



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Μηχανική συμπεριφορά της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου



Διπλωματική Εργασία

Λαζαρίδης Ιωάννης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Επιβλέπων: Β.Ν. Γεωργιάννου, Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Β.Ν. Γεωργιάννου, αναπληρώτρια καθηγήτρια της σχολής πολιτικών μηχανικών Ε.Μ.Π., για την επιστημονική καθοδήγηση, το χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τη δυνατότητα που μου προσέφερε να εργαστώ στο εργαστήριο εδαφομηχανικής αποκτώντας έτσι εμπειρία στον τομέα της πειραματικής εδαφομηχανικής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Στέλιο Τσεντίδη, τεχνικό του εργαστηρίου εδαφομηχανικής για την απαραίτητη βοήθειά του στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και την άριστη συνεργασία που είχαμε, τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Τριαντάφυλλο για την προθυμία του να βοηθήσει όποτε χρειάστηκε και τον πολιτικό μηχανικό και φίλο Ηλία Κωστόγιαννη για την καθοδήγησή του όσον αφορά στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας.

Περίληψη

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία διερευνάται η μηχανική συμπεριφορά της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου. Πρόκειται για μία ιλύ χαμηλής πλαστιμότητας με χαμηλό ποσοστό αργιλικών προσμίξεων. Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές συμπίεσομέτρου σε φυσικά και αναζυμωμένα δοκίμια.

Αρχικά προσδιορίζονται τα εγγενή χαρακτηριστικά συμπίεστότητας και η περιβάλλουσα κρίσιμης κατάστασης αστοχίας για τα αναζυμωμένα δοκίμια και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των αδιατάρακτων δοκιμίων. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η επίδραση που έχει η δομή του φυσικού υλικού στη συμπίεστότητα και στην αντοχή του.

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση της ανωτέρω συμπεριφοράς με άλλα αργιλικά υλικά των οποίων έχει μελετηθεί η συμπεριφορά στη βιβλιογραφία. Η Μάργα του Ισθμού της Κορίνθου παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από τη συμπεριφορά τυπικών αργιλικών εδαφών της βιβλιογραφίας.

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα στερεοποίησης των αναζυμωμένων δοκιμίων παρουσιάζουν έντονη καμπυλότητα και δεν συγκλίνουν με τη θεωρητική καμπύλη ICL του Burland που αντιπροσωπεύει τα αργιλικά υλικά.

Οι διαδρομές τάσεων παραπέμπουν εν μέρει σε συμπεριφορά άμμου πράγμα που αποδίδεται στο μεγάλο ποσοστό περιεχόμενης ιλύος στο υλικό.

Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα της διάτμησης των αναζυμωμένων δοκιμίων ορίζουν μία περιβάλλουσα αστοχίας που απέχει από εκείνη των φυσικών, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη δομής στο φυσικό υλικό.

Abstract

In this diploma thesis the mechanical behavior of the Marl from the Corinth canal is investigated. In the plasticity chart, the marl is characterized as a low plasticity silt which includes a low percentage of clayey minerals.

Tests were carried out in the oedometer and the triaxial apparatus on intact and reconstituted samples.

The intrinsic characteristics and the critical state parameters for the reconstituted material are established and compared to the characteristics of the intact material. This comparison indicates the influence of the structure of the intact soil on its response to shearing and compression.

The Marl from the Corinth canal displays multiple differences from other typical clayey soils presented in the literature.

The normalized intrinsic compression line displays severe curvature and does not converge at any point to Burland's ICL.

The shape of the stress paths resembles in some respects the stress paths of sands, reflecting to the high content of silt in the material.

The normalized peak strength of the reconstituted samples lies below the normalized peak strength of the intact samples, hence the influence of the micro-structure on peak strength of natural soil can be identified.

Πίνακας περιεχομένων

1.	Εισαγωγή	5
2.	Βιβλιογραφική αναφορά	7
	2.1 Φύση, προέλευση του εδάφους και εδαφικοί δεσμοί	7
	2.2 Αναζυμωμένα υλικά	10
	2.3 Συμπιεστότητα και αντοχή αναζυμωμένων υλικών – σύγκριση με τα φυσικά υλικά	11
	2.3.1 Συμπεριφορά στο συμπιεσόμετρο.....	11
	2.3.2 Συμπεριφορά στην τριαξονική δοκιμή.....	19
3.	Το υλικό που μελετήθηκε	30
	3.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου...30	
	3.2 Παλαιότερες μελέτες πάνω στην Μάργα του Ισθμού της Κορίνθου..35	
4.	Εργαστηριακές δοκιμές.....	40
	4.1 Δοκιμές συμπιεσόμετρον.....	40
	4.1.1 Υλικό δοκιμών.....	41
	4.1.2 Εξοπλισμός.....	45
	4.1.3 Μόρφωση δοκιμίου.....	45
	4.1.4 Πειραματική διαδικασία.....	46
	4.1.5 Δοκιμές συμμόρφωσης.....	51
	4.1.6 Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών συμπιεσόμετρον.....	59
	4.2 Δοκιμές στην τριαξονική συσκευή.....	53
	4.2.1 Υλικό δοκιμών.....	55
	4.2.2 Εξοπλισμός	55
	4.2.3 Μόρφωση αναζυμωμένου δοκιμίου	56
	4.2.4 Πειραματική διαδικασία.....	57
	4.2.5 Συγκεντρωτικός πίνακας τριαξονικών δοκιμών.....	66
5.	Αποτελέσματα πειραμάτων.....	67
	5.1 Δοκιμές συμπιεσομέτρον.....	67
	5.1.1 Αναζυμωμένα δοκίμια.....	67
	5.1.2 Αδιατάρακτα δοκίμια.....	80
	5.2 Τριαξονικές δοκιμές.....	90
	5.2.1 Αναζυμωμένα δοκίμια.....	90
	5.2.2 Αδιατάρακτα δοκίμια.....	124

6. Συμπεράσματα.....	127
Βιβλιογραφία.....	129
Παράρτημα.....	131

1 Εισαγωγή

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μία ιλύ χαμηλής πλαστιμότητας που προέρχεται από τα πρηνή του Ισθμού της Κορίνθου και αποσπάσθηκε περίπου 1m από τη στάθμη της θάλασσας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δοκίμια, μέσω των οποίων προσδιορίστηκαν οι σταθερές εγγενούς συμπίεστότητας. Ακόμη έγιναν τριαξονικές δοκιμές σε αναζυμωμένα δοκίμια, μέσω των οποίων προσδιορίστηκαν οι σταθερές κρίσιμης κατάστασης. Τέλος αξιολογήθηκε η επίδραση που έχει η δομή του φυσικού υλικού στη διατμητική αντοχή και στη συμπίεστότητά του.

Αναλυτικότερα τα παραπάνω αναφέρονται στα επιμέρους κεφάλαια ως εξής:

Κεφάλαιο 1: Παρουσιάζεται συνοπτικά το περιεχόμενο της εργασίας, ο σκοπός της και η διάρθρωσή της.

Κεφάλαιο 2: Παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία για τη φύση των εδαφικών υλικών και τη συμπεριφορά τους. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στοιχεία από τη βιβλιογραφία σχετικά με τη συμπεριφορά των αναζυμωμένων αργιλικών υλικών στο συμπίεσομετρο και στην τριαξονική συσκευή.

Κεφάλαιο 3: Δίνονται τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη εδαφικού υλικού. Παρουσιάζονται στοιχεία για την ορυκτολογική του σύσταση, τα όρια Atterberg και την κοκκομετρική του διαβάθμιση. Γίνεται σύγκριση των παραπάνω χαρακτηριστικών με άλλα τυπικά υλικά και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από παλαιότερες δοκιμές στη Μάργα του Ισθμού της Κορίνθου.

Κεφάλαιο 4: Περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Αναλυτικότερα, για τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και τις τριαξονικές δοκιμές περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες των

επιμέρους δοκιμών και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιτυχή ολοκλήρωση των πειραμάτων.

Κεφάλαιο 5: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης και οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες καμπύλες. Γίνεται σύγκριση με παλαιότερες δοκιμές επί του ιδίου υλικού που έγιναν στο εργαστήριο, για να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος γίνεται σύγκριση του φυσικού υλικού με το αναζυμωμένο και αξιολογείται η επίδραση της δομής στη συμπεστότητά του. Παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών για τα αναζυμωμένα δοκίμια και προσδιορίζεται η γραμμή κρίσιμης κατάστασης και οι σταθερές φ_{cr} , φ_e^* και M . Γίνεται σύγκριση με αποτελέσματα από τριαξονικές δοκιμές σε φυσικά δοκίμια και αξιολογείται η επίδραση της δομής του φυσικού υλικού στη διατμητική του αντοχή.

Κεφάλαιο 6: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραμάτων της εργασίας.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται ενδεικτικά η πορεία υπολογισμών των πειραμάτων και ενδιαφέροντα στοιχεία που προέκυψαν κατά τη διάρκεια αυτών.

