού με προδιάτμηση έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης από πολλούς μελετητές.

Η προδιάτμηση επιτυγχάνεται στο εργαστήριο είτε με τη βοήθεια της τριαξονικής συσκευής, όπου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ασκείται διαφορετική κατακόρυφη πίεση από την οριζόντια, είτε με πειράματα στρεπτικής διάτμησης, όπου φορτίζονται στρεπτικά πριν την επιβολή της κύριας φόρτισης. Η επίδραση της προδιάτμησης στη συμπεριφορά του δοκιμίου δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως καθώς ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι δρά ευνοϊκά, ενώ ορισμένες ότι δρά αρνητικά έως αδιάφορα.

### 1.3.5 Κορεσμός δοκιμίου – Ρόλος της υγρής φάσης

Ο ρόλος της υγρής φάσης δε θα μπορούσε να αμεληθεί στη συμπεριφορά του δείγματος διότι η σημασία της παρουσίας νερού στους πόρους του εδαφικού σχηματισμού είναι μεγάλη και σε αυτήν οφείλονται φαινόμενα όπως η στερεοποίηση και η ρευστοποίηση.

### 1.3.6 Ένταση και ρυθμός φόρτισης

Η συμπεριφορά του δοκιμίου υπό καταπόνηση δεν εξαρτάται μόνο από τα φυσικά, σταθερά χαρακτηριστικά του αλλά και από το μορφή, τη διάρκεια της φόρτισης και τη φορά επιβολής της. Λόγω της ανισοτροπίας της δομής του, ο εδαφικός σχηματισμός εκδηλώνει διαφορετική συμπεριφορά για διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης, ιδιότητα που παρατηρείται όταν υποβάλλεται σε διαφορετικό τασικό πεδίο φορτίσεων. Επιπλέον η συμπεριφορά του εδαφικού σχηματισμού επηρεάζεται από τη δυνατότητα ή μη στράγγισης κατά τη διάρκεια της καταπόνησης και από το ρυθμό παραμόρφωσης της.

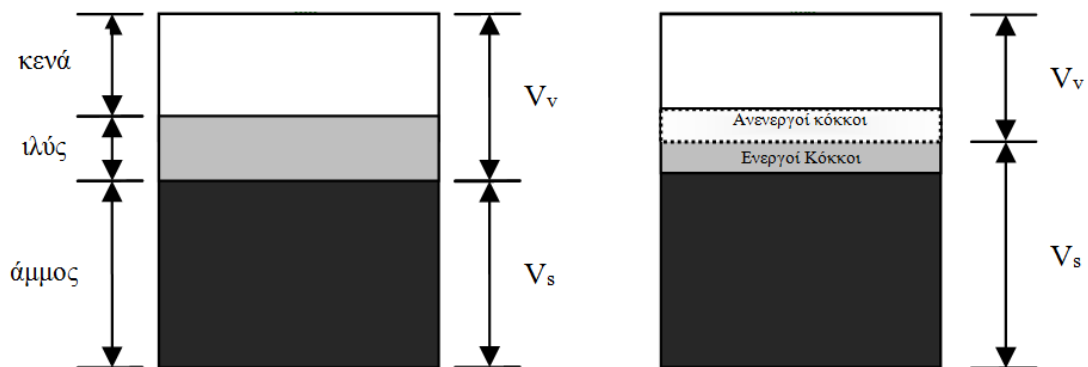
Οι ερευνητές Boulanger R.W. και Idriss I.M. υποστήριξαν ότι το γρήγορο πείραμα θα υποτιμούσε την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του δείγματος. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται και ταχείς δοκιμές καθώς οι μετρήσεις των παραμέτρων αντοχής πρέπει κάθε φορά να λαμβάνονται κατά τρόπο που προσομοιώνουν τις συνθήκες στο χώρο.

### **1.3.7 Τρόπος και συνθήκες φόρτισης κατά τη δοκιμή**

Πέρα από την ένταση και τον ρυθμό της φόρτισης, σημαντικός παράγοντας είναι και ο τρόπος και οι συνθήκες φόρτισης που εφαρμόζουμε. Μπορούμε να διεξάγουμε δοκιμές είτε με αποτόνωση των πιέσεων πόρων δηλαδή στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained Condition-CD) είτε αστράγγιστες συνθήκες (Undrained Condition-CU) με ανάπτυξη υπερπιέσεων εντός του δοκιμίου. Στη συσκευή κούλου δοκιμίου ο τρόπος φόρτισης ποικίλλει καθώς μπορούν να γίνουν δοκιμές υπό σταθερή γωνία της κύριας τάσης, ανακυκλικές καθώς και μονοτονικές δοκιμές ανάλογα με την έρευνα που πραγματοποιείται.

## 1.4 Ορισμοί Δεικτών Πόρων

Από τη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις ως προς τον δείκτη πόρων και τις περιπτώσεις που προσομοιάζουν βέλτιστα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εξ αυτών.



Σχήμα 1.3 Γραφική απεικόνιση ανομοιογενούς μίγματος αμμοιλύς

### Ολικός Δείκτης Πόρων ( e ) :

Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη προσέγγιση ως μέτρο σύγκρισης μεταξύ των δοκιμίων, όμως προσομοιώνει καλύτερα μονάχα ομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς διότι δεν κάνει διάκριση μεταξύ λεπτόκοκκων και χονδροκοκκων κλασμάτων.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad [-]$$

$V_v$  : όγκος κενών ( Voids ) [Kg/m<sup>3</sup>]

$V_s$  : όγκος στερεών ( Solids ) [Kg/m<sup>3</sup>]

Δείκτης Πόρων Σκελετού (  $e_{sk}$  ή  $e_c$  )

Αυτός ο δείκτης πόρων θεωρεί ότι το λεπτόκοκκο κλάσμα περιλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου στα κενά του σκελετού και δεν λαμβάνει μέρος στην αναλήψη δυνάμεων. Παρατηρείται δε ότι αν τεθεί στη σχέση  $f_c=0$  καταλήγουμε στον ολικό δείκτη πόρων  $e$ . Η χρήση του δείκτη πόρων σκελετού προτείνεται για μικρό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού ( έως 25% ).

$$e_{sk} = \frac{V_v + V_f}{V_s} = \frac{(e + f_c)}{(1 - f_c)} \quad [-]$$

$V_v$ : όγκος κενών ( Voids )	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$V_s$ : όγκος στερεών ( Solids )	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$V_f$ : όγκος λεπτόκοκκων ( Fines )	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$f_c$ : ποσοστό λεπτόκοκκων	[ $\frac{\%}{\%}$ ]
$e$ : ολικός δείκτης πόρων	[-]

Δείκτης Πόρων Λεπτόκοκκων (  $e_f$  )

Ο δείκτης πόρων λεπτόκοκκων ενδείκνυται για μίγματα με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Παρατηρείται ότι για  $f_c=100\%$  ο τύπος, ταυτίζεται με τον ολικό δείκτη πόρων  $e$ .

$$e_f = \frac{V_v - V_f}{V_f} = \frac{e}{f_c} \quad [-]$$

$V_v$ : όγκος κενών ( Voids )	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$V_f$ : όγκος λεπτόκοκκων ( Fines )	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$f_c$ : ποσοστό λεπτόκοκκων	[ $\frac{\%}{\%}$ ]
$e$ : ολικός δείκτης πόρων	[-]

Ισοδύναμος Δείκτης Πόρων (  $e_{eq}$  )

Οι Thevanayagam et al (2000) για να λάβουν υπόψιν τους την επιρροή των λεπτόκοκκων στη δομή της δύναμης εισήγαγαν τον ισοδύναμο δείκτη πόρων. Η μεταβλητή  $b$  προσαρμόζεται στο εύρος 0 έως 1 ανάλογα με το ποσοστό των λεπτόκοκκων κλασμάτων που είναι ενεργό, δηλαδή συμμετέχει στην ανάληψη δυνάμεων. Πιο συγκεκριμένα, θέτοντας  $b=0$  όλο το λεπτόκοκκο υλικό είναι ανενεργό και καταλήγουμε στον δείκτη πόρων σκελετού  $e_{sk}$ . Άρα ο ο δείκτης πόρων σκελετού πλησιάζει τον ισοδύναμο για μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων.

$$e_{eq} = \frac{(e+(1-b)f_c)}{(1-(1-b)f_c)}, 0 < b < 1 \quad [-]$$

$f_c$  : ποσοστό λεπτόκοκκων [  $\frac{\%}{\%}$  ]

$e$  : ολικός δείκτης πόρων [-]

$b$  : παράμετρος που δείχνει το ποσοστό συμμετοχής των λεπτόκοκκων στην αλληλεμπλοκή των κόκκων της άμμου [-]

Ο προσδιορισμός της παραμέτρου  $b$  γίνεται προς το παρόν με αντίστροφες αναλύσεις πειραματικών δεδομένων. Με σκοπό τον προσδιορισμό της παραμέτρου  $b$  εισήχθηκε μία ημι-εμπειρική προσέγγιση που δίνεται παρακάτω και δείχνει τη συσχέτιση της μεταβλητής  $b$  με τον λόγο των χαρακτηριστικών διαμέτρων των δύο υλικών και το ποσοστό των λεπτόκοκκων ώστε να χαθούν οι επαφές μεταξύ των κόκκων (  $f_{threshold}$  ).

$$b = \left(1 - e^{\frac{-2,5f_c^2}{k}}\right) \left(\frac{rf_c}{f_{thre}}\right)^r \quad [-]$$

$f_c$  : ποσοστό λεπτόκοκκων [  $\frac{\%}{\%}$  ]

$f_{thre}$  : απαιτούμενο ποσοστό λεπτόκοκκων ώστε να εξαφανιστούν οι επαφές μεταξύ των κόκκων [  $\frac{\%}{\%}$  ]

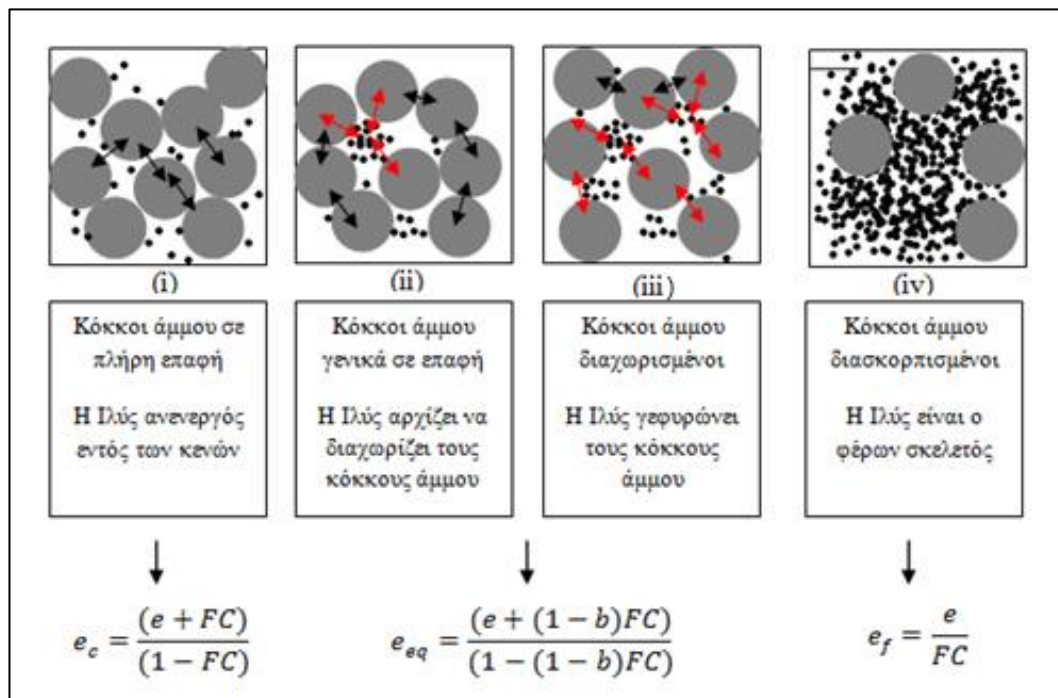
$$r = \chi^{-1} = \frac{d_{50}}{D_{10}} \quad [-]$$

$$k = 1 - r^{0,25} \quad [-]$$

$\chi$  : λόγος χαρακτηριστικών διαμέτρων των δύο συστατικών [-]

Σύμφωνα με τις προτάσεις των Thevanayagam et al. (2002) , στο Σχήμα 1.4 δίνονται οι πιθανές μορφές της μικροδομής του υλικού και οι προτεινόμενοι δείκτες πόρων ανά περίπτωση που προσεγγίζουν όσο γίνεται καλύτερα το υλικό. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις περιπτώσεις (i) , (ii) και (iii) μπορούμε να έχουμε ίδιο ποσοστό λεπτόκοκκων και παρ'όλ'αυτά οι διαφοροποιήσεις στη μικροδομή να αλλάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά.

Από το Σχήμα 1.4 παρατηρείται επίσης ότι δεν χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης ο ολικός δείκτης πόρων  $e$  ή η σχετική πυκνότητα  $D_r$ . Αυτό συμβαίνει γιατί οι συγκεκριμένοι δείκτες πόρων δε μας λένε κάτι για τη μικροδομή του υλικού καθώς δε λαμβάνουν υπόψιν την ύπαρξη δύο διαφορετικών υλικών και η χρήση τους προτείνεται σε ομοιογενή υλικά.



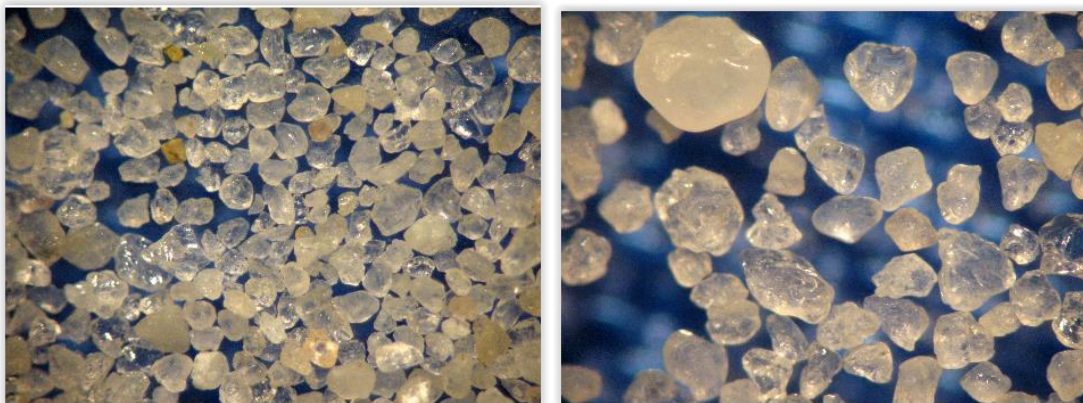
Σχήμα 1.4 Χαρακτηριστικές μορφές μικροδομής και αντίστοιχοι δείκτες πόρων που τις προσεγγίζουν βέλτιστα

# A2

## Υλικά

### 2.1 Άμμος

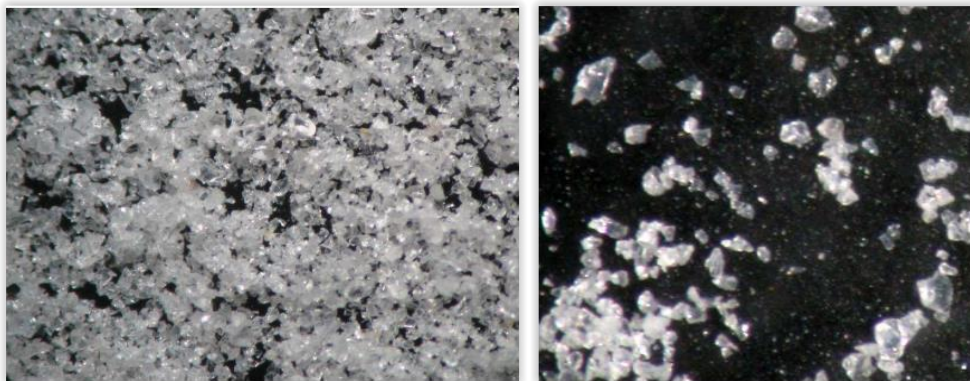
Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε άμμος M31. Η άμμος M31 είναι μία φυσική χαλαζιακή άμμος από το Βέλγιο. Πρόκειται για μία καθαρή άμμο με σχετικά ομοιόμορφα σιλιβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα όπως φαίνεται έπειτα από εξέταση στο μικροσκόπιο. Οι κόκκοι στην πλειονότητα τους είναι διαυγείς, ενώ ένα ποσοστό της τάξης του 5-10% είναι ημιδιαφανείς, άλλης γενετικής προέλευσης. Παρατηρείται επίσης μία απειροελάχιστη ποσότητα (<1%) μαύρων κόκκων σιδηροξειδίων άγνωστης προέλευσης.



Σχήμα 2.1 Μορφή των κόκκων άμμου M31 κάτω από το μικροσκόπιο

## 2.2 Ιλύς

Ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιήθηκε η αμμώδης ιλύς D6. Η ιλύς D6 είναι προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου, με απειροελάχιστη ποσότητα (<1‰) μαύρων κόκκων, που οφείλονται πιθανόν σε ανθρώπινη μόλυνση. Οι κόκκοι της είναι διαυγείς και εξαιρετικά γωνιώδεις σε αντίθεση με την άμμο M31. Σημειώνεται επίσης ότι η ιλύς είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερο pH.



Σχήμα 2.2 Μορφή των κόκκων ιλύος D6 κάτω από το μικροσκόπιο

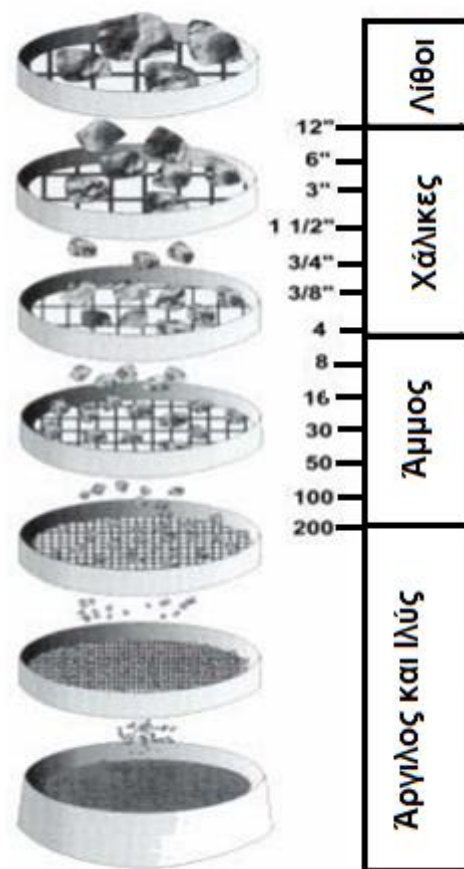


Σχήμα 2.3 Παρασκευή μίγματος άμμου με ποσοστό ιλύος 10%



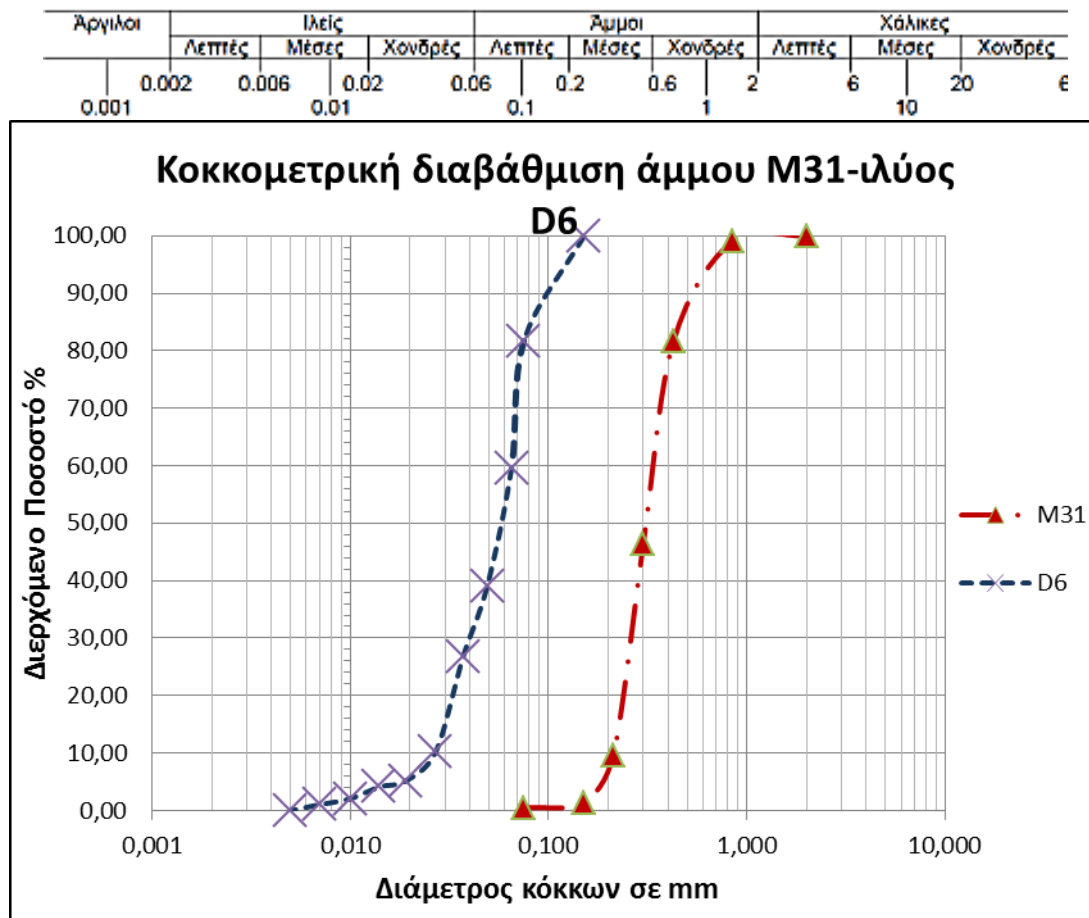
## 2.3 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών

Η παραμόρφωση του εδάφους εξαρτάται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόκκων και την μεταξύ τους ολίσθηση. Το μέγεθος της παραμόρφωσης εξαρτάται βέβαια από την ένταση και το είδος της φόρτισης, εξαρτάται όμως και από άλλους παράγοντες όπως το σχήμα των κόκκων που το απαρτίζουν, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και η σχετική πυκνότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται η κοκκομετρία και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των δύο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.



No	2'	1'	3/4"	4	10	20	30	40	100	200
d(mm)	50,8	25,4	19,1	4,76	2	0,84	0,59	0,42	0,149	0,074

Σχήμα 2.4 Ονομασία και διαμέτρημα κοσκίων

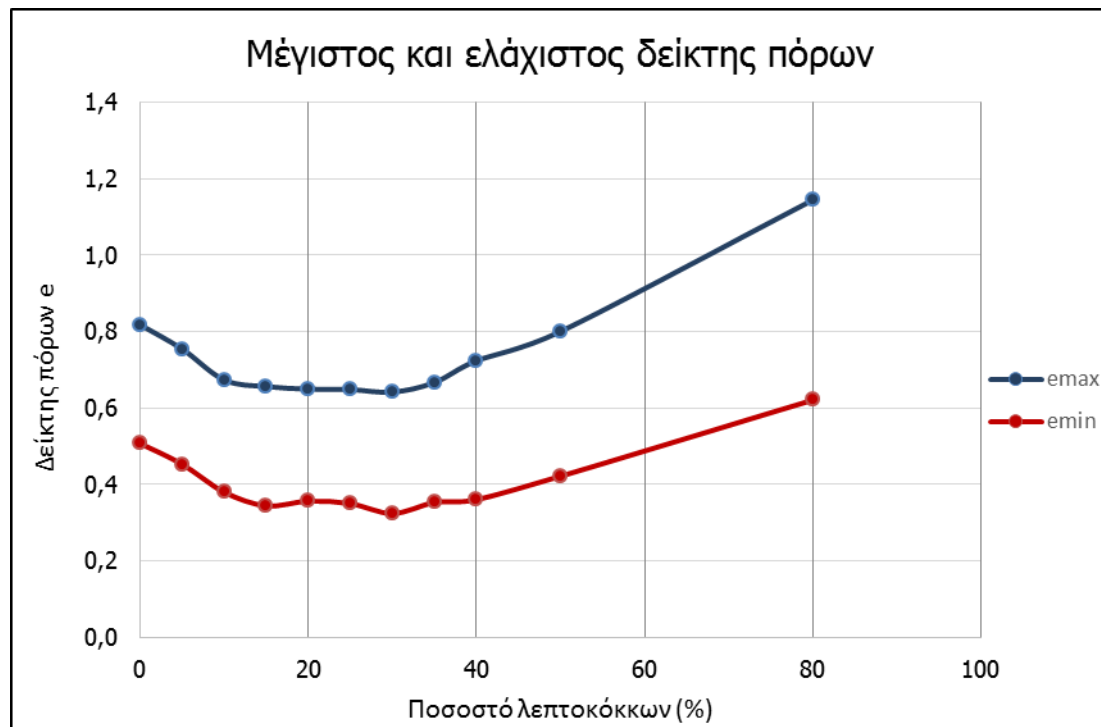


Σχήμα 2.5 Κοκκομετρία των δύο υλικών

Χαρακτηριστικά Μεγέθη	Άμμος Μ31	Χαρακτηριστικά Μεγέθη	Ιλύς D6
D10	0,22	d10	0,027
D30	0,262	d30	0,04
D50	0,3	d50	0,058
D60	0,323	d60	0,065
$C_u = D60/D10$	1,468	$C_u = d60/d10$	2,407

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικές τιμές από την κοκκομετρία των δύο υλικών

Πέραν της κοκκομετρίας των δύο υλικών, σημαντικό είναι να γνωρίζουμε τη διάταξη των κόκκων τους. Ένα συγκεκριμένο μη-συνεκτικό εδαφικό υλικό μπορεί να εμφανιστεί στη φύση με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων που εξαρτώνται από την εκάστοτε δομή των κόκκων του. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι πυκνότερες και οι χαλαρότερες πιθανές δομές των δύο υλικών που εκφράζονται αντίστοιχα με τον ελάχιστο και τον μέγιστο δείκτη πόρων.



Σχήμα 2.6 Χαλαρότερη και πυκνότερη δομή της άμμου με διάφορα ποσοστά ιλύος

Από το Σχήμα 2.6 είναι προφανές ότι τα δύο αυτά διαγράμματα ακολουθούν παρόμοια διαδρομή. Επίσης μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι αφού προσθέτουμε ένα μικρό ποσοστό ιλύος στην καθαρή άμμο, η ιλύς αυτή γεμίζει τα κενά με αποτέλεσμα η δομή αυτή να γίνεται όλο και πυκνότερη. Περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των λεπτοκόκκων, πέραν του 30%, έχει δυσμενές αποτέλεσμα αφού η δομή γίνεται όλο και αραιότερη. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κόκκοι άμμου χάνουν την επαφή μεταξύ τους και πλέον η ιλύς είναι ο φέρων σκελετός.

Λόγω του τρόπου που διεξάγονται τα δύο πειράματα για την εύρεση της χαλαρότερης και της πυκνότερης δομής, οι δείκτες πόρων ανά επανάληψη του πειράματος βγαίνουν κοντινοί αλλά σπανίως ίσοι.

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα του Σχήματος 2.6 και στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα από παλαιότερα πειράματα των πανεπιστημίων της Ελλάδος για την εμφάνιση της πιθανής απόκλισης μεταξύ των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η απόκλιση αυτή οφείλεται στη διαφορετική ανακίνηση του κυλίνδρου για την εύρεση της χαλαρότερης δομής και στη διαφορετική συμπύκνωση του δοκιμίου για την εύρεση της πυκνότερης δομής.

	M31	95%M31 & 5% D6	90%M31 & 10%D6	D6
$e_{max}$	0,8	0,754	0,673	-
$e_{min}$	0,5	0,453	0,38	-

Πίνακας 2.2 Πειραματικά αποτελέσματα

AUTH	M31	D6	NTUA	M31	D6	UPATRAS	M31	D6
$e_{max}$	0,805	-	$e_{max}$	0,8	1,06	$e_{max}$	0,76	1,22
$e_{min}$	0,558	-	$e_{min}$	0,5	0,66	$e_{min}$	0,47	0,55
$G_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2,655	2,639	$G_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,62	$G_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2,665	2,6

Πίνακας 2.3 Πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων Πανεπιστημίων

Γνωρίζοντας τη χαλαρότερη και την πυκνότερη δομή ενός υλικού μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σχετική του πυκνότητα. Η σχετική πυκνότητα βοηθάει στον χαρακτηρισμό του εδαφικού σχηματισμού στη φύση με δεδομένο δείκτη πόρων  $e$  σε σχέση με τη χαλαρότερη ( $e_{max}$ ) και την πυκνότερη ( $e_{min}$ ) πιθανή δομή του.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} 100 \quad [\%]$$

$e_{max}$  : μέγιστη τιμή του δείκτη πόρων που αντιστοιχεί στην χαλαρότερη δομή [-]

$e_{min}$  : ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων που αντιστοιχεί στην πυκνότερη δομή [-]

$e$  : ολικός δείκτης πόρων του υλικού [-]

Σχετική πυκνότητα (%)	Περιγραφή μή-συνεκτικού εδάφους
0 - 15	Πολύ χαλαρό
15 - 35	Χαλαρό
35 - 65	Μέσης πυκνότητας
65 - 85	Πυκνό
85 - 100	Πολύ πυκνό

Πίνακας 2.4 Δομή υλικού με βάσει τη σχετική του πυκνότητα

Αξίζει να τονισθεί ότι η σχετική πυκνότητα προτείνεται ως μέτρο σύγκρισης σε ομοιογενή υλικά καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν το ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού.

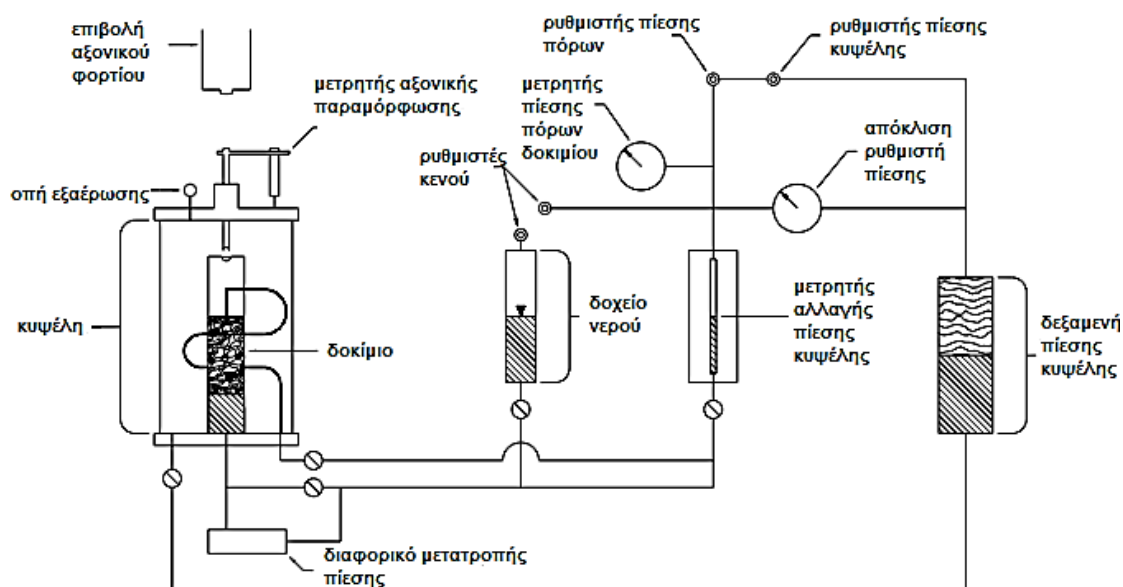


# B3

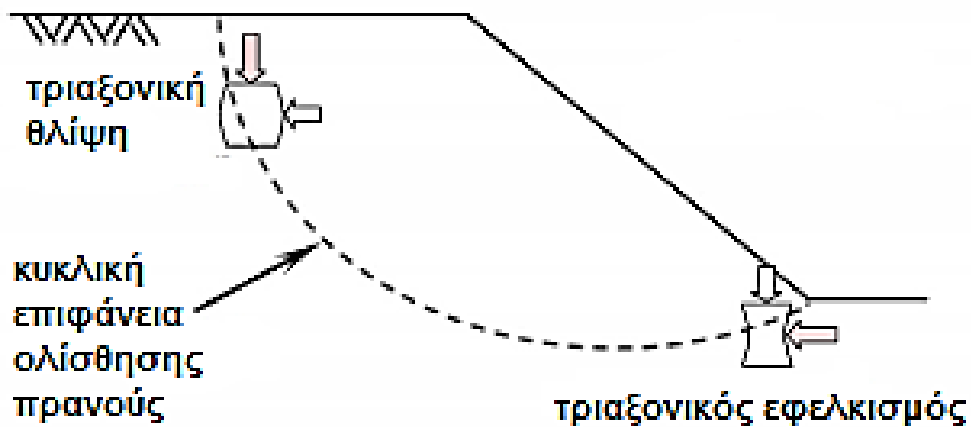
## Συσκευή τριαξονικής συμπίεσης

### 3.1 Σύντομη περιγραφή συσκευής

Η εκτέλεση πειραμάτων στην συσκευή τριαξονικής συμπίεσης (triaxial compression tests) βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς του εδαφικού σχηματισμού κατά τη φόρτιση ή την αποτόνωσή του ( δοκιμή τριαξονικής θλίψης ή εφελκυσμού αντίστοιχα). Προσδιορίζοντας τις διάφορες μορφές συμπεριφοράς και τις εδαφικές παραμέτρους, μπορεί να επιτευχθεί η προσομοίωση του εδάφους με τη χρήση αναλυτικών μοντέλων.



Σχήμα 3.1 Τριαξονική Συσκευή Συμπίεσης



Σχήμα 3.2 Εφαρμογή αποτελεσμάτων τριαξονικής συσκευής σε γεωτεχνικό πρόβλημα

Για την εφαρμογή του τριαξονικού εφελκυσμού στη συσκευή δεν ασκώ αρνητική αξονική τάση αλλά έχω μεγαλύτερη πλευρική τάση από ότι αξονική, όπως φαίνεται και στο σχήμα τα βελάκια δείχνουν τις μεγαλύτερες τιμές άρα την  $\sigma_1$ .

Η σειρά πειραμάτων που διεξήχθη στο εργαστήριο ήταν αποκλειστικά δοκιμών θλίψεως. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με εναπόθεση εν ξηρώ και η δοκιμές ήταν κατηγορίας CU δηλαδή αργή δοκιμή με αποτόνωση των πιέσεων με στερεοποίηση των δοκιμίων (Consolidated) και αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης (Undrained).

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το δοκίμιο πριν τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης με την τοποθέτηση στα τοιχώματά του αισθητήρων μέτρησης της αξονικής μετατόπισης τύπου LVDT (αριστερά) και μετά το πέρας της δοκιμής (δεξιά).



Σχήμα 3.3 Δοκίμιο πριν (αριστερά) και μετά το πέρας της θλίψης (δεξιά)

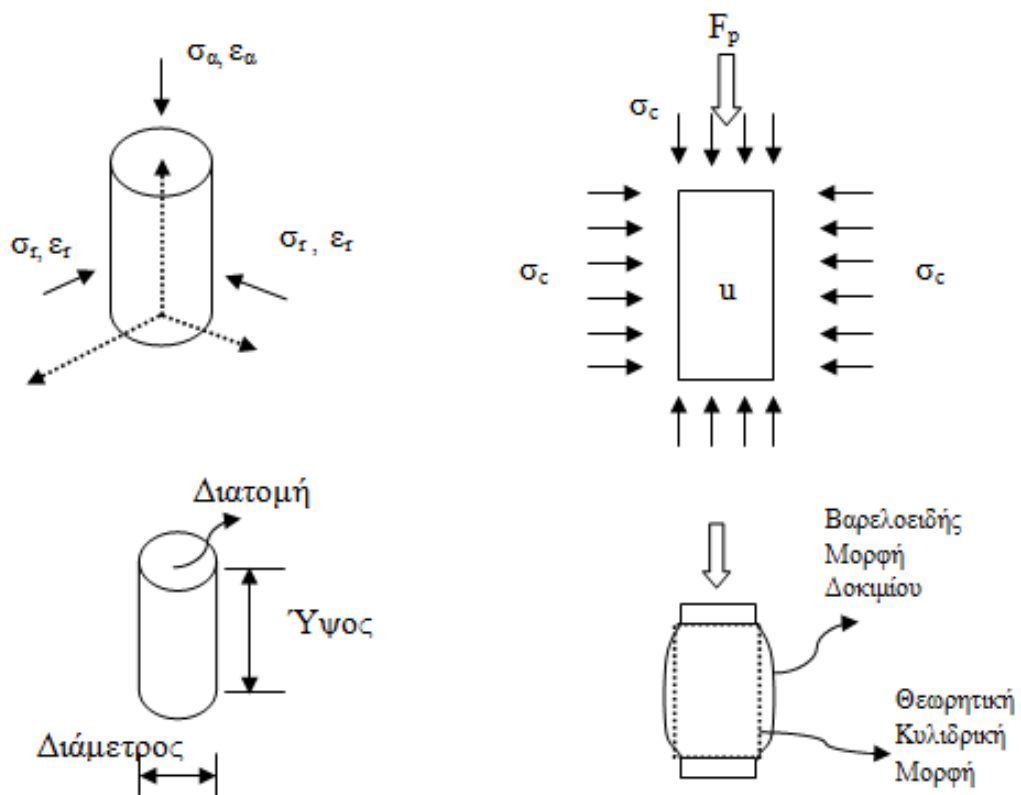


Αξίζει να αναφερθεί ότι τα πειράματα τελείωναν όταν ολοκληρώνονταν 40mm με 45mm αξονική μείωση του ύψους. Και ο ρυθμός μείωσης που κρίθηκε αρκετός ώστε να αποτονώνονται οι πιέσεις σε δοκίμιο με εδαφικό σκελετό την άμμο ήταν 0,3 mm το λεπτό.

### 3.2 Βασικές σχέσεις που διέπουν τη τριαξονική θλίψη

Στην τριαξονική δοκιμή, το σχήμα του δοκιμίου είναι κυλινδρικό και κατά τη δοκιμή του ασκείται σταθερή πίεση κυψέλης  $\sigma_c$  και αξονική πίεση μεγαλύτερη της πίεσης κυψέλης λόγω της δύναμης του πιστονιού  $F_p$  η οποία αυξάνεται στη διάρκεια του πειράματος καθώς ολόκληρη η κυψέλη ανεβαίνει σταδιακά.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι πιέσεις και οι δυνάμεις που ασκούνται στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής θλίψης καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα του δοκιμίου στο πέρας της δοκιμής.



Σχήμα 3.4 Περιγραφή πιέσεων και δυνάμεων κατά τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης

Για ένα δοκίμιο που μπορεί να παραμορφώνεται διατηρώντας το κυλινδρικό του σχήμα το ύψος συσχετίζεται με τη διατομή. Σε αστράγγιστες συνθήκες και συνεπώς υπό ισόογκη ( $\delta V = 0$ ) παραμόρφωση μειώνεται το ύψος δοκιμίου κατά  $\delta H$  και αυξάνεται η διατομή κατά  $\delta A$ . Η σχέση που τα συνδέει είναι :

$$V_{\text{initial}} = H_{\text{initial}} * A_{\text{initial}} = H * A \quad [\text{m}^3]$$

όπου ο δείκτης  $_{\text{initial}}$  αναφέρεται στις αρχικές διαστάσεις του κυλινδρικού ακόμα δοκιμίου.

Τα παραπάνω είναι εφικτά στην περίπτωση που η συσκευή διαθέτει υπερμεγέθεις πλάκες και λιπαντικό στην διεπιφάνεια δοκιμίου πλάκας, έτσι ώστε να επιτρέπει ομοιόμορφη παραμόρφωση του δοκιμίου. Στα παρόντα πειράματα οι πλάκες έχουν την ίδια διάμετρο με το δοκίμιο. Το σχήμα κατά την παραμόρφωση γίνεται βαρελοειδές και συνεπώς η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται απλουστευτικά.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφονται :

- Πίεση Κυψέλης  $\sigma_c$  (cell)
- Πίεση Πόρων  $u$
- Αξονικό Φορτίο  $F_p$  (piston)
- Αξονική Παραμόρφωση ( εξωτερικός αισθητήρας μέτρησης και μέσος όρος των δύο πλευρικών αισθητήρων στα τοιχώματα του δοκιμίου )
- Όγκος που απορροφάται (διόγκωση δοκιμίου ) ή απομακρύνεται (σμύκρυνση δοκιμίου) σε cc

Με βάση αυτά υπολογίζουμε τα εντατικά μεγέθη :

Ακτινική Κύρια Ενεργός Τάση,  $\sigma'_r$  (radial) :

$$\sigma'_r = \sigma_c - u \quad [\text{kPa}]$$

Αξονική Κύρια Ενεργός Τάση,  $\sigma'_\alpha$  (axial) :

$$\sigma'_\alpha = \sigma_c + F_p/A - u \quad [\text{kPa}]$$

Στη δοκιμή θλίψεως η αξονική κύρια τάση  $\sigma'_\alpha$  είναι μεγαλύτερη της ακτινικής  $\sigma'_r$  και κατ'επέκταση έχουμε :

$$\sigma'_r = \sigma'_3$$

$$\sigma'_\alpha = \sigma'_1$$

Για την περιγραφή της εντατικής κατάστασης με όρους εδαφομηχανικής χρησιμοποιούμε τις εξής παραμέτρους:

Αποκλίνουσα Τάση,  $q$  (deviatoric stress) :

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \frac{Fp}{A} \quad [\text{kPa}]$$

Μέση Ενεργός Τάση,  $p'$  (mean effective stress) :

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad [\text{kPa}]$$

(Οι ανωτέρω εκφράσεις των παραμέτρων των τάσεων έχουν υιοθετηθεί από την Σχολή του Cambridge University)

ή τις παραμέτρους Mohr που αντιστοιχούν στην κορυφή του ομώνυμου κύκλου:

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad [\text{kPa}]$$

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad [\text{kPa}]$$

### 3.3 Διαγράμματα Τριαξονικής Συσκευής

#### 3.3.1 Στοιχεία Τριαξονικών Δοκιμών

Στον Πίνακα 3.1 δίνονται συνοπτικά τα στοιχεία των πειραμάτων τριαξονικής θλίψης που διεξήχθησαν και στον Πίνακα 3.2 δίνονται τα στοιχεία παλαιότερων πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Αξίζει να τονισθεί ότι δεν έγιναν συγκρίσεις μεταξύ των δοκιμών του Πίνακα 3.1 με τα δοκίμια του Πίνακα 3.2 διότι στα παλαιότερα πειράματα ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιήθηκε ιλύ ΗΡF4, με διαφορετική προέλευση και κοκκομετρία.

Τίτλος Πειράματος	Τάση Στερεοποίησης	Ποσοστό Λεπτόκοκκων	Αρχική Διάμετρος Δοκιμίου	Αρχικό Ύψος Δοκιμίου	Μάζα Άμμου	Μάζα Ιλύος	Αρχικός Δείκτης Πόρων Σκελετού	Τελικός Δείκτης Πόρων Σκελετού
	$P'_{initial}$ [kPa]	FC [%]	$D_{initial}$ [mm]	$H_{initial}$ [mm]	$M_{M31}$ [gr]	$M_{D6}$ [gr]	$e_{skinitial}$ [-]	$e_{skfinal}$ [-]
S100f0M31_1	100	0	49,41	105,08	320,01	0,00	0,675	0,672
S100f0M31_2			48,55	99,75	291	0,00	0,688	0,685
S100f5M31_1		5	49,14	101,82	305,96	24,81	0,652	0,648
S100f5M31_2			48,6	99,75	286,75	23,25	0,689	0,685
S100f5M31_3			48,69	99,69	278,42	22,58	0,724	0,739
S100f10M31_1		10	49,01	102,18	272,24	47,76	0,819	0,814
S100f10M31_2			48,86	96,79	274,44	45,65	0,701	0,696
S300f0M31_1		300	0	49,5	104,23	320,20	0,00	0,666
S300f0M31_2	49,11			103,14	307,89	0,00	0,688	0,677
S300f0M31_3	48,6			99,78	285,00	0,00	0,728	0,714
S300f5M31_1	5		48,96	100,36	284,81	23,09	0,736	0,721
S300f5M31_2			49,22	96,88	286,8	23,25	0,682	0,671
S300f10M31_1	10		48,61	99,78	258,63	45,65	0,834	0,815
S300f10M31_2			48,79	98,56	272,24	47,76	0,738	0,724
S300f10M31_3			49,01	99,70	281,14	49,27	0,718	0,705

Πίνακας 3.1 Δεδομένα νέων πειραμάτων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο

Τίτλος Πειράματος	Τάση Στερεοποίησης	Ποσοστό Λεπτόκοκκων	Αρχική Διάμετρος Δοκιμίου	Αρχικό Ύψος Δοκιμίου	Μάζα Άμμου	Μάζα Ιλύος	Αρχικός Δείκτης Πόρων Σκελετού	Τελικός Δείκτης Πόρων Σκελετού
	$P'_{initial}$ [kPa]	FC [%]	$D_{initial}$ [mm]	$H_{initial}$ [mm]	$M_{M31}$ [gr]	$M_{D6}$ [gr]	$e_{sk initial}$ [-]	$e_{sk final}$ [-]
S100f0M31_1	100	0	48,74	105,10	327,25	0,00	0,589	0,588
S100f0M31_2			48,80	105,20	302,10	0,00	0,726	0,721
S100f5M31_1		5	48,87	105,68	292,10	14,78	0,707	0,705
S100f5M31_2			48,83	105,11	324,42	17,07	0,596	0,592
S100f10M31		10	49,27	105,10	327,81	36,42	0,595	0,59
S300f0M31		300	0	48,43	106,00	299,40	0,00	0,728
S300f5M31	5		47,89	105,11	292,36	15,39	0,698	0,683

Πίνακας 3.2 Δεδομένα παλαιότερων πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

### 3.3.2 Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης

Οι Schofield & Wroth (1968) παρουσίασαν τη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως ως χαρακτηριστική κατάσταση συμπεριφοράς των εδαφών. Η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται, είτε υπό αστράγγιστες συνθήκες, όταν η πίεση πόρων και η μέση ενεργός τάση παραμένουν σταθερές με συνεχιζόμενη παραμόρφωση του εδαφικού υλικού, είτε υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, όταν ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός.

Βασική αρχή της Θεωρίας της Κρίσιμης Κατάστασης είναι ότι υπάρχει μία μονοσήμαντη σχέση μεταξύ του δείκτη πόρων  $e_{cs}$ , της μέσης ενεργού τάσης  $p'_{cs}$  και της αποκλίνουσας τάσης  $q_{cs}$ , όπου ο συμβολισμός  $cs$  αντιστοιχεί στη κρίσιμη κατάσταση Critical State.

Η σχέση αυτή εκφράζεται στο επίπεδο των  $e_{cs} - p'_{cs}$  από την εξίσωση :

$$e_{cs} = \Gamma_{cs} - \lambda_{cs} \ln p'_{cs} \quad [-]$$

$\Gamma_{cs}$  : η τιμή του κρίσιμου δείκτη πόρων για  $p'_{cs}=1$  kPa

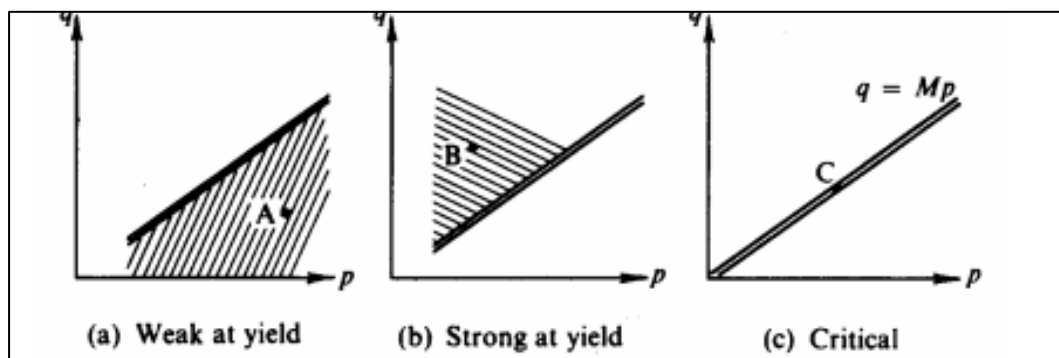
$\lambda_{cs}$  : η κλίση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL)

Και στο επίπεδο των  $q_{cs} - p'_{cs}$  από την εξίσωση :

$$q_{cs} = Mp'_{cs} \quad [-]$$

$M$  : ο λόγος των τάσεων στην κρίσιμη κατάσταση ( $q_{cs}/p'_{cs}$ )

Σύμφωνα με τη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης, η συμπεριφορά ενός κοκκώδους εδάφους δεν εξαρτάται μόνο από την πυκνότητά του, αλλά και από το μέγεθος της μέσης ενεργού τάσης. Η τρέχουσα κατάσταση του κοκκώδους εδάφους περιγράφεται ως ένα σημείο στο επίπεδο  $q-p'$  του οποίου οι συντεταγμένες αντιστοιχούν στις τρέχουσες τιμές της παραμένουσας αντοχής και της μέσης ενεργού τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Απεικόνιση δείγματος στο επίπεδο  $q-p'$  σε σχέση με τη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης

Όταν το σημείο βρίσκεται πάνω από τη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (Σημείο B :  $q_1 > M^*p_1$ ), το έδαφος έχει την τάση να εμφανίσει συστολική συμπεριφορά, ενώ όταν το σημείο βρίσκεται κάτω από τη Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (Σημείο A :  $q_1 < M^*p_1$ ), το έδαφος θα εμφανίσει διαστολική συμπεριφορά.

Στις αστράγγιστες δοκιμές (Undrained Tests), η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται όταν η πίεση πόρων και η αποκλίνουσα τάση παραμένουν σταθερές για αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων ( $\Delta U = \Delta q = 0$ ).

Αντίθετα στις στραγγιζόμενες δοκιμές (Drained Tests), η Κρίσιμη κατάσταση αναγνωρίζεται όταν δεν έχω πλέον μεταβολή του όγκου του δοκιμίου σε μεγάλες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης ( $\Delta V = 0$ ). Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το δοκίμιο να μην έχει σχηματίσει διατμητική ζώνη.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν αστράγγιστες ( Undrained Tests) και έτσι για την αναγνώριση της Κρίσιμης Κατάστασης έπρεπε να ισχύουν δύο συνθήκες :

- Η αποκλίνουσα τάση  $q$  και η πίεση πόρων  $u$  να παραμένουν σταθερές για αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων και
- Η μεταβολή του ρυθμού αύξησης της πίεσης πόρων  $\delta(\Delta u)/\delta(\epsilon_z)$  να είναι μηδενική.

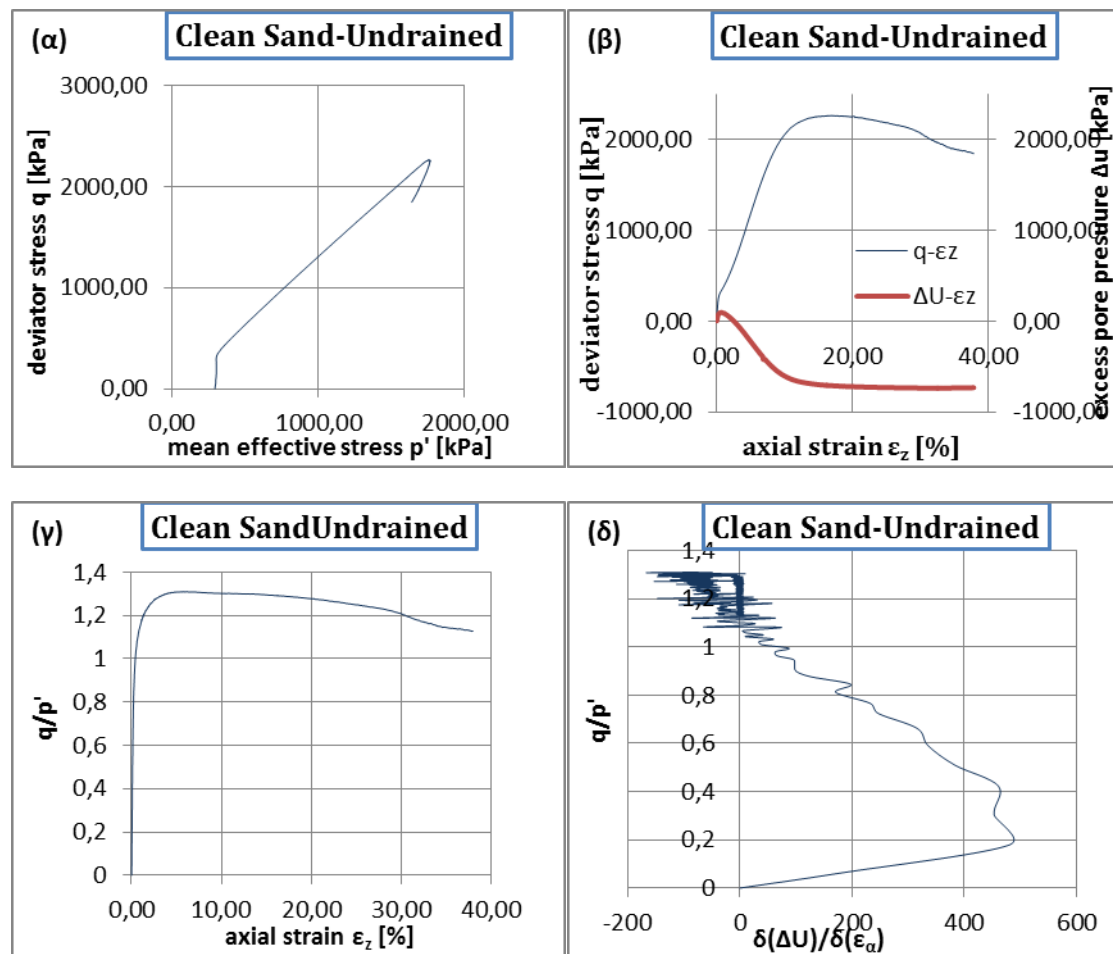
Στο Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα δοκίμια που ενεργοποίησαν τη Κρίσιμη Κατάσταση, σε συνθήκες ώστε να ισχύουν οι δύο παραπάνω προϋποθέσεις ταυτόχρονα. Έτσι, επιλέχθηκαν εκείνα τα στοιχεία της δοκίμης ( $p'_{cs}$ ,  $q_{cs}$ ,  $u_{cs}$ ) όπου εμφανίζονται σε μεγαλύτερες αξονικές παραμορφώσεις  $\epsilon_a$ .

Αναλυτικότερα, στα Σχήματα 3.6 - 3.8 παρουσιάζονται τα δοκίμια καθαρής άμμου που έφτασαν σε Κρίσιμη Κατάσταση. Τα Σχήματα 3.9 – 3.11 αφορούν δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% ενώ τα Σχήματα 3.12 -3.13 αφορούν δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% που έφτασαν σε Κρίσιμη Κατάσταση.

Ποσοστό Λεπτόκοκκου Υλικού [%]	Τάση Στερεοποίησης [kPa]	Μέθοδος Παρασκευής Δοκιμίου	Ολικός Δείκτης Πόρων e [-]	Δείκτης Πόρων Σκελετού e <sub>sk</sub> [-]	Ισοδύναμος Δείκτης Πόρων e <sub>eq</sub> [-]	φ=σταθερό και ΔU=0				δ(ΔU)/δ(ε <sub>z</sub> )=0			
						Μέση ενεργός τάση p' <sub>cs</sub> [kPa]	Αποκλίνοσα τάση q <sub>cs</sub> [kPa]	Λόγος τάσεων η <sub>cs</sub> =q/p' [-]	Αξονική Παραμόρφωση ε <sub>z</sub> [%]	Μέση ενεργός τάση p' <sub>cs</sub> [kPa]	Αποκλίνοσα τάση q <sub>cs</sub> [kPa]	Λόγος τάσεων η <sub>cs</sub> =q/p' [-]	Αξονική Παραμόρφωση ε <sub>z</sub> [%]
0	100	dry deposition	0,672	0,672	0,672	1452,77	1970,95	1,36	9,59	1451,06	1969,64	1,36	9,42
0	300	dry deposition	0,677	0,677	0,677	1659,88	2158,65	1,30	11,45	1734,22	2247,49	1,30	14,47
0	300	dry deposition	0,657	0,657	0,657	1834,69	2478,00	1,35	9,17	1844,88	2485,95	1,35	9,94
0	100	dry deposition	0,685	0,685	0,685	1169,95	1463,03	1,25	13,89	1170,07	1463,40	1,25	13,86
5	100	dry deposition	0,548	0,648	0,628	1410,48	2058,77	1,46	8,83	1424,52	2077,49	1,46	9,81
5	300	dry deposition	0,571	0,642	0,652	1679,03	2407,72	1,43	11,41	1587,67	2241,74	1,41	7,81
5	100	dry deposition	0,523	0,592	0,602	1488,93	2346,12	1,58	4,58	1467,55	2309,19	1,57	4,34
5	100	dry deposition	0,582	0,685	0,664	1504,73	2164,27	1,44	10,25	1444,26	2093,63	1,45	7,26
5	300	dry deposition	0,569	0,696	0,650	1792,12	2547,55	1,42	10,13	1775,26	2526,20	1,42	9,38
5	300	dry deposition	0,616	0,721	0,700	1203,12	1453,53	1,21	37,11	1201,29	1467,21	1,22	35,05
10	300	dry deposition	0,516	0,724	0,681	1578,52	2136,94	1,35	21,85	1581,67	2139,48	1,35	22,05
10	100	dry deposition	0,5	0,696	0,663	1506,54	2193,97	1,46	12,25	1512,16	2200,49	1,46	12,53
10	300	dry deposition	0,58	0,815	0,752	1092,03	1365,98	1,25	30,61	1087,42	1360,97	1,25	30,27
10	300	dry deposition	0,49	0,63	0,652	1660,36	2445,26	1,47	10,89	1536,70	2260,20	1,47	7,24

Πίνακας 33 Δοκίμια που ενεργοποίησαν την κρίσιμη κατάσταση



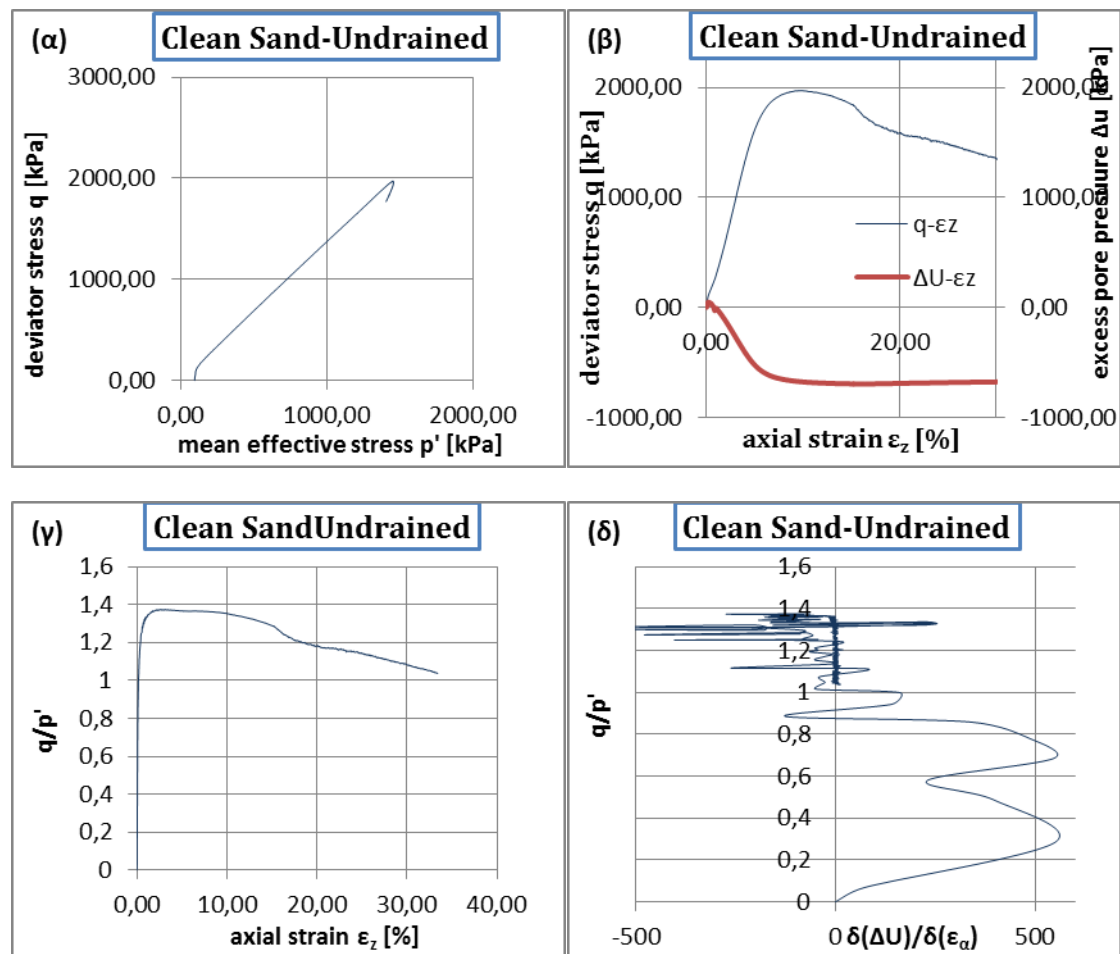


Σχήμα 3.6 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο καθαρής άμμου,  $p'_0=300\text{kPa}$

AU-300-1	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_\alpha$	$u$
Όταν $\delta(\Delta u)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$	1,296	1734,216	2247,490	14,472	15,469
Όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta u=0$	1,300	1659,876	2158,651	11,451	60,065
Επίπεδο αστοχίας	1,292	1748,893	2259,700	15,931	4,862

Πίνακας 3.4 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος AU-300-1

Το Σχήμα 3.6 περιγράφει ένα πείραμα καθαρής άμμου στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 300kPa με  $e_{sk}=0,677$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται για λόγο τάσεων  $q_{cs}/p'_{cs}=1,30$  όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6 (δ) όπου  $\delta(\Delta u)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$  και στο Σχήμα 3.6 (γ) όπου ο λόγος μένει σταθερός.

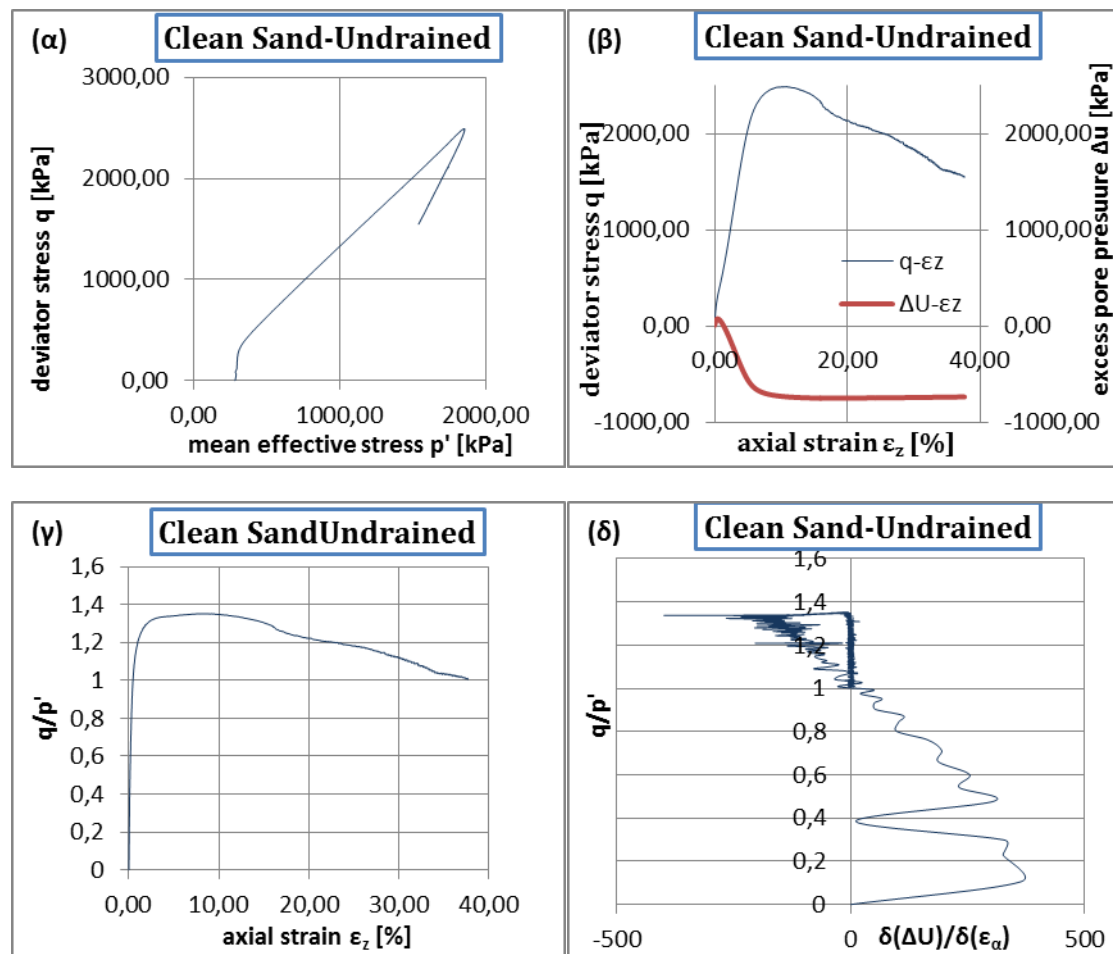


Σχήμα 3.7 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο καθαρής άμμου,  $p'_0=100\text{kPa}$

AU-100-2	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_{\alpha}$	u
Όταν $\delta(\Delta u)/\delta(\epsilon_{\alpha})=0$	1,357	1451,059	1969,641	9,423	6,139
όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta U=0$	1,357	1452,774	1970,946	9,588	4,606
επίπεδο αστοχίας	1,350	1456,546	1966,933	10,248	-0,632

Πίνακας 3.5 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος AU-100-2

Το Σχήμα 3.7 περιγράφει ένα πείραμα καθαρής άμμου στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 100kPa με  $e_{sk}=0,672$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε μέση ενεργό τάση  $p'_{cs}=1452,774\text{kPa}$  και αποκλίνουσα  $q_{cs}=1970,946$  δηλαδή για λόγο τάσεων  $q_{cs}/p'_{cs}=1,36$  όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.7 (δ).

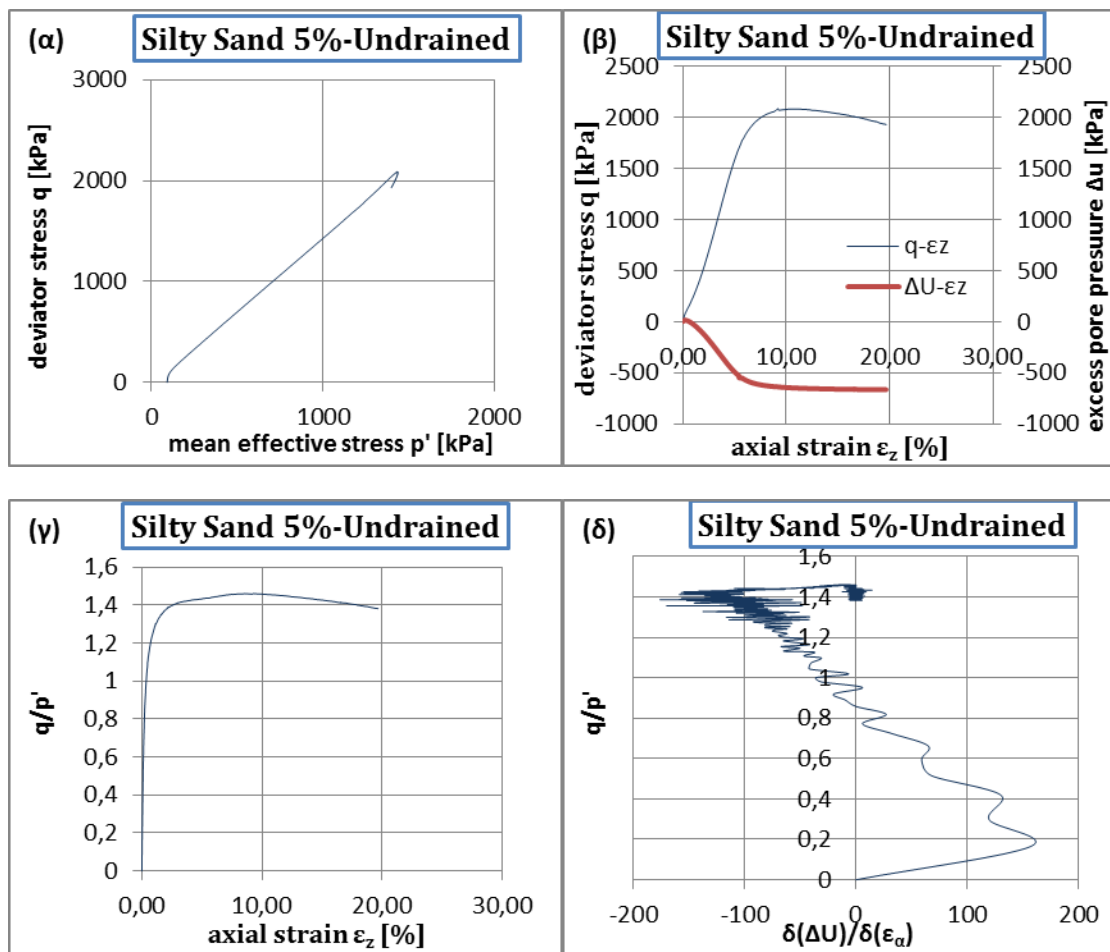


Σχήμα 3.8 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο καθαρής άμμου,  $p'_0=300\text{kPa}$

AU-300-2	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_\alpha$	$u$
Όταν $\delta(\Delta U)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$	1,3475	1844,8767	2485,9491	9,9363	-15,3260
Όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta U=0$	1,3506	1834,6905	2477,9984	9,1731	-8,5530
Επίπεδο αστοχίας	1,3418	1853,6113	2487,2289	11,3082	-23,8870

Πίνακας 3.6 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος AU-300-2

Το Σχήμα 3.8 περιγράφει ένα πείραμα καθαρής άμμου στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 300kPa με  $e_{sk}=0,657$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε μέση ενεργό τάση  $p'_{cs}=1844,88\text{kPa}$  και αποκλίνουσα  $q_{cs}=2485,95\text{kPa}$  δηλαδή για λόγο τάσεων  $q_{cs}/p'_{cs}=1,35$  όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 3.8 (γ) και (δ).

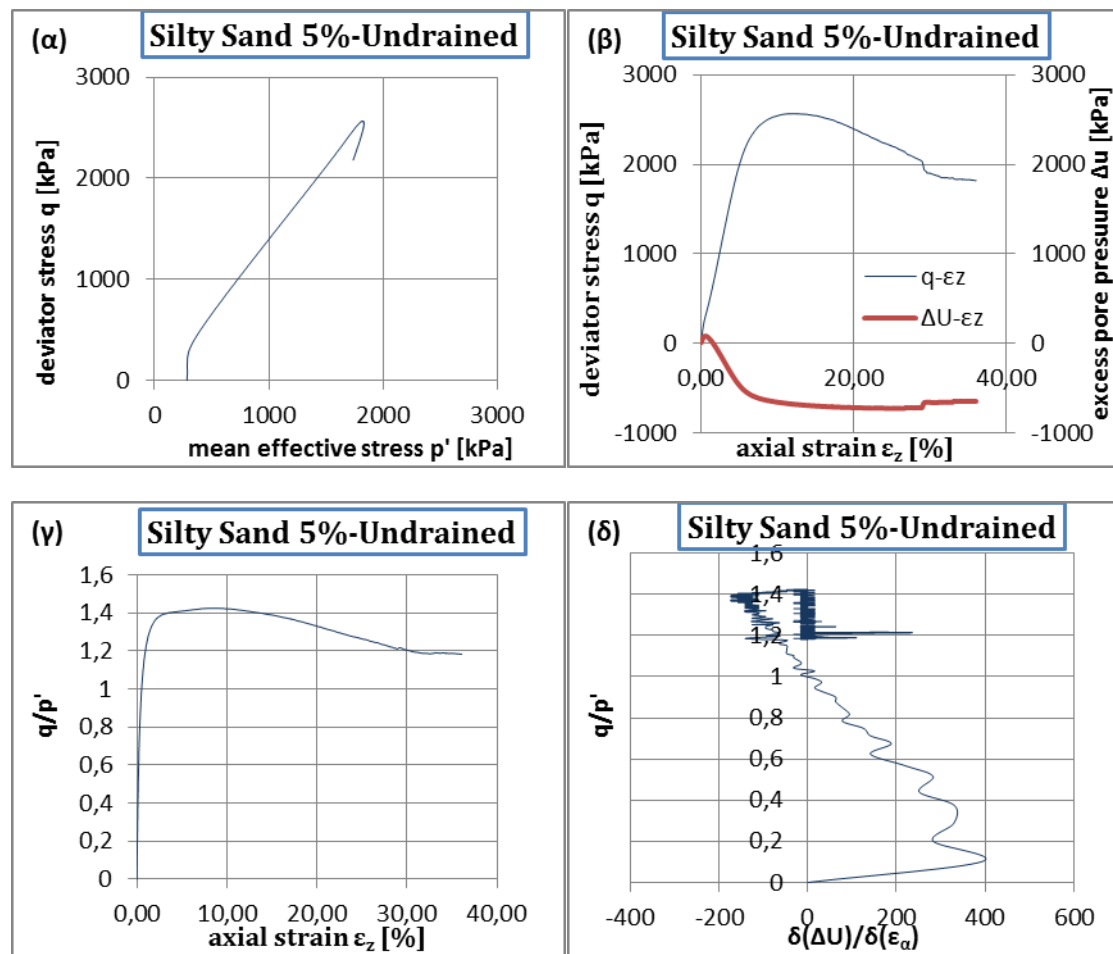


Σχήμα 3.9 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπιέσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπιέσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5%,  $p'_0=100\text{kPa}$

B5U-100-2	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_{\alpha}$	u
Όταν $\delta(\Delta U)/\delta(\epsilon_{\alpha})=0$	1,458	1424,516	2077,492	9,808	700,209
Όταν $q=\sigma_{\text{σταθ}}$ και $\Delta U=0$	1,460	1410,479	2058,768	8,827	700,209
Επίπεδο αστοχίας	1,455	1432,342	2084,101	10,766	700,209

Πίνακας 3.7 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος B5U-100-2

Το Σχήμα 3.9 περιγράφει ένα πείραμα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 100kPa με  $e_{sk}=0,648$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε μέση ενεργό τάση  $p'_{cs}=1424,52\text{kPa}$  και αποκλίνουσα  $q_{cs}=2077,49\text{kPa}$  δηλαδή για λόγο τάσεων  $q_{cs}/ p'_{cs}=1,46$  όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 3.9 (γ) και (δ).

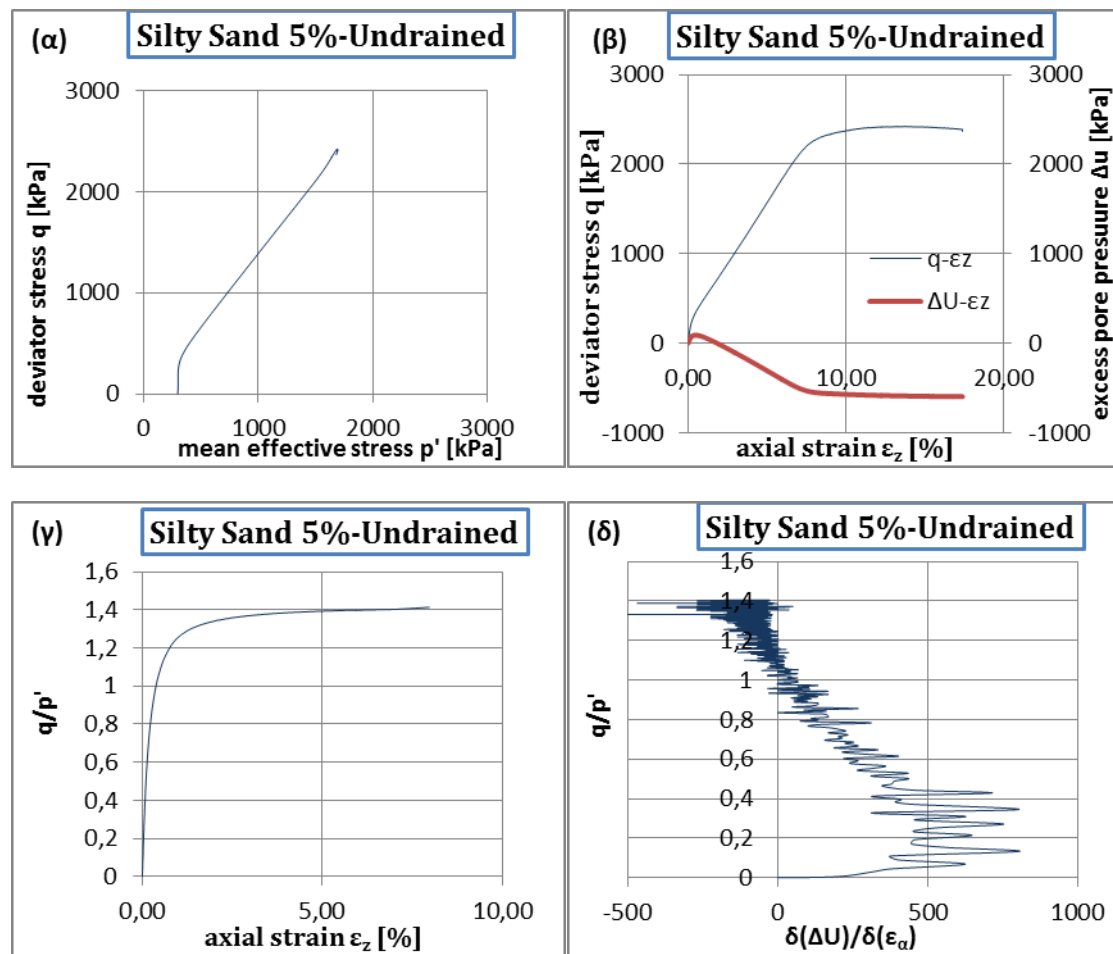


Σχήμα 3.10 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5%,  $p'_0=300\text{kPa}$

B5U-300-1	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_\alpha$	u
Όταν $\delta(\Delta u)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$	1,423	1775,260	2526,197	9,377	67,397
Όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta U=0$	1,422	1792,115	2547,550	10,126	57,253
Επίπεδο αστοχίας	1,380	1831,027	2526,728	15,964	11,401

Πίνακας 3.8 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος B5U-300-1

Το Σχήμα 3.10 περιγράφει ένα πείραμα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 300kPa με  $e_{sk}=0,696$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε λόγο τάσεων  $q_{cs}/ p'_{cs}=1,42$  όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 3.10 (γ) και (δ).

