



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ
ΑΜΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΜΜΟΥ-ΙΛΥΟΣ ΣΕ
ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ**

**Δημήτρης Παπαδόπουλος
Χρύσανθος Πολυδώρου**

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

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Δημήτρης Γ. Παπαδόπουλος
Χρύσανθος Α. Πολυδώρου
(2015)

Μονοτονική και ανακυκλική συμπεριφορά άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος σε
στρεπτική διάτμηση
Διπλωματική Εργασία
Εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Demetris G. Papadopoulos
Chrysanthos A. Polydorou
(2015)

Monotonic and cyclic behaviour of sand and silty-sand mixtures in torsional shear
Diploma Thesis
Experimental Soil Mechanics Laboratory, National Technical University of Athens,
Greece

Copyright © Demetris G. Papadopoulos, Chrysanthos A. Polydorou, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

No part of these pages, either text or image may be used for any purpose other than personal use. Therefore, reproduction, modification, storage in a retrieval system or retransmission, in any forms or by any mean, electronic, mechanical or otherwise, for reasons other than personal use, is strictly prohibited without prion written permission.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

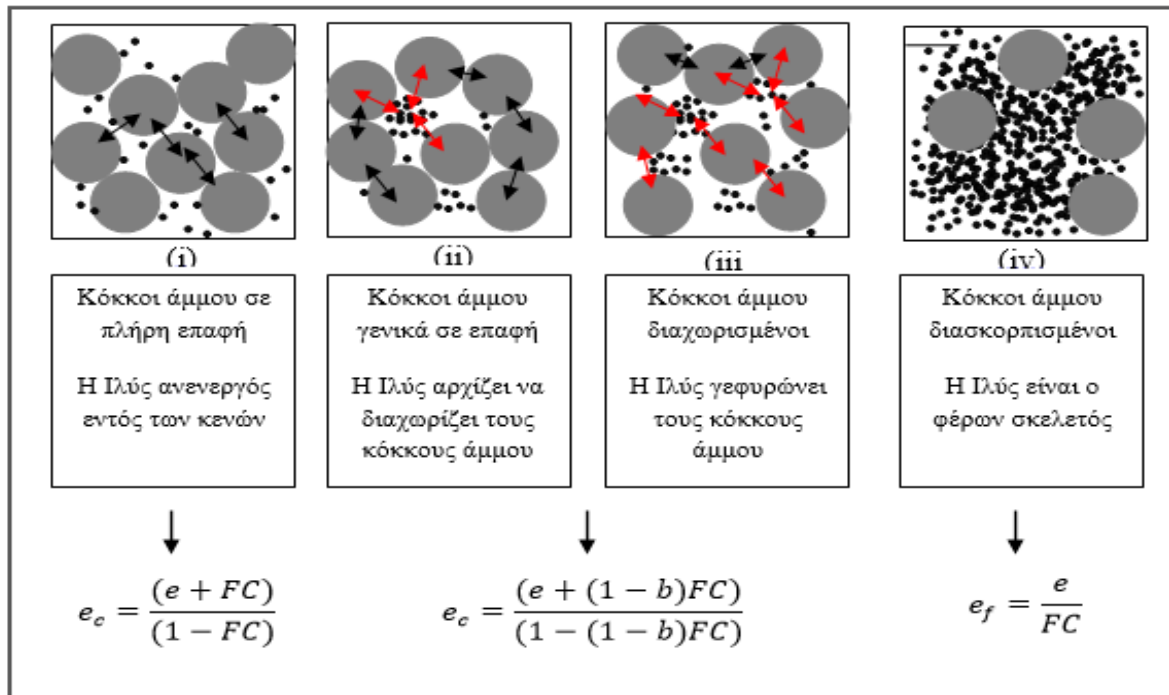
Διπλωματική Εργασία
**Μονοτονική και ανακυκλική συμπεριφορά άμμου και μειγμάτων άμμου-
ιλύος σε στρεπτική διάτμηση**
Δημήτρης Παπαδόπουλος
Χρύσανθος Πολυδώρου

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

Εκτενής Περίληψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση που έχει το ποσοστό περιεχόμενης ιλύος σε μείγματα άμμου, όσον αφορά την μηχανική τους συμπεριφορά, καθώς επίσης και κατά πόσο αυτή αλλάζει αναλόγως του περιεχόμενου ποσοστού λεπτόκοκκου παράγοντα. Αυτό το ζήτημα είναι ένα κομμάτι της Γεωτεχνικής Επιστήμης το οποίο δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως. Οι λόγοι στους οποίους οφείλονται οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα των εργασιών που γίνονται κατά καιρούς είναι πολλοί και ποικίλουν. Μερικοί από αυτούς είναι η σύσταση των υλικών, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, ο δείκτης πόρων, η ενεργός τάση στερεοποίησης, ο τρόπος με τον οποίο οι διάφορες συσκευές επιβάλλουν την φόρτιση και αρκετές άλλες παράμετροι οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο ως προς την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στην μικροδομή του υλικού έτσι ώστε να υπάρχει μια κοινή βάση αναφοράς, καθώς επίσης και στους ορισμούς των διαφόρων δεικτών πόρων και σε ποιούς εδαφικούς σχηματισμούς είναι κατάλληλος να εφαρμόζεται ο καθένας από αυτούς (Σχήμα 1). Ακόμη, αναφέρονται επιγραμματικά ορισμένοι κύριοι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην συμπεριφορά της καθαρής άμμου και μειγμάτων άμμου-ιλύος, και οι οποίοι παίζουν καθοριστικό ρόλο ως προς την αντίσταση των δοκιμών έναντι ρευστοποίησης, όπως είναι το ποσοστό λεπτοκόκκων, ο δείκτης πόρων, η αρχική ενεργός τάση και η αρχική δομή του εδαφικού σχηματισμού.



Σχήμα 1. Χαρακτηριστικές μορφές μικροδομής και οι αντίστοιχοι δείκτες πόρων που τις περιγράφουν (Thevanayagam et al. 2000)

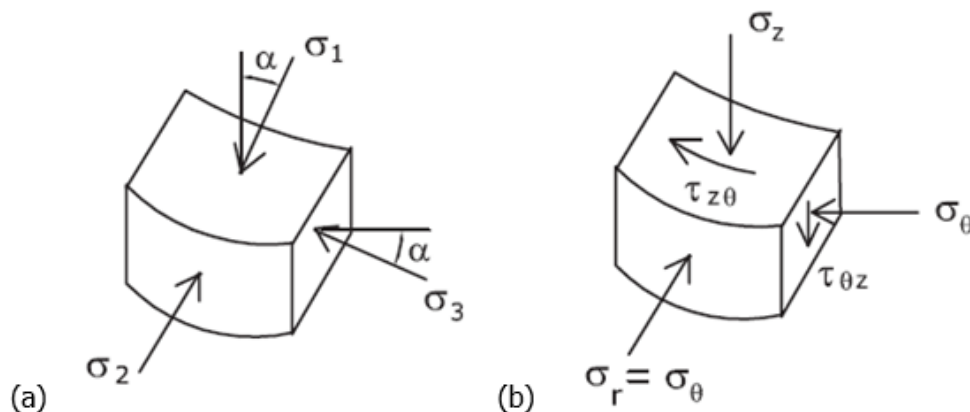
Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της άμμου (M31) και της ιλύος (D6) η μέση διάμετρος της οποίας είναι υποπενταπλάσια σε σχέση με εκείνης της άμμου. Επίσης, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέγιστου και ελάχιστου δείκτη πόρων για κάθε ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού στο μείγμα άμμου-ιλύος, τα οποία συγκρινόμενα με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας φαίνεται να συμπίπτουν, εμφανίζοντας μείωση των δεικτών πόρων μέχρι ποσοστό λεπτοκόκκων 30% και στη συνέχεια διαρκή αύξηση με την αύξηση του ποσοστού ιλύος στο μείγμα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στις βιβλιογραφικές αναφορές όσον αφορά την επίδραση του ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου, τόσο σε τριαξονικές δοκιμές, όσο και σε δοκιμές στρέψης κοίλου δοκιμίου. Αυτές οι βιβλιογραφικές αναφορές γίνονται με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού αλλά και τον δείκτη πόρων κενών έτσι ώστε να αποσαφηνιστεί η επίδραση του κάθε παράγοντα (πυκνότητα, τάση στερεοποίησης, ποσοστό λεπτόκοκκων) συναρτήσει του κάθε δείκτη πόρων. Γενικά, στο κεφάλαιο αυτό παρατηρούμε ότι οι απόψεις των διαφόρων ερευνητών διίστανται και ότι το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι αρκετά πολύπλοκο αφού μέσα σε αυτό υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες όπως ο τρόπος παρασκευής των δοκιμίων, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, ο τρόπος σύγκρισης των αποτελεσμάτων, οι πειραματικές διατάξεις, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συσκευή στρέψης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην οποία πραγματοποιήθηκαν και τα πειράματα της παρούσας εργασίας. Ακολούθως, περιγράφεται η πειραματική

διαδικασία παρασκευής των διαφόρων δοκιμίων καθώς επίσης και ο τρόπος επιβολής της φόρτισης (μονοτονική και ανακυκλική).

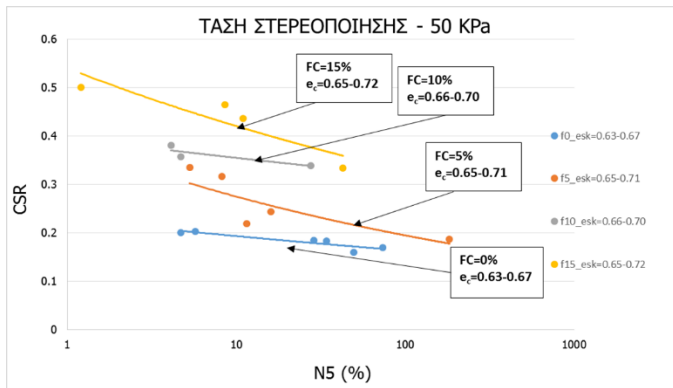
Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι αρχές λειτουργίας της συσκευής όπως και οι υποθέσεις που γίνονται όσο αφορά την κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων κοίλου δοκιμίου (Σχήμα 2). Επίσης, γίνεται ειδική αναφορά στην επίδραση που έχει η γεωμετρία του δοκιμίου στην κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του.



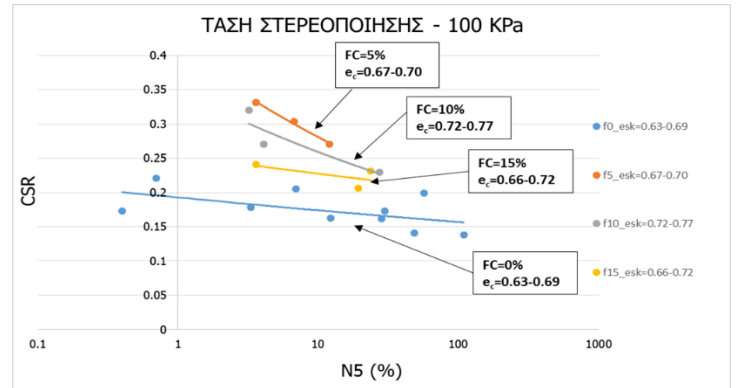
Σχήμα 2. (a) Κύριες τάσεις και (b) τάσεις στο τοίχωμα του κοίλου δοκιμίου

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα ανακυκλικής φόρτισης στην συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder), σε δοκίμια καθαρής άμμου και σε μείγματα άμμου-ιλύος, με το ποσοστό του λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού να κυμαίνεται από 0% έως και 15%. Τα δοκίμια έχουν στερεοποιηθεί σε αρχικές ενεργές τάσεις που κυμαίνονται από 50kPa έως και 300kPa. Συνολικά, έχουν επεξεργαστεί 63 ανακυκλικά πειράματα τα οποία είχαν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ενώ στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε και μια νέα σειρά πειραμάτων, που αποτελείται από 23 ανακυκλικές δοκιμές. Εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας μέσα από δυο σειρές πειραμάτων (χαλαρών και πυκνών δοκιμίων), τόσο στην καθαρή άμμο, όσο και σε μείγματα άμμου-ιλύος με τα πυκνότερα δοκίμια να παρουσιάζουν σαφώς βελτιωμένη συμπεριφορά έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με τα χαλαρά. Όμως με την αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων πέραν του 10%, μειώνεται και η επίδραση που έχει η πυκνότητα στα τελικά αποτελέσματα. Στην συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση που έχει το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών σε μείγματα άμμου-ιλύος, για δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχικές ενεργές τάσεις από 50kPa έως και 300kPa. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, για τα δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργή τάση 50kPa, η αντοχή έναντι ρευστοποίησης αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών. Τα δοκίμια όμως που στερεοποιήθηκαν σε μεγαλύτερες αρχικές ενεργές τάσεις (100kPa και 300kPa) παρουσιάζουν μια διαφοροποίηση, αφού το βέλτιστο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού παρατηρήθηκε ότι είναι 5%. Περαιτέρω αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού στο μείγμα (10% και 15%), οδηγεί σε πτώση της αντοχής έναντι ρευστοποίησης, όχι όμως και μικρότερη αντοχή από τα δείγματα της καθαρής άμμου (Σχήμα 3). Τέλος, στο

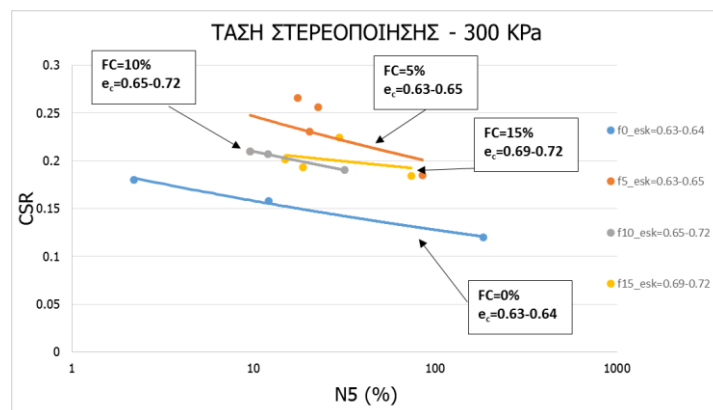
κεφάλαιο αυτό τα αποτελέσματα των δοκιμών κανονικοποιήθηκαν με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού όπως και με τον δείκτη πόρων κενών ούτως ώστε να ξεκαθαριστεί η επίδραση του ποσοστού των λεπτόκοκκων και της τάσης στερεοποίησης στην αντοχή των δοκιμών έναντι ρευστοποίησης για τις δύο διαφορετικές βάσεις σύγκρισης.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ όπου (α) Δοκίμια στερεοποιημένα στα $p' = 50 \text{ kPa}$, (β) Δοκίμια στερεοποιημένα στα $p' = 100 \text{ kPa}$ και (γ) Δοκίμια στερεοποιημένα στα $p' = 300 \text{ kPa}$

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από πειράματα μονοτονικής φόρτισης στην συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε δοκίμια καθαρής άμμου και σε μείγματα άμμου-ιλύος, με το ποσοστό του λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού να κυμαίνεται από 0% έως και 15%. Τα δοκίμια έχουν στερεοποιηθεί σε αρχικές ενεργές τάσεις που κυμαίνονται από 25 kPa έως και 300 kPa. Συνολικά, έχουν επεξεργαστεί 28 μονοτονικά πειράματα. Αρχικά, στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας, τόσο σε δοκίμια καθαρής άμμου, όσο και σε μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 5%, 10% και 15%. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, παρατηρούμε ότι 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 υπερπίεσεις είναι θετικές. Ακολουθώς, εξετάζεται η επίδραση που έχει το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών σε μείγματα άμμου-ιλύος, σε πυκνά αλλά και σε χαλαρά δοκίμια, τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχικές ενεργές τάσεις απο 50kPa έως και 300kPa. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων όπου φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού αυξάνει την διατμητική αντοχή των δοκιμίων σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια της καθαρής άμμου, τόσο για πυκνά όσο και χαλαρά δοκίμια. Όσον αφορά την επίδραση της τάσης στην οποία έχουν στερεοποιηθεί τα δοκίμια, τόσο στην καθαρή άμμο, όσο και σε μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού απο 5% έως και 15% τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι η αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης αυξάνει την τάση για συστολή των δοκιμίων, με αποτέλεσμα τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa, να παρουσιάζουν σημαντικά πιο συστολική συμπεριφορά σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa, όπως και μεγαλύτερο πλάτος διατμητικής παραμόρφωσης για το οποίο οι υπερπίεσεις πόρων ήταν θετικές. Τέλος, τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών κανονικοποιήθηκαν με βάση την αρχική τους ενεργό τάση έτσι ώστε να αποσαφηνιστεί η επίδραση της τάσης στερεοποίησης σε πυκνά και χαλαρά δοκίμια καθαρής άμμου, αλλά και μειγμάτων άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού απο 5% έως και 15%.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν μετά απο επεξεργασία των ανακυκλικών και μονοτονικών δοκιμών στην συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder), και συγκρίνονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν απο αυτές τις δυο διαφορετικές μορφές φόρτισης.

Extended Summary

This Diploma Thesis investigates the influence of the silt content in sand-silt mixtures on the mechanical behaviour of the mixture in comparison with the response of the host sand. There is contradicting evidence in the literature regarding the role of the silt in sand-silt mixtures. It appears that the origin, the grading, the density, the initial mean effective stress, the loading conditions are among a number of parameters that strongly affect the observed behaviour.

In the first chapter reference is made on the microstructure of the mixtures so that there is a common ground for objective comparisons between various contents of fines. The void ratio indices related to different microstructures depending on the silt content are defined. Moreover, a brief report is presented on the influence of the above mentioned parameters on the liquefaction resistance of clean sands and sand-silt mixtures.

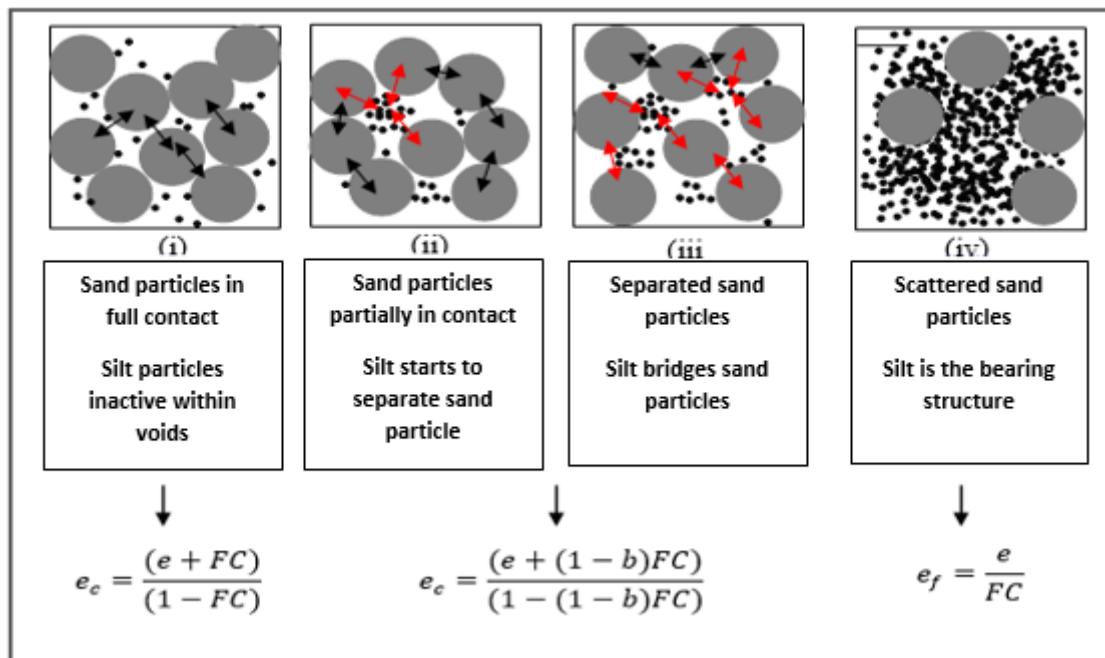


Figure 1. Characteristic forms of microstructure and the respective void ratio indices which describe them (Thevanayagam et al. 2000)

In the second chapter the soil materials which were used in this study are presented and specifically, the properties of Sand (M31) and Silt (D6) the latter having five times smaller mean diameter compared to the sand. In addition, the variation of maximum and minimum granular void ratio with increasing percentage of fines in the sand-silt mixtures is presented; it appears to be in agreement with observations of other researchers in that void ratio index decreases for contents up to 30% and continuously increases for higher fine contents.

The third chapter is an extended literature review on the effect of silt on the mechanical behaviour of sand-silt mixtures compared to clean sand is presented based on triaxial tests, as well as torsional shear tests. Both granular void ratio as well as

global void ratio are considered to clarify the observed effect of parameters such as density, mean effective stress, fine percentage, in relation to each void ratio. Generally, in this chapter it has been observed that there is conflicting evidence regarding resistance to liquefaction due to variation of the void indices used for comparison, apart from a number of factors (i.e. specimen preparation methods,, materials being used, comparison of the findings, experimental procedures) which also affect the final results.

In the fourth chapter a description is made of the hollow cylinder apparatus where the experiments of the current study have been conducted along with the experimental procedures that have been adopted; specimen preparation and loading conditions (monotonic and cyclic) are described in detail.

In the fifth chapter, there is a comprehensive reference of the operating principles of the hollow cylinder apparatus and the assumptions concerning the allocation of stresses and strains. Particular attention is paid on the geometry of the specimen and the stress distribution within the specimen (Figure 2.).

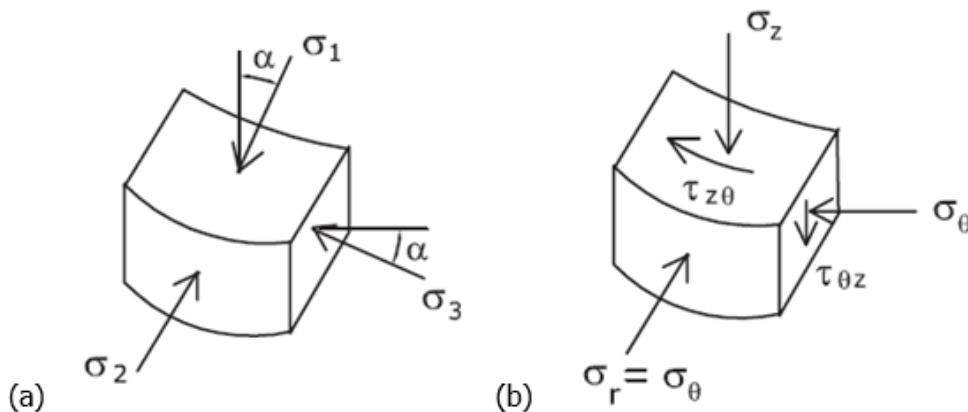


Figure 2. (a) Principal stresses, (b) Stresses in the walls of the specimen

In the sixth chapter the results that emerged from cyclic loading tests in the hollow cylinder apparatus are shown for clean sand specimens and sand-silt mixtures at contents 5%, 10% and 15%. The specimens were consolidated to initial mean effective stresses ranging from 50kPa up to 300kPa. Thus, in this chapter an effort was made to identify the effect of the initial consolidation pressure and the contribution of fines content on the mechanical behaviour of clean sand specimens and sand-silt mixtures under cyclic loading. The study was based both on sixty-three (63) cyclic loading tests from previous studies in the Soil mechanics Laboratory of the National Technical University of Athens, and a new set of tests conducted as part of this study which consisted of twenty-three (23) cyclic loading tests. The effect of density is examined for two sets of experiments (loose and dense specimens) in clean sand as well as in sand-silt mixtures; in both cases, the denser specimens showed improved behaviour in terms of liquefaction resistance compared to the looser specimens. However, for fine contents higher than 10% the effect of density diminishes. Subsequently, the effect of fine material content in sand-silt mixtures is examined for specimens consolidated to initial mean effective stresses $p'=50\text{kPa}$ to 300kPa . According to these findings, for specimens consolidated to a mean effective

stress of 50kPa the liquefaction resistance increases with the increasing silt content. The specimens though consolidated to greater mean effective stresses (100kPa – 300kPa) show a different response with the 5% silt content mixture exhibiting the highest resistance to liquefaction while further increase in silt content leads to lower resistance to liquefaction which however remains higher than that of the clean sand. (Figure 3.) Finally, in this chapter the results were normalized with respect to granular and global void ratio to point out the difference of the observed effects of fine content and initial mean effective stress depending on the void ratio used as the basis of comparison.

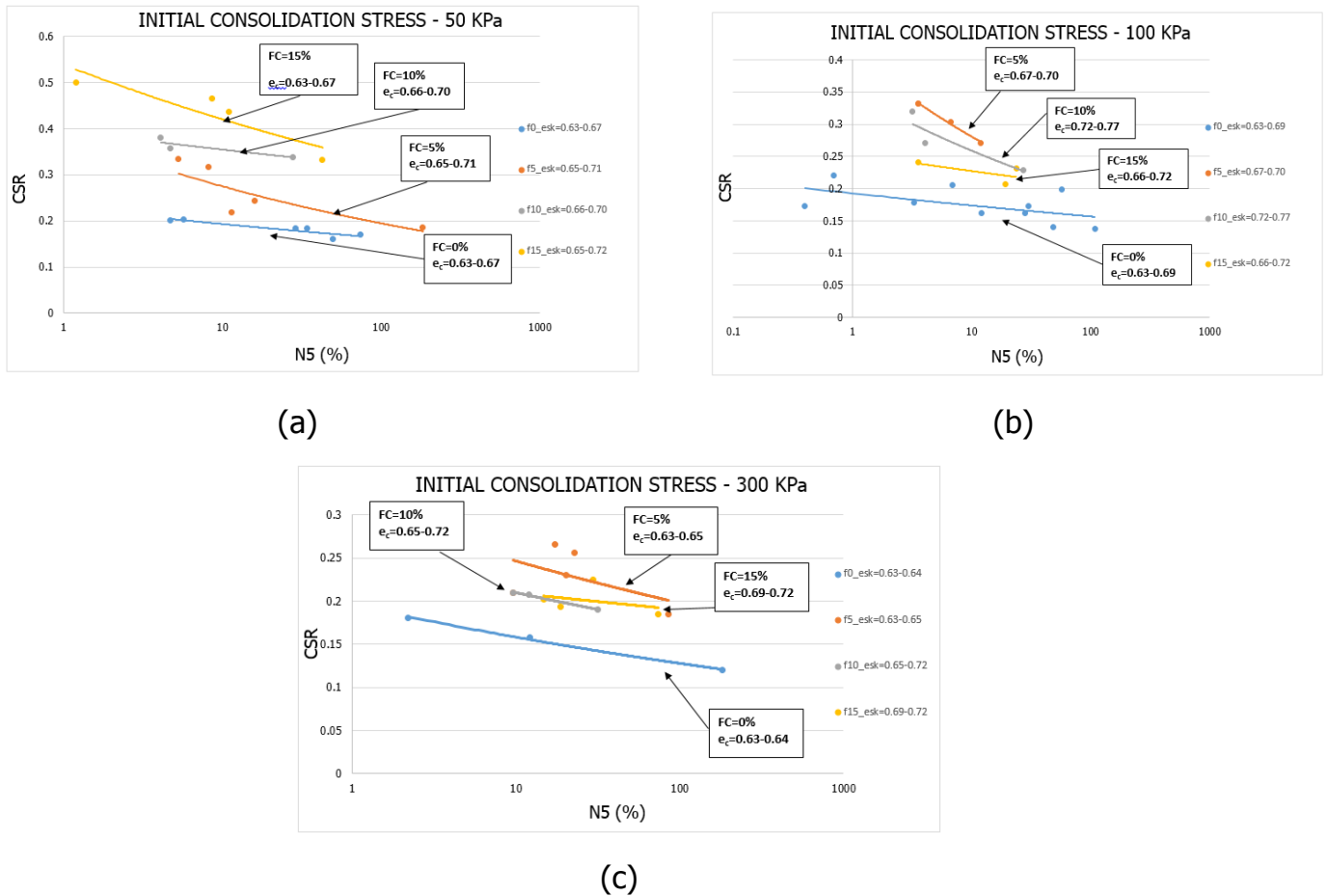


Figure 3. Cyclic stress ratio in relation to the number of cycles required for double amplitude shear strain of $\gamma_{DA}=5\%$ to be developed, where (a) Specimens consolidated at $p'=50\text{kPa}$, (b) Specimens consolidated at $p'=100\text{kPa}$ (c) Specimens consolidated at $p'=300\text{kPa}$

In the seventh chapter, the results of monotonic tests conducted in Hollow cylinder apparatus on specimens of clean sand and sand-silt mixtures of fine content 5%, 10% and 15% are presented. The specimens were consolidated at initial mean effective stresses ranging from 25kPa to 300kPa. In total, twenty eight (28) monotonic tests were carried out. Initially, in this chapter the effect of density is examined in specimens of clean sand and sand-silt mixtures with fine percentage of ranging from 5% to 15%.

According to the experimental results, a decrease in granular void ratio leads to an increase in shearing resistance and in a subsequent decrease in the strain range for which the excess pore pressures remain positive. Subsequently, the effect of fines content is examined for sand-silt mixtures, both in dense and loose specimens, which were consolidated to initial mean effective stresses ranging from 50kPa to 300kPa. The results are depicted in diagrams which illustrate mean effective stress in relation to deviatoric stress ($p'-q$), deviatoric stress in relation to shear strain ($q-\gamma_{\theta z}$) and excess pore pressure generation with shear strain ($\Delta u-\gamma_{\theta z}$). It was observed that the addition of fine material increases shear resistance compared to specimens of clean sand both in dense and loose specimens. Regarding the effect of consolidation mean effective stress on both specimens of clean sand and sand-silt mixtures with silt contents varying from 5% to 15% the results indicate that increasing the initial mean effective stress leads to an increase in shear strength. As a result specimens consolidated to 100kPa presented significantly greater tendency for contraction compared to specimens consolidated to 50kPa as well as wider range of shear strain for which excess pore pressures remain positive. Finally, the results of monotonic experiments were normalized with respect to the initial mean effective stress in order to define the effect of initial mean effective stress in both dense and loose specimens of clean sand and sand-silt mixtures.

In the eighth and final chapter, the general conclusions drawn from the cyclic and monotonic loading tests in the hollow cylinder apparatus are presented and analyzed; detailed comparison between the observations made for each of the two loading conditions is presented.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την διπλωματική αυτή εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησης μας στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με αυτή την αφορμή θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας σε όλους όσους έπαιξαν σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησης μας στο Ίδρυμα.

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κυρία Β. Ν. Γεωργιάδου που ήταν και η επιβλέπουσα της διπλωματικής μας εργασίας. Η διαρκής και υποδειγματική της καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική της κατάρτιση, συνέλαβαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, αφού ήταν πάντα διαθέσιμη και πρόθυμη να μας λύσει απορίες και γενικά να μας βοηθήσει να ξεπεράσουμε κάθε εμπόδιο που συναντήσαμε.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον τεχνικό του εργαστηρίου Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Στέλιο Τσεντίδη, για τις τεχνικές πληροφορίες και οδηγίες που μας έδωσε σχετικά με την χρήση και λειτουργία των συσκευών του εργαστηρίου.

Για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μας εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Παναγιώτη Τριαντάφυλλο.

Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ θα θέλαμε να το εκφράσουμε στις οικογένειες μας για την συμπαράσταση και στήριξή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

*Δημήτρης Παπαδόπουλος
Χρύσανθος Πολυδώρου
Ιούλιος, 2015*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικές παρατηρήσεις.....	1
1.2 Μικροδομή	2
1.3 Παράγοντες που επιδρούν στην συμπεριφορά καθαρής άμμου και μειγμάτων και μεταβάλλουν την αντίσταση τους έναντι ρευστοποίησης	6
1.3.1. Ποσοστό λεπτόκοκκων	6
1.3.2. Δείκτης πόρων	7
1.3.3. Ενεργός τάση	7
1.3.4. Αρχική δομή	7
1.3.5. Αρχική διατμητική τάση (προδιάτμιση).....	8
2. Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών	9
2.1. Εισαγωγή.....	9
2.2. Άμμος M31	9
2.3. Ιλύς D6.....	10
2.4. Προσδιορισμός κοκκομετρίας εδαφικών υλικών	11
2.4.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31	11
2.4.2. Κοκκομετρική διαβάθμιση ιλύος D6.....	12
2.5. Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων e_{max} και ελάχιστου δείκτη πόρων e_{min} της άμμου M31	13
2.6 Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων e_{max} και ελάχιστου δείκτη πόρων e_{min} σε όρους skeleton.....	18
3. Η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου με βάση βιβλιογραφικές αναφορές	21
3.1. Εισαγωγή.....	21
3.2.Βιβλιογραφικές αναφορές της επίδρασης του ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου.....	21
3.2.1. Πειράματα των Γεωργιάννου και Σάκκη (2010).....	21
3.2.2. Επεξεργασία πειραμάτων απο τους Αδριανόπουλο, Μπουκοβάλα και Παπαδημητρίου, 2001.....	24
3.2.3. Πειράματα των Γεωργιάννου , Τσομώκου και Σταύρου (2000)	26
3.2.4. Πειράματα των Sharafi και Baziar, 2012.....	28
3.2.5. Πειράματα των. Sitharam, Govinda Raju, Murthy, 2004.....	31
3.2.6. Πειράματα των Muley, Maheshwari and Paul 2012	34
3.2.7. Πειράματα των Belkhatir, Missoum, Arab, Della, και Schanz 2011.....	38

3.2.8. Πειράματα των Bensoula , Missoum και Bendani, 2014.....	42
3.2.9. Πειράματα των Salgado, Bandini και Karim, 2000.....	47
3.2.10. Πειράματα Παπαδοπούλου και Τίκα 2008.....	52
4. Περιγραφή συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου	59
4.1. Εισαγωγή.....	59
4.2. Γενικά χαρακτηριστικά - Μηχανισμοί - Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου	59
4.2.1. Βάση συσκευής.....	59
4.2.2. Τριαξονική κυψέλη	60
4.2.3. Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου	60
4.2.4. Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου	60
4.2.5. Κεντρική μονάδα παροχής αέρα.....	61
4.2.6. Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου	61
4.2.7. Μονάδα παροχής νερού.....	61
4.2.8. Καταγραφή πειραματικών δεδομένων - Ηλεκτρονικός Υπολογιστής	62
4.3. Πειραματική διαδικασία	62
4.3.1. Παρασκευή, τοποθέτηση, κορεσμός και ισότροπη στερεοποίηση δοκιμίου	62
4.3.2. Φόρτιση του δοκιμίου	64
5. Στρεπτική διάτμηση	77
5.1. Εισαγωγή.....	77
5.2. Στρεπτική διάτμηση κοίλου δοκιμίου	77
5.3 Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων στη δοκιμή στρέπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου.....	78
5.3.1 Υπολογισμός τάσεων.....	78
5.3.2. Υπολογισμός παραμορφώσεων	79
5.3.3. Υπολογισμός εντατικών μεγεθών κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση.....	80
6. Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών	85
6.1. Εισαγωγή.....	85
6.2. Διαδρομές τάσεων – Ενδεικτικά διαγράμματα ανακυκλικής δοκιμής	89
6.3. Επίδραση πυκνότητας	91
6.4. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων	97
6.4.1. Παρουσίαση διαγραμμάτων	97
6.4.2. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων σκελετού (esk)	106
6.4.3. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων (e).....	111
6.5. Επίδραση τάσης στερεοποίησης.....	115

6.5.1. Παρουσίαση διαγραμμάτων	116
6.5.2. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων σκελετού (esk)	122
6.5.3. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων (e).....	126
7. Αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών	133
7.1. Εισαγωγή.....	133
7.2. Επίδραση πυκνότητας	136
7.2.1. Τάση στεροποίησης 50 kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 0%.....	137
7.2.2. Τάση στεροποίησης 100kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%.....	139
7.2.3. Τάση στεροποίησης 300kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%.....	141
7.2.4. Τάση στεροποίησης 50 kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%	143
7.3. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων	147
7.3.1. Τάση στεροποίησης 50kPa.....	148
7.3.2. Τάση στεροποίησης 100 kPa	152
7.3.3. Τάση στεροποίησης 300kPa.....	160
7.4. Επίδραση τάσης στερεοποίησης	166
7.4.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων 0%.....	166
7.4.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων 5%.....	170
7.4.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων 15%	173
7.5. Κανονικοποίηση.....	178
7.5.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων 0%.....	178
7.5.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων 5%.....	183
7.5.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων 15%	185
7.6. Γραμμή αλλαγής φάσης (Phase Transformation Line).....	188
8. Ανάλυση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	193
8.1. Συμπεράσματα ανακυκλικών δοκιμών	194
8.1.1. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων.....	194
8.1.2. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων στα κανονικοποιημένα διαγράμματα	195
8.1.3. Επίδραση αρχικής ενεργού τάσης στερεοποίησης.....	195
8.1.4. Επίδραση πυκνότητας.....	196
8.2. Συμπεράσματα μονοτονικών δοκιμών	196
8.2.1. Επίδραση πυκνότητας.....	196
8.2.2. Επίδραση περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων.....	197
8.2.3. Επίδραση αρχικής ενεργού τάσης.....	197
8.3. Παρατηρήσεις απο την σύγκριση ανακυκλικών-μονοτονικών δοκιμών	198
9. Βιβλιογραφικές αναφορές.....	199

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικές παρατηρήσεις

Η ανισοτροπία και η πολυπλοκότητα του εδάφους απασχολούν τους επιστήμονες εδώ και πολλές δεκαετίες. Τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα σχετίζονται με απότομες μεταβολές του εντατικού πεδίου και γενικότερα σύνθετες εντατικές καταστάσεις. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη πραγματοποίησης πειραμάτων στο εργαστήριο που να προσομοιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πολύπλοκες διαδρομές τάσεων που παρατηρούνται στην φύση, έτσι ώστε να μπορέσουμε να κατανοήσουμε σε βάθος τους μηχανισμούς αυτούς.

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της καθαρής άμμου M31, αλλά και μειγμάτων άμμου M31 με διάφορα ποσοστά ιλύος D6. Στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου παρασκευάστηκαν δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και μείγματα με διάφορα ποσοστά ιλύος, τα οποία καταπονήθηκαν στην συσκευή κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder) του εργαστηρίου, υπό ανακυκλική φόρτιση αλλά και υπό μονοτονική φόρτιση. Η συσκευή αυτή σε σχέση με τις συνηθισμένες εργαστηριακές δοκιμές δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής εντατικού πεδίου στο δοκίμιο πολύ ευρύτερου των κλασικών δοκιμών. Αυξομειώνοντας κάποιες από τις επιβαλλόμενες παραμέτρους, παρέχει τη δυνατότητα να καθοριστούν οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3) με αποτέλεσμα να μπορεί να παραχθεί σχεδόν οποιοδήποτε εντατικό πεδίο.

Ένας ακόμη στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν να γίνει μία συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού λεπτοκόκκων σε μείγματα άμμου σε σχέση με την αντοχή τους έναντι ρευστοποίησης. Μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες δοκιμές είναι η Απλοποιημένη Μέθοδος (Simplified Procedure) που αξιοποιεί δεδομένα από δοκιμές SPT (Seed and Idriss;1971). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η αυξημένη παρουσία λεπτοκόκκων θεωρείται πάντοτε ευνοϊκή ως προς την αντοχή σε ρευστοποίηση κάτι το οποίο βάσει των πειραμάτων της παγκόσμιας κοινότητας δεν έχει ακόμη ξεκαθαριστεί. Άλλωστε, σοβαρά περιστατικά ρευστοποίησης έλαβαν χώρα σε περιοχές με ιλυώδη άμμο.

Η έρευνα του φαινομένου έχει δώσει μέχρι στιγμής αποτελέσματα τα οποία ποικίλουν μεταξύ τους. Οι ερευνητές αναφέρουν ευνοϊκή, ασήμαντη ή δυσμενή επίδραση της παρουσίας λεπτοκόκκων. Πιθανώς αυτό να οφείλεται στις διαφορετικές βάσεις σύγκρισης που χρησιμοποιούν οι διάφοροι ερευνητές. Παράγοντες όπως η σχετική κοκκομετρία των δύο κλασμάτων του μίγματος (Vaid et al ; Ishihara, 1985; Kokusho ; Castro et al, 1982), η κατάλληλη επιλογή του δείκτη πόρων, η αρχική ενεργός τάση, η προδιάτμηση, ο τρόπος επιβολής της φόρτισης, η αρχική δομή του μείγματος και πολλοί άλλοι παράγοντες φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή των μειγμάτων έναντι ρευστοποίησης.

Για την ερμηνεία των φαινομένων με μία κοινή βάση αναφοράς έχει προταθεί ένα θεωρητικό πλαίσιο περιγραφής της μικροδομής του υλικού. Σε αστράγγιστες συνθήκες καθοριστικό ρόλο παίζουν οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων. Αυτές με τη σειρά τους εξαρτώνται από την συμπίεστικότητα – παραμορφωσιμότητα του υλικού και άρα από την εσωτερική δομή του. Οι Lade et al (2009) για παράδειγμα, προτείνουν τη χρήση της ογκομετρικής συμπίεστικότητας ως μέτρο του δυναμικού ρευστοποίησης.

Για λόγους πληρότητας γίνεται και μία μικρή περιγραφή της μικροδομής του υλικού, η οποία είναι αναγκαία τόσο για την κατανόηση των φαινομένων αλλά και για να υπάρχει και μια κοινή βάση αναφοράς.

1.2 Μικροδομή

Είναι πλέον ευρέως γνωστό ότι η μηχανική συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητά τους. Ένας αμμώδης σχήματισμός που βρίσκεται σε χαλαρή δομή μειώνει τον όγκο του κατά την διάτμηση με αποτέλεσμα σε αστράγγιστες φορτίσεις να αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων (συστολικότητα). Αντίθετα εάν ο ίδιος σχήματισμός βρίσκεται σε πυκνή δομή η αναδιάταξη των κόκκων στην αρχή της διάτμησης τείνει να μειώσει τα κενά αλλά πολύ γρήγορα αυτό ανατρέπεται. Έτσι στα πιο πυκνά δοκίμια παρατηρείται διαστολική συμπεριφορά συνήθως, δηλαδή τάση του υλικού να αυξήσει τα κενά του, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αρνητικές πιέσεις πόρων. Γνωρίζοντας τη σχετική πυκνότητα (D_r) ή το δείκτη πόρων (e) μιας καθαρής άμμου μπορούμε να εκτιμήσουμε την απόκρισή της. Η χρήση αυτών των δεικτών κατάστασης θα λέγαμε ότι είναι αμφιλεγόμενη στην περίπτωση μειγμάτων όπου δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο κατά πόσο το ποσοστό ιλύος συμβάλλει στην καλύτερη αλληλεμπλοκή των κόκκων ή όχι.

Όσο αφορά τα μείγματα θα λέγαμε ότι η συμπεριφορά εξαρτάται από τις επιμέρους ιδιότητες των δυο υλικών όπως το σχήμα των κόκκων και την σχετική τους κοκκομετρία (Monkul ; 2010). Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, δόθηκε έμφαση στη συνεισφορά του ποσοστού ιλύος στα μείγματα και στην επίδραση του στην μικροδομή.

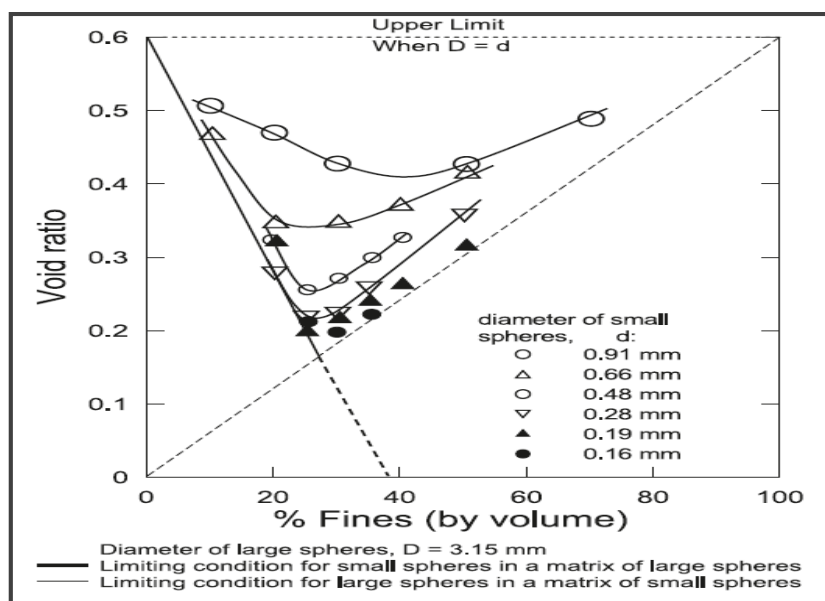
Έρευνες στην μελέτη μειγμάτων άμμου με ποσοστά ιλύος (Carraro et al. 2003; Kuerbis and Vaid 1988; Polito and Martin 2003; Salgado et al. 2000; Thevanayagam et al. 2002) έδειξαν ότι για να γίνει σωστή σύγκριση και αποτίμηση πειραμάτων είναι ανάγκαia η σωστή επιλογή του κατάλληλου δείκτη πυκνότητας.

Για παράδειγμα, στο παρελθόν έχουν δημοσιευθεί αντιφατικά αποτελέσματα σχετικά με την διατμητική αντοχή μειγμάτων λόγω της ακαταλλήλης επιλογής του δείκτη κενών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του δείκτη πόρων σκελετού e_{sk} (skeleton void ratio) (Kuerbis et al. 1988 ; Georgiannou et al. 1990) (Georgiannou, Burland, Hight) Shen et al. 1977) όπου οι πυκνότητες των διαφόρων δοκιμίων εκφράζονται σε όρους σκελετού με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$e_{sk} = (e + FC/100) / (1 - FC/100)$$

όπου FC είναι ο λόγος του ξηρού βάρους των λεπτοκόκκων προς το συνολικό ξηρό βάρος.

Η διάμετρος των κόκκων των εδαφικών υλικών είναι μια άλλη βασική παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση του εδάφους. Οι Lade et al. (1998), μεταβάλλοντας το ποσοστό των μικρών σφαιριδίων από 0% σε 100%, υπολόγισαν πειραματικά αλλά και θεωρητικά τις πιο πυκνές διατάξεις που μπορούν να επιτευχθούν (binary packing). Η διαδικασία επαναλαμβάνονταν για ζεύγη σφαιριδίων με διαφορετικούς λόγους διαμέτρων, τα αποτελέσματα της οποίας παριστάνονται στο Σχήμα 1.1..



Σχήμα 1.1. Επίδραση του λόγου διαμέτρων και του ποσοστού λεπτοκόκκων στον ελάχιστο δείκτη πόρων – πραγματικές μετρήσεις για εναπόθεση μεταλλικών σφαιριδίων.

Απο το Σχήμα 1.1. μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

α) Οι θεωρητικές ευθείες γραμμές αναφέρονται σε σφαιρίδια απειροστού μεγέθους. Όσο η διάμετρος των μικρών σφαιρών πλησιάζει εκείνη των μεγάλων, τόσο απομακρυνόμαστε από τις θεωρητικές τιμές καθώς οι μικροί κόκκοι δυσκολεύονται να χωρέσουν στα κενά.

β) Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του Ποσοστού Λεπτοκόκκων (Fines Content Threshold Value) $FC_{th} \approx 30\%$, όπου η μικροδομή αλλάζει. Για $FC < FC_{th}$ έχουμε λεπτοκόκκα σε ένα σκελετό από χονδροκόκκα. Για $FC > FC_{th}$ έχουμε χονδροκόκκα σε ένα σκελετό από λεπτοκόκκα.

Επίσης, η ύπαρξη οριακής τιμής του ελάχιστου δείκτη πόρων (e_{min}) και του μέγιστου δείκτη πόρων (e_{max}) για συγκεκριμένο ποσοστό λεπτοκόκκων αναγνωρίζεται και στην

εργασία του Thevanayagam et al. (2002) όπως επίσης και το ότι η ικανότητα ενός σκελετού να φέρει φορτίο είναι ευθέως ανάλογη των ενεργών επαφών που δημιουργούνται εντός του σκελετού.

Ως προς τον δείκτη πόρων κενών (e) προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις στη διεθνή βιβλιογραφία, όμως στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί.

Ολικός Δείκτης Πόρων (e):

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

όπου V_v : όγκος κενών (voids)

V_s : όγκος στερεών (solids)

Θα λέγαμε ότι αυτή η προσέγγιση ταιράζει περισσότερο σε ομοιογενείς εδαφικούς σχηματισμούς λόγω του ότι αυτός ο ολικός δείκτης πόρων δεν κάνει διάκριση μεταξύ λεπτόκοκκων ή χονδροκοκκων.

Δείκτης Πόρων Σκελετού (e_c):

$$e_c = \frac{V_v + V_f}{V_s} = \frac{(e + FC)}{(1 - FC)}$$

όπου e : ο ολικός δείκτης πόρων

FC : το ποσοστό λεπτόκοκκων

V_v : όγκος κενών (voids)

V_s : όγκος στερεών (solids)

V_f : όγκος λεπτόκοκκων (fines)

Σε αυτόν τον δείκτη πόρων, η ύπαρξη του λεπτόκοκκου υλικού αγνοείται και όλος ο λεπτόκοκκος σχηματισμός θεωρείται μέρος των κενών. Επίσης για $FC=0\%$ ο δείκτης πόρων σκελετού (e_{sk}) ταυτίζεται με τον ολικό δείκτη πόρων(e).

Δείκτης Πόρων Λεπτόκοκκων (e_f):

$$e_f = \frac{V_v - V_f}{V_f} = \frac{e}{FC}$$

όπου e : ο ολικός δείκτης πόρων

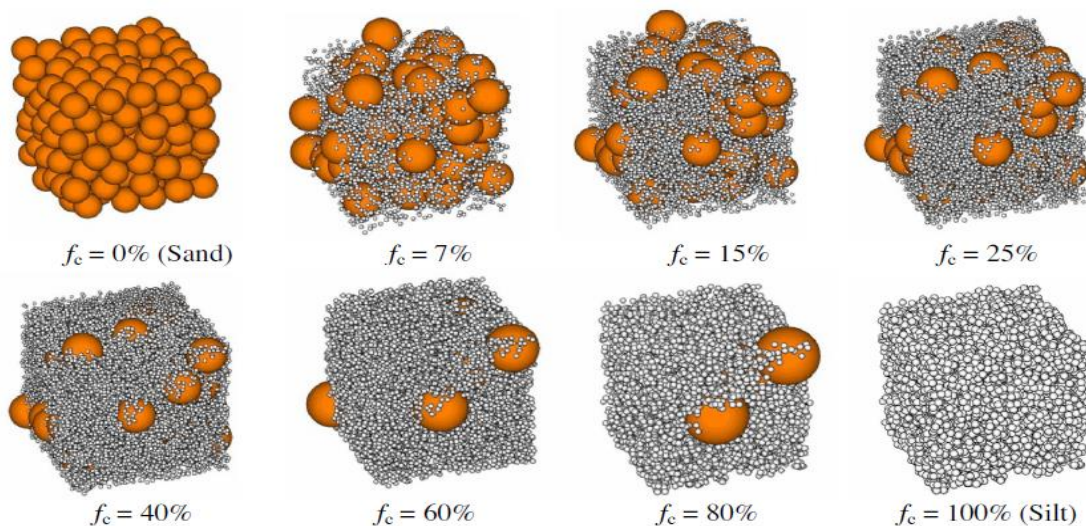
FC : το ποσοστό λεπτόκοκκων

V_v : όγκος κενών (voids)

V_f : όγκος λεπτόκοκκων (fines)

Για $FC=100\%$, ο δείκτης πόρων λεπτόκοκκων (e_f) ταυτίζεται με τον ολικό δείκτη πόρων σε δείγμα από καθαρή ιλύ. Στην περίπτωση μείγματος, ως διαθέσιμος χώρος λαμβάνονται τα κενά που αφήνει ο σκελετός των χονδροκόκκων.

Στο Σχήμα 1.2. φαίνονται οι διάφορες μορφές μικροδομής σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Παρατηρώντας την εικόνα αυτή, μπορούμε να πούμε ότι μέχρι ένα ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού στο μείγμα γύρω στο 25%, τα λεπτόκοκκα υλικά δεν συμμετέχουν στην μεταφορά δυνάμεων εντός του σκελετού και κατάλληλος δείκτης πόρων θεωρείται ο δείκτης πόρων σκελετού (e_{sk}).



Σχήμα 1.2. Τρισδιάστατη απεικόνιση της μικροδομής μειγμάτων άμμου με διάφορα ποσοστά ιλύος

Στην περίπτωση της καθαρής άμμου, όπου $FC=0\%$, ο ολικός δείκτης πόρων (e) είναι πιο αντιπροσωπευτικός λόγω του ότι τα κενά είναι γεμάτα με αέρα και όχι με λεπτόκοκκο υλικό.

Για ενδιάμεσες τιμές χρησιμοποιείται ο ισοδύναμος δείκτης πόρων (e_{eq}) που υπολογίζεται ως εξής:

$$e_{eq} = \frac{(e + (1 - b)FC)}{(1 - (1 - b)FC)}, 0 < b < 1$$

όπου e : ο δείκτης πόρων του μίγματος

FC : το ποσοστό λεπτόκοκκων,

b : το ποσοστό συμμετοχής των λεπτόκοκκων στην αλληλοεμπλοκή των κόκκων της άμμου.

Ο προσδιορισμός του b γίνεται προς το παρόν με αντίστροφες αναλύσεις πειραματικών δεδομένων. Γίνονται και προσπάθειες για το συσχετισμό του με παραμέτρους όπως το FC , ο λόγος χαρακτηριστικών διαμέτρων της κοκκομετρίας των συστατικών (π.χ. D_{50} / d_{10}), το FC_{th} κ.ά.. Στόχος είναι η εκτίμηση του b με γνωστές μόνο τις φυσικές ιδιότητες των συστατικών και την αναλογία τους.

Γενικότερα, στα μείγματα οι συνήθεις δείκτες όπως η σχετική πυκνότητα (D_r) ή ο δείκτης πόρων (e) δεν μας λένε κάτι για την συμπεριφορά του υλικού λόγω του ότι δεν λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη δύο διαφορετικών υλικών και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικοί δείκτες των ενεργών επιφανειών που υπάρχουν στον σκελετό του μίγματος.

1.3 Παράγοντες που επιδρούν στην συμπεριφορά καθαρής άμμου και μειγμάτων και μεταβάλλουν την αντίσταση τους έναντι ρευστοποίησης

1.3.1. Ποσοστό λεπτόκοκκων

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που συμβάλει και θετικά και αρνητικά στην αντίσταση έναντι ρευστοποίησης είναι το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο εδαφικό δοκίμιο. Τα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών είναι αντιφατικά και αντικρουόμενα. Υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι η αύξηση του ποσοστού μη πλαστικής ιλύος αυξάνει το δυναμικό ρευστοποίησης (Chang et al, 1982; Tokimatsu et Yoshimi, 1983) και άλλες που δείχνουν ότι το δυναμικό ρευστοποίησης μειώνεται (Tronsco and Verdugo, 1985; Vaid, 1994). Επίσης μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι το δυναμικό ρευστοποίησης δεν είναι τόσο συνάρτηση του ποσοστού ιλύος, όσο είναι συνάρτηση του δείκτη πόρων του εδαφικού σκελετού (e_{sk}).

1.3.2. Δείκτης πόρων

Ο δείκτης πόρων, μπορούμε να πούμε ότι είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή ως προς την ρευστοποίηση. Είναι δυνατόν δοκίμια μειγμάτων με ίδια αρχική ενεργό τάση, να συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά λόγω διαφορετικής πυκνότητας. Τα χαλαρά δοκίμια τείνουν να αναπτύσσουν υπερπίεσεις πόρων (συστολική συμπεριφορά), ενώ μικρές τιμές του δείκτη πόρων αναπτύσσουν αρνητικές πιέσεις πόρων (διαστολικότητα). Για ενδιάμεσες τιμές του δείκτη πόρων τα δοκίμια παρουσιάζουν αρχικά συστολική συμπεριφορά και αργότερα μια τάση για διαστολή. Διάφοροι δείκτες πόρων έχουν χρησιμοποιηθεί για μείγματα άμμων με ποσοστό ιλύος, όμως στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν συγκρίσεις με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού (Skeleton Void Ratio) .

1.3.3. Ενεργός τάση

Ένας άλλος παράγοντας, η σημασία του οποίου είναι καθοριστική στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης είναι η ενεργός τάση. Σε πειράματα που έγιναν στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές, παρατηρήθηκε ότι σε δοκίμια τα οποία είχαν την ίδια πυκνότητα, αυτά που στερεοποιήθηκαν σε μεγαλύτερη αρχική ενεργό τάση, είχαν και την μεγαλύτερη τάση για συστολή (Ishihara, 1993). Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 20% παρατηρείται ταύτιση της συμπεριφοράς των δοκιμίων που στερεοποιούνται σε διαφορετικές τάσεις η οποία προσεγγίζει παρόμοια τιμή αντοχής στη σταθερή κατάσταση.

1.3.4. Αρχική δομή

Η αρχική δομή του μείγματος ή της καθαρής άμμου είναι ένας άλλος παράγοντας που δεν θα μπορούσε να αμεληθεί. Στα διάφορα εργαστήρια έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες όσον αφορά τον τρόπο παρασκευής των δοκιμίων και την μελέτη της δομής και της αντίστοιχης συμπεριφοράς των δοκιμίων σε φόρτιση. Στόχος είναι η παραγωγή στο εργαστήριο δοκιμίων που να έχουν κατά το δυνατόν παρόμοια δομή με εκείνη των φυσικών αποθέσεων των διάφορων εδαφικών υλικών.

Υπάρχουν τρόποι εναπόθεσης δειγμάτων που από τη φύση της μεθοδολογίας τα δοκίμια γίνονται πιο στιβαρά(π.χ. water pluviation) . Αντίθετα, υπάρχουν και άλλοι τρόποι παρασκευής δοκιμίων (π.χ wet tamping) οι οποίοι παράγουν πιο χαλαρά δοκίμια.

1.3.5. Αρχική διατμητική τάση (προδιάτμηση)

Τέλος, ένας παράγοντας με καίρια σημασία είναι η αρχική διατμητική τάση (προδιάτμηση). Τις περισσότερες φορές, η εντατική κατάσταση ενός δοκιμίου είναι ανισότροπη και είναι πολύ πιθανόν να βρίσκεται υπο μια αρχική διατμητική τάση πριν εφαρμοσθεί οποιαδήποτε άλλη φόρτιση. Το γεγονός αυτό έχει απασχολήσει αρκετούς επιστήμονες που με διάφορες δοκιμές προσπάθησαν να εξακριβώσουν τον ρόλο και την σημασία του παράγοντα αυτού. Οι Lee and Seed (1967), Lee et al. (1975), Seed et al. (1975), Seed (1983) και Hosono and Yoshimine (2004) υποδουκνείουν ότι όταν η άμμος υποβάλλεται σε ανακυκλική φόρτιση, η παρουσία αρχικής διατμητικής τάσης αυξάνει την αντίσταση της έναντι ρευστοποίησης. Αντίθετα, οι Castro (1965, 1975), Casagrande (1975), Castro and Poulos (1977) και Yoshimi and Tokimatsu (1978) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της αρχικής διατμητικής τάσης μπορεί να μειώσει την αντίσταση της άμμου έναντι ρευστοποίησης ή να την αφήσει ανεπηρέαστη.

Πολλές φορές στο εργαστήριο επιτυγχάνεται η προδιάτμηση στην τριαξονική συσκευή κάνοντας ανισότροπη στερεοποίηση όπου ο λόγος $K_c = \frac{\sigma_{1c}'}{\sigma_{3c}'}$ είναι μεγαλύτερος της μοναδής. Στην συσκευή κοίλου δοκιμίου η προδιάτμηση επιβάλλεται με μία αρχική στρεπτική τάση στερεοποίησης τ_s πριν από την κυρίως φόρτιση.

2. Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών

2.1. Εισαγωγή

Κατά την εκτέλεση πειραμάτων στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιούνται εργαστηριακές άμμοι και ιλύς και όχι εδαφικά υλικά τα οποία μπορούμε να συλλέξουμε από το φυσικό περιβάλλον. Αυτά τα εδαφικά υλικά είναι κατάλληλα επεξεργασμένα ώστε να είναι καθαρά (χωρίς προσμίξεις με άλλα υλικά), σχετικά ομοιογενή, κατάλληλα διαβαθμισμένα και να περιέχουν κόκκους με χαρακτηριστικό μέγεθος και σχήμα. Η χρησιμοποίηση τέτοιων εδαφικών υλικών οδηγεί σε ακριβή συμπεράσματα για την εδαφική απόκριση καθώς είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους.

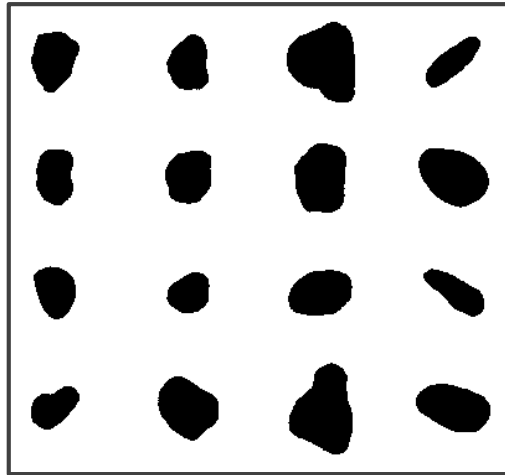
Επιγραμματικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι:

- Άμμος M31
- Ιλύς D6

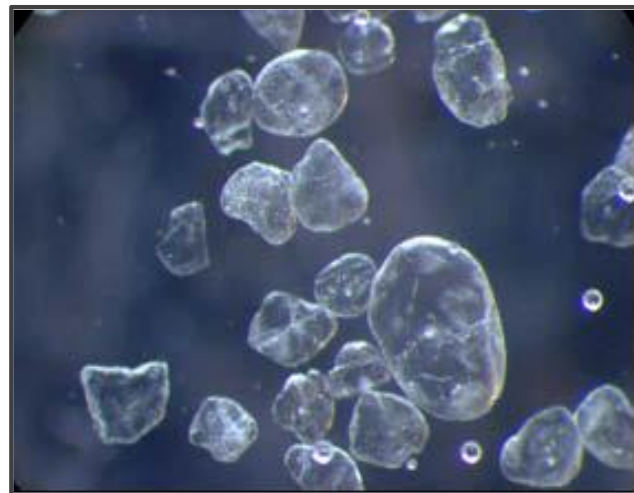
Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του κάθε υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί.

2.2. Άμμος M31

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, ως χονδρόκοκκο υλικό χρησιμοποιήθηκε η τεχνητή άμμος M31. Η άμμος αυτή είναι κατά 99% οξειδίο του πυριτίου (SiO_2), ενώ μπορεί να περιέχει και άλλες προσμίξεις. Είναι μια καλά διαβαθμισμένη άμμος με ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών $G_s=2.66\text{gr/cm}^3$ και το σχήμα των κόκκων της είναι γενικά ακανόνιστο με κόκκους από ωοειδείς έως και υπογωνιώδεις. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τα Σχήματα 2.1. και 2.2, η επιφάνεια των κόκκων εμφανίζεται στρογγυλευμένη και χωρίς γωνιώδεις απολίξεις.



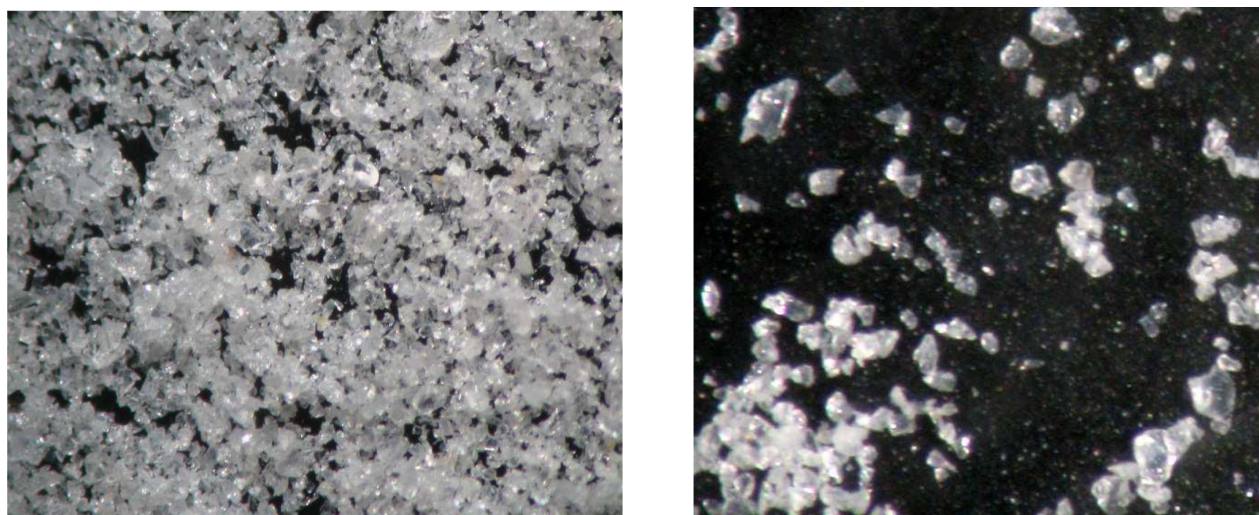
Σχήμα 2.1. Δισδιάστατη απεικόνιση κόκκων άμμου μέσω της συσκευής QicPic.



Σχήμα 2.2. Εικόνα απο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο κόκκων άμμου M31.

2.3. Ιλύς D6

Ως λεπτόκοκκο κλάσμα χρησιμοποιήθηκε η αμμώσης ιλύς D6. Πρόκειται για προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου με απειροελάχιστη ποσότητα μαύρων κόκκων, που πιθανόν να οφείλονται σε ανθρώπινη επιμόλυνση. Οι κόκκοι της ιλύος D6 είναι διαυγείς και εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα, γεγονός που αποδίδεται στη θραύση τους. Επίσης η ιλύς D6 είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερη ενεργό οξύτητα (pH).



Σχήμα 2.3. Άποψη του Σχήματος και της μορφής των κόκκων της ιλύος D6.

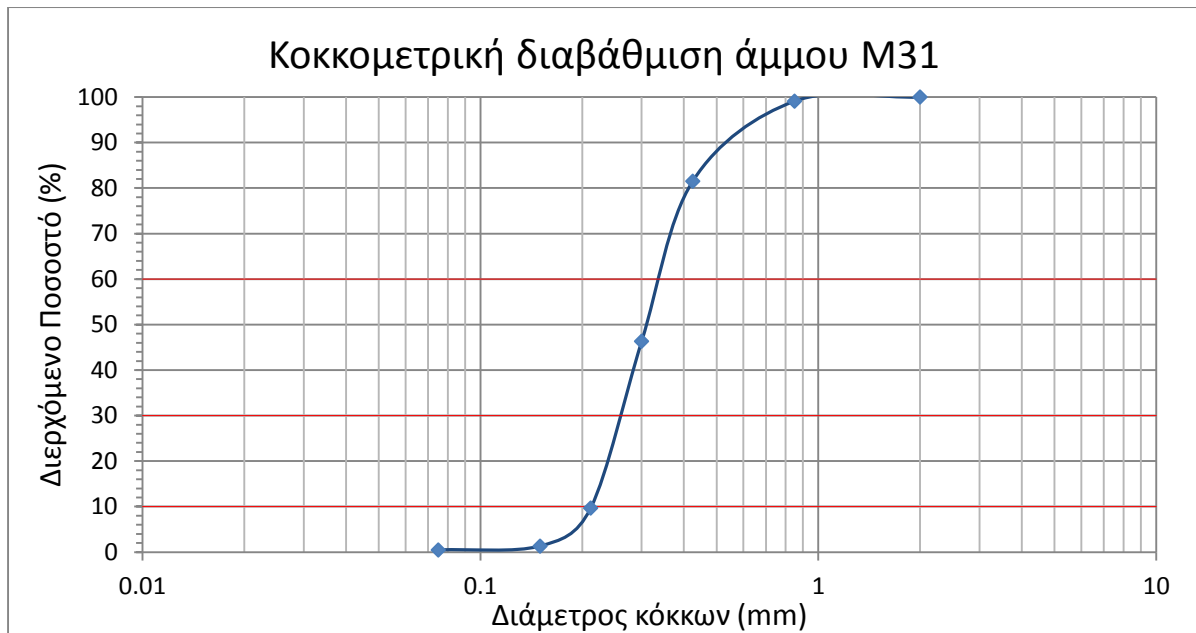
2.4. Προσδιορισμός κοκκομετρίας εδαφικών υλικών

2.4.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31

Το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων μιας άμμου επηρεάζουν σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά της και για τον λόγο αυτό μελετώνται ξεχωριστά στα πλαίσια της διαδικασίας εύρεσης της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 σε αυτή την διπλωματική εργασία προσδιορίστηκε με την βοήθεια κοσκίνων διαφορετικής διαμέτρου οπής σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στα British Standards 1377 (BS1377). Η σειρά κοσκίνων που επιλέγει για τα εξεταζόμενα υλικά περιγράφεται στον Πίνακα 2.1.. Επίσης, στο Σχήμα 2.4. παρουσιάζεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της άμμου M31 όπως προέκυψε μετά απο την παραπάνω πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο.

Ονομασία κοσκίνου	Διάμετρος οπής κοσκίνου (mm)
No 10	2.000
No 20	0.850
No 40	0.425
No 50	0.300
No 70	0.212
No 100	0.150
No 200	0.075

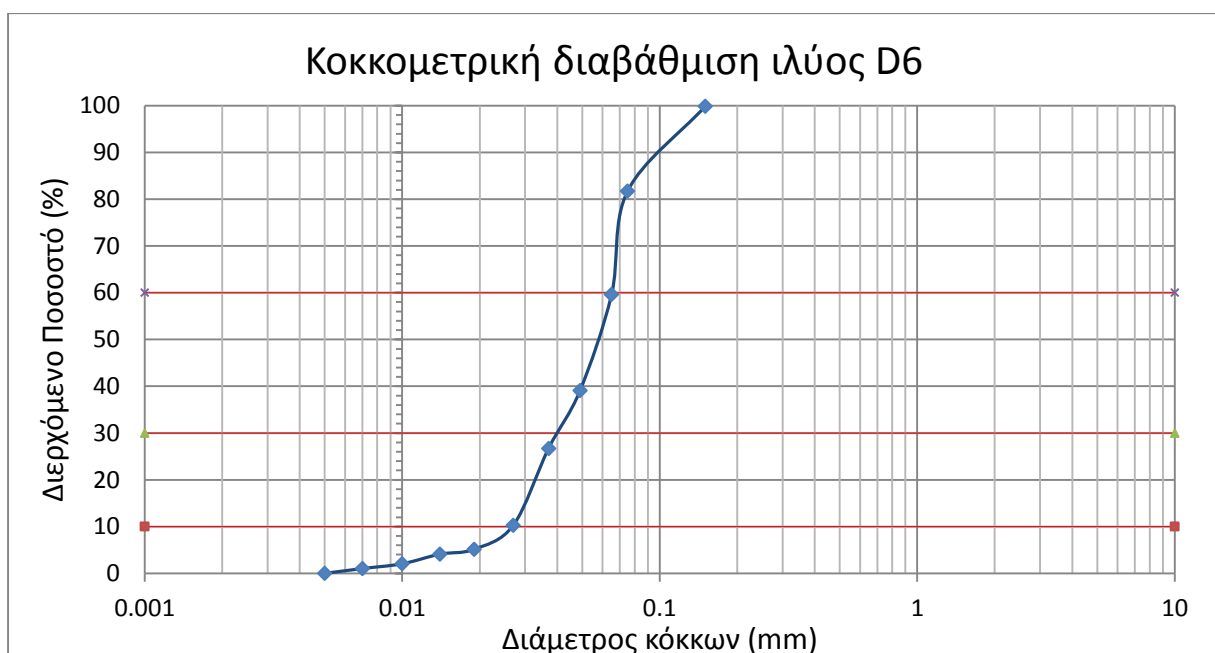
Πίνακας 2.1. Ονομασία και διάμετρος οπής κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο



Σχήμα 2.4. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31

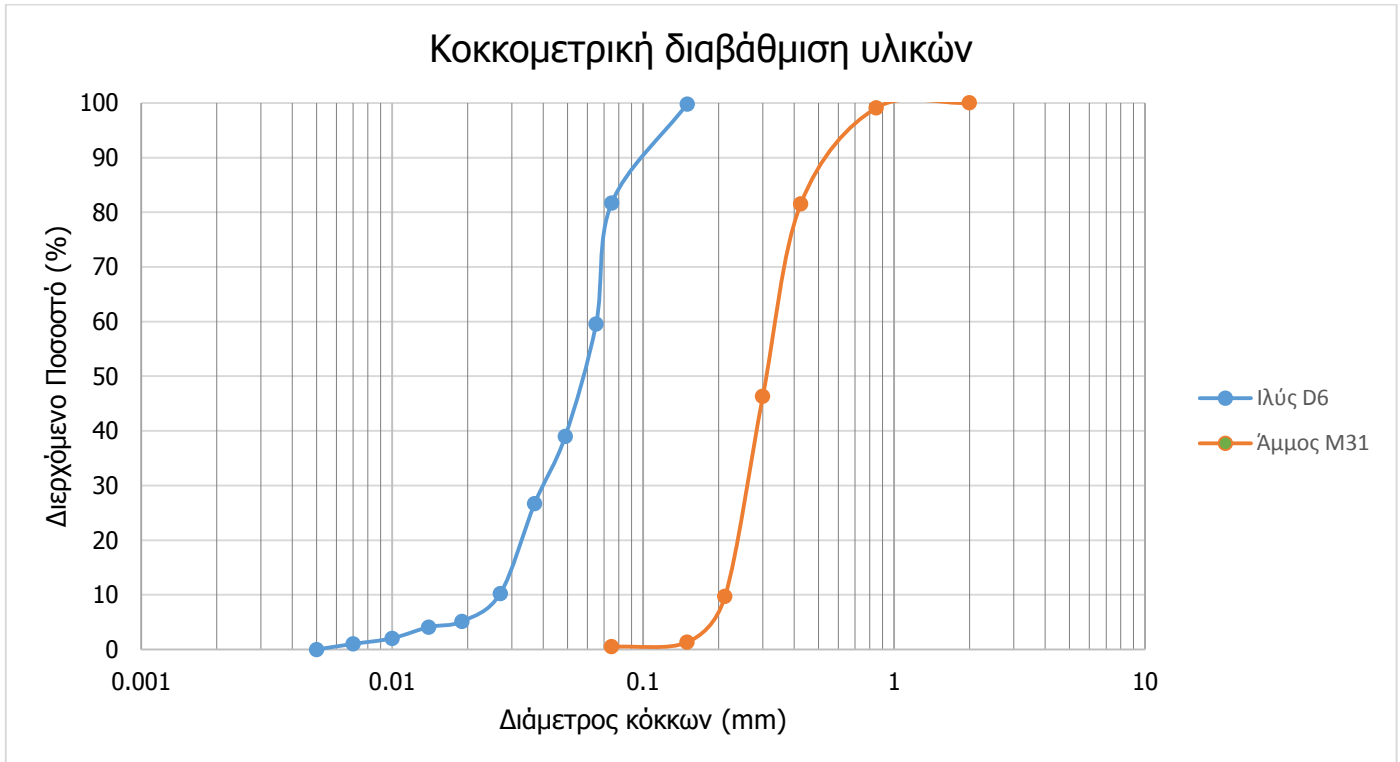
2.4.2. Κοκκομετρική διαβάθμιση ιλύος D6

Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης της ιλύος D6 χρησιμοποιήθηκε από την παραπάνω διαδικασία μόνο το κόσκινο Νο 200. Όσο ποσοστό πέρασε από το κόσκινο αυτό, διαβαθμίστηκε με την βοήθεια πυκνομέτρου. Η τελική κοκκομετρική καμπύλη της ιλύος, όπως υπολογίστηκε πειραματικά στο εργαστήριο φαίνεται στο Σχήμα 2.5..



Σχήμα 2.5. Κοκκομετρική διαβάθμιση ιλύος D6

Τέλος, στο Σχήμα 2.6. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις της άμμου (M31) και της ιλύος (D6) που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 2.6. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31 και ιλύος D6

2.5. Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων e_{max} και ελάχιστου δείκτη πόρων e_{min} της άμμου M31

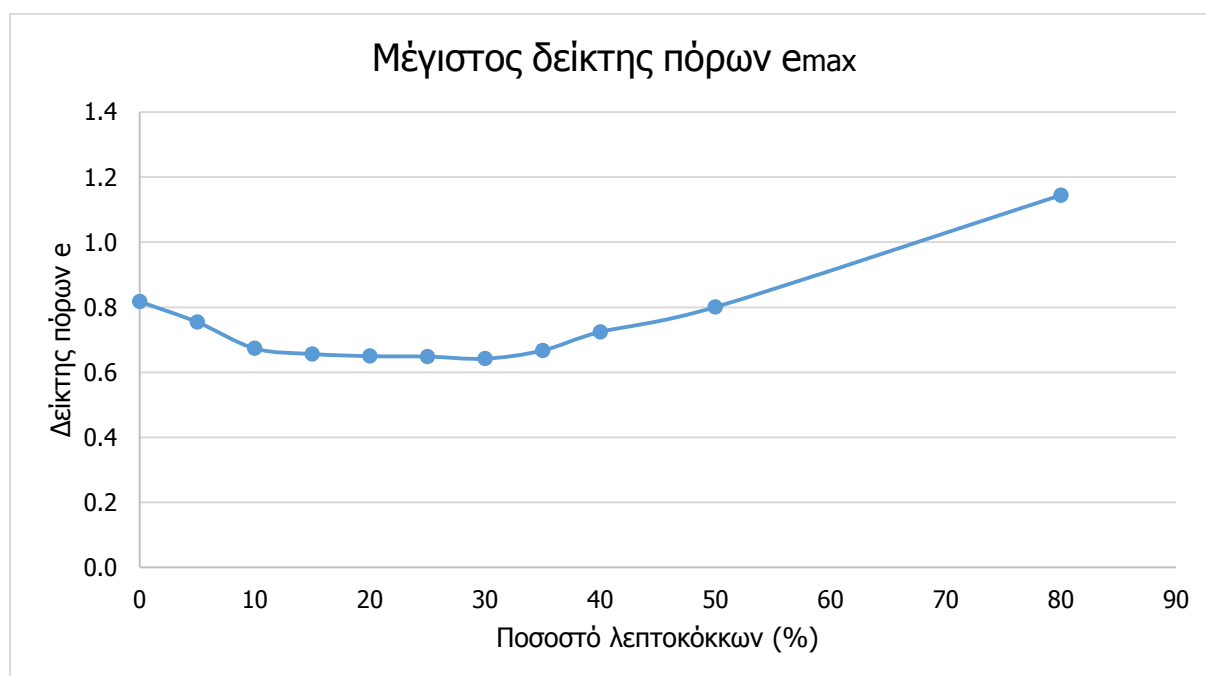
Ο μέγιστος δείκτης πόρων e_{max} , δηλαδή η χαλαρότερη δομή της άμμου M31 προσδιορίστηκε με βάση την μέθοδο του Kolbuszewski (1948b). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η διαδικασία έχει ως εξής:

- Σε γυάλινο δοκιμαστικό σωλήνα χωρητικότητας 1lt αποτίθενται περίπου 500gr ξηρής άμμου.
- Στο ελεύθερο άκρο του δοκιμαστικού σωλήνα τοποθετείται ελαστικό κάλυμμα.
- Ο δοκιμαστικός σωλήνας αναταράσσεται μερικές φορές μαζί με την άμμο και αναποδογυρίζεται. Κατόπιν και πολύ γρήγορα με μια κίνηση, αναποδογυρίζεται και πάλι και επιστρέφει στην κανονική του θέση.
- Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τουλάχιστον 5 φορές και καταγράφεται ο μέγιστος όγκος του δοκιμίου (που αντιστοιχεί και στην χαλαρότερη δομή) με βάση την ένδειξη του δοκιμαστικού σωλήνα.

- Μέσω του όγκου του δοκιμίου, του G_s και του βάρους της άμμου υπολογίζεται ο μέγιστος δείκτης πόρων e_{max} .

Με βάση την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι η τιμή του μέγιστου δείκτη πόρων e_{max} της καθαρής άμμου M31 είναι ίσος με 0,80.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία για την εύρεση του μέγιστου δείκτη πόρων μείγματος που περιέχει άμμο M31 και κάθε φορά διαφορετικό ποσοστό ιλύος D6. Θεωρήθηκε ότι η άμμος περιέχει 100% χονδρόκοκκο υλικό ενώ η ιλύς αποτελείται από 80% λεπτόκοκκο υλικό και 20% χονδρόκοκκο. Έγιναν δοκιμές για εύρεση του μέγιστου δείκτη πόρων e_{max} για μείγματα με ποσοστό λεπτοκόκκων 0% , 5% , 10% , 15% , 20% , 25% , 30% , 35% , 40% , 50% και 80%. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία, τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7..



Σχήμα 2.7. Μέγιστος δείκτης πόρων συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων

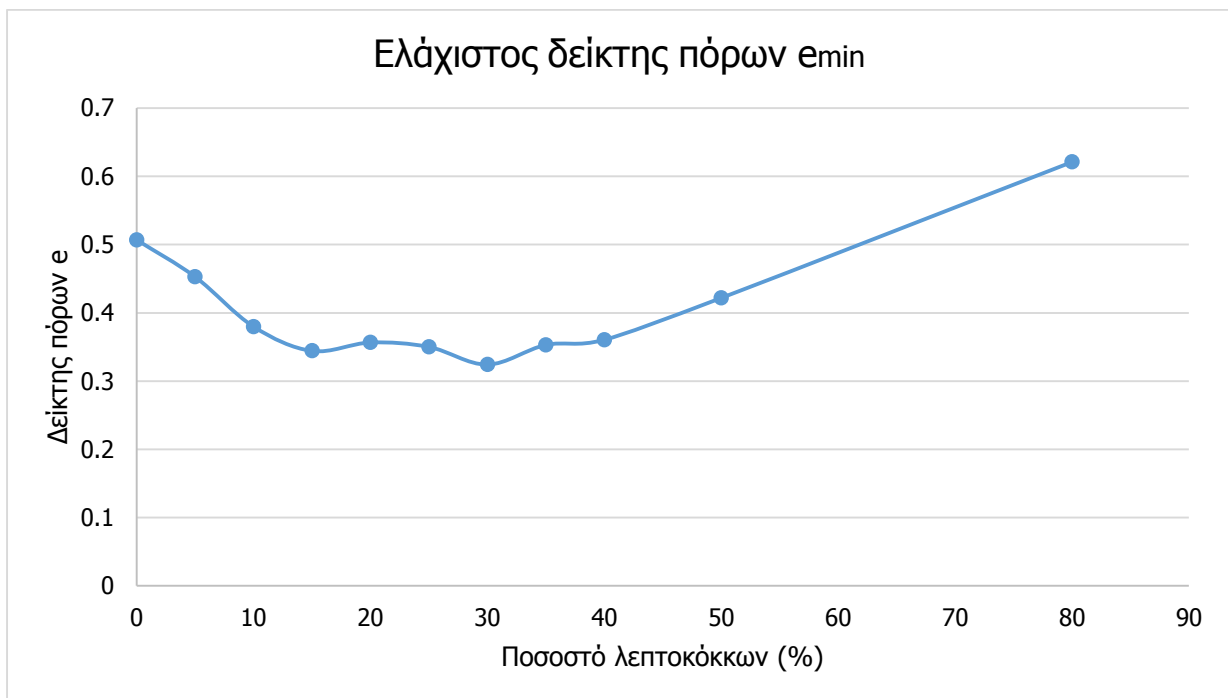
Ο ελάχιστος δείκτης πόρων e_{min} , δηλαδή η πυκνότερη δομή της άμμου M31 προσδιορίστηκε ως εξής:

- Σε ειδικό δοχείο κυλινδρικού σχήματος αποτίθεται σε τρεις διαδοχικές στρώσεις η εξεταζόμενη άμμος.
- Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με συνεχή χτυπήματα της άμμου (100 περίπου ανά στρώση), από ειδικό χειροκίνητο όργανο.
- Καταγράφεται ο συνολικός όγκος του δοκιμίου και ζυγίζεται το βάρος του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

- Μέσω του όγκου του δοκιμίου, του G_s και του βάρους της άμμου υπολογίζεται ο ελάχιστος δείκτης πόρων e_{min} .

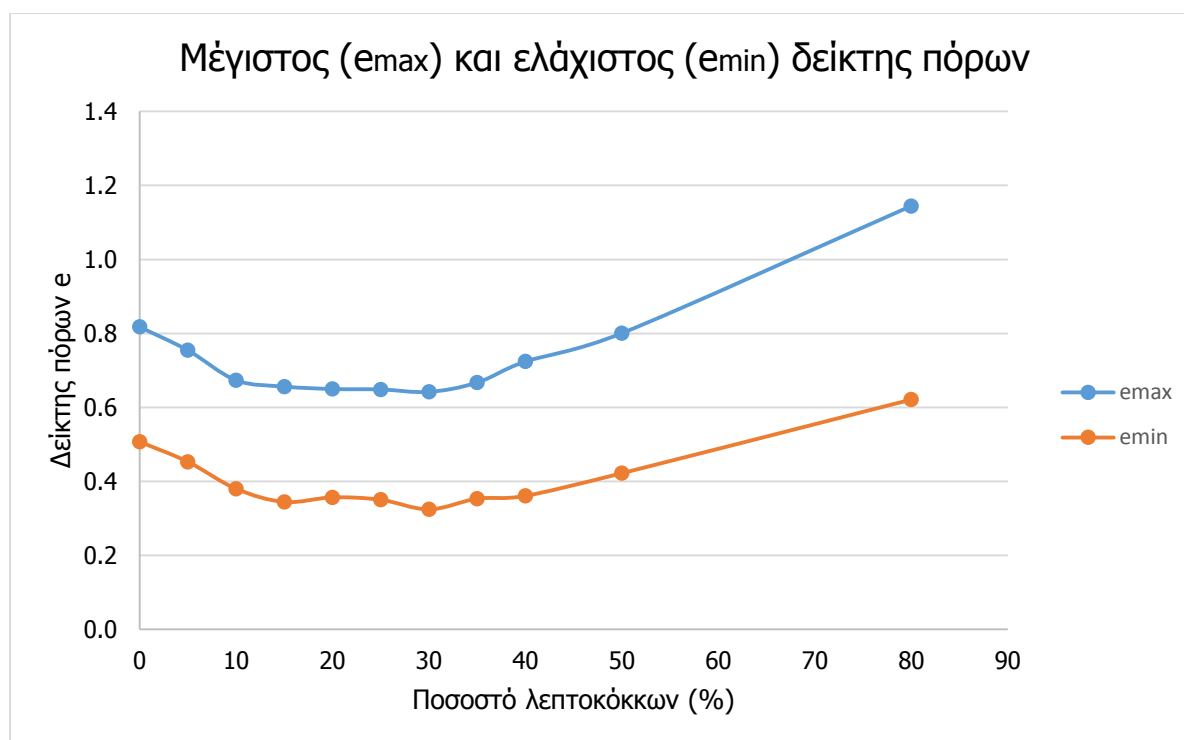
Με βάση την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι η τιμή του ελάχιστου δείκτη πόρων e_{min} της καθαρής άμμου M31 είναι ίσος με 0,50.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία για την εύρεση του ελάχιστου δείκτη πόρων μείγματος που περιέχει άμμο M31 και κάθε φορά διαφορετικό ποσοστό ιλύος D6. Θεωρήθηκε ότι η άμμος περιέχει 100% χονδρόκοκκο υλικό ενώ η ιλύς αποτελείται από 80 % λεπτόκοκκο υλικό και 20% χονδρόκοκκο. Έγιναν δοκιμές για εύρεση του ελάχιστου δείκτη πόρων e_{min} για μείγματα με ποσοστό λεπτοκόκκων 0% , 5% , 10% , 15% , 20% , 25% , 30% , 35% , 40% , 50% και 80%. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία, τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8..



Σχήμα 2.8. Ελάχιστος δείκτης πόρων συναρτήσει του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων

Στο Σχήμα 2.9. παριστάνονται συγκεντρωμένα τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις δύο παραπάνω πειραματικές διαδικασίες.



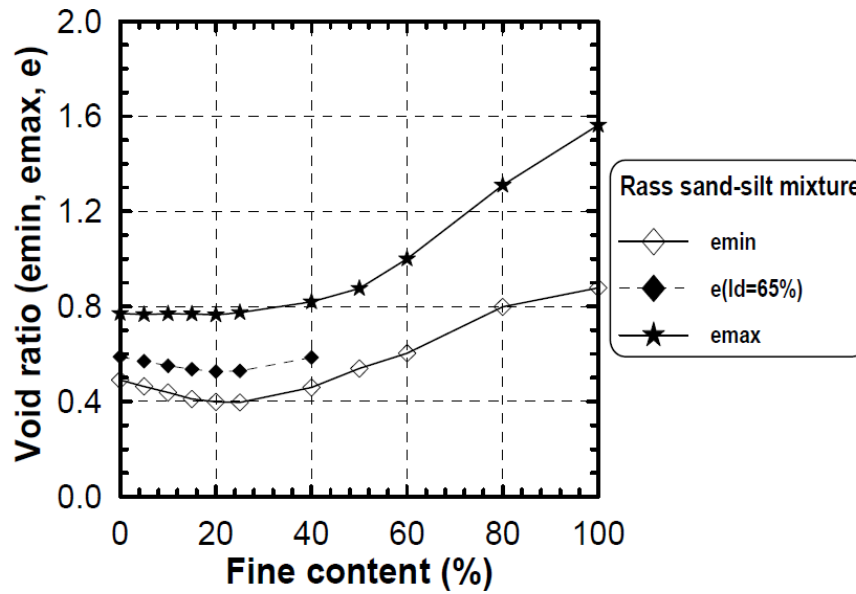
Σχήμα 2.9. Μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων

Είναι προφανές ότι τα διαγράμματα αυτά ακολουθούν παρόμοια διαδρομή. Επίσης μπορούμε να εξάγουμε 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. Αυτό συμβαίνει ενώ προσθέτουμε ποσοστό λεπτοκόκκων έως και 30%. Στην συνέχεια, παρατηρούμε ότι περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των λεπτοκόκκων έχει δυσμενές αποτέλεσμα αφού η δομή γίνεται όλο και αραιότερη. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κόκκοι άμμου χάνουν την επαφή μεταξύ τους, η ιλύς είναι το πρωτεύον υλικό και συνεπώς έχουμε άμμο σε σκελετό ιλύος.

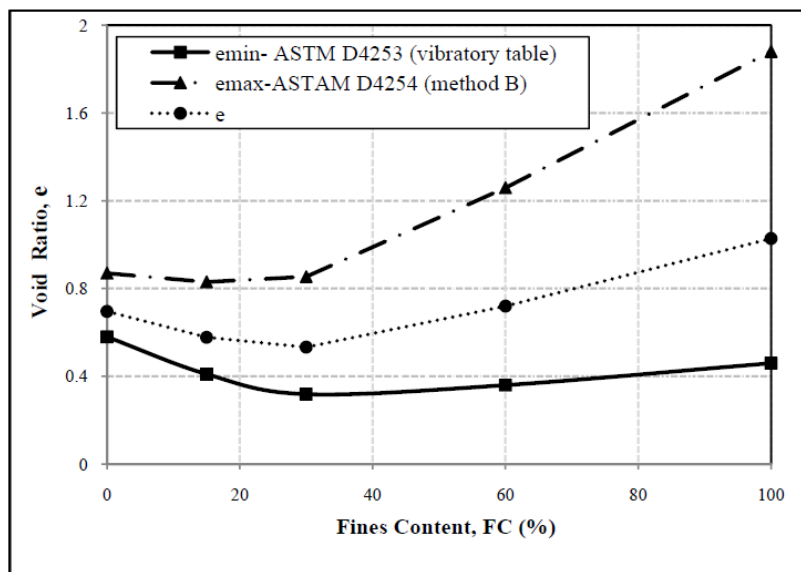
Το παραπάνω συμπέρασμα έχει εξαχθεί και από διάφορους άλλους ερευνητές οι οποίοι μελέτησαν μείγματα άμμου-ιλύος.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10., οι Arab και Belkhatir (2012) σε πειράματα που πραγματοποίησαν στο University of Chlef παρατήρησαν ότι για ποσοστό λεπτοκόκκων έως και 25% αυτό έχει θετική επίδραση αφού οι κόκκοι ιλύος πληρώνουν τα κενά της άμμου και έτσι το μείγμα αποκτά μια πιο πυκνή δομή. Επίσης, για ποσοστό ιλύος πέραν αυτού το μείγμα αποκτά μια πιο χαλαρή δομή.

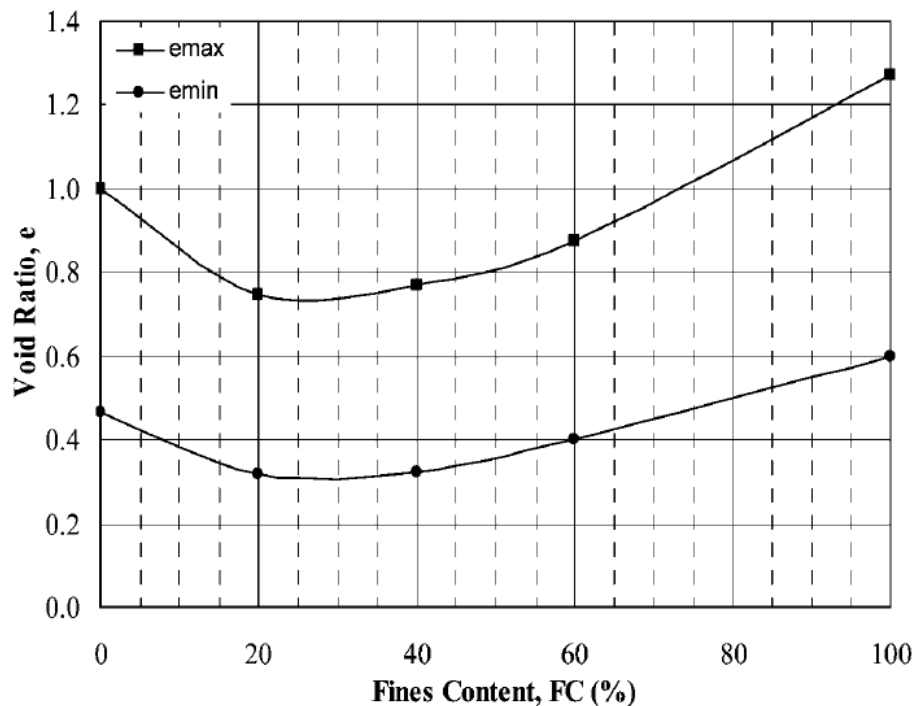
Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Baziar, Shahnazari, Sharafi (2010) όπως και οι El-Mamlouk H., Hussein A.K., Hassan A.M. (2006) οι οποίοι αποφάνθηκαν ότι θετική επίδραση έχει η προσθήκη λεπτοκόκκου υλικού στην άμμο έως και 30%.



Σχήμα 2.10. Μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων (Arab και Belkhatir ; 2012)



Σχήμα 2.11. Μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων (Baziar, Habib Shahnazari, Sharafi ; 2010)



Σχήμα 2.12. Μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων (El-Mamlouk, Hussein, Hassan ; 2006)

2.6 Υπολογισμός μέγιστου δείκτη πόρων e_{max} και ελάχιστου δείκτη πόρων e_{min} σε όρους skeleton

Χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα από τις παραπάνω πειραματικές διαδικασίες, έγινε κατάλληλη επεξεργασία ούτως ώστε να προκύψουν τα αντίστοιχα διαγράμματα μέγιστου (e_{max}) και ελάχιστου (e_{min}) δείκτη πόρων σε όρους skeleton. Η επεξεργασία αυτή έγινε με την βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$e_{sk} = \frac{V_v + V_f}{V_s}$$

όπου

e_{sk} : ο ολικός δείκτης πόρων σκελετού

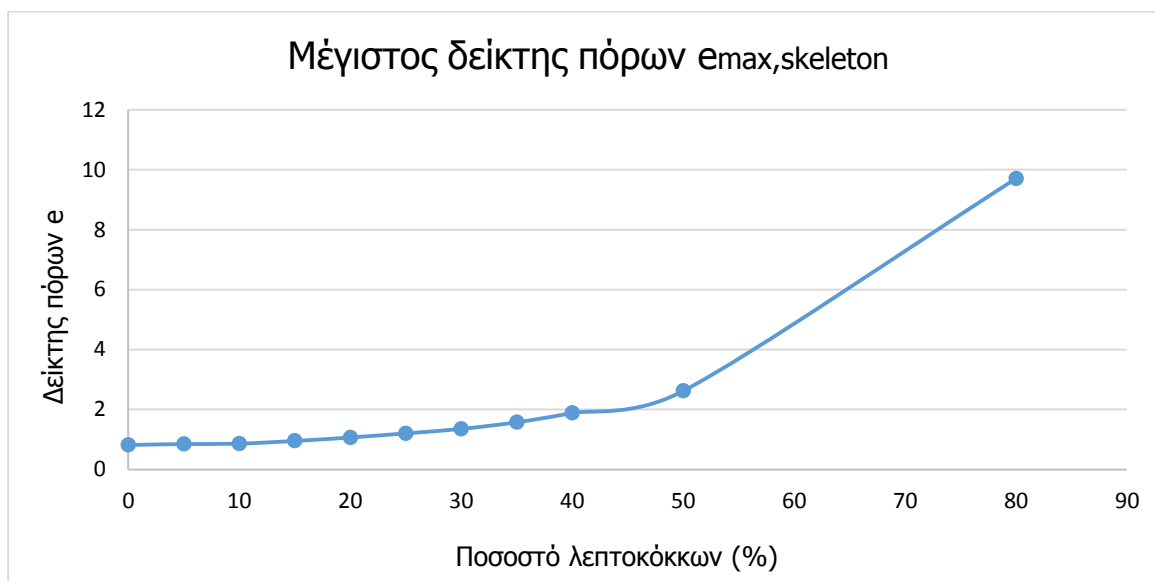
V_v : όγκος κενών (voids)

V_s : όγκος στερεών (solids)

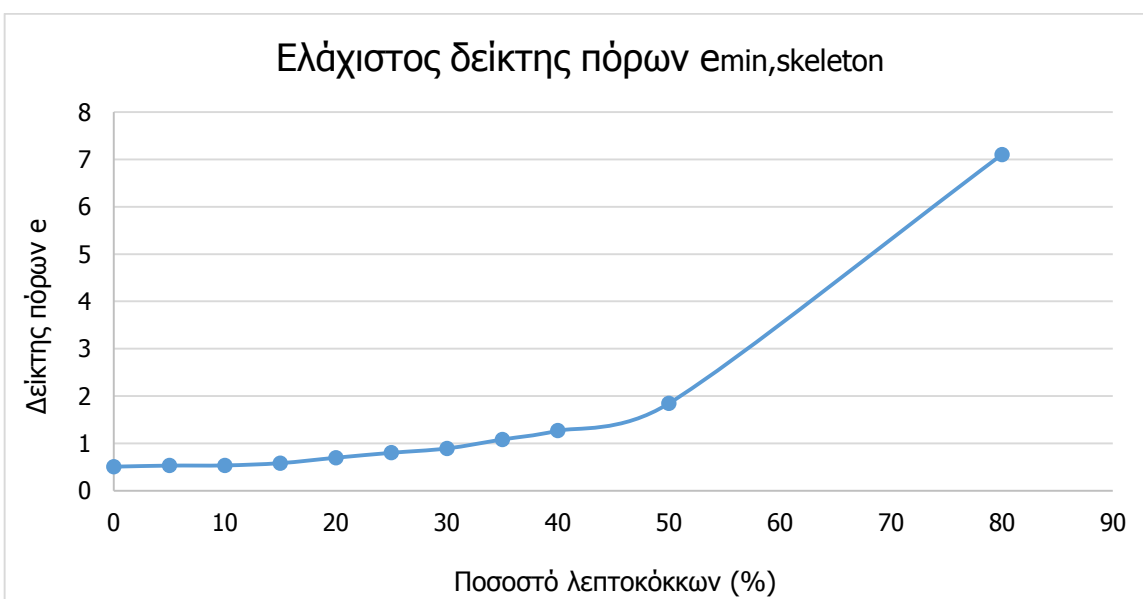
V_f : όγκος λεπτόκοκκων (fines)

Αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρήθηκε ότι η άμμος αποτελείτο από 100% χονδρόκοκκο εδαφικό υλικό ενώ η ιλύς αποτελείται από 80% λεπτόκοκκο και 20% χονδρόκοκκο υλικό. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία τα διαγράμματα μέγιστου και ελάχιστου

δείκτη πόρων σε όρους skeleton σε συνάρτηση με το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού παριστάνονται στα Σχήματα 2.13. και 2.14. αντίστοιχα. Είναι φανερό (και σε αντίθεση με τον δείκτη πόρων που υπολογίστηκε αρχικά) ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού θα αυξάνεται ανάλογα και ο ολικός δείκτης πόρων σκελετού e_{sk} αφού όπως παρατηρούμε και απο την μαθηματική σχέση όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτοκόκκων θα αυξάνεται ο αριθμητής (V_f) και επίσης θα μειώνεται ο παρονομαστής (V_s).

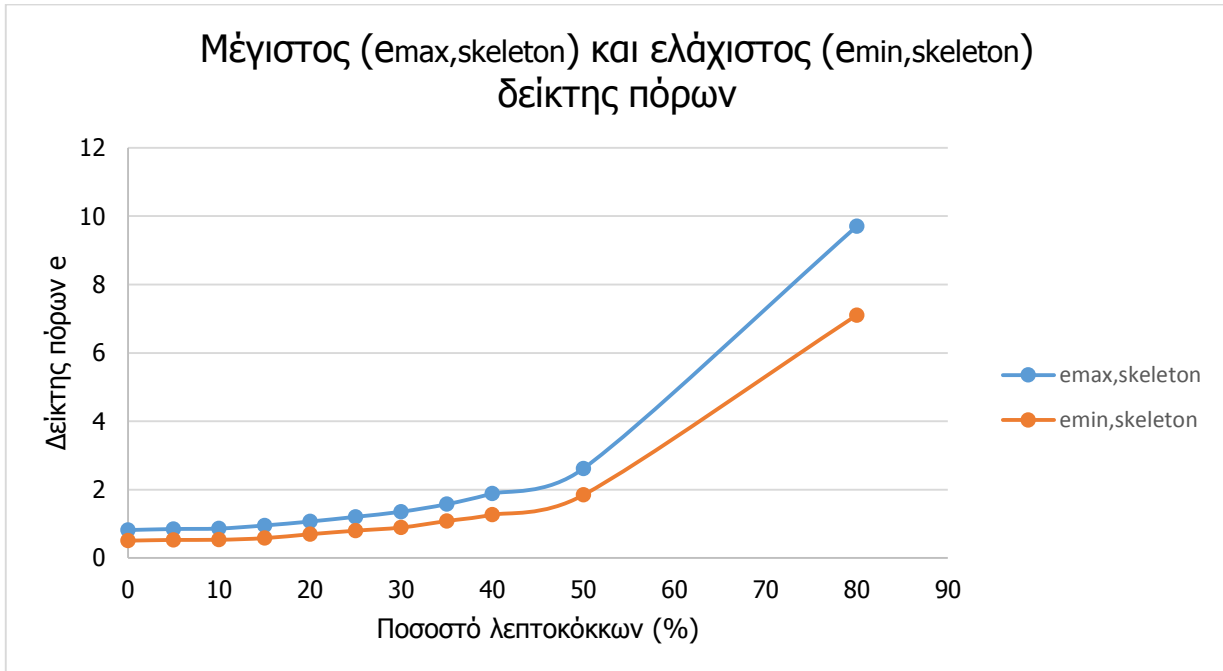


Σχήμα 2.13. Μέγιστος δείκτης πόρων σε όρους skeleton συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων



Σχήμα 2.14. Ελάχιστος δείκτης πόρων σε όρους skeleton συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων

Στο Σχήμα 2.15. φαίνονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα που προκύπτουν για τον μέγιστο (e_{max}) και ελάχιστο (e_{min}) δείκτη πόρων σε όρους skeleton. Παρατηρούμε επίσης, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των λεπτοκόκκων στο μείγμα, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο δείκτης πόρων σκελετού.



Σχήμα 2.15. Μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων σε όρους skeleton συναρτήση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων

3. Η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου με βάση βιβλιογραφικές αναφορές

3.1. Εισαγωγή

Γενικά, το θέμα της προσθήκης ποσοστού λεπτοκόκκων και ιδιαίτερα ιλύος σε καθαρή άμμο και η επίδραση αυτού του ποσοστού στις μηχανικές ιδιότητες του μείγματος, είναι ένα πολύ σύνθετο θέμα που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Οι υπάρχουσες απόψεις ποικίλουν και συχνά έρχονται σε αντίθεση η μια με την άλλη. Οι μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν βασίζονται κυρίως σε τριαξονικές δοκιμές και σε μικρότερο βαθμό σε δοκιμές στρέψης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder).