2 Βιβλιογραφική αναφορά

2.1 Φύση, προέλευση του εδάφους και εδαφικοί δεσμοί

Ο φυσικός κύκλος της διάβρωσης στο φλοιό της γης από μηχανικούς ή χημικούς παράγοντες, αποσάθρωση, μεταφορά, εναπόθεση και συμπίεση από μεταγενέστερα ιζήματα αποτελεί διαχρονικό πεδίο μελέτης από γεωλόγους (π.χ. Holmes, 1965). Τα κατάλοιπα του κύκλου αυτού, αυτό της απώλειας του υλικού του φλοιού, η δέσμευση αλλά και προσφορά νέου υλικού σε αυτόν, έχει προσφάτως εξηγηθεί μέσω ολισθήσεων και τεκτονισμού των ηπειρωτικών πλακών (π.χ. Hallam, 1973). Το κομμάτι αυτό του γεωλογικού κύκλου που περιλαμβάνει τη διάβρωση, απόθεση και ως ένα σημείο τη συμπίεση οδηγεί στη δημιουργία των "εδαφών του μηχανικού".

Κάτω από μεγάλη συμπίεση λόγω του μεγάλου ύψους των υπερκείμενων αποθέσεων, τα εδάφη υπόκεινται σε αλλαγές για να γίνουν αυτό που ονομάζουμε βράχος, με την έννοια του μηχανικού. Από την άλλη πλευρά επιφανειακοί βράχοι μπορεί να αποσαθρώνονται ανά σημείο για να δημιουργήσουν τα λεγόμενα "εδάφη μηχανικού". Τα έργα πολιτικού μηχανικού αφορούν σε φυσικώς προκύπτοντα εδάφη, στο σχεδιασμό πρανών, θεμελιώσεων, ή σε προϊόντα εκσκαφής και επαναχρησιμοποίησης κατά την κατασκευή επιχωμάτων. Σε κάθε περίπτωση ο πολιτικός μηχανικός θα ασχοληθεί με τη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού, αργιλικού ή κοκκώδους, με νερό στους κενούς χώρους αυτού. Το υλικό αυτό συνήθως θα εμφανίζει μία δομή με δεσμούς συγκόλλησης ανάμεσα στους κόκκους ή στα πλακίδια αυτού.

Εφ' όσον τα εδάφη δημιουργούνται από φθορά των βράχων, οι κόκκοι του εδάφους θα αποτελούνται από τα πηγαία συστατικά των βράχων ή τα προϊόντα αυτών ύστερα από χημικές διεργασίες. Αν ο βράχος είναι αλλοιωμένος μόνο μηχανικά από την κίνηση πάγου, νερού, αέρα, συνεχείς θερμοκρασιακές μεταβολές (δηλαδή μηχανική αποσάθρωση) τα προϊόντα της αλλοίωσης αυτής θα έχουν την ίδια σύσταση με το βράχο, ενώ το μέγεθος, σχήμα και η υφή τους θα εξαρτώνται πρωτίστως από το ιστορικό αποσάθρωσης, μεταφοράς και απόθεσης. Αυτά είναι τα λεγόμενα χονδρόκοκκα εδάφη με κόκκους μεγαλύτερους από 0.06mm (χάλικες και άμμοι). Όταν όμως συμβαίνουν χημικές αλλαγές όπως οξείδωση, ενανθράκωση, αναγωγή (δηλαδή χημική αποσάθρωση), τα πηγαία συστατικά του βράχου αλλάζουν σε

συστατικά αργιλικά, τα πιο συνηθισμένα από τα οποία είναι αυτά του καολινίτη του ιλλίτη και του μοντμοριλλονίτη. Αυτά είναι τα λεγόμενα λεπτόκοκκα εδάφη και πιο συγκεκριμένα οι ιλεις με κόκκους από 0.06mm μέχρι 0.002mm και οι άργιλοι με κόκκους μικρότερους από 0.002mm.

Τα χονδρόκοκκα εδάφη ονομάζονται και μη συνεκτικά καθώς δε παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους. Τα λεπτόκοκκα εδάφη ονομάζονται και συνεκτικά, λόγω της συνοχής που παρουσιάζουν μεταξύ των σωματιδίων τους, που οφείλεται στις ηλεκτρικές έλξεις μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων. Τα πλακίδια έλκονται και συγκολλούνται μέσω των ισχυρών ηλεκτρικών δυνάμεων.



Σχήμα 2.1.1 : Τυπική διάταξη κόκκων άμμου και πλακιδίων αργίλου

Τα ακριβή προϊόντα της χημικής αποσάθρωσης εξαρτώνται περισσότερο από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και την κατάσταση στράγγισης υδάτων παρά από τη σύσταση του πηγαίου βράχου. Από τη σκοπιά του μηχανικού, η παρουσία σχετικά μικρών ποσοτήτων αργιλικών υλικών σε κάποιο εδαφικό σχηματισμό μπορεί να έχει ουσιαστική επιρροή στη μηχανική συμπεριφορά αυτού.

Οι μηχανικοί ενδιαφέρονται περισσότερο για τη μηχανική συμπεριφορά εδαφικών μαζών παρά για τις μικροσκοπικές ιδιότητες των επιμέρους σωματιδίων, γι' αυτό και η χημική σύσταση των επιμέρους σωματιδίων δεν αναλύεται περαιτέρω. Ωστόσο εξετάζεται το εύρος και η ποικιλομορφία αυτών καθώς και η επιρροή των επιφανειακών δυνάμεων μεταξύ τους, όσον αφορά στη συμπεριφορά των εδαφικών μαζών.

Το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων του εδάφους είναι πολύ μεγάλο. Τα διάφορα συστήματα κατάταξης που υπάρχουν είναι παρόμοια και το επικρατέστερο είναι το σύστημα που έχει προταθεί από το Massachusetts Institute of Technology και έχει υιοθετηθεί παγκοσμίως φαίνεται στον πίνακα 2.1.1. Γενικότερα τα σωματίδια της άμμου φαίνονται με γυμνό μάτι, τα σωματίδια της ιλύος είναι διακριτά μέσω οπτικού μικροσκοπίου, ενώ τα σωματίδια της αργίλου είναι διακριτά μόνο μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

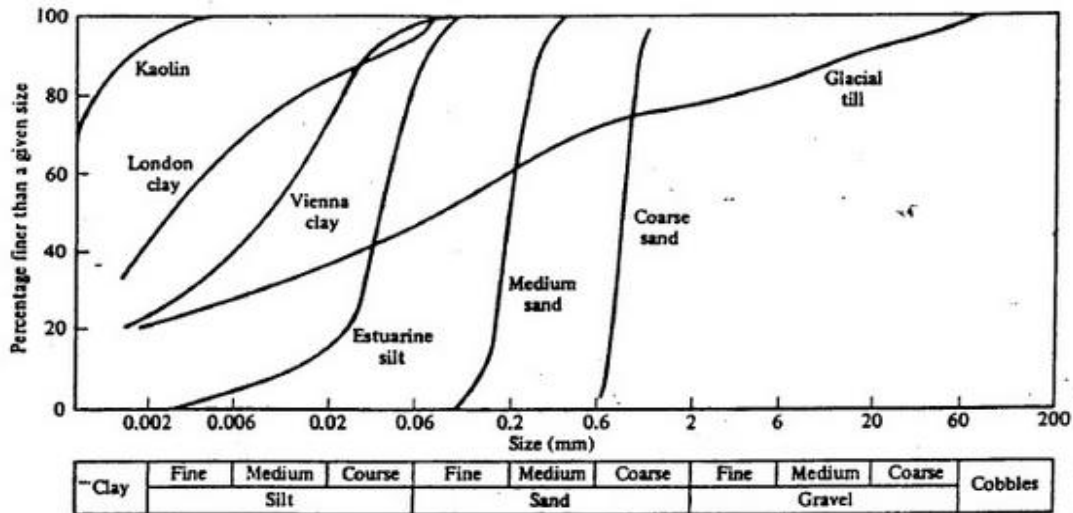
Description	Diameter (mm)
Cobbles	> 60
Gravel	
Coarse	60 - 20
Medium	20 - 6
Fine	6 - 2
Sand	
Coarse	2 - 0.6
Medium	0.6 - 0.2
Fine	0.2 - 0.06
Silt	
Coarse	0.06 - 0.02
Medium	0.02 - 0.006
Fine	0.006 - 0.002
Clay	< 0.002

Πίνακας 2.1.1 : Πίνακας κατάταξης εδαφικών σωματιδίων.

Το σχήμα των σωματιδίων διαφέρει σημαντικά. Τα αργιλικά σωματίδια είναι πολύ λεπτά πλακίδια, ενώ αυτά της άμμου ή της ιλύος είναι πιο στρογγυλού σχήματος.

Οι όροι ‘άμμος’, ‘άργιλος’ και ‘ιλύς’ χρησιμοποιούνται για να περιγράψουμε τύπους σωματιδίων. Όμως, ένα έδαφος που περιγράφεται σαν άμμος μπορεί να περιέχει περιορισμένες ποσότητες των άλλων σωματιδίων. Η κατανομή των μεγεθών αυτών είναι σχηματικά απεικονισμένη ως μία βαθμονομημένη καμπύλη σε ένα διάγραμμα μεγεθών κόκκων, η λεγόμενη κοκκομετρική καμπύλη. Το σχήμα αυτής έχει συνήθως το σχήμα S, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.1.1 στο οποίο παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες κάποιων τυπικών εδαφών. Αν η καμπύλη είναι σχετικά οριζόντια τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται καλώς διαβαθμισμένο, ενώ εάν είναι σχετικά κατακόρυφη, τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται κακώς διαβαθμισμένο. Η διαβάθμιση των κόκκων ενός εδάφους συνήθως δίνει κάποια πληροφορία για την προέλευσή του.