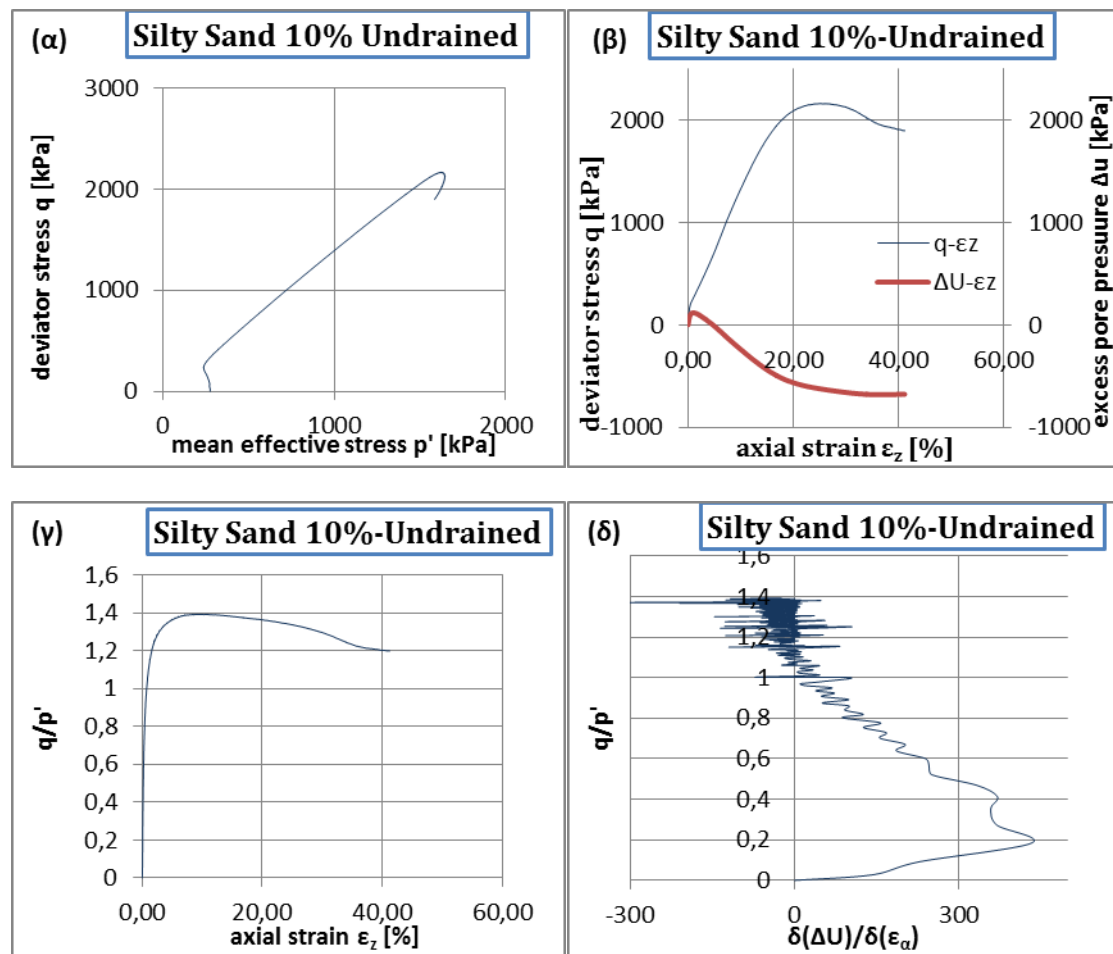


Σχήμα 3.11 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5%,  $p'_0=300\text{kPa}$

B5U-300-3	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_\alpha$	u
Όταν $\delta(\Delta u)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$	1,412	1587,670	2241,738	7,806	3,455
Όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta u=0$	1,434	1679,029	2407,721	11,407	-32,576
Επίπεδο αστοχίας	1,422	1695,512	2411,565	15,725	-46,632

Πίνακας 3.9 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος B5U-300-3

Το Σχήμα 3.11 περιγράφει ένα πείραμα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 300kPa με  $e_{sk}=0,642$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε μέση ενεργό τάση  $p'_{cs}=1679,03\text{kPa}$  και αποκλίνουσα  $q_{cs}=2407,72\text{kPa}$  δηλαδή για λόγο τάσεων  $q_{cs}/p'_{cs}=1,43$ .

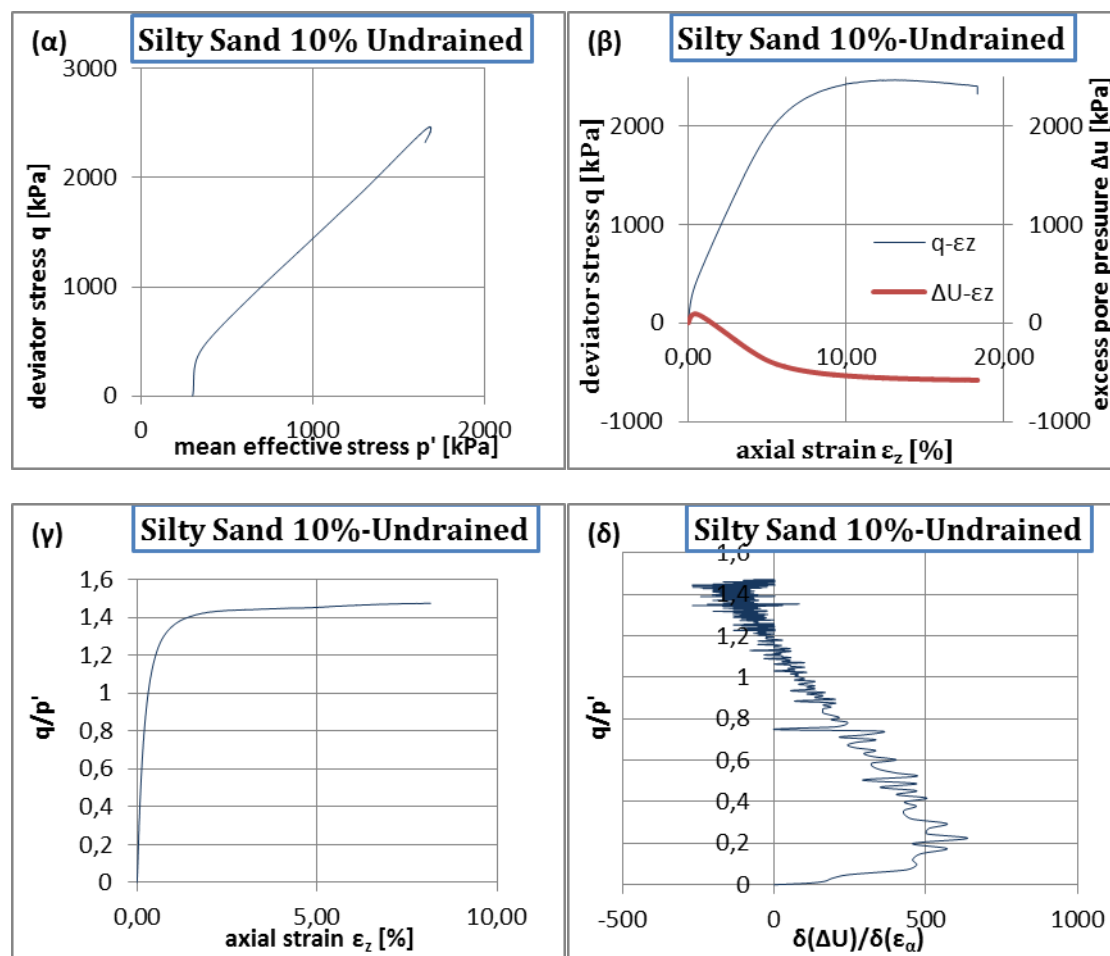


Σχήμα 3.12 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10%,  $p'_0=300\text{kPa}$

B10U-300-1	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_\alpha$	$u$
Όταν $\delta(\Delta U)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$	1,353	1581,671	2139,482	22,052	131,883
Όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta U=0$	1,354	1578,521	2136,935	21,846	134,056
Επίπεδο αστοχίας	1,287	1645,127	2116,696	30,702	60,960

Πίνακας 3.10 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος B10U-300-1

Το Σχήμα 3.12 περιγράφει ένα πείραμα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%, στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 300kPa με  $e_{sk}=0,724$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε μέση ενεργό τάση  $p'_{cs}=1581,671\text{kPa}$  και αποκλίνουσα  $q_{cs}=2139,482\text{kPa}$  δηλαδή για λόγο τάσεων  $q_{cs}/p'_{cs}=1,35$ .



Σχήμα 3.13 (α) Διαδρομές τάσεων (β) Αποκλίνουσα τάση και υπερπίεσεις πόρων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (γ) Λόγος τάσεων σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση και (δ) λόγος των τάσεων σε συνάρτηση με τον λόγο των μεταβολών υπερπίεσεων πόρων και αξονικής παραμόρφωσης για δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10%,  $p'_0=300\text{kPa}$

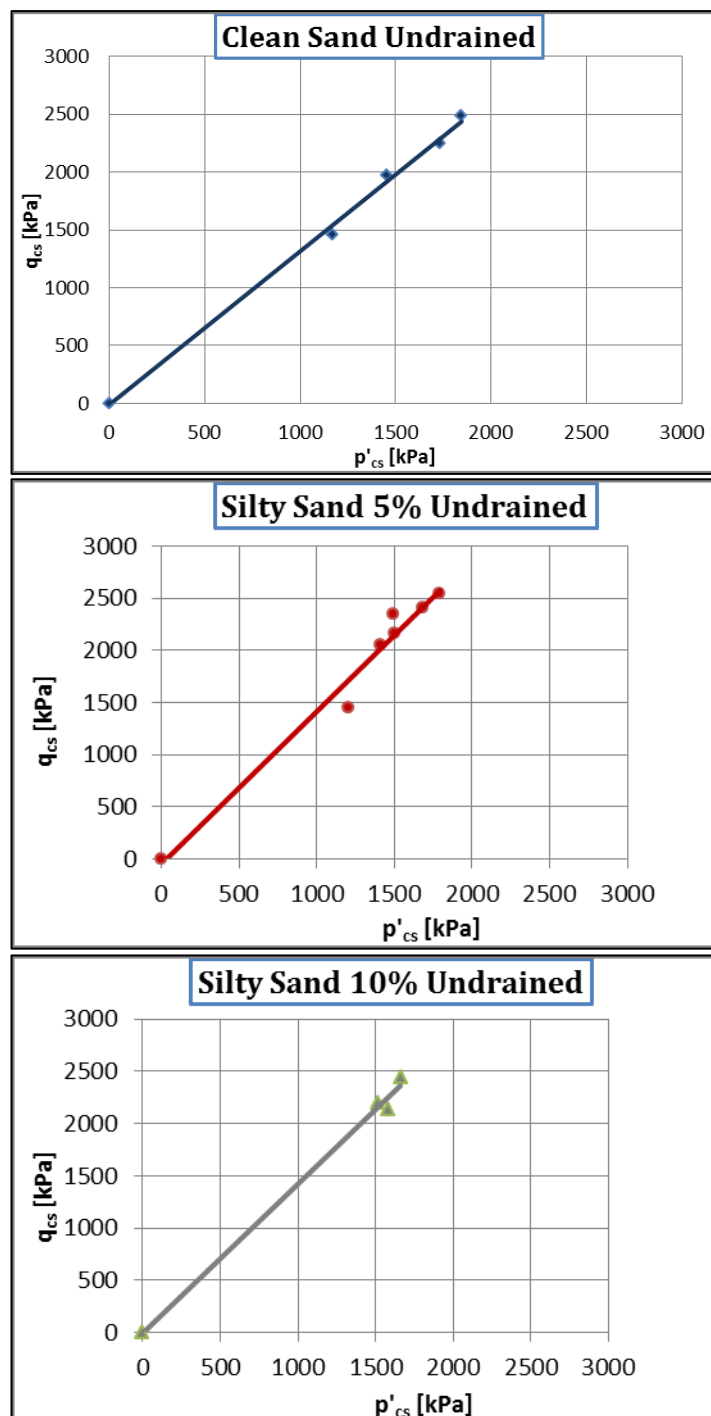
B10U-300-2	$(q/p')_{cs}$	$p'_{cs}$	$q_{cs}$	$\epsilon_\alpha$	u
Όταν $\delta(\Delta U)/\delta(\epsilon_\alpha)=0$	1,47080947	1536,70125	2260,19475	7,2412318	60,704
όταν $q=\text{σταθ}$ και $\Delta U=0$	1,47272492	1660,36101	2445,25503	10,8918489	-1,397
επίπεδο αστοχίας	1,45517481	1688,3988	2456,9154	14,6586609	-25,676

Πίνακας 3.11 Κρίσιμη κατάσταση πειράματος B10U-300-2

Το Σχήμα 3.13 περιγράφει ένα πείραμα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%, στερεοποιημένης σε αρχική ενεργό τάση 300kPa με  $e_{sk}=0,63$  όπου η Κρίσιμη Κατάσταση ενεργοποιείται σε λόγο τάσεων  $q_{cs}/p'_{cs}=1,47$ .

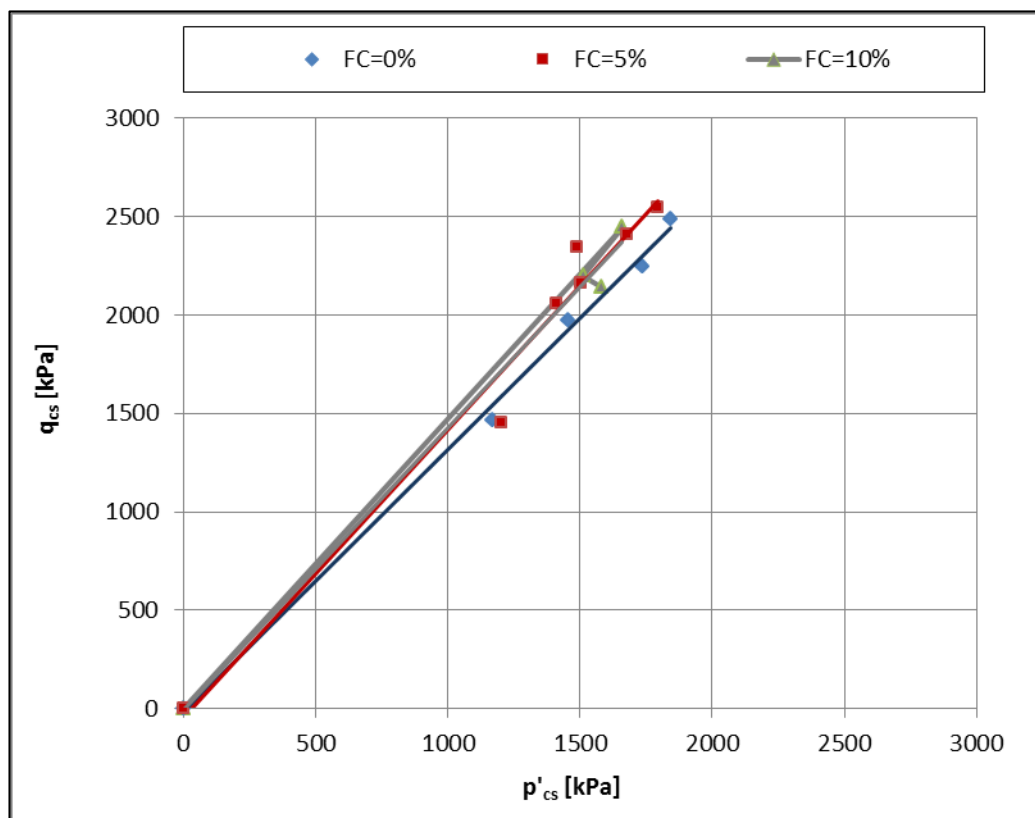


Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι γραμμές της Κρίσιμης Κατάστασης της άμμου και των μειγμάτων ιλυώδους άμμου 5% και 10% στο επίπεδο  $q_{cs}$ - $p'_{cs}$  που προσδιορίστηκαν από εκείνες τις αστράγγιστες και στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές όπου η κρίσιμη κατάσταση ενεργοποιήθηκε. Το σχήμα των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο  $q_{cs}$ - $p'_{cs}$  είναι ευθείες που ξεκινούν από την αρχή των αξόνων και ορίζονται από τον τύπο  $q_{cs}=M \cdot p'_{cs}$  όπως αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα 3.14 Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο επίπεδο  $q_{cs}$ - $p'_{cs}$  (α) καθαρής άμμου, (β) μειγμάτων 5% και (γ) μειγμάτων 10%

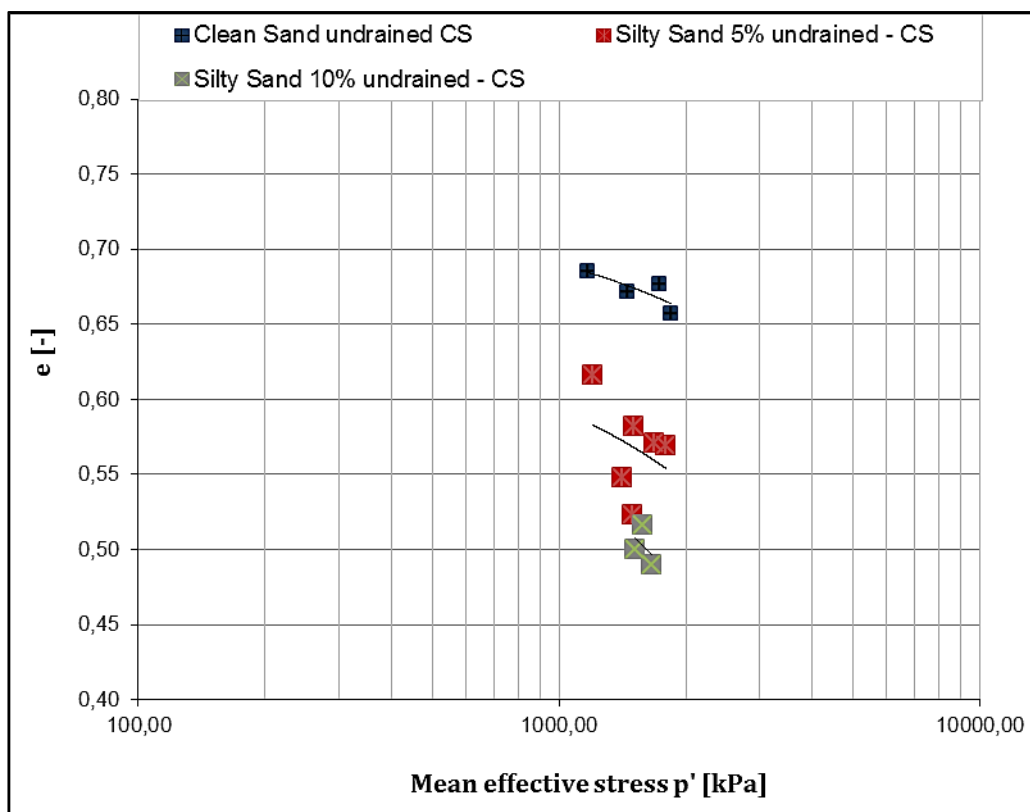
Αν βάλουμε τις Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης της καθαρής άμμου και των μειγμάτων 5% και 10% θα παρατηρήσουμε ότι η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης των μειγμάτων συμπίπτουν, δηλαδή έχουν ίδια κλίση ενώ η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης της καθαρής άμμου έχει μικρότερη κλίση όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15 Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο επίπεδο  $q_{cs}$ - $p'_{cs}$  καθαρής άμμου και μειγμάτων ιλυώδους άμμου 5% και 10%

Όμοια και από το Σχήμα 3.16 όπου οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης έχουν παραχθεί στο επίπεδο  $e$ - $p'_{cs}$  φαίνεται ότι όσο προσθέτω λεπτόκοκκο υλικό, οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης εμφανίζουν ελάχιστα εντονότερη κλίση και βρίσκονται χαμηλότερα.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι τόσο από τις αστράγγιστες όσο και από τις στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές προκύπτει μία μοναδική Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης για κάθε ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού όπως υποστήριξαν οι Yang et al. (2006).



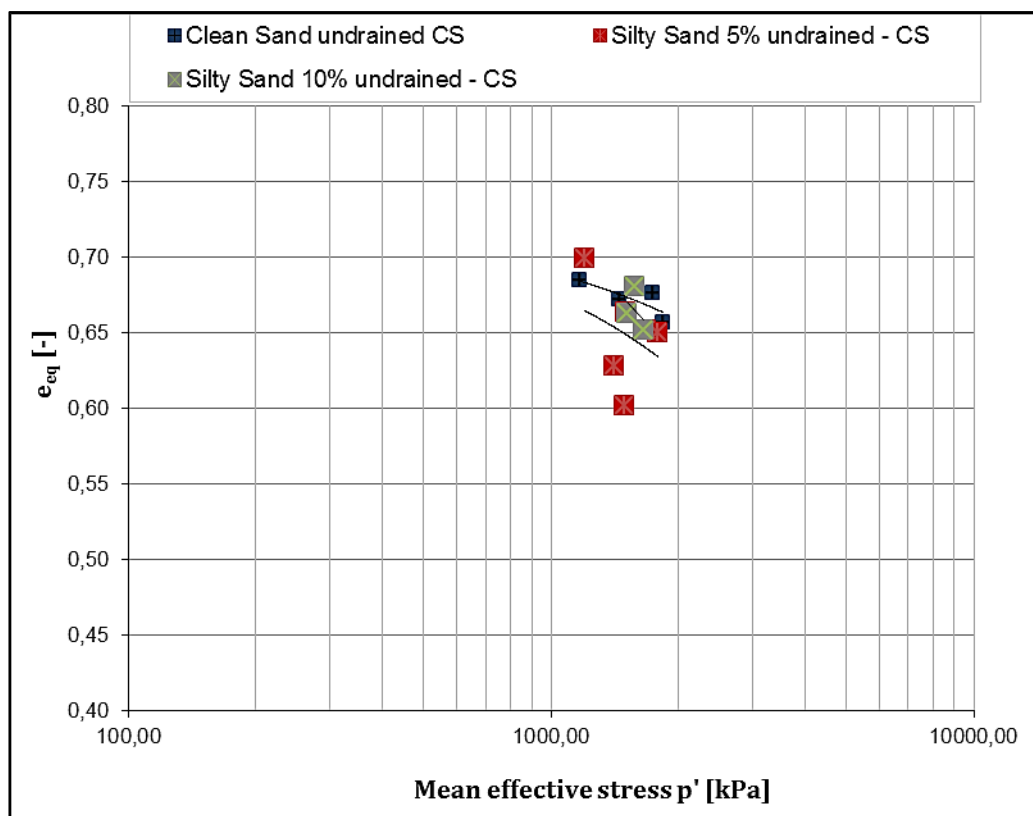
Σχήμα 3.16 Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο επίπεδο  $e-\log p'_{cs}$  καθαρής άμμου και μειγμάτων ιλυώδους άμμου 5% και 10%

Το Σχήμα 3.17 παρουσιάζει τις Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο  $e_{eq}-p'_{cs}$ . Παρατηρούμε ότι οι Γραμμές Κρίσιμης κατάστασης των δύο μειγμάτων και της καθαρής άμμου πλησίασαν.

.Οι ισοδύναμοι δείκτες πόρων κάθε δοκιμίου βγήκαν από τη σχέση:

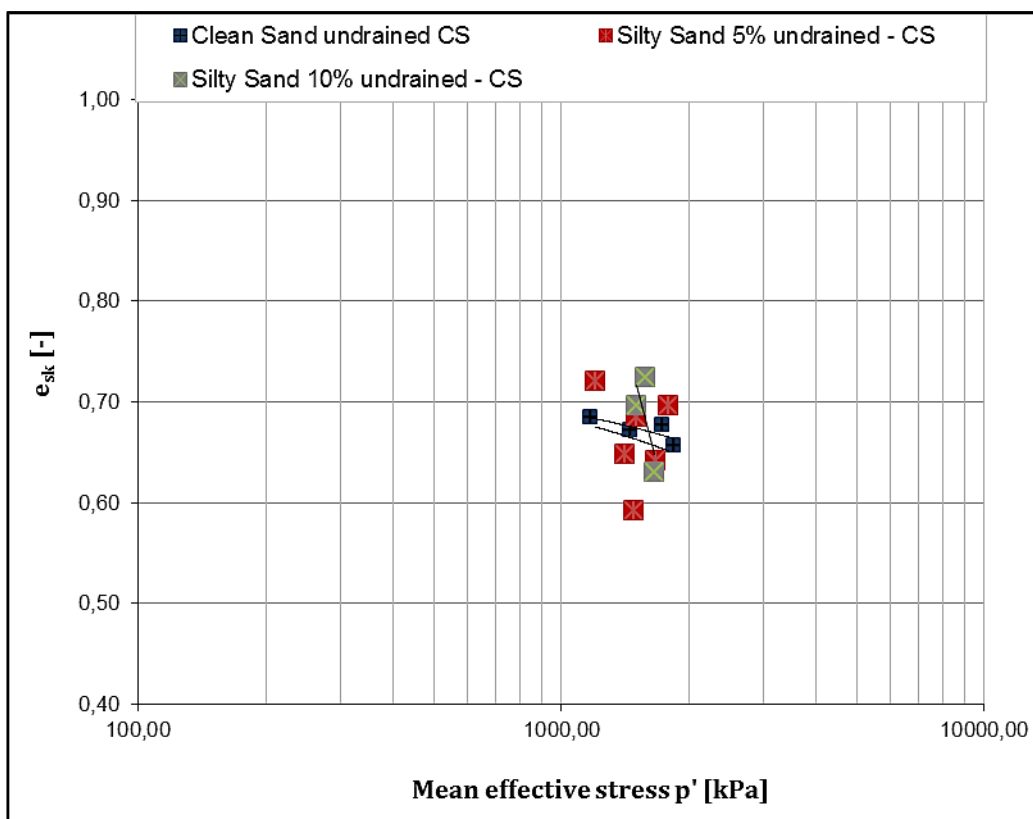
$$e_{eq} = \frac{e+(1-b)f_c}{1-(1-b)f_c} \quad [-]$$

Υποθέτοντας  $b=0$  για το δοκίμιο καθαρής άμμου,  $b=0,015$  για το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5% και  $b=0,02$  για το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10%.



Σχήμα 3.17 Κανονικοποιημένες Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο επίπεδο  $e_{eq}-\log p'_{cs}$  καθαρής άμμου και μειγμάτων ιλυώδους άμμου 5% και 10%

Το Σχήμα 3.18 απεικονίζει τις Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο  $e_{sk}-p'_{cs}$ . Οι Γραμμές Κρίσιμης κατάστασης της καθαρής άμμου και των μειγμάτων 5% και 10% ήρθαν ακόμα πιο κοντά. Τα σημεία που ορίζουν την Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης της ιλυώδους άμμου 10% απομακρύνθηκαν περισσότερο, όμως η κλίση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης της καθαρής άμμου και του μείγματος 5% έχουν παρόμοια κλίση και εδώ.



Σχήμα 3.18 Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο επίπεδο  $e_{sk}-\log p'_{cs}$  καθαρής άμμου και μειγμάτων ιλυώδους άμμου 5% και 10%

Από το Σχήμα 3.15 μπορούμε εύκολα να βρούμε τη γωνία τριβής στη κρίσιμη κατάσταση για κάθε ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού σύμφωνα με τη σχέση :

$$M = \frac{6 \sin \varphi'_{cs}}{3 - \sin \varphi'_{cs}} \quad [-]$$

όπου M η κλίση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης ( $M = q_{cs} / p'_{cs}$ )

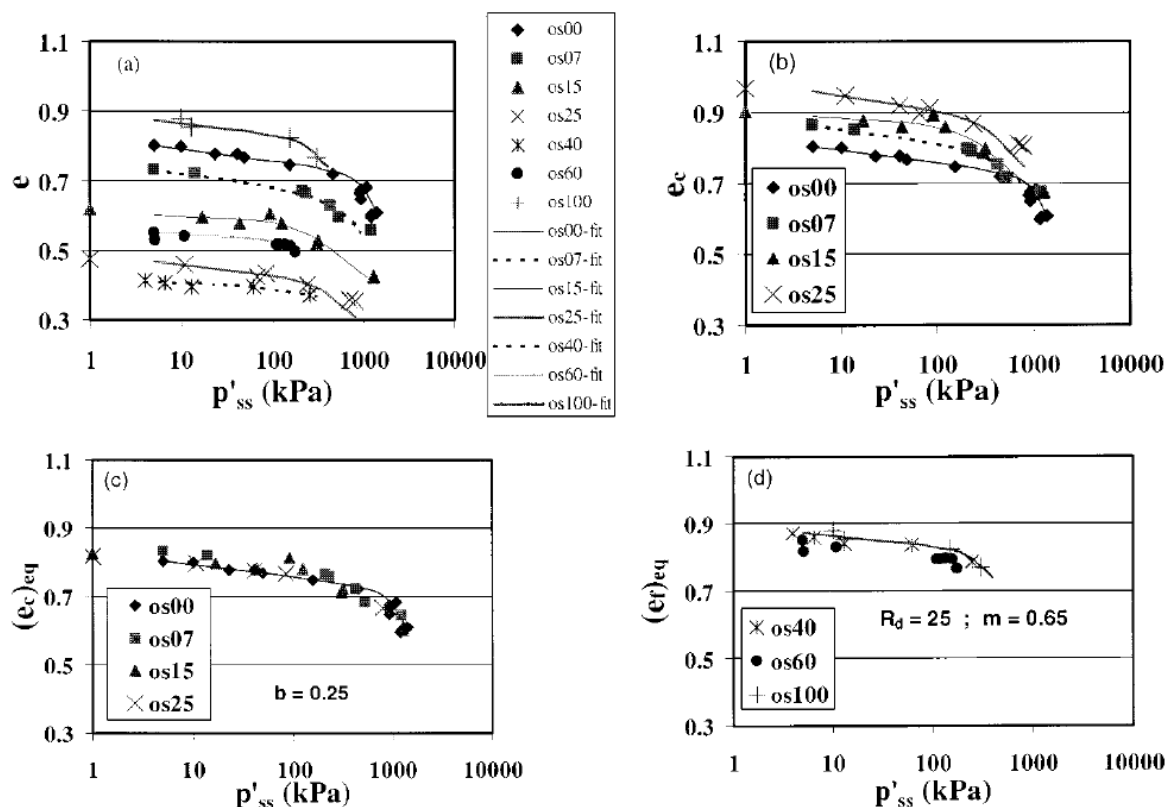
	Clean Sand	Silty Sand 5%	Silty Sand 10%
M	1,3323	1,4618	1,4288
$\varphi'_{cs}$	33,03	35,99	35,24

Πίνακας 3.12 Γωνία Τριβής στην Κρίσιμη Κατάσταση

Παρατηρούμε ότι η κλίση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης είναι εντονότερη στα μείγματα. Ενώ αν οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης παραχθούν στο επίπεδο  $q_{cs}-p'_{cs}$  τότε προσθέτοντας λεπτόκοκκο υλικό οι Γραμμές πάνε χαμηλότερα και με παρόμοια σχετικά κλίση.

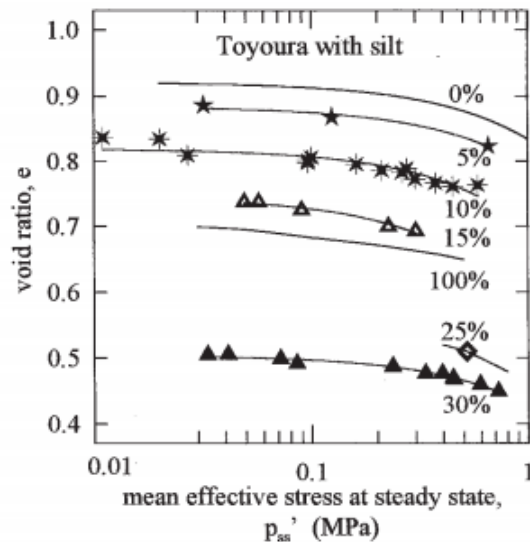
Οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης είναι περισσότερο ή λιγότερο παράλληλες μεταξύ τους στο επίπεδο  $e_{cs}-p'_{cs}$ . Επιπλέον, όπως το ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού αυξάνει, η θέση της CSL / SSL κινείται προς τα κάτω μέχρι ορισμένης ποσότητας λεπτόκοκκων. Σε όμοιο συμπέρασμα κατέληξαν πολλοί ερευνητές όπως παραδείγματος χάριν οι Zlatonic & Ishihara (1995), Lade & Yamamuro (1997), Thevanayagam (1998), Thevanayagam & Mohan (2000), Thevanayagam et al. (2002). Ni et al. (2004), Yang et al. (2006), Murthy et al. (2007), Rahman & Gnanendran (2008).

Για λόγους πληρότητας παρατίθεται η έρευνα των Thevanayagam et al. (2000) οι οποίοι βρήκαν ότι για λεπτόκοκκο υλικό έως 40% οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης κινούνται προς τα κάτω όταν στον άξονα  $y$  φαίνεται ο δείκτης πόρων,  $e$ , ενώ με περαιτέρω αύξηση η θέση της CSL αλλάζει κατεύθυνση και κινείται προς τα πάνω έως ότου η περιεκτικότητα φτάσει το 100% (καθαρή ιλύς). Τόνισαν επίσης ότι η κλίση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης παραμένει ίδια ανεξαρτήτου ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.19. Όμως όταν στον άξονα  $y$  εμφανίζεται ο ισοδύναμος δείκτης πόρων οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν όπως παρατηρήθηκε και στα Σχήματα 1.16-1.18.



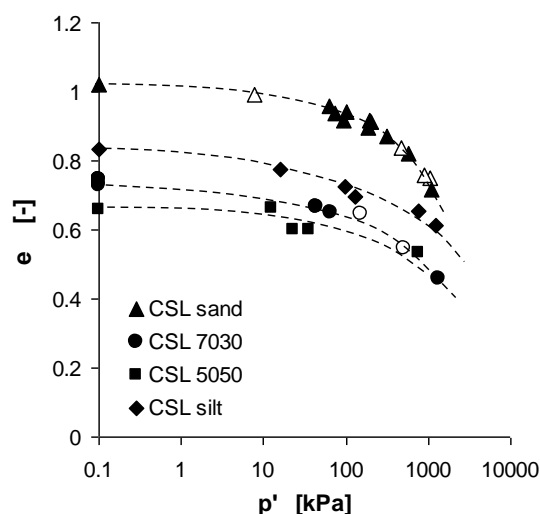
Σχήμα 3.19 Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της CSL στο επίπεδο  $e - \ln p'$ ,  $e_c - \ln p'$ ,  $(e_c)_{eq} - \ln p'$  και  $(e_f)_{eq} - \ln p'$ , Thevanayagam et al. (2000)

Ομοίως, οι Zlatonic & Ishihara (1995) βρήκαν ότι οι CSL's/SSL's για μείγματα άμμου Toyoura και μη πλαστικής ιλύς κινείται προς τα κάτω με αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού έως 30% και στη συνέχεια προς τα επάνω για να αντιπροσωπεύσουν τη συμπεριφορά της καθαρής ιλύς.



Σχήμα 3.20 Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της SSL στο επίπεδο  $e - \ln p'$ , Zlatonic & Ishihara (1995)

Επίσης, οι Yang et al. (2006) βρήκαν ότι οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης κινούνται προς τα κάτω με αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού έως 50% και στη συνέχεια προς τα επάνω για να αντιπροσωπεύσουν τη συμπεριφορά της καθαρής ιλύς.



Σχήμα 3.21 Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της CSL στο επίπεδο  $e - \ln p'$  (τα κενά σχήματα είναι δοκιμές όπου παρασκευάστηκαν με διαφορετικό τρόπο από την υγρή αναμόχλευση, Yang et al. (2006)

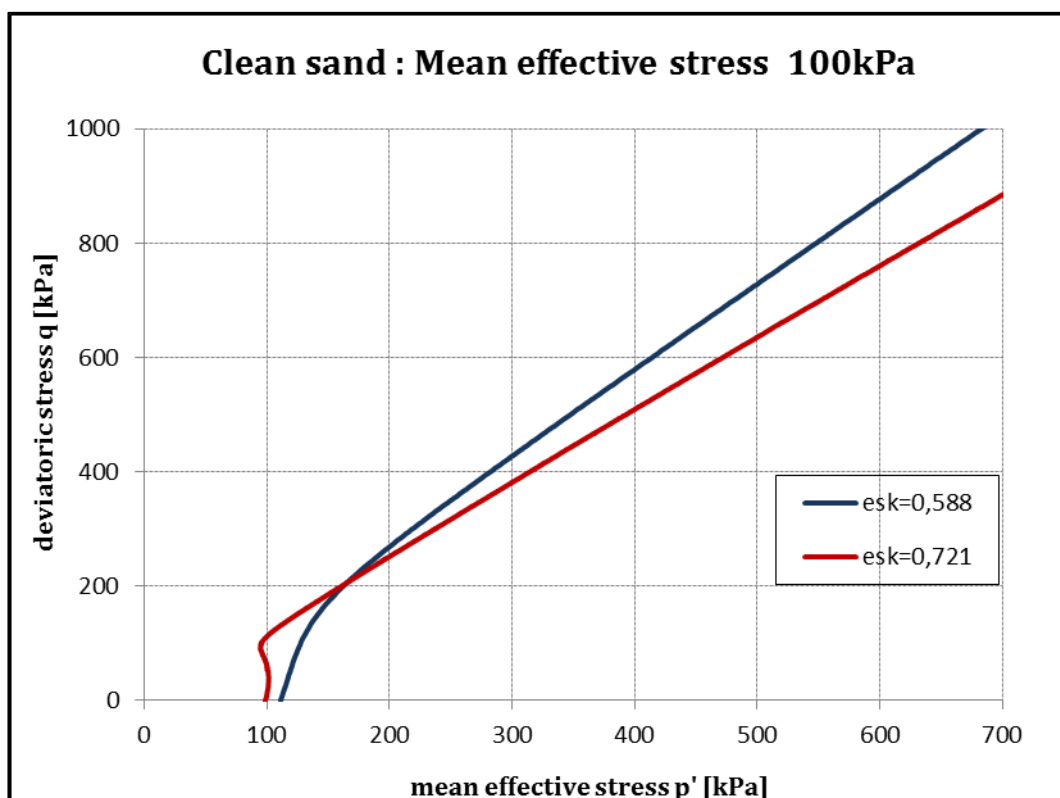
### 3.3.3 Επίδραση Της Πυκνότητας

Παρακάτω παρουσιάζονται δεδομένα από τα πειράματα του Πίνακα 3.1 και του Πίνακα 3.2 που βρίσκονται σε κοινή τάση στερεοποίησης  $\sigma'_o$  ή  $\sigma'_{initial}$  [kPa] και έχουν ίδιο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC [%] με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας του υλικού μέσω των διαφορετικών δεικτών πόρων σκελετού  $e_{sk}$  ή  $e_c$ .

#### 3.3.3.1 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=0%

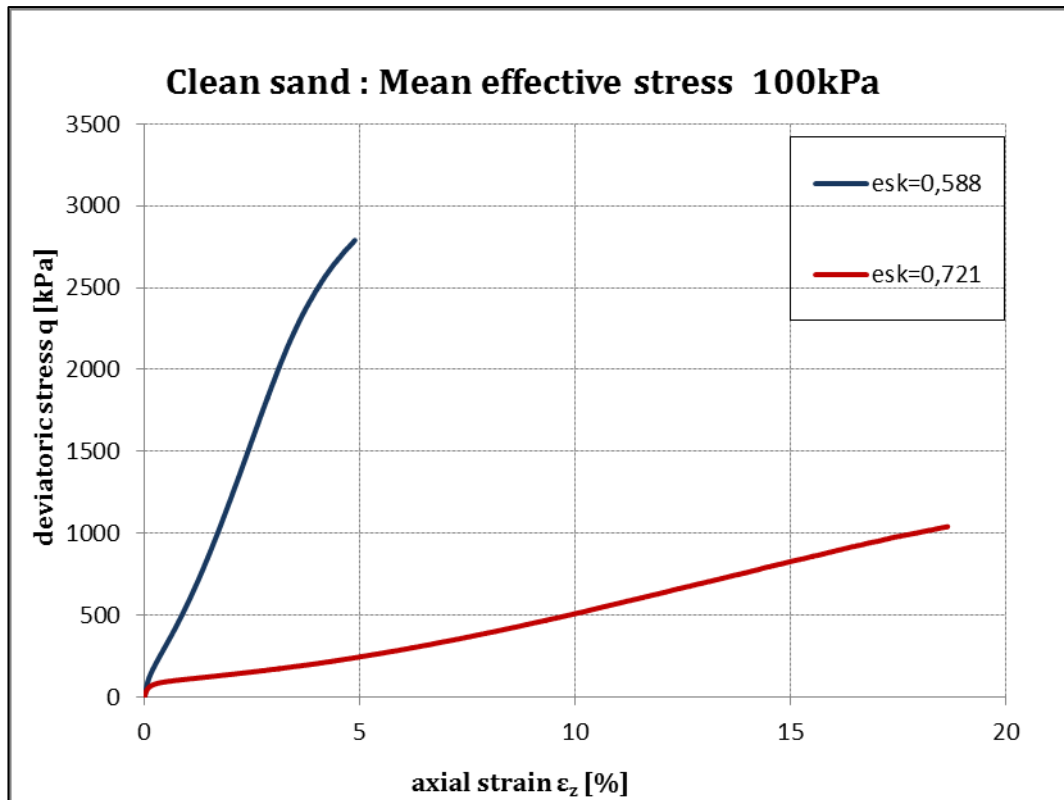
Στα Σχήματα 3.22 έως 3.24 παρουσιάζονται δοκίμια καθαρής άμμου που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa με μόνη διαφορά στην πυκνότητα τους (πυκνό δοκίμιο με  $e_{sk}=0,588$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}=0,721$ ).

Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα το πυκνότερο δοκίμιο (με  $e_{sk}=0,588$ ) είναι πιο διαστολικό από το χαλαρότερο (με  $e_{sk}=0,721$ ) καθώς αναπτύσσει μικρότερη υπερπίεση πόρων με το χαλαρότερο αλλά για μικρότερο εύρος αξονικών παραμορφώσεων. Επίσης από το Σχήμα 3.23 το πυκνότερο δοκίμιο παρουσιάζει και μεγαλύτερη διατμητική αντοχή.

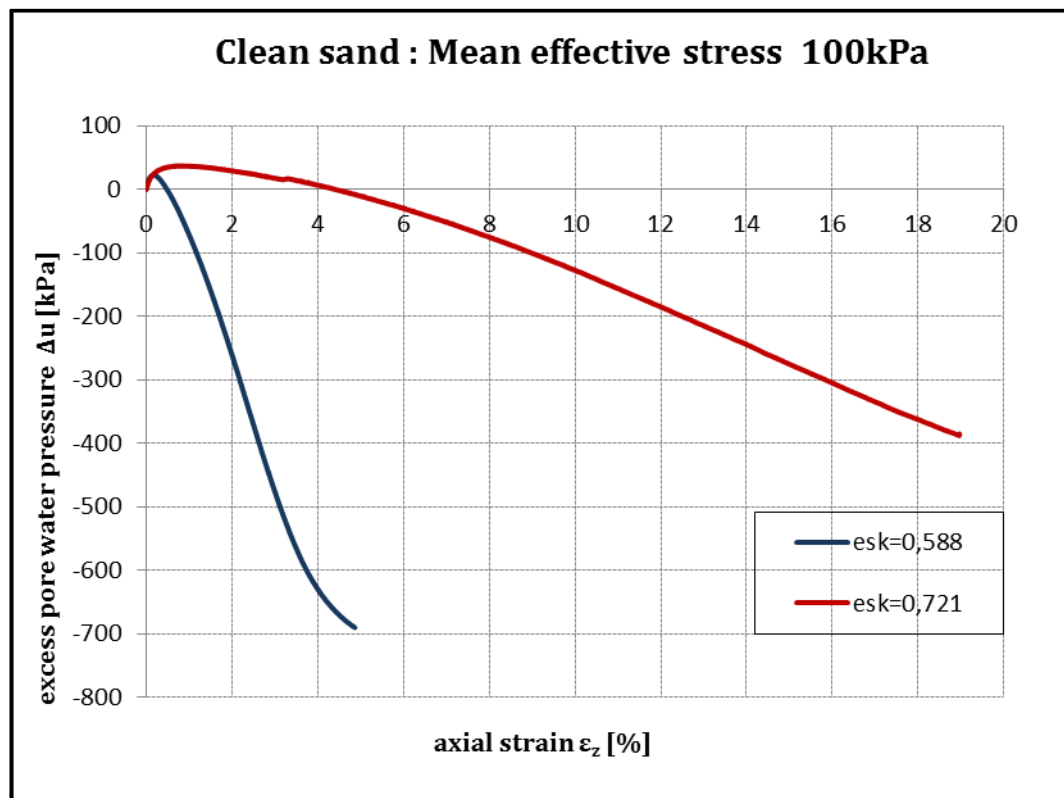


Σχήμα 3.22 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa





Σχήμα 3.23 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

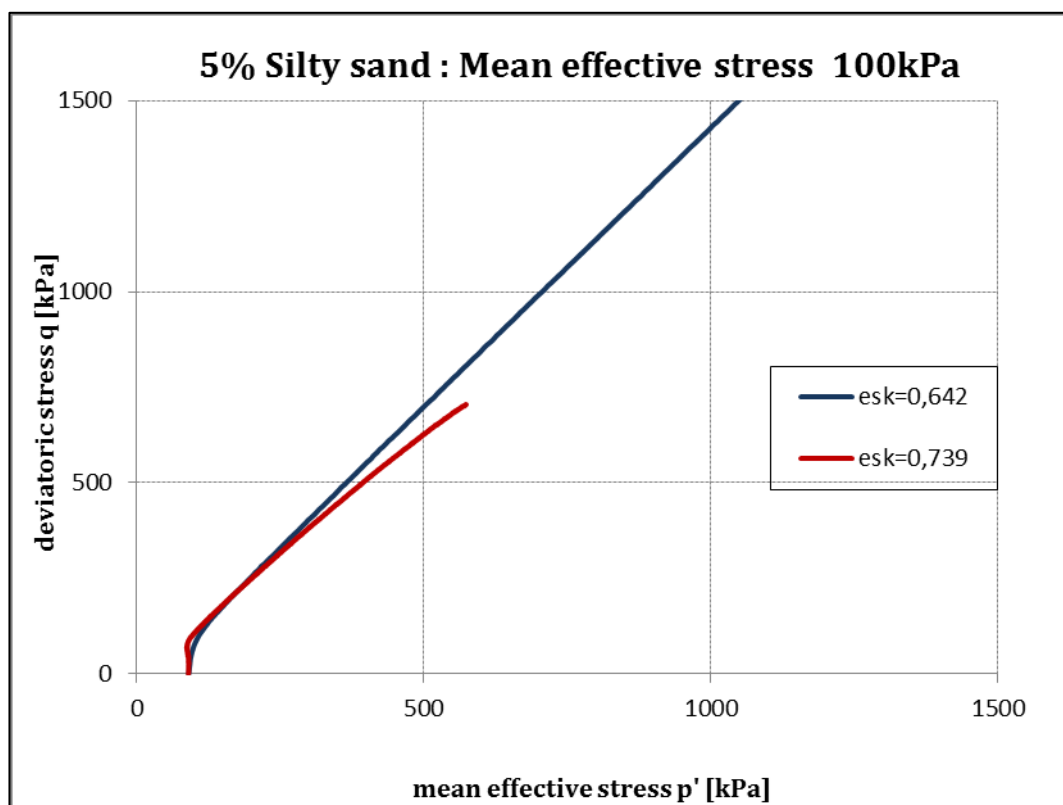


Σχήμα 3.24 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

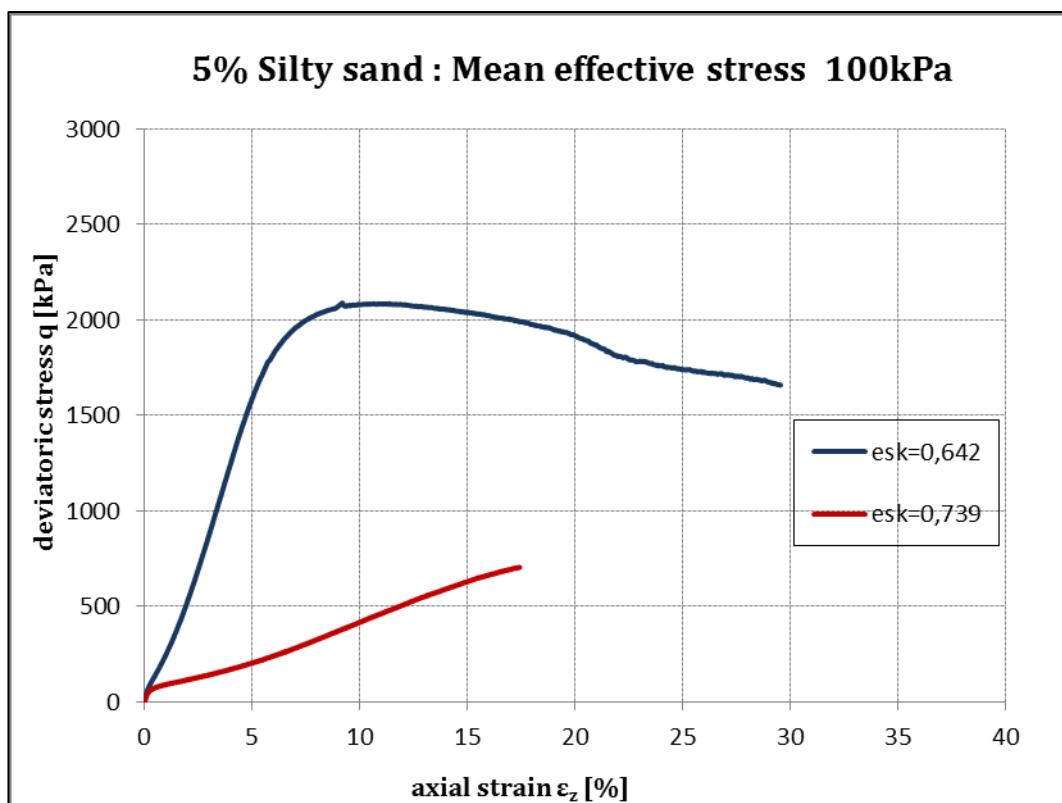
### 3.3.3.2 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=5%

Στα Σχήματα 3.25 έως 3.27 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου FC=5% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa με μόνη διαφορά στην πυκνότητά τους ( πυκνό δοκίμιο με  $e_{sk}=0,642$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,739$ ).

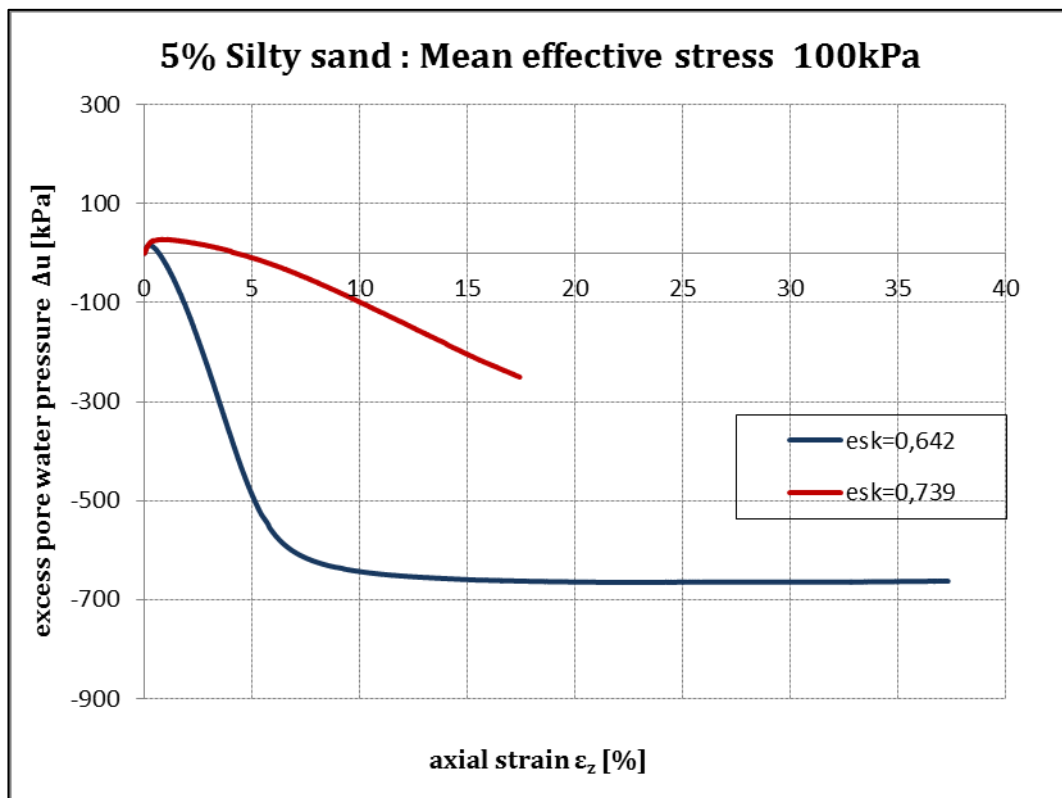
Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 3.25, το δοκίμιο με  $e_{sk}=0,739$  είναι πιο συστολικό. Στο Σχήμα 3.26 το χαλαρότερο δοκίμιο παρουσιάζει μικρότερες αντοχές ενώ στο Σχήμα 3.27 το πυκνότερο δοκίμιο αποτονώνει ταχύτερα τις υπερπίεσεις που αναπτύσσονται στο σκελετό του.



Σχήμα 3.25 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 3.26 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 100kPa

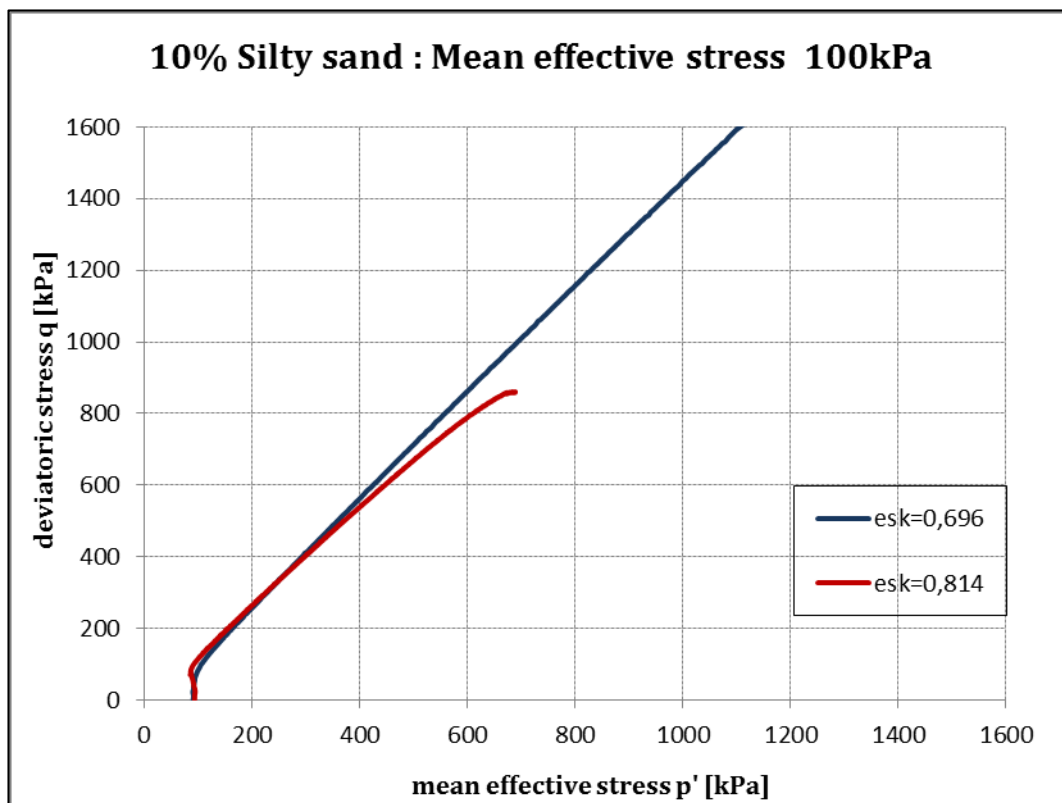


Σχήμα 3.27 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 100kPa

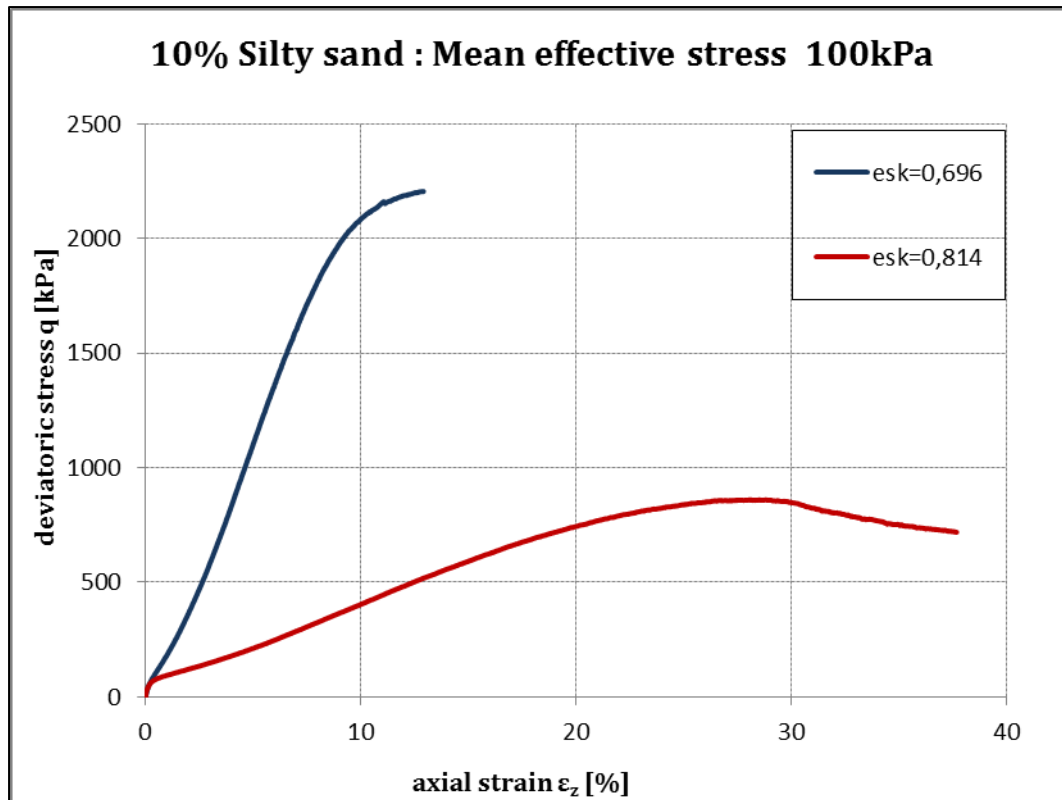
### 3.3.3.3 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=10%

Στα Σχήματα 3.28 έως 3.30 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου FC=10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa με μόνη διαφορά στην πυκνότητά τους (πυκνό δοκίμιο με  $e_{sk}=0,696$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,814$ ).

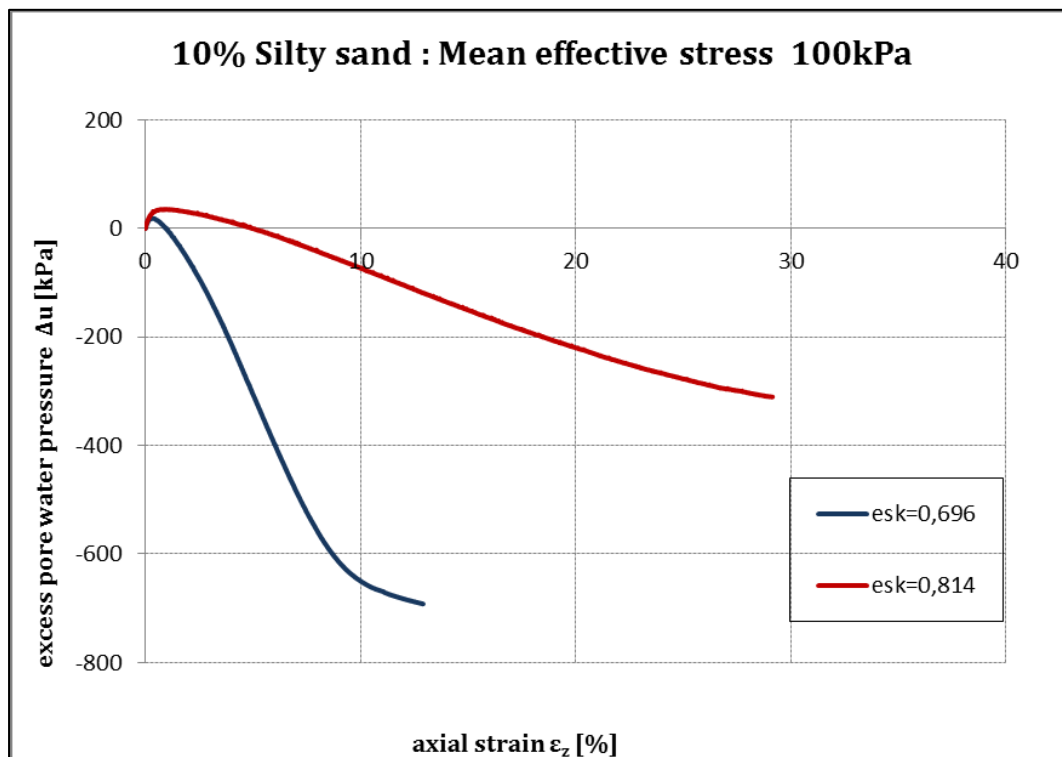
Από τα Σχήματα βλέπουμε ότι το πυκνότερο δοκίμιο έχει καλύτερη συμπεριφορά υπό καταπόνηση με την ανάπτυξη μικρότερων υπερπιέσεων. Ακόμα το πυκνότερο δοκίμιο αναπτύσσει μεγαλύτερη αντοχή όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.28 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 3.29 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 100kPa

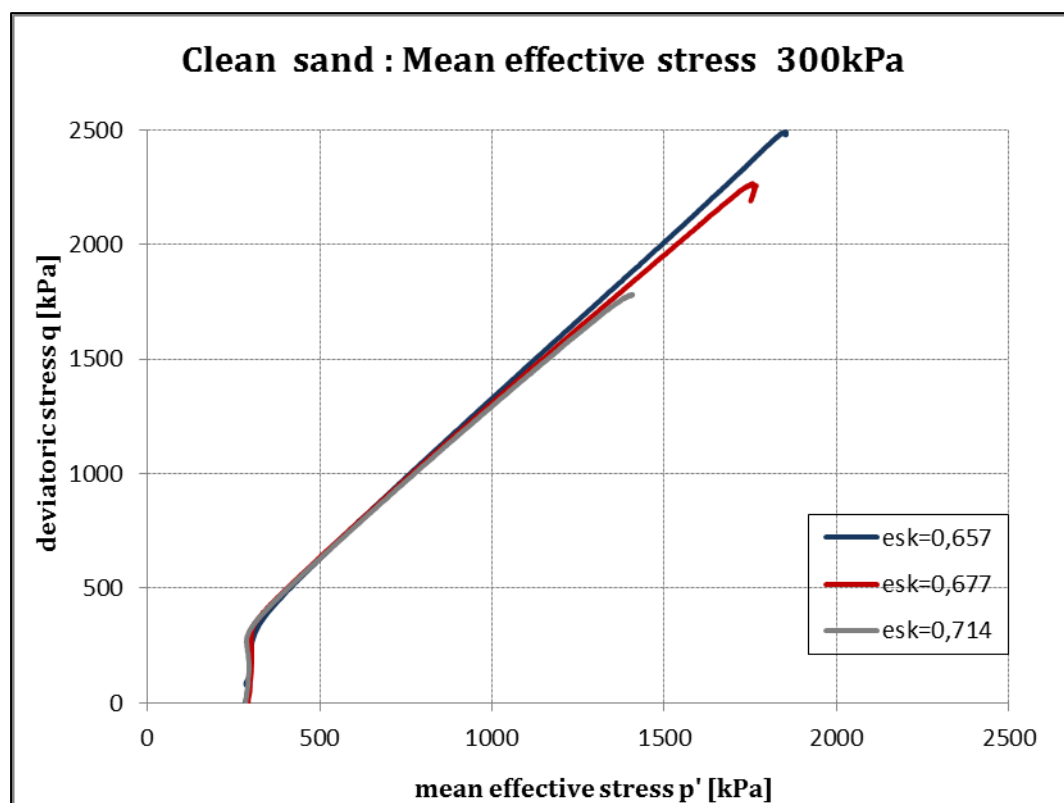


Σχήμα 3.30 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 100kPa

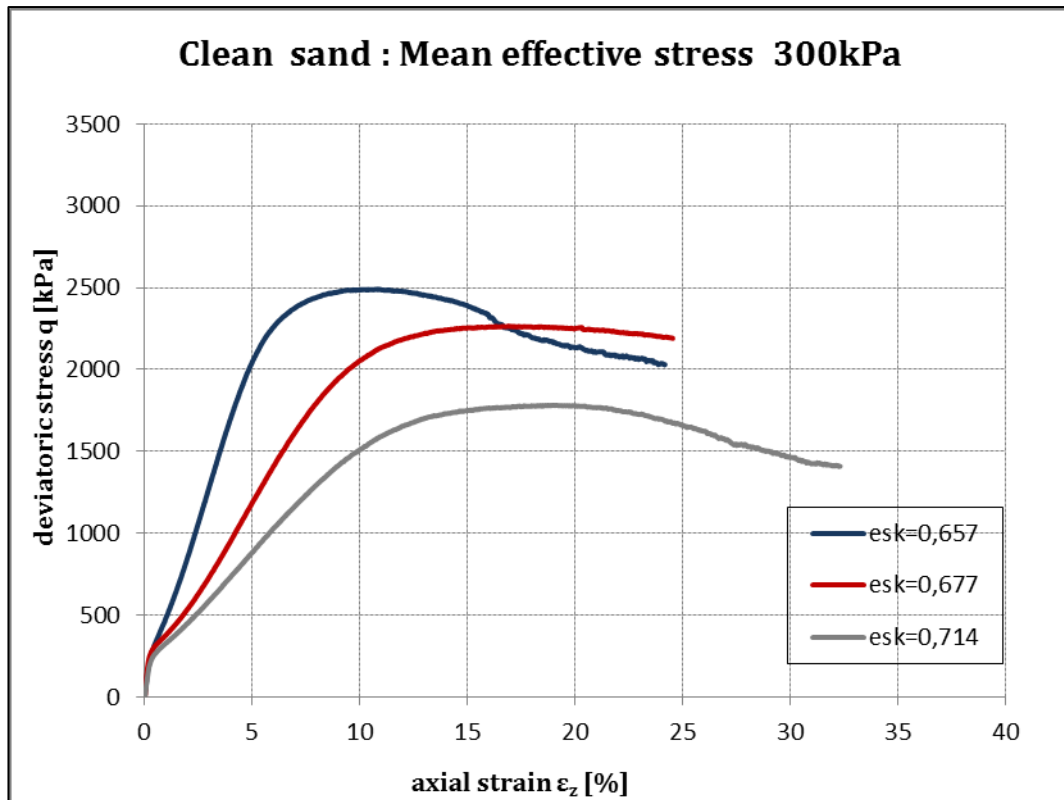
### 3.3.3.4 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=0%

Στα Σχήματα 3.31 έως 3.33 παρουσιάζονται δοκίμια καθαρής άμμου που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με μόνη διαφορά στην πυκνότητά τους ( πικνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,657$ , ενδιάμεσο  $e_{sk}=0,677$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,714$ ).

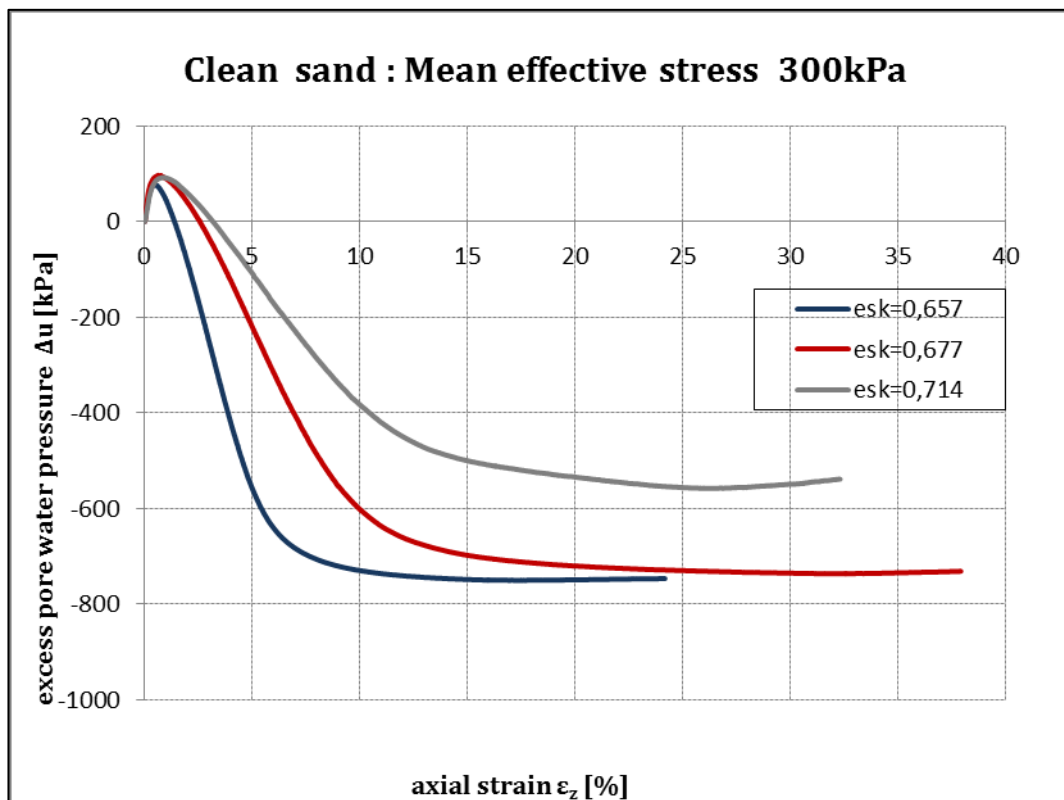
Από το Σχήμα 3.31 βλέπουμε ότι οι διαδρομές τάσεων των τριών δοκιμίων αρχικά συμπίπτουν οπότε δε βγαίνει κάποιο συμπέρασμα. Όμως στο Σχήμα 3.32 παρατηρούμε ότι το πικνότερο δοκίμιο αναπτύσσει τη μεγαλύτερη αντοχή. Από το Σχήμα 3.33 βγαίνει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του δοκιμίου τόσο λιγότερες υπερπιέσεις αυτό αναπτύσσει.



Σχήμα 3.31 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση q συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης p' για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 3.32 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

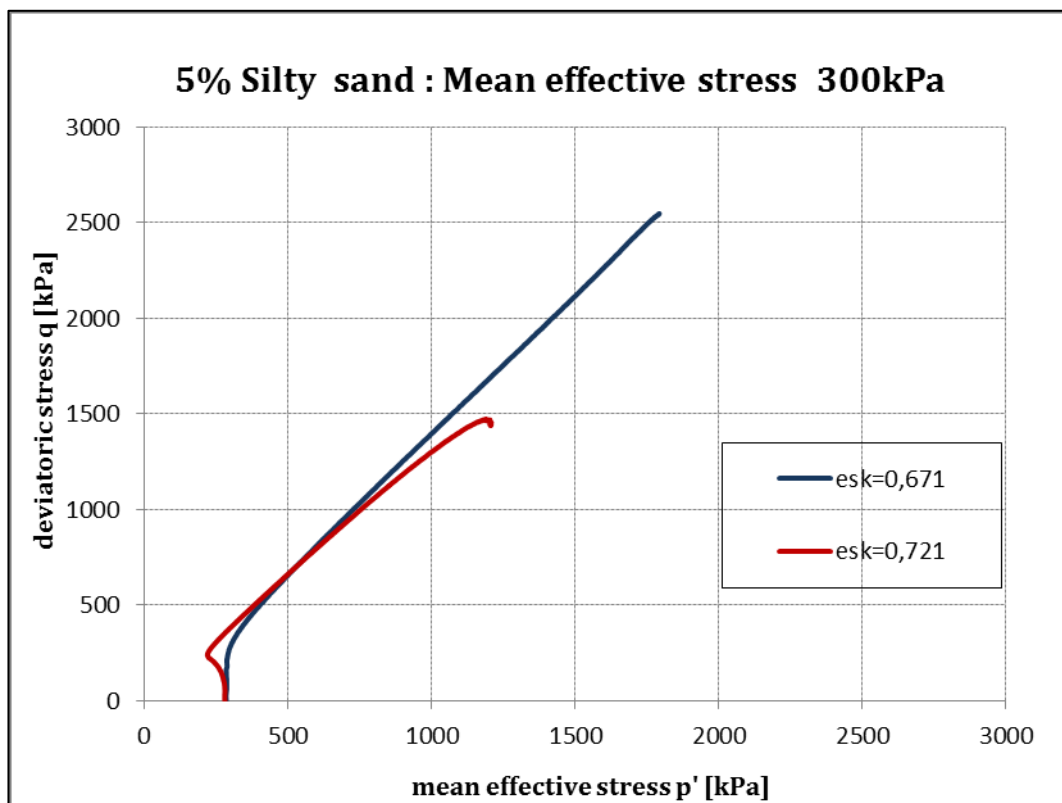


Σχήμα 3.33 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

### 3.3.3.5 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=5%

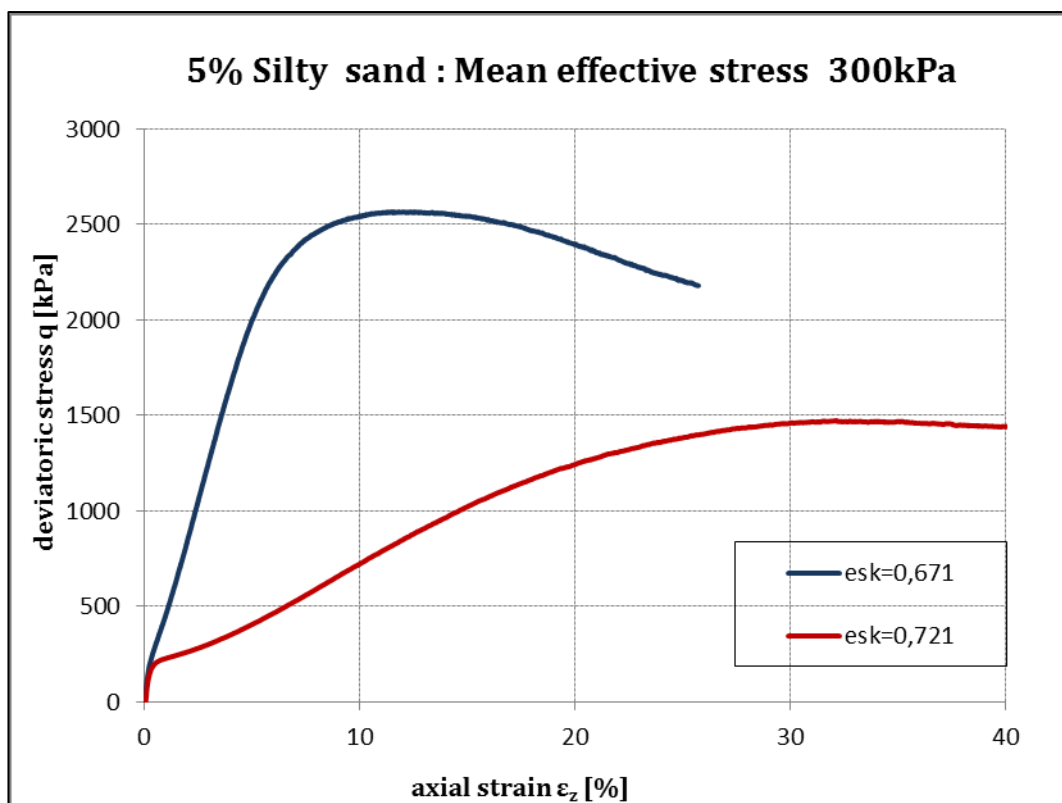
Στα Σχήματα 3.34 έως 3.36 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με μόνη διαφορά στην πυκνότητά τους ( πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,671$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,721$ ).

Από τα παρακάτω Σχήματα παρατηρούμε ότι το χαλαρότερο δοκίμιο ( $e_{sk}=0,721$ ) έχει πολύ συστολική συμπεριφορά με την αποτόνωση των υπερπίεσεων του σε μεγάλο εύρος αξονικής παραμόρφωσης της τάξης του 10%.