3.2. Βιβλιογραφικές αναφορές της επίδρασης του ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου

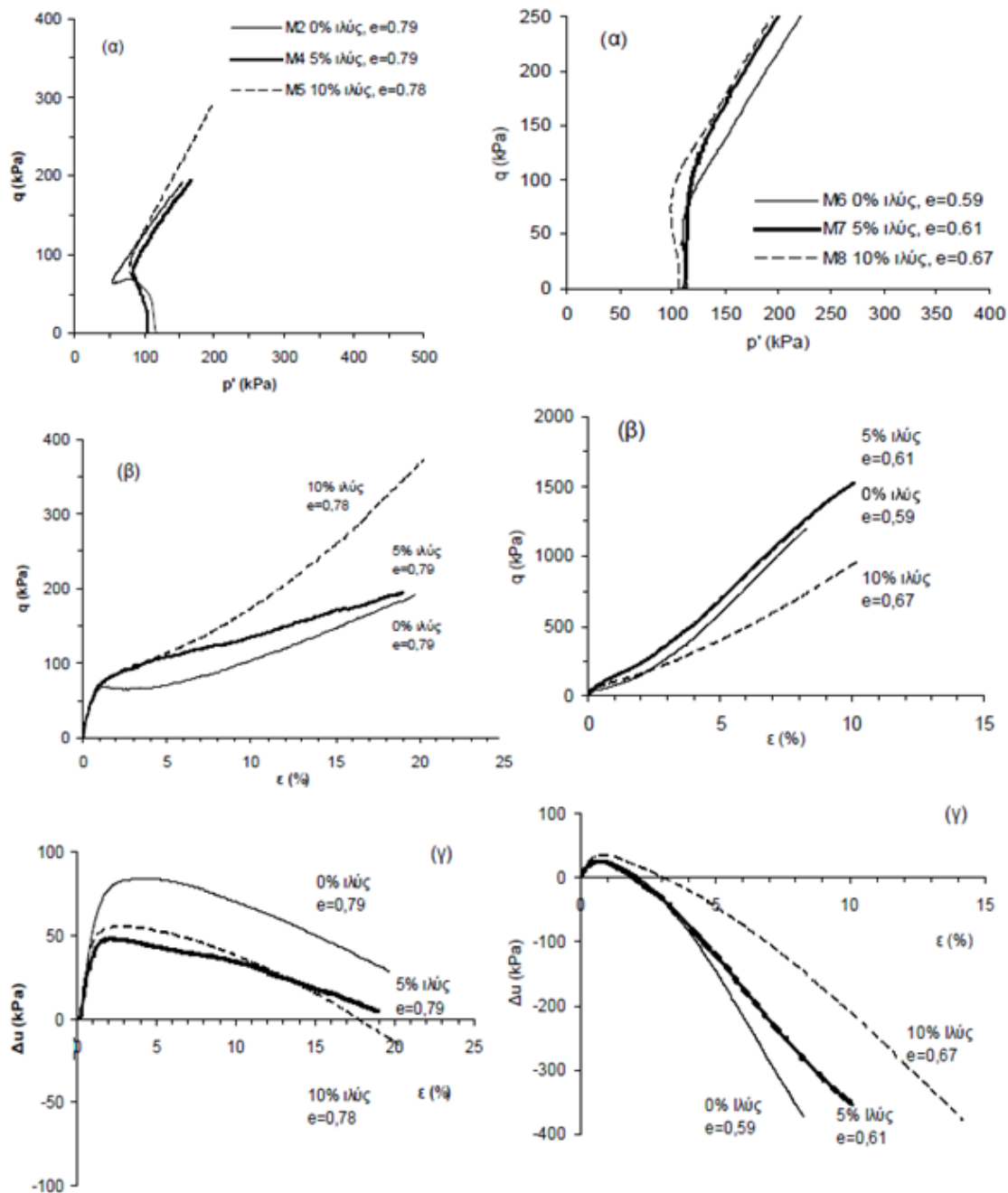
3.2.1. Πειράματα των Γεωργιάννου και Σάκκη (2010)

Στα πειράματα αυτά εξετάστηκε η επίδραση της ιλύος στη συμπεριφορά μιας λεπτόκοκκης και ομοιόμορφα διαβαθμισμένης άμμου. Έγιναν δοκιμές σε πυκνά και χαλαρά δοκίμια με ποσοστά ιλύος έως και 10% ενώ οι αρχικές ενεργές τάσεις κυμαίνονταν από 50kPa έως και 300kPa. Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τριαξονικές συσκευές ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων (Bishop & Wesley, 1975). Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμος (M31) με ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2.65\text{gr/cm}^3$ και ιλύς HPF4.

Τα χαλαρά δοκίμια στεροποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 100 KPa ενώ οι δείκτες πόρων πριν την επιβολή της διατμητικής φόρτισης ήταν κοντά στο 0,80. Αυτό που παρατήρησαν είναι ότι μεγαλύτερη τάση για συστολή εμφάνισε η καθαρή άμμος ενώ η προσθήκη της ιλύος σταθεροποιούσε την απόκριση της άμμου εφόσον δεν παρατηρήθηκε πτώση της αποκλίνουσας τάσης αλλά συνεχής αύξησή της με την παραμόρφωση. Επιπλέον, από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 3.1. φαίνεται ότι η τάση για διαστολική συμπεριφορά αυξανόταν με την αύξηση του ποσοστού ιλύος. Στα διαγράμματα υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων του Σχήματος 3.1. φαίνεται ότι η παρουσία της ιλύος εμπόδιζε την ανάπτυξη υπερπίεσεων σε σχέση με την καθαρή άμμο.

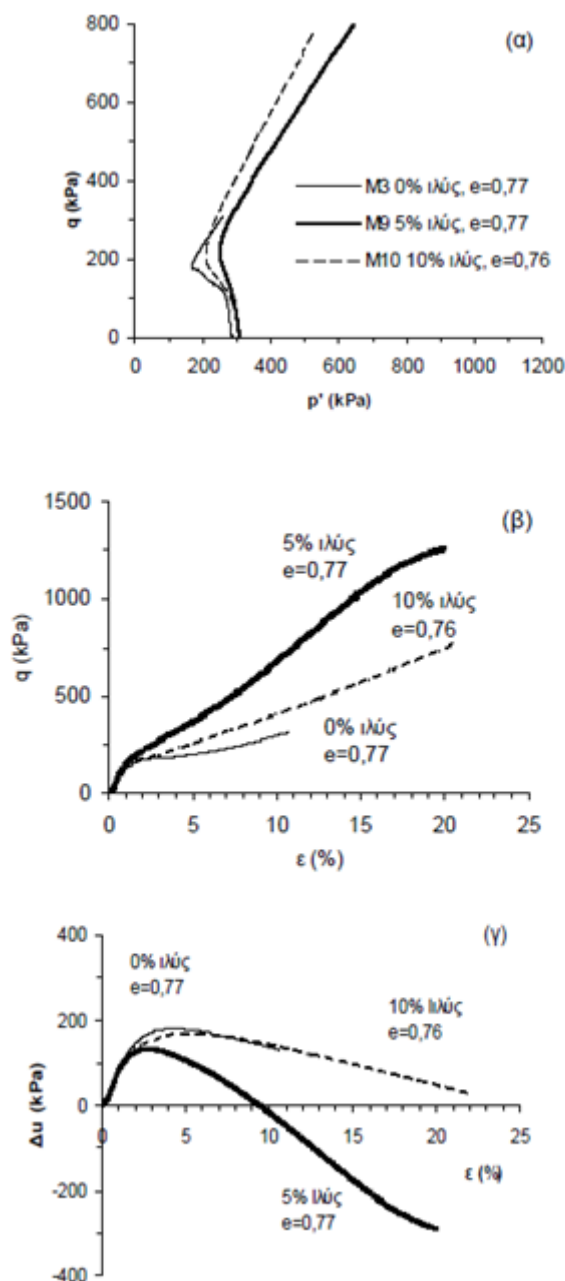
Τα πυκνά δοκίμια στεροποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 100 KPa ενώ οι δείκτες πόρων πριν την επιβολή της διατμητικής φόρτισης ήταν 0.59 για την καθαρή άμμο, 0.61 για το μείγμα άμμου-ιλύος με 5% ιλύ και 0.67 για το μείγμα άμμου-ιλύος με 10% ιλύ. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε αντίθετη συμπεριφορά σε σχέση με αυτή που παρατηρήθηκε στα χαλαρά δοκίμια αφού λόγω της πυκνότητάς τους όλα τα δοκίμια εμφάνιζαν συνεχή αύξηση της αποκλίνουσας τάσης τόσο στα διαγράμματα τάσεων όσο και στις καμπύλες τάσεων –παραμορφώσεων. Όμως, τα μείγματα της άμμου με ιλύ εμφάνισαν μικρότερη τάση για διαστολή από την καθαρή άμμο όπως φαίνεται και στα διαγράμματα υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων στο Σχήμα 3.1..

Κεφάλαιο 3: Η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου με βάση βιβλιογραφικές αναφορές



Σχήμα 3.1. Χαλαρά δοκίμια (αριστερή στήλη) και πυκνά δοκίμια (δεξιά στήλη), $p'=100\text{kPa}$, (α)διαδρομές ενεργών τάσεων, (β)καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ)καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων

Στην συνέχεια, χαλαρά δοκίμια με δείκτες πόρων κοντά στο 0,77 στεροποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 300kPa. Παρατηρήθηκε ότι με την προσθήκη ιλύος σε ποσοστό 5% η επίδραση της είναι ευεργετική, ωστόσο περαιτέρω προσθήκη σε ποσοστό 10% δεν είχε ανάλογο αποτέλεσμα αφού η αντοχή του μείγματος ήταν μικρότερη (Σχήμα 3.2.).



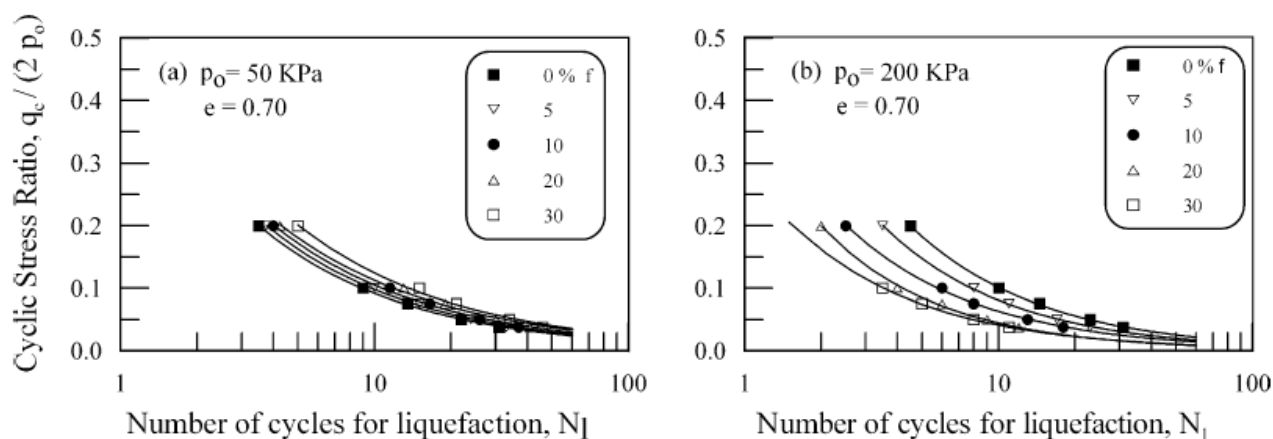
Σχήμα 3.2. Χαλαρά δοκίμια, $p'=300$ KPa, (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι ενώ στην χαλαρή άμμο η παρουσία της ιλύος δρα πάντοτε ευνοϊκά μειώνοντας την τάση της άμμου για συστολική συμπεριφορά, στην πυκνή άμμο η προσθήκη της ιλύος δεν είχε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα αφού για προσθήκη σε ποσοστό 10% η αντοχή της άμμου μειώνεται. Επίσης, η δράση της ιλύος στην άμμο φαίνεται να εξαρτάται και από το μέγεθος της αρχικής ενεργού τάσης αφού για χαλαρά δείγματα που στερεοποιήθηκαν σε μέση ενεργό τάση 300 kPa παρατηρήθηκε ότι η αντοχή της άμμου δεν αυξάνεται συνεχώς με την προσθήκη ιλύος. Συνεπώς, η εκτίμηση της αντοχής μιας φυσικής άμμου που περιέχει σχετικώς μικρά ποσοστά ιλύος απαιτεί την συνεκτίμηση των ανωτέρω παραγόντων. Ο ρόλος της ιλύος

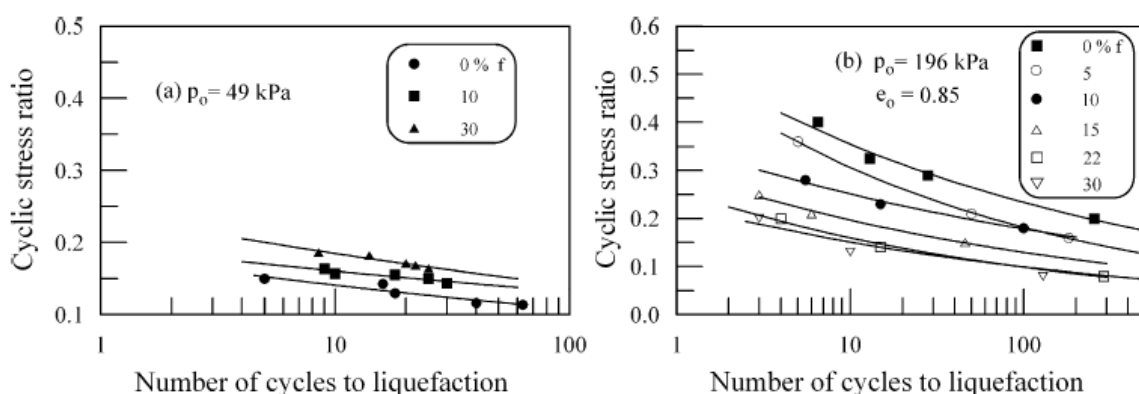
πρέπει να συνδυάζεται με συγκεκριμένες συνθήκες γεγονός που δικαιολογεί τα φαινομενικά αντιφατικά συμπεράσματα της βιβλιογραφίας.

3.2.2. Επεξεργασία πειραμάτων από τους Αδριανόπουλο, Μπουκοβάλα και Παπαδημητρίου, 2001

Οι Αδριανόπουλος, Μπουκοβάλας και Παπαδημητρίου μετά από επεξεργασία πειραμάτων βιβλιογραφίας (2001), εκτίμησαν την επίδραση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού σε ένα μείγμα άμμου-ιλύος για διάφορες τάσεις στερεοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, παρατήρησαν ότι η αύξηση του ποσοστού ιλύος σε ένα μείγμα με άμμο επιδρά ευνοικά στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης, όταν αυτό έχει στερεοποιηθεί σε μικρή τάση στερεοποίησης (μικρότερη των 60KPa). Αντιθέτως, όταν το δοκίμιο έχει στερεοποιηθεί σε μεγαλύτερες τάσεις η αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκων αυξάνει την συστολικότητα του δοκιμίου και έτσι το καθιστά πιο ευάλωτο στην ρευστοποίηση. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στα Σχήματα 3.3. και 3.4..

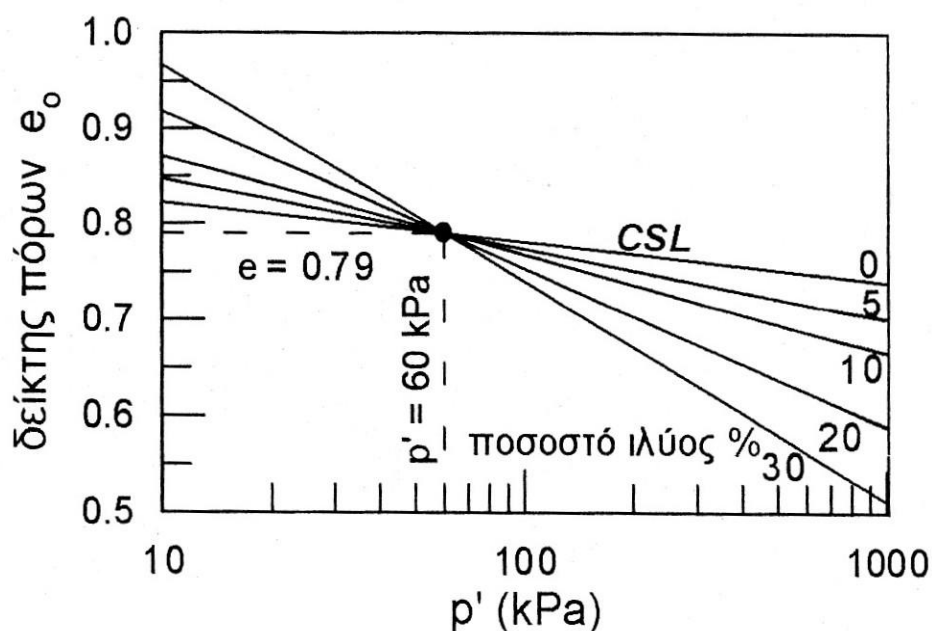


Σχήμα 3.3. Θεωρητική προσομοίωση της επίδρασης του ποσοστού λεπτόκοκκων υλικών στην άμμο από την Nevada στην ανακυκλική αντοχή ως προς ρευστοποίηση όπου (a) $p'_0=50\text{kPa}$ και (b) $p'_0=200 \text{ KPa}$

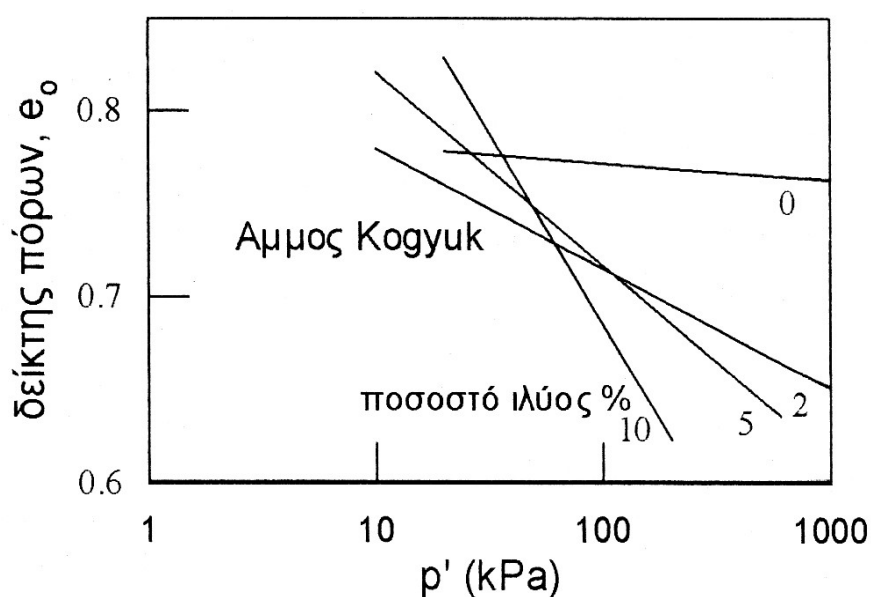


Σχήμα 3.4. Πειραματικά αποτελέσματα της επίδρασης του ποσοστού λεπτόκοκκων υλικών στην άμμο από την Nevada στην ανακυκλική αντοχή ως προς ρευστοποίηση όπου (a) $p'_0=49\text{KPa}$ και (b) $p'_0=196 \text{ KPa}$

Συγκεντρωτικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5, η αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού σε ένα μείγμα άμμου-ιλύος για τάσεις στερεοποίησης κάτω των 60kPa δείχνει να είναι ευεργετική, ενώ αντίθετα σε μεγαλύτερες από 60kPa τάσεις στερεοποίησης φαίνεται να απομειώνει τις αντοχές. Έτσι, παρατηρείται μία τάση για δεξιόστροφη κίνηση της γραμμής της κρίσιμης κατάστασης περίπου γύρω από την αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης 60 kPa και δείκτη πόρων $e=0.79$.



Σχήμα 3.5. Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της CSL στο χώρο ($e - \ln(p')$)



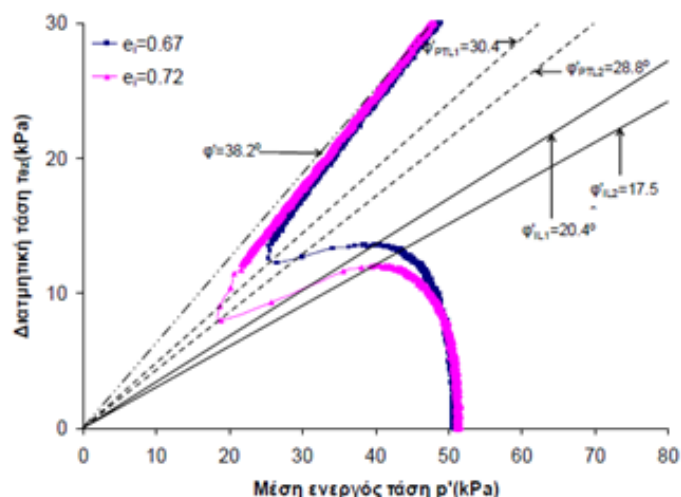
Σχήμα 3.6. Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της CSL για την άμμο Κογκυκ

3.2.3. Πειράματα των Γεωργιάννου, Τσομώκου και Σταύρου (2000)

Στα πειράματα αυτά διερευνήθηκε η απόκριση μίας άμμου μέσης διαβάθμισης σε μονοτονική και ανακυκλική στρεπτική διάτμηση. Πολλές μελέτες είχαν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν (π.χ. Symes et al. 1984, Sladen et al. 1985, Vaid and Chern 1985, Alarcon-Guzman et al. 1988, Georgiannou et al. 1991, Sasitharan et al. 1993, Hyodo et al. 1994, De Gennaro et al. 2004) με στόχο τη συσχέτιση της συμπεριφοράς της άμμου σε μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση με τα αποτελέσματα των διαφόρων αυτών μελετών να ποικίλουν μεταξύ τους.

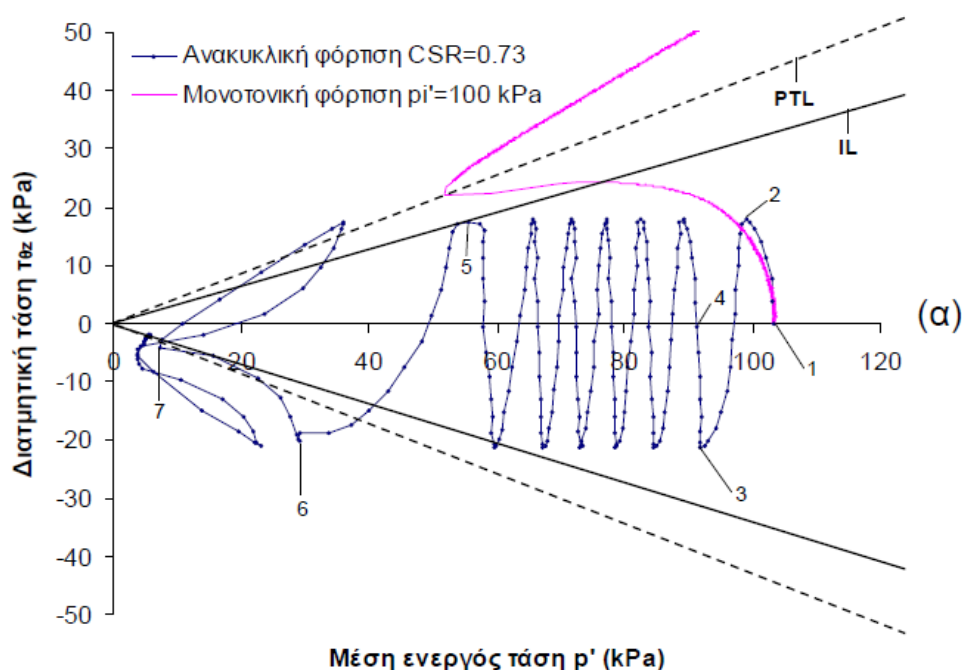
Στην προκειμένη περίπτωση, το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν μία άμμος μέσης διαβάθμισης, η άμμος M31, με ειδικό βάρος στερεών $G_s=2.65\text{gr/cm}^3$. Όλα τα δοκίμια της άμμου M31 παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της “εμβάπτισης σε νερό” σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνουν οι Bishop and Henkel.

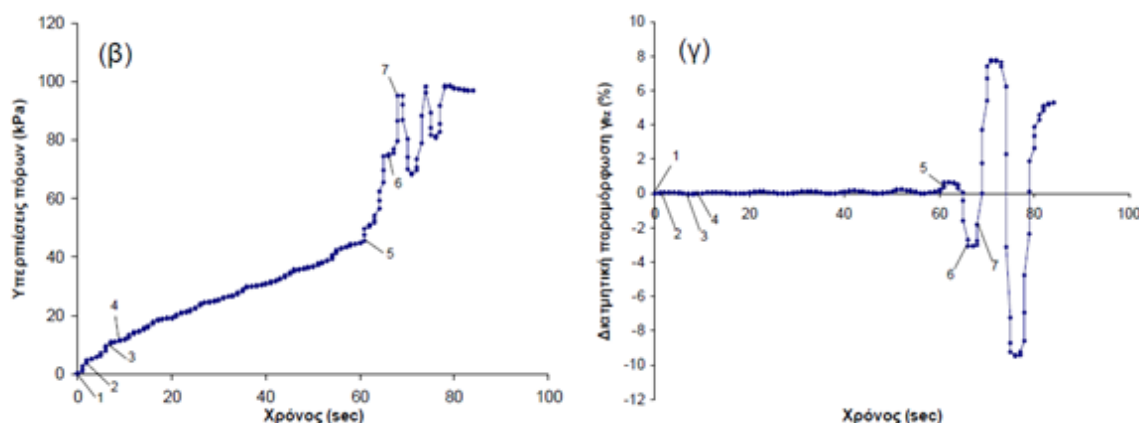
Αρχικά μελετήθηκε η απόκριση της άμμου M31 κατά την μονοτονική στρεπτική διάτμηση. Στο Σχήμα 3.7. φαίνονται οι διαδρομές τάσεων δύο εδαφίων δοκιμίων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 50 KPa, το ένα με δείκτη πόρων πριν από την διάτμηση ίσο με $e_i=0.72$ (χαλαρό δοκίμιο) και το άλλο με δείκτη πόρων πριν από την διάτμηση ίσο με $e_i=0.67$ (πυκνότερο δοκίμιο). Παρατηρήθηκε και στα δύο δοκίμια συστολική συμπεριφορά καθώς η διατμητική τους αντοχή μετά την απόκτηση μίας μέγιστης τιμής μειώνεται συνεχώς. Τα σημεία που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές διατμητικής αντοχής κατά τη διάρκεια της συστολικής συμπεριφοράς ονομάζονται σημεία αστάθειας και ενώνοντας τα σημεία αυτά για διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις και παρόμοιο δείκτη πόρων ορίζεται μια ευθεία γραμμή στο διάγραμμα $t\sigma\text{-}p'$, γνωστή ως γραμμή αστάθειας (Instability Line - IL, Lade, 1993). Από διάφορους ερευνητές έχει παρατηρηθεί ότι όσο μικρότερος είναι ο δείκτης πόρων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η κλίση της γραμμής αστάθειας ($\phi'_{IL1}=20.4^\circ$ για το πυκνότερο δοκίμιο M31-2 και $\phi'_{IL2}=17.5^\circ$ για το χαλαρό δοκίμιο M31-1). Η συμπεριφορά των δύο δοκιμίων άλλαξε όταν πλησίασαν τη γραμμή αλλαγής φάσης (Phase Transformation Line - PTL, Ishihara et al., 1975), οπότε από τάση για συστολή παρουσίαζαν συνεχή τάση για διαστολή. Οι γωνίες αλλαγής φάσης ήταν ίσες με $\phi'_{PTL1}=30.4^\circ$ και $\phi'_{PTL2}=28.8^\circ$ για το πυκνότερο δοκίμιο M31-2 και το χαλαρό δοκίμιο M31-1 αντίστοιχα, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 3.7.. Τελικά και τα δύο δοκίμια οδηγήθηκαν στην αστοχία ακολουθώντας την ίδια γραμμή αστοχίας με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=38.2^\circ$.



Σχήμα 3.7. Μονοτονική στρεπτική διάτμηση άμμου M31 υπο συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Διαδρομές ενεργών τάσεων δοκιμίων με διαφορετικό δείκτη πόρων

Στην συνέχεια μελετήθηκε η απόκριση της άμμου M31 κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση με την βοήθεια δοκιμίου με δείκτη πόρων $e_v=0.65$ το οποίο στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργό τάση 100kPa. Ακολουθώντας, φορτίστηκε ανακυκλικά με διατμητική τάση $\Delta\tau_{sz}$ η οποία αντιστοιχούσε σε λόγο $CSR=0.73$, όπου CSR είναι ο λόγος του μεγέθους της εφαρμοζόμενης ανακυκλικής τάσης προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή δοκιμίου που φορτίζεται μονοτονικά στην ίδια αρχική μέση ενεργό τάση. Στο Σχήμα 3.8. φαίνεται η διαδρομή των τάσεων του δοκιμίου αυτού (δοκίμιο M31-4) μαζί με την διαδρομή ενεργών τάσεων δοκιμίου που διαθέτει παρόμοιο δείκτη πόρων και την ίδια αρχική μέση ενεργό τάση με το προηγούμενο, αλλά το οποίο υποβάλλεται σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση (δοκίμιο M31-3).





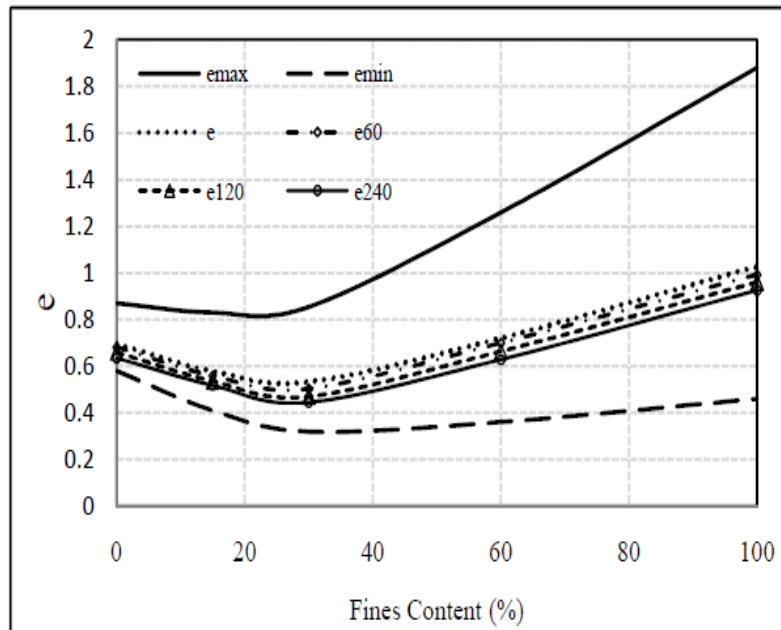
Σχήμα 3.8. Ανακυκλική ($CSR=0.73$) και μονοτονική στρεπτική διάτμηση ισότροπα στερεοποιημένων δοκιμίων άμμου M31 υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (α) διαδρομές ενεργών τάσεων (β) υπερπίεση πόρων ως προς το χρόνο (γ) διατμητική παραμόρφωση ως προς το χρόνο.

Αρχικά παρατηρήθηκε μια μικρή απόκλιση των διαδρομών τάσεων στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Στην συνέχεια παρουσιάστηκε ασταθής συμπεριφορά για πρώτη φορά την στιγμή που η διαδρομή ενεργών τάσεων προσέγγισε την γραμμή αστάθειας των μονοτονικών δοκιμών (σημείο 5). Η αλλαγή στην κατεύθυνση της φόρτισης, με την αποφόρτιση από το σημείο 5 (διαδρομή τάσεων από το σημείο 5 στο σημείο 6), οδήγησε σε συσσώρευση υπερπίεσεων πόρων και διατμητικών παραμορφώσεων και η ανακυκλική διαδρομή τάσεων μετακινήθηκε προς την αρχή των αξόνων. Τέλος, παρόλο που το σημείο 5 συνδέεται με την εμφάνιση ασταθούς συμπεριφοράς, το δοκίμιο ρευστοποιήθηκε μετά την αλλαγή στη φορά της φόρτισης, στο σημείο 6, όπου ο λόγος των τάσεων είναι μεγαλύτερος από τον λόγο των τάσεων στη γραμμή αστάθειας, αλλά και στη γραμμή αλλαγής φάσης.

Έτσι, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η γραμμή αστάθειας κατά την μονοτονική φόρτιση χαρακτηρίζει την συμπεριφορά της άμμου υπό ανακυκλική φόρτιση εφόσον αποτελεί το όριο στο διάγραμμα τάσεων το οποίο σηματοδοτεί την ανάπτυξη ασταθούς συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης.

3.2.4. Πειράματα των Sharafi και Baziar, 2012

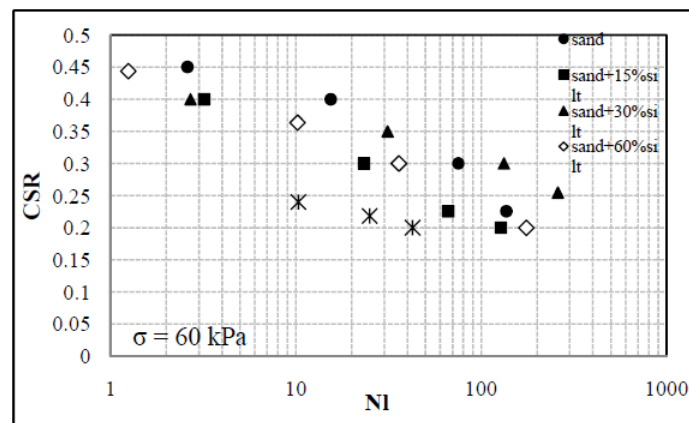
Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να προσδιοριστεί η επίδραση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών στην αντοχή ενός μείγματος έναντι ρευστοποίησης. Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε τρεις διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης 60kPa, 120kPa και 240kPa και όλα τα δοκίμια ήταν σχετικής πυκνότητας $Dr=60\%$. Συνολικά εκτελέστηκαν 60 πειράματα τα οποία χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες με βάση το ποσοστό περιεκτικότητάς τους σε λεπτόκοκκα (15%, 30%, 60% και 100%). Μια πρώτη παρατήρηση που έγινε, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από το Σχήμα 3.9., είναι ότι με την προσθήκη λεπτόκοκκων υλικών στην άμμο μέχρι και για 30% κατά βάρος, ο ελάχιστος δείκτης πόρων (e_{min}) και ο μέγιστος δείκτης πόρων (e_{max}) μειώνονται ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά από 30% αυξάνονται όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.5.



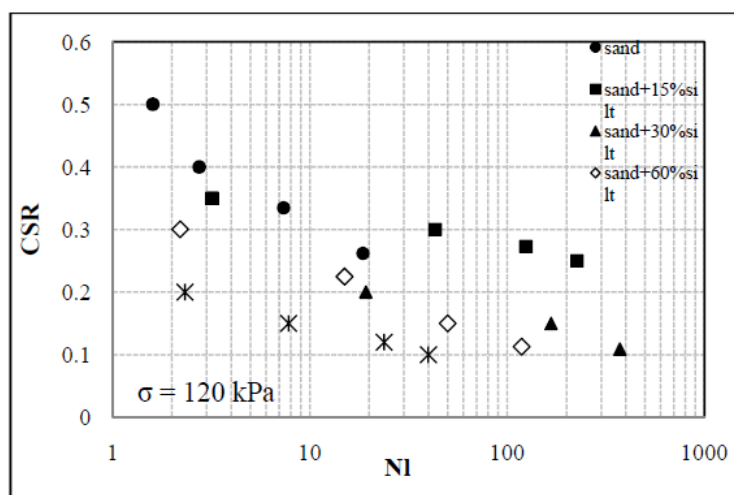
Σχήμα 3.9. Η μεταβολή του δείκτη πόρων κενών με την αλλαγή το ποσοστού το λεπτόκοκκου υλικού σε διάφορες τάσεις στερεοποίησης

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε δοκίμια με χαμηλές τιμές του ποσοστού λεπτοκόκκων ($FC < FC_{th}$), η αύξηση του ποσοστού αυτού οδηγεί σε μείωση της αντίστασης σε ρευστοποίηση. Αντιθέτως, για υψηλότερα ποσοστά λεπτοκόκκων (30%-60%), μια αύξηση στο ποσοστό αυτό αυξάνει την αντίσταση σε ρευστοποίηση. Ακόμη, η αύξηση του ποσοστού αυτού για δοκίμια με ποσοστά άνω του 60% οδηγεί και πάλι σε μείωση της αντίστασης σε ρευστοποίηση.

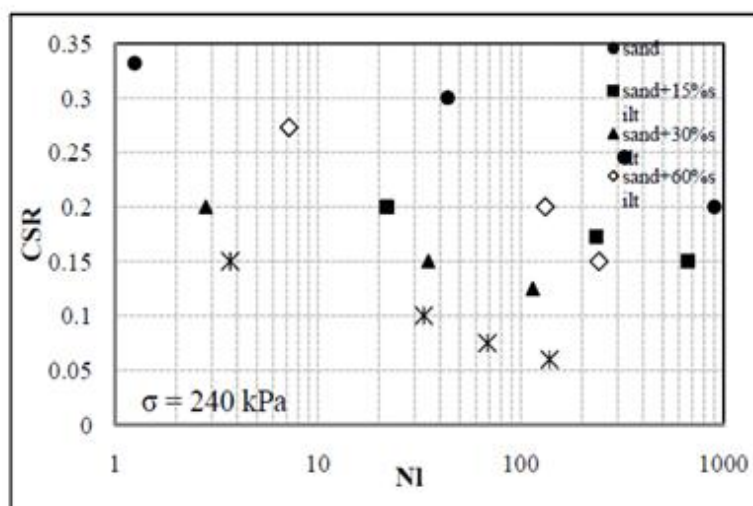
Μετά απο πειράματα που έγιναν σε ιλυώδη άμμο με ποσοστό ιλύος 30%, σε 3 τάσεις στερεοποίησης (60KPa, 120KPa και 240KPa), παρατηρήθηκε ότι για τάση στερεοποίησης 240KPa η αντίσταση σε ρευστοποίηση είναι 40% μειωμένη σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 60KPa. Αυτό αποτυπώνεται και στα διαγράμματα του Σχήματος 3.10..



(a)



(b)



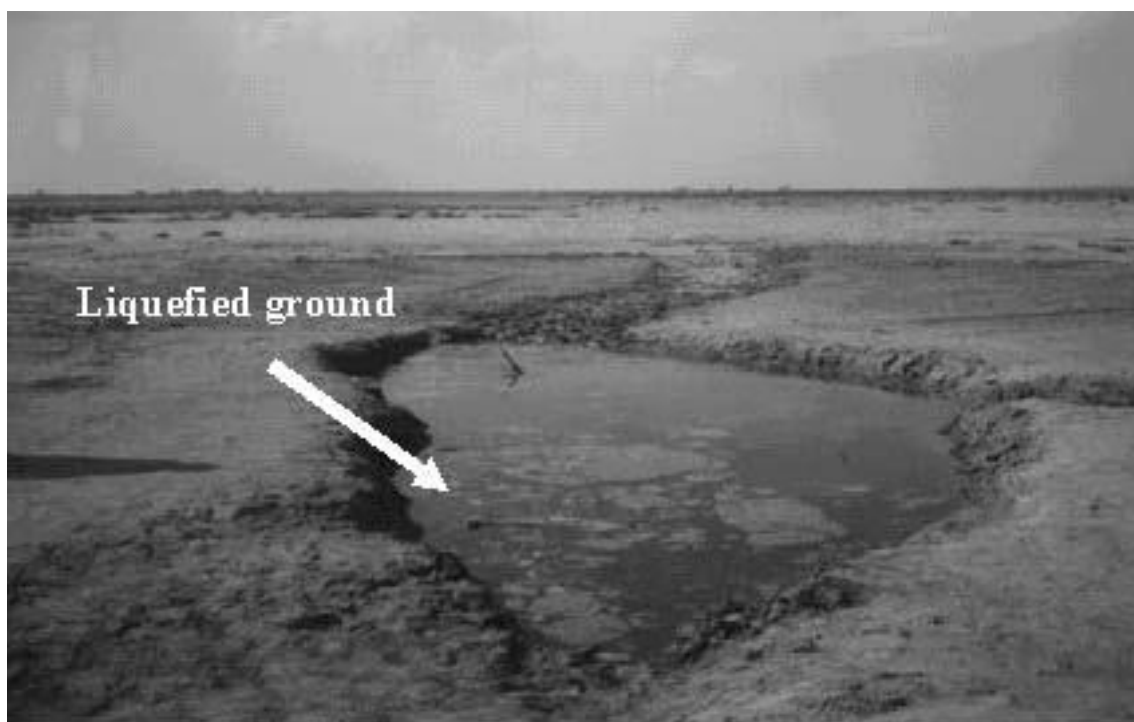
(c)

Σχήμα 3.10. Λόγος ανακυκλικής τάσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων μέχρι την αρχή της ρευστοποίησης σε τρεις τάσεις στερεοποίησης (a) $\sigma_3' = 60 \text{ kPa}$, (b) $\sigma_3' = 120 \text{ kPa}$ και (c) $\sigma_3' = 240 \text{ kPa}$

Τέλος, τα γενικά συμπεράσματα της έρευνας είναι ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της ιλύος σε μείγματα με άμμο, η αντοχή έναντι ρευστοποίησης μειώνεται. Επίσης μία πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι όσο αυξάνεται η τάση περίσφιξης ενός δοκιμίου (σ_3), αυξάνεται η συστολικότητα του δοκιμίου με αποτέλεσμα την μείωση της αντίστασης έναντι ρευστοποίησης. Ακόμη, παρατηρείται ότι στα δοκίμια καθαρής άμμου η έναρξη του φαινομένου της ρευστοποίησης ξεκινά όταν η υπερπίεση των πόρων στο δοκίμιο εξισωθεί με την αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης, ενώ στα δείγματα άμμου-ιλύος και στη καθαρή ιλύ το φαινόμενο παρατηρείται όταν το δοκίμιο φτάσει σε διπλού πλάτους διατμητική παραμόρφωση ίση με 5%.

3.2.5. Πειράματα των. Sitharam, Govinda Raju, Murthy, 2004

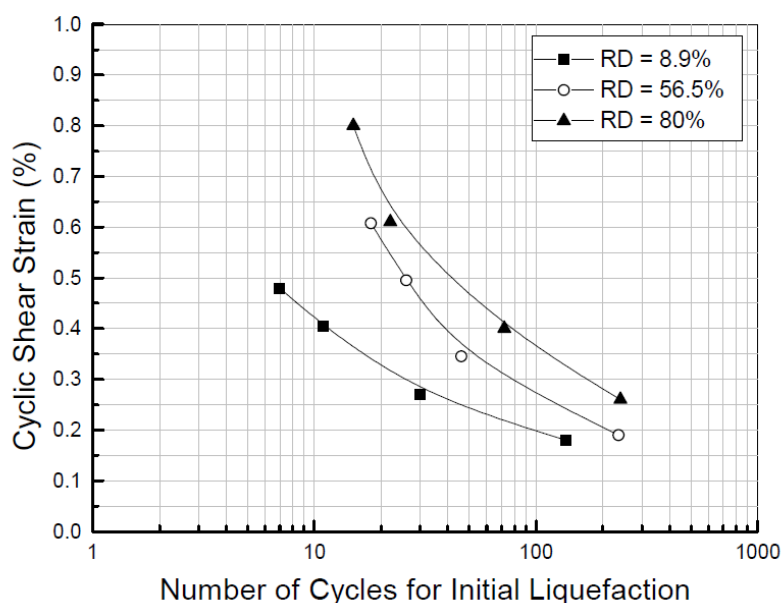
Κατά την διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού μεγέθους 7,7 στην κλίμακα ρίχτερ στο Βητζ της Ινδίας στις 26 Ιανουαρίου 2001 παρατηρήθηκε έντονα το φαινόμενο της ρευστοποίησης, αφού ποσότητα λεπτόκοκκης άμμου η οποία περιείχε σημαντική ποσότητα ιλύος μεταφέρθηκε στην επιφάνεια του εδάφους όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11. Τοποθεσία ρευστοποίησης του εδάφους

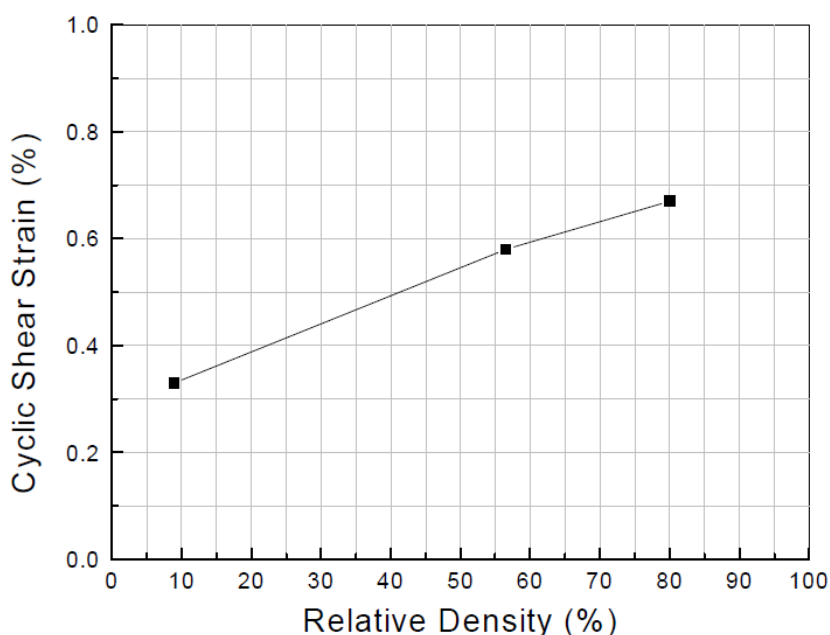
Οι ερευνητές αυτοί προσπάθησαν μέσα από εργαστηριακές δοκιμές να μελετήσουν την συμπεριφορά αμμώδους εδαφικού υλικού το οποίο περιείχε σημαντική ποσότητα ιλύος επιβάλλοντας στο δείγμα τριαξονική συμπίεση και ακολούθως εφαρμόζοντας μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση.

Αρχικά, αφού πήραν τρία δείγματα με ποσοστό ιλύος 20% και με διαφορετικές σχετικές πυκνότητες (πολύ χαλαρό, μέτριας πυκνότητας και πολύ πυκνό δείγμα αντίστοιχα), τα στερεοποίησαν σε ενεργό τάση 100kPa και στην συνέχεια επέβαλαν ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ακολούθως, μετρήθηκε η κυκλική διατμητική παραμόρφωση σε σχέση με τους αριθμούς των κύκλων που απαιτήθηκαν ούτως ώστε να επέλθει ρευστοποίηση. Αυτό που παρατήρησαν είναι ότι μεγαλύτερη διατμητική παραμόρφωση ανέπτυξε το πιο πυκνό δοκίμιο με το χαλαρότερο να παρουσιάζει μικρότερη διατμητική παραμόρφωση κατά την αστοχία (Σχήμα 3.12.).



Σχήμα 3.12. Ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων μέχρι την έναρξη της ρευστοποίησης για τρεις σχετικές πυκνότητες RD=8.9%, RD=56.5% και RD=80%

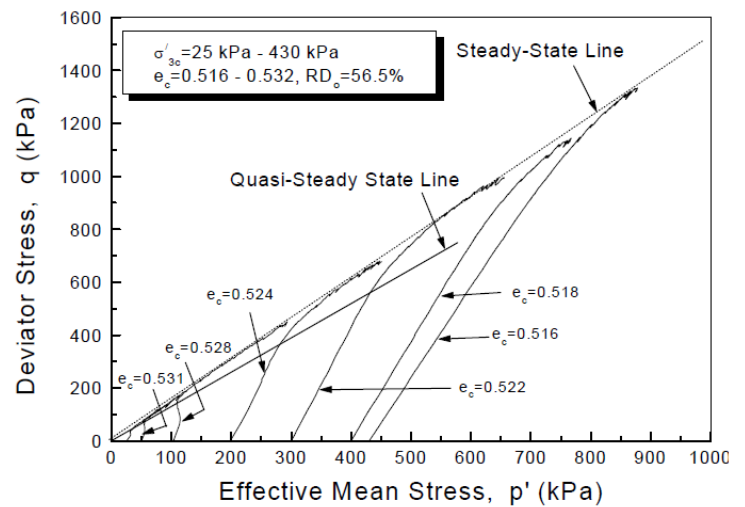
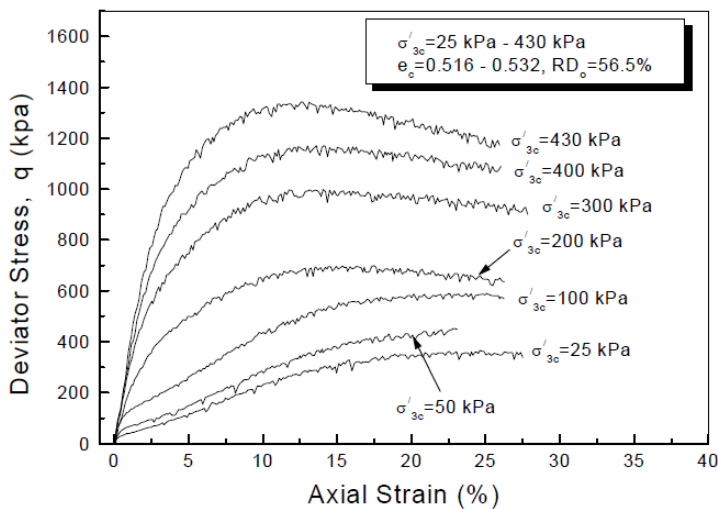
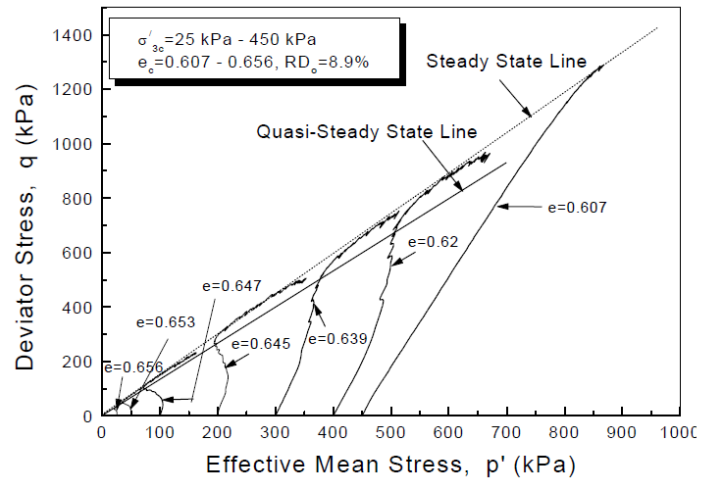
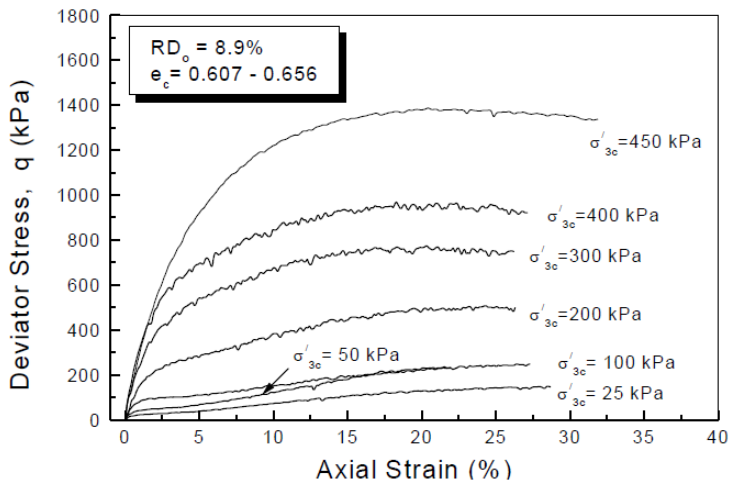
Επίσης, μετρήθηκε η κυκλική διατμητική παραμόρφωση για κάθε δείγμα. Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 3.13., παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η σχετική πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη ήταν και η αντοχή σε κυκλική διατμητική παραμόρφωση, άρα και πιο ανθεκτικό το δοκίμιο έναντι ρευστοποίησης.



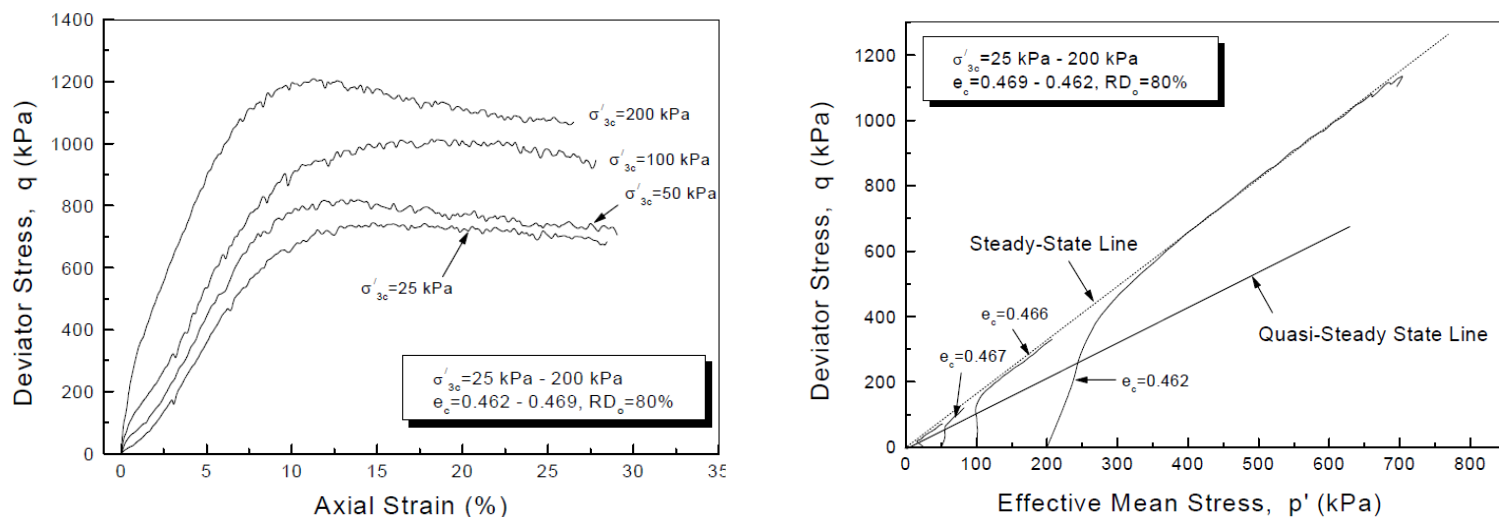
Σχήμα 3.13. Ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση σε συνάρτηση με την σχετική πυκνότητα

Κεφάλαιο 3: Η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου με βάση βιβλιογραφικές αναφορές

Στη συνέχεια, εδαφικά δείγματα με διαφορετικές σχετικές πυκνότητες (8,9%, 56,5% και 80% αντίστοιχα) στερεοποιήθηκαν αρχικά σε διάφορες ενεργές τάσεις από 25kPa έως και 430kPa. Ακολούθως υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση και έδωσαν τα αποτελέσματα όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 3.14..



Κεφάλαιο 3: Η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ιλύος στην μηχανική συμπεριφορά της άμμου με βάση βιβλιογραφικές αναφορές



Σχήμα 3.14. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ($q-\epsilon_a$) και αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση ($q-p'$) για τρεις ομάδες πυκνοτήτων, $RD=8.9\%$, $RD=56.5\%$ και $RD=80\%$

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τα διαγράμματα του Σχήματος 3.14., παρατηρήθηκε ότι για μικρότερη τάση στερεοποίησης τα δοκίμια παρουσίασαν συστολική συμπεριφορά για τους διάφορους δείκτες πόρων. Επίσης, με αύξηση της αρχικής τάσης στερεοποίησης παρατηρήθηκε ότι αυξήθηκε η παραμένουσα αντοχή σε κάθε δεδομένο δείκτη πόρων ή σχετική πυκνότητα. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι όσο μειώνεται ο δείκτης πόρων (και αντίστοιχα αυξάνεται η σχετική πυκνότητα) τα δείγματα παρουσιάζουν περισσότερο διαστολική συμπεριφορά.

3.2.6. Πειράματα των Muley, Maheshwari and Paul 2012

Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αυτών των ερευνητών, είναι κακώς διααβαθμισμένη ενώ η ιλύς μη πλαστική, σύμφωνα με την κατηγοριοποίησή τους από το Ινδικό επιμελητήριο. Τα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των πειραμάτων παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.1. και 3.2..

Properties of Solani Sand			
Sr. No.	Particulars	Notations	Value
1	Soil Type	SP	Poorly Graded Sand
2	Specific Gravity	G_s	2.68
3	Uniformity Co-efficient	C_u	1.96
4	Co-efficient of Curvature	C_c	1.15
5	Grain Size	D_{10}	0.120 mm
		D_{30}	0.180 mm
		D_{50}	0.210 mm
		D_{60}	0.235 mm
6	Maximum Void Ratio	e_{max}	0.850
7	Minimum Void Ratio	e_{min}	0.540

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά άμμου Solani

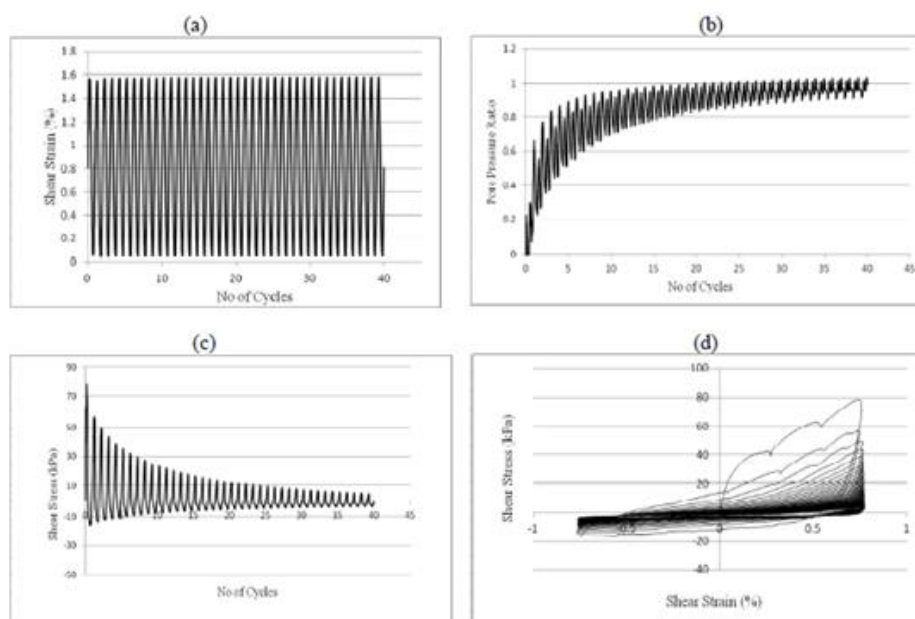
Sr. No.	Particulars	Notations	Value
1	Soil type	ML	Low Plasticity Silt
2	Specific gravity	G_s	2.54
3	Liquid limit	LL	30%
4	Plastic limit	PL	24%
5	Plasticity index	PI	6%
6	Grain size	D_{10}	0.001 mm
		D_{30}	0.006 mm
		D_{50}	0.018 mm
		D_{60}	0.026 mm
9	Maximum void ratio	e_{max}	1.27
10	Minimum void ratio	e_{min}	0.34

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά υλίου

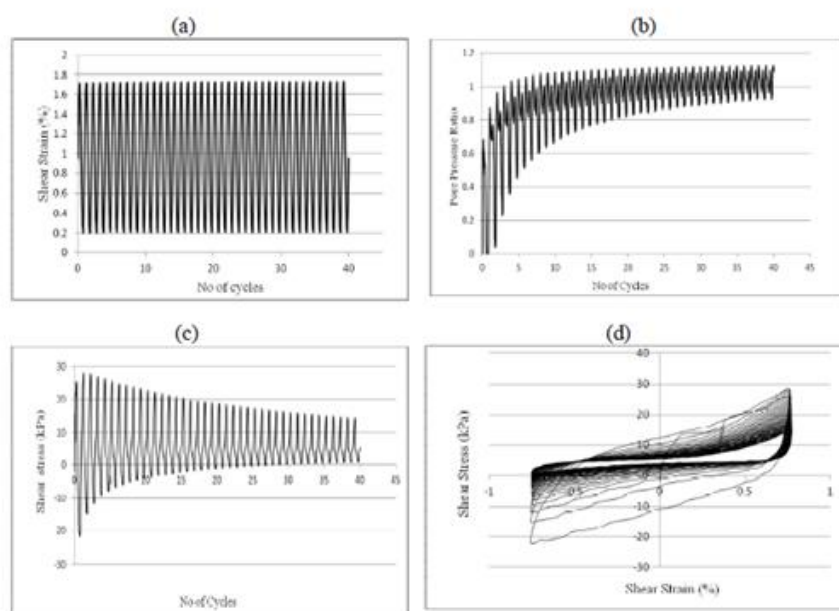
Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν δέκα ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές με συχνότητα 1Hz με πέντε διαφορετικά ποσοστά ιλύος (0%, 5%, 10%, 15% και 20%), σε δύο διαφορετικές σχετικές πυκνότητες ($Dr=35\%$ και $Dr=50\%$), και σε μία ενιαία τάση στερεοποίησης 50kPa.

Στα πειράματα αυτά, για να προσδιοριστεί σε ποιόν ακριβώς κύκλο πραγματοποιείται η ρευστοποίηση εισήχθει ο συντελεστής R_u , που αντιπροσωπεί τον λόγο της υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσεται στο δοκίμιο μετά την επιβολή της διάτμησης προς την αρχική τάση στερεοποίησης του δοκιμίου (Confining Pressure). Θεωρήθηκε ότι όταν ο συντελεστής αυτός γίνει ίσος με την μονάδα, τότε στο δοκίμιο έχει επέλθει πλήρης ρευστοποίηση.

Τα πειράματα χωρίστηκαν σε δυο βασικές ομάδες, αναλόγως της σχετικής πυκνότητας τους (35% και 50%). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτά τα πειράματα παριστάνονται στα Σχήματα 3.15. και 3.16..



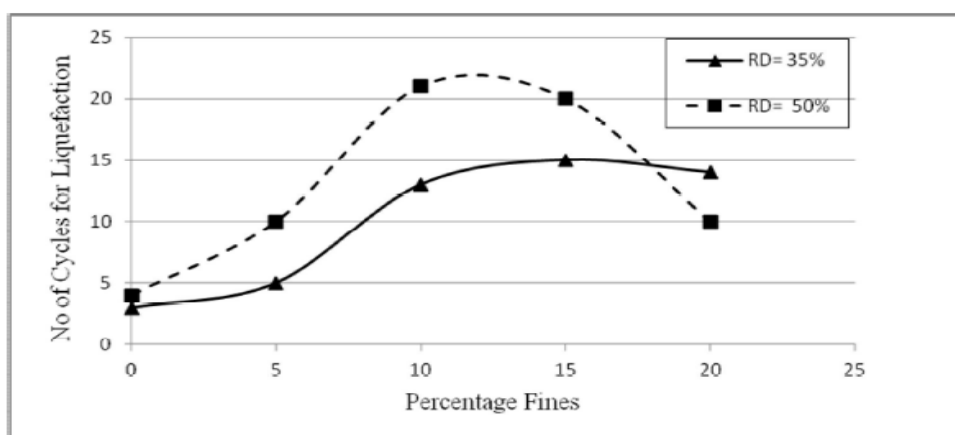
Σχήμα 3.15. Αποτελέσματα ανακυκλικής δοκιμής μείγματος άμμου-ιλύος με 10% ποσοστό υλίου, σε συχνότητα 1Hz, αρχική ενεργό τάση 50kPa και σχετική πυκνότητα 50%. (α)διατμητική παραμόρφωση σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων, (β)πιέσεις πόρων ρευστού σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων, (γ)διατμητική τάση σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων, (δ)διατμητική τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση



Σχήμα 3.16. Αποτελέσματα ανακυκλικής δοκιμής δοκιμίου καθαρής άμμου, σε συχνότητα 1Hz, αρχική ενεργό τάση 50kPa και σχετική πυκνότητα 50%. (α)διατμητική παραμόρφωση σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων, (β)πιέσεις πόρων ρευστού σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων, (γ)διατμητική τάση σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων, (δ)διατμητική τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση

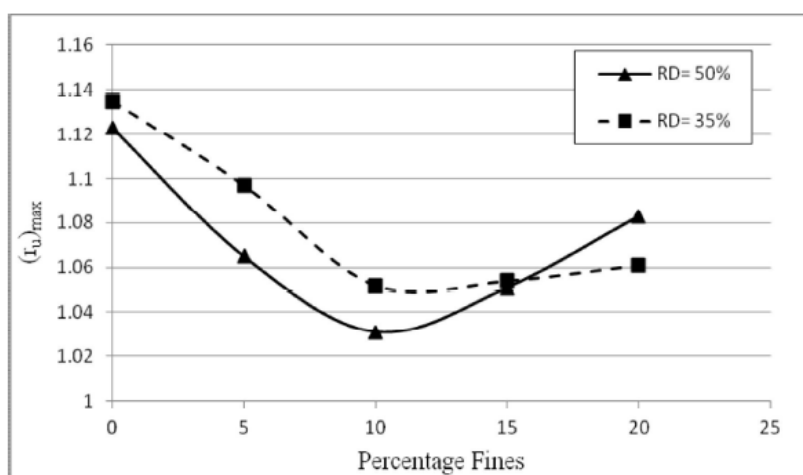
Αυτό που παρατηρήθηκε στα πειράματα αυτά, είναι ότι το μείγμα με 10% ιλύ ρευστοποιήθηκε στους 21 κύκλους σε αντίθεση με την καθαρή άμμο που ρευστοποιήθηκε στον τέταρτο κύκλο.

Στα Σχήματα 3.17. και 3.18. παρουσιάζεται η σύγκριση 2 μειγμάτων, το ένα με σχετική πυκνότητα $D_r=35\%$ και το άλλο με σχετική πυκνότητα $D_r=50\%$, σε διάφορα ποσοστά ιλύος και πώς αυτή συμβάλλει στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης.



Fines Content (%) Vs No of Cycles Required to Liquefaction

Σχήμα 3.17. Αριθμός κύκλων μέχρι τη ρευστοποίηση σε συνάρτηση με το ποσοστό των λεπτόκοκκων



Fines Content Vs $(r_u)_{max}$

Σχήμα 3.18. Λόγος υπερπίεσης πόρων – αρχικής τάσης στερεοποίησης σε συνάρτηση με το ποσοστό των λεπτόκοκκων

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τα Σχήματα 3.17 και 3.18., οι ερευνητές αυτοί αποφάνθηκαν ότι για τις σχετικές πυκνότητες $Dr=35\%$ και $Dr=50\%$ το βέλτιστο ποσοστό ιλύος είναι 15% και 10% αντίστοιχα, για το οποίο η αντοχή σε ρευστοποίηση λαμβάνει την μέγιστη τιμή. Συνεπώς για ποσοστά ιλύος χαμηλότερα από τα άνω όρια η δράση της ιλύος είναι ευεργετική ως προς την αντοχή της άμμου σε ρευστοποίηση.

Επίσης, ακόμα μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι για μείγματα με το ίδιο ποσοστό ιλύος, ο αριθμός των κύκλων αυξάνεται με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας και έτσι μπορούμε να πούμε ότι η σχετική πυκνότητα παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην αντοχή ως προς την ρευστοποίηση. Αντίθετα η επίδραση της τείνει να μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό της ιλύος στο μείγμα.

3.2.7. Πειράματα των Belkhatir, Missoum, Arab, Della, και Schanz 2011

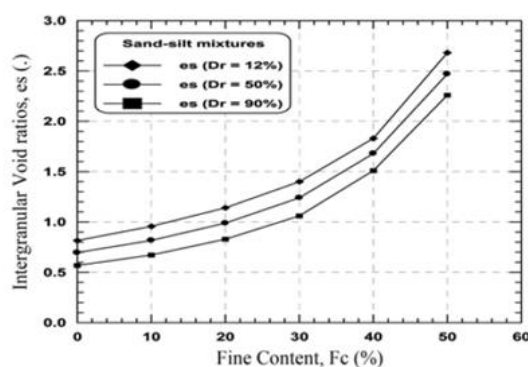
Οι παραπάνω ερευνητές μελέτησαν την επίδραση του δείκτη πόρων στην παραμένουσα διατμητική αντοχή εδαφικών δοκιμών υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης σε δείγματα καθαρής άμμου αλλά και μείγματος άμμου με ιλύ. Μελετήθηκαν χαλαρά, μέτρια και πυκνά δοκίμια ($Dr = 12, 50, \text{ και } 90\%$ πριν την στερεοποίηση) των οποίων στην συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά υπό μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση.

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα δείγματα στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100KPa ενώ υπολογίστηκε ο δείκτης πόρων εδαφικού σκελετού χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$e_s = \frac{e + (F_c/100)}{1 - (F_c/100)}$$

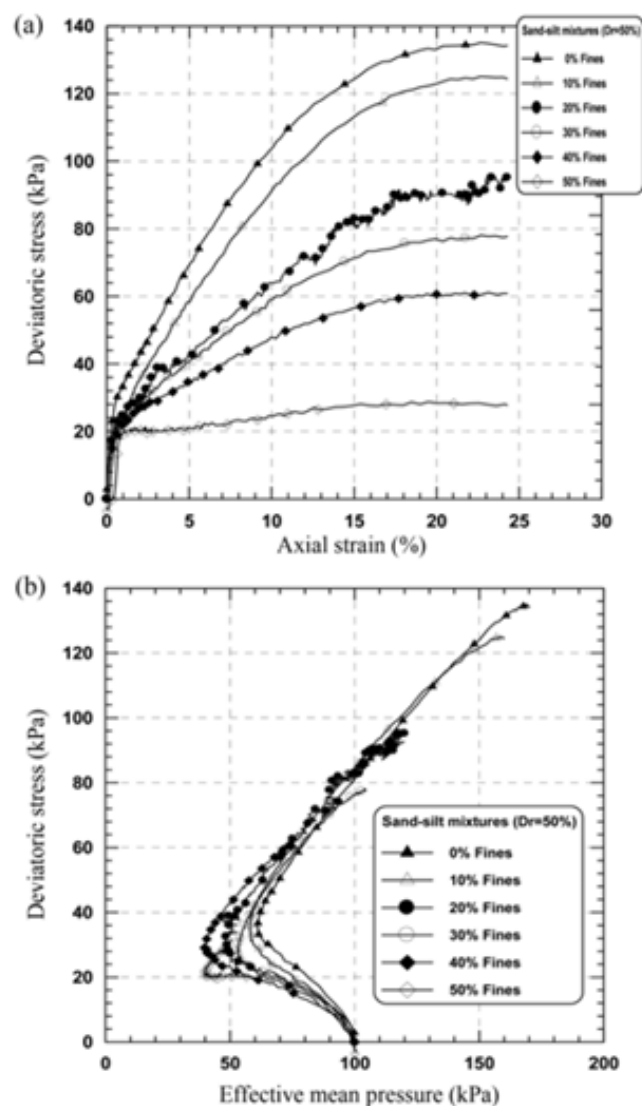
όπου F_c ορίζεται ως το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών κατά βάρος ως προς το συνολικό βάρος του δοκιμίου.

Επίσης, στο Σχήμα 3.19. φαίνεται η συσχέτιση του δείκτη πόρων (skeleton) και ποσοστού λεπτοκόκκων των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.



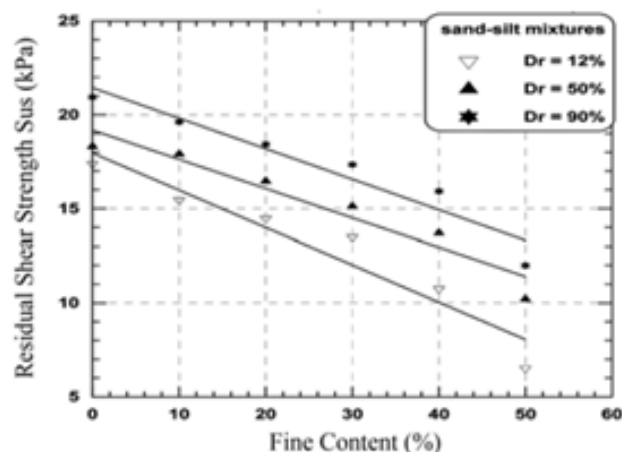
Σχήμα 3.19. Δείκτης πόρων σκελετού σε συνάρτηση με το ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών κατά βάρος και την αρχική σχετική πυκνότητα

Κατά την μελέτη των αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών υπό μονοτονική φόρτιση για εύρος λεπτόκοκκων υλικών από 0 έως και 50% και για δείγματα με σχετική πυκνότητα 50%, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτοκόκκων τόσο μειώνεται και η αποκλίνουσα τάση (Σχήμα 3.20.).



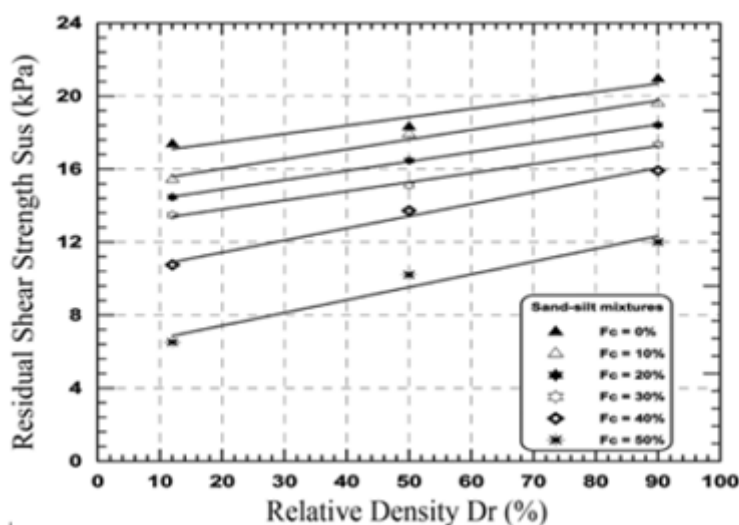
Σχήμα 3.20. Επίδραση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή των μειγμάτων άμμου-ιλύος ($\sigma_3' = 100 \text{ kPa}$, $D_r = 50\%$) (a)αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση, (b)αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση

Επίσης, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.21., παρατηρήθηκε το φαινόμενο ότι η παραμένουσα διατμητική αντοχή στο συγκεκριμένο εύρος λεπτοκόκκων υλικών, μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του δείκτη πόρων σκελετού.



Σχήμα 3.21. Παραμένουσα διατμητική αντοχή σε συνάρτηση με το ποσοστό των λεπτόκοκκων κατά βάρος σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες ($\sigma_3' = 100\text{kPa}$)

Τέλος, παρατηρήθηκε μια γραμμική συσχέτιση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την σχετική πυκνότητα (Σχήμα 3.22.). Όσο αυξανόταν η σχετική πυκνότητα, αυξανόταν ανάλογα και η παραμένουσα διατμητική αντοχή καθώς επίσης όσο λιγότερο ποσοστό λεπτοκόκκων περιείχαν τα δείγματα, τόσο καλύτερη αντοχή παρουσίαζαν.



Σχήμα 3.22. Παραμένουσα διατμητική αντοχή σε συνάρτηση με την σχετική πυκνότητα για διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού

Στην συνέχεια, μελετήθηκαν μείγματα τα οποία περιείχαν ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών από 0 έως και 40% τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση 100kPa. Στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε τριαξονικές ανακυκλικές δοκιμές με σταθερή συχνότητα 0.5 Hz. Τα πειράματα που έγιναν στις πρώτες δοκιμές ήταν σε καθαρή άμμο με δείκτη πόρων ίσο με 0,695. Οι δεύτερες δοκιμές έγιναν σε μείγματα ιλυώδους άμμου

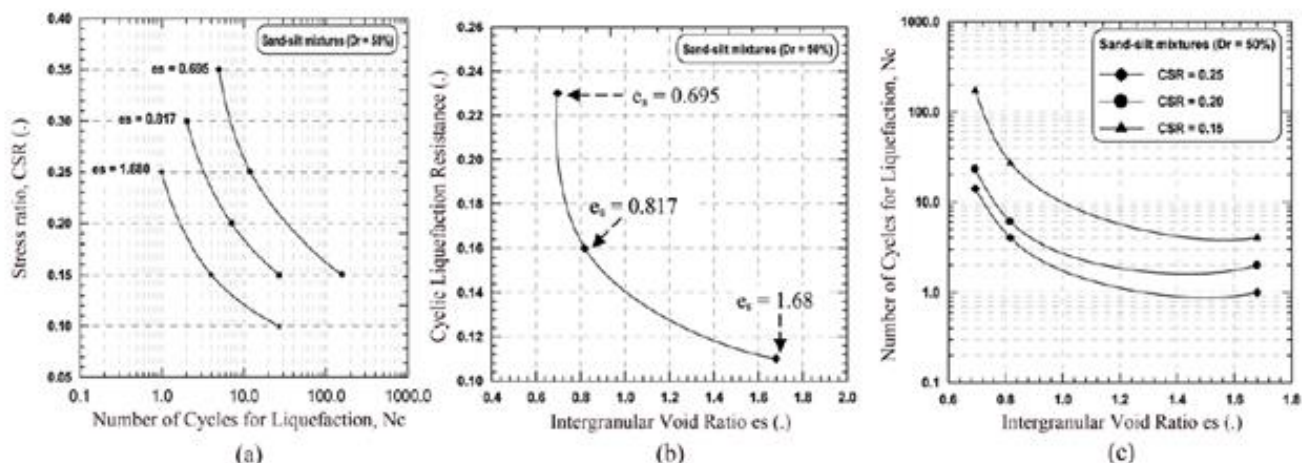
με ποσοστό λεπτοκόκκων 10% και δείκτη πόρων ίσο με 0,817 ενώ οι τρίτες δοκιμές έγιναν σε μείγματα ιλυώδους άμμου με ποσοστό λεπτοκόκκων 40% και δείκτη πόρων ίσο με 1,680. Συγκεντρωτικά πραγματοποιήθηκαν εννέα πειράματα με τις παραμέτρους των οποίων να φαίνονται στον Πίνακα 3.3..

Summary of Cyclic Triaxial Tests Results (Inter-granular void ratio effect)

N	Test	Relative Density D_r (%)	Fine Content F_c (%)	CSR	Number of Cycles N_c
1	CUM3C	50	0	0.15	158
2	CUM2C	50	0	0.25	12
2	CUM1C	50	0	0.35	5
4	CUM4C	50	10	0.15	27
5	CUM5C	50	10	0.20	7
6	CUM6C	50	10	0.30	2
7	CUM7C	50	40	0.10	27
8	CUM8C	50	40	0.15	4
9	CUM9C	50	40	0.25	1

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά ανακυκλικών τριαξονικών πειράματων και ο αντίστοιχος αριθμός κύκλων κατά την αστοχία τους

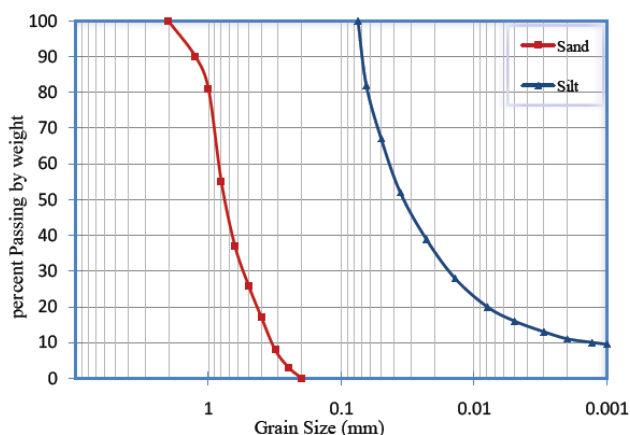
Απο τα πειράματα αυτά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτοκόκκων, τόσο πιο επιρρεπές είναι το μείγμα σε ρευστοποίηση. Επίσης όσο μεγαλύτερος ήταν ο δείκτης πόρων (skeleton) τόσο περισσότερο μειωνόταν η αντίσταση σε ρευστοποίηση υπό ανακυκλική φόρτιση. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα μείγματα τα οποία φορτίστηκαν με μικρότερο πλάτος διάτμησης, παρουσίασαν σαφώς καλύτερη αντοχή σε ρευστοποίηση σε σχέση με αυτά τα οποία φορτίστηκαν σε μεγαλύτερο πλάτος διάτμησης τα οποία ήταν πιο ευάλωτα στο φαινόμενο αυτό (Σχήμα 3.23.).



Σχήμα 3.23. Επίδραση του δείκτη πόρων σκελετού στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε μείγματα άμμου-ιλύος ($\sigma'_3=100\text{kPa}$, $D_r=50\%$) (a)Λόγος ανακυκλικής τάσης σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων μέχρι την ρευστοποίηση, (b)ανακυκλική αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε συνάρτηση με τον δείκτη πόρων σκελετού και (c) αριθμός κύκλων μέχρι την ρευστοποίηση σε συνάρτηση με τον δείκτη πόρων σκελετού

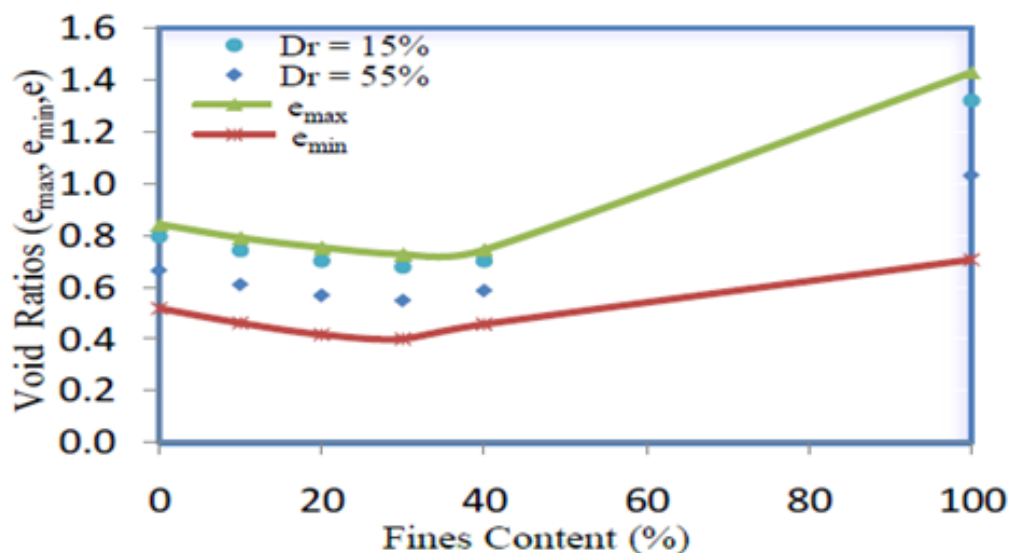
3.2.8.Πειράματα των Bensoula, Missoum και Bendani, 2014

Στα πειράματα αυτά, χρησιμοποιήθηκε ιλύς με όριο πλαστιμότητας και όριο υδαρότητας 20% και 25% αντίστοιχα. Το ειδικό βάρος της άμμου ήταν 2.67t/m^3 και της ιλύος 2.69t/m^3 . Επίσης, λόγω του ότι οι πλείστες ρευστοποιήσεις έλαβαν χώρα σε εδαφικούς σχηματισμούς με ποσοστό υλίου μέχρι και 40%, τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν εντός των ορίων αυτών. Ακόμη, οι ερευνητές αυτοί εκτέλεσαν διάφορα πειράματα σε δύο διαφορετικές σχετικές πυκνότητες, ούτως ώστε να αποφανθούν για την σημασία της στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Για λόγους πληρότητας, στο Σχήμα 3.24. παρατίθεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των δύο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες αυτών των πειραμάτων.



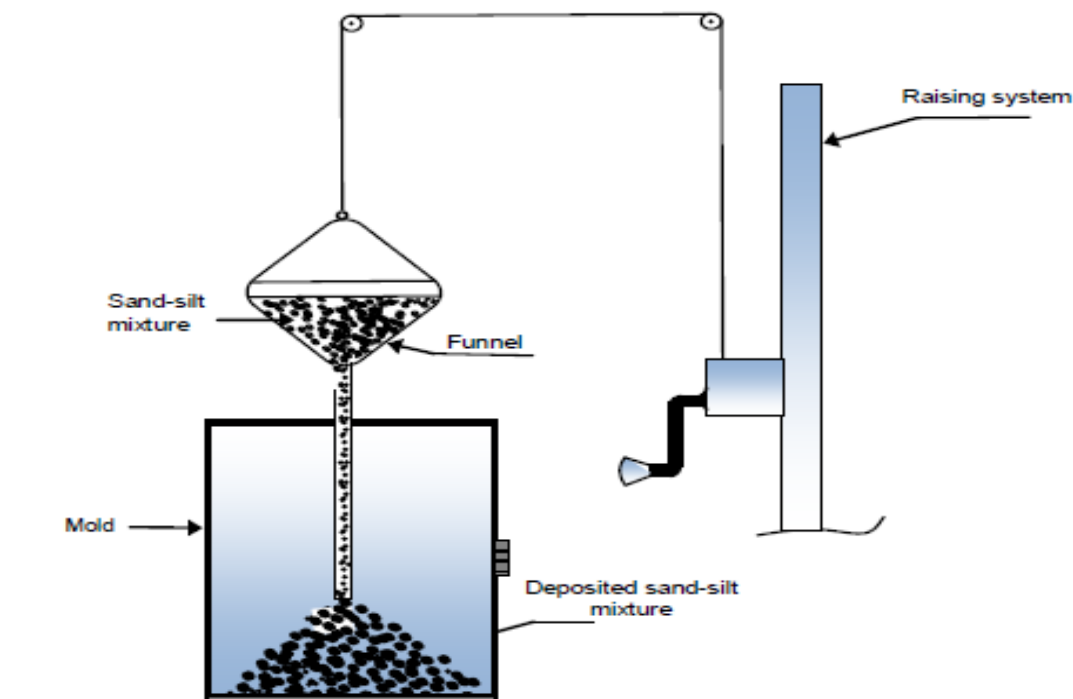
Σχήμα 3.24. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου και ιλύος. Ποσοστό διερχόμενων σε συνάρτηση με το μέγεθος κόκκου

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό που καθορίζει εν μέρη την αντοχή του μείγματος έναντι ρευστοποίησης, είναι το άνω και κάτω όριο του δείκτη πόρων (e_{max} και e_{min}). Στο Σχήμα 3.25, παρατίθεται το διάγραμμα με τις τιμές του μέγιστου (e_{max}) και του ελάχιστου (e_{min}) δείκτη πόρων για διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων υλικών στο μείγμα και για δύο διαφορετικές σχετικές πυκνότητες $D_r=15\%$ και $D_r=55\%$.



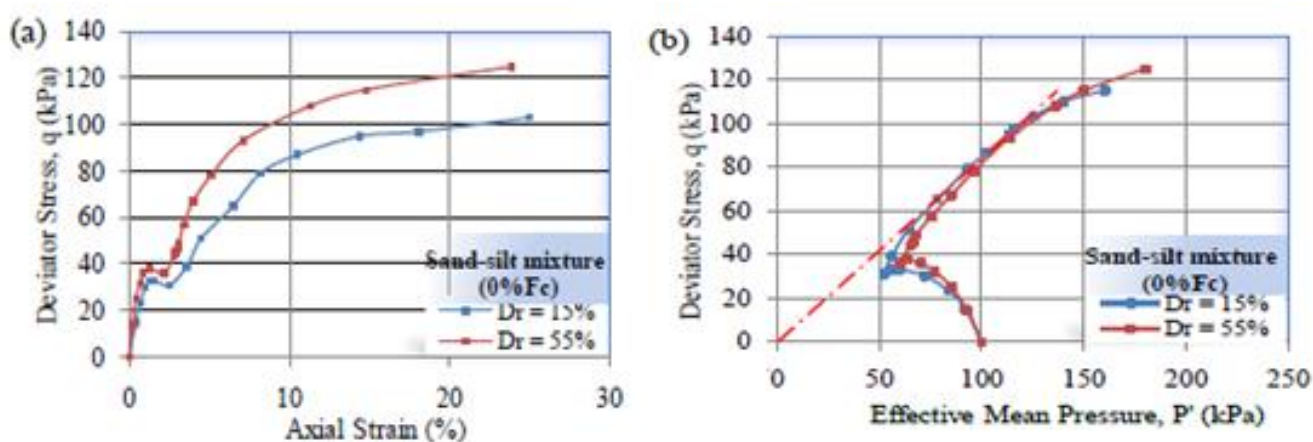
Σχήμα 3.25. Μέγιστος δείκτης πόρων e_{max} , ελάχιστος δείκτης πόρων e_{min} και δείκτες πόρων για δύο σχετικές πυκνότητες ($D_r=15\%$ και $D_r=55\%$) σε συνάρτηση με το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο μείγμα κατά βάρος.

Οι παραπάνω ερευνητές εξέτασαν διάφορες μεθόδους απόθεσης, αλλά συμπέραναν ότι αυτή που θα αναπαριστούσε καλύτερα τις γεωστατικές συνθήκες υπαίθρου θα ήταν η μέθοδος ξηρής απόθεσης, την οποία και εφάρμοσαν στα πειράματα αυτά (Σχήμα 3.26.)

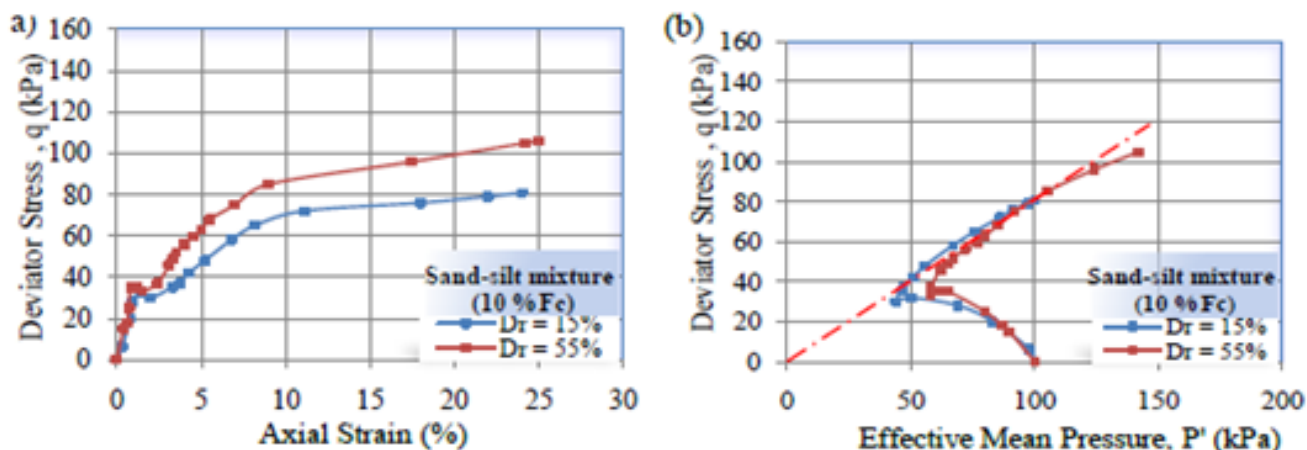


Σχήμα 3.26. Αναπαράσταση μεθόδου ξηρής απόθεσης

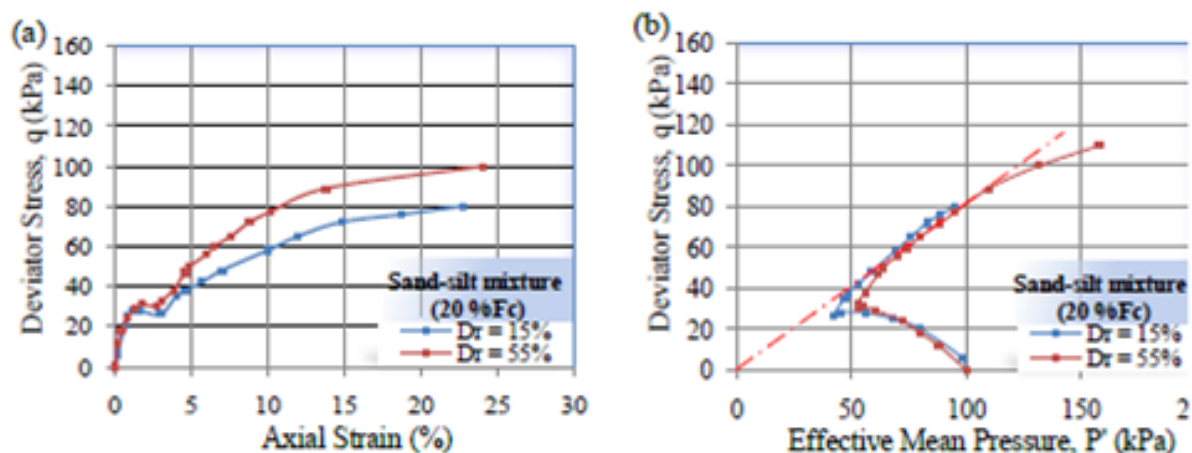
Με τον μηχανισμό αυτό υπάρχει η δυνατότητα ανάμειξης οποιουδήποτε επιθυμητού ποσοστού λεπτοκόκκων με τον αναδευτήρα Σχήματος χωνιού (Σχήμα 3.26.). Τα μείγματα αυτά στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και έπειτα υποβλήθηκαν σε αστράγγιστη διατμητική μονοτονική φόρτιση με ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης 5%/hour. Στα παρακάτω Σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών.



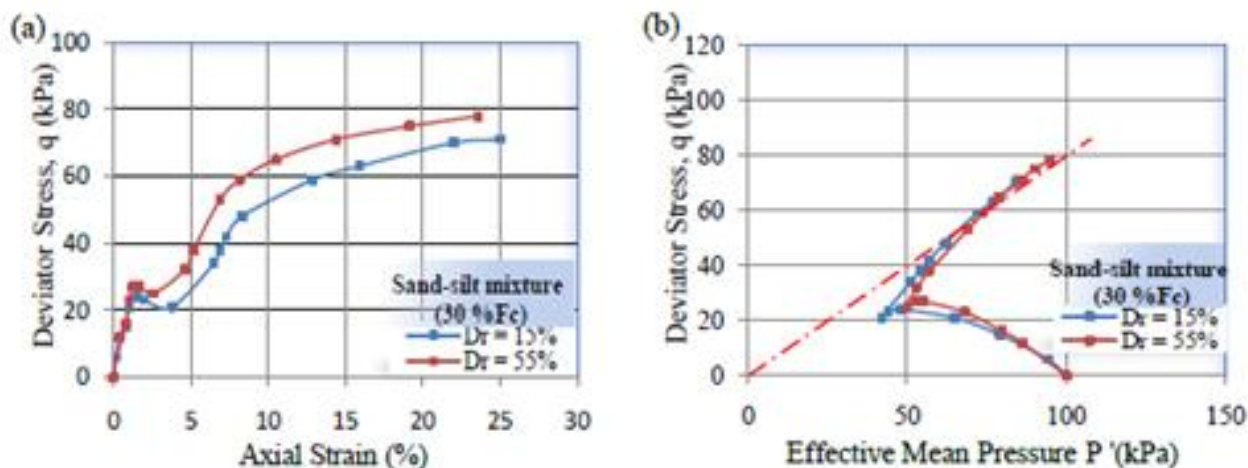
Σχήμα 3.27. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνοιας τάσης σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση ($q-\epsilon_a$) και διαδρομές ενεργών τάσεων ($q-p'$) σε δοκίμια καθαρής άμμου σε δύο σχετικές πυκνότητες ($Dr=15\%$ και $Dr=55\%$) υπό αστράγγιστες συνθήκες



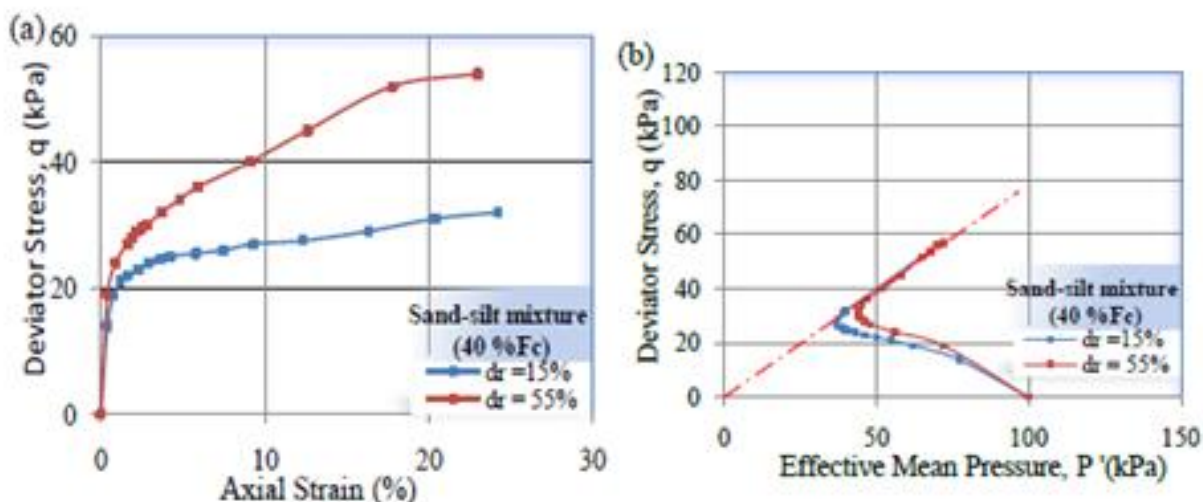
Σχήμα 3.28. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ($q-\epsilon_a$) και διαδρομές ενεργών τάσεων ($q-p'$) σε μείγματα άμμου ιλύος με 10% ποσοστό ιλύος, σε δύο σχετικές πυκνότητες ($D_r=15\%$ και $D_r=55\%$) υπό αστράγγιστες συνθήκες



Σχήμα 3.29. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ($q-\epsilon_a$) και διαδρομές ενεργών τάσεων ($q-p'$) σε μείγματα άμμου ιλύος με 20% ποσοστό ιλύος, σε δύο σχετικές πυκνότητες ($D_r=15\%$ και $D_r=55\%$) υπό αστράγγιστες συνθήκες



Σχήμα 3.30. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ($q-\epsilon_a$) και διαδρομές ενεργών τάσεων ($q-p'$) σε μείγματα άμμου ιλύος με 30% ποσοστό ιλύος, σε δύο σχετικές πυκνότητες ($D_r=15\%$ και $D_r=55\%$) υπό αστράγγιστες συνθήκες



Σχήμα 3.31. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ($q-\epsilon_a$) και διαδρομές ενεργών τάσεων ($q-p'$) σε μείγματα άμμου ιλύος με 40% ποσοστό ιλύος, σε δύο σχετικές πυκνότητες ($D_r=15\%$ και $D_r=55\%$) υπό αστράγγιστες συνθήκες

Αρχικά, τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών, παίζει σημαντικότατο ρόλο στην κρίσιμη αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Επίσης, μέσα από αυτά τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι για ποσοστό λεπτόκοκκων μικρότερο του 30%, μια αύξηση στον δείκτη πόρων ($e_{skeleton}$) συνεπάγεται σε ανάλογη μείωση της κρίσιμης διατμητικής αντοχής.

Όσον αφορά τα μείγματα που περιείχαν 40% λεπτόκοκκο υλικό, δεν παρατηρήθηκε μείωση της αποκλίνουσας τάσης και για τις δύο σχετικές πυκνότητες. Αυτό υποδηλώνει ότι τα λεπτόκοκκα υλικά στα μείγματα με ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών μεγαλύτερο του 30% συνεισέφεραν στον περιορισμό της ανάπτυξης των υπερπιάσεων πόρων.

Αντίθετα, τα μείγματα με ποσοστό λεπτοκόκκων μικρότερο από 30% δείχνουν μια έντονα συστολική συμπεριφορά στις μικρές παραμορφώσεις, λόγω του ότι τα λεπτόκοκκα υλικά στην περίπτωση αυτή μειώνουν την διαστολικότητα του δοκιμίου και διευρύνουν την συστολική φάση με αποτέλεσμα να μειώνονται οι διατμητικές αντοχές.

3.2.9. Πειράματα των Salgado, Bandini και Karim, 2000

Οι παραπάνω ερευνητές προσπάθησαν μέσα από σειρά πειραμάτων να προσδιορίσουν την επίδραση μη πλαστικών λεπτόκοκκων υλικών στην δυστημψία της άμμου στις μικρές γωνίες αλλά και στη διατμητική της αντοχή.

Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκε άμμος τύπου Ottawa καθώς επίσης και λεπτόκοκκο υλικό σε ποσοστό που κυμαινόταν από 5% έως και 20%. Τα δείγματα παρασκευάστηκαν σε διάφορες σχετικές πυκνότητες και στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε διαφορετικές αρχικές ενεργές τάσεις.

Στην συνέχεια επέβαλαν τα δείγματα αυτά σε τριαξονικές δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης, ούτως ώστε να αποφανθούν για τα παραπάνω χαρακτηριστικά των μειγμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκρίσεις έγιναν ως προς την σχετική πυκνότητα (D_r) κάθε μείγματος, αφού πρώτα υπολογίστηκε ο μέγιστος και ο ελάχιστος δείκτης πόρων για κάθε περίπτωση ποσοστού λεπτόκοκκων υλικών. Ακολούθως, εισήχθηκε ο δείκτης πόρων σε όρους σκελετού ο οποίος υπολογίστηκε με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$e_{sk} = \frac{1+e}{1-f} - 1$$

όπου:

e - ο ολικός δείκτης πόρων του εδαφικού υλικού

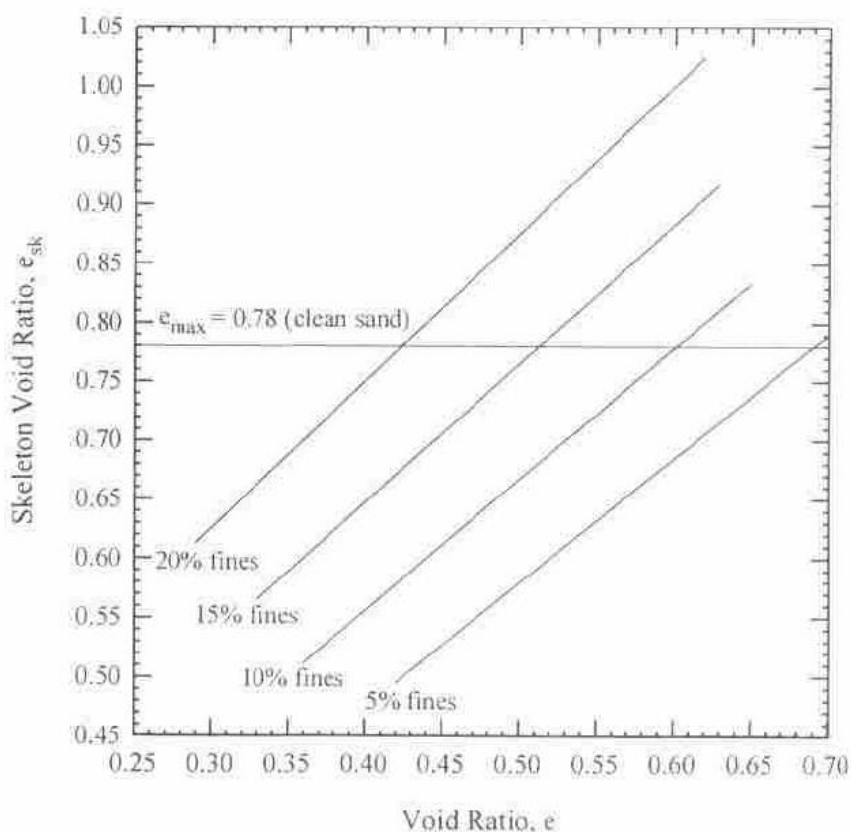
f - το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού

silt(%) (1)	e_{min} (2)	e_{max} (3)
0	0.48	0.78
5	0.42	0.7
10	0.36	0.65
15	0.32	0.63
20	0.29	0.62

Πίνακας 3.4. Μέγιστος και ελάχιστος δείκτης πόρων για καθαρή και ιλιώδη άμμο Ottawa

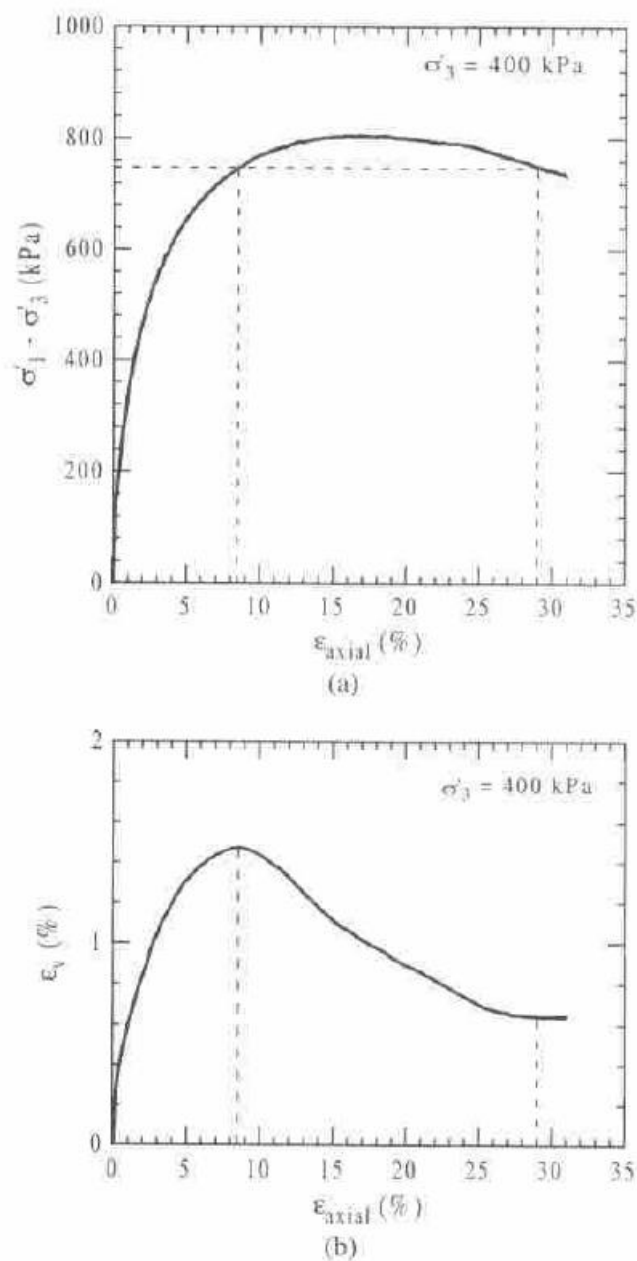
Η μέγιστη γωνία τριβής και η γωνία τριβής της κρίσιμης κατάστασης προσδιορίζεται σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb (δηλαδή από την σχέση $s = \sigma \cdot \tan(\varphi)$) από τα σημεία της μέγιστης αντοχής και της κρίσιμης κατάστασης αντίστοιχα.