Εδάφη αποτεθειμένα από ποταμούς ή από αέρα είναι κακώς διαβαθμισμένα, ενώ εδάφη αποτεθειμένα από πάγο τείνουν να είναι καλώς διαβαθμισμένα με ευρεία κατανομή μεγεθών κόκκων, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (boulder clays και glacial tills).



Διάγραμμα 2.1.1 : Κοκκομετρικές καμπύλες τυπικών εδαφών.

2.2 Αναζυμωμένα υλικά

Τα εδαφικά υλικά πέρα από τις επίκτητες ιδιότητες δηλαδή εκείνες που αποκτούνται με τη γεωλογική ιστορία του υλικού με βάση τα παραπάνω, έχουν κάποιες ιδιότητες που διατηρούν ανεξάρτητα της κατάστασης στην οποία βρίσκονται. Οι ιδιότητες αυτές ονομάζονται εγγενείς και χαρακτηρίζουν τα υλικά τα οποία έχουν χάσει τη δομή τους, όπως τα αναζυμωμένα υλικά.

Τα στοιχεία που αφορούν τη συμπιεστότητα και τη διατμητική αντοχή των αναζυμωμένων υλικών δίνουν ένα χρήσιμο πλαίσιο αναφοράς (συνήθως ένα κατώτατο όριο) για τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των αντίστοιχων φυσικών υλικών και την επίδραση που έχει η δομή του εδαφικού σκελετού τους.

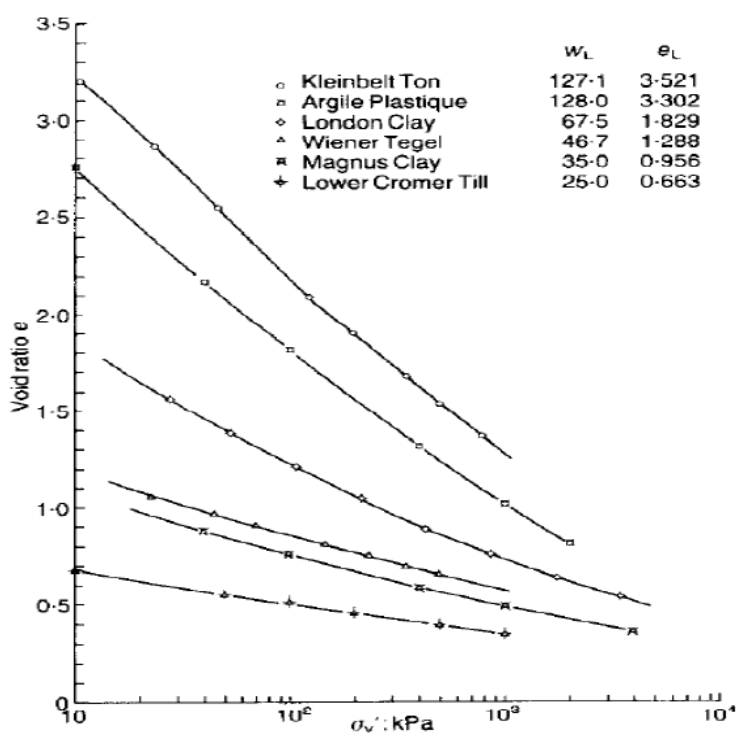
Σύμφωνα με το Burland (1990) αναζυμωμένη άργιλος είναι εκείνη η άργιλος η οποία έχει πλήρως αναμειχθεί με νερό σε ποσοστό υγρασίας μεταξύ w_L και $1.5 * w_L$, κατά προτίμηση $1.25 * w_L$, όπου w_L είναι το όριο υδαρότητας. Οι εγγενείς ιδιότητες, δηλαδή οι βασικές εσωτερικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το υλικό ανεξάρτητα της φυσικής του κατάστασης και της ιστορίας φόρτισής του, ονομάζονται έτσι διότι απορρέουν από μία τυποποιημένη διαδικασία αναζύμωσης κατά την οποία καταστρέφονται οι δεσμοί μεταξύ των κόκκων. Οι εγγενείς ιδιότητες χωρίζονται στις σταθερές της εγγενούς συμπιεστότητας (intrinsic compressibility), οι οποίες ορίζουν τις εγγενείς καμπύλες συμπίεσης/στερεοποίησης (intrinsic compression curves, ICC) και στις σταθερές κρίσιμης κατάστασης αστοχίας (critical state failure), οι οποίες ορίζουν την περιβάλλουσα κρίσιμης κατάστασης υπό διατμητική φόρτιση (critical

state envelope, CSE). Τα εγγενή χαρακτηριστικά μπορεί να διαφοροποιούνται εντόνως από τα χαρακτηριστικά του υλικού στη φυσική του κατάσταση, έχουν αποδειχθεί όμως ιδιαίτερα χρήσιμα, καθώς παρέχουν ένα σύστημα αναφοράς για τον έλεγχο και την κατανόηση της κατάστασης του επί τόπου υλικού, τη δομή αυτού, καθώς και τα μετρούμενα χαρακτηριστικά αδιατάρακτων δειγμάτων. Σε κάθε περίπτωση τα εγγενή χαρακτηριστικά δε θα πρέπει να συγχέονται με τα χαρακτηριστικά του φυσικού υλικού.

2.3 Συμπιεστότητα και αντοχή αναζυμωμένων υλικών – σύγκριση με τα φυσικά υλικά

2.3.1 Συμπεριφορά στο συμπιεσόμετρο

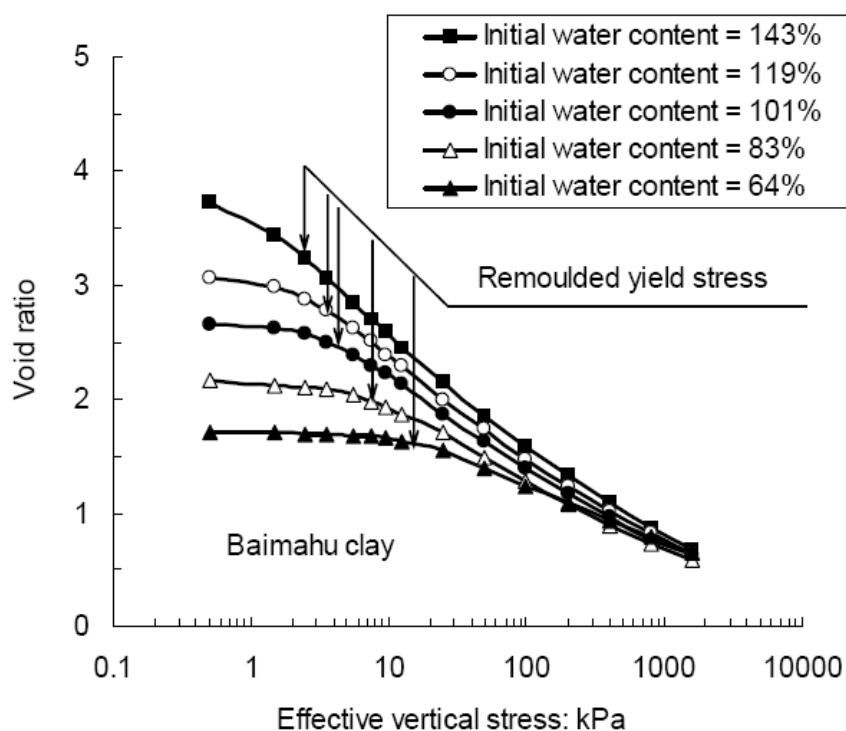
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι καμπύλες στερεοποίησης σε όρους δείκτη πόρων (e) και λογαρίθμου της ενεργού κατακόρυφης τάσης ($\log \sigma'_v$), για αναζυμωμένες αργίλους με διαφορετικά μεταξύ τους όρια υδαρότητας, από σειρά πειραμάτων που παρουσίασε ο Burland (1990).



Διάγραμμα 2.3.1 : Καμπύλες στερεοποίησης αναζυμωμένων αργίλων (Burland 1990).