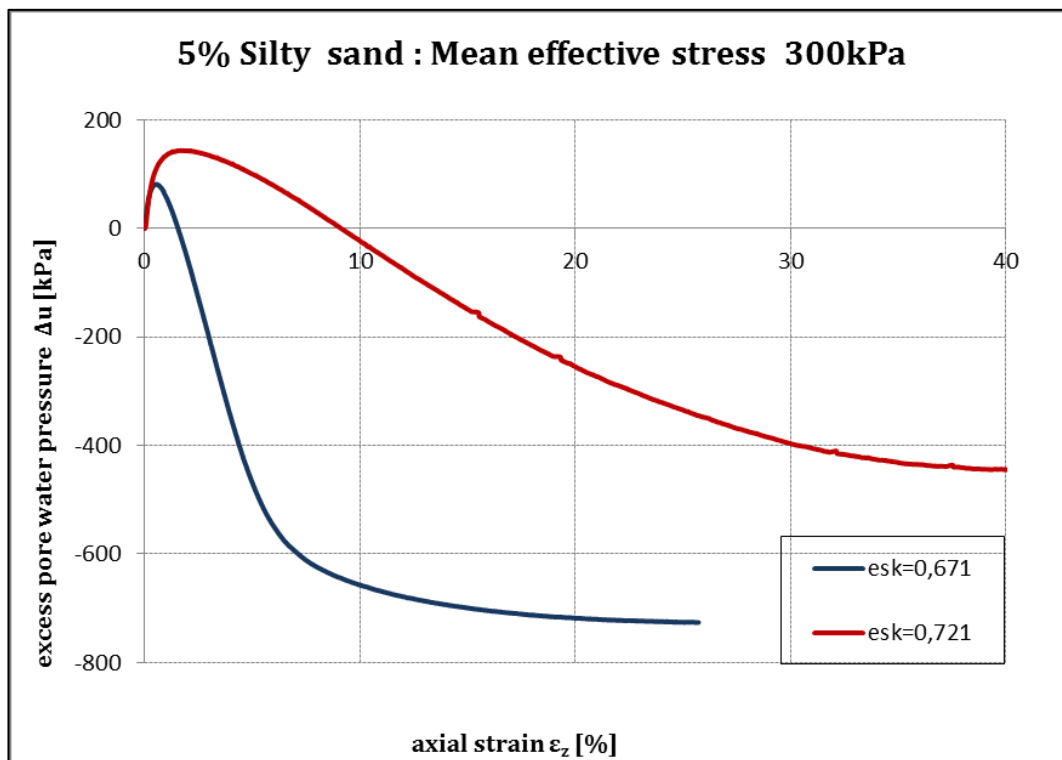


Σχήμα 3.34 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 300kPa





Σχήμα 3.35 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 300kPa

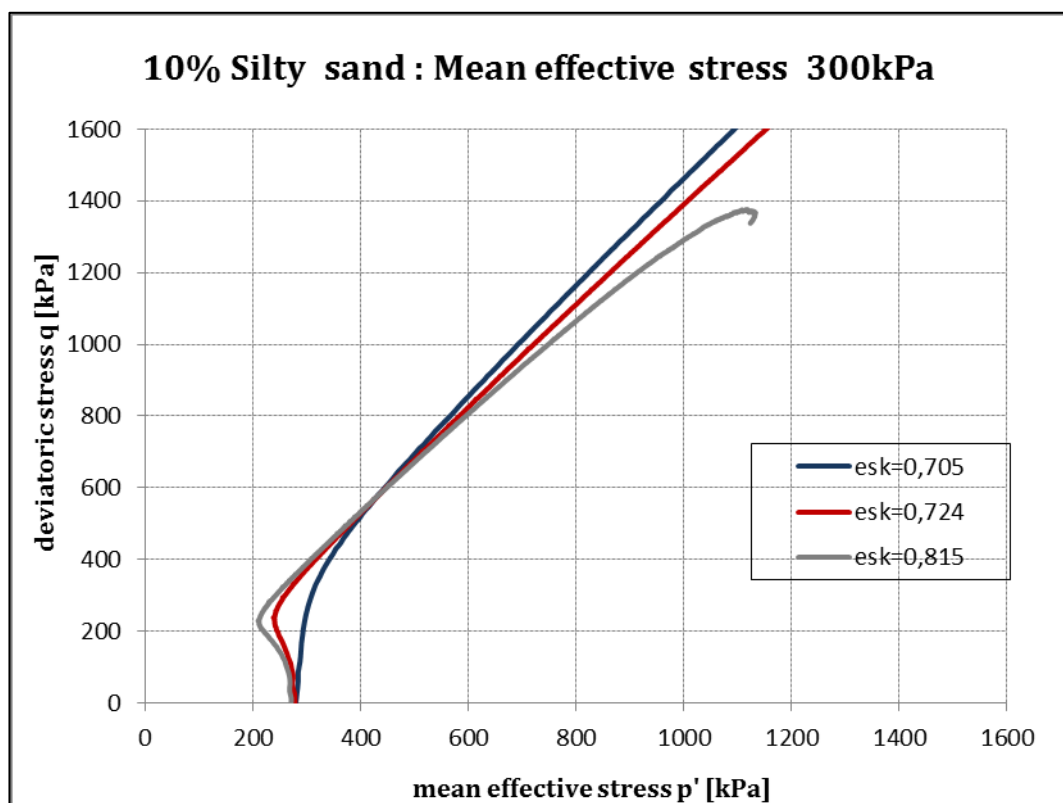


Σχήμα 3.36 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 300kPa

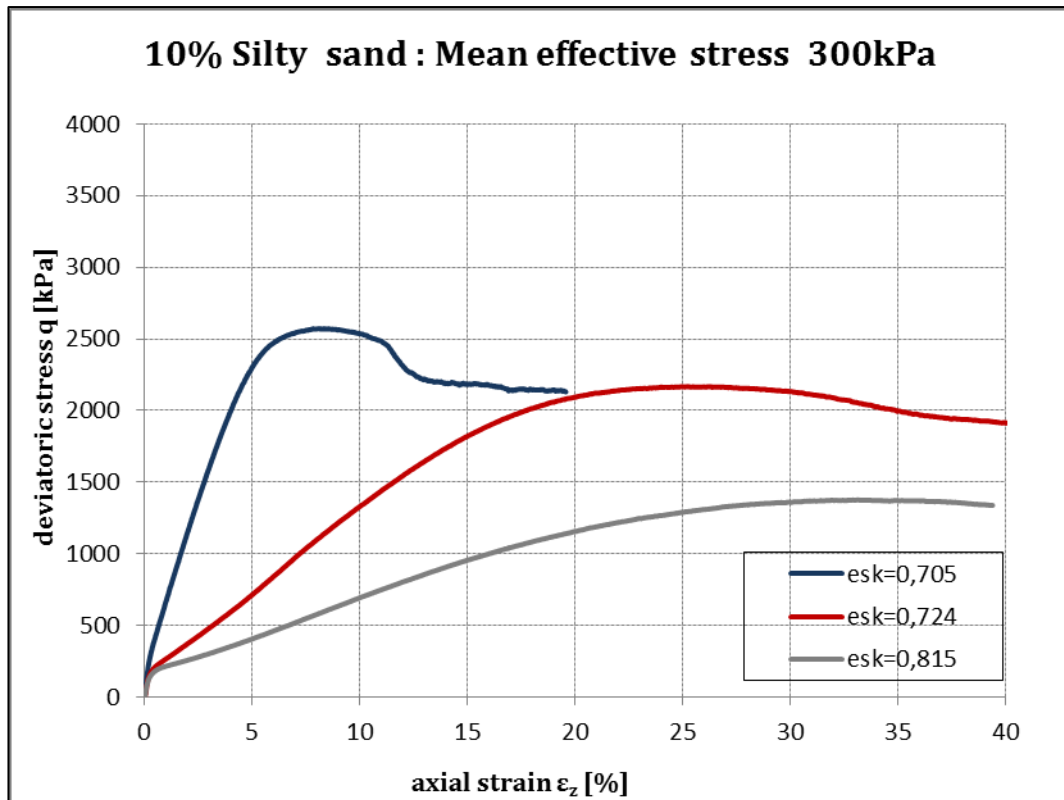
### 3.3.3.6 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=10%

Στα Σχήματα 3.37 έως 3.39 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με μόνη διαφορά στην πυκνότητα τους (πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,705$ , ενδιάμεσο με  $e_{sk}=0,724$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}=0,815$ ).

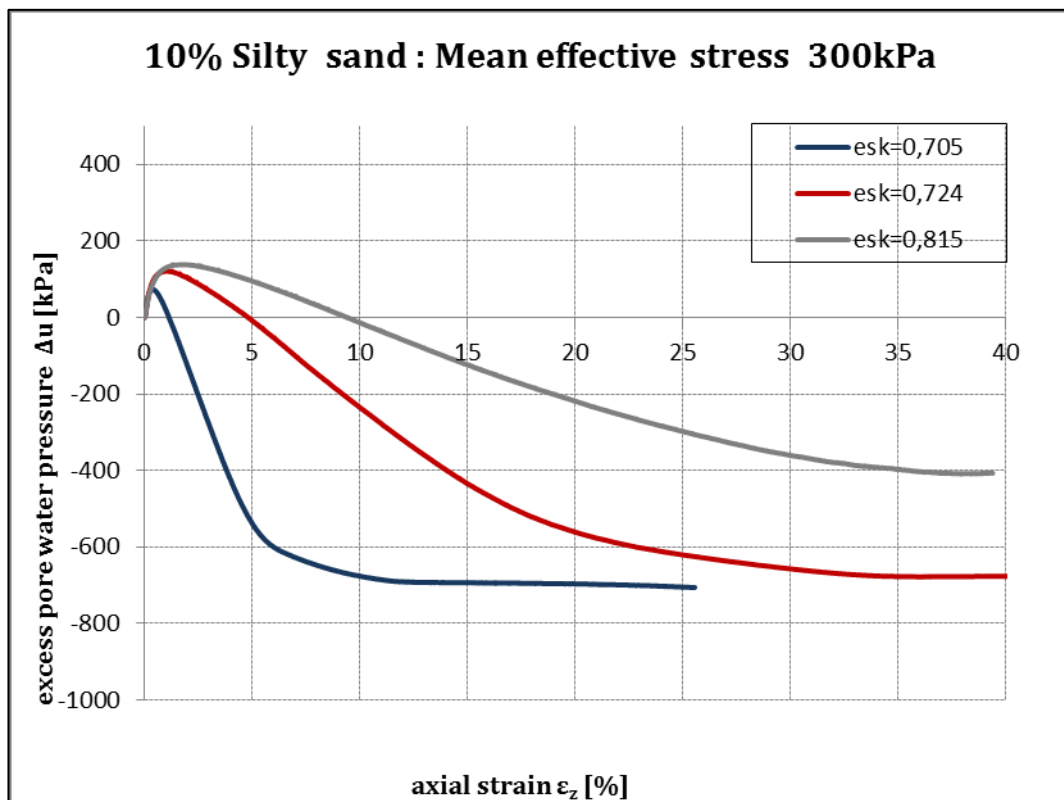
Από τα Σχήματα 3.37-3.39 παρατηρούμε ότι όσο χαλαρότερο είναι το δοκίμιο τόσο πιο συστολική συμπεριφορά παρουσιάζει. Αν και τα δοκίμια με  $e_{sk}=0,724$  και  $e_{sk}=0,815$  παρουσιάζουν την ίδια υπερπίεση πόρων ,στο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,724$  αποτονώνεται πιο γρήγορα σε τάξη 5% της αξονικής παραμόρφωσης σε αντίθεση με το δοκίμιο με  $e_{sk}=0,815$  που χρειάζεται τη διπλάσια αξονική παραμόρφωση 10%.



Σχήμα 3.37 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 3.38 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 300kPa



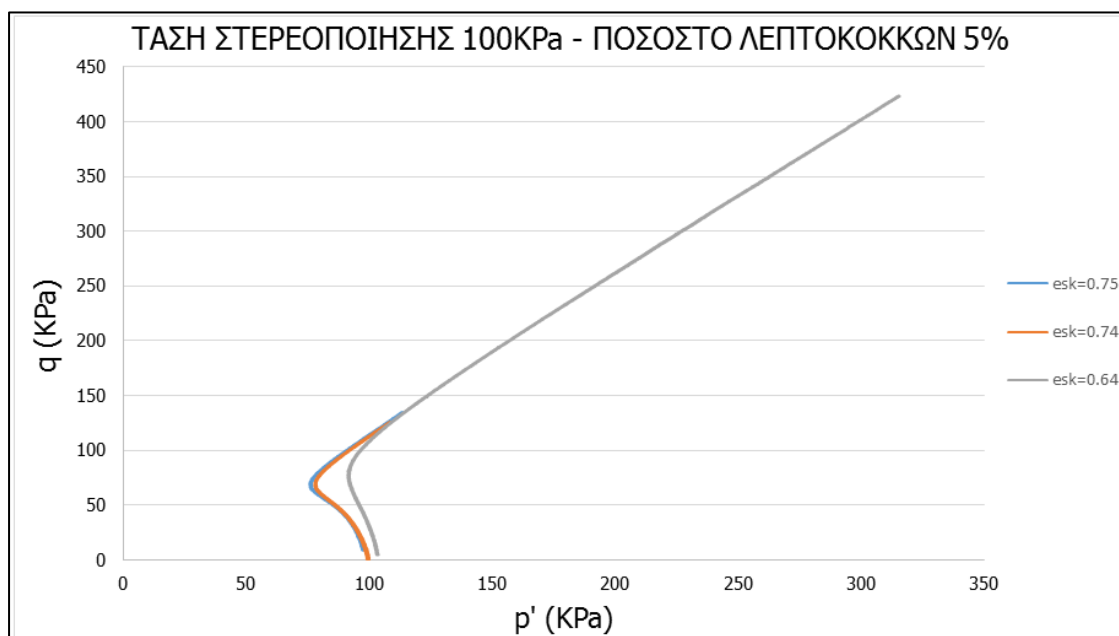
Σχήμα 3.39 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 300kPa

Όπως είναι ευρέως γνωστό, στα δοκίμια καθαρής άμμου, ανεξαρτήτως της τάσης στερεοποίησης, η επίδραση της πυκνότητας είναι ευνοϊκή. Αυτό το συμπέρασμα εξάγεται και από τα διαγράμματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ( Σχήματα 3.22-3.24 και Σχήματα 3.31-3.33).

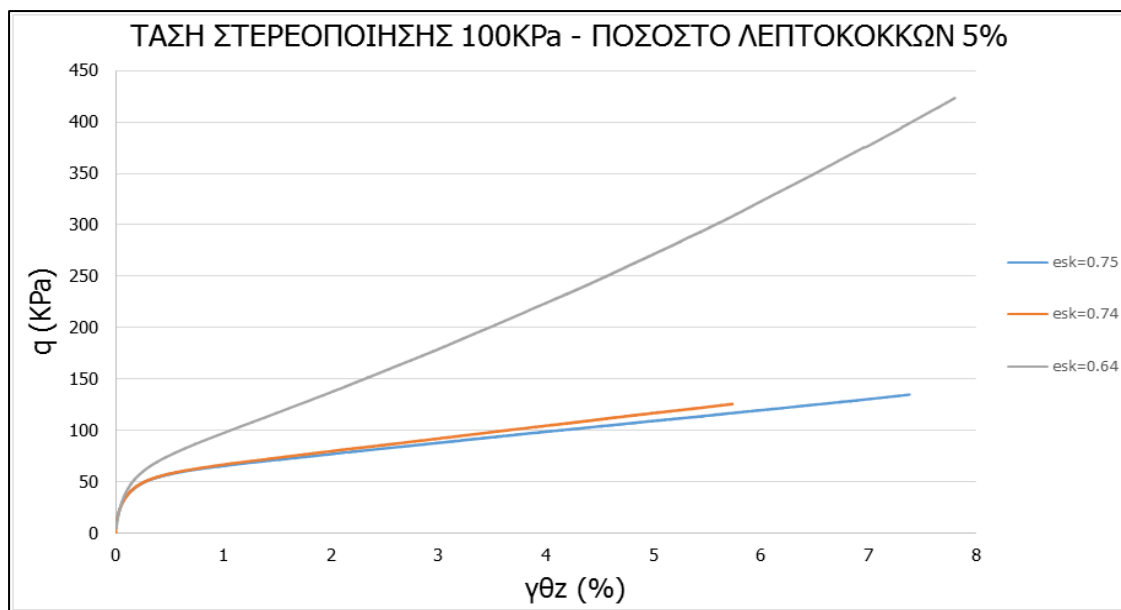
Στα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκων έως 10% παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση της πυκνότητας συνάδει με αύξηση των διατμητικών αντοχών του δοκιμίου και μείωση της συστολικής συμπεριφοράς. Το συγκεκριμένο αυτό συμπέρασμα εξάγεται από όλα τα Σχήματα άρα είναι ανεξάρτητο του μεγέθους της τάσεως στερεοποίησης.

Αξίζει να τονισθεί ότι αυτό συμβαίνει για σχετικά μικρό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού καθώς στην παρούσα διπλωματική μίγματα με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού μεγαλύτερο του 10% δε μελετήθηκαν.

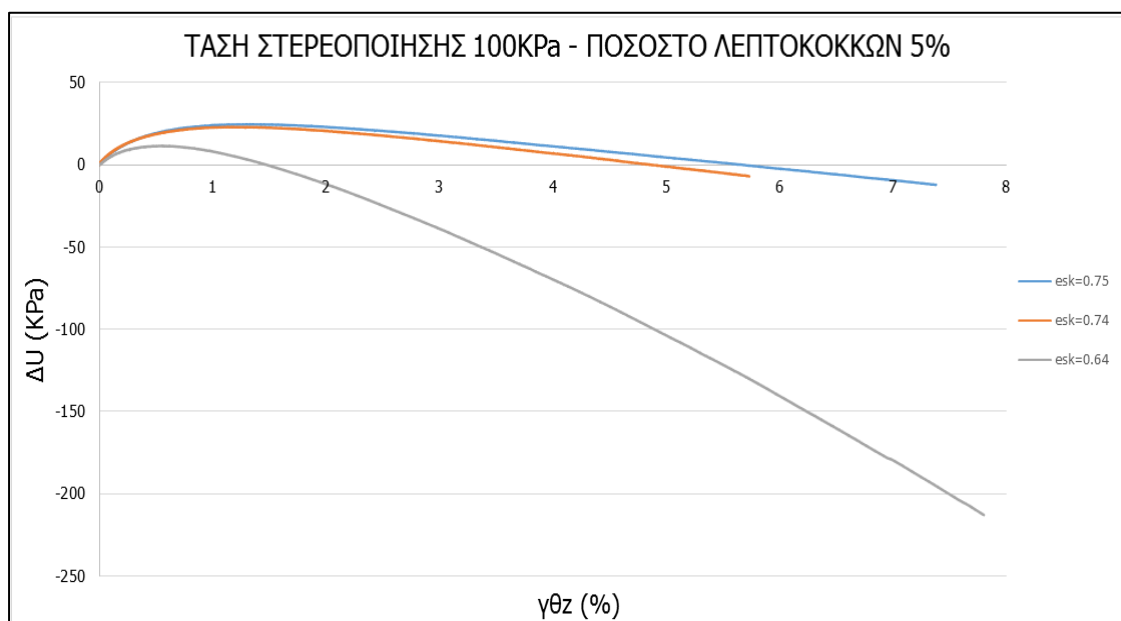
Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία οι Παπαδόπουλος και Πολυδώρου (2015) που πραγματοποίησαν μονοτονικά πειράματα στη συσκευή στρέψης κοίλου δοκιμίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αναφορικά παρουσιάζεται η επίδραση της πυκνότητας σε δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 100kPa και με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%. Από τα Σχήματα 3.40-3.42 παρατηρούμε ότι το δοκίμιο με  $e_{sk}=0,75$  έχει παρόμοια συμπεριφορά με το δοκίμιο με  $e_{sk}=0,74$  που είναι πιο συστολική από τη συμπεριφορά του δοκιμίου με  $e_{sk}=0,64$ .



Σχήμα 3.40 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργή τάση δοκιμίων μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% σε τάση στερεοποίησης 100kPa

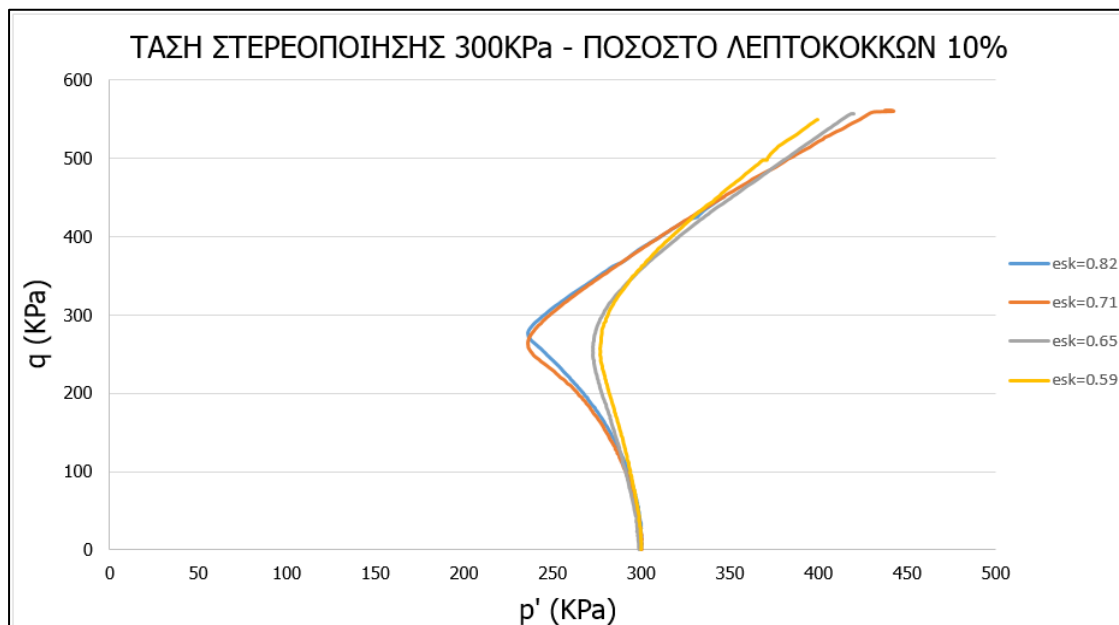


Σχήμα 3.41 Αποκλίνουσα τάση ( $q$ ) σε συνάρτηση με την διαμητική παραμόρφωση ( $\gamma_{\theta z}$ ) δοκιμίων μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% σε τάση στερεοποίησης 100kPa

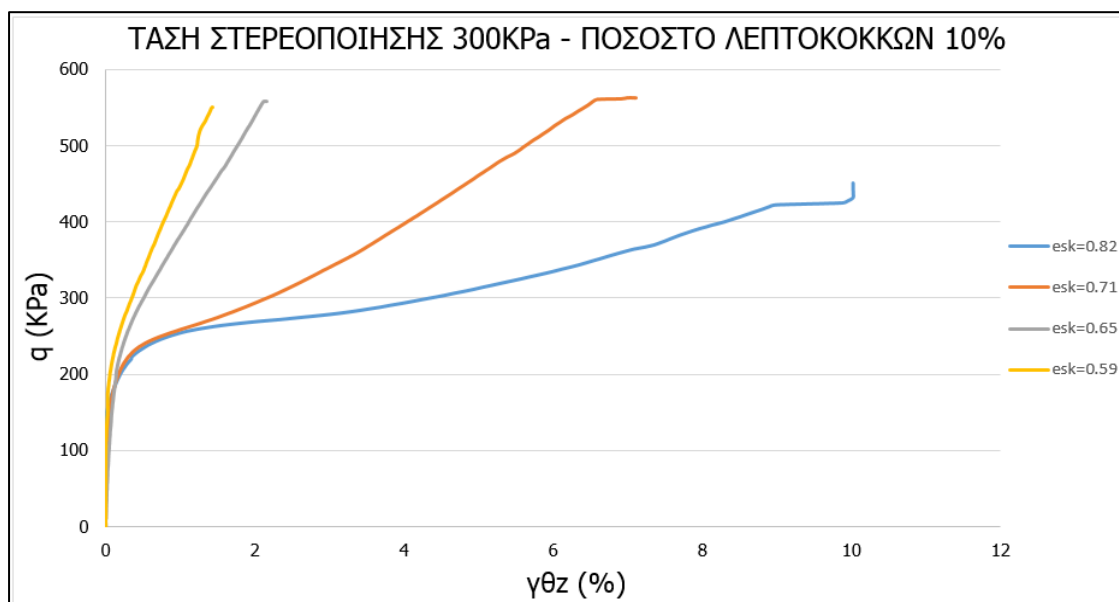


Σχήμα 3.42 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος ( $\Delta u$ ) σε συνάρτηση με την διαμητική παραμόρφωση ( $\gamma_{\theta z}$ ) δοκιμίων μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% σε τάση στερεοποίησης 100kPa

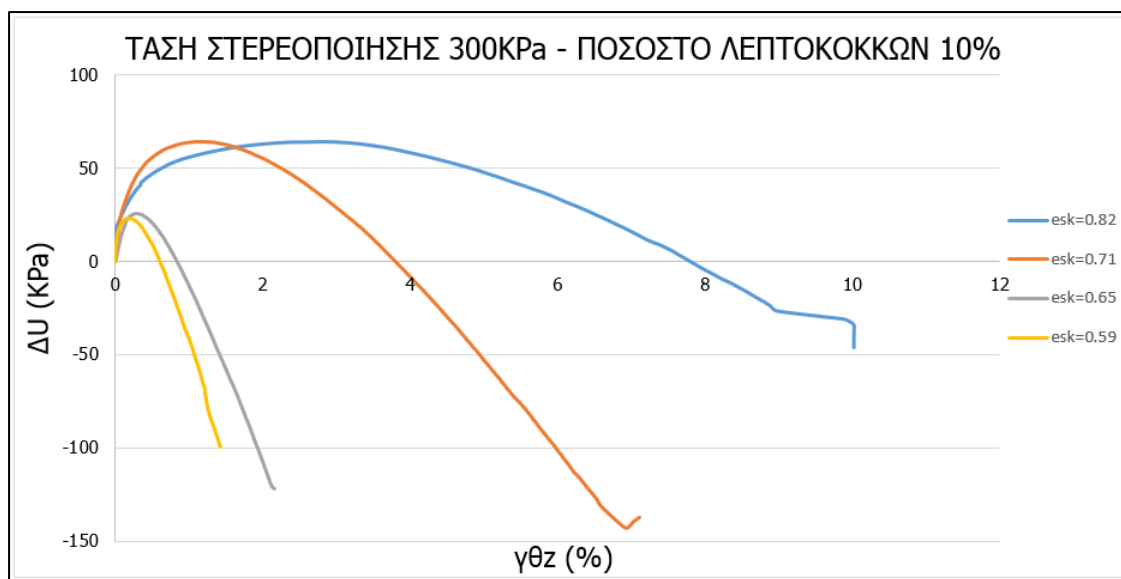
Όμοια και για αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa και ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% τα πειράματα έδειξαν θετική επίδραση της πυκνότητας όπως παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 3.43 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% σε αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa

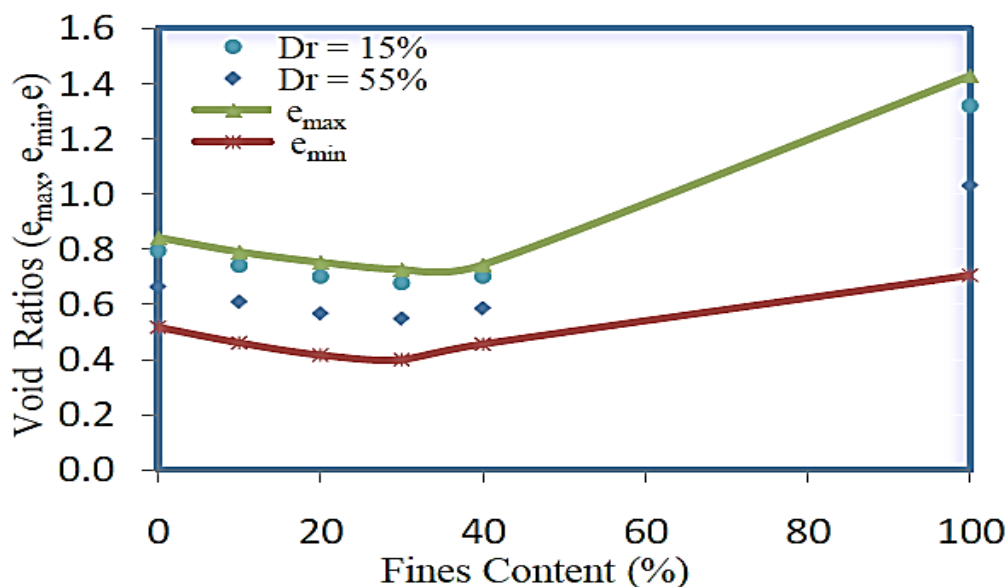


Σχήμα 3.44 Αποκλίνουσα τάση ( $q$ ) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ( $\gamma_{\theta z}$ ) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% σε αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa

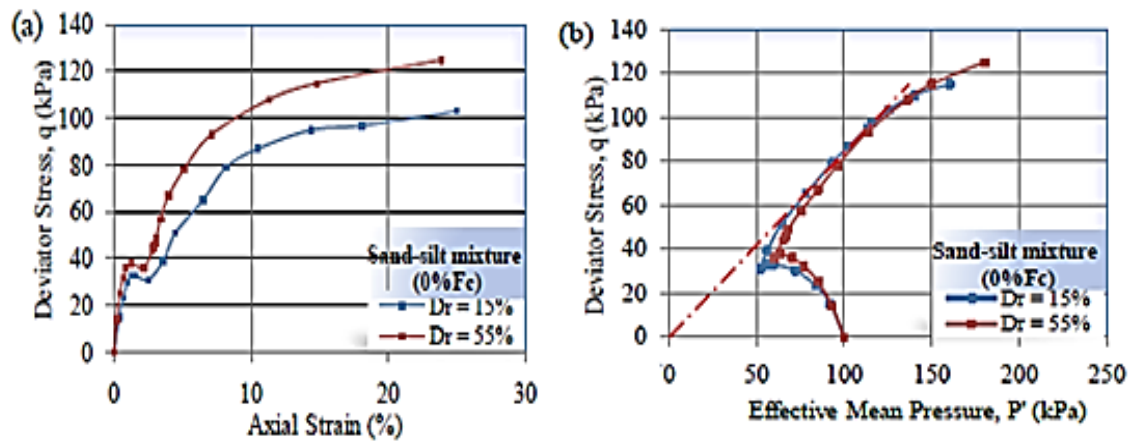


Σχήμα 3.45 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος(Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση(γθz) δοκιμών μείγματος άμμου M31-ίλιος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% σε τάση στερεοποίησης 300kPa

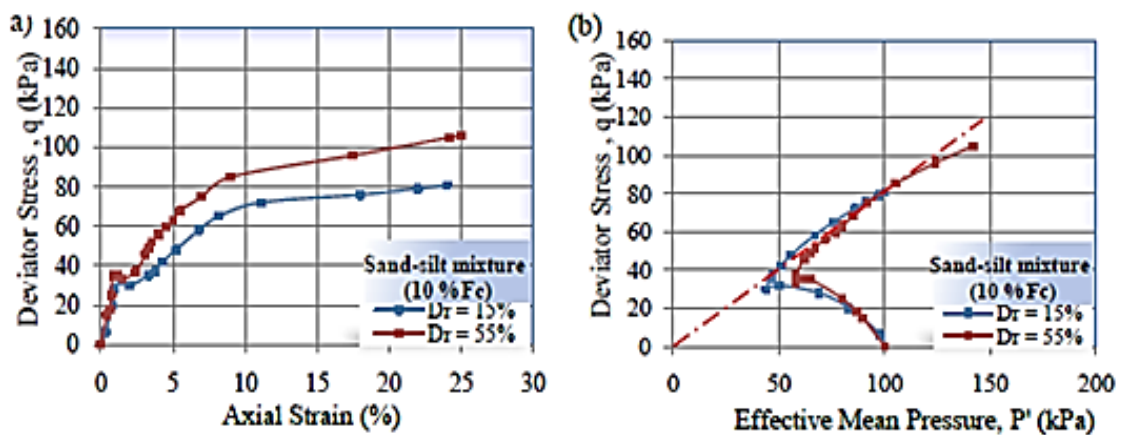
Οι ερευνητές Bensoula, Missoum και Bendani (2014) πραγματοποίησαν μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και σε μίγματα άμμου ίλιος με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού, τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa. Τα δοκίμια αυτά παρασκευάζονταν σε δύο σχετικές πυκνότητες  $D_r=15\%$  και  $D_r=55\%$  έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της πυκνότητας.



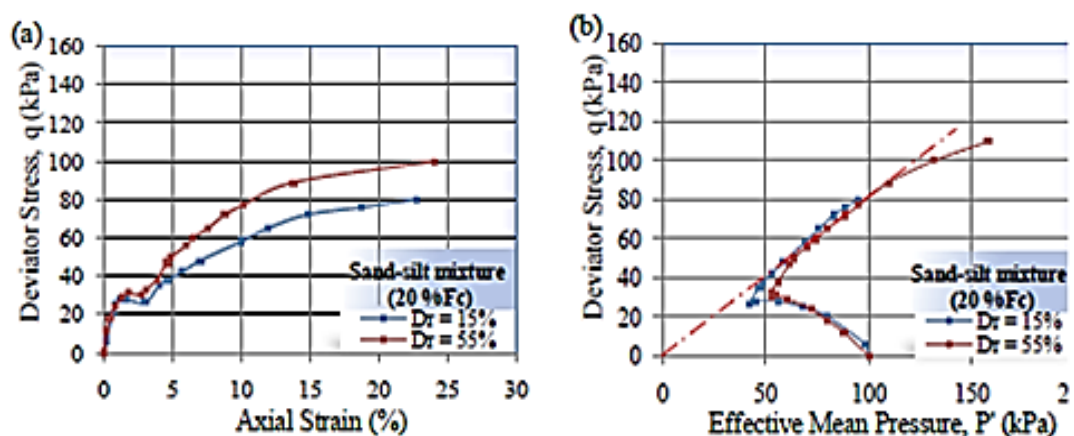
Σχήμα 3.46 Μέγιστοι και ελάχιστοι δείκτες πόρων για δοκίμια με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού



Σχήμα 3.47 Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση (α) με την αξονική παραμόρφωση και (β) διαδρομές ενεργών τάσεων για δοκίμια καθαρής άμμου

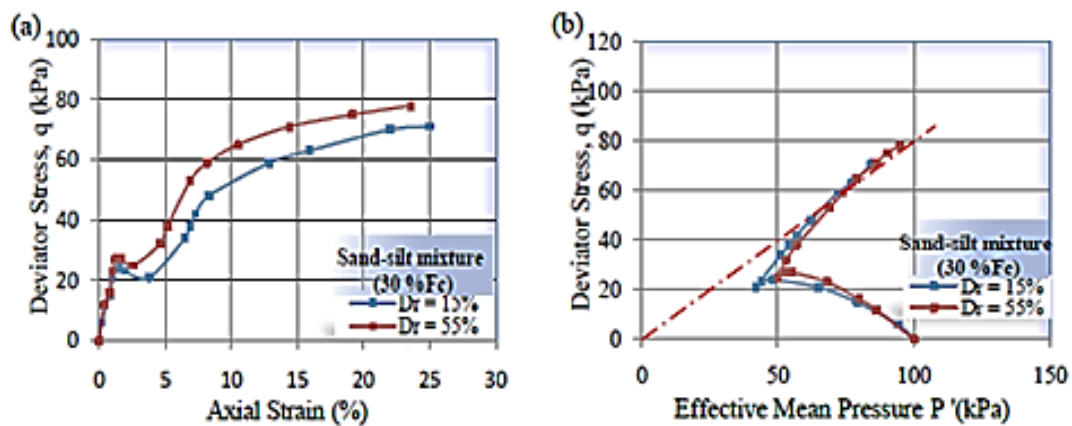


Σχήμα 3.48 Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση (α) με την αξονική παραμόρφωση και (β) διαδρομές ενεργών τάσεων για δοκίμια αμμοιλύος 10%

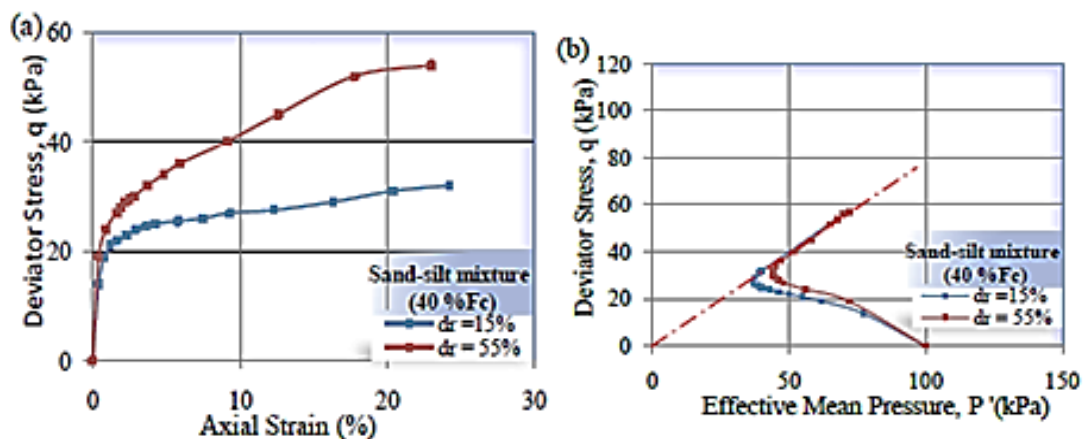


Σχήμα 3.49 Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση (α) με την αξονική παραμόρφωση και (β) διαδρομές ενεργών τάσεων για δοκίμια αμμοιλύος 20%





Σχήμα 3.50 Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση (a) με την αξονική παραμόρφωση και (b) διαδρομές ενεργών τάσεων για δοκίμια αμμοιλύς 30%



Σχήμα 3.51 Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση (a) με την αξονική παραμόρφωση και (b) διαδρομές ενεργών τάσεων για δοκίμια αμμοιλύς 40%

Αρχικά, τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών, παίζει σημαντικότερο ρόλο στην κρίσιμη αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

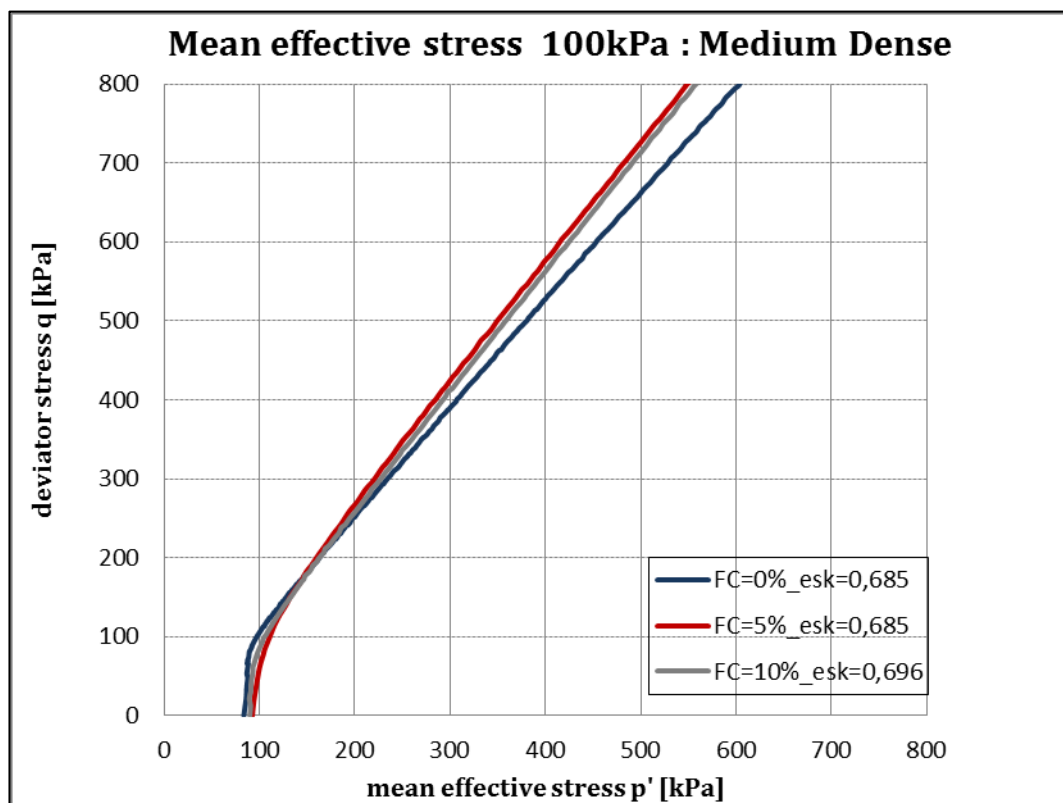
Ακόμα παρατηρείται ότι, ανεξαρτήτως του ποσοστού λεπτοκόκκων, το χαλαρό δοκίμιο είναι πάντα πιο συστολικό και έχει μικρότερες διατμητικές αντοχές. Επίσης ότι η επίδραση της πυκνότητας στην καθαρή άμμο και στα μίγματα με 10%, 20% και 30% φαίνεται να είναι περίπου ίδια.

### 3.3.4 Επίδραση Του Περιεχόμενου Ποσοστού Λεπτόκοκκων

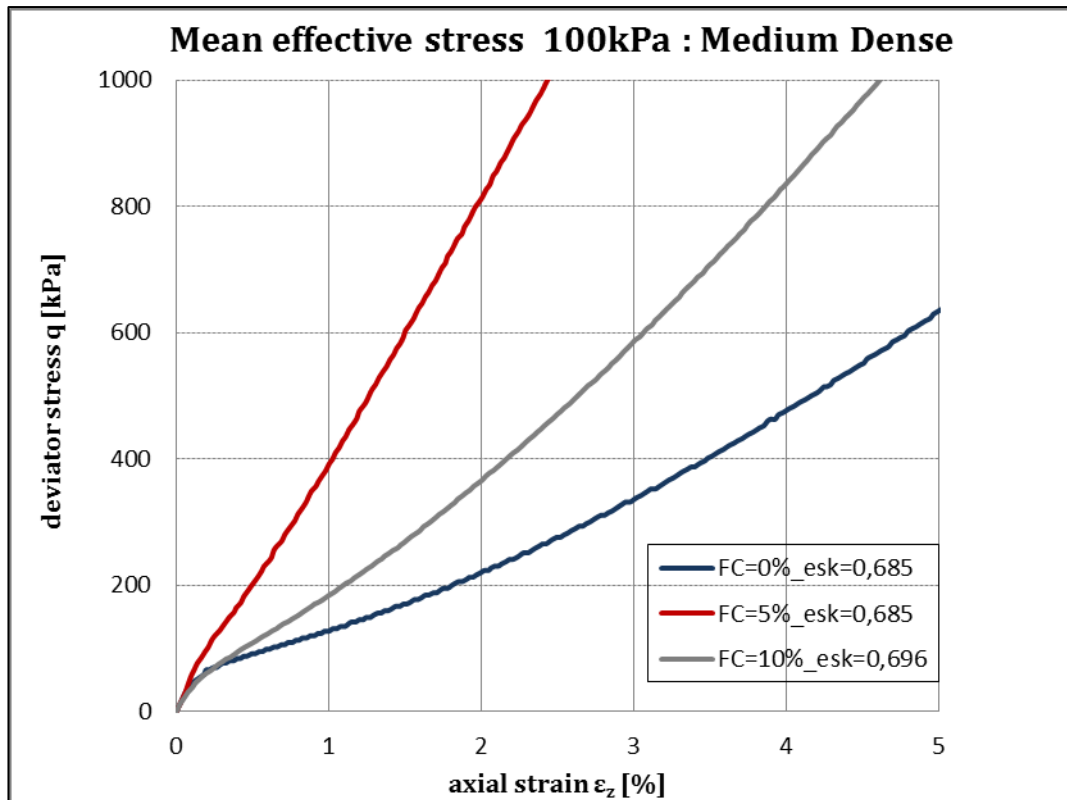
#### 3.3.4.1 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa

#### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

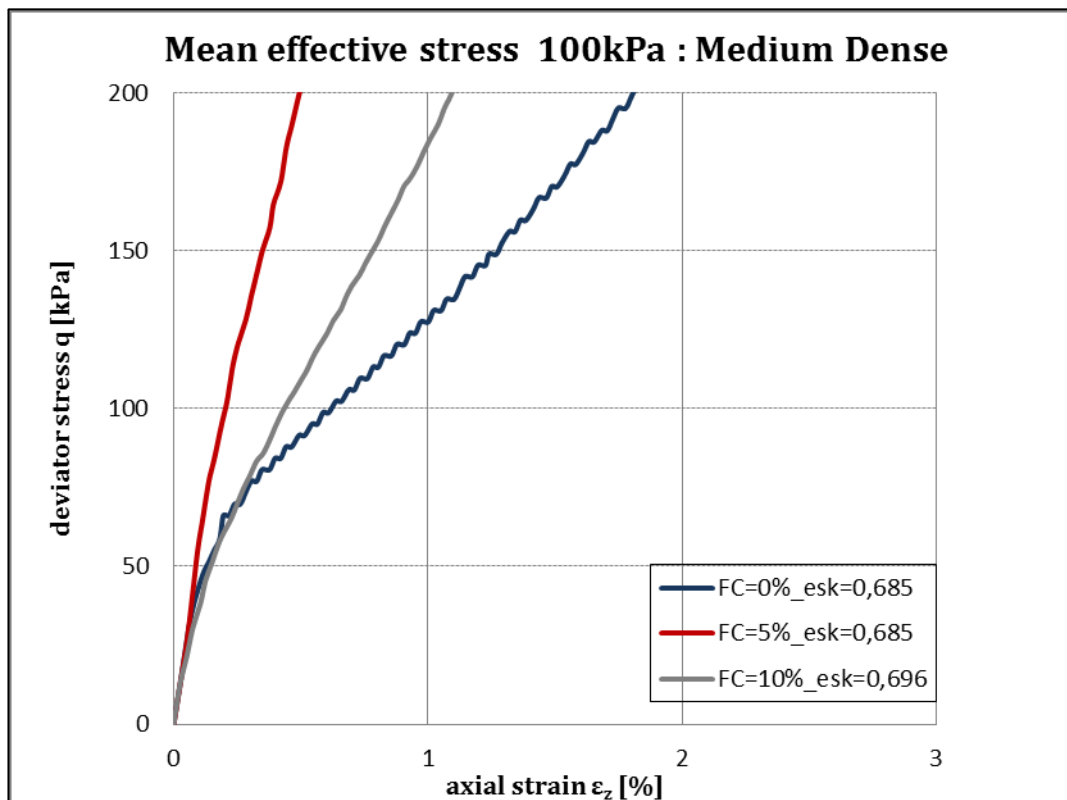
Στα Σχήματα 3.52 έως 3.55 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,685$  έως  $e_{sk}=0,696$ ).



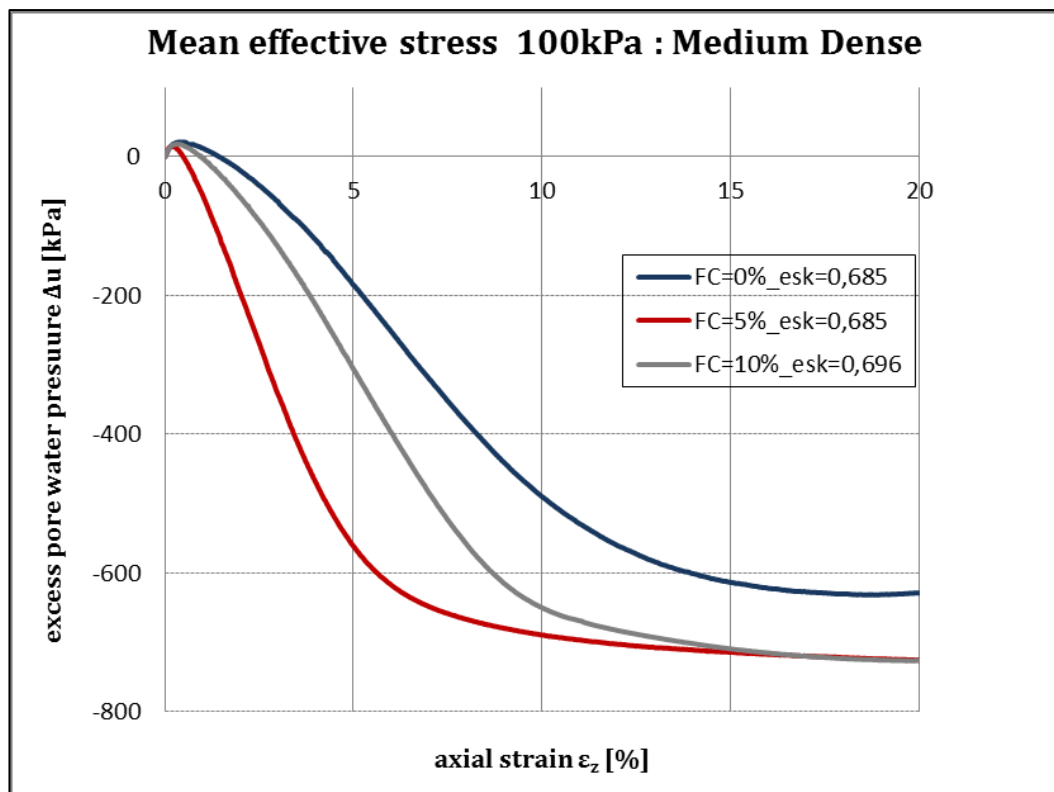
Σχήμα 3.52 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσκει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 3.53 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 3.54 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμόρφώσεων  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

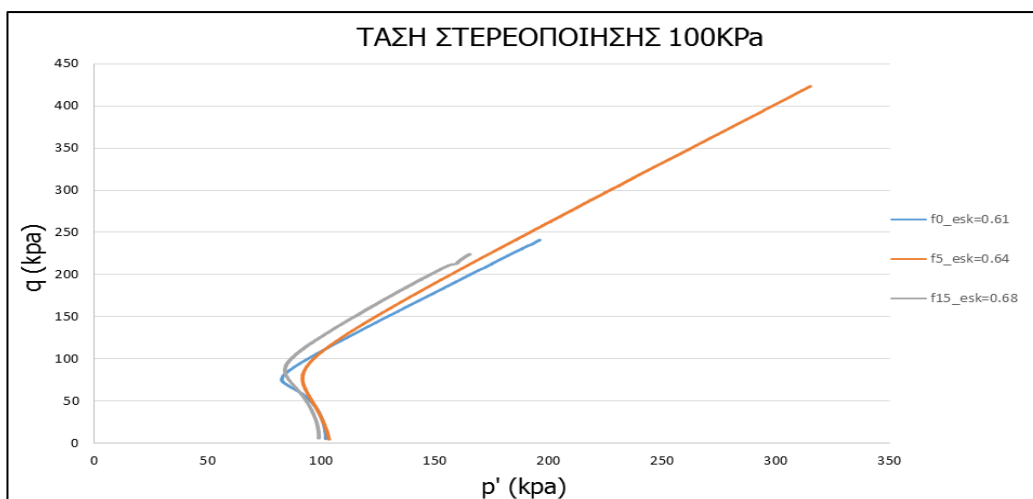


Σχήμα 3.55 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

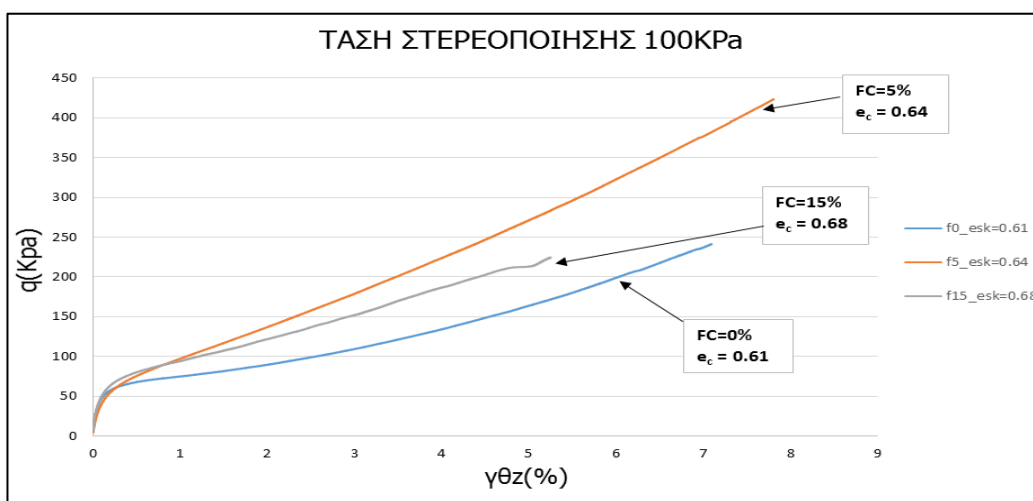
Από τα Σχήματα 3.52-3.55 αυτής της κατηγορίας δοκιμίων και για τάση στερεοποίησης 100kPa, παρατηρούμε ότι όταν προσθέτουμε λεπτόκοκκο υλικό 5% η τάση για διαστολή αυξάνεται ενώ περαιτέρω αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού δεν έχει τα ίδια αποτελέσματα, αντίθετα μειώνει τη διαστολικότητα.

Από το Σχήμα 3.53 παρατηρούμε ότι για μικρές παραμορφώσεις οι αντοχές του δοκιμίου ιλυώδους άμμου 5% είναι μεγαλύτερες ενώ οι αντοχές καθαρής άμμου είναι ίδιες με το δοκίμιο με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%. Σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 0,5% το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10% αναπτύσσει μεγαλύτερες αντοχές από το δοκίμιο καθαρής άμμου και φτάνει σε παρόμοια παραμένουσα αντοχή με το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5%.

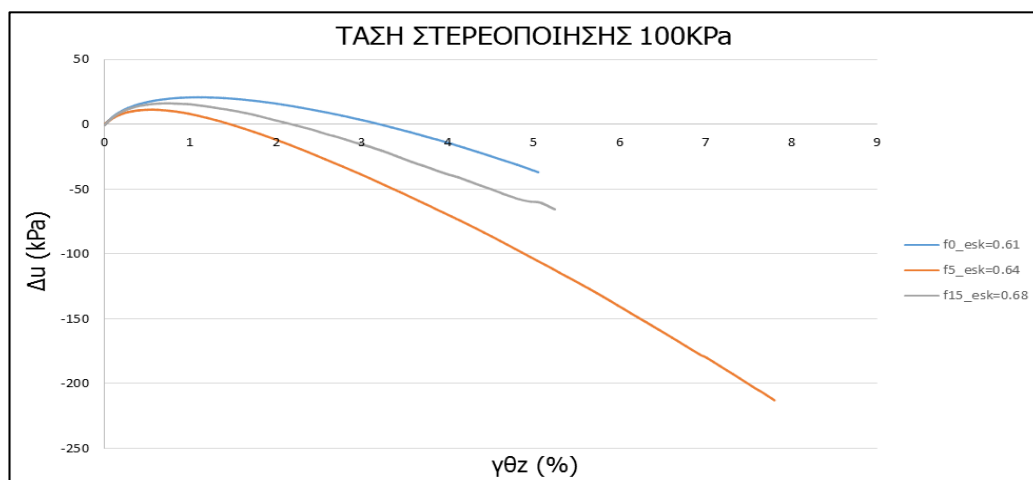
Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και σε παλιότερη διπλωματική εργασία (Παπαδόπουλος και Πολυδώρου, 2015). Από μονοτονικά πειράματα που διεξήχθησαν στη Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου. Παρουσίασαν ότι για ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% η συμπεριφορά βελτιώνεται ενώ για περαιτέρω αύξηση της τάξης του 15% το υλικό αποκτά πιο συστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο με FC=5% όχι όμως και από το δοκίμιο καθαρής άμμου. Οι δείκτες πόρων της σύγκρισης αυτής είναι ελάχιστα πιο μικροί,  $e_{sk}=0,61-0,68$  και συνάδουν με τους δείκτες πόρων της κατηγορίας 'Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια' της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 3.56 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

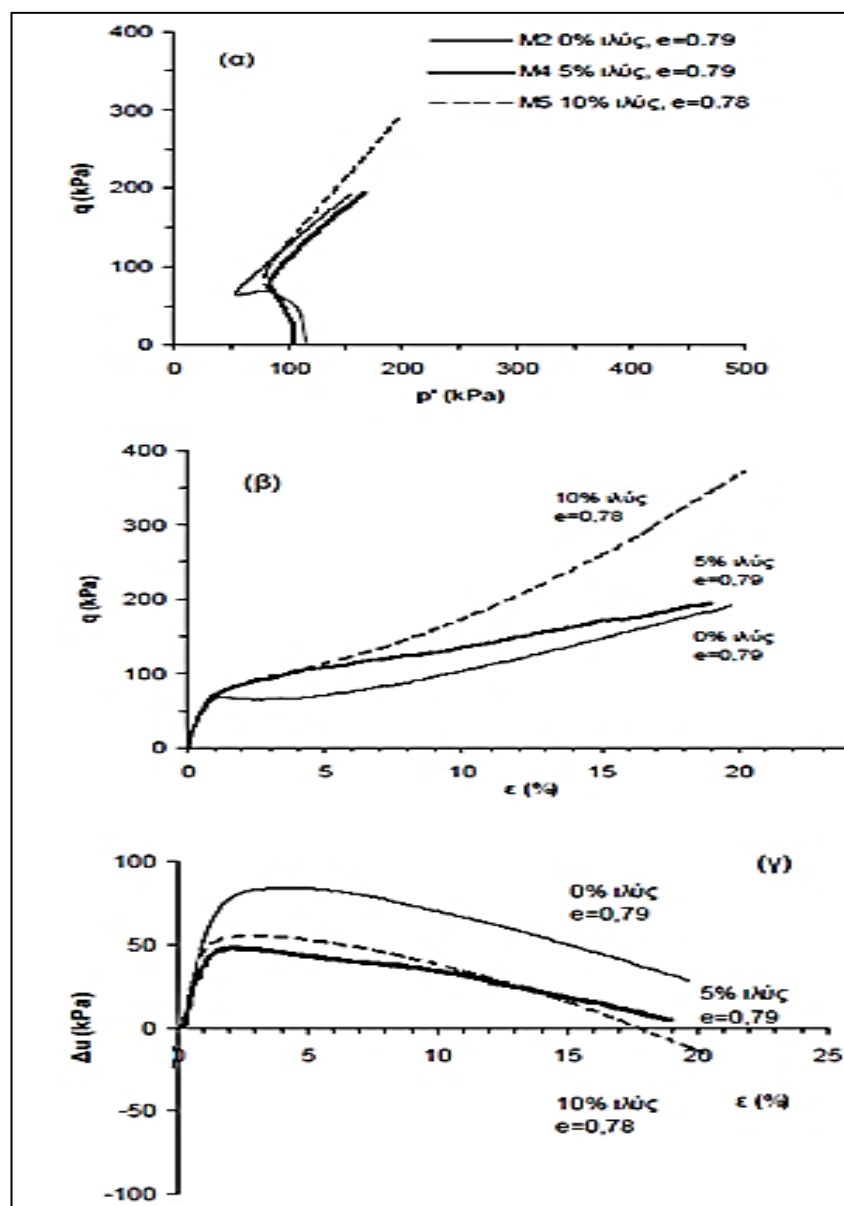


Σχήμα 3.57 Αποκλίνουσα τάση ( $q$ ) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ( $\gamma_{\theta z}$ ) μειγμάτων και καθαρής άμμου στεροποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 3.58 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

Σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγήθηκαν και άλλοι ερευνητές, μετά απο πειράματα που πραγματοποίησαν. Στο Σχήμα 3.59 (Γεωργιάννου και Σάκκης, 2010) παριστάνονται τα αποτελέσματα απο σειρά τριαξονικών δοκιμών σε μίγματα άμμου-ιλύος τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa και με ολικούς δείκτες πόρων κοντά στο  $e=0.8$ . Από το Σχήμα 3.59 διεξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη ιλύος στα χαλαρά δοκίμια βελτιώνει συνεχώς την συμπεριφορά του μίγματος σε σχέση με την καθαρή άμμο.

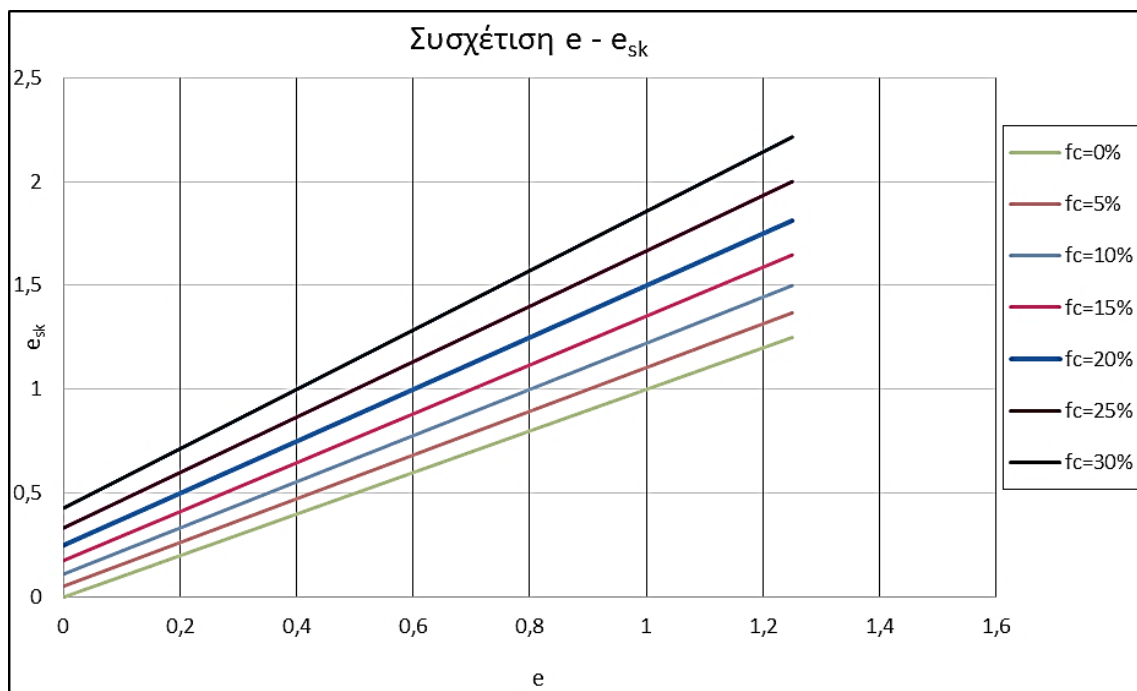


Σχήμα 3.59 Χαλαρά δοκίμια,  $p'=100\text{kPa}$ , (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων

Αξίζει να σημειωθεί πως η ομαδοποίηση πυκνών-χαλαρών δοκιμίων έγινε από τους Γεωργιάννου και Σάκκη (2010) με βάση τον ολικό δείκτη πόρων και όχι τον δείκτη πόρων σκελετού όπως έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στο Σχήμα 3.60 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη πόρων σκελετού και του ολικού δείκτη πόρων. Οι δύο αυτοί δείκτες πόρων συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$e_{sk} \approx \frac{e+f_c}{1-f_c} \leftrightarrow e \approx e_{sk}(1-f_c) - f_c \quad [-]$$

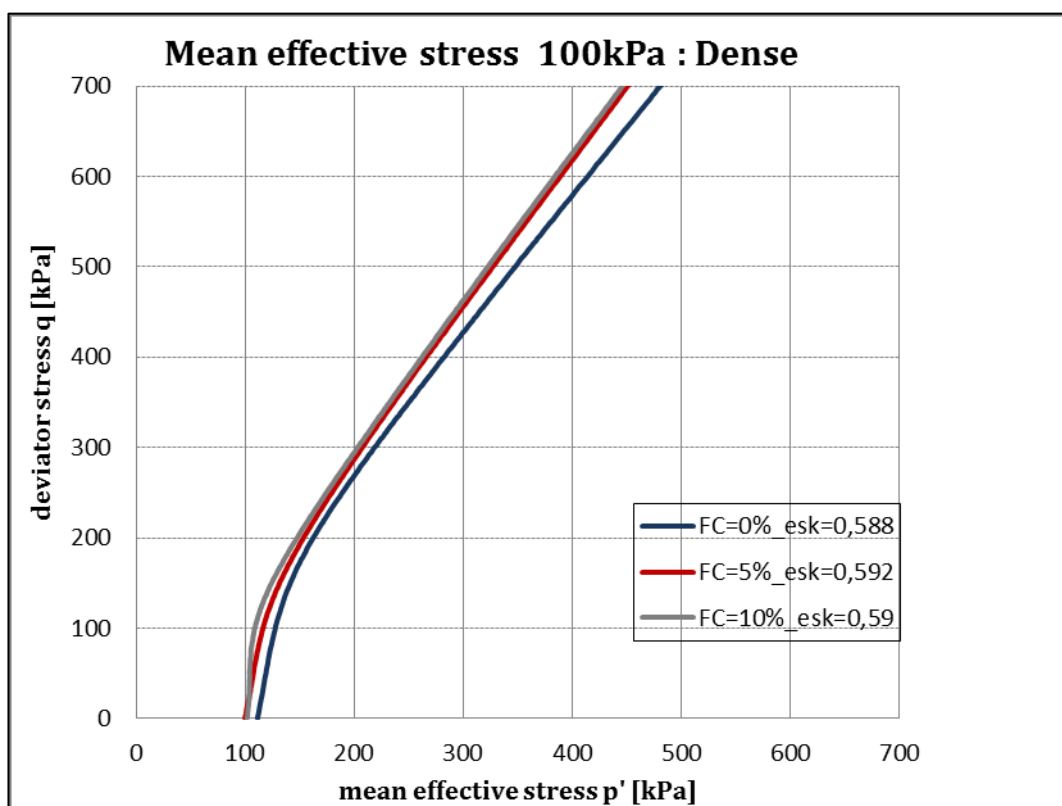
Από το Σχήμα 3.60 γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων σε ένα μίγμα με σταθερό ολικό δείκτη πόρων αυξάνει σημαντικά τον αντίστοιχο δείκτη πόρων σκελετού. Έτσι αν ομαδοποιήσουμε δοκίμια ίδιου δείκτη πόρων με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων, τα μίγματα με υψηλά ποσοστά λεπτοκόκκων θα έχουν πολύ αραιότερες δομές με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού. Παρόλα αυτά σύμφωνα με το Σχήμα 3.59 η ιλυώδης άμμος εμφανίζει διαστολικότερη συμπεριφορά από την καθαρή άμμο. Εάν δε η σύγκριση γίνει ως προς δείκτη πόρων σκελετού (βλ. Σχήμα 3.53) ποσοστό ιλύος 5% έχει ευεργετικότερη δράση από ποσοστό 10% όταν προστίθεται στην ίδια άμμο αλλά και τα δύο ποσοστά μειώνουν την συστολικότητα της άμμου.



Σχήμα 3.60 Δείκτης πόρων σκελετού ( $e_{sk}$ ) συναρτήσει ολικού δείκτη πόρων ( $e$ ) για διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού

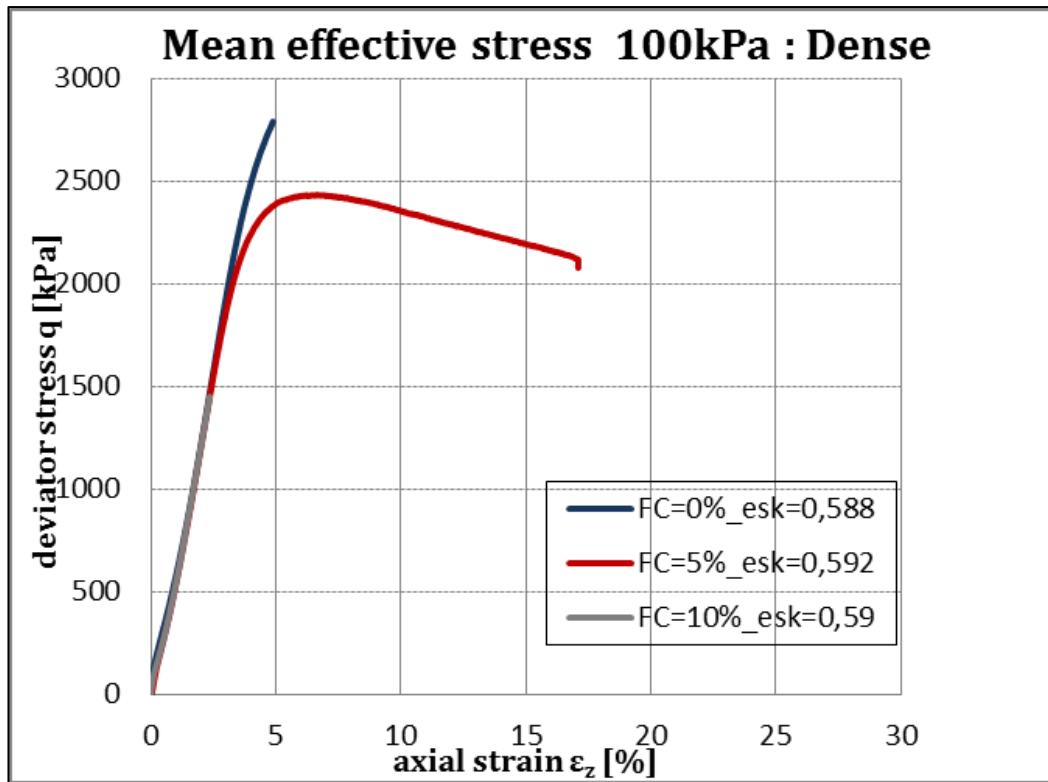
### Πυκνά Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.61 έως 3.64 παρουσιάζονται πυκνά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa . Αρχικά τα δοκίμια της ιλυώδους άμμου δείχνουν πιο συστολική συμπεριφορά αλλά για παραμορφώσεις >0.5% όλα τα δοκίμια δείχνουν κοινή διαστολικότητα.

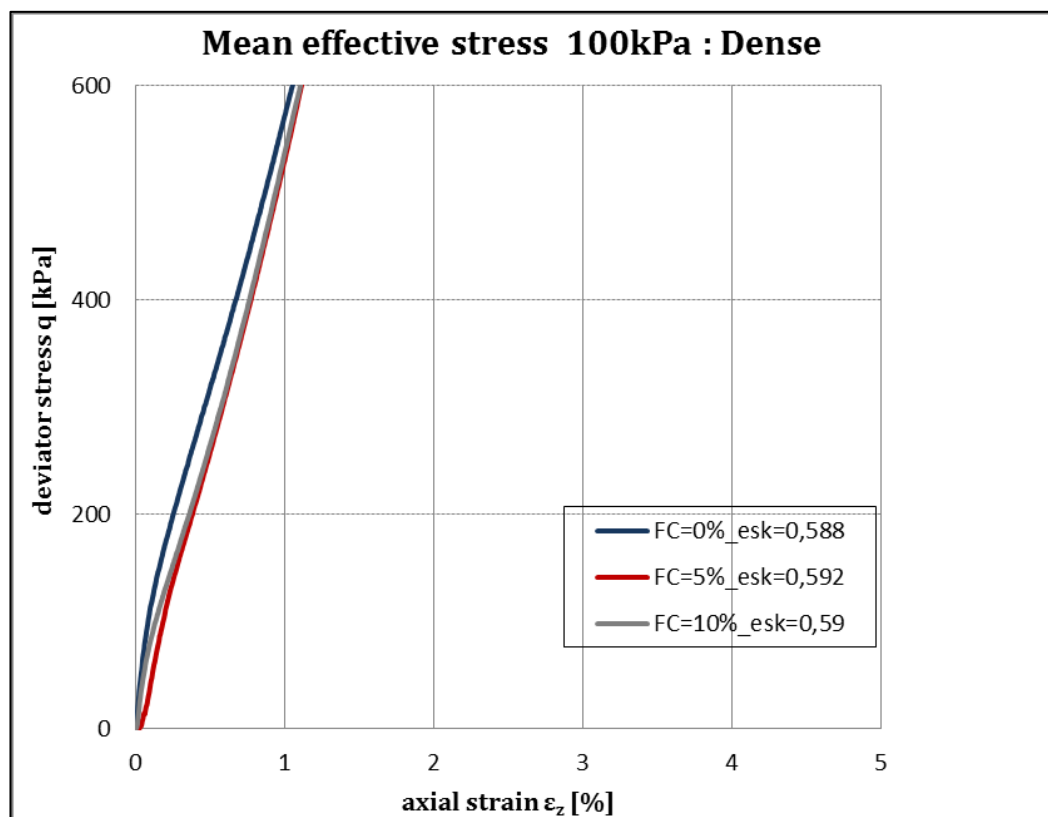


Σχήμα 3.61 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

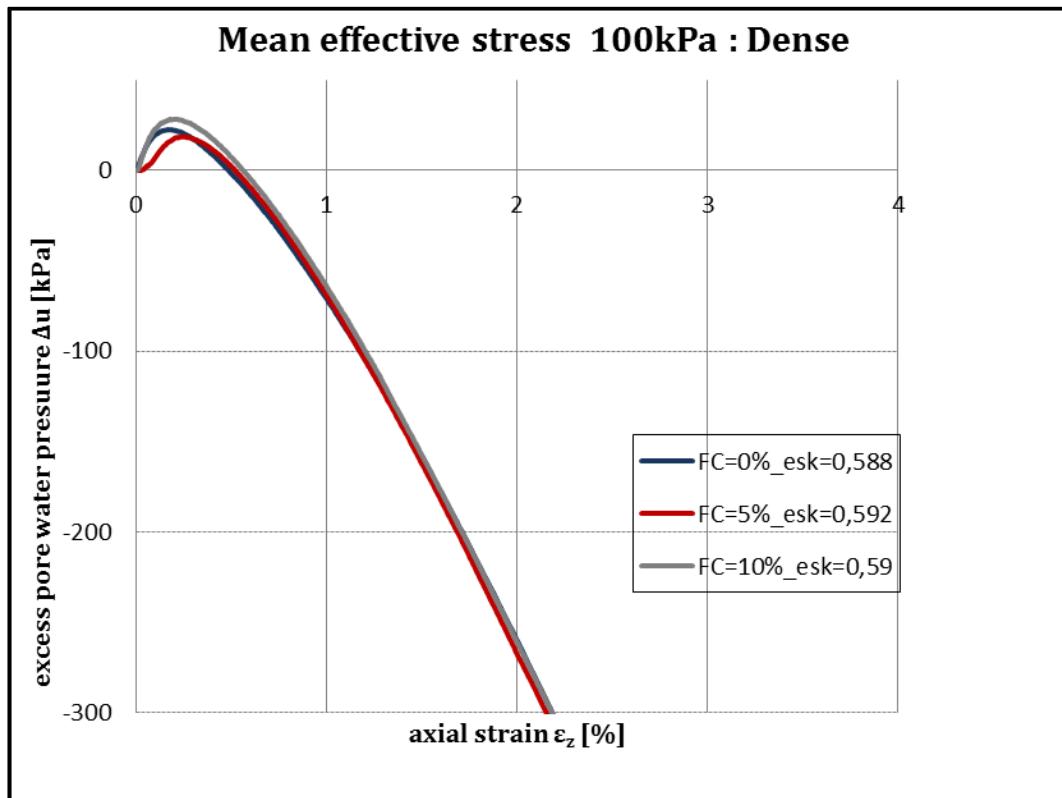




Σχήμα 3.62 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 3.63 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



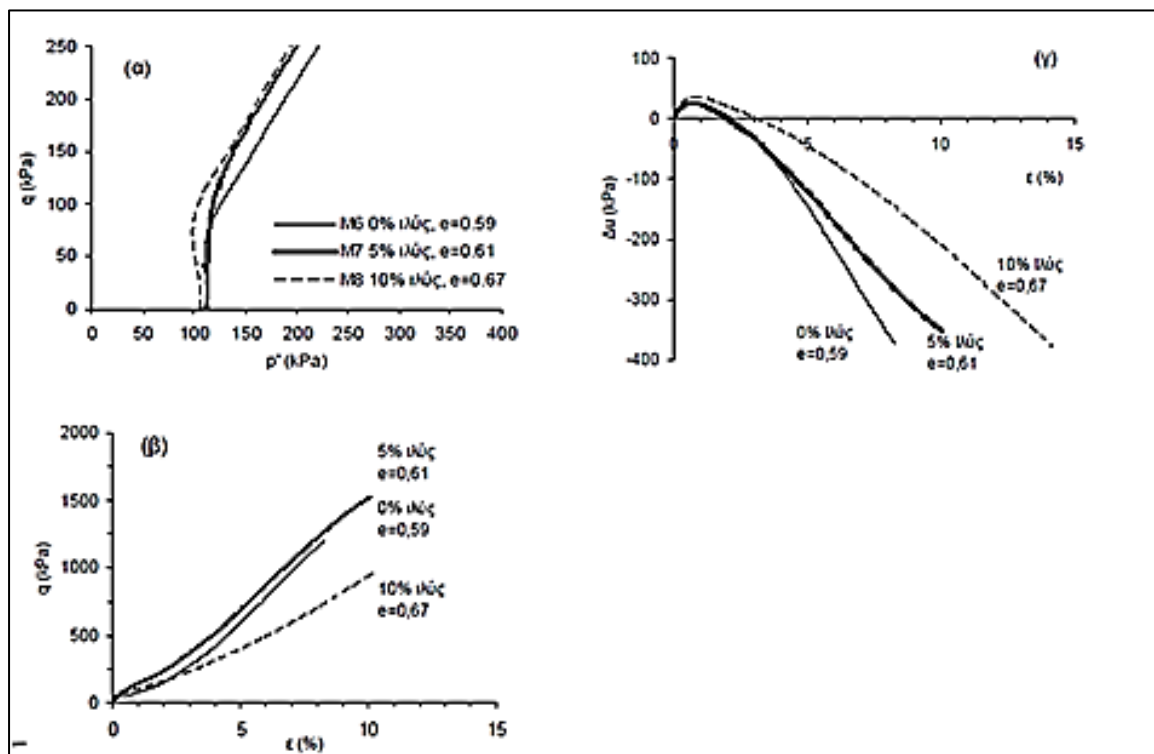
Σχήμα 3.64 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

Στην κατηγορία 'Πυκνά Δοκίμια' παρατηρούμε ότι τα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά καθώς έχουν παρόμοιες διαδρομές τάσεων και παρουσιάζουν κοντινές υπερπίεσεις πόρων που αποτονώνονται με τον ίδιο τρόπο. Σε αυτή τη κατηγορία, οι δείκτες πόρων σκελετού είναι  $e_{sk}=0,588-0,59$  άρα αναφερόμαστε σε πολύ πυκνά δοκίμια με μικρό όγκο κενών. Όσον αφορά την αρχική συστολική απόκριση των δοκιμίων παρατηρείται ότι προσθέτοντας λεπτόκοκκο υλικό έως 5% η συμπεριφορά βελτιώνεται ενώ για περαιτέρω αύξηση στα 10% το δοκίμιο παρουσιάζει πιο συστολική συμπεριφορά και από το δοκίμιο καθαρής άμμου. Αυτό δεν συνέβει στα χαλαρά δοκίμια όπου και ποσοστό 10% εμφανίζει πιο διαστολική συμπεριφορά από την καθνή άμμο πιθανώς διότι για ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% το λεπτόκοκκο υλικό γεμίζει τους λίγους πόρους (τα κενά) της πυκνής άμμου και χάνονται οι επαφές των κόκκων της άμμου ενώ δεν ήταν αρκετό να γεμίσει τα κενά του σκελετού της χαλαρής άμμου.

Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση είναι ότι από το Σχήμα 3.62 βλέπουμε το δοκίμιο καθαρής άμμου να έχει σχετικά μεγαλύτερες αντοχές από τα δοκίμια ιλυώδους άμμου και αυτό επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 3.63 όπου το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5% έχει μικρότερη παραμένουσα αντοχή από το δοκίμιο καθαρής άμμου ενώ για το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10% δε μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα.

Σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγήθηκαν και άλλοι ερευνητές, μετά απο πειράματα που πραγματοποίησαν. Στο Σχήμα 3.65 (Γεωργιάννου και Σάκκης, 2010) παριστάνονται τα αποτελέσματα απο σειρά τριαξονικών δοκιμών σε μίγματα άμμου-ιλύος τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa και με δείκτες πόρων που για τα πυκνά δοκίμια κυμαίνονταν μεταξύ  $e=0.59-0.67$ .

Από το Σχήμα 3.65 διεξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη ιλύος σε ποσοστό 5% αυξάνει την αποκλίνουσα τάση. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση του ποσοστού σε 10% οδηγεί σε αντοχές σημαντικά μειωμένες και πιο συστολική συμπεριφορά του μίγματος σε σχέση με την καθαρή άμμο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης πόρων για το μίγμα με ποσοστό ιλύος 10% είναι υψηλότερος από εκείνον των άλλων δοκιμών και πιθανώς ευθύνεται για την πολύ συστολική απόκριση του μίγματος.