Η κρίσιμη κατάσταση (critical state) προσδιορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία ενώ η διατμητική τάση και ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός, η διατμητική παραμόρφωση αυξάνεται. Για την εξακρίβωση του πότε προσεγγίζεται η κρίσιμη κατάσταση (critical state) χρησιμοποιήθηκε ως βασικό διάγραμμα η ογκομετρική παραμόρφωση (ϵ_v) συναρτήση με την αξονική παραμόρφωση (ϵ_{ax}) (Σχήμα 3.33.). Η γωνία κρίσιμης κατάστασης προσδιορίζεται από το διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-ογκομετρικής παραμόρφωσης, όταν η εφαπτόμενη στην καμπύλη γίνει οριζόντια (εκεί δηλαδή που η γωνία διαστολικότητας γίνεται ίση με 0). Σαν δευτερεύων έλεγχος χρησιμοποιήθηκε, η τιμή της γωνίας διαστολικότητας που αντιστοιχεί στο πρώτο μέγιστο σημείο της ογκομετρικής παραμόρφωσης στο ίδιο διάγραμμα που αντιστοιχεί επίσης σε οριζόντια εφαπτομένη και έτσι η γωνία διαστολικότητας είναι και εκεί ίση με 0.



Σχήμα 3.32. Δείκτης πόρων σκελετού (e_{sk}) σε συνάρτηση με τον δείκτη πόρων (e)

Οι δυο παραπάνω υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της γωνίας τριβής στην κρίσιμη κατάσταση (ϕ_c) είναι κοινοί σε πειράματα κατά τα οποία η καμπύλη μεταβολής όγκου γίνεται οριζόντια σε μεγάλες αξονικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.33. (α)Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με αξονική παραμόρφωση και (β)ογκομετρική παραμόρφωση σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση, $p'=400\text{kPa}$

Οι παραπάνω ερευνητές πραγματοποίησαν δυο ομάδες πειραμάτων. Στην πρώτη ομάδα αντιστοιχούσαν πειράματα τα οποία περιείχαν 0%, 5% , 10%, 15% και 20%

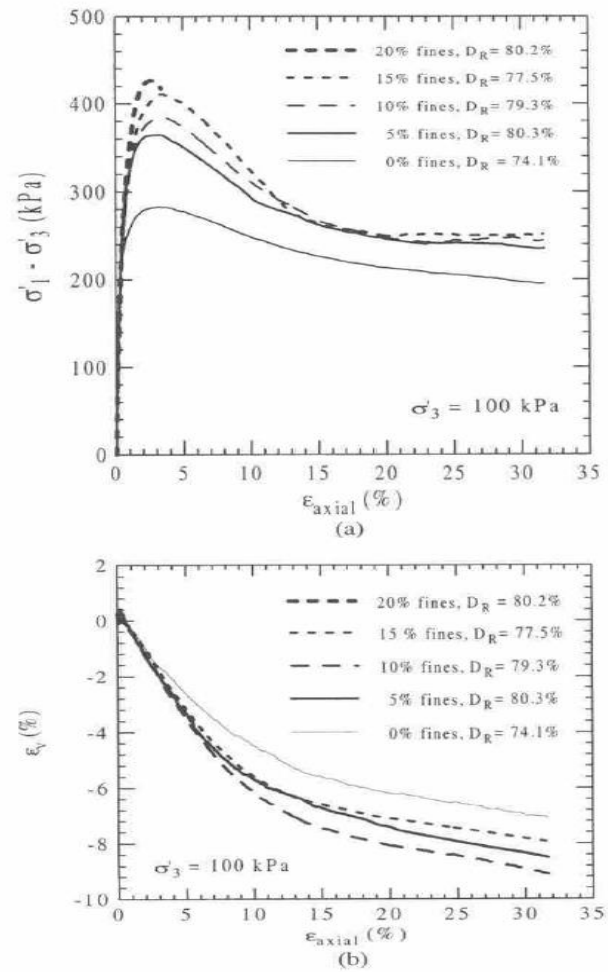
ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών και τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε τάση στερεοποίησης 400kPa, με σχετική πυκνότητα γύρω στο 30%. Στην δεύτερη ομάδα αντιστοιχούσαν πειράματα τα οποία περιείχαν 0%, 5%, 10%, 15% και 20% ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε τάση στερεοποίησης 100kPa ενώ η σχετική πυκνότητα ήταν κοντά στο 80%.

Είναι φανερό, όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα στα Σχήματα 3.34. και 3.35., ότι η γωνία τριβής της κρίσιμης κατάστασης αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών. Επίσης παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του ποσοστού των λεπτοκόκκων αυξάνεται και η διαστολικότητα του δοκιμίου.

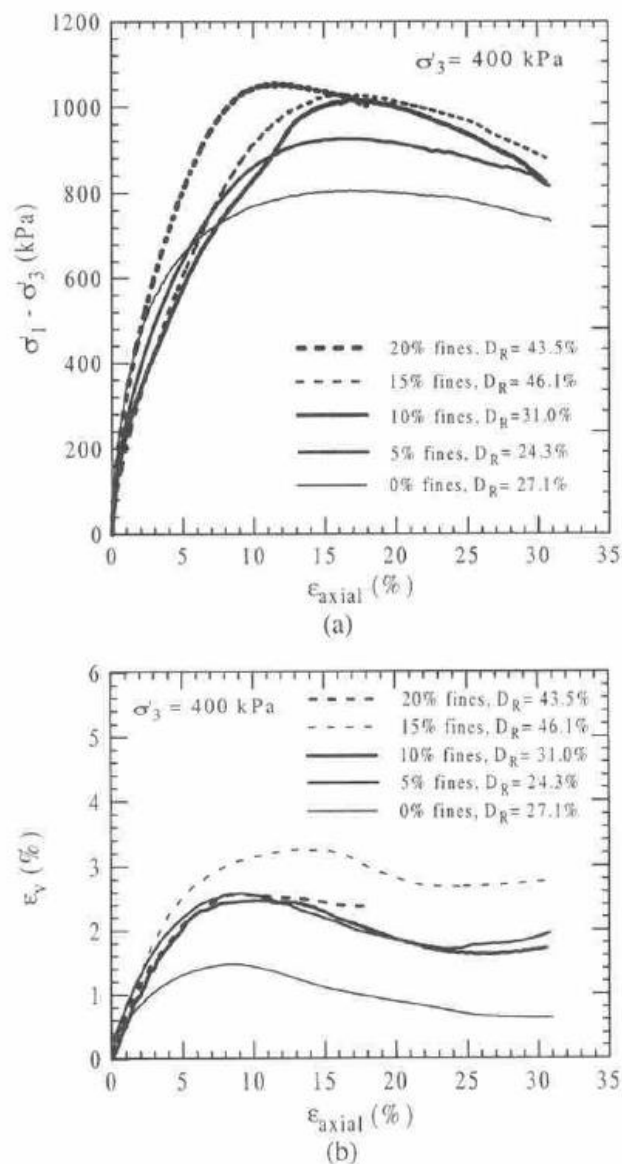
Ακόμη, λόγω της αύξησης της διαστολικότητας του δοκιμίου αλλά και της γωνίας τριβής στην κρίσιμη κατάσταση με την αύξηση του ποσοστού των λεπτοκόκκων, έχουμε και αύξηση της μέγιστης γωνίας τριβής ϕ_p .

Επίσης, αυτοί οι ερευνητές προσπάθησαν να ερευνήσουν τις επιπτώσεις της προσθήκης μη πλαστικών λεπτόκοκκων υλικών στην άμμο ως προς την δυσμησία στις μικρές παραμορφώσεις και την αντοχή. Στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης σε τάση στερεοποίησης 400KPa, έδειξαν ότι σε χαλαρά δοκίμια σε μικρές παραμορφώσεις η προσθήκη λεπτόκοκκου παράγοντα μέχρι το 15% μειώνει τη δυσμησία. Αντιθέτως, αν συνεχιστεί η προσθήκη λεπτόκοκκου πέραν του 15% η δυσμησία αυξάνει.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στο διάγραμμα ογκομετρικών παραμορφώσεων του Σχήματος 3.35.. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι, η προσθήκη μικρού ποσοστού μη πλαστικών λεπτόκοκκων στην άμμο Ottawa απομειώνει τη δυσμησία του μείγματος διότι τα σωματίδια της άμμου απομακρύνονται με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενεργές επαφές. Ωστόσο, καθώς η διάτμηση συνεχίζεται και ξεπερνά σχετικά τις μικρές παραμορφώσεις, η παρουσία της ιλύος δείχνει να επιδρά θετικά στο μείγμα αυξάνοντας του την διαστολικότητα και έτσι η διατμητική αντοχή στις μεγάλες παραμορφώσεις να αυξάνεται. Στα πειράματα αυτά, φαίνεται ότι για ποσοστά ιλύος 15% η συμπεριφορά του μείγματος διέπεται από τα χαρακτηριστικά της ιλύος κατά κύριο λόγο. Για μείγματα τα οποία περιέχουν 20% ιλύ, οι Salgado et al. υποστηρίζουν ότι τα σωματίδια της άμμου είναι εντελώς αδρανή μέσα στο μείγμα και η συμπεριφορά που παρατηρείται είναι η συμπεριφορά της ιλύος. Ακόμη, η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών στο μείγμα δεν επέφερε καμία αλλαγή στη δυσμησία.



Σχήμα 3.34. (a) Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με αξονική παραμόρφωση και (b) ογκομετρική παραμόρφωση σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση, $p' = 100 \text{ kPa}$, πικνά δοκίμια ($D_R \sim 80\%$)



Σχήμα 3.35. (α)Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με αξονική παραμόρφωση και (β)ογκομετρική παραμόρφωση σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση, $p'_3=400$ kPa, χαλαρά δοκίμια ($D_r \sim 30\%$)

3.2.10. Πειράματα Παπαδοπούλου και Τίκα 2008

Οι παραπάνω ερευνήτριες πραγματοποίησαν τριαξονικά μονοτονικά και ανακυκλικά πειράματα σε μείγματα άμμου και ιλύος ούτως ώστε να αποφανθούν για την επίδραση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών στην κρίσιμη κατάσταση και την αντίσταση σε ρευστοποίηση.

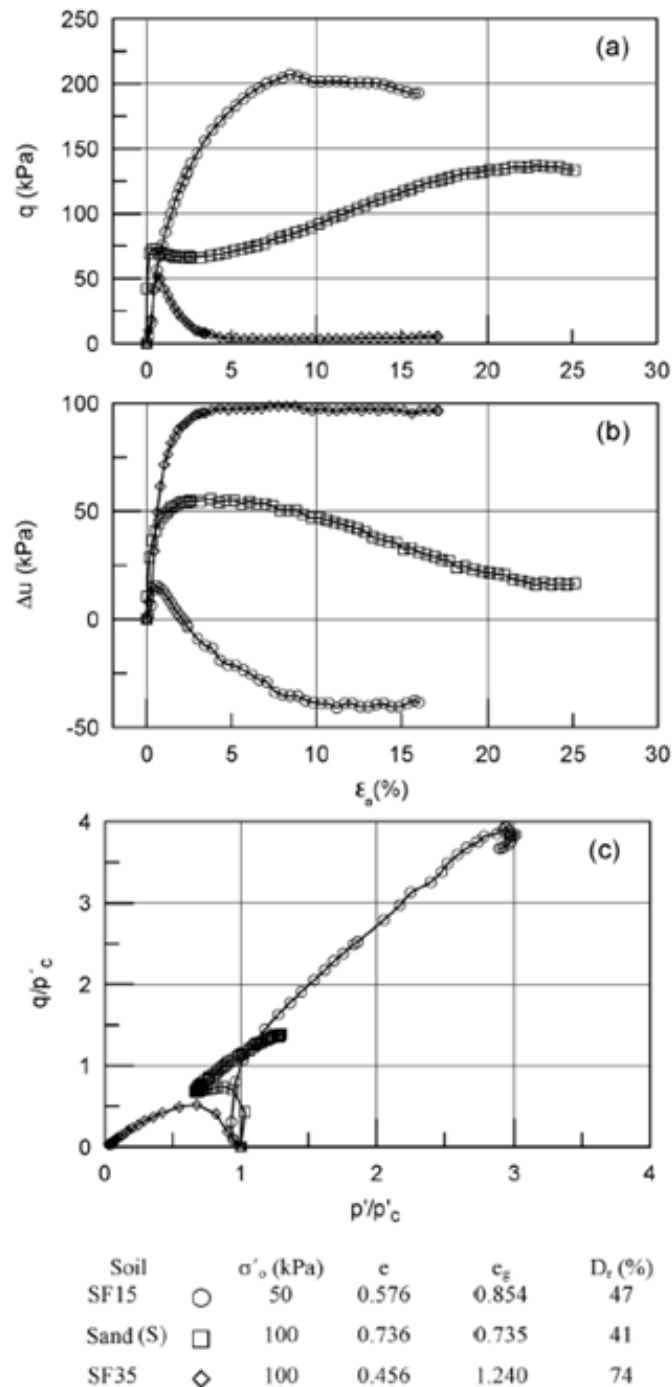
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αυτά ήταν και τεχνητά μείγματα άμμου και ιλύος αλλά και φυσικά. Τα μείγματα άμμου και ιλύος προήλθαν απο μια καθαρή χαλαζακή άμμο (M31) με καλά στρογγυλεμένους κόκκους και μη πλαστική ιλύ, ένα

προιόν εδάφους που προέρχεται από τα φυσικά κοιτάσματα χαλαζία στην Ασσύρο στην Ελλάδα. Τα δείγματα παρασκευάστηκαν με ανάμειξη της άμμου με την ιλύ σε ποσοστά 5%, 10%, 15%, 25%, 35%, 40% και 60%. Επίσης, διεξήχθησαν πειράματα τόσο σε καθαρή άμμο, όσο και σε καθαρή ιλύ.

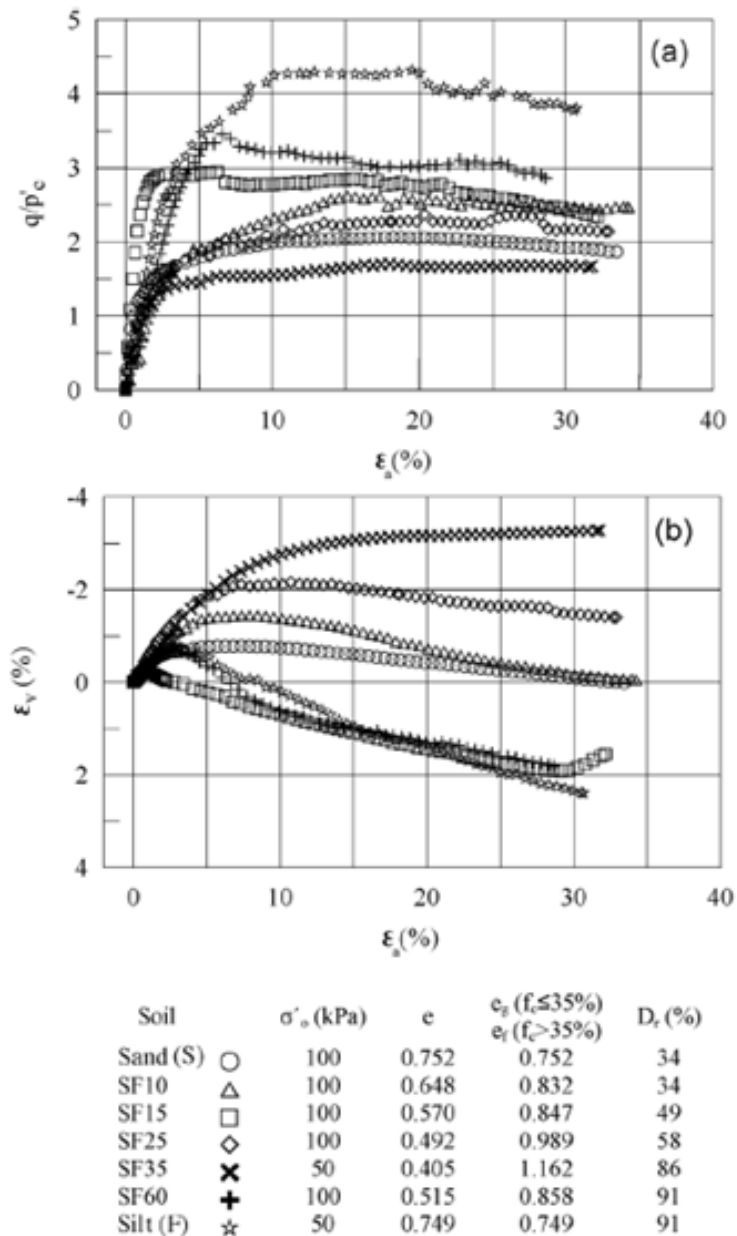
Στα μονοτονικά πειράματα παρατηρήθηκε ότι η εμφάνιση της κρίσιμης κατάστασης (critical state) αντιστοιχεί στα σημεία όπου η μέση ενεργός τάση και η διατμητική τάση, όπως επίσης και η πίεση πόρων, παραμένουν πρακτικά σταθερές σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση. Τα σημεία αυτά, σε αυτά τα πειράματα παρατηρήθηκαν σε παραμορφώσεις που κυμαίνονταν από 7%-42% και εξαρτώντο από το είδος συμπεριφοράς (συστολική, διαστολική), το είδος του υλικού και την πυκνότητα. Στο Σχήμα 3.36. φαίνονται τα αποτελέσματα των αστράγγιστων αυτών πειραμάτων όπου η συμπεριφοράς που παρατηρήθηκαν ήταν συστολική, συστολική/διαστολική και διαστολική.

Στα μονοτονικά πειράματα που διεξήχθησαν υπό στραγγιζόμενες συνθήκες παρατηρήθηκε ότι η κρίσιμη κατάσταση (critical state) συνέβαινε σε αξονικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 30%, όπου ο ρυθμός μεταβολής της διατμητικής τάσης και της ογκομετρικής παραμόρφωσης μειωνόταν σημαντικά ή ακόμη μηδενιζόταν. Στο Σχήμα 3.37. φαίνονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα αυτά.

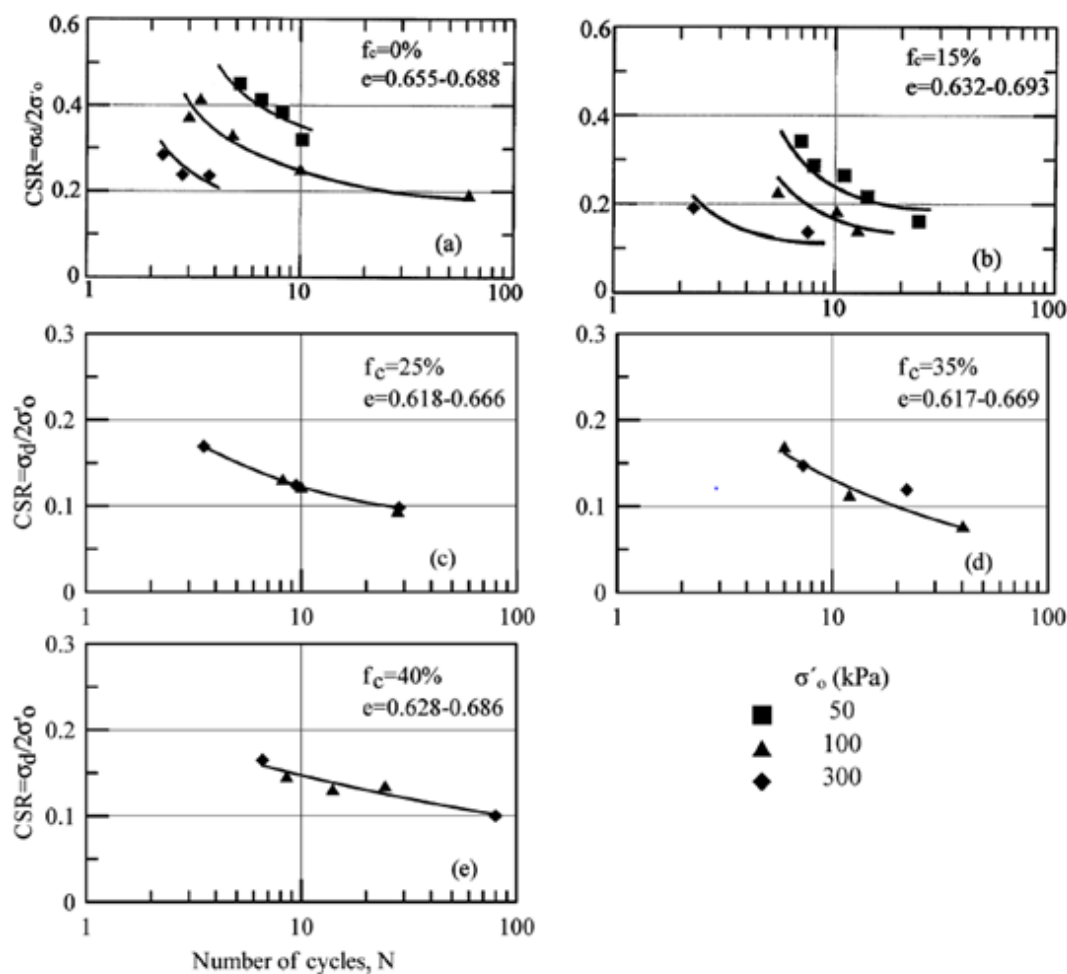
Τα ανακυκλικά πειράματα που διεξήχθησαν ήταν από καθαρή άμμο, μείγματα με διαφορετικό ποσοστό ιλύος κάθε φορά, μέχρι και καθαρή ιλύ. Επίσης έγινε η προσπάθεια να παρασκευαστούν δοκίμια με την ίδια περίπου πυκνότητα, κοντά στο $e=0.65$, ενώ στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε τάσεις από 50kPa έως και 300kPa. Στο Σχήμα 3.38. παριστάνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, όπου συσχετίζεται η μεταβολή του CSR με τον αριθμό των κύκλων σε διάφορα ποσοστά λεπτοκόκκων. Είναι φανερό ότι για ένα δεδομένο αριθμό κύκλων, η τιμή του CSR μειώνεται με αύξηση της τάσης στερεοποίησης από 50kPa έως 300kPa. Αυτό παρατηρείται για ποσοστό λεπτοκόκκων από 0% μέχρι και 15%. Ακολούθως παρατηρείται ότι η επίδραση της τάσης στερεοποίησης στο CSR μειώνεται για ποσοστά λεπτοκόκκων άνω του 15%.



Σχήμα 3.36. Τυπικά αποτελέσματα αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών με συστολική (SF35), συστολική/διαστολική (S) και διαστολική συμπεριφορά (S15) όπου (a) αποκλίνουσα τάση – αξονική παραμόρφωση ($q - \varepsilon_a$), (b) υπερπιέσεις πόρων–αξονική παραμόρφωση ($\Delta u - \varepsilon_a$) και (c) ανηγμένο διάγραμμα διαδρομών τάσεων ως προς την αρχική τάση στερεοποίησης ($q/p'_c - \rho'/\rho'_c$)

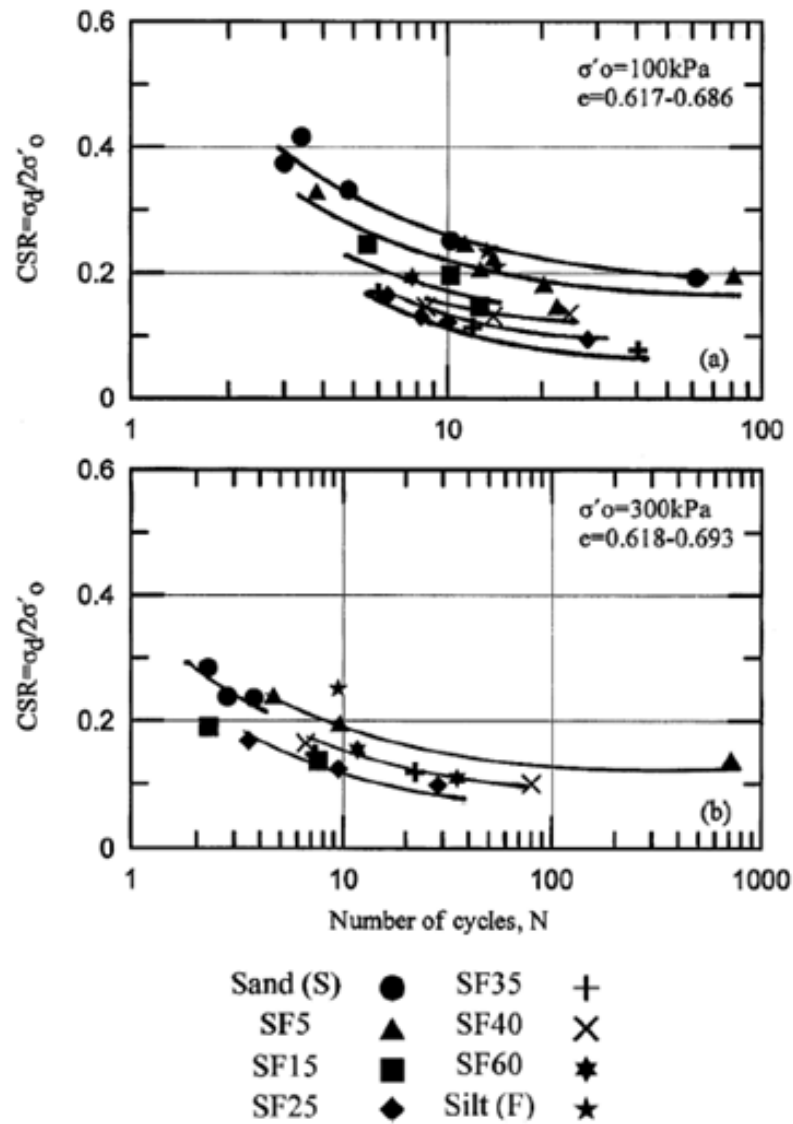


Σχήμα 3.37. Αποτελέσματα μονοτονικών στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών όπου (a) ανηγμένη αποκλίνουσα – αξονική παραμόρφωση ($q/p'_c - \epsilon_a$) και (b) ογκομετρική παραμόρφωση – αξονική παραμόρφωση ($\epsilon_v - \epsilon_a$)



Σχήμα 3.38. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων για σταθερό δείκτη πόρων και διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις όπου (α) καθαρή άμμος, (β) μείγμα άμμου ιλύος με 15% ποσοστό ιλύος κατα βάρος, (γ) μείγμα άμμου ιλύος με 25% ποσοστό ιλύος κατα βάρος, (δ) μείγμα άμμου ιλύος με 35% ποσοστό ιλύος κατα βάρος και (ε) μείγμα άμμου ιλύος με 40% ποσοστό ιλύος κατα βάρος

Επίσης, οι ερευνητριες με τα πειράματα αυτά προσπάθησαν να αποφανθούν για την επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων στην τιμή του CSR για μια συγκεκριμένη σταθερή πυκνότητα (κοντά στο $e=0.65$). Αυτό που παρατήρησαν είναι ότι για ένα συγκεκριμένο αριθμό κύκλων, η τιμή του CSR αρχικά μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων μέχρι ένα ποσοστό ορόσημο που ονομάζεται Fine Threshold Content (FC_{th}) που στην προκειμένη περίπτωση το ποσοστό αυτό είναι 35%, και ακολούθως αυξάνεται με την περαιτέρω αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων (Σχήμα 3.39.).



Σχήμα 3.39. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων για σταθερό δείκτη πόρων (e) και σε διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων σε τάσεις στερεοποίησης (a) $\sigma'_o = 100 \text{ kPa}$, (b) $\sigma'_o = 300 \text{ kPa}$

4. Περιγραφή συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

4.1. Εισαγωγή

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (hollow cylinder apparatus), η οποία βρίσκεται στο Εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει κατασκευαστεί από την Ιαπωνική εταιρεία SEIKEN INC. Με την συσκευή αυτή είναι δυνατόν να επιβληθούν στα δοκίμια μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση με έλεγχο της επιβαλλόμενης τάσης ή της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Για τον έλεγχο των επιβαλλόμενων πιέσεων μέσα και έξω από το δοκίμιο, οι ηλεκτροπνευματικές μονάδες ελέγχου συνδέονται με ειδικές βαλβίδες αέρα. Επίσης η ακρίβεια στη μεταβολή των πιέσεων είναι της τάξης του 0,5 KPa. Η συσκευή δίνει την δυνατότητα τα προς εξέταση δοκίμια να είναι είτε συμπαγή ή κοίλα. Σε αυτή την διπλωματική όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν κοίλα με εξωτερική διάμετρο κοντά στα 70mm, εσωτερική διάμετρο περίπου 40mm και ύψος 140mm.

4.2. Γενικά χαρακτηριστικά - Μηχανισμοί - Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

Η γενική όψη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.1. και 4.2. Το Σχήμα 4.2. συνοδεύεται και από υπόμνημα στο οποίο κατονομάζονται τα συστήματα που προσομοιώνονται. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα μέρη που απαρτίζουν την συσκευή.

4.2.1. Βάση συσκευής

Το κύριο μέρος της συσκευής, που απαρτίζεται από την τριαξονική κυψέλη και το μηχανισμό επιβολής της φόρτισης, εδράζεται σε στερεό μεταλλικό πλαίσιο το οποίο έχει διαστάσεις 700x600x105mm. Η βάση της συσκευής στηρίζεται σε τέσσερις μεταλλικές κολώνες, ενώ έχει μεγάλη ακαμψία, ώστε να πραγματοποιείται απρόσκοπτα η πειραματική διαδικασία κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης φόρτισης. Η τριαξονική κυψέλη μπορεί και ολισθαίνει στη βάση της συσκευής με τη βοήθεια αέρα, διευκολύνοντας την παρασκευή των δοκιμίων και τη σύνδεση της κυψέλης με το σύστημα επιβολής φόρτισης.

4.2.2. Τριαξονική κυψέλη

Η τριαξονική κυψέλη (Σχήματα 4.3. και 4.4.) έχει ύψος ίσο με 835mm και διάμετρο βάσης ίση με 200 mm. Πάνω στη βάση της κυψέλης βιδώνεται η βάση του δοκιμίου η οποία διαθέτει ενσωματωμένο πορώδη δίσκο για τη στράγγιση του δοκιμίου. Στην κορυφή του δοκιμίου τοποθετείται ειδικό κάλυμμα που φέρει και αυτό πορώδη δίσκο για στράγγιση, αλλά και κυκλοφορία απαερωμένου νερού στη φάση παρασκευής του δοκιμίου. Το άνω τμήμα της τριαξονικής κυψέλης στηρίζεται στη βάση με τη βοήθεια τριών μεταλλικών ράβδων, εξασφαλίζοντας την ευθυγράμμιση των δύο άκρων του δοκιμίου. Η μέτρηση της γωνίας στρέψης κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιείται μέσω ειδικού οργάνου που τοποθετείται σε επαφή με το άνω κάλυμμα του δοκιμίου. Τα όργανα μέτρησης του κατακόρυφου φορτίου και της στρεπτικής ροπής συνδέονται επίσης με το κάλυμμα της κορυφής του δοκιμίου. Το δοκίμιο περιβάλλεται από το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης που έχει ύψος 450 mm, ενώ πάνω από το περίβλημα τοποθετείται μεταλλικός δακτύλιος στεγάνωσης του οποίου η επαφή με το περίβλημα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια τριών μεταλλικών κοχλιών.

Η τριαξονική κυψέλη φέρει έμβολο το οποίο μπορεί να κινείται ελεύθερα στον κατακόρυφο άξονα και συνδέεται με τα συστήματα επιβολής φόρτισης της συσκευής. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω ειδικού μηχανισμού που βρίσκεται στην κορυφή του εμβόλου για την απορρόφηση κραδασμών. Στο ύψος του μηχανισμού βρίσκεται και το όργανο για την καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων. Δεξιά της τριαξονικής κυψέλης υπάρχει το σύστημα που ρυθμίζει την παροχή του αέρα για την επιβολή της επιθυμητής στρεπτικής φόρτισης, καθώς και η δεξαμενή εκτόνωσης. Αριστερά της τριαξονικής κυψέλης βρίσκεται το όργανο μέτρησης μεταβολής του όγκου του δοκιμίου. Τέλος, στη βάση της τριαξονικής κυψέλης υπάρχει σύστημα βαλβίδων οι οποίες συνδέονται με τη μονάδα παροχής νερού στο δοκίμιο και την κυψέλη (Σχήμα 4.2.) και ρυθμίζουν:

- την πλήρωση της κυψέλης με νερό
- τον κορεσμό του δοκιμίου
- την ολίσθηση της τριαξονικής κυψέλης στη βάση της συσκευής στρεπτικής διάτμησης.

4.2.3. Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου

Ο μηχανισμός αυτός (Σχήμα 4.2.) λειτουργεί με την διαφορά πίεσης αέρα που διοχετεύεται σε έμβολο το οποίο συνδέεται με τη βοήθεια κοχλιών με το έμβολο φόρτισης της τριαξονικής κυψέλης. Η πίεση αυτή ελέγχεται από την κεντρική μονάδα παροχής αέρα στην οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω.

4.2.4. Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου

Ο μηχανισμός αυτός (Σχήμα 4.7.) όπως και ο μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου λειτουργεί με τη διαφορά πίεσης αέρα που παρέχεται σε έμβολο στην οριζόντια θέση. Η πίεση στο έμβολο ρυθμίζεται μέσω του συστήματος τροφοδότησης και της δεξαμενής εκτόνωσης (Relief Tank) που βρίσκονται δεξιά της τριαξονικής κυψέλης (Σχήμα 4.3.). Το σύστημα τροφοδότησης περιλαμβάνει:

- τη βαλβίδα ενεργοποίησης (Actuator Drive) που είναι μονίμως στραμμένη στη θέση Bal.P.
- το ρυθμιστή (Regulator) της δεξαμενής αποτόνωσης (Relief Tank) ο οποίος καθορίζει την πίεση αέρα που θα μεταφερθεί στο μηχανισμό του εμβόλου επιβολής στρεπτικού φορτίου για τη λειτουργία του.
- τη βαλβίδα Primary Air Pressure. Η βαλβίδα κατά τη διάρκεια της φόρτισης στρέφεται στη θέση EP Transducer IN, ενώ στο τέλος της δοκιμής στρέφεται στη θέση εκτόνωσης (Exhaust).
- το όργανο μέτρησης της πίεσης του αέρα MG-J.

4.2.5. Κεντρική μονάδα παροχής αέρα

Η κεντρική μονάδα παροχής αέρα (Σχήματα 4.2. και 4.5.) όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, ελέγχει την παροχή αέρα στα υποσυστήματα της συσκευής. Η μέγιστη πίεση που δύναται να παρέχει η συσκευή είναι της τάξεως των $8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$. Η κατανομή της πίεσης του αέρα στα διάφορα υποσυστήματα γίνεται μέσω ρυθμιστών παροχής και βαλβίδων που κατευθύνουν τον αέρα στα σημεία που χρειάζεται.

4.2.6. Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου

Η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (Σχήματα 4.2. και 4.6.) επιβάλλει τον έλεγχο όσον αφορά στον τύπο της φόρτισης που θα επιβληθεί στο δοκίμιο (μονοτονική ή ανακυκλική) καθώς και το ρυθμό με τον οποίο αυτή επιβάλλεται, στο μέγεθος των κατακόρυφων και των πλευρικών πιέσεων και επικοινωνεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής.

4.2.7. Μονάδα παροχής νερού

Η συγκεκριμένη μονάδα (Σχήμα 4.7.) ρυθμίζει την κίνηση του νερού από και προς την τριαξονική κυψέλη και το εσωτερικό του δοκιμίου. Το νερό χρησιμοποιείται κυρίως για τον κορεσμό του δοκιμίου και την απαέρωση των γραμμών στράγγισης, συνεπώς είναι απαραίτητο να είναι εκ των προτέρων απαερωμένο. Η απαέρωση του νερού γίνεται στη δεξαμενή απαέρωσης (De-aired Water Tank) μέσω του συστήματος επιβολής αρνητικών πιέσεων (Vacuum System) της κεντρικής μονάδας παροχής αέρα. Η δεξαμενή πίεσης του νερού των πόρων (Back Pressure Tank) καθορίζει την πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου, ενώ η δεξαμενή πλευρικής πίεσης (Lateral Pressure Tank) την πλευρική πίεση που εξασκείται στο δοκίμιο.

Η κυκλοφορία απαερωμένου νερού στο εσωτερικό του δοκιμίου επιτυγχάνεται μέσω των βαλβίδων που βρίσκονται στη βάση της μονάδας παροχής νερού και των βαλβίδων στη βάση της τριαξονικής κυψέλης (Σχήματα 4.7. και 4.2. αντίστοιχα). Κατά τη φάση κορεσμού το νερό της δεξαμενής απαέρωσης διοχετεύεται μέσα από το δοκίμιο και στη συνέχεια καταλήγει στη δεξαμενή κενού (Vacuum Tank) με τη βοήθεια αρνητικών πιέσεων. Η πλήρωση της τριαξονικής κυψέλης με νερό γίνεται από εξωτερική δεξαμενή απαερωμένου νερού μέσω των βαλβίδων της βάσης της μονάδας παροχής νερού.

4.2.8. Καταγραφή πειραματικών δεδομένων - Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του ΕΜΠ είναι μονίμως συνδεδεμένη με Η/Υ ο οποίος διαθέτει κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για την αυτόματη καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, γίνεται καταγραφή του αξονικού φορτίου, της πλευρικής πίεσης της κυψέλης, της πίεσης πόρων του δοκιμίου, του στρεπτικού φορτίου, της κατακόρυφης μετακίνησης του δοκιμίου, της γωνίας στρέψης και της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου (συνολικά επτά κανάλια πειραματικών δεδομένων). Για την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων και την εμφάνισή τους στην οθόνη του Η/Υ απαιτείται η παρεμβολή ειδικής κάρτας μεταξύ της μονάδας ηλεκτρονικού ελέγχου της συσκευής στρεπτικής διάτμησης και του Η/Υ που μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό. Πρόκειται για δυναμική κάρτα με ταχύτητα καταγραφής 100KS/s (όπου KS συντομογραφία της αγγλικής λέξης Kilo-Samples) η οποία έχει τη δυνατότητα καταγραφής 16 αναλογικών σημάτων με ανεξάρτητη γείωση και με δυνατότητα καταγραφής 16 ψηφίων (bits). Η διακριτότητα (resolution) της κάρτας σε συνδυασμό με τον ηλεκτρικό θόρυβο επιτρέπει τον έλεγχο των τάσεων με ακρίβεια ± 0.5 KPa και του φορτίου με ακρίβεια ± 0.1 Nt.

4.3. Πειραματική διαδικασία

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μονοτονικής και ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου.

4.3.1. Παρασκευή, τοποθέτηση, κορεσμός και ισότροπη στερεοποίηση δοκιμίου

Τα διαδοχικά βήματα που ακολουθούνται έχουν ως εξής:

1. Μετράται το πάχος της εσωτερικής και της εξωτερικής αδιαπέρατης ελαστικής μεμβράνης, μέσα στις οποίες περικλείεται το δοκίμιο. Η εσωτερική μεμβράνη είναι αυτή που τοποθετείται πρώτη στην κυλινδρική βάση του δοκιμίου, ενώ συγκρατείται και στεγανοποιείται εκεί με τη βοήθεια ειδικών ελαστικών δακτυλίων από καουτσούκ.
2. Η κυλινδρική βάση τοποθετείται και βιδώνεται στη βάση της τριαξονικής κυψέλης και εν συνεχεία συνδέονται οι σωληνώσεις που αποτελούν τις γραμμές στράγγισης της βάσης του δοκιμίου. Ακολουθεί η τοποθέτηση και στερέωση της εξωτερικής μεμβράνης με τρόπο όμοιο με την εσωτερική (χρησιμοποιούνται δύο στεγανωτικοί δακτύλιοι).
3. Γύρω από την εξωτερική ελαστική μεμβράνη και μέσα από την εσωτερική κλείνουν ειδικά μεταλλικά καλούπια. Μέσω της μονάδας παροχής αέρα επιβάλλεται αρνητική πίεση της τάξεως των 20KPa στο κενό μεταξύ της εξωτερικής μεμβράνης και του καλουπιού. Με αυτό τον τρόπο η μεμβράνη αναρροφάται, «κολλάει» στα τοιχώματα και αποκτά την απαιτούμενη κυλινδρική μορφή.
4. Δια μέσου των γραμμών στράγγισης περνάει απιονισμένο και απαερωμένο νερό με το οποίο πληρώνεται ο χώρος του δοκιμίου. Χρησιμοποιώντας χωνί με

προσαρτημένο σωλήνα διαμέτρου 1.5cm, αποτίθεται σε υγρή μορφή η άμμος στον ίδιο χώρο ώστε να διασφαλιστεί ο καλύτερος κορεσμός του δοκιμίου. Η απόθεση του δείγματος γίνεται από ύψος το οποίο μεταβάλλεται διαρκώς, ούτως ώστε η απόσταση από την επιφάνεια της άμμου που έχει ήδη εναποτεθεί και συνεπώς η ενέργεια πρόσπτωσης να διατηρείται σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται κατά το δυνατό η ομοιομορφία και η επαναληπτικότητα του δοκιμίου. Αυτή η μέθοδος παρασκευής του δοκιμίου προτάθηκε από τους Bishop και Henkel (1957), ονομάζεται «εμβάπτιση στο νερό» (pluviation through water) και είναι κατάλληλη για την παρασκευή χαλαρών δοκιμίων. Δοκίμια πυκνότερης δομής παρασκευάζονται με εναπόθεση όλης της ποσότητας της άμμου ή σε τρεις διαδοχικές στρώσεις και ισόποσα χτυπήματα του εξωτερικού μεταλλικού καλουπιού ανά στρώση. Στη συνέχεια, η κορυφή του δείγματος επιπεδοποιείται, τοποθετείται ειδικό κάλυμμα με άκαμπτο πορώδη δίσκο και συνδέεται η γραμμή στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου.

5. Μέσω της γραμμής στράγγισης της κορυφής του δοκιμίου, επιβάλλεται στο δοκίμιο αρνητική πίεση της τάξεως των 30KPa και καταγράφεται η μεταβολή του όγκου του. Η αρνητική πίεση, που ισοδυναμεί με μέση ενεργό τάση $p' = 30\text{KPa}$, προσδίδει αντοχή στο δοκίμιο και καθίσταται δυνατή η αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών που το συγκρατούσαν. Μετά την αφαίρεση των ειδικών μεταλλικών καλουπιών μετράται η εξωτερική διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου με μηκυνσιόμετρο ακρίβειας 0,01 mm. Στη συνέχεια συνδέεται το τμήμα της συσκευής με το οποίο θα επιβληθεί η εξωτερική φόρτιση και ακολουθεί η διέλευση απαερωμένου νερού μέσα από το δοκίμιο (το νερό εισέρχεται από τις γραμμές στράγγισης στη βάση του δοκιμίου και εξέρχεται από τη γραμμή στράγγισης στην κορυφή του). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο πλήρης κορεσμός του δοκιμίου και των γραμμών στράγγισης.
6. Τοποθετείται το εξωτερικό περίβλημα της κυψέλης και σφίγγονται όλοι οι κοχλίες, ώστε να επιτευχθεί η στεγάνωση του θαλάμου. Κατόπιν ανοίγεται η βαλβίδα παροχής νερού και γεμίζει ο θάλαμος με νερό.
7. Ακολουθεί η διαδικασία αύξησης της πλευρικής πίεσης της κυψέλης με ταυτόχρονη ισόποση αύξηση της πίεσης πόρων, ώστε η ενεργός τάση του δοκιμίου να διατηρείται κάθε φορά σταθερή και ίση με 30KPa. Για τις σειρές πειραμάτων που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία, η τελική τιμή της πλευρικής πίεσης ήταν ίση με 400kPa ενώ της πίεσης πόρων ίση με 370KPa. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας (αλλά και αργότερα κατά την ισότροπη στερεοποίηση του δοκιμίου) το αξονικό φορτίο διατηρείται σταθερό μέσω της επιβολής πίεσης ισορροπίας. Με τον τρόπο αυτό, η μεταβολή της πίεσης $\Delta\sigma$ επί του δοκιμίου γίνεται ισότροπα.
8. Για τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού του δοκιμίου χρησιμοποιείται η παράμετρος B του Skempton (1954). Κατά τη μέθοδο αυτή, εάν σε ένα πλήρως κορεσμένο εδαφικό στοιχείο ασκηθεί ισότροπα και υπό αστράγγιστες συνθήκες μία μεταβολή τάσης $\Delta\sigma$, τότε σε αυτό αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων $\Delta u = \Delta\sigma$. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι πλήρως κορεσμένο, αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων $\Delta u < \Delta\sigma$. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν θεωρήθηκε ότι έχει επιτευχθεί πλήρης κορεσμός του δοκιμίου για τιμές της παραμέτρου B μεγαλύτερες από 0.97, οι οποίες συνήθως προέκυπταν μετά από διάστημα μερικών ωρών από την παρασκευή του δοκιμίου.

9. Το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα μεταβάλλοντας την πλευρική πίεση και ταυτόχρονα, μέσω της πίεσης ισορροπίας, την αξονική πίεση και διατηρώντας σταθερή την πίεση πόρων. Στα πειράματα που εκτελέστηκαν η τελική τιμή της μέσης ενεργού τάσης p' έλαβε τιμές από 25kPa έως 300kPa.
10. Μετά την ισότροπη στερεοποίηση ακολουθεί περίοδος ηρεμίας του δοκιμίου διάρκειας 12 ωρών (δευτερεύουσα στερεοποίηση). Η περίοδος αυτή διατηρείται σταθερή για όλα τα δοκίμια, ώστε η ιστορία φόρτισης πριν από τη διάτμηση να είναι κοινή.
11. Την περίοδο ηρεμίας διαδέχεται η διαδικασία φόρτισης του δοκιμίου σε στρέψη. Η φόρτιση των δοκιμίων σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης με τη βοήθεια της βαλβίδας στράγγισης (βαλβίδα Specimen Low) η οποία παραμένει κλειστή. Όλα τα δοκίμια φορτίζονται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης (με έλεγχο δηλαδή του στρεπτικού φορτίου και όχι της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης). Κατά τη διάρκεια της μονοτονικής φόρτισης η διαδικασία τερματίζεται όταν το μέγεθος του στρεπτικού φορτίου φτάσει σε μια ορισμένη τιμή μέχρι την οποία το δοκίμιο έχει επιδείξει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του. Κατά την ανακυκλική φόρτιση η διαδικασία τερματίζεται όταν η πίεση πόρων εξισώνεται σχεδόν με την πλευρική πίεση της κυψέλης.

4.3.2. Φόρτιση του δοκιμίου

Το επόμενο στάδιο μετά την παρασκευή, τον κορεσμό και τη στερεοποίηση του δοκιμίου είναι η φόρτισή του. Όλα τα πειράματα αυτής της διπλωματικής εργασίας, μονοτονικά και ανακυκλικά, πραγματοποιήθηκαν μέσω του σερβοελεγκτή ΕΟ-290U. Στο Σχήμα 4.8. παριστάνεται ο σερβοελεγκτής με όλους τους διακόπτες σημειωμένους με την κανονική, αλλά και με κωδική ονομασία, ώστε να είναι πιο εύκολη η αναφορά τους μέσα στο κείμενο. Επίσης, στο Σχήμα 4.9. παρουσιάζεται εκ νέου η γενική όψη της συσκευής στρεπτικής διάτμησης.

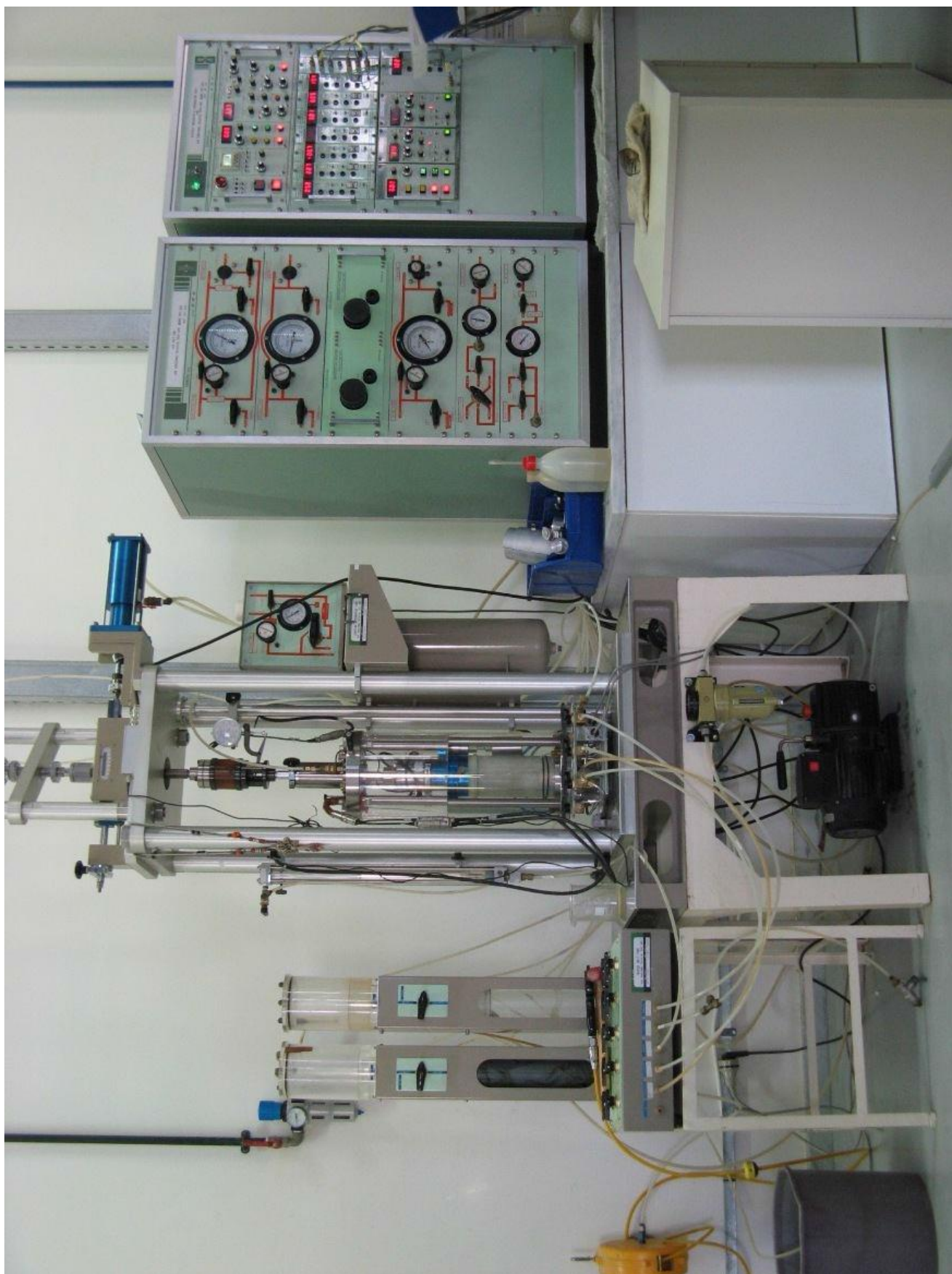
4.3.2.1. Δοκιμή μονοτονικής στρέψης

- Αρχικά, επιλέγεται η ταχύτητα της φόρτισης από την γεννήτρια στατικών συναρτήσεων (Slope Generator) που βρίσκεται στο κέντρο του σερβοελεγκτή ΕΟ-290U. Η ταχύτητα φόρτισης καθορίζεται από τους διακόπτες S3 και S2 (Σχήμα 4.8.). Για παράδειγμα, αν ο διακόπτης S2 στραφεί πλήρως δεξιόστροφα (10 πλήρεις στροφές) και ο διακόπτης S3 τοποθετηθεί στη θέση 100 τότε η ταχύτητα φόρτισης είναι 100%/MIN, δηλαδή η ηλεκτρική τάση μεταβάλλεται με ρυθμό 5V/MIN. Η ταχύτητα σχετίζεται με το μέγεθος (στρεπτικό φορτίο ή γωνία στρέψης) που επιλέγεται από τον διακόπτη T20.
- Για να ξεκινήσει η φόρτιση πιέζεται το κουμπί LOAD της γεννήτριας στατικών συναρτήσεων (Σχήμα 4.8.). Για να σταματήσει η φόρτιση πιέζεται το κουμπί STOP. Για την αποφόρτιση του δοκιμίου χρησιμοποιείται το κουμπί UNLOAD. Πάντα προηγείται το πάτημα του κουμπιού STOP και μετά του UNLOAD. Τέλος, το κουμπί RESET μηδενίζει απευθείας το επιβαλλόμενο φορτίο.

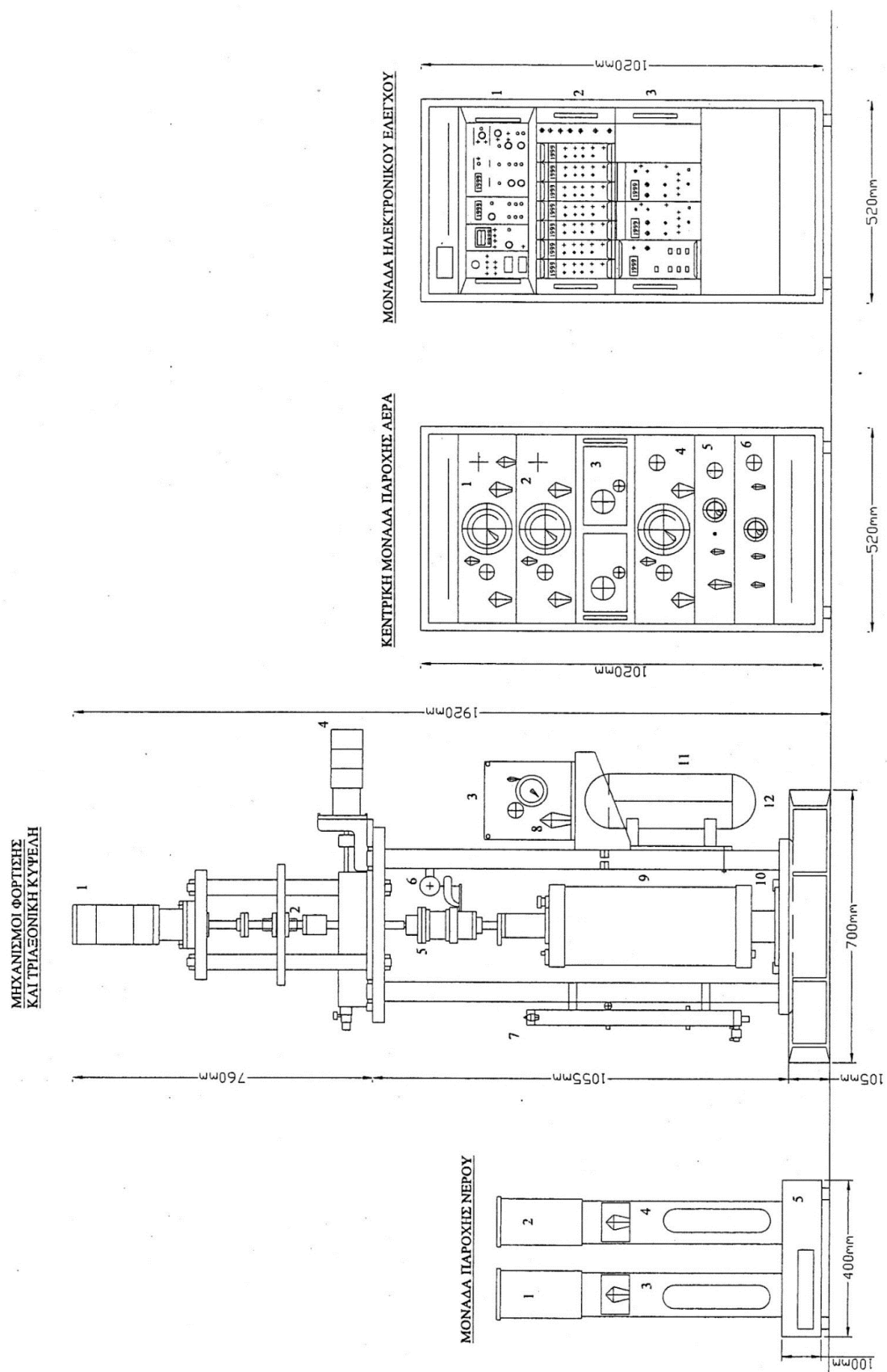
4.3.2.2 Δοκιμή ανακυκλικής στρέψης

- Η επιλογή της κυματομορφής, της συχνότητας του κύματος, καθώς και ο αριθμός των κύκλων φορτίσεως γίνεται μέσω της γεννήτριας δυναμικών συναρτήσεων (DYNAMIC FUNCTION GENERATOR) που βρίσκεται στο αριστερό τμήμα του σερβοελεγκτή EO-290U.
- Η επιλογή της συχνότητας γίνεται από τους διακόπτες F8 και F7 (Σχήμα 4.8.).
- Η επιλογή της κυματομορφής (μεταξύ ημιτονοειδούς, ορθογωνικής και τριγωνικής) γίνεται μέσω του διακόπτη F3 (Σχήμα 4.8.).
- Η επιλογή του αριθμού των κύκλων φόρτισης γίνεται μέσω του Preset Counter.
- Το εύρος της δυναμικής φόρτισης καθορίζεται από το διακόπτη T26 (Σχήμα 4.8.).
- Για να ξεκινήσει η δυναμική φόρτιση πιέζεται το κουμπί T27 (Σχήμα 4.8.). Για να σταματήσει η δυναμική φόρτιση πιέζεται το κουμπί T28 (εκτός και αν έχει συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων φόρτισης οπότε και σταματάει αυτόματα).

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επαναφορά του εμβόλου του μηχανισμού στρεπτικού φορτίου στη θέση του μετά από την μονοτονική ή την ανακυκλική φόρτιση έχει ως εξής: Ξεσφίγγονται οι κοχλίες του εμβόλου και στρέφεται ο διακόπτης T10 (Σχήμα 4.8.) αριστερόστροφα μέχρι το έμβολο να αρχίσει να μετακινείται από τα αριστερά προς τα δεξιά έως την αρχική του θέση. Τότε μηδενίζεται η ηλεκτρική τάση της σερβοβαλβίδας EP-2 και στη συνέχεια στρέφεται η βαλβίδα V16 αριστερόστροφα (θέση εκτόνωσης).



Σχήμα 4.1. Γενική όψη συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου



Σχήμα 4.2. Διαγραμματική παράσταση συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

Συστήματα της συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου (υπόμνημα Σχήματος 4.2.)

Η συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2. αποτελείται από:

A. Τους μηχανισμούς επιβολής φόρτισης (αξονικής ή στρεπτικής) μαζί με την τριαξονική κυψέλη:

1. Μηχανισμός επιβολής κατακόρυφου φορτίου
2. Σύστημα καθορισμού της θέσης του εμβόλου, που μεταβιβάζει την κατακόρυφη φόρτιση
3. Σύστημα τροφοδότησης για την επιβολή στρεπτικού φορτίου
4. Μηχανισμός επιβολής στρεπτικού φορτίου
5. Μηχανισμός απορρόφησης των κραδασμών
6. Όργανο καταγραφής κατακόρυφων μετακινήσεων με εύρος 200mm
7. Όργανο μέτρησης μεταβολής του όγκου με μέγιστη χωρητικότητα 50ml
8. Βαλβίδα για την τροφοδότηση του συστήματος ενεργοποίησης της στρεπτικής φόρτισης με αέρα
9. Τριαξονική κυψέλη
10. Βάση τριαξονικής κυψέλης
11. Δεξαμενή εκτόνωσης με χωρητικότητα 5lt
12. Βάση της συσκευής

B. Μονάδα παροχής νερού:

1. Δεξαμενή απαέρωσης με χωρητικότητα 1lt (όριο αντοχής σε αρνητική πίεση $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$)
2. Δεξαμενή επιβολής αρνητικών πιέσεων με χωρητικότητα 1,5lt (όριο αντοχής σε αρνητική πίεση $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$)
3. Δεξαμενή υποπίεσης με χωρητικότητα 2lt και όριο αντοχής $10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
4. Δεξαμενή πλευρικής πίεσης με χωρητικότητα 2lt και όριο αντοχής $10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
5. Βάση η οποία περιέχει τις βαλβίδες που καθορίζουν την κίνηση του νερού

Γ. Κεντρική μονάδα παροχής αέρα:

1. Σύστημα πλευρικής πίεσης και υποπίεσης
2. Σύστημα κατακόρυφης πίεσης
3. Σύστημα ρύθμισης πίεσης αέρα

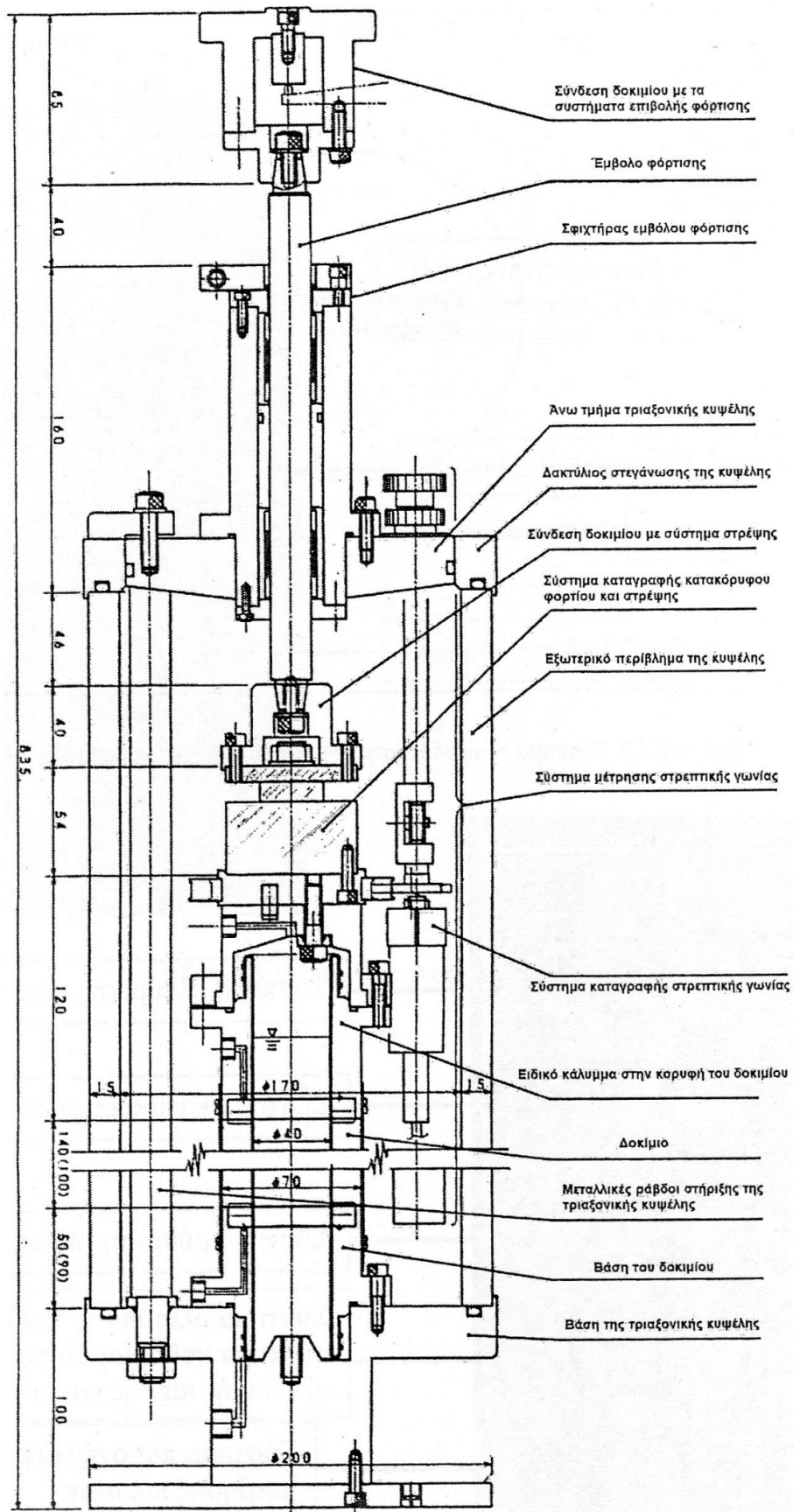
4. Σύστημα ολίσθησης τριαξονικής κυψέλης και σύστημα καθορισμού της σχέσης μεταξύ πλευρικής και κατακόρυφης πίεσης
5. Σύστημα παροχής αέρα και σύστημα μέτρησης πιέσεων
6. Σύστημα επιβολής αρνητικών πιέσεων

Δ. Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου:

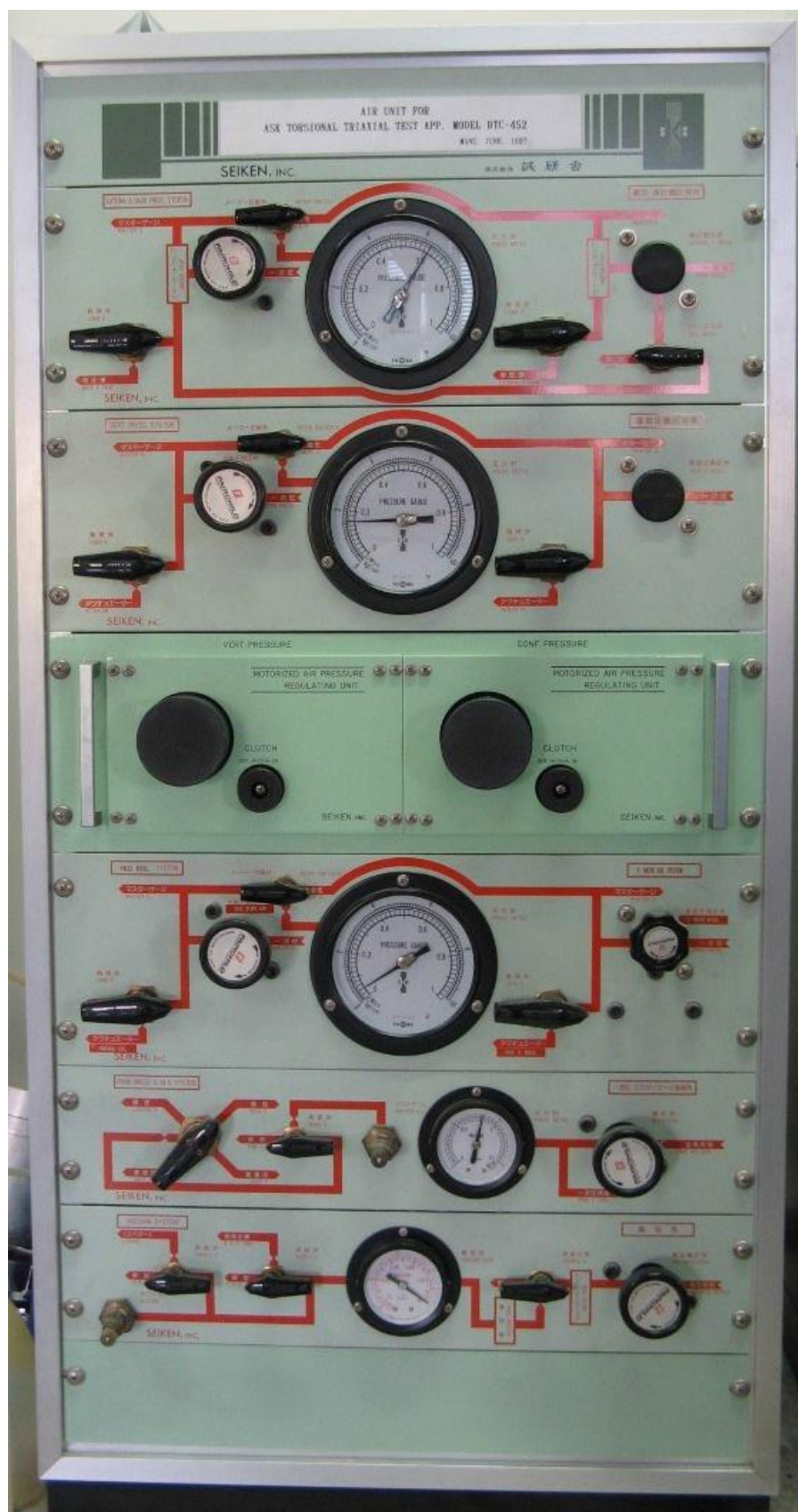
1. Ηλεκτροπνευματικός σερβοελεγκτής ΕΟ – 290U
2. Μονάδες ενίσχυσης
3. Σερβοελεγκτής ΕΟ - 470U



Σχήμα 4.3. Τριαξονική κυψέλη (διακρίνεται στο κέντρο της συσκευής). Δεξιά πάνω βρίσκεται το σύστημα τροφοδότησης για την επιβολή στρεπτικού φορτίου και από κάτω η δεξαμενή εκτόνωσης



Σχήμα 4.4. Τριαξονική κυψέλη (διαστάσεις σε mm)

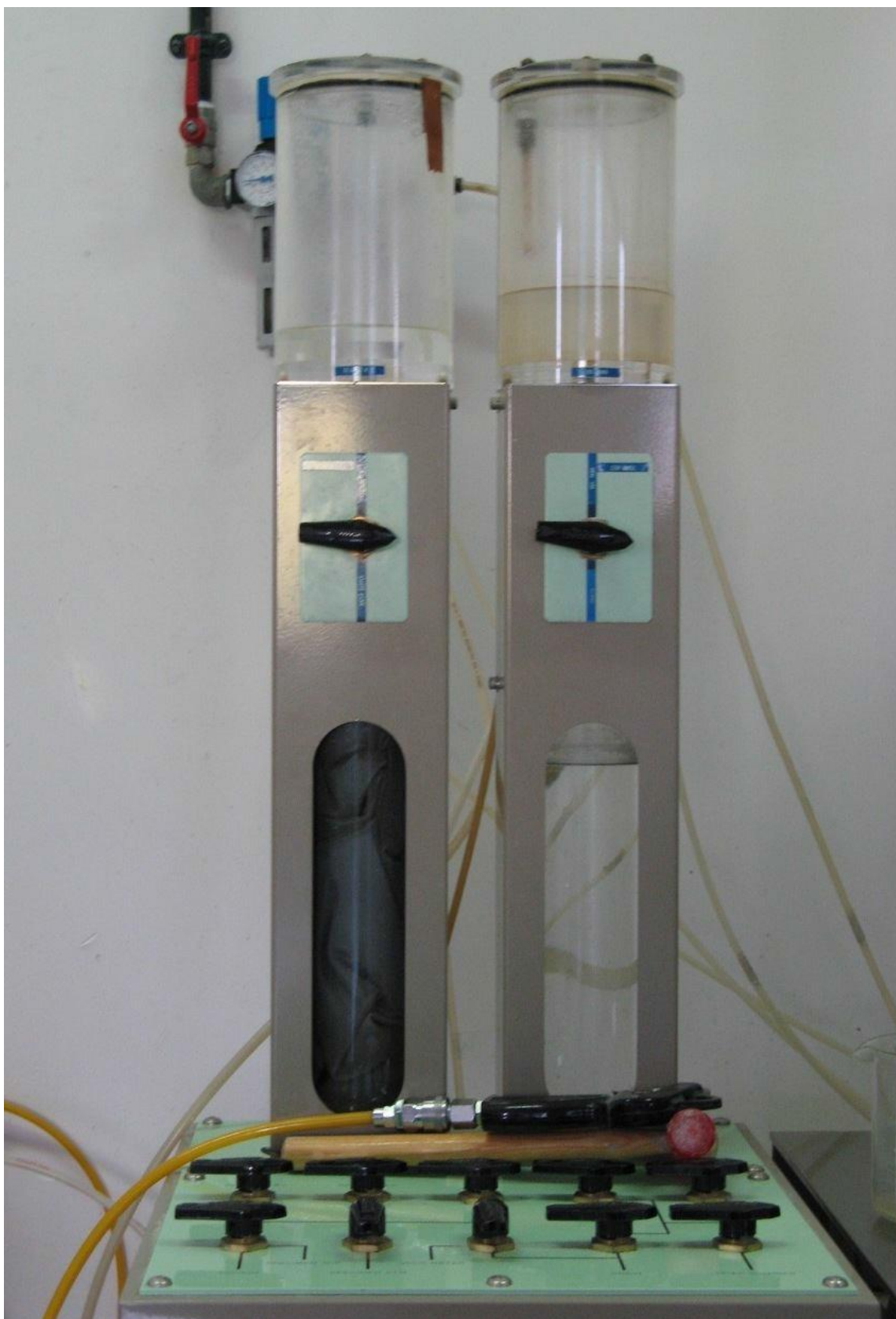


Σχήμα 4.5. Κεντρική μονάδα παροχής αέρα

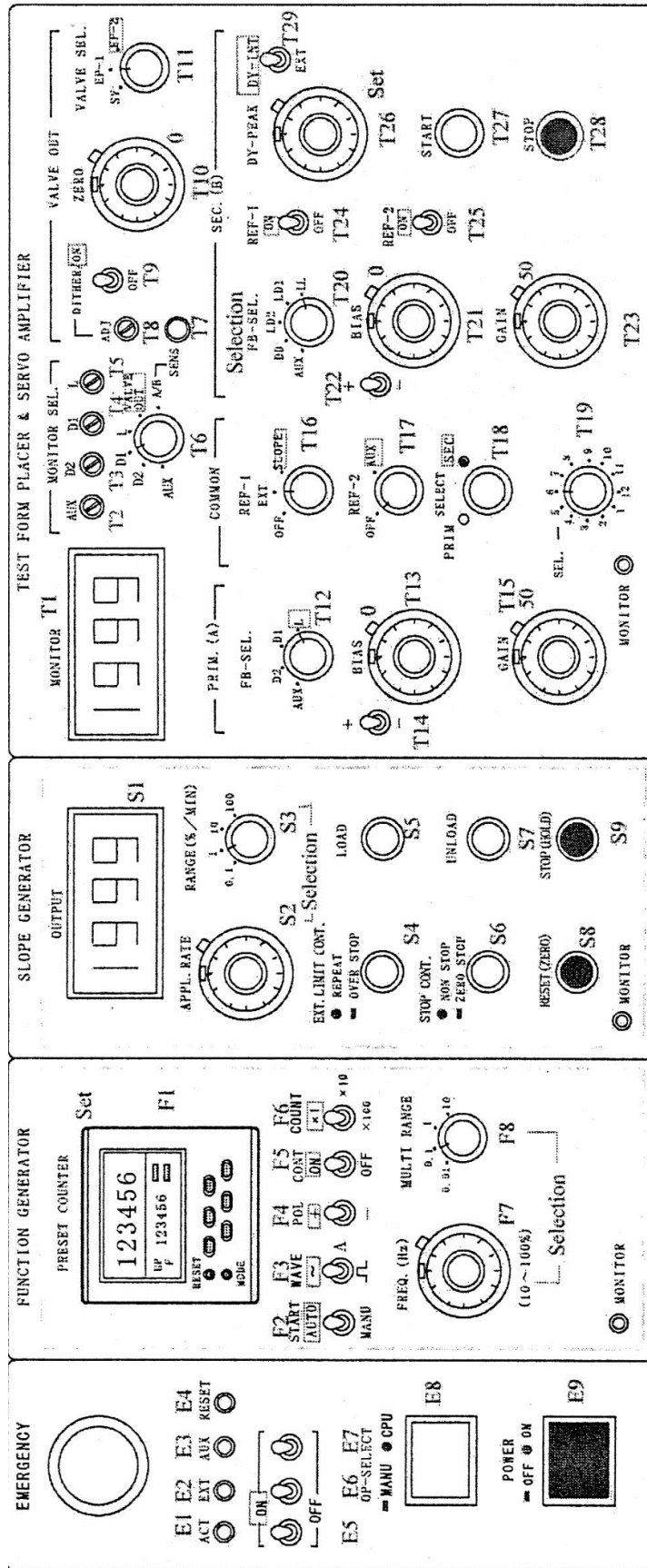
Κεφάλαιο 4: Περιγραφή συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου



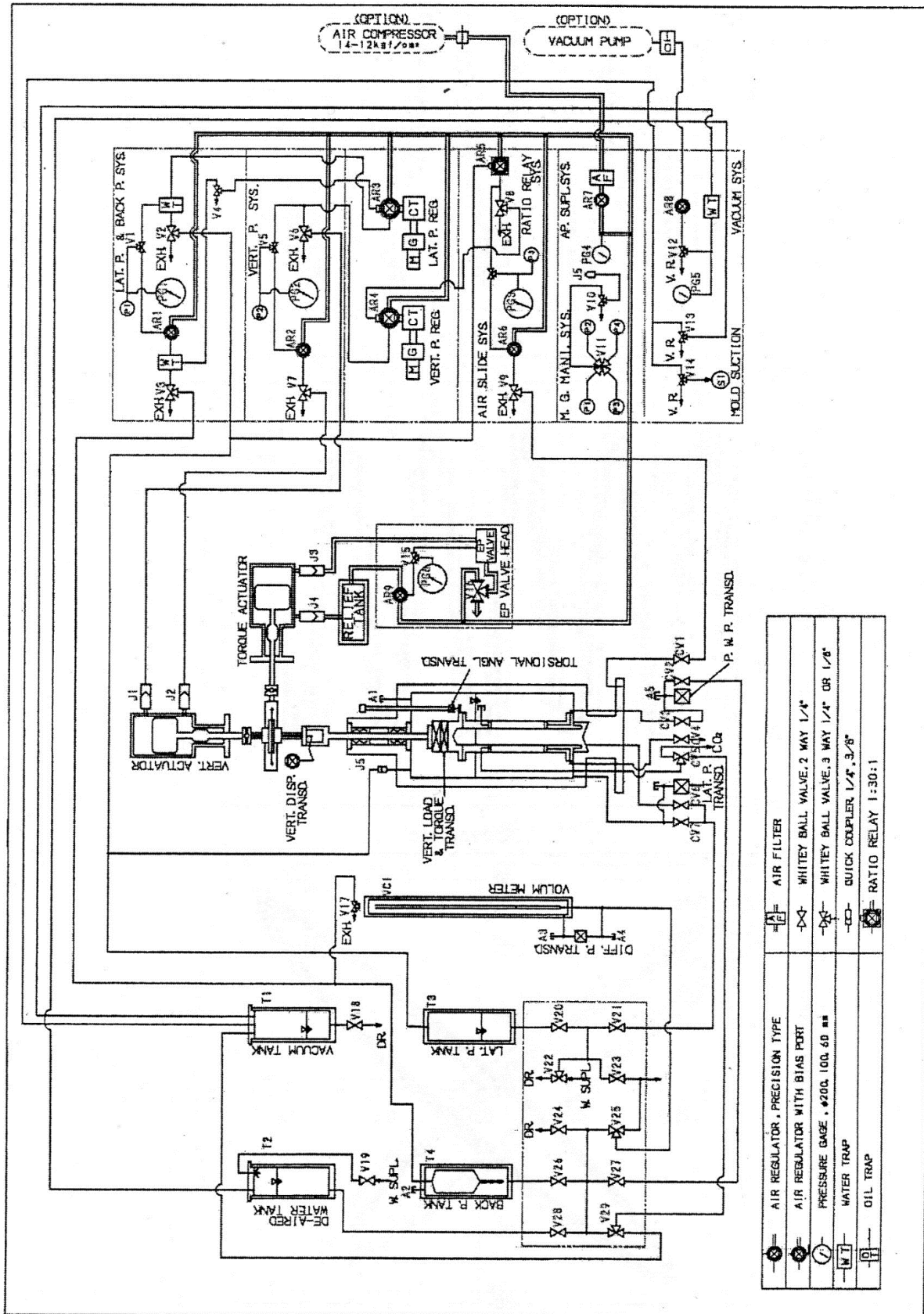
Σχήμα 4.6. Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου



Σχήμα 4.7. Μονάδα παροχής νερού



Σχήμα 4.8. Διακόπτες σερβοελεγκτή EO – 290U



Σχήμα 4.9. Γενική όψη συσκευής στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

5. Στρεπτική διάτμηση

5.1. Εισαγωγή

Τα πλείστα γεωτεχνικά προβλήματα στη φύση σχετίζονται με σύνθετες εντατικές καταστάσεις και περιλαμβάνουν αλλαγές τόσο στο μέγεθος των κύριων τάσεων όσο και στην διεύθυνση τους. Έτσι λοιπόν, γεννιέται η ανάγκη πραγματοποίησης πειραμάτων στο εργαστήριο που να προσομοιάζουν κατά το δυνατόν αυτές τις πολύπλοκες διαδρομές τάσεων, ώστε να προκύψουν οι απαραίτητες παραμέτροι για την επίλυση του κάθε προβλήματος.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει εκτενής αναφορά στις υποθέσεις που γίνονται όσον αφορά την κατανομή τάσεων και των παραμορφώσεων κοίλου δοκιμίου, ενώ θα γίνει ειδική αναφορά στην επίδραση της γεωμετρίας του δοκιμίου.

5.2. Στρεπτική διάτμηση κοίλου δοκιμίου

Παρακάτω θα αναλυθούν οι βασικές παράμετροι της στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου. Τέτοια παράμετρος είναι η τιμή b , η οποία αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 ως προς τις τάσεις σ_1 και σ_3 και είναι ίση με $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, ενώ η γωνία α αντιπροσωπεύει την κλίση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 ως προς την κατακόρυφο (Σχήμα 5.2.).

Κοίλα δοκίμια δοκίμια θεωρούνται τα δοκίμια κυλινδρικής μορφής με μια οπή στο κέντρο τους, για τα οποία ισχύει ότι το ύψος τους είναι μεγαλύτερο από την εξωτερική τους διάμετρο. Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος από δύο, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η κατανομή 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, όπως διατυπώνεται ακριβέστερα από τους Saada and Townsend (1981), Hight et al. (1983) και Saada (1988).

Όταν εφαρμόζεται στρεπτική ροπή M_t ταυτόχρονα με πλευρική πίεση και αξονικό φορτίο W , μπορεί να παραχθεί ένα μεγάλο φάσμα διαδρομών τάσεων, ειδικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαφορά στις πιέσεις εντός και εκτός των τοιχωμάτων του κοίλου δοκιμίου (p_i και p_o). Η στρεπτική ροπή αναπτύσσει διατμητικές τάσεις σε οριζόντια επίπεδα, ενώ συμπληρωματικές διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται λόγω συνοριακών συνθηκών σε κατακόρυφα ακτινικά επίπεδα μέσα στην εδαφική μάζα. Το Σχήμα του δοκιμίου και η περιμετρική διεύθυνση της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης εξασφαλίζουν συνθήκες καθαρής στρεπτικής διάτμησης και επιτρέπουν την ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Το μέγεθος και η διεύθυνση της μεγάλης και της μικρής κύριας τάσης (σ_1 και σ_3), καθορίζονται από το μέγεθος των διατμητικών ($\tau_{\theta z}$), των αξονικών (σ_z) και των περιμετρικών (σ_θ) τάσεων. Η ενδιάμεση κύρια τάση

σ_2 είναι ίση με την ακτινική τάση σ_r και η διεύθυνση των κύριων τάσεων σ_1 και σ_3 μπορεί να μεταβάλλεται ή να διατηρείται σταθερή έτσι ώστε να προσομοιάζει όλων των ειδών τα προβλήματα.

5.3 Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων στη δοκιμή στρέπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου

5.3.1 Υπολογισμός τάσεων

Στο Σχήμα 5.1. φαίνονται ξεκάθαρα όλες οι τάσεις που δρούν σε ένα δοκίμιο κατά την δοκιμή στρεπτικής διάτμησης. Η εσωτερική πίεση p_i και η εξωτερική πίεση p_o ασκούνται μέσω εύκαμπτων μεμβρανών με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις σε ακτινικά ή περιμετρικά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό, η ακτινική τάση σ_r είναι κύρια τάση, ενώ οι τάσεις σ_z και σ_θ είναι κύριες μόνο όταν η διατμητική τάση $\tau_{\theta z}$ είναι μηδενική. Από τις τάσεις σ_z , σ_θ , $\tau_{\theta z}$ και $\tau_{z\theta}$ μπορεί να προκύψει το μέγεθος και η διεύθυνση των άλλων 2 κύριων τάσεων. Για την περίπτωση όπου $p_o = p_i$ (Σχήμα 5.1.)

ισχύει ότι $\sigma_\theta = \sigma_r = p_o = p_i$ και $\sigma_z = \frac{W}{\pi \cdot (r_o^2 - r_i^2)} + p_o$ όπου W το αξονικό φορτίο.

Σε στοιχείο του κοίλου δοκιμίου πάχους dr η στρεπτική ροπή M_T σε ακτινική απόσταση r από το κέντρο του είναι ίση με $M_T = 2\pi \cdot \int_{r_i}^{r_o} \tau_{\theta z}(r) r^2 dr$ (Σχήμα 5.3.). Για να ολοκληρωθεί η σχέση αυτή πρέπει να θεωρηθεί μία καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το έδαφος από το οποίο αποτελείται το δοκίμιο. Εάν γίνει η παραδοχή ότι το κοίλο δοκίμιο παραμένει επίπεδο και κυλινδρικό κατά την στρεπτική δοκιμή η κατανομή των τάσεων στα τοιχώματα του έχει την ίδια μορφή με το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων μπορεί να προσεγγιστεί με δυο διαφορετικά τμήματα, το ένα γραμμικά ελαστικό και το άλλο πλήρως πλαστικό (Σχήμα 5.4.). Για ελαστική κατανομή των τάσεων μεταξύ της εσωτερικής ακτινός r_i και

της εξωτερικής r_o , η τάση δίνεται από την σχέση $\tau_{\theta z} = \frac{T_{\max}}{r_o} \cdot r$, όπου T_{\max} είναι η μέγιστη διατμητική τάση στην εξωτερική ακτίνα του δοκιμίου και προκύπτει από την σχέση $T_{\max} = \frac{2 \cdot M_T \cdot r_o}{\pi \cdot (r_o^4 - r_i^4)}$. Η μέση διατμητική τάση σε οποιαδήποτε διατομή του κοίλου δοκιμίου

είναι ίση με: $T_{\text{av}} = \frac{2 \cdot T_{\max} \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3 \cdot r_o \cdot (r_o^2 - r_i^2)}$ Συνεπώς, αν αντικαταστήσουμε την σχέση του

T_{\max} στο T_{av} προκύπτει ο τύπος υπολογισμού της μέσης διατμητικής τάσης για ελαστική κατανομή $\tau_{\theta z, \text{lin}} = \frac{4 \cdot M_T \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3 \cdot \pi \cdot (r_o^4 - r_i^4) \cdot (r_o^2 - r_i^2)}$, όπου εάν λάβουμε τον μέσο όρο της διατμητικής τάσης στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του κοίλου δοκιμίου είναι ίση με:

$\tau_{\theta z, \text{mean}} = \frac{M_T \cdot (r_o + r_i)}{\pi \cdot (r_o^4 - r_i^4)}$. Έτσι, ο λόγος των διατμητικών τάσεων για την πλαστική ανάλυση και για τις διαστάσεις των δοκιμίων της παρούσης διπλωματικής εργασίας προκύπτει να είναι ίσος με $\frac{\tau_{\theta z, \text{pl}}}{\tau_{\theta z, \text{mean}}} = 1.05$, όπου $\tau_{\theta z, \text{pl}} = \frac{3 \cdot M_T}{r_o^3 - r_i^3}$. Επίσης, σε αυτή την διπλωματική εργασία έγινε χρήση της πλαστικής διατμητικής τάσης που είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο τοίχωμα και η διαφορά της από την ελαστική διατμητική τάση είναι λιγότερο από 5%.

Έχοντας υπολογίσει πλέον τις τάσεις σ_z , σ_r , σ_θ και $\tau_{\theta z}$ μπορεί να βρεθεί το μέγεθος και η διεύθυνση των κύριων τάσεων σ_1, σ_2 και σ_3 και να χαραχθεί ο αντίστοιχος κύκλος Mohr. Οι τύποι υπολογισμού των τάσεων έχουν ως εξής:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_r = \sigma_\theta$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2}$$

Η γωνία που σχηματίζει η μέγιστη κύρια τάση ως προς τον κατακόρυφο είναι ίση με:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_\theta}. \text{ Η παράμετρος } b \text{ (Bishop, 1971) είναι ίση με } b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \text{ και δείχνει}$$

την επιρροή της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 στην αντοχή και τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά του εδάφους. Για την συνθήκη $r_o = r_i$ οι δύο παράμετροι συνδέονται μοναδικά με την σχέση $b = \sin^2 \alpha$.

5.3.2. Υπολογισμός παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις που υπολογίζονται κατά τη δοκιμή στρεπτικής διάτμησης είναι:

1. Η διατμητική παραμόρφωση $\gamma_{\theta z}$ σε περιμετρικό επίπεδο
2. Η κατακόρυφη παραμόρφωση ϵ_z
3. Η ακτινική παραμόρφωση ϵ_r
4. Η περιμετρική παραμόρφωση ϵ_θ

Η διατμητική παραμόρφωση είναι ίση σε όλες τις οριζόντιες διατομές καθ' ύψος του δοκιμίου και δίνεται από τον τύπο $\gamma_{\theta z} = \frac{2 \cdot \theta \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3 \cdot H_o \cdot (r_o^2 - r_i^2)}$, όπου H_o είναι το αρχικό ύψος του δοκιμίου και θ είναι η περιμετρική μετακίνηση σε rad.

Η μέση κατακόρυφη παραμόρφωση $\epsilon_{z, \text{av}} = \frac{\Delta h}{H_o}$, όπου Δh είναι η κατακόρυφη μετακίνηση και H_o το αρχικό ύψος του δοκιμίου.

Η ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου είναι ίση με: $\epsilon_v = \epsilon_{z,av} + \epsilon_{r,av} + \epsilon_{\theta,av}$. Με την θεώρηση ότι $\epsilon_{r,av} = \epsilon_{\theta,av}$ η παραπάνω μπορεί να γραφεί και ως: $\epsilon_{r,av} = \epsilon_{\theta,av} = \frac{1}{2}(\epsilon_v - \epsilon_{z,av})$, οπότε κατά την στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης στην οποία δεν μεταβάλλεται ο ογκος του δοκιμίου ($\epsilon_v = 0$) έχουμε τελικά ότι: $\epsilon_{r,av} = \epsilon_{\theta,av} = -\frac{1}{2}\epsilon_{z,av}$ (Σχήμα 5.5.).

Έχοντας υπολογίσει πλέον τις παραμορφώσεις ϵ_z , ϵ_r , ϵ_{θ} και $\gamma_{\theta z}$ μπορεί να βρεθεί το μέγεθος και η διεύθυνση των κύριων παραμορφώσεων ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 .

Οι τύποι υπολογισμού των παραμορφώσεων έχουν ως εξής:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_{\theta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_{\theta}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_r$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_{\theta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon_z - \epsilon_{\theta}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2}$$

Η γωνία που σχηματίζει η παραμόρφωση ϵ_1 ως προς την κατακόρυφο είναι ίση με:

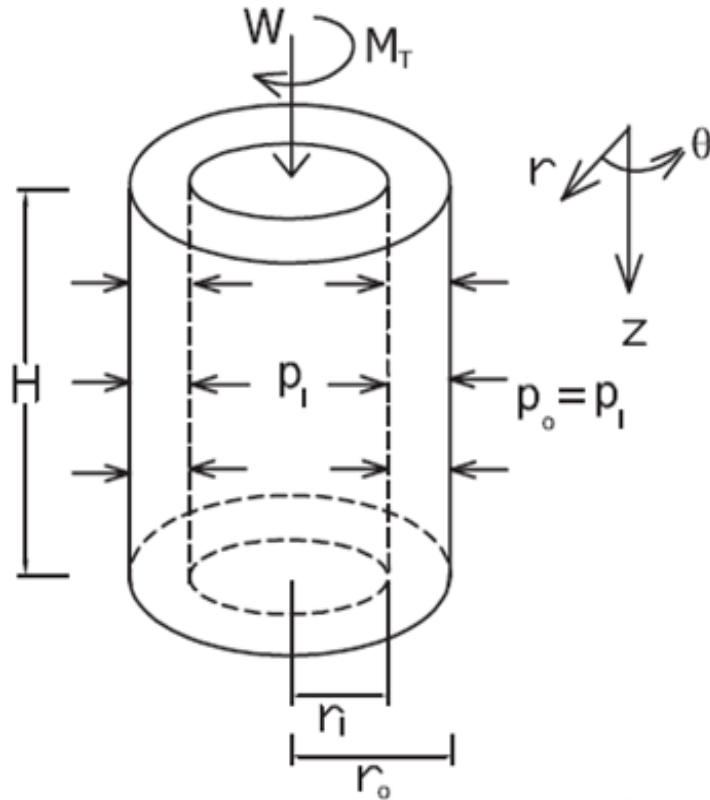
$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{2} \arctan \frac{\gamma_{\theta z}}{\epsilon_z - \epsilon_{\theta}}$$

5.3.3. Υπολογισμός εντατικών μεγεθών κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση

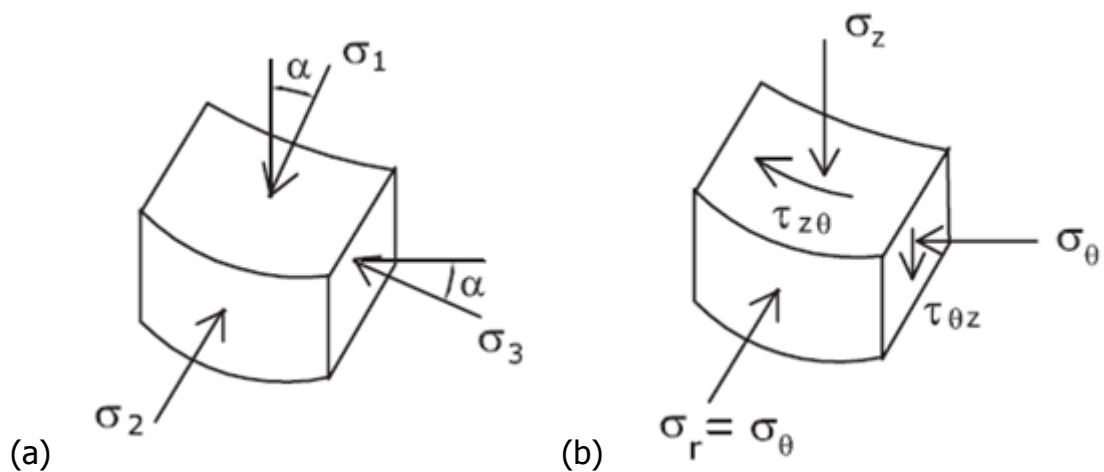
Στο Σχήμα 5.6. έχει σχεδιαστεί σε άξονες στρεπτικής ροπής M_T ως προς τη γωνία περιστροφής θ ένας κύκλος φόρτισης δοκιμίου που υποβάλλεται σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση. Κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση το ημι-εύρος της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ορίζεται ως: $\tau_{sa} = \frac{M_{T(R)} + M_{T(L)}}{2 \cdot \pi \cdot (r_o^2 + r_i^2) \cdot (r_o - r_i)}$, όπου $M_{T(R)}$ και $M_{T(L)}$ είναι το ημι-εύρος της στρεπτικής ροπής κατα την ωρολογιακή και αντιωρολογιακή φορά αντίστοιχα, με θετικό πρόσημο και οι δύο, και r_o και r_i είναι η εξωτερική και εσωτερική διάμετρος του δοκιμίου κατα την έναρξη της ανακυκλικής φόρτισης.

Το ημι-εύρος της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης ορίζεται ως εξής:

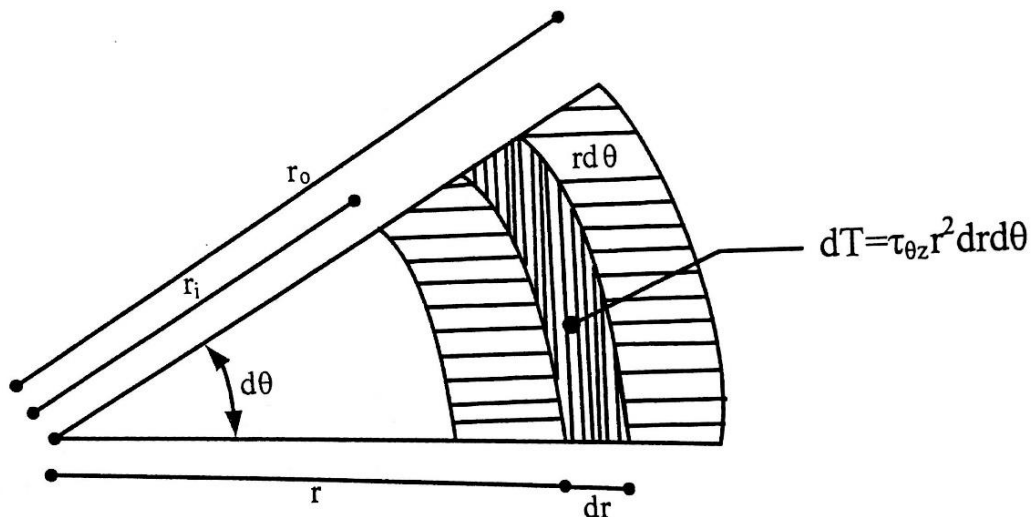
$\gamma_{sa} = \frac{\Delta\theta(r_o + r_i)}{4H_n}$, όπου $\Delta\theta$ είναι η γωνία περιστροφής σε rad και H_n είναι το ύψος του δοκιμίου κατα την έναρξη της ανακυκλικής φόρτισης.



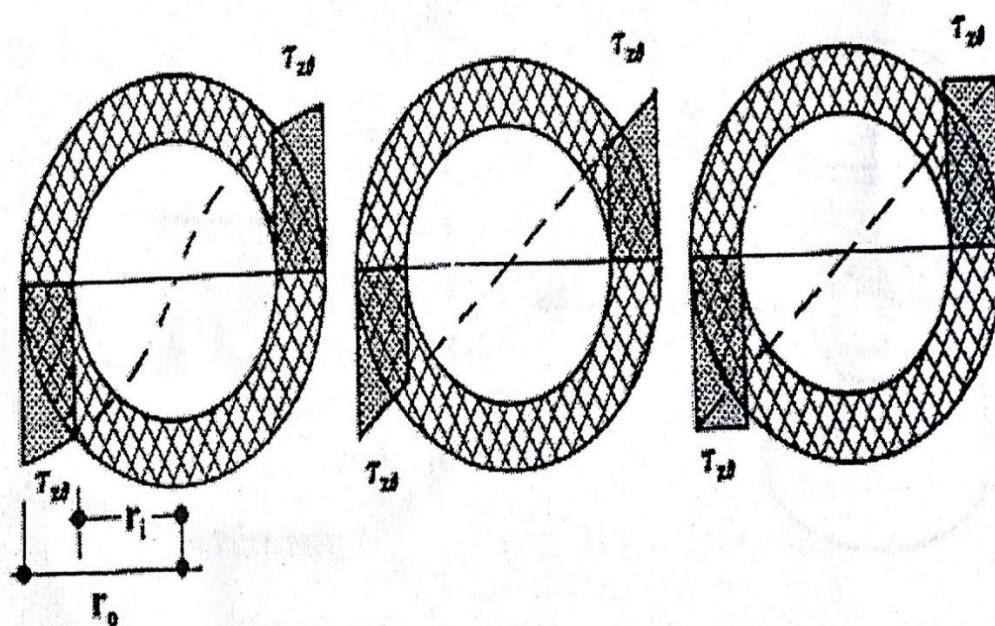
Σχήμα 5.1. Κοίλο κυλινδρικό δοκίμιο υπό κατακόρυφη φόρτιση W , στρεπτική ροπή M_T , εσωτερική πίεση p_i και εξωτερική πίεση p_o



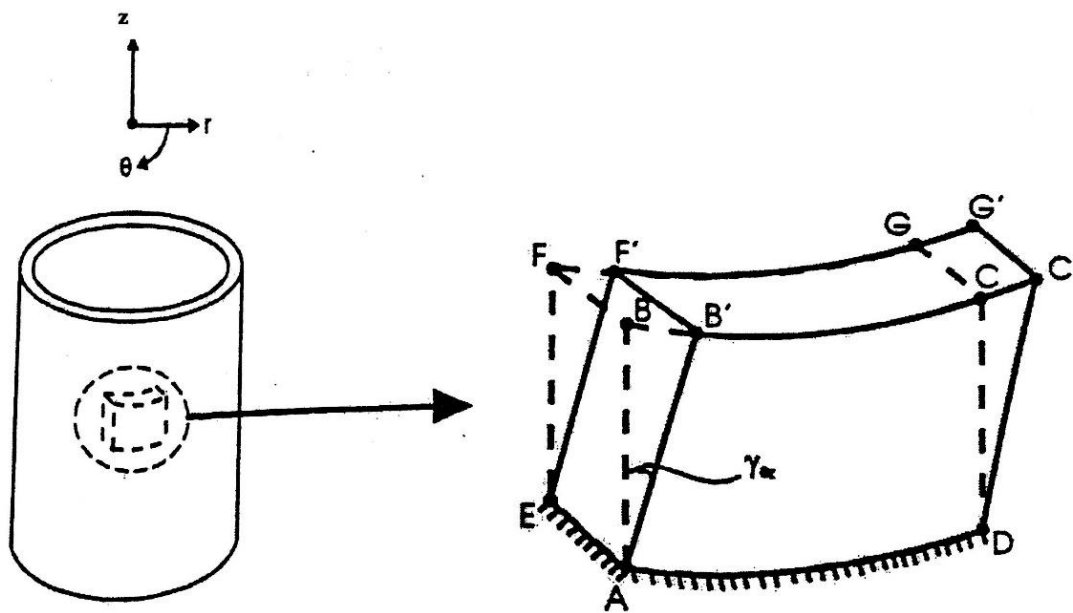
Σχήμα 5.2. (a) Κύριες τάσεις και (b) τάσεις σε κομμάτι στο τοίχωμα του κοίλου δοκιμίου



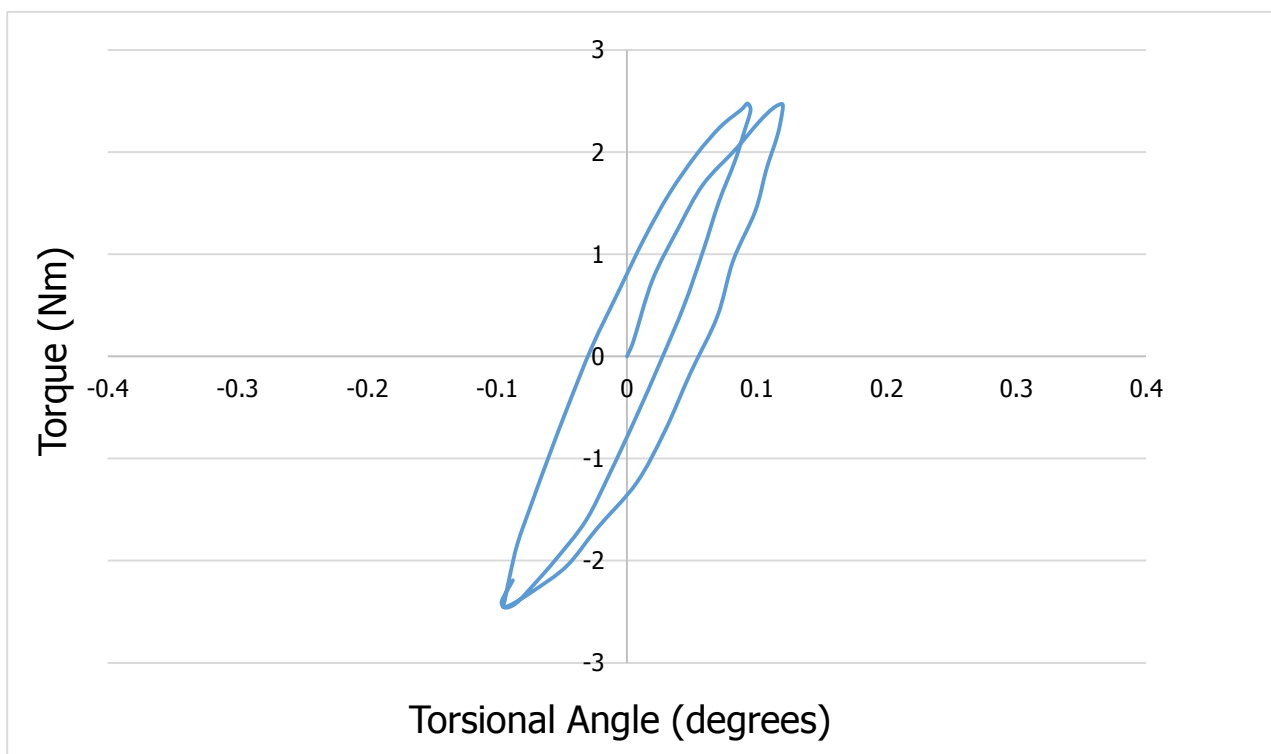
Σχήμα 5.3. Στοιχείο του κοίλου δοκιμίου πάχους dr και γωνίας $d\theta$



Σχήμα 5.4. (a) Πραγματική ελαστική κατανομή διατμητικών τάσεων, (b) εξιδανικευμένη ελαστική κατανομή διατμητικών τάσεων και (c) πλήρως πλαστική κατανομή διατμητικών τάσεων



Σχήμα 5.5. Κομμάτι απο τοίχωμα κοίλου δοκιμίου υποβαλλόμενο σε στρεπτική διάτμηση



Σχήμα 5.6. Στρεπτική ροπή M_T ως προς τη γωνία περιστροφής θ για ένα κύκλο φόρτισης δοκιμίου που υποβάλλεται σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση

6. Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών

6.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πρώτη, κύρια σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αυτή η σειρά πειραμάτων περιλαμβάνει πειράματα ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε καθαρή άμμο (M31), αλλά και σε μείγματα άμμου (M31) και ιλύος (D6) με ποσοστό λεπτοκόκκων 5%, 10% και 15%. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πειράματα αυτά θεωρήθηκε ότι η άμμος (M31) είναι μια ομοιόμορφη μέσης διαμέτρου $D_{50}=0.31$ mm, ενώ η ιλύς (D6) είναι πολύ λεπτότερο υλικό μέσης διαμέτρου $D_{50}=0.06$ mm με το 80% των κόκκων κατά βάρος να είναι μικρότερο των 0.074 mm. Επίσης, στη σειρά αυτή τα διάφορα δοκίμια έχουν στερεοποιηθεί ισότροπα σε αρχικές ενεργές τάσεις από 50kPa έως και 300kPa. Μετά από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κυρίως οι καμπύλες ρευστοποίησης και μερικά ενδεικτικά διαγράμματα τα οποία περιγράφουν με λεπτομέρεια την συμπεριφορά των δοκιμών.