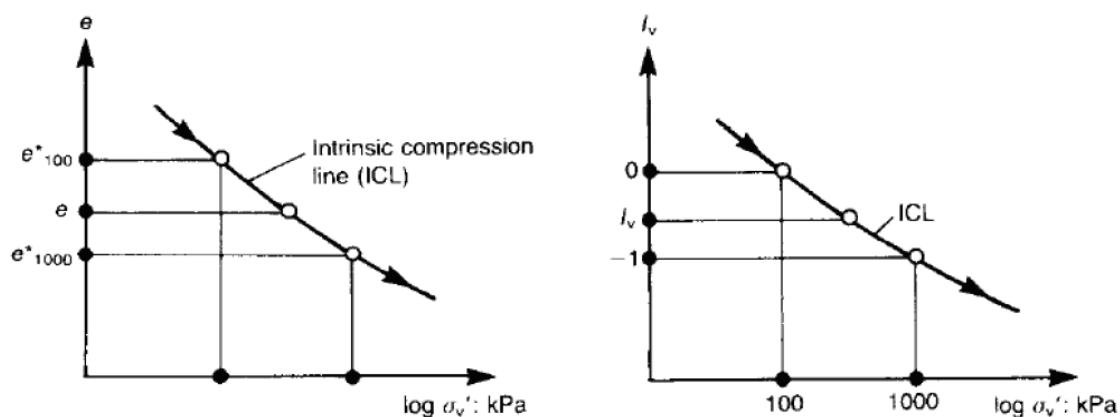
Οι καμπύλες εγγενούς συμπίεστικότητας είναι συνήθως ελαφρά κοίλες, είναι παρόμοιες στο σχήμα και συγκλίνουν προς ένα σημείο. Καθώς κάθε άργιλος έχει διαφορετικά όρια Atterberg και ξεχωριστό δείκτη πόρων οι διαφοροποιήσεις στις καμπύλες είναι αναμενόμενες. Η κύρια διαφοροποίησή τους, αυτή ως προς την αρχική θέση της καμπύλης οφείλεται στα διαφορετικά μεταξύ τους αρχικά ποσοστά υγρασίας.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας στην αρχική θέση της καμπύλης εγγενούς συμπίεστικότητας της ίδια αναζυμωμένης αργίλου, Baimahu clay, σύμφωνα με σειρά πειραμάτων που παρουσίασαν οι Hong et al. (2010).



Διάγραμμα 2.3.2: Καμπύλες στερεοποίησης της αναζυμωμένης αργίλου Baimahu clay για διαφορετικά ποσοστά αρχικής υγρασίας (Hong et al 2010).

Για να εξαλειφθεί το πρόβλημα που δημιουργούν τα διαφορετικά αρχικά ποσοστά υγρασίας, προτείνεται από τον Burland σαν δείκτης κανονικοποίησης ο δείκτης κενών I_v , όπως φαίνεται στο σχήμα:



Διάγραμμα 2.3.3: παράδειγμα χρήσης του δείκτη I_v για την κανονικοποίηση καμπύλης μονοδιάστατης στερεοποίησης αναζυμωμένης αργίλου (Burland 1990).

Ο δείκτης κενών I_v δίνεται από τη σχέση:

$$I_v = (e - e^*_{100}) / (e^*_{100} - e^*_{1000}) = (e - e^*_{100}) / C^*_c$$

Ο αστερίσκος (*) αναφέρεται στις εγγενείς ιδιότητες, δηλαδή στις ιδιότητες του αναζυμωμένου υλικού, ενώ e^*_{100} και e^*_{1000} είναι οι δείκτες πόρων που αντιστοιχούν σε κατακόρυφη ενεργό τάση 100kPa και 1000kPa αντίστοιχα, από την καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού.

Για τα υλικά που βρίσκονται πάνω από τη γραμμή A του χάρτη πλαστικότητας του Casagrande, ο Burland προτείνει κάποιες σχέσεις που συνδέουν το e^*_{100} και το C^*_c με το e^*_L , δηλαδή το δείκτη πόρων που αντιστοιχεί στο όριο υδαρότητας (LL):

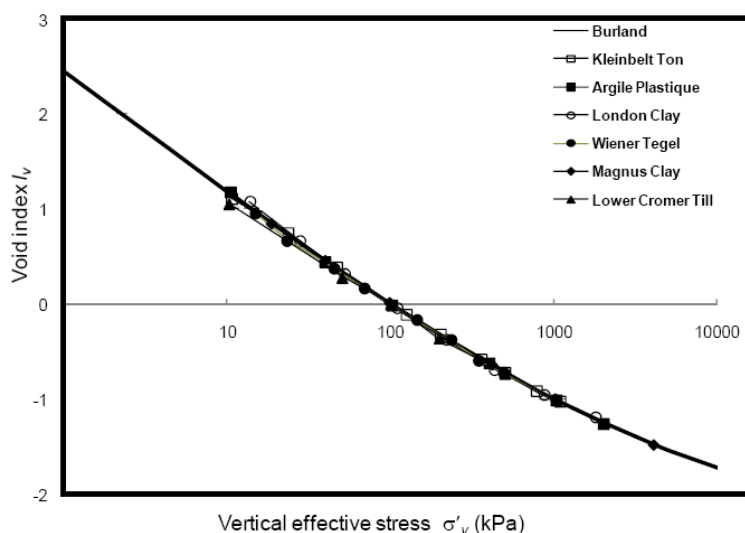
$$e^*_{100} = 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3$$

$$C^*_c = 0.256e_L - 0.04$$

Είναι προτιμότερο βέβαια, αν υπάρχει δυνατότητα, οι δείκτες αυτοί να υπολογίζονται απευθείας από πειραματικά δεδομένα, ξεχωριστά από τις παραπάνω εξισώσεις.

Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος $e - \log \sigma'_v$ επομένως, εάν αντικαταστήσουμε το δείκτη πόρων e με το δείκτη κενών I_v , οι καμπύλες συμπίεσης διάφορων αναζυμωμένων αργίλων, όπως αυτές του διαγράμματος 2.3.1, σχεδόν ταυτίζονται και δίνουν μία μοναδική καμπύλη που ονομάζεται εγγενής καμπύλη

συμπίεστικότητας (intrinsic compression line, ICL). Ένα τέτοιο κανονικοποιημένο διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω, όπου οι καμπύλες συμπίεσης επτά αναζυμωμένων αργίλων με διαφορετικά αναμεταξύ τους αρχικά ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας και δείκτη πόρων, σχηματίζουν μία μοναδική καμπύλη όταν σχεδιαστούν σε όρους δείκτη κενών I_v και κατακόρυφης ενεργού τάσης ($\log \sigma'_v$).

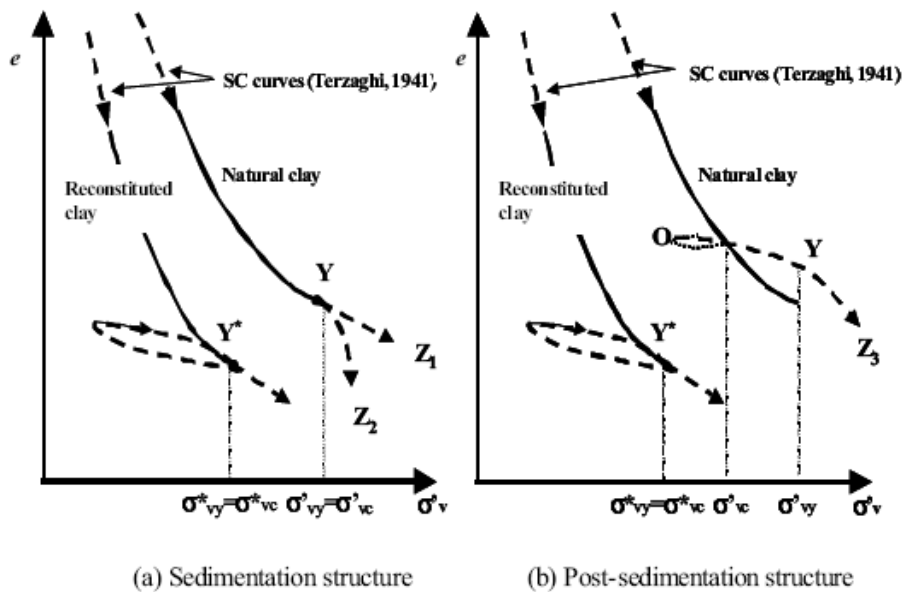


Διάγραμμα 2.3.4: Η εξίσωση του Burland και αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα (Burland 1990).

Ο Burland προτείνει για την περιγραφή αυτής της ευθείας την παρακάτω εξίσωση:

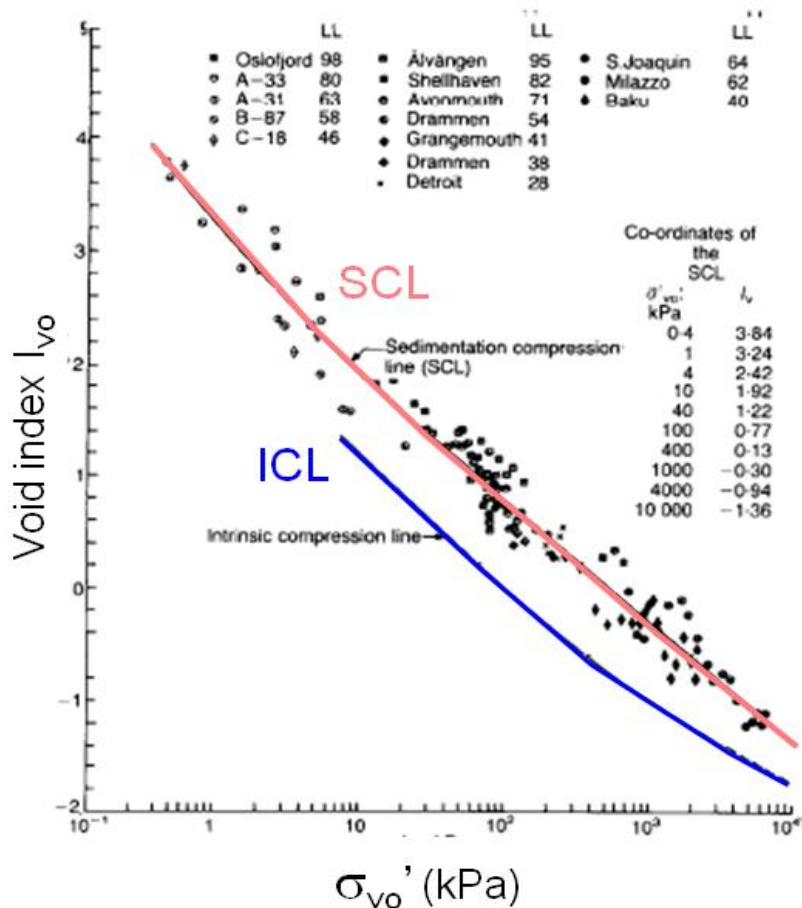
$$I_v = 2.45 - 1.285 \log \sigma'_v + 0.015 \log \sigma'_v{}^3$$