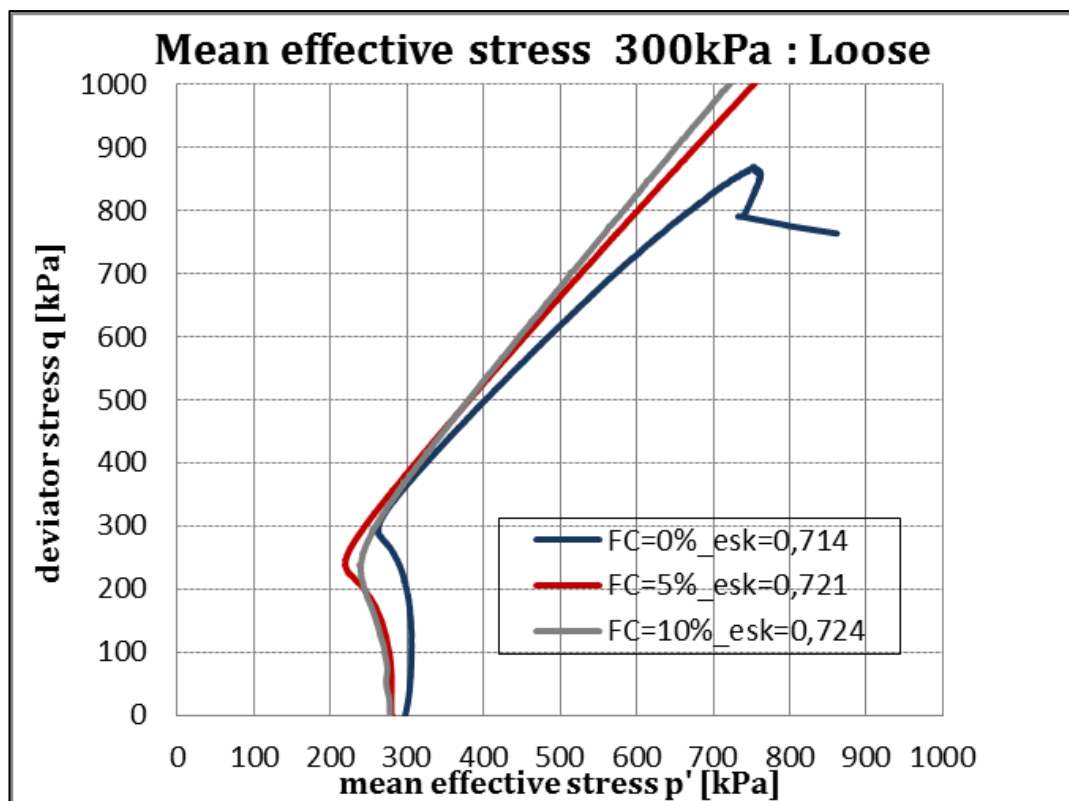
Σχήμα 3.65 Πυκνά δοκίμια,  $p'_i=100\text{kPa}$ , (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων (Γεωργιάννου και Σάκκης, 2010)

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω η ομαδοποίηση πικνών-χαλαρών δοκιμών έγινε με βάση τον ολικό δείκτη πόρων και όχι τον δείκτη πόρων σκελετού όπως έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία (βλ. Σχήμα 3.45). Έτσι αν ομαδοποιήσουμε δοκίμια ίδιου δείκτη πόρων με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων, τα μίγματα με υψηλά ποσοστά λεπτοκόκκων θα έχουν πολύ αραιότερες δομές με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού.

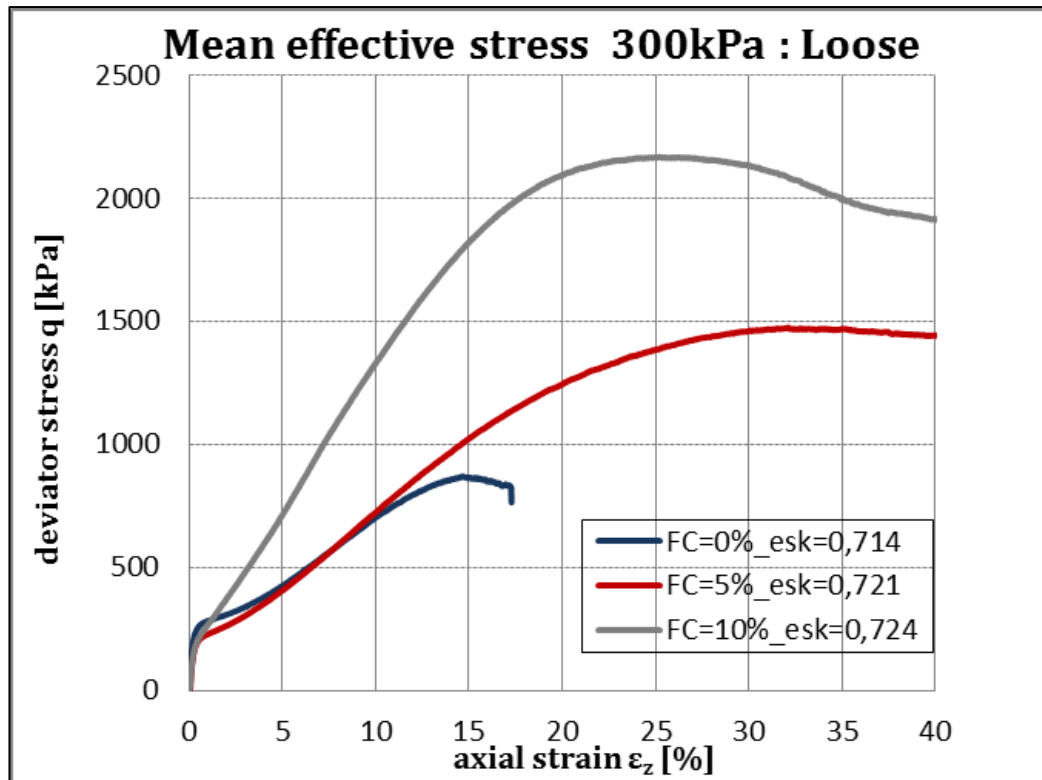
### 3.3.4.2 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa

#### Χαλαρά Δοκίμια

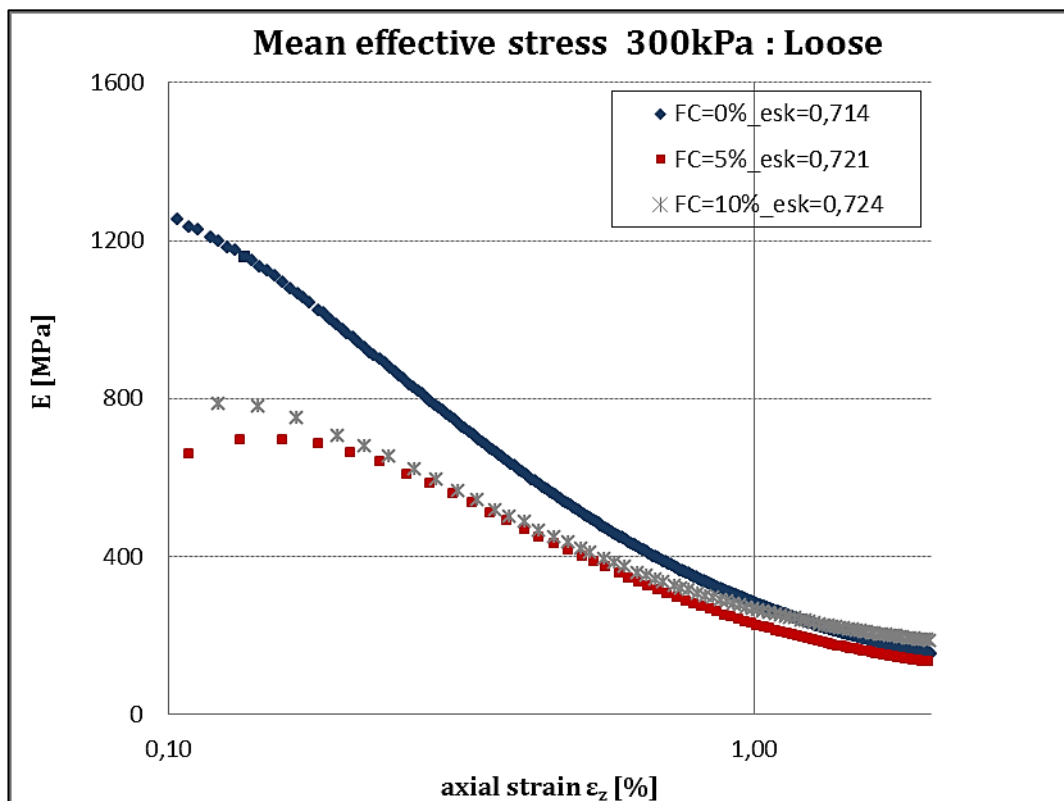
Στα Σχήματα 3.66 έως 3.69 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πικνότητες ( $e_{sk}=0,714$  έως  $e_{sk}=0,724$ ).



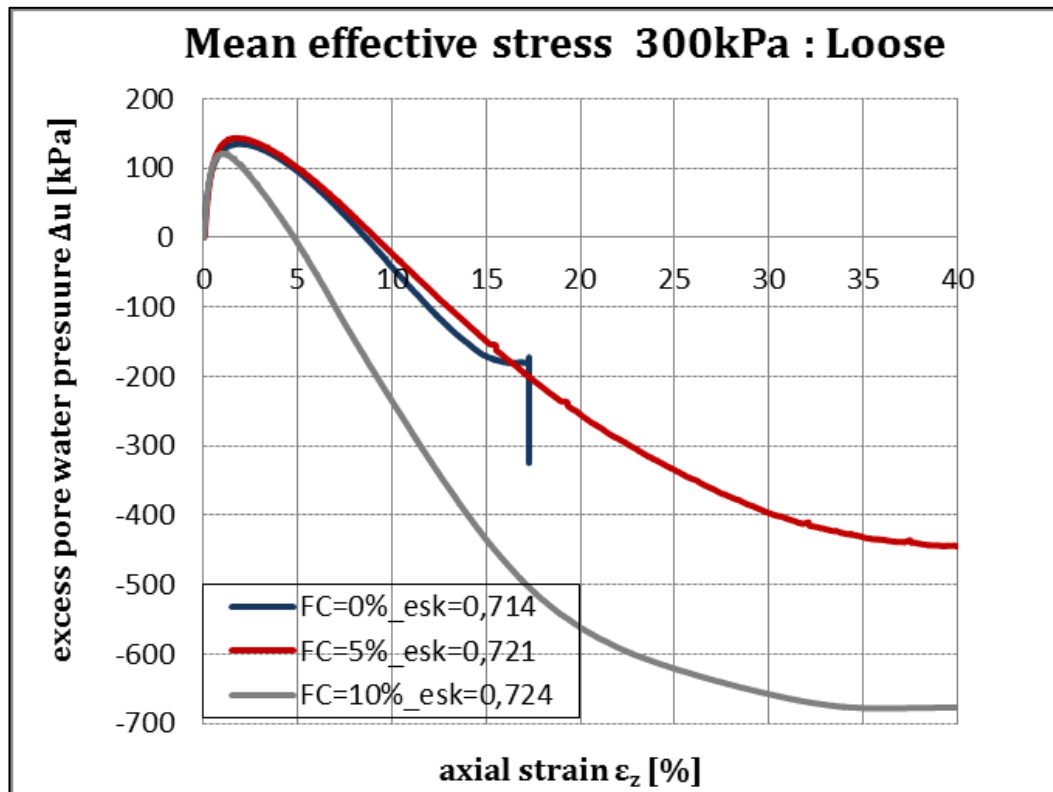
Σχήμα 3.66 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 3.67 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



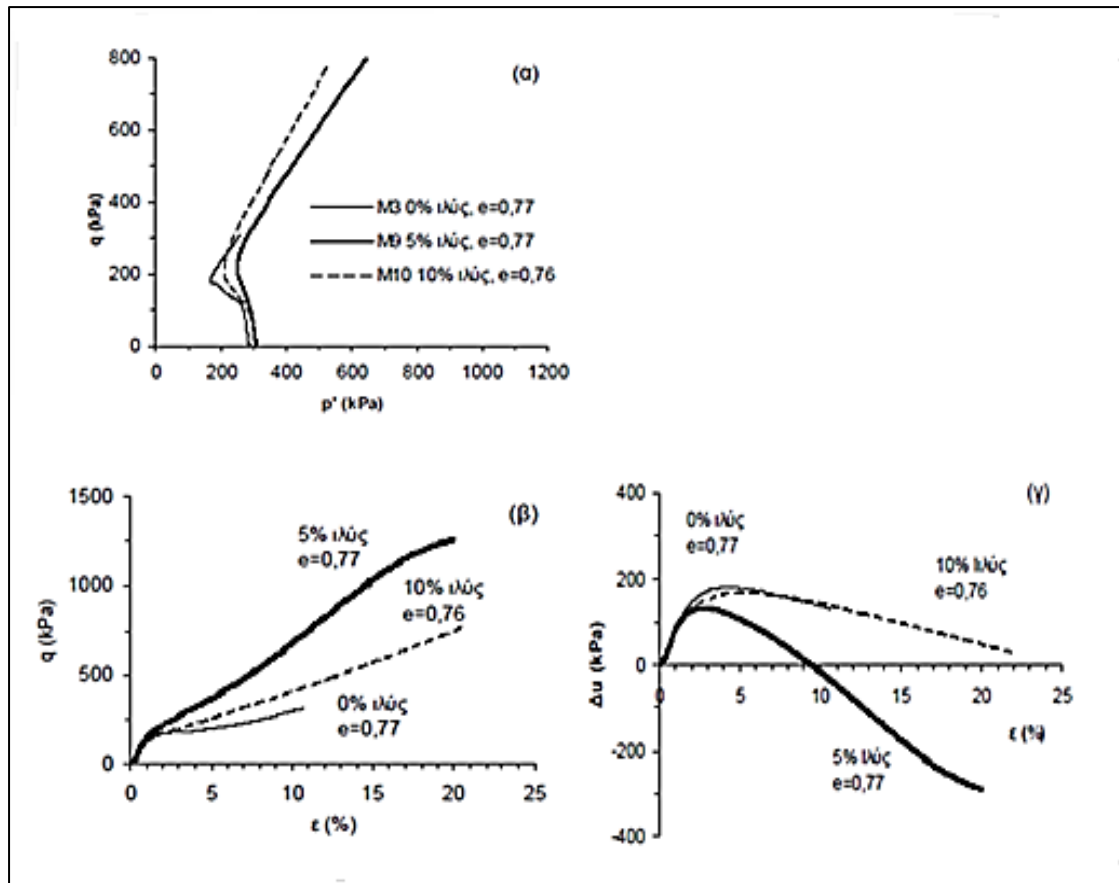
Σχήμα 3.68 Μέτρο δυστημσίας  $E$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 3.69 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

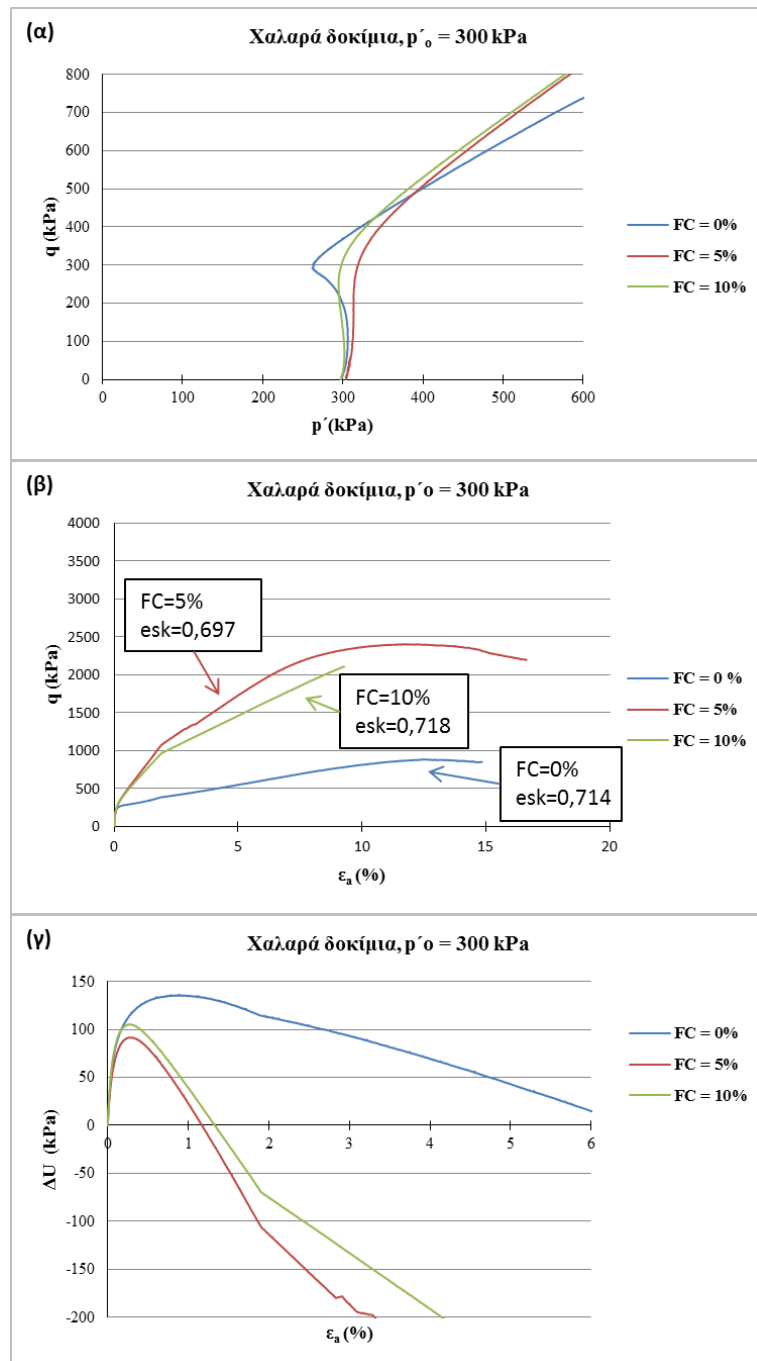
Από τις διαδρομές τάσεων των τριων δοκιμίων παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καθαρής άμμου αστόχησε σε μικρότερες τάσεις. Από το Σχήμα 3.69 είναι φανερό ότι το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10% αναπτύσσει μικρότερες υπερπίεσεις που αποτονώνει ταχύτερα ενώ τα άλλα δύο δοκίμια αναπτύσσουν ίδιες υπερπίεσεις που αποτονώνουν με τον ίδιο τρόπο. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ τα μείγματα έχουν μικρότερη δυσμησία από την καθαρή άμμο (Σχήμα 3.68), αναπτύσσουν μεγαλύτερες παραμένουσες αντοχές (Σχήμα 3.67). Όμοιος είχαν καταλήξει και οι ερευνητές Salgado, Antonio, Carraro και Prezzi (2009) από στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 400kPa.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Β.Ν.Γεωργιάννου και Σάκκης (2010) όταν πραγματοποίησαν δοκιμές σε χαλαρά δοκίμια με ολικούς δείκτες πόρων 0,76-0,77 που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa όπου η άμμος είναι περισσότερο συστολική από τα μείγματα.



Σχήμα 3.70 Χαλαρά δοκίμια,  $p'=300\text{kPa}$ , (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων (Γεωργιάννου και Σάκκης, 2010)

Όμοια κατέληξαν και σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Γκιούσας, 2012) όπου έγινε σύγκριση ανάμεσα σε τριαξονικά πειράματα στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση  $300\text{kPa}$  και με δείκτες πόρων σκελετού  $esk=0,697-0,718$ . Από το Σχήμα 3.71 (β) παρατηρούμε ότι το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5% αναπτύσσει μεγαλύτερες διατμητικές αντοχές αρχικά όμως το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10% φαίνεται να αναπτύσσει μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή. Το συγκεκριρωτικό συμπέρασμα που παρατηρούμε και εδώ είναι ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού δρα ευνοϊκά στη συμπεριφορά της άμμου.

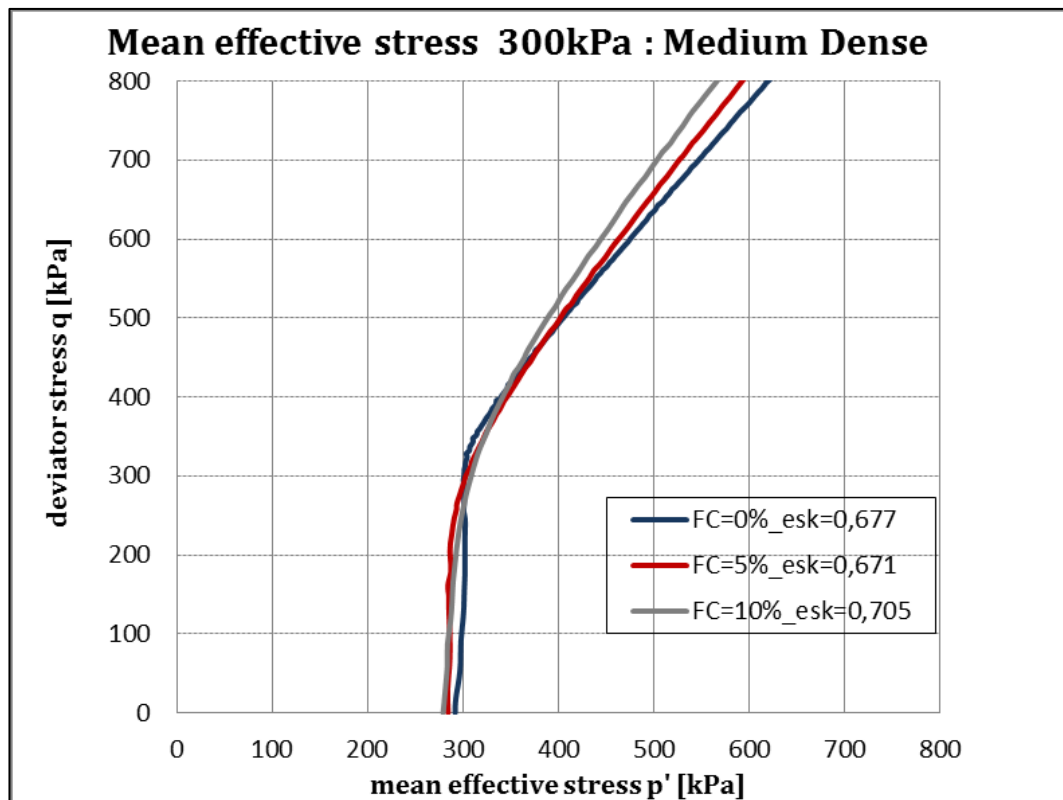


Σχήμα 3.71 Χαλαρά δοκίμια,  $p'_{0}=300\text{kPa}$ , (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων

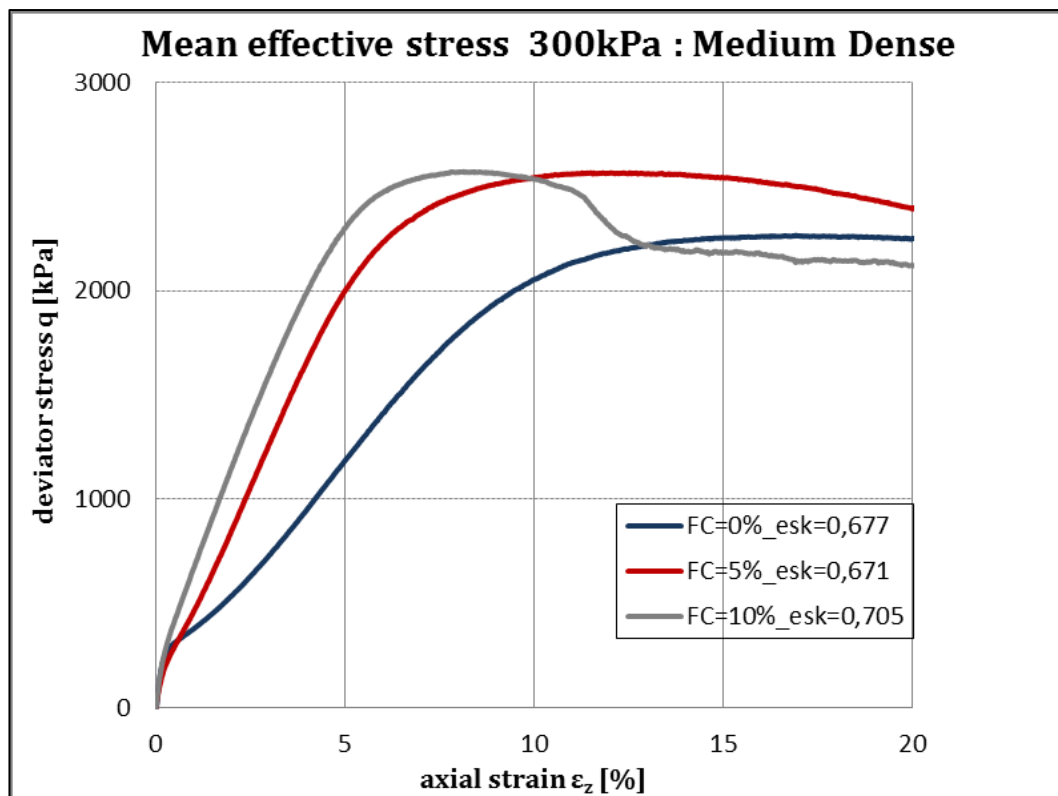


### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

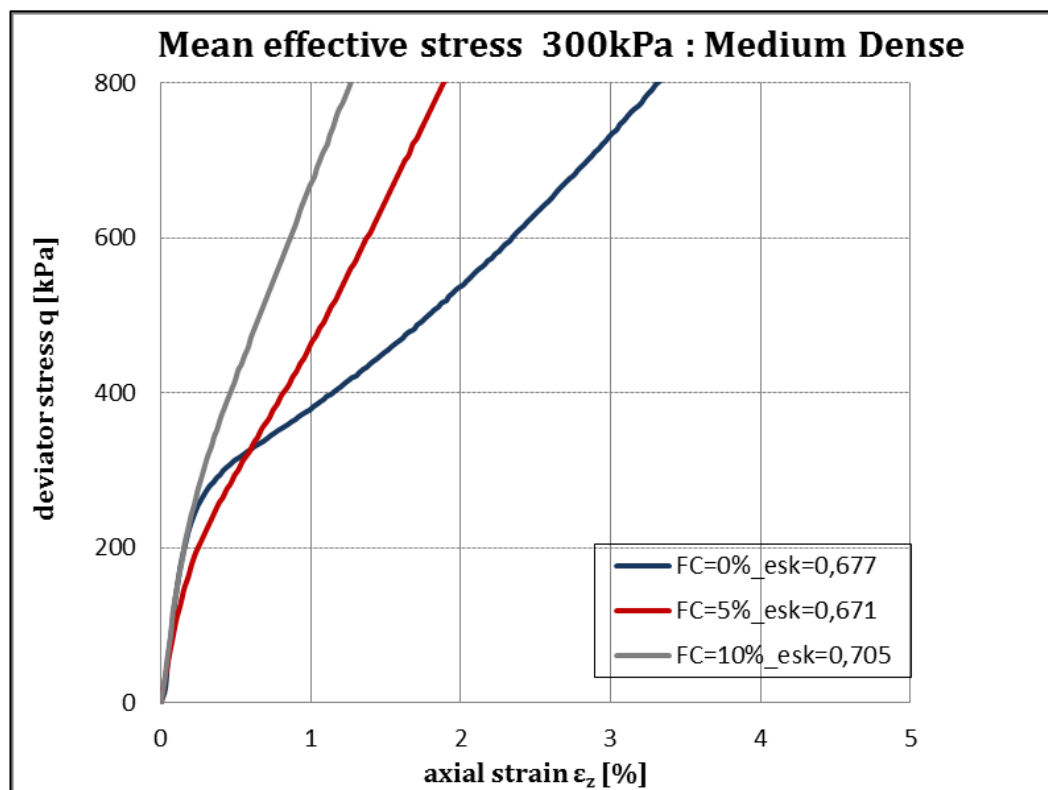
Στα Σχήματα 3.72 έως 3.75 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού  $FC=5\%$  και  $10\%$  που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης  $300\text{kPa}$  και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,671$  έως  $e_{sk}=0,705$ ).



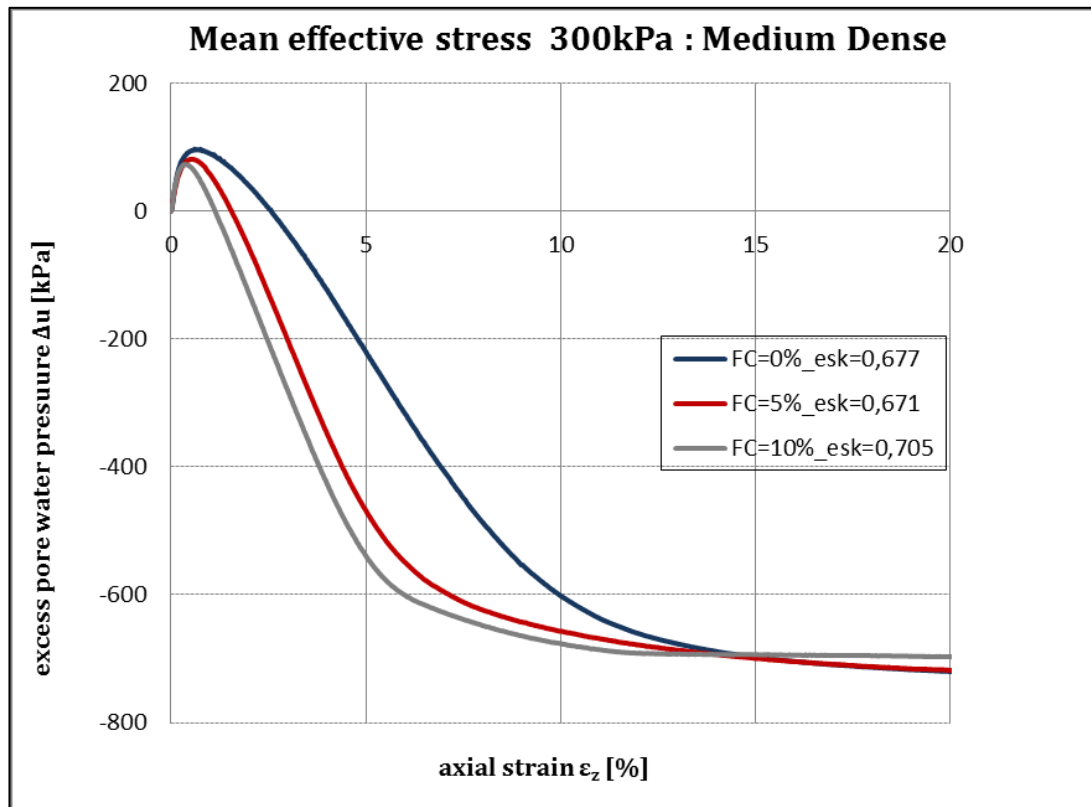
Σχήμα 3.72 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα  $300\text{kPa}$



Σχήμα 3.73 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



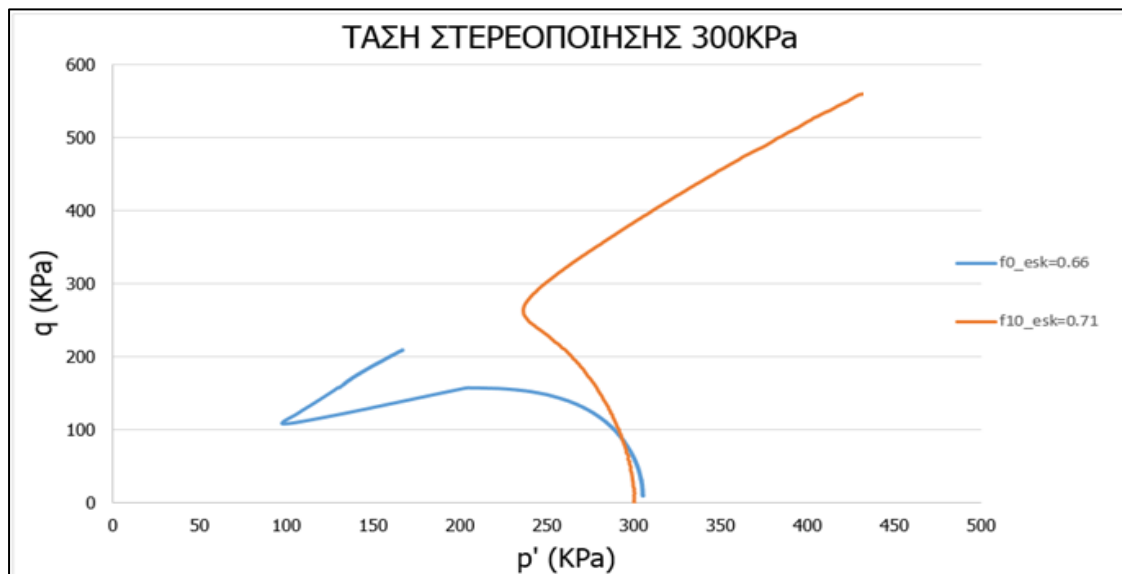
Σχήμα 3.74 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



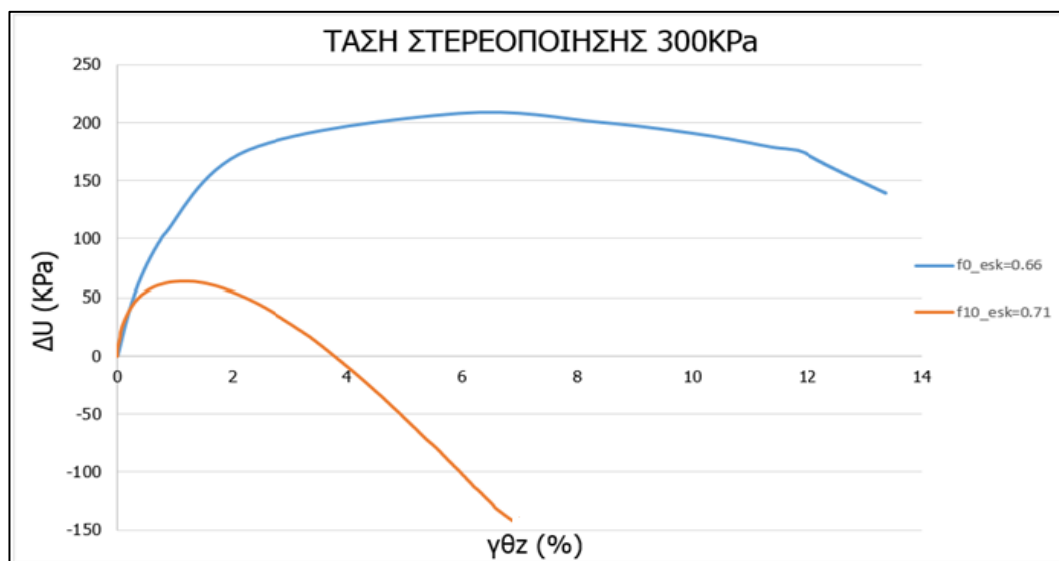
Σχήμα 3.75 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

Στη κατηγορία 'Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια' ανήκουν τα δοκίμια με  $e_{sk}=0,671-0,705$  δηλαδή είναι μέσης πυκνότητος δοκίμια που είναι συγκρίσιμη με τη πυκνότητα των δοκιμίων της κατηγορίας 'Χαλαρά Δοκίμια' με τάση στερεοποίησης 100kPa. Από τα Σχήματα 3.72-3.75 παρατηρούμε ότι όσο προσθέτουμε λεπτόκοκκο υλικό (ιλύ) τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά του δοκιμίου έχουμε.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Παπαδόπουλος και Πολυδώρου σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (2015) με τη σειρά μονοτονικών πειραμάτων στη συσκευή στρέψης κούλου δοκιμίου με  $e_{sk}=0,66-0,71$  που συνάδουν με τη κατηγορία 'Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια' της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 3.75 και 3.76, το δοκίμιο με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% έχει πιο διαστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου αναπτύσσοντας μικρότερες υπερπιέσεις πόρων.



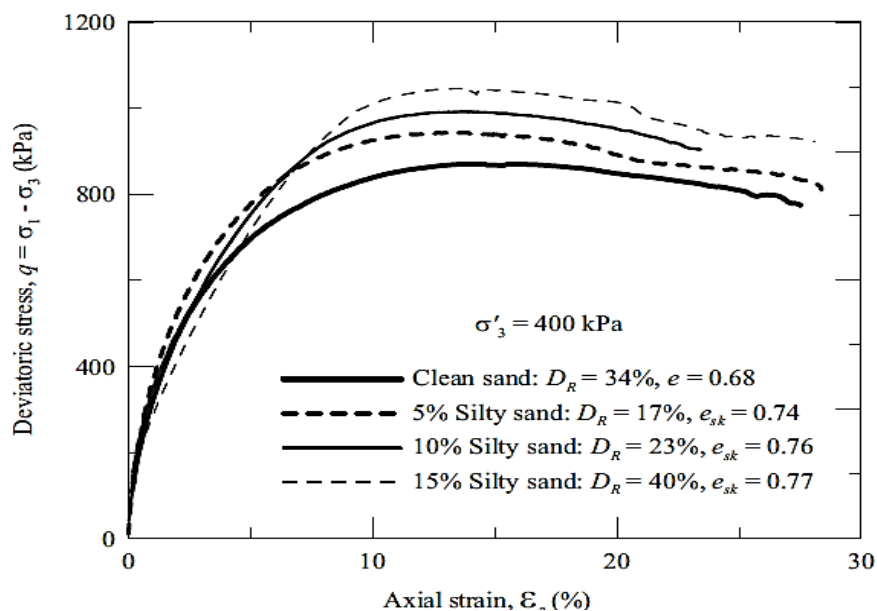
Σχήμα 3.76 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa



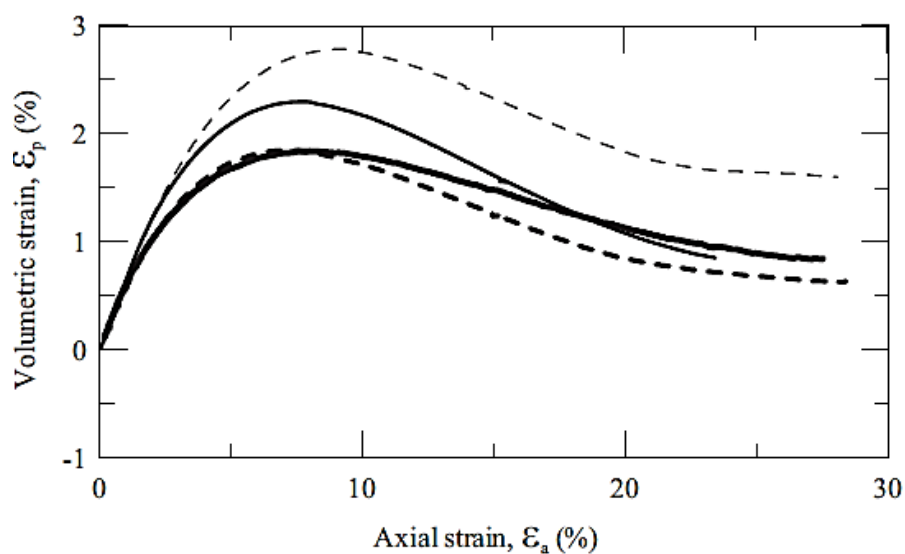
Σχήμα 3.77 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος( $\Delta u$ ) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

Σε όμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι ερευνητές Antonio, Carraro, Prezzi και Salgado (2009) που πραγματοποίησαν σειρά στραγγιζόμενων τριαξονικών πειραμάτων σε χαλαρά σχετικά δοκίμια με δείκτες πόρων σκελετού  $e_{sk}=0.68-0.77$  και τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 400kPa. Σε αυτά τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε μια αύξηση της αποκλίνουσας τάσης με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού στο μίγμα έως 15%.

Όλα τα μίγματα παρουσίαζαν βελτιωμένες αντοχές σε σχέση με την καθαρή άμμο, όπως καταλήξαμε και στην παρούσα διπλωματική εργασία για δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε κοντινή ενεργό τάση 300kPa και με κοντινούς δείκτες πόρων  $e_{sk}=0,671-0,705$ .



Σχήμα 3.78 Διάγραμμα ( $p' - q$ ), Χαλαρά δοκίμια,  $p'_0 = 400$ Κρα



Σχήμα 3.79 Διάγραμμα ( $\epsilon_p - \epsilon_a$ ), Χαλαρά δοκίμια,  $p'_0 = 400$ Κρα

	ΧΑΛΑΡΑ	ΜΕΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ	ΠΥΚΝΑ
<u>100kPa</u>			
(1)		$e_{sk}=0.685-0.696$	$e_{sk}=0.588-0.590$
		<b>0% &lt; 10% &lt; 5%</b>	<b>10% &lt; 0% ≤ 5%</b>
(2)	$e_{sk}=0,72-0,73$	$e_{sk}=0.610-0.680$	
	<b>0% &lt; 5% ≤ 15%</b>	<b>0% &lt; 15% &lt; 5%</b>	
(3)	$e=0.780-0.790$		$e=0.590-0.670$
	<b>0% &lt; 10% ≤ 5%</b>		<b>10% &lt; 0% ≤ 5%</b>
(5)	$e_{sk}=0,719-0,725$		
	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>		
<u>300kPa</u>			
(1)	$e_{sk}=0.714-0.724$	$e_{sk}=0.677-0.705$	
	<b>0% ≤ 5% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 5% ≤ 10%</b>	
(2)		$e_{sk}=0.660-0.710$	$e_{sk}=0,55-0,59$
		<b>0% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 10%</b>
(3)	$e=0.760-0.770$		
	<b>0% ≤ 10% &lt; 5%</b>		
(4)	$e_{sk}=0.680-0.770$		
	<b>0% &lt; 5% &lt; 10% &lt; 15%</b>		
(5)		$e_{sk}=0,697-0,718$	$e_{sk}=0,644-0,651$
		<b>0% &lt; 10% &lt; 5%</b>	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>
(1) παρούσα διπλωματική, (2) Παπαδόπουλος & Πολυδώρου (2015), (3) Γεωργιάννου & Σάκης (2010), (4) Salgado et al. (2010), (5) Γκιούσας (2012)			

Πίνακας 3.13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραμάτων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πειραμάτων βιβλιογραφίας

Ο Πίνακας 3.13 περιλαμβάνει τόσο πειράματα τριαξονικής συμπίεσης όσο και μονοτονικά πειράματα στη Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου. Όσον αφορά τα χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100 kPa, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού οδηγεί σε πιο διαστολική συμπεριφορά του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, οι Γεωργιάννου και Σάκης (2010) και οι Παπαδόπουλος και Πολυδώρου (2015) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού έως 5% δρά ευεγερτικά στη συμπεριφορά του δοκιμίου. Περαιτέρω αύξηση οδηγεί σε λιγότερο ευεγερτική επίδραση.

Στα μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100 kPa, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού έως 5% δρα ευεγερτικά στη συμπεριφορά της άμμου. Περαιτέρω αύξηση έχει αρνητική επίδραση χωρίς όμως το δοκίμιο να ξεπερνά τη συστολικότητα της καθαρής άμμου.

Στα πυκνά δοκίμια της κατηγορίας αυτής, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού πέραν του 10% οδηγεί σε πιο συστόλικο δοκίμιο ακόμα και από τη καθαρή άμμο. Αυτό συμβαίνει διότι τα κενά του σκελετού είναι πλέον λιγότερα και γεμίζουν με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% με αποτέλεσμα να χάνονται οι επαφές μεταξύ των κόκκων της άμμου.

Όσον αφορά τα χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300 kPa, τα πειράματα αποδεικνύουν ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού οδηγεί σε πιο συστολική συμπεριφορά του δοκιμίου, μειώνοντας τις υπερπιέσεις στο σκελετό του. Οι ερευνητές Γεωργιάννου και Σάκκης (2010) διεξήγαγαν τριαξονικά πειράματα σε αρκετά χαλαρά δοκίμια και κατέληξαν ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού της τάξης του 10% του συνολικού βάρους δοκιμίου οδηγούσε σε πιο συστολική συμπεριφορά δοκιμίου το οποίο πλησίαζε τη συμπεριφορά της καθαρής άμμου.

Η συμπεριφορά των μέσης πυκνότητας δοκιμίων της ίδιας κατηγορίας δείχνει ότι τα μείγματα άμμου-ιλύος έχουν πιο διαστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου.

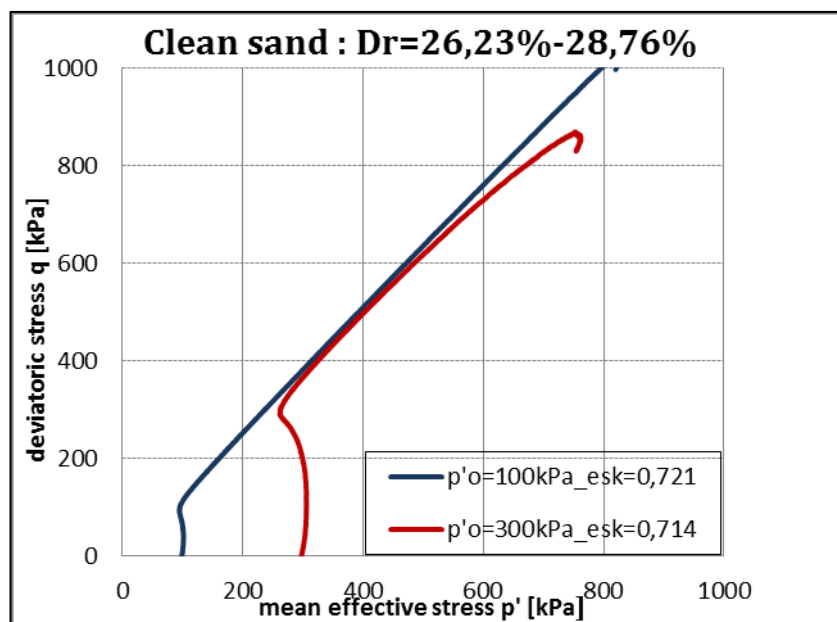
Τα πυκνά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300 kPa επίσης εμφανίζουν πιο διαστολική συμπεριφορά με τη προσθήκη ιλύος.

### 3.3.5 Επίδραση Της Τάσης Στερεοποίησης

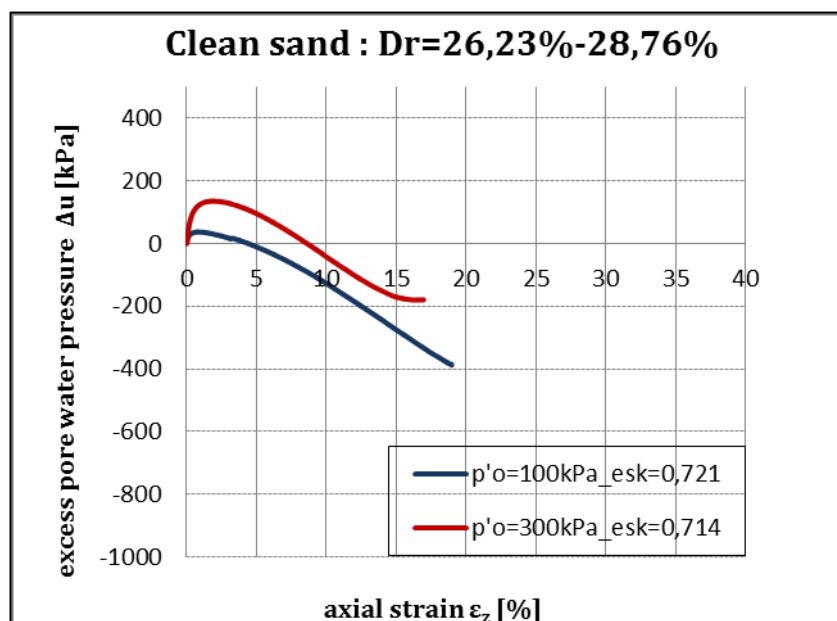
#### 3.3.5.1 Καθαρή Άμμος – Ποσοστό Λεπτόκοκκων 0%

#### Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.80 και 3.81 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια άμμου με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,714$  και  $e_{sk}=0,721$ ).



Σχήμα 3.80 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου

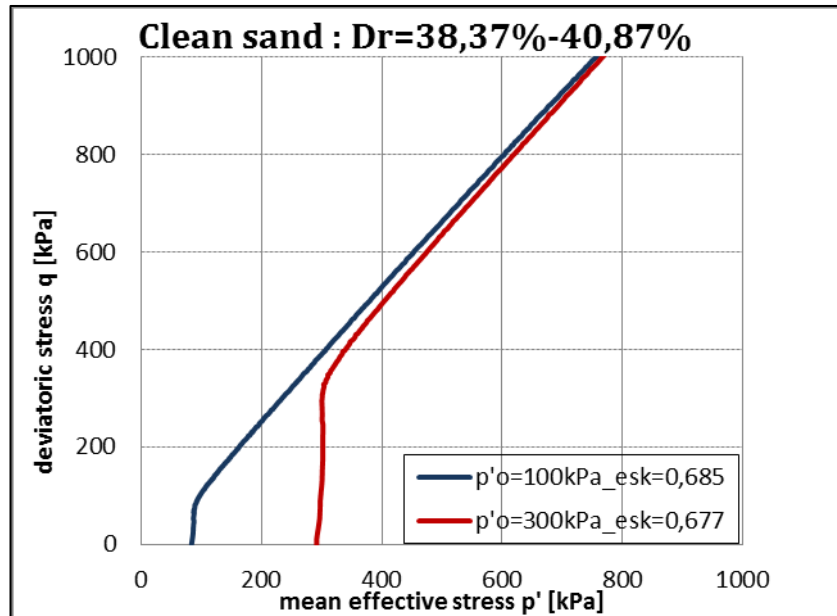


Σχήμα 3.81 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου

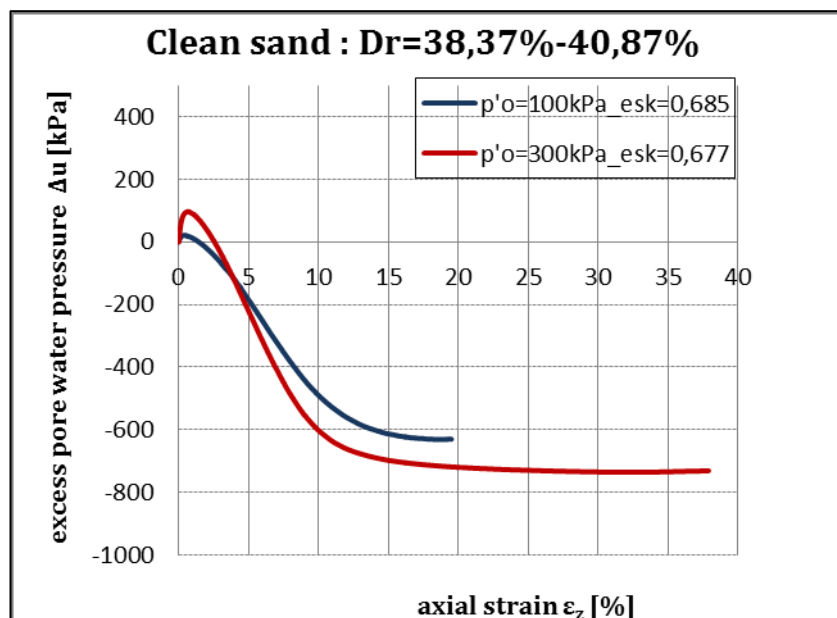


### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.82 και 3.83 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,677$  και  $e_{sk}=0,685$ ).



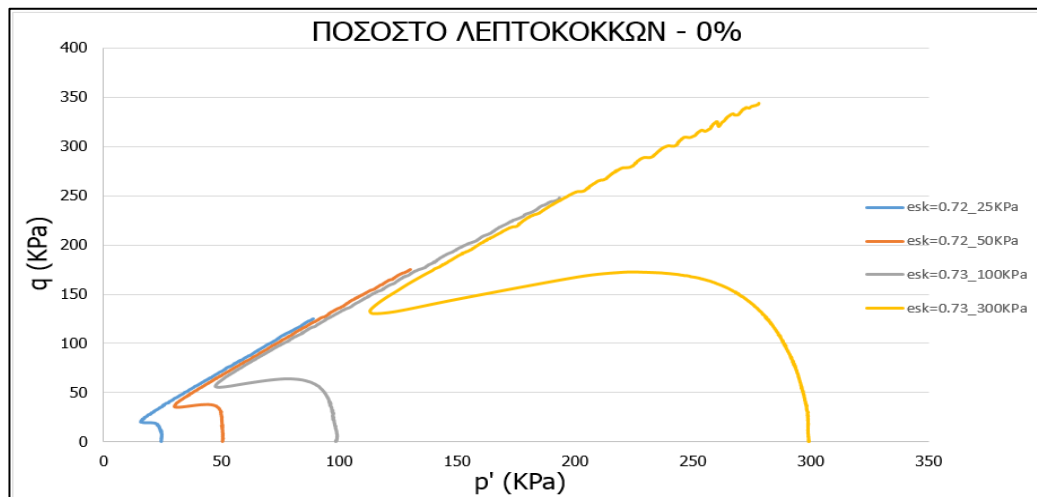
Σχήμα 3.82 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου



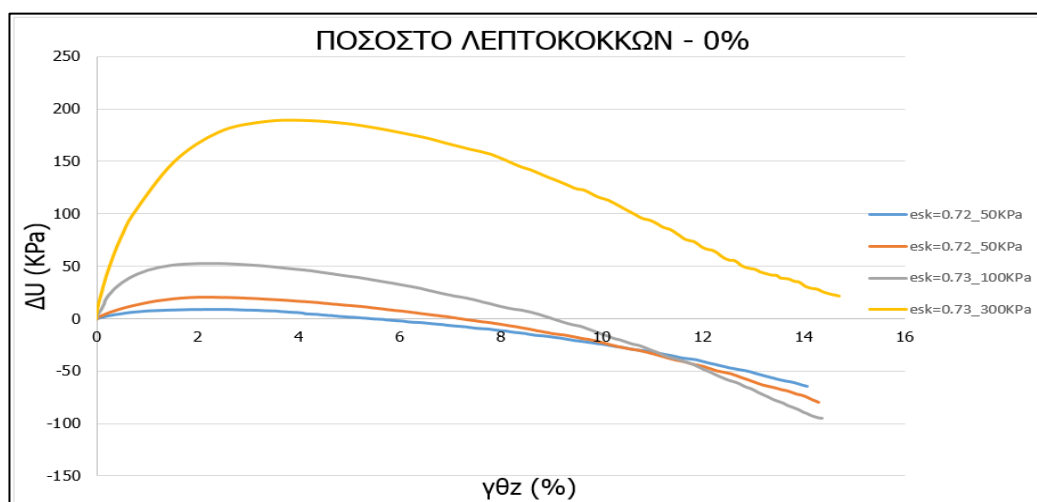
Σχήμα 3.83 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου

Στα χαλαρά και στα μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου παρατηρούμε ότι όσο μικρότερη η τάση στερεοποίησης του δοκιμίου τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά αυτό έχει. Ένα ακόμα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η επίδραση της αρχικής ενεργού τάση στερεοποίησης είναι μικρότερη στα πυκνά από ότι στα χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου.

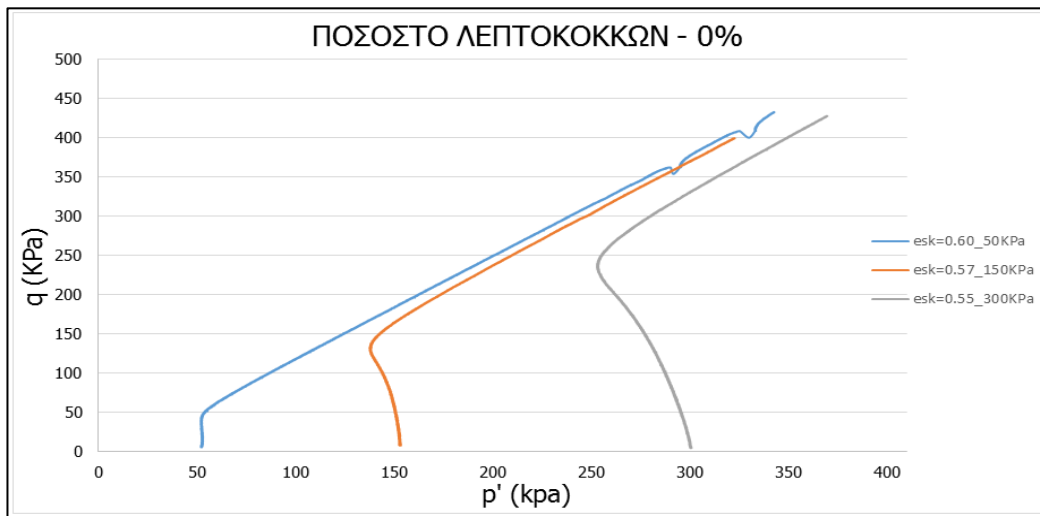
Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία για δοκιμές στρέψης κοίλου δοκιμίου (Παπαδόπουλος και Πολυδώρου, 2015) όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.83 και 3.84, 3.85 και 3.86 που αναφέρονται σε χαλαρά και σε πυκνά δοκίμια καθαρής άμμου αντίστοιχα, τα οποία υποβάλλονται σε στρεπτική διάτμηση. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα όσο μεγαλύτερη η τάση στερεοποίησης τόσο πιο συστολική συμπεριφορά του δοκιμίου παρατηρείται ανεξαρτήτως πυκνότητας και για τριαξονική αλλά και στρεπτική διάτμηση.



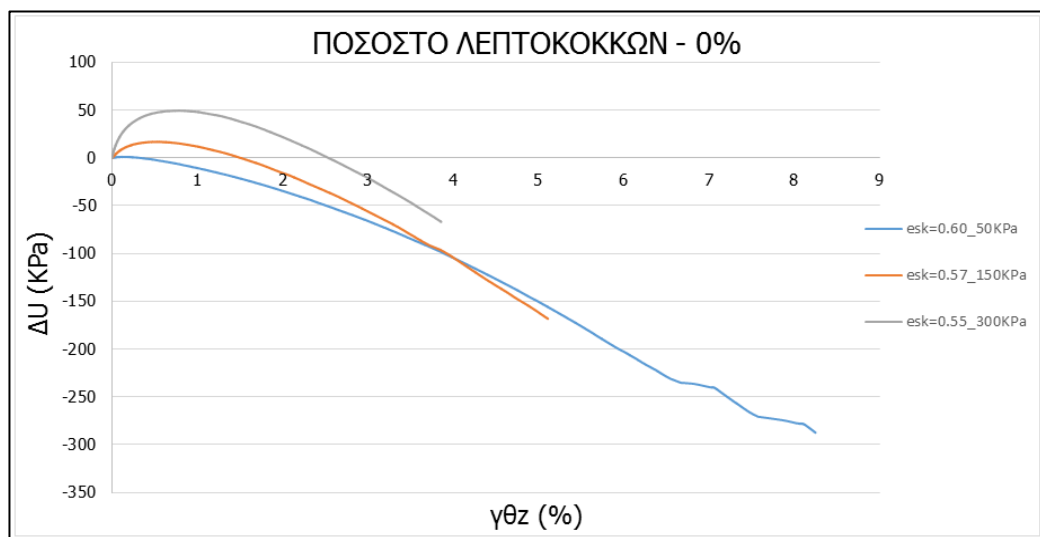
Σχήμα 3.84 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  χαλαρών δοκιμίων καθαρής άμμου



Σχήμα 3.85 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση χαλαρών δοκιμίων καθαρής άμμου



Σχήμα 3.86 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  πυκνών δοκιμών καθαρής άμμου

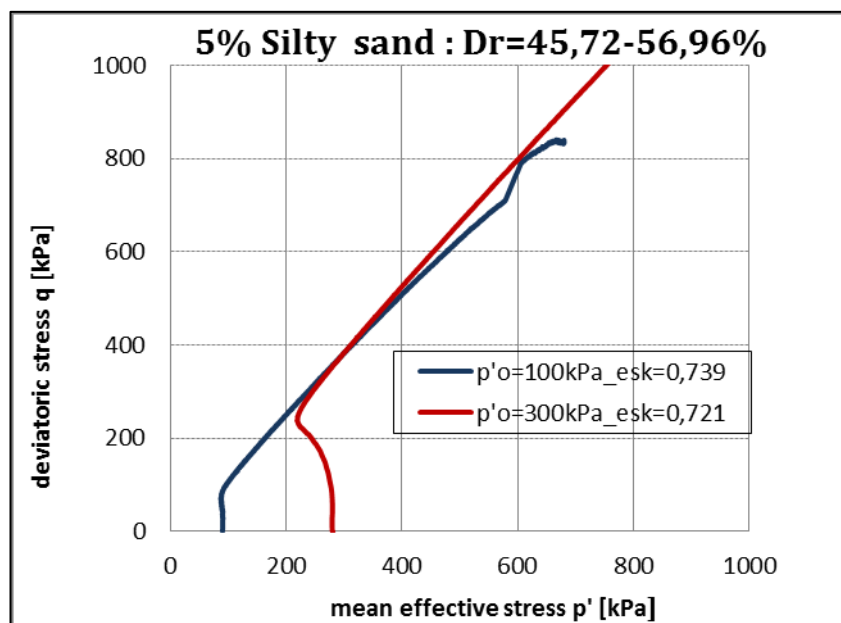


Σχήμα 3.87 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση πυκνών δοκιμών καθαρής άμμου

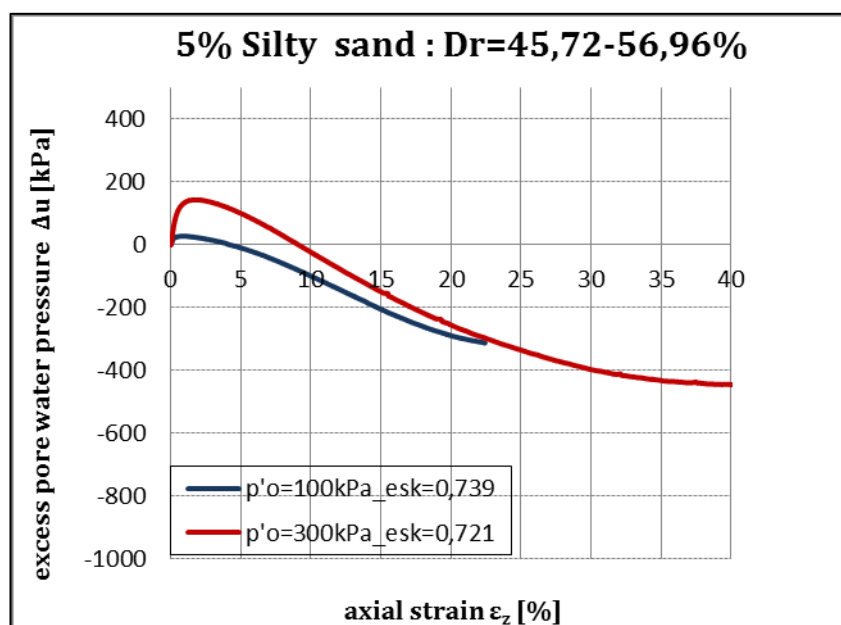
## 3.3.5.2 Ιλυώδης Άμμος – Ποσοστό Λεπτόκοκκων 5%

Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.88 και 3.89 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,671$  και  $e_{sk}=0,685$ ).



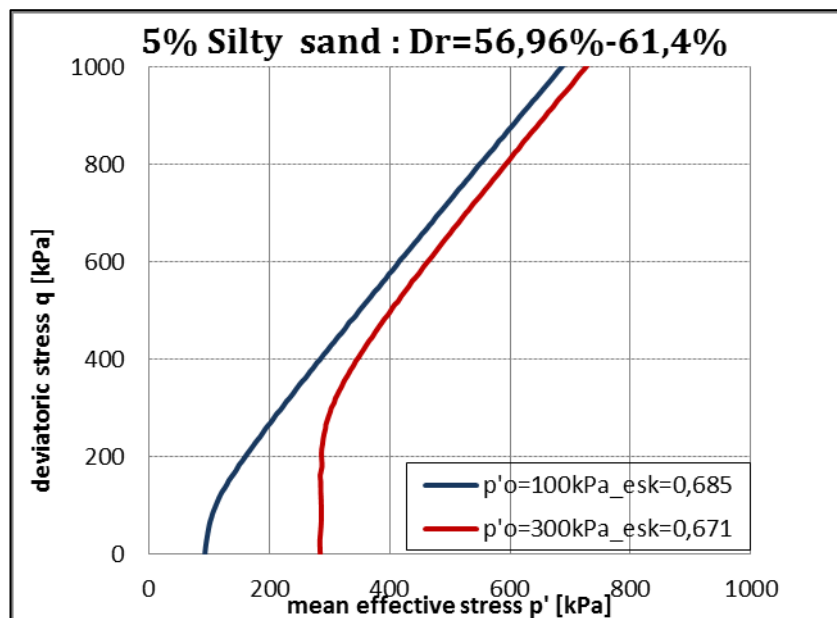
Σχήμα 3.88 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια αμμοιλύος 5%



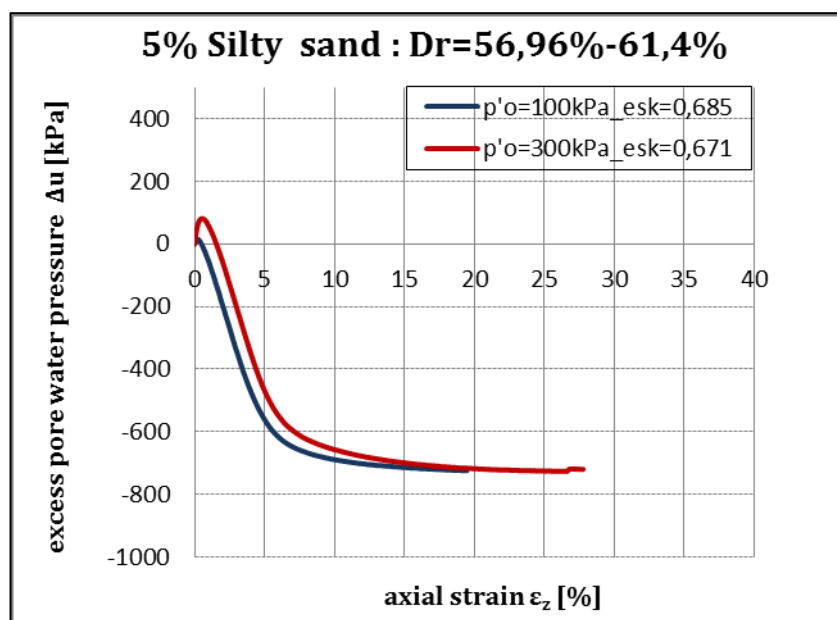
Σχήμα 3.89 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσεως της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια αμμοιλύος 5%

### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.90 και 3.91 παρουσιάζονται πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,671$  και  $e_{sk}=0,685$ ).



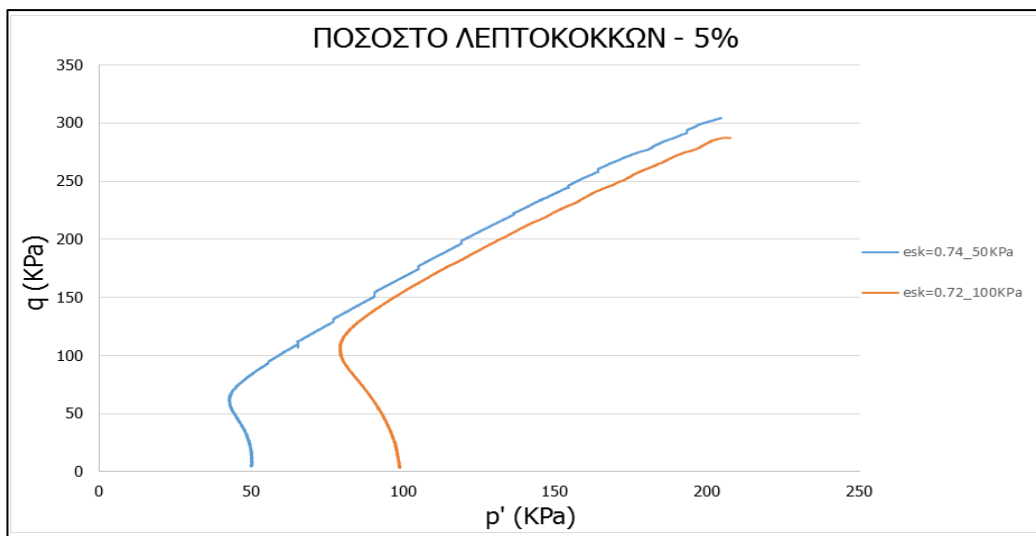
Σχήμα 3.90 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια αμμοιλύος 5%



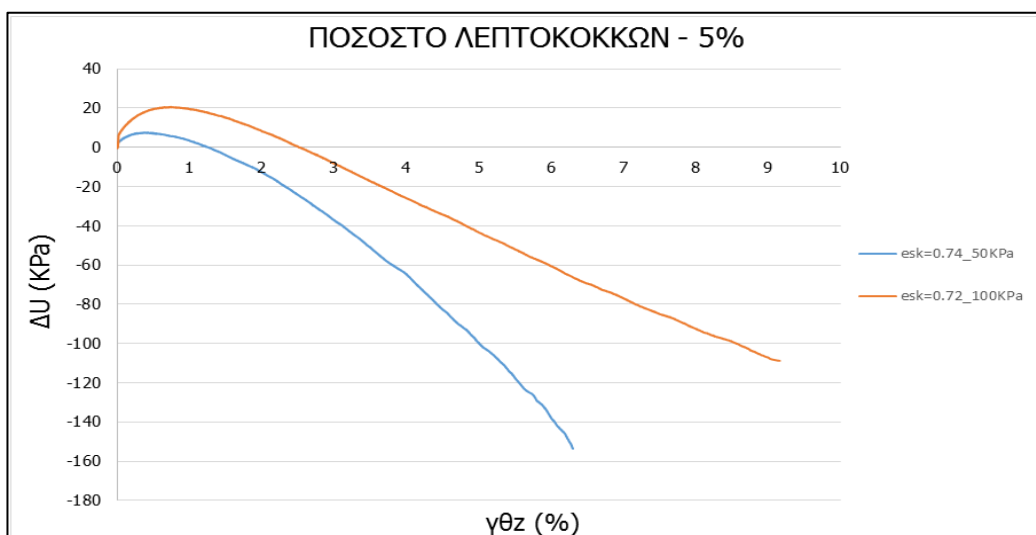
Σχήμα 3.91 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια αμμοιλύος 5%

Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 3.87-3.88, που αφορούν χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% και από τα Σχήματα 3.89-3.90 που αφορούν μέσης πυκνότητας δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%, όσο πιο μικρή είναι η τάση στερεοποίησης τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά δοκιμίου καταγράφεται κατά τη δοκιμή.

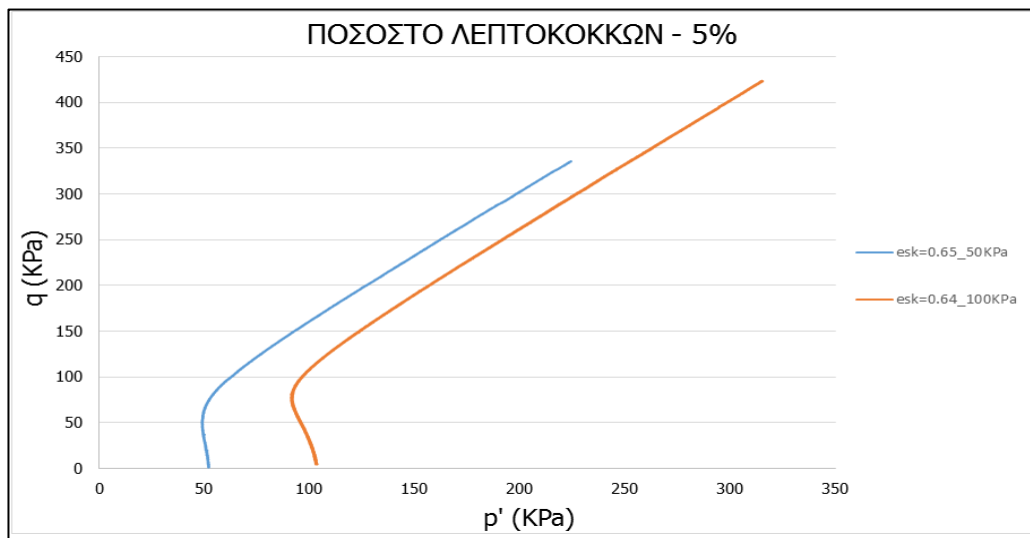
Σε όμοια συμπεράσματα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία οι Παπαδόπουλος και Πολυδώρου (2015) όπως φαίνεται από τα Σχήματα 3.92-3.95.



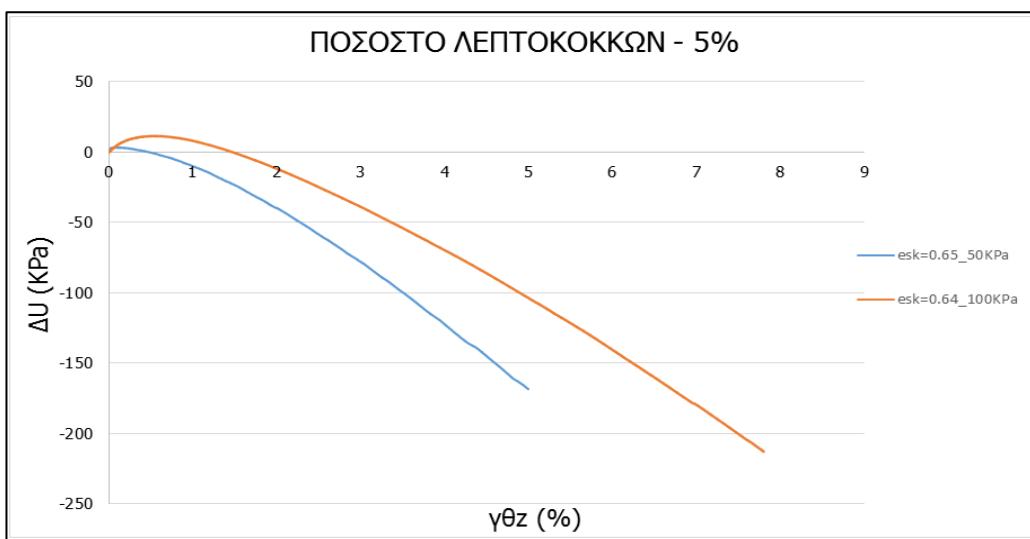
Σχήμα 3.92 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση χαλαρών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 5%



Σχήμα 3.93 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος ( $\Delta u$ ) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ( $\gamma_{\theta z}$ ) χαλαρών δοκιμίων μίγματος άμμου –ιλύος 5%



Σχήμα 3.94 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση πικνών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 5%

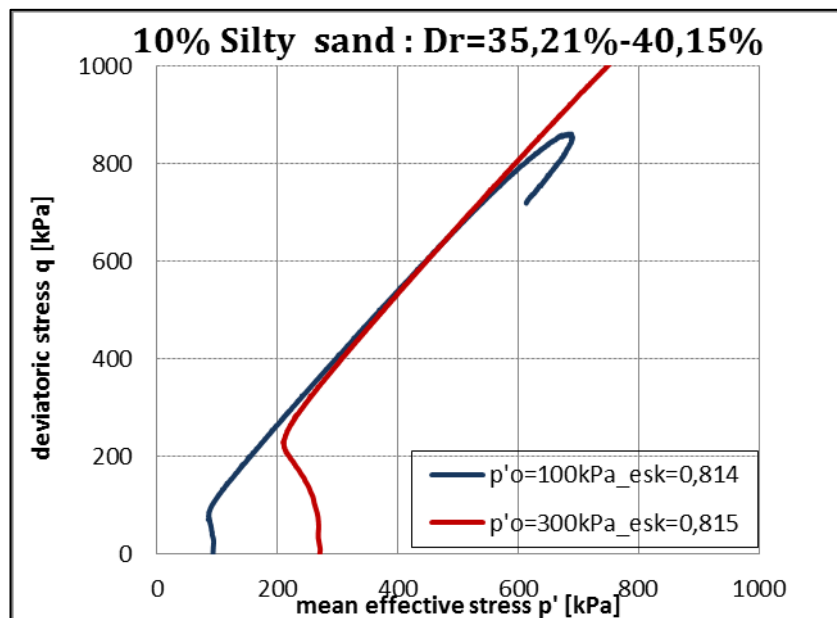


Σχήμα 3.95 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος ( $\Delta u$ ) σε συνάρτηση με την διαμητική παραμόρφωση ( $\gamma_{\theta z}$ ) πικνών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 5%

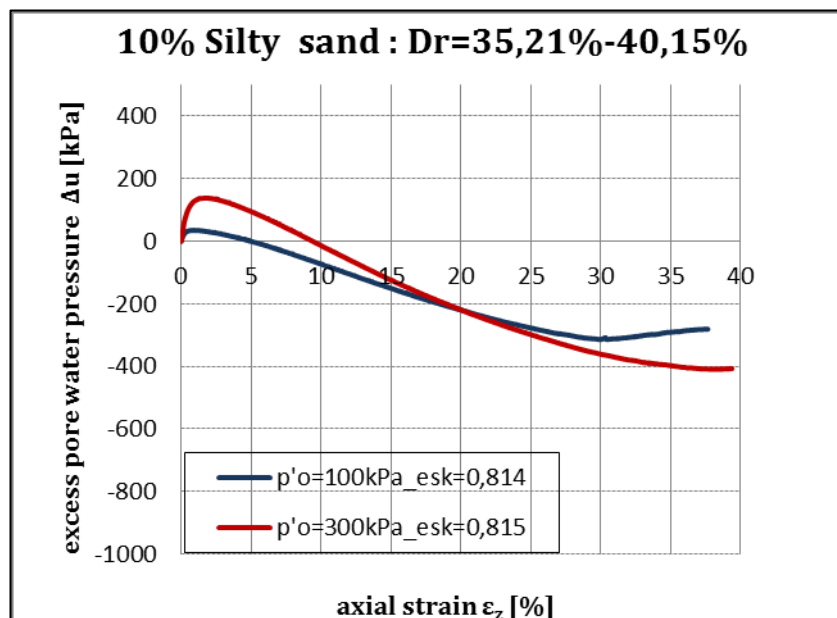
## 3.3.5.3 Ιλυώδης Άμμος – Ποσοστό Λεπτόκοκκων 10%

Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.96 και 3.97 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,814$  και  $e_{sk}=0,815$ ).