Η αρχική ρευστοποίηση, η κατάσταση δηλαδή κατά την οποία η υπερπίεση των πόρων Δu αποκτά τιμή περίπου ίση με την αρχική μέση ολική τάση p , σηματοδοτεί την έναρξη δραστικών αλλαγών στην συμπεριφορά των δοκιμών με κύριο χαρακτηριστικό την ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Στην δική μας περίπτωση, θεωρήθηκε ότι η ρευστοποίηση επέρχεται όταν το δοκίμιο αναπτύξει εύρος διατμητικής παραμόρφωσης 5% ($\gamma_{sa}=5\%$) και για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο τα αποτελέσματα των δοκιμών να συνοψιστούν σε ένα διάγραμμα που θα παρουσιάζεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N (5%), ως συνάρτηση του λόγου t_{hz}/p' (CSR), δηλαδή του λόγου της επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση. Αυτή είναι μια κλασική μέθοδος προσδιορισμού της αντίστασης σε ρευστοποίηση ενός εδαφικού υλικού στο εργαστήριο.

Το Κεφάλαιο 6 χωρίζεται σε τέσσερα υποκεφάλαια. Στο πρώτο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα ανακυκλικής δοκιμής που εξάγουμε από τα πειράματα, τα οποία μας περιγράφουν αναλυτικά την συνολική συμπεριφορά των δοκιμών. Στο δεύτερο υποκεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας μέσα από δυο σειρές πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα πειράματα αυτά, μαζί με τα κύρια τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.. Στο τρίτο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των καμπύλων ρευστοποίησης όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τον ρόλο του ποσοστού των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών για κάθε σειρά πειραμάτων με κοινή τάση στερεοποίησης (50 KPa, 100 KPa και 300 KPa). Επίσης στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα κανονικοποιημένα ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού καθώς και ως προς τον δείκτη

πόρων κενών. Στο τέταρτο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των καμπύλων ρευστοποίησης όπου μπορούμε να συμπαιράνουμε τον ρόλο της αρχικής τάσης στερεοποίησης σε δοκίμια τα οποία αποτελούνται από καθαρή άμμο αλλά και μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού 5%, 10% και 15%. Ακόμη, στο υποκεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται και οι αντίστοιχες καμπύλες ρευστοποίησης, κανονικοποιημένες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού καθώς και ως προς τον δείκτη πόρων κενών. Συνολικά, στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είχαν πραγματοποιηθεί 63 ανακυκλικά πειράματα τα οποία έχουν επεξεργαστεί για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.2.. Τέλος, μια νέα σειρά ανακυκλικών πειραμάτων πραγματοποιήθηκε, ούτως ώστε να επαληθευτούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα παλιότερα πειράματα. Τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων αυτών φαίνονται συνοψισμένα στον Πίνακα 6.3..

A/A	Ονομασία πειράματος	f_c (%)	Τάση στερεοποίησης p' (kPa)	esk	e	CSR
1	M31-300-1	0	300	0.68	0.68	0.22
2	M31-300-2	0	300	0.67	0.67	0.14
3	M31-300-3	0	300	0.67	0.67	0.25
4	M31-300-4	0	300	0.72	0.72	0.12
5	M31-300-5	0	300	0.72	0.72	0.14
6	M31-300-6	0	300	0.72	0.72	0.16
7	M31-300-7	0	300	0.71	0.71	0.22
8	M31-300-8	0	300	0.71	0.71	0.25
9	M31-10-300-1	10	300	0.78	0.60	0.18
10	M31-10-300-2	10	300	0.75	0.57	0.14
11	M31-10-300-3	10	300	0.77	0.59	0.22
12	M31-10-300-4	10	300	0.76	0.58	0.12
13	M31-10-300-5	10	300	0.75	0.57	0.18
14	M31-10-300-6	10	300	0.81	0.63	0.14
15	M31-10-300-7	10	300	0.84	0.65	0.18
16	M31-10-300-8	10	300	0.80	0.62	0.10

Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά ανακυκλικών πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για εξέταση της επίδρασης της πυκνότητας

A/A	Ονομασία πειράματος	f_c (%)	Τάση στερεοποίησης p' (kPa)	esk	e	CSR
1	M31-(50kPa)-1	0	50	0.67	0.67	0.16
2	M31-(50kPa)-2	0	50	0.64	0.64	0.18
3	M31-(50kPa)-3	0	50	0.63	0.63	0.20
4	M31-(50kPa)-4	0	50	0.66	0.66	0.17
5	M31-(50kPa)-5	0	50	0.66	0.66	0.18
6	M31-(50kPa)-6	0	50	0.67	0.67	0.20

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών

7	M31-(100kPa)-7	0	100	0.67	0.67	0.16
8	M31-(100kPa)-8	0	100	0.64	0.64	0.21
9	M31-(100kPa)-9	0	100	0.65	0.65	0.22
10	M31-(100kPa)-10	0	100	0.63	0.63	0.18
11	M31-(100kPa)-11	0	100	0.65	0.65	0.14
12	M31-(100kPa)-12	0	100	0.67	0.67	0.16
13	M31-(100kPa)-13	0	100	0.65	0.65	0.17
14	M31-(100kPa)-14	0	100	0.67	0.67	0.17
15	M31-(100kPa)-15	0	100	0.69	0.69	0.20
16	M31-(300kPa)-16	0	300	0.63	0.63	0.12
17	M31-(300kPa)-17	0	300	0.63	0.63	0.16
18	M31-(300kPa)-18	0	300	0.64	0.64	0.18
19	M31-f5-(50kPa)-19	5	50	0.71	0.63	0.19
20	M31-f5-(50kPa)-20	5	50	0.71	0.63	0.22
21	M31-f5-(50kPa)-21	5	50	0.69	0.61	0.24
22	M31-f5-(50kPa)-22	5	50	0.65	0.57	0.32
23	M31-f5-(50kPa)-23	5	50	0.67	0.58	0.33
24	M31-f5-(100kPa)-24	5	100	0.67	0.59	0.27
25	M31-f5-(100kPa)-25	5	100	0.67	0.58	0.30
26	M31-f5-(100kPa)-26	5	100	0.70	0.61	0.33
27	M31-f5-(300kPa)-27	5	300	0.65	0.57	0.19
28	M31-f5-(300kPa)-28	5	300	0.65	0.57	0.23
29	M31-f5-(300kPa)-29	5	300	0.63	0.55	0.26
30	M31-f5-(300kPa)-30	5	300	0.63	0.55	0.27
31	M31-f10-(50kPa)-31	10	50	0.66	0.50	0.34
32	M31-f10-(50kPa)-32	10	50	0.70	0.53	0.36
33	M31-f10-(50kPa)-33	10	50	0.69	0.52	0.38
34	M31-f10-(100kPa)-34	10	100	0.72	0.55	0.23
35	M31-f10-(100kPa)-35	10	100	0.72	0.55	0.27
36	M31-f10-(100kPa)-36	10	100	0.77	0.60	0.32
37	M31-f10-(100kPa)-37	10	100	0.77	0.59	0.14
38	M31-f10-(100kPa)-38	10	100	0.75	0.58	0.22
39	M31-f10-(100kPa)-39	10	100	0.75	0.58	0.25
40	M31-f10-(100kPa)-40	10	100	0.74	0.57	0.30
41	M31-f10-(300kPa)-41	10	300	0.65	0.48	0.19
42	M31-f10-(300kPa)-42	10	300	0.72	0.54	0.21
43	M31-f10-(300kPa)-43	10	300	0.70	0.53	0.21
44	M31-f10-(300kPa)-44	10	300	0.81	0.85	0.14
45	M31-f10-(300kPa)-45	10	300	0.84	0.88	0.18
46	M31-f10-(300kPa)-46	10	300	0.78	0.82	0.18
47	M31-f10-(300kPa)-47	10	300	0.75	0.79	0.14
48	M31-f10-(300kPa)-48	10	300	0.77	0.81	0.22
49	M31-f10-(300kPa)-49	10	300	0.80	0.84	0.22

50	M31-f10-(300kPa)-50	10	300	0.76	0.80	0.24
51	M31-f10-(300kPa)-51	10	300	0.76	0.80	0.12
52	M31-f10-(300kPa)-52	10	300	0.75	0.79	0.18
53	M31-f15-(50kPa)-53	15	50	0.70	0.45	0.33
54	M31-f15-(50kPa)-54	15	50	0.65	0.40	0.44
55	M31-f15-(50kPa)-55	15	50	0.66	0.41	0.46
56	M31-f15-(50kPa)-56	15	50	0.72	0.46	0.50
57	M31-f15-(100kPa)-57	15	100	0.72	0.46	0.21
58	M31-f15-(100kPa)-58	15	100	0.66	0.41	0.23
59	M31-f15-(100kPa)-59	15	100	0.71	0.45	0.24
60	M31-f15-(300kPa)-60	15	300	0.69	0.44	0.18
61	M31-f15-(300kPa)-61	15	300	0.69	0.43	0.19
62	M31-f15-(300kPa)-62	15	300	0.72	0.46	0.20
63	M31-f15-(300kPa)-63	15	300	0.69	0.44	0.22

Πίνακας 6.2. Χαρακτηριστικά ανακυκλικών πειραμάτων που έχουν επεξεργαστεί

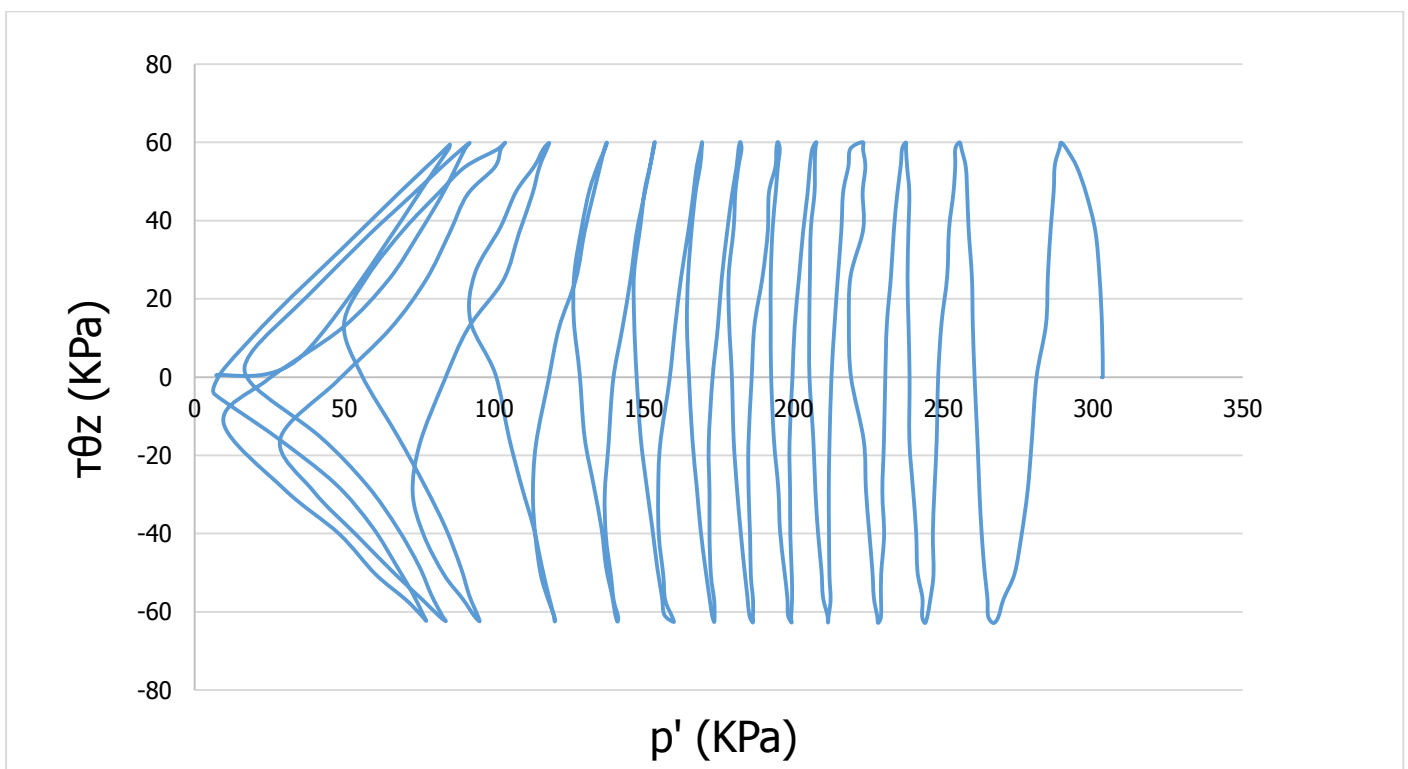
A/A	Ονομασία πειράματος	f_c (%)	Τάση στερεοποίησης p' (KPa)	esk	e	CSR
1	M31-300-1	0	300	0.72	0.72	0.12
2	M31-300-2	0	300	0.72	0.72	0.14
3	M31-300-3	0	300	0.72	0.72	0.16
4	M31-300-4	0	300	0.68	0.68	0.22
5	M31-300-5	0	300	0.71	0.71	0.22
6	M31-300-6	0	300	0.67	0.67	0.14
7	M31-300-7	0	300	0.71	0.71	0.25
8	M31-300-8	0	300	0.67	0.67	0.25
9	M31-5-300-9	5	300	0.68	0.59	0.18
10	M31-5-300-10	5	300	0.65	0.57	0.20
11	M31-5-300-11	5	300	0.63	0.55	0.24
12	M31-5-300-12	5	300	0.64	0.56	0.30
13	M31-5-300-13	5	300	0.66	0.58	0.24
14	M31-10-300-14	10	300	0.81	0.63	0.14
15	M31-10-300-15	10	300	0.84	0.65	0.18
16	M31-10-300-16	10	300	0.80	0.62	0.10
17	M31-10-300-17	10	300	0.75	0.57	0.14
18	M31-10-300-18	10	300	0.77	0.59	0.22
19	M31-10-300-19	10	300	0.80	0.62	0.22
20	M31-10-300-20	10	300	0.76	0.58	0.24
21	M31-10-300-21	10	300	0.80	0.62	0.12
22	M31-10-300-22	10	300	0.76	0.58	0.12
23	M31-10-300-23	10	300	0.75	0.57	0.18

Πίνακας 6.3. Χαρακτηριστικά νέας σειράς ανακυκλικών πειραμάτων

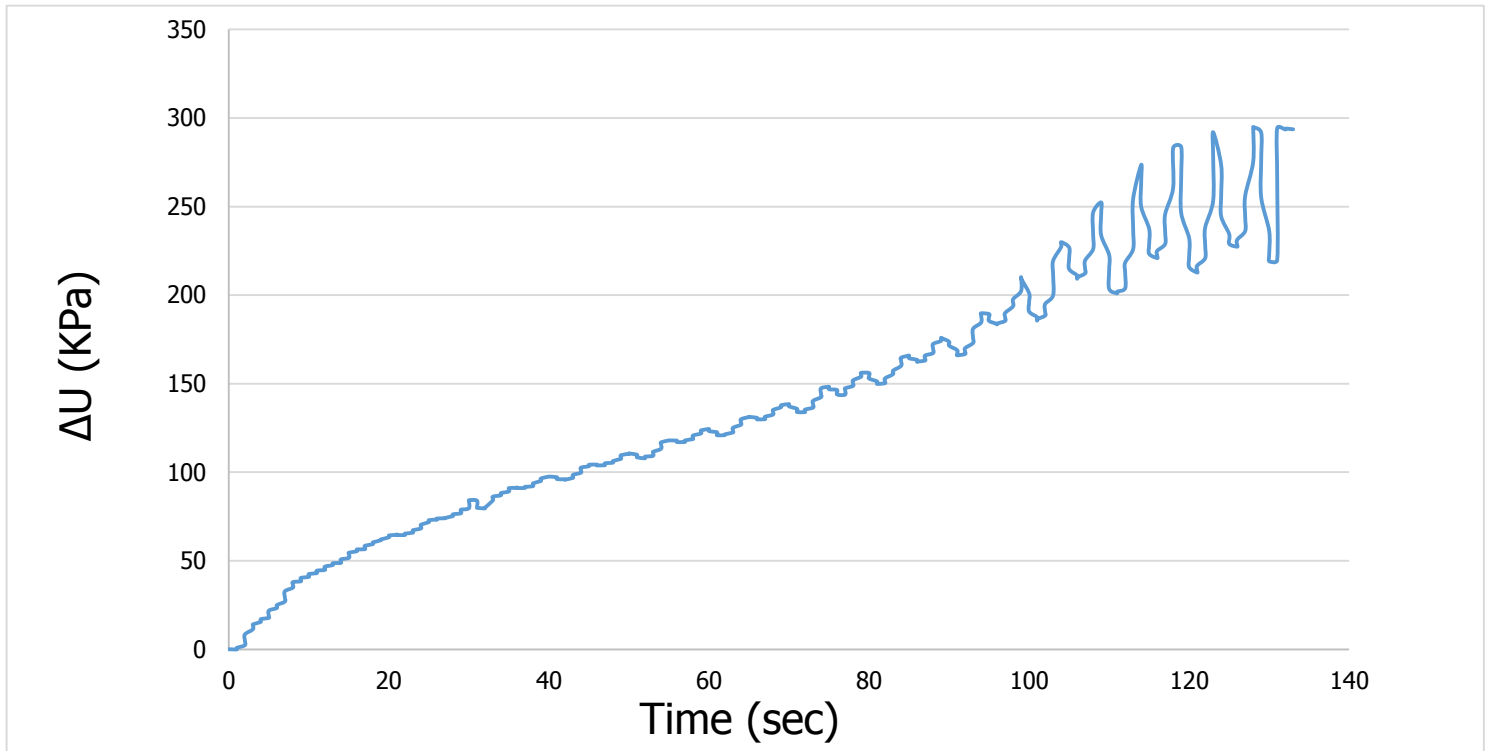
6.2. Διαδρομές τάσεων – Ενδεικτικά διαγράμματα ανακυκλικής δοκιμής

Αφού παρασκευαστεί ένα δοκίμιο, όπως έχει περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 4.3., ακολούθως του επιβάλλουμε ανακυκλική φόρτιση. Στην συνέχεια, μέσα απο ορισμένα διαγράμματα μπορούμε να συμπαιράνουμε την συμπεριφορά του δοκιμίου καθώς και την αντοχή του έναντι ρευστοποίησης. Για λόγους πληρότητας, πιο κάτω παρουσιάζονται οι κύριες γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν απο τα πρωτόλεια δεδομένα ενός τυπικού ανακυκλικού πειράματος κοίλου δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.1. παρατίθεται το διάγραμμα της μέσης ενεργού τάσεως σε συνάρτηση με την μέση διατμητική τάση στο τοίχωμα του δοκιμίου ($p'-\tau_{\theta z}$), στο Σχήμα 6.2. παρουσιάζεται η ανάπτυξη των υπερπιέσεων του νερού των πόρων σε συνάρτηση με τον χρόνο ($\Delta u-t$) ενώ στο Σχήμα 6.3. φαίνεται η εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο ($\gamma_{\theta z}-t$).

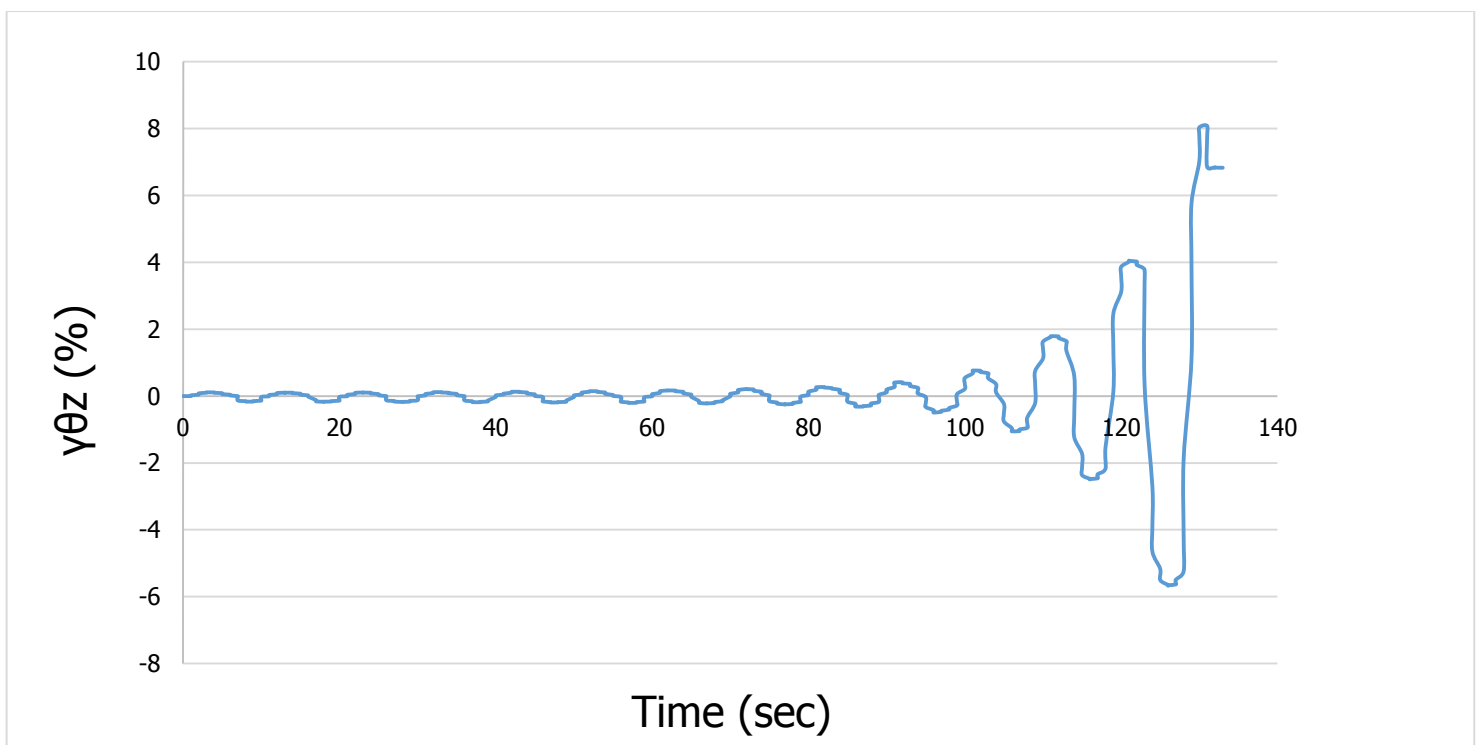
Το πιο κάτω πείραμα εκτελέστηκε σε δοκίμιο μείγματος άμμου-ιλύος με 10% περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Το δοκίμιο αυτό στερεοποιήθηκε σε μέση ενεργό τάση 300kPa και ο δείκτης πόρων σκελετού του ήταν $e_{sk}=0.72$. Ο επιβαλλόμενος λόγος ανακυκλικής τάσης ήταν $CSR=0.2$ και ο αριθμός των κύκλων για να αναπτυχθεί εύρος διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{\theta z}=5\%$ ήταν $N(5\%) = 12$ κύκλοι.



Σχήμα 6.1. Ανακυκλική διατμητική τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση



Σχήμα 6.2. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ρευστού σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση



Σχήμα 6.3. Εξέλιξη των διατμητικών παραμορφώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά την ανακυκλική στρεπτική διάτμηση

6.3. Επίδραση πυκνότητας

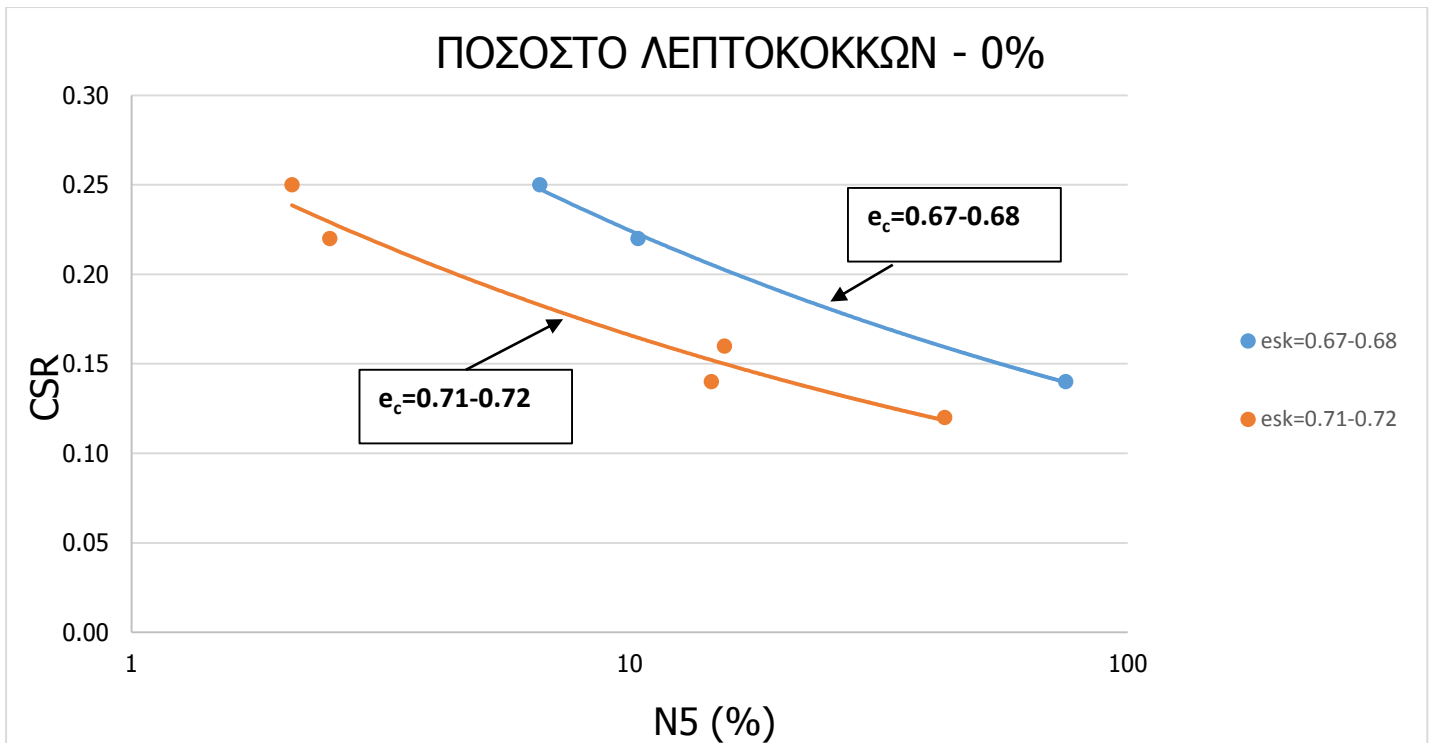
Αρχικά, στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων, ούτως ώστε να αποφανθούμε για την επίδραση της πυκνότητας τόσο στην καθαρή άμμο, όσο και σε μείγματα άμμου-ιλύος και την αντοχή τους έναντι ρευστοποίησης.

Η πρώτη σειρά πειραμάτων περιλάμβανε δοκίμια καθαρής άμμου σε δυο διαφορετικές πυκνότητες (πυκνά και χαλαρά). Η μια ομάδα αποτελείτο από σχετικά χαλαρά δοκίμια με σχετικές πυκνότητες (D_r) από 15% έως και 29% και αντίστοιχους δείκτες πόρων $e=0.71-0.72$. Η άλλη ομάδα περιλάμβανε δοκίμια που είναι σχετικά πιο πυκνά με την σχετική τους πυκνότητα (D_r) να κυμαίνεται από 41.3% έως και 42.6% και αντίστοιχους δείκτες πόρων $e=0.67-0.68$. Όλα αυτά τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση 300 KPa.

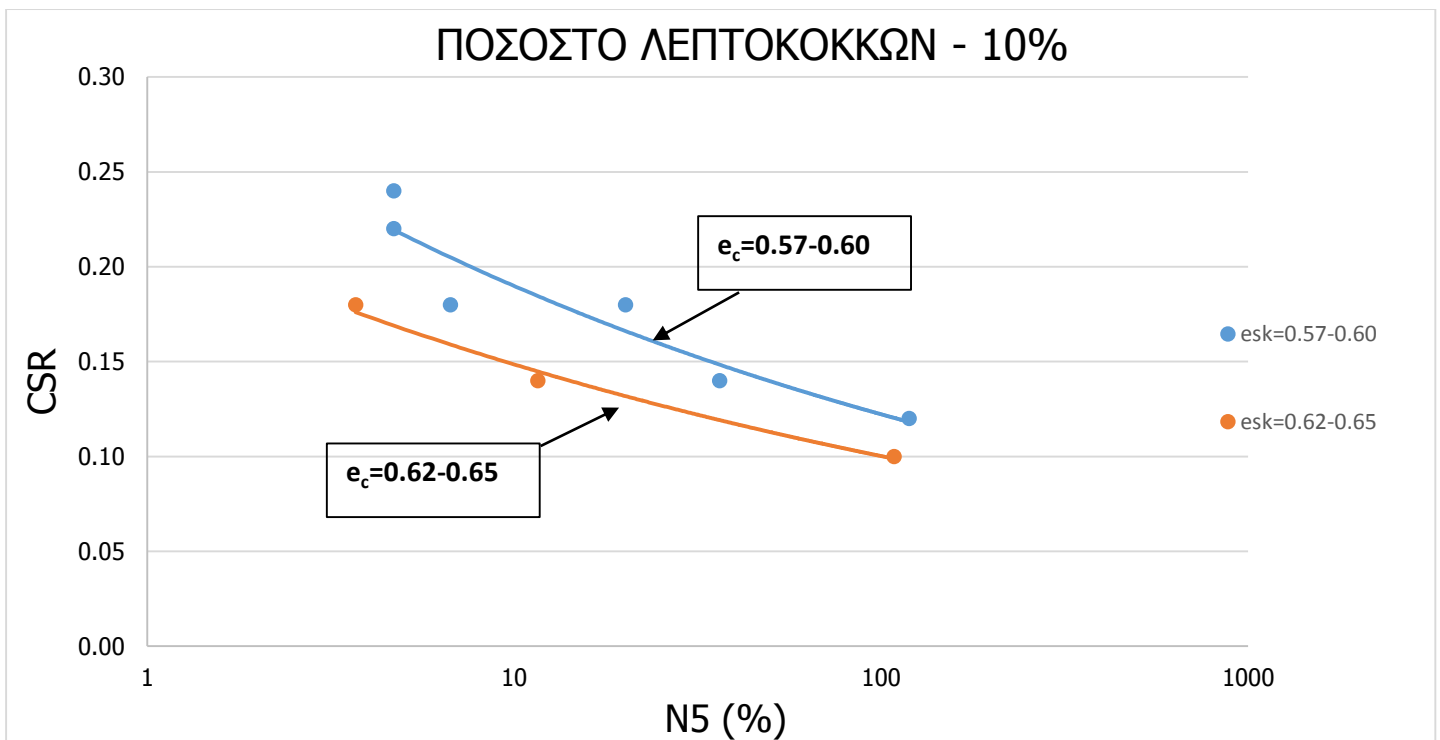
Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη σειρά πειραμάτων, η οποία έγινε σε μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% και χωρίστηκαν σε 2 ομάδες, αναλόγως της πυκνότητάς τους. Η μια ομάδα αποτελείτο από σχετικώς χαλαρά δοκίμια της τάξεως του $D_r=27.9\%-37.3\%$ και αντίστοιχους δείκτες πόρων $e=0.62-0.65$. Η άλλη ομάδα περιλάμβανε πιο πυκνά δοκίμια με την σχετική τους πυκνότητα (D_r) να κυμαίνεται από 44.1% έως και 51.3% και αντίστοιχους δείκτες πόρων $e=0.57-0.60$. Και αυτά τα δοκίμια όπως και τα παραπάνω της καθαρής άμμου στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση 300 KPa.

Στον Πίνακα 6.1. παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων των δύο αυτών σειρών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο.

Στα Σχήματα 6.4. και 6.5. φαίνονται τα διαγράμματα CSR – $N_5(\%)$ που έχουν εξαχθεί για την καθαρή άμμο και για το μείγμα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%, μετά από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών στρέψης κοίλου δοκιμίου.



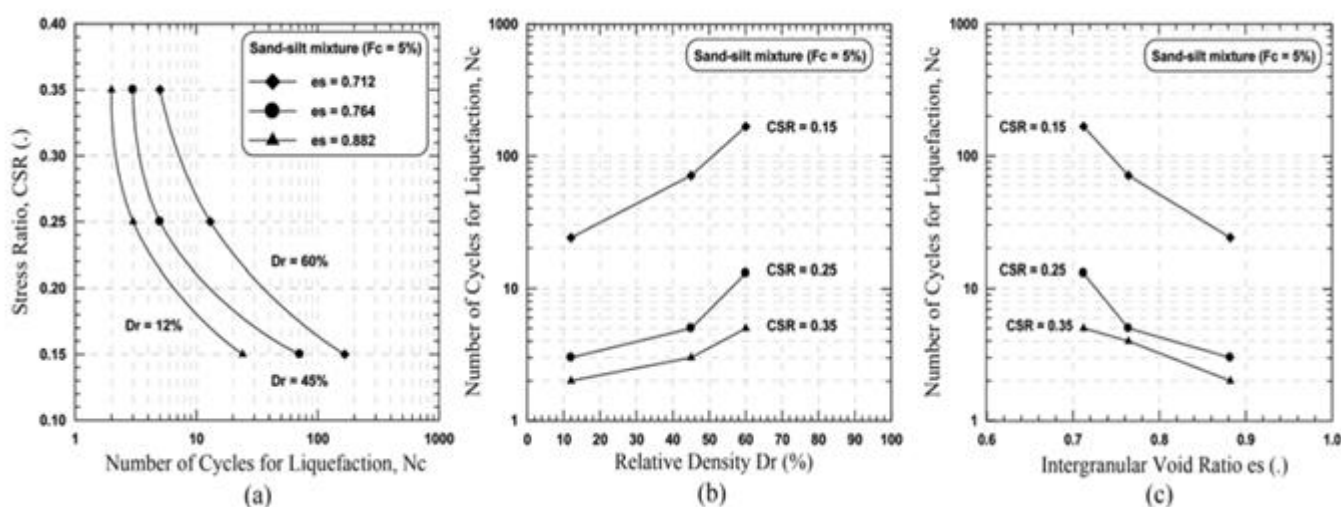
Σχήμα 6.4. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια καθαρής άμμου



Σχήμα 6.5. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$. Σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 10%

Αυτό που παρατηρούμε τόσο στα πειράματα καθαρής άμμου όσο και στα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού 10% είναι ότι τα πυκνά δοκίμια παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη αντοχή έναντι ρευστοποίησης, κατά περίπου 25% στους 10 κύκλους. Επίσης, όπως παρατηρούμε και απο τα δύο παραπάνω διαγράμματα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για μικρές τιμές του λόγου ανακυκλικής τάσης και μεγάλο αριθμό κύκλων οι καμπύλες χαλαρών και πυκνών δοκιμίων συγκλίνουν. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι πιθανόν για μεγάλο αριθμό κύκλων και αντίστοιχα μικρούς λόγους ανακύκλικής τάσης η επίδραση της πυκνότητας να είναι σχετικά ασήμαντη.

Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύονται απο τα συμπεράσματα των Mostefa Belkhatir, Hanifi Missoum, Ahmed Arab, Nouredine Della, and Tom Schanz (2011), απο ανακυκλικά πειράματα που πραγματοποίησαν σε τρεις ομάδες πυκνοτήτων από $e_{sk}=0.712$ έως και $e_{sk}=0.882$ σε μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.6. οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι σε μείγματα άμμου-ιλύος, η αύξηση του δείκτη πόρων (global void ratio) οδηγεί σε μείωση της αντίστασης έναντι ρευστοποίησης και αντίστοιχα η αύξηση της σχετικής πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση.

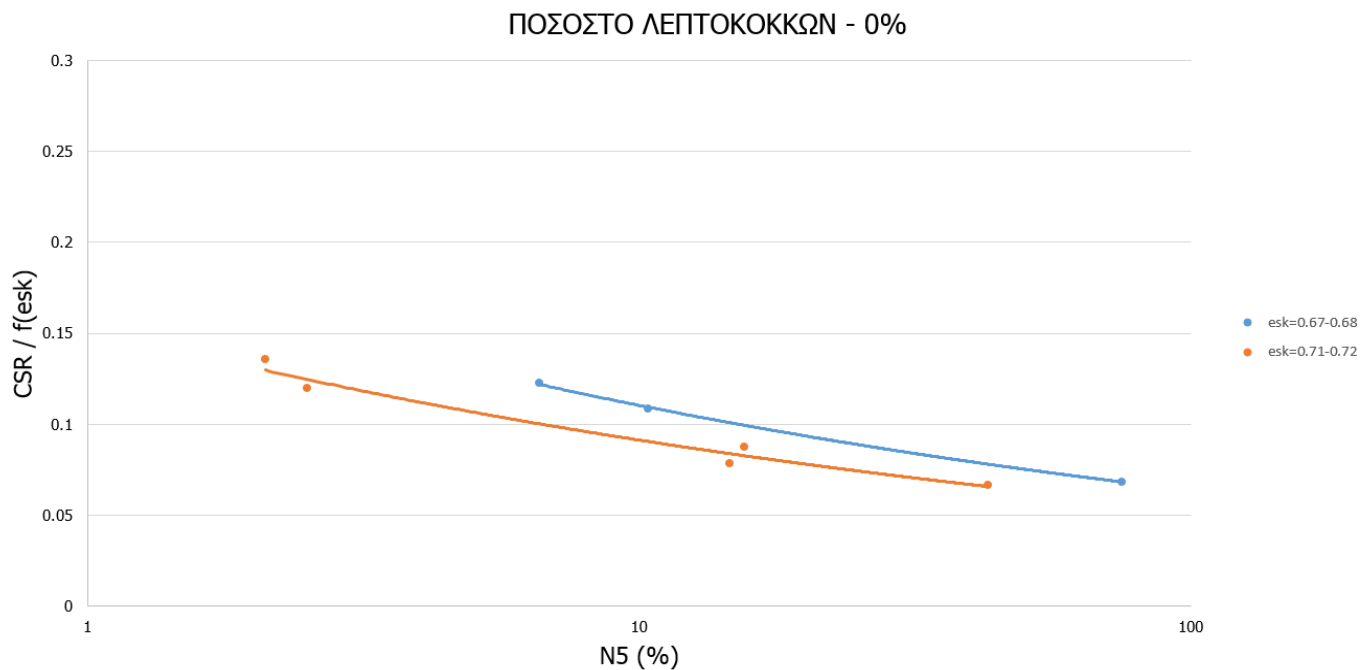


Σχήμα 6.6. Επίδραση αρχικής σχετικής πυκνότητας στην αντίσταση έναντι ρευστοποίησης σε μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση $\sigma_3' = 100\text{kPa}$ όπου (a)λόγος ανακυκλικής τάσης σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων μέχρι να επέλθει ρευστοποίηση, (b)αριθμός κύκλων μέχρι να επέλθει ρευστοποίηση σε συνάρτηση με την σχετική πυκνότητα και (c)αριθμός κύκλων μέχρι να επέλθει ρευστοποίηση σε συνάρτηση με τον δείκτη πόρων σκελετού (Mostefa Belkhatir, Hanifi Missoum, Ahmed Arab, Nouredine Della, and Tom Schanz ; 2011)

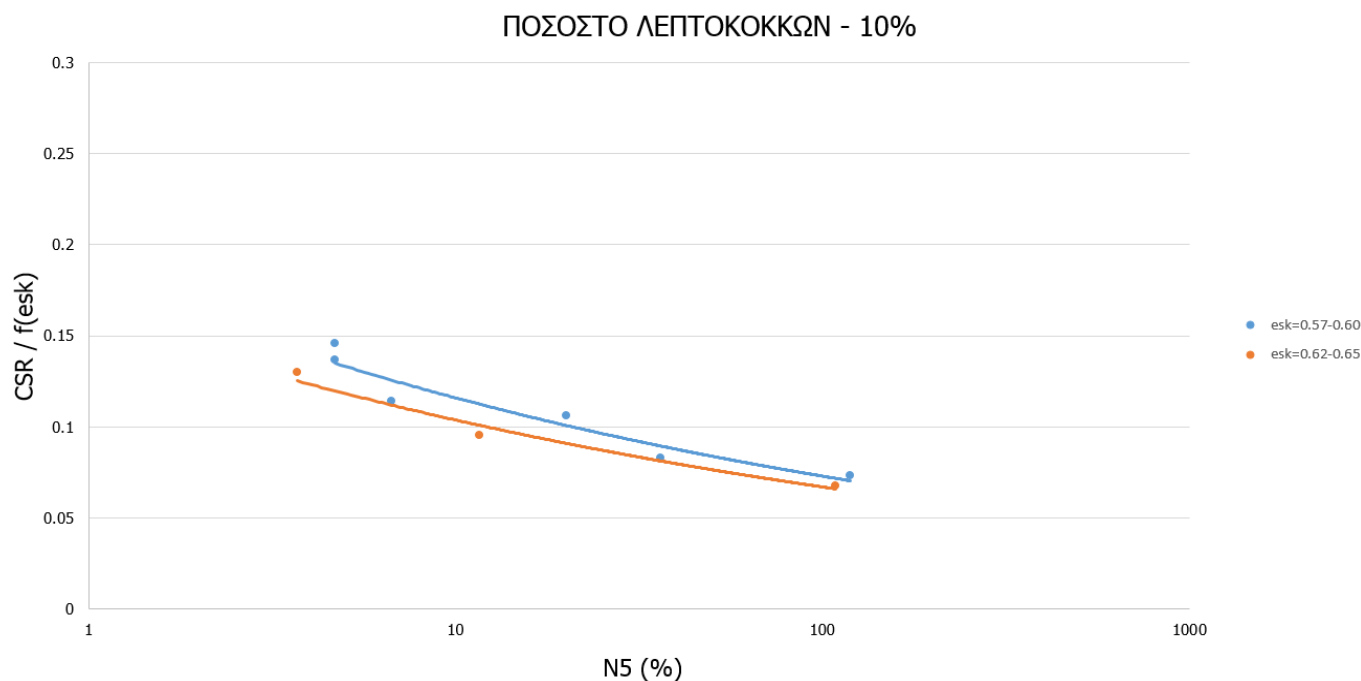
Ένα πρόβλημα που παρατηρείται συχνά στα εργαστήρια είναι το γεγονός ότι καθώς παρασκευάζουμε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο, δεν επιτυγχάνουμε πάντα τον επιθυμητό δείκτη πόρων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα δοκίμια να διαφέρουν έστω και ελάχιστα ως προς τον δείκτη πόρων και αναπόφευκτα να έχουμε σφάλματα στις συγκρίσεις. Για τον λόγο αυτό στα παραπάνω πειράματα έγινε προσπάθεια κανονικοποίησής τους ώστε να απαλείψουμε αυτό το σφάλμα κατά το δυνατό. Ακόμη, όπως θα δούμε και στην συνέχεια στα υποκεφάλαια 6.3. και 6.4. του παρόντος κεφαλαίου, με εφαρμογή της κανονικοποίησης σου παρέχεται η δυνατότητα να συμπεριληφθούν στις συγκρίσεις πειράματα τα οποία έχουν απόκλιση ως προς την πυκνότητα, και να εμφανιστεί μια πιο ξεκάθαρη εικόνα ως προς την συνολική συμπεριφορά των δοκιμίων, έχοντας απαλήψει την επίδραση του δείκτη πόρων. Πολλοί είναι οι ερευνητές οι οποίοι ακολουθούν την διαδικασία αυτή, παρ' όλα αυτά, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι η κανονικοποίηση αυτή περιγράφει το σύνολο των πειραμάτων της βιβλιογραφίας, αφού το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι αρκετά πολύπλοκο και υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Στην δική μας περίπτωση, αρχικά κανονικοποιήσαμε τα παραπάνω αποτελέσματα ως προς την συνάρτηση $f(esk)=esk^{-1.3}$ (Lo Presti et al. 1997) όπου esk είναι ο δείκτης πόρων σκελετού των δοκιμίων πριν από την διάτμηση.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.7. και 6.8. που προέκυψαν μετά από την κανονικοποίηση παρατηρούμε ότι τόσο στα δοκίμια της καθαρής άμμου, όσο και στα δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%, οι καμπύλες πλησιάζουν αρκετά με αποτέλεσμα ο ρόλος της πυκνότητας να μειώνεται σημαντικά. Το γεγονός αυτό υποδικνύει ότι αυτού του είδους η κανονικοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην καθνή άμμο, όσο και σε μείγματα άμμου-ιλύος ούτως ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν πειράματα τα οποία έχουν απόκλιση ως προς την πυκνότητα και έτσι με μεγαλύτερο αριθμό πειραμάτων να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για την συνολική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών.



Σχήμα 6.7. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια καθαρής άμμου. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)



Σχήμα 6.8. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια μείγματος άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 10%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

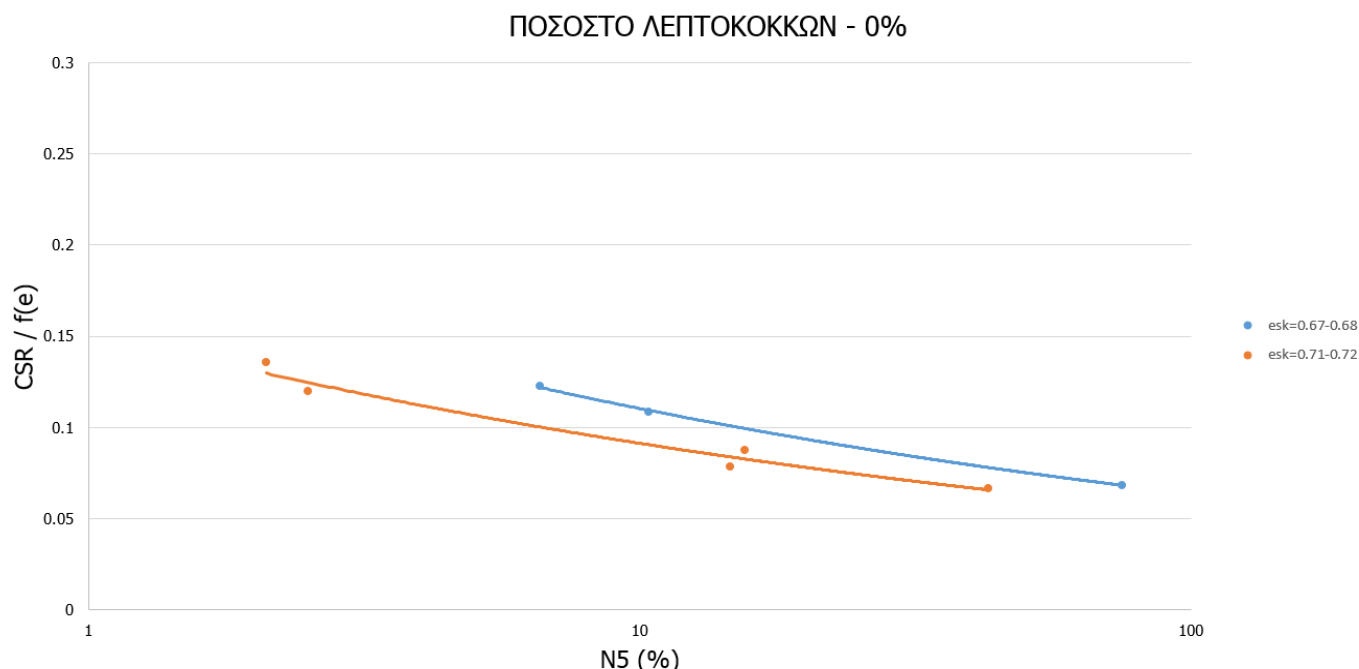
Στην συνέχεια, έγινε κανονικοποίηση των αρχικών αποτελεσμάτων των ανακυκλικών πειραμάτων με την ίδια συνάρτηση $f(e)=e^{-1.3}$ αλλά τώρα όπου e είναι ο κλασικός δείκτης πόρων της εδαφομηχανικής (global void ratio). Τα αποτελέσματα αυτά έχουν μια μαθηματική συσχέτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά απο κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (e_{sk}) αφού ο κλασικός δείκτης πόρων e και ο δείκτης πόρων σκελετού e_{sk} σχετίζονται με τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$e = e_{sk}(1-f_c) - f_c$$

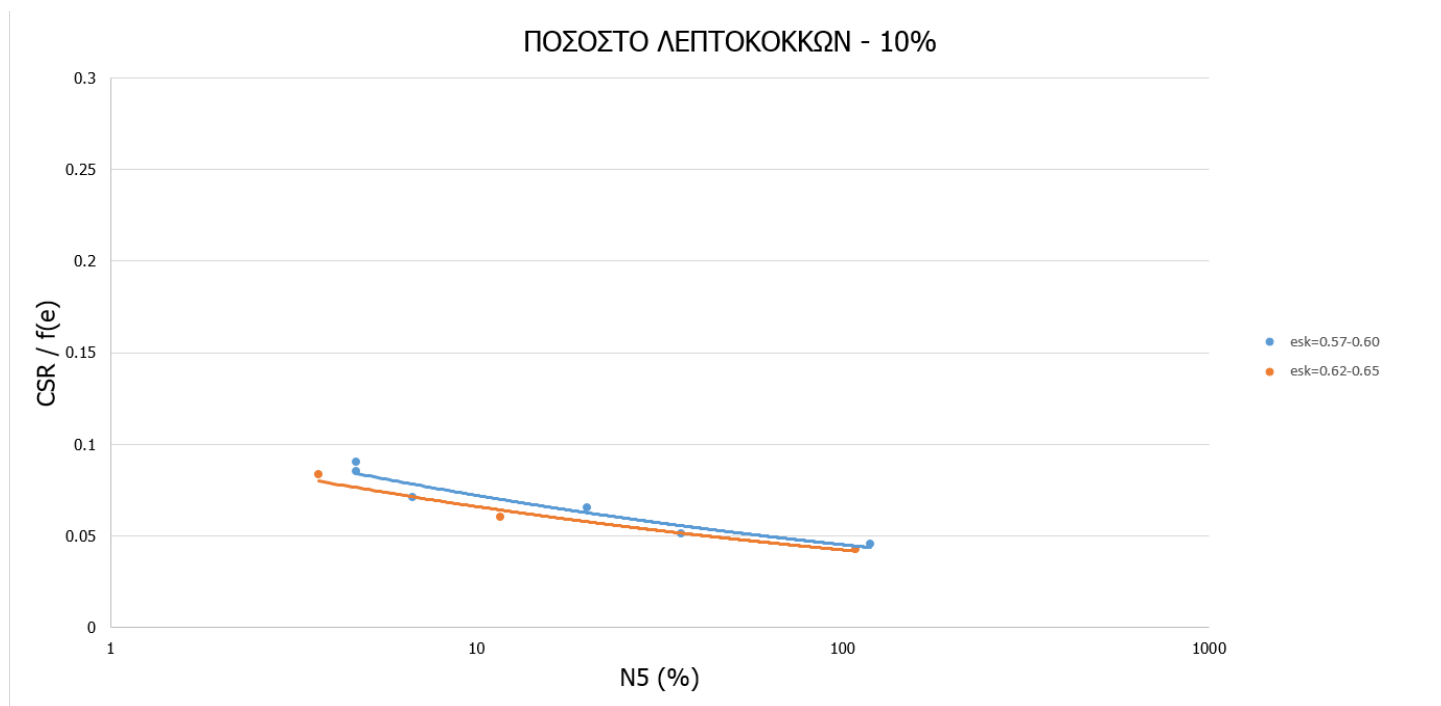
όπου: e_{sk} = δείκτης πόρων σκελετού

$$f_c = \text{ξηρή μάζα του λεπτόκοκκου υλικού} / \text{συνολική ξηρή μάζα}$$

Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.9. και 6.10 που πρέκυψαν μετά απο αυτού του είδους την κανονικοποίηση, είναι ξεκάθαρο ότι οι καμπύλες ρευστοποίησης απο δοκίμια με διαφορετικές πυκνότητες, με το ίδιο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, στερεοποιημένα στην ίδια αρχική ενεργό τάση, πλησιάζουν αρκετά γεγονός που υποδυνκνύει ότι η μέθοδος αυτή δουλεύει αποτελεσματικά τόσο σε δοκίμια καθαρής άμμου, αλλά και σε δοκίμια μείγματος άμμου-ιλύος. Η μεγάλη απόσταση που υπήρχε ανάμεσα στις καμπύλες ρευστοποίησης χαλαρών και πυκνών δοκιμίων πριν την κανονικοποίηση (Σχήματα 6.4. και 6.5.), κάτι που παρουσίαζε τα χαλαρά δοκίμια να είναι πιο ευάλωτα σε ρευστοποίηση έχει σχεδόν απαλειφθεί και για τον λόγο αυτό οι δυο αυτές μέθοδοι κανονικοποίησης που έχουν παρουσιαστεί θα εφαρμοστούν και αργότερα στα πειράματων των υποκεφαλαίων 6.3. και 6.4..



Σχήμα 6.9. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια καθαρής άμμου. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)



Σχήμα 6.10. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια μείγματος άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 10%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.4. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, εξετάζεται μετά απο επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων των ανακυκλικών δοκιμών στρέψης κοίλου δοκιμίου, η επίδραση της προσθήκης κλάσματος λεπτόκοκκου υλικού σε δείγμα καθαρής άμμου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο ρόλος και η σημασία του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού σε δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση απο 50kPa έως και 300kPa. Για κάθε τάση στερεοποίησης, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως μεταβάλλεται η συμπεριφορά των δοκιμίων καθαρής άμμου, καθώς επίσης και μειγμάτων άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 5%, 10% και 15%.

6.4.1. Παρουσίαση διαγραμμάτων

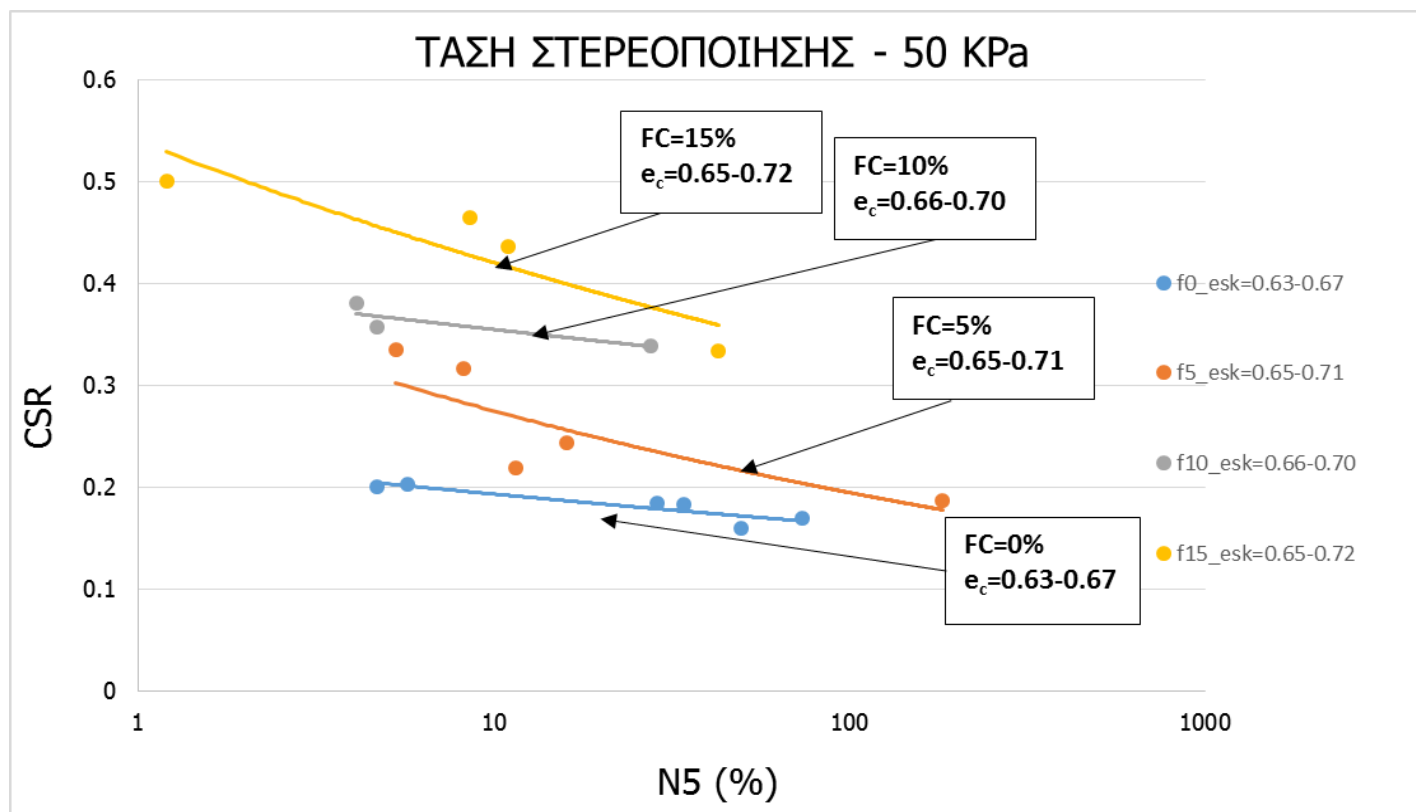
6.4.1.1. Τάση στερεοποίησης 50kPa

Στο Σχήμα 6.11. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για σειρά πειραμάτων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε κοινή αρχική ενεργό τάση ίση με 50kPa τα οποία ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού.

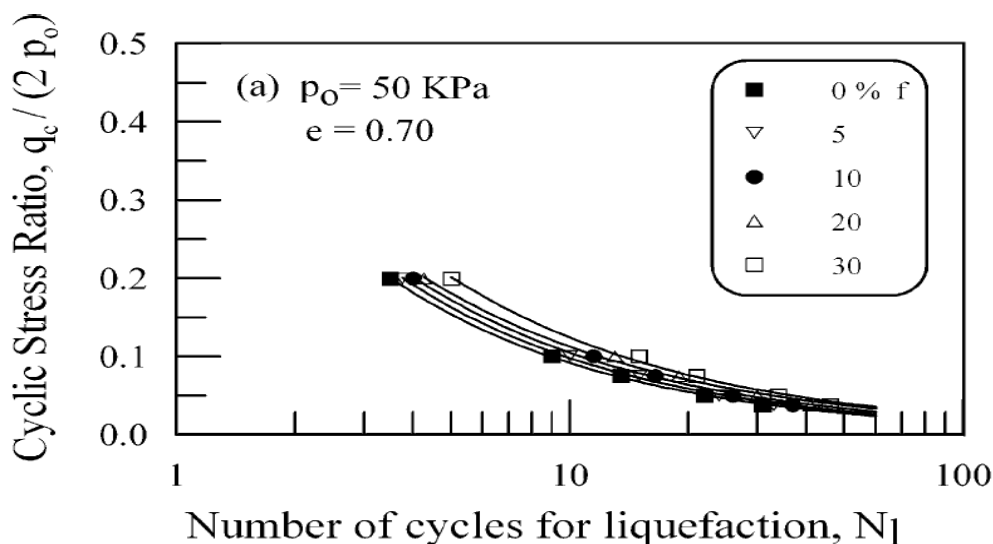
Είναι ξεκάθαρο ότι η αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε δοκίμια με τάση στερεοποίησης 50kPa είναι ευθέως ανάλογη του ποσοστού των λεπτόκοκκων μέχρι το 15%. Ακόμη, το μείγμα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% έχει 2 με 2.5 φορές μεγαλύτερη αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με την καθαρή άμμο ή αλλιώς για

την ίδια επιβαλλόμενη ανακυκλική διατμητική τάση απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι μέχρι να επέλθει η ρευστοποίηση. Μία ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι αποστάσεις μεταξύ των καμπυλών είναι περίπου ίσες, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κατά προσέγγιση η αύξηση της αντοχής είναι αναλογική.

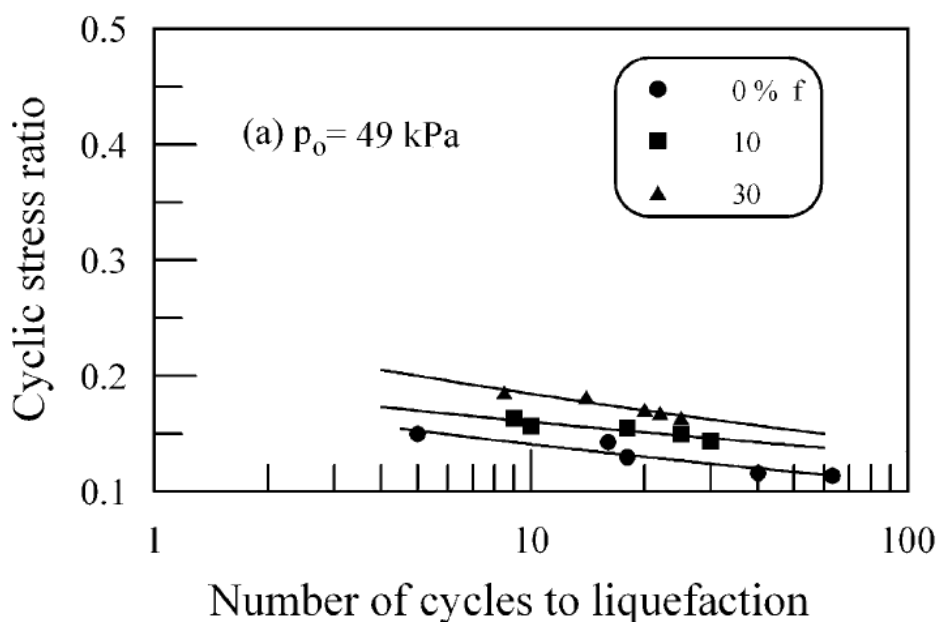
Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας αν και η επίδραση της ιλύος είναι πολύ σημαντικότερη στην παρούσα σειρά πειραμάτων. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6.12. και 6.13. (Αδριανόπουλος, Μπουκοβάλας και Παπαδημητρίου ; 2003), παρατηρείται ότι απο πειράματα που έγιναν στο παρελθόν για δοκίμια στερεοποιημένα σε ενεργό τάση μικρότερη των 60KPa, η προσθήκη λεπτόκοκκων υλικών μέχρι ποσοστό της τάξης του 30% βελτιώνει την αντίσταση ως προς την ρευστοποίηση. Αντίθετα, όπως παρατηρούμε απο το Σχήμα 6.14. (Hassan Sharafi and Mohammad Hassan Baziar ; 2010), πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε καθαρή άμμο αλλά και μείγματα άμμου-ιλύος, στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση 60KPa, έρχονται σε αντίθεση με αυτά των σχημάτων 6.12. και 6.13. διότι όπως φαίνεται στο Σχήμα αυτό, τα μείγματα με ποσοστά μέχρι 30% έχουν μειωμένες αντοχές σε σχέση με την καθαρή άμμο.



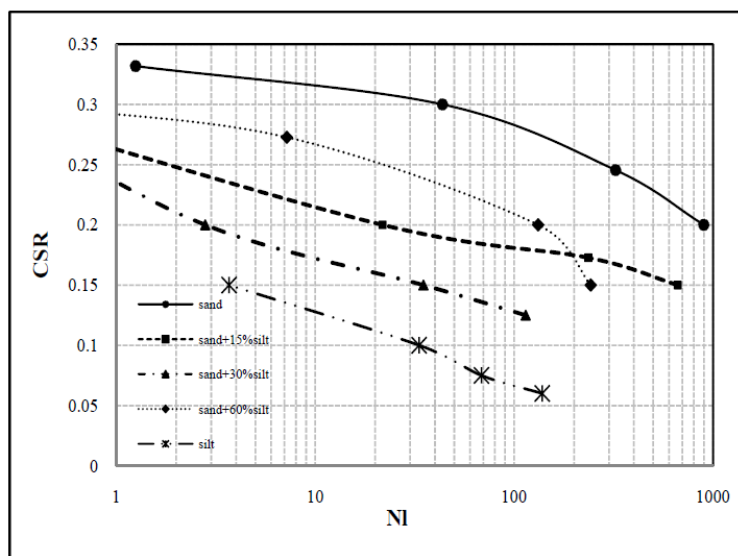
Σχήμα 6.11. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 50kPa



Σχήμα 6.12. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση (Αδριανόπουλος, Μπουκοβάλας και Παπαδημητρίου ; 2003)



Σχήμα 6.13. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση (Αδριανόπουλος, Μπουκοβάλας και Παπαδημητρίου ; 2003)



Σχήμα 6.14. Επίδραση μη πλαστικών λεπτόκοκκων υλικών σε δοκίμια καθαρής άμμου και σε μείγματα άμμου-υλίου, στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση $p' = 60 \text{ kPa}$, υπό σταθερή σχετική πυκνότητα $D_r = 60\%$ (Hassan Sharafi and Mohammad Hassan Baziar ; 2010)

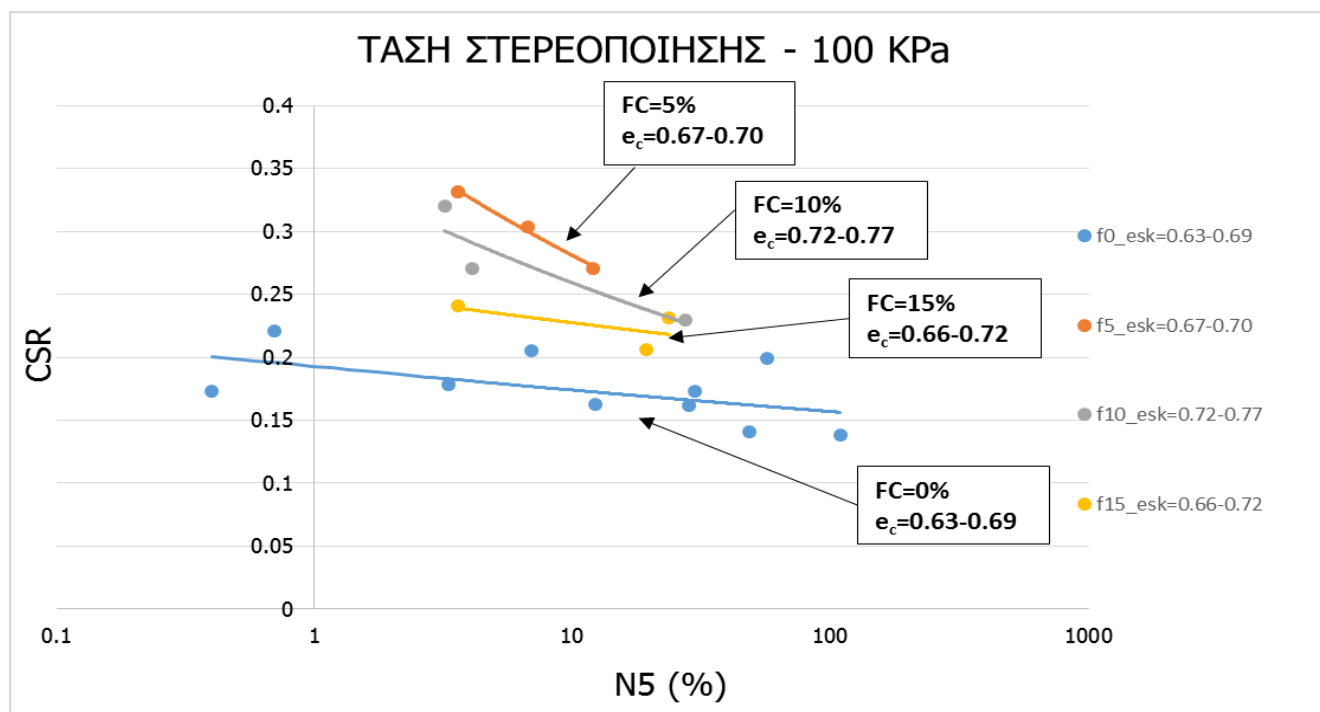
6.4.1.2. Τάση στερεοποίησης 100kPa

Στο Σχήμα 6.15. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για σειρά πειραμάτων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε κοινή αρχική ενεργό τάση ίση με 100kPa. Τα πειράματα αυτά ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, από 0% (καθαρή άμμος) μέχρι και 15%.

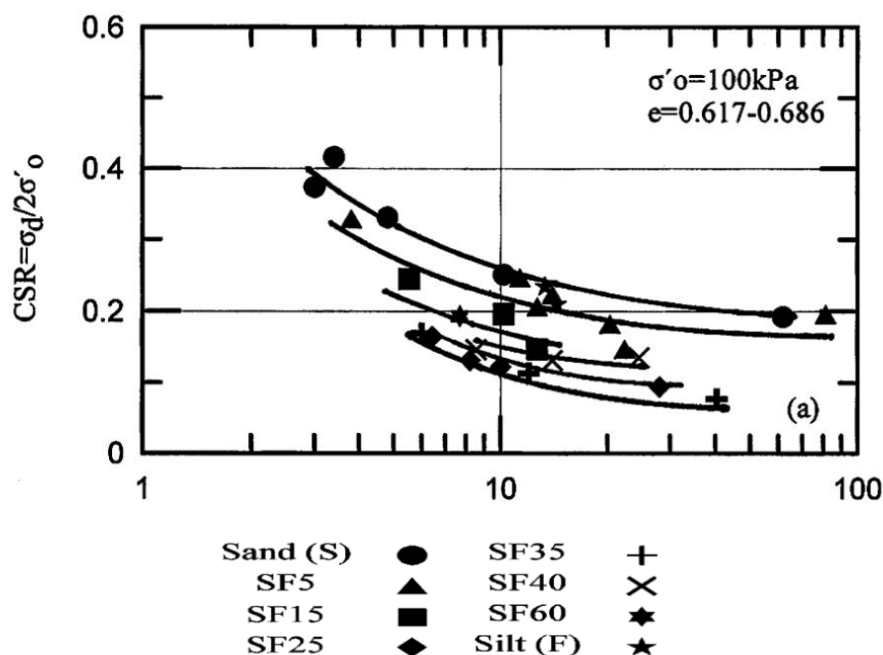
Παρατηρώντας τις καμπύλες ρευστοποίησης του Σχήματος 6.15., φαίνεται ότι τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa εμφανίζουν μια διαφοροποίηση στην συμπεριφορά ως προς το αντίστοιχο διάγραμμα των 50kPa. Ενώ η προσθήκη μικρής ποσότητας λεπτόκοκκου υλικού σε ποσοστό μέχρι 5% οδηγεί σε δυσανάλογη αύξηση της διατμητικής αντοχής ως προς την ρευστοποίηση, προσθήκη μεγαλύτερου κλάσματος λεπτόκοκκου σε 10% ή 15% μειώνει την αντοχή σε σχέση με το κλάσμα 5% αλλά όχι σε σχέση με την καθαρή άμμο. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% έχουν παρόμοια συμπεριφορά και πλησιάζουν την αντοχή έναντι ρευστοποίησης των δοκιμών με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%. Αντίθετα τα δοκίμια με μεγαλύτερο κλάσμα λεπτόκοκκου υλικού της τάξης του 15% βρίσκονται κάπου ενδιάμεσα της καθαρής άμμου και του μείγματος με 5% λεπτόκοκκο υλικό, σε όρους αντοχής έναντι ρευστοποίησης. Σε αντίθεση με τις καμπύλες ρευστοποίησης του Σχήματος 6.11. όπου παρουσιάζονταν δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 50kPa, αυτά τα δοκίμια έχουν μία τάση περίσφιξης 100kPa η οποία φαίνεται να παρεμποδίζει την αναδιάταξη των κόκκων της άμμου με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες πιέσεις πόρων και έτσι τα μείγματα με ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού μεγαλύτερα του 5% να παρουσιάζουν μειωμένες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια με κλάσμα λεπτόκοκκου υλικού 5%. Για τις πυκνότητες

που εξετάζονται η ιλύς έχει πληρώσει όλα τα κενά ανάμεσα στους κόκκους της άμμου με αποτέλεσμα η παρουσία ιλύος έξω από τα κενά των πόρων να μειώνει τις ενεργές επαφές των κόκκων της άμμου άρα και την αντοχή σε ρευστοποίηση.

Τα αποτελέσματα αυτών των καμπύλων ρευστοποίησης (Σχήμα 6.15.) που παρουσιάζουν δοκίμια τα οποία είναι στερεοποιημένα σε ενεργό τάση 100kPa, έρχονται σε αντίθεση με κάποια από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από το Σχήμα 6.16. (Παπαδοπούλου και Τίκα ; 2008), για πειράματα που έγιναν στο παρελθόν σε τριαξονική συσκευή, σε δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa και είχαν πυκνότητες παρόμοιες με αυτές των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού όλο και μειώνει την αντοχή έναντι ρευστοποίησης. Η κύρια διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των πειραμάτων αυτών και των αντίστοιχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ότι ενώ στο Σχήμα 6.15. όλα τα μείγματα παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή σε σχέση με την καθαρή άμμο, στο 6.16. όλα τα μείγματα παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε σχέση με την καθαρή άμμο. Αντίθετα, πειράματα που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση παλιότερης διπλωματικής εργασίας από τον Τομέα Γεωτεχνικής (Μπανιάς, 2011), οι καμπύλες ρευστοποίησης ταυτίζονται πλήρως με τις αντίστοιχες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μια άλλη χαρακτηριστική διαφορά είναι το γεγονός ότι στην παρούσα εργασία η σύγκριση γίνεται για παρόμοιες τιμές δείκτη σκελετού ενώ στην εργασία των Παπαδοπούλου και Τίκα (2008) η σύγκριση γίνεται για παρόμοιες τιμές του δείκτη πόρων της άμμου και των μειγμάτων.



Σχήμα 6.15. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 6.16. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση (Ανθή Παπαδοπούλου και Θεοδώρα Τίκα ; 2008)

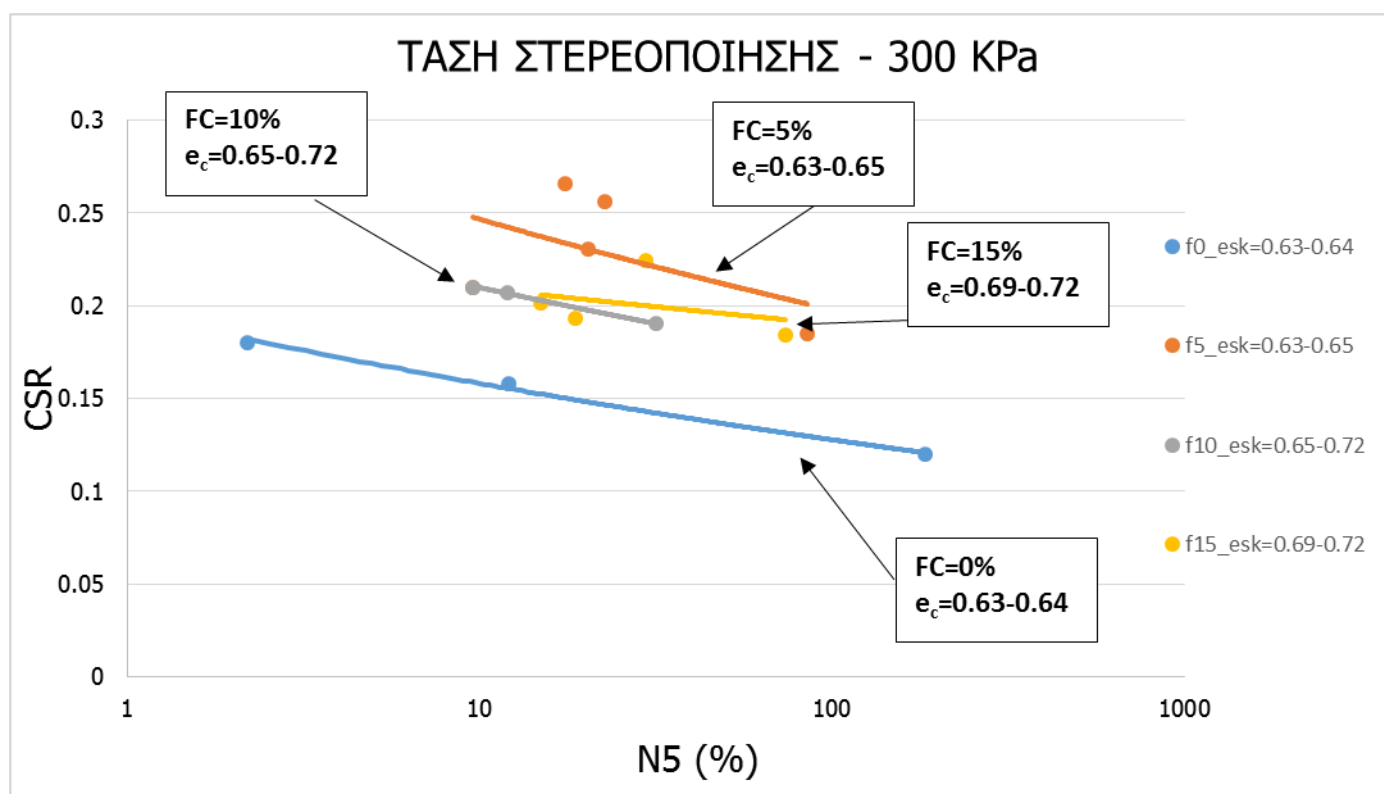
6.4.1.3. Τάση στερεοποίησης 300kPa

Στο Σχήμα 6.17. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για σειρά πειραμάτων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε κοινή αρχική ενεργό τάση ίση με 300kPa. Τα δοκίμια ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, από 0% (καθαρή άμμος) μέχρι και 15%.

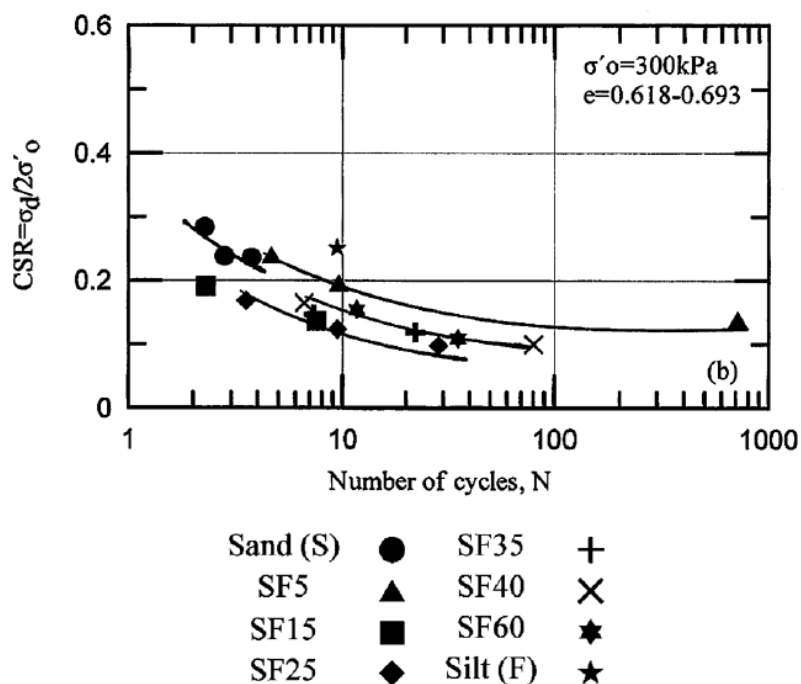
Μια γεννικότερη παρατήρηση που μπορεί να γίνει για το Σχήμα 6.17. είναι ότι και πάλι βλέπουμε το μείγμα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% να έχει τις μεγαλύτερες αντοχές έναντι ρευστοποίησης, όπως παρατηρήσαμε και στο διάγραμμα με τα δοκίμια που είναι στερεοποιημένα στα 100kPa. Μια μικρή διαφορά όμως, είναι το γεγονός ότι τα δοκίμια με ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού 10% και 15% παρ'όλο που εξακολουθούν να διατηρούν αντοχές μεγαλύτερες από αυτές της καθαρής άμμου και μικρότερες από αυτές του μείγματος με ποσοστό λεπτόκοκκων 5%, έχουν σχεδόν ταυτιστεί μεταξύ τους, δηλαδή έχουν σχεδόν ίδιες αντοχές.

Παρατηρείται επίσης ότι μεγαλύτερη τάση για συστολή και πάλι παρουσιάζει η καθαρή άμμος ενώ την μικρότερη συστολικότητα φαίνεται να έχει το μείγμα με 5% λεπτόκοκκο υλικό. Η περαιτέρω προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού στην άμμο πέραν του 10% φαίνεται να μην επιδρά ούτε θετικά αλλά ούτε και αρνητικά αφού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17. οι καμπύλες ρευστοποίησης των μειγμάτων με 15% και 10% λεπτόκοκκο υλικό σχεδόν ταυτίζονται.

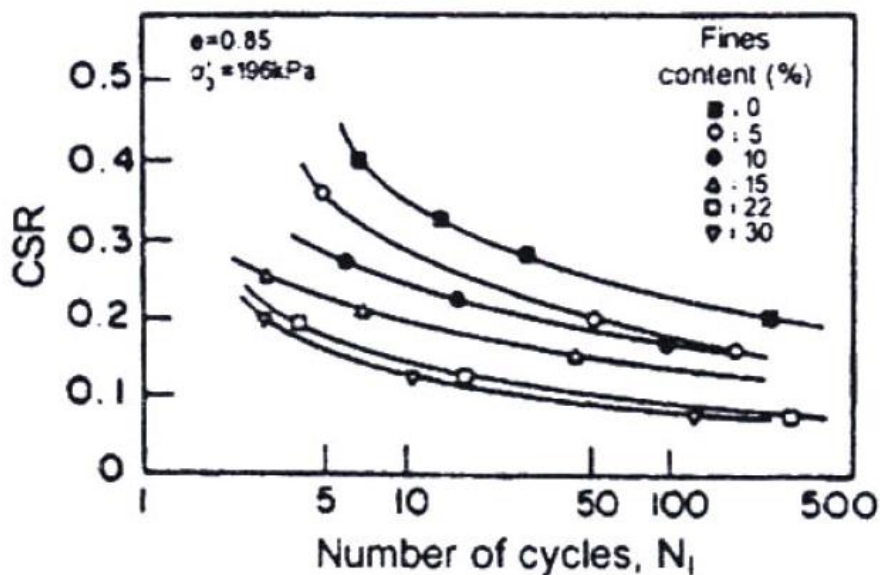
Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν εν μέρη με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας (Παπαδοπούλου και Τίκα ; 2008). Στο Σχήμα 6.18. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης αυτών των πειραμάτων, όπου έγιναν σε μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, και εδώ φαίνεται ότι τα μείγματα με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με την καθαρή άμμο. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού 10% και 15% έχουν μικρότερη αντοχή σε ρευστοποίηση από την καθαρή άμμο, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.19. (Askari et al. 2011), άλλα πειράματα που έγιναν στο παρελθόν σε εδαφικά δοκίμια στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση 200kPa, παρουσίασαν μειωμένη αντοχή έναντι ρευστοποίησης με την αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού. Μια βασική διαφορά όμως των πειραμάτων αυτών σε σχέση με τα αντίστοιχα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αρκετά μεγάλη διαφορά στους δείκτες πόρων, ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει αισθητά τις αντοχές των δοκιμών και έτσι οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στις καμπύλες CSR-N5(%) ίσως να έγκειται στο γεγονός αυτό.



Σχήμα 6.17. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα $p'=300\text{kPa}$



Σχήμα 6.18. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση (Ανθή Παπαδοπούλου και Θεοδώρα Τίκα ; 2008)

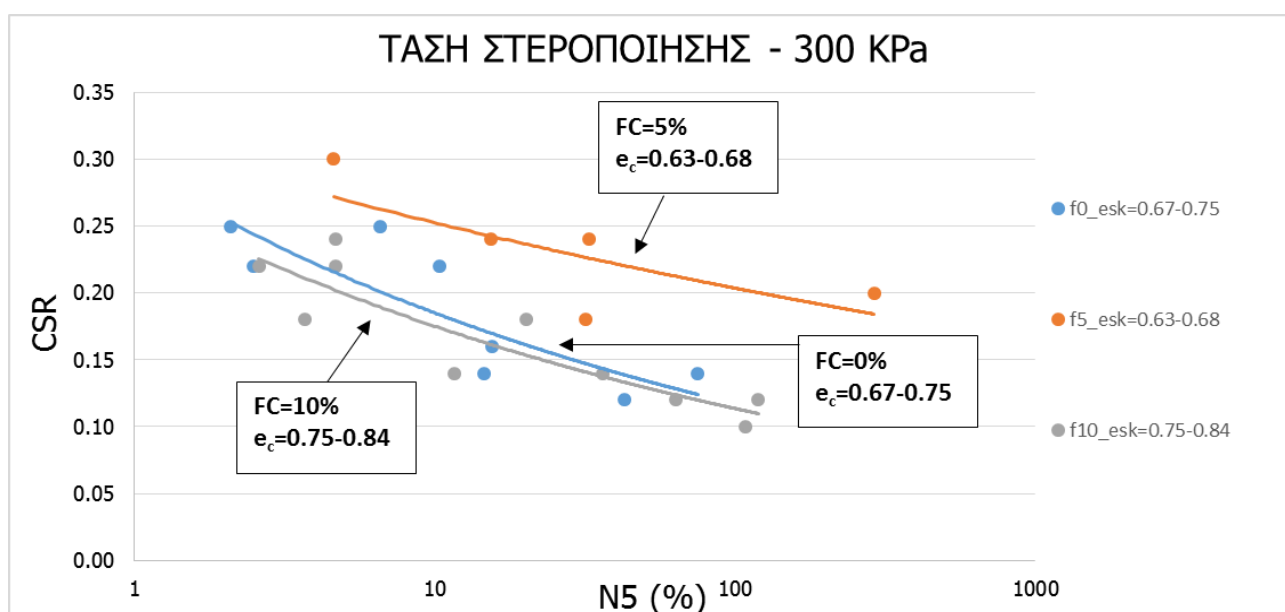


Σχήμα 6.19. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση για δοκίμια με δείκτη πόρων κοντά στο $e = 0.85$ (Faradjollah Askari, Rouzbeh Dabiri, Ali Shafiee, Mohammad Kazem Jafari; 2011)

Νέα σειρά πειραμάτων

Μια καινούργια σειρά πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα πειράματα αυτά έγιναν σε δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa και σε δείκτες πόρων σκελετού που κυμαίνονται από $e=0.63$ μέχρι $e=0.84$. Τα δοκίμια ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδρασή του στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης υπο ανακυκλική φόρτιση. Με βάση τα αποτελέσματα από τα πειράματα αυτά, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες λόγου ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κυκλών φόρτισης για αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$, έτσι ώστε να επαληθεύσουμε τα προηγούμενα αποτελέσματα για την επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού.

Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων και οι αντίστοιχες καμπύλες ρευστοποίησης φαίνονται στο 6.20. Παρατηρούμε ότι και πάλι τα δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% έχουν σημαντικά αυξημένες αντοχές έναντι ρευστοποίησης, μια διαπίστωση που επαληθεύεται και από τα προηγούμενα πειράματα που έχουν ήδη παρουσιαστεί. Μια σημαντική διαφορά που παρατηρείται σε αυτά τα πειράματα (Σχήμα 6.20.) σε σχέση με τα προηγούμενα (Σχήμα 6.17.), είναι ότι τα μείγματα με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% παρουσιάζουν ίσες ή και ελαφρά μικρότερες αντοχές ως προς την καθαρή άμμο έναντι ρευστοποίησης. Ωστόσο, η συμπεριφορά αυτή μπορεί να ευθύνεται από το γεγονός ότι ο δείκτης πόρων σκελετού των δοκιμών που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 10% είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο δείκτη πόρων σκελετού για τα δοκίμια της καθαρής άμμου και άρα ουσιαστικά τα μείγματα άμμου-ιλύος με 10% λεπτόκοκκο υλικό να έχουν συμπεριφορά πιο χαλαρών δοκιμών σε σχέση με τα αντίστοιχα της καθαρής άμμου.



Σχήμα 6.20. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα σε αρχική ενεργό τάση $p' = 300\text{kPa}$

6.4.2. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων σκελετού (esk)

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης των ανακυκλικών πειραμάτων της παρούσης διπλωματικής εργασίας, κανονικοποιημένες ως προς την συνάρτηση $f(esk)=esk^{-1.3}$ (Lo Presti et al. 1997) όπου esk είναι ο δείκτης πόρων σκελετού των δοκιμίων πριν από την διάτμηση. Αυτή η επιλογή έγινε με το σκεπτικό να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αφού υπήρχε μια μικρή διασπορά στους δείκτες πόρων κενών των δοκιμίων λόγω του ότι μερικά από αυτά ήταν πιο πυκνά και άλλα πιο χαλαρά. Έτσι με την κανονικοποίηση αυτή, μεγάλωσε το πλήθος των πειραμάτων κάθε ομάδας με αποτέλεσμα να έχουμε μια πιο ακριβή ένδειξη την συμπεριφοράς των διαφόρων δοκιμίων.

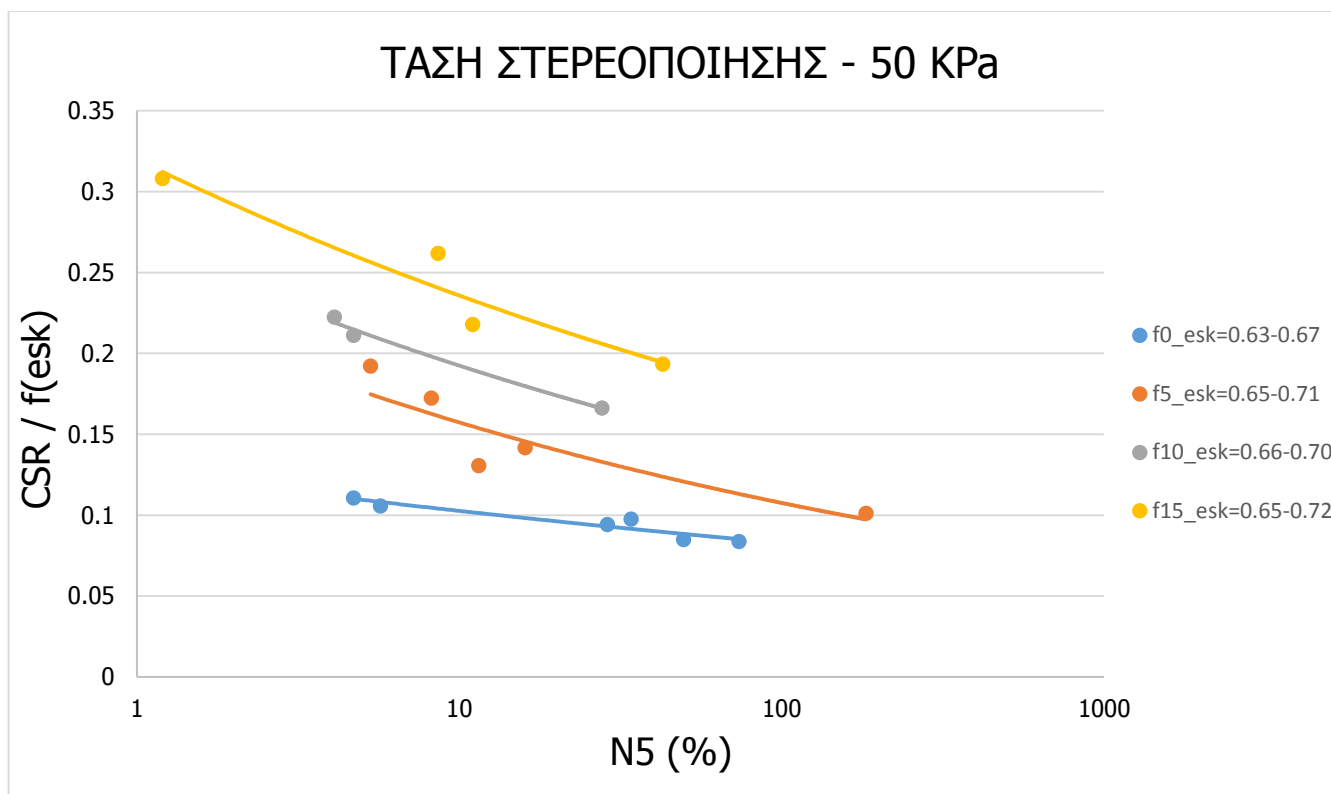
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως από ερευνητές, όταν θέλουν να εξετάσουν και να συγκρίνουν πειράματα τα οποία παρασκευάζονται με διαφορετικό τρόπο, από διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, διαφορετικά υλικά, διαφορετικές πυκνότητες ή ακόμη και από διαφορετικές χρονολογίες. Παρ' όλα αυτά, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι η κανονικοποίηση αυτή περιγράφει το σύνολο των πειραμάτων της βιβλιογραφίας, αφού το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι αρκετά πολύπλοκο και υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

6.4.2.1. Τάση στερεοποίησης 50kPa

Όλα τα δοκίμια του Σχήματος 6.21. έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa και έχουν χωριστεί σε τέσσερις ομάδες με βάση το κλάσμα λεπτόκοκκου υλικού που περιέχεται σε κάθε δοκίμιο. Ακολούθως κανονικοποιήθηκαν με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα που ήταν χωρίς κανονικοποίηση, παρατηρείται μια αναλογική αύξηση της αντοχής έναντι ρευστοποίησης με την αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού μέχρι 15%. Πιο συγκεκριμένα, η καθαρή άμμος παρουσιάζει μια αντοχή έναντι ρευστοποίησης περίπου 2-2.5 φορές μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη αντοχή του μείγματος άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%. Οι καμπύλες των ομάδων με κλάσμα λεπτόκοκκου παράγοντα 5% και 10% βρίσκονται μεταξύ της καμπύλης της καθαρής άμμου και του μείγματος με κλάσμα λεπτόκοκκου 15%, όπως ακριβώς παρατηρείται και στα διαγράμματα χωρίς την κανονικοποίηση.

Θεωρώντας ότι με την κανονικοποίηση απαλείφεται η επίδραση της πυκνότητας το Σχήμα 6.21 υποδεικνύει ότι οι διαφορές που παρατηρούνται στην αντίσταση σε ρευστοποίηση είναι αποτέλεσμα του ποσοστού της ιλύος.



Σχήμα 6.21. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 50kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

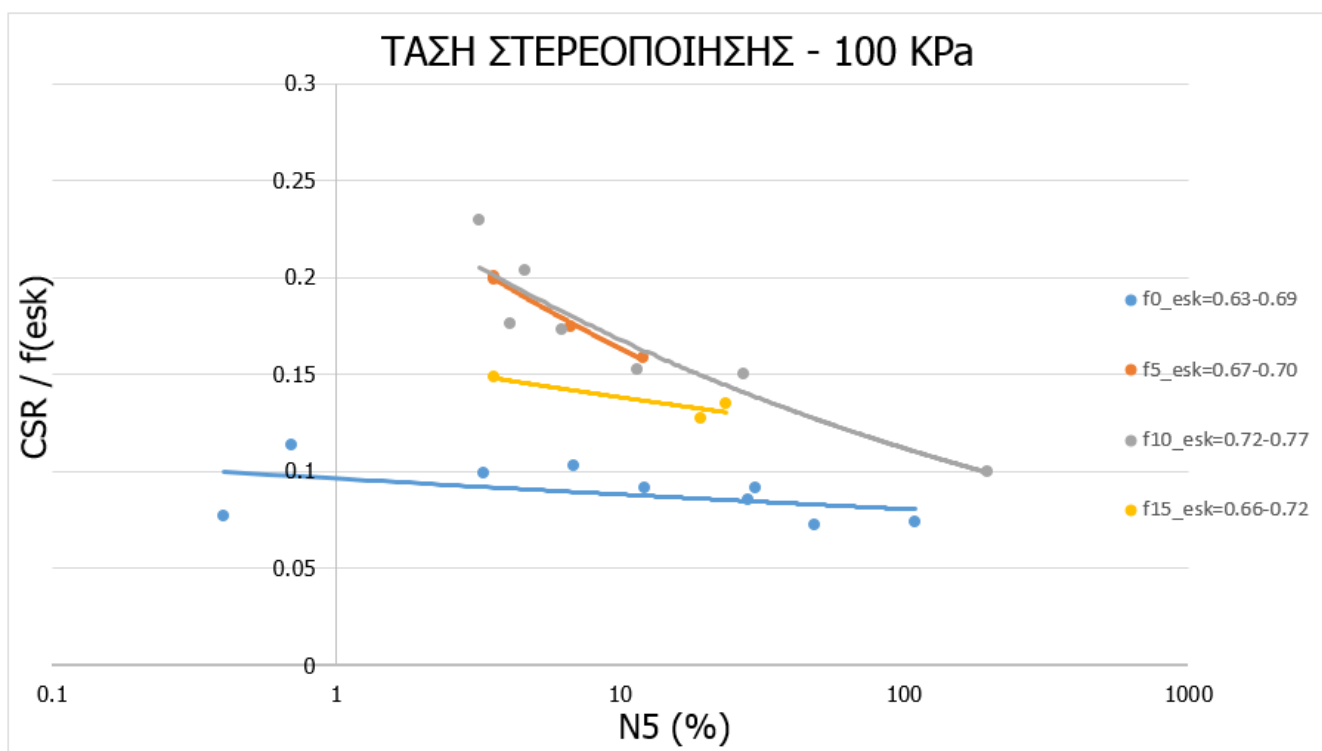
6.4.2.2. Τάση στερεοποίησης 100kPa

Στο Σχήμα 6.22. παρουσιάζεται η καμπύλη ρευστοποίησης για την σειρά πειραμάτων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε κοινή αρχική ενεργό τάση ίση με 100kPa. Τα πειράματα αυτά ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, από 0% (καθαρή άμμος) μέχρι και 15% και ακολούθως κανονικοποιήθηκαν με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Αντιθέτως με το αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.15.), τώρα οι καμπύλες των δοκιμών με 5% και 10% λεπτόκοκκο υλικό φαίνονται να ταυτίζονται και να έχουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και από την καθαρή άμμο, αλλά και από τα δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 15%. Επίσης, η άμμος και πάλι παρουσιάζει την μεγαλύτερη συστολικότητα σε σχέση με τα μείγματα άμμου-ιλύος, ενώ η καμπύλη στην οποία αντιστοιχούν μείγματα με 15% λεπτόκοκκο υλικό βρίσκεται μεταξύ των καμπυλών που περιέχουν 5% λεπτόκοκκο υλικό (ή 10% αφού ταυτίζονται) και της καθαρής άμμου.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, μπορούμε να πούμε ότι οι καμπύλες μετά την κανονικοποίηση για δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 100kPa, έχουν

σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες καμπύλες χωρίς κανονικοποίηση, εκτός από το γεγονός ότι η καμπύλη των μειγμάτων που περιέχουν 5% και 10% λεπτόκοκκο υλικό ταυτίζονται και ακολουθεί η καμπύλη με τα δοκίμια που περιέχουν λεπτόκοκκο παράγοντα 15%. Αυτή η παρατήρηση μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το βέλτιστο κλάσμα λεπτόκοκκων για τάση στερεοποίησης 100kPa βρίσκεται μεταξύ του 5% και του 10%.