Στα φυσικά υλικά που έχουν αποκτήσει δομή, είτε κατά την ιζηματογένεση, είτε λόγω της ιστορίας φόρτισης, είναι γνωστό ότι η καμπύλη συμπίεσης βρίσκεται συνήθως δεξιά από την καμπύλη εγγενούς συμπίεστικότητας του αντίστοιχου αναζυμωμένου υλικού, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.3.5: Τυπικές καμπύλες στερεοποίησης για (α) αργίλους που απέκτησαν δομή κατά την ιζηματογένεση, (β) αργίλους που απέκτησαν δομή μετά την ιζηματογένεση (Cotecchia & Chandler 1997).

Επομένως, για δεδομένο δείκτη πόρων e , το φυσικό υλικό μπορεί να αναλάβει μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση από το αντίστοιχο αναζυμωμένο. Αυτό είναι αναμενόμενο και οφείλεται στην ύπαρξη δεσμών και στη δομή του εδαφικού σκελετού στα φυσικά υλικά, πράγμα που απουσιάζει από τα αναζυμωμένα υλικά. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η ICL (intrinsic compression line) καθώς και τα αποτελέσματα από τη συμπίεση κανονικά στερεοποιημένων αργίλων, τα οποία μπορούν να παρασταθούν σε μία ευθεία, την SCL (sedimentation compression line). Παρατηρείται ότι για συγκεκριμένες περιοχές τάσεων (π.χ. από 10kPa μέχρι 100kPa) η SCL και η ICL είναι σχεδόν παράλληλες.

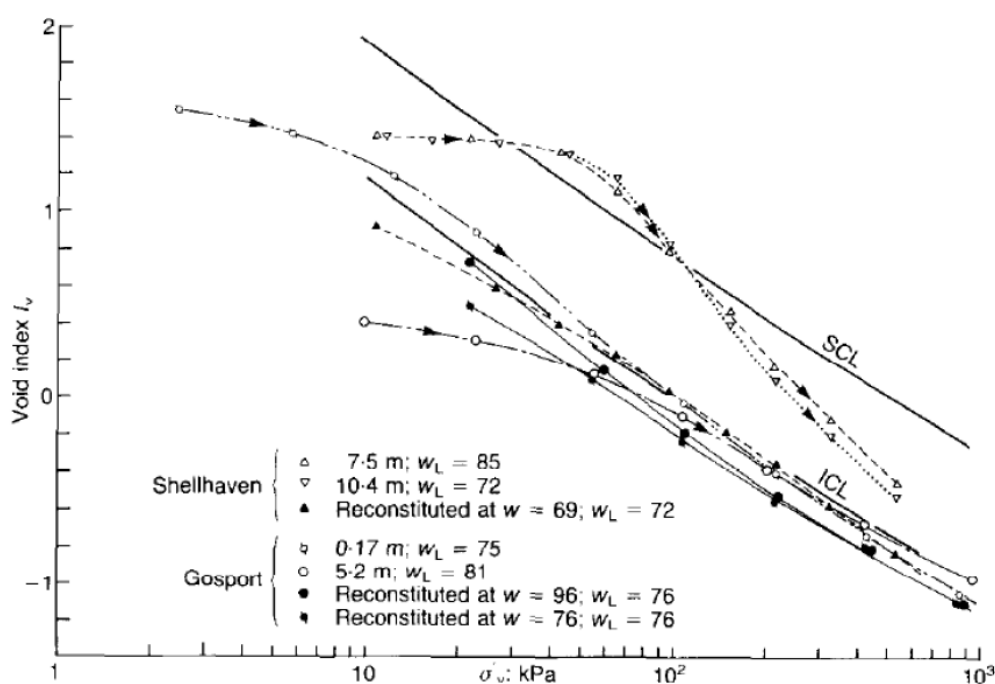


Διάγραμμα 2.3.6: Η ICL (εγγενής καμπύλης συμπίεσης) και η SCL (καμπύλη συμπίεσης από ιζηματογένεση) (Burland 1990).

Για μία υπερστερεοποιημένη άργιλο έχει παρατηρηθεί ότι η καμπύλη συμπίεσης συνήθως τέμνει την ICL, κατευθύνεται προς την SCL και μετά από συνεχή φόρτιση αλλάζοντας κλίση τείνει προς την ICL. Ο λόγος C_s^* / C_s , όπου C_s και C_s^* είναι οι κλίσεις των κλάδων αποφόρτισης για το φυσικό και το αναζυμωμένο υλικό αντίστοιχα όπως έχει οριστεί από τον Schmertmann (1969) ως swell sensitivity (ευαισθησία σε διόγκωση). C_s^* / C_s πάνω από 2.5 περίπου συνεπάγεται ύπαρξη σημαντικής δομής. Η θέση της SCL σε σχέση με την ICL αντανακλά την ιστορία απόθεσης της αργίλου. Για ένα έδαφος που η κατάστασή του βρίσκεται πάνω από την SCL, ο ρυθμός που δέχεται τις φορτίσεις και τα φορτία στο συμπιεσόμετρο είναι τέτοια, που μπορούν να αλλάξουν τη δομή και τη συγκόλληση μεταξύ των πλακιδίων κι έτσι η καμπύλη συμπίεσης έχει αρχικά πιο απότομη κλίση από την SCL και στη συνέχεια τείνει και αυτή προς την ICL. Αντίθετα, τα υλικά που η κατάστασή τους είναι κοντά στην ICL έχουν ήδη λόγω του τρόπου απόθεσής τους προσανατολισμένη

δομή κι έτσι η δοκιμή του συμπιεσόμετρου δε θα επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη δομή τους.

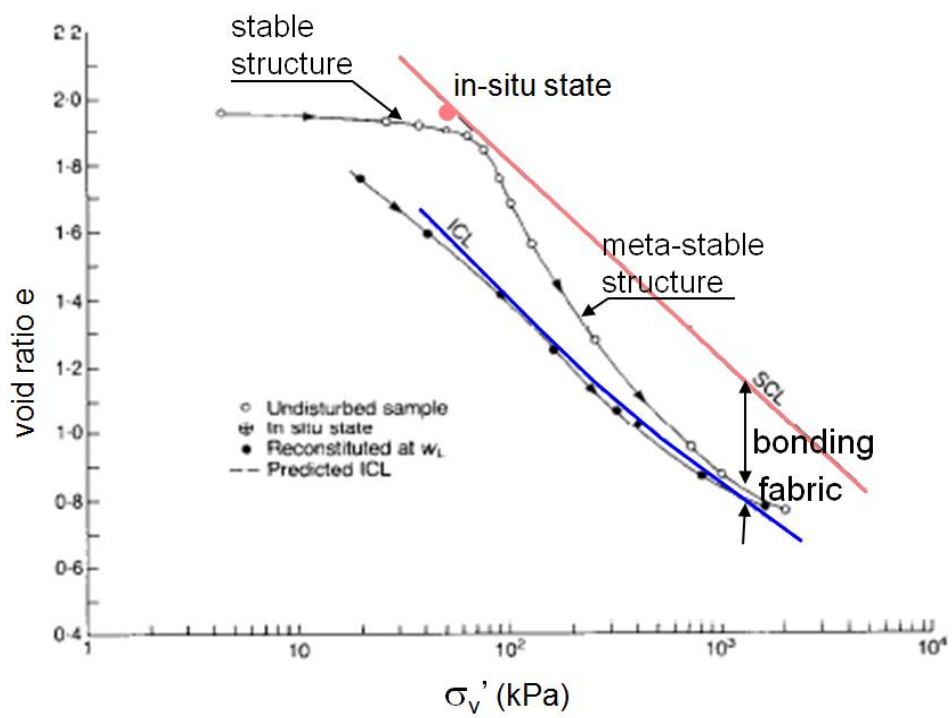
Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της συμπεριφοράς είναι η φυσική άργιλος Shellhaven και Gosport αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.3.7.



Διάγραμμα 2.3.7: Καμπύλες συμπίεσης από δοκιμές συμπιεσομέτρου για τις αργίλους Shellhaven και Gosport σε φυσικά και αναζυμωμένα δοκίμια (Burland 1990).