Σχήμα 3.96 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια αμμοιλύος 10%

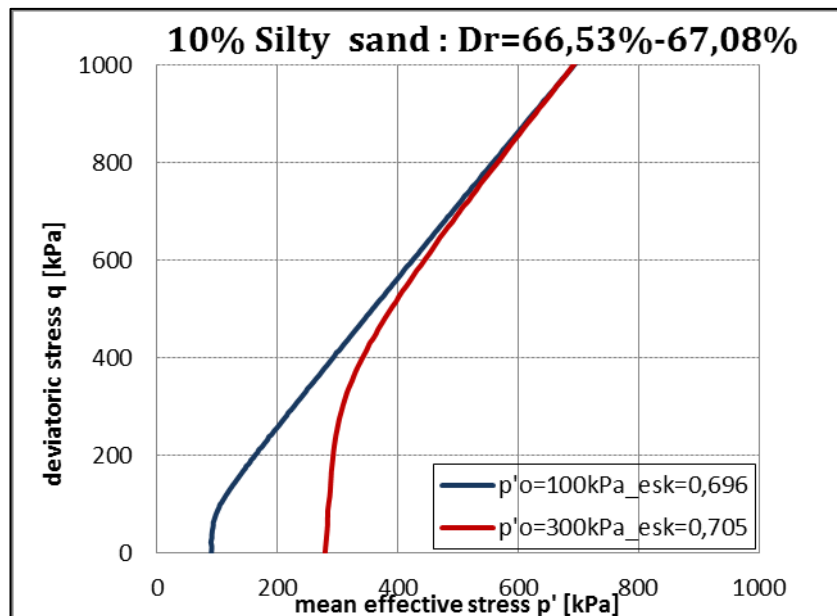


Σχήμα 3.97 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια αμμοιλύος 10%

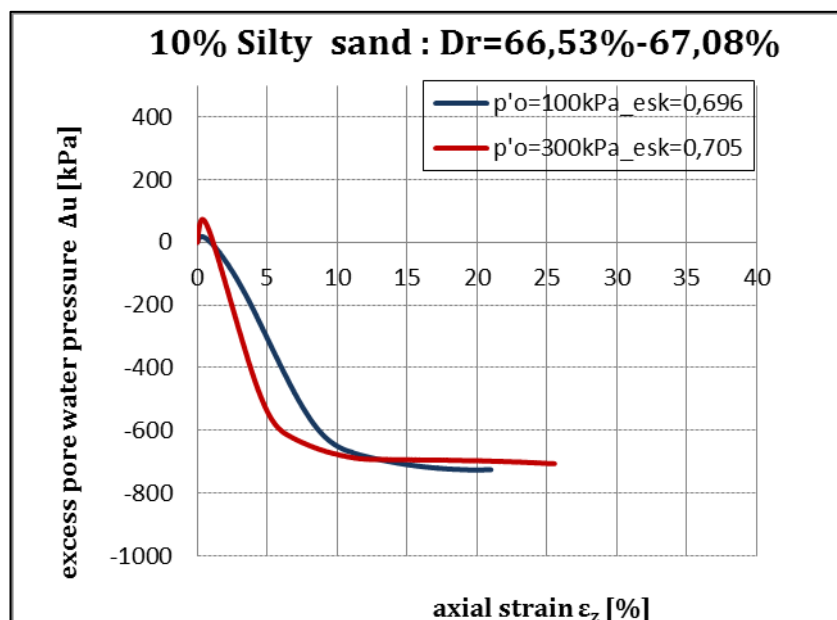


### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 3.98 και 3.99 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,671$  και  $e_{sk}=0,685$ ).



Σχήμα 3.98 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια αμμοιλύος 10%



Σχήμα 3.99 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια αμμοιλύος 10%

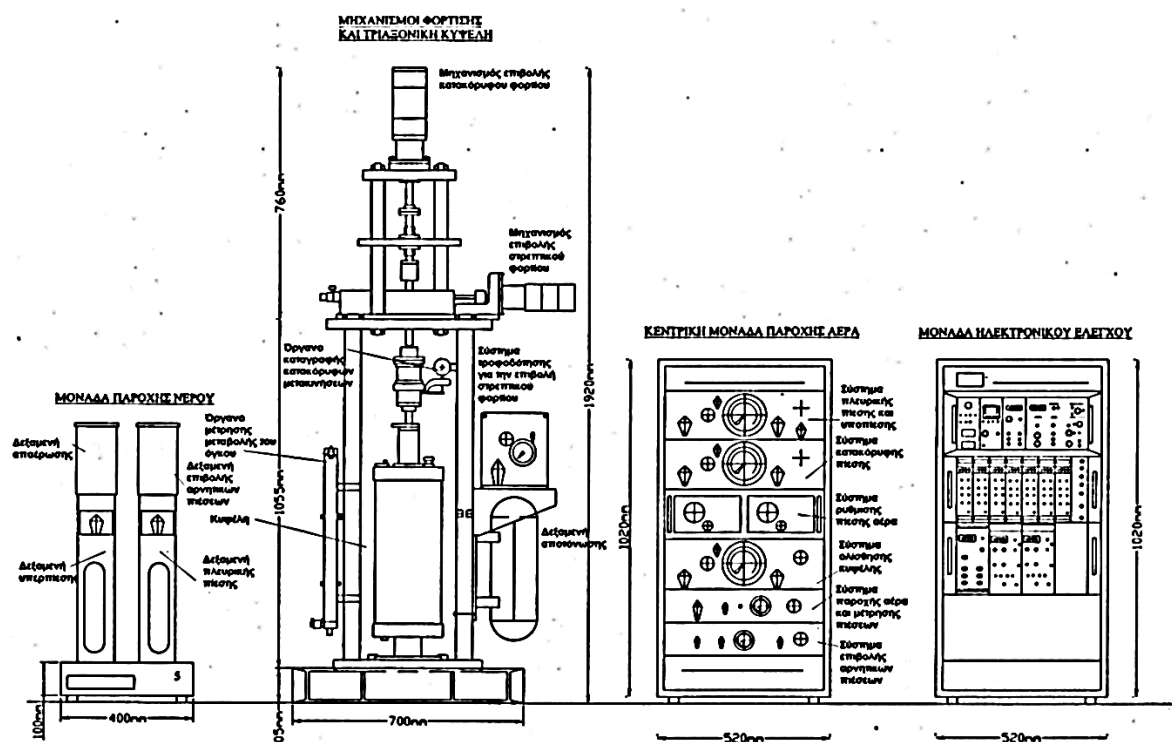
Και στα μέσης πυκνότητας και στα χαλαρά δοκίμια της κατηγορίας “Ιλυώδης άμμος-Ποσοστό Λεπτόκοκκων 10%” η συμπεριφορά των δοκιμίων είναι παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε στα δοκίμια της καθαρής και ιλιώδους άμμου με ποσοστό ιλύος 5%,, με τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 100kPa να εμφανίζουν πιο διαστολική συμπεριφορά.

# B4

## Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου

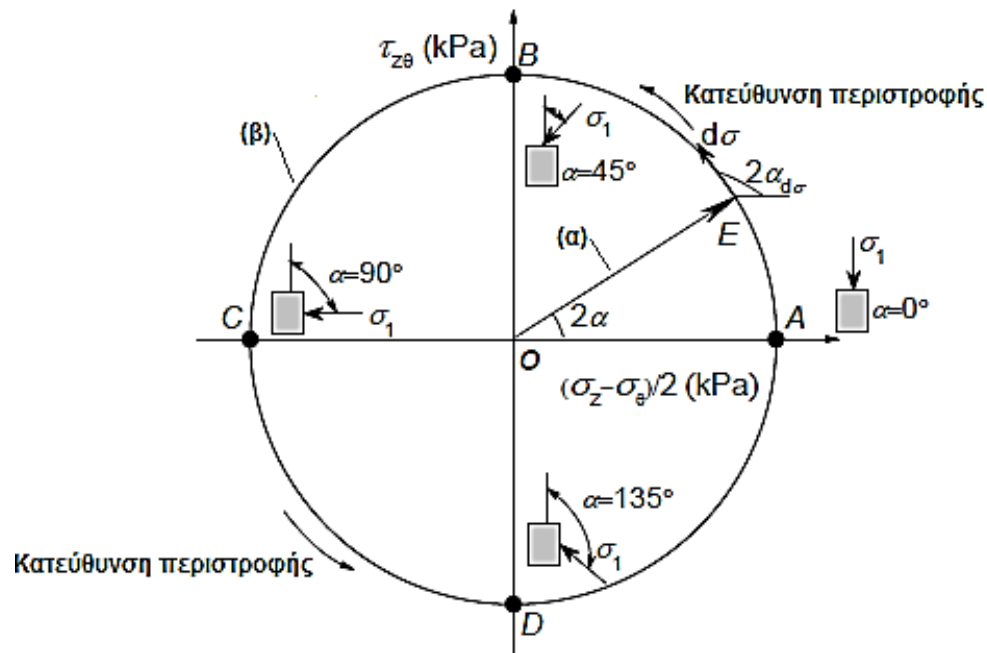
### 4.1 Σύντομη περιγραφή συσκευής

Μέσω της συσκευής στρέψης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder torsional test) μπορούν να επιβληθούν γενικευμένες καταστάσεις φόρτισης στο δοκίμιο ώστε να προβλεφθεί με ακρίβεια η συμπεριφοράς του εδαφικού στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα, στην τριαξονική δοκιμή οι διευθύνσεις των κύριων επιπέδων (κατακόρυφο και οριζόντιο) είναι πάντα σταθερές σε σχέση με τον άξονα του δοκιμίου (συμπίεση:  $\alpha=0^\circ$ , εφελκυσμός:  $\alpha=90^\circ$ ) ενώ στη συσκευή στρέψης οι διευθύνσεις των κύριων επιπέδων μπορούν να είναι και σε άλλα επίπεδα καθώς και να αλλάζουν διεύθυνση κατά τη διάρκεια της δοκιμής για βέλτιστη προσομοίωση γενικευμένων καταστάσεων στη φύση.



Σχήμα 4.1 Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης Κοίλου Δοκιμίου

Τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα στη φύση σχετίζονται με εντατικές καταστάσεις και φορτίσεις σύνθετες, με αλλαγές στο μέγεθος και στη διεύθυνση των κύριων τάσεων. Συνεπώς υπερτερεί η χρήση της συσκευής στρέψης κοίλου δοκιμίου έναντι της τριαξονικής για τη προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδαφικού στοιχείου διότι έχει τη δυνατότητα να επιβάλλει τις σύνθετες καταστάσεις φόρτισης που απαντώνται στο πεδίο.



Σχήμα 4.2 Ένδειξη διαδρομών τάσεων (α) για σειρά δοκιμών με περιστροφή των κύριων τάσεων (β) με σταθερή τη κατεύθυνση των κύριων τάσεων

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή στρέπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου ήταν αποκλειστικά μονοτονικές δοκιμές με μέθοδο παρασκευής δοκιμών την “εμβάπτιση στο νερό” σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνουν οι Bishop and Henkel (1957) και εκτελέστηκαν από τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Π. Τριαντάφυλλο.

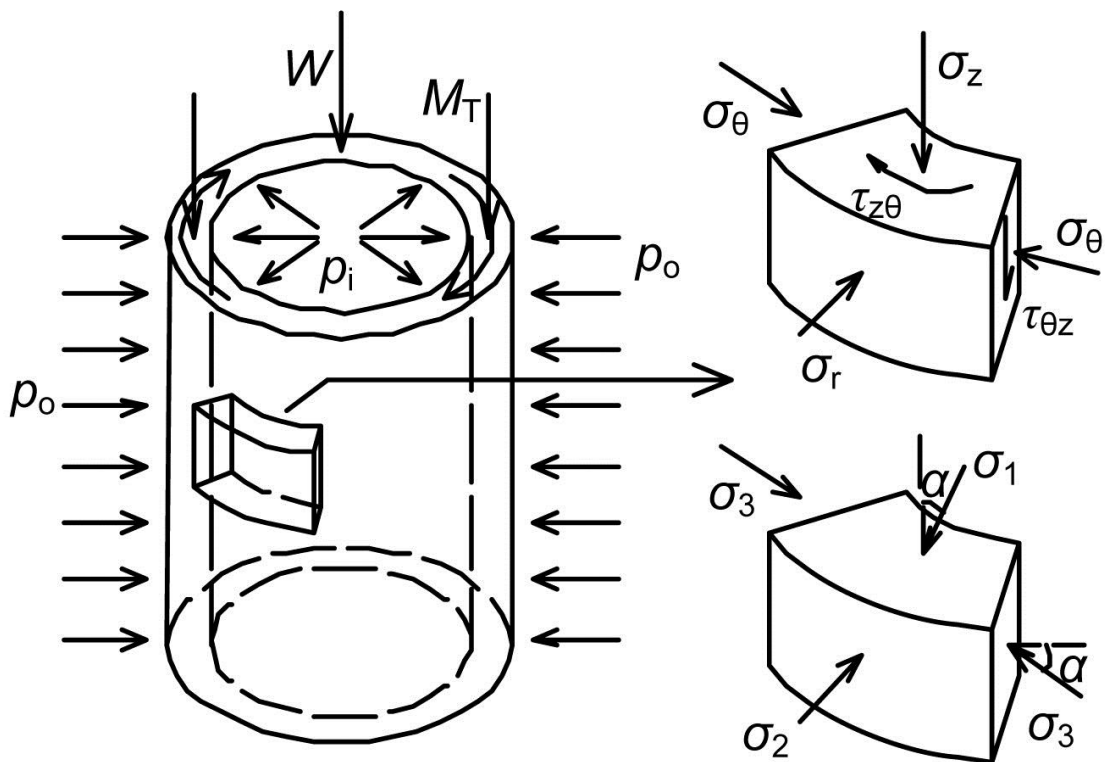
## 4.2 Βασικές σχέσεις που διέπουν την στρεπτική διάτμηση

Κατά τη δοκιμή στρέψης κοίλου δοκιμίου, ασκείται σταθερή πίεση εσωτερικά ( $p_i$ ) και εξωτερικά ( $p_o$ ) του δοκιμίου με αποτέλεσμα η γωνία  $\alpha$  να αντιπροσωπεύει την κλίση της μέγιστης κύριας τάσης  $\sigma_1$  ως προς την κατακόρυφο και να συνδέεται με την παράμετρο  $b$ . Η παράμετρος  $b$  είναι το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$ , σύμφωνα με τη σχέση :

$$b = \sin^2 \alpha = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad [-]$$

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι πιέσεις και οι δυνάμεις που ασκούνται στο κοίλο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ενδεικτικά τα μεγέθη που παρουσιάζονται είναι :

$W$  = Δύναμη Πιστονιού ,  $M_T$  = Ροπή Στρέψης,  $P_o$  = πίεση στα εξωτερικά τοιχώματα ,  $P_i$  = πίεση στα εσωτερικά τοιχώματα,  $R_o$  = εξωτερική διάμετρος δοκιμίου,  $R_i$  = εσωτερική διάμετρος δοκιμίου,  $\sigma_1$  = μέγιστη κύρια τάση,  $\sigma_3$ =ελάχιστη κύρια τάση,  $\sigma_2$ = ενδιάμεση κύρια τάση,  $\sigma_z$  = τάση κάθετη στο επίπεδο  $zz$  και όμοια οι υπόλοιπες τάσεις.



Σχήμα 4.3 Εντατική κατάσταση δοκιμίου στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης ( HCT )

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, πέραν του αξονικού φορτίου και της πλευρικής πίεσης, εφαρμόζεται και μία στρεπτική ροπή  $M_T$ . Η στρεπτική αυτή ροπή αναπτύσσει διατμητικές τάσεις σε οριζόντια επίπεδα, ενώ διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται και σε κατακόρυφα επίπεδα λόγω συνοριακών συνθηκών. Το σχήμα του δοκιμίου και η περιμετρική διεύθυνση της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης εξασφαλίζουν συνθήκες καθαρής στρεπτικής διάτμησης και επιτρέπουν την ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων.

Αναφορικά με το σχήμα του δοκιμίου, κοίλα θεωρούνται τα δοκίμια κυλινδρικής μορφής με οπή στο κέντρο τους, για τα οποία ισχύει ότι το ύψος τους είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο από την εξωτερική τους διάμετρο. Αυτό απαιτείται ώστε να μην επηρεάζεται η κατανομή των τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου από τα άκαμπτα όριά του. Επίσης, το πάχος του τοιχώματος του δοκιμίου πρέπει να είναι μικρότερο από την εσωτερική του διάμετρο.

Στην περίπτωση που έχω ίδια πίεση εσωτερικά και εξωτερικά από το δοκίμιο δηλαδή  $p_0=p_i$

Ακτινική Τάση, τάση στο επίπεδο  $rr$ ,  $\sigma_r$ :

$$\sigma'_r = p'_0 = p'_i \quad [\text{kPa}]$$

Τάση στο επίπεδο  $\theta\theta$ ,  $\sigma_\theta$ :

$$\sigma'_\theta = \sigma'_r = p'_0 = p'_i \quad [\text{kPa}]$$

Αξονική Τάση, τάση στο επίπεδο  $zz$ ,  $\sigma_z$ :

$$\sigma'_z = \frac{F_z}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} + p'_0 \quad [\text{kPa}]$$

Η ενδιάμεση κύρια τάση  $\sigma_2$  είναι ίση με την ακτινική τάση  $\sigma_r$  ενώ το μέγεθος και η διεύθυνση της μεγάλης και της μικρής κύριας τάσης ( $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  αντίστοιχα) καθορίζονται από το μέγεθος των διατμητικών ( $\tau_{\theta z}$ ), των αξονικών ( $\sigma_z$ ) και των παραμετρικών ( $\sigma_\theta$ ) τάσεων. Η διεύθυνση των κύριων τάσεων  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  μπορεί να μεταβάλλεται ή να διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Οι τάσεις  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  είναι κύριες (δηλαδή η  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  αντίστοιχα) μόνο αν  $\tau_{\theta z} = 0$  και αυτό αποδεικνύεται και από τις σχέσεις των κύριων εκάστωτε κύριων τάσεων αν θέσω  $\tau_{\theta z} = 0$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πειράματα που διεξήχθησαν για το σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας η διεύθυνσή τους διατηρείται σταθερή. Η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  είναι σε γωνία  $\alpha=45^\circ$  από την κατακόρυφο (αρχικά  $\alpha=0^\circ$  και αυξάνει ραγδαία έως  $\alpha=45^\circ$  που διατηρείται σταθερή έως το πέρας του πειράματος). Ως γνωστόν, η ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$  είναι κάθετη στη  $\sigma_1$  και αυτές οι διευθύνσεις διατηρούνται σταθερές έως το πέρας του κάθε πειράματος.

Μέγιστη Κύρια Τάση,  $\sigma_1$ :

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma'_z + \sigma'_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma'_z - \sigma'_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad [\text{kPa}]$$

Ενδιάμεση Κύρια Τάση,  $\sigma_2$ :

$$\sigma'_2 = \sigma'_r = \sigma'_\theta \quad [\text{kPa}]$$

Ελάχιστη Κύρια Τάση,  $\sigma_3$ :

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma'_z + \sigma'_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma'_z - \sigma'_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad [\text{kPa}]$$

Οι τάσεις που ασκούνται στο δοκίμιο εύκολα αποδεικνύεται ότι μπορούν να βρεθούν και από τις παρακάτω σχέσεις λαμβάνοντας υπόψιν ότι το εμβαδόν του κοίλου δοκιμίου συμβολίζεται με  $A$  και ορίζεται ως :

$$A = \pi(r_0^2 - r_i^2) \quad [\text{m}^2]$$

Ακτινική Τάση, τάση στο επίπεδο  $rr$ ,  $\sigma_r$ :

$$\sigma_r' = \frac{p'_0 r_0 + p'_i r_i}{r_0 + r_i} \quad [\text{kPa}]$$

Τάση στο επίπεδο  $\theta\theta$ ,  $\sigma_\theta$ :

$$\sigma'_\theta = \frac{p'_0 r_0 - p'_i r_i}{r_0 - r_i} \quad [\text{kPa}]$$

Αξονική Τάση, τάση στο επίπεδο  $zz$ ,  $\sigma_z$ :

$$\sigma'_z = \frac{F_{z+\pi r_0^2 p'_0 - \pi r_i^2 p'_i}}{A} \quad [\text{kPa}]$$

Όσον αφορά τις διαμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο δοκίμιο, η εσωτερική πίεση  $p_i$  και η εξωτερική πίεση  $p_0$  ασκούνται μέσω εύκαμπτων μεμβράνων με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται διαμητικές τάσεις σε ακτινικά ή περιμετρικά επίπεδα. Άρα :

Διαμητική τάση στο επίπεδο  $\theta\theta$ ,  $\sigma_{zr}$  και στο επίπεδο  $zz$ ,  $\sigma_{r\theta}$ :

$$\tau_{zr} = \tau_{r\theta} = 0 \quad [\text{kPa}]$$

Διαμητική τάση στο επίπεδο  $rr$ ,  $\sigma_{z\theta}$ :

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)} \quad [\text{kPa}]$$

Οι παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής στρέψης κοίλου δοκιμίου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

Παραμόρφωση στο επίπεδο που ασκείται η κύρια τάση  $\sigma_1$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \quad [\%]$$

Παραμόρφωση στο επίπεδο που ασκείται η ενδιάμεση τάση  $\sigma_2$ :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r \quad [\%]$$



Παραμόρφωση στο επίπεδο που ασκείται η κύρια τάση  $\sigma_3$ :

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

Όπου :

Παραμόρφωση στο κάθετο επίπεδο,  $\varepsilon_z$ :

$$\varepsilon_z = -\frac{\Delta H}{H} \quad [\%]$$

Παραμόρφωση στο οριζόντιο επίπεδο,  $\varepsilon_r$ :

$$\varepsilon_r = -\frac{u_0 - u_i}{r_0 - r_i} \quad [\%]$$

Παραμόρφωση στο επίπεδο  $\theta\theta$ ,  $\varepsilon_\theta$ :

$$\varepsilon_\theta = -\frac{u_0 + u_i}{r_0 + r_i} \quad [\%]$$

Γωνιακή παραμόρφωση,  $\gamma_{z\theta}$ :

$$\gamma_{z\theta} = \frac{2\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3H(r_0^2 - r_i^2)} \quad [\%]$$

Για την περιγραφή της εντατικής κατάστασης με όρους εδαφομηχανικής χρησιμοποιούμε τις εξής παραμέτρους:

Αποκλίνουσα Τάση,  $q$  (deviatoric stress) :

$$q = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma'_z - \sigma'_\theta}{2}\right)^2 - \tau_{z\theta}^2} \quad [\text{kPa}]$$

Μέση Ενεργός Τάση,  $p'$  (mean effective stress) :

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma'_z + \sigma'_r + \sigma'_\theta}{3} \quad [\text{kPa}]$$

Για να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις με τα αποτελέσματα της τριαξονικής συσκευής χρησιμοποιείται ο παρακάτω γενικευμένος τύπος για την αποκλίνουσα τάση :

$$q_{gen} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]}$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}[(\sigma'_z - p')^2 + (\sigma'_r - p')^2 + (\sigma'_\theta - p')^2 + 2\sigma_{\theta z}'^2]} \quad [\text{kPa}]$$

Όπου  $p' = -\frac{(\sigma'_z + \sigma'_r + \sigma'_\theta)}{3}$

Και  $\varepsilon_{gen} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad [\%]$

Τέλος οι εκφράσεις των παραμέτρων των τάσεων βάσει του κύκλου του Mohr ( κορυφή κύκλου ) :

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad [\text{kPa}]$$

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad [\text{kPa}]$$

## 4.3 Διαγράμματα Συσκευής Στρέψης

### 4.3.1 Στοιχεία Δοκιμών Στρεπτικής Διάτμησης

Στον πίνακα 4.1 δίνονται συνοπτικά τα στοιχεία των πειραμάτων στρεπτικής διάτμησης που διεξήχθησαν στο εργαστήριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Όλες οι δοκιμές ήταν μονοτονικές με ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια και επικρατούσαν αστράγγιστες συνθήκες κατά τη φόρτιση (monotonic undrained torsional shear tests).

Τίτλος Πειράματος	Τάση Στερεοποίησης	Ποσοστό Λεπτόκοκκων	Αρχικός Δείκτης Πόρων	Τελικός Δείκτης Πόρων	Τελικός Δείκτης Πόρων Σκελετού	Σχετική Πυκνότητα	
	$P'_{initial}$ [kPa]	FC [%]	$e$ [-]	$e_{fin}$ [-]	$e_{sk\ final}$ [-]	$D_r$ [%]	
AU-25-1	25	0	0,724	0,724	0,72	26,83	
AU-25-2			0,68	0,68	0,671	42,85	
AU-50-1	50	0	0,72	0,72	0,717	27,78	
AU-50-2			0,667	0,667	0,667	44,41	
AU-100-1	100	0	0,725	0,725	0,725	24,96	
AU-100-2			0,681	0,681	0,681	39,68	
AU-100-3			0,674	0,674	0,674	42,10	
B5U-100-1		5	0,502	0,502	0,599	82,82	
B5U-100-2			0,647	0,647	0,754	34,22	
B5U-100-3			0,561	0,561	0,662	63,11	
B5U-100-4			0,492	0,492	0,589	85,91	
B10U-100-1		10	0,432	0,432	0,63	89,24	
B10U-100-2			0,649	0,649	0,877	17,03	
B15U-100-1			0,43	0,43	0,68	42,1	
B15U-100-2			0,46	0,46	0,724	33,6	
AU-200-1		200	0	0,714	0,714	0,714	28,68
AU-200-2				0,692	0,692	0,692	35,95
AU-300-1		300	0	0,726	0,726	0,726	24,55
AU-300-2				0,592	0,592	0,592	69,48
AU-300-3				0,663	0,663	0,663	45,56
AU-300-4	0,683			0,683	0,683	39,04	
AU-300-5	0,596			0,596	0,596	68,09	
AU-300-6	0,599			0,599	0,599	66,84	
AU-300-7	0,606			0,606	0,606	64,52	
B5U-300-1	5		0,49	0,490	0,586	86,7	
B5U-300-2			0,559	0,559	0,660	63,7	
B5U-300-3			0,662	0,662	0,770	29,3	
B5U-300-4			0,593	0,593	0,696	52,3	
B10U-300-1	10		0,427	0,427	0,625	90,92	
B10U-300-2			0,49	0,49	0,696	70,12	
B10U-300-3			0,538	0,538	0,751	53,88	
B10U-300-4			0,622	0,622	0,847	25,94	
B10U-300-5			0,568	0,568	0,785	43,86	

Πίνακας 4.1 Δεδομένα πειραμάτων που διεξήχθησαν στη Συσκευή Στρεπτικής Διάτμησης

### 4.3.2 Προσδιορισμός της γωνίας τριβής της άμμου M31

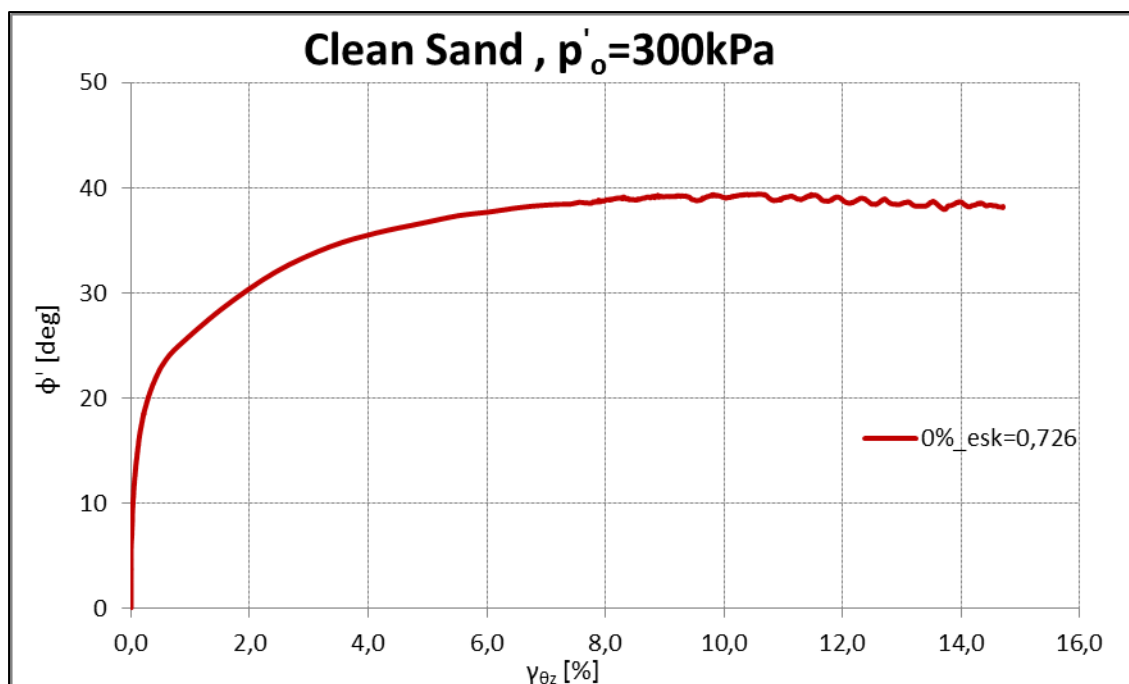
Η γωνία τριβής  $\varphi'$  δίνεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση :

$$\sin \varphi = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2} \leftrightarrow \varphi = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \leftrightarrow \varphi = \sin^{-1} \left( \frac{t}{s'} \right)$$

Ο τύπος αυτός προκύπτει από την περιβάλλουσα αστοχίας που δημιουργείται από τους κύκλους Mohr , όπου :

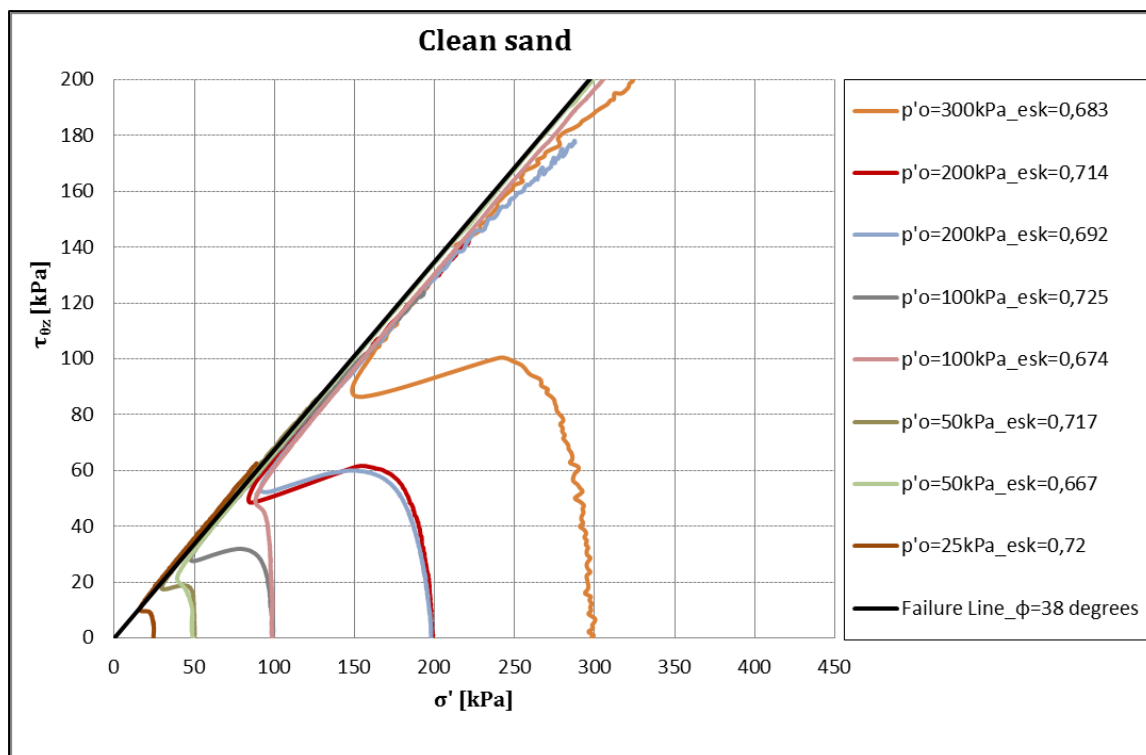
$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad , \quad s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad [\text{kPa}]$$

Για κάθε δοκίμιο καθαρής άμμου σχεδιάστηκαν οι καμπύλες γωνιακής παραμόρφωσης  $\gamma_{\theta z}$  (%) – γωνίας τριβής  $\varphi'$ . Όλα τα διαγράμματα ήταν της ίδιας μορφής έτσι ενδεικτικά παρατίθεται ένα από τα διαγράμματα στο Σχήμα 2.4 όπου παρουσιάζεται δοκίμιο καθαρής άμμου στερεοποιημένο στα 300kPa με  $e_{sk}=0.726$ . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 όσο αυξάνει η γωνιακή παραμόρφωση και πλησιάζει την αστοχία η γωνία  $\varphi'$  προσεγγίζει την γωνία διατμητικής αντοχής της καθαρής άμμου που είναι και το άνω όριο της καμπύλης αυτής. Στην ίδια γωνία κατέληγαν και τα υπόλοιπα πειράματα δηλαδή το ανώτατο όριο της καμπύλης ήταν  $\varphi'=38^\circ$ .



Σχήμα 4.4 Γωνιακή παραμόρφωση  $\gamma_{\theta z}$  [%] συναρτήσεως της γωνίας τριβής  $\varphi'$  [°]

Συνεπώς η γωνία διατμητικής αντοχής της καθαρής άμμου είναι  $38^\circ$ . Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων σε άξονες  $\tau_{\theta z}$ ,  $\sigma'$  των δοκιμών καθαρής άμμου διαφόρων πυκνοτήτων. Όπως παρατηρούμε όλα τα δοκίμια σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις τείνουν να προσεγγίσουν την περιβάλλουσα αστοχίας, γεγονός που επαληθεύει το πιο πάνω αποτέλεσμα, δηλαδή ότι η γωνία διατμητικής αντοχής είναι  $\phi'=38^\circ$  για το εύρος των πυκνοτήτων που εμφανίζονται (0.667-0.725).



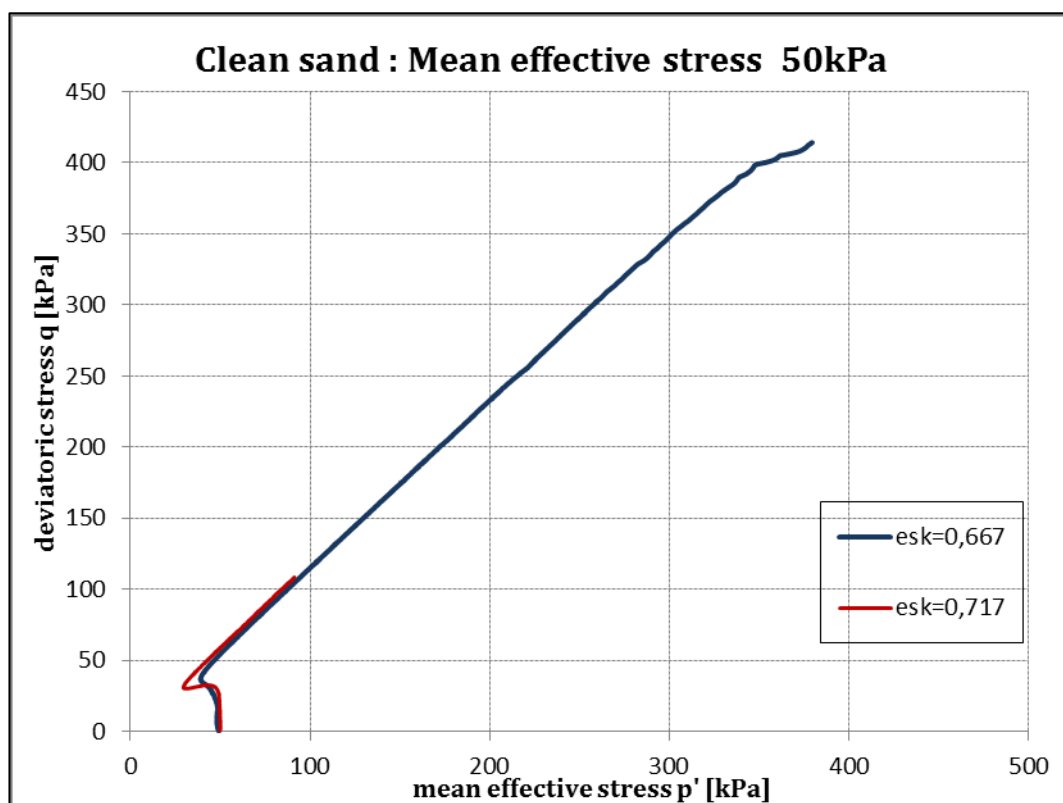
Σχήμα 4.5 Περιβάλλουσα αστοχίας πυκνών και χαλαρών δοκιμών καθαρής άμμου

### 4.3.3 Επίδραση Της Πυκνότητας

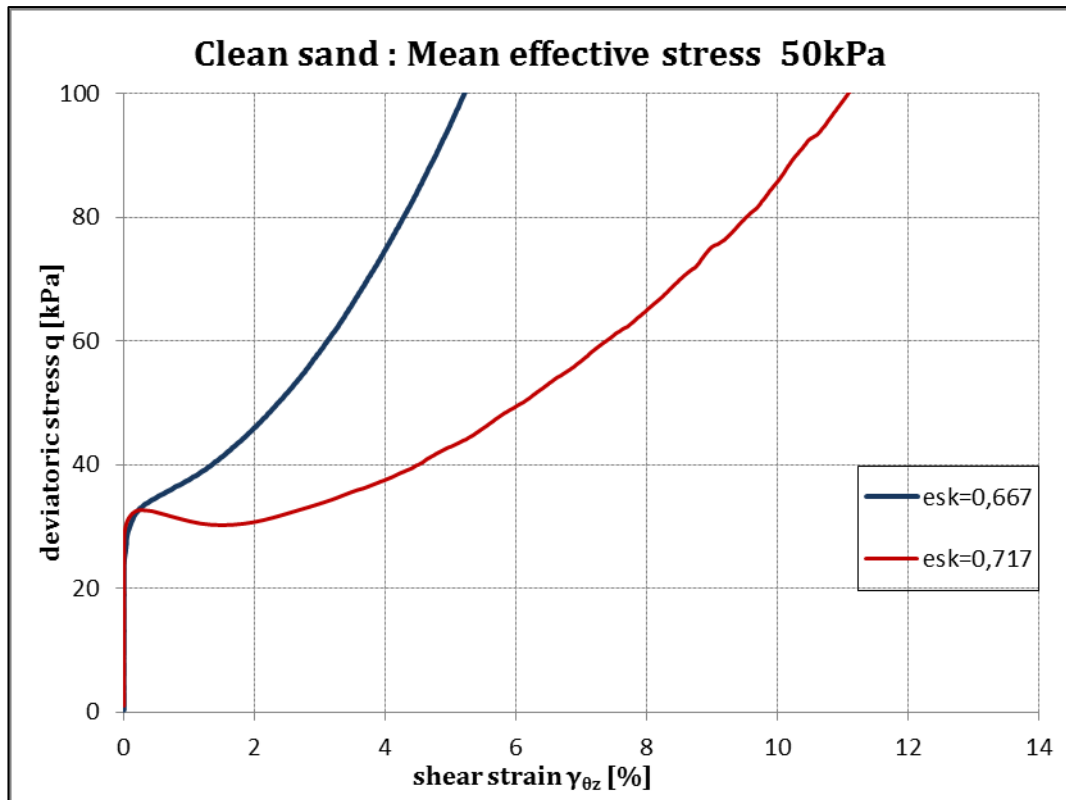
Παρακάτω παρουσιάζονται δεδομένα από τα πειράματα του Πίνακα 4.1 που βρίσκονται σε κοινή τάση στερεοποίησης  $\sigma'_o$  ή  $\sigma'_{initial}$  [kPa] και έχουν ίδιο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC [%] με σκοπό την διερεύνηση της θετικής ή αρνητικής επίδρασης της πυκνότητας του υλικού μέσω των διαφορετικών δεικτών πόρων σκελετού  $e_{sk}$ .

#### 4.3.3.1 Τάση Στερεοποίησης 50 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=0%

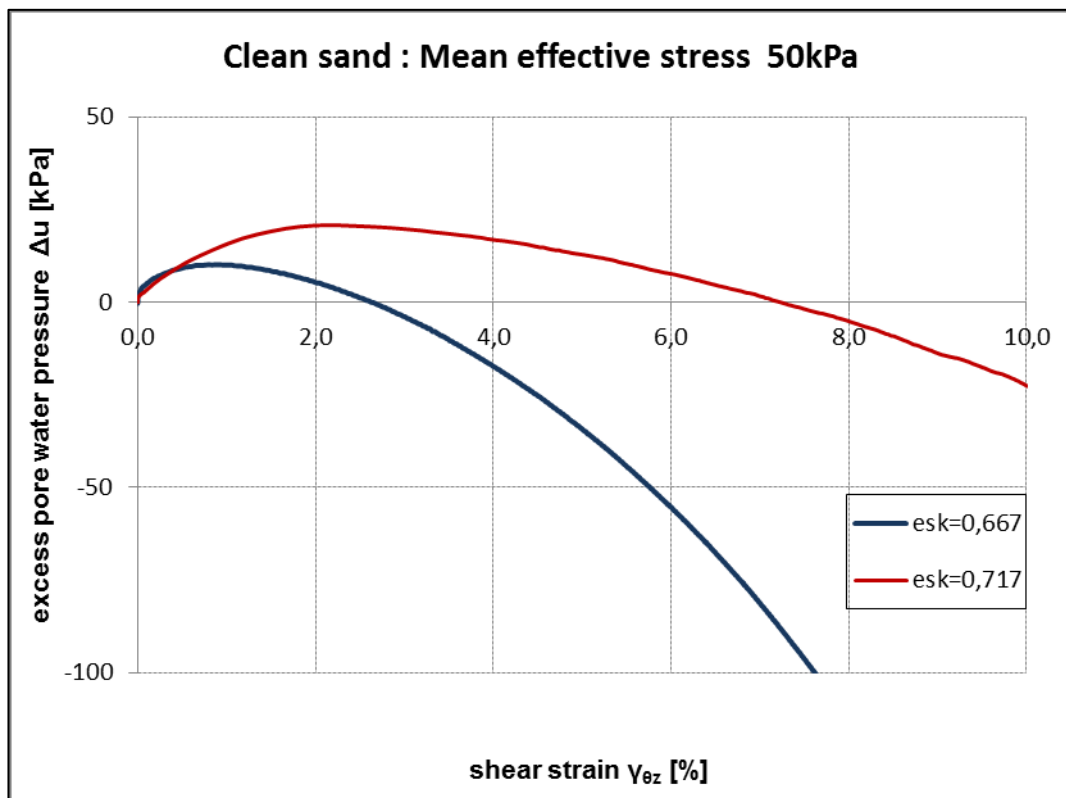
Στα Σχήματα 4.6 έως 4.8 παρουσιάζονται δοκίμια καθαρής άμμου που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 50kPa με μόνη διαφορά στη πυκνότητα τους ( πυκνό δοκίμιο με  $e_{sk}=0,667$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,717$ ).



Σχήμα 4.6 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa



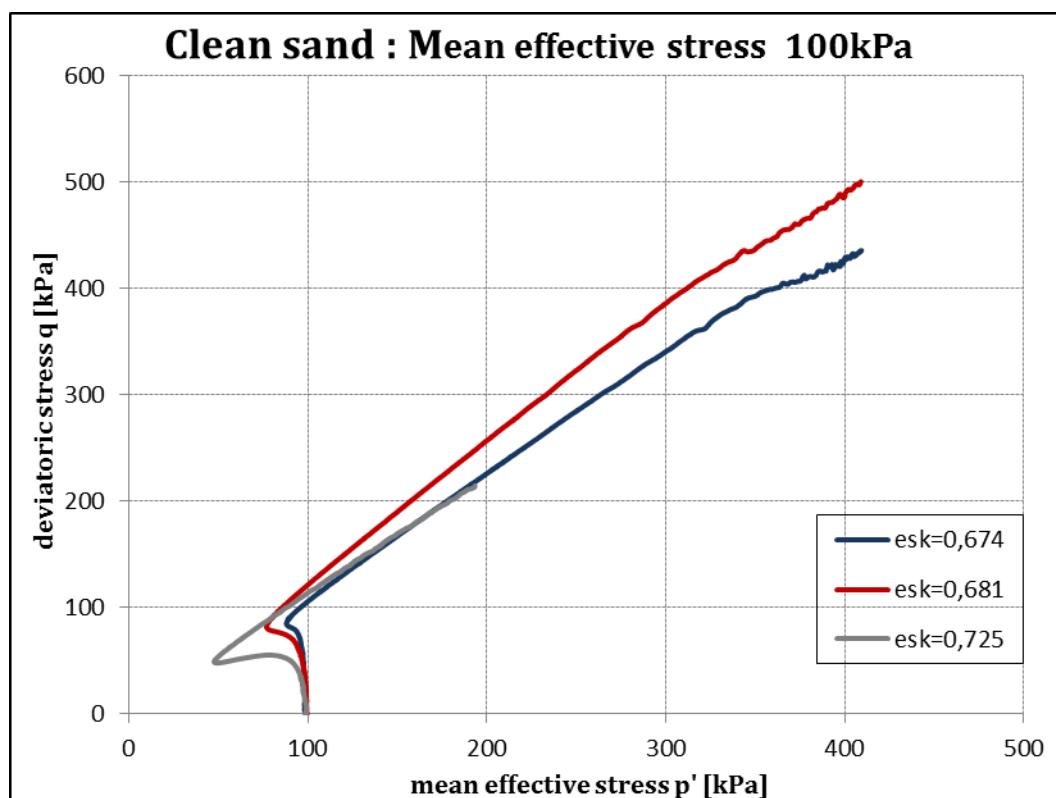
Σχήμα 4.7 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa



Σχήμα 4.8 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa

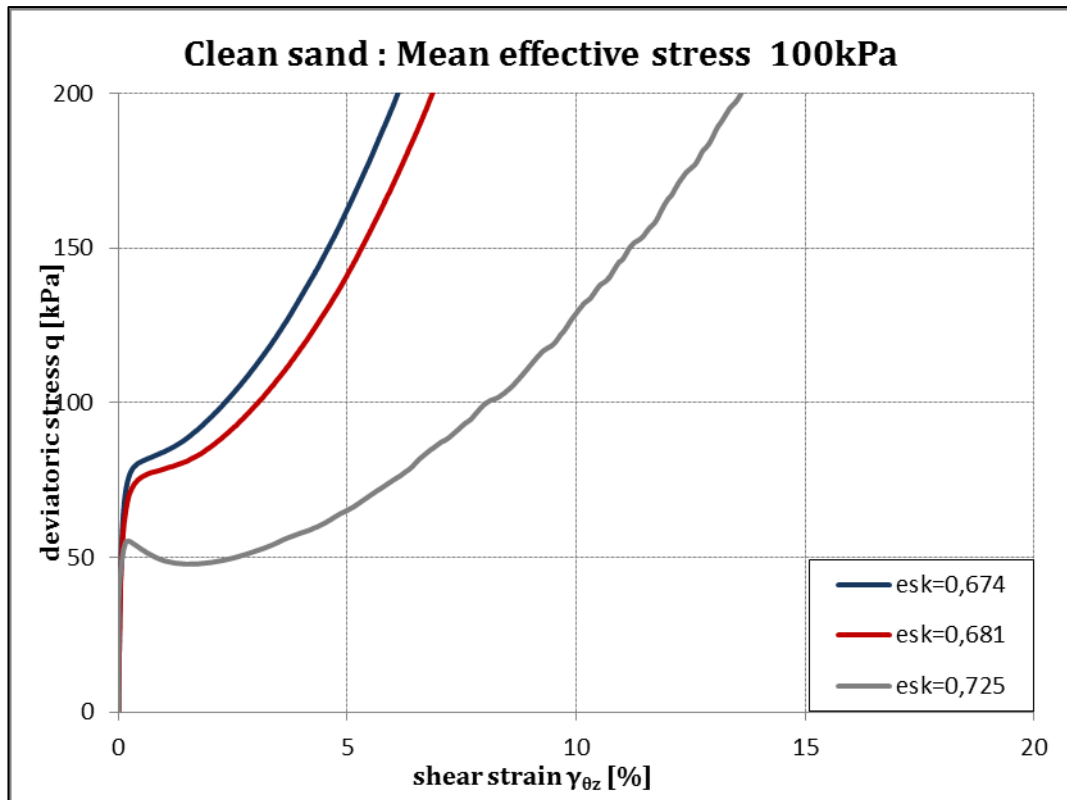
#### 4.3.3.2 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=0%

Στα Σχήματα 4.9 έως 4.11 παρουσιάζονται δοκίμια καθαρής άμμου που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa με μόνη διαφορά στη πυκνότητά τους ( πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,674$ , ενδιάμεσο με  $e_{sk}=0,681$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,725$ ).

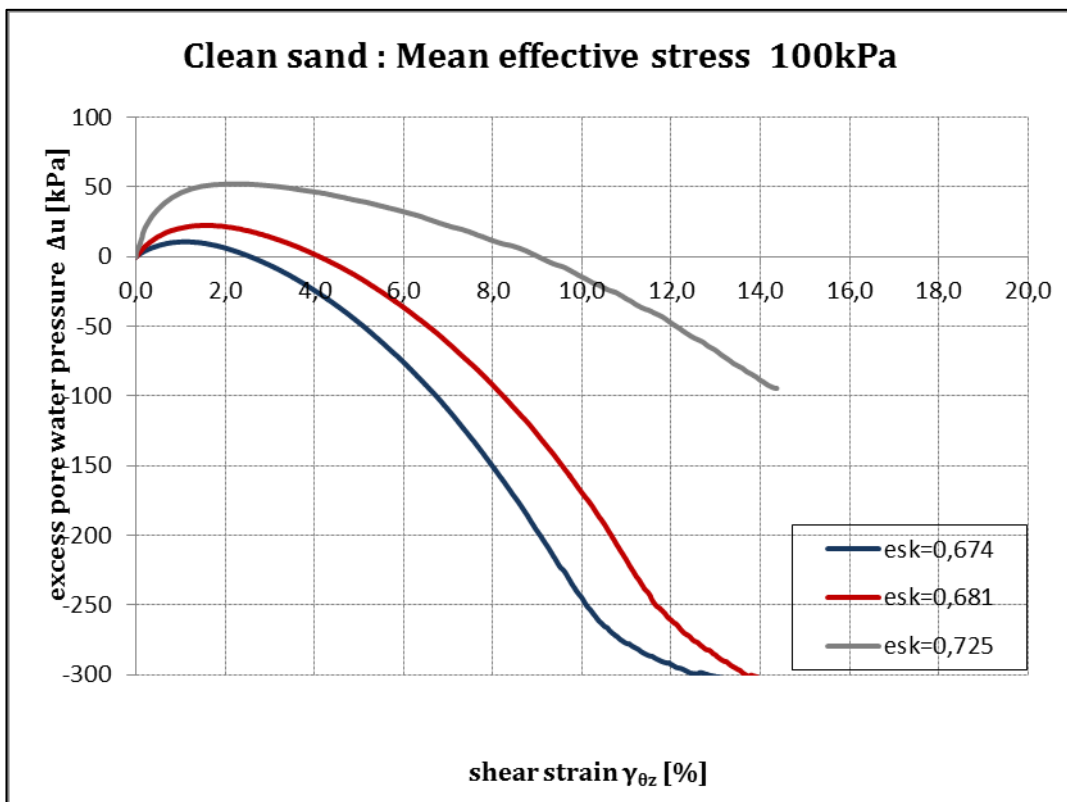


Σχήμα 4.9 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa





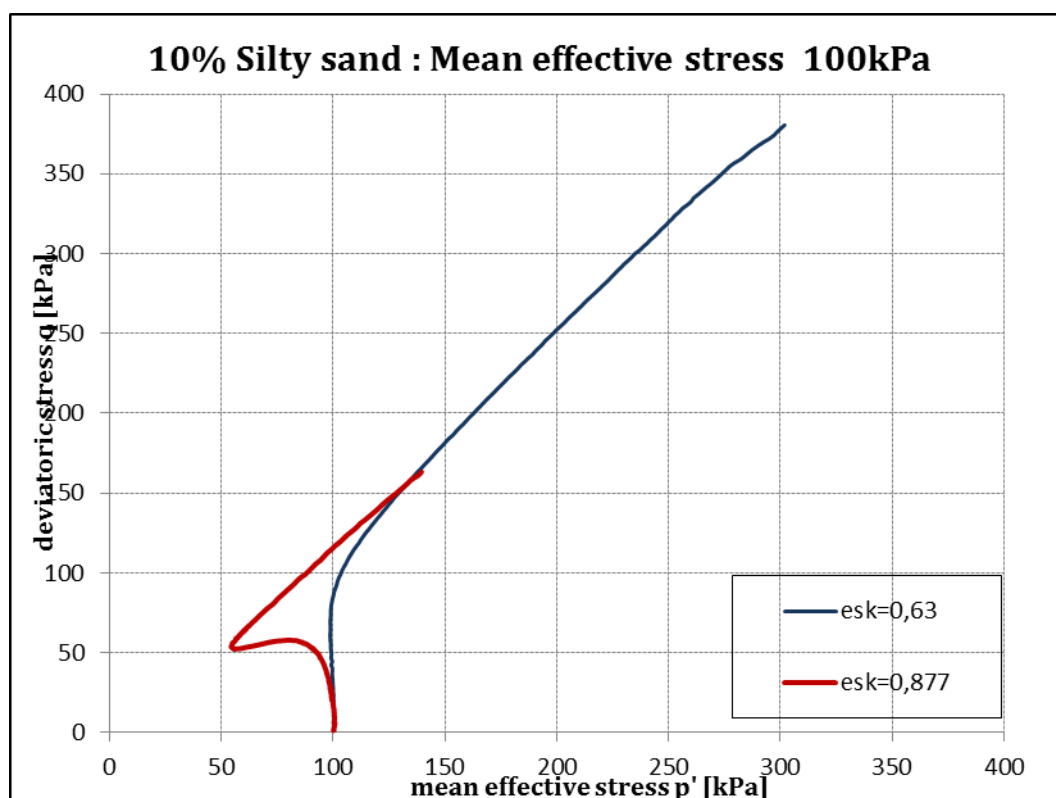
Σχήμα 4.10 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa



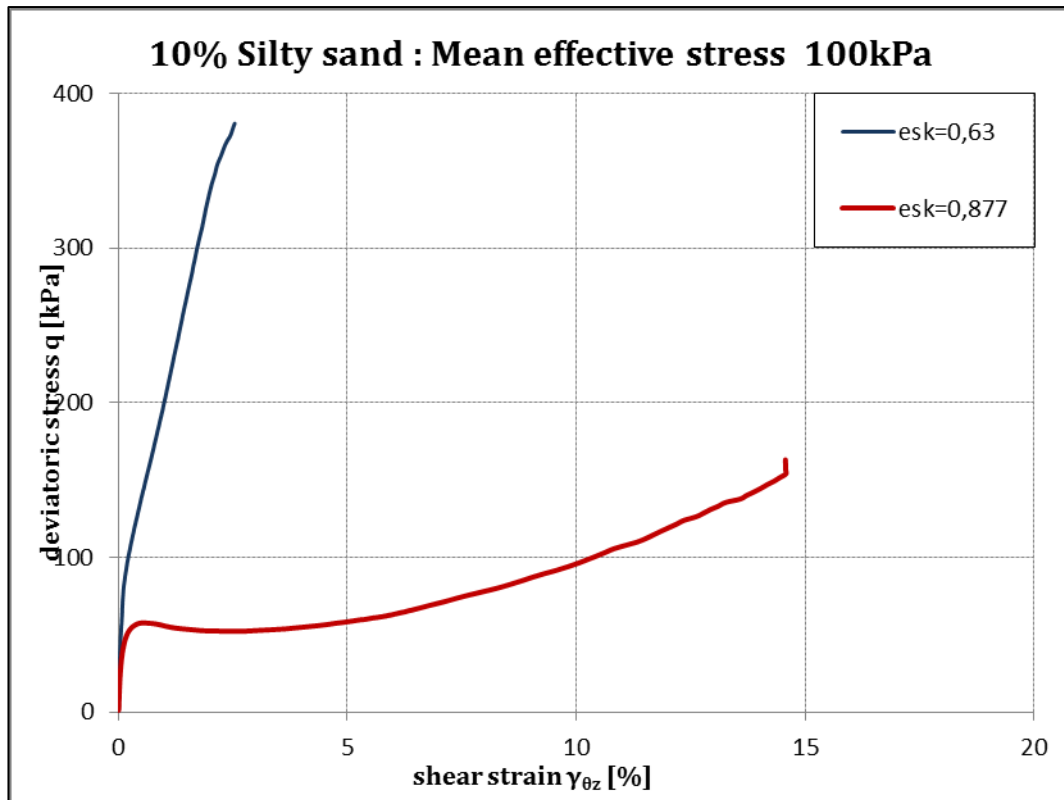
Σχήμα 4.11 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

### 4.3.3.3 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=10%

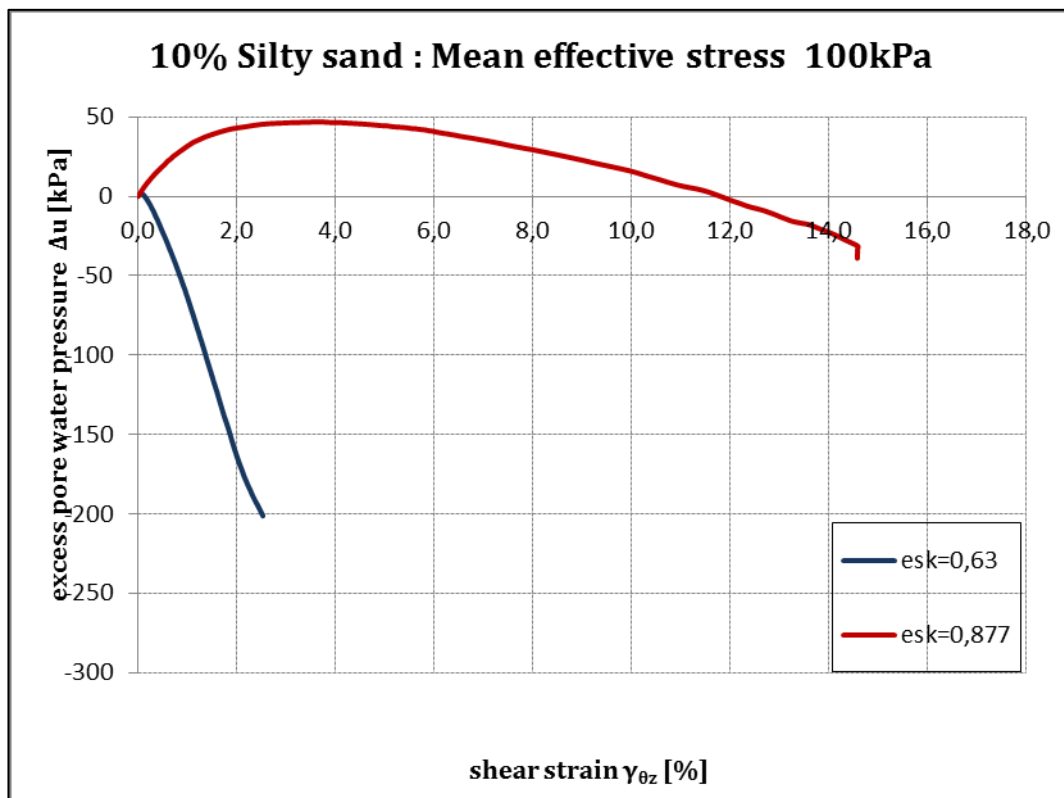
Στα Σχήματα 4.12 έως 4.14 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa με μόνη διαφορά στη πυκνότητα τους (πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,63$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}=0,877$ ).



Σχήμα 4.12 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 100kPa



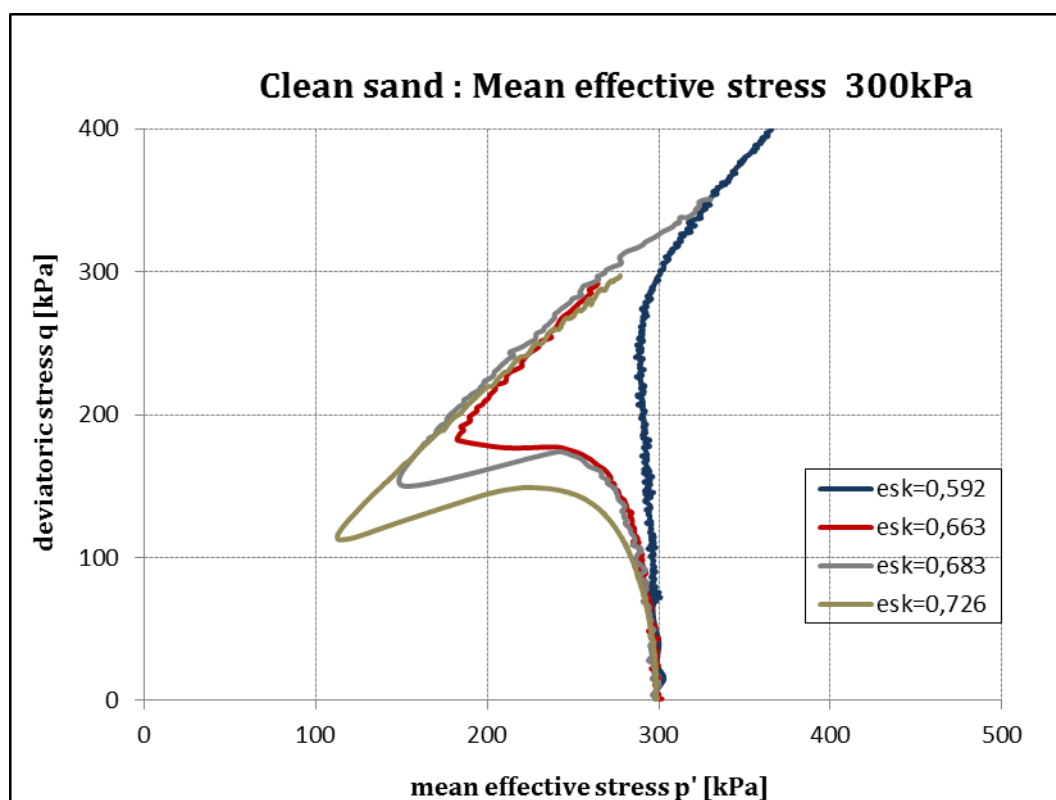
Σχήμα 4.13 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 100kPa



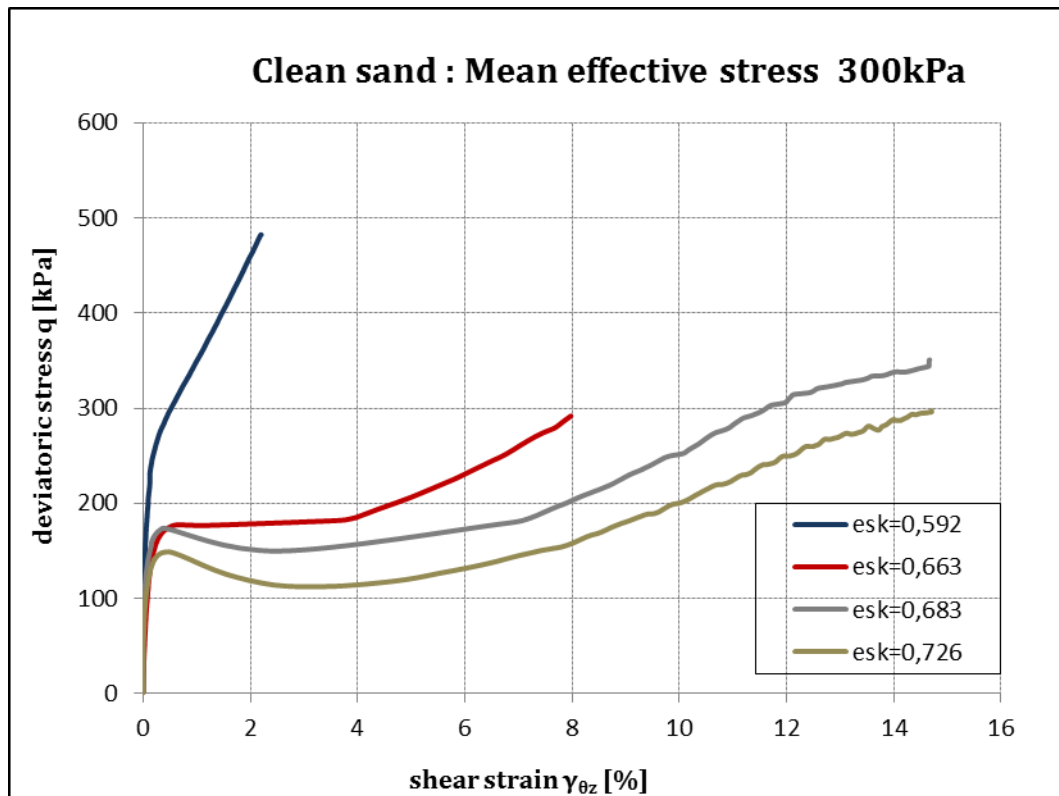
Σχήμα 4.14 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 100kPa

#### 4.3.3.4 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=0%

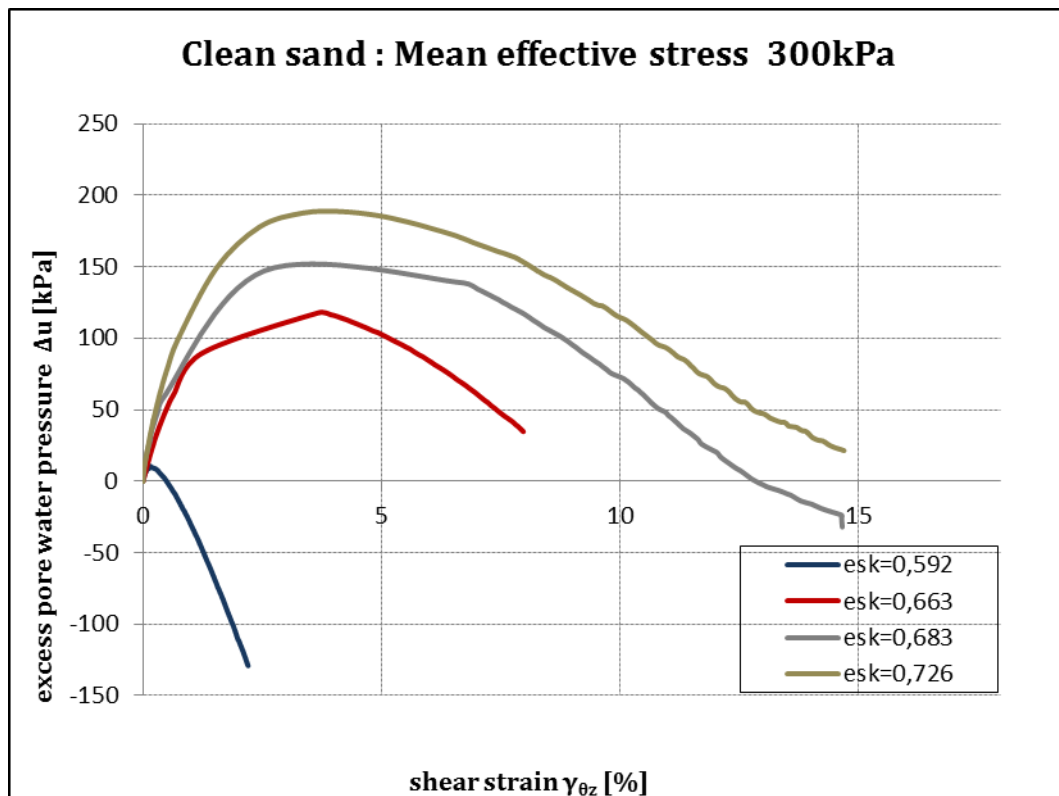
Στα Σχήματα 4.15 έως 4.17 παρουσιάζονται δοκίμια καθαρής άμμου που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με μόνη διαφορά στη πυκνότητα τους (πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,592$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}=0,726$ ).



Σχήμα 4.15 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa



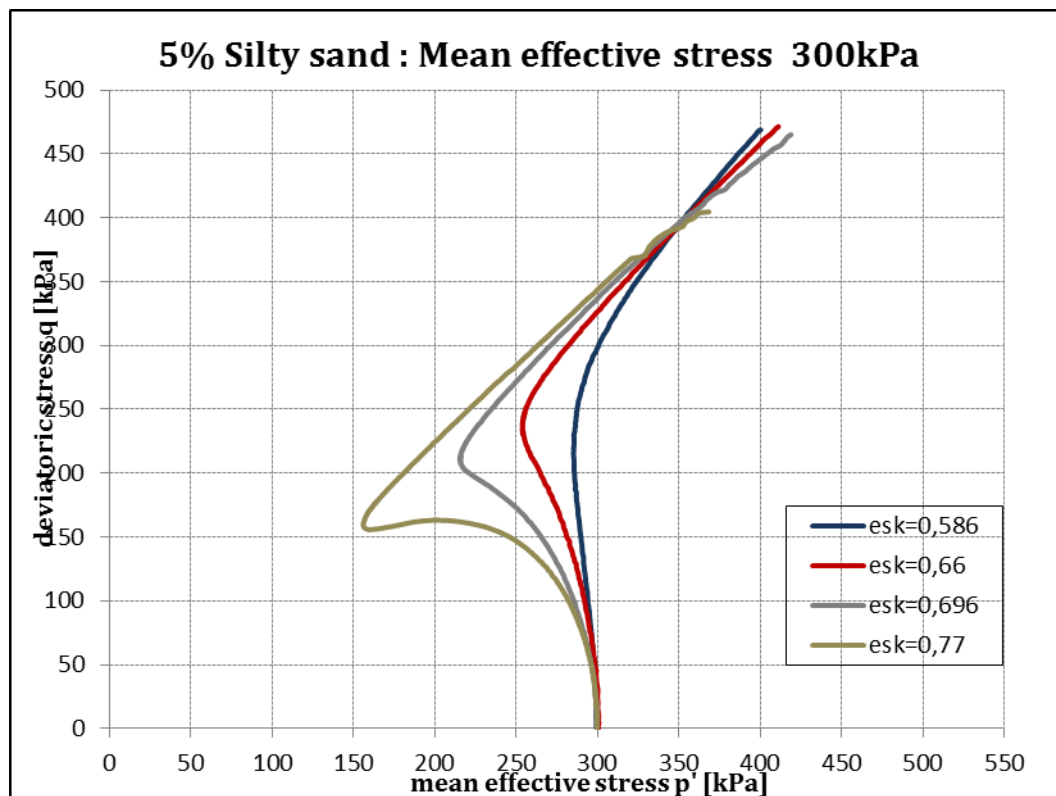
Σχήμα 4.16 Αποκλίνουσα τάση q συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa



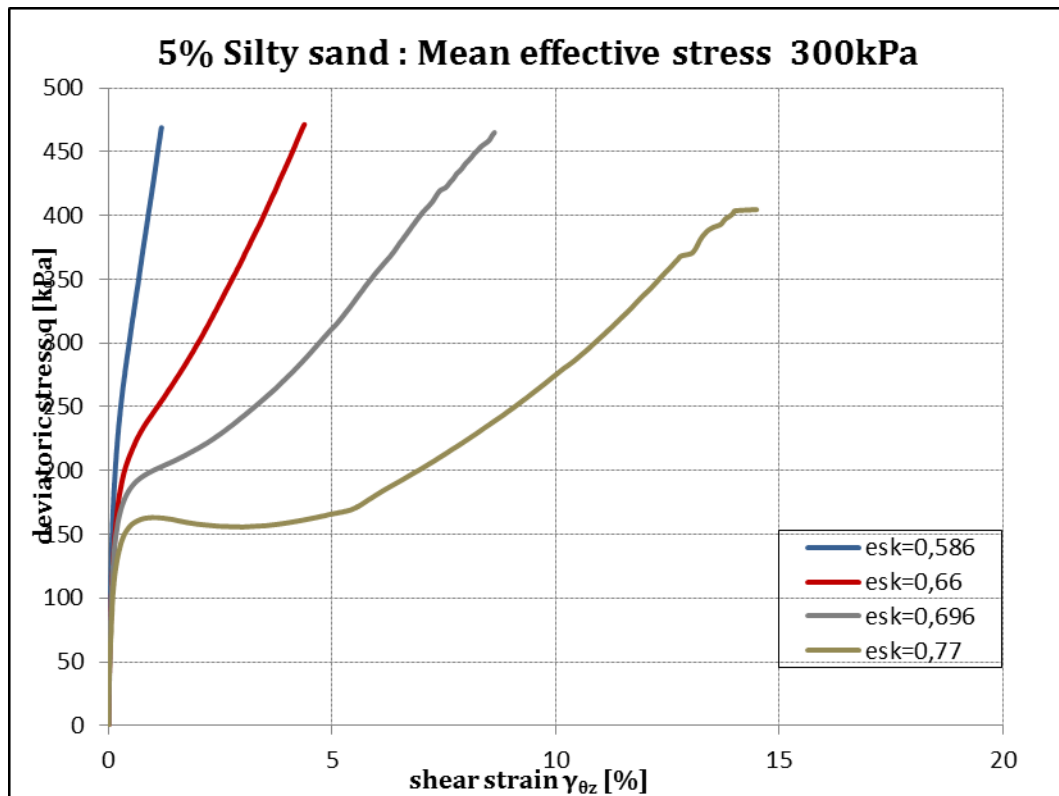
Σχήμα 4.17 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

#### 4.3.3.5 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=5%

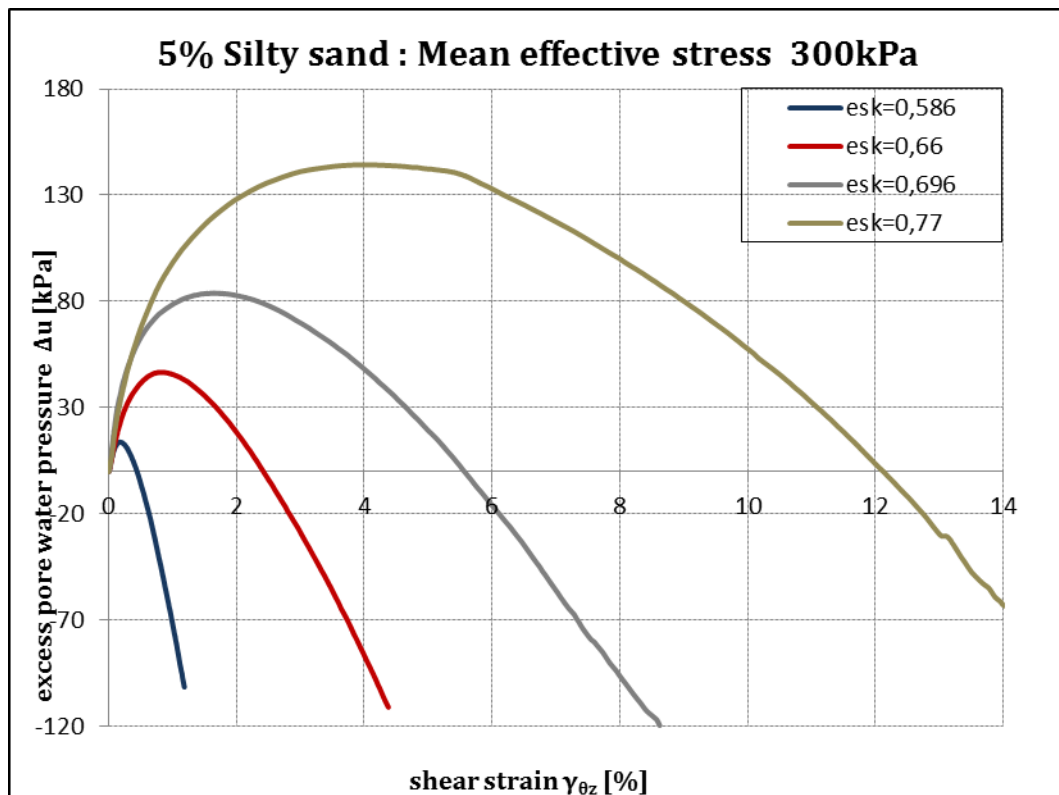
Στα Σχήματα 4.18 έως 4.20 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με μόνη διαφορά στη πυκνότητά τους (πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,586$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}=0,77$ ).



Σχήμα 4.18 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 300kPa



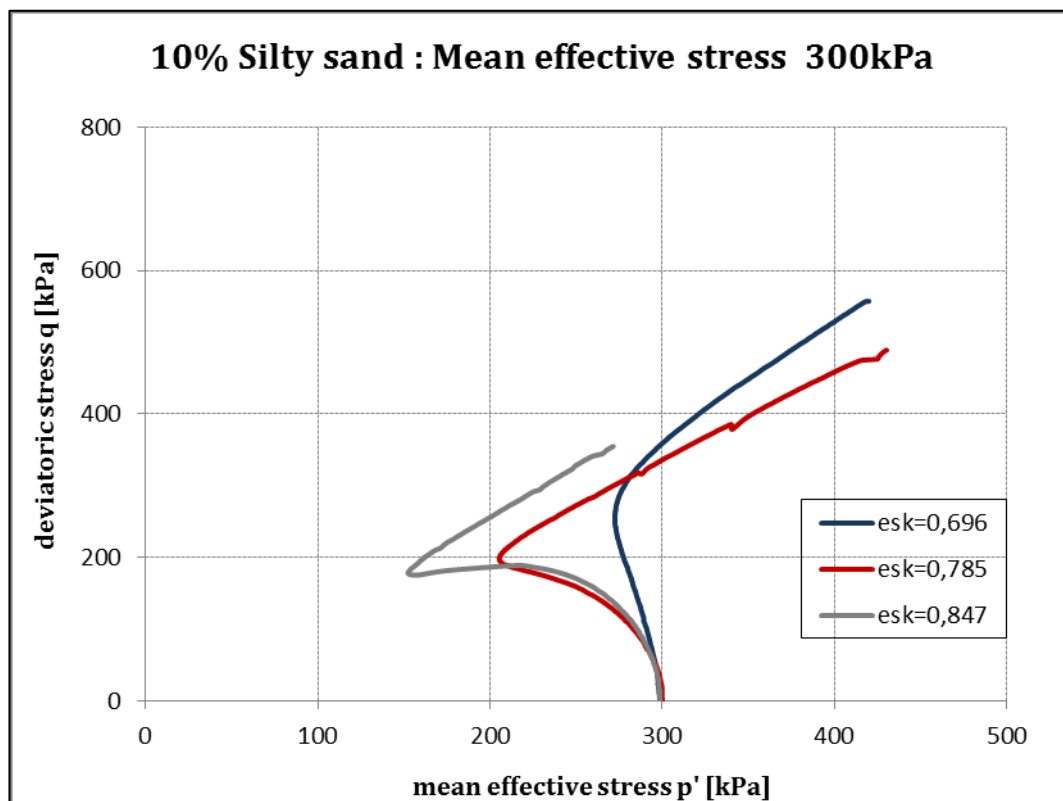
Σχήμα 4.19 Αποκλίνουσα τάση q συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.20 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 5% στερεοποιημένα στα 300kPa

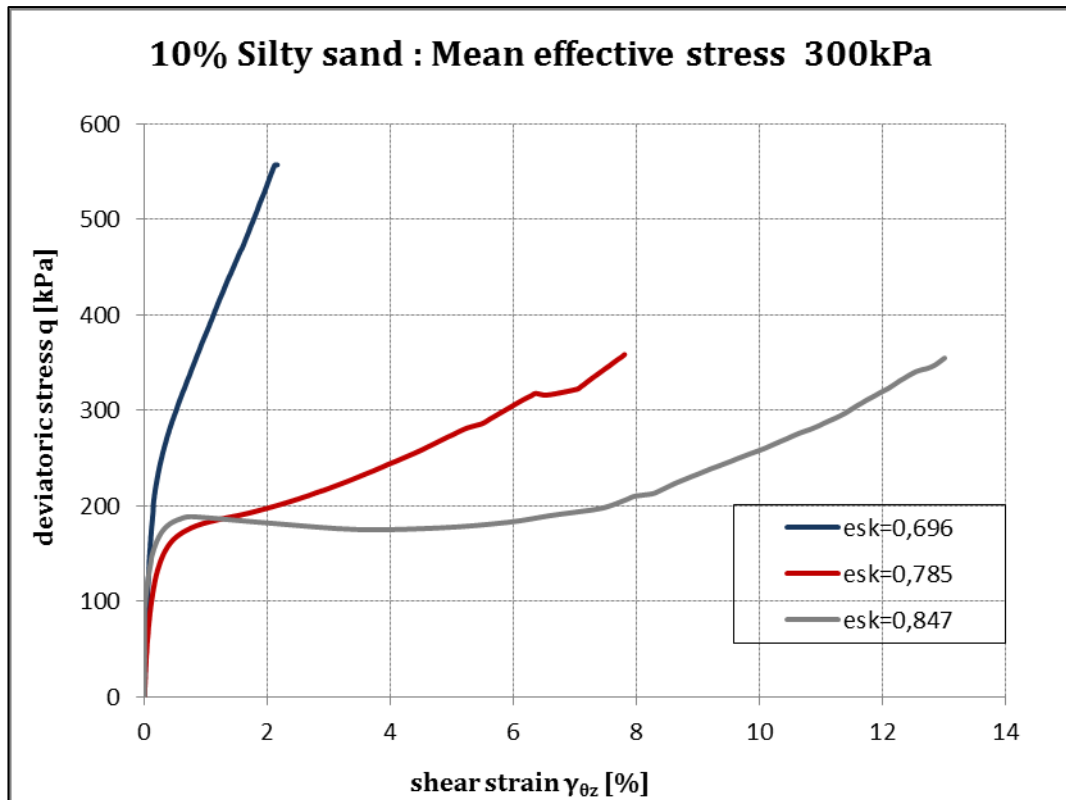
#### 4.3.3.6 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa , ποσοστό λεπτόκοκκων FC=10%

Στα Σχήματα 4.21 έως 4.23 παρουσιάζονται δοκίμια ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με μόνη διαφορά στη πυκνότητα τους (πυκνότερο δοκίμιο με  $e_{sk}=0,696$  και χαλαρότερο με  $e_{sk}= 0,847$ ).