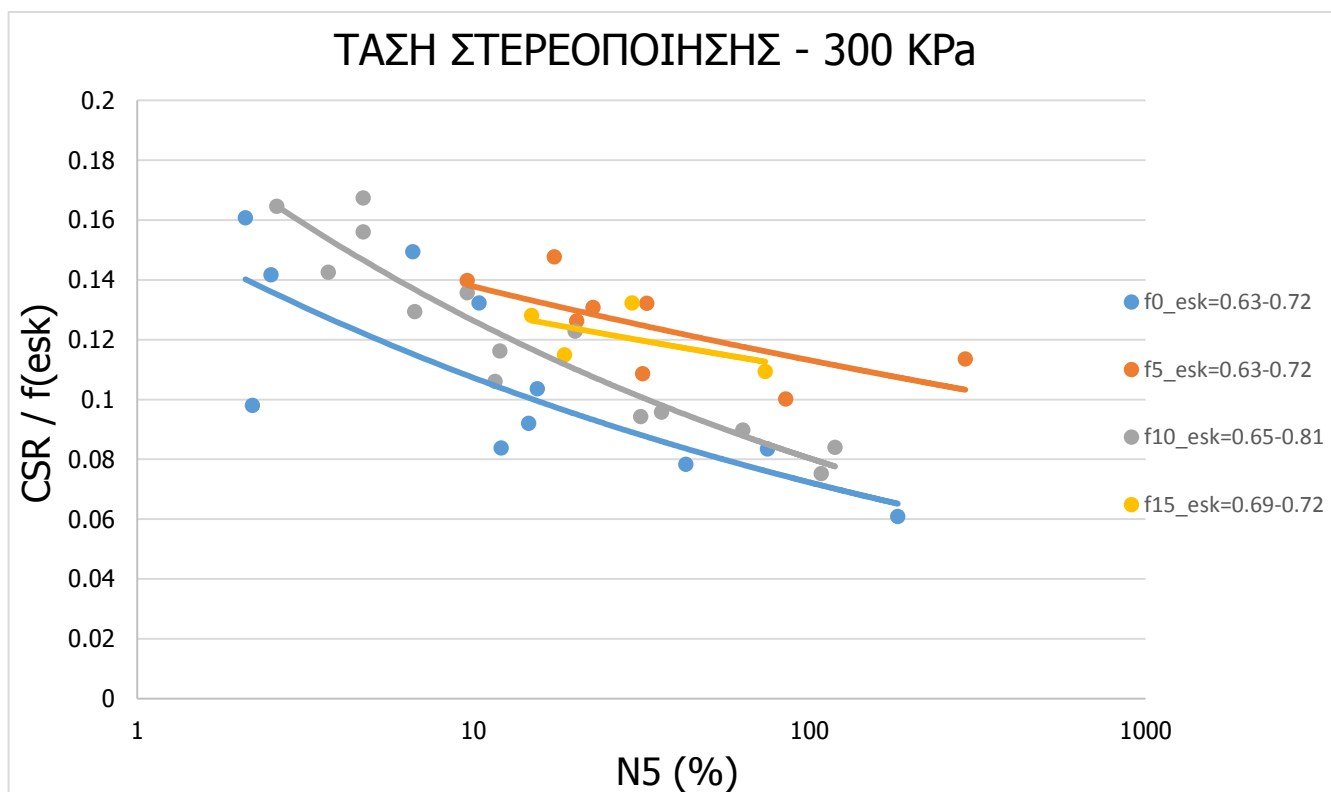
Σχήμα 6.22. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

6.4.2.3. Τάση στερεοποίησης 300kPa

Στο Σχήμα 6.23. παρουσιάζεται η καμπύλη ρευστοποίησης για σειρά πειραμάτων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε κοινή αρχική ενεργό τάση ίση με 300 KPa. Τα δοκίμια ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, από 0% (καθαρή άμμος) μέχρι και 15% και ακολούθως κανονικοποιήθηκαν με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε και το οποίο έρχεται σε αντίθεση με το αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.17.) είναι ότι τα δοκίμια με ποσοστά λεπτόκοκκου παράγοντα 5% και 15%, παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αντίσταση έναντι ρευστοποίησης. Την μικρότερη αντίσταση έναντι ρευστοποίησης, όπως είναι αναμενόμενο, παρουσιάζει η καθαρή άμμος που δεν έχει λεπτόκοκκο υλικό

να πληρώσει τα κενά της με αποτέλεσμα να αναπτύσσει πιέσεις πόρων γρηγορότερα απο τα μείγματα. Τα μείγματα με κλάσμα 10% λεπτόκοκκου υλικού παρουσιάζουν ελαφρά βελτιωμένη αντοχή σε σχέση με την καθαρή άμμο αλλά χειρότερη συμπεριφορά απο τα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού 5% και 15%.



Σχήμα 6.23. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

Νέα σειρά πειραμάτων κανονικοποιημένα ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

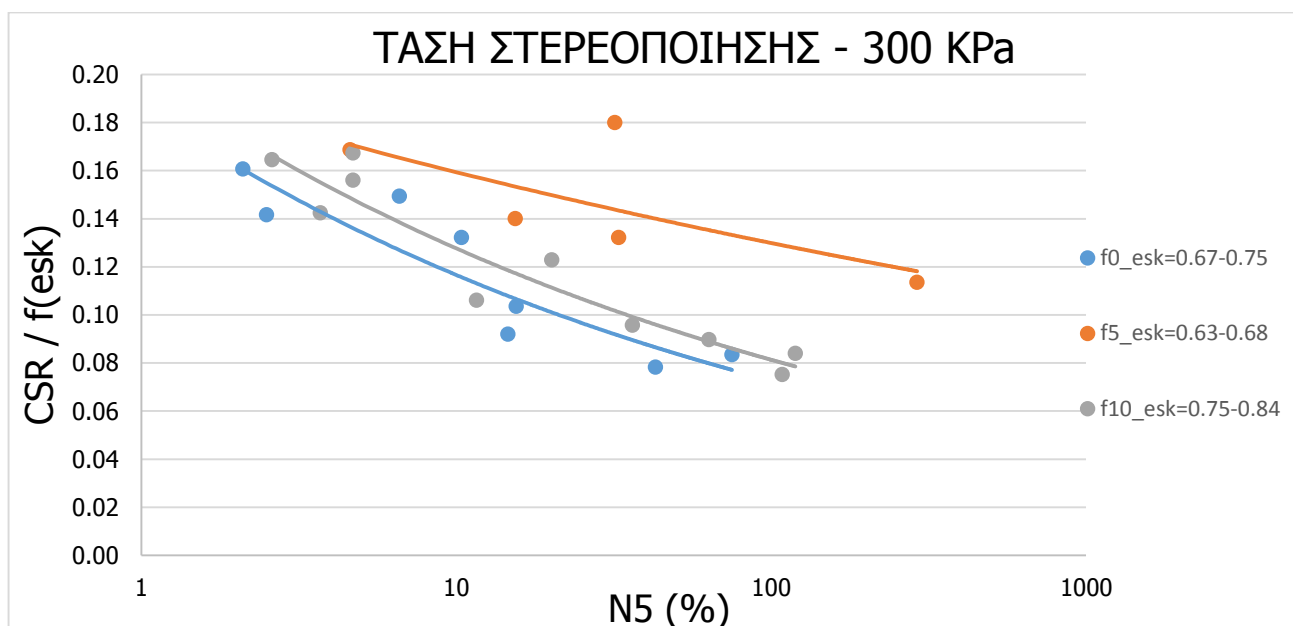
Η νέα σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελείται απο δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300 KPa και έχουν δείκτες πόρων που κυμαίνονται απο $e=0.63$ μέχρι και $e=0.84$. Τα δοκίμια αυτά ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης υπο ανακυκλική φόρτιση. Ακολουθώντας, κανονικοποιήθηκαν με βάση τον τύπο $f(esk)=esk^{-1.3}$ έτσι ώστε να υπάρχει μια κοινή βάση σύγκρισης και να είναι σχετικώς ανεξάρτητα του δείκτη πόρων σκελετού.

Με την πιο πάνω κανονικοποίηση ουσιαστικά έχουμε απαλλαγθεί απο τις αποκλίσεις που υπήρχαν στους δείκτες πόρων σκελετού. Έτσι, τώρα έχουμε την δυνατότητα να

κάνουμε πιο αντικειμενικές παρατηρήσεις για την επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων στην αντίσταση ρευστοποίησης.

Αυτό που παρατηρείται μέσα από αυτή τη σειρά πειραμάτων, επαληθεύει απόλυτα τα προηγούμενα αποτελέσματα των πειραμάτων του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.24., τα δοκίμια με κλάσμα λεπτόκοκκου υλικού 5% και πάλι παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με την καθαρή άμμο, αλλά και τα δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%. Επίσης, τα δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος 10% παρουσιάζονται μεταξύ της καθαρής άμμου και του μείγματος άμμου-ιλύος με 5% λεπτόκοκκο υλικό, γεγονός που επαληθεύει τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα.

Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε από το Σχήμα 6.24. είναι ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού μέχρι το 5% αυξάνει την αλληλεμπλοκή μεταξύ των κόκκων και συνεπώς η αντοχή έναντι ρευστοποίησης αυξάνεται. Η περαιτέρω προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού σε ποσοστό 10% φαίνεται να μειώνει την αντοχή σε σχέση με τα μείγματα άμμου-ιλύος που περιέχουν 5% λεπτόκοκκο υλικό αλλά συνεχίζει να παραμένει αυξημένη ως προς την καθαρή άμμο. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται λογικό, επειδή ουσιαστικά το περιττό ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών εισχωρεί στις επαφές του σκελετού της άμμου και λόγω του ότι έχουν πλέον ήδη γεμίσει τα κενά, οι ενεργές επαφές να μειώνονται και επομένως η αντοχή σε ρευστοποίηση να μειώνεται.



Σχήμα 6.24. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

Το ανωτέρω διάγραμμα (Σχήμα 6.24) υποδεικνύει ότι η συνεχώς αυξανόμενη αντοχή των μειγμάτων με την αύξηση του ποσοστού ιλύος του Σχήματος ... (μη κανονικοποιημένου) οφείλεται στην αυξημένη πυκνότητα των μειγμάτων π.χ. για τον

ίδιο δείκτη πόρων εδαφικού σκελετού τα μείγματα με 15% ιλύ έχουν μικρότερο δείκτη πόρων από εκείνα με 5% ιλύ.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και μετά τις κανονικοποιήσεις τα μείγματα φαίνεται να έχουν πάντα μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση από την καθαρή άμμο.

6.4.3. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων (e)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης των ανακυκλικών πειραμάτων της παρούσης διπλωματικής εργασίας, κανονικοποιημένες τώρα ως προς τον κλασικό δείκτη πόρων (e) της εδαφομηχανικής (global void ratio). Ουσιαστικά, όλα τα CSR ($=\tau\theta z/p'$) που προέκυψαν για τα διάφορα δοκίμια διαιρέθηκαν με την μεταβλητή $f(e)=e^{-1.3}$. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν μια μαθηματική συσχέτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά απο κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (e_{sk}) αφού ο κλασικός δείκτης πόρων e και ο δείκτης πόρων σκελετού e_{sk} σχετίζονται με τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$e = e_{sk}(1-f_c) - f_c$$

όπου: e_{sk} = δείκτης πόρων σκελετού

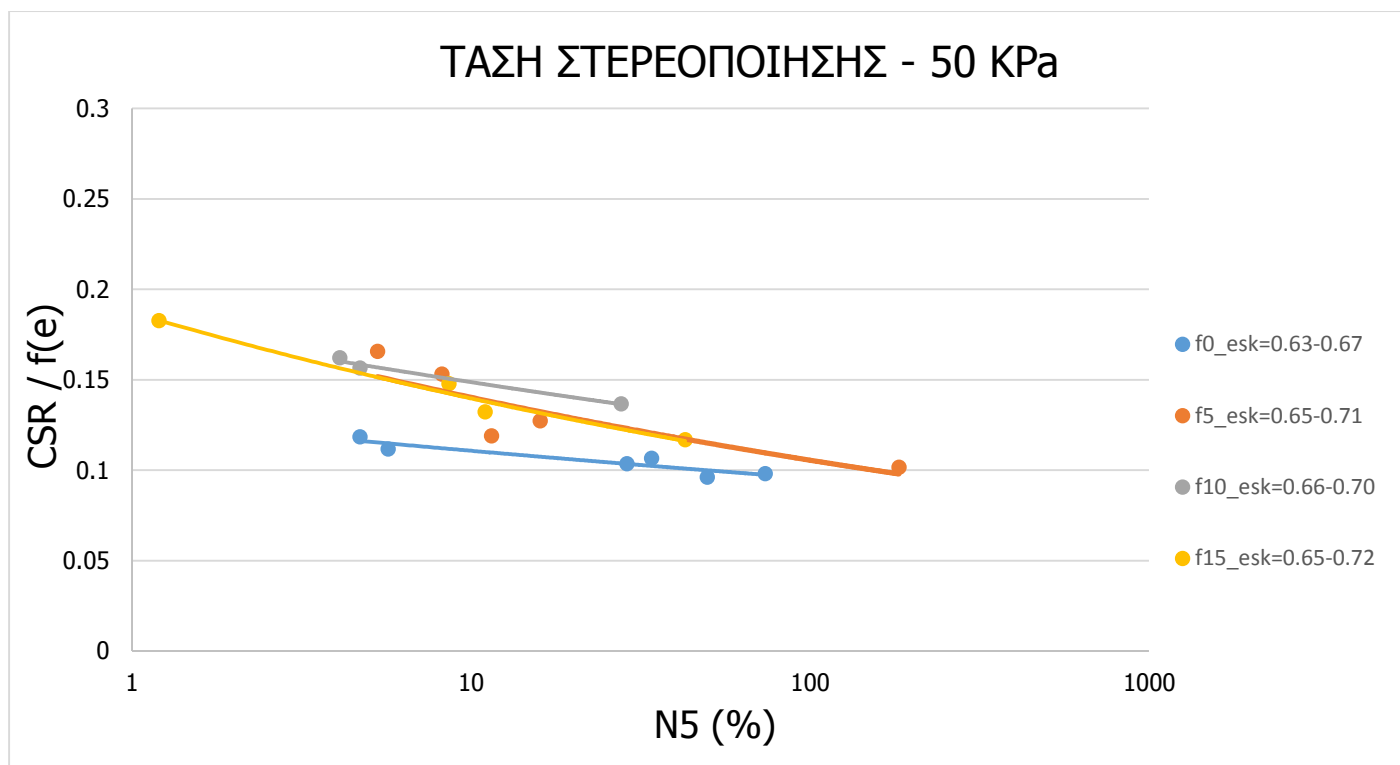
f_c = ξηρή μάζα του λεπτόκοκκου υλικού / συνολική ξηρή μάζα

Παρακάτω παριστάνονται τα αποτελέσματα και οι καμπύλες ρευστοποίησης με αυτή την κανονικοποίηση για κάθε τάση στερεοποίησης ξεχωριστά, ούτως ώστε να προσδιοριστεί η συνεισφορά του λεπτόκοκκου υλικού σε κάθε τάση.

6.4.3.1. Τάση στερεοποίησης 50kPa

Όλα τα δοκίμια του 6.25. έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa και έχουν χωριστεί σε τέσσερις ομάδες με βάση το κλάσμα λεπτόκοκκου υλικού που περιέχεται σε κάθε δοκίμιο. Ακολούθως κανονικοποιήθηκαν με βάση την σχέση $f(e)=e^{-1.3}$.

Αντιθέτως με το αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.11.), σε αυτό το διάγραμμα παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη αντοχή σε ρευστοποίηση παρουσιάζουν τα δοκίμια που περιέχουν 10% λεπτόκοκκο υλικό. Όπως ήταν αναμενόμενο τα πιο συστολικά δοκίμια είναι αυτά της καθαρής άμμου ενώ μεταξύ των δοκιμίων που περιέχουν 10% λεπτόκοκκο υλικό και της καθαρής άμμου βρίσκονται τα δοκίμια με ποσοστά 5% και 15% λεπτόκοκκου υλικού. Οι αντόχές των δοκιμίων αυτών (5% και 15%) έναντι ρευστοποίησης φαίνεται να ταυτίζονται και στους λίγους κύκλους αλλά και στους πολλούς. Επίσης είναι προφανές ότι με αυτού του είδους την κανονικοποίηση και για δοκίμια τα οποία έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa, το βέλτιστο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού είναι το 10% ή ακριβέστερα η δράση της ιλύος είναι ευεργετική, αυξάνει την αντίσταση της άμμου σε ρευστοποίηση.

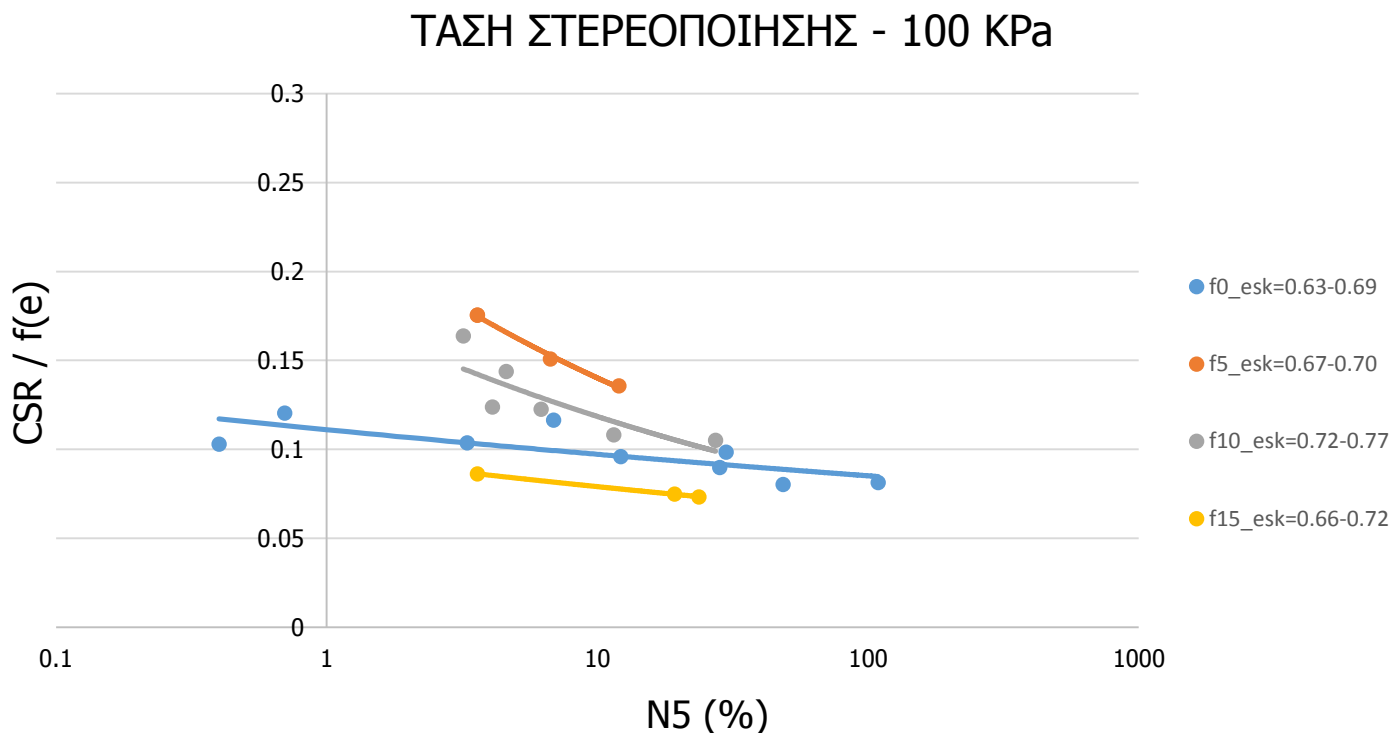


Σχήμα 6.25. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 50kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.4.3.2. Τάση στερεοποίησης 100kPa

Στο Σχήμα 6.26. παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa και κανονικοποιήθηκαν ως προς τον δείκτη πόρων e (global void ratio) με χρήση της σχέσης $f(e)=e^{-1.3}$. Έπειτα, ομαδοποιήθηκαν με βάση το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού που περιέχεται σε κάθε δοκίμιο.

Αυτό που παρατηρούμε από το διάγραμμα αυτό, είναι ότι μοιάζει πολύ με το αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.15.) εκτός από μια βασική διαφορά. Ενώ τα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό 5% λεπτόκοκκου υλικού προβάλλουν την μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση (το οποίο είχαμε παρατηρήσει και προηγουμένως), τώρα την μικρότερη αντοχή την έχει το μείγμα που περιέχει 15% λεπτόκοκκο υλικό κάτι που έρχεται σε αντίθεση με αυτό που παρατηρήσαμε στα προηγούμενα διαγράμματα που όπως είδαμε πιο επιρρεπής σε ρευστοποίηση ήταν η καθαρή άμμος. Επίσης, τα δοκίμια με την καθαρή άμμο και τα μείγματα που περιέχουν 10% λεπτόκοκκο υλικό φαίνεται να παρουσιάζουν παρόμοιες αντοχές κάτι που είναι αντίθετο με το αντίστοιχο μη κανονικοποιημένο διάγραμμα.

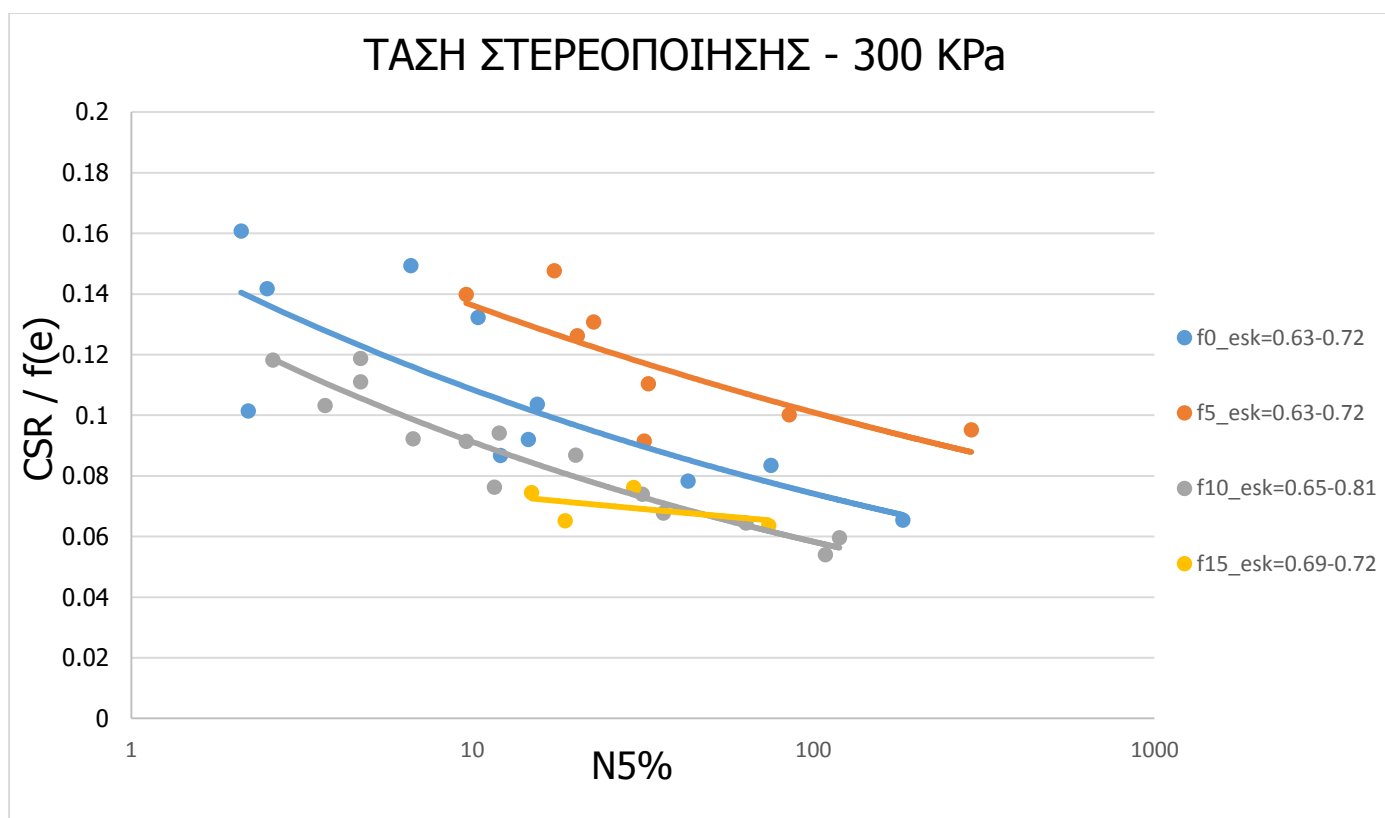


Σχήμα 6.26. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 100kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.4.3.3. Τάση στερεοποίησης 300kPa

Στο Σχήμα 6.27. παρουσιάζεται η καμπύλη ρευστοποίησης για σειρά πειραμάτων που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε κοινή αρχική ενεργό τάση ίση με 300kPa. Τα δοκίμια ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, από 0% (καθαρή άμμος) μέχρι και 15% και ακολούθως κανονικοποιήθηκαν με βάση την σχέση $f(e)=e^{-1.3}$.

Στο Σχήμα 6.27. παρατηρείται ότι τα δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% έχουν και την μεγαλύτερη αντοχή έναντι ρευστοποίησης. Περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών οδηγεί σε κατακόρυφη πτώση της διατμητικής αντοχής σε ρευστοποίηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κανονικοποίηση αυτή δείχνει ότι τα δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% και 15% έχουν τις χαμηλότερες αντοχές, χαμηλότερες ακόμη και από την καθαρή άμμο.



Σχήμα 6.27. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

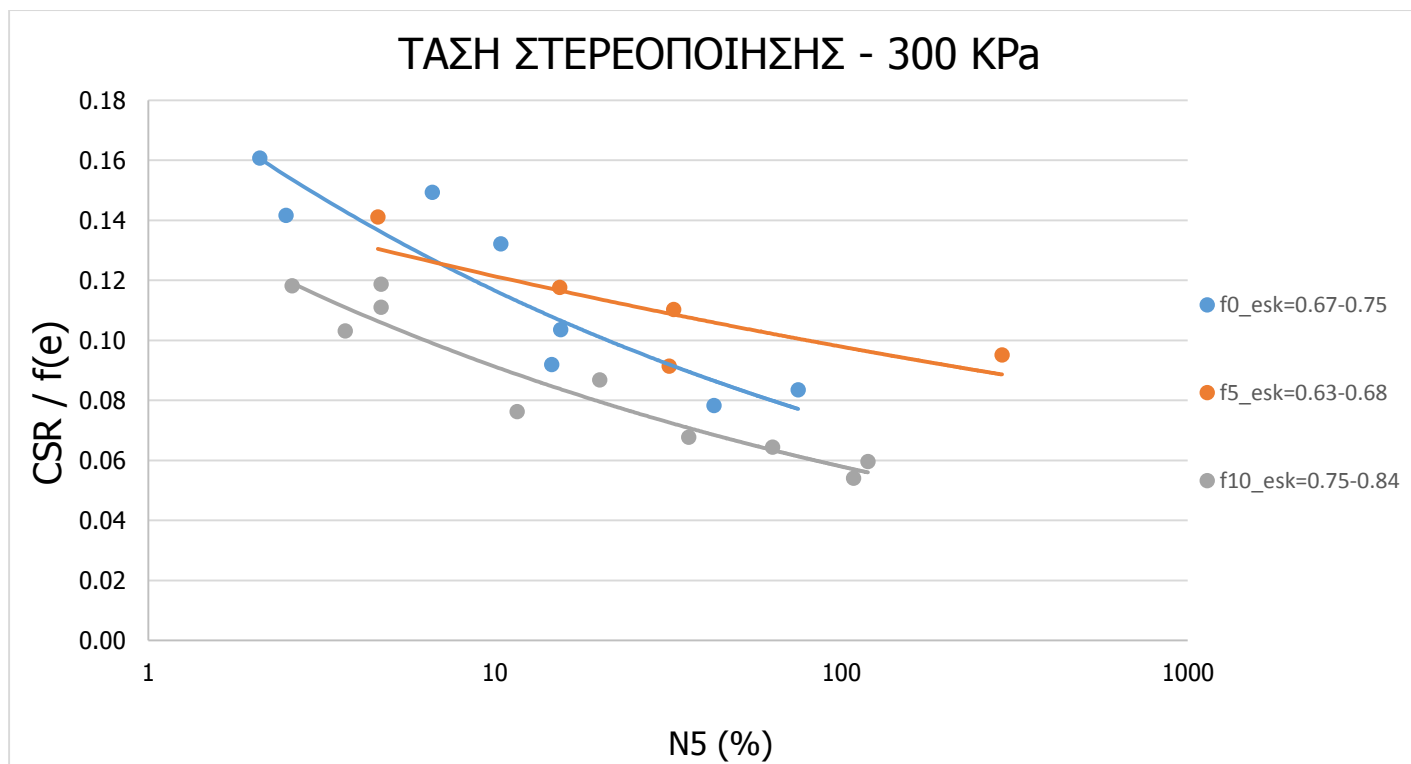
Νέα σειρά πειραμάτων κανονικοποιημένα ως προς τον δείκτη σκελετού (e)

Η νέα σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελείται από δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa και έχουν δείκτες πόρων που κυμαίνονται από $e=0.63$ μέχρι και $e=0.84$. Τα δοκίμια αυτά ομαδοποιήθηκαν με βάση το περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης υπο ανακυκλική φόρτιση. Ακολούθως, κανονικοποιήθηκαν με βάση τον τύπο $f(e)=e^{-1.3}$ έτσι ώστε να υπάρχει μια κοινή βάση σύγκρισης και να είναι σχετικώς ανεξάρτητα του δείκτη πόρων.

Οι σημαντικότερες παρατηρήσεις που μπορούν να εξαχθούν από τα πειράματα αυτά (Σχήμα 6.28.), είναι ότι και πάλι τα δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και ως προς την καθαρή άμμο αλλά και ως προς τα μείγματα με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%. Η σημαντικότερη διαφορά του διαγράμματος αυτού σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα που είναι κανονικοποιημένο ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού για τα ίδια πειράματα (Σχήμα

6.24.) είναι ότι τα δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% παρουσιάζονται ασθενέστερα αν τα συγκρίνουμε με την καθαρή άμμο.

Μια ερμηνεία που μπορούμε να δώσουμε για το φαινόμενο αυτό είναι το ότι όταν γίνεται η κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων, μπορούμε να συγκρίνουμε δοκίμια σχετικώς ανόμοιας πυκνότητας. Με την μέθοδο αυτή, ουσιαστικά είναι σαν να ανάγουμε όλα τα δοκίμια σε ένα ενιαίο δείκτη πόρων. Έτσι, αν συγκρίνουμε ένα δοκίμιο καθαρής άμμου με ένα μείγμα άμμου-ιλύος το οποίο περιέχει 10% λεπτόκοκκο υλικό στον ίδιο δείκτη πόρων είναι λογικό ότι ο λεπτόκοκκος παράγοντας δεν συμβάλλει τόσο, όσο οι κόκκοι της άμμου στην μεταφορά των θλιπτικών δυνάμεων εντός του σκελετού. Επίσης, η αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων χωρίς να μεταβάλλεται ο δείκτης πόρων, οδηγεί σε μείωση των ενεργών επαφών της άμμου με αποτέλεσμα την μείωση των αντοχών εναντι ρευστοποίησης.



Σχήμα 6.28. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια στερεοποιημένα στα 300kPa. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.5. Επίδραση τάσης στερεοποίησης

Στο υποκεφάλαιο αυτό, εξετάζεται μετά απο επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων των ανακυκλικών δοκιμών στρέψης κοίλου δοκιμίου η επίδραση της

τάσης στα οποία στερεοποιήθηκαν τα εδαφικά δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο ρόλος της τάσης στερεοποίησης στην καθαρή άμμο και σε μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτοκόκκου εδαφικού υλικού από 5% έως και 15%.

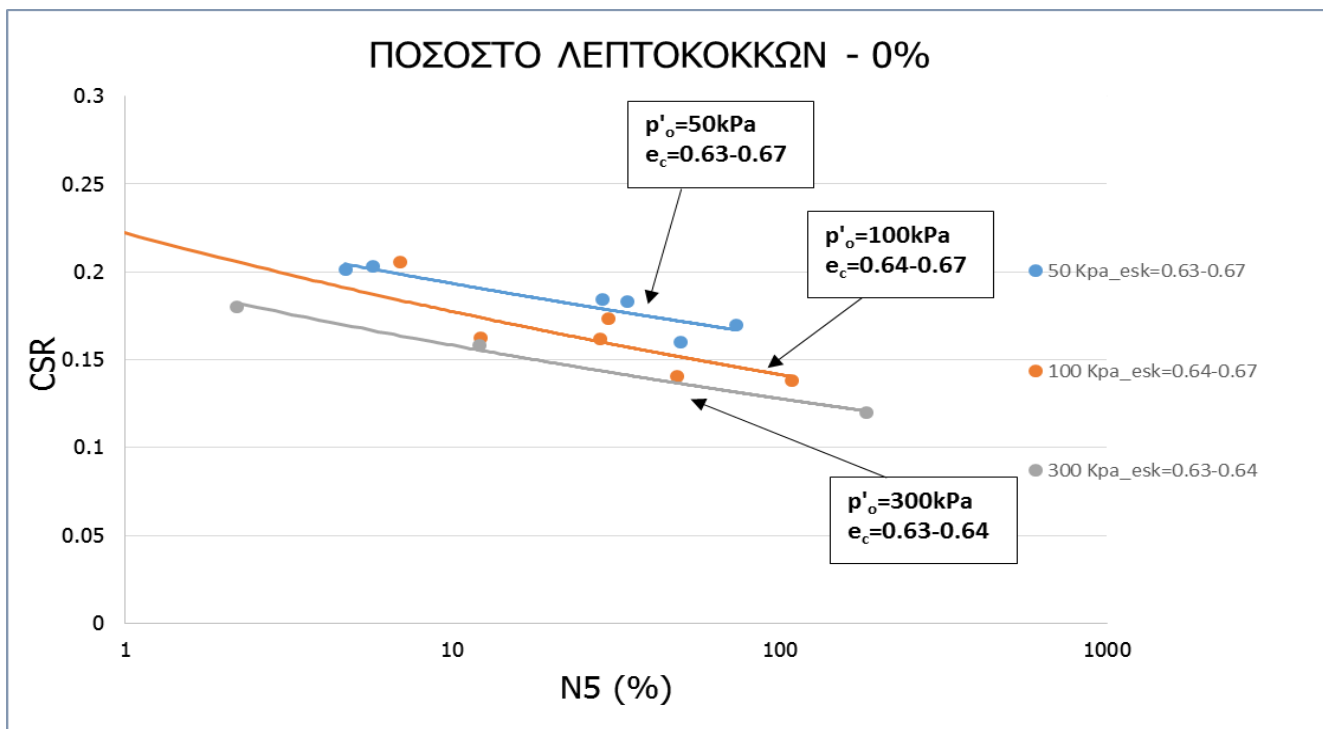
6.5.1. Παρουσίαση διαγραμμάτων

6.5.1.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 0%

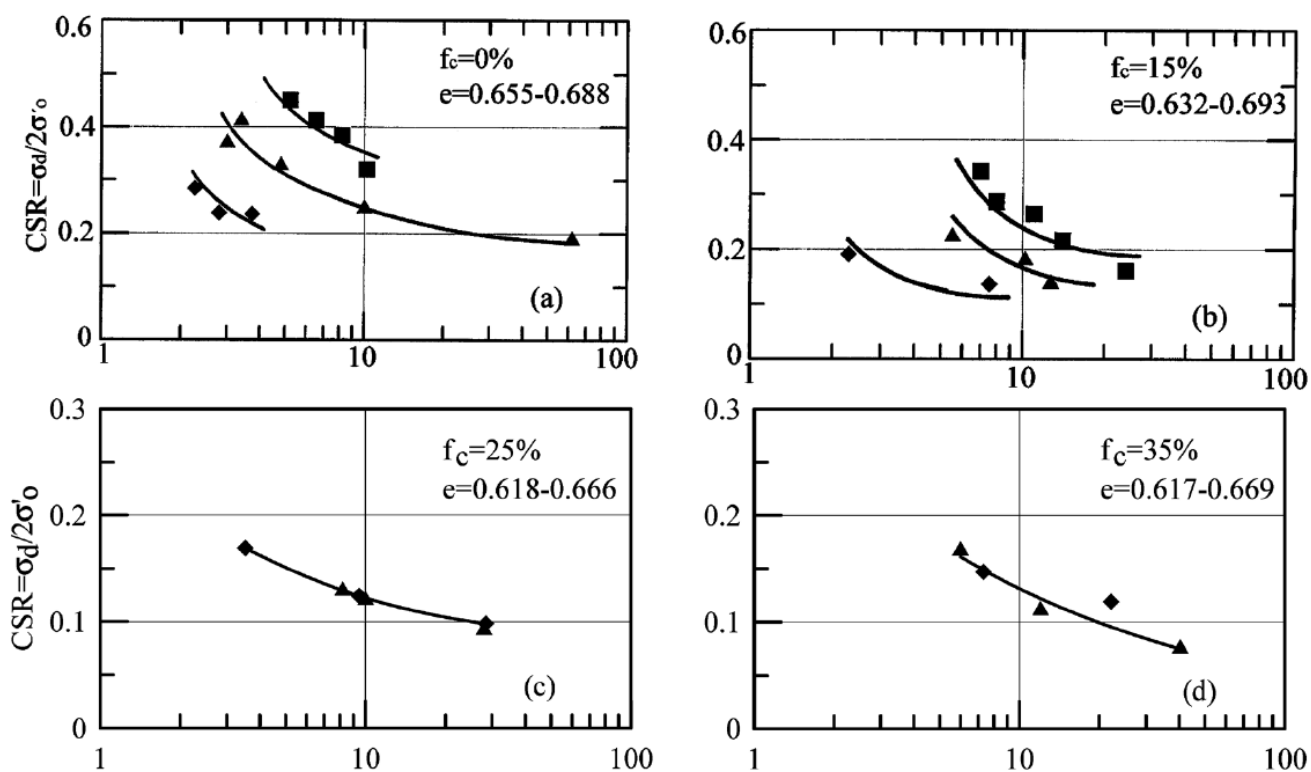
Στο Σχήμα 6.29. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα καθαρής άμμου τα οποία ομαδοποιήθηκαν αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί.

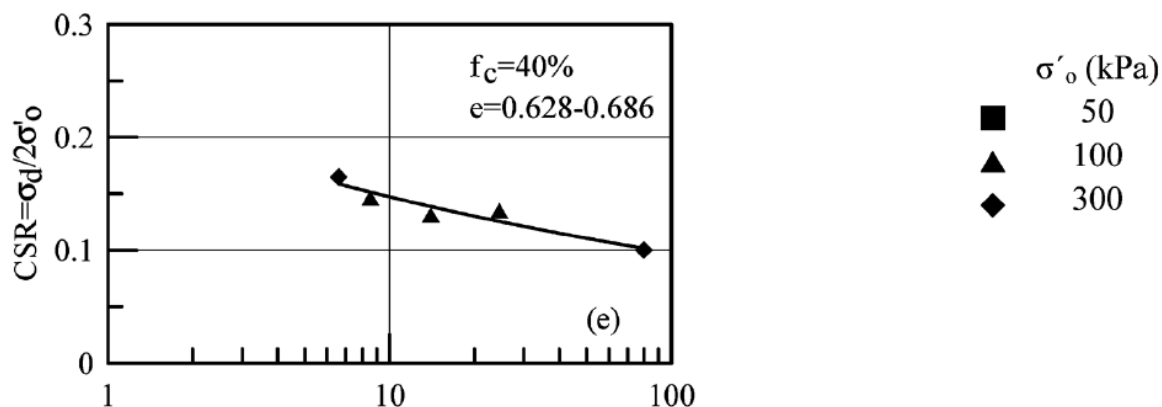
Με βάση την καμπύλη αυτή, είναι ξεκάθαρο ότι τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 50kPa παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά έναντι ρευστοποίησης ενώ τα δοκίμια τα οποία έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 300kPa είναι πιο ευάλωτα σε ρευστοποίηση. Αυτό συμβαίνει επειδή τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε μεγαλύτερες τάσεις στερεοποίησης είναι πιο συστολικά, και άρα αναπτύσσουν μεγαλύτερες πιέσεις πόρων. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι παρακάτω καμπύλες ισαπέχουν, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αντοχή του εδαφικού υλικού μειώνεται όσο αυξάνεται η ενεργός τάση που στερεοποιείται.

Τα αποτελέσματα αυτά ταυτίζονται πλήρως με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.30. (Παπαδοπούλου και Τίκα, 2008), παρατηρείται ότι για πειράματα που έγιναν στο παρελθόν με πυκνότητες παραπλήσιες με αυτές των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα δοκίμια καθαρής άμμου παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά, δηλαδή τα δοκίμια που είχαν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa ήταν πιο διαστολικά σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αντίστοιχα, τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa ήταν και τα πιο συστολικά. Επίσης, την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζουν πειράματα που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση παλιότερης διπλωματικής εργασίας από τον Τομέα Γεωτεχνικής (Μπανιάς, 2011).



Σχήμα 6.29. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια καθαρής άμμου



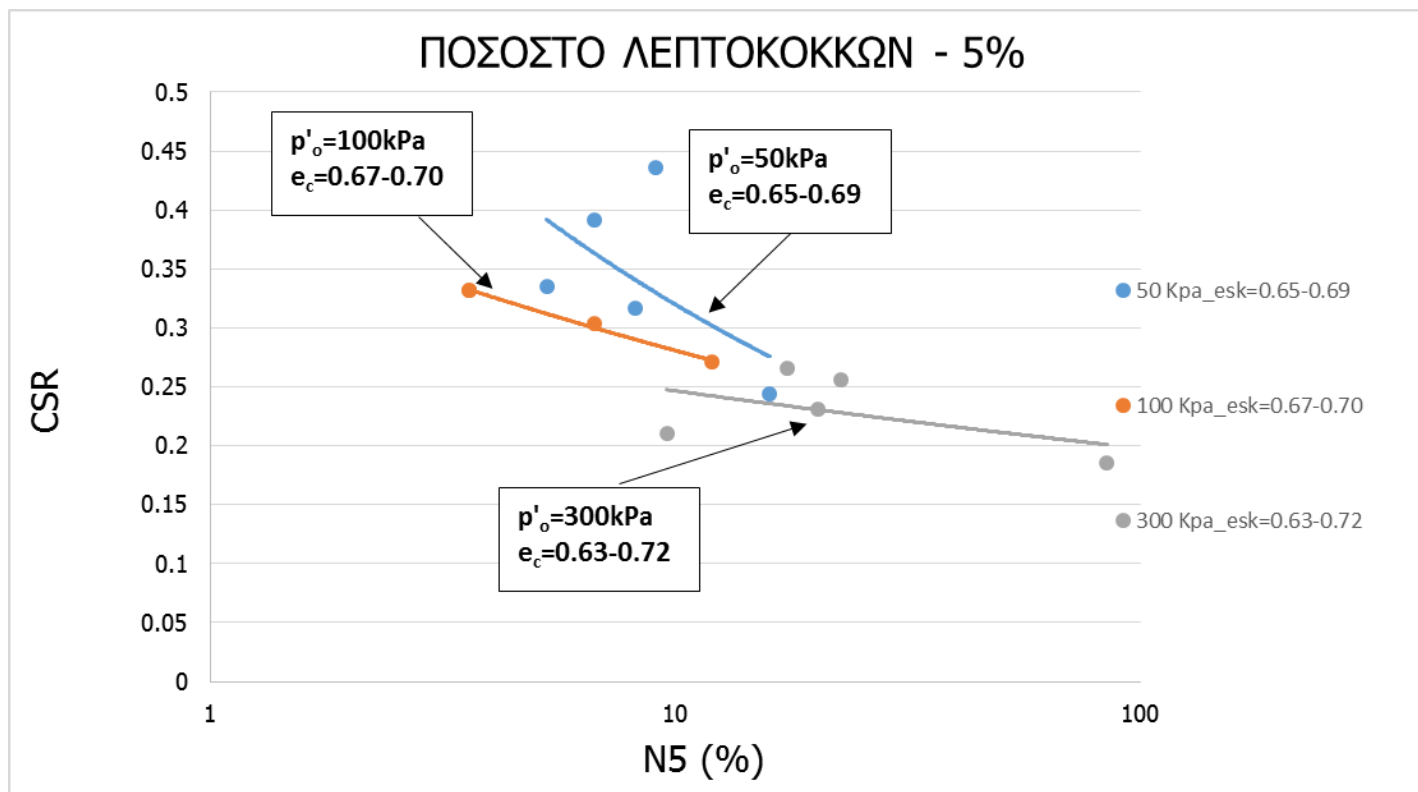


Σχήμα 6.30. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης μέχρι την ρευστοποίηση σε δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και σε μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων απο 5% έως και 40% (Ανθή Παπαδοπούλου και Θεοδώρα Τίκα ; 2008)

6.5.1.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 5%

Στο Σχήμα 6.31. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 5% και είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί.

Παρατηρώντας τις καμπύλες ρευστοποίησης του Σχήματος 6.31. φαίνεται ότι τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 50kPa παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά έναντι ρευστοποίησης ενώ τα δοκίμια τα οποία έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 300kPa είναι πιο ευάλωτα σε ρευστοποίηση, όταν αυτή επέρχεται σε μικρό αριθμό κύκλων (περίπου κάτω από 10). Αυτό συμβαίνει επειδή τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε μεγαλύτερες τάσεις στερεοποίησης είναι πιο συστολικά, και άρα αναπτύσσουν μεγαλύτερες πιέσεις πόρων. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι παρακάτω καμπύλες συγκλίνουν όταν η ρευστοποίηση επέρχεται σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων και αναμένουμε τα δοκίμια να παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά ανεξαρτήτως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες ρευστοποίησης των δοκιμών που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa και στα 100kPa πλησιάζουν μεταξύ τους αν τις συγκρίνουμε με τις αντίστοιχες καμπύλες της καθαρής άμμου (Σχήμα 6.29.).



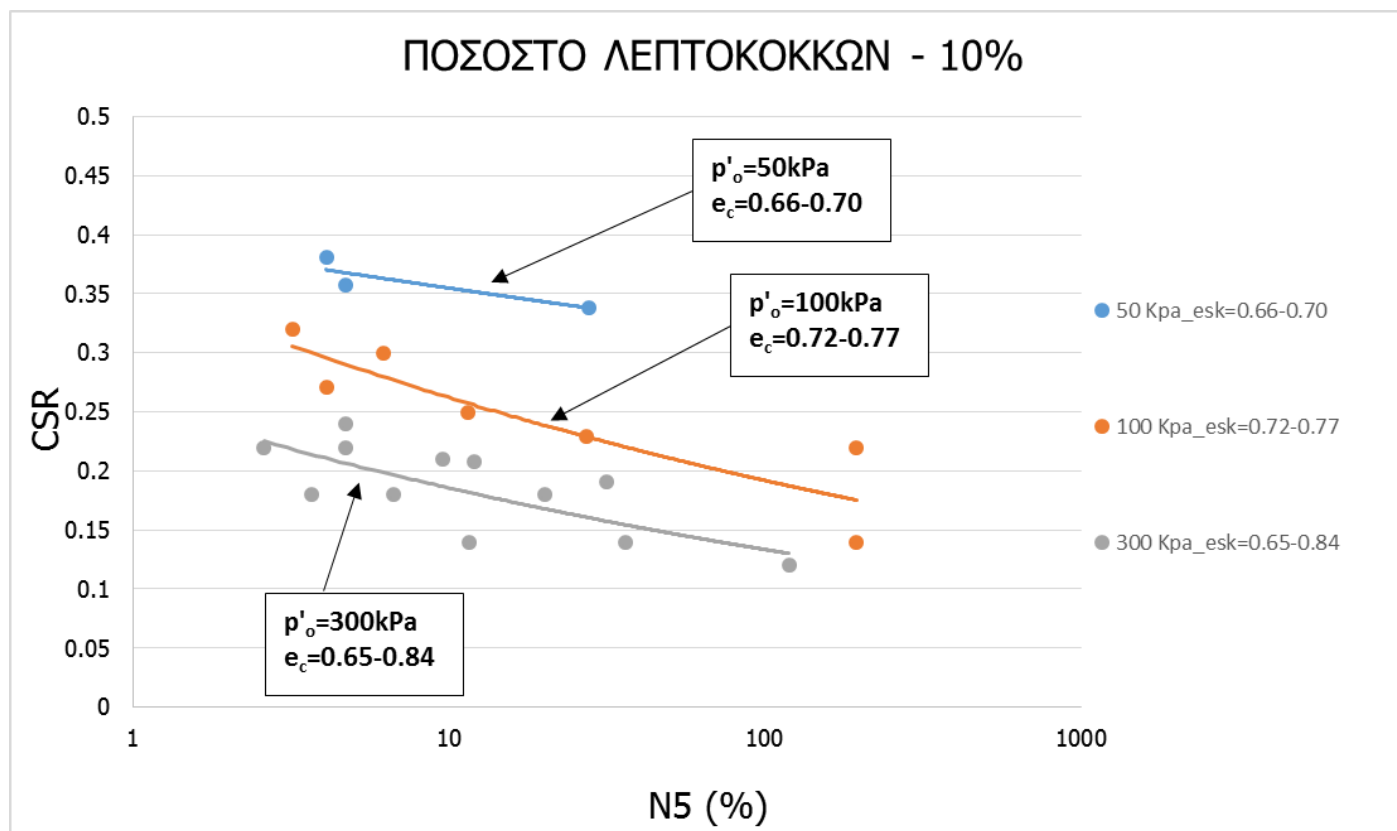
Σχήμα 6.31. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 5%

6.5.1.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 10%

Στο Σχήμα 6.32. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 10%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί.

Οι καμπύλες ρευστοποίησης παρουσιάζουν συμπεριφορά παραπλήσια με τις αντίστοιχες καμπύλες ρευστοποίησης της καθαρής άμμου αφού τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε μικρότερη ενεργό τάση παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές έναντι ρευστοποίησης. Άλλη μια σημαντική παρατήρηση που αξίζει να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι ενώ τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 300kPa σε καθαρή άμμο και μείγματα με ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών ίσο με 10% παρουσιάζουν ίδιες περίπου αντοχές έναντι ρευστοποίησης, δεν συμβαίνει το ίδιο και στα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa αφού είναι προφανές ότι τα δοκίμια που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού 10% παρουσιάζουν σαφώς καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα της καθαρής άμμου. Επίσης, ενώ οι καμπύλες ρευστοποίησης της καθαρής άμμου ισαπέχουν και είναι κοντά μεταξύ τους, οι αντίστοιχες καμπύλες ρευστοποίησης για ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 10% ισαπέχουν επίσης, αλλά είναι πιο απομακρυσμένες γεγονός που

υποδεικνύει ότι υπάρχει εμφανής διαφορά στις αντοχές έναντι ρευστοποίησης όταν τα δοκίμια στερεοποιούνται σε διαφορετικές ενεργές τάσεις.



Σχήμα 6.32. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 10%

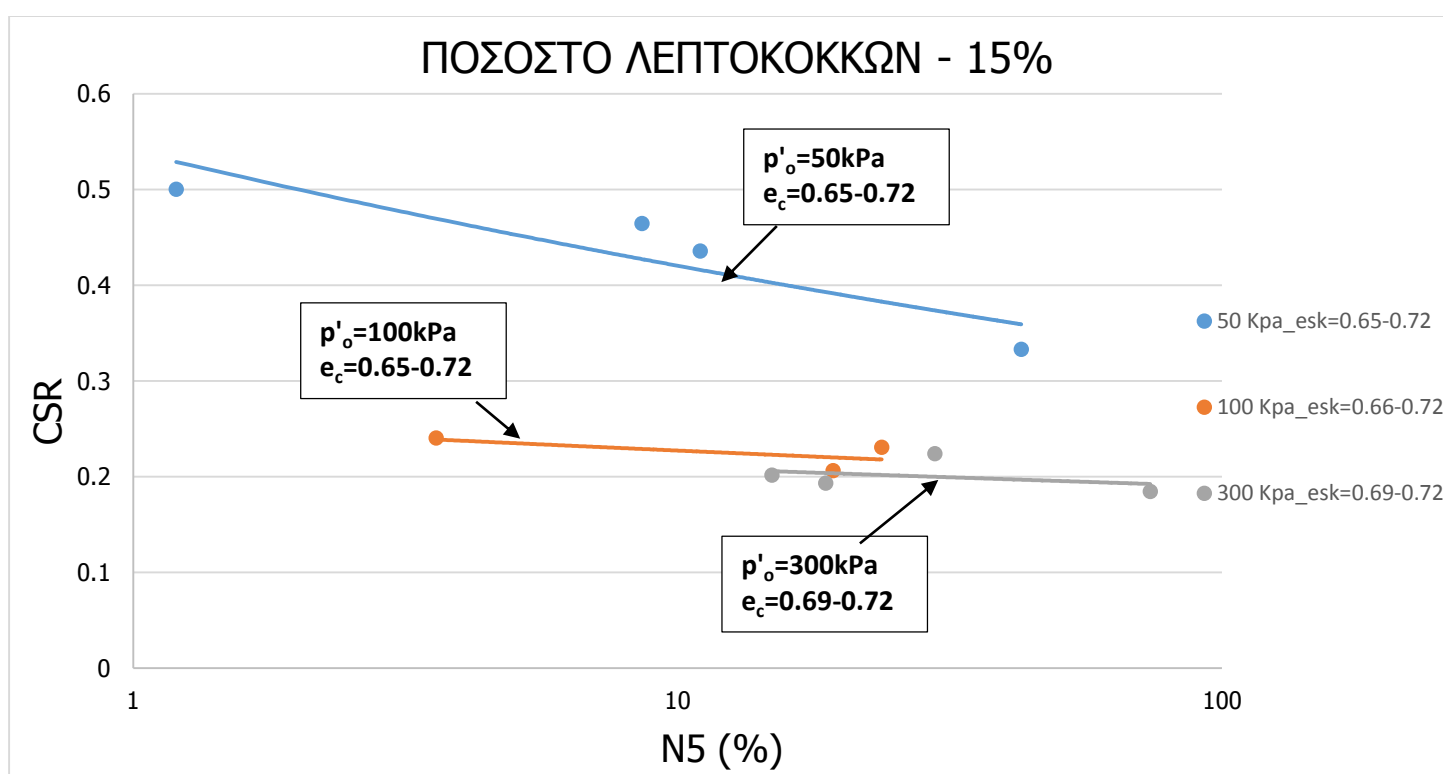
6.5.1.4. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 15%

Στο Σχήμα 6.33. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτοκόκκου εδαφικού υλικού ίσο με 15%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί.

Παρατηρώντας τις καμπύλες ρευστοποίησης του Σχήματος 6.33., είναι εμφανής η υπεροχή σε αντοχή έναντι ρευστοποίησης των δοκιμών τα οποία έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 50kPa. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες ρευστοποίησης των δοκιμών που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχικές ενεργές τάσεις ίσες με 100kPa και 300kPa συγκλίνουν, γεγονός που υποδεικνύει ότι δοκίμια που στερεοποιούνται απο μια τάση και έπειτα, παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά. Ένα γενικό συμπέρασμα που παρατηρείται είναι το γεγονός ότι με την προσθήκη

λεπτόκοκκου υλικού όλο και περισσότερο αυξάνεται η αντοχή έναντι ρευστοποίησης, ιδιαίτερα στα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση ίση με 50kPa.

Οι παρατηρήσεις αυτές φαίνεται να διαφοροποιούνται κάπως σε σχέση με τις αντίστοιχες του Σχήματος 6.30. (Ανθή Παπαδοπούλου και Θεοδώρα Τίκα, 2008). Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.30. παρατηρείται ότι τα δοκίμια που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού ίσο με 15% και έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa είναι πιο διαστολικά σε σχέση με τα υπόλοιπα που στερεοποιήθηκαν σε μεγαλύτερες ενεργές τάσεις, κάτι που ταυτίζεται με τα πειράματα αυτής της διπλωματικής εργασίας. Απο την άλλη, ενώ στα πειράματα αυτής της διπλωματικής εργασίας φαίνεται μια παραπλήσια συμπεριφορά των δοκιμών που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa και 300kPa, στο Σχήμα 6.30. παρατηρείται μια διαφοροποίηση αφού τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa παρουσιάζονται πιο διαστολικά σε σχέση με τα αντίστοιχα που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση που αξίζει να αναφερθεί, είναι το γεγονός ότι τα πειράματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.30. φαίνεται να έχουν σαφώς μειωμένες αντοχές σε σχέση με τα αντίστοιχα που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, τα αποτελέσματα του Σχήματος 6.33. συμφωνούν απόλυτα με τα αποτελέσματα παλιότερης διπλωματικής εργασίας που πραγματοποιήθηκε στον τομέα Γεωτεχνικής (Μπανιάς, 2011).



Σχήμα 6.33. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 15%

6.5.2. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων σκελετού (esk)

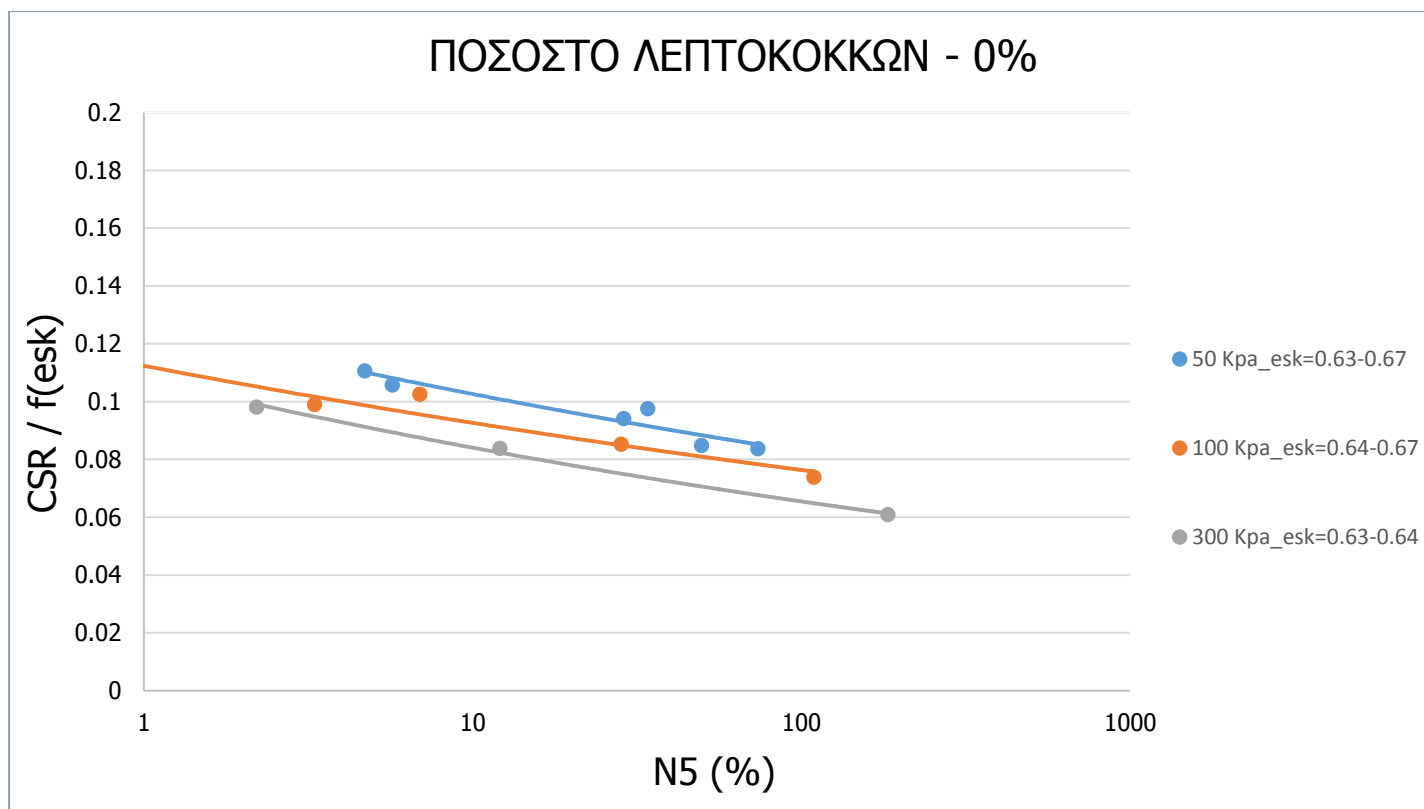
Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης των ανακυκλικών πειραμάτων της παρούσης διπλωματικής εργασίας, κανονικοποιημένες ως προς την συνάρτηση $f(esk)=esk^{-1.3}$ (Lo Presti et al. 1997) όπου esk είναι ο δείκτης πόρων σκελετού των δοκιμίων πριν από την διάτμηση. Αυτή η επιλογή έγινε με το σκεπτικό να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αφού υπήρχε μια μικρή διασπορά στους δείκτες πόρων κενών των δοκιμίων λόγω του ότι μερικά από αυτά ήταν πιο πυκνά και άλλα πιο χαλαρά. Έτσι με την κανονικοποίηση αυτή, μεγάλωσε το πλήθος των πειραμάτων κάθε ομάδας με αποτέλεσμα να έχουμε μια πιο ακριβή ένδειξη την συμπεριφοράς των διαφόρων δοκιμίων.

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, διαφορετικά υλικά, 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 το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι αρκετά πολύπλοκο και υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

6.5.2.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 0%

Στο Σχήμα 6.34. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για δοκίμια τα οποία αποτελούνται από καθαρή άμμο. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Αυτό που παρατηρείται στο Σχήμα 6.34. και το οποίο συνάδει με το αντίστοιχο Σχήμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.29.), είναι ότι η αύξηση της τάσης με την οποία στερεοποιούνται τα διάφορα δοκίμια καθαρής άμμου είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντοχής έναντι ρευστοποίησης. Αυτό αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι η άμμος που στερεοποιήθηκε στα 50kPa, παρουσιάζει μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 100kPa. Αντίστοιχα, τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 100kPa έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια της καθαρής άμμου που στερεοποιήθηκαν στα 300kPa. Μια μικρή διαφορά που παρατηρείται στο διάγραμμα αυτό σε σχέση με το Σχήμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.29.), είναι ότι οι καμπύλες πλησιάζουν που σημαίνει ότι με την κανονικοποίηση μειώνεται η επίδραση της τάσης στερεοποίησης.

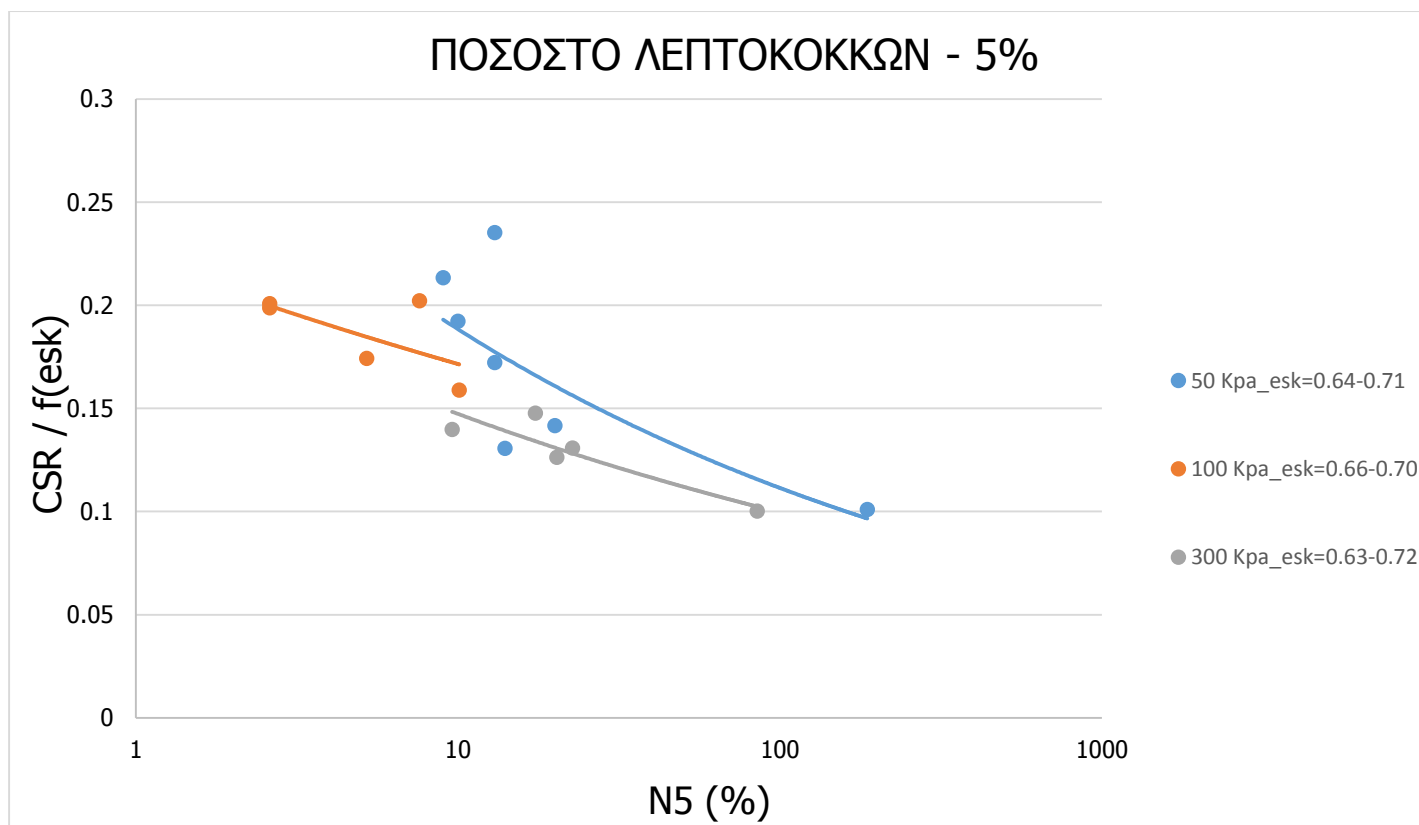


Σχήμα 6.34. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια καθαρής άμμου. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

6.5.2.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 5%

Στο Σχήμα 6.35. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 5%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Παρατηρώντας τις καμπύλες ρευστοποίησης του Σχήματος 6.35. φαίνεται ξεκάθαρα ότι σε μικρό αριθμό κύκλων τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε ενεργό τάση 50kPa έχουν καλύτερες αντοχές έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η τάση στερεοποίησης τόσο πιο συστολικά είναι τα δοκίμια, αναπτύσσουν μεγαλύτερες πιέσεις πόρων και έχουν μικρότερες αντοχές. Στα δοκίμια που τους επιβλήθηκε σχετικά μικρή διατμητική τάση (CSR) και είχαν αντέξει πολλούς κύκλους φόρτισης, παρατηρούμε ότι η επίδραση της τάσης στερεοποίησης ήταν αμελητέα, αφού οι καμπύλες ρευστοποίησης συγκλίνουν σε μεγάλο αριθμό κύκλων.



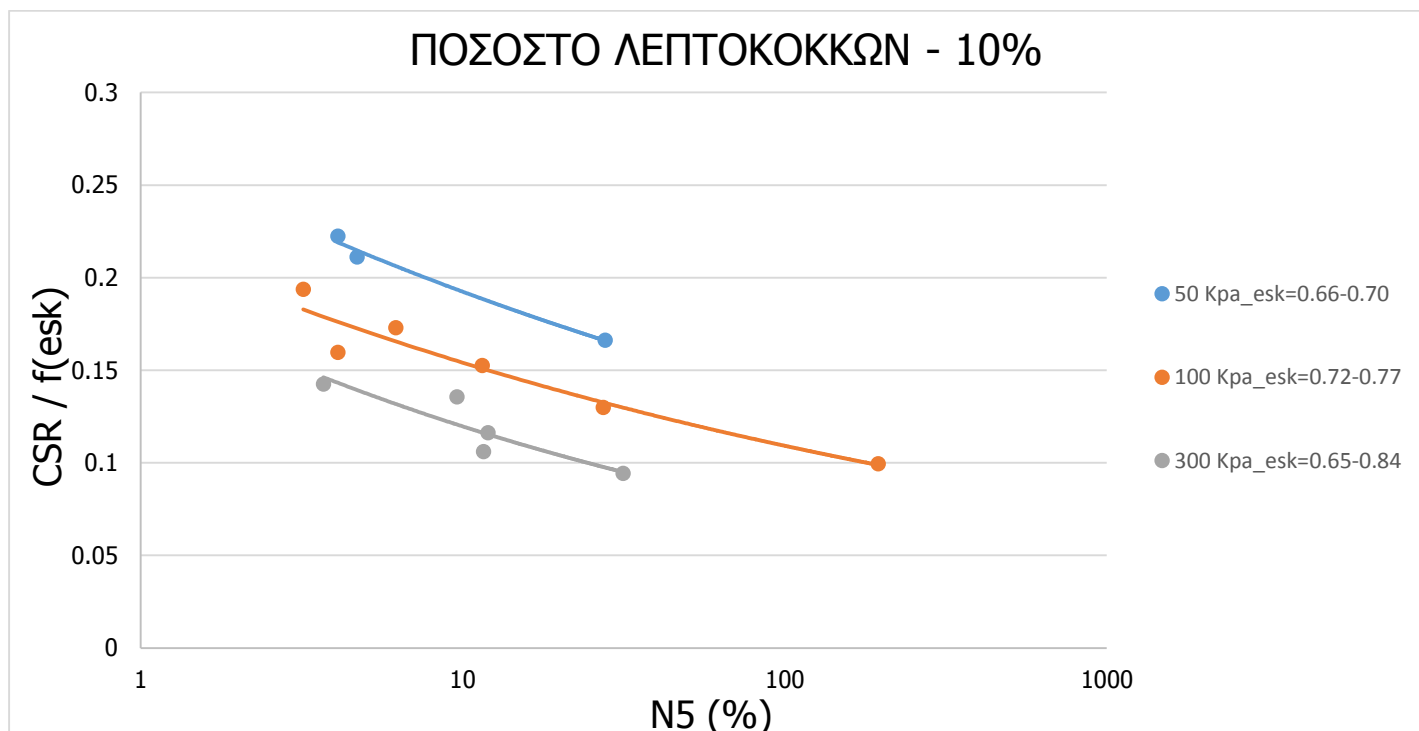
Σχήμα 6.35. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 5%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

6.5.2.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 10%

Στο Σχήμα 6.36. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 10%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Αυτό που παρατηρούμε στο Σχήμα 6.36. είναι ότι δεν διαφέρει σχεδόν καθόλου από το αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.36.). Και πάλι τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 50kPa παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αντοχή ενώ αυτά που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa την μικρότερη. Οι καμπύλες φαίνεται να ισαπέχουν μεταξύ τους γεγονός που υποδεικνύει ότι με την αύξηση της τάσης που στερεοποιούνται τα δοκίμια υπάρχει και πτώση της αντοχής τους έναντι ρευστοποίησης. Επίσης, μια μικρή διαφορά που μπορεί κανείς να παρατηρήσει συγκριτικά με το Σχήμα 6.34. όπου παριστάνονται τα δοκίμια της καθαρής άμμου που έχουν κανονικοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο, είναι ότι ενώ και αυτές οι καμπύλες ρευστοποίησης είναι παράλληλες μεταξύ τους, παρουσιάζονται ελαφρά μετατοπισμένες προς τα κάτω, δηλαδή τα δοκίμια της καθαρής άμμου που έχουν

κανονικοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%.

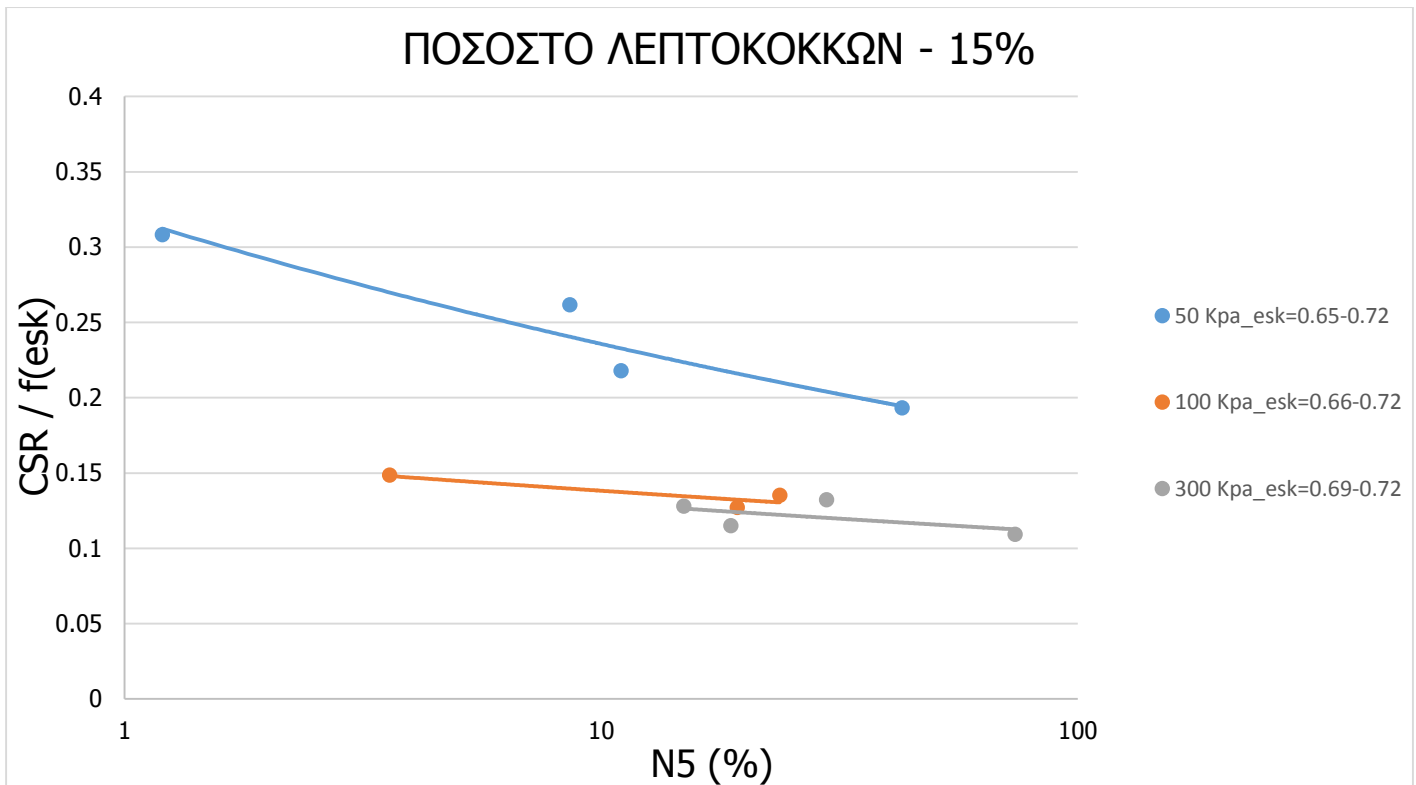


Σχήμα 6.36. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων 10%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

6.5.2.4. Ποσοστό λεπτόκοκκων – 15%

Στο Σχήμα 6.37. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 15%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(esk)=esk^{-1.3}$.

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.37. συμπεραίνουμε ότι τα δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% και έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa παρουσιάζουν εμφανώς αυξημένες αντοχές έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 100kPa και στα 300kPa, τα οποία παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσιμες αντοχές. Επίσης, μια ακόμη σημαντική παρατήρηση που εξάγεται από το Σχήμα 6.37. είναι ότι τα δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 15% και έχουν στερεοποιηθεί στα 50kPa παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα μείγματα άμμου-ιλύος που περιέχουν 5% ή 10% λεπτόκοκκα υλικά και στερεοποιήθηκαν στην ίδια αρχική ενεργό τάση. Είναι ξεκάθαρο λοιπόν, ότι για αυτή την συγκεκριμένη τάση στερεοποίησης, με αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού έχουμε και αύξηση της αντοχής έναντι ρευστοποίησης.



Σχήμα 6.37. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 15%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk)

6.5.3. Κανονικοποίηση ως προς δείκτη πόρων (e)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης των ανακυκλικών πειραμάτων της παρούσης διπλωματικής εργασίας, κανονικοποιημένες τώρα ως προς τον κλασικό δείκτη πόρων (e) της εδαφομηχανικής (global void ratio). Ουσιαστικά, όλα τα CSR ($=t_{sa}/p'$) που προέκυψαν από τα διάφορα δοκίμια διαιρέθηκαν με την μεταβλητή $f(e)=e^{-1.3}$. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν μια μαθηματική συσχέτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από κανονικοποίηση ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού (esk) αφού ο κλασικός δείκτης πόρων e και ο δείκτης πόρων σκελετού esk σχετίζονται με τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$e = e_{sk}(1-f_c) - f_c$$

όπου: e_{sk} = δείκτης πόρων σκελετού

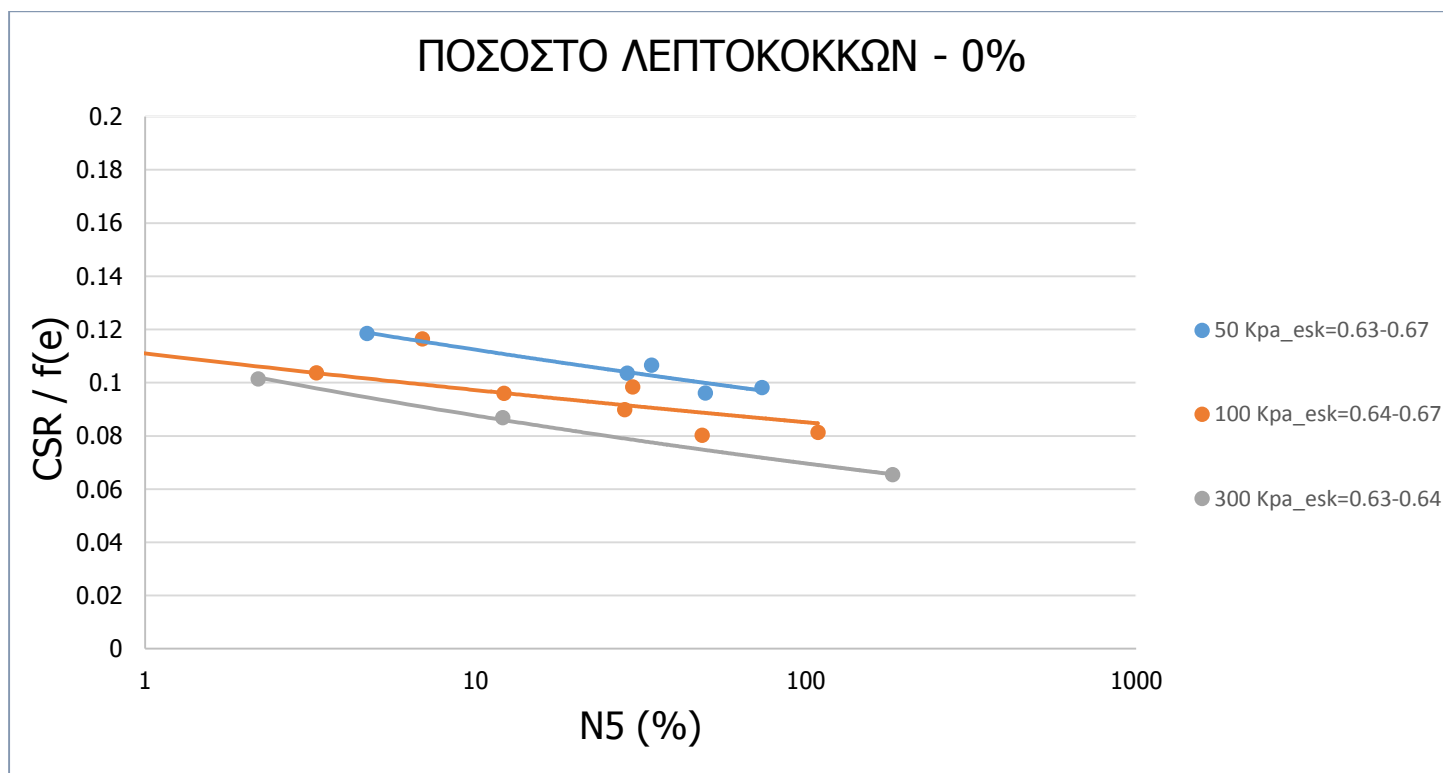
f_c = ξηρή μάζα του λεπτόκοκκου υλικού / συνολική ξηρή μάζα

Παρακάτω παριστάνονται τα αποτελέσματα και οι καμπύλες ρευστοποίησης με αυτή την κανονικοποίηση για κάθε ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού ξεχωριστά, ούτως ώστε να προσδιοριστεί η επιρροή της τάσης στερεοποίησης.

6.5.3.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 0%

Στο Σχήμα 6.38. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για δοκίμια καθαρής άμμου. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(e)=e^{-1.3}$.

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει από το Σχήμα 6.38. είναι ότι και πάλι η τάση με την οποία στερεοποιήθηκαν τα δοκίμια είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αντίσταση ως προς ρευστοποίηση. Πέραν όμως από αυτό, παρατηρούμε ότι ενώ οι καμπύλες για τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 50kPa και στα 100kPa αποκλίνουν σε μικρό αριθμό κύκλων, φαίνεται να συγκλίνουν σε μεγάλο αριθμό. Το αντίθετο συμβαίνει για τις καμπύλες των δοκιμών που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και στα 300kPa όπου συγκλίνουν σε μικρό αριθμό κύκλων και αποκλίνουν σε μεγάλο. Δεν μπορούμε να έχουμε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για το φαινόμενο αυτό, αφού ίσως οφείλεται σε πειραματικά σφάλματα του εργαστηρίου.

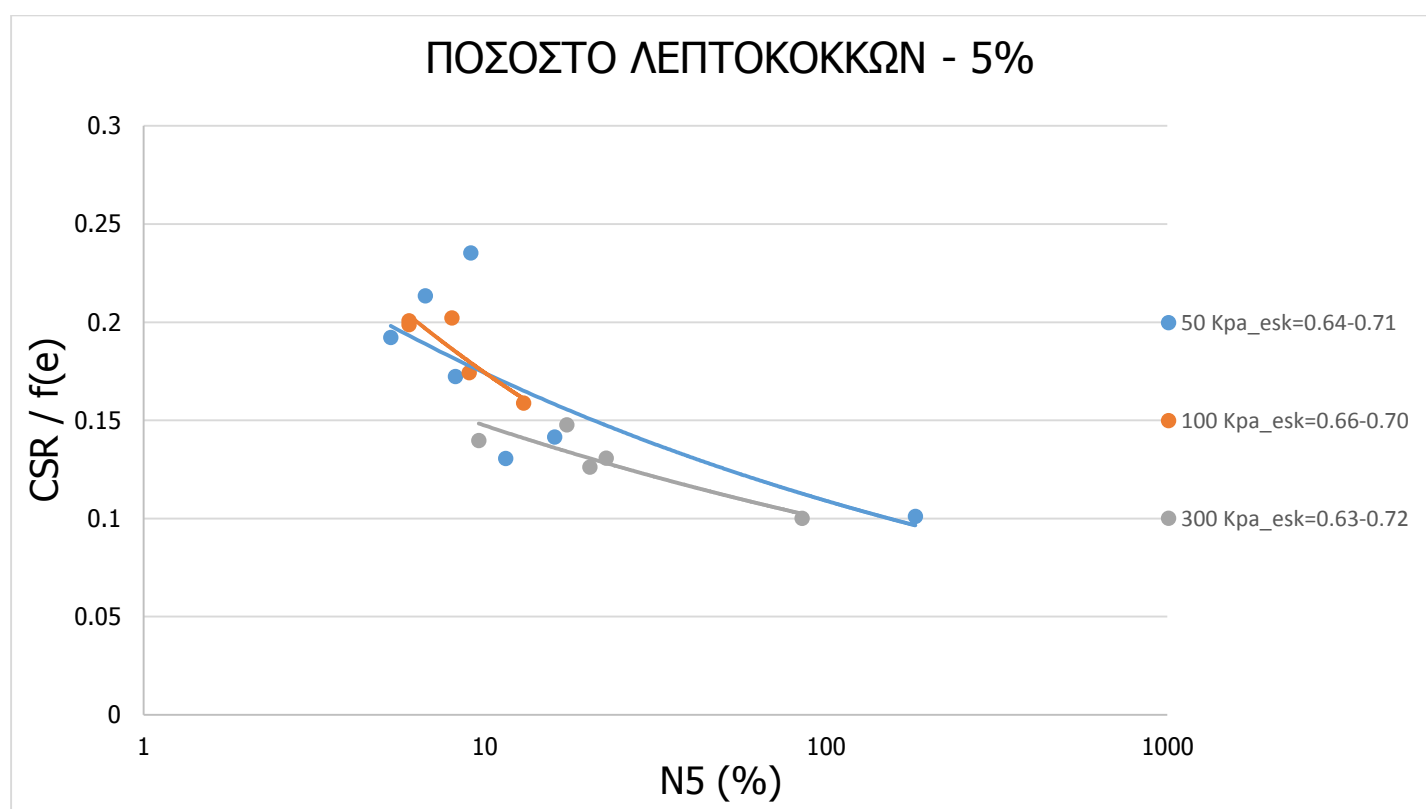


Σχήμα 6.38. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια καθαρής άμμου. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.5.3.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 5%

Στο Σχήμα 6.39. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 5%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(e)=e^{-1.3}$.

Στο Σχήμα 6.38. παρατηρούμε ότι την μεγαλύτερη αντοχή έναντι ρευστοποίησης παρουσιάζουν τα μείγματα που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 50kPa και 100kPa, κάτι που διαφέρει ως ένα βαθμό με το αντίστοιχο μη κανονικοποιημένο διάγραμμα (Σχήμα 6.31.), όπου υπήρχε μια πιο ξεκάθαρη διαφοροποίηση ως προς τα δοκίμια που έχουν μεγαλύτερες αντοχές αναλόγως της τάσης που είχαν στερεοποιηθεί. Οι δύο αυτές καμπύλες φαίνεται να ταυτίζονται παρά τον μικρό αριθμό δοκιμίων που έχουν πραγματοποιηθεί. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa είναι τα πιο συστολικά και έτσι παρουσιάζουν την μικρότερη αντοχή σε ρευστοποίηση. Ακόμη, οι τρεις καμπύλες φαίνεται να συγκλίνουν σε μεγάλο αριθμό κύκλων, κάτι που υποδικνύει ότι για δοκίμια που φορτίστηκαν με μικρότερη διατμητική τάση, δεν έπαιξε σχεδόν κανένα ρόλο στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης η αρχική ενεργός τάση με την οποία είχαν στερεοποιηθεί.

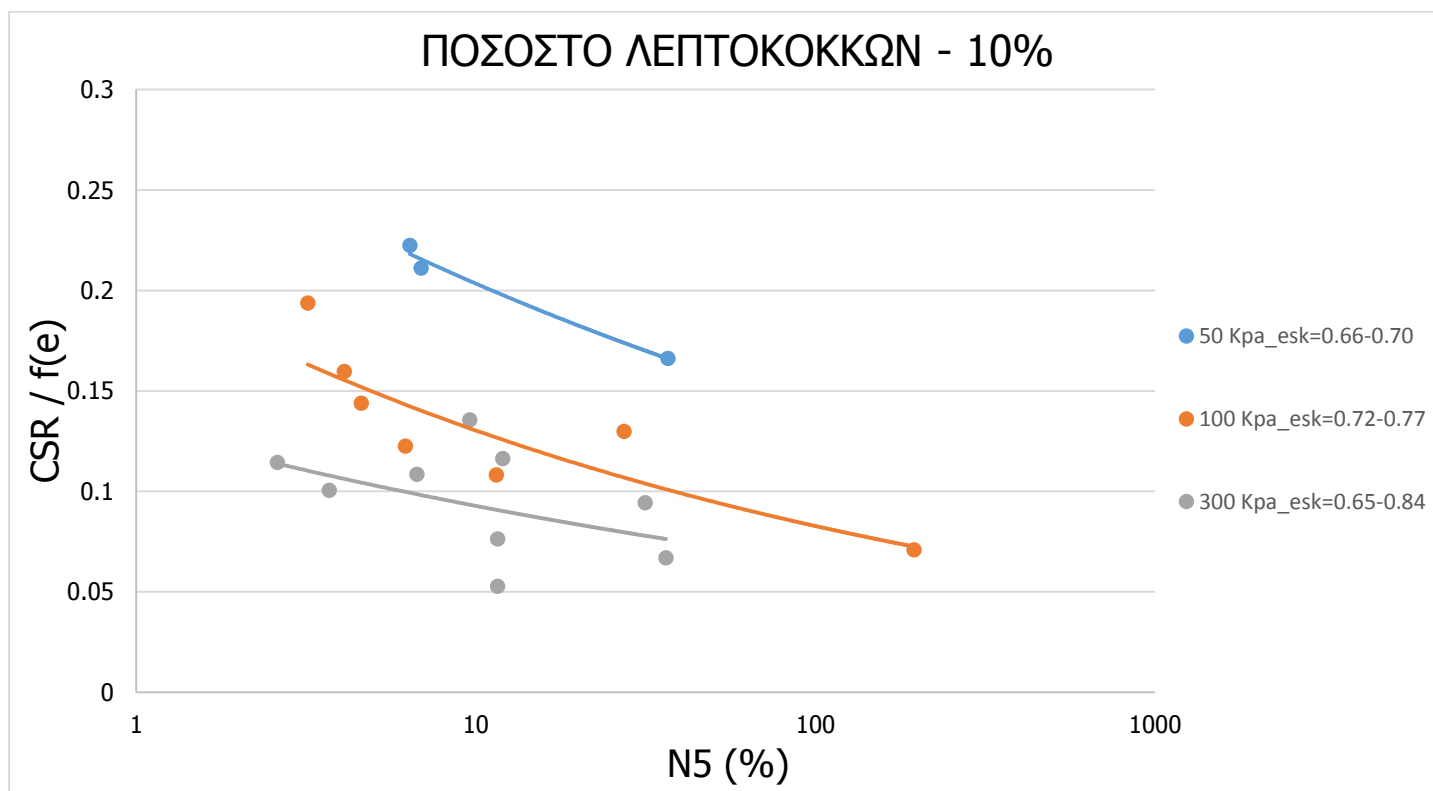


Σχήμα 6.39. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 5%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.5.3.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 10%

Στο Σχήμα 6.39. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 10%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(e)=e^{-1.3}$.

Στο Σχήμα 6.39. παρατηρούμε και πάλι ότι τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 50kPa έχουν την μεγαλύτερη αντοχή σε ρευστοποίηση, ακολουθούν τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και έπειτα τα αντίστοιχα στα 300kPa. Επίσης, παρατηρούμε ότι ενώ οι καμπύλες αυτές φαίνεται να είναι παράλληλες, οι αποστάσεις μεταξύ τους δεν είναι οι ίδιες, αφού η απόσταση μεταξύ της καμπύλης των δοκιμίων που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa και στα 100kPa είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη απόσταση μεταξύ των καμπυλών για δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και στα 300kPa. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι για δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%, η μείωση που παρουσιάζεται στις αντοχές έναντι ρευστοποίησης δεν είναι ανάλογη με την αύξηση της τάσης στερεοποίησης.

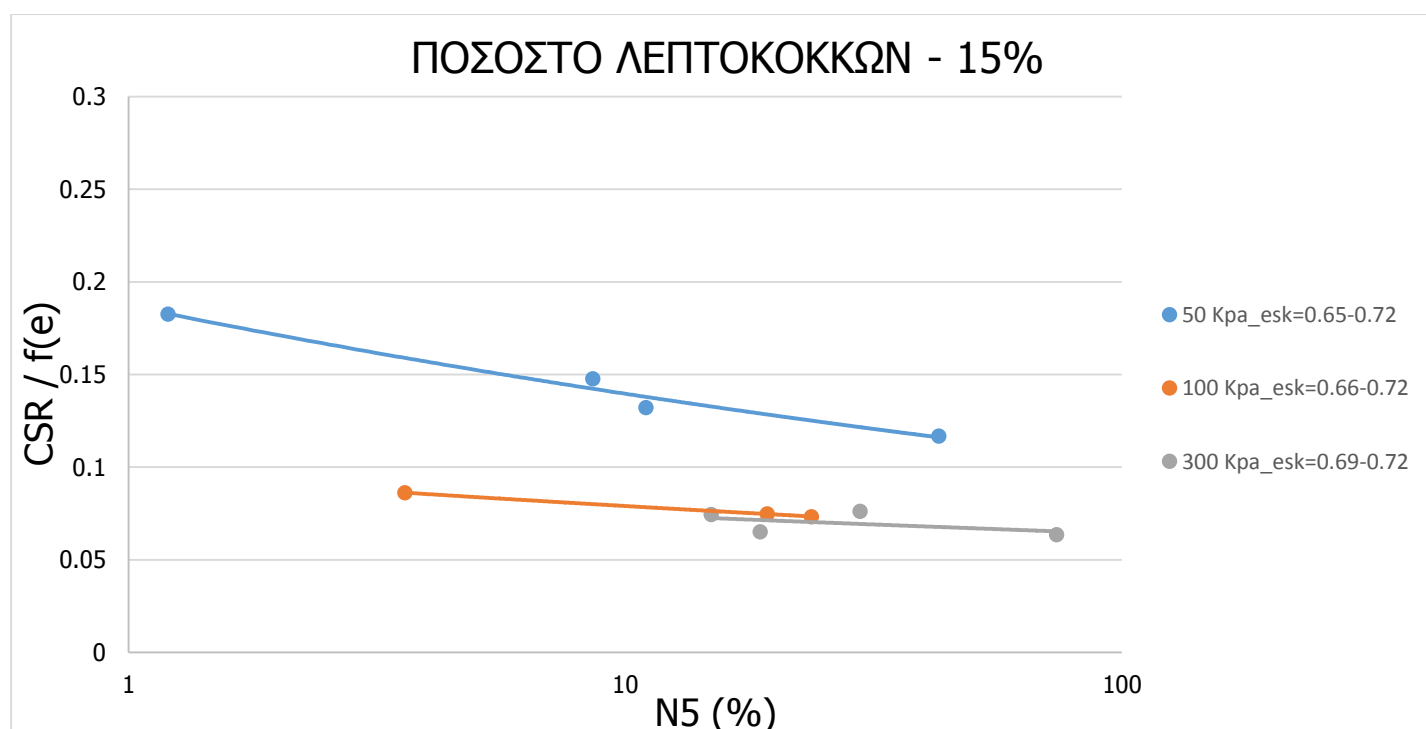


Σχήμα 6.40. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 10%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

6.5.3.4. Ποσοστό λεπτοκόκκων – 15%

Στο Σχήμα 6.40. παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης για πειράματα τα οποία είναι μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού ίσο με 15%. Τα πειράματα αυτά είναι ομαδοποιημένα αναλόγως της αρχικής ενεργού τάσης που έχουν στερεοποιηθεί και έχουν κανονικοποιηθεί με βάση την σχέση $f(e)=e^{-1.3}$.

Όπως έχει παρατηρηθεί και στο αντίστοιχο διάγραμμα χωρίς κανονικοποίηση (Σχήμα 6.33.) τα μείγματα που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες αντοχές έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 100kPa και 300kPa. Οι καμπύλες των δοκιμών που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και 300kPa παρατηρούμε ότι συμπίπτουν και αυτό υποδηλώνει ότι για δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% και έχουν στερεοποιηθεί πάνω από μία ενεργό τάση της τάξης των 100 kPa, η ενεργός αυτή τάση δεν παίζει ρόλο στις αντοχές που παρουσιάζουν τα δοκίμια έναντι ρευστοποίησης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι όπως προκύπτει από το Σχήμα 6.41., φαίνεται ότι τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί σε αρχική ενεργό τάση 50kPa παρουσιάζουν σχεδόν διπλάσια αντοχή έναντι ρευστοποίησης σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και στα 300kPa. Ακόμη, λόγω της μικρής διαφοράς κλίσης που παρουσιάζουν οι καμπύλες των 50kPa σε σχέση με τις αντίστοιχες καμπύλες των 100kPa και 300 Pa, μπορούμε να πούμε ότι σε πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων οι διατμητικές αντοχές των δοκιμών ίσως τείνουν να ταυτιστούν.



Σχήμα 6.41. Λόγος ανακυκλικής τάσης CSR σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί διατμητική παραμόρφωση διπλού πλάτους $\gamma_{DA}=5\%$ σε δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 15%. Κανονικοποιημένες καμπύλες ως προς τον δείκτη πόρων (e)

Εν κατακλείδει τα διαγράμματα που δείχνουν την επίδραση της τάσης στερεοποίησης είτε στην απλή είτε στην κανονικοποιημένη τους έκδοση, υποδεικνύουν ότι η επίδραση της τάσης στερεοποίησης φαίνεται να είναι σημαντική στα υψηλότερα ποσοστά ιλύος 10% & 15% όπου η διαφοροποίηση της τάσης των 50 κΠα από τις καμπύλες που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τάσεις στερεοποίησης είναι εμφανής . Γιά καθαρή άμμο και μείγματα με 5% ιλύ αν και στη μικρότερη τάση αυξάνεται η αντίσταση σε ρευστοποίηση οι διαφορές μεταξύ των καμπυλών είναι πολύ μικρότερες. Συνεπώς στις μεγάλες τάσεις στερεοποίησης αναμένεται η μείωση της αντίστασης σε ρευστοποίηση των μειγμάτων άμμου και υψηλών ποσοστών ιλύος.

7. Αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών

7.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η δεύτερη κύρια σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε στη συσκευή στρεπτικής διάτμησης κοίλου δοκιμίου του Τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αυτή η σειρά πειραμάτων περιλαμβάνει πειράματα μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε καθαρή άμμο (M31), αλλά και σε μείγματα άμμου (M31) και ιλύος (D6) με ποσοστό λεπτοκόκκων 5%, 10% και 15%, έτσι ώστε να εξεταστεί η επίδραση των λεπτόκοκκων υλικών μέσα στον σκελετό του χονδρόκοκκου παράγοντα. Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων σε τέτοιου είδους μείγματα με χαμηλά ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού, θεωρείται η αλληλεπίδραση των κόκκων άμμου, ενώ η ιλύς θεωρείται ως μέσο πλήρωσης των κενών της άμμου. Η συνεισφορά των λεπτόκοκκων στοιχείων στη συστολικότητα ή την διαστολικότητα που προσφέρουν στην άμμο σε διάφορες τάσεις στερεοποίησης είναι το κύριο αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου. Επίσης, μελετάται η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης στην οποία στερεοποιήθηκαν τα δοκίμια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή τυπικών διαγραμμάτων, όπως είναι τα διαγράμματα διαδρομών ενεργών τάσεων, τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, διαγράμματα αποκλίνοσας τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης και διαγράμματα υπερπίεσης πόρων-διατμητικής παραμόρφωσης. Συνολικά, στο εργαστήριο Πειραματικής Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου έχουν πραγματοποιηθεί 28 μονοτονικά πειράματα τα οποία έχουν επεξεργαστεί για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται συνοψισμένα στον Πίνακα 7.1.

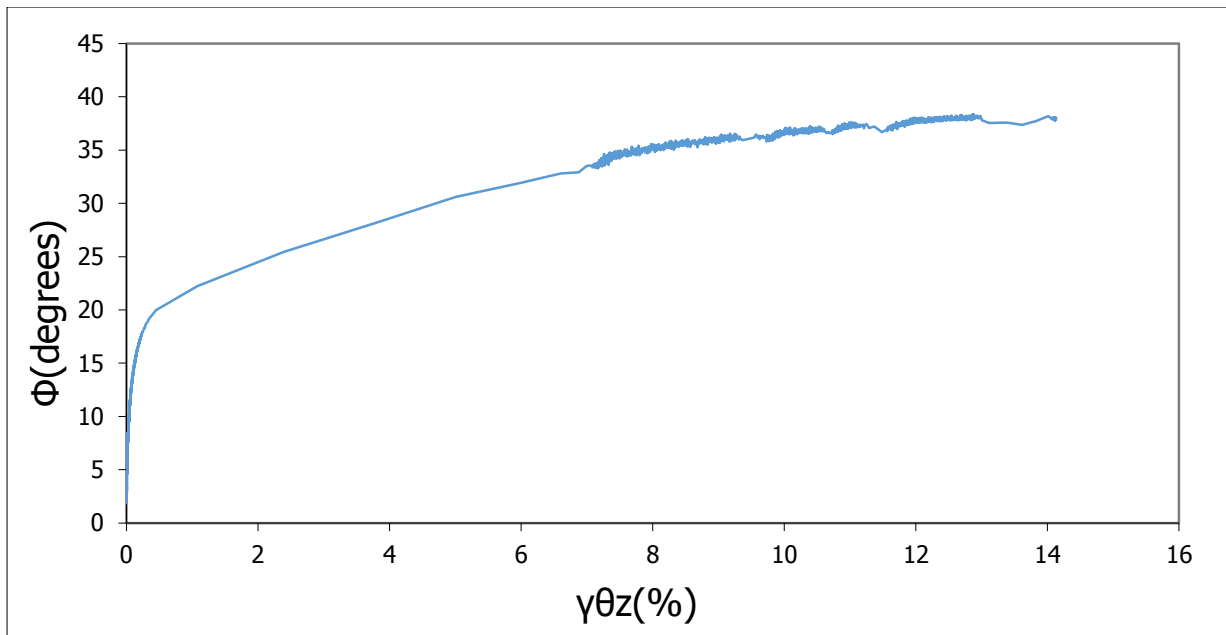
A/A	Ονομασία πειράματος	f_c (%)	Τάση στερεοποίησης p' (kPa)	esk	e
1	M31-(25kPa)-1	0	25	0.72	0.72
2	M31-(50kPa)-2	0	50	0.72	0.72
3	M31-(50kPa)-3	0	50	0.67	0.67
4	M31-(50kPa)-4	0	50	0.60	0.60
5	M31-(75kPa)-5	0	75	0.70	0.70
6	M31-(100kPa)-6	0	100	0.73	0.73
7	M31-(100kPa)-7	0	100	0.63	0.63
8	M31-(150kPa)-8	0	150	0.67	0.67
9	M31-(150kPa)-9	0	150	0.57	0.57
10	M31-(300kPa)-10	0	300	0.73	0.73
11	M31-(300kPa)-11	0	300	0.66	0.66
12	M31-(300kPa)-12	0	300	0.55	0.55

13	M31-f5-(50kPa)-13	5	50	0.74	0.65
14	M31-f5-(50kPa)-14	5	50	0.67	0.59
15	M31-f5-(50kPa)-15	5	50	0.65	0.57
16	M31-f5-(100kPa)-16	5	100	0.75	0.66
17	M31-f5-(100kPa)-17	5	100	0.74	0.65
18	M31-f5-(100kPa)-18	5	100	0.72	0.63
19	M31-f5-(100kPa)-19	5	100	0.64	0.56
20	M31-f10-(300kPa)-20	10	300	0.82	0.64
21	M31-f10-(300kPa)-21	10	300	0.71	0.54
22	M31-f10-(300kPa)-22	10	300	0.65	0.49
23	M31-f10-(300kPa)-23	10	300	0.59	0.43
24	M31-f15-(50kPa)-24	15	50	0.74	0.48
25	M31-f15-(50kPa)-25	15	50	0.66	0.41
26	M31-f15-(100kPa)-26	15	100	0.74	0.48
27	M31-f15-(100kPa)-27	15	100	0.72	0.46
28	M31-f15-(100kPa)-28	15	100	0.68	0.43

Πίνακας 7.1. Χαρακτηριστικά μονοτονικών δοκιμών

Προσδιορισμός γωνίας τριβής Φ'

Για τον προσδιορισμό της γωνίας τριβής του κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε ο μαθηματικός τύπος $\sin^{-1} \left(\frac{t}{s'} \right)$, που προκύπτει από την περιβάλλουσα αστοχίας στους κύκλους του Mohr, όπου $t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ και $s' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$. Για κάθε δοκίμιο καθαρής άμμου σχεδιάστηκαν οι καμπύλες γωνιακής παραμόρφωσης $\gamma_{\theta z}(\%)$ – γωνίας τριβής ϕ . Στο Σχήμα 7.1. παρατίθεται ενδεικτικά μια από αυτές η οποία παρουσιάζει δοκίμιο καθαρής άμμου στερεοποιημένο στα 75kPa με δείκτη πόρων σκελετού $e_{sk}=0.7$.



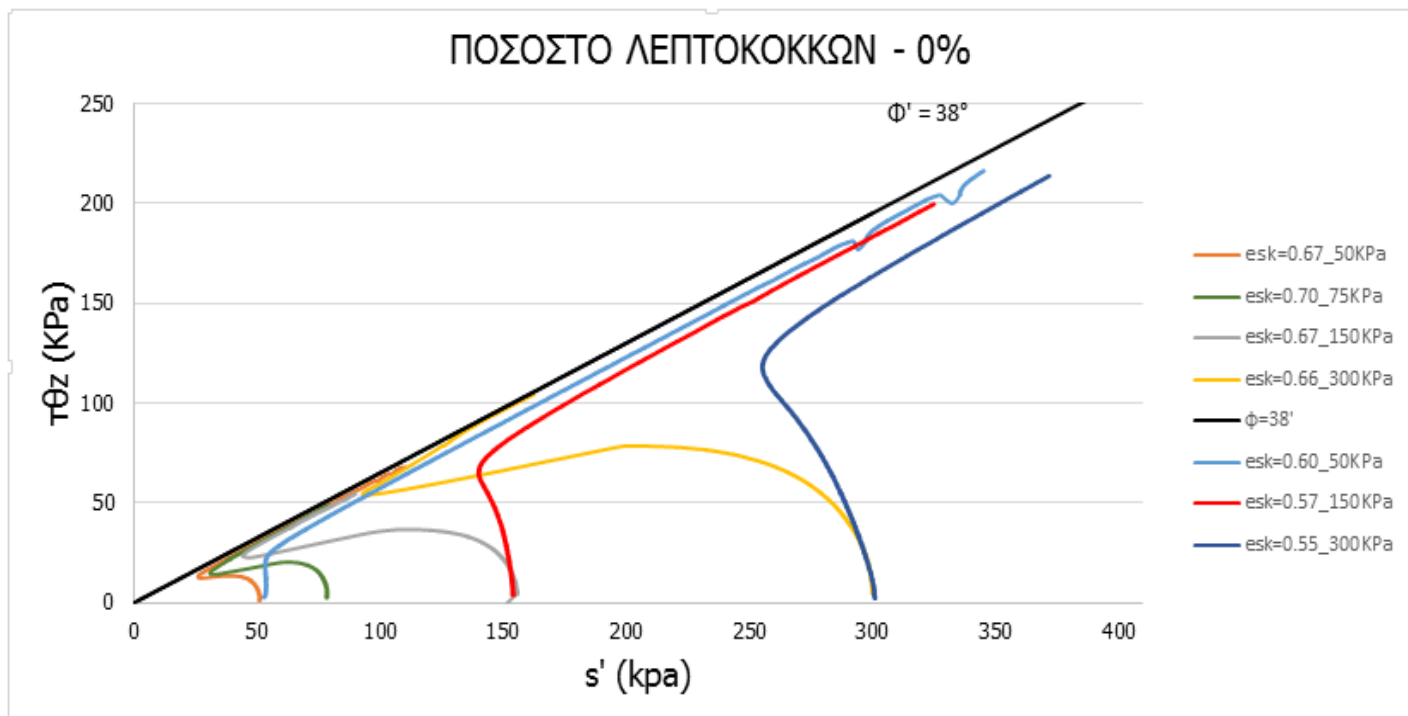
Σχήμα 7.1. Γωνιακή παραμόρφωση γθz(%) σε συνάρτηση με τη γωνία τριβής

Όπως φαίνεται απο το Σχήμα 7.1. όσο αύξανεται η γωνιακή παραμόρφωση και πλησιάζει την αστοχία η γωνία φ προσεγγίζει την γωνία τριβής της καθαρής άμμου που είναι και το άνω όριο της καμπύλης αυτής.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για μία σειρά πυκνών δοκιμών με δείκτες πόρων σκελετού $e_{sk}=0.55-0.60$ και για μία σειρά χαλαρών δοκιμών με δείκτες πόρων σκελετού $e_{sk}=0.66-0.70$. Απο τα αποτελέσματα προέκυψε ότι και τα χαλαρά, αλλά και τα πυκνά δοκίμια έχουν γωνία τριβής $\phi=38^\circ$ περίπου.