Στο παρακάτω διάγραμμα $e - \sigma'_v$ φαίνεται η αρχική θέση της αργίλου Bothkennar για δοκίμια από βάθος 6.5m. Κατά την αποφόρτιση κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας η αρχική θέση του δοκιμίου είναι στη θέση A. Στη συνέχεια κατά τη δοκιμή του συμπιεσομέτρου η καμπύλη στερεοποίησης ακολουθεί ένα κλάδο περίπου παράλληλο στον άξονα των τάσεων στον οποίο εμφανίζει σταθερή απόκριση και δομή, έως ότου συναντήσει την καμπύλη SCL όπου ήταν η αρχική θέση, πριν τη δειγματοληψία. Στη συνέχεια εμφανίζει έντονη συμπίεση και αλλαγή δομής κατά τη φόρτιση, με αποτέλεσμα η δομή του σε υψηλές τάσεις (10^3 kPa) στο συμπιεσόμετρο να τείνει σε εκείνη του αναζυμωμένου υλικού. Στην τάση αυτή η μεταβολή του δείκτη πόρων από την SCL στην ICL μπορεί να θεωρηθεί ως ενδεικτική παράμετρος των δεσμών του

φυσικού υλικού που καταστράφηκαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης στο συμπιεσόμετρο.



Διάγραμμα 2.3.8: Καμπύλες συμπίεσης από δοκιμές συμπιεσομέτρου για την άργιλο Bothkennar (Cotecchia & Chandler 1997).

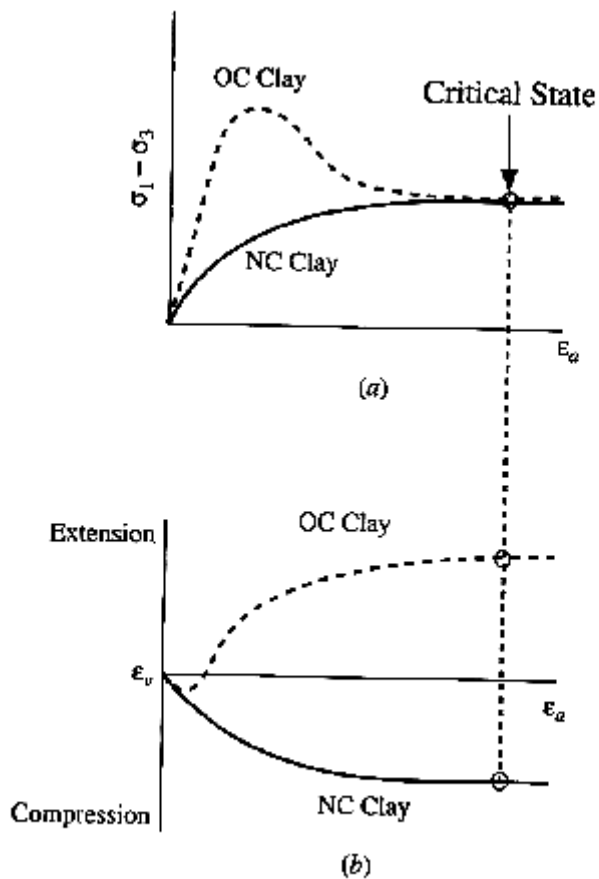
2.3.2 Συμπεριφορά στην τριαξονική δοκιμή

Η τριαξονική δοκιμή είναι μία από τις σημαντικότερες δοκιμές του εργαστηρίου εδαφομηχανικής. Μέσω αυτής παίρνουμε πληροφορίες για τη διατμητική αντοχή των εδαφών, τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε διάφορες αρχικές εντατικές καταστάσεις. Στην τριαξονική συσκευή μπορούν να προσομοιωθούν εντατικές καταστάσεις, στις οποίες οδηγούνται εδαφικά στοιχεία στη φύση ή σε διάφορα τεχνικά έργα (π.χ. επιφάνειες αστοχίας πρανών, τεχνητών επιχωμάτων, μετακινήσεις τοίχων αντιστήριξης κ.τ.λ.).

Η γενίκευση της συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών κατά την τριαξονική δοκιμή, σε άλλες εντατικές καταστάσεις αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έρευνας τα τελευταία χρόνια. Μία από τις πρώτες (και ιδιαίτερα επιτυχημένες) προσπάθειες περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με βάση τη λογική της γενίκευσης της συμπεριφοράς τους κατά την κυλινδρική τριαξονική δοκιμή έγινε από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου του Cambridge τη δεκαετία του 60 (Schofield & Wroth, 1968) και ονομάζεται θεωρία της κρίσιμης κατάστασης (critical state). Επιβεβαίωση και επαλήθευση των παραπάνω έγινε μετά από εκτενή πειραματική έρευνα σε φυσικά και αναζυμωμένα υλικά, από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου Imperial την ίδια δεκαετία (Henkel, 1960).

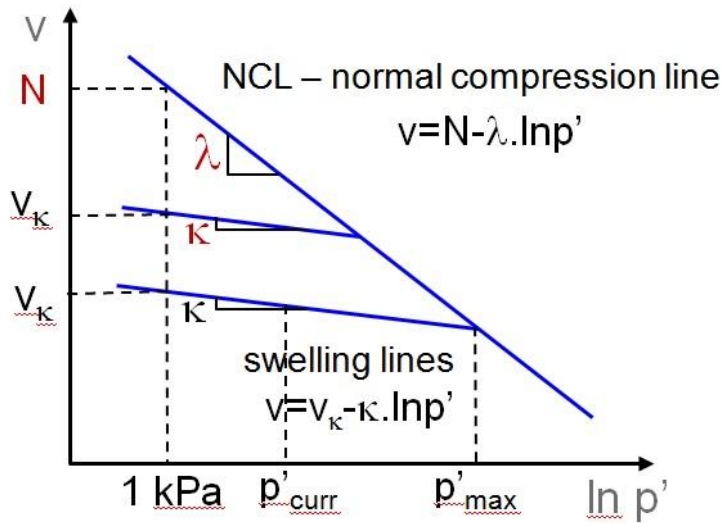
Όταν ένα δοκίμιο υπόκειται σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις κατά τη διάτμηση, από ένα σημείο και μετά τείνει να συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς περαιτέρω αλλαγή της εντατικής του κατάστασης. Η κρίσιμη κατάσταση λοιπόν ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις λαμβάνουν χώρα υπό σταθερές ενεργές τάσεις και σταθερό όγκο, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

Κατά τη διάτμηση, όλα τα υλικά φτάνουν σε κρίσιμη κατάσταση ανεξάρτητα από την αρχική κατάσταση στην οποία βρίσκονται (πεδίο τάσεων, δείκτης πόρων).



Διάγραμμα 2.3.9: Ορισμός της κρίσιμης κατάστασης.

Η θεωρία της κρίσιμης κατάστασης βασίζεται στη συμπεριφορά του δοκιμίου μέσα από ισότροπη συμπίεση η οποία συντελείται στην τριαξονική συσκευή, όπως περιγράφεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Στον άξονα y φαίνεται ο δείκτης κενών $v = 1 + e$ και στον άξονα x ο λογάριθμος της μέσης ενεργού τάσης p' .



Διάγραμμα 2.3.10: Καμπύλη ισότροπης συμπίεσης στην τριαξονική συσκευή.

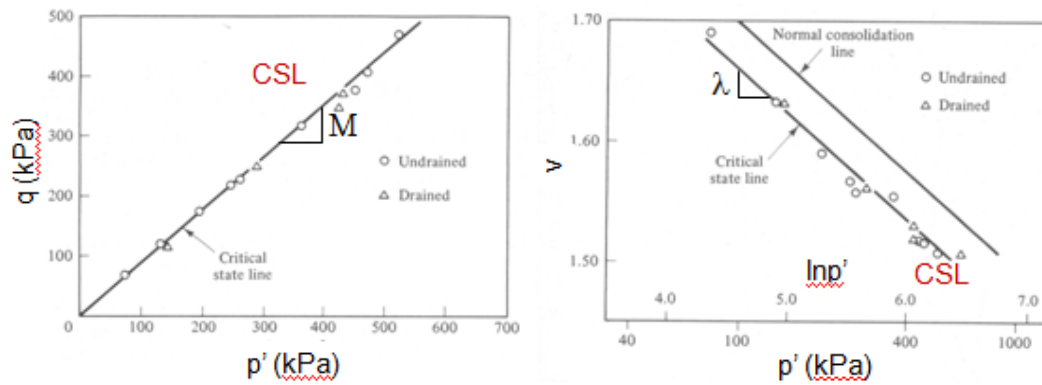
Κατά τη φόρτιση ακολουθείται η καμπύλη συμπίεσης NCL (normal compression line), όπου το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά καθώς γίνεται αναδιάταξη των κόκκων ή πλακιδίων. Ανάλογα με τον κλάδο στον οποίο βρίσκεται το υλικό, χαρακτηρίζεται κανονικά στερεοποιημένο ή υπερστερεοποιημένο πράγμα που θα καθορίσει και τη συμπεριφορά του στη διάτμηση αργότερα. Η εξίσωση που περιγράφει την ισότροπη συμπίεση είναι:

$$v = N - \lambda * \ln p' \quad \text{και} \quad v = N_{\kappa} - \kappa * \ln p'$$

με τα λ , κ , και N να θεωρούνται σταθερές του εδάφους.