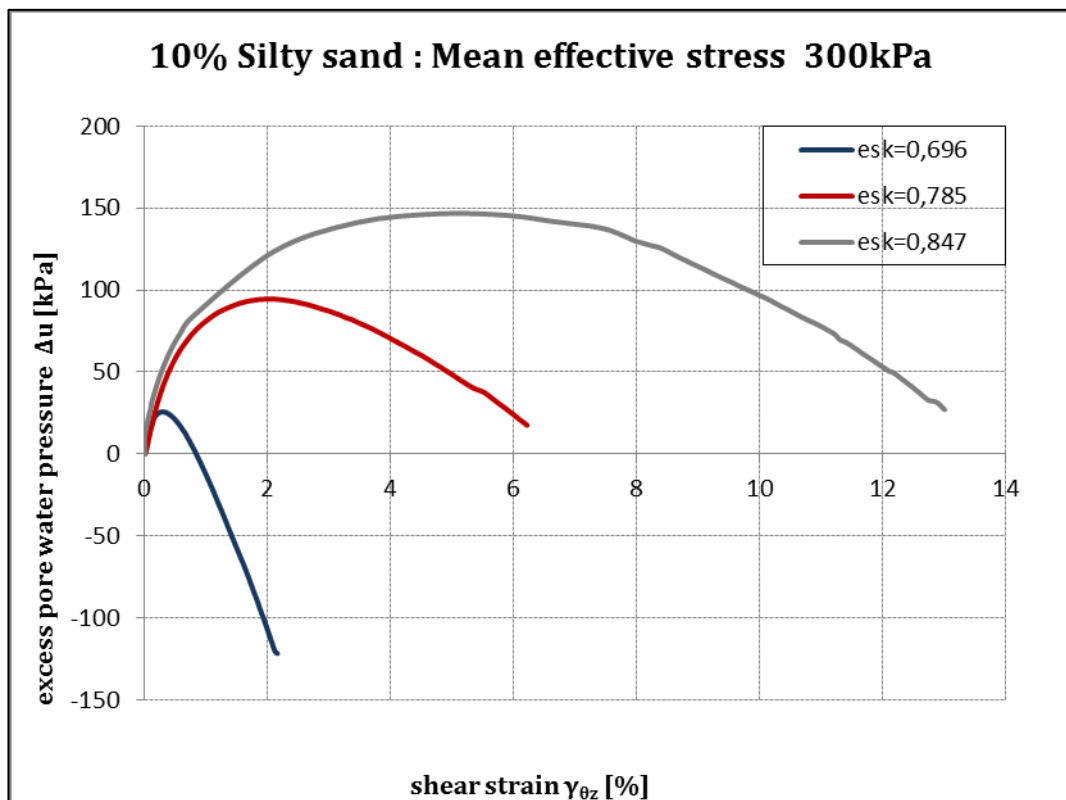


Σχήμα 4.21 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 300kPa





Σχήμα 4.22 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.23 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% στερεοποιημένα στα 300kPa

Όπως και από τα αντίστοιχα συμπεράσματα των τριαξονικών δοκιμών στο Κεφάλαιο 3.3.2 έτσι και εδώ διεξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο πυκνότερο είναι το δοκίμιο τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά έχει, αναπτύσσοντας μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και μικρότερες υπερπιέσεις πόρων που αποτονώνονται ταχύτερα. Το συμπέρασμα αυτό διεξάγεται ανεξαρτήτως αρχικής τάσης στερεοποιήσεως και περιεχόμενου ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού.

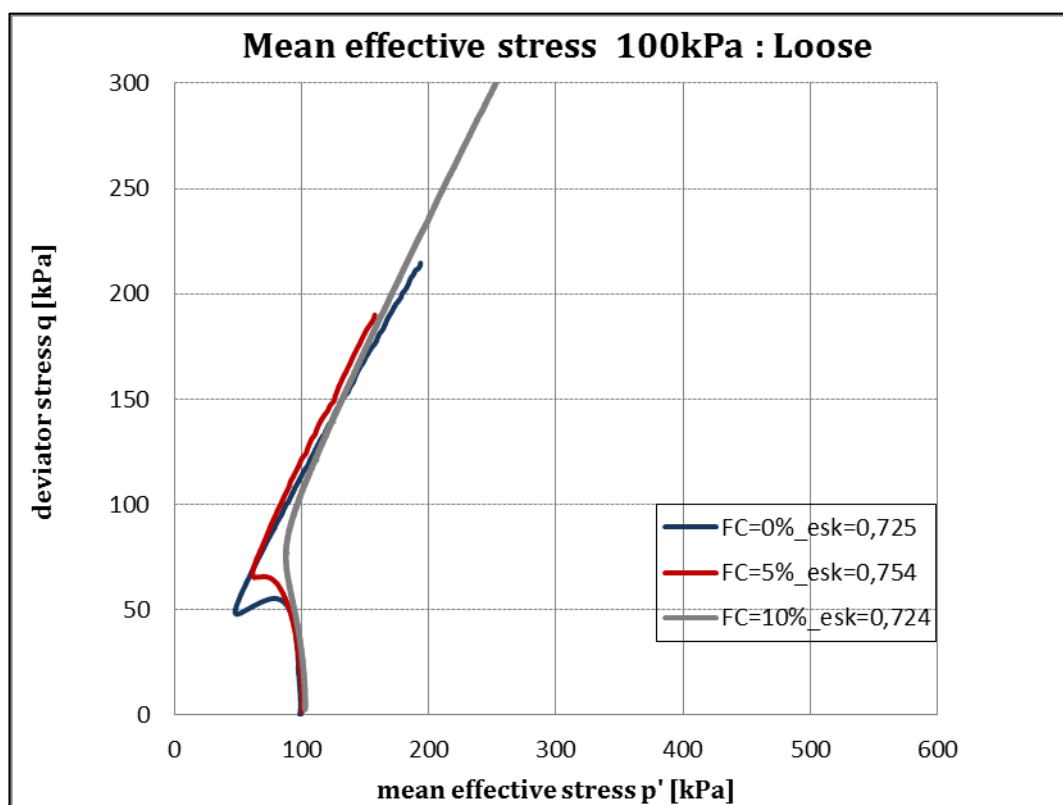
Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Δ. Παπαδόπουλος και Χ. Πολυδώρου, 2010) και πολλοί ερευνητές όπως οι Bensoula, Missoum και Bendani (2004) που πραγματοποίησαν μονοτονικές δοκιμές σε δύο κατηγορίες με σχετικές πυκνότητες  $D_r=15\%$  και  $D_r=50\%$  έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της πυκνότητας. Επίσης, στα διαγράμματα όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.2 στα Σχήματα 3.29-3.31 παρατηρήθηκε ότι ανεξαρτήτως του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού, το χαλαρότερο δοκίμιο είναι πάντα πιο συστολικό και παρουσιάζει μικρότερες διατμητικές αντοχές.

### 4.3.4 Επίδραση Του Περιεχόμενου Ποσοστού Λεπτόκοκκων

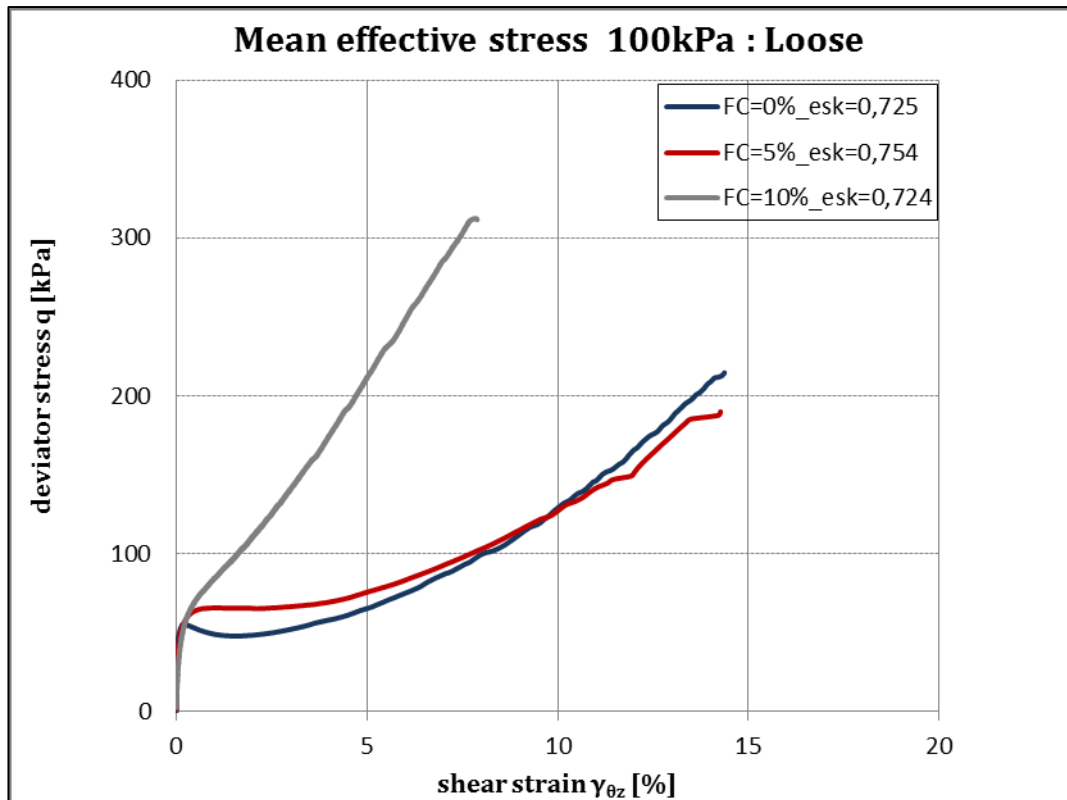
#### 4.3.4.1 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa

#### Χαλαρά Δοκίμια

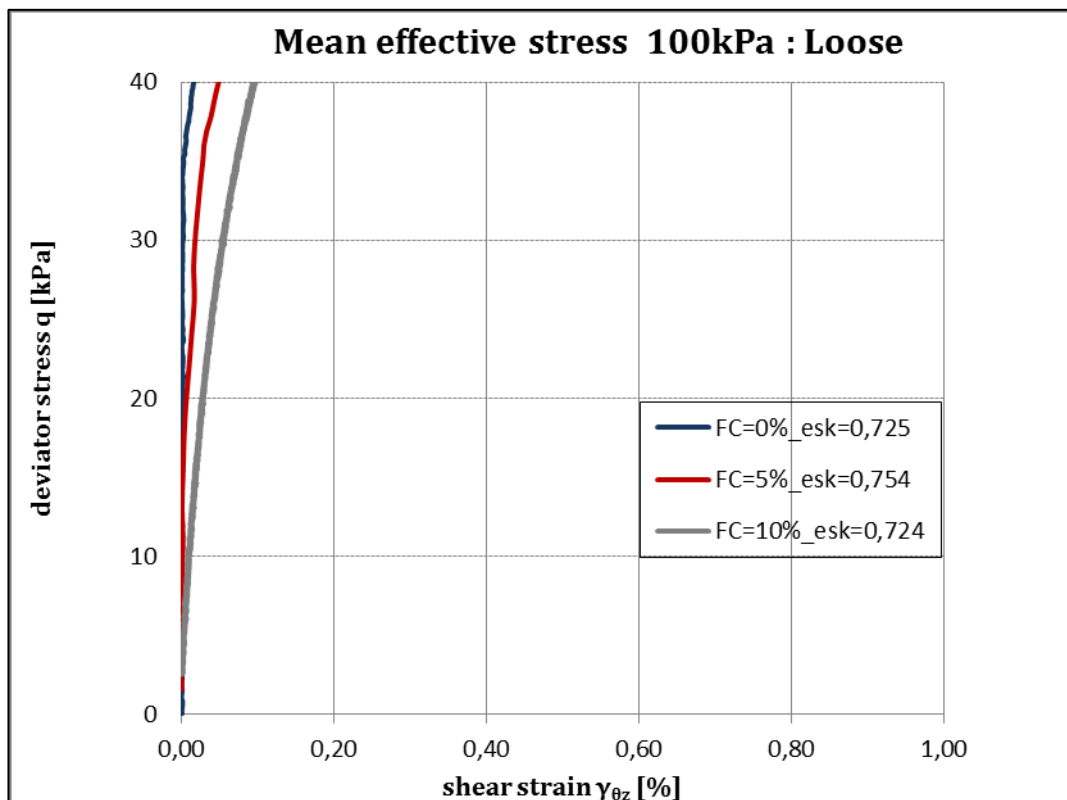
Στα Σχήματα 4.24 έως 4.27 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,724$  έως  $e_{sk}=0,754$ ).



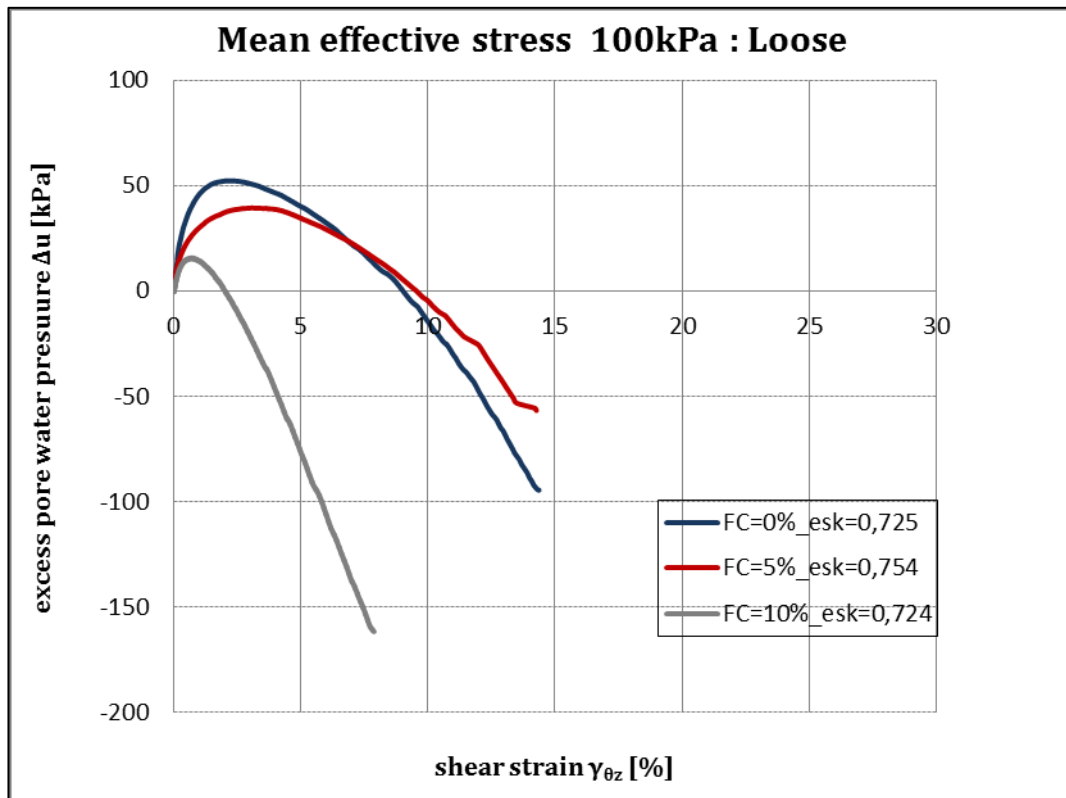
Σχήμα 4.24 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 4.25 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



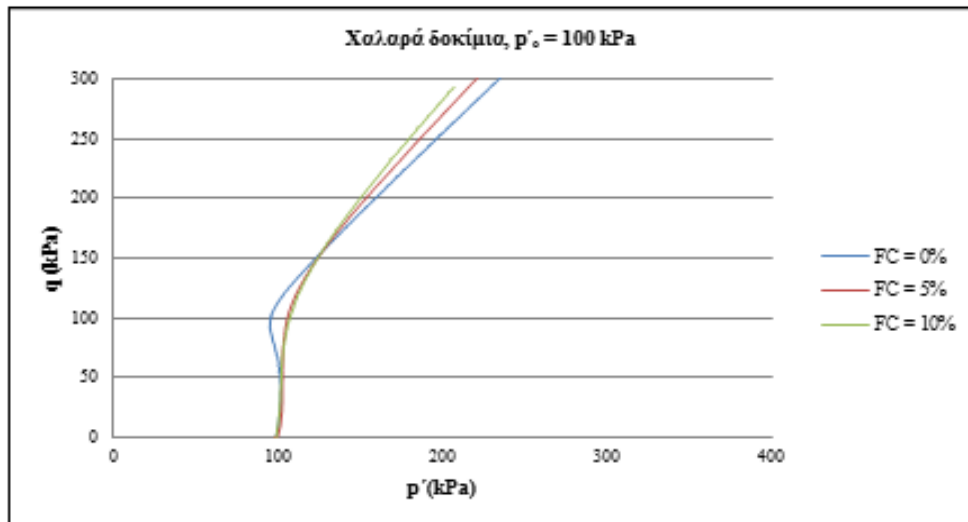
Σχήμα 4.26 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



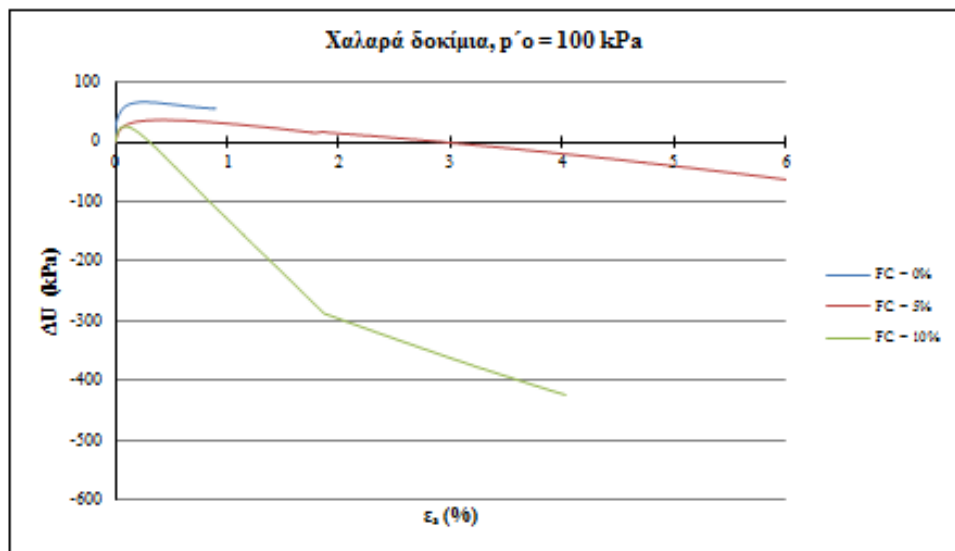
Σχήμα 4.27 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

Όσον αφορά τα χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa με δείκτες πόρων σκελετού  $e_{sk}=-0,724-0,754$  παρατηρούμε ότι προσθέτοντας λεπτόκοκκο υλικό, το δοκίμιο αναπτύσσει μεγαλύτερες διατμητικές αντοχές και μικρότερες υπερπίεσεις στο σκελετό του όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.27.

Ομοίως από το Σχήμα 4.28 (Διπλωματική εργασία, Γκιούσας, 2012) παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καθαρής άμμου έχει πολύ πιο συστολική συμπεριφορά από τα δοκίμια αμμοϊλύος. Από το Σχήμα 4.29 γίνεται επίσης φανερό ότι όσο προσθέτω λεπτόκοκκο υλικό έως 10% οι υπερπίεσεις πόρων στο σκελετό του δοκιμίου είναι μικρότερες και αποτονώνονται ταχύτερα.



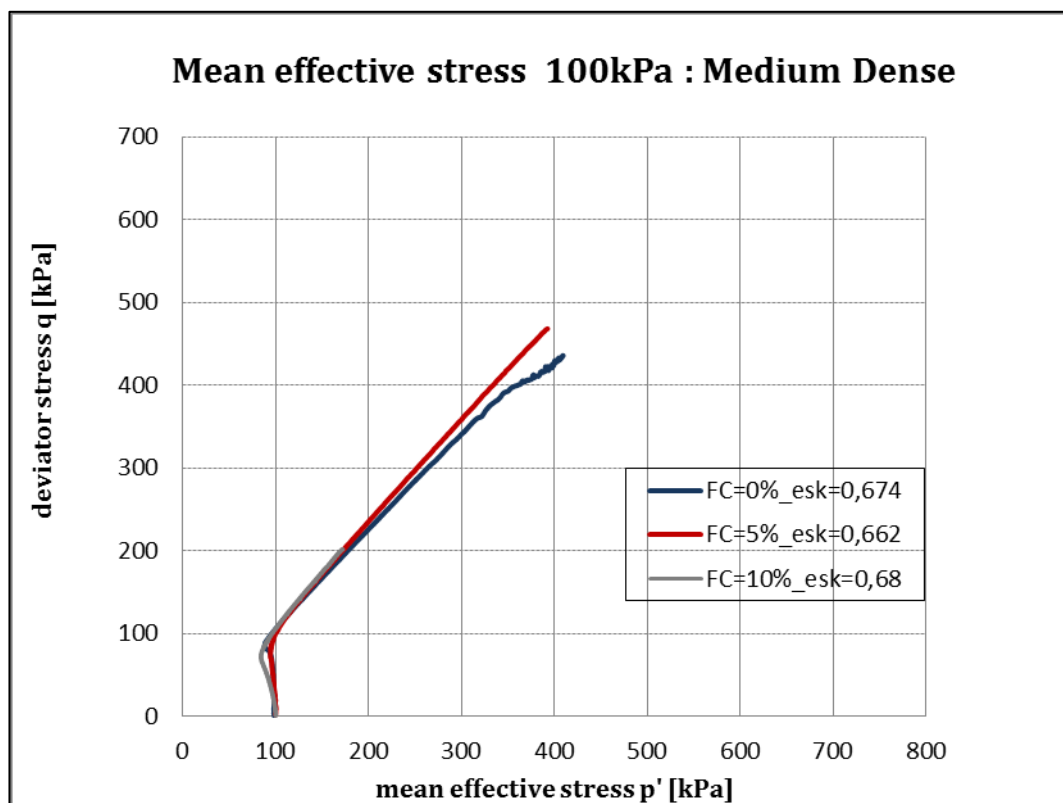
Σχήμα 4.28 Διαδρομές τάσεων, Γκιούσας ( 2012)



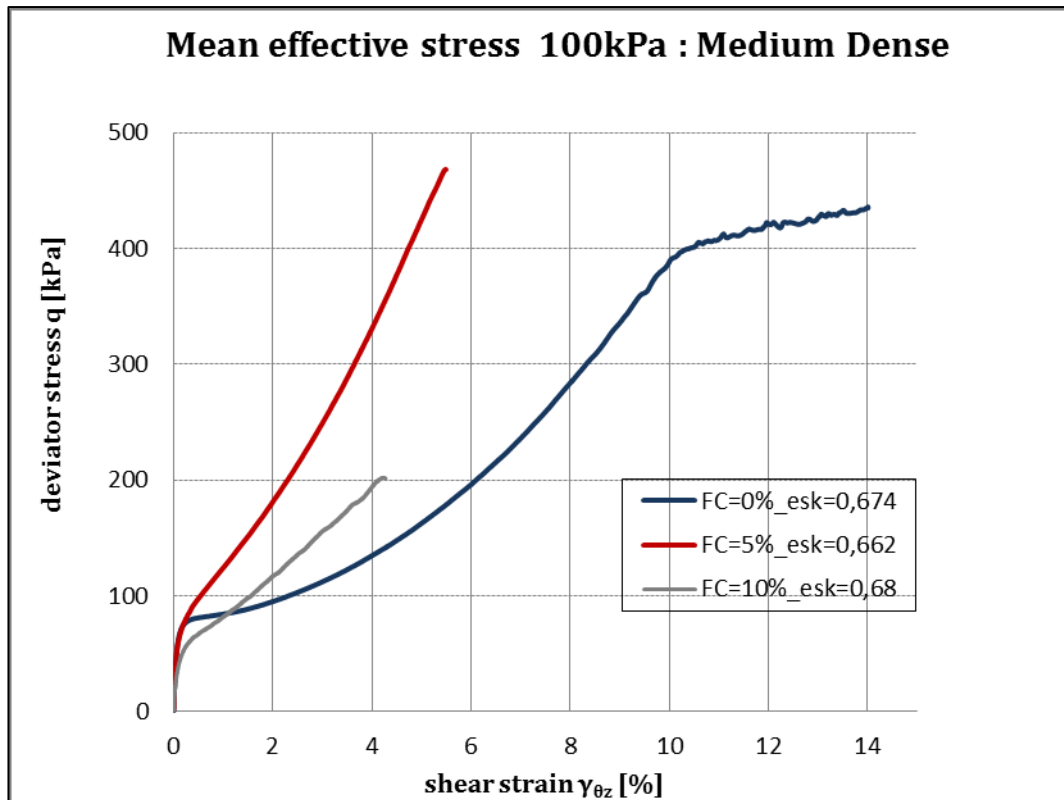
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα πιέσεων πόρων συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης, Γκιούσας ( 2012)

### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

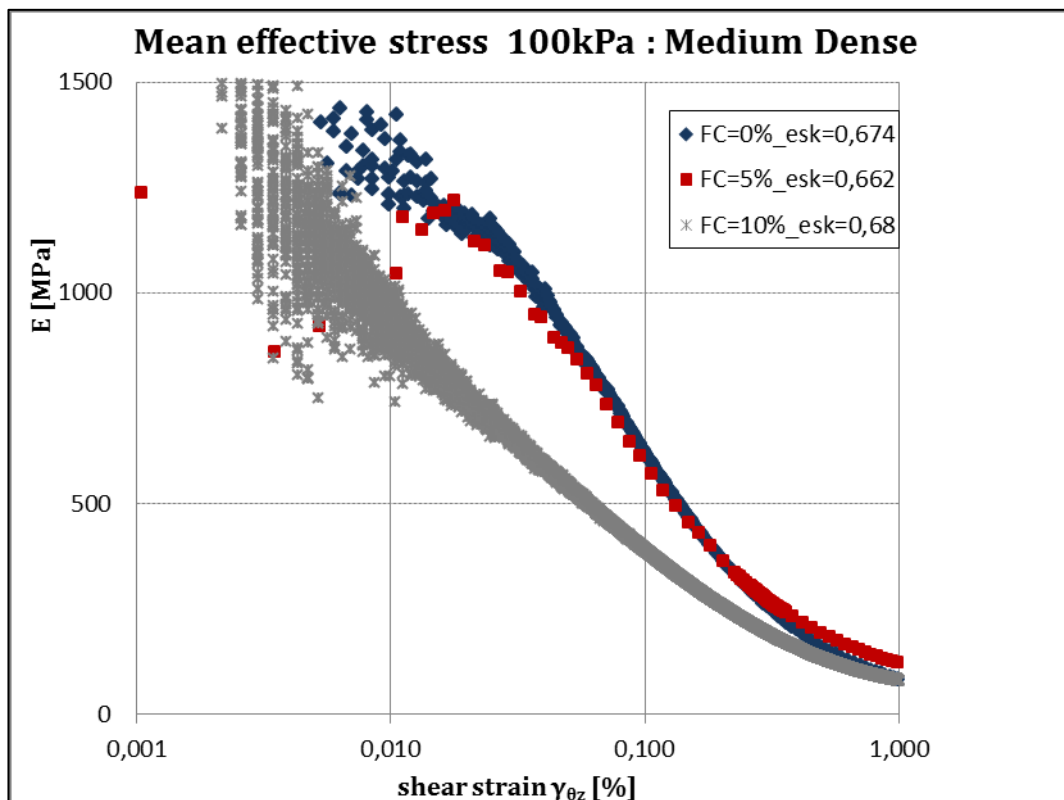
Στα Σχήματα 4.30 έως 4.33 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10%, που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,662$  και  $e_{sk}=0,68$ ).



Σχήμα 4.30 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

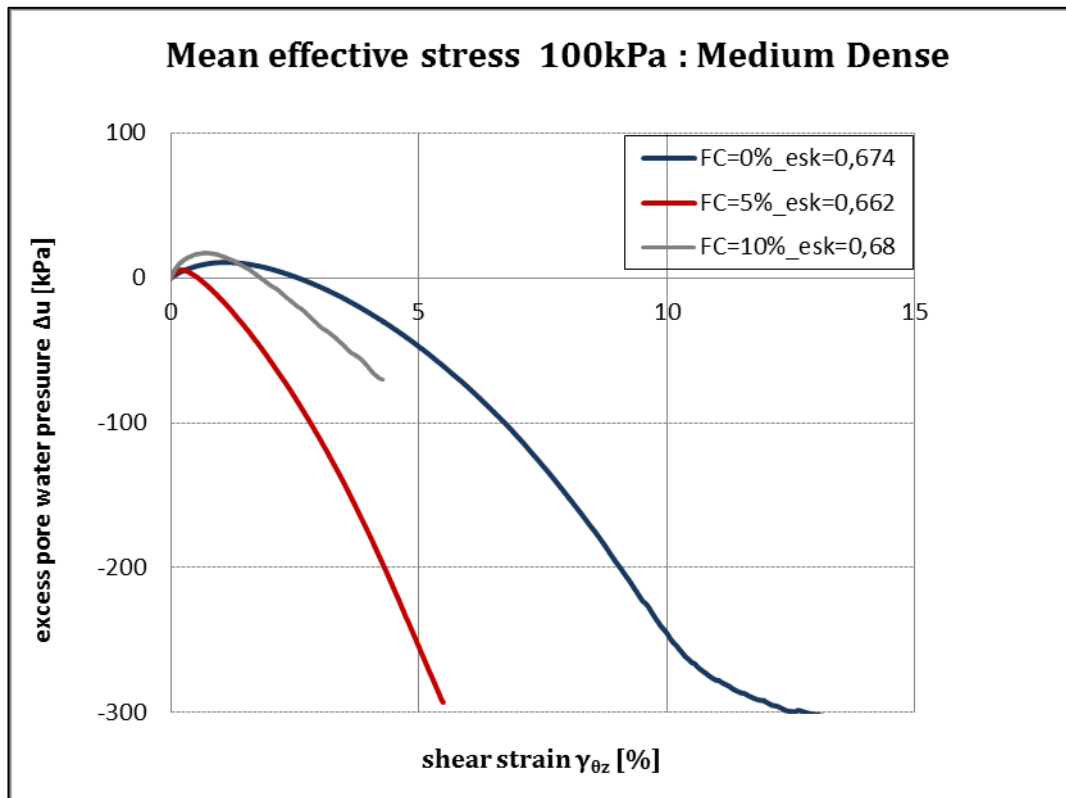


Σχήμα 4.31 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 4.32 Μέτρο δυστημσίας  $E$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa





Σχήμα 4.33 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

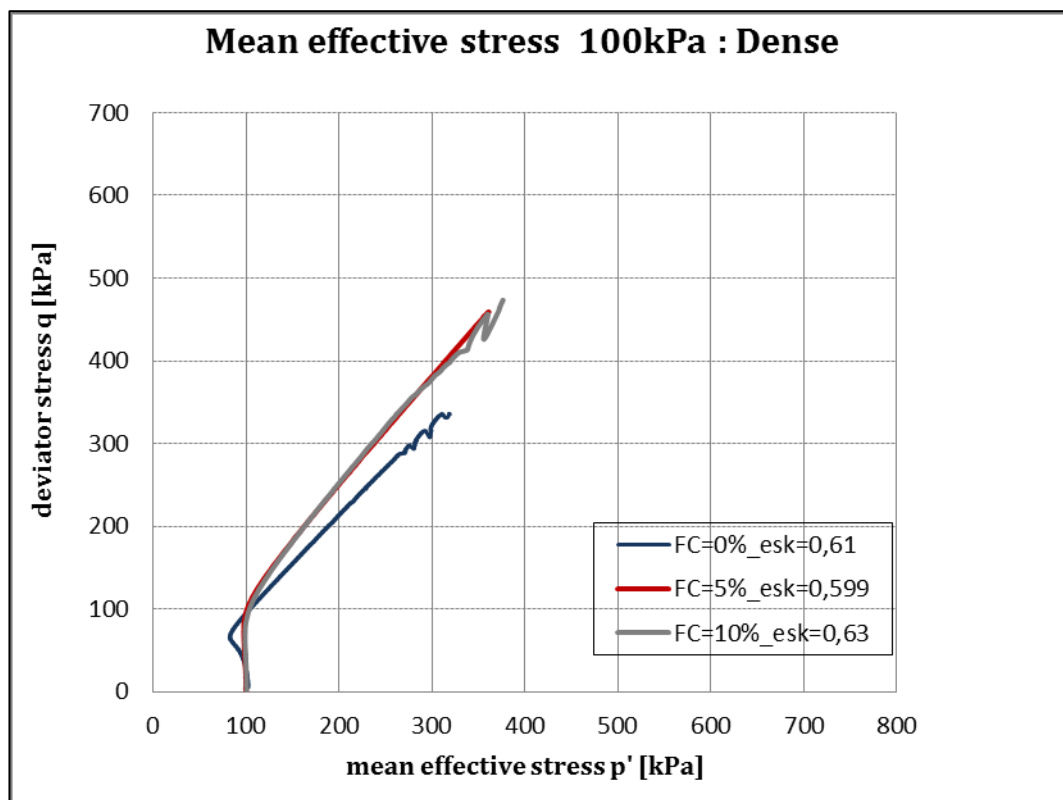
Παρατηρούμε ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού οδηγεί το δοκίμιο σε πιο διαστολική συμπεριφορά του δοκιμίου, όμως το δοκίμιο με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% είναι πιο διαστολικό από το δοκίμιο με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ αρχικά για μικρές αξονικές παραμορφώσεις, το δοκίμιο καθαρής άμμου αναπτύσσει διαμηθικές αντοχές μεγαλύτερες του δοκιμίου ιλυώδους άμμου 10%, στη συνέχεια του πειράματος αυτό ανατρέπεται. Από το Σχήμα 3.32 παρατηρούμε ότι το δοκίμιο καθαρής άμμου έχει μεγαλύτερη δυσμηθία όμως από το Σχήμα 4.31, τα μείγματα αναπτύσσουν μεγαλύτερες αντοχές.

Το ίδιο συμπέρασμα διεξάγεται και από τα τριαξονικά πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας σε δοκίμια μέσης πυκνότητας στερεοποιημένα στα 100kPa με  $e_{sk}=0,685-0,696$  στο Υποκεφάλαιο 3.3.4.

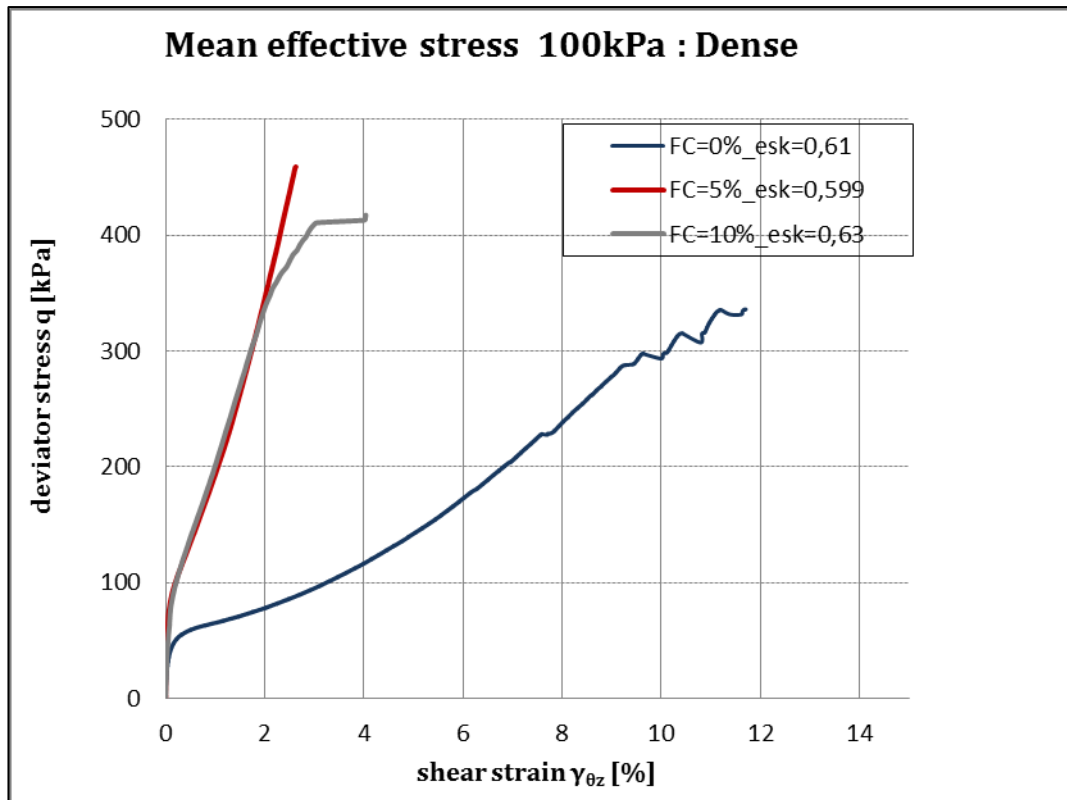
Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού της τάξης του 5% έχει μικρή βελτίωση στα χαλαρά δοκίμια που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.24-4.27, ενώ στα μέσης πυκνότητας δοκίμια της κατηγορίας αυτής έχει μεγάλη επίδραση (Σχήμα 4.31-4.33), άρα η επίδραση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού εξαρτάται από την αρχική πυκνότητα.

### Πυκνά Δοκίμια

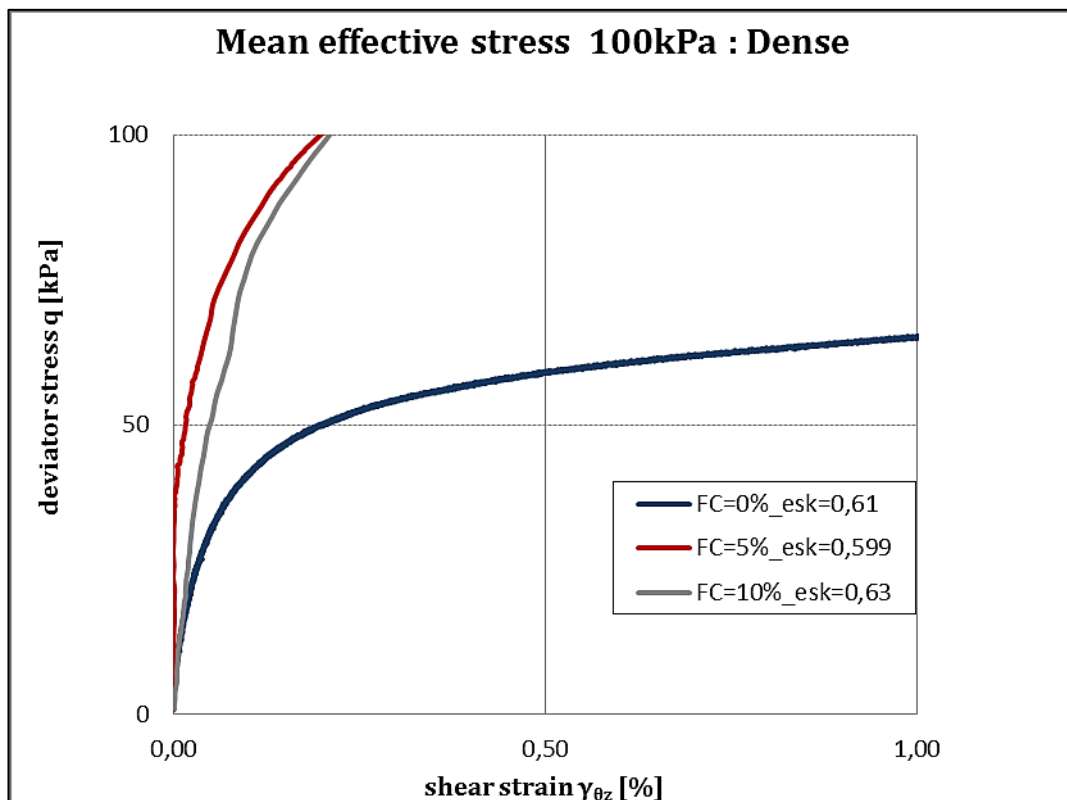
Στα Σχήματα 4.34 έως 4.37 παρουσιάζονται πυκνά δοκίμια καθαρής άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού  $FC=5\%$  και  $10\%$  που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης  $100\text{kPa}$  και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,599$  και  $e_{sk}=0,63$ ).



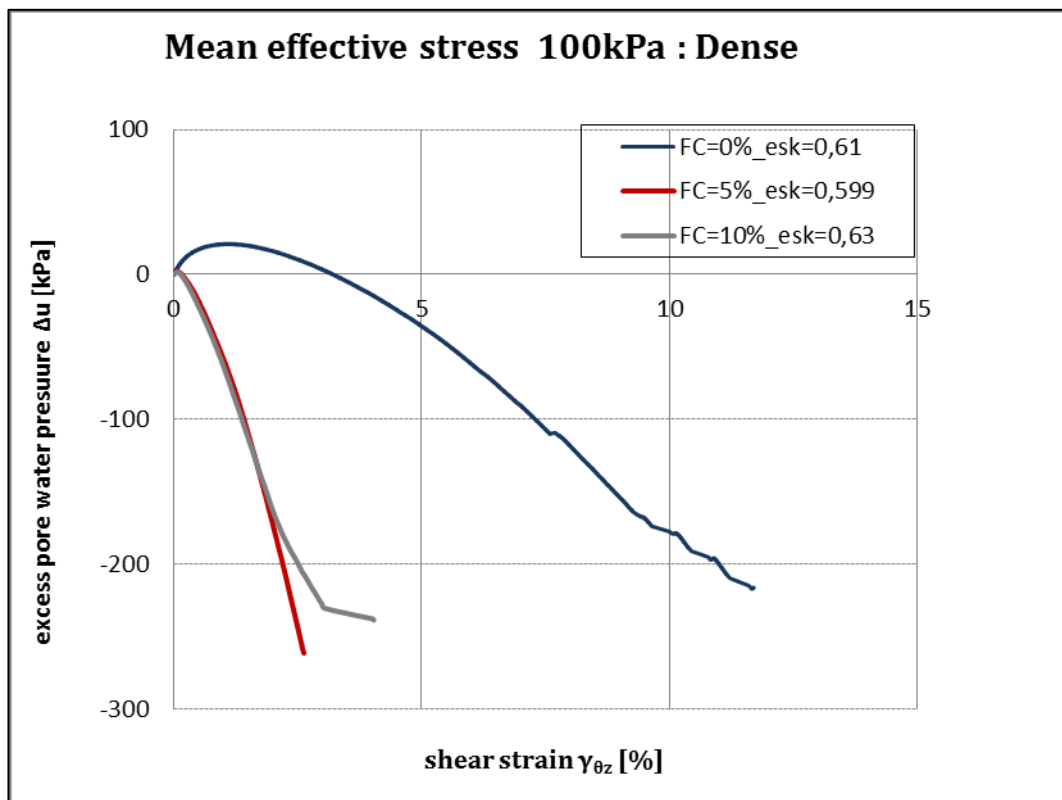
Σχήμα 4.34 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα  $100\text{kPa}$



Σχήμα 4.35 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 4.36 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



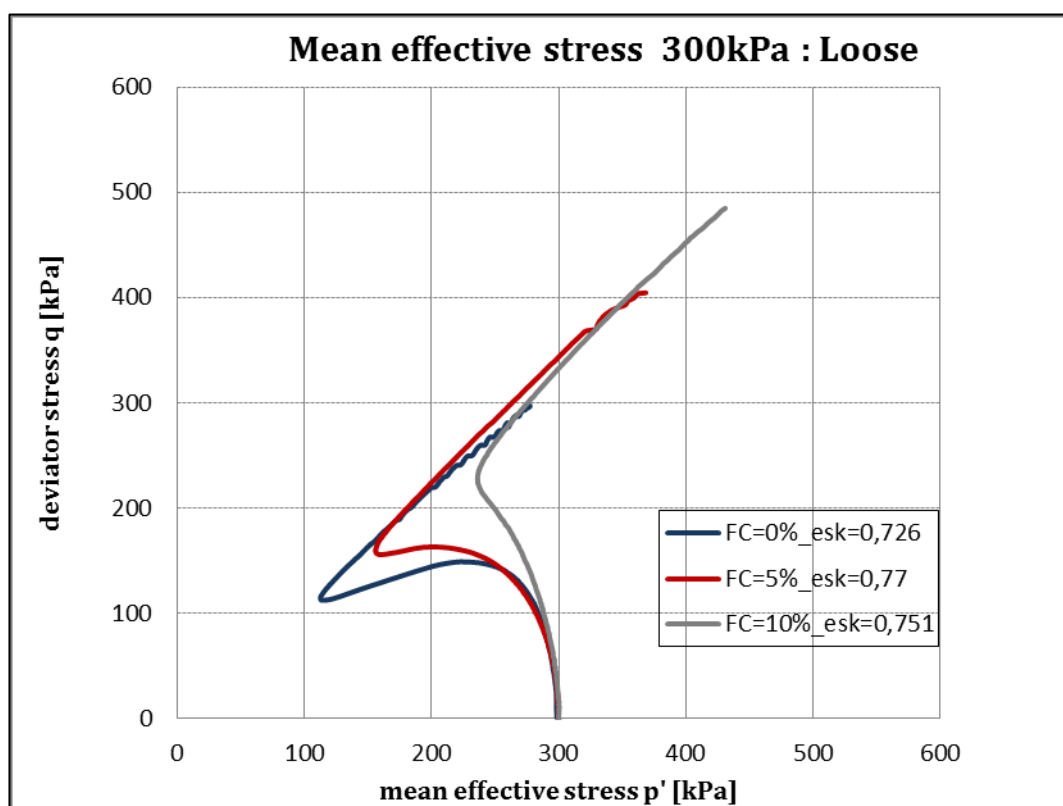
Σχήμα 4.37 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

Από τα Σχήματα 4.34-4.37 που αφορούν πυκνά δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 100kPa παρατηρούμε ότι το δοκίμιο με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% αναπτύσσει μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή από το δοκίμιο με  $f_c=10\%$ , και τα δυο μαζί είναι αρκετά πιο διαστολικά από το δοκίμιο καθαρής άμμου.

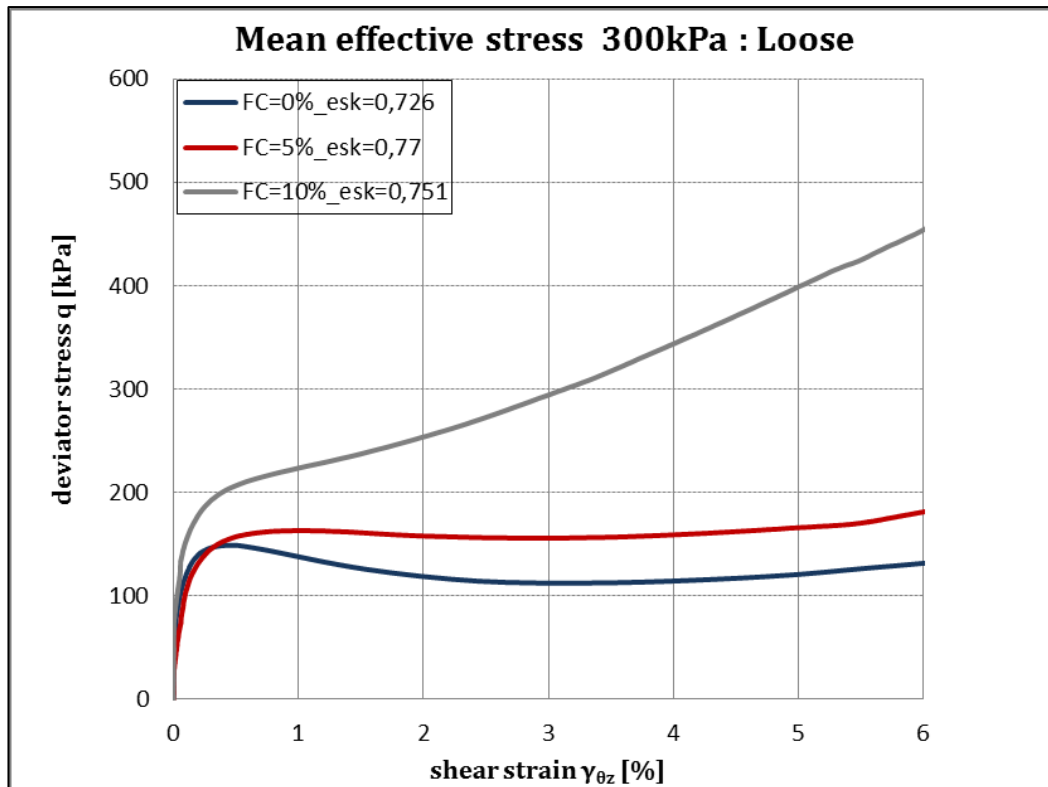
## 4.3.4.2 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa

Χαλαρά Δοκίμια

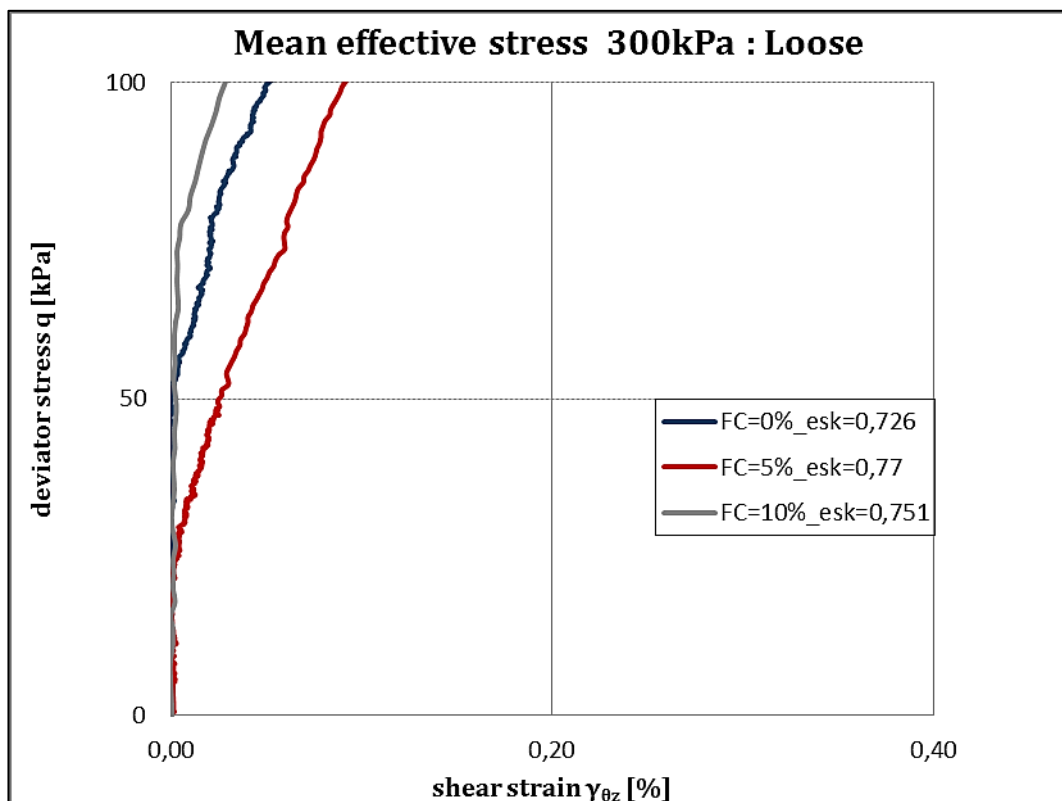
Στα Σχήματα 4.38 έως 4.41 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,726$  έως  $e_{sk}=0,77$ ).



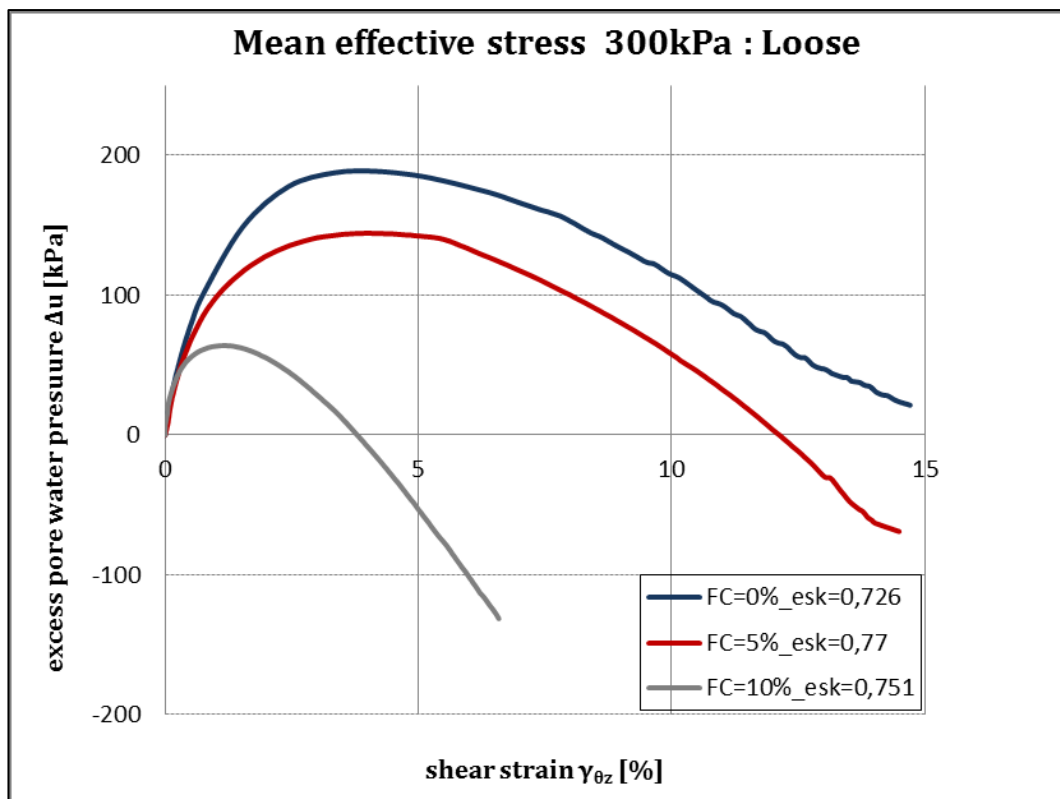
Σχήμα 4.38 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.39 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.40 Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



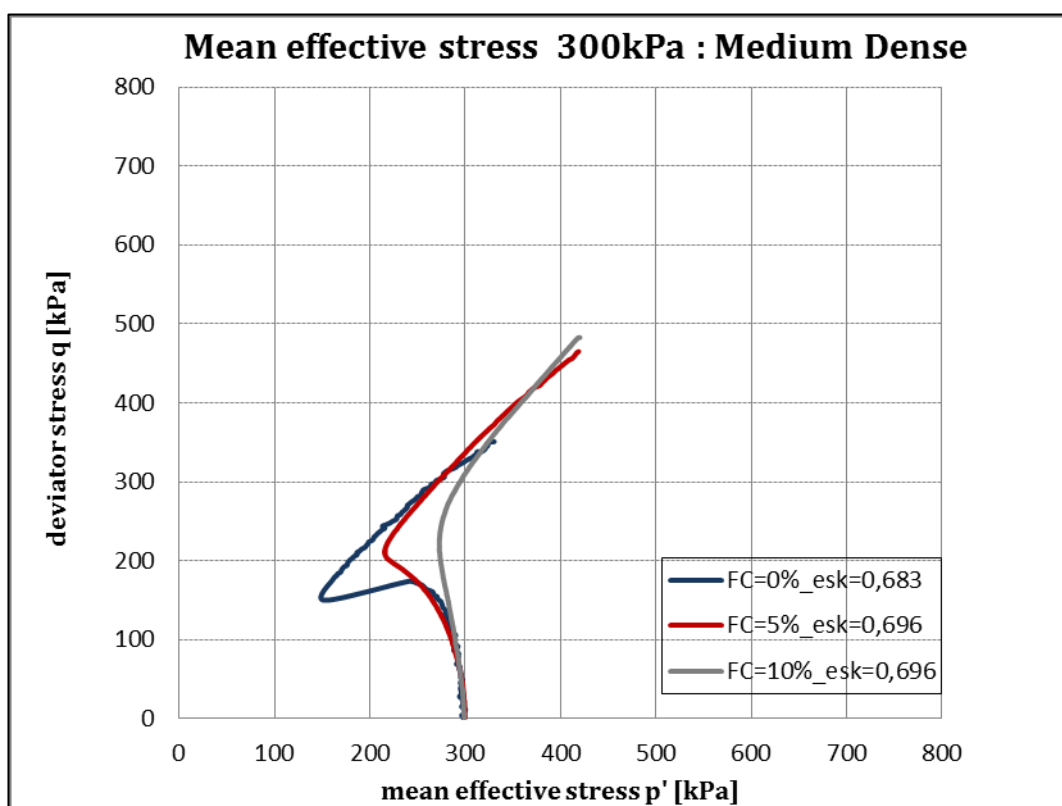
Σχήμα 4.41 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

Από τα Σχήματα 4.38-4.41 που αφορούν χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa παρατηρούμε ότι όσο προσθέτουμε λεπτόκοκκο υλικό τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά του δοκιμίου παρατηρώ.

Όμοιο συμπέρασμα είχε εξαχθεί από τα τριαξονικά πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία με δείκτες πόρων σκελετού  $esk=0,714-0,724$ , στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa και παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 3.3.4

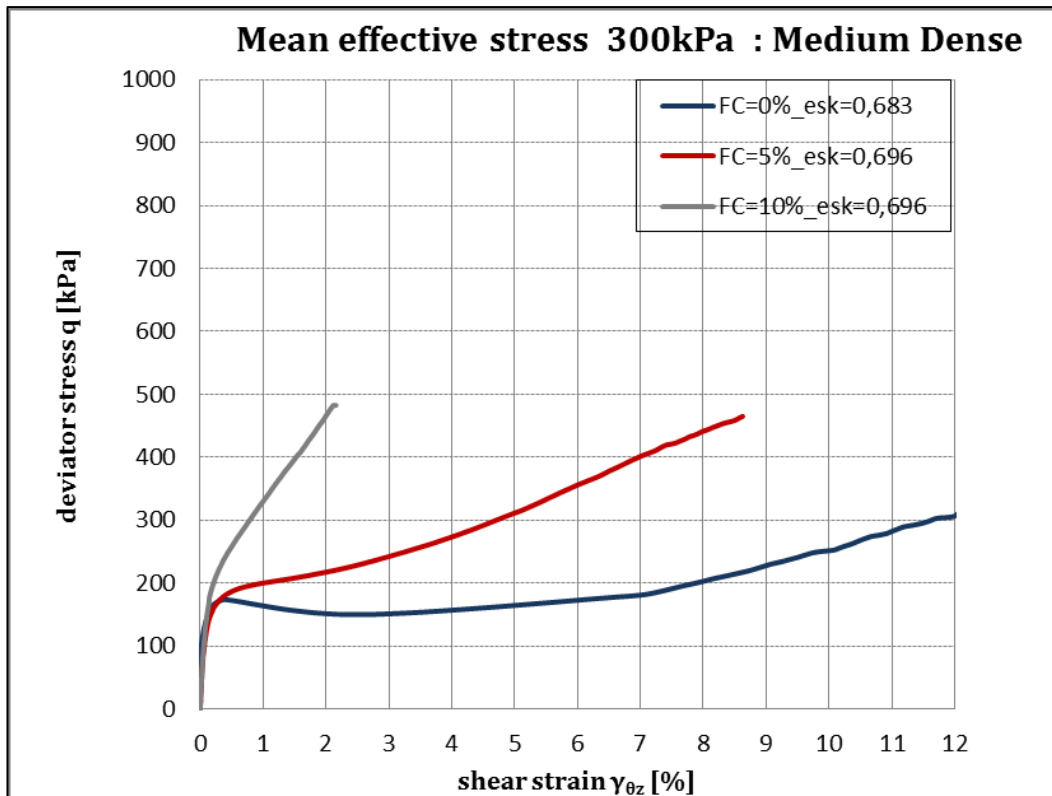
### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.42 έως 4.45 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,683$  έως  $e_{sk}=0,696$ ).

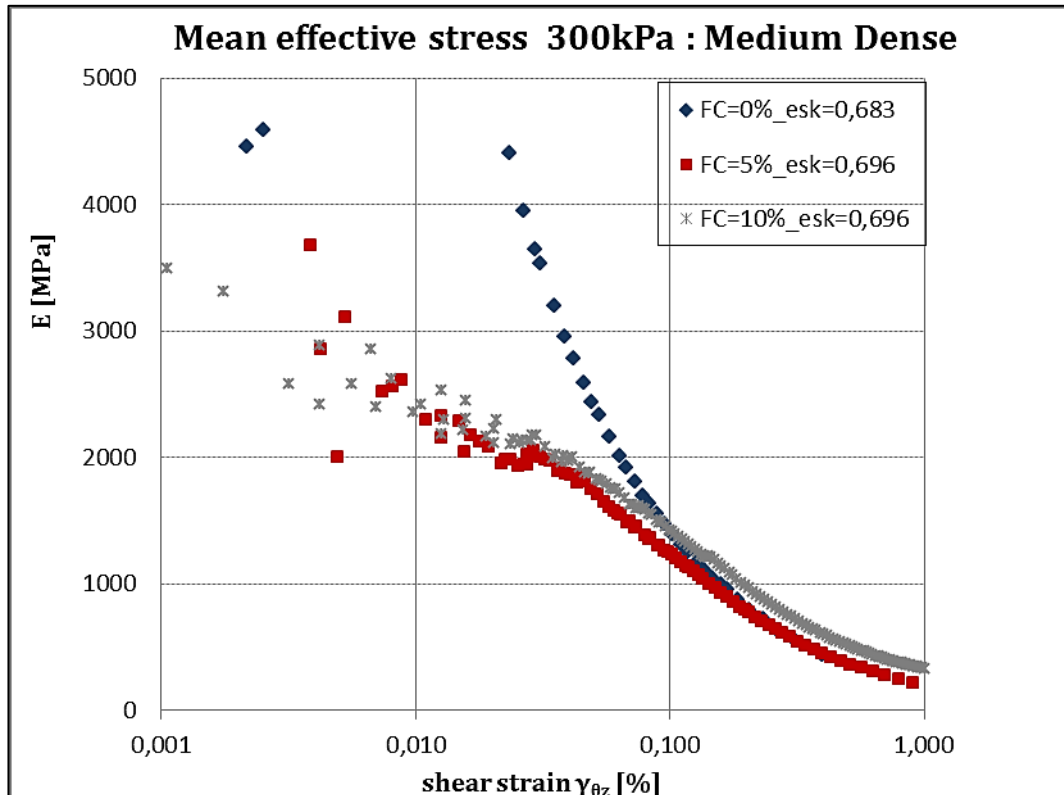


Σχήμα 4.42 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

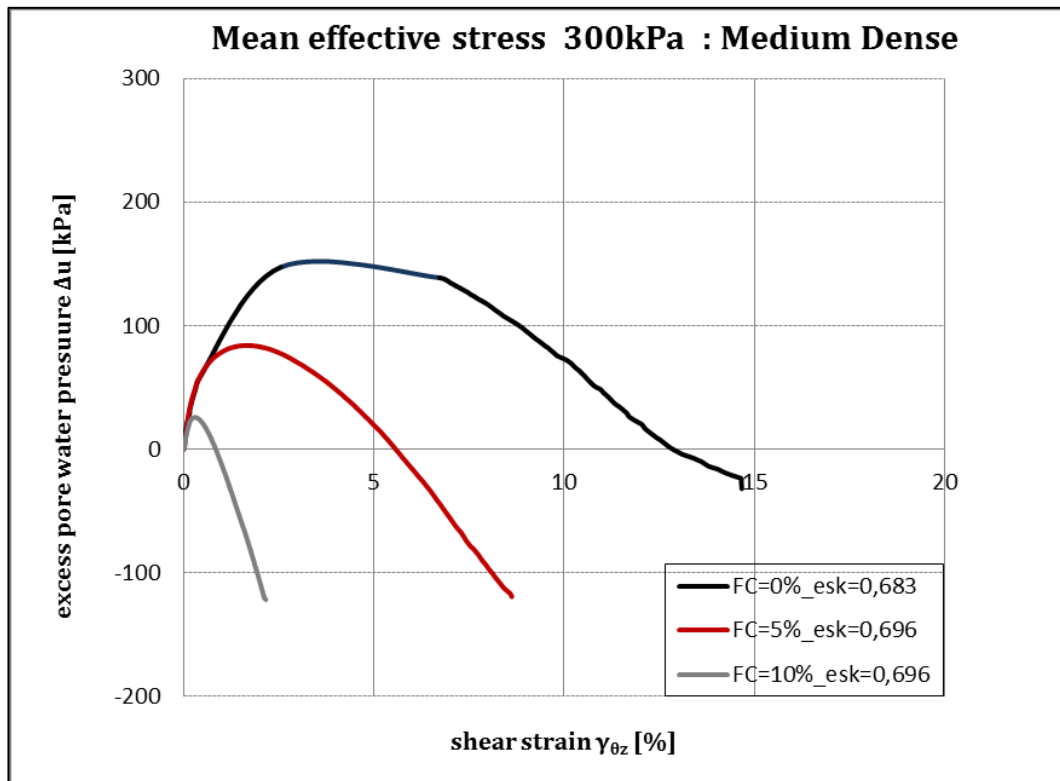




Σχήμα 4.43 Αποκλίνουσα τάση q συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.44 Μέτρο δυστημής E για μικρές παραμορφώσεις, μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



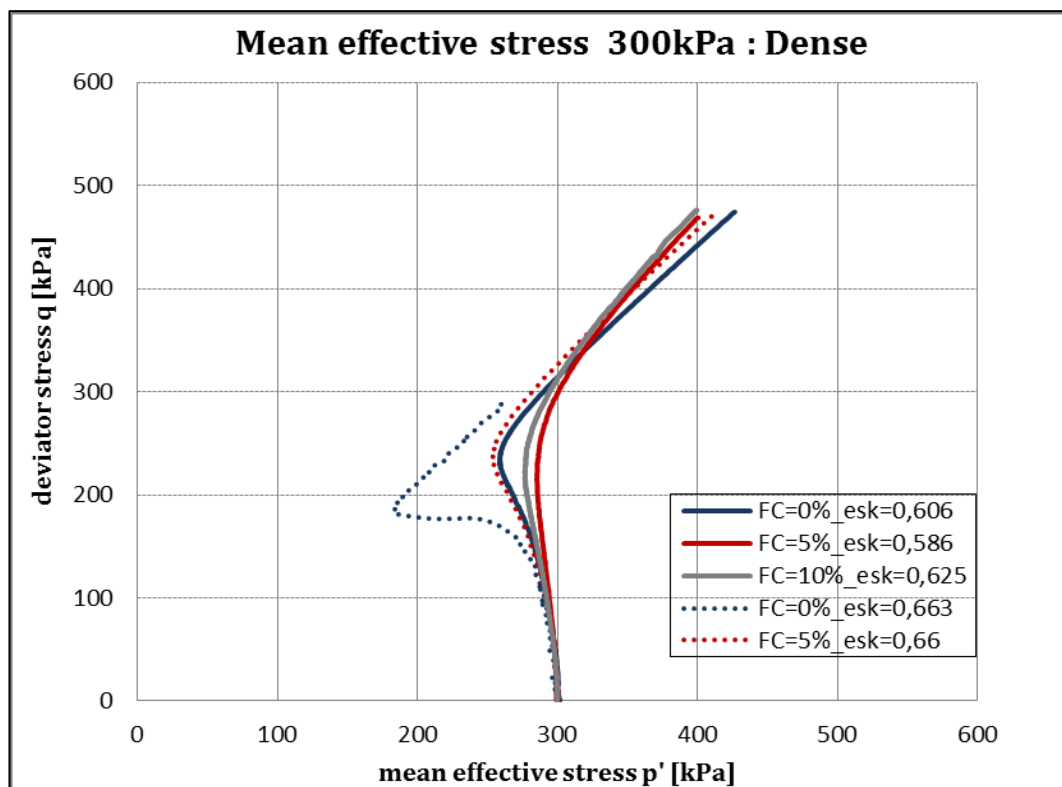
Σχήμα 4.45 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

Από τα Σχήματα 4.42-4.45 που αφορούν μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa παρατηρούμε ότι όσο προσθέτουμε λεπτόκοκκο υλικό τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά παρατηρούμε. Οι υπερπιέσεις πόρων μειώνονται αισθητά και αποτονώνονται ταχύτερα. Όμοιας όσο μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού έχω τόσο μεγαλύτερες αντοχές αναπτύσσει το δοκίμιο κατά τη διάτμηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ τα μείγματα έχουν μικρότερη δυσμησία (Σχήμα 4.44), αναπτύσσουν τελικώς μεγαλύτερες αντοχές (Σχήμα 4.43) όπως είχαν καταλήξει και οι ερευνητές Salgado et al. (2009) για δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 400kPa.

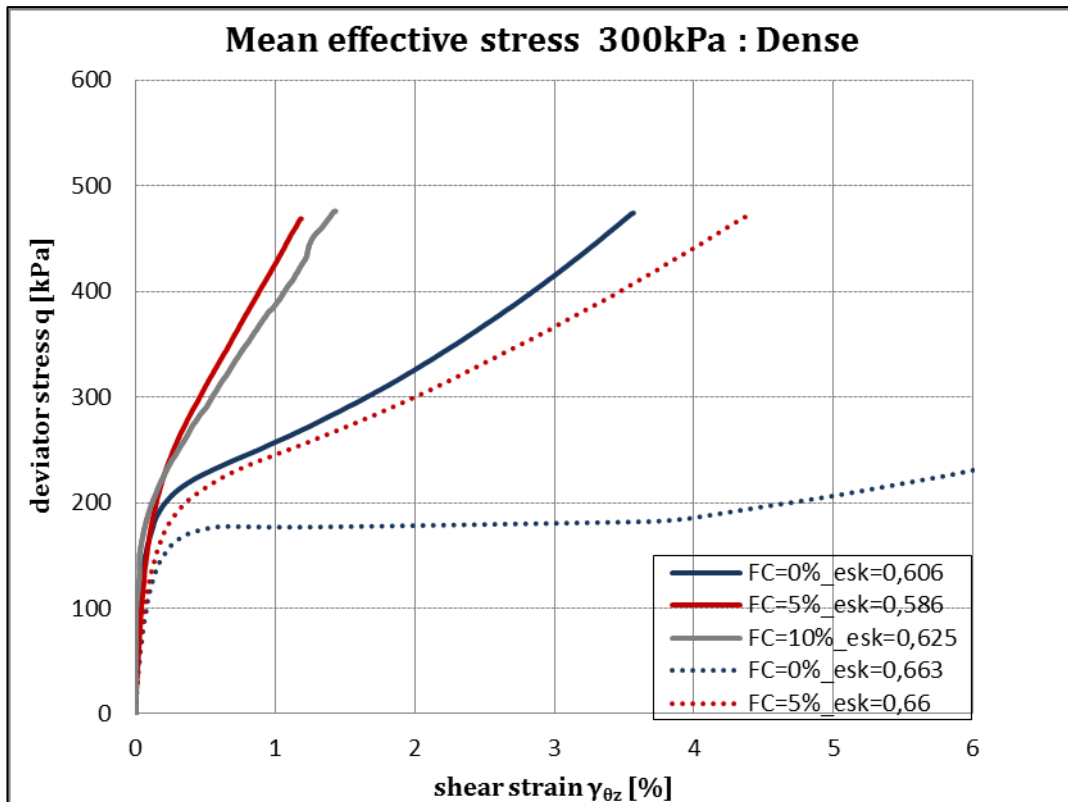
Όμοιο συμπέρασμα είχε εξαχθεί από τα τριαξονικά πειράματα στο Υποκεφάλαιο 3.3.4 για μέσης πυκνότητας δοκίμια με δείκτες πόρων σκελετού  $e_{sk}=0,671-0,705$  που συνάδουν με τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας αφού έχουν  $e_{sk}=0,683-0,696$ .

### Πυκνά Δοκίμια

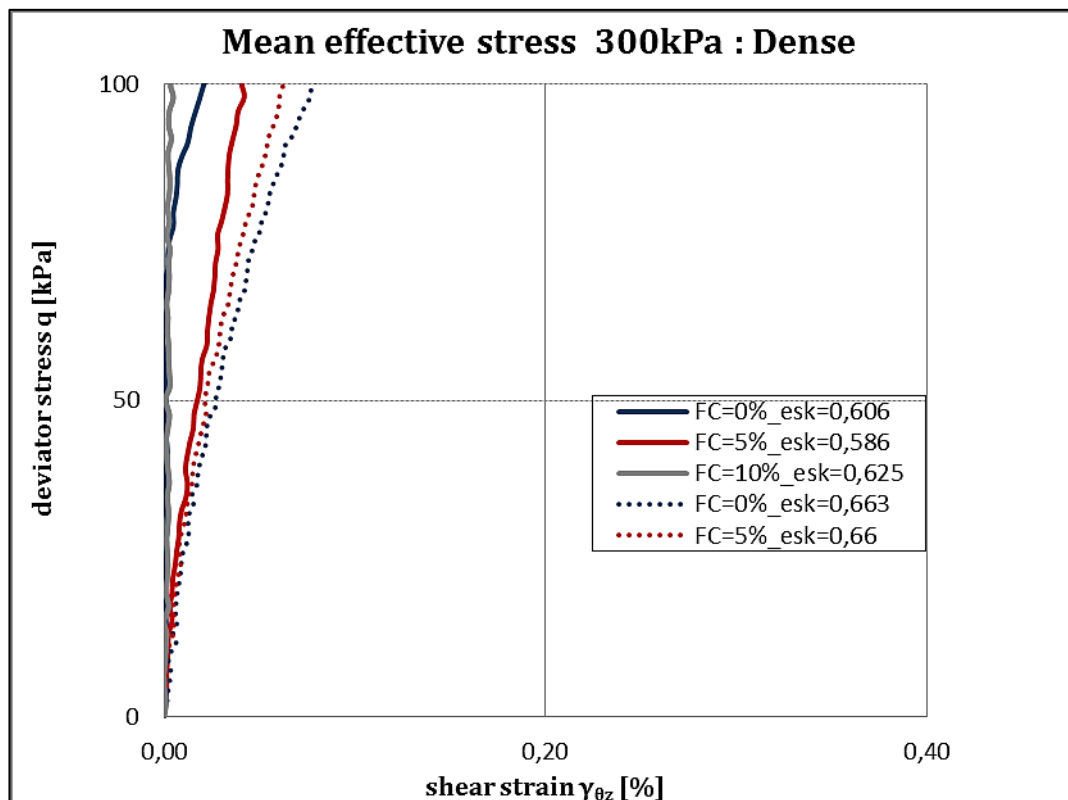
Στα Σχήματα 4.46 έως 4.49 παρουσιάζονται πυκνά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,586$  έως  $e_{sk}=0,625$ ).