Στο Σχήμα 7.2. παρουσιάζεται το διάγραμμα διαδρομών τάσεων σε άξονες $t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$

και $s' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, των χαλαρών και των πυκνών δοκιμών της καθαρής άμμου.



Σχήμα 7.2. Περιβάλλουσα αστοχίας πυκνών και χαλαρών δοκιμών σε άξονες $\tau_{\theta z}$ - s'

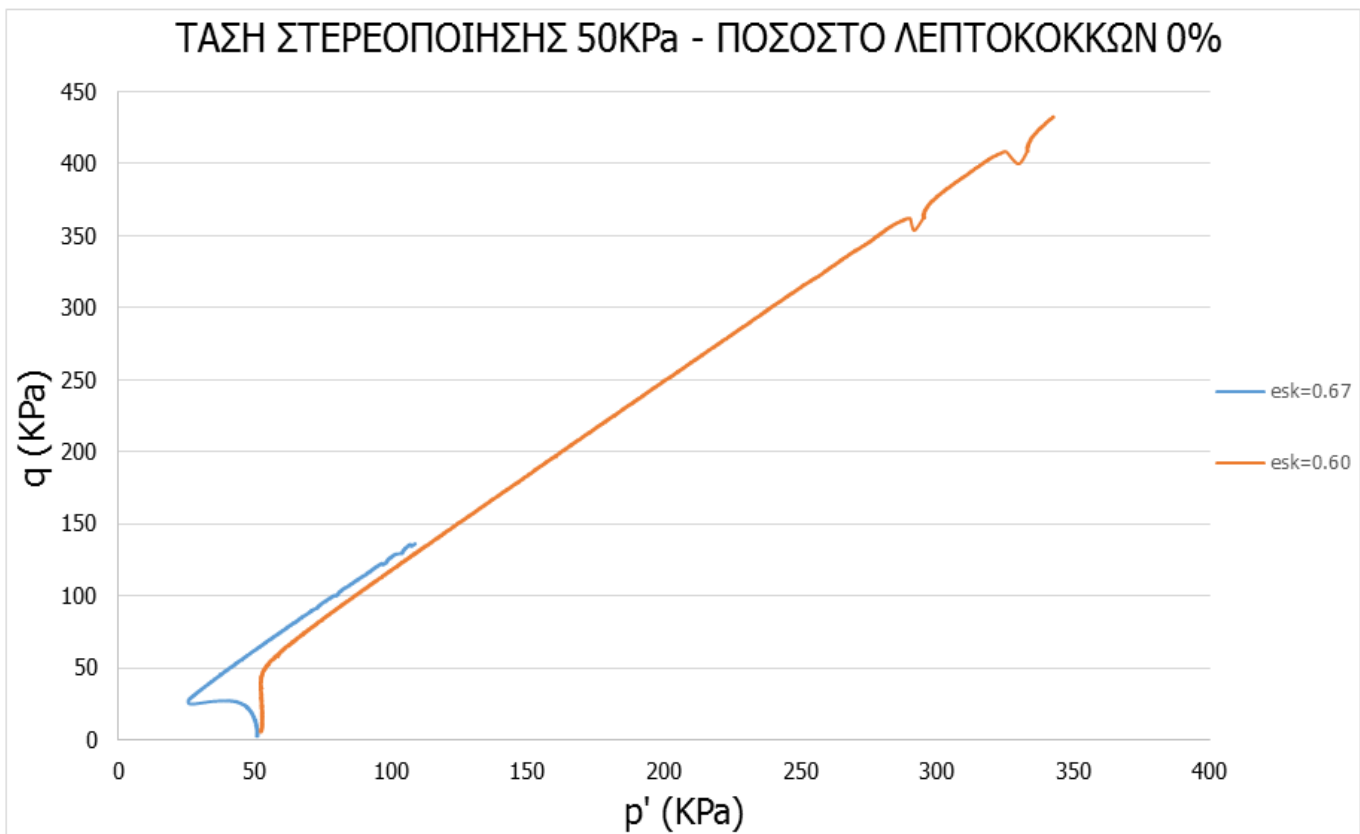
Απο το Σχήμα 7.2. παρατηρούμε ότι όλα τα δοκίμια σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις τείνουν να προσεγγίσουν την περιβάλλουσα αστοχίας, γεγονός που επαληθεύει το πιο πάνω αποτέλεσμα, δηλαδή ότι η γωνία τριβής είναι $\Phi' = 38^\circ$.

7.2. Επίδραση πυκνότητας

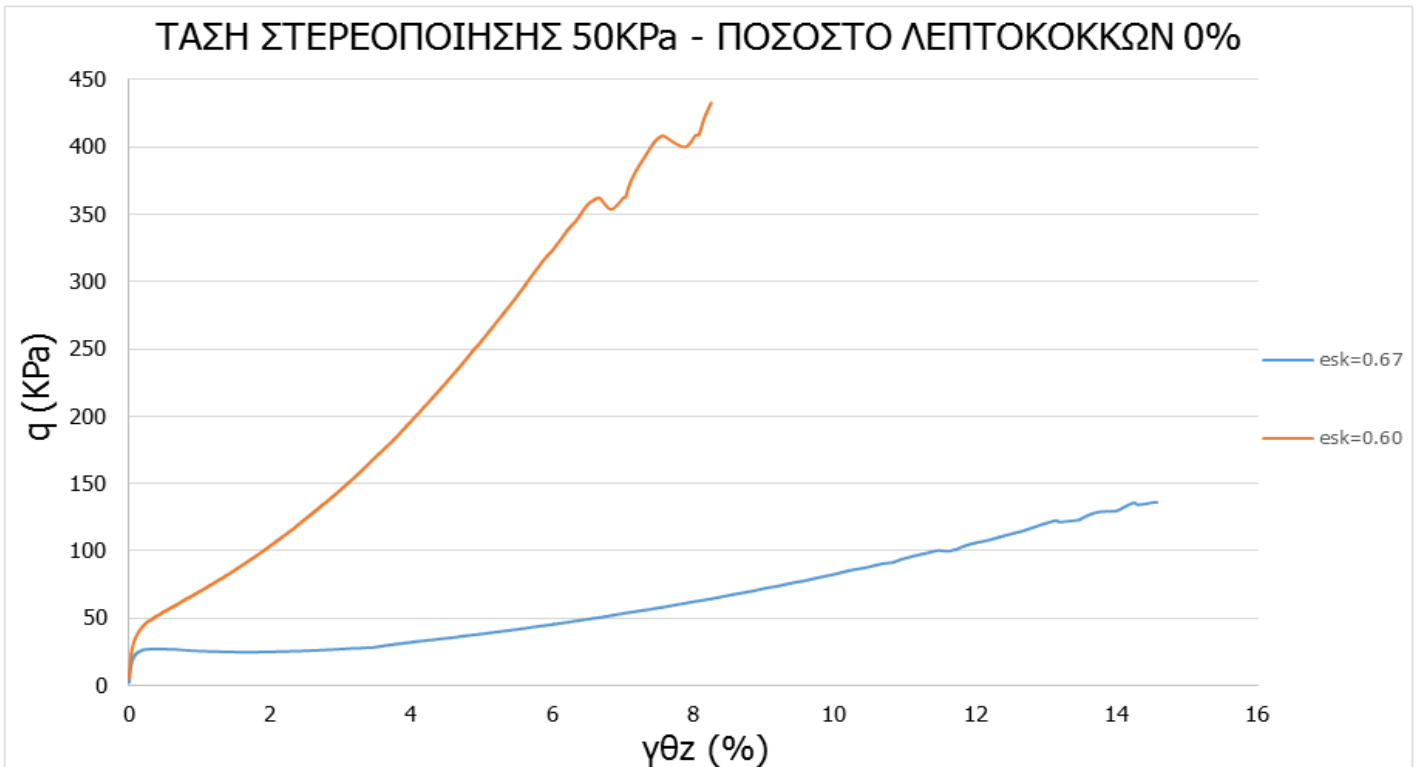
Μετά απο επεξεργασία των μονοτονικών πειραμάτων, τα οποία παρουσιάζονται συνοψισμένα στον Πίνακα 7.1 έγινε μια προσπάθεια ομαδοποίησης ορισμένων απο αυτά σε κοινά διαγράμματα, ούτως ώστε να αποφανθούμε για την επίδραση της πυκνότητας τόσο στην καθαρή άμμο, όσο και σε μείγματα άμμου-ιλύος. Πιο συγκεκριμένα, έχουν ομαδοποιηθεί δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, 10% και 15%, τα οποία έχουν στερεοποιηθεί σε αρχικές ενεργές τάσεις 50kPa, 100kPa και 300kPa, σε κοινά διαγράμματα όπου παριστάνονται η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση ($q - p'$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$).

7.2.1. Τάση στερεοποίησης 50 kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 0%

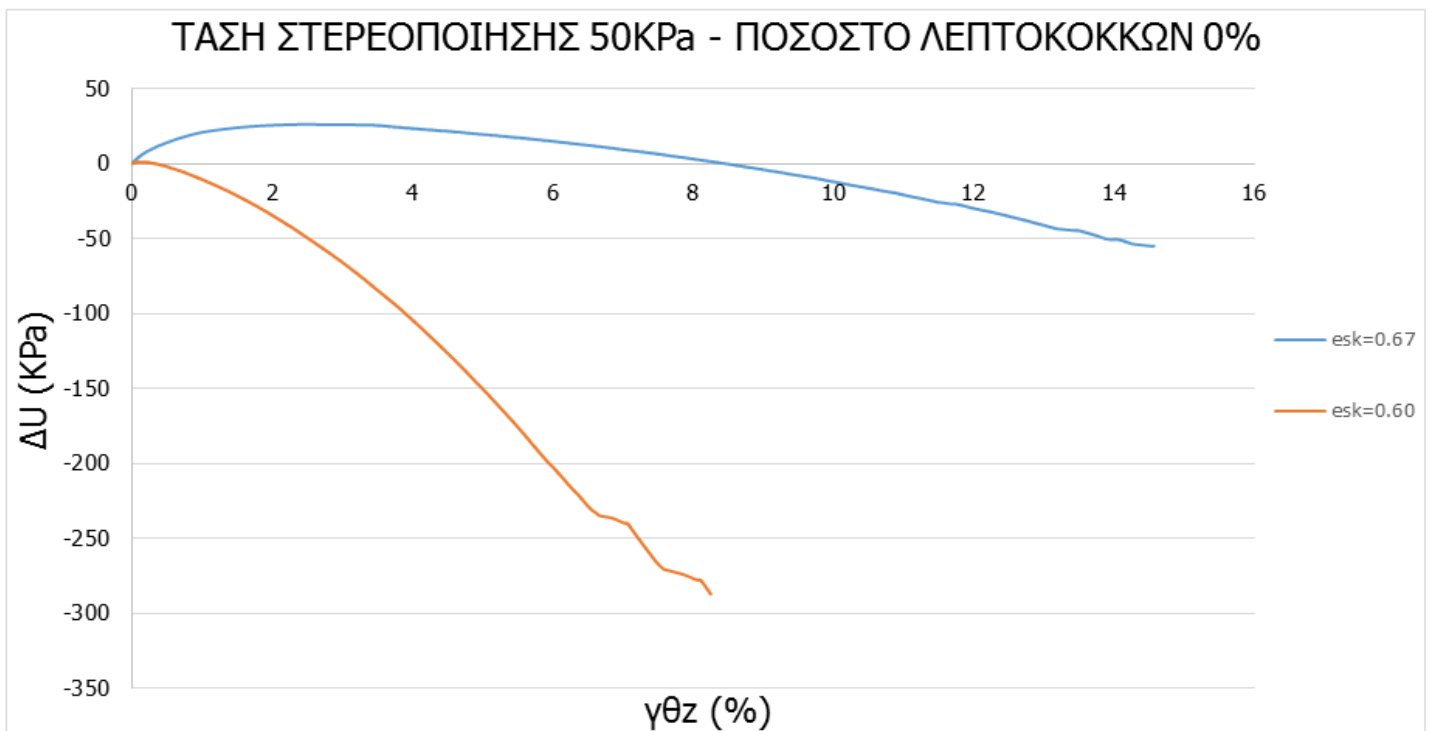
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται δοκίμια καθαρής άμμου στερεοποιημένα σε κοινή τάση στερεοποίησης 50 kPa με σκελετικούς δείκτες πόρων $esk=0.67$ και $esk=0.60$, με στόχο να αποτυπωθεί η επίδραση της πυκνότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση ($q - p'$), αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και υπερπίεσης πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$).



Σχήμα 7.3. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση δοκιμίων καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa



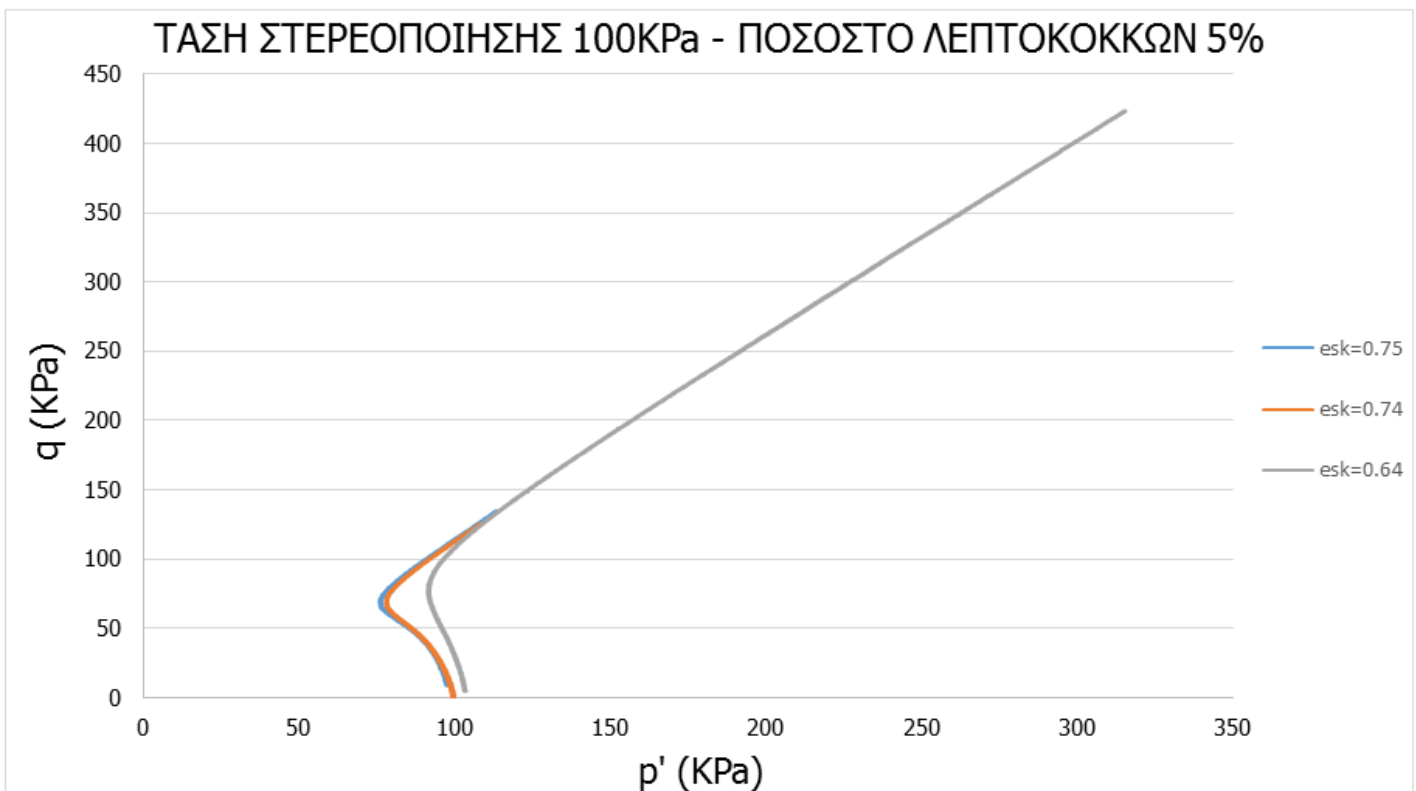
Σχήμα 7.4. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa



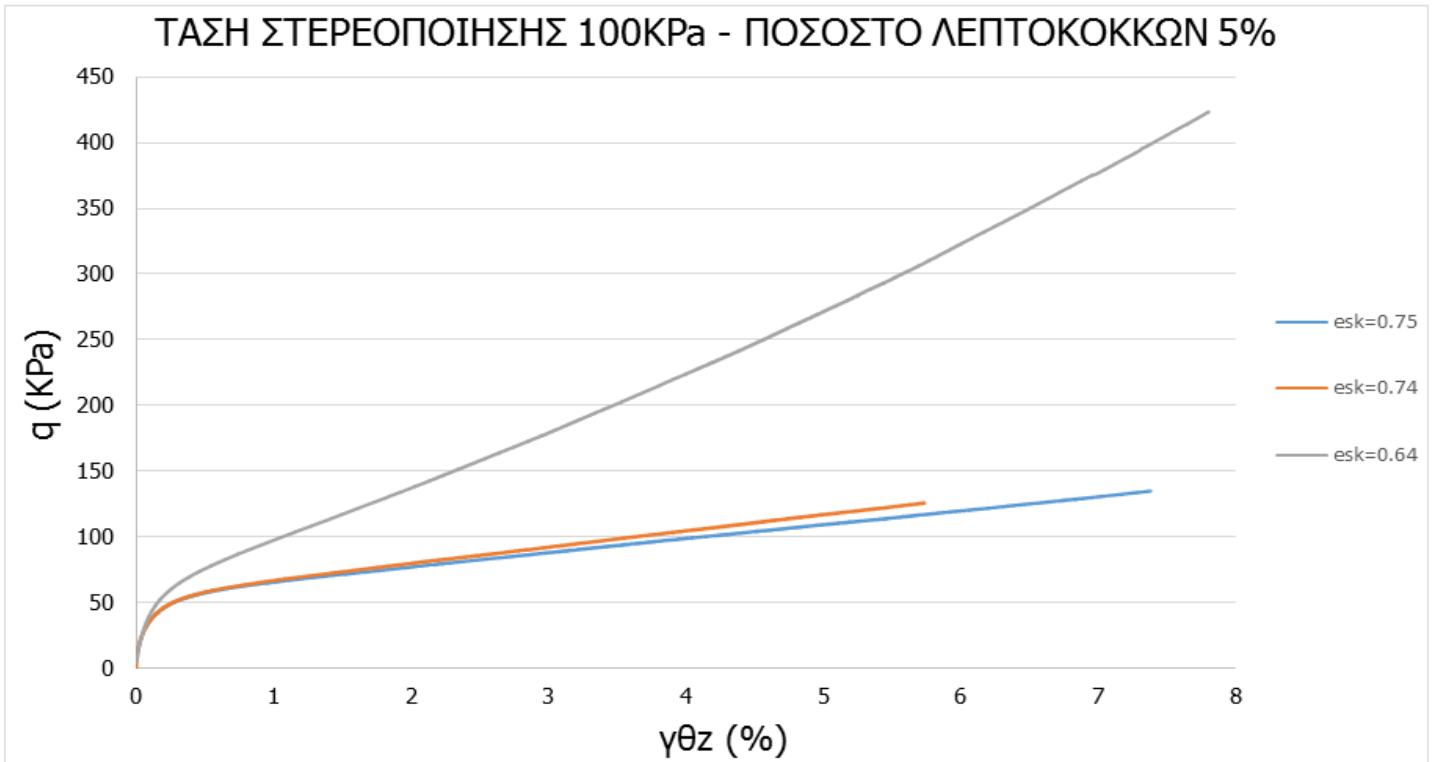
Σχήμα 7.5. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa

7.2.2. Τάση στερεοποίησης 100kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%

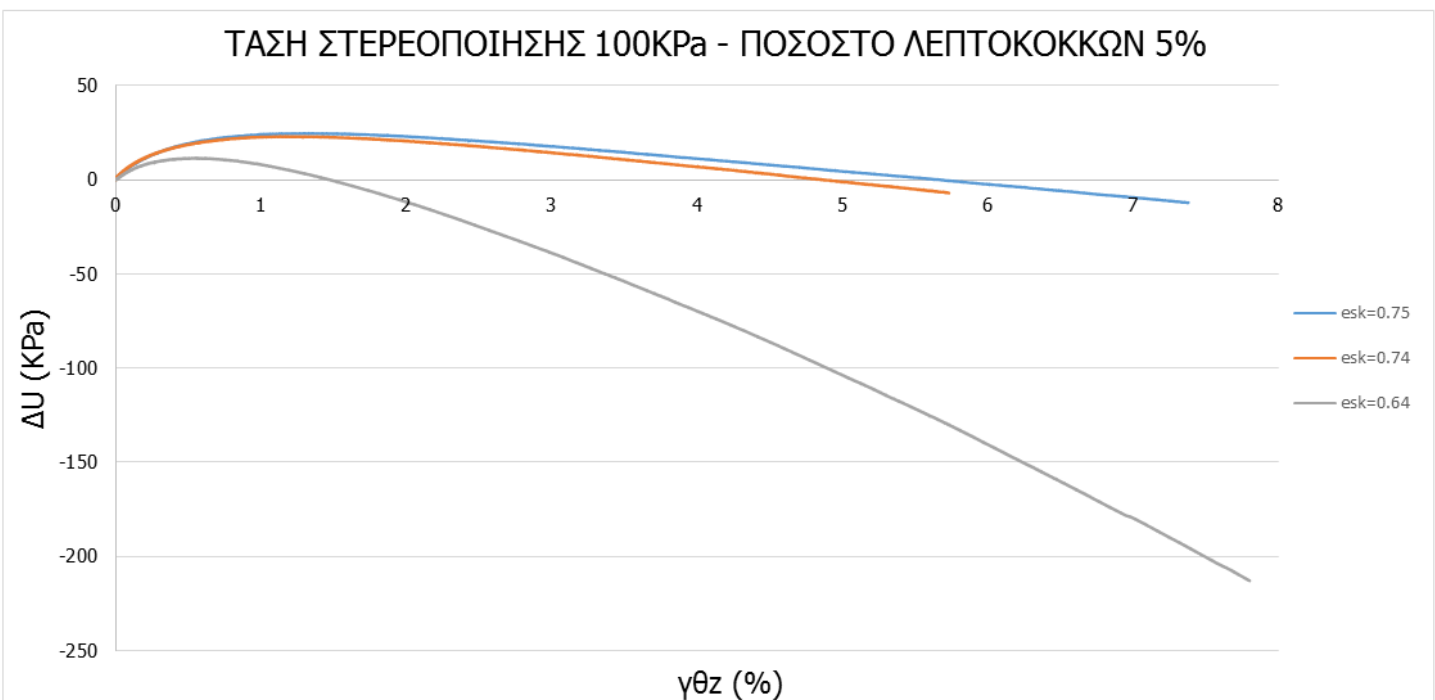
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται δοκίμια μείγματος άμμου– ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, τα οποία είναι στερεοποιημένα σε κοινή τάση στερεοποίησης 100kPa με σκελετικούς δείκτες πόρων που κυμαίνονται στο εύρος $esk=0.64-0.75$, με στόχο να αποτυπωθεί η επίδραση της πυκνότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση ($q - p'$), αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και υπερπίεσης πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$).



Σχήμα 7.6. 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 5% σε αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa



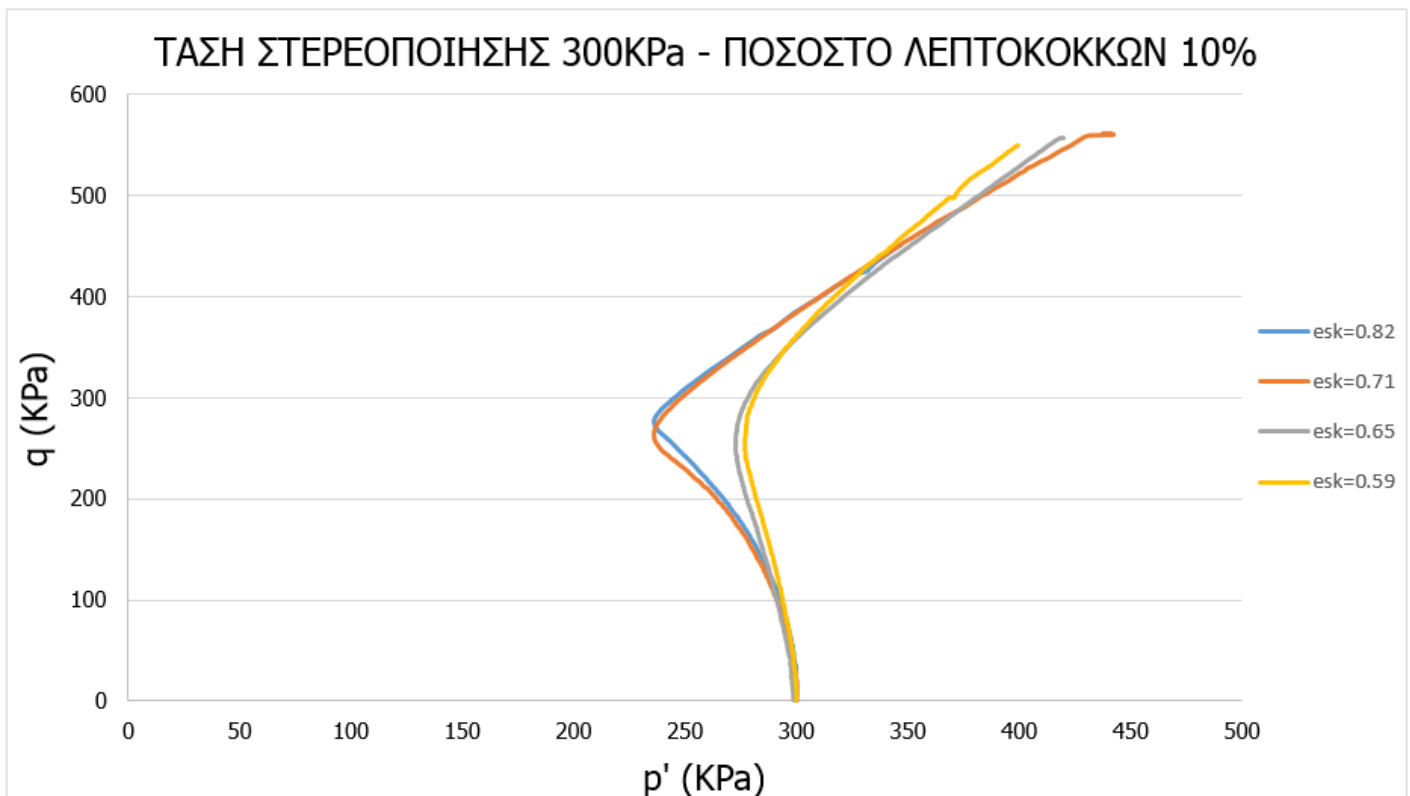
Σχήμα 7.7. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% σε αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa



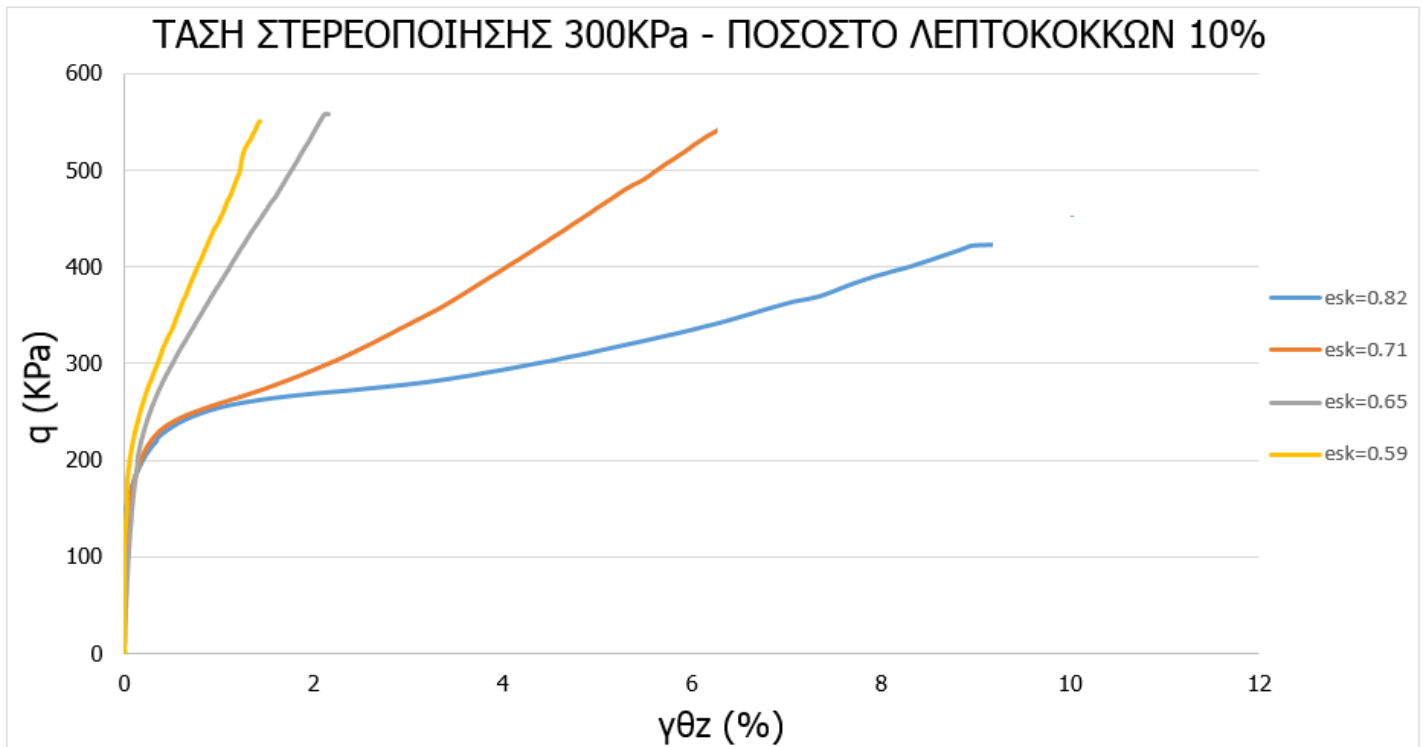
Σχήμα 7.8. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% σε αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa

7.2.3. Τάση στερεοποίησης 300kPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%

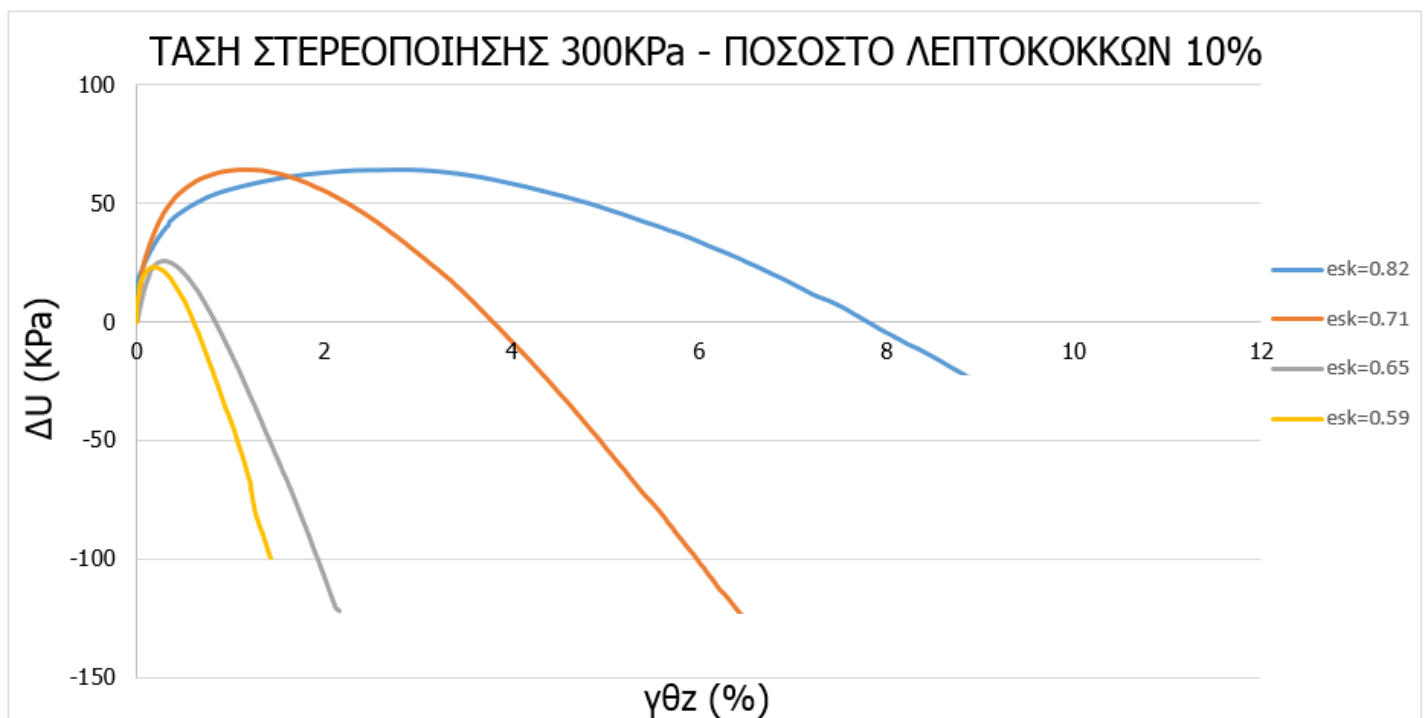
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται δοκίμια μείγματος άμμου– ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10%, τα οποία είναι στερεοποιημένα σε κοινή τάση στερεοποίησης 300kPa με σκελετικούς δείκτες πόρων που κυμαίνονται στο εύρος $esk=0.59-0.82$, με στόχο να αποτυπωθεί η επίδραση της πυκνότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση ($q - p'$), αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και υπερπίεσης πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$).



Σχήμα 7.9. 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



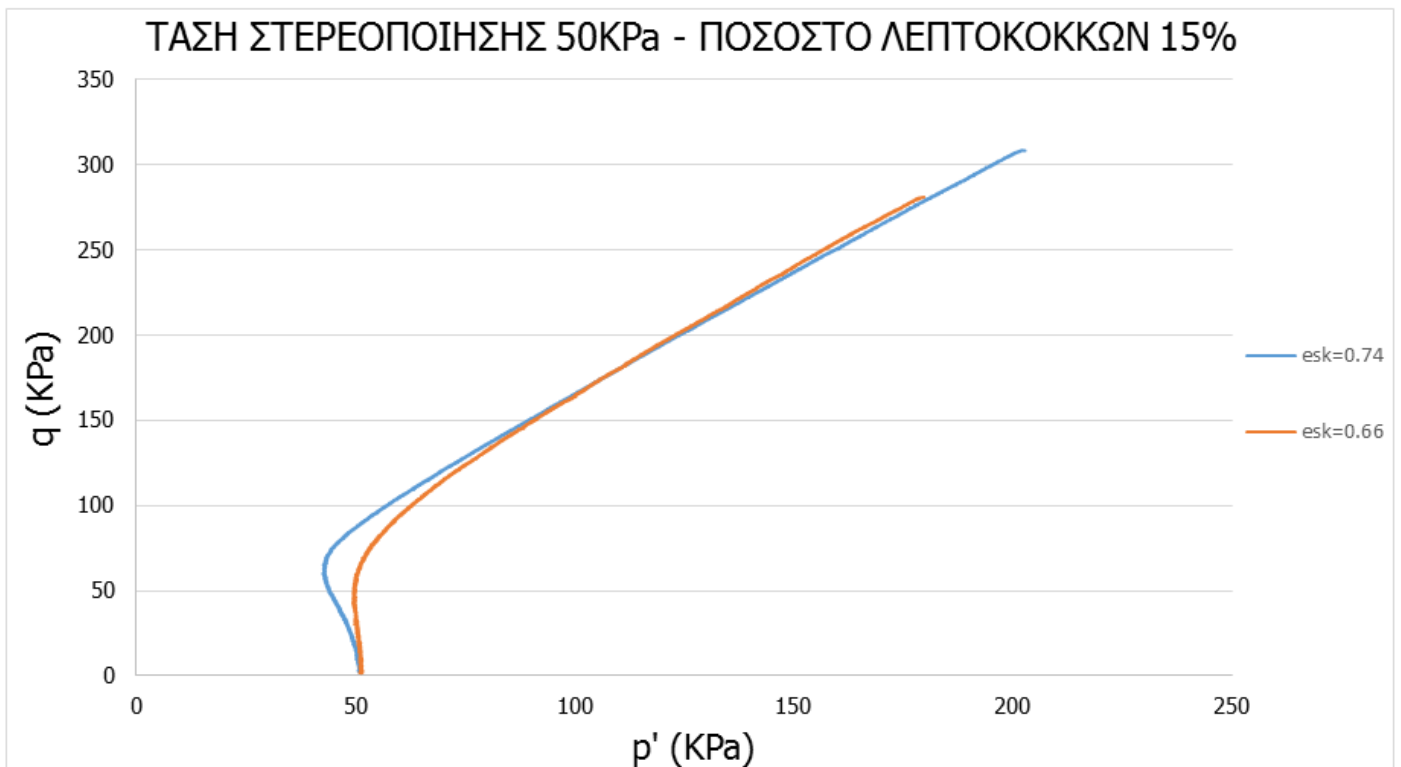
Σχήμα 7.10. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% σε αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa



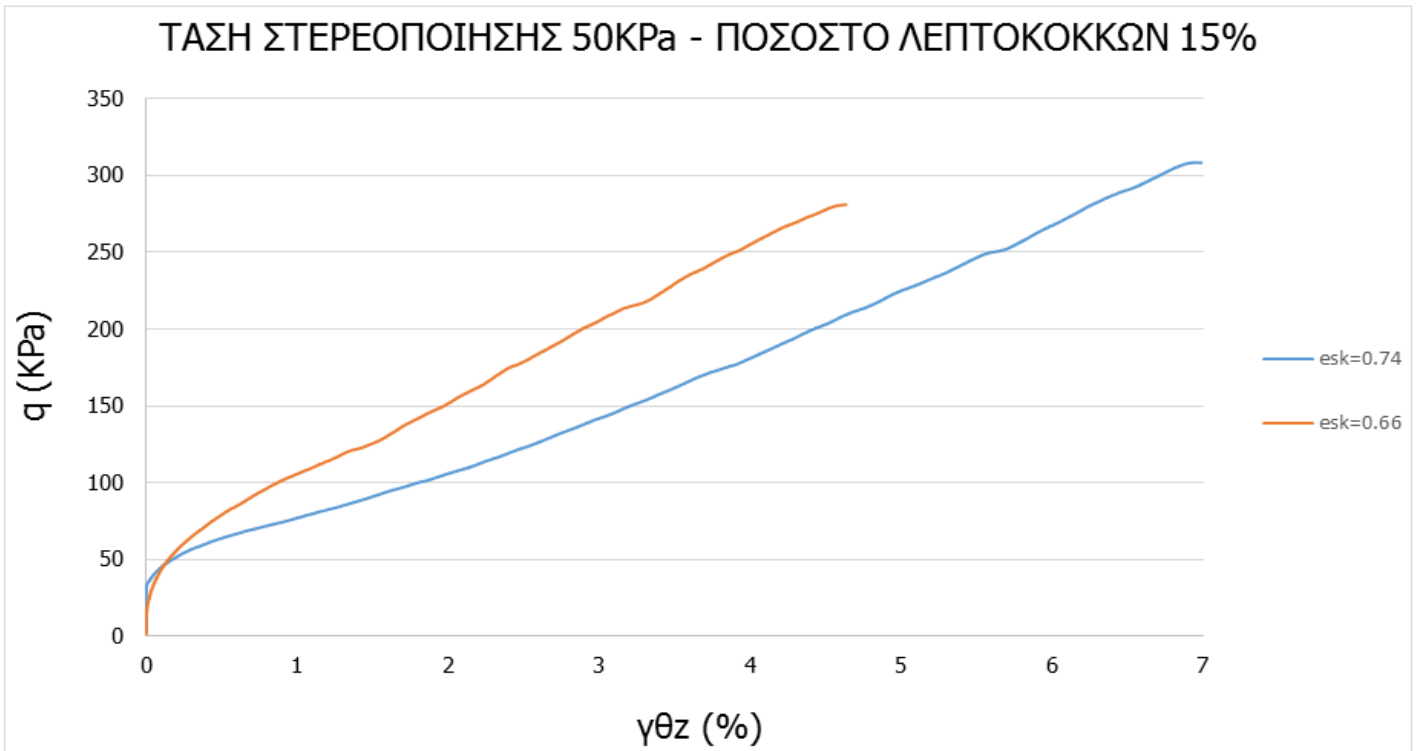
Σχήμα 7.11. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31–ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 10% σε αρχική τάση στερεοποίησης 300kPa

7.2.4. Τάση στερεοποίησης 50 KPa με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%

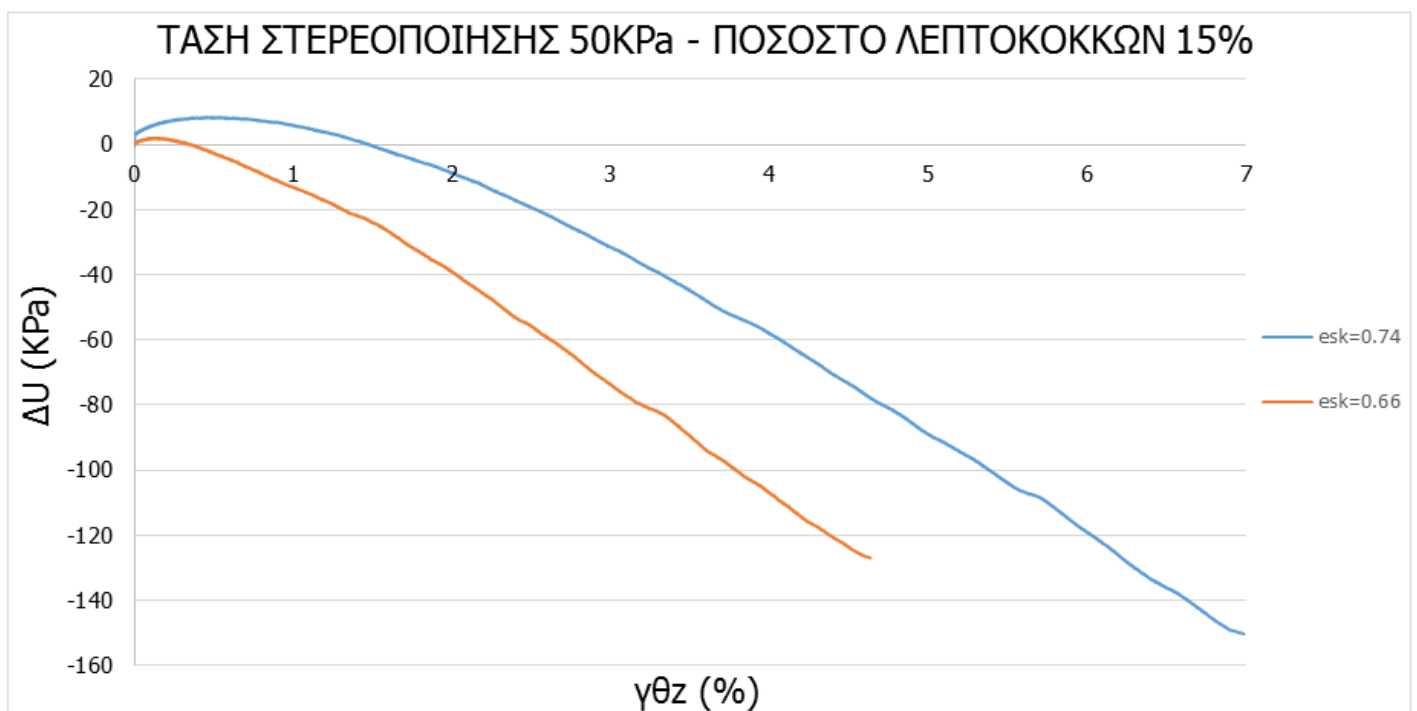
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται δοκίμια μίγματος άμμου– ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, τα οποία είναι στερεοποιημένα σε κοινή τάση στερεοποίησης 50kPa με σκελετικούς δείκτες πόρων $e_{sk}=0.74$ και $e_{sk}=0.66$ με στόχο να αποτυπωθεί η επίδραση της πυκνότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση ($q - p'$), αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και υπερπίεσης πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$).



Σχήμα 7.12. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση δοκιμών μίγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% σε αρχική τάση στερεοποίησης 50kPa



Σχήμα 7.13. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% σε αρχική τάση στερεοποίησης 50kPa



Σχήμα 7.14. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% σε αρχική τάση στερεοποίησης 50kPa

Γενικές παρατηρήσεις ως προς την επίδραση της πυκνότητας

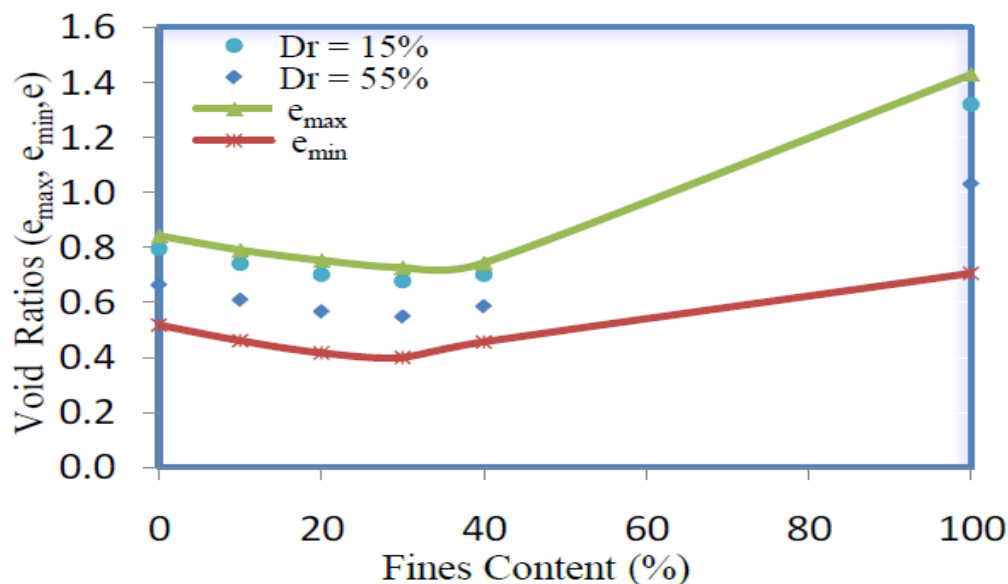
Όπως είναι ευρέως γνωστό, η αύξηση της πυκνότητας στα δοκίμια καθαρής άμμου οδηγεί σε αύξηση των διατμητικών αντοχών και σε μείωση της συστολικής φάσης. Αυτό μπορούμε να το παρατηρήσουμε και από τα παραπάνω διαγράμματα, αφού ισχύει σε όλα τα δοκίμια, τόσο στην καθαρή άμμο, όσο και στα μείγματα άμμου-ιλύος που περιέχουν έως και 15% λεπτόκοκκο υλικό, ανεξαρτήτως της αρχικής ενεργού τάσης στερεοποίησης. Εύκολα λοιπόν μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι καθώς μειώνεται ο δείκτης πόρων σκελετού η διατμητική αντοχή και η διαστολικότητα των δοκιμίων αυξάνεται.

Επιπλέον, τα μείγματα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 5% φαίνεται να παρουσιάζουν μικρή μεταβολή της διατμητικής αντοχής τους όταν μεταβάλλεται ο δείκτης πόρων σκελετού, ανεξαρτήτως της αρχικής ενεργού τάσης στερεοποίησης, σε σχέση με τα δοκίμια καθαρής άμμου. Αυτή η παρατήρηση γίνεται πιο ξεκάθαρη στο Σχήμα 7.7. αφού δοκίμια με μεγάλη διαφορά στους δείκτες πόρων παρουσιάζουν μικρή σχετικά διαφορά στις διατμητικές αντοχές. Αυτό φαίνεται επίσης και από τα διαγράμματα των υπερπιέσεων πόρων σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση στο Σχήμα 7.8. όπου φυσικά υπάρχει μία αύξηση του εύρους της συστολικής φάσης με την αύξηση του δείκτη πόρων σκελετού. Αν την συγκρίνουμε όμως με την αντίστοιχη αύξηση της συστολικής φάσης των δοκιμίων καθαρής άμμου, παρατηρούμε ότι είναι αρκετά μικρότερη. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο στα μείγματα με 15% περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.13. και 7.14., όπου φυσικά υπάρχει μία εμφανής διαφορά μεταξύ χαλαρού και πυκνού δοκιμίου, όμως είναι ασυγκρίτως μικρότερη σε σχέση με τα δοκίμια καθαρής άμμου. Συγκεκριμένα, από το Σχήμα 7.14. φαίνεται το πυκνό δοκίμιο να εισέρχεται κατευθείαν στη διαστολική φάση ενώ το χαλαρό δοκίμιο σε διατμητική παραμόρφωση περί το 1.5%. Το αντίστοιχο πυκνό και χαλαρό δοκίμιο στην καθαρή άμμο εισέρχονται στην διαστολική φάση με αντίστοιχη διαφορά 8% (Σχήμα 7.5.), κάτι που μας οδηγεί στο πιο πάνω συμπέρασμα.

Έτσι, το συμπέρασμα που εξαγάγουμε ως προς την επίδραση της πυκνότητας σε δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στην ίδια αρχική ενεργό τάση και με ίδιο περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού είναι ότι με την αύξηση της πυκνότητας, αυξάνεται η τάση για διαστολική συμπεριφορά, αναπτύσσονται λιγότερες υπερπιέσεις πόρων ενώ στα χαλαρότερα δοκίμια παρατηρείται αύξηση του μεγέθους των υπερπιέσεων.

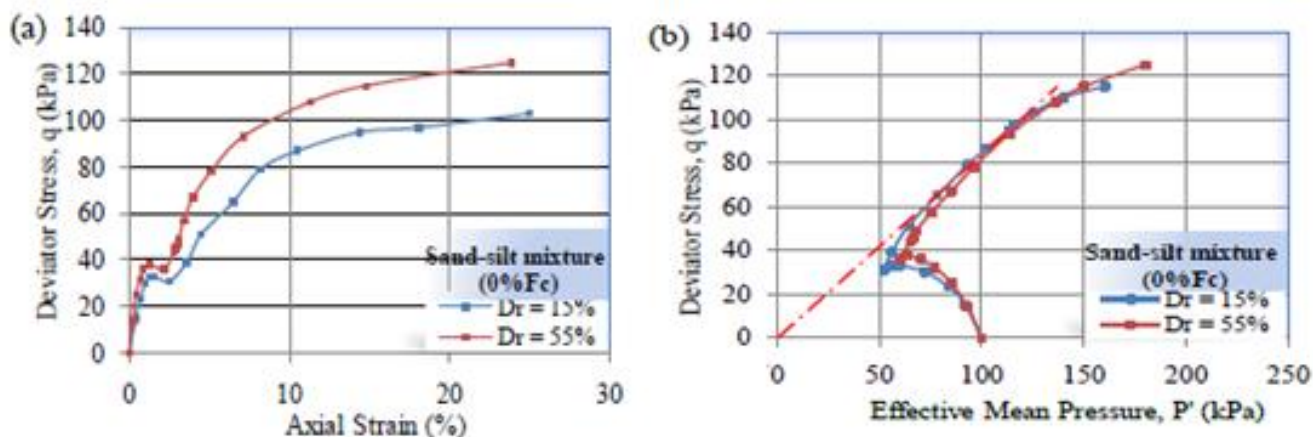
Επίσης με την αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων στο μείγμα, μειώνεται η διαφορά μεταξύ των αντοχών, δηλαδή μειώνεται ουσιαστικά η επίδραση της πυκνότητας, εφόσον τα δοκίμια πυκνά και χαλαρά έχουν ομαδοποιηθεί με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού.

Οι ερευνητές Bensoula, Missoum και Bendani πραγματοποίησαν μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και σε μείγματα άμμου ιλύος με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού, τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική τάση στερεοποίησης 100 KPa. Τα δοκίμια αυτά παρασκευάζονταν σε 2 σχετικές πυκνότητες $D_r=15\%$ και $D_r=50\%$ έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της πυκνότητας.

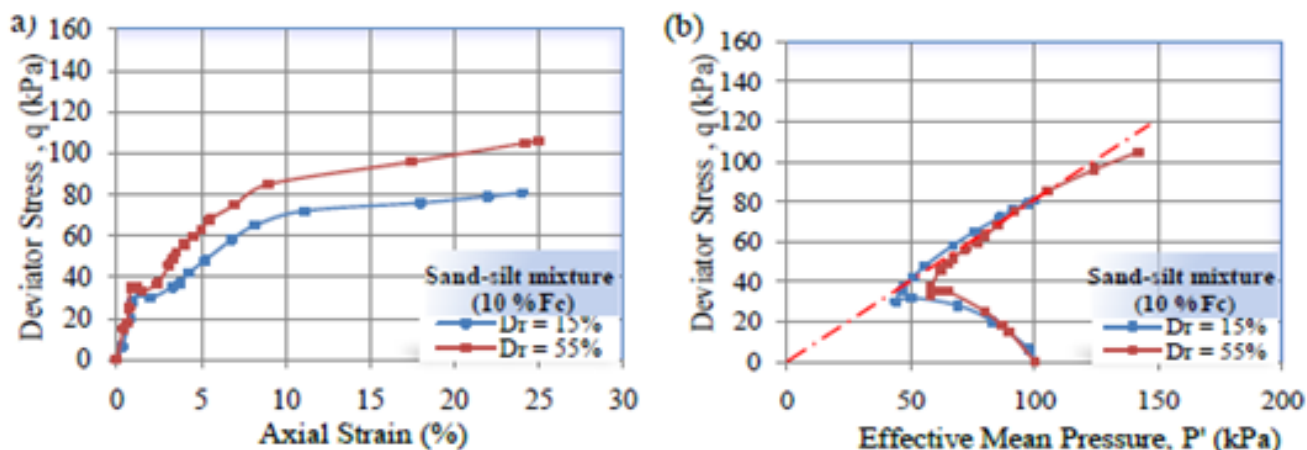


Σχήμα 7.15. Μέγιστοι και ελάχιστοι δείκτες πόρων για δοκίμια με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού

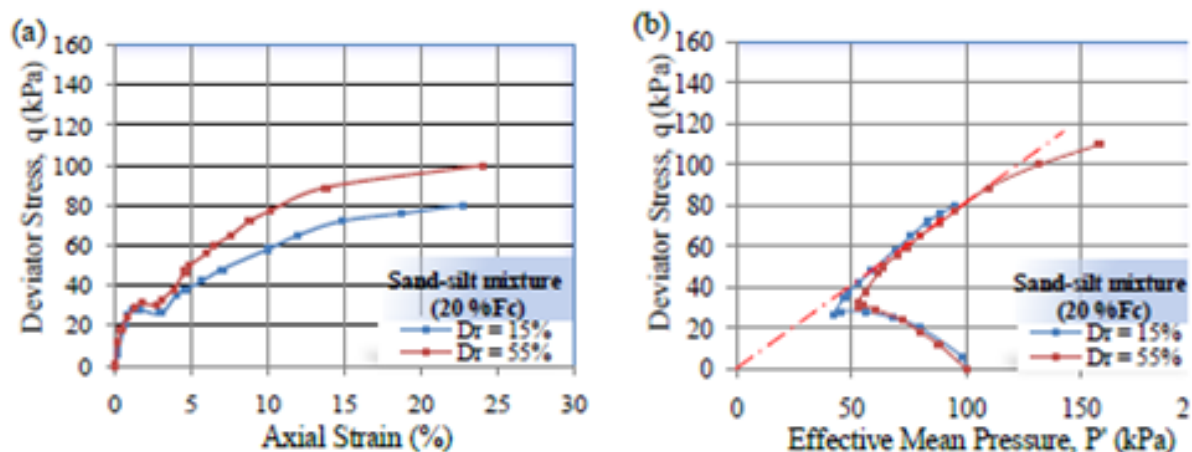
Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πιο πάνω ερευνητές προσδιόρισαν της σχετικές πυκνότητες των διαφόρων δοκιμών χρησιμοποιώντας για κάθε ποσοστό λεπτόκοκκου τον αντίστοιχο μέγιστο και τον ελάχιστο δείκτη πόρων για τον προσδιορισμό της σχετικής πυκνότητας κάθε δείγματος.



Σχήμα 7.16. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ($q-\epsilon_a$) και διαδρομές ενεργών τάσεων



Σχήμα 7.17. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (q - ϵ_a) και διαδρομές ενεργών τάσεων



Σχήμα 7.18. Πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση (q - ϵ_a) και διαδρομές ενεργών τάσεων

Παρατήρησαν 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 μείγματα με 10% και 20% φαίνεται να είναι περίπου ίδια. Στην παρούσα διπλωματική η επίδραση της πυκνότητας φαίνεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη στη άμμο απ' ότι στα μείγματα. Οι συγκρίσεις στην παρούσα διπλωματική έγιναν με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού και όχι με τη σχετική πυκνότητα.

7.3. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων

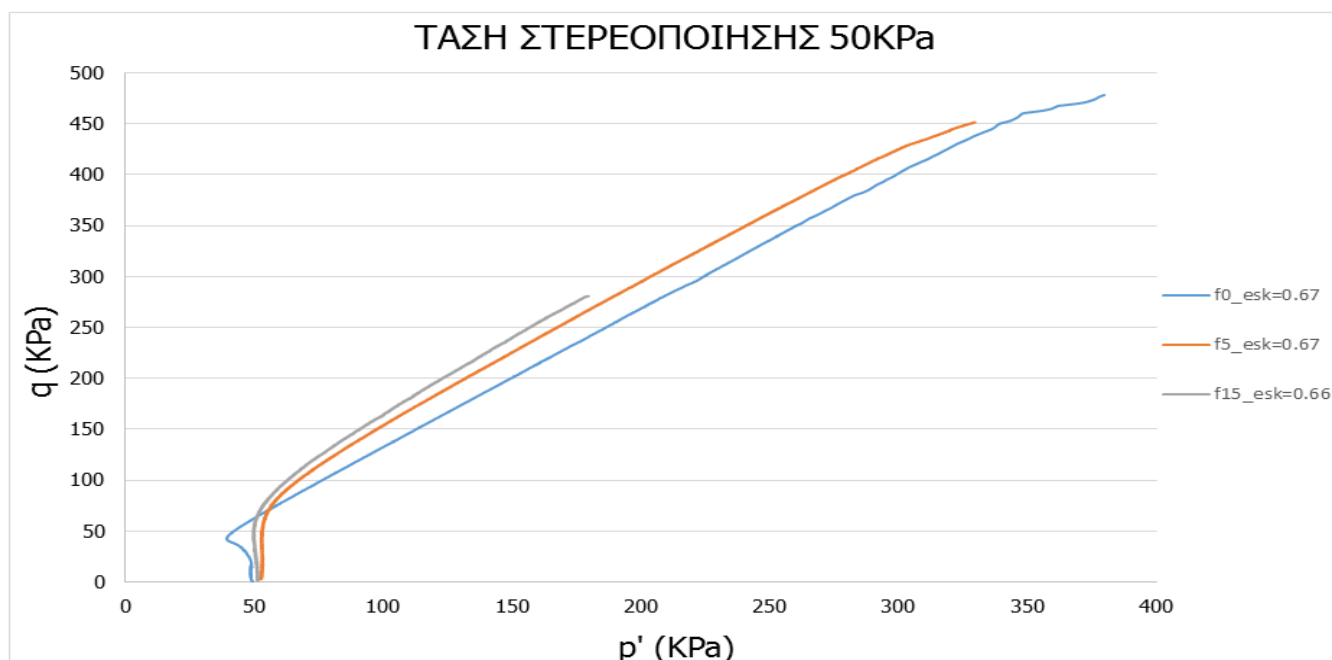
Σε αυτό το υποκεφάλαιο, εξετάζεται μετά από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων των μονοτονικών δοκιμών στρέψης κοίλου δοκιμίου, η επίδραση της προσθήκης κλάσματος λεπτόκοκκου υλικού σε δείγμα καθαρής άμμου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο ρόλος και η σημασία του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού

σε δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε αρχική ενεργό τάση από 50kPa έως και 300kPa. Για κάθε τάση στερεοποίησης, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως μεταβάλλεται η συμπεριφορά των δοκιμών καθαρής άμμου, καθώς επίσης και μειγμάτων άμμου και ιλύος τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού έως και 15%. Επίσης, η συμπεριφορά εξετάζεται και σε πυκνά, αλλά και σε χαλαρά δοκίμια για κάθε τάση στερεοποίησης.

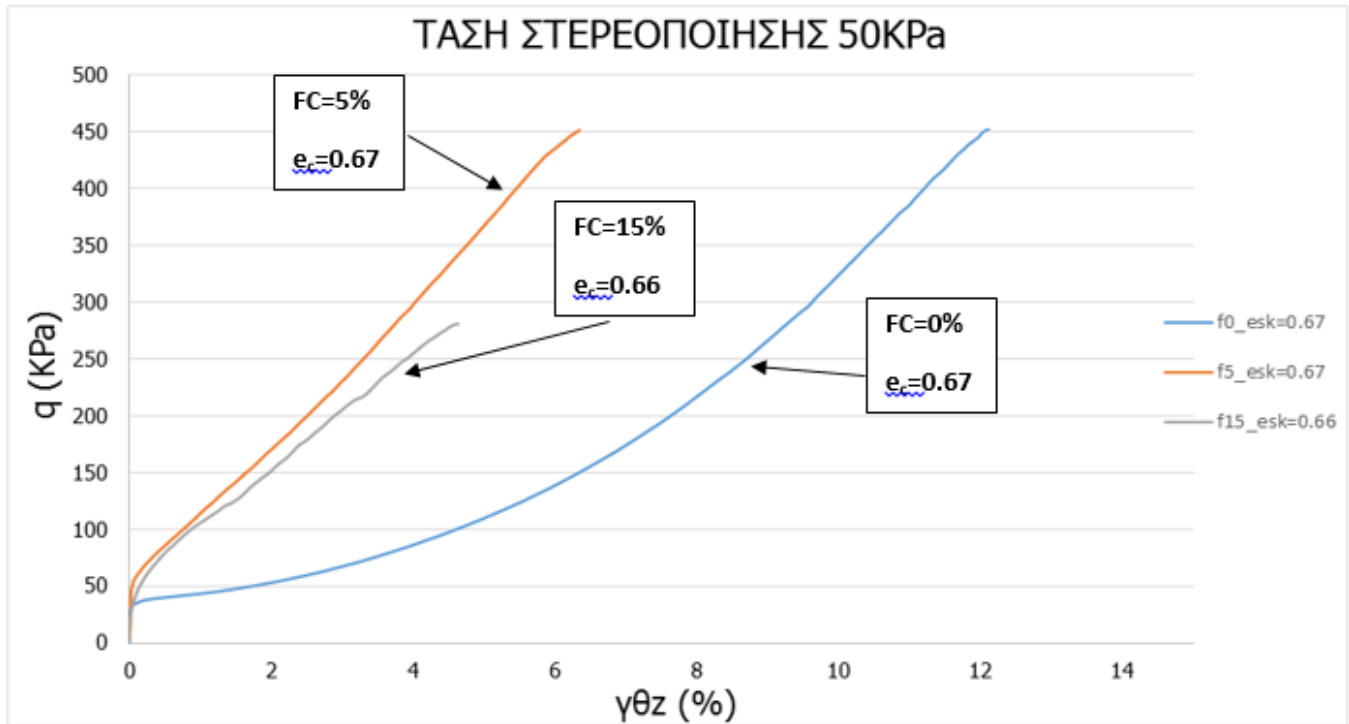
7.3.1. Τάση στερεοποίησης 50kPa

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για πυκνά δοκίμια, όσο και για χαλαρά, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p_0=50\text{kPa}$. Οι δείκτες πόρων σκελετού των πυκνών δοκιμών κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης κυμαίνονταν μεταξύ $esk=0.66-0.67$. Αντίστοιχα, οι δείκτες πόρων σκελετού των χαλαρών δοκιμών κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης κυμαίνονταν μεταξύ $esk=0.72-0.74$. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμών και ακολούθως των χαλαρών. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Τα δοκίμια αυτά συγκρίνονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων και στα πυκνά αλλά και στα χαλαρά δοκίμια.

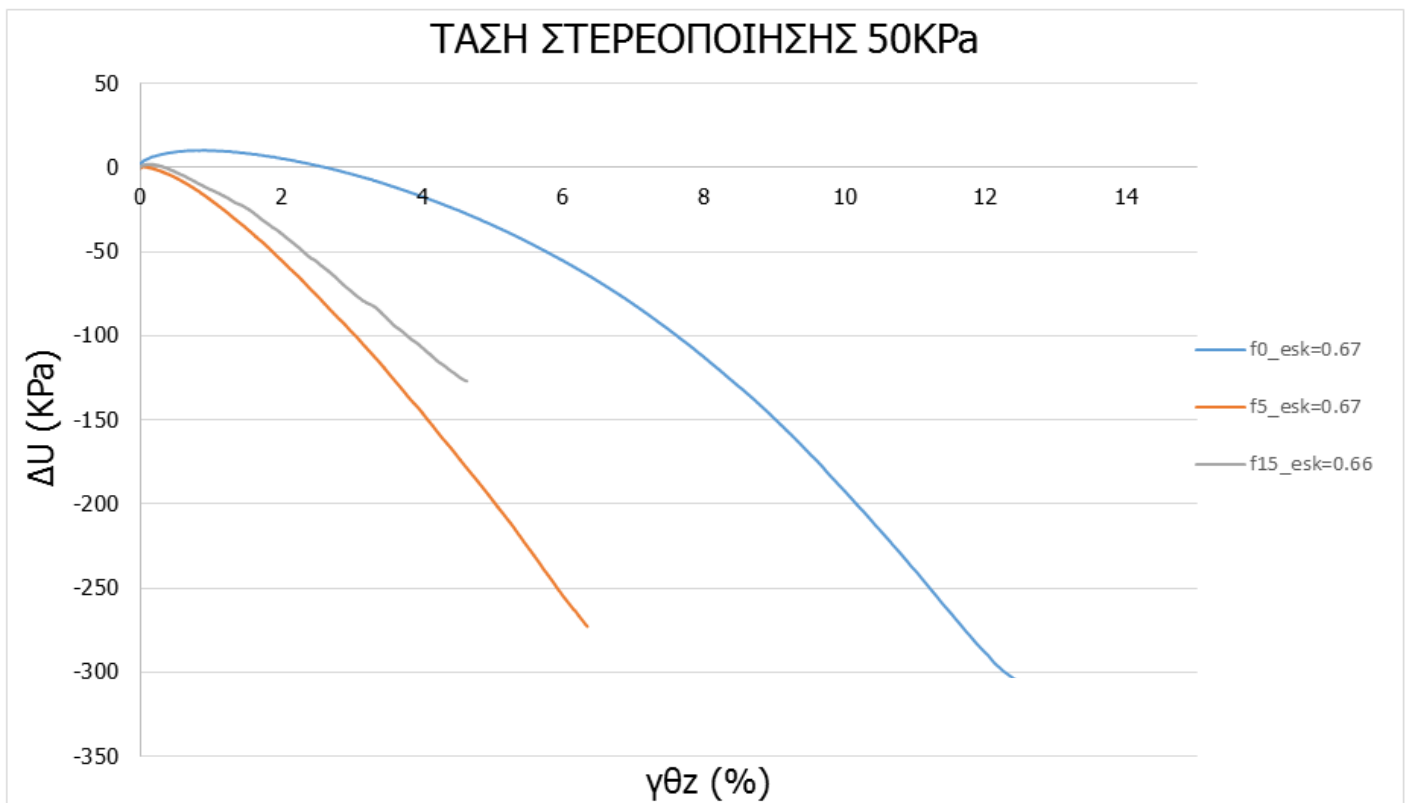
Πυκνά δοκίμια



Σχήμα 7.19. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένων στα 50kPa

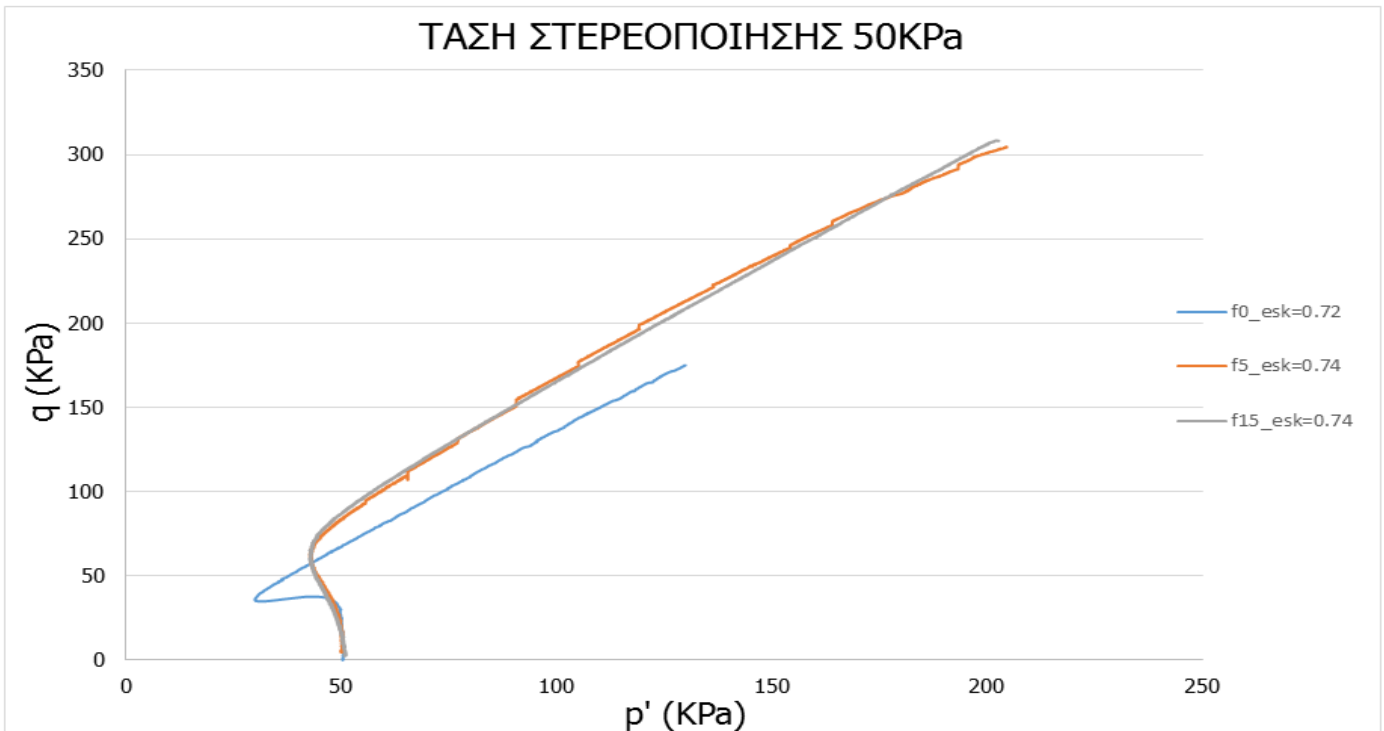


Σχήμα 7.20. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa

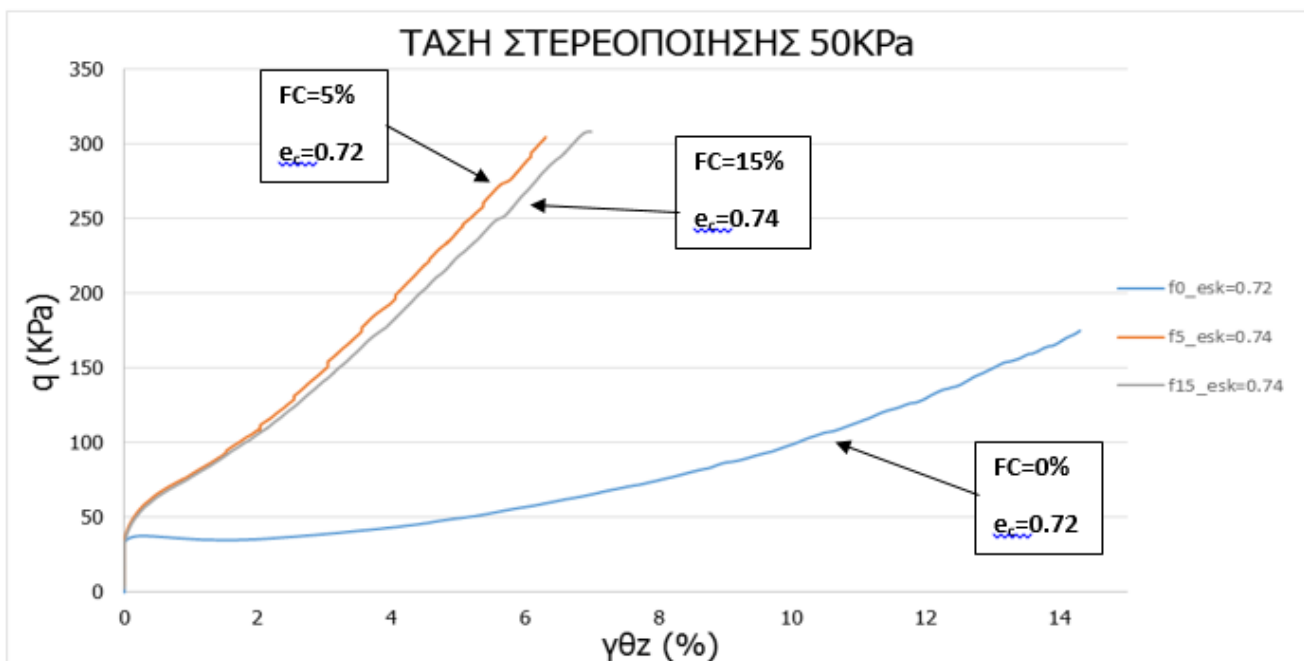


Σχήμα 7.21. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa

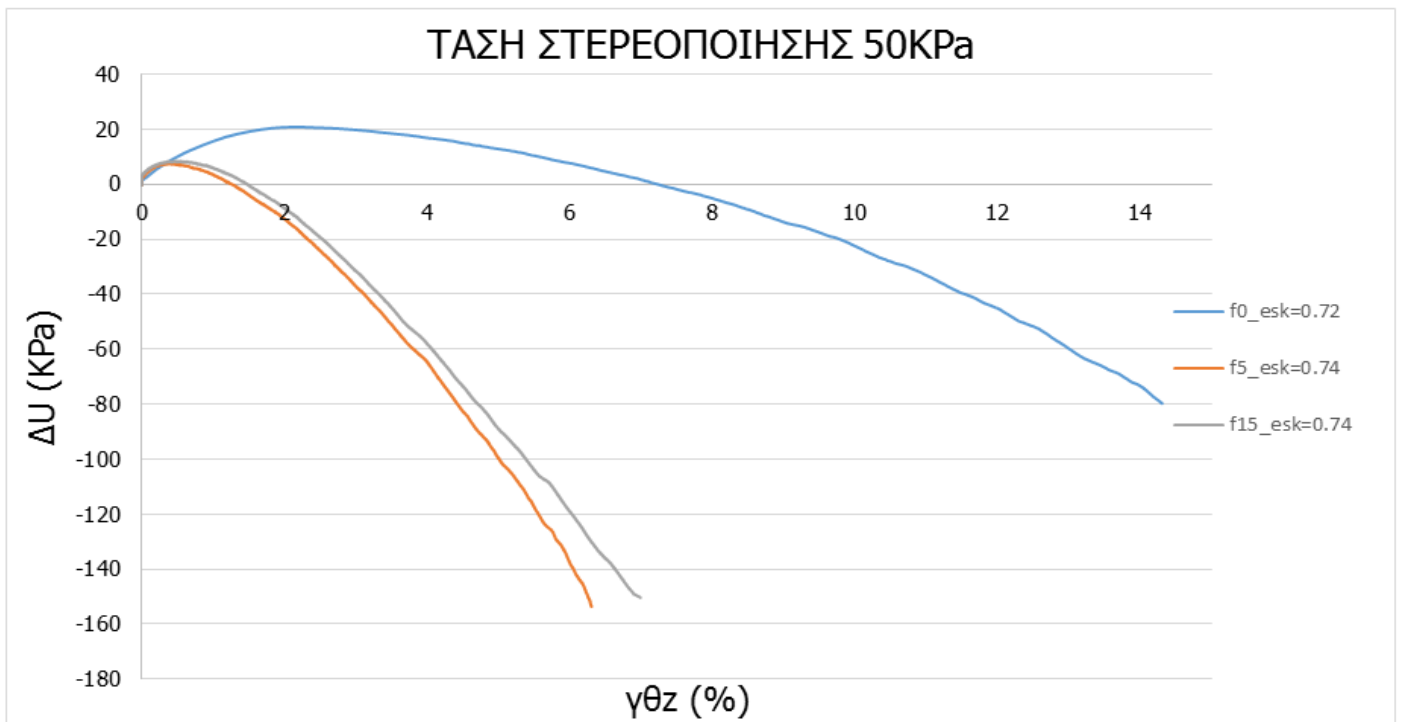
Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.22. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa



Σχήμα 7.23. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa



Σχήμα 7.24. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος(Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 50kPa

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, τα πυκνά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 50kPa, η προσθήκη ποσοστού λεπτοκόκκων σε ποσοστό 5% βελτιώνει τις διατμητικές αντοχές και αυξάνει την διαστολική φάση. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αυτού στο 15% δεν βελτιώνει την αντοχή σε σχέση με το 5% αλλά αντιθέτως την υποβιβάζει ελαφρώς (Σχήμα 7.20.).

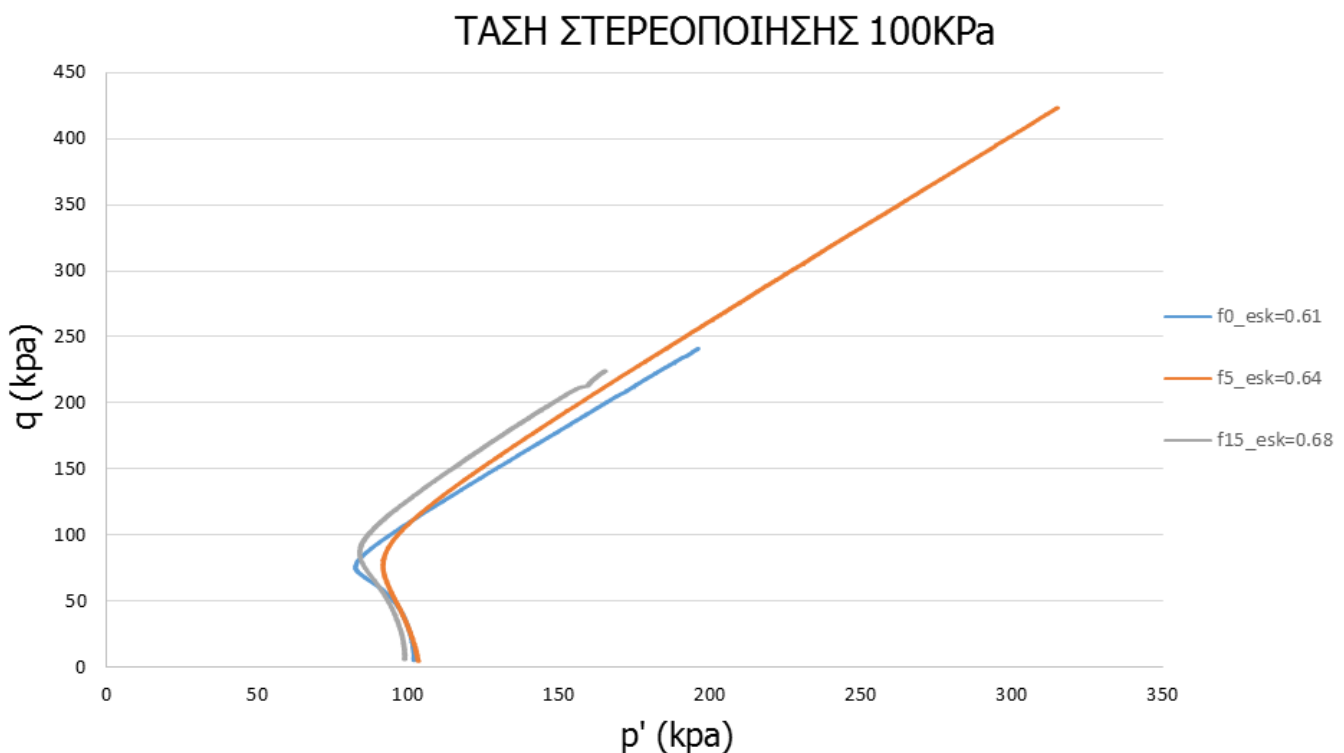
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στα χαλαρά δοκίμια, καθώς βλέπουμε μια μεγάλη αύξηση των διατμητικών αντοχών με την προσθήκη ποσοστού 5% λεπτόκοκκων υλικών. Περαιτέρω προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού σε ποσοστό 15% οδηγεί σε μικρή πτώση της αποκλίνουσας τάσης (για διατμητική παραμόρφωση >2%), η οποία είναι σχεδόν αμελητέα (Σχήμα 7.23.).

Τέλος, στα διάγραμματα υπερπίεσεων πόρων-παραμορφώσεων των πυκνών δοκιμίων (Σχήμα 7.21.) και των χαλαρών δοκιμίων (Σχήμα 7.24.) βλέπουμε ότι τις μεγαλύτερες υπερπίεσεις πόρων αναπτύσσει η καθαρή άμμος. Η προσθήκη ιλύος μειώνει το μέγεθος των υπερπίεσεων αλλά και και το εύρος των παραμορφώσεων όπου αυτές είναι θετικές.

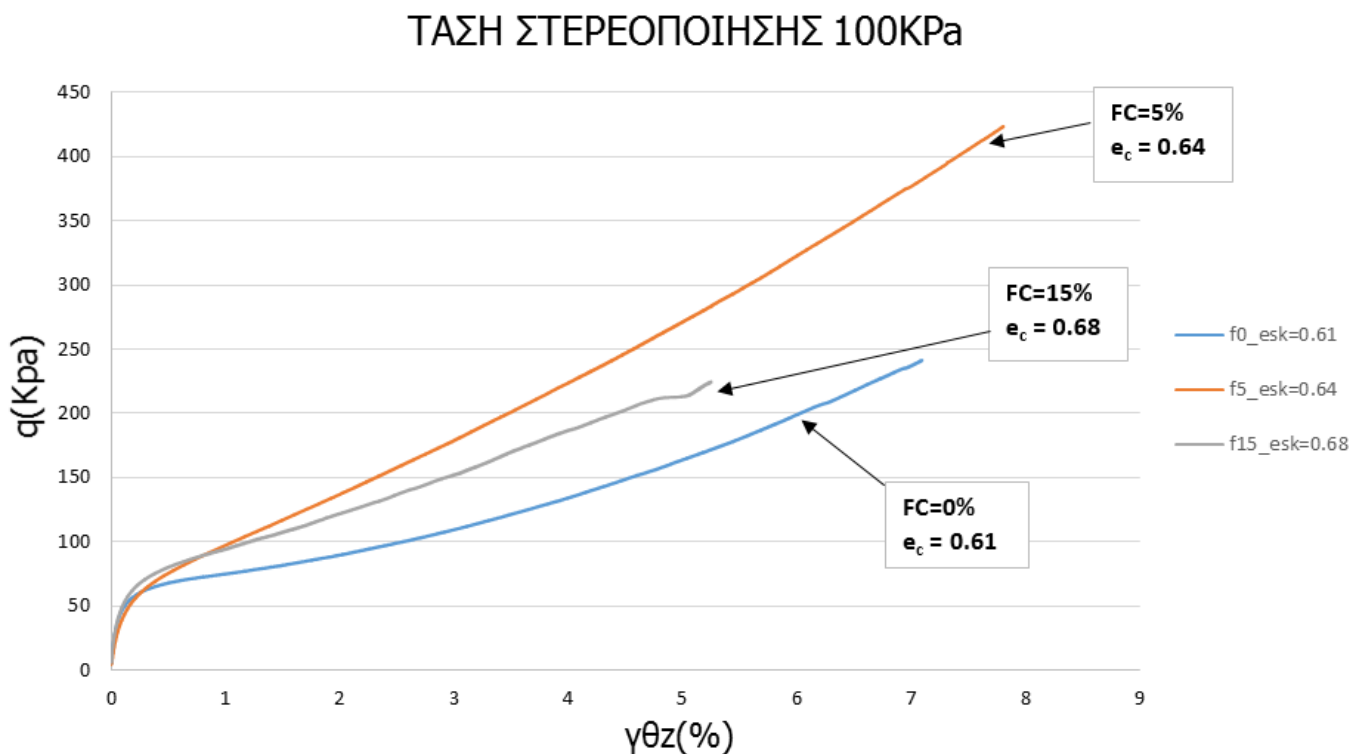
7.3.2. Τάση στερεοποίησης 100 kPa

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για πυκνά δοκίμια, όσο και για χαλαρά, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p_0=100\text{kPa}$. Οι δείκτες πόρων σκελετού των πυκνών δοκιμίων κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης κυμαίνονταν μεταξύ $esk=0.63-0.68$. Αντίστοιχα, οι δείκτες πόρων σκελετού των χαλαρών δοκιμίων κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης κυμαίνονταν μεταξύ $esk=0.72-0.73$. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμίων και ακολούθως των χαλαρών. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Τα δοκίμια αυτά συγκρίνονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων και στα πυκνά αλλά και στα χαλαρά δοκίμια.

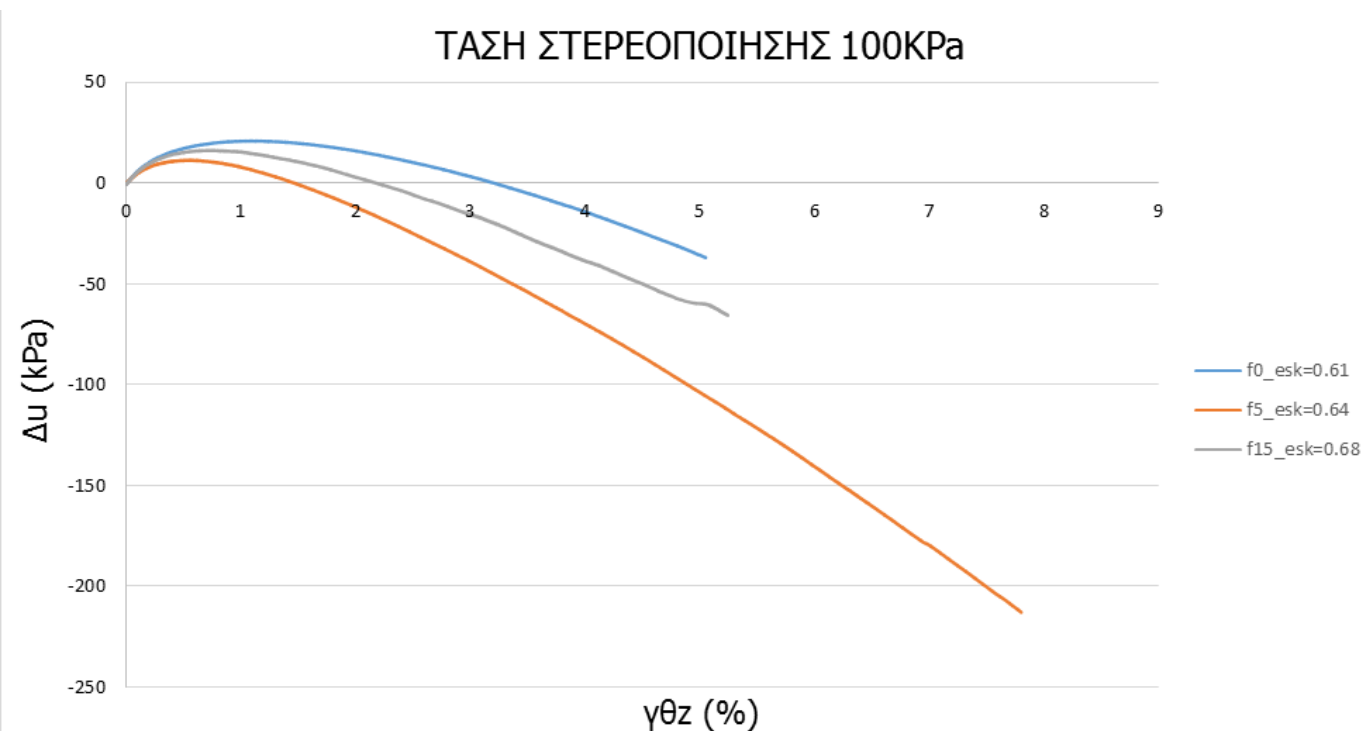
Πυκνά δοκίμια



Σχήμα 7.25. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

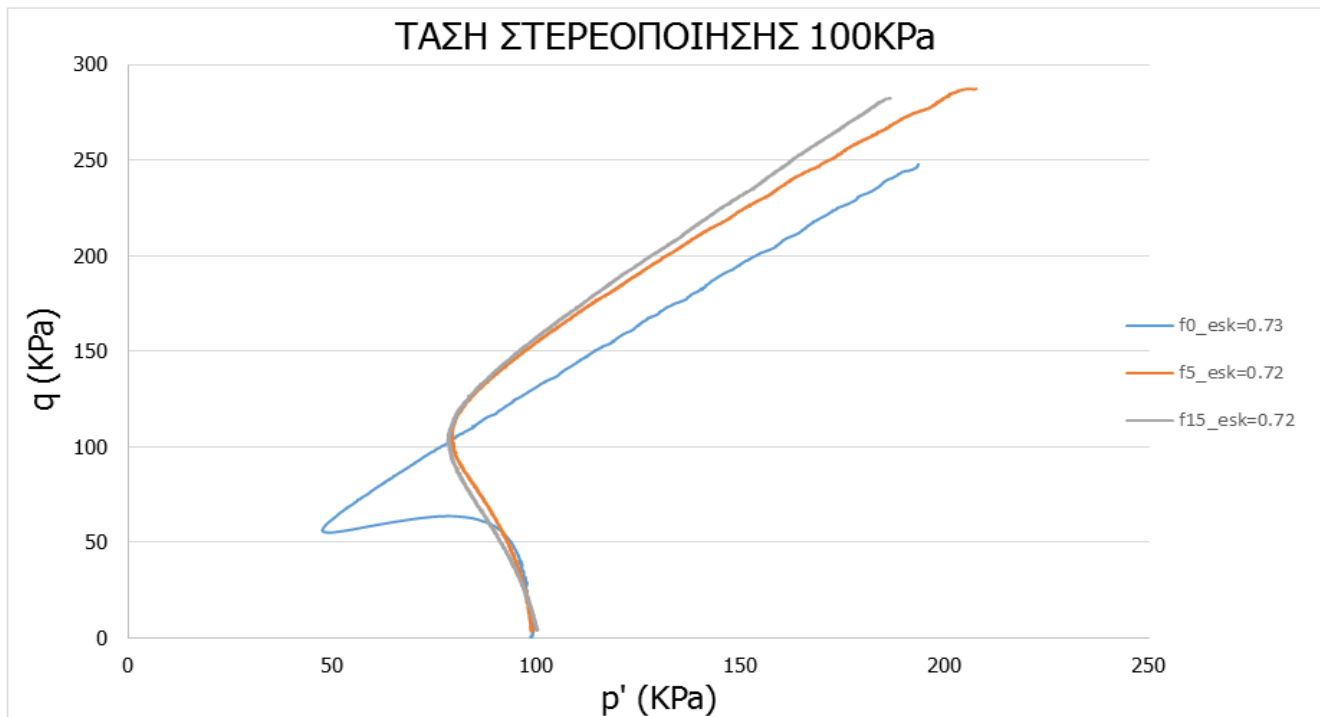


Σχήμα 7.26. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

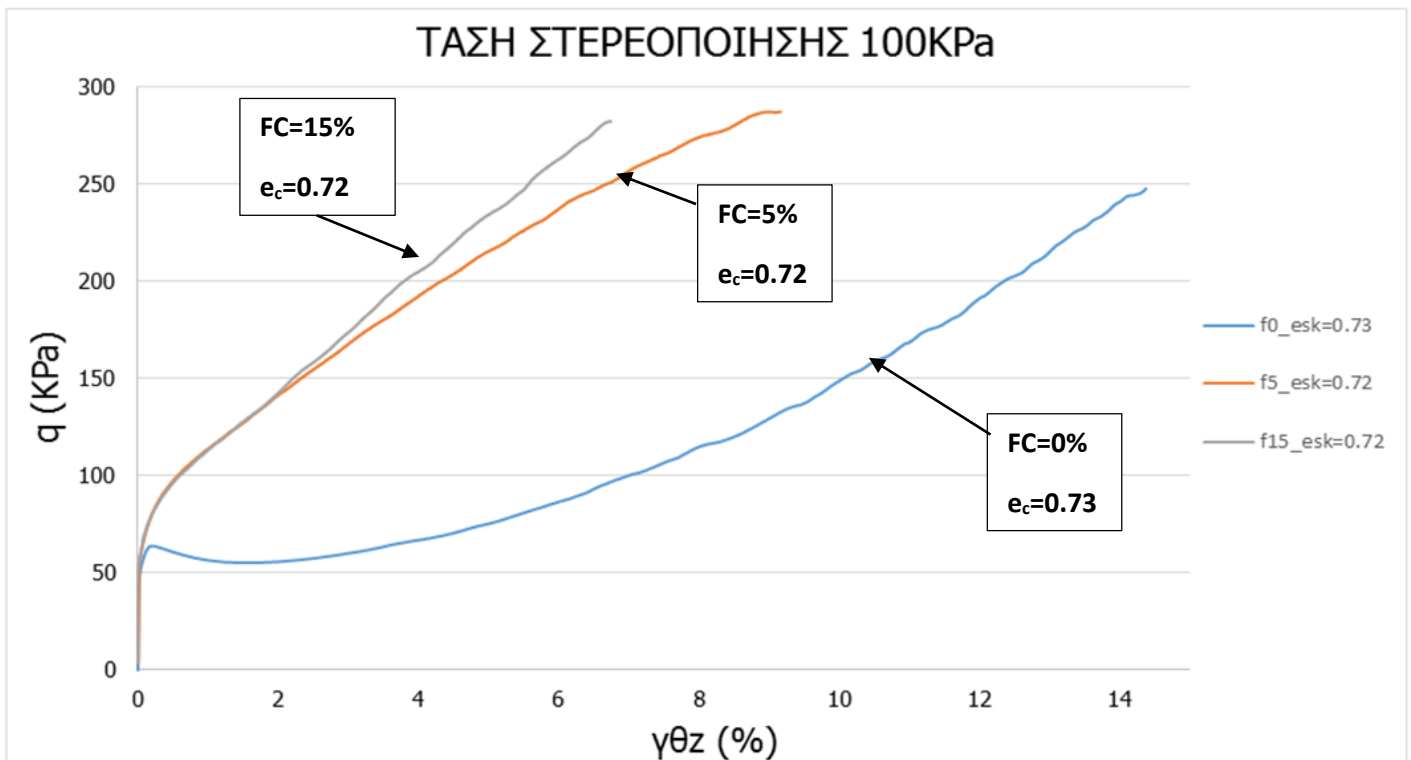


Σχήμα 7.27. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

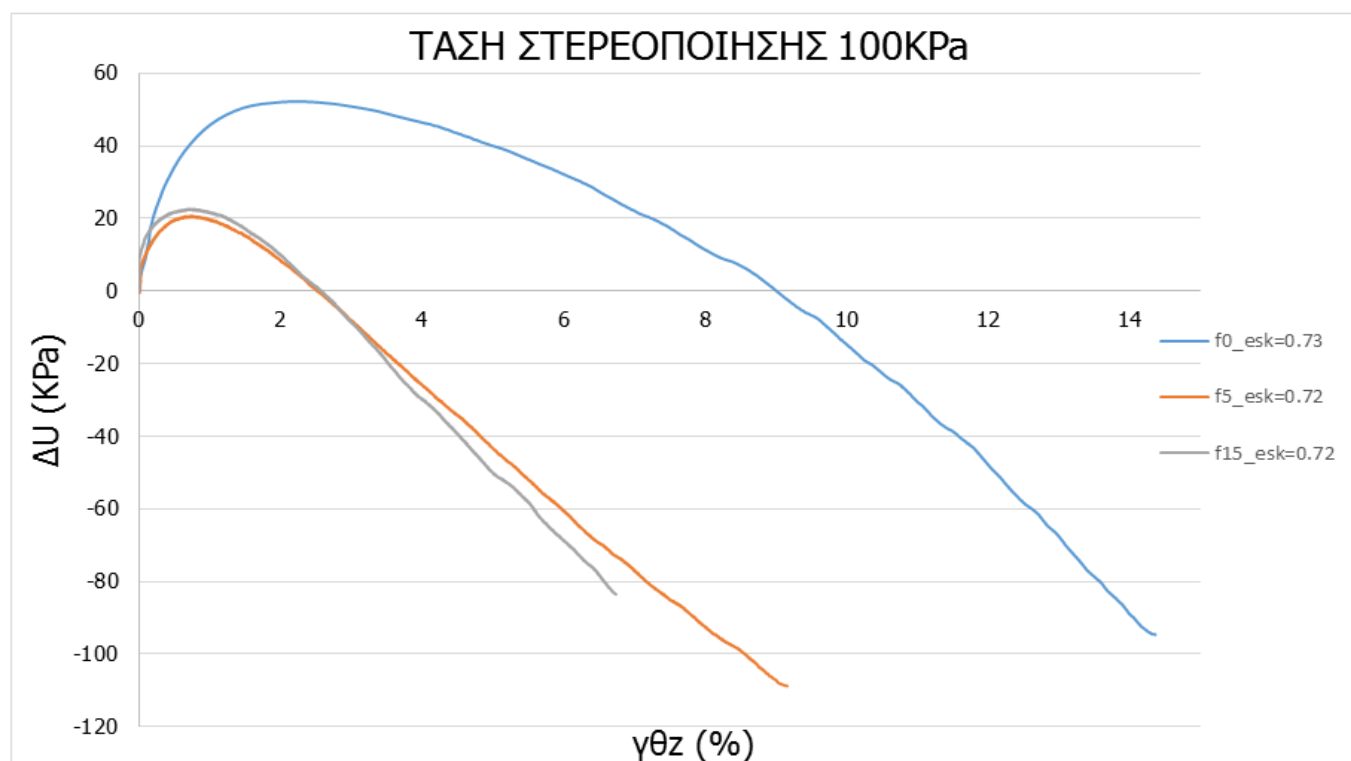
Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.28. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa



Σχήμα 7.29. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa



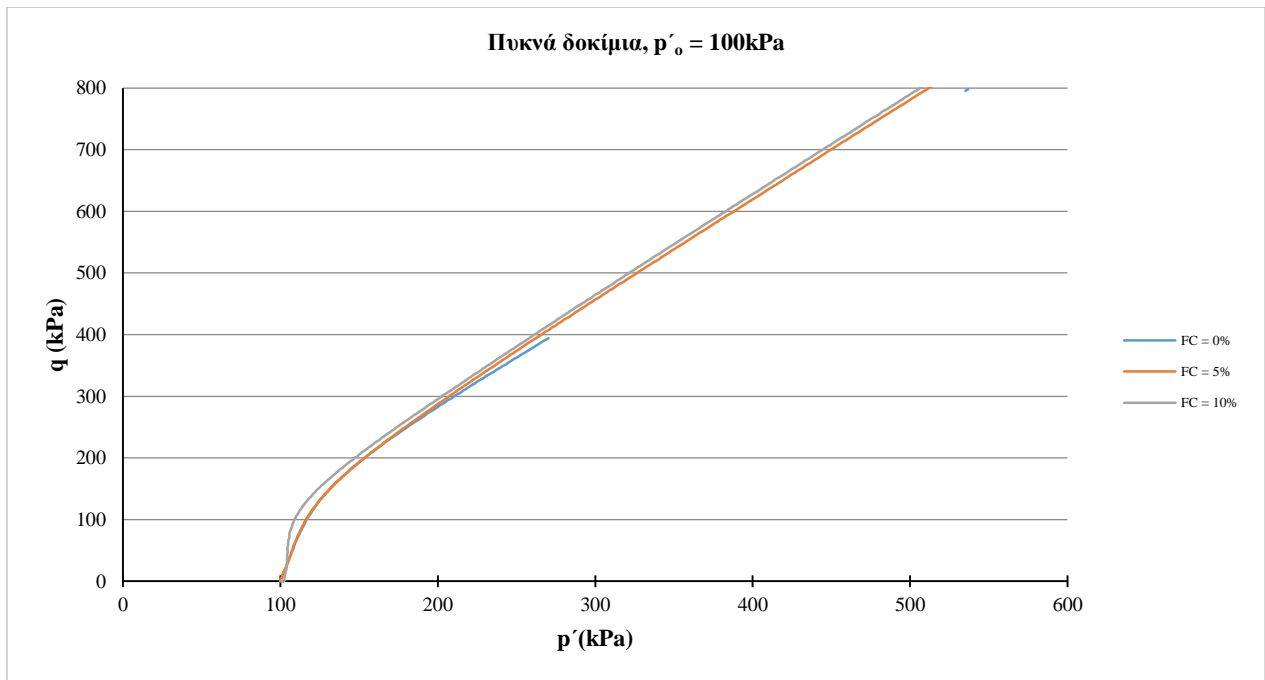
Σχήμα 7.30. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος(Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 100kPa

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, τα πυκνά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού φαίνεται να βελτιώνει τις αντοχές της καθαρής άμμου μέχρι και σε ποσοστό 15%. Επίσης, στα πυκνά δοκίμια το μείγμα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% φαίνεται να υπερτερεί ελαφρώς σε σχέση με το μείγμα που περιέχει 15% λεπτόκοκκο υλικό. Ωστόσο, η διαφορά αυτή μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα.