Ο λόγος λ / κ κυμαίνεται από 3 για υλικά μικρού PI μέχρι 10 για υλικά μεγάλου PI.

Στην τριαξονική δοκιμή, ανάλογα με τον τύπο της (εμποδιζόμενη ή ελεύθερη στράγγιση), ακολουθούνται διαφορετικές διαδρομές ενεργών τάσεων, όμως στην κρίσιμη κατάσταση η παραμένουσα διατμητική αντοχή καταλήγει στη γραμμή κρίσιμης κατάστασης CSL (critical state line) όπως περιγράφεται στο διάγραμμα 2.3.11.



Διάγραμμα 2.3.11: Συγκέντρωση των τιμών παραμένουσας διατμητικής αντοχής στη CSL για την κανονικά στερεοποιημένη άργιλο Weald clay.

Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν την μορφή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, CSL, βάσει μεγάλου αριθμού πειραματικών δεδομένων σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο Weald clay.

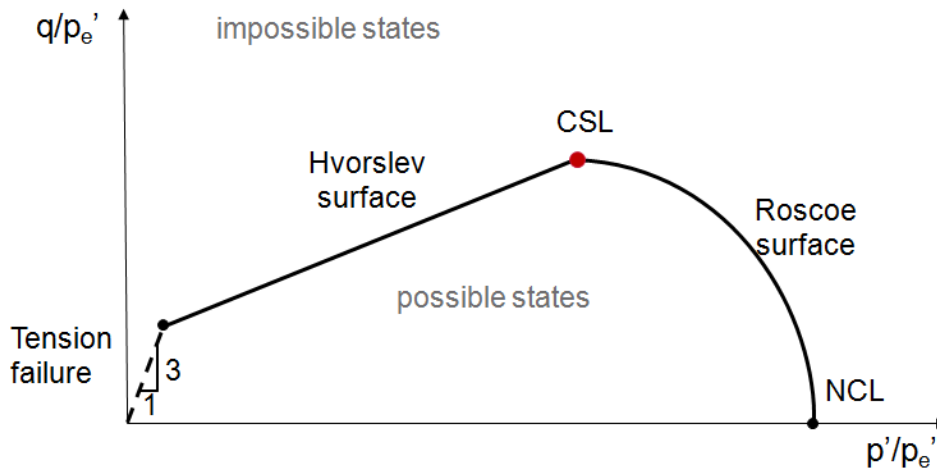
Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη CSL είναι η

$$q = M * p' \quad \text{και} \quad v = \Gamma - \lambda * \ln p'$$

Η CSL είναι παράλληλη με την NCL και βρίσκεται αριστερά αυτής.

Οι συντελεστές λ , Γ , M θεωρούνται σταθερές για το εκάστοτε υλικό, οι οποίες μπορούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά του.

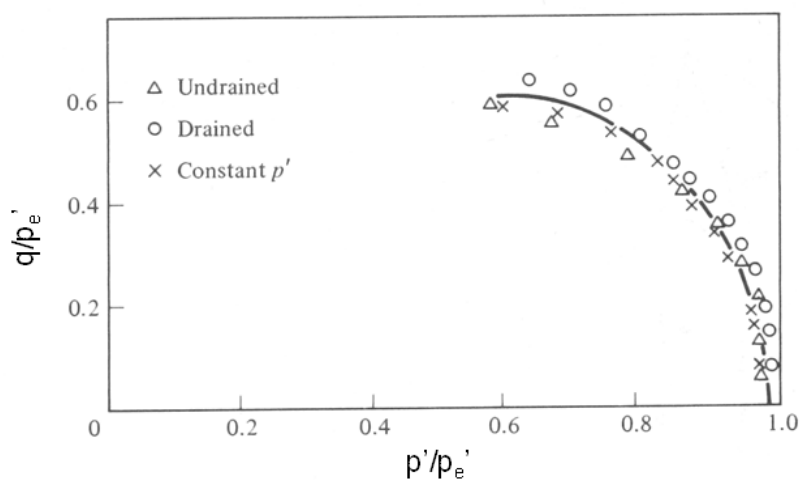
Για να εξαλειφθεί το πρόβλημα που δημιουργείται από τις διαφορετικές αρχικές συνθήκες συμπίεσης ή εντατικού πεδίου στο οποίο βρίσκεται το δοκίμιο πριν τη διάτμηση εισάγεται η παρακάτω ολοκληρωμένη, κανονικοποιημένη περιβάλλουσα πιθανών εδαφικών καταστάσεων.



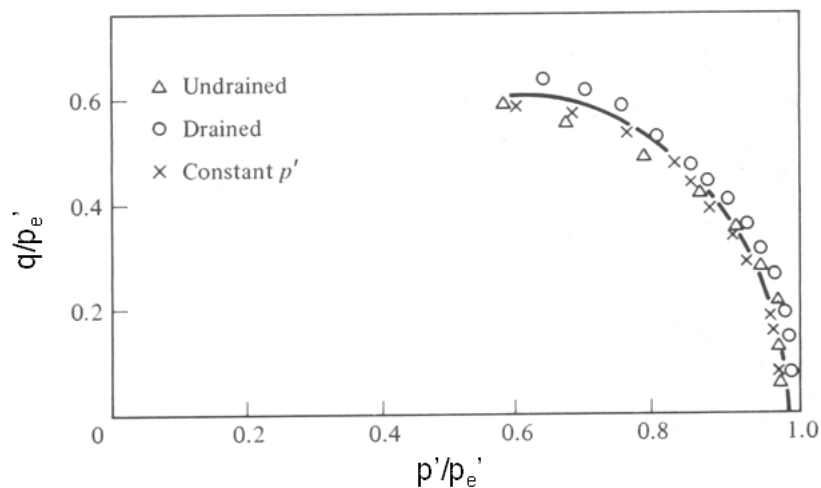
Διάγραμμα 2.3.13: Ολοκληρωμένη, κανονικοποιημένη περιβάλλουσα πιθανών εδαφικών καταστάσεων.

Η κανονικοποίηση γίνεται ως προς την τιμή p'_e η οποία είναι η αντίστοιχη τιμή του p' στην καμπύλη συμπίεσης NCL για τον εκάστοτε όγκο κενών (specific volume) v που είχε στη συγκεκριμένη κατάσταση το δοκίμιο. Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης CSL του προηγούμενου διαγράμματος 2.3.11 μετά την κανονικοποίηση φαίνεται ως το σημείο CSL στο παραπάνω διάγραμμα.

Η επιφάνεια Roscoe αποτελεί τη συγκέντρωση των καμπυλών όλων των κανονικοποιημένων διαδρομών τάσεων μιας κανονικά στερεοποιημένης αναζυμωμένης αργίλου, είτε σε στραγγιζόμενες είτε σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές, οι οποίες καταλήγουν στη CSL. Η Roscoe surface αποτελεί όριο καθώς ελαφρά υπερστερεοποιημένες άργιλοι κινούνται κοντά και αριστερά, ποτέ όμως δεξιά αυτής, καταλήγοντας επίσης στο σημείο CSL όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



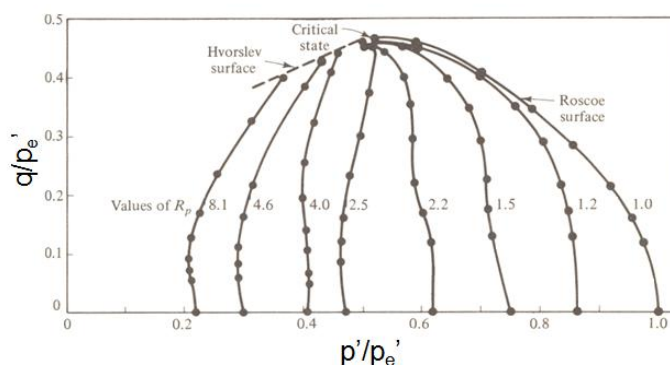
Διάγραμμα 2.3.13: Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων σε κανονικά στερεοποιημένο καολίνη (Balasubramaniam 1969).



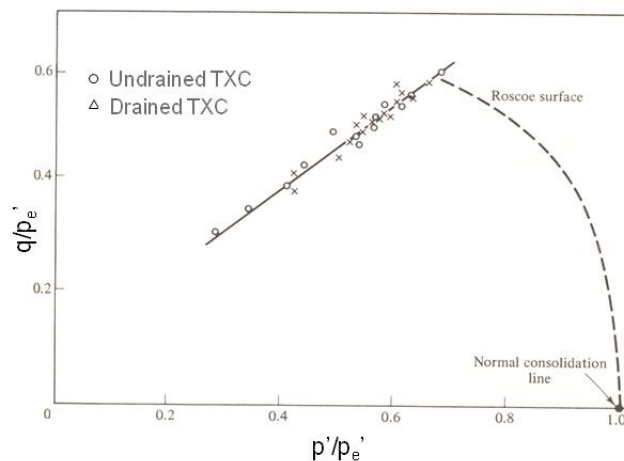
Διάγραμμα 2.3.14: Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων σε ελαφρώς υπερστερεοποιημένα δοκίμια (Loudon, 1967).