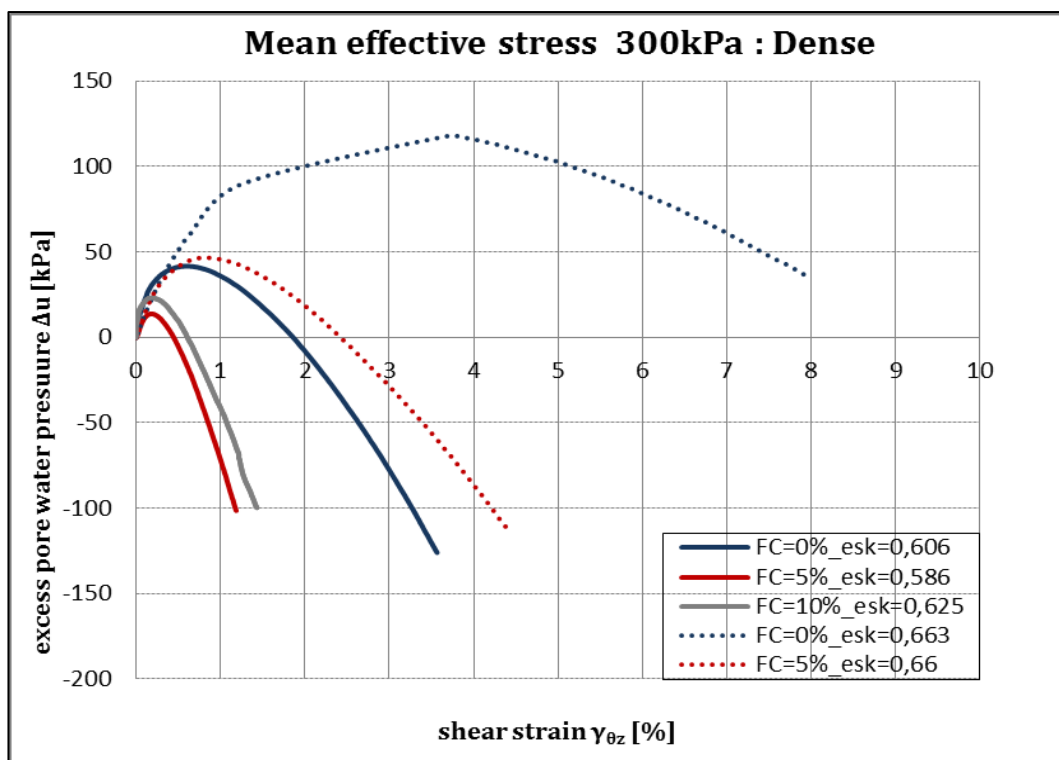
Σχήμα 4.46 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.47 Αποκλίνουσα τάση q συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.48 Αποκλίνουσα τάση q συναρτήσει μικρών αξονικών παραμορφώσεων  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

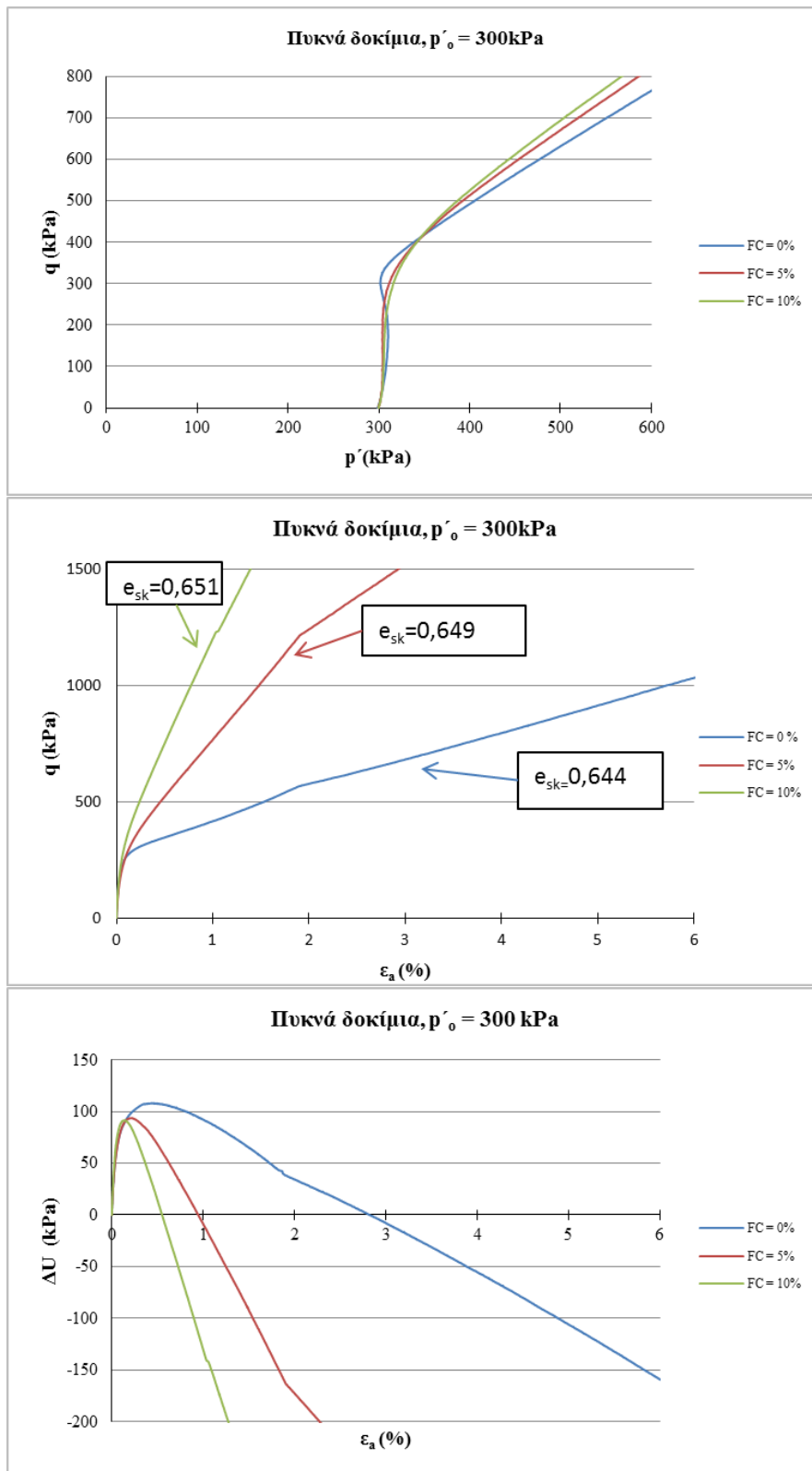


Σχήμα 4.49 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

Όσον αφορά τα πυκνά δοκίμια της κατηγορίας αυτής, από το Σχήμα 2.46 παρατηρούμε ότι τα δοκίμια αμμοίλους έχουν πιο διαστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου. Όμοια από τα Σχήματα 2.47-2.49 βλέπουμε ότι τα δοκίμια ιλυώδους άμμου αναπτύσσουν μεγαλύτερες αντοχές και μικρότερες υπερπίεσεις από το δοκίμιο καθαρής άμμου. Το δοκίμιο με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% έχει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από το δοκίμιο ιλυώδους άμμου ποσοστού ιλύος 10% όμως αυτό μπορεί να ωφείλεται στο γεγονός ότι είναι πυκνότερο ( $e_{sk}=0,586$  έναντι  $e_{sk}=0,625$ ).

Επιπλέον συγκρίσεις μπορούν να διεξαχθούν από τα δοκίμια καθαρής άμμου και ιλυώδους άμμου 5% με  $e_{sk}=0,663$  και  $e_{sk}=0,66$  αντίστοιχα. Όμοια παρατηρούμε ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού αυξάνει την αντοχή του δοκιμίου της καθαρής άμμου και αναπτύσσει πιο διαστολική συμπεριφορά.

Από το Σχήμα 4.50 (Διπλωματική εργασία Γκιούσας, 2012) διεξάγεται όμοιο συμπέρασμα, δηλαδή ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού δημιουργεί πιο διαστολική συμπεριφορά του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, από το Σχήμα 4.50 (β) παρατηρούμε ότι η προσθήκη ιλύος αυξάνει τη δυσμησία του δοκιμίου και από το Σχήμα 4.50 (γ) παρατηρούμε ότι η προσθήκη ιλύος μειώνει τις υπερπίεσεις που αναπτύσσονται στο σκελετό του δοκιμίου καθώς και το χρόνο που αυτές αποτονώνονται.



Σχήμα 4.50 Τριαξονικά πειράματα που αφορούν πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση 300kPa ( Διπλωματική Γκιούσας, 2012)

#### 4.3.5 Κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}$ – Επίδραση του Περιεχόμενου Ποσοστού Λεπτόκοκκων

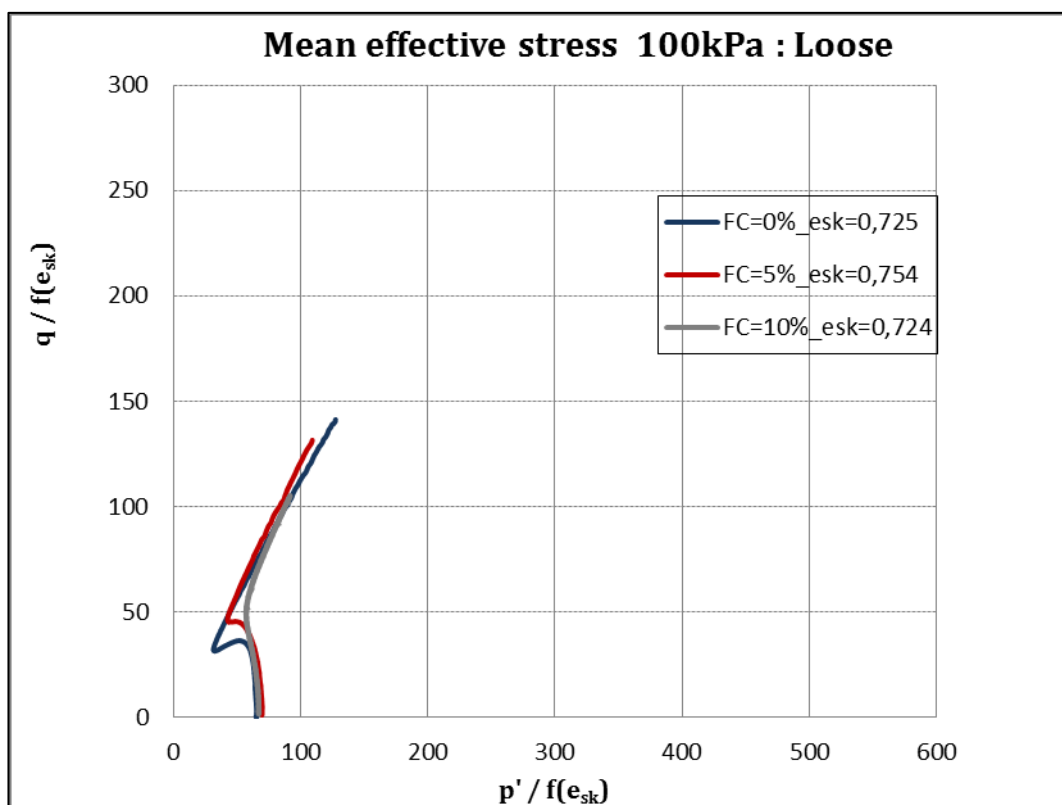
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του Υποκεφαλαίου 4.3.4 κανονικοποιημένες ως προς την συνάρτηση  $f(e_{sk})=e_{sk}^{-1.3}$  (Lo Presti et al. 1997) όπου  $e_{sk}$  είναι ο δείκτης πόρων σκελετού των δοκιμίων πριν από την διάτμηση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως από ερευνητές, όταν θέλουν να εξετάσουν και να συγκρίνουν πειράματα τα οποία παρασκευάζονται με διαφορετικό τρόπο, από διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, διαφορετικές πυκνότητες ή ακόμη και από διαφορετικές χρονολογίες. Παρ' όλα αυτά, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι η κανονικοποίηση αυτή περιγράφει το σύνολο των πειραμάτων της βιβλιογραφίας, αφού υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ώστε να απαλειφθεί η επίδραση της πυκνότητας των δοκιμίων καθώς σε ορισμένες συγκρίσεις υπήρχε μια μικρή διασπορά στους δείκτες πόρων σκελετού των δοκιμίων.

## 4.3.5.1 Τάση Στερεοποίησης 100 kPa

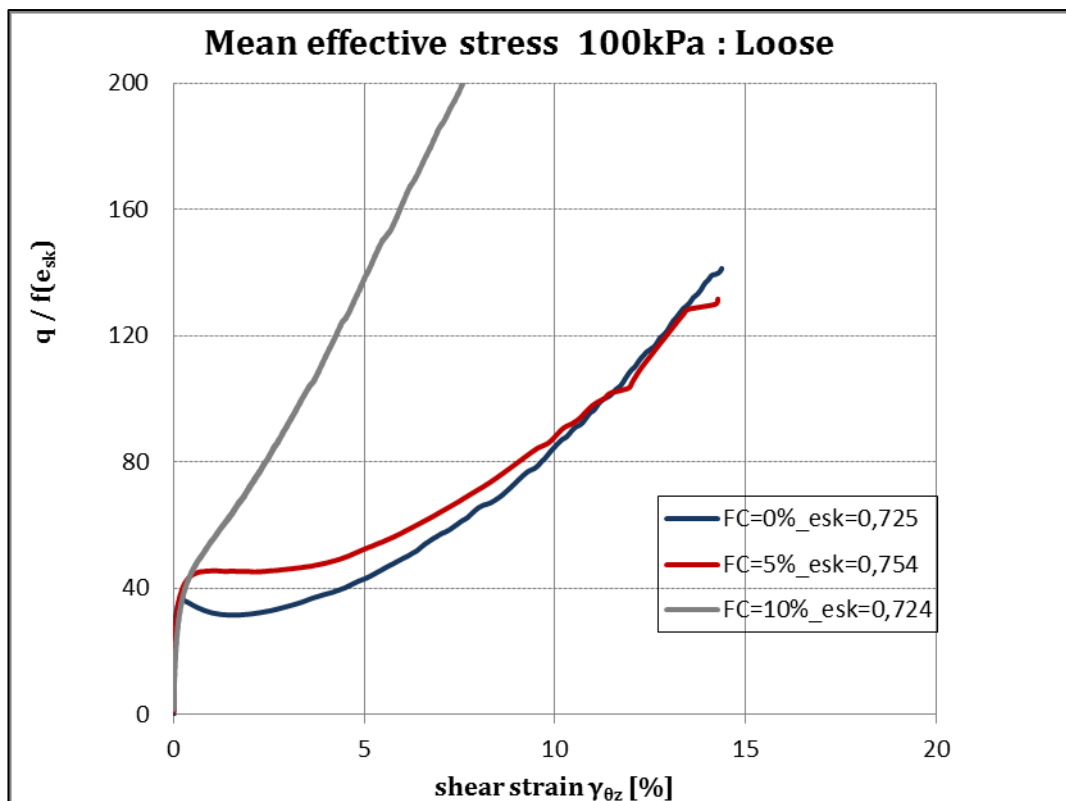
Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.51 έως 4.53 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν χαλαρά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa και σε κοντινές πυκνότητες στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης ( $e_{sk}=0,725$  έως  $e_{sk}=0,877$ ).

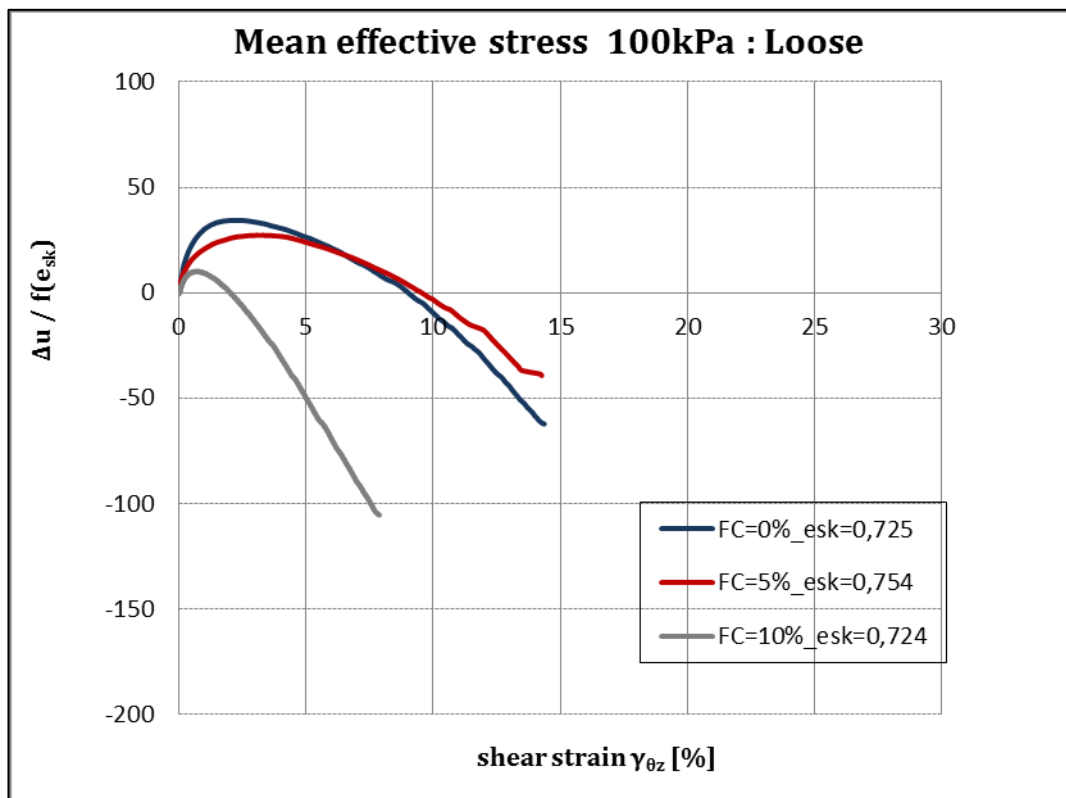


Σχήμα 4.51 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa





Σχήμα 4.52 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

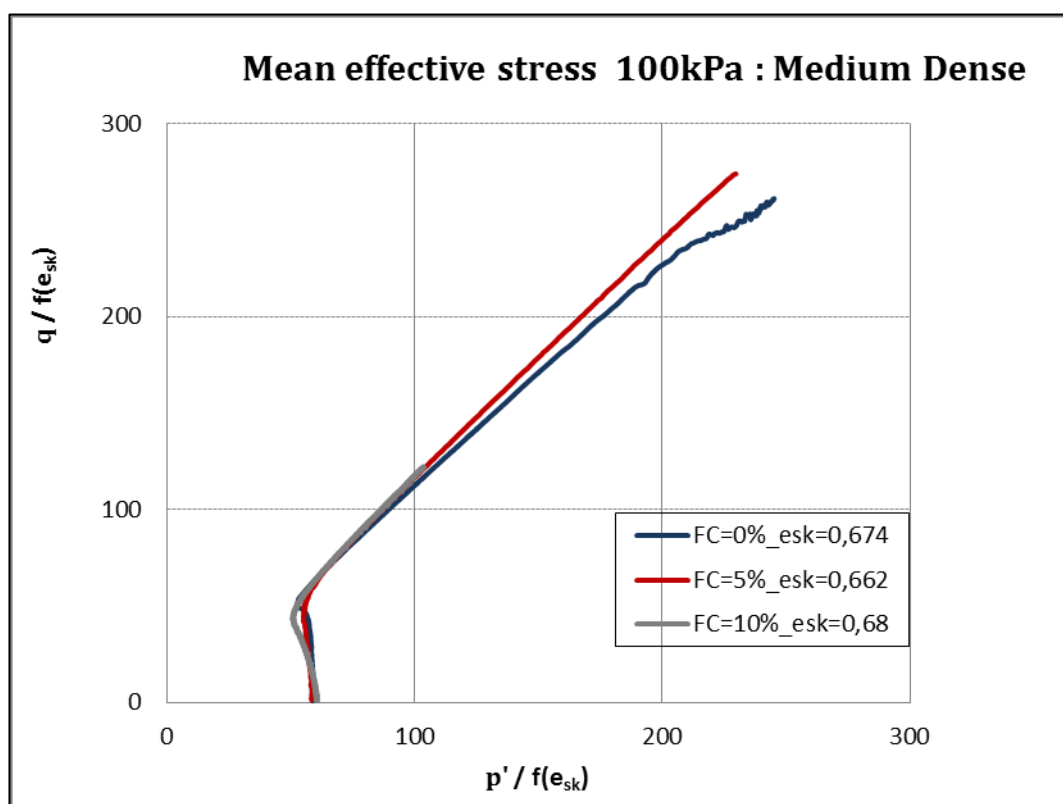


Σχήμα 4.53 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

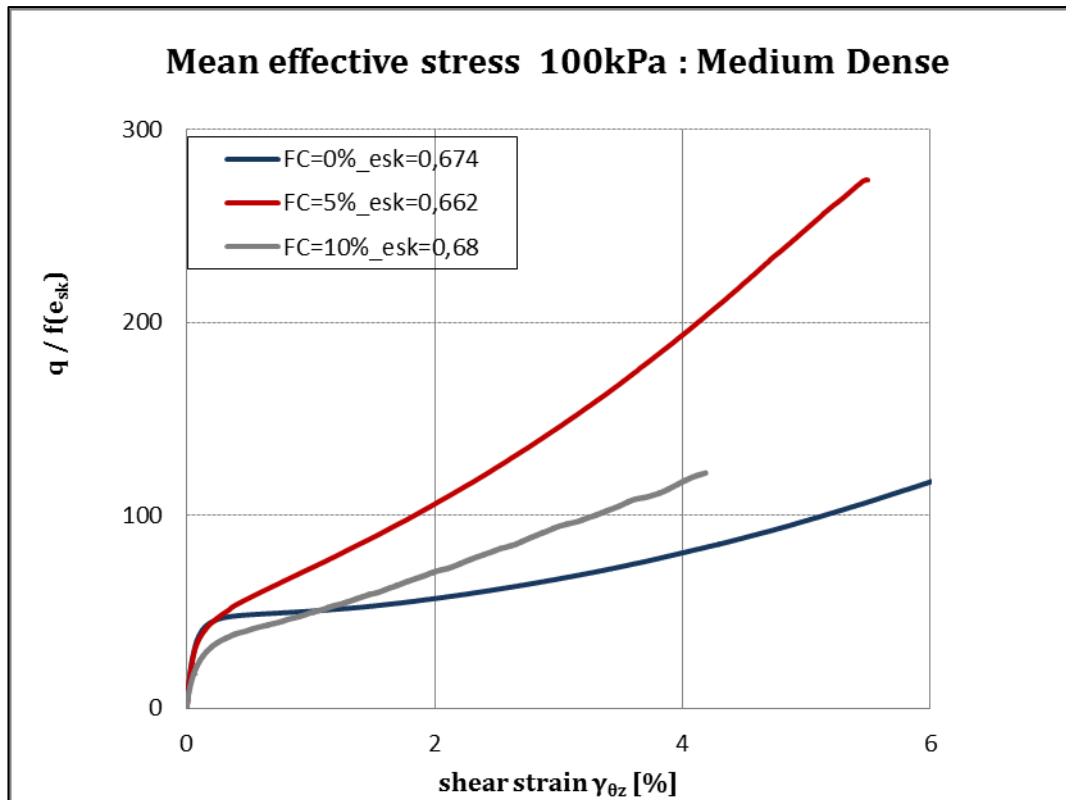
Όπως παρατηρείται από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα της κατηγορίας αυτής οι καμπύλες των τριών δοκιμών ήρθαν πιο κοντά όμως εξάγεται το ίδιο συμπέρασμα πριν την κανονικοποίηση. Το συμπέρασμα είναι ότι η προσθήκη ιλύος βελτιώνει συνεχώς τη συμπεριφορά του δοκιμίου.

### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

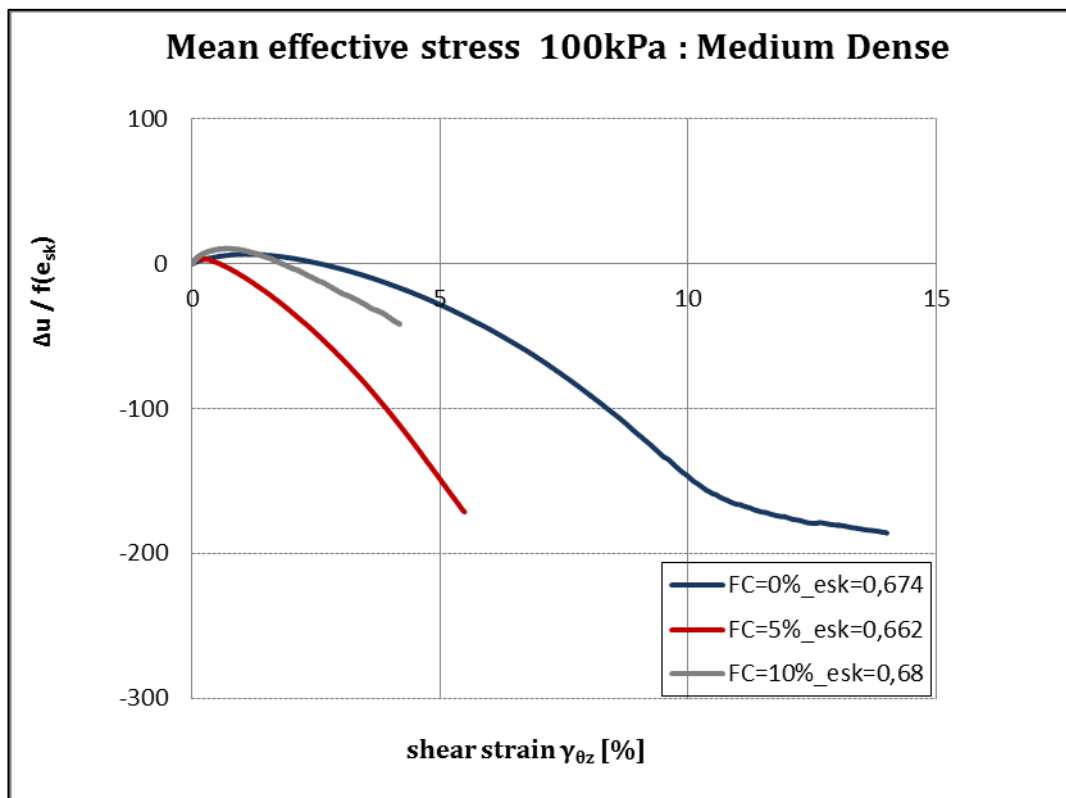
Στα σχήματα 4.54 έως 4.56 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού  $FC=5\%$  και  $10\%$  που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης  $100\text{kPa}$  και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,662$ - $e_{sk}=0,68$ ).



Σχήμα 4.54 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα  $100\text{kPa}$



Σχήμα 4.55 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

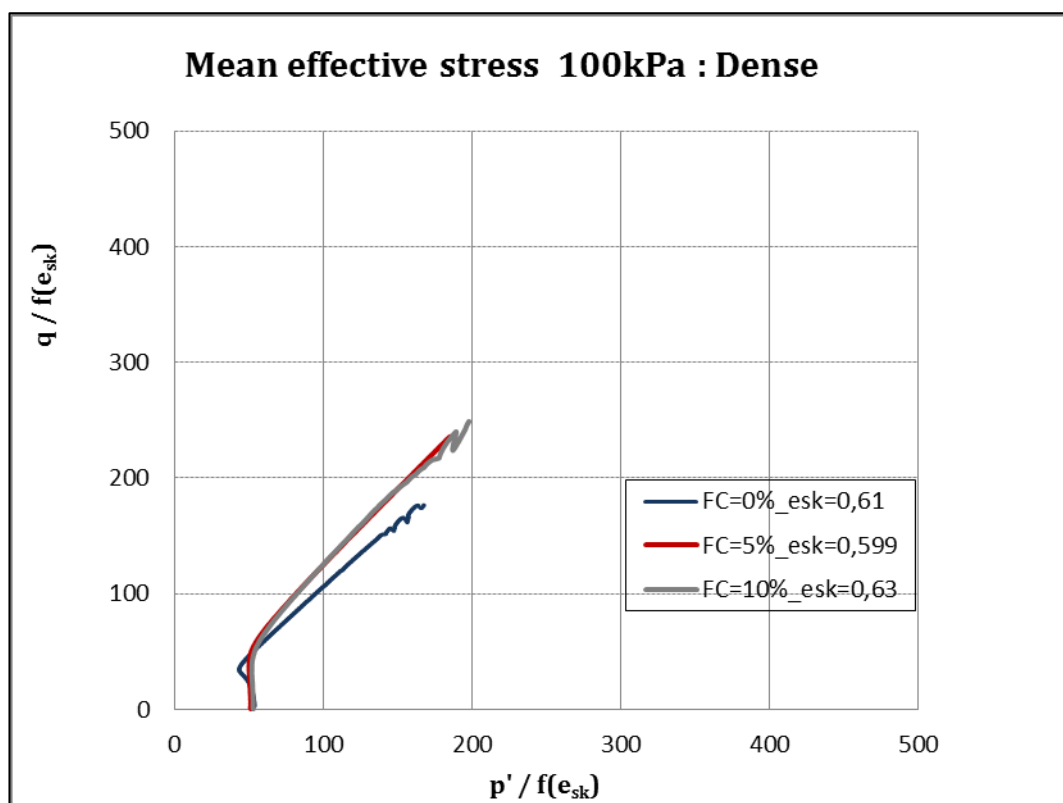


Σχήμα 4.56 Κανονικοποιημένες καμπύλες- Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης για μέσης πυκνότητας δοκίμια,  $p'_0=100kPa$

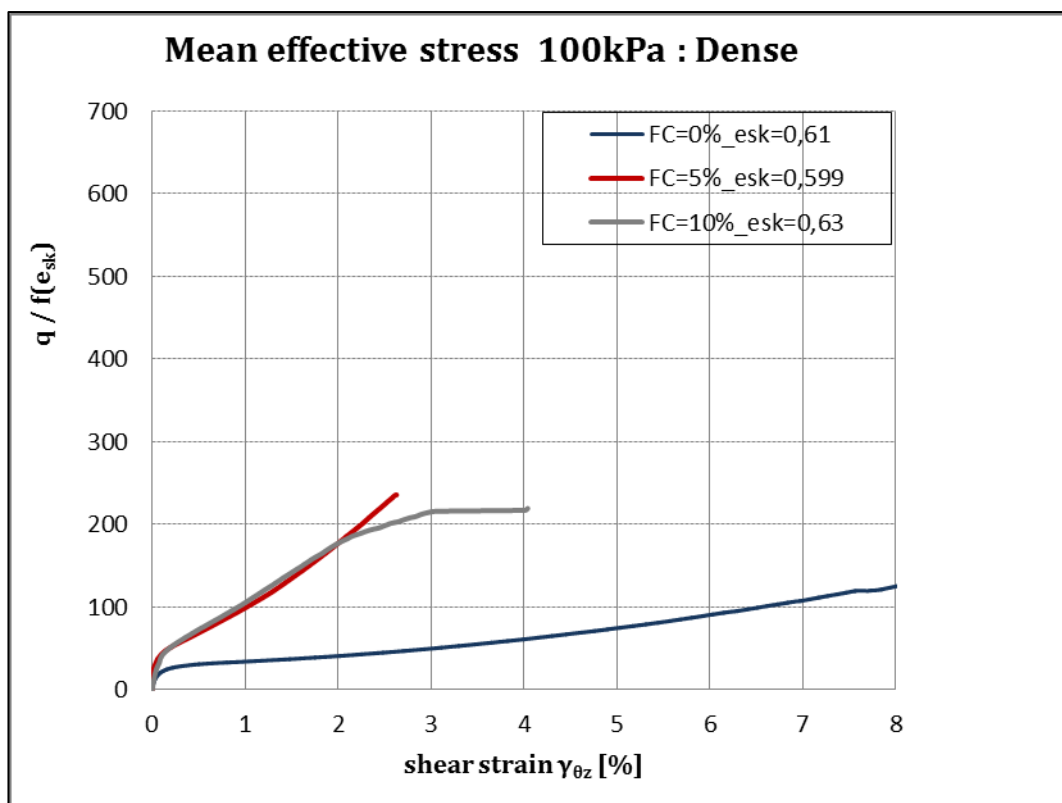
Από τα κανονικοποιημένα Σχήματα 4.54-4.56 παρατηρούμε ότι οι καμπύλες πλησιάζουν. Η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού της τάξης του 5% βελτιώνει τη συμπεριφορά του δοκιμίου όμως περαιτέρω προσθήκη δε παρουσιάζει το ίδιο αποτέλεσμα, καθώς το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10% προσεγγίζει τη συμπεριφορά της καθαρής άμμου.

### Πυκνά Δοκίμια

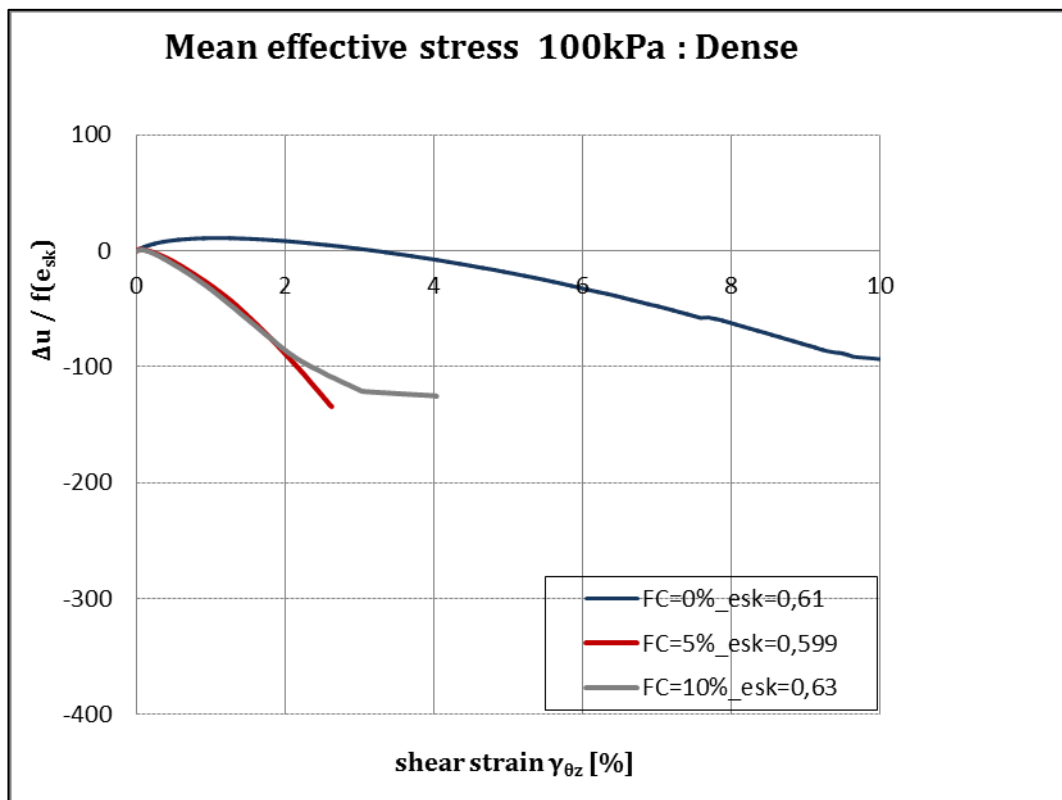
Στα σχήματα 4.57 έως 4.59 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν πυκνά δοκίμια καθαρής άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,599$  και  $e_{sk}=0,63$ ).



Σχήμα 4.57 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 4.58 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



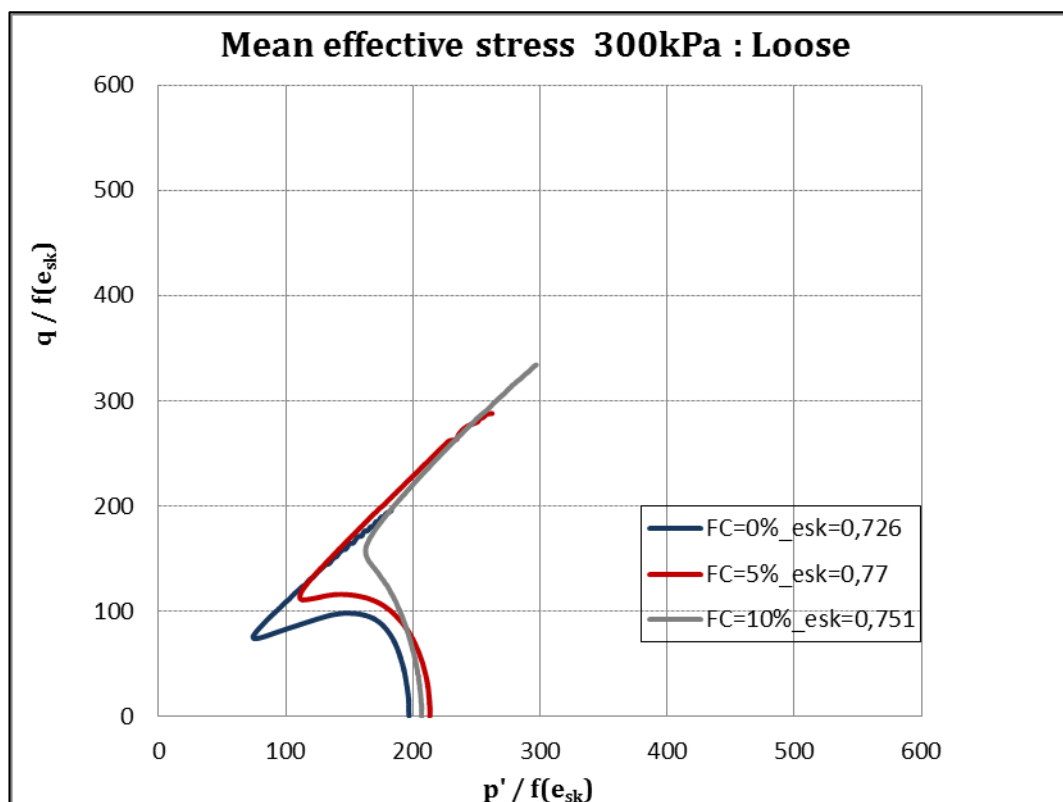
Σχήμα 4.59 Κανονικοποιημένες καμπύλες- Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa

Από το Σχήμα 4.57 βλέπουμε ότι οι διαδρομές τάσεων είναι ίδιες με πριν την κανονικοποίηση με τον δείκτη πόρων σκελετού. Από το Σχήμα 4.58 παρατηρείται, όπως και από το μη κανονικοποιημένο σχήμα, ότι το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5% έχει συνεχώς αυξανόμενες αντοχές.

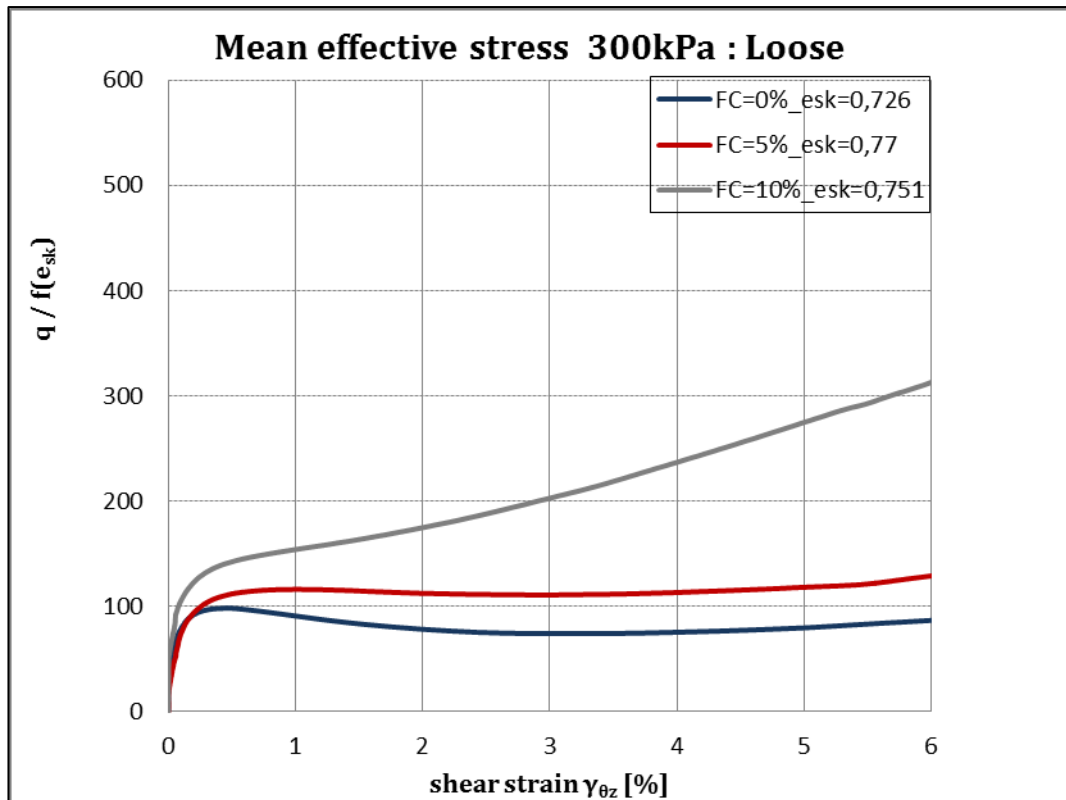
#### 4.3.5.2 Τάση Στερεοποίησης 300 kPa

### Χαλαρά Δοκίμια

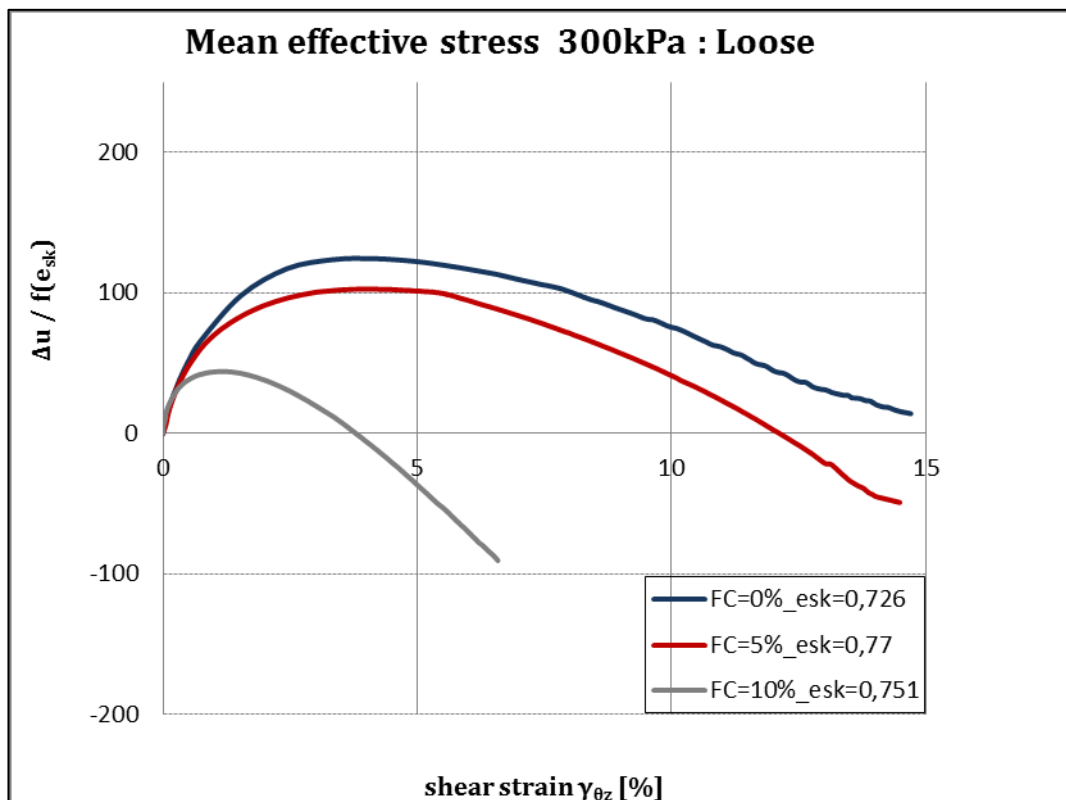
Στα Σχήματα 4.60 έως 4.62 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν χαλαρά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,726$  έως  $e_{sk}=0,77$ ).



Σχήμα 4.60 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.61 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

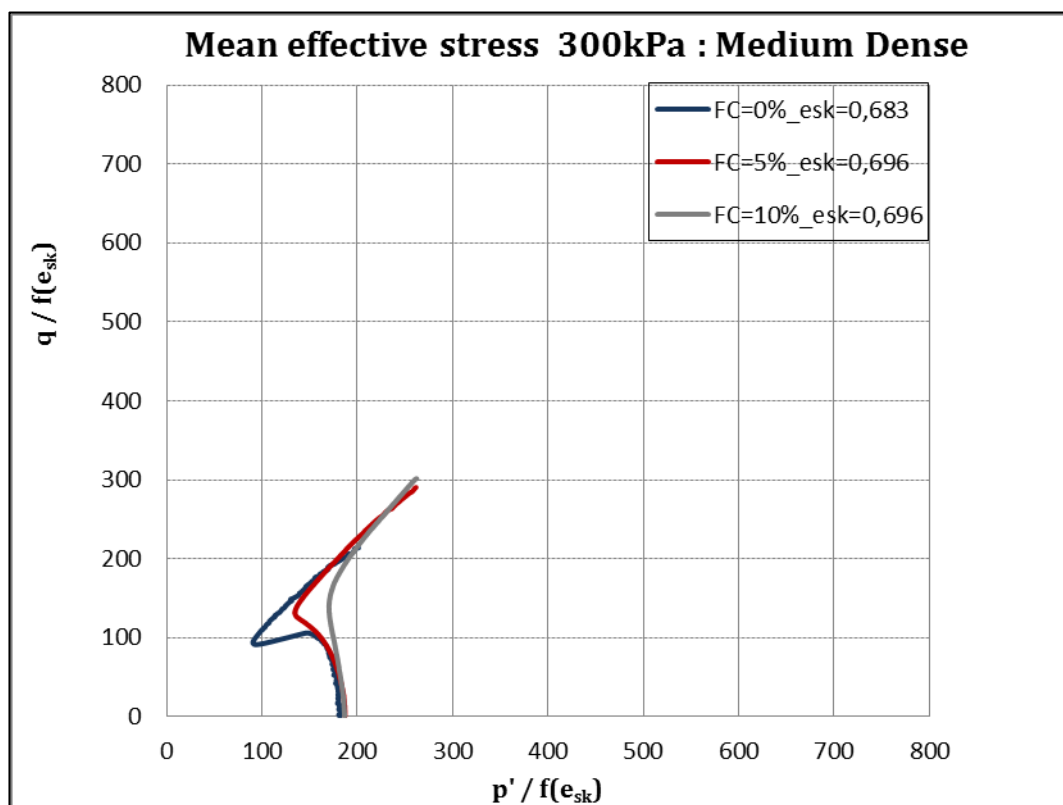


Σχήμα 4.62 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για χαλαρά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

Από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των τριών δοκιμών ήρθαν πιο κοντά, το συμπέρασμα που εξάγεται όμως είναι το ίδιο, δηλαδή ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού κάνει τη συμπεριφορά του δοκιμίου πιο διαστολική.

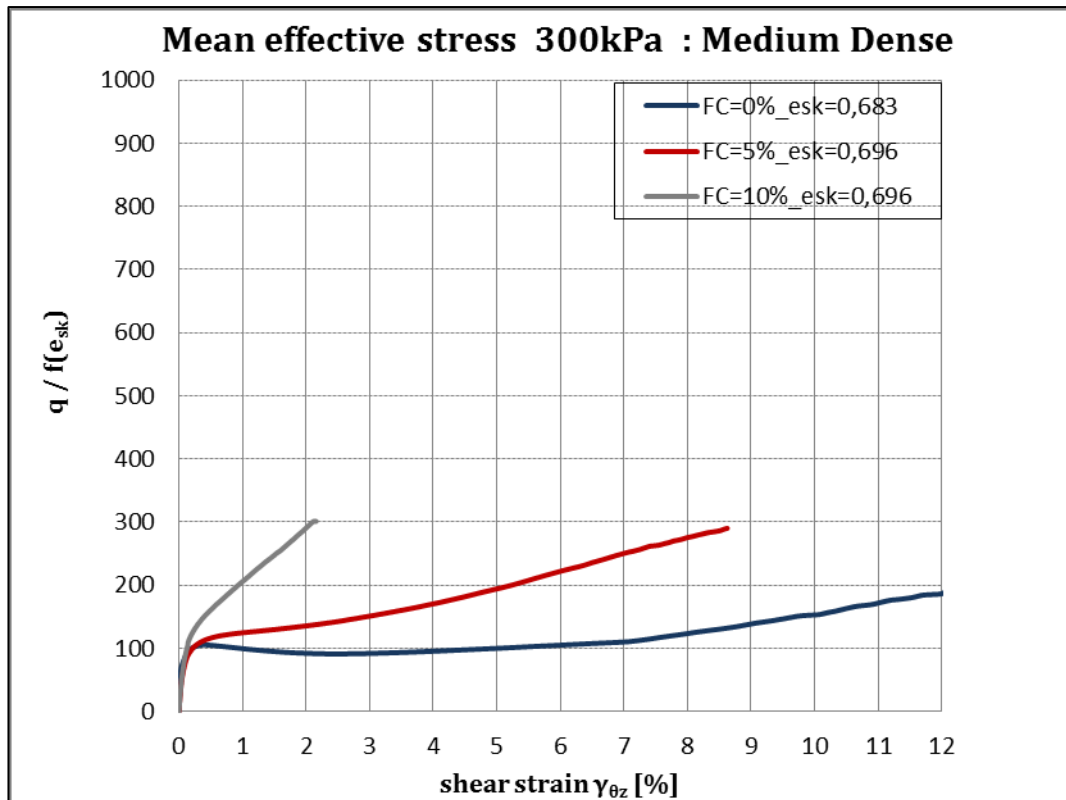
### Μέσης Πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.63 έως 4.65 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,683$  έως  $e_{sk}=0,696$ ).

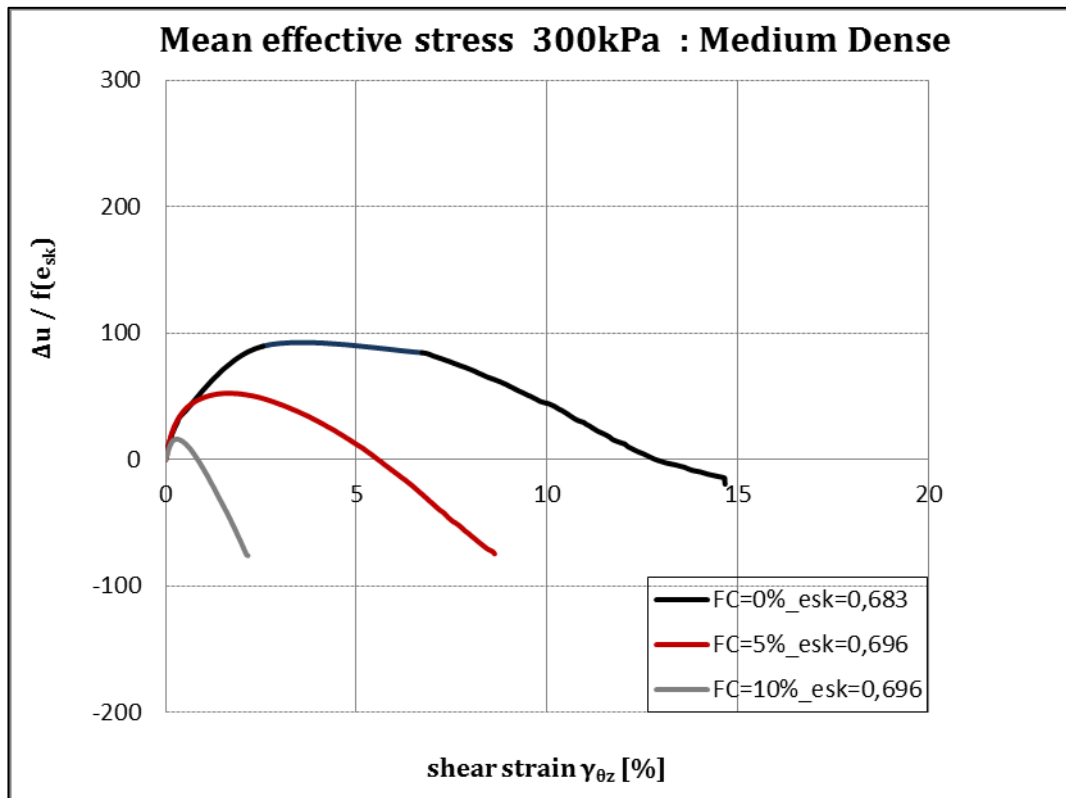


Σχήμα 4.63 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa





Σχήμα 4.64 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $e_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

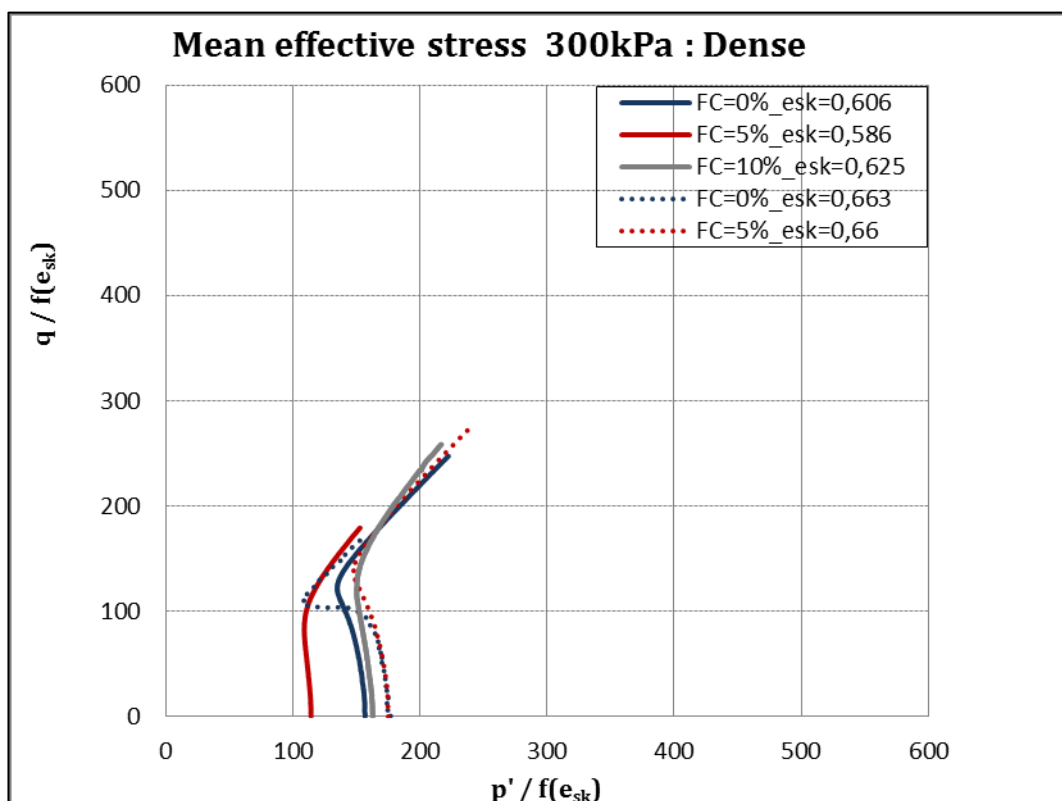


Σχήμα 4.65 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για μέσης πυκνότητας δοκίμια,  $p'_0 = 300\text{kPa}$

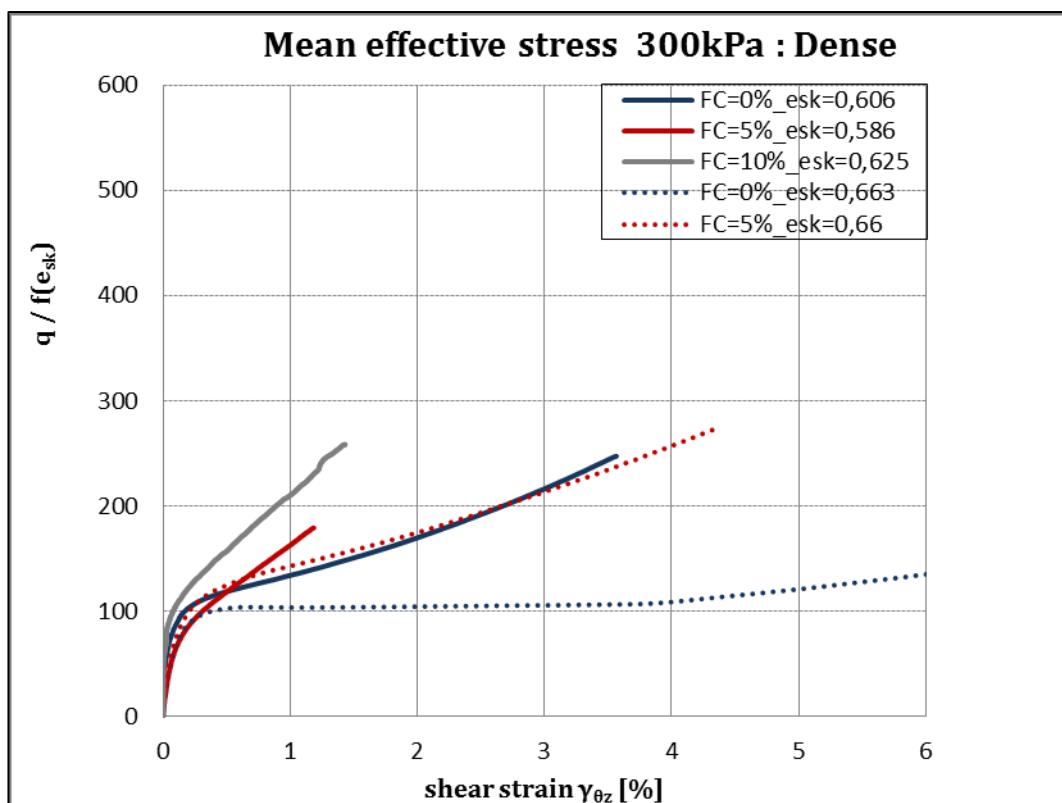
Από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των τριών δοκιμών ήρθαν πιο κοντά. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.63 οι διαδρομές τάσεων έχουν την ίδια μορφή με το δοκίμιο καθαρής άμμου να είναι πιο συστολικό και το δοκίμιο αμμοιλύος 10% να είναι πιο διαστολικό. Στο Σχήμα 4.64 παρατηρούμε ότι οι καμπύλες ήρθαν πιο κοντά αλλά το συμπέρασμα είναι το ίδιο δηλαδή ότι όσο προσθέτω λεπτόκοκκο υλικό τόσο μεγαλύτερες αντοχές αναπτύσσει το δοκίμιο. Στο Σχήμα 4.65 παρατηρούμε ότι η καμπύλη του δοκιμίου καθαρής άμμου πλησιάζει τις άλλες δύο καμπύλες αλλά ακόμα είναι το πιο συστολικό από τα άλλα δύο.

### Πυκνά Δοκίμια

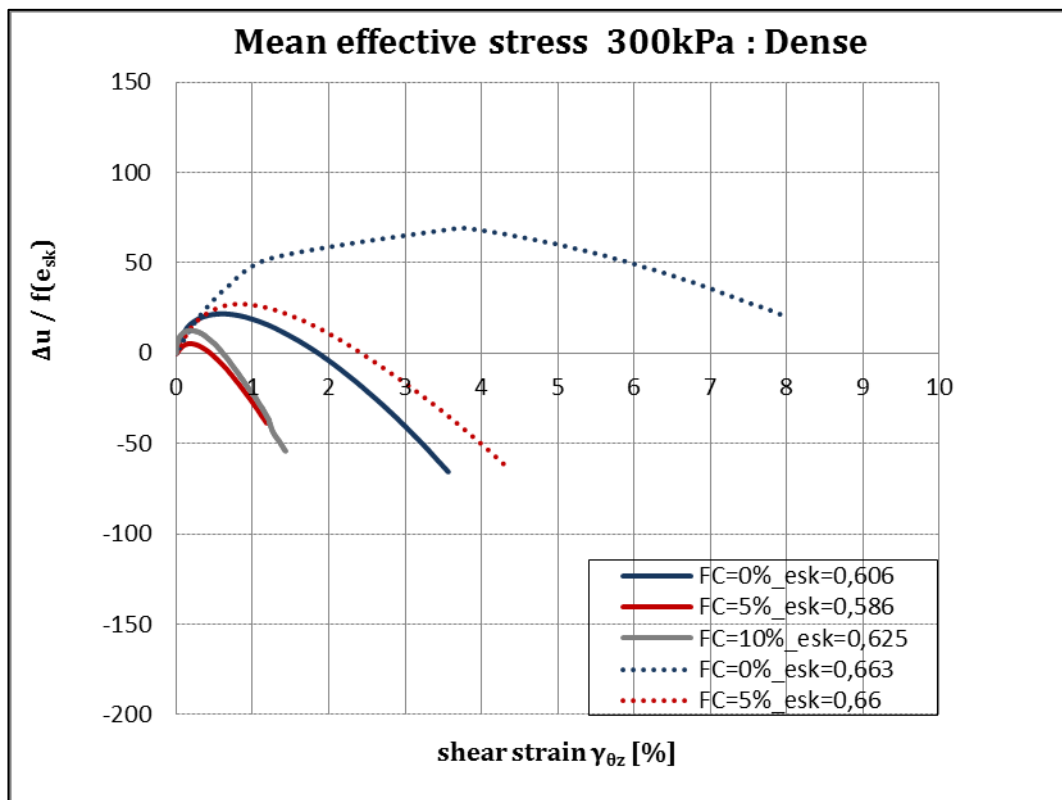
Στα Σχήματα 4.66 έως 4.68 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένα διαγράμματα που αφορούν πυκνά δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού FC=5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa και με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,586$  έως  $e_{sk}=0,663$ ).



Σχήμα 4.66 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.67 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πικνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 4.68 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για πικνά δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa

Από το Σχήμα 4.66 βλέπουμε ότι το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5% με  $e_{sk}=0,586$  απομακρύνθηκε διότι έχει αρκετά πυκνότερο δείκτη πόρων από τα δοκίμια που γίνεται η σύγκριση. Στα Σχήματα 4.67 και 4.68 οι καμπύλες ήρθαν πιο κοντά όμως το συμπέρασμα που διεξάγεται είναι ίδιο. Για την πρώτη σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων  $e_{sk}=0,586-0,625$  παρατηρούμε ότι προσθέτοντας λεπτόκοκκο υλικό η συμπεριφορά του δοκιμίου είναι πιο διαστολική. Όμοια παρατηρούμε και ότι το δοκίμιο με ιλυώδη άμμο 5% και  $e_{sk}=0,66$  είναι πιο διαστολικό και αναπτύσσει μεγαλύτερες αντοχές από το δοκίμιο καθαρής άμμου με  $e_{sk}=0,663$ .

Ένα συγκεντρωτικό συμπέρασμα που διεξάγεται μέσω της κανονικοποίησης με τον δείκτη πόρων σκελετού είναι ότι οι πυκνότητες είναι παρόμοιες για κάθε ομάδα σύγκρισης καθώς τα συμπεράσματα πριν και μετά τη κανονικοποίηση παραμένουν ίδια.

	ΧΑΛΑΡΑ	ΜΕΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ	ΠΥΚΝΑ
<u>100kPa</u>			
(1)		$e_{sk}=0.685-0.696$	$e_{sk}=0.588-0.590$
		<b>0% &lt; 10% &lt; 5%</b>	<b>10% &lt; 0% ≤ 5%</b>
(2)		$e_{sk}=0.610-0.680$	
		<b>0% &lt; 15% &lt; 5%</b>	
(3)	$e=0.780-0.790$		$e=0.590-0.670$
	<b>0% &lt; 10% ≤ 5%</b>		<b>10% &lt; 0% ≤ 5%</b>
(5)	$e_{sk}=0,719-0,725$		
	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>		
(6)	$e_{sk}=0,724-0,754$	$e_{sk}=0,662-0,68$	$e_{sk}=0,599-0,63$
	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 10% &lt; 5%</b>	<b>0% &lt; 5% ≈ 10%</b>
<u>300kPa</u>			
(1)	$e_{sk}=0.714-0.724$	$e_{sk}=0.677-0.705$	
	<b>0% ≤ 5% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 5% ≤ 10%</b>	
(2)		$e_{sk}=0.660-0.710$	$e_{sk}=0,55-0,59$
		<b>0% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 10%</b>
(3)	$e=0.760-0.770$		
	<b>0% ≤ 10% &lt; 5%</b>		
(4)	$e_{sk}=0.680-0.770$		
	<b>0% &lt; 5% &lt; 10% &lt; 15%</b>		
(5)		$e_{sk}=0,697-0,718$	$e_{sk}=0,644-0,651$
		<b>0% &lt; 10% &lt; 5%</b>	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>
(6)	$e_{sk}=0,726-0,77$	$e_{sk}=0,683-0,696$	$e_{sk}=0,586-0,625$
	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 5% &lt; 10%</b>	<b>0% &lt; 5% ≈ 10%</b>
(1) παρούσα διπλωματική-τριαξονικά πειράματα, (2) Παπαδόπουλος & Πολυδώρου (2015), (3) Γεωργιάννου & Σάκης (2010), (4) Salgado et al. (2010), (5) Γκιούσας (2012), (6) παρούσα διπλωματική –πειράματα στρεπτικής διάτμησης			

Πίνακας 4.2 Αποτελέσμα μονοτονικών και τριαξονικών πειραμάτων

Όσον αφορά τα μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100 kPa, τόσο στα τριαξονικά όσο και στα μονοτονικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Ε.Μ.Π., παρατηρούμε ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού έως 5% δρα ευεγερτικά στη συμπεριφορά του δοκιμίου, περαιτέρω δε αύξηση δεν έχει το ίδιο αποτέλεσμα. Επίσης, τα μείγματα άμμου ιλύος έχουν πιο διαστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου.

Από τον Πίνακα 4.2 τα πυκνά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100 kPa και καταπονήθηκαν υπό τριαξονική θλίψη είχαν πυκνότερη δομή από τα δοκίμια της ίδιας κατηγορίας που καταπονήθηκαν μονοτονικά υπό στρεπτική διάτμηση. Έτσι ενώ στα τριαξονικά η προσθήκη ιλύος της τάξης του 10% δημιουργεί πιο συστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου, στα πειράματα στρεπτικής διάτμησης το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 10% είναι πιο διαστολικό από το δοκίμιο καθαρής άμμου.

Στην κατηγορία των χαλαρών δοκιμίων που στερεοποιήθηκαν στα 300 kPa το συμπέρασμα που διεξήχθη τόσο από τα τριαξονικά όσο και από τα πειράματα στρεπτικής διάτμησης είναι ίδιο, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού οδηγεί σε πιο διαστολική συμπεριφορά.

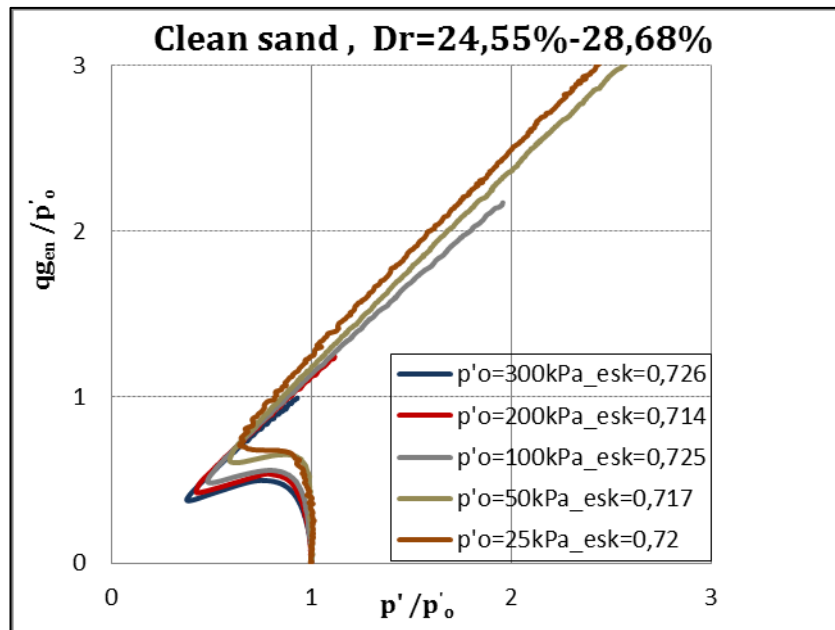
Αναφορικά με τα μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε μέση ενεργό τάση 300 kPa, το συμπέρασμα που διεξάγεται από τις δύο διαφορετικές καταπονήσεις είναι ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού δρα ευεγερτικά στη συμπεριφορά της καθαρής άμμου.

### 4.3.6 Επίδραση Της Τάσης Στερεοποίησης

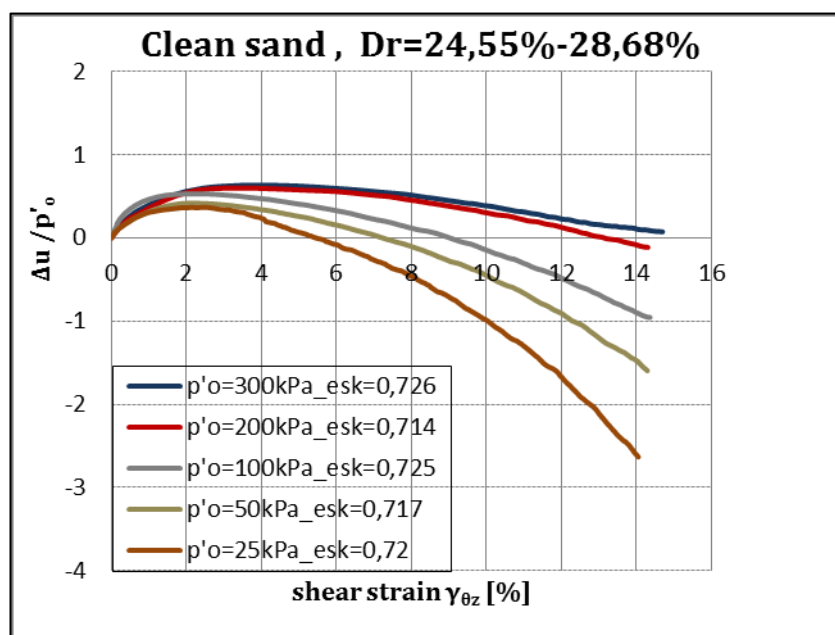
#### 4.3.6.1 Καθαρή Άμμος – Ποσοστό Λεπτόκοκκων 0%

#### Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.69 και 4.70 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια άμμου με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,714$  έως  $e_{sk}=0,726$ ).



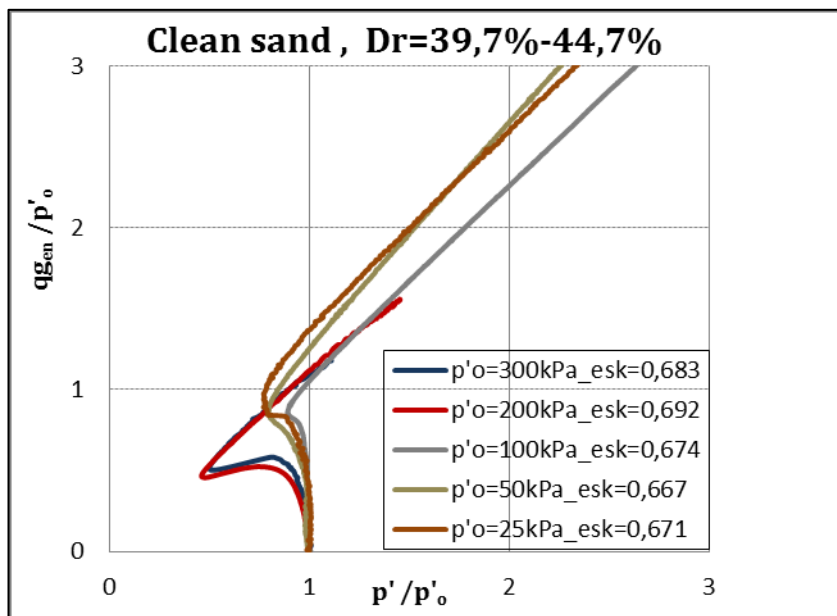
Σχήμα 4.69 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου



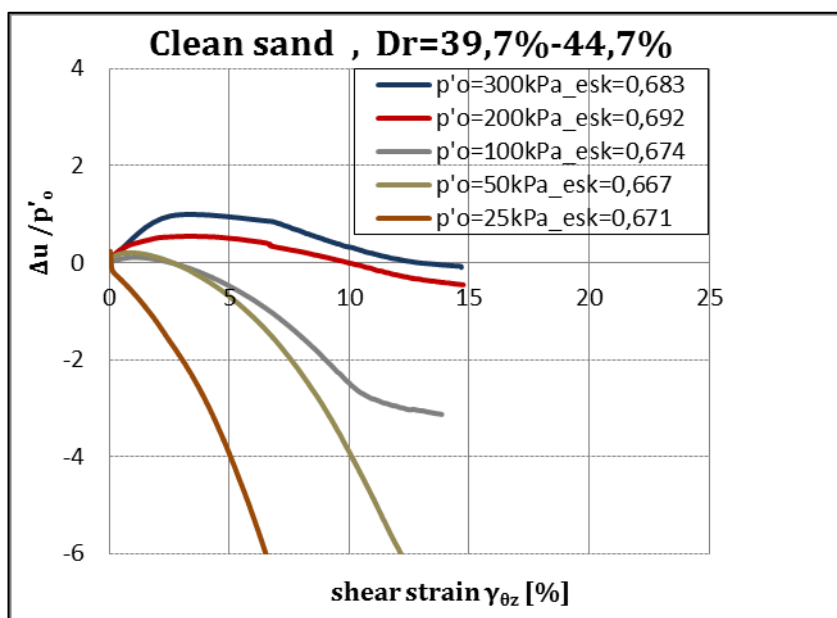
Σχήμα 4.70 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου

### Μέσης πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.71 και 4.72 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,667$  και  $e_{sk}=0,692$ ) που έχουν στερεοποιηθεί σε διαφορετικές αρχικές τάσεις.



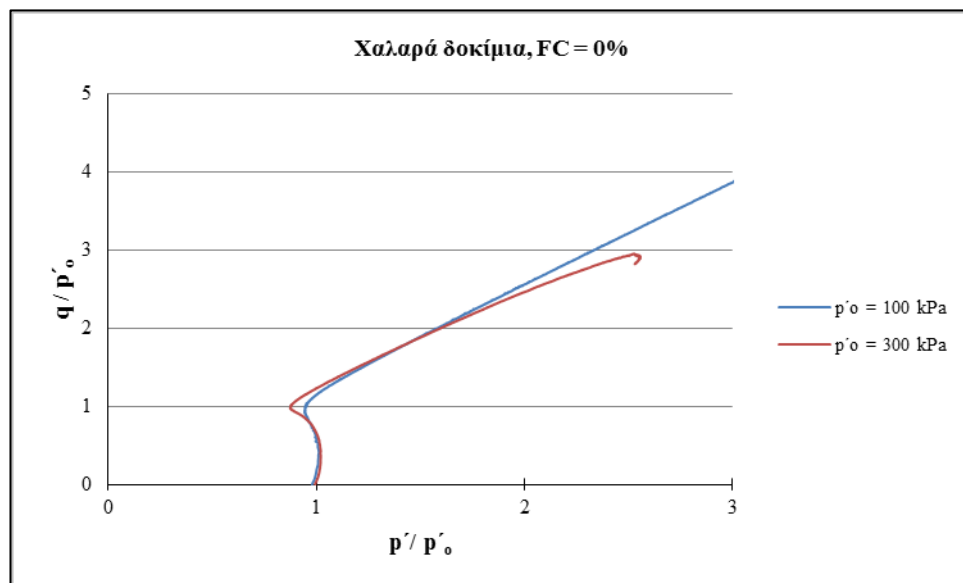
Σχήμα 4.71 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου



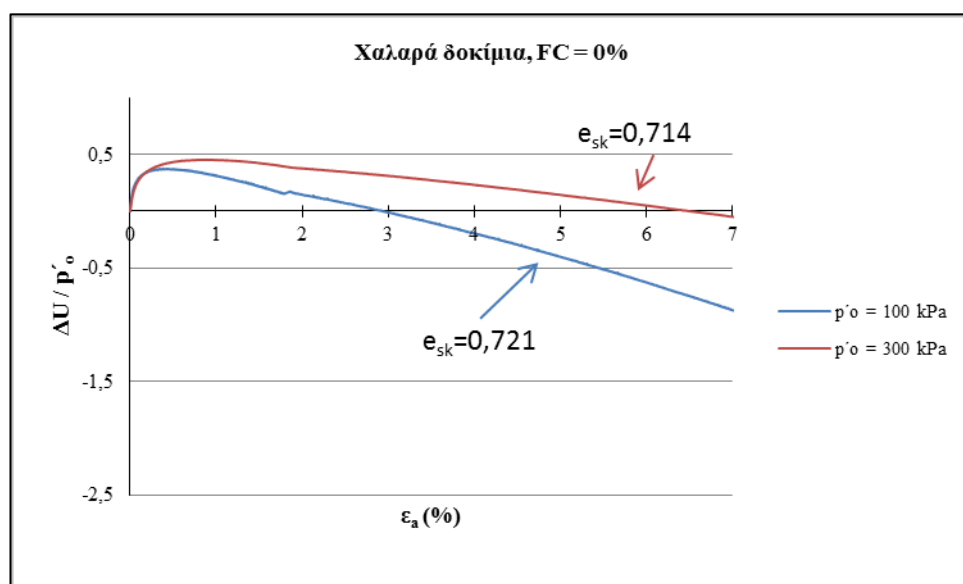
Σχήμα 4.72 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου

Τόσο στα χαλαρά όσο και στα μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου παρατηρούμε ότι όσο μικρότερη η τάση στερεοποίησης του δοκιμίου τόσο πιο διαστολική συμπεριφορά αυτό έχει όπως παρουσιάζεται και στο Υποκεφάλαιο 3.3.5 όπου παρουσιάζονται τα τριαξονικά πειράματα.

Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Γκιούσας, 2012) από τριαξονικά πειράματα. όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.73 και 4.74 που αναφέρονται σε χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα, το δοκίμιο καθαρής άμμου που στερεοποιήθηκε στα 100kPa είναι πιο διαστολικό.