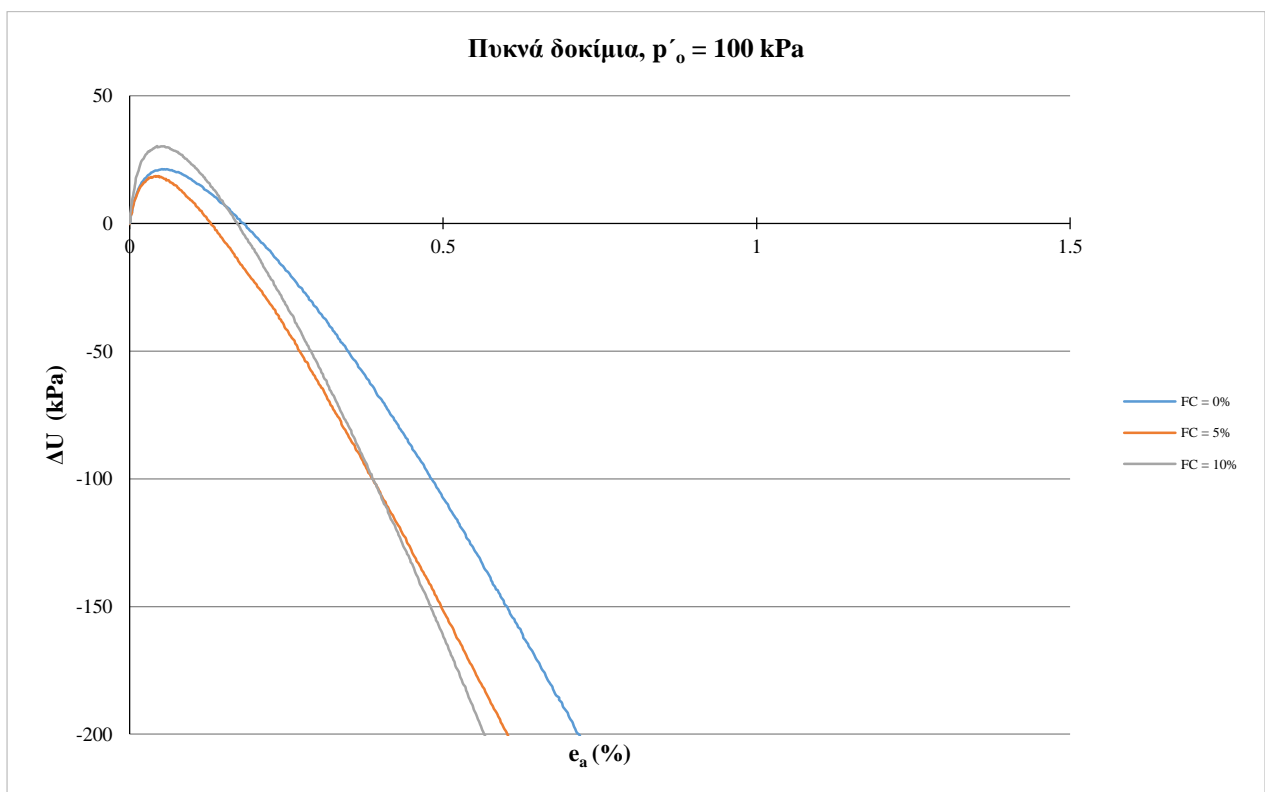
Όσο αφορά τα χαλαρά δοκίμια, και πάλι παρατηρούμε ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού βελτιώνει σημαντικά τις αντοχές της καθαρής άμμου. Συγκεκριμένα, το μείγμα με 5% περιεχόμενο λεπτόκοκκο υλικό έχει ελαφρώς ασθενέστερη συμπεριφορά σε σχέση με το μείγμα που περιέχει 15% λεπτόκοκκο όταν η στερεοποίηση γίνεται σε 100kPa. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο διαγράμμα αποκλίνουσας τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης (Σχήμα 7.29.) αλλά και από το διάγραμμα υπερπίεσης πόρων σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση (Σχήμα 7.30.).

Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και σε παλιότερη διπλωματική εργασία του τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνίου (Μάριος Γκιούσας ; 2012). Σε αυτή την διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές σε χαλαρά ($esk=0.719-0.725$) και πυκνά ($esk=0.588-0.616$) δοκίμια μειγμάτων και καθαρής άμμου τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση ίση με 100kPa και με περιεχόμενα ποσοστά λεπτοκόκκων από 0% μέχρι και 10%. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών.

Πυκνά δοκίμια

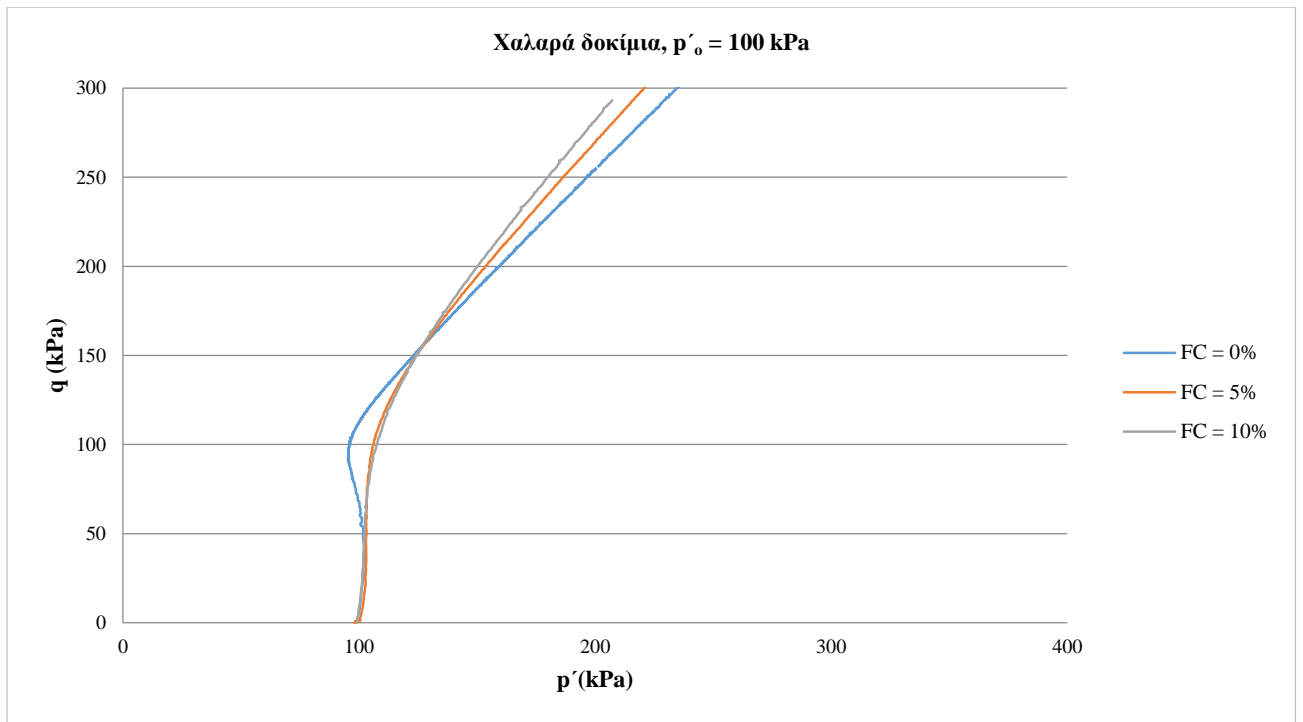


Σχήμα 7.31. Διάγραμμα ($p' - q$), Πυκνά δοκίμια, $p'_o = 100\text{kPa}$

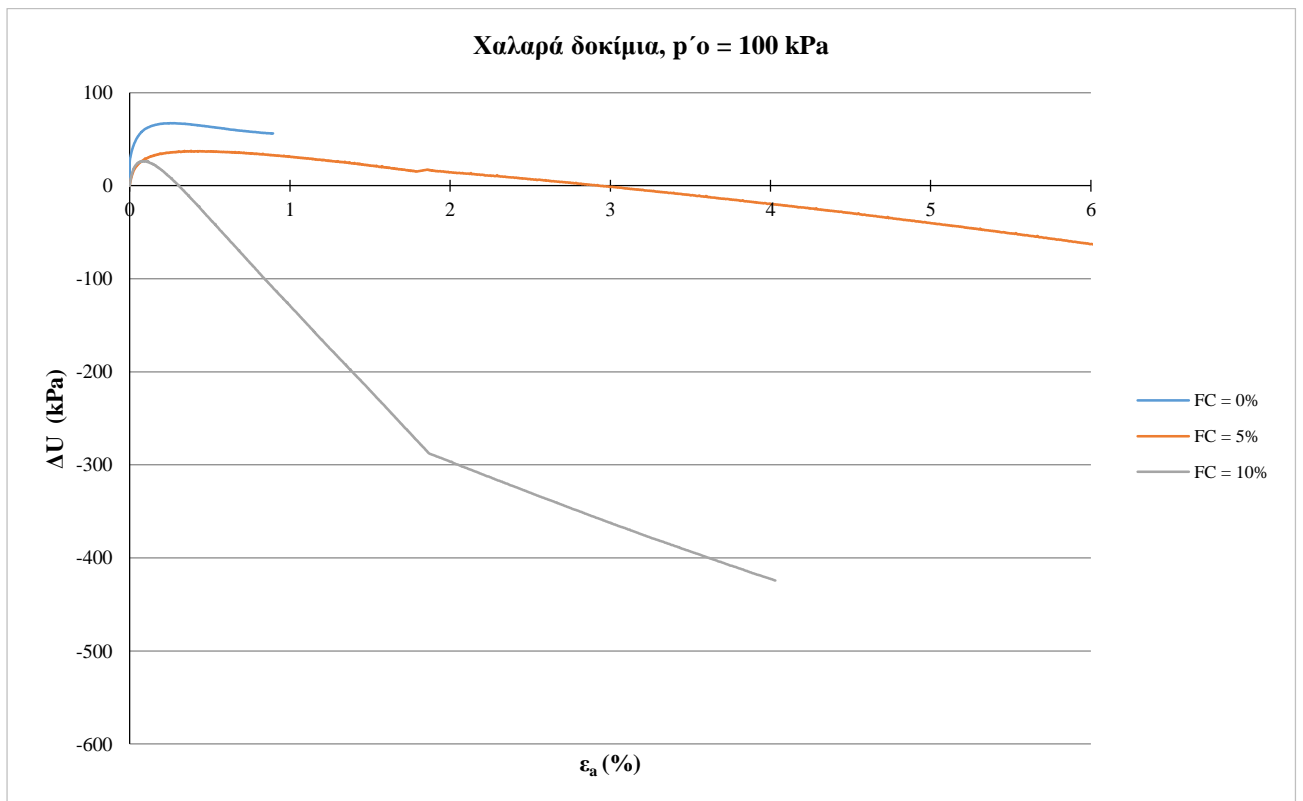


Σχήμα 7.32. Διάγραμμα ($\Delta U - \epsilon_a$), Πυκνά δοκίμια, $p'_o = 100\text{kPa}$

Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.33. Διάγραμμα ($p' - q$), Χαλαρά δοκίμια, $p'_o = 100 \text{ kPa}$



Σχήμα 7.34. Διάγραμμα ($\Delta U - \varepsilon_a$), Χαλαρά δοκίμια, $p'_o = 100 \text{ kPa}$

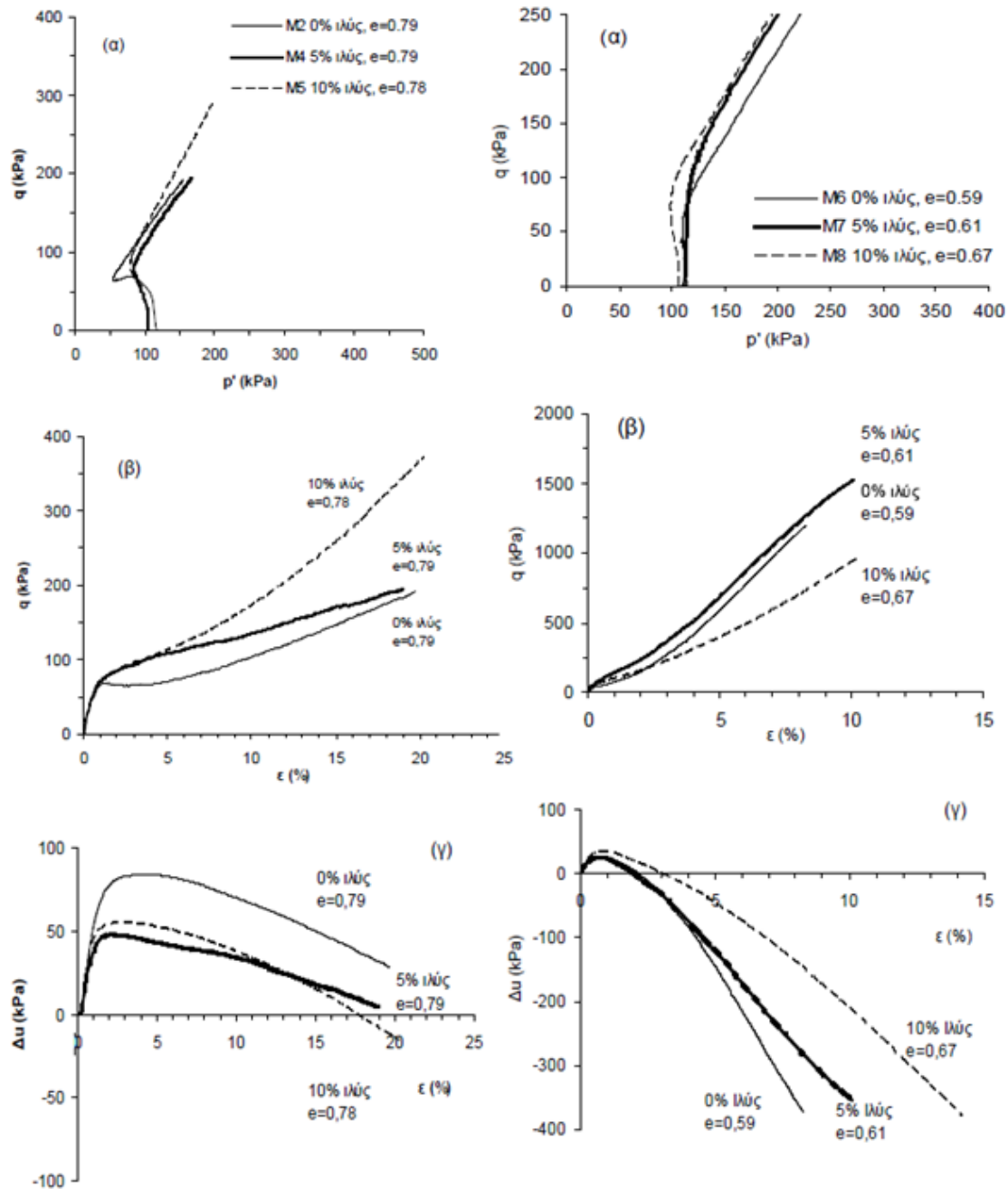
Στα Σχήματα 7.31. και 7.32. παρατηρούμε ότι για τα πυκνά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού στην καθαρή άμμο δημιουργεί μια πιο διαστολική συμπεριφορά σε σχέση με τα δοκίμια καθαρής άμμου. Ωστόσο, η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων σε ποσοστό 10% υποβαθμίζει ελαφρώς τις αντοχές και την διαστολικότητα των δοκιμών σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που περιέχουν 5% λεπτόκοκκο υλικό.

Αντίστοιχα, από τις διαδρομές τάσεων (Σχήμα 7.33.) και και από το διάγραμμα υπερπίεσης πόρων – αξονικής παραμόρφωσης (Σχήμα 7.34.) για τα χαλαρά δοκίμια, παρατηρούμε ότι η αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων στα μείγματα οδηγεί σε αύξηση της αποκλίνουσας τάσης, όπως και αύξηση της διαστολικότητας των δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, στα χαλαρά δοκίμια φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων μέχρι το 10%, αυξάνει συνεχώς την διαστολικότητα και την αντοχή των δοκιμών, με το δοκίμιο με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 10% να εισέρχεται στην διαστολική φάση από αξονική παραμόρφωση μόλις 0.3%. Αντίθετα στα πυκνά δοκίμια το αντίστοιχο ποσοστό εμφάνισε μεγαλύτερη υπερπίεση πόρων και από την καθαρή άμμο στις μικρές παραμορφώσεις. (Σχήμα 7.32).

Επίσης, σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγήθηκαν και άλλοι ερευνητές, μετά από πειράματα που πραγματοποίησαν. Στο Σχήμα 7.35. (Γεωργιάννου και Σάκκης ; 2010) παριστάνονται τα αποτελέσματα από σειρά τριαξονικών δοκιμών σε μείγματα άμμου-ιλύος, σε δύο ομάδες πυκνοτήτων, τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 100kPa. Τα χαλαρά δοκίμια είχαν δείκτη πόρων (Global Void Ratio) κοντά στο $e=0.8$, ενώ οι δείκτες πόρων για τα πυκνά δοκίμια κυμαίνονταν μεταξύ $e=0.59-0.67$.

Στο Σχήμα 7.35. φαίνεται ότι η προσθήκη ιλύος στα χαλαρά δοκίμια βελτιώνει συνεχώς την συμπεριφορά του μείγματος σε σχέση με την καθαρή άμμο. Στα πυκνά δοκίμια η προσθήκη υλίου σε ποσοστό 5% αυξάνει ελάχιστα την αποκλίνουσα τάση. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αυτού σε 10% οδηγεί σε αντοχές σημαντικά μειωμένες και πιο συστολική συμπεριφορά του μείγματος σε σχέση με την καθαρή άμμο. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί πως η ομαδοποίηση πυκνών-χαλαρών δοκιμών έγινε με βάση τον δείκτη κενών (Global Void Ratio) και όχι με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού.

Στο Σχήμα 7.36. φαίνεται η συχέτιση μεταξύ του δείκτη πόρων σκελετού και του κλασσικού δείκτη πόρων. Αμέσως γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων σε ένα μείγμα με σταθερό δείκτη πόρων σκελετού μειώνει σημαντικά τον αντίστοιχο κλασσικό δείκτη πόρων. Έτσι αν ομαδοποιήσουμε δοκίμια ίδιου δείκτη κενών με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων, τα μείγματα με υψηλά ποσοστά λεπτοκόκκων θα έχουν πολύ αραιότερες δομές με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού και έτσι δικαιολογούνται και οι φαινομενικά μικρότερες αντοχές των δοκιμών με ποσοστά λεπτόκοκκων υλικών μεγαλύτερα του 5%.



Σχήμα 7.35. Χαλαρά δοκίμια (αριστερή στήλη) και πυκνά δοκίμια (δεξιά στήλη), $p' = 100$ kPa, (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, (γ) καμπύλες υπερπίεσης πόρων-παραμορφώσεων (Γεωργιάννου και Σάκκης ; 2010)

Αυτό φαίνεται επίσης και από τον μαθηματικό τύπο που συνδέει τον δείκτη πόρων σκελετού με τον κλασσικό δείκτη πόρων. Σύμφωνα με την σχέση αυτή ισχύει:

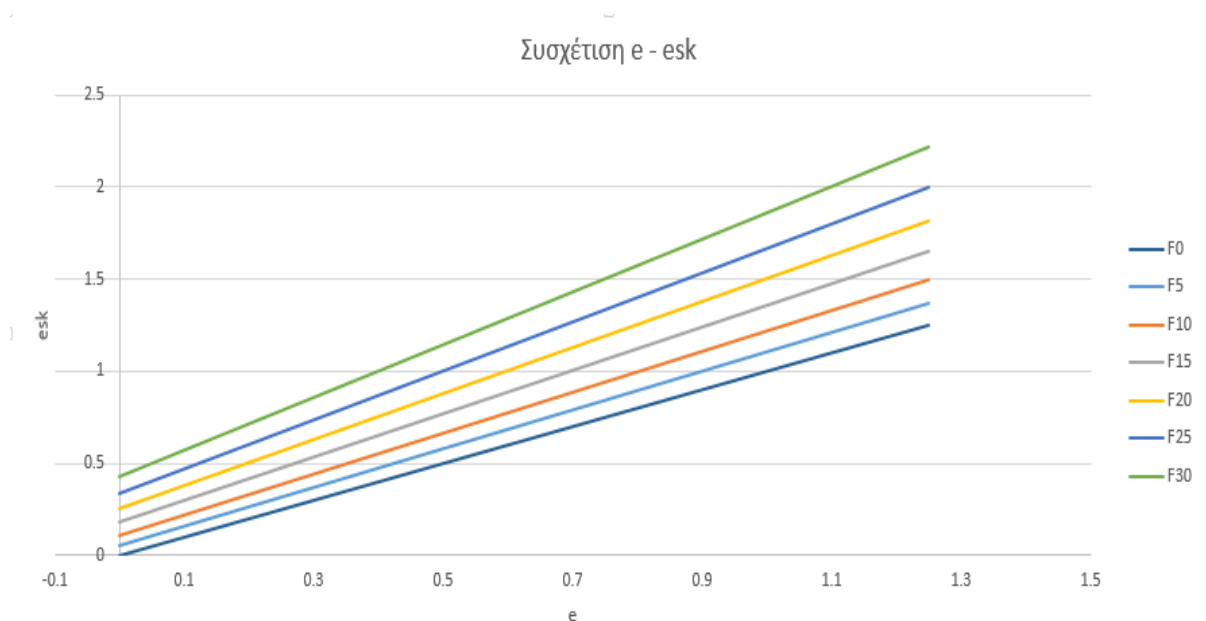
$$e = e_{sk}(1-FC)-FC$$

όπου e_{sk} = ο δείκτης πόρων σκελετού

e = δείκτης κενών

και FC = ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού κατα βάρος

Για τον ίδιο δείκτη πόρων σκελετού η αύξηση στο ποσοστό των λεπτόκοκκων οδηγεί πάντα σε μείωση του κλασσικού δείκτη πόρων. Έτσι λοιπόν θα μπορούσαν να δικαιολογηθούν οι διαφορές που παρατηρούνται στα πυκνά δοκίμια μεταξύ της παρούσας διπλωματικής εργασίας και των αποτελεσμάτων που παρατηρήθηκαν στο Σχήμα 7.35. (Γεωργιάννου και Σάκκης ; 2010).

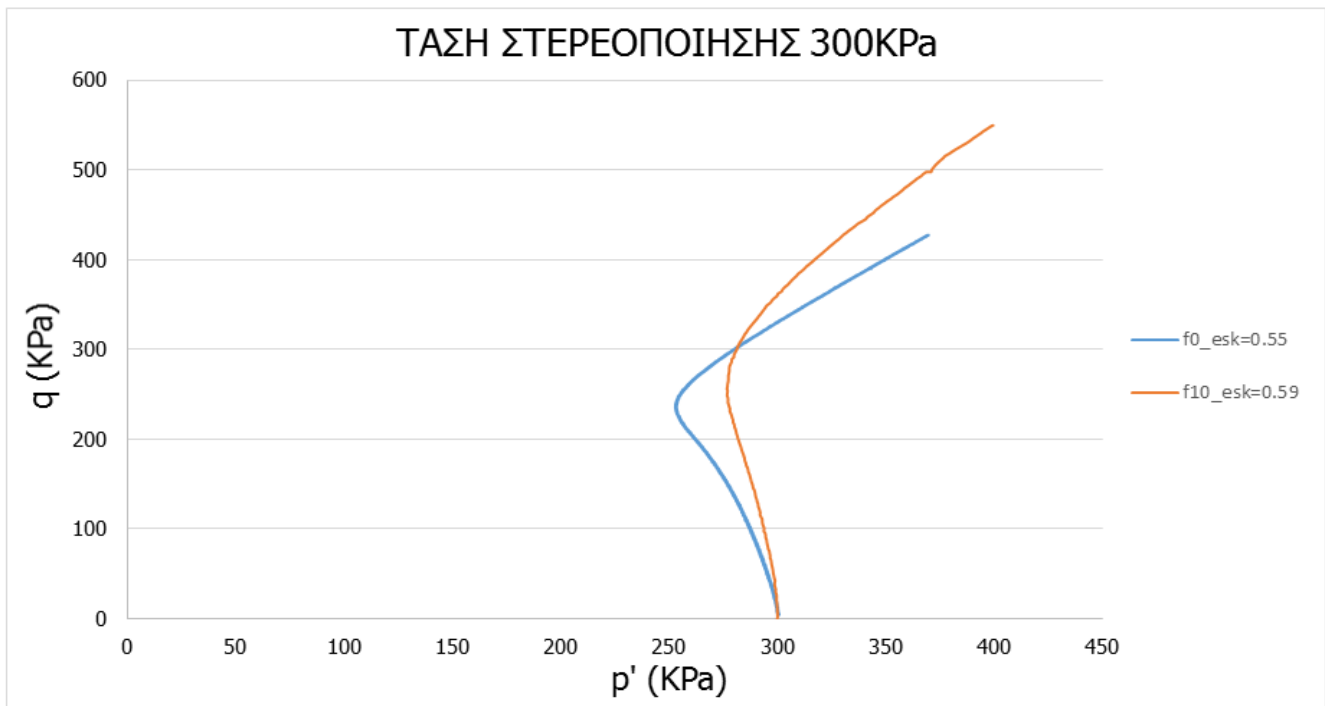


Σχήμα 7.36. Δείκτης πόρων σκελετού (esk) σε συνάρτηση με τον κλασσικό δείκτη πόρων (e) για διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού

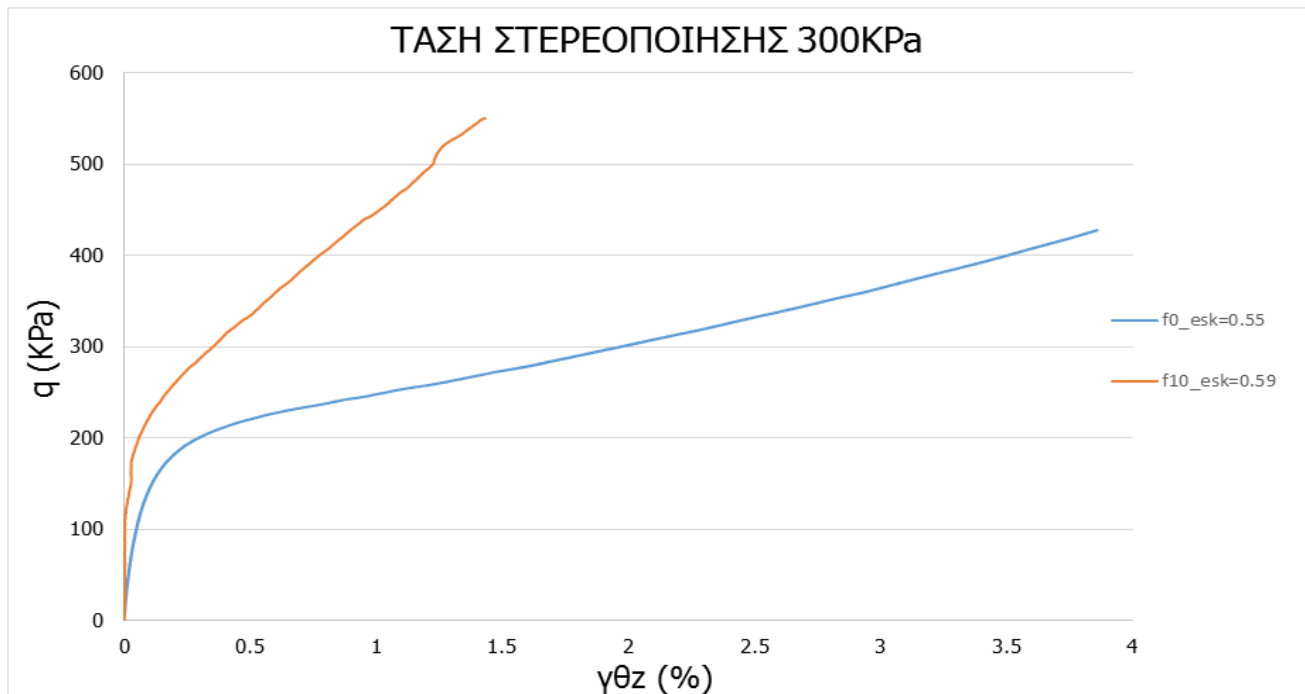
7.3.3. Τάση στερεοποίησης 300kPa

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για πυκνά δοκίμια, όσο και για χαλαρά, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέση ενεργό τάση $p_0=300kPa$. Οι δείκτες πόρων σκελετού των πυκνών δοκιμίων κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης κυμαίνονταν μεταξύ $esk=0.55-0.59$. Αντίστοιχα, οι δείκτες πόρων σκελετού των χαλαρών δοκιμίων κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης κυμαίνονταν μεταξύ $esk=0.66-0.71$. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμίων και ακολούθως των χαλαρών. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Τα δοκίμια αυτά συγκρίνονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων και στα πυκνά αλλά και στα χαλαρά δοκίμια.

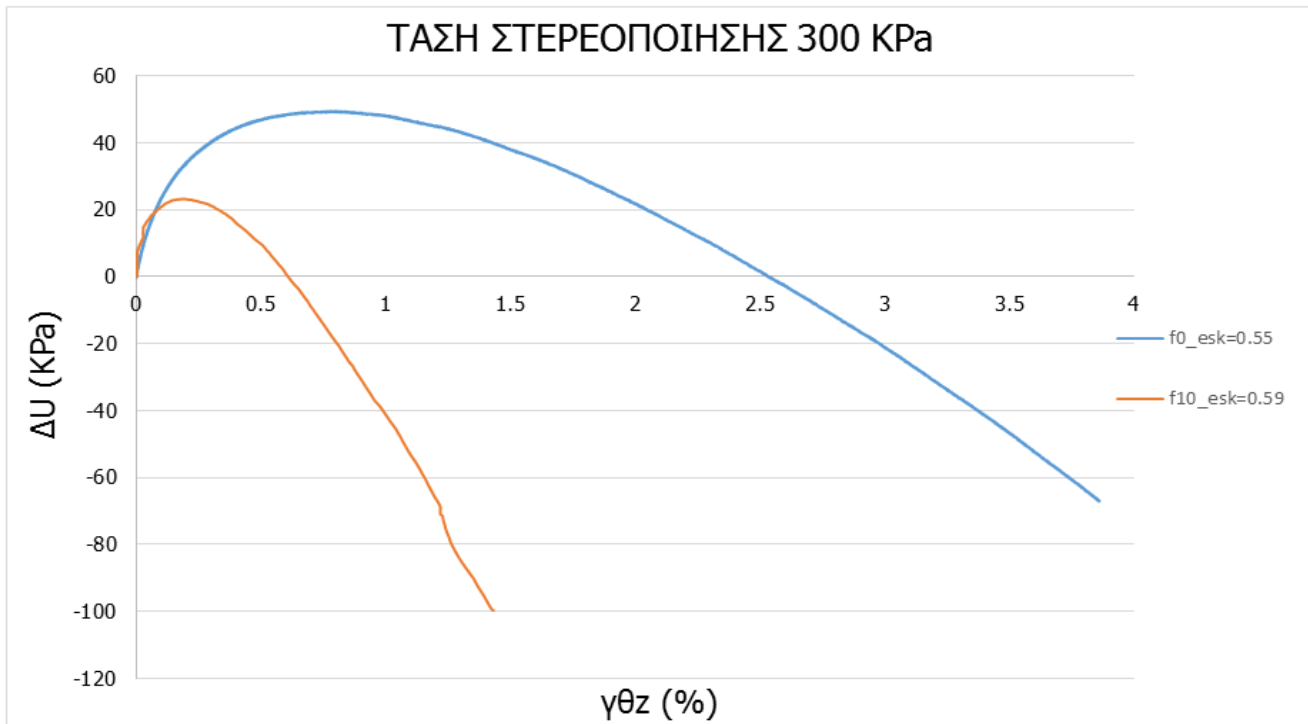
Πυκνά δοκίμια



Σχήμα 7.37. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

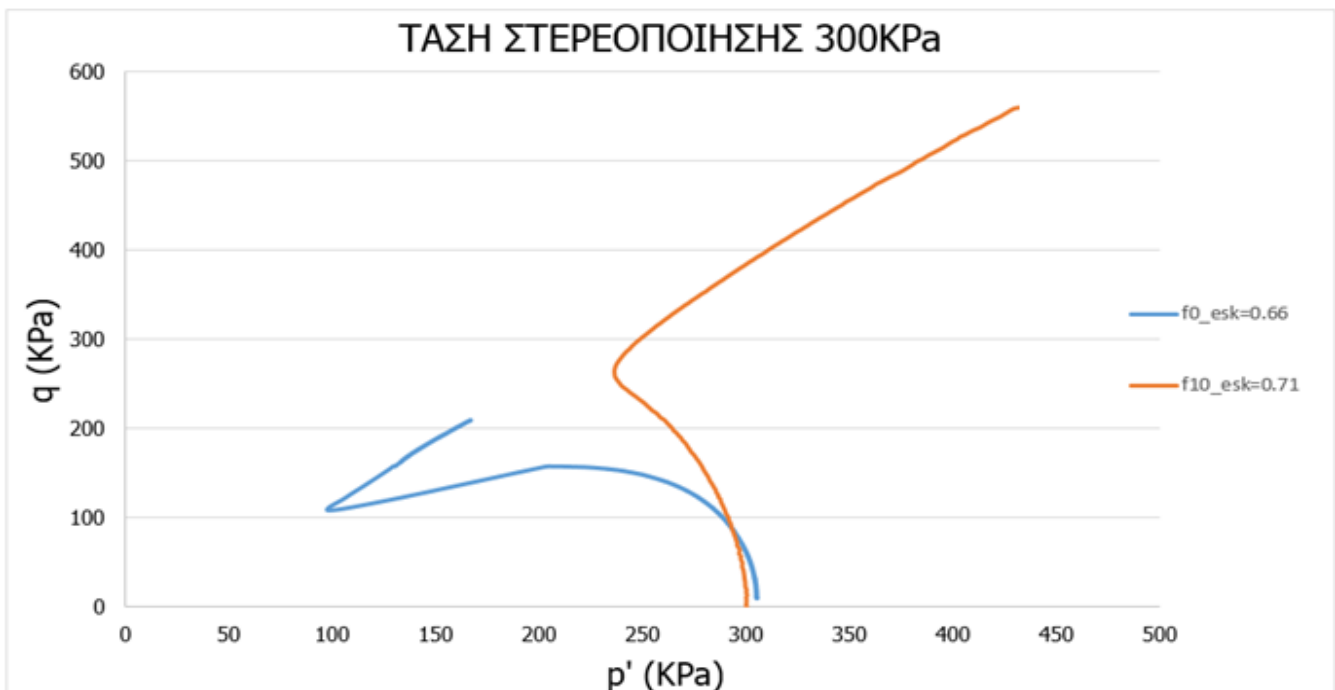


Σχήμα 7.38. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

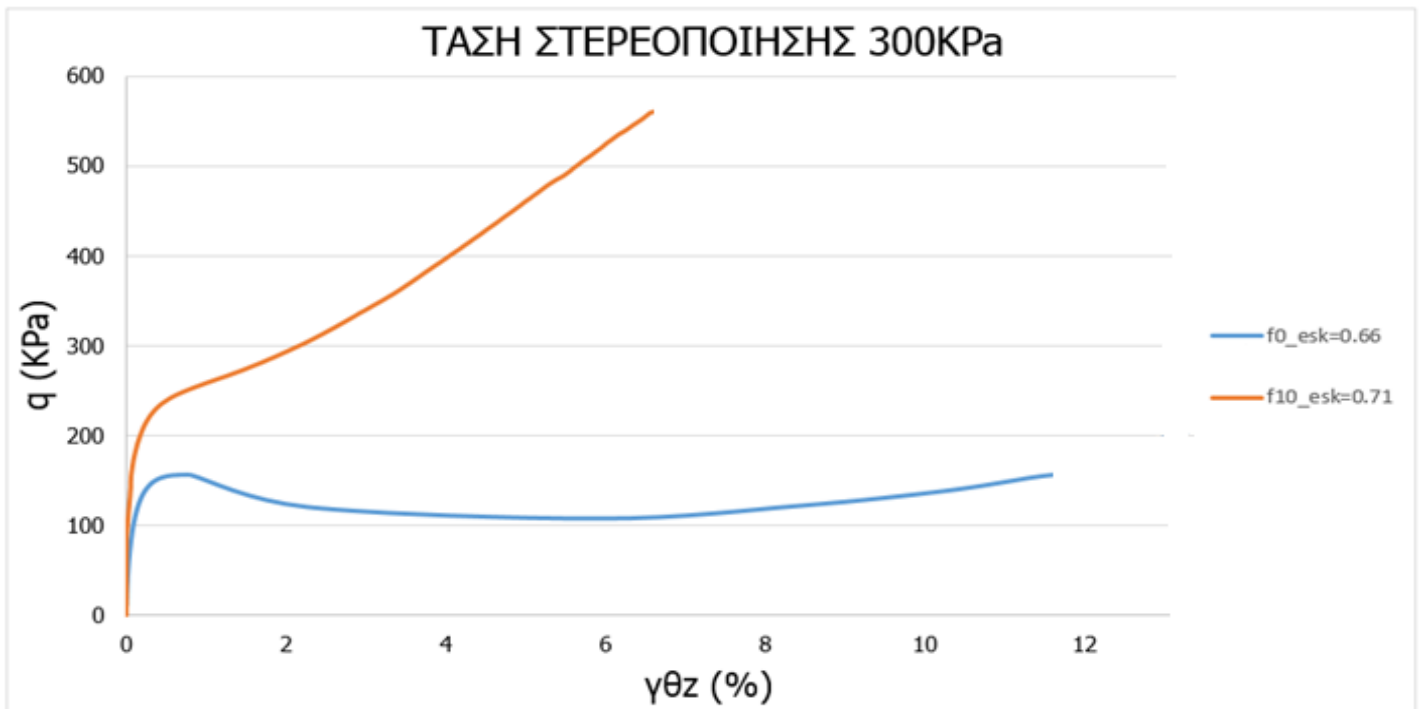


Σχήμα 7.39. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος(Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

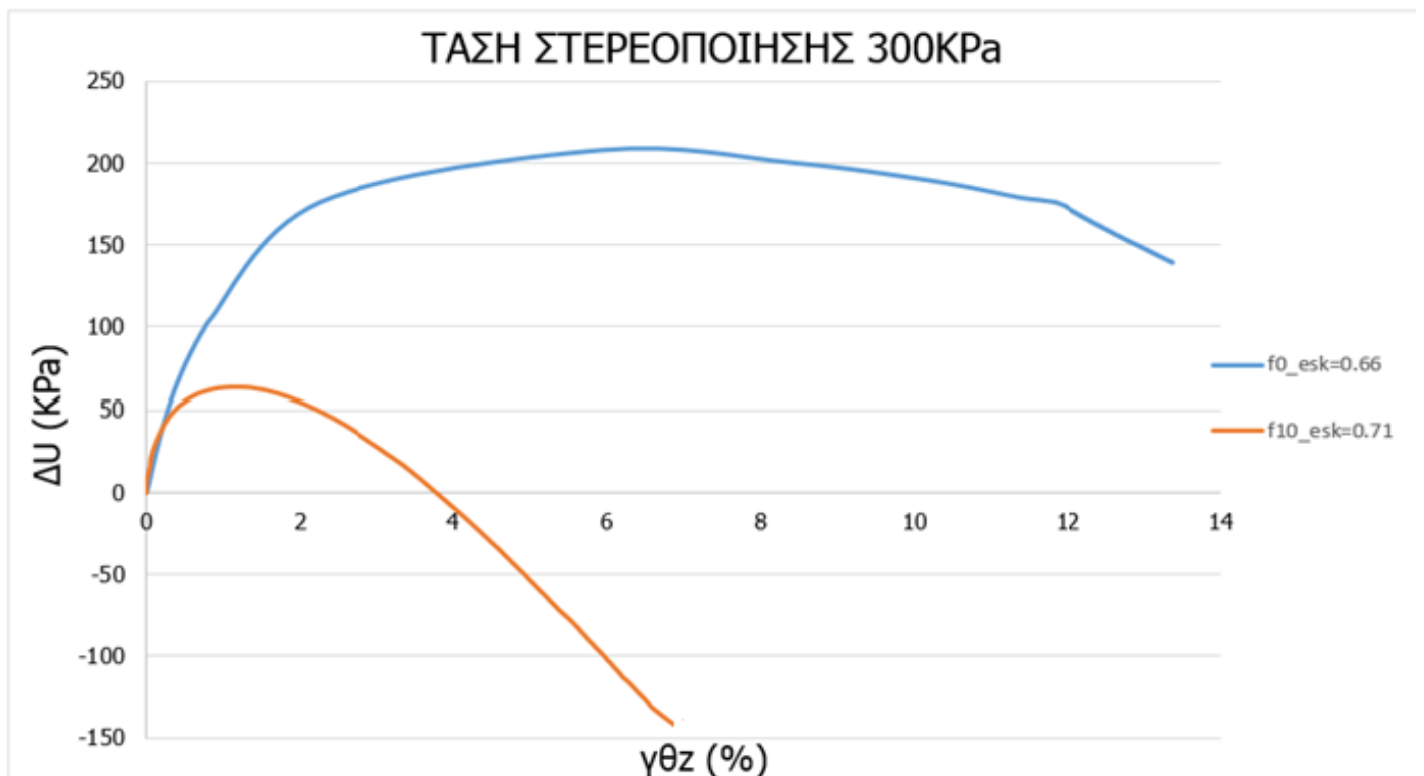
Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.40. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 7.41. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa



Σχήμα 7.42. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) μειγμάτων και καθαρής άμμου στερεοποιημένα στα 300kPa

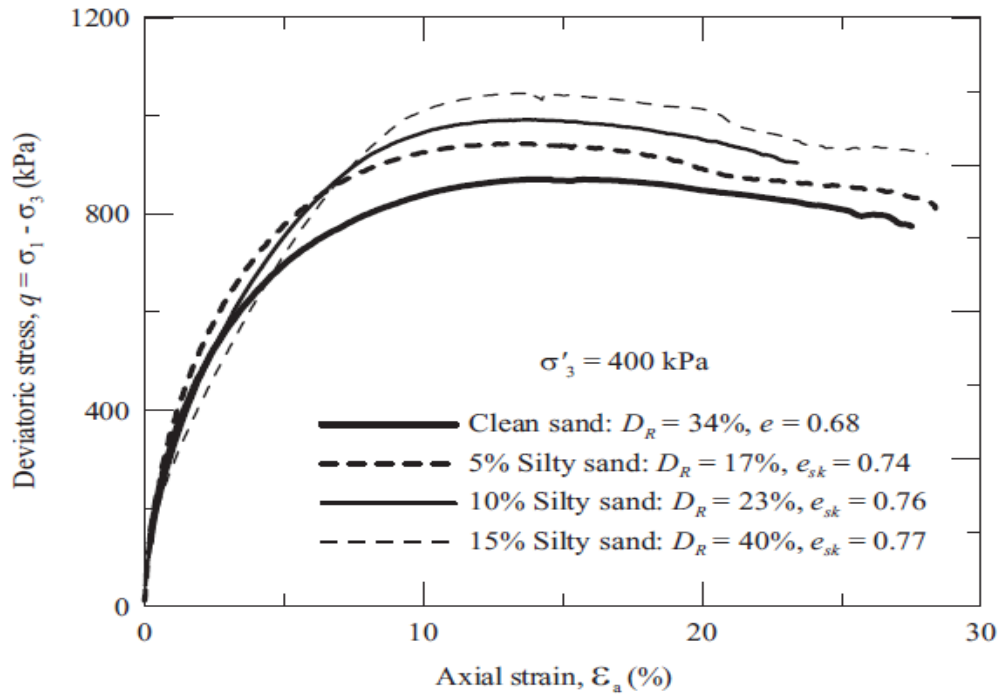
Απο τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα πυκνά δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 300kPa, η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού βελτιώνει την συμπεριφορά, αφού το δοκίμιο που περιέχει 10% ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού είναι σαφώς πιο διαστολικό σε σχέση με το αντίστοιχο της καθαρής άμμου. Η προσθήκη 10% ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού στα δοκίμια αυτά βελτιώνει σημαντικά την διατμητική αντοχή.

Στο Σχήμα 7.40. όπου παρουσιάζονται τα χαλαρά δοκίμια, η συμπεριφορά της καθαρής άμμου είναι πολύ πιο συστολική σε σχέση με το δοκίμιο που περιέχει 10% λεπτόκοκκο υλικό. Αυτή η παρατήρηση γίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρη απο το διάγραμμα υπερπίεσεων πόρων ρευστού σε συνάρτηση με τη διατμητική παραμόρφωση (Σχήμα 7.42) όπου η καθαρή άμμος ακόμη και σε διατμητική παραμόρφωση της τάξεως του 14% συνεχίζει να διατηρεί υπερπίεσεις σε αντίθεση με το δοκίμιο με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 10%, το οποίο έχει εισέλθει σε διαστολική κατάσταση απο παραμόρφωση περίπου 1%.

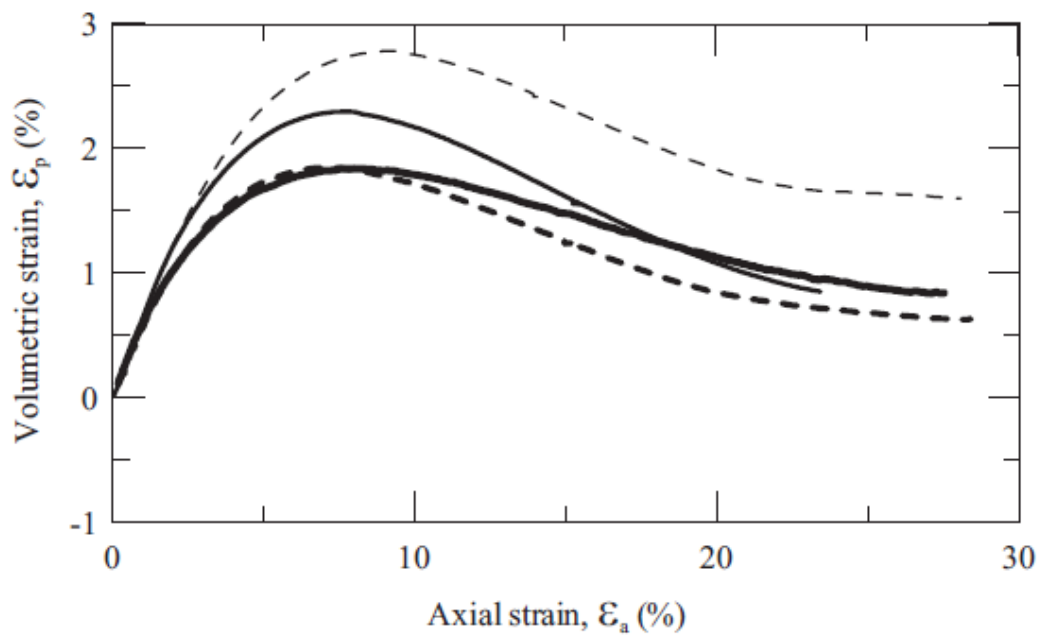
Αν συγκρίνουμε την επίδραση των λεπτόκοκκων υλικών στα πυκνά και στα χαλαρά δοκίμια, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού στα χαλαρά δοκίμια είναι πιο ευεργετική σε σχέση με τα πυκνά αφού αν συγκρίνουμε το Σχήμα 7.38. με το Σχήμα 7.41. παρατηρούμε πόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του ποσοστού ιλύος στα χαλαρά δείγματα. Η παρατήρηση αυτή συνάδει με τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών (Γκούσιας,2011) όπου επίσης χρησιμοποιήθηκε ως βάση σύγκρισης ο δείκτης πόρων σκελετού.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και άλλοι ερευνητές, οι οποίοι διεξήγαγαν πειράματα στο παρελθόν. Στα Σχήματα 7.43. και 7.44. (Antonio, Carraro, Prezzi και Salgado ; 2009) παριστάνονται τα αποτελέσματα απο σειρά στραγγιζόμενων τριαξονικών πειραμάτων σε χαλαρά δοκίμια με δείκτες πόρων σκελετού που κυμαίνονταν στο εύρος $e_{sk}=0.68-0.77$ 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 μείγμα. Όλα τα μείγματα παρουσίαζαν βελτιωμένες αντοχές σε σχέση με την καθαρή άμμο, μια παρατήρηση που συμφωνεί με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 7.43. Διάγραμμα ($p' - q$), Χαλαρά δοκιμία, $p'_o = 400 \text{ kPa}$



Σχήμα 7.44. Διάγραμμα ($\varepsilon_p - \varepsilon_a$), Χαλαρά δοκιμία, $p'_o = 400 \text{ kPa}$

7.4. Επίδραση τάσης στερεοποίησης

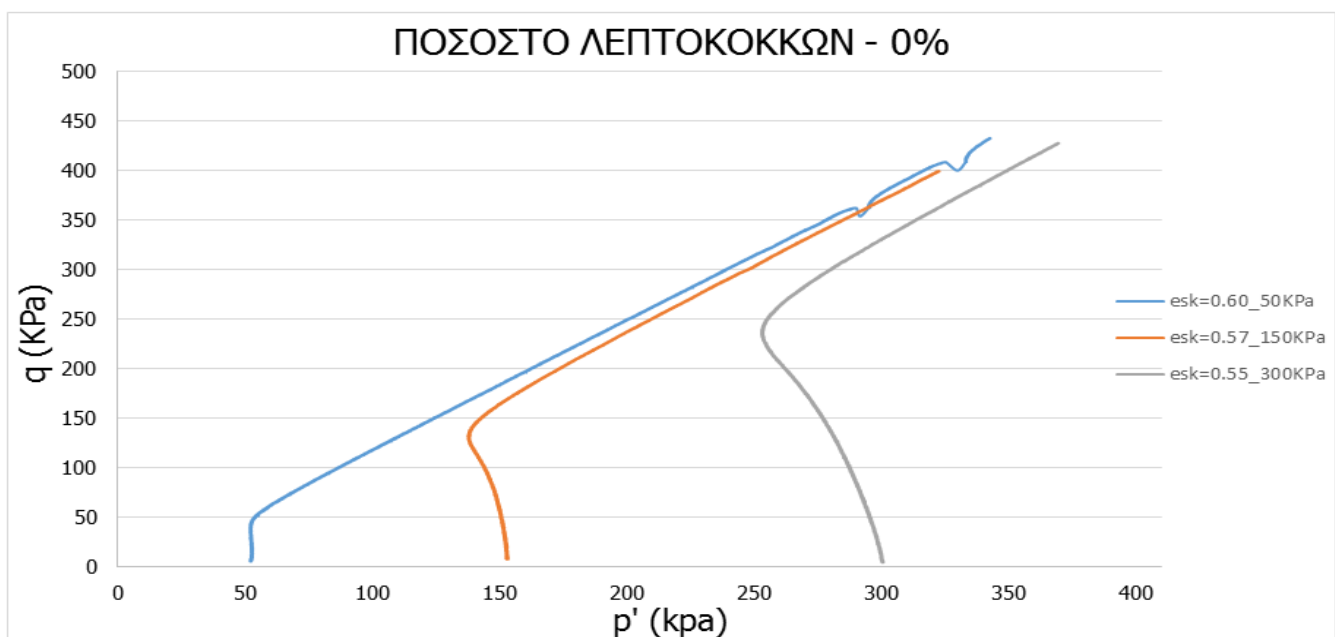
Στο υποκεφάλαιο αυτό, εξετάζεται μετά απο επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων των μονοτονικών δοκιμών στρέψης κοίλου δοκιμίου, η επίδραση της τάσης στην οποία στερεοποιήθηκαν τα εδαφικά δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο ρόλος της τάσης στερεοποίησης στην καθαρή άμμο και σε μείγματα άμμου και ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού από 5% έως και 15%. Η επίδραση της τάσης στερεοποίησης εξετάζεται τόσο σε πυκνά δοκίμια, όσο και σε χαλαρά.

7.4.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων 0%

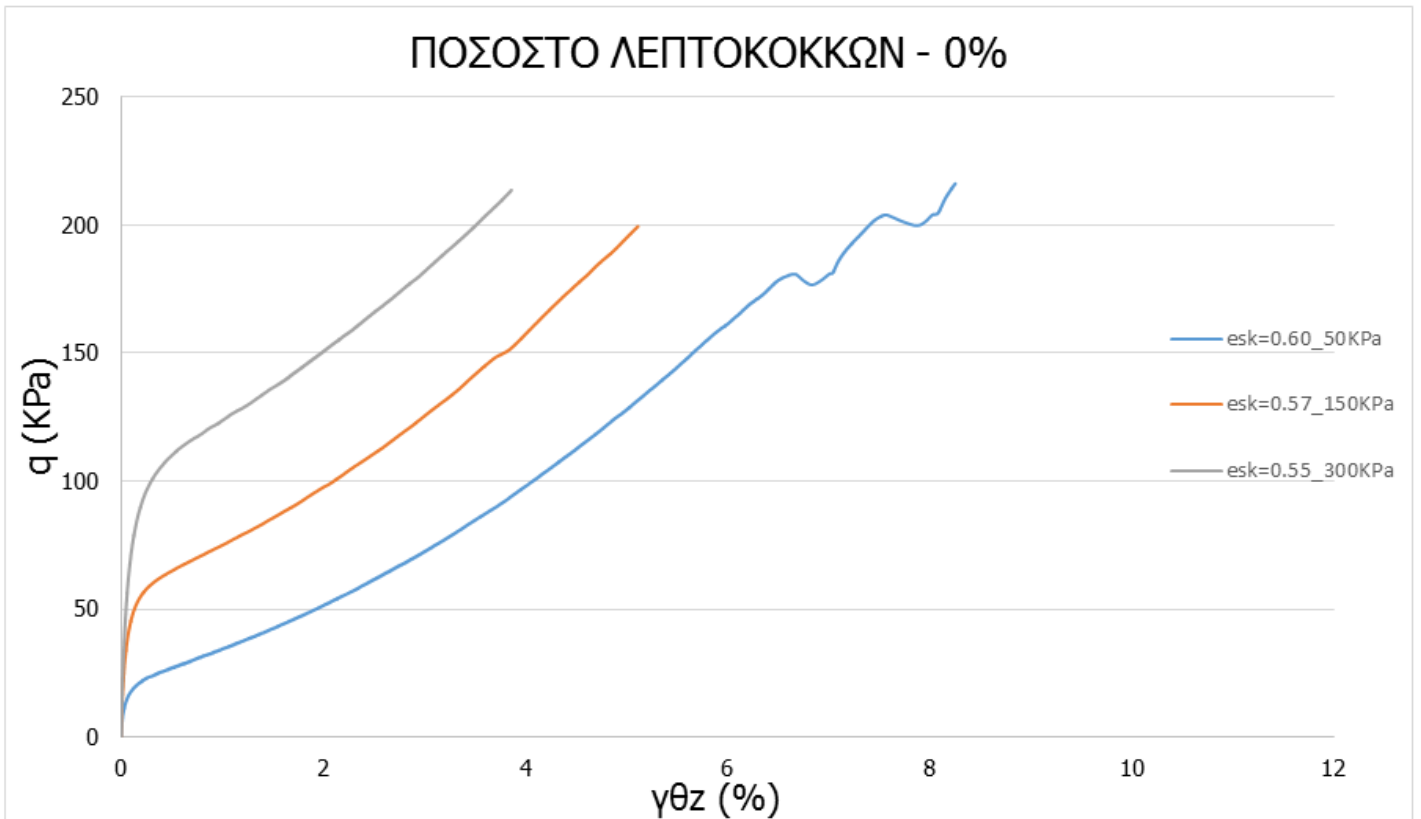
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δοκίμια καθαρής άμμου που στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε διάφορες μέσες ενεργές τάσεις, απο 25kPa έως και 300kPa. Τα δοκίμια αυτά έχουν διαχωριστεί αναλόγως της πυκνότητάς τους σε πυκνά και χαλαρά. Οι δείκτες πόρων σκελετού των πυκνών δοκιμίων κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης ήταν 0.55 – 0.6 ενώ των χαλαρών δοκιμίων ήταν 0.72 – 0.73.

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμίων, ακολουθούν τα αντίστοιχα των δοκιμίων ενδιάμεσης πυκνότητας και τέλος των χαλαρών δοκιμίων. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Τα δοκίμια αυτά συγκρίνονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της τάσης στερεοποίησης στην καθαρή άμμο σε πυκνά, χαλαρά και ενδιάμεσης πυκνότητας δοκίμια.

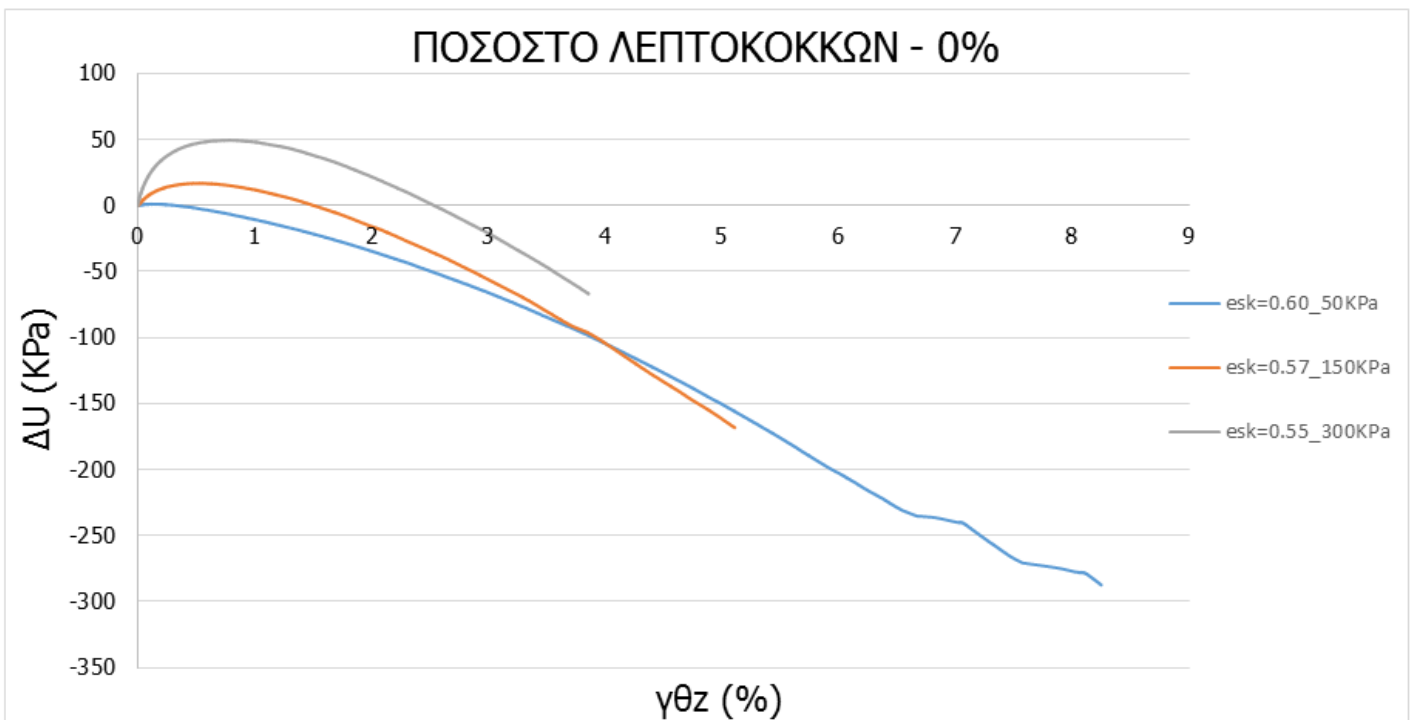
Πυκνά δοκίμια



Σχήμα 7.45. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση δοκιμίων καθαρής άμμου

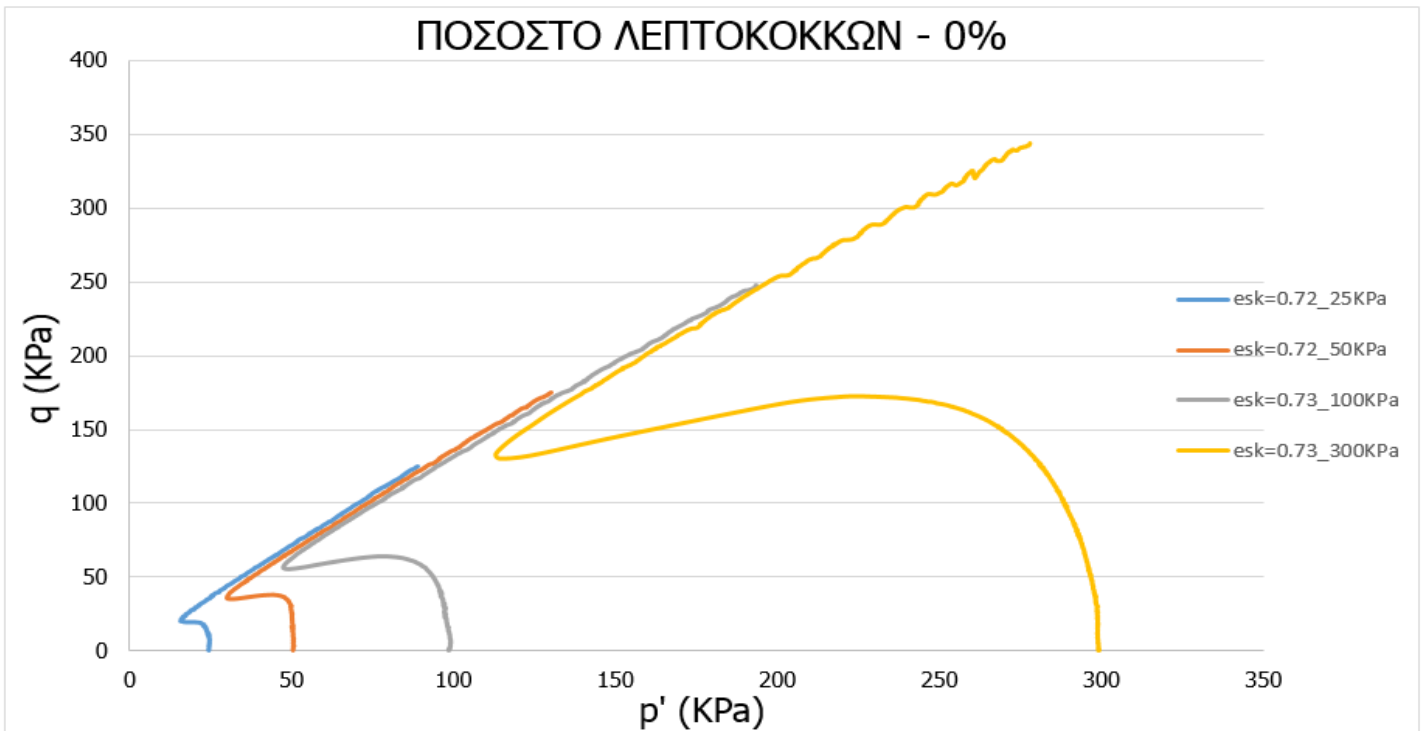


Σχήμα 7.46. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών καθαρής άμμου

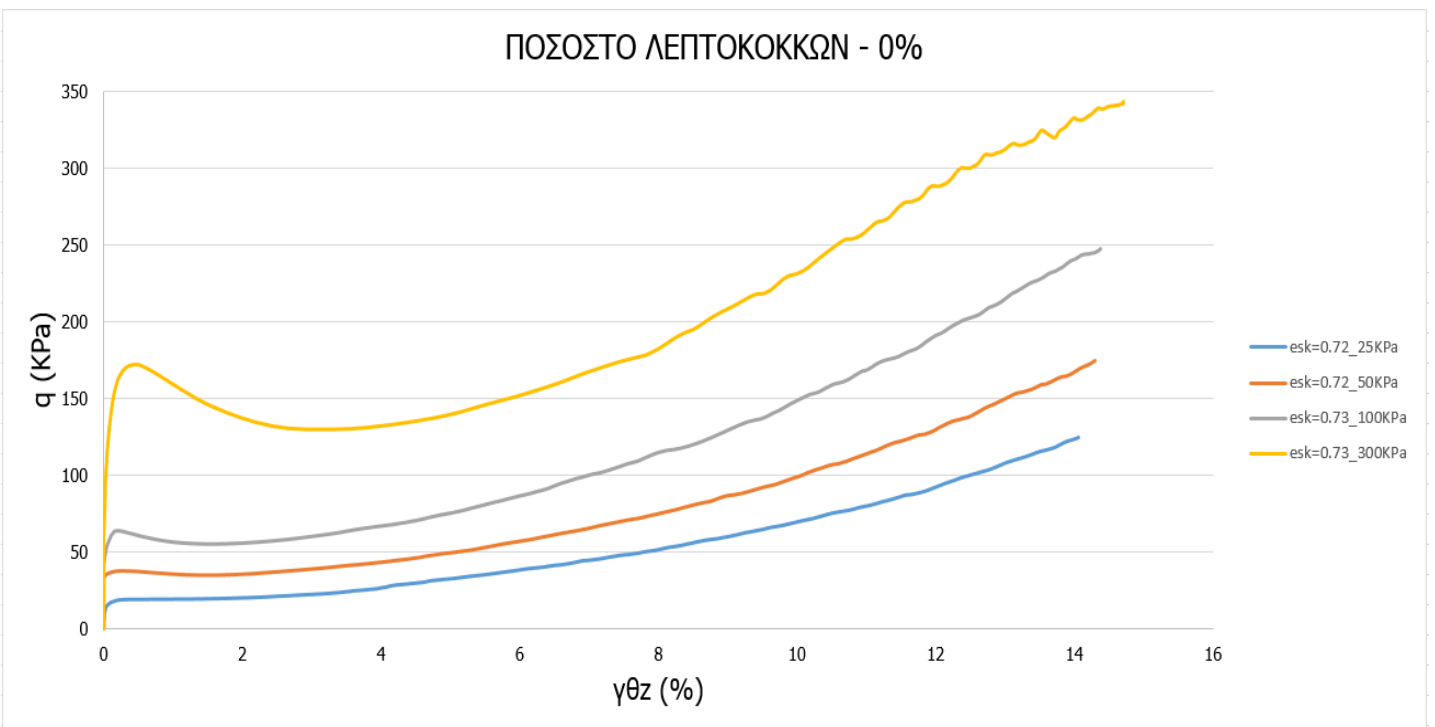


Σχήμα 7.47. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών καθαρής άμμου

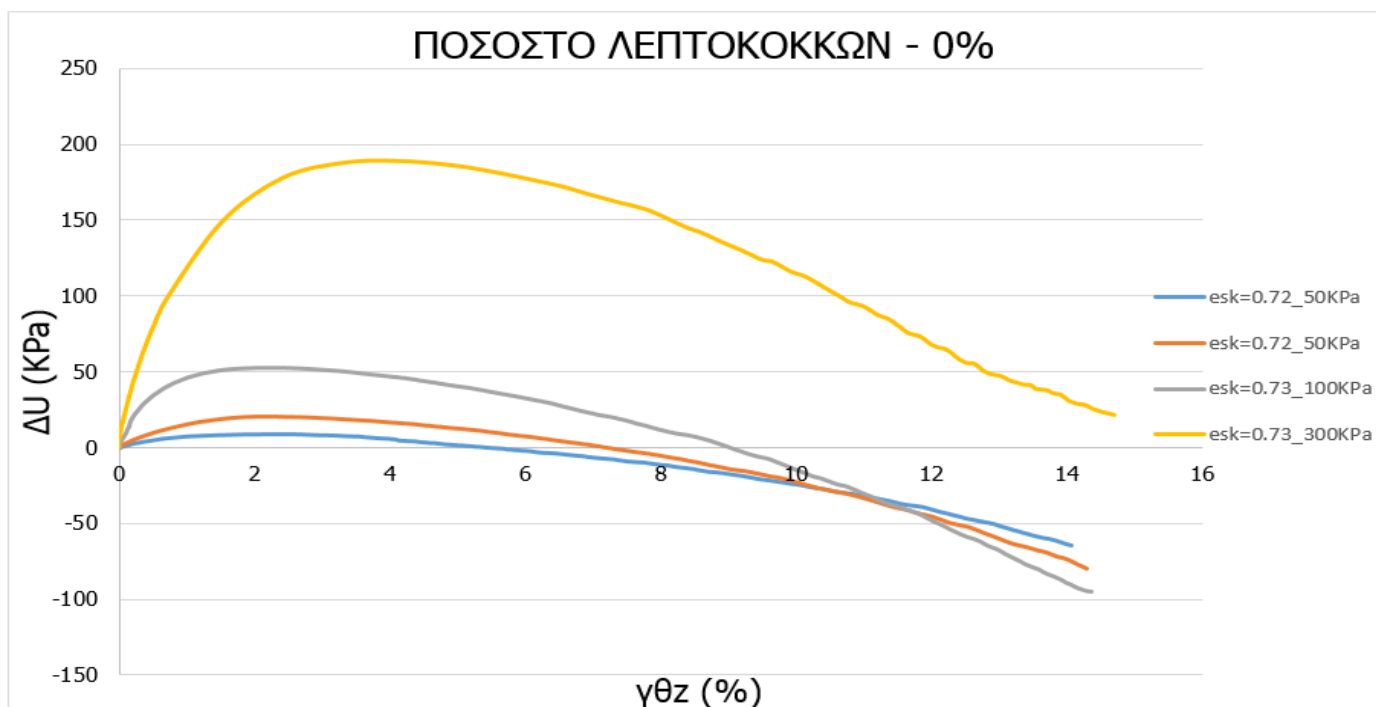
Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.48. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργό τάση δοκιμών καθαρής άμμου



Σχήμα 7.49. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών καθαρής άμμου



Σχήμα 7.50. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών καθαρής άμμου

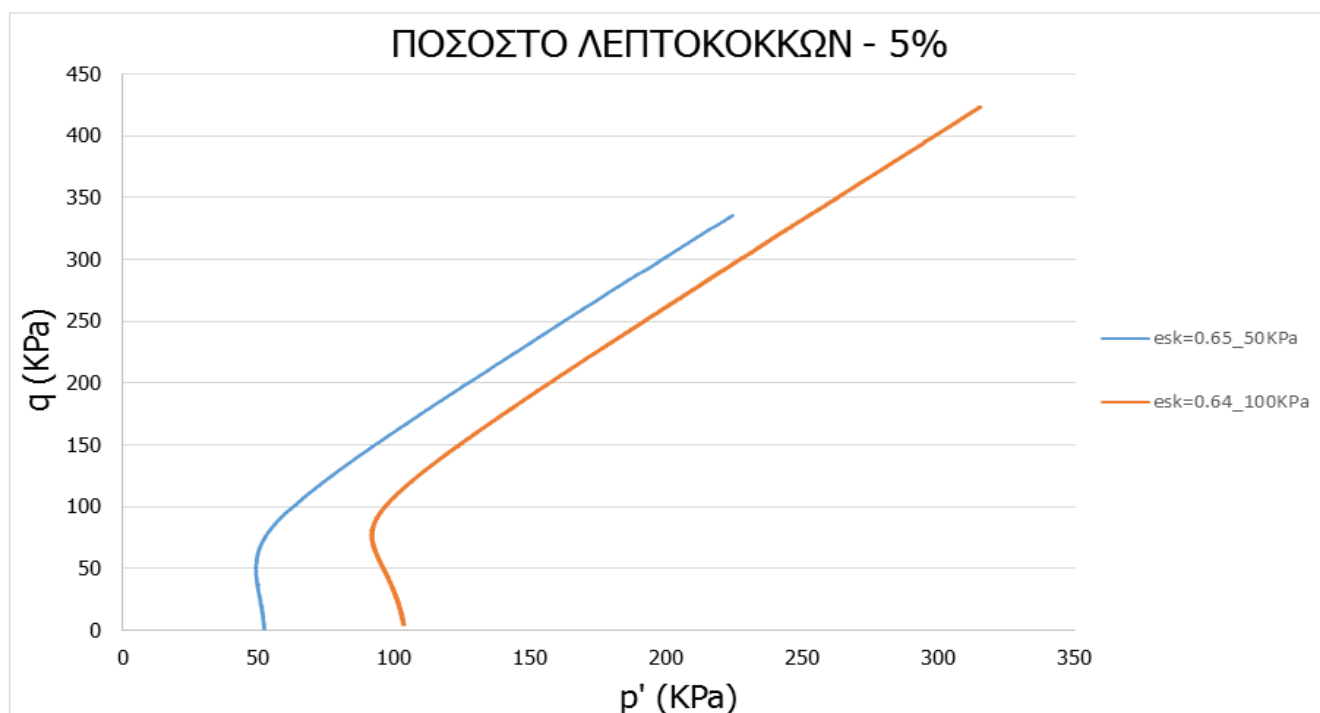
Όπως είναι γνωστόν, η αρχική τάση στερεοποίησης καθορίζει εν μέρει την διαστολικότητα ή την συστολικότητα ενός δοκιμίου. Στο Σχήμα 7.45, όπου παρουσιάζεται μια σειρά πυκνών δοκιμών στερεοποιημένα σε τρεις διαφορετικές αρχικές τάσεις στερεοποίησης, είναι εμφανής η σημαντική επίδραση της στην διατμητική αντοχή των δοκιμίων. Το δοκίμιο που έχει στερεοποιηθεί στα 300kPa επιδουκνύει αρκετά πιο συστολική συμπεριφορά σε σχέση με το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από το Σχήμα 7.47, όπου το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 300kPa αναπτύσσει μεγαλύτερες υπερπίεσεις ως προς το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa. Παρ' όλα αυτά, λόγω μεγαλύτερης τάσης περίσφιξης το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 300kPa αναπτύσσει σημαντικά μεγαλύτερες διατμητικές αντοχές σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Αντίστοιχα για την σειρά πειραμάτων χαλαρών δοκιμών καθαρής άμμου, φαίνεται ξεκάθαρα πόσο μεγάλη είναι η επιρροή της αρχικής τάσης στερεοποίησης, η οποία όπως παρατηρούμε είναι μεγαλύτερη και από την επιρροή που έχει η τάση στερεοποίησης στα πυκνά δοκίμια. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται κατανοητό αν κανείς παρατηρήσει με λεπτομέρεια το Σχήμα 7.50., όπου φαίνεται πόσο ευαίσθητα είναι τα δοκίμια στις μεταβολές της αρχικής τους τάσης στερεοποίησης. Στο Σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 300kPa αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες πιέσεις πόρων σε σχέση με το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa, όπου σε μεγάλες παραμορφώσεις (κοντά στο 6%) αναπτύσσει ακόμα και υποπίεσεις, δηλαδή όσο χαλαρότερο είναι ένα δοκίμιο καθαρής άμμου τόσο πιο ευάλωτο σε ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων είναι όταν αυξάνεται η τάση εγκιβωτισμού.

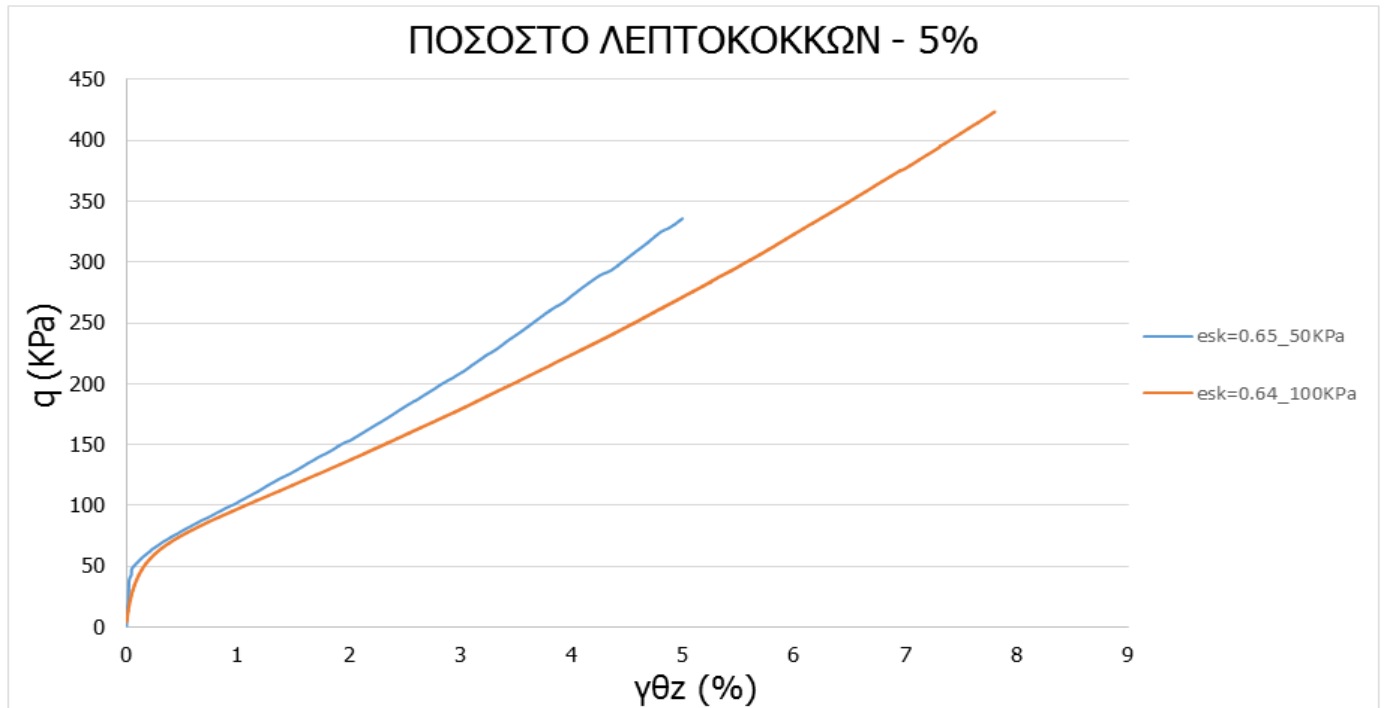
7.4.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων 5%

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δοκίμια μείγματος άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέσες ενεργές τάσεις 50kPa και 100kPa. Τα δοκίμια αυτά έχουν διαχωριστεί αναλόγως της πυκνότητάς τους σε πυκνά και χαλαρά. Οι δείκτες πόρων σκελετού των πυκνών δοκιμών κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης ήταν 0.65 και 0.64. Αντίστοιχα, οι δείκτες πόρων σκελετού των χαλαρών δοκιμών κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης ήταν 0.74 και 0.72. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμών και ακολούθως τα αντίστοιχα των χαλαρών δοκιμών. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Τα δοκίμια αυτά συγκρίνονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της τάσης στερεοποίησης σε μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5% τόσο σε πυκνά, όσο και σε χαλαρά δοκίμια.

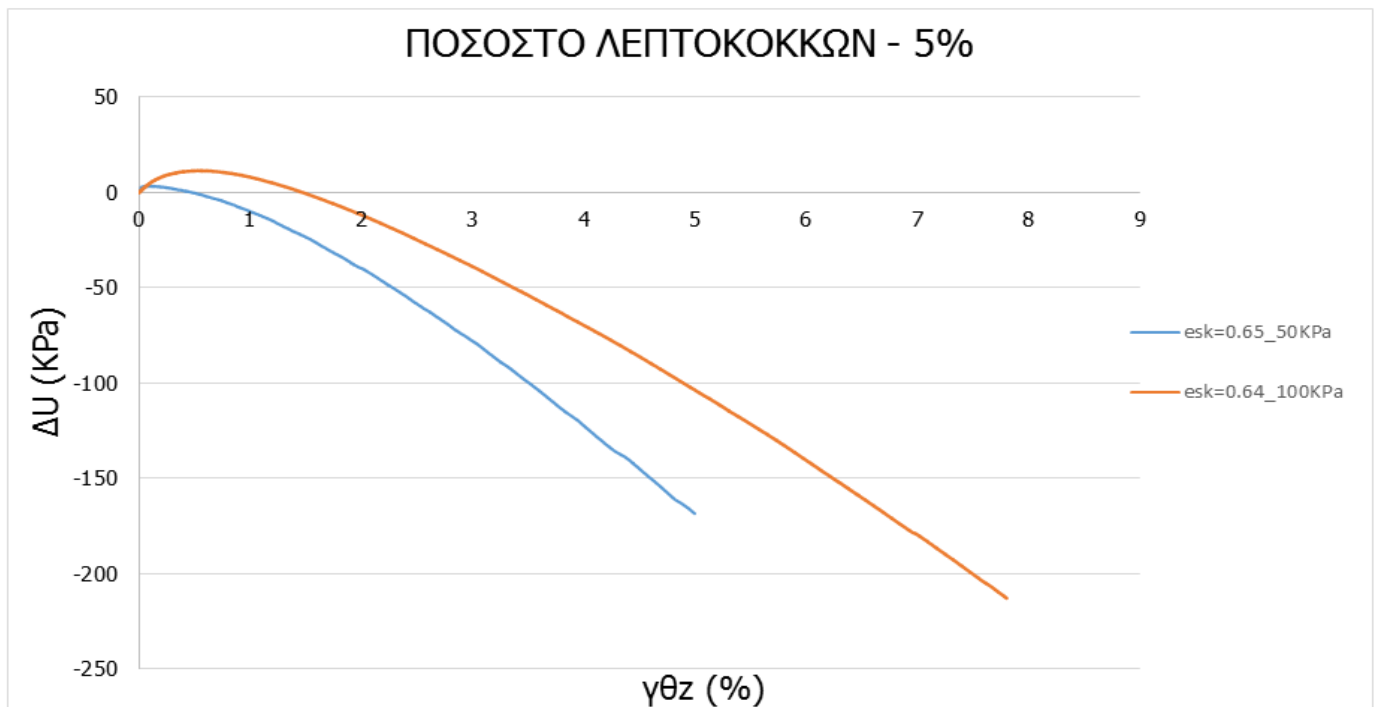
Πυκνά δοκίμια



Σχήμα 7.51. Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q - p'$. Αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την μέση ενεργή τάση δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%

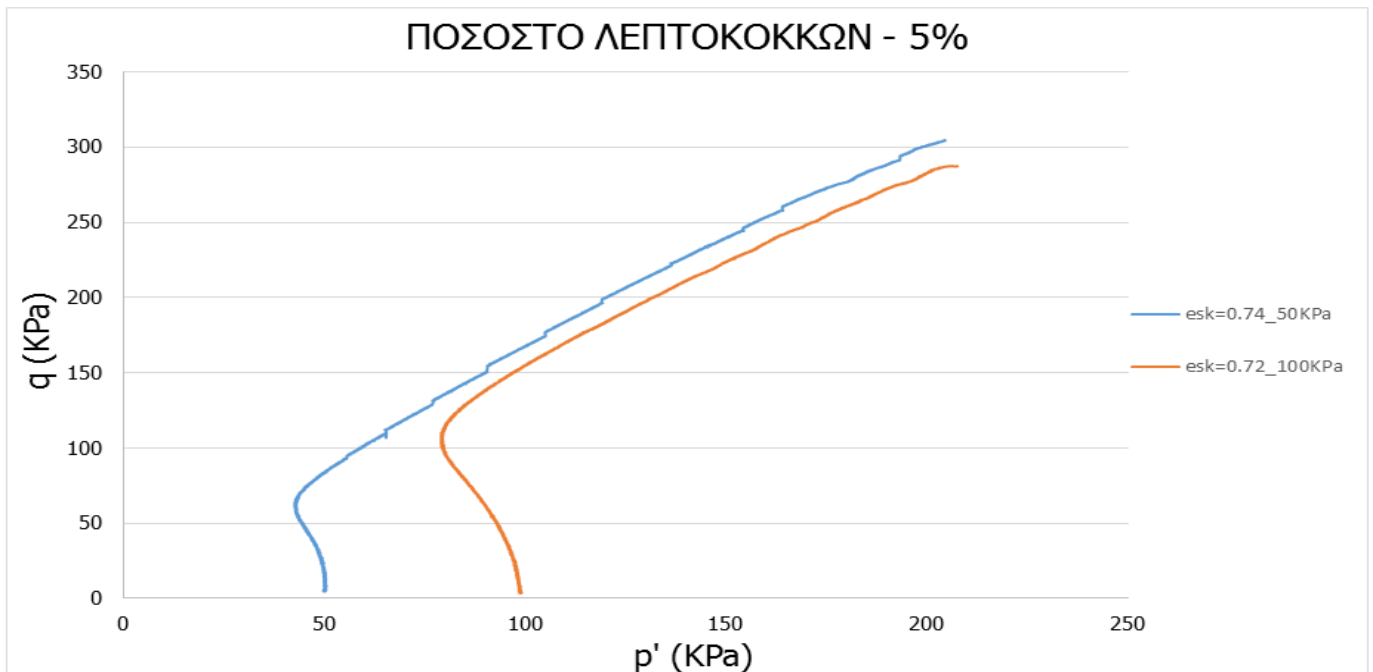


Σχήμα 7.52. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%

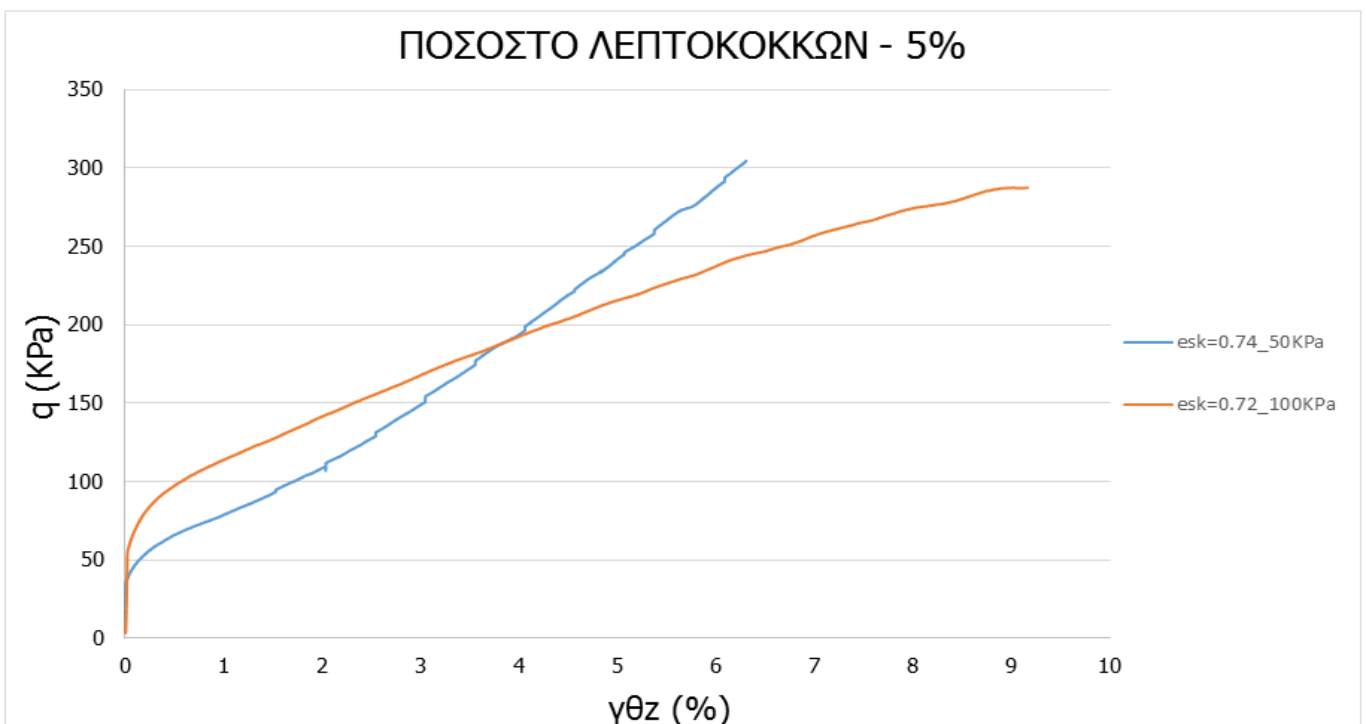


Σχήμα 7.53. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31–ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%

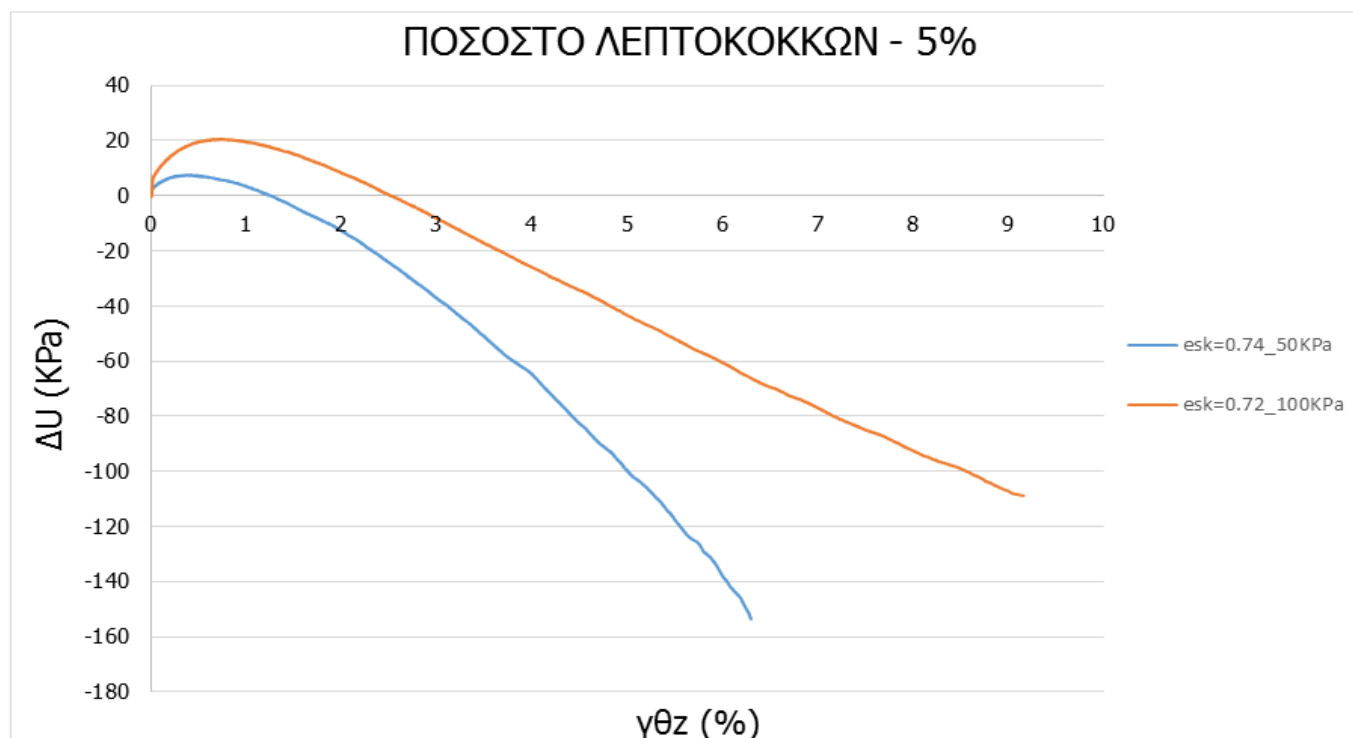
Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.54. 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 5%



Σχήμα 7.55. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%



Σχήμα 7.56. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31-ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%

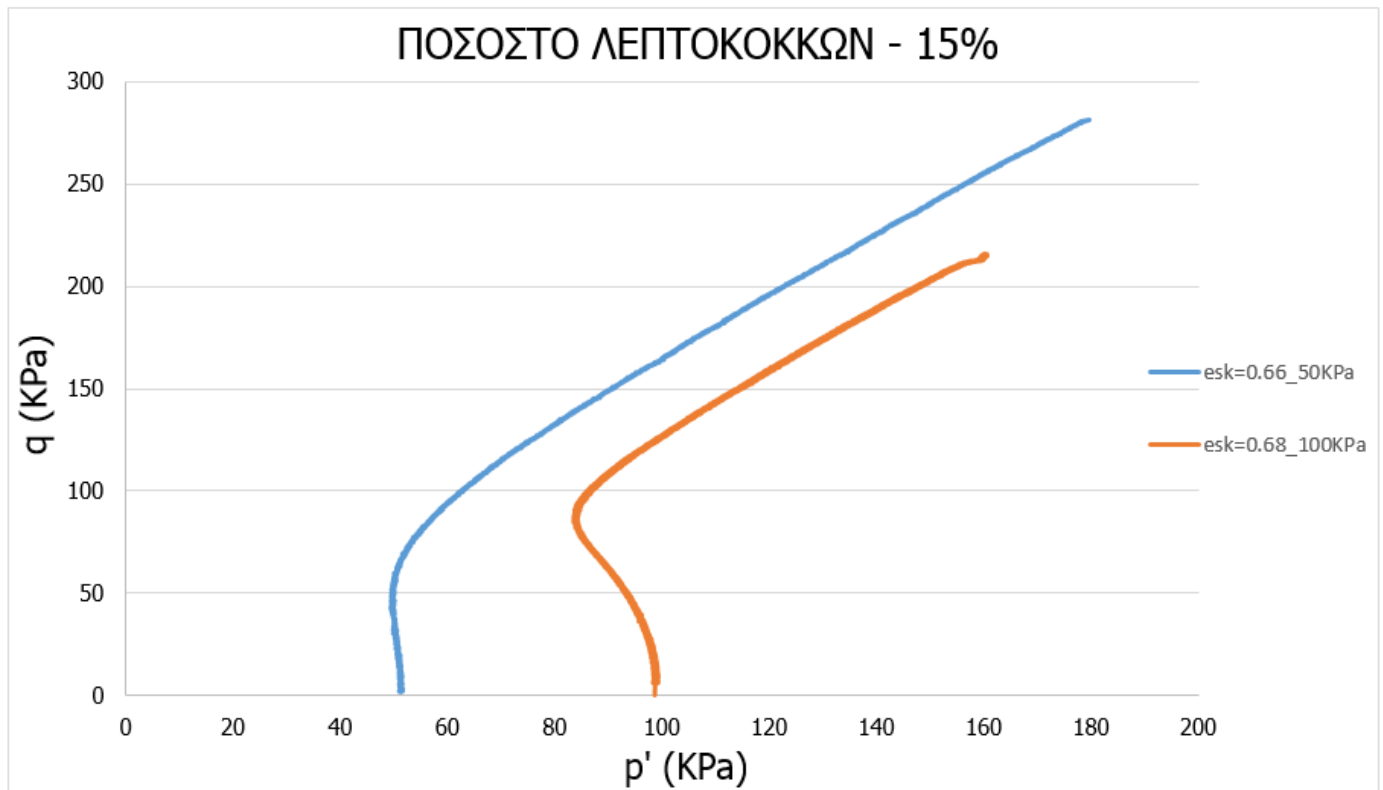
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, για μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων 5% παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά για τα χαλαρά και τα πυκνά δοκίμια. Στα Σχήματα 7.51. και 7.54. βλέπουμε ότι τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa επιδεικνύουν πιο συστολική συμπεριφορά σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa, τόσο τα πυκνά όσο και τα χαλαρά.

7.4.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων 15%

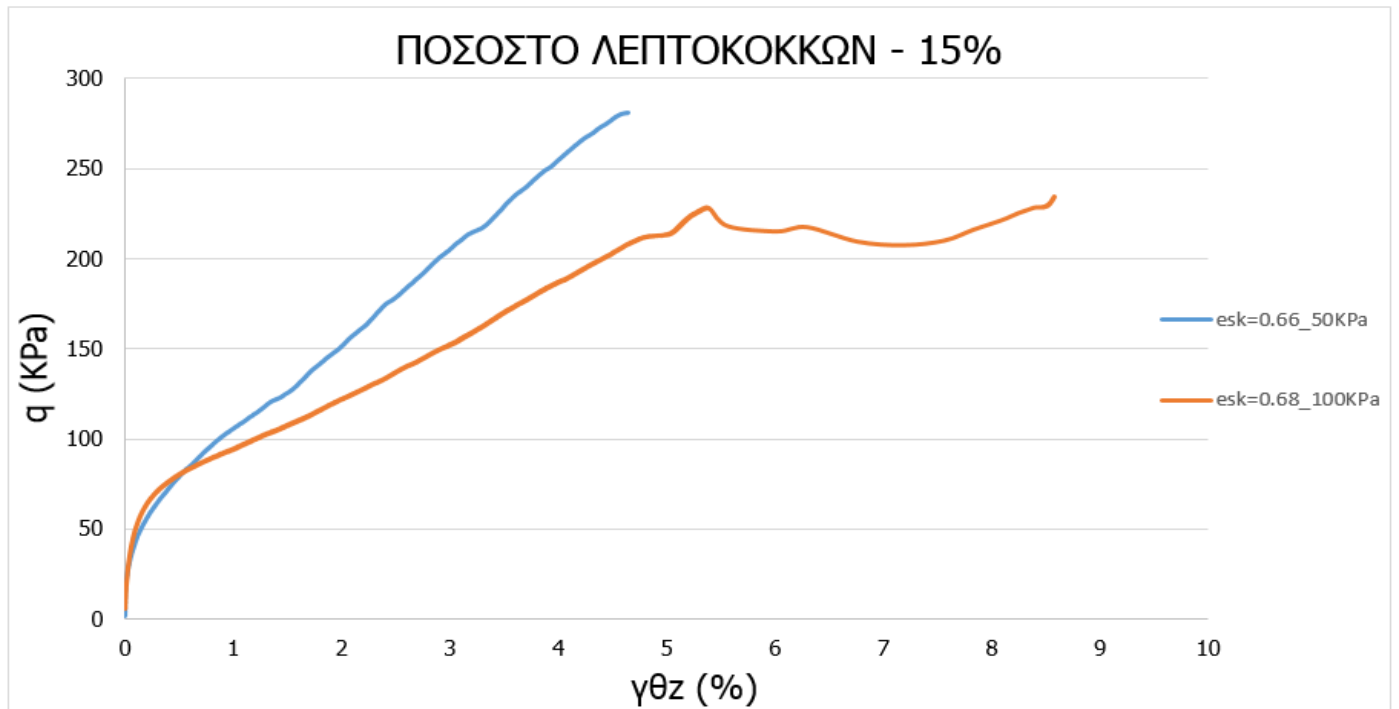
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δοκίμια μείγματος άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε μέσες ενεργές τάσεις 50kPa και 100kPa. Τα δοκίμια αυτά έχουν διαχωριστεί αναλόγως της πυκνότητάς τους σε πυκνά και χαλαρά. Οι δείκτες πόρων σκελετού των πυκνών δοκιμών κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης ήταν 0.66 και 0.68. Αντίστοιχα, οι δείκτες πόρων σκελετού των χαλαρών δοκιμών κατά την επιβολή της μονοτονικής στρεπτικής φόρτισης ήταν 0.74 και στα δύο δοκίμια. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμών και ακολούθως τα αντίστοιχα των χαλαρών δοκιμών. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων ($p' - q$), η αποκλίνουσα τάση σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($q - \gamma_{\theta z}$) και η υπερπίεση πόρων ρευστού σε συνάρτηση με

την διατμητική παραμόρφωση ($\Delta U - \gamma_{\theta z}$). Τα δοκίμια αυτά συγκρίνονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της τάσης στερεοποίησης σε μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15% τόσο σε πυκνά, όσο και σε χαλαρά δοκίμια.

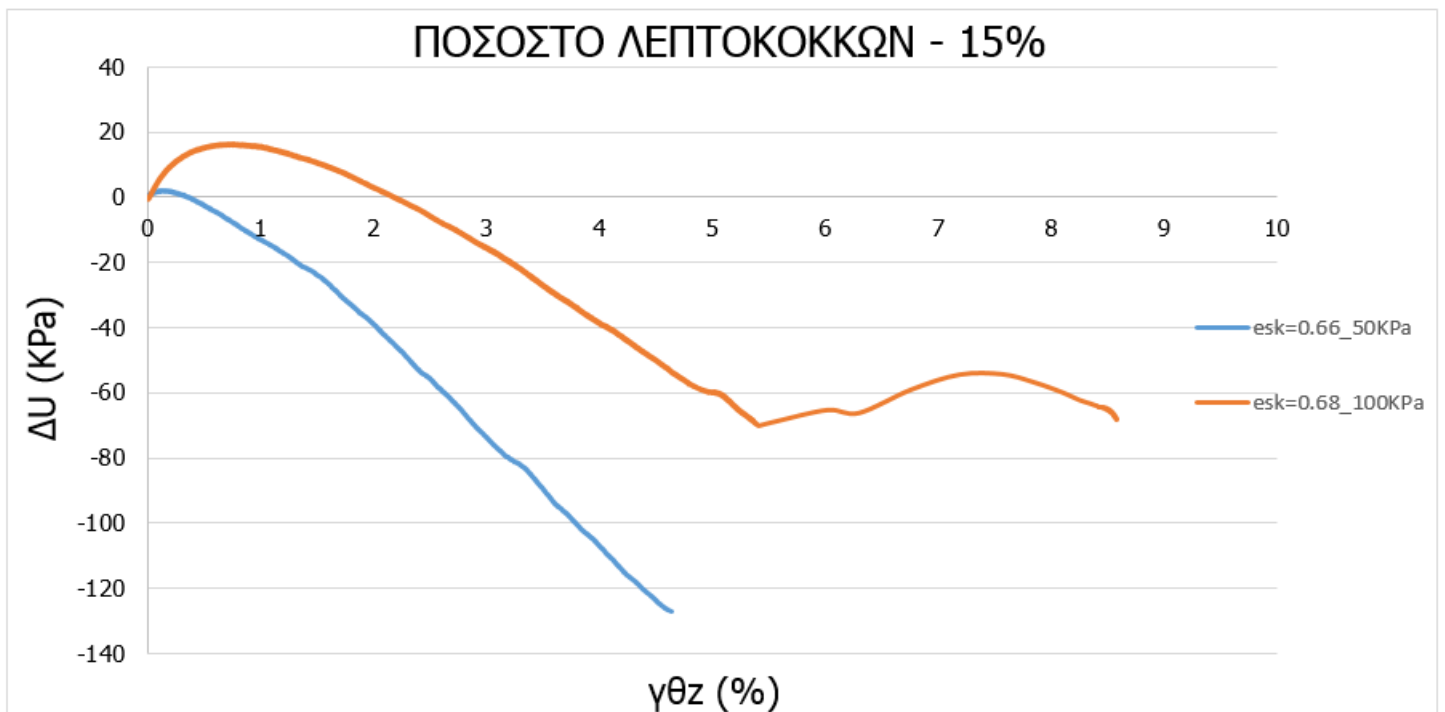
Πυκνά δοκίμια



Σχήμα 7.57. 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 15%

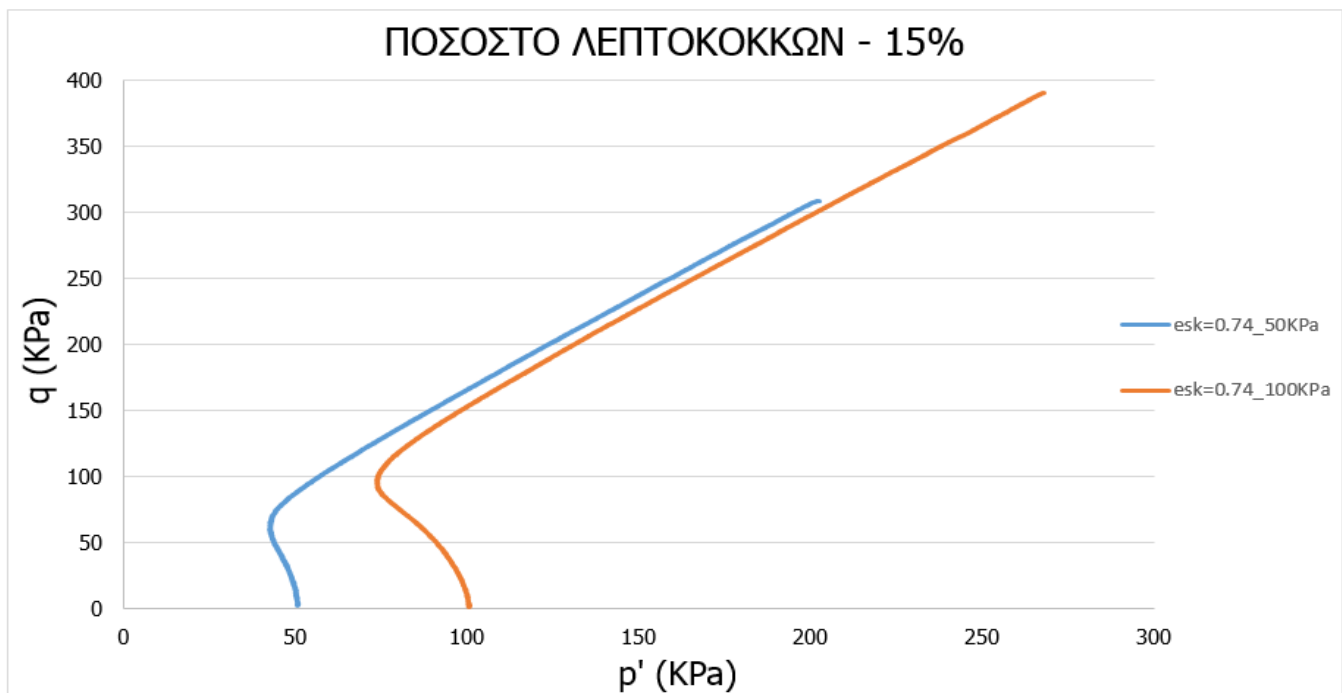


Σχήμα 7.58. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%

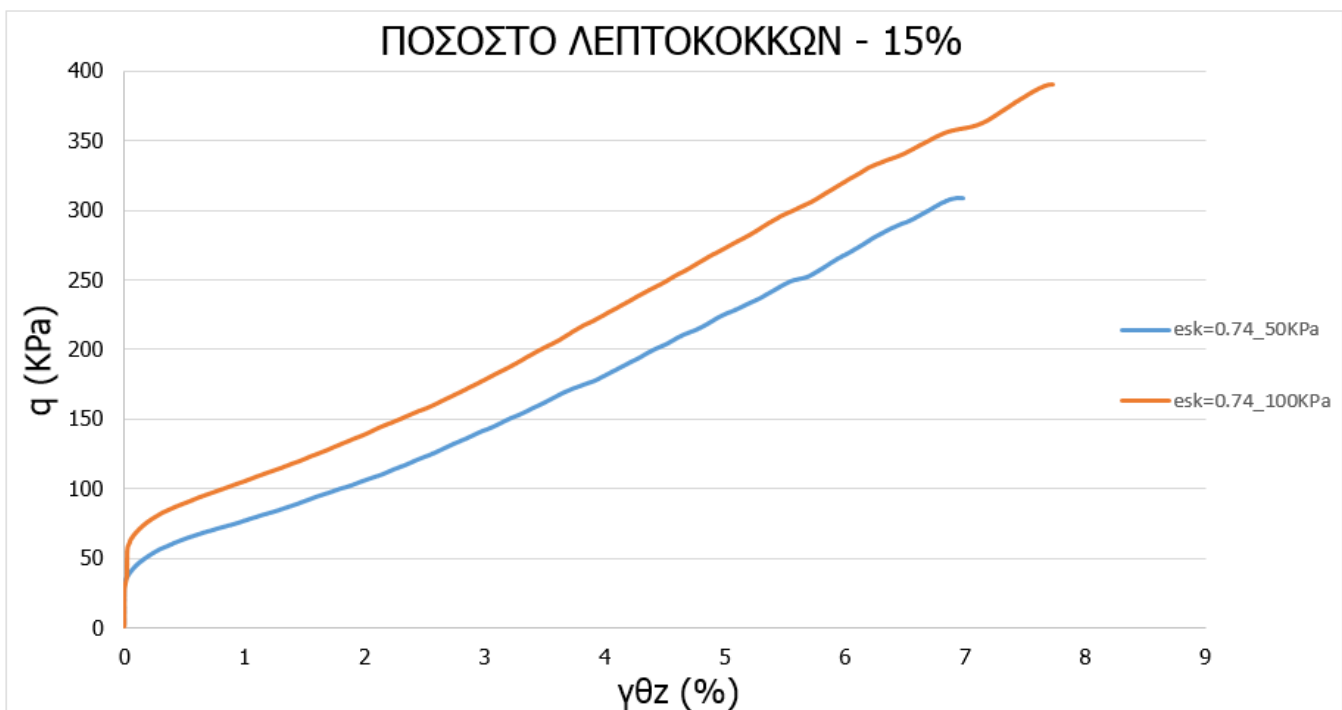


Σχήμα 7.59. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31–ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%

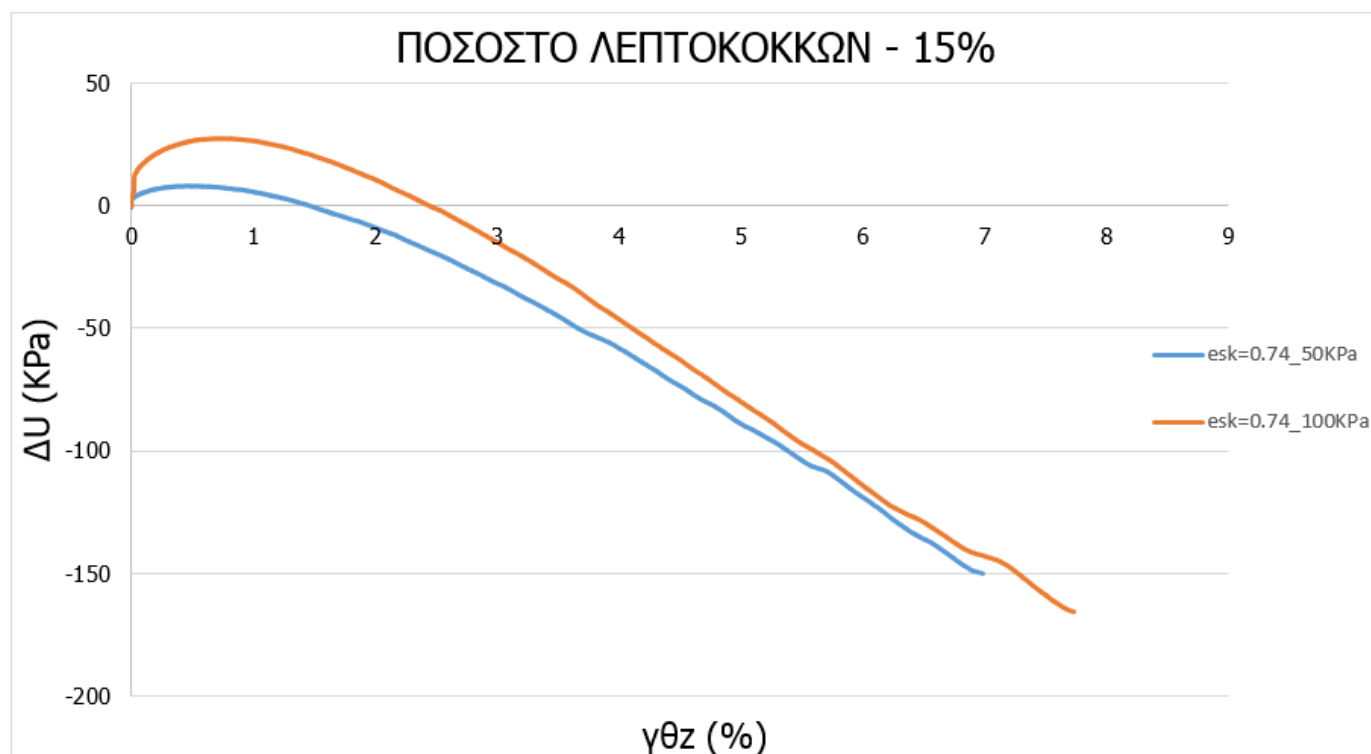
Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.60. 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 15%



Σχήμα 7.61. Αποκλίνουσα τάση (q) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31 – ιλύος D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%



Σχήμα 7.62. Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων ύδατος (Δu) σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{\theta z}$) δοκιμών μείγματος άμμου M31-ίλους D6 με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%

Σύμφωνα με τα διαγράμματα των πυκνών δοκιμών που περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, παρατηρούμε ότι το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa υπερτερεί σε διατμητική αντοχή σε σχέση με το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100kPa (Σχήμα 7.57). Επίσης, όπως αναμενόταν το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100kPa παρουσιάζει πιο συστολική συμπεριφορά έναντι του δοκιμίου των 50kPa. Μια σημαντική διαπίστωση που μπορεί να αναφερθεί για τα πυκνά μείγματα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων 15% είναι ότι αύξηση της τάσης στερεοποίησης από τα 50kPa στα 100kPa μειώνει την διατμητική αντοχή λόγω του ότι κάνει το δοκίμιο να συμπεριφέρεται πιο συστολικά.