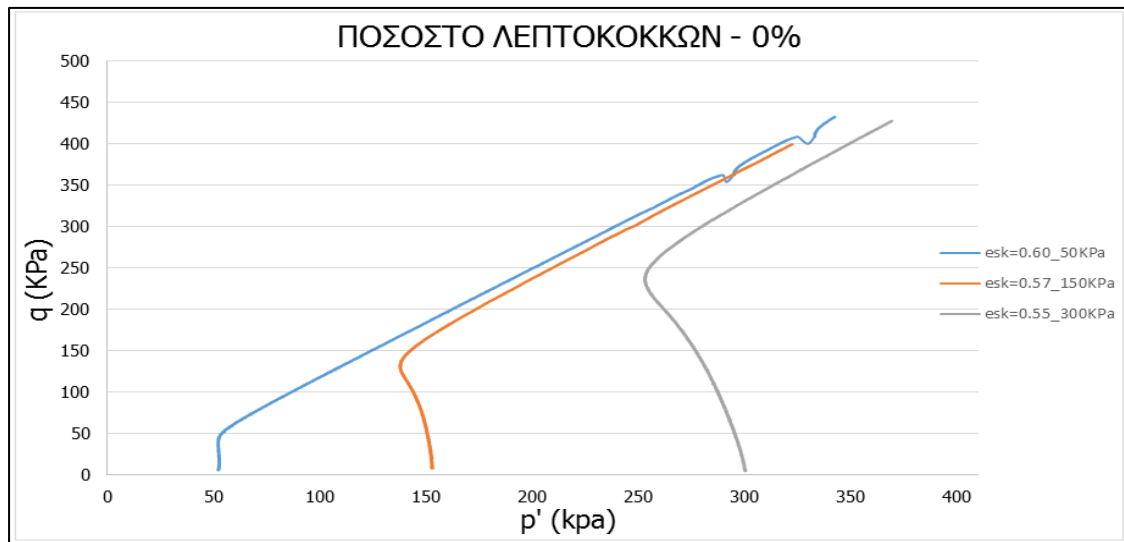
Σχήμα 4.73 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  χαλαρών δοκιμών καθαρής άμμου



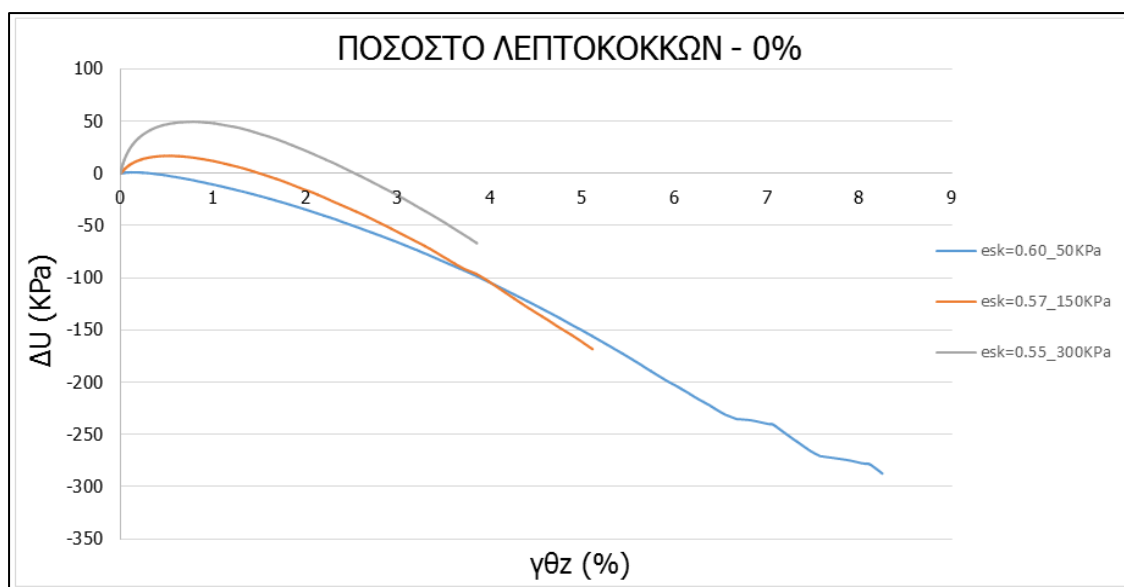
Σχήμα 4.74 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διαμητική παραμόρφωση χαλαρών δοκιμών καθαρής άμμου



Όσον αφορά τα μέσης πυκνότητας δοκίμια, οι Παπαδόπουλος και Πολυδώρου (2015) μέσα από μονοτονικά πειράματα όπως παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.75 και 4.76. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα όσο μεγαλύτερη η τάση στερεοποίησης τόσο πιο συστολική συμπεριφορά του δοκιμίου έχω ανεξαρτήτου πυκνότητας.



Σχήμα 4.75 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$  πυκνών δοκιμών καθαρής άμμου

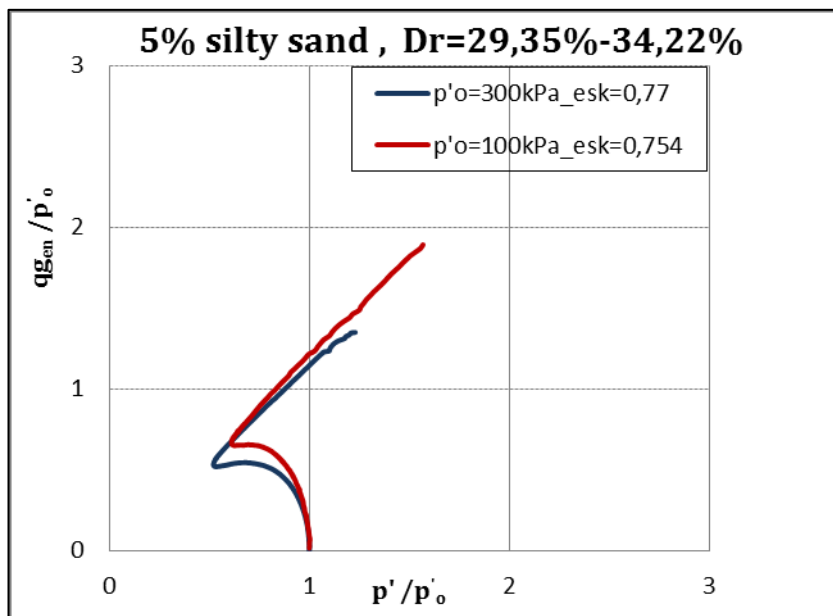


Σχήμα 4.76 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση πυκνών δοκιμών καθαρής άμμου

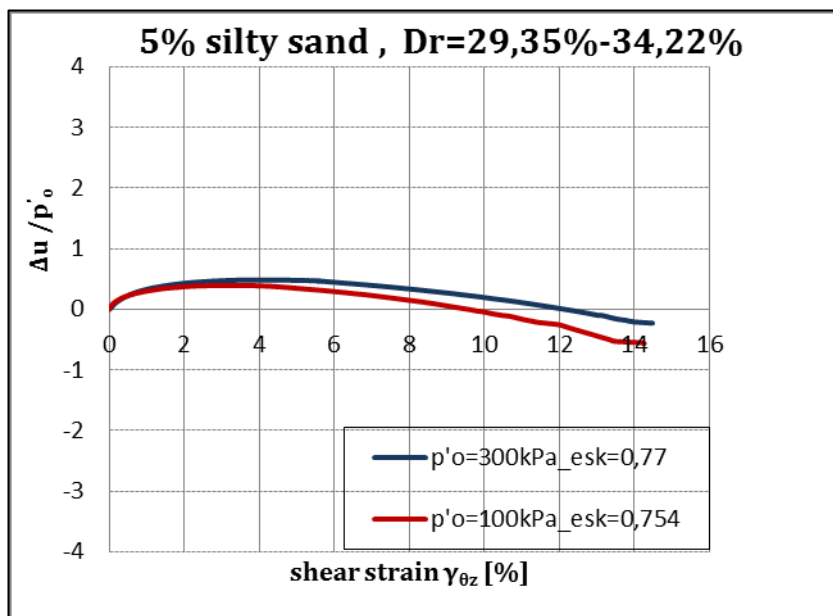
## 4.3.6.2 Ποσοστό Λεπτόκοκκων 5%

**Χαλαρά Δοκίμια**

Στα Σχήματα 4.77 και 4.78 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,754$  εως  $e_{sk}=0,77$ ).



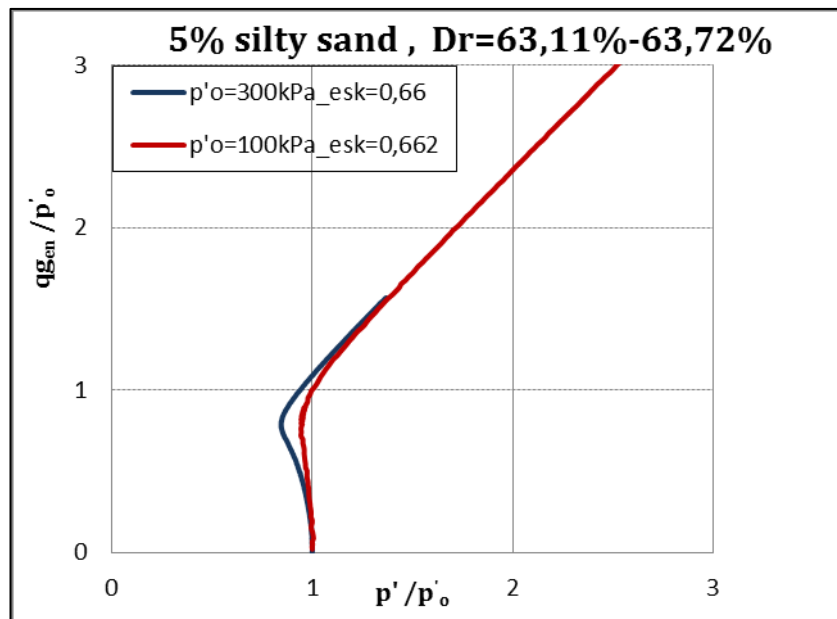
Σχήμα 4.77 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%



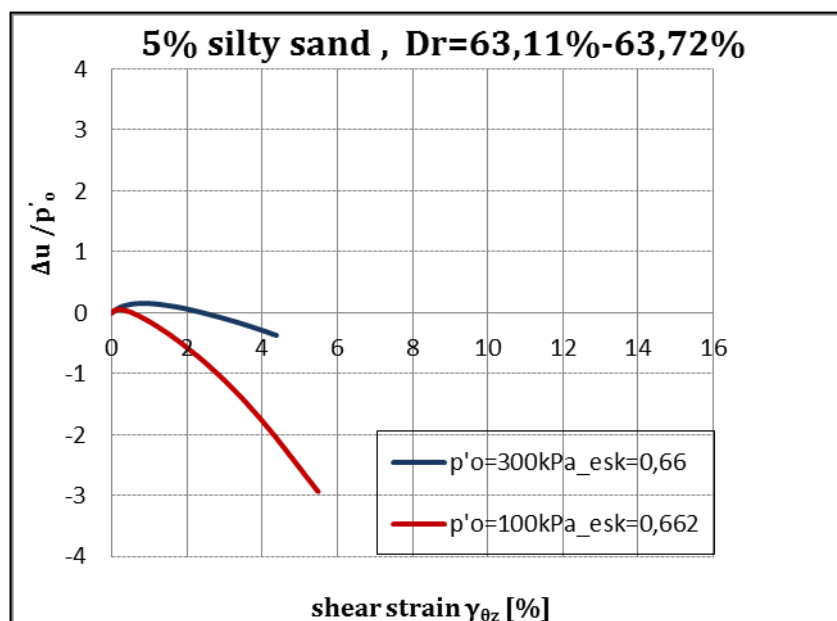
Σχήμα 4.78 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%

### Μέσης πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.79 και 4.80 παρουσιάζονται μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,66$  και  $e_{sk}=0,662$ ).



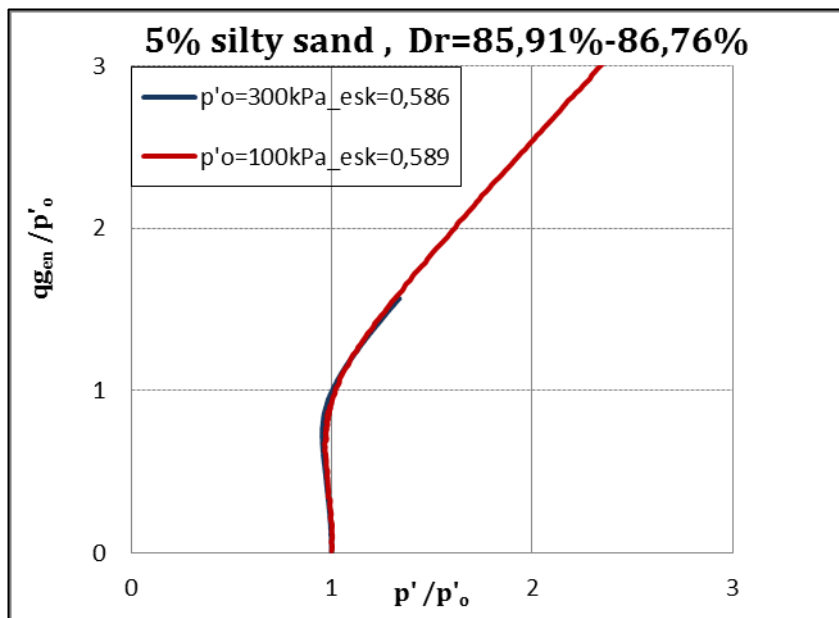
Σχήμα 4.79 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσεως μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%



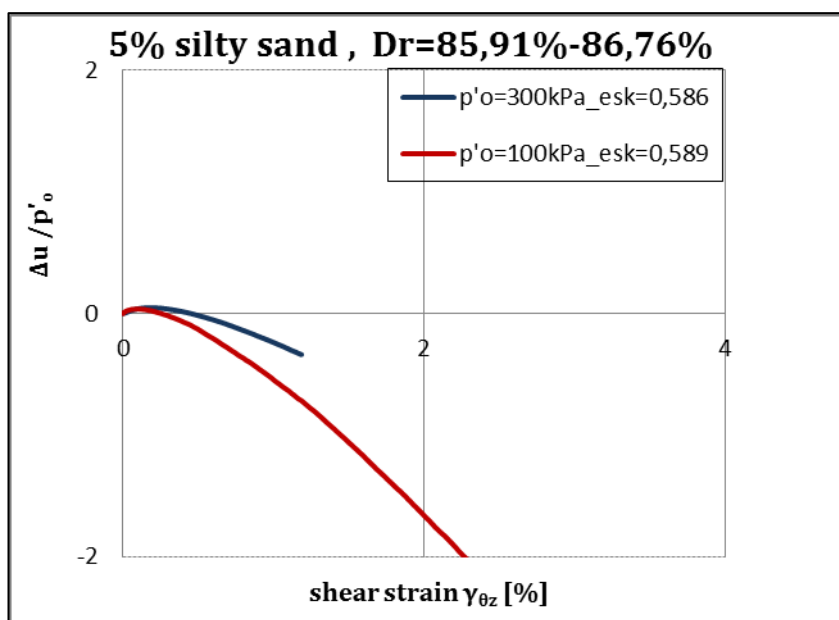
Σχήμα 4.80 Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσεως της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%

### Πυκνά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.81 και 4.82 παρουσιάζονται πυκνά δοκίμια άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,586$  και  $e_{sk}=0,589$ ).



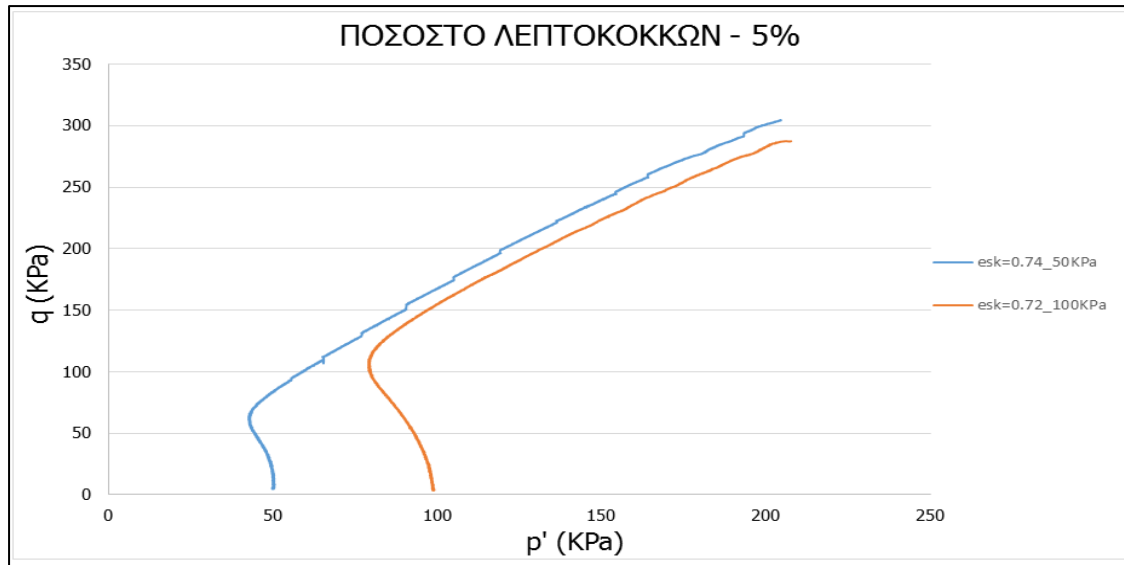
Σχήμα 4.81 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%



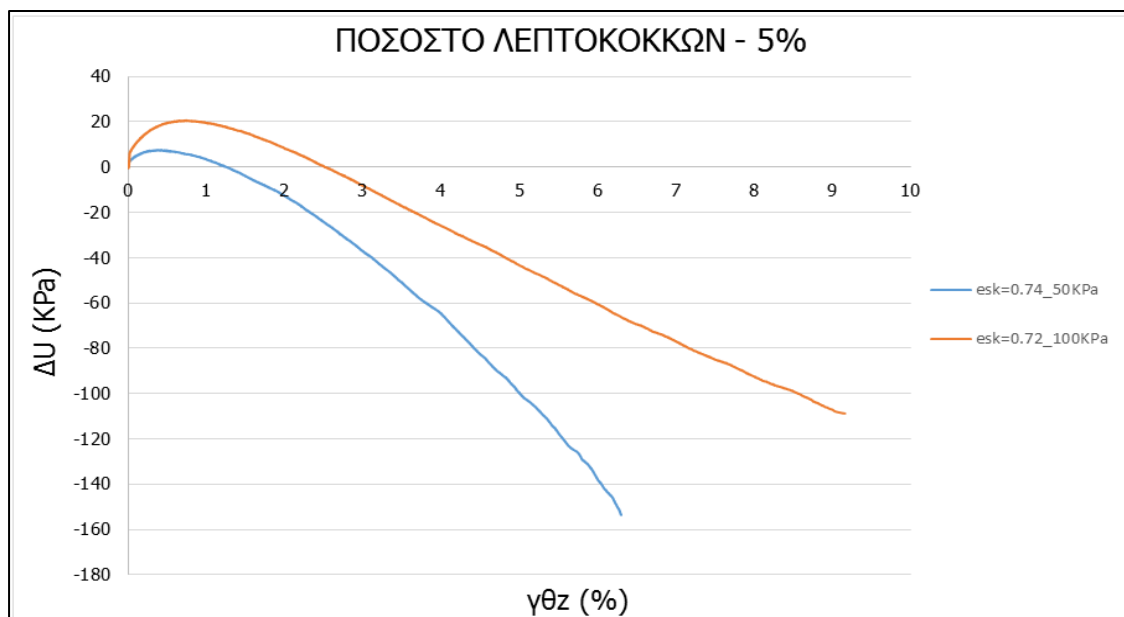
Σχήμα 4.82 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%

Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 4.77-4.82 που αφορούν Χαλαρά, Μέσης πυκνότητας και Πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%, το δοκίμιο που έχει στερεοποιηθεί στα 100kPa έχει πιο διαστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο που έχει στερεοποιηθεί στα 300kPa.

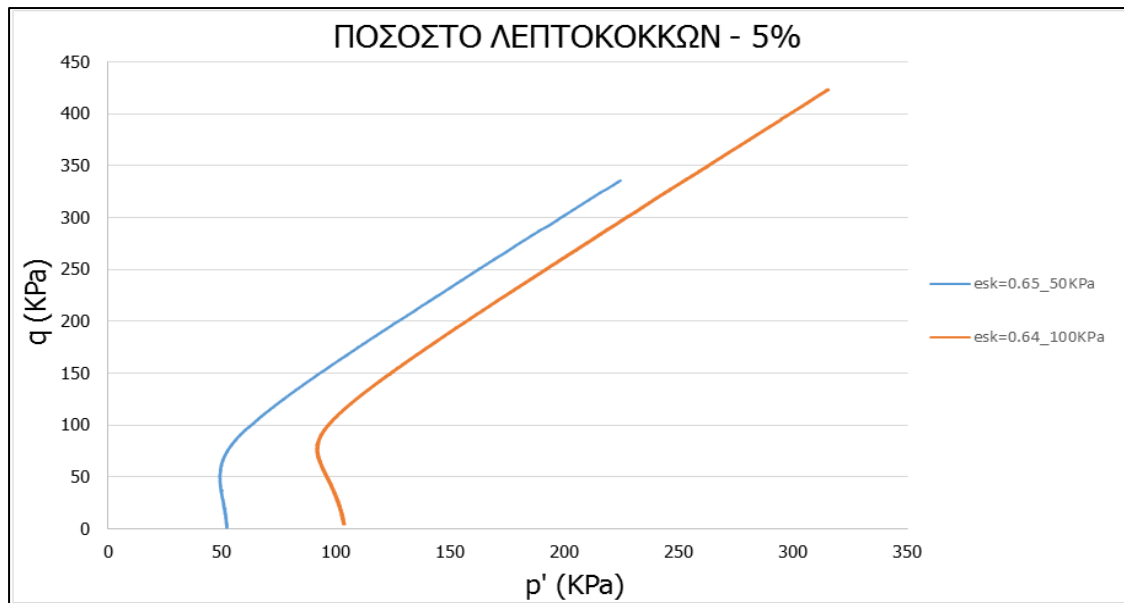
Σε όμοια συμπεράσματα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Παπαδόπουλος και Πολυδώρου, 2015) όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.83-4.84 και 4.85-4.86 που αφορούν χαλαρά και μέσης πυκνότητας δοκίμια αντίστοιχα.



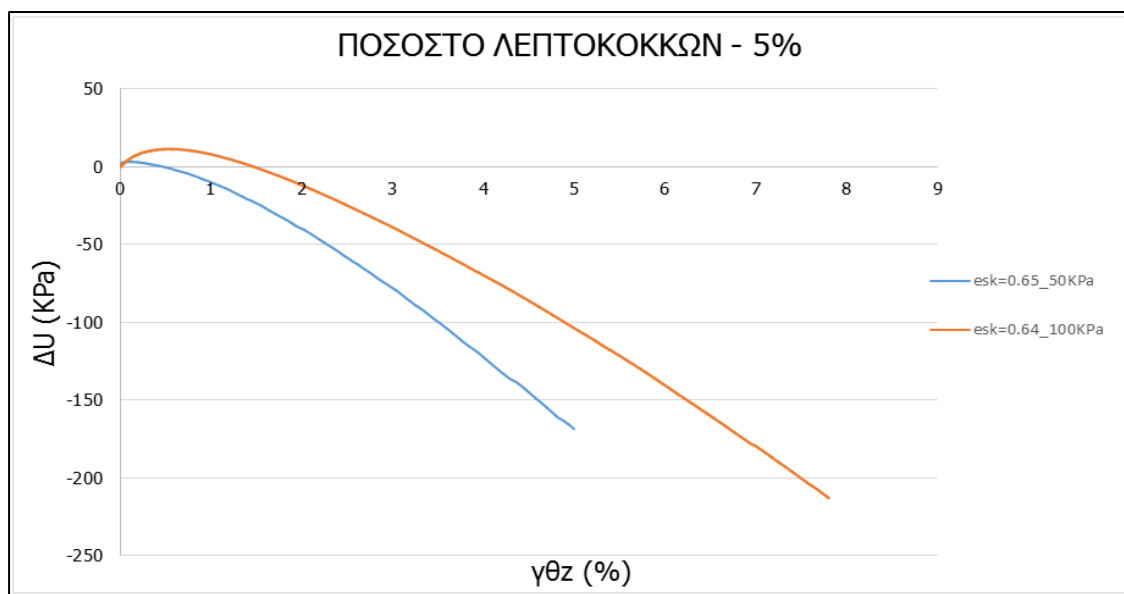
Σχήμα 4.83 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση χαλαρών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 5%



Σχήμα 4.84 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση χαλαρών δοκιμίων μίγματος άμμου –ιλύος 5%



Σχήμα 4.85 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση πυκνών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 5%

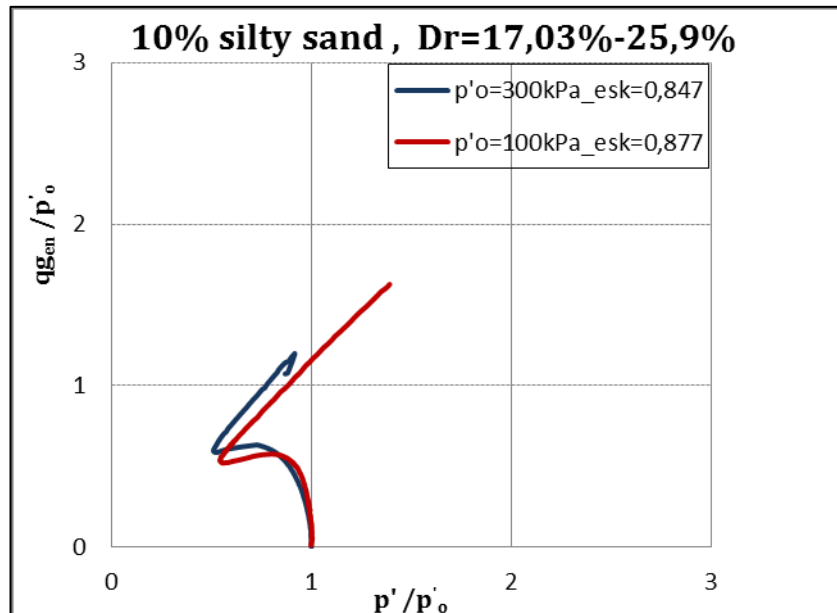


Σχήμα 4.86 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διαμητρική παραμόρφωση πυκνών δοκιμίων μίγματος άμμου –ιλύος 5%

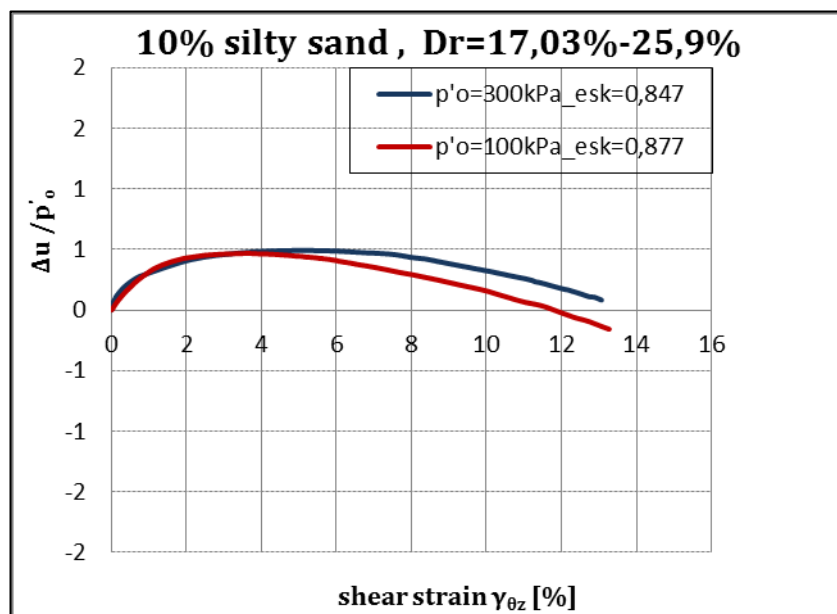
## 4.3.6.3 Ποσοστό Λεπτόκοκκων 10%

Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.87 και 4.88 παρουσιάζονται χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,847$  έως  $e_{sk}=0,877$ ).



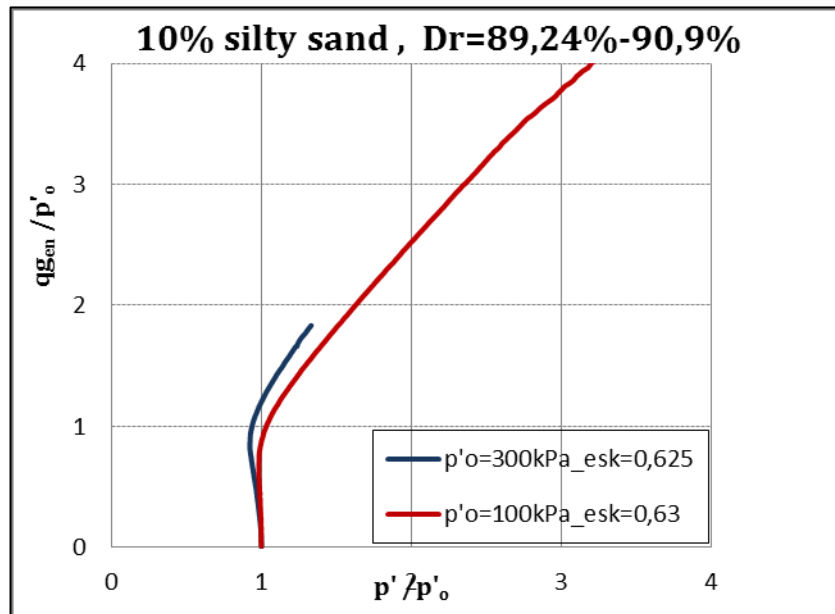
Σχήμα 4.87 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%



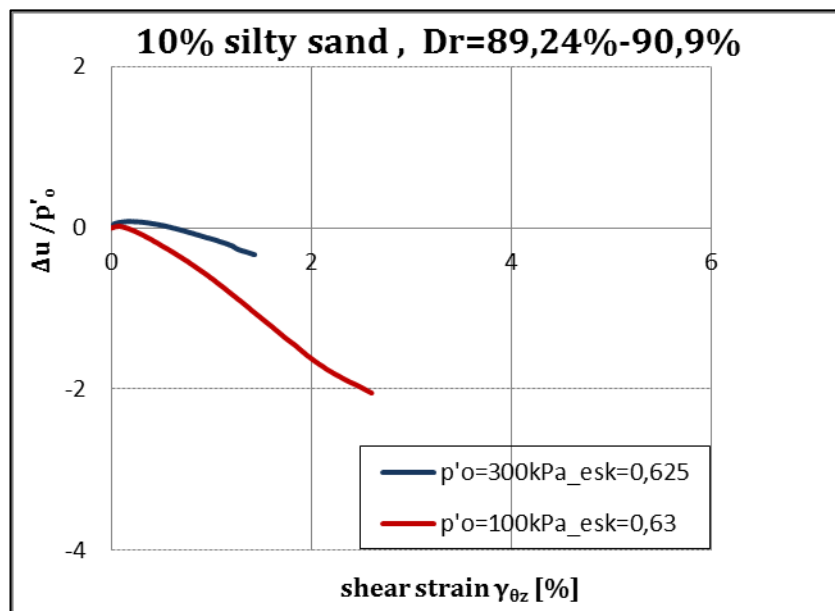
Σχήμα 4.88 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%

**Πυκνά Δοκίμια**

Στα Σχήματα 4.89 και 4.90 παρουσιάζονται πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,625$  και  $e_{sk}=0,63$ ).



Σχήμα 4.89 Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%

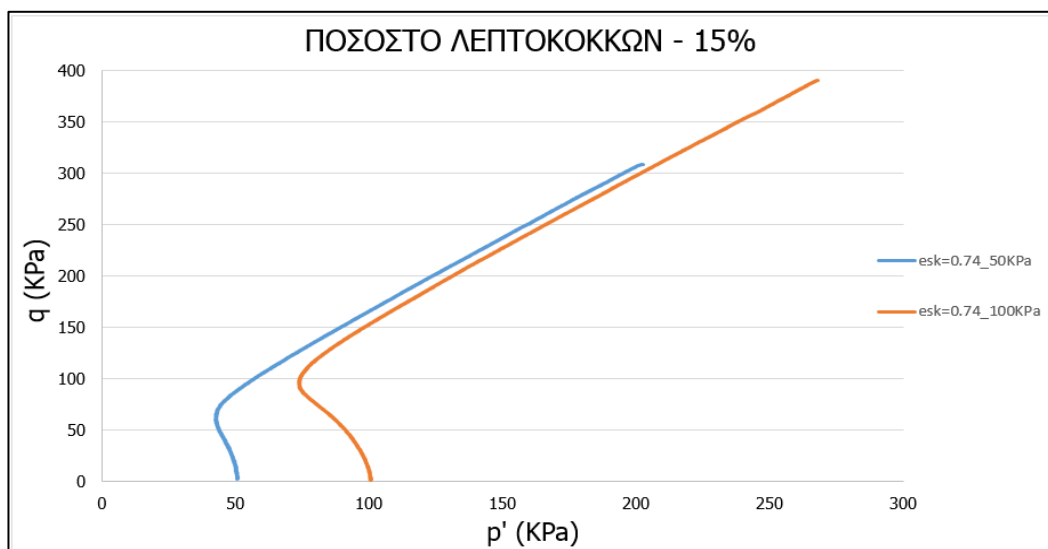


Σχήμα 4.90 Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%

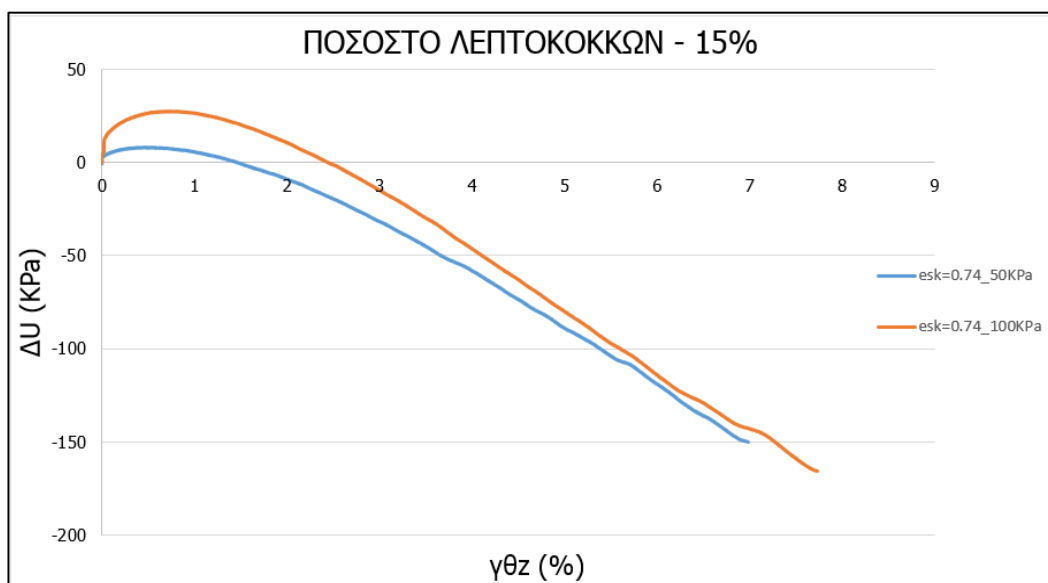


Από τα Σχήματα 4.87-4.90 τόσο στα Χαλαρά όσο και στα Πυκνά δοκίμια αμμοιλύος 10%, το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε σε αρχική ενεργό τάση 300kPa έχει πιο συστολική συμπεριφορά που συνοδεύεται με την ανάπτυξη μεγαλύτερων υπερπιέσεων.

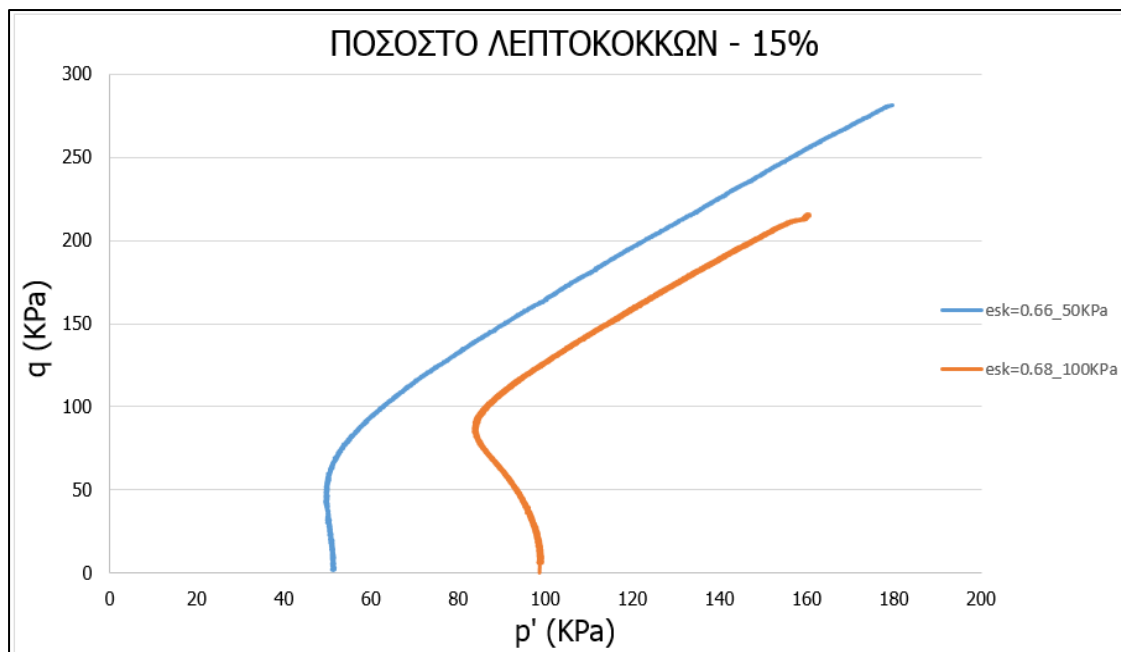
Σε όμοια συμπεράσματα κατέληξαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Παπαδόπουλος και Πολυδώρου, 2015) για ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.91-4.94. Σύμφωνα με τα διαγράμματα τόσο των μέσης πυκνότητας δοκιμίων όσο και των χαλαρών δοκιμίων που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, παρατηρούμε ότι το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa δείχνει πιο διαστολική συμπεριφορά σε σχέση με το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100kPa.



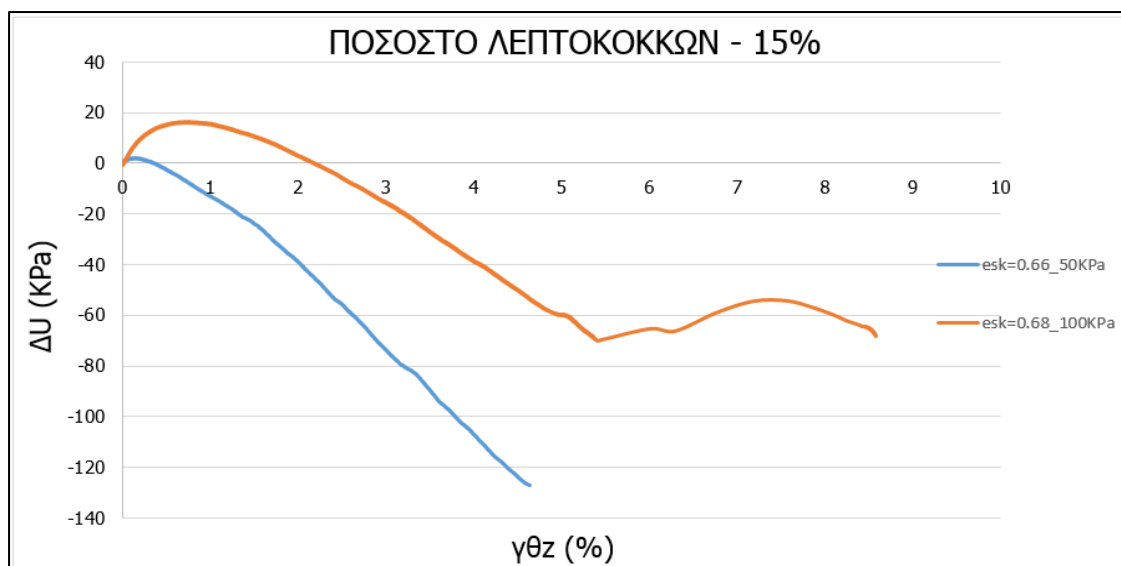
Σχήμα 4.91 Διαδρομές τάσεων  $q - p'$  χαλαρών μίγματος άμμου – ιλύος 15%



Σχήμα 4.92 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση χαλαρών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 15%



Σχήμα 4.93 Διαδρομές τάσεων  $q - p'$ . Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση πυκνών δοκιμίων μίγματος άμμου – ιλύος 15%



Σχήμα 4.94 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος σε συνάρτηση με την διαμητική παραμόρφωση πυκνών δοκιμίων μίγματος άμμου –ιλύος 15%

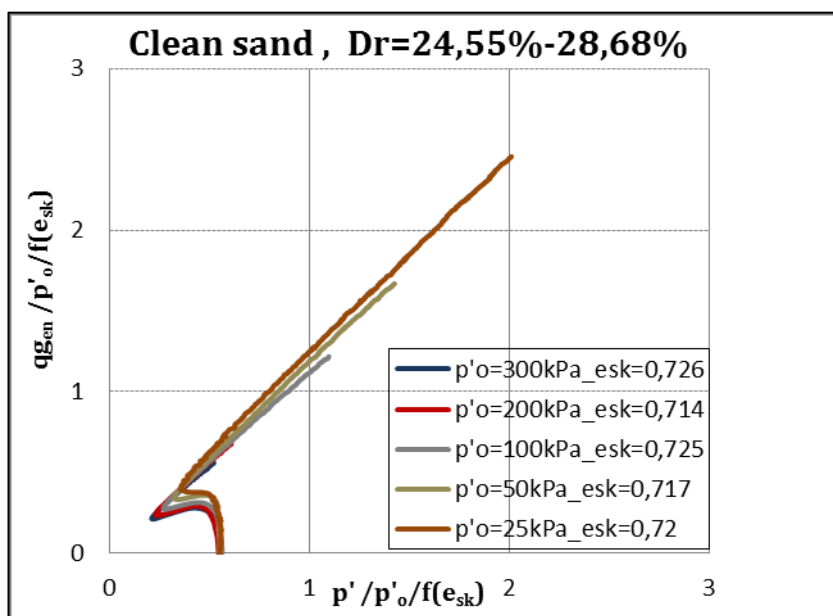
### 4.3.7 Κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}$ – Επίδραση Της Τάσης Στερεοποίησης

Στο Υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του Υποκεφαλαίου 4.3.6 κανονικοποιημένες ως προς την συνάρτηση  $f(e_{sk})=e_{sk}^{-1.3}$  (Lo Presti et al. 1997).

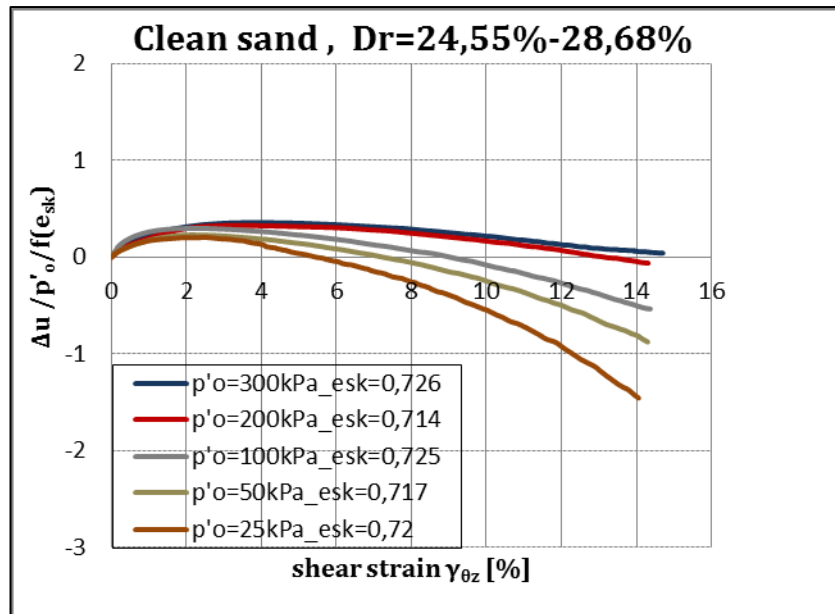
#### 4.3.7.1 Καθαρή Άμμος – Ποσοστό Λεπτόκοκκων 0%

##### Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.95 και 4.96 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες που αφορούν χαλαρά δοκίμια άμμου με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,714$  έως  $e_{sk}=0,726$ ) που έχουν στερεοποιηθεί σε διαφορετικές τάσεις.



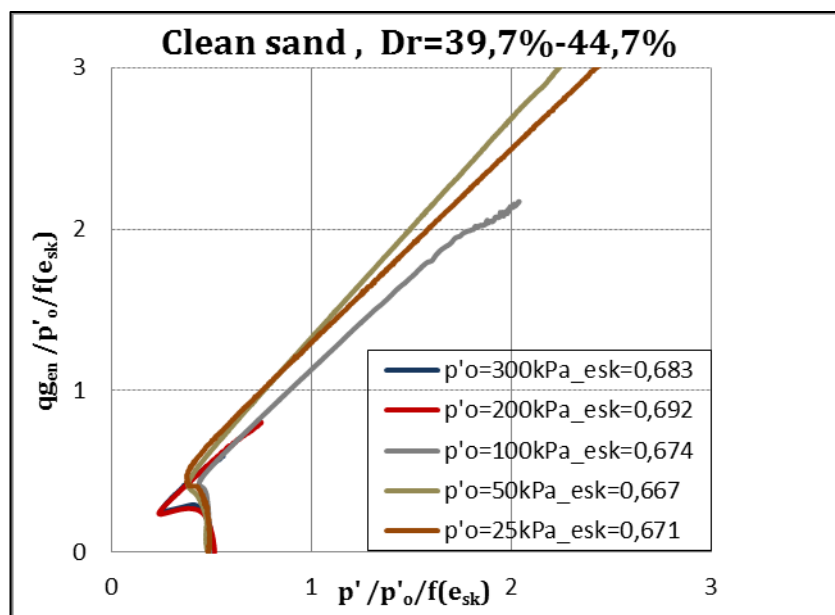
Σχήμα 4.95 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου



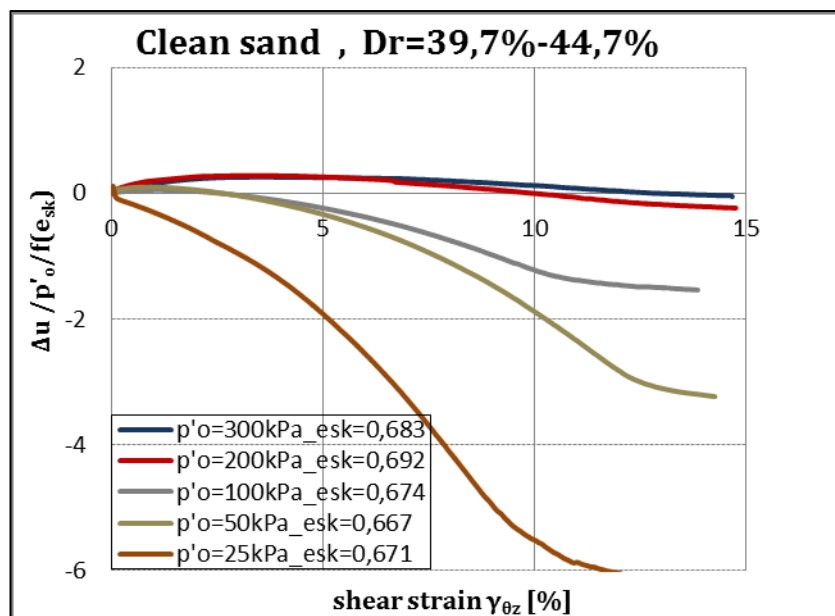
Σχήμα 4.96 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $e_z$  για χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου

### Μέσης πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.97 και 4.98 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες των δοκιμίων καθαρής άμμου μέσης πυκνότητας με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,667$  και  $e_{sk}=0,692$ ).



Σχήμα 4.97 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου



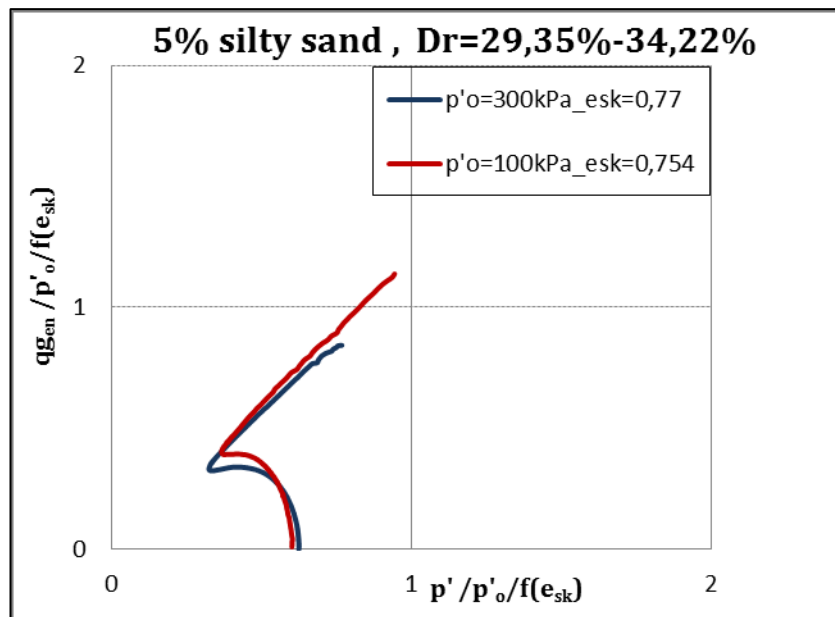
Σχήμα 4.98 Κανονικοποιημένες καμπύλες- Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια καθαρής άμμου

Τόσο στα χαλαρά όσο και στα μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa μέσω της κανονικοποίησης οι καμπύλες ήρθαν πιο κοντά. Τα συμπεράσματα που εξάγονται όμως είναι τα ίδια, δηλαδή το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε σε μικρότερη τάση είναι πιο διαστολικό και εμφανίζει μικρότερες υπερπιέσεις που αποτονώνονται ταχύτερα. Ειδικά στα πυκνά δοκίμια η συμπεριφορά αυτή είναι πιο εμφανής.

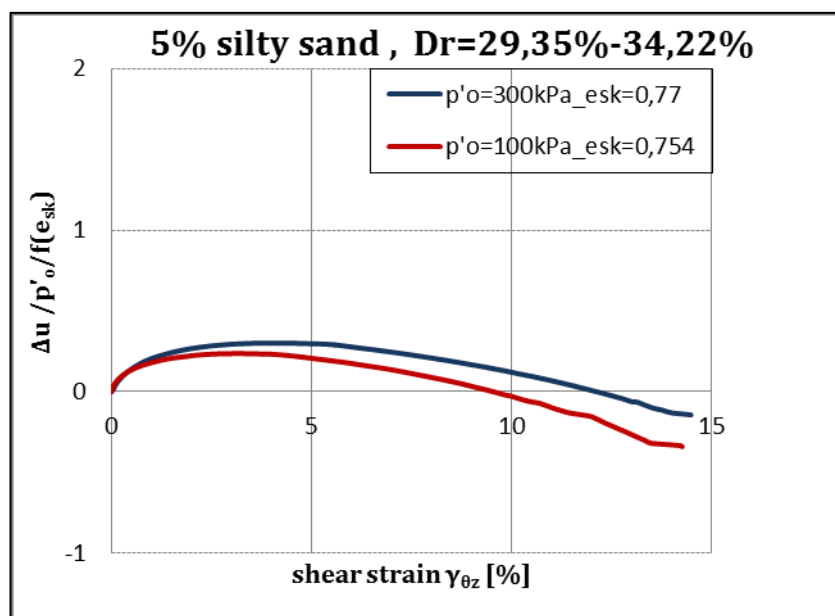
## 4.3.7.2 Ποσοστό Λεπτόκοκκων 5%

Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.99 και 4.100 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες χαλαρών δοκιμών ιλυώδους άμμου 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,754$  έως  $e_{sk}=0,77$ ).



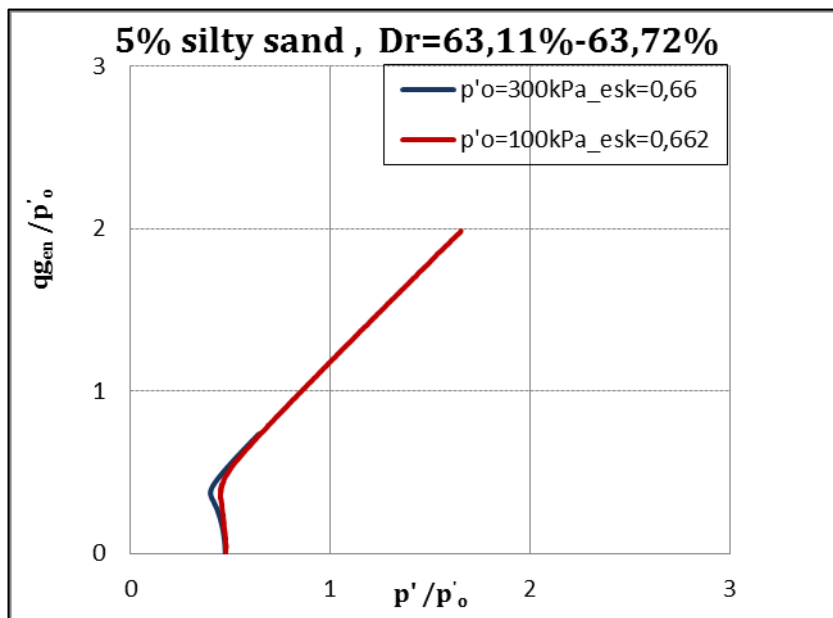
Σχήμα 4.99 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%



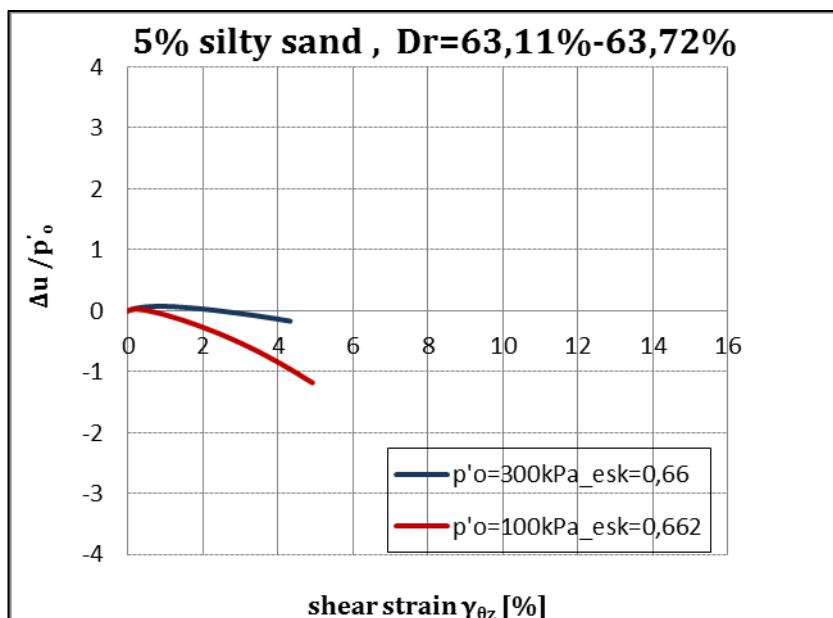
Σχήμα 4.100 Κανονικοποιημένες καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%

### Μέσης πυκνότητας Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.101 και 4.102 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες των πυκνών δοκιμών ιλυώδους άμμου 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,66$  και  $e_{sk}=0,662$ ).



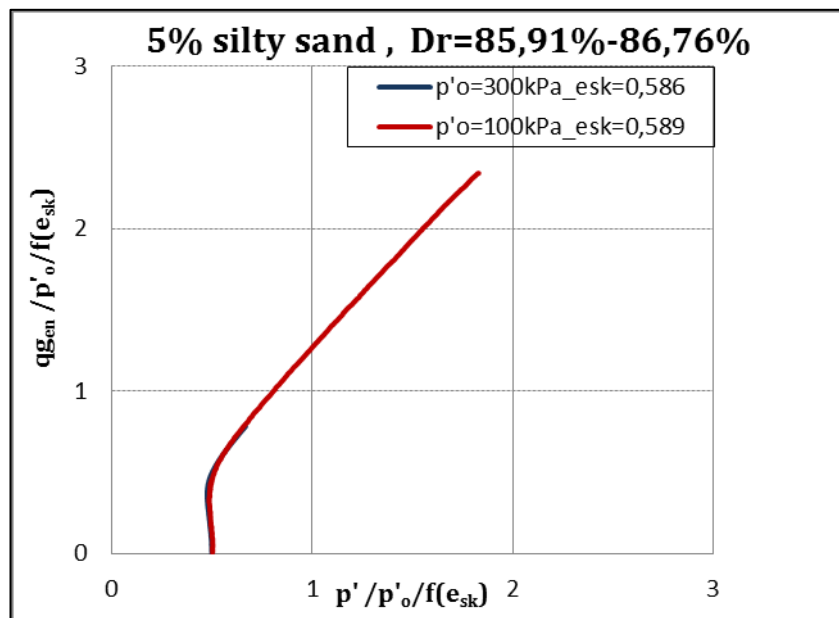
Σχήμα 4.101 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%



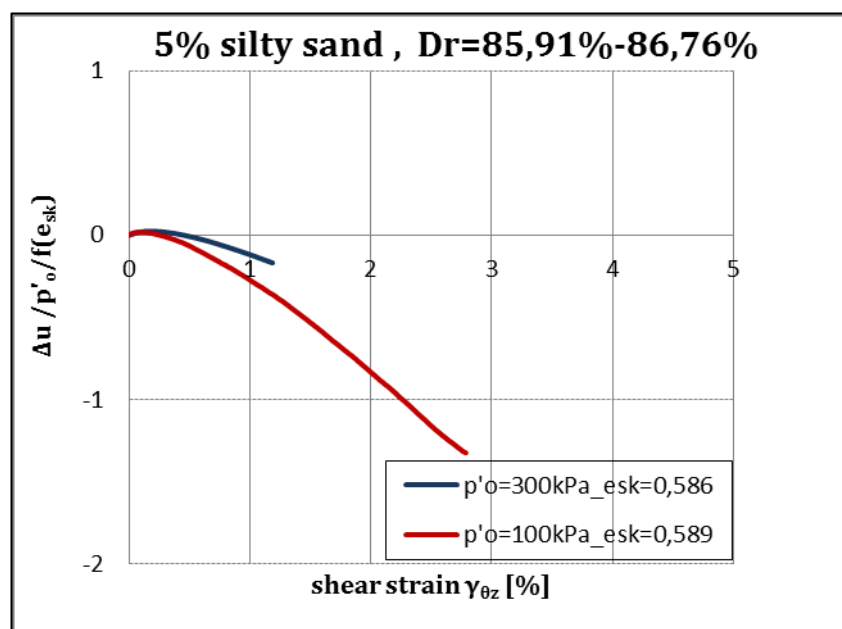
Σχήμα 4.102 Κανονικοποιημένες Καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για μέσης πυκνότητας δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%

### Πυκνά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.103 και 4.104 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες των πυκνών δοκιμών ιλυώδους άμμου 5% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,586$  και  $e_{sk}=0,589$ ).



Σχήμα 4.103 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%



Σχήμα 4.104 Κανονικοποιημένες Καμπύλες-Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 5%

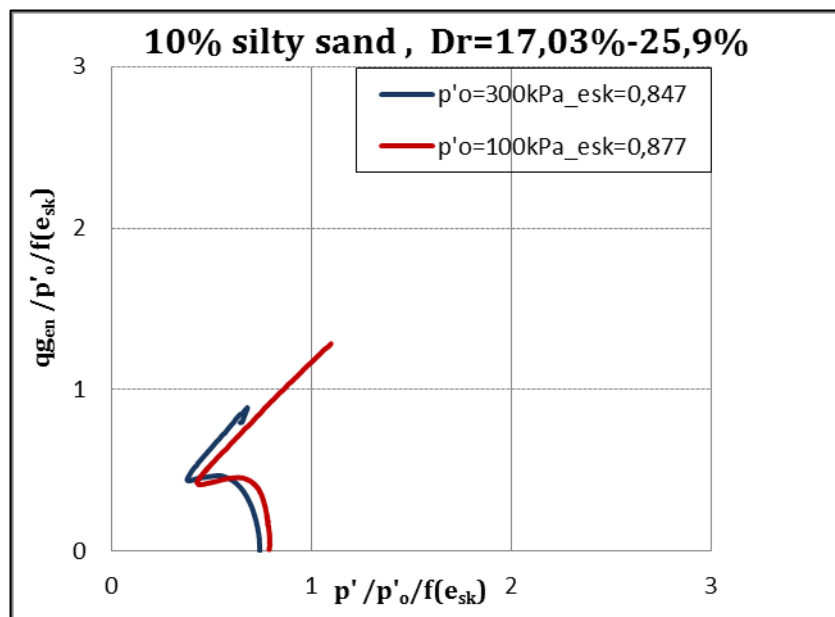


Όμοια συμπεράσματα εξάγονται και από τα Κανονικοποιημένα διαγράμματα των δοκιμών αμμοιλύος 5% ανεξαρτήτως πυκνότητας. Σε κάθε περίπτωση το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε σε αρχική ενεργό τάση 300kPa είναι πιο συστολικό που συνάδει με την ανάπτυξη μεγαλύτερων υπερπιέσεων στο σκελετό του.

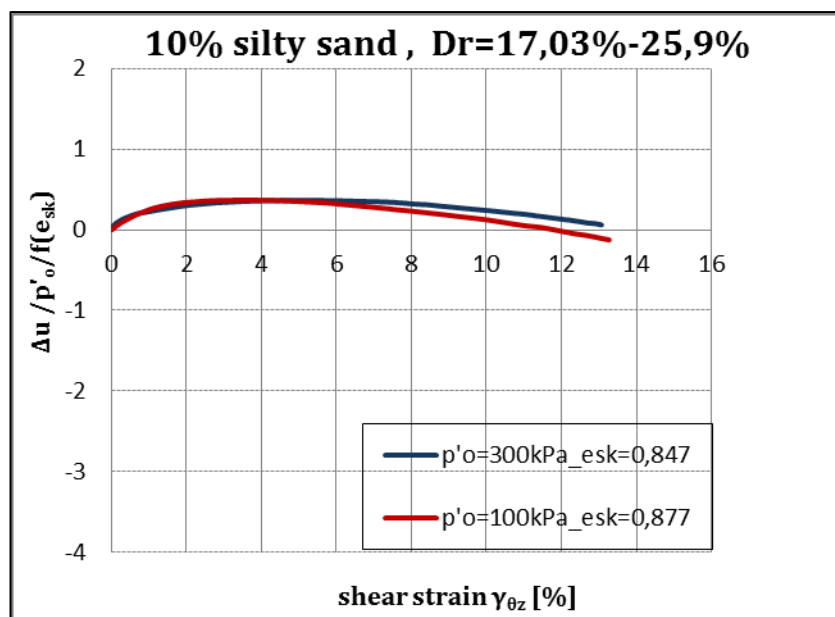
#### 4.3.7.3 Ποσοστό Λεπτόκοκκων 10%

##### Χαλαρά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.105 και 4.106 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες χαλαρών δοκιμών ιλυώδους άμμου 10% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,847$  έως  $e_{sk}=0,877$ ).



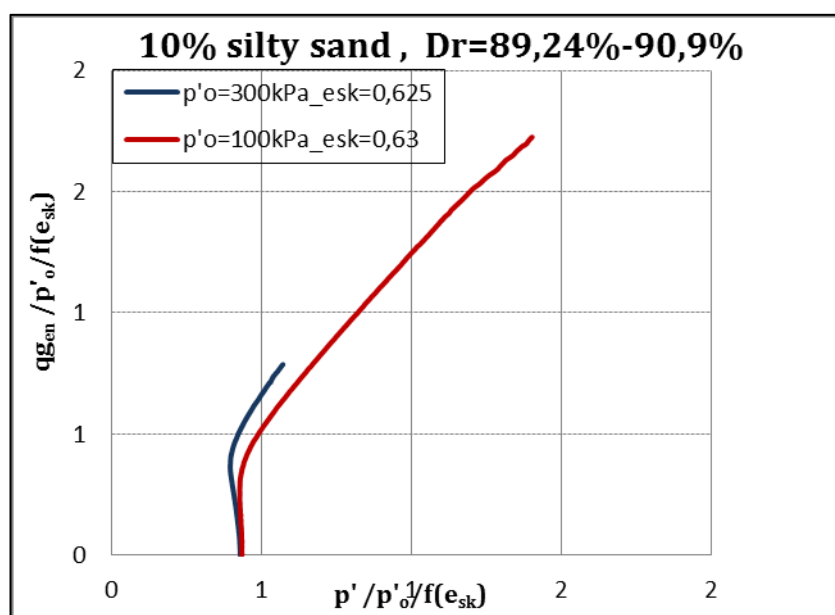
Σχήμα 4.105 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%



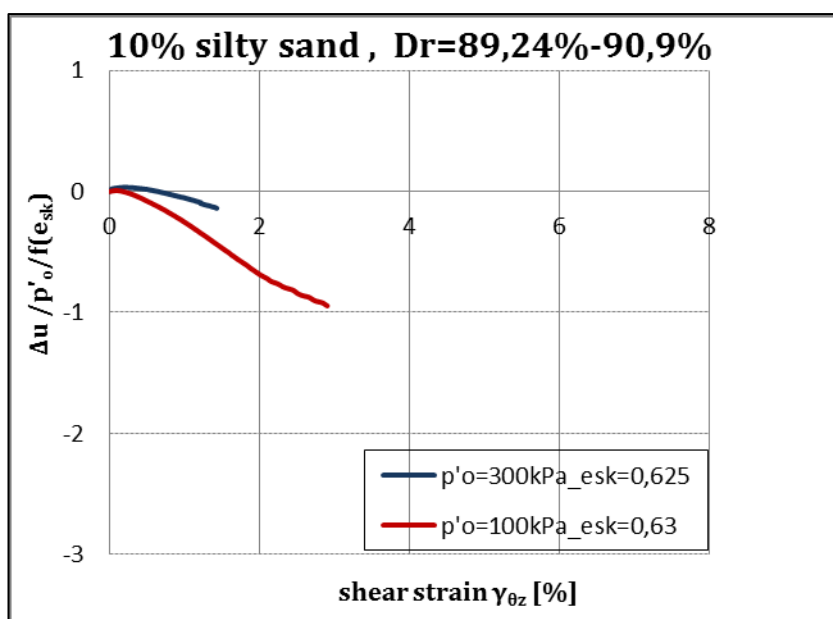
Σχήμα 4.106 Κανονικοποιημένες καμπύλες- Ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για χαλαρά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%

### Πυκνά Δοκίμια

Στα Σχήματα 4.107 και 4.108 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες των πυκνών δοκιμίων ιλυώδους άμμου 10% με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% με κοντινές πυκνότητες ( $e_{sk}=0,625$  και  $e_{sk}=0,63$ ).



Σχήμα 4.107 Κανονικοποιημένες Διαδρομές τάσεων. Αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτήσει μέσης ενεργού τάσης  $p'$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%



Σχήμα 4.108 Κανονικοποιημένες καμπύλες- Ανάπτυξη υπερπτιέσεων πόρων  $\Delta u$  συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon_z$  για πυκνά δοκίμια ιλυώδους άμμου 10%

Από τα κανονικοποιημένα σχήματα και των πυκνών και των χαλαρών δοκιμίων ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% παρατηρείται ότι οι καμπύλες δεν πλησίασαν πολύ και αυτό λόγω του ότι οι συγκρίσεις ήταν σε κοντινούς δείκτες πόρων. Το συμπέρασμα που διεξάγεται και εδώ είναι το ίδιο, το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100kPa είναι πιο διαστολικό από το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε σε αρχική ενεργό τάση 300kPa λόγω επίδρασης της τάσης στερεοποίησης και όχι λόγω διαφορετικών πυκνοτήτων.



# B5

## Συμπεράσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας που αφορούν δοκίμια καθαρής άμμου και μείγματα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% και 10%.

### 5.2 Συμπεριφορά ιλυωδών άμμων υπό τριαξονική συμπίεση

Τα κυριότερα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τη μελέτη της συμπεριφοράς καθαρής άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος υπό τριαξονική καταπόνηση είναι τα εξής :

(α) Επίδραση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού στη θέση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο  $q_{cs}-p'_{cs}$  και στο επίπεδο  $e_{cs}-p'_{cs}$ .

Η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού αυξάνει την κλίση των Γραμμών Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) στο επίπεδο  $q_{cs}-p'_{cs}$ , ενώ οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης είναι περίπου παράλληλες μεταξύ τους αν παραχθούν στο επίπεδο  $e_{cs}-p'_{cs}$ . Τέλος, όταν αυξάνεται το ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού η θέση της CSL κινείται προς τα κάτω στο επίπεδο  $e_{cs}-p'_{cs}$ . Στην περίπτωση που ο δείκτης πόρων αντικαθίσταται με τον δείκτη σκελετού ή τον ισοδύναμο δείκτη σκελετού για ποσοστά λεπτοκόκκου 0-10% οι καμπύλες κρίσιμης κατάστασης σχεδόν συμπίπτουν.

(β) Επίδραση της πυκνότητας

Για δεδομένη ενεργό τάση, η αύξηση της πυκνότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαστολικής τάσης του εδάφους καθώς και της διατμητικής αντοχής ανεξάρτητα από το ποσοστό περιεχομένης ιλύος. Αξίζει να τονισθεί ότι ως μέτρο ομαδοποίησης των συγκρίσεων στην παρούσα εργασία είναι ο δείκτης κενών του εδαφικού σκελεστού.

(γ) Επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού

Όσον αφορά τα μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100 kPa, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού έως 5% δρα ευνοϊκά στη συμπεριφορά της άμμου ενώ περαιτέρω αύξηση δεν έχει το ίδιο αποτέλεσμα, με το μείγμα με 10% ιλύ να είναι μικρότερης αντοχής από το μείγμα με 5% ιλύ. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι, όλα τα μείγματα παρουσιάζουν πιο διαστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου.

Τα πυκνά δοκίμια της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν πιο διαστολική συμπεριφορά με τη προσθήκη ιλύος έως 5%, ενώ με τη προσθήκη ιλύος 10% το δοκίμιο εμφανίζει πιο συστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο καθαρής άμμου. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να ερμηνευτεί διότι τα κενά του σκελετού στα πυκνά δοκίμια είναι λιγότερα και με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού έστω και 10% γεμίζουν και χάνονται οι επαφές μεταξύ των κόκκων άμμου.

Η σταδιακή αλλαγή, με την μείωση της πυκνότητας, της συμπεριφοράς των μειγμάτων με 10% ιλύ συνάδει με την παρατήρηση του Γκιούσα (2012) ότι για χαλαρά δοκίμια το δοκίμιο με 10% ιλύ δείχνει πιο διαστολική συμπεριφορά από εκείνο με 5% ιλύ το οποίο με τη σειρά του είναι πιο διαστολικό από το χαλαρό δοκίμιο της καθαρής άμμου. Σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Παπαδόπουλος & Πολυδώρου (2015) βασιζόμενοι σε πειράματα στρεπτικής διάτμησης.

Αναφορικά με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 300 kPa, η προσθήκη ιλύος δρα ευεγερτικά τόσο στα χαλαρά όσο και στα μέσης πυκνότητας δοκίμια. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα διότι η μεγάλη ενεργός τάση στερεοποίησης ενεργοποιεί τις επαφές μεταξύ των κόκκων της άμμου.

(δ) Επίδραση της αρχικής τάσης στερεοποίησης

Για δεδομένη πυκνότητα, η αύξηση της αρχικής τάσης στερεοποίησης οδηγεί σε πιο συστολική συμπεριφορά ανεξαρτήτως του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και μειγμάτων 5% και 10% που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 300kPa εμφανίζουν μεγαλύτερες διατμητικές αντοχές. Παρόλα αυτά, επειδή αυξάνεται η συστολική τους τάση, αναπτύσσουν μεγαλύτερες υπερπιέσεις στο σκελετό τους. Η κανονικοποίηση όμως ως προς την αρχική ενεργό τάση δείχνει μείωση της αντοχής και αύξηση των πιέσεων πόρων με την αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης του δοκιμίου.

### **5.3 Συμπεριφορά καθαρής άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος υπό στρεπτική διάτμηση**

Τα κυριότερα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τη μελέτη της συμπεριφοράς καθαρής άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος υπό μονοτονική καταπόνηση στη Συσκευή Στρέψης Κοίλου Δοκιμίου είναι τα εξής :

(α) Επίδραση της πυκνότητας

Ανεξαρτήτως αρχικής ενεργού τάσης στερεοποίησης, η μείωση του δείκτη πόρων σκελετού στα δοκίμια καθαρών άμμων και μειγμάτων άμμου-ιλύος οδηγεί σε αύξηση των διατμητικών αντοχών και σε μείωση του εύρους παραμόρφωσης για το οποίο οι υπερπιέσεις είναι θετικές όπως παρατηρήθηκε και στις τριαξονικές δοκιμές.

(β) Επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού

Όσον αφορά τα χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100 kPa, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού σταδιακά μειώνει τη συστολική τάση των δοκιμίων με την αύξηση του ποσοστού ιλύος. Η δράση της ιλύος στη συμπεριφορά της άμμου εξαρτάται όμως από την πυκνότητα. Έτσι όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών τα μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100 kPa εμφανίζουν πιο διαστολική συμπεριφορά με τη προσθήκη ιλύος έως 5% ενώ περαιτέρω αύξηση του ποσοστού σε 10% οδηγεί σε πιο συστολική συμπεριφορά σε σχέση με το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5%. Βεβαίως, τα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% και 10% είναι πιο διαστολικά από το δοκίμιο καθαρής άμμου.

Τα πυκνά δοκίμια της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν πιο διαστολική συμπεριφορά με τη προσθήκη ιλύος έως 5% ενώ με τη προσθήκη ιλύος 10% το δοκίμιο εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5% χωρίς να δείχνει μεγαλύτερη τάση για συστολή από το δοκίμιο με 5% ιλύ όπως παρατηρήθηκε στις τριαξονικές δοκιμές, διότι τα εν λόγω πυκνά δοκίμια είχαν ελαφρώς μεγαλύτερο δείκτη κενών από τα αντίστοιχα της τριαξονικής.

Αναφορικά με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 300 kPa, η προσθήκη ιλύος μειώνει τη συστολική συμπεριφορά ανεξαρτήτως πυκνότητας των δοκιμίων. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα διότι η μεγάλη ενεργός τάση στερεοποίησης ενεργοποιεί τις επαφές μεταξύ των κόκκων της άμμου όπως παρατηρήθηκε και στις τριαξονικές δοκιμές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πυκνά δοκίμια της κατηγορίας αυτής, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού της τάξης του 10% οδηγεί σε παρόμοια συμπεριφορά με το δοκίμιο ιλυώδους άμμου 5%. Φαίνεται ότι για τάση στερεοποίησης 300kPa μόνο στα πυκνά δοκίμια φαίνονται δείγματα της τάσης για μείωση της ευεργετικής δράσης της αύξησης του ποσοστού ιλύος που παρατηρήθηκε για χαλαρότερα δοκίμια σε τάση στερεοποίησης 100kPa.

#### (γ) Επίδραση της αρχικής τάσης στερεοποίησης

Όπως και στις τριαξονικές δοκιμές, η αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης αυξάνει την τάση για συστολή των δοκιμίων αναπτύσσοντας μεγάλες υπερπιέσεις πόρων που μειώνουν την διατμητική αντοχή των δοκιμίων.



## 5.4 Συγκεντρωτικά Συμπεράσματα ως προς την επίδραση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού

Γενικά η επίδραση του ποσοστού ιλύος στη συμπεριφορά μίας καθαρής άμμου φαίνεται να εξαρτάται από τον συνδυασμό της πυκνότητας και της τάσης στερεοποίησης του δοκιμίου τόσο για συνθήκες τριαξονικής θλίψης όσο και στρεπτικής διάτμησης.

Σε χαμηλές αρχικές ενεργές τάσεις η ευεργετική τάση της ιλύος φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας με αποτέλεσμα υπό τριαξονική φόρτιση στα πυκνά δοκίμια το μείγμα με 10% ιλύ να δείχνει πιό συστολική συμπεριφορά από την καθαρή άμμο.

Για χαλαρά και μέσης πυκνότητας δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa η δράση της ιλύος είναι πάντοτε ευεργετική για την άμμο με το ποσοστό 5% ιλύος να δίνει τη μέγιστη διαστολικότητα και αύξηση άνω του 5% να οδηγεί σε αύξηση της συστολικότητας και για τις δύο μορφές φόρτισης (τριαξονική και στρεπτική διάτμηση).

Για υψηλή αρχική ενεργό τάση 300kPa, και για τις δύο μορφές φόρτισης, η αύξηση του ποσοστού της ιλύος φαίνεται να μειώνει σταδιακά τη συστολικότητα της άμμου.

# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Γεωγιάννου Β.Ν., Σάκκης Β., “Η Επίδραση του Ποσοστού Ιλύος στην Απόκριση Άμμου”, (2010), 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος.

Γεωργιάννου Β.Ν., Κωνσταντίνου Μ., “Μικροσκοπική Ανάλυση του Σχήματος των Κόκκων Άμμων”, (2010), 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος.

Παπαδοπούλου, Α.Ι., Τίκα, Θ.Μ., Κονίνης, Γ.Ε., “Το Κρίσιμο Ποσοστό Λεπτοκόκκων Μειγμάτων Κοκκωδών Εδαφών”, (2010), 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος.

Been K., Jefferies M. G. and Hachey J. E., “The critical state of sands”, (1991), *Geotechnique*, 35, No 2, 99-112.

Been K., Jefferies M. G., “A state parameter for sands”, (1985), *Geotechnique*, 41, No 3, 365-381.

Belkhatir M., Missoum H., Arab A., Della N, Schanz T., “Undrained Shear Strength of Sand-silt Mixture: Effect of Intergranular Void Ratio and Other Parameters”, (2011), *KSCE Journal of Civil Engineering* 15(8):1335-1342.

Boukovalas G.D., Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G., “A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands”, (2003), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23, 115–125.

Lade P.V., Yamamuro J.A., Liggio C.D., “Effects of Fines on Void Ratio, compressibility and static liquefaction of silty sand”, (2009), *Geomechanics and Engineering*, vol. 1, No. 1, pp 1-15.

Lade P.V., Liggio C.D., Yamamuro J.A., “Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand”, (1998), *Geotechnical Testing Journal*, vol. 21, issue 4.

Lo, S. R.; Gnanendran, C. T.; Rahman, M. M., “On equivalent granular void ratio and steady state behaviour of loose sand with fines”, (1998), *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, no. 10, pp. 1439-1456(18).

Papadopoulou A., Tika T., "The Effect of Fines on Critical State and Liquefaction Resistance Characteristics of Non-Plastic Silty Sands", (2008), *Soils and Foundations* Vol. 48, No. 5, 713–725.

Polito, C.P., Martin J.R., "Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands", (2001), *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*.

Salgado R., Bandini P., Karim A., "Shear Strength and Stiffness of Silty Sand", (2000), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 5.

Schofield A.N., Wroth C.P., (1968), *Critical state soil mechanics*, McGraw-Hill, New York.

Thevanayagam S., "Effect of Fines and Confining Stress on Undrained Shear Strength of Silty Sands", (1998), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, No. 6.

Thevanayagam S., Revishankar K., Mohan S., "Effects of fines on monotonic shear strength of sandy soils", (1997), *Geotechnical Testing Journal*, 20 (4), 394-406.

Thevanayagam S., Shenthan T., Mohan S., Liang J., "Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands and Sandy Silts", (2002), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, No. 10.

Yamamuro J., Lade V.P., "Static Liquefaction of very Loose Sands", (1997), *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34, pp 905-917.

Yamamuro J., Covert K., "Monotonic and Cyclic Liquefaction of Very Loose Sands with High Silt Content", (2001), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, No. 4.

Wood D.M., "Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics", (1990), Cambridge University Press.

Zlativić S., Ishihara K., "On the influence of non-plastic fines on ultimate strength", (1995), first International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokio, A.A. Balkema Rotterdam, 239-244.