Αντίστοιχα, στα χαλαρά δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 15% παρατηρείται ότι το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100kPa έχει ελαφρώς βελτιωμένες διατμητικές αντοχές σε σχέση με το δοκίμιο που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa, κάτι που είναι λογικό αφού αυξάνεται η τάση εγκιβωτισμού τους. Ωστόσο, το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100kPa, παρουσιάζεται πιο συστολικό ως προς το αντίστοιχο δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa και η διαστολική του φάση ξεκινάει περίπου σε κατά 0.5% μεγαλύτερη παραμόρφωση σε σχέση με το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 50kPa.

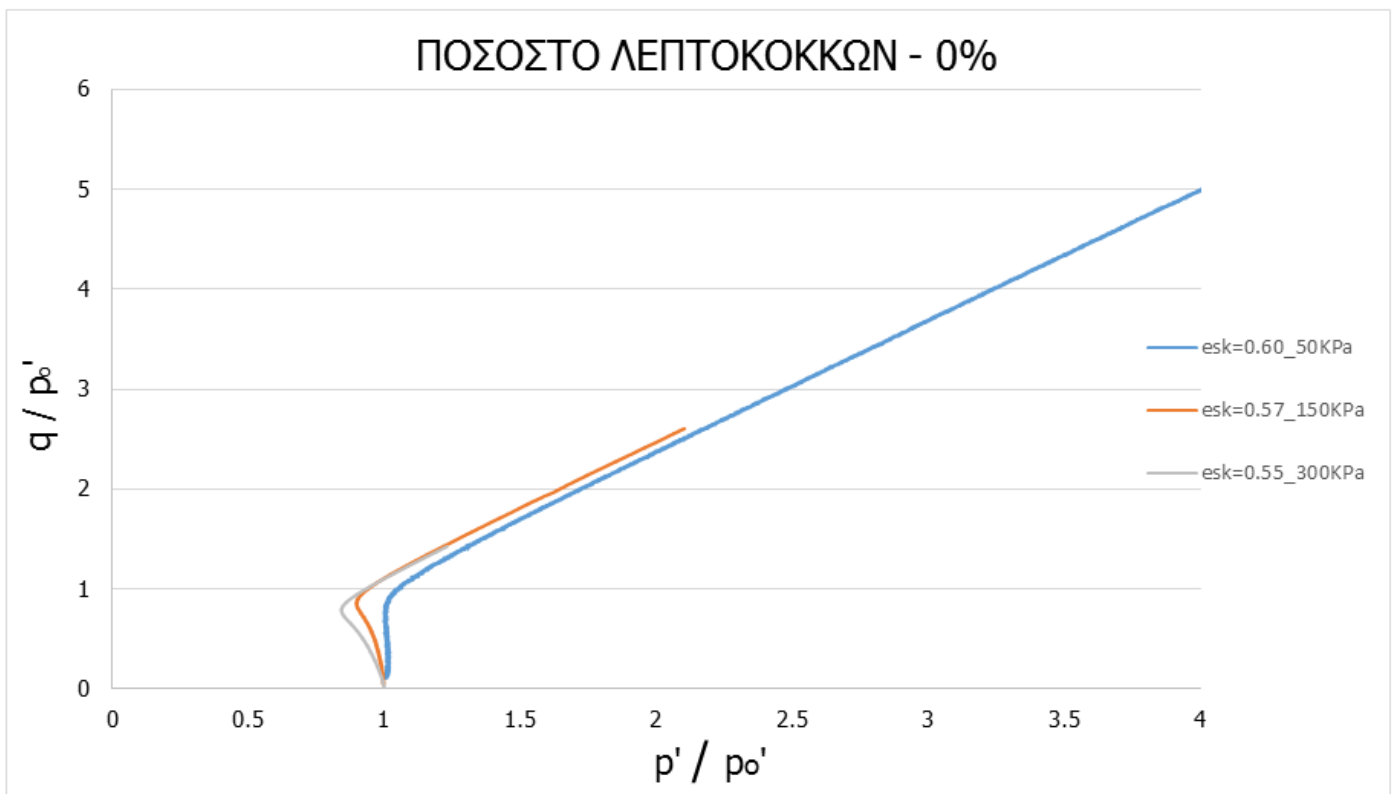
7.5. Κανονικοποίηση

Θέλοντας να εξετάσουμε πια ακριβώς είναι η επίδραση της αρχικής μέσης ενεργού τάσης p'_o στη μηχανική συμπεριφορά των μειγμάτων, κανονικοποιήσαμε τα γραφήματα ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση p'_o , ενώ διατηρήσαμε σταθερό το ποσοστό λεπτοκόκκων (FC) και τον δείκτη πόρων του εδαφικού σκελετού (e_c). Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται κανονικοποιημένα τα διαγράμματα των ενεργών τάσεων, αλλά και των υπερπιέσεων πόρων σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση.

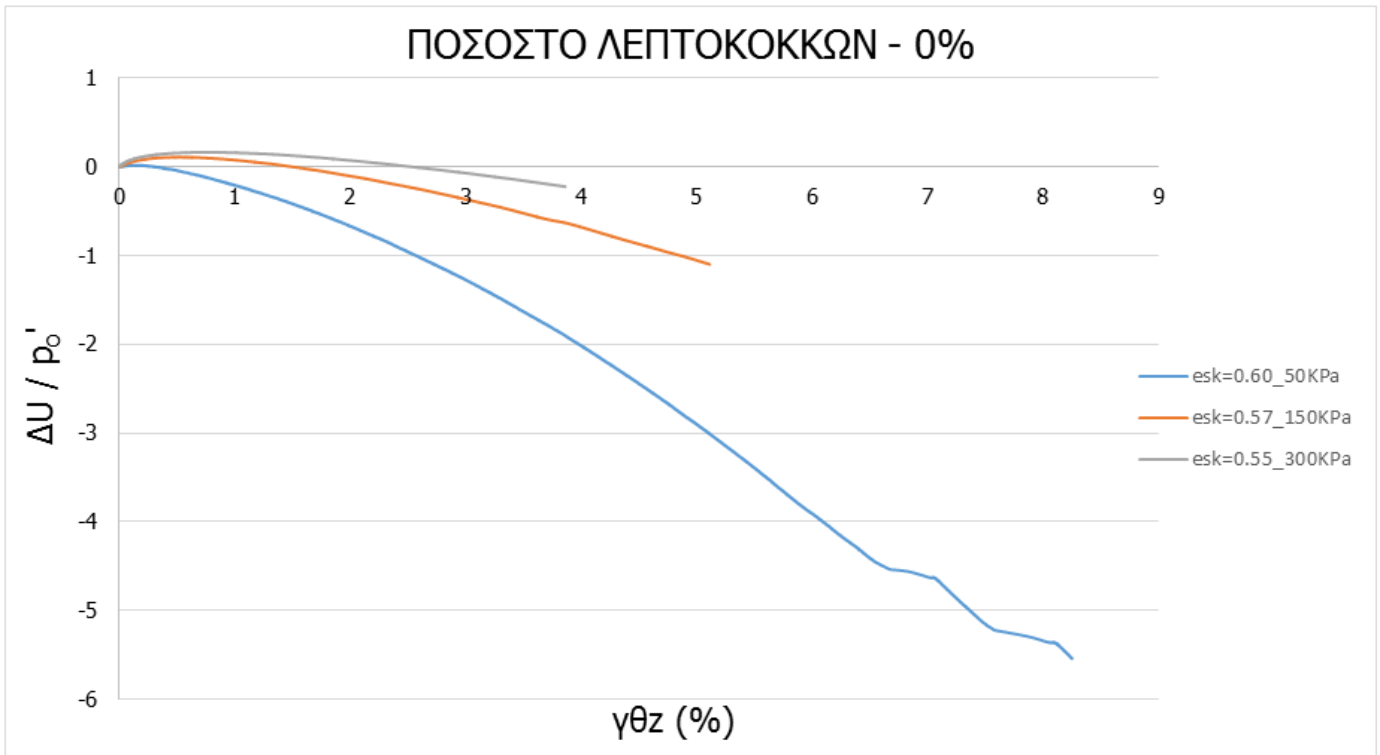
7.5.1. Ποσοστό λεπτοκόκκων 0%

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ενεργών τάσεων και των υπερπιέσεων πόρων σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση των δοκιμών καθαρής άμμου, κανονικοποιημένα ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση p'_o . Αρχικά παριστάνονται τα πυκνά δοκίμια και ακολούθως τα χαλαρά.

Πυκνά δοκίμια

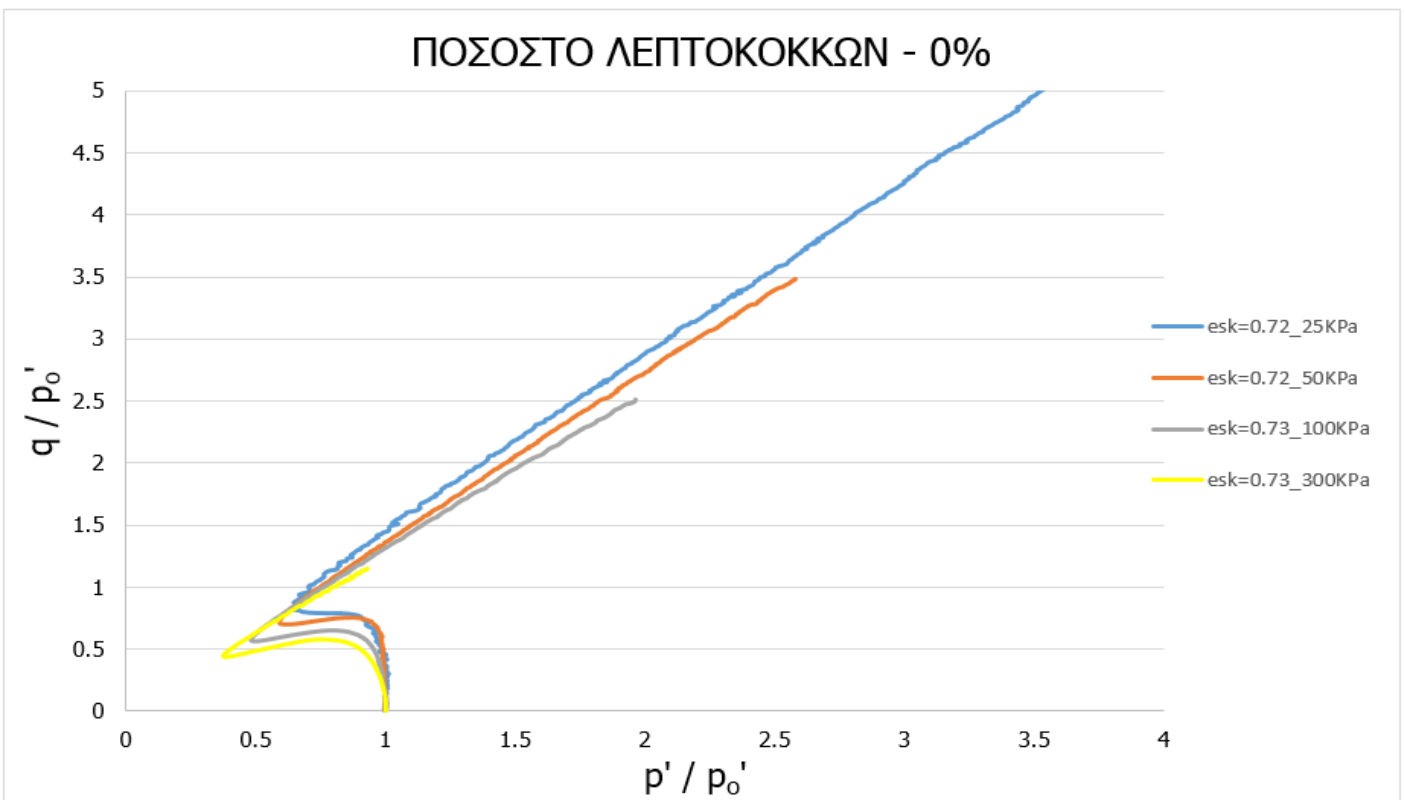


Σχήμα 7.63. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p' / p'_o - q / p'_o$), FC =0%

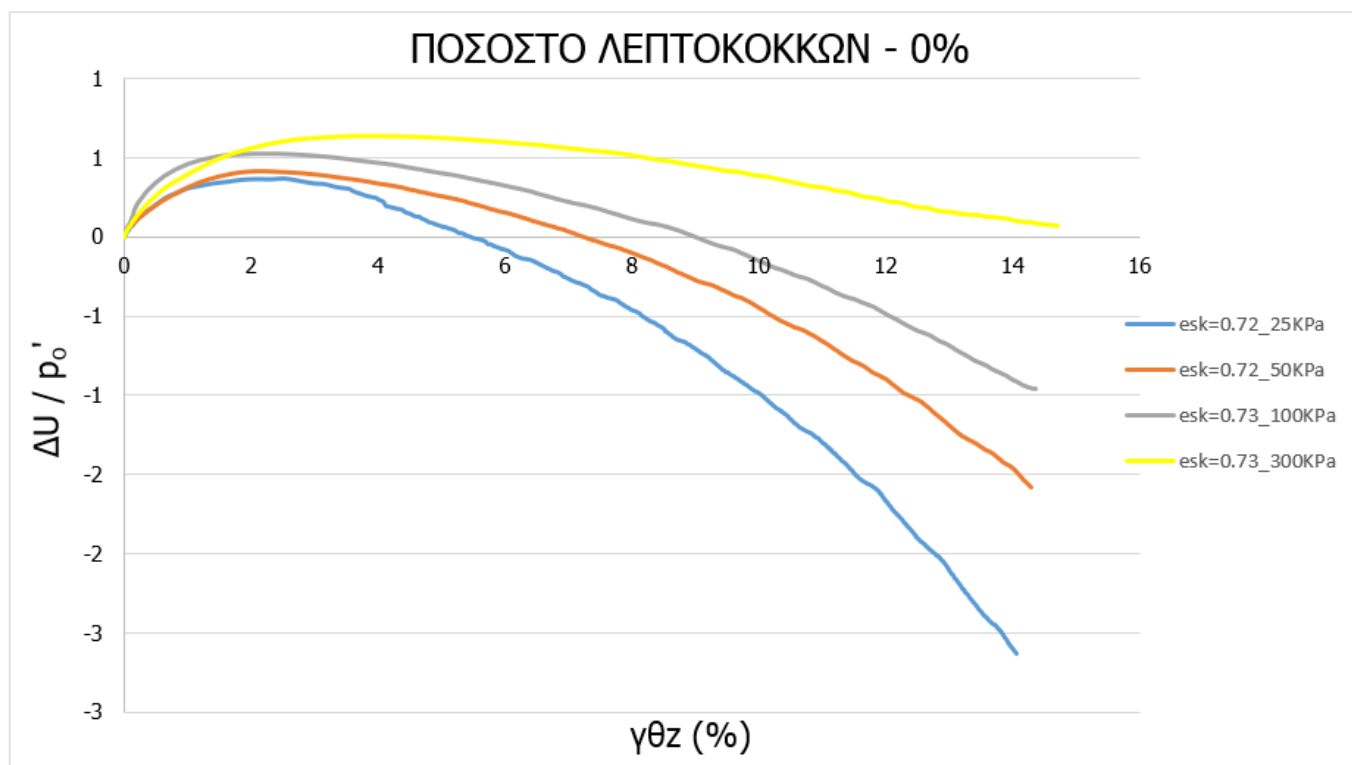


Σχήμα 7.64. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U/p'_0 - \gamma\theta z$), $FC=0\%$

Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.65. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p' / p'_0 - q / p'_0$), $FC = 0\%$



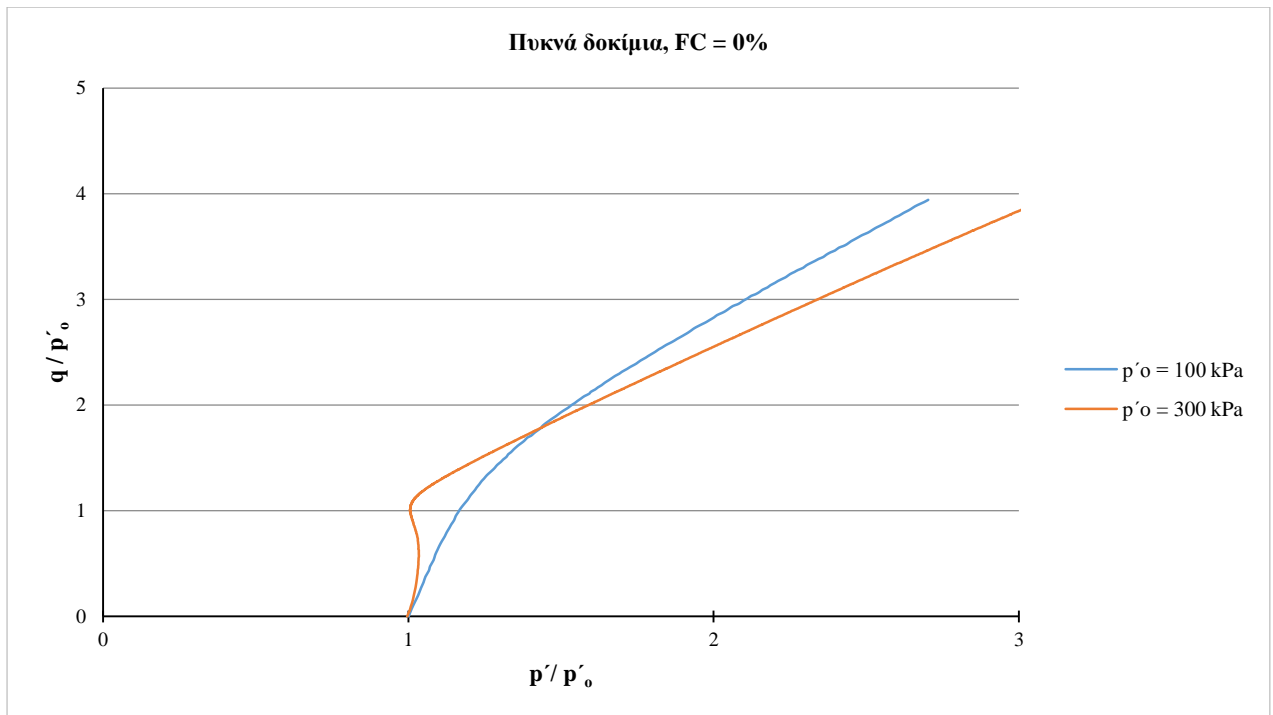
Σχήμα 7.66. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U/p'_0$ - $\gamma_{\theta z}$), $FC=0\%$

Είναι εμφανές ότι η αύξηση της αρχικής τάσης στερεοποίησης οδηγεί τα δοκίμια καθαρής άμμου σε σημαντικά πιο συστολικές συμπεριφορές. Σε όλες τις ανωτέρω πυκνότητες, στο δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 300kPa εκτός από τις σημαντικά αυξημένες υπερπίεσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα, παρατηρείται και μεγαλύτερο εύρος παραμορφώσεων για το οποίο αυτές είναι θετικές.

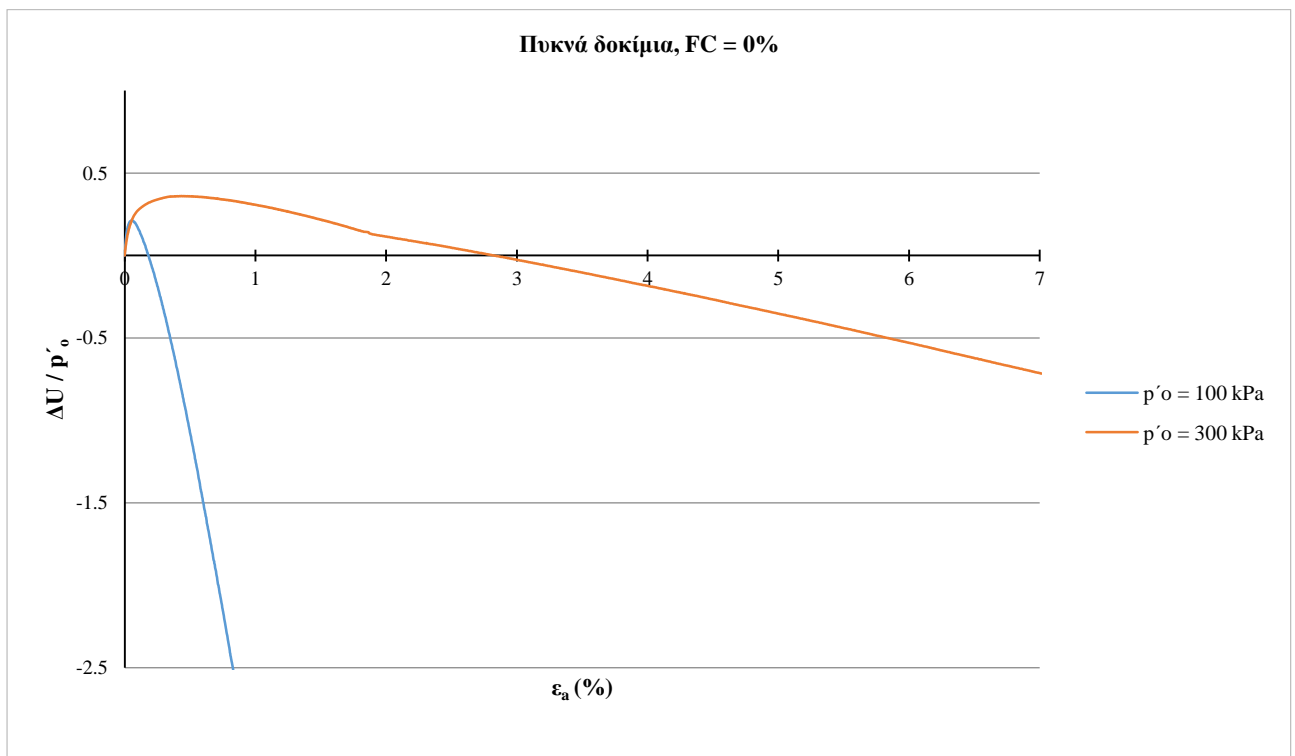
Αν συγκρίνουμε τα διαγράμματα υπερπίεσεων πόρων ρευστού σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση, μεταξύ χαλαρών και πυκνών δοκιμών, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όχι μόνο τα χαλαρά δοκίμια αναπτύσσουν υψηλότερες τιμές της πίεσης πόρων αλλά και μεγαλύτερο εύρος παραμόρφωσης για το οποίο αυτές είναι θετικές.

Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξε και παλαιότερη διπλωματική εργασία του Τομέα Γεωτεχνικής (Γκιούσας, 2011), μετά από τριαξονικές δοκιμές σε καθαρή άμμο, σε πυκνά ($e_{sk}=0.59-0.64$) και χαλαρά ($e_{sk}=0.71-0.72$) δοκίμια σε τάσεις στερεοποίησης 100kPa και 300kPa. Τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας παριστάνονται στα πιο κάτω διαγράμματα.

Πυκνά δοκίμια

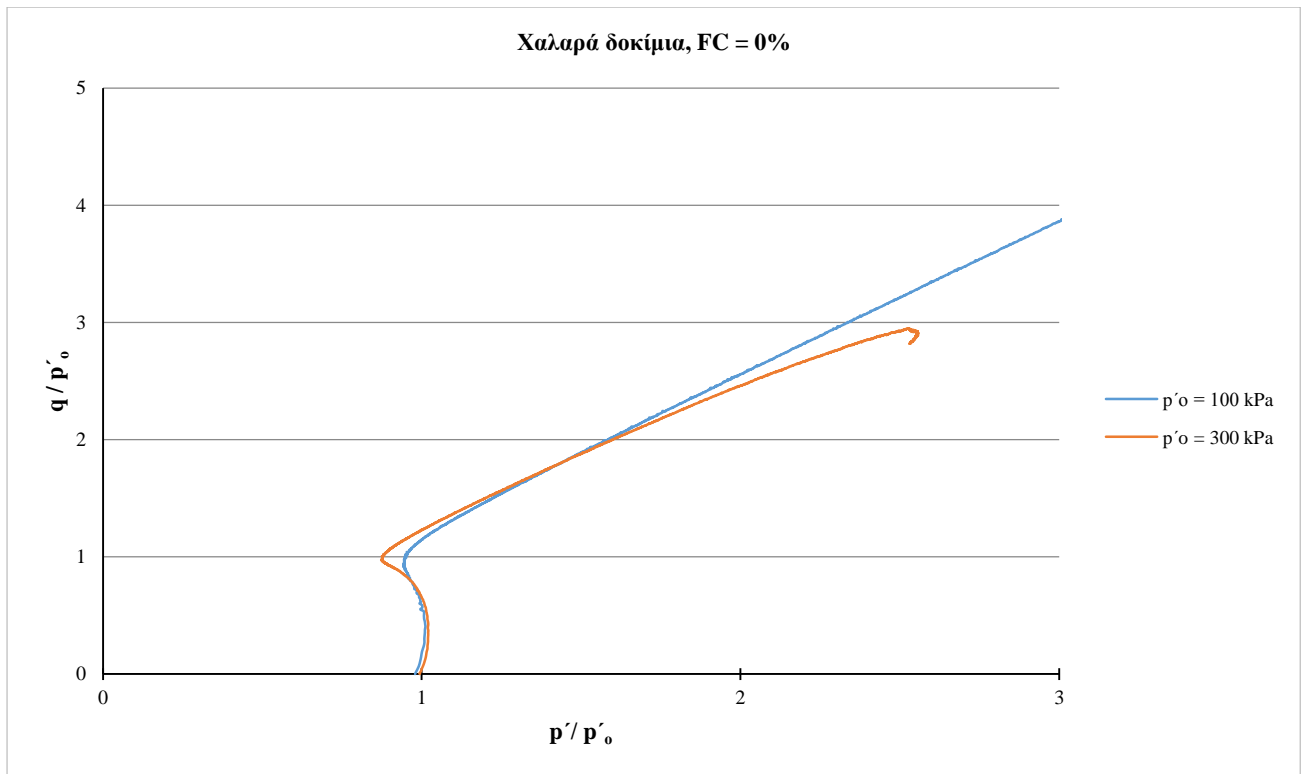


Σχήμα 7.67. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p' / p'_o - q / p'_o$), FC = 0%

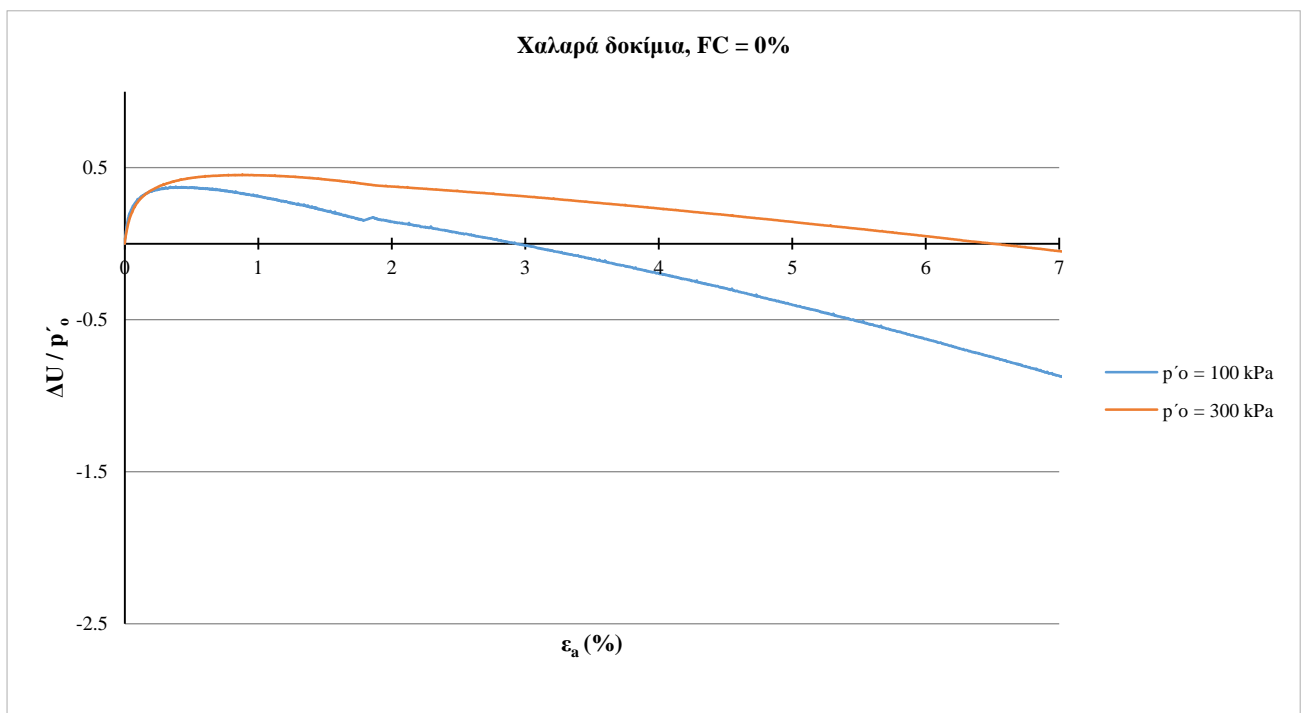


Σχήμα 7.68. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U / p'_o - \epsilon_a$), FC = 0%

Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.69. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p' / p'_o - q / p'_o$), FC = 0%



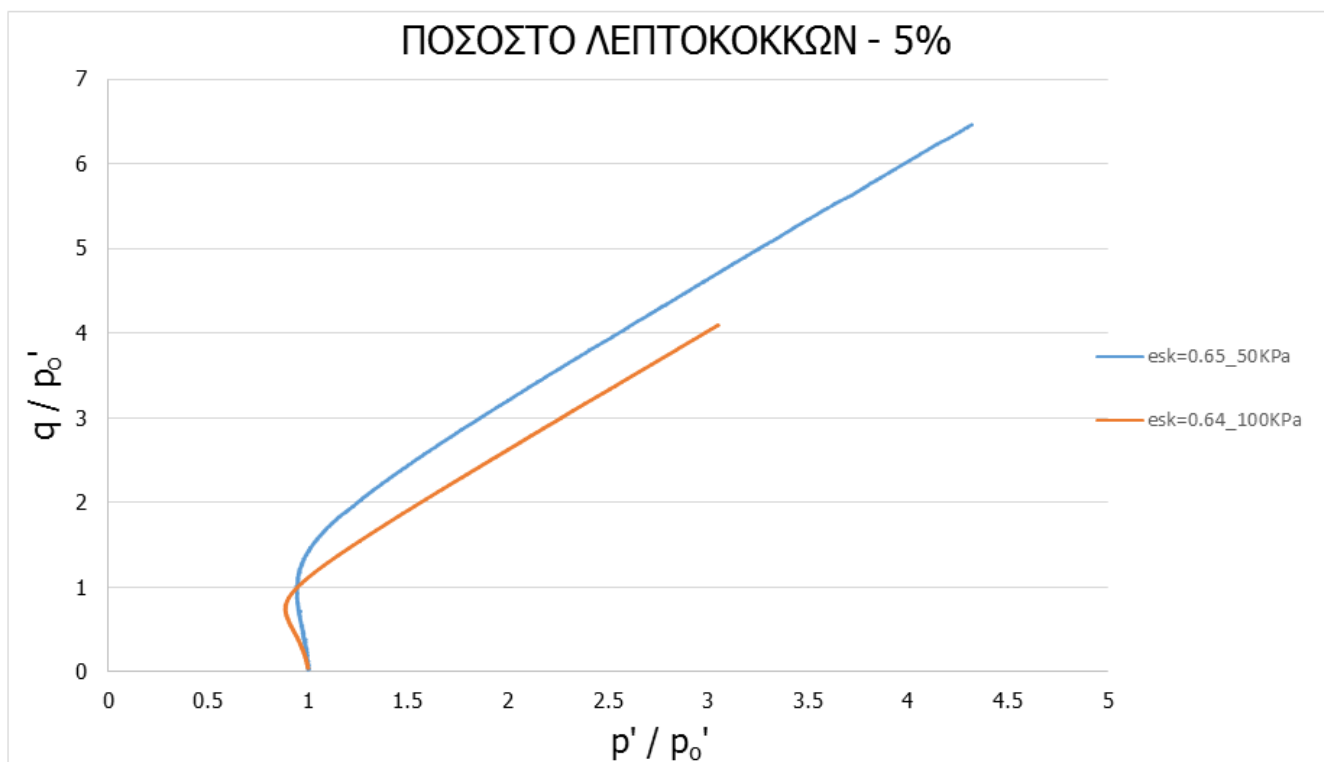
Σχήμα 7.70. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U / p'_o - \epsilon_a$), FC = 0%

Όπως φαίνεται απο τα ανωτέρω Σχήματα τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 300kPa εμφανίζουν πιο συστολική συμπεριφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa. Επίσης, στα πυκνά δοκίμια φαίνεται η διαφορά της τάσης στερεοποίησης να παίζει σημαντικότερο ρόλο απ' οτι στα χαλαρά. Ωστόσο, αυτό μπορεί να οφείλεται στη σχετικά μεγάλη διασπορά που υπάρχει στους δείκτες πόρων των πυκνών δοκιμίων.

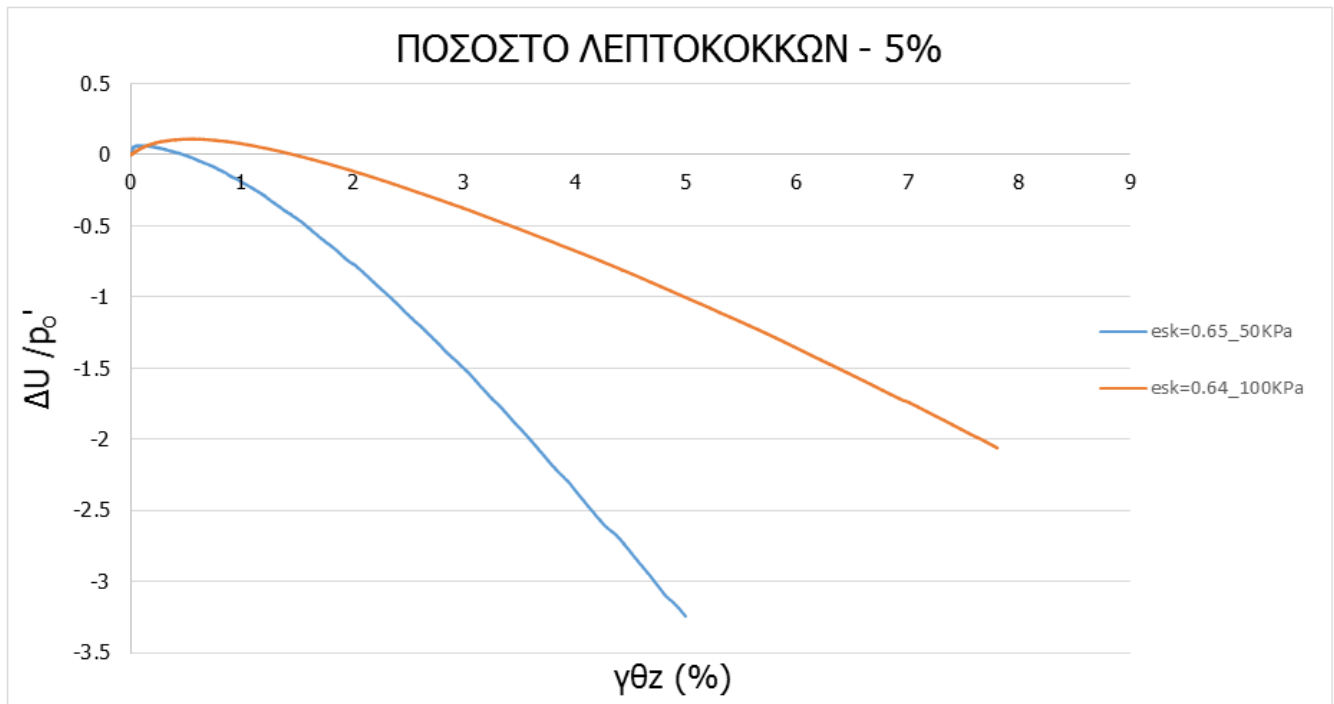
7.5.2. Ποσοστό λεπτοκόκκων 5%

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ενεργών τάσεων και των υπερπιέσεων πόρων σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση των δοκιμίων με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, κανονικοποιημένα ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση p'_o . Αρχικά παριστάνονται τα πυκνά δοκίμια και ακολούθως τα χαλαρά.

Πυκνά δοκίμια

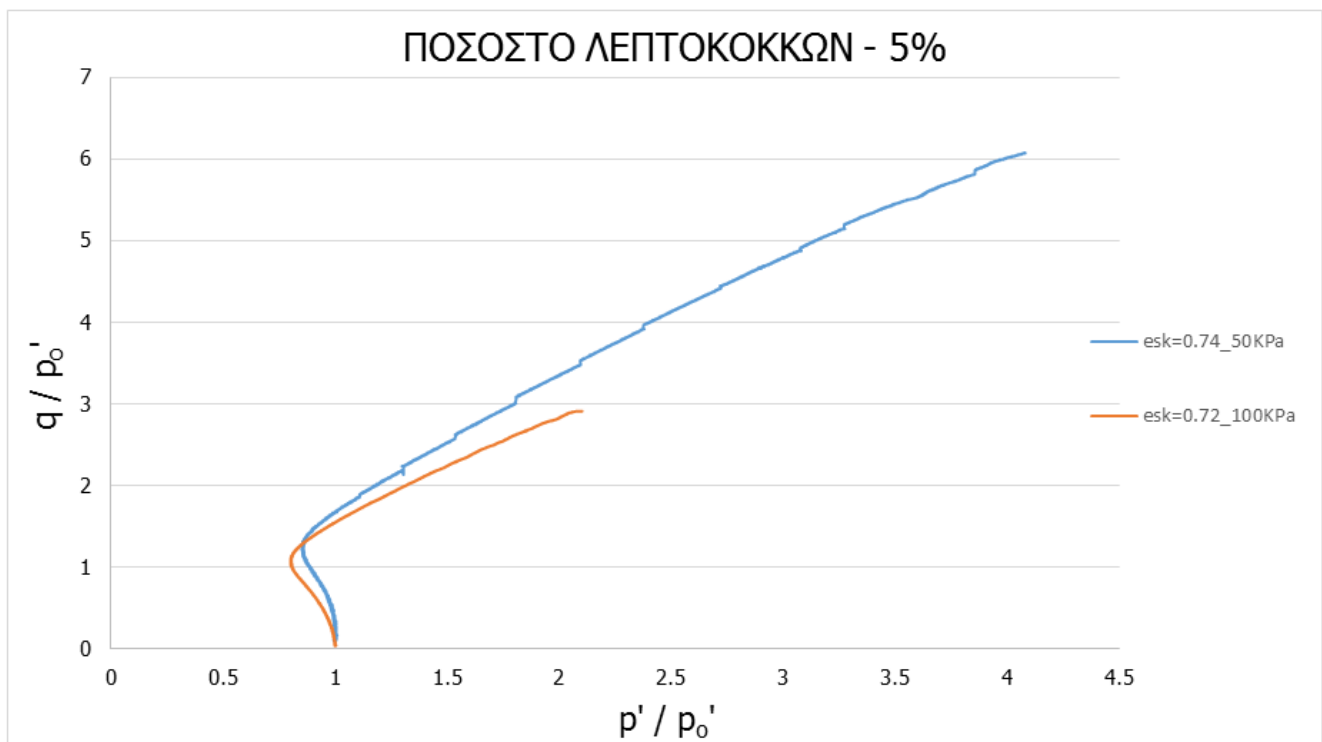


Σχήμα 7.71. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p'/p'_o - q/p'_o$), FC =5%

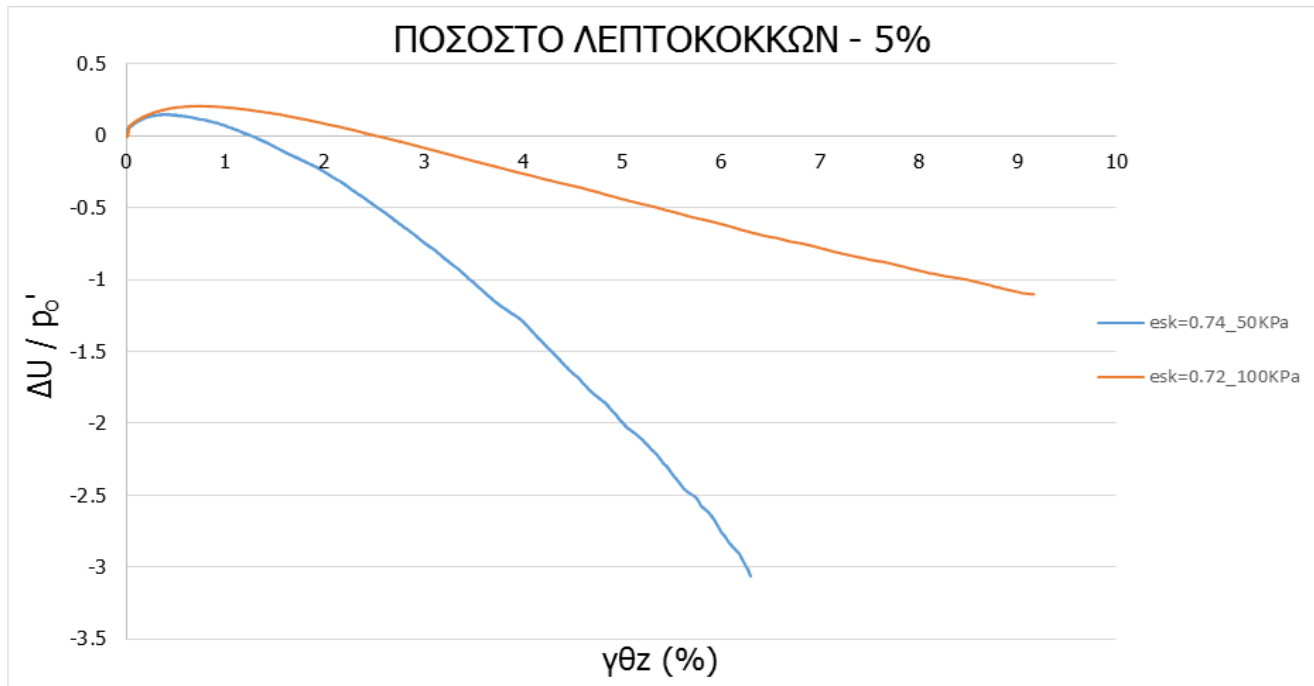


Σχήμα 7.72. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U / p'_0$ - $\gamma_{\theta z}$), FC=5%

Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.73. Κανονικοποιημένο διάγραμμα (p' / p'_0 - q / p'_0), FC =5%



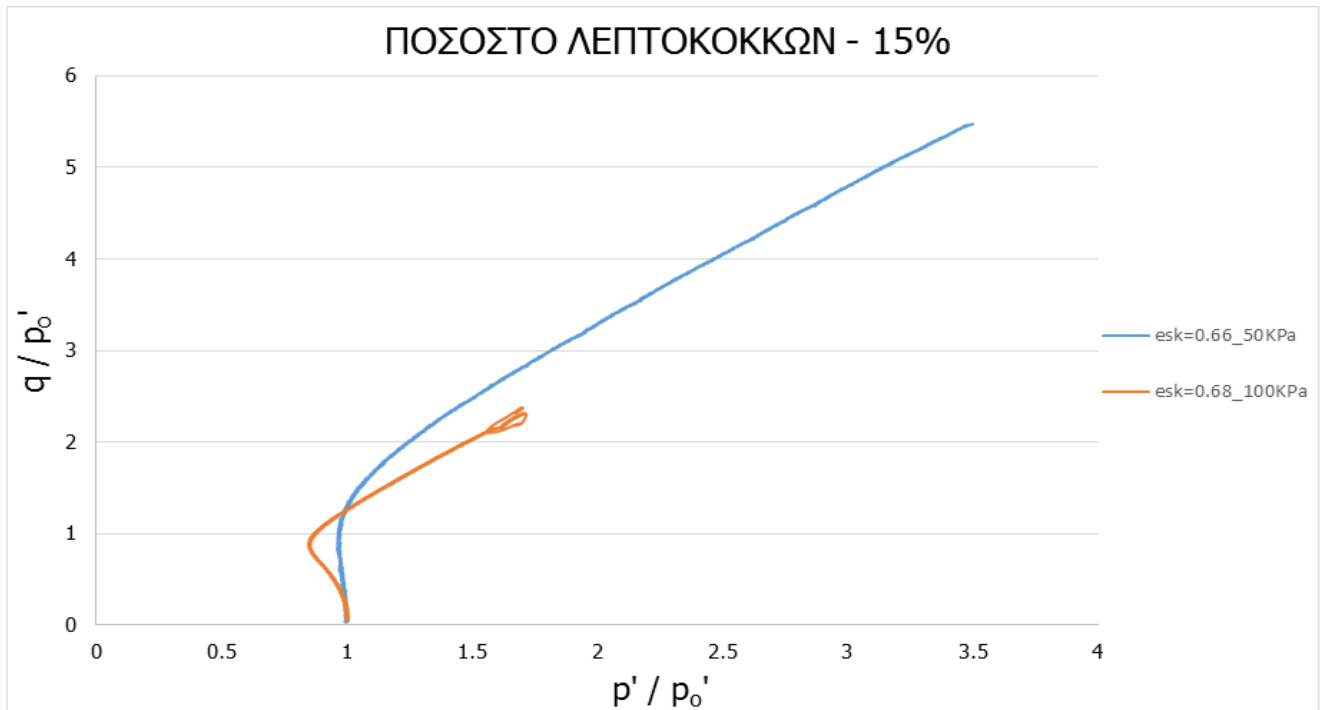
Σχήμα 7.74. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U/p'_0$ - $\gamma_{\theta z}$), FC=5%

Όπως και στα πειράματα με τα δοκίμια καθαρής άμμου, και πάλι φαίνεται ότι τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa να παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές λόγω του ότι συμπεριφέρονται διαστολικότερα σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa. Μια διαφορά που θα μπορούσε να αναφερθεί για τα μείγματα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 5%, είναι ότι λόγω του ότι αναπτύσσουν καλύτερη αλληλεμπλοκή μεταξύ των κόκκων σε σχέση με την καθαρή άμμο, η μεταβολή στην ενεργό τάση των δοκιμίων αυτών δεν μεταβάλλει την διατμητική αντοχή όσο την μεταβάλλει στα δοκίμια καθαρής άμμου.

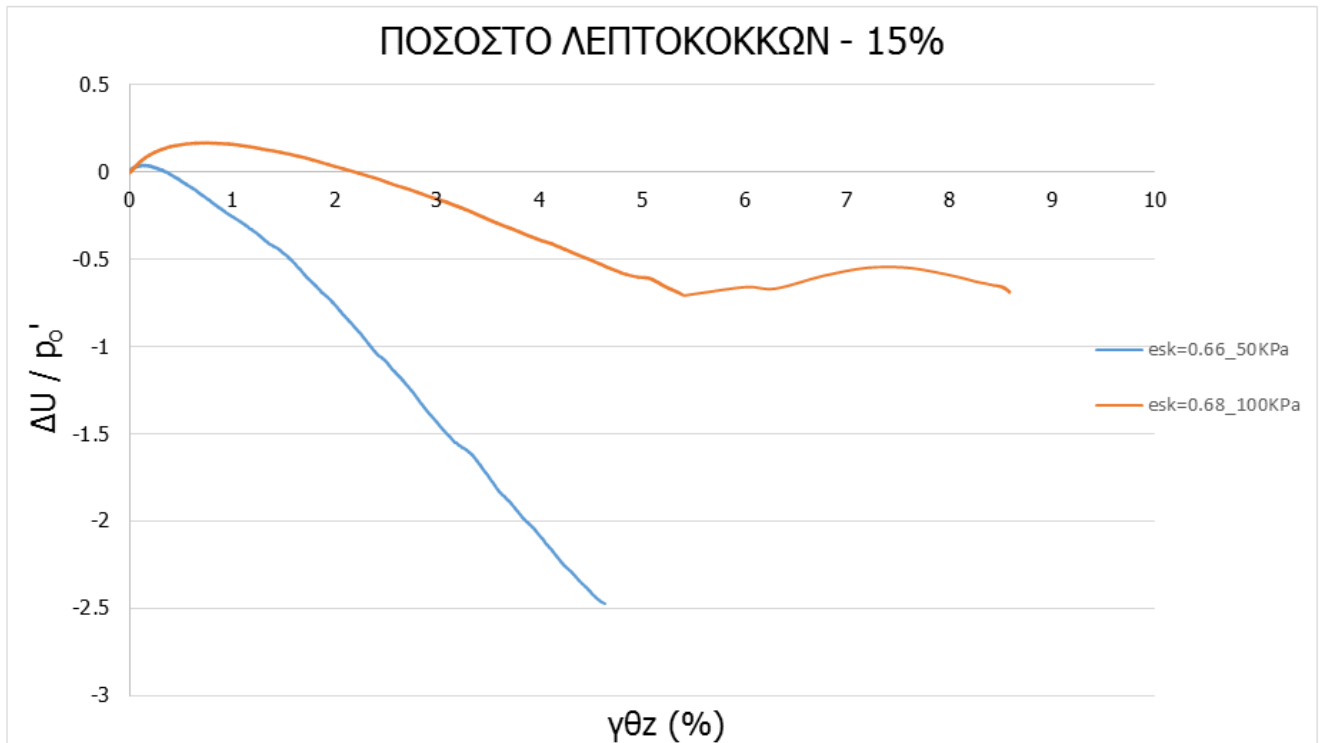
7.5.3. Ποσοστό λεπτοκόκκων 15%

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ενεργών τάσεων και των υπερπιέσεων πόρων σε συνάρτηση με την διατμητική παραμόρφωση των δοκιμίων με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, κανονικοποιημένα ως προς την αρχική μέση ενεργό τάση p'_0 . Αρχικά παριστάνονται τα πυκνά δοκίμια και ακολούθως τα χαλαρά.

Πυκνά δοκίμια

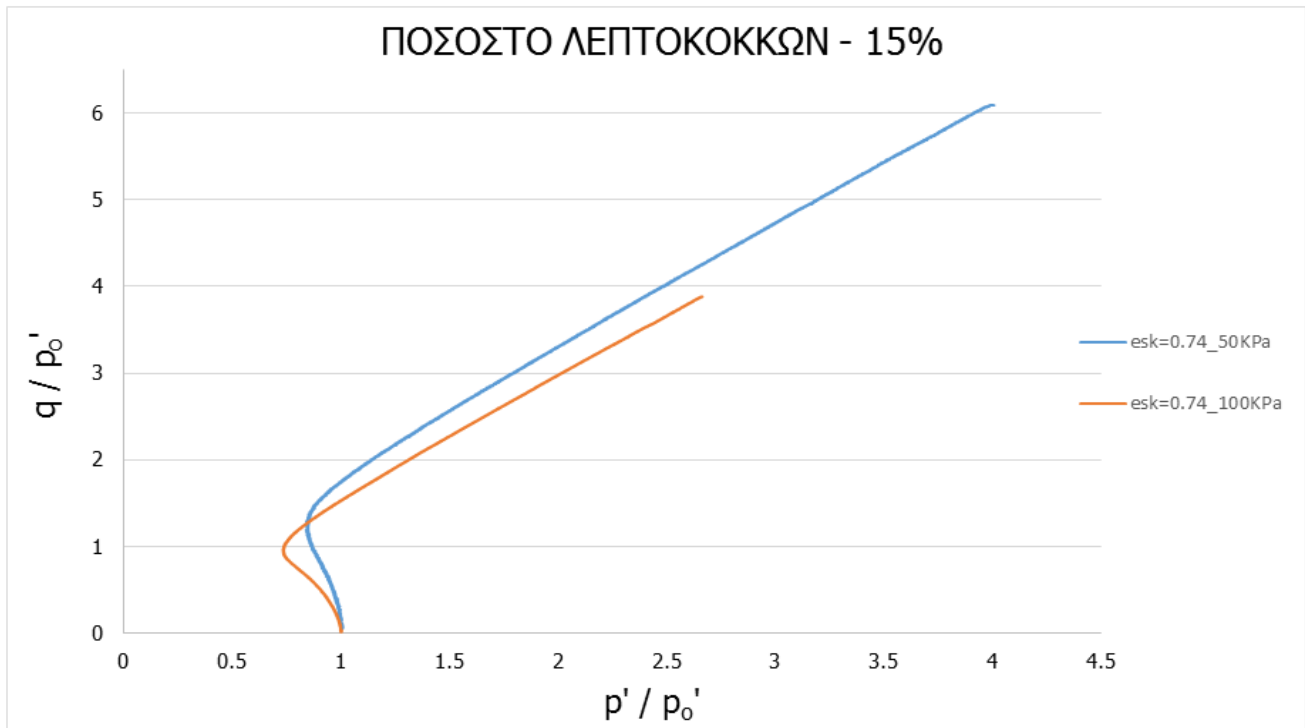


Σχήμα 7.75. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p' / p'_0 - q / p'_0$), FC =15%

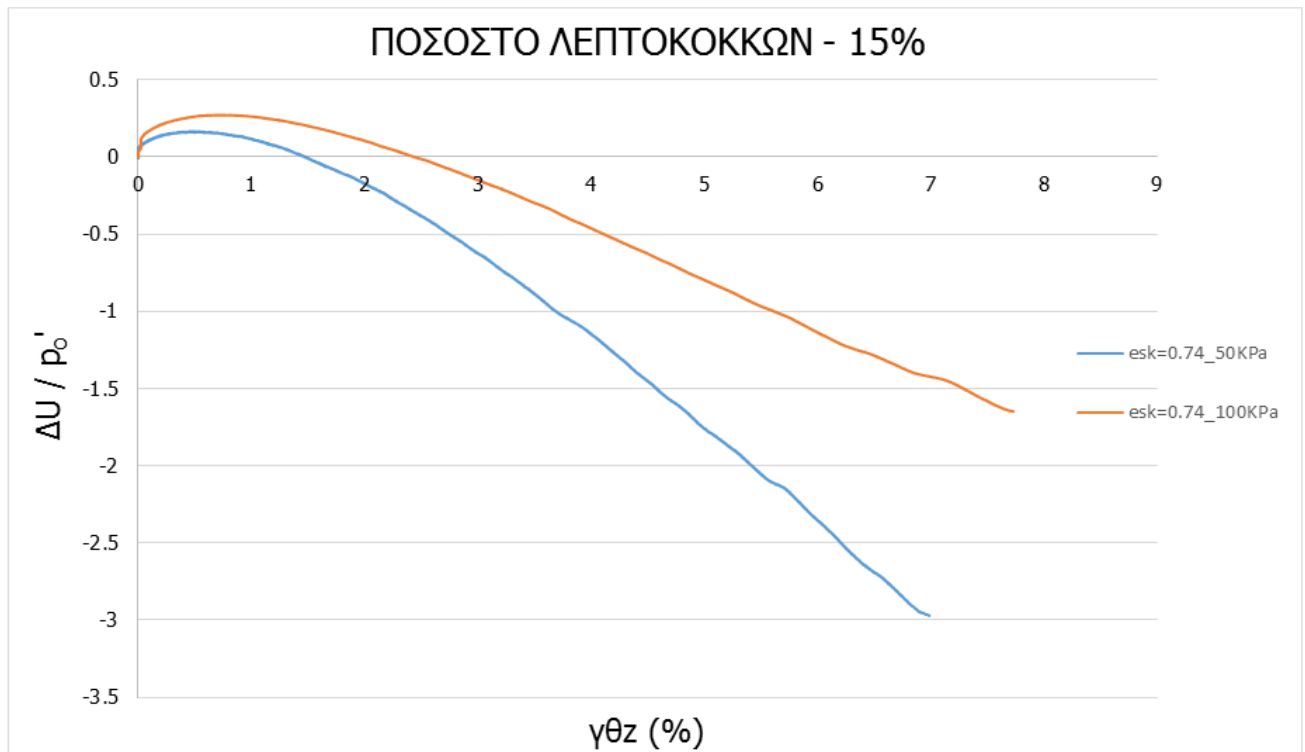


Σχήμα 7.76. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U / p'_0 - \gamma_{\theta z}$), FC=15%

Χαλαρά δοκίμια



Σχήμα 7.77. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($p' / p'_0 - q / p'_0$), FC = 15%



Σχήμα 7.78. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ($\Delta U / p'_0 - \gamma_{\theta z}$), FC=15%

Στα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι τα δοκίμια τα οποία περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, τόσο τα πυκνά, όσο και τα χαλαρά, με την αύξηση της τάσης στερεοποίησης αυξάνεται και η συστολικότητα του δοκιμίου και άρα μειώνεται η διατμητική αντοχή. Επίσης, στα πυκνά δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 15%, η επίδραση της τάσης στερεοποίησης φαίνεται να είναι μεγαλύτερη απ' ό τι στα χαλαρά δοκίμια (Σχήμα 7.76. και 7.78).

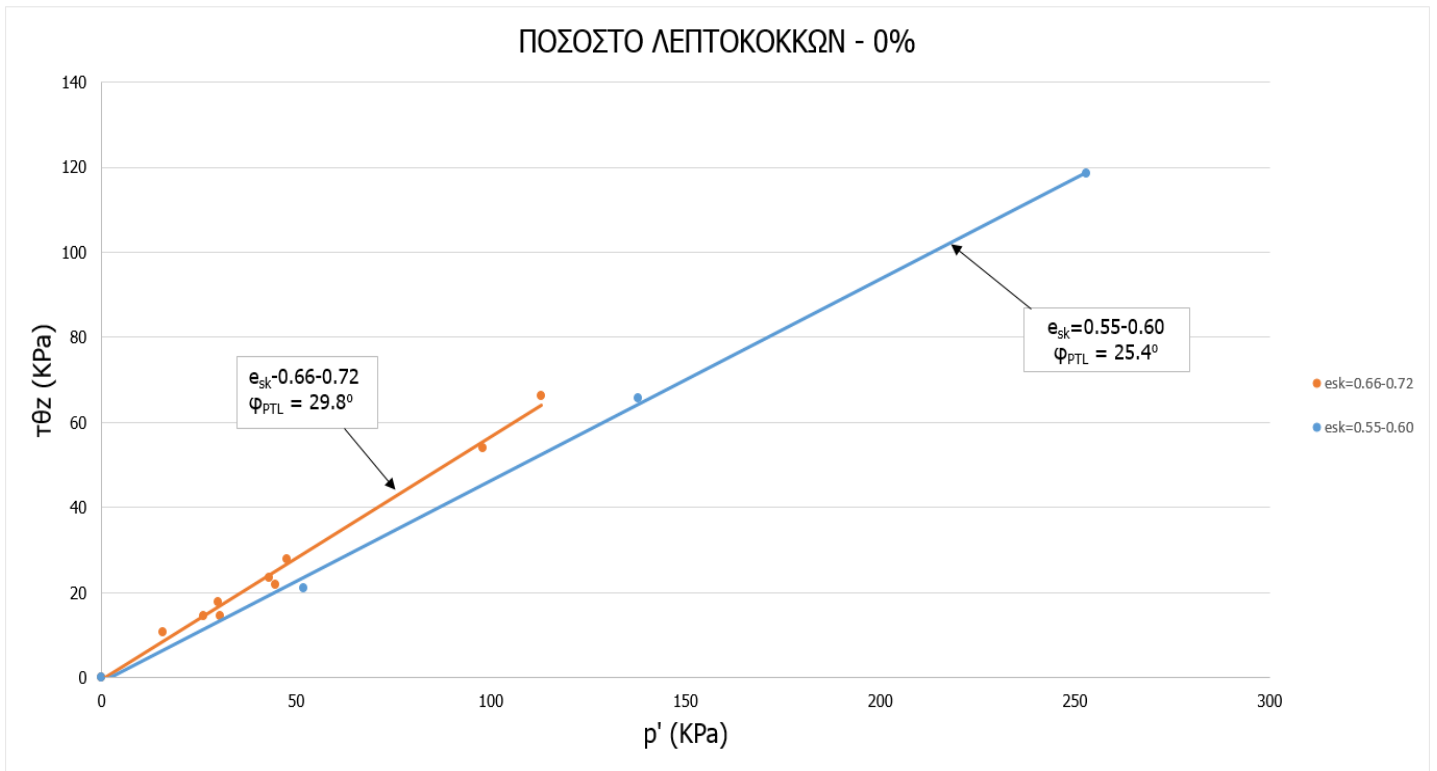
7.6. Γραμμή αλλαγής φάσης (Phase Transformation Line)

Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζεται πως μεταβάλλεται η γραμμή αλλαγής φάσης για δοκίμια καθαρής άμμου αλλά και μειγμάτων άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού απο 5% έως και 15%. Τα δοκίμια έχουν χωριστεί σε πυκνά και χαλαρά, ούτως ώστε να αποφανθούμε κατά ποσο η πυκνότητα των δοκιμίων παίζει ρόλο στην κλίση της γωνίας της γραμμής αλλαγής φάσης.

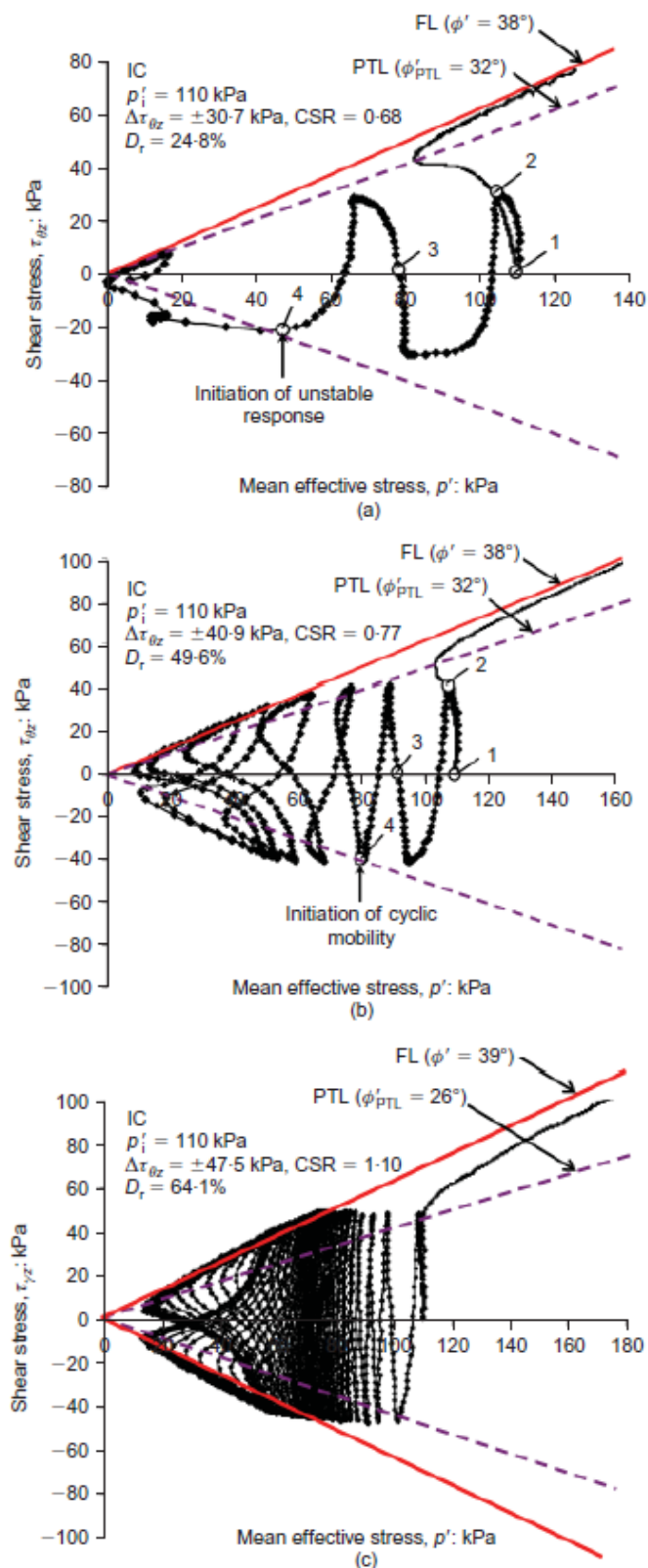
Η γραμμή αλλαγής φάσης (Phase Transformation Line – PTL) ορίζεται ως η ευθεία που σχηματίζεται απο τα σημεία μονοτονικών πειραμάτων όπου τα δοκίμια στα σημεία αυτά απο τάση για συστολή παρουσιάζουν τάση για διαστολή (Ishihara et al. 1975).

Στο Σχήμα 7.79. παρουσιάζονται οι γραμμές αλλαγής φάσης για δοκίμια καθαρής άμμου. Τα δοκίμια αυτά χωρίστηκαν σε δύο ομάδες, αναλόγως της πυκνότητάς τους (πυκνά και χαλαρά). Αυτό που παρατηρούμε απο το Σχήμα 7.79. είναι ότι τα χαλαρά δοκίμια με δείκτες πόρων σκελετού στο εύρος $esk=0.66-0.72$ παρουσιάζουν μεγαλύτερη κλίση σε σχέση με τα πυκνά δοκίμια όπου οι δείκτες πόρων σκελετού κυμαίνονται μεταξύ $esk=0.55-0.60$. Οι γωνίες αλλαγής φάσης για τα χαλαρά και τα πυκνά δοκίμια είναι 29.8° και 25.4° αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα αυτά ταυτίζονται πλήρως με την βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.80. (V. N. Georgiannou and M. Konstadinou, 2014) παρουσιάζονται πειράματα που έγιναν στο παρελθόν σε δοκίμια καθαρής άμμου Ottawa σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες ($Dr=24.8\%$ -χαλαρά δοκίμια, $Dr=49.6\%$ -δοκίμια ενδιάμεσης πυκνότητας και $Dr=64.1\%$ -πυκνά δοκίμια). Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι και στα χαλαρά δοκίμια αλλά και στα αντίστοιχα δοκίμια ενδιάμεσης πυκνότητας η γωνία αλλαγής φάσης παρέμεινε σταθερή και ίση με 32° . Όμως, στα πυκνά δοκίμια παρατηρήθηκε μειωμένη κλίση, η οποία ήταν ίση με 26° .



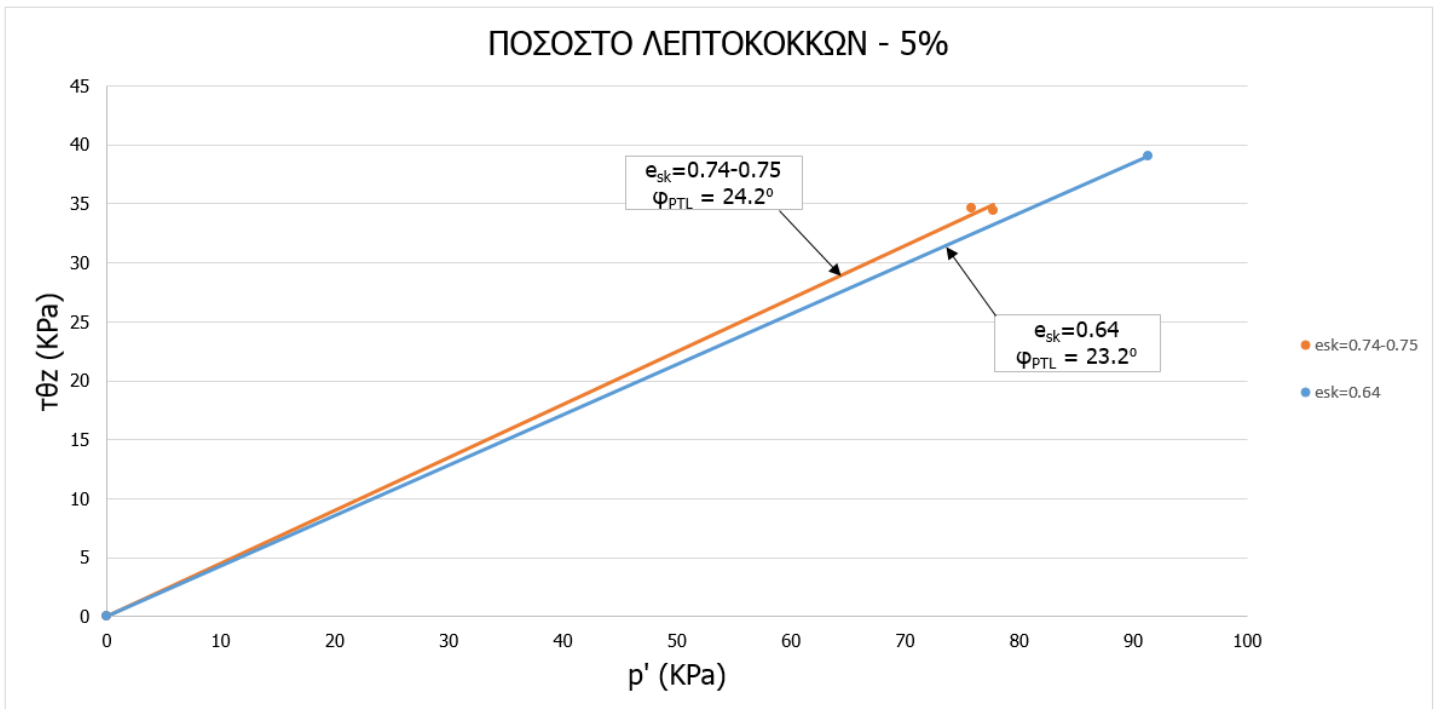
Σχήμα 7.79. Γραμμές αλλαγής φάσης (PTL) σε δοκίμια καθαρής άμμου



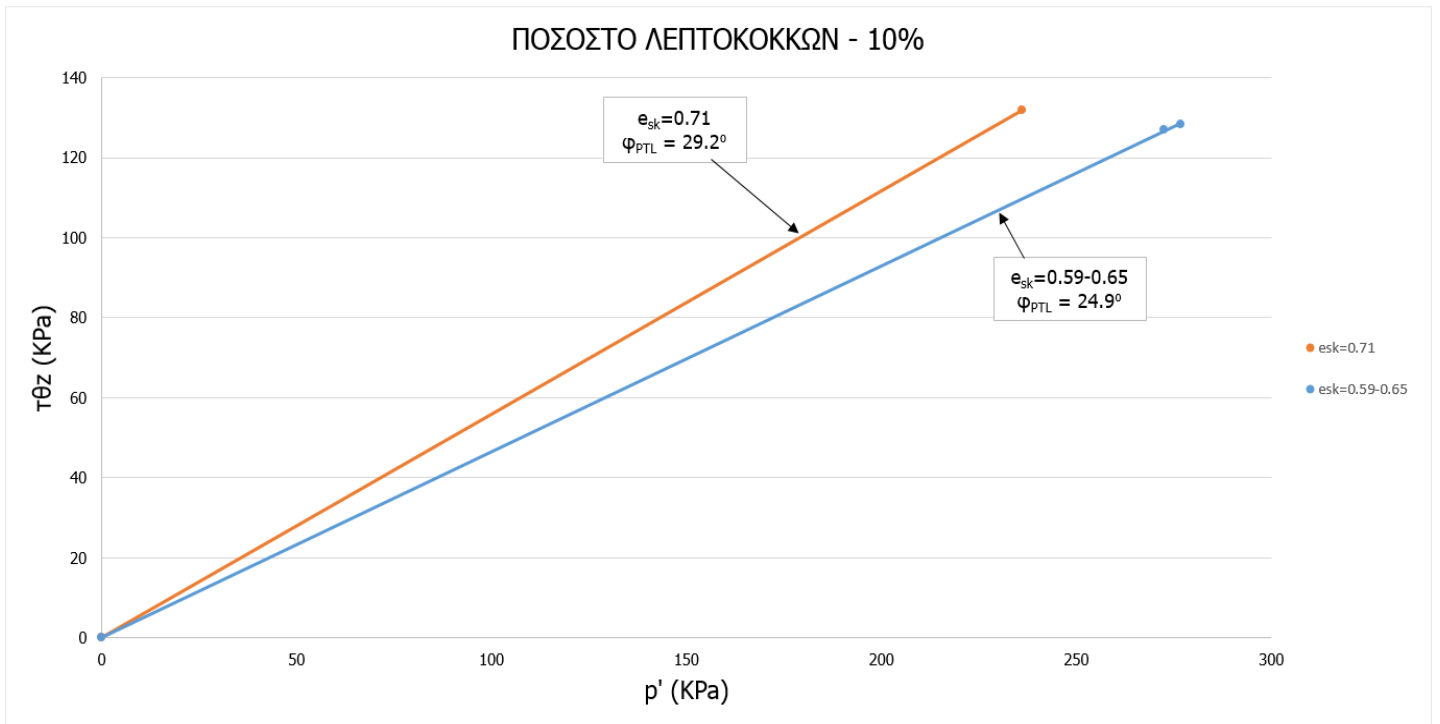
Σχήμα 7.80. Διαδρομές κύριων τάσεων σε δοκίμια καθαρής άμμου Ottawa όπου (a) $D_r = 24.8\%$ (χαλαρά δοκίμια) και $\Delta\tau_{\theta z} = \pm 30.7$ kPa, (b) $D_r = 49.6\%$ (δοκίμια ενδιάμεσης πυκνότητας) και $\Delta\tau_{\theta z} = \pm 40.9$ kPa, και (c) $D_r = 64.1\%$ (πυκνά δοκίμια) και $\Delta\tau_{\theta z} = \pm 47.5$ kPa (V. N. Georgiannou and M. Konstadinou, 2014)

Στα Σχήματα 7.81. , 7.82. και 7.83. παρουσιάζονται οι γραμμές αλλαγής φάσης για μείγματα άμμου-ιλύος με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 5%, 10% και 15%. Σε κάθε περίπτωση, έχουμε χωρίσει τα δοκίμια αναλόγως της πυκνότητάς τους σε πυκνά και χαλαρά.

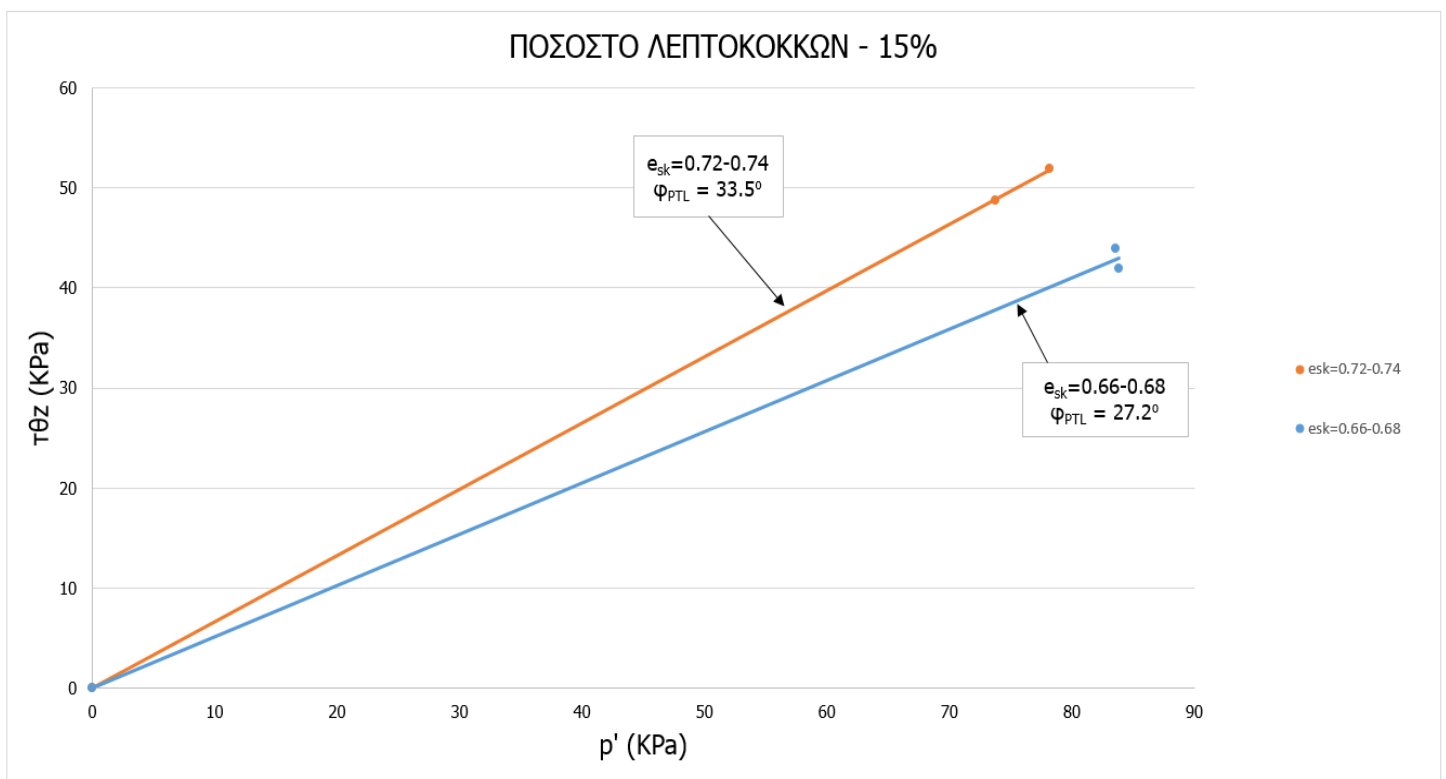
Αυτό που παρατηρούμε σε όλες τις περιπτώσεις μειγμάτων άμμου-ιλύος είναι το γεγονός ότι η γραμμή αλλαγής φάσης για τα χαλαρά δοκίμια παρουσιάζεται πάντα με μεγαλύτερη κλίση σε σχέση με την αντίστοιχη για τα πυκνά δοκίμια με εξαίρεση το ποσοστό 5%. Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι και στα χαλαρά, αλλά και στα πυκνά δοκίμια, η κλίση της γραμμής αλλαγής φάσης φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων στο μείγμα.



Σχήμα 7.81. Γραμμές αλλαγής φάσης (PTL) σε δοκίμια με ποσοστό λεπτοκόκκων υλικών 5%



Σχήμα 7.82. Γραμμές αλλαγής φάσης (PTL) σε δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 10%



Σχήμα 7.83. Γραμμές αλλαγής φάσης (PTL) σε δοκίμια με ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών 15%

8. Ανάλυση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Ποιός όμως δείκτης πόρων είναι καταλληλότερος? Εάν συγκρίνουμε τα μείγματα ως προς τον δείκτη πόρων (όγκος κενών/όγκο στερεών) είναι προφανές ότι για τον ίδιο δείκτη πόρων όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο μειώνεται το ποσοστό της άμμου. Συνεπώς, είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της ιλύος τόσο θα μειώνεται η αντίσταση του μείγματος σε ρευστοποίηση αφού στη διάτμηση θα συμμετέχουν όλο και περισσότεροι κόκκοι ιλύος που εμφανίζουν μικρότερη αντίσταση από την άμμο. Αυτό παρατηρείται στη βιβλιογραφία όταν βάση σύγκρισης είναι ο δείκτης πόρων (Ανθή Παπαδοπούλου και Θεοδώρας Τίκα ; 2008).

Εάν τώρα συγκρίνουμε τα μείγματα ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού της άμμου, τότε για τον ίδιο δείκτη πόρων σκελετού όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος τόσο μειώνονται τα κενά των πόρων και κατά συνέπεια ο κλασσικός δείκτης πόρων μειώνεται. Συνεπώς, θα αναμέναμε αν ο δείκτης πόρων ήταν η αντιπροσωπευτική παράμετρος, αύξηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση με την αύξηση του ποσοστού ιλύος. Οι Salgado et al., παρατηρούν αύξηση της αντοχής σε ελεύθερη στράγγιση με την αύξηση του ποσοστού ιλύος μέχρι 20%.

Είναι όμως πιθανό τα κενά που δημιουργούνται όταν έχουμε μία καθαρή άμμο να παραμένουν τα ίδια στην περίπτωση που τα στερεά είναι μείγμα της άμμου με ιλύ που εκ των πραγμάτων έχει πολύ μικρότερους κόκκους από την άμμο και τουλάχιστον ένα τμήμα της θα καταλήξει μέσα στα κενά των πόρων? Την δεύτερη περίπτωση προσομοιώνει ο δείκτης πόρων σκελετού θεωρώντας ότι τμήμα της ιλύος δεν θα συμμετέχει στις αλυσίδες μεταφοράς των τάσεων ανάμεσα στους κόκκους. Ασφαλώς, η ιλύς εκτός των κενών θα συμμετέχει στη μεταφορά των τάσεων και εφόσον εμφανίζει μικρότερη αντίσταση από την καθαρή άμμο αναμένεται η αντίσταση του μείγματος σε ρευστοποίηση να μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού της ιλύος ώστε να προσεγγίζει εκείνη της καθαρής ιλύος.

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.16. και 6.17. δείχνουν ακριβώς αυτή τη συμπεριφορά όταν αύξηση του ποσοστού των λεπτοκόκκων πάνω από 5% οδηγεί σε μείωση της αντίστασης ρευστοποίησης για τάσεις στερεοποίησης 100kPa και 300kPa. Αυτό δεν συμβαίνει για τάση στερεοποίησης 50kPa όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11. όπου αύξηση του ποσοστού της ιλύος οδηγεί σε συνεχή αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησης των μειγμάτων και αυτό θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Για να απαλειφθεί η επίδραση του δείκτη πόρων σκελετού έγινε κανονικοποίηση. Στις μεγαλύτερες τάσεις στερεοποίησης παρατηρείται η ίδια εικόνα με τα μείγματα με ποσοστό λεπτοκόκκων 10% να εμφανίζουν σημαντικά μικρότερη αντίσταση σε σχέση με το μείγμα με 5% λεπτόκοκκα υλικά, το οποίο με τη σειρά του εξακολουθεί να δείχνει σημαντικά αυξημένη αντίσταση σε σχέση με την καθαρή άμμο. Φαίνεται λοιπόν, ότι δεν είναι θέμα δείκτη πόρων αλλά της δομής των μειγμάτων. Έτσι, μικρά ποσοστά ιλύος σταθεροποιούν τους κόκκους της άμμου γεμίζοντας τα κενά ανάμεσά τους.

Αντίθετα αύξηση του ποσοστού της ιλύος, την κάνει να συμμετέχει στη διαδικασία της διάτμησης με απομείωση της αντίστασης της άμμου όπως αναμένεται σύμφωνα με τα προαναφερθέντα.

Συνεπώς, ο δείκτης πόρων σκελετού ορθώς περιγράφει αυτή την απόκριση, σε αντίθεση με τον κλασικό δείκτη πόρων που προβλέπει συνεχή μείωση της αντίστασης των μειγμάτων σε σχέση με την άμμο.

Η κανονικοποίηση για τάση στερεοποίησης 50kPa αντίθετα φαίνεται να απομειώνει τις διαφορές στις καμπύλες ρευστοποίησης των μειγμάτων υποδηλώνοντας ότι στην τάση αυτή κυριαρχεί η πυκνότητα των μειγμάτων στη συμπεριφορά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην χαμηλή αυτή τάση η συμπεριφορά της καθαρής άμμου είναι διαστολική, όπως έχει παρατηρηθεί και στη βιβλιογραφία, και ίσως στην περίπτωση αυτή η παρουσία της ιλύος να παίζει μικρό ρόλο ενώ τον κύριο ρόλο να παίζει η πυκνότητα του μείγματος.

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το ποσοστό της ιλύος που οδηγεί στη μετάβαση από αύξηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση της άμμου σε μείωση της, εξαρτάται από την πυκνότητα της άμμου και συνεπώς το μέγεθος των κενών. Για σχετικά μικρές μεταβολές μεταξύ χαλαρών και πυκνών δοκιμών χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα μονοτονικών δοκιμών για να διερευνηθεί αν ισχύουν οι ανωτέρω παρατηρήσεις των ανακυκλικών πειραμάτων.

8.1. Συμπεράσματα ανακυκλικών δοκιμών

8.1.1. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων

Όσον αφορά τα δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί στα 50kPa είναι ξεκάθαρο ότι η αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων αυξάνει αναλογικά τον λόγο ανακυκλικής τάσης που οδηγεί στην αστοχία.

Για αρχική τάση στερεοποίησης 100kPa όμως, παρουσιάζεται μία διαφοροποίηση. Ενώ η προσθήκη μικρής ποσότητας λεπτόκοκκου υλικού (5%) οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής, η προσθήκη μεγαλύτερου κλάσματος λεπτοκόκκου (10% ή 15%) οδηγεί σε μείωση των αντοχών σε σχέση με το κλάσμα 5%, αλλά όχι σε σχέση με την καθαρή άμμο.

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 300kPa όπου και πάλι τα δοκίμια που είχαν ποσοστό λεπτοκόκκων 10% ή 15% εμφανίζουν αντίσταση σε ρευστοποίηση μεταξύ των δοκιμών με πρόσμιξη 5% λεπτόκοκκου υλικού και των δοκιμών καθαρής άμμου. Είναι αξιοσημείωτο επίσης το γεγονός ότι τα δοκίμια με κλάσμα λεπτόκοκκου υλικού 10% είχαν πολύ παρόμοια συμπεριφορά με τα δοκίμια με κλάσμα 15% και οι καμπύλες είχαν πολύ όμοια κλίση και σχήμα.

Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά πυκνο και αυτό φαίνεται από τους δείκτες πόρων σκελετού που κυμαίνονταν από 0.63 μέχρι 0.71. Συνεπώς αν γίνει ο υπολογισμός ως προς τον συνήθη ορισμό (όγκος κενών/όγκο στερεών) φαίνεται πόσο πυκνά ήταν τα δοκίμια. Μια εξήγηση λοιπόν για την πιο πάνω

παρατηρηθείσα συμπεριφορά είναι ακριβώς αυτή η πυκνότητα. Πυκνό υλικό σημαίνει μικρά κενά μεταξύ των κόκκων της άμμου άρα λιγότερος όγκος για να εισχωρήσουν τα λεπτόκοκκα. Μικρή ποσότητα ιλύος λοιπόν, μπαίνει στα κενά και βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά της ιλύος ενώ μεγαλύτερη ποσότητα σημαίνει ότι κάποια ποσότητα λεπτόκοκκου περισσέυει με αποτέλεσμα να μειώνει τις ενεργές επαφές της άμμου και ακολούθως την αντοχή του μείγματος έναντι ρευστοποίησης.

8.1.2. Επίδραση ποσοστού λεπτοκόκκων στα κανονικοποιημένα διαγράμματα

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού φαίνεται να μην επηρεάζουν την σειρά με την οποία εμφανίζονται οι καμπύλες στα διαγράμματα ανακυκλικής τάσης – αριθμό κύκλων μέχρι τη ρευστοποίηση. Δηλαδή, και πάλι φαίνεται ότι για τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa, η αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου παράγοντα στο μείγμα μέχρι το 15% είναι ανάλογη της αύξησης του λόγου ανακυκλικής τάσης που οδηγεί σε αστοχία. Επίσης, όσον αφορά τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa και στα 300kPa και πάλι τα δοκίμια με 5% λεπτόκοκκο υλικό παρουσίασαν την μεγαλύτερη αντοχή, ενώ τα μείγματα με 10% και 15% λεπτόκοκκο υλικό βρίσκονταν μεταξύ των δοκιμίων με 5% και των δοκιμίων καθαρής άμμου σε όρους κανονικοποιημένης ανακυκλικής αντοχής σε ρευστοποίηση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κανονικοποιημένες καμπύλες ρευστοποίησης ως προς τον δείκτη κενών (Global void ratio) όπου παρατηρούνται κάποιες σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις μή κανονικοποιημένες καμπύλες. Πιο συγκεκριμένα, ανεξαρτήτως της αρχικής τάσης στερεοποίησης φαίνεται η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού σε ποσότητες μεγαλύτερες του 5% να υποβιβάζει τις αντοχές του μείγματος ακόμα και κάτω από τις αντοχές της άμμου, κάτι το οποίο δεν είχε παρατηρηθεί ούτε στις μή κανονικοποιημένες καμπύλες (CSR-N5%) αλλά και ούτε και στις κανονικοποιημένες ως προς τον δείκτη πόρων σκελετού. Μία απλή εξήγηση του φαινομένου αυτού, είναι το γεγονός ότι κανονικοποιώντας ως προς τον δείκτη κενών ουσιαστικά αλλάζει η βάση σύγκρισης των δοκιμίων με αποτέλεσμα να συγκρίνουμε δοκίμια με ίδιο δείκτη κενών και διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δοκίμια με μεγάλα ποσοστά λεπτόκοκκων να έχουν μικρό δείκτη κενών και μεγάλο δείκτη πόρων σκελετού και τελικώς ουσιαστικά να συγκρίνουμε χαλαρότερα μείγματα (με βάση τον δείκτη πόρων σκελετού) με πυκνότερα δοκίμια καθαρής άμμου.

8.1.3. Επίδραση αρχικής ενεργού τάσης στερεοποίησης

Τόσο στην καθαρή άμμο, όσο και στα μείγματα με ποσοστά 5% 10% και 15% λεπτόκοκκου υλικού, υπάρχει επιρροή της αρχικής ενεργού τάσης p_0' . Παρά την κανονικοποίηση που γίνεται ως προς την αρχική ενεργό τάση ($CSR = \tau_{tz}/p_0'$) τα μείγματα αλλά και η καθαρή άμμος που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa δείχνουν αυξημένη αντοχή σε ρευστοποίηση έναντι των μειγμάτων που στερεοποιήθηκαν σε μεγαλύτερες τάσεις.

Επίσης, σε όλα τα μείγματα άμμου-ιλύος και στην καθαρή άμμο φαίνεται η αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης να είναι ανάλογη της μείωσης του λόγου ανακυκλικής τάσης,

με εξαίρεση τα μείγματα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 15%, όπου η μεταβολή της αρχικής ενεργού τάσης από τα 100kPa στα 300kPa δεν επιφέρει καμία αλλαγή στον λόγο ανακυκλικής αντοχής των μειγμάτων αυτών.

8.1.4. Επίδραση πυκνότητας

Τόσο στα πειράματα καθαρής άμμου, όσο και στα μείγματα άμμου-ιλύος με ποσοστό λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού 10%, τα πυκνά δοκίμια παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη αντοχή έναντι ρεστοποίησης. Επίσης, παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές του λόγου ανακυκλικής τάσης και μεγάλο αριθμό κύκλων, οι καμπύλες χαλαρών και πυκνών δοκιμίων συγκλίνουν. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι πιθανόν για μεγάλο αριθμό κύκλων και αντίστοιχα μικρούς λόγους ανακυκλικής τάσης η επίδραση της πυκνότητας να είναι σχετικά ασήμαντη.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα για την επίδραση της πυκνότητας είναι ότι όσο αυξάνεται το περιεχόμενο ποσοστό των λεπτόκοκκων τόσο μειώνεται η επίδραση της πυκνότητας. Αυτό φαίνεται από τις διαφορές πυκνών-χαλαρών δοκιμίων που είναι μικρότερες στα δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων 10% σε σχέση με την καθαρή άμμο.

8.2. Συμπεράσματα μονοτονικών δοκιμών

8.2.1. Επίδραση πυκνότητας

Όπως είναι ευρέως γνωστό, 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. Αυτό ισχύει για όλα τα δοκίμια ανεξαρτήτως της αρχικής τους τάσης στερεοποίησης.

Μία ακόμη σημαντική παρατήρηση που έγινε συγκρίνοντας την επίδραση της πυκνότητας στα διάφορα δοκίμια, είναι ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών σε ένα μείγμα που στερεοποιήθηκε στα 50kPa τόσο μειώνεται η επίδραση της πυκνότητας. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται και σε δοκίμια στερεοποιημένα σε μεγαλύτερες τάσεις, όχι όμως τόσο έντονα. Μια εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι τα χαλαρά μείγματα με 15% ποσοστό λεπτόκοκκων που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa έχουν σχηματίσει ήδη μία σταθερή δομή και έτσι η μείωση του δείκτη πόρων σκελετού δεν επηρεάζει τόσο σημαντικά τις αντοχές και την ανάπτυξη πιέσεων πόρων όσο επηρεάζει τα δοκίμια άμμου.

8.2.2. Επίδραση περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκόκκων

Είναι εμφανές ότι η προσθήκη ποσοστού ιλύος στην καθαρή άμμο επιδρά ευνοϊκά. Τα δοκίμια που περιέχουν ένα ποσοστό ιλύος που συγκρίνονται σε κοινό δείκτη πόρων σκελετού ανεξαρτήτως της τάσης στερεοποίησης παρουσιάζουν αυξημένες διατμητικές αντοχές πάντα σε σχέση με την καθαρή άμμο. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια με ποσοστά 5% και 15% λεπτόκοκκο υλικό τα οποία στερεοποιήθηκαν σε αρχική ενεργό τάση 50kPa παρουσιάζουν σημαντικά πιο διαστολική συμπεριφορά σε σχέση με την καθαρή άμμο, με το δοκίμιο με 5% περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού να είναι ελαφρώς διαστολικότερο από το μείγμα με 15%, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τα ανακυκλικά αποτέλεσμα. Τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa υποδουκνείου παρόμοια συμπεριφορά με μία μικρή διαφορά. Στα πυκνά αυτά δοκίμια το μείγμα με 5% λεπτόκοκκο υλικό παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένες αντοχές σε σχέση με το μείγμα με 15%, ενώ αντίθετα στα χαλαρά δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 15% είναι ελαφρώς διαστολικότερο από το μείγμα με 5%, γεγονός το οποίο συμφωνεί με τα ανακυκλικά πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 300kPa, και στα πυκνά αλλά και στα χαλαρά δοκίμια, λόγω του ότι έχουμε δεδομένα μονοτονικών δοκιμών μόνο για καθαρή άμμο και για μείγματα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων 10%, μπορούμε να πούμε ότι η προσθήκη ποσοστού λεπτοκόκκων 10% βελτιώνει πάντα την διατμητική αντοχή και μειώνει το εύρος θετικών πιέσεων πορών σε σχέση με την καθαρή άμμο.

8.2.3. Επίδραση αρχικής ενεργού τάσης

Το γενικότερο συμπέρασμα για την επίδραση της τάσης στερεοποίησης είναι ότι και στα μείγματα άμμου-ιλύος, αλλά και στην καθαρή άμμο η αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης οδηγεί σε αύξηση των διατμητικών αντοχών για τις μικρές παραμορφώσεις. Ωστόσο λόγω του ότι η αύξηση της αρχικής ενεργού τάσης αυξάνει την τάση για συστολή των δοκιμίων δημιουργούνται μεγάλες υπερπίεσεις πόρων που μειώνουν την διατμητική αντοχή των δοκιμίων. Τα δοκίμια καθαρής άμμου, όπως και τα μείγματα με περιεχόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων 5% 10% και 15% που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa παρουσιάζουν σημαντικά πιο συστολική συμπεριφορά σε σχέση με τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa, όπως και μεγαλύτερο πλάτος διατμητικής παραμόρφωσης για το οποίο οι υπερπίεσεις πόρων ήταν θετικές.

Επίσης, στα χαλαρά δοκίμια μειγμάτων με περιεχόμενο ποσοστό λεπτοκόκκων 5% και 15% παρατηρήθηκε ότι στις μικρές παραμορφώσεις ($\gamma < 1\%$) τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa παρουσίασαν αυξημένη αντοχή έναντι των δοκιμίων που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa. Αντιθέτως, στα πυκνά αυτά μείγματα τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa και 100kPa είχαν σχεδόν ταυτόσιμες διατμητικές αντοχές, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στα πυκνά δοκίμια, στις μικρές παραμορφώσεις η επίδραση της αρχικής ενεργού τάσης δεν είναι τόσο σημαντική όσο είναι στα χαλαρά δοκίμια. Ωστόσο, και τα πυκνά αλλά και τα χαλαρά δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa παρουσίασαν πάντα μεγαλύτερη τάση για διαστολή.

8.3. Παρατηρήσεις απο την σύγκριση ανακυκλικών-μονοτονικών δοκιμών

Στις ανακυκλικές δοκιμές που στερεοποιήθηκαν στα 50kPa παρατηρείται συνεχής αύξηση του λόγου ανακυκλικής διάτμησης με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού λεπτοκοκκόκκων μέχρι το 15%. Στις μονοτονικές δοκιμές στην ίδια τάση στερεοποίησης τα μείγματα επίσης εμφανίζουν αυξημένες διατμητικές αντοχές και είναι πιο διαστολικά σε σχέση με την καθαρή άμμο, όμως τα δοκίμια με περιεχόμενο ποσοστό ιλύος 5% εμφανίζουν ελάχιστα βελτιωμένη αντοχή σε σχέση με το μείγμα με 15% λεπτόκοκκα.

Όσον αφορά τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 100kPa και υποβλήθηκαν σε ανακυκλική στρεπτική διάτμηση, παρουσίασαν αύξηση του λόγου διατμητικής αντοχής για ποσοστό ιλύος 5% και ακολούθως μία μικρή πτώση με την αύξηση του ποσοστού αυτού στο 15%, ενώ εμφανίζουν βελτιωμένη αντοχή σε σχέση με την καθαρή άμμο. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στα αντίστοιχα πυκνά δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονοτονική στρεπτική διάτμηση αφού ποσοστό 5% λεπτοκοκκόκκων μεγιστοποιεί την αποκλίνουσα τάση. Αντιθέτως στα χαλαρά δοκίμια η προσθήκη μεγαλύτερου ποσοστού απο 5% συνεχίζει να βελτιώνει τις διατμητικές αντοχές του μείγματος. Οι ανωτέρω παρατηρήσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στις μονοτονικές δοκιμές ο ρόλος της πυκνότητας είναι πολύ σημαντικός και εν μέρει καθορίζει το ποσοστό λεπτόκοκκων στο οποίο βελτιστοποιείται η διατμητική αντοχή του μείγματος. Αντιθέτως, στις ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές λόγω της συσσώρευσης των υπερπιέσεων πόρων με τον αριθμό των κύκλων, φαίνεται ότι ο ρόλος της αρχικής τάσης στερεοποίησης είναι αυτός που καθορίζει κατά κύριο λόγο το ποσοστό λεπτόκοκκων που βελτιστοποιεί τον λόγο ανακυκλικής τάσης

9. Βιβλιογραφικές αναφορές

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

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

Γεωργιάννου Β.Ν., Τσομώκος Α., Σταύρου Κ., "Απόκριση Άμμου Σε Μονοτονική Και Ανακυκλική Φόρτιση Σε Στρέψη", 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.

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

Τσομώκος, Α., (2005), "Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς εδαφικού στοιχείου σε δοκιμές στατικής και δυναμικής στρέψης κοίλου δοκιμίου", Ph.D.Thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Baziar M.H, Sharafi H., "A Laboratory Study on the Liquefaction Resistance of Firouzkooch Silty Sands Using Hollow Torsional System", Electronic Journal Of Geotechnical Engineering, Vol. 15 (2010), Bund. J.

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", KSCE Journal of Civil Engineering (2011) 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", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) 115–125.

Carraro, J. A. H., Bandini, P., Salgado R., "Liquefaction resistance of clean and nonplastic silty sands based on Cone Penetration Resistance", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering ASCE, November 2003.

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.

Monkul M.M., "Influence of Silt Size and Content on Static Liquefaction Potential of Sand", (2010), Dissertation submitted to Oregon State University.

Muley P., Maheshwari B.K., Paul D.K., "Effect of Fines on Liquefaction Resistance of Solani Sand", World Conferences on Earthquake Engineering, 2012

Murthy T.G, Loukidis D., Carraro, J.A., Prezzi M., Salgado R., (2007) "Undrained monotonic response of clean and silty sands". *Geotechnique* 57, No. 3, 273-288.

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

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

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

Sitharam T.G., Raju G., Murthy S., "Cyclic and Monotonic Undrained Shear Response of Silty Sand from Bhuj Region in India", *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 450, Vol. 41, No. 2-4, June-December 2004, pp. 249-260.

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., "Intergrain Contact Density Indices for Granular Mixes – II: Liquefaction Resistance", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1671-3664(2007)02-0135-12.

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. 102