Στο διάγραμμα 2.3.13 φαίνονται οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων κανονικά στερεοποιημένων (NC) δοκιμίων καολίνη, ενώ στο διάγραμμα 2.3.14 φαίνονται οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για ελαφρά υπερστερεοποιημένα δοκίμια ($OCR = 1.2 - 2.2$)

Η επιφάνεια Hvorslev (βλ. διάγραμμα 2.3.12) είναι μια περιβάλλουσα αστοχίας που σχηματίζεται από τα υπερστερεοποιημένα δοκίμια για μεγαλύτερους δείκτες OCR. Οι διαδρομές τάσεων των υπερστερεοποιημένων δοκιμίων την τέμνουν, συνεχίζουν μέχρι τη μέγιστη διατμητική αντοχή (peak), και μετά την αστοχία επιστρέφουν και συμπίπτουν με αυτή.



Διάγραμμα 2.3.15: Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων υπερστερεοποιημένων δοκιμίων. Δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης σε καολίνη (Loudon 1967).



Διάγραμμα 2.3.16: Εντατικές καταστάσεις κατά την αστοχία υπερστερεοποιημένων δοκιμίων. Δοκιμές ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης σε άργιλο Weald clay (Parry 1960).

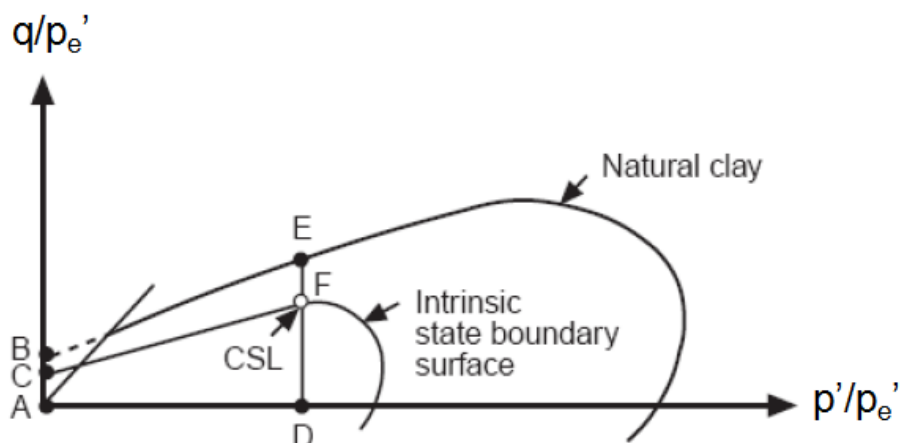
Η περιβάλλουσα αστοχίας του Hvorslev περιγράφεται από την εξίσωση:

$$q/p'_e = \kappa^* + (p'/p'_e)$$

Η κατάσταση των αναζυμωμένων αργιλικών υλικών είναι δυνατόν να βρίσκεται στο εσωτερικό του σχήματος τάδε, με τις επιφάνειες Roscoe και Hvorslev να αποτελούν αυστηρό σύνορο.

Ακολουθώντας όμοια ακριβώς διαδικασία κανονικοποίησης για αντίστοιχους δείκτες πόρων και p'_e , μπορούμε να δημιουργήσουμε την αντίστοιχη ολοκληρωμένη και κανονικοποιημένη περιβάλλουσα αστοχίας για τα φυσικά υλικά.

Οι σύγκριση των περιβαλλουσών για φυσικά και αναζυμωμένα δοκίμια δίνει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την επίδραση που έχει η δομή στη μηχανική συμπεριφορά των φυσικών υλικών.



Διάγραμμα 2.3.17: Σύγκριση περιβαλλουσών για φυσικά και αναζυμωμένα δοκίμια (Burland et al., 1996).

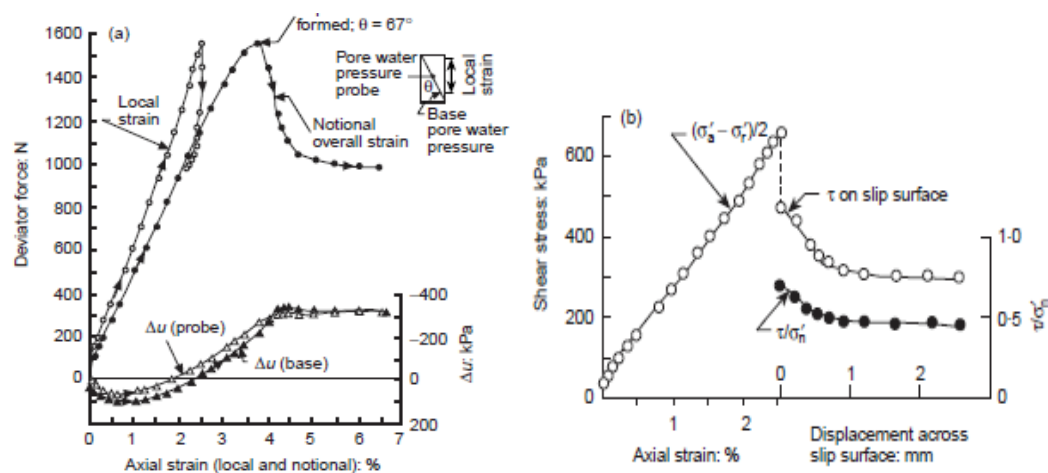
Η επίδραση της δομής στη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού μπορεί να αξιολογηθεί με βάση το λόγο AB / AC (λόγος συνοχής), ή με το λόγο των κανονικοποιημένων αντοχών διάτμησης εδαφικού υλικού DE / DF .

Είναι φανερό ότι η δομή που έχουν τα φυσικά υλικά προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή σε διάτμηση. Ο περισσότερες φυσικές άργιλοι δε φτάνουν την εγγενή καμπύλη κρίσιμης κατάστασης κατά τη διάτμηση στην τριαξονική δοκιμή, χρειάζεται δηλαδή πολύ μεγαλύτερη διάτμηση για να καταστραφεί πλήρως η δομή της αργίλου.

Μετά από πειράματα άμεσης διάτμησης στη άργιλο Todi clay ο Calabresi (1980) διαπίστωσε 2 τρόπους απομείωσης της αντοχής μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής. Η πρώτη και σημαντικότερη συμβαίνει απότομα, ακριβώς μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, για μετακινήσεις μικρότερες του ενός χιλιοστού. Η δεύτερη γίνεται σταδιακά καθώς αυξάνεται η σχετική μετακίνηση τείνοντας προς μία κατάσταση παραμένουσας αντοχής. Η περιβάλλουσα απομειωμένης αντοχής αμέσως μετά τη μέγιστη τάση, βρίσκεται πάνω από την περιβάλλουσα παραμένουσας

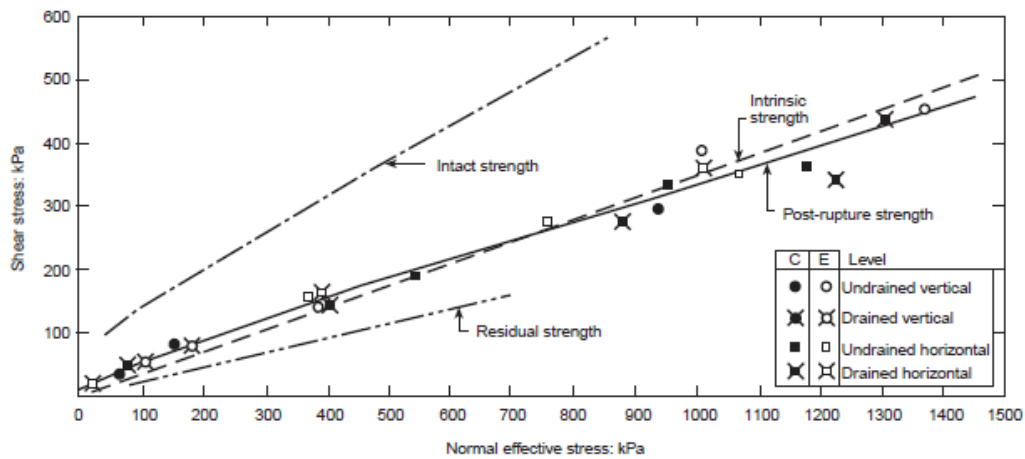
αντοχής. Ο Calabresi διατύπωσε ότι η άμεση απομειωμένη αντοχή είναι αντιπροσωπευτική της αρχικής διατμητικής αντοχής κατά μήκος μίας προσφάτως δημιουργηθείσας ασυνέχειας.

Έπειτα από σειρά τριαξονικών δοκιμών στις αργίλους London και Todi clay ο Burland (1990) σημείωσε ότι τα φυσικά δοκίμια παρουσιάζουν ψαθυρή συμπεριφορά σε μικρές ή μεσαίες τάσεις με τη δημιουργία επιφάνειας αστοχίας κατά την ανάπτυξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής και στη συνέχεια ολίσθηση δύο ξεχωριστών άκαμπτων σωμάτων επί αυτής. Η διατμητική αντοχή της επιφάνειας αυτής πέφτει γρήγορα σε μία σχετικά σταθερή τιμή έπειτα από ολίσθηση για ελάχιστα χιλιοστά όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.3.18. Η τιμή αυτή ονοματίστηκε από το Burland αντοχή μετά τη θραύση (post rupture strength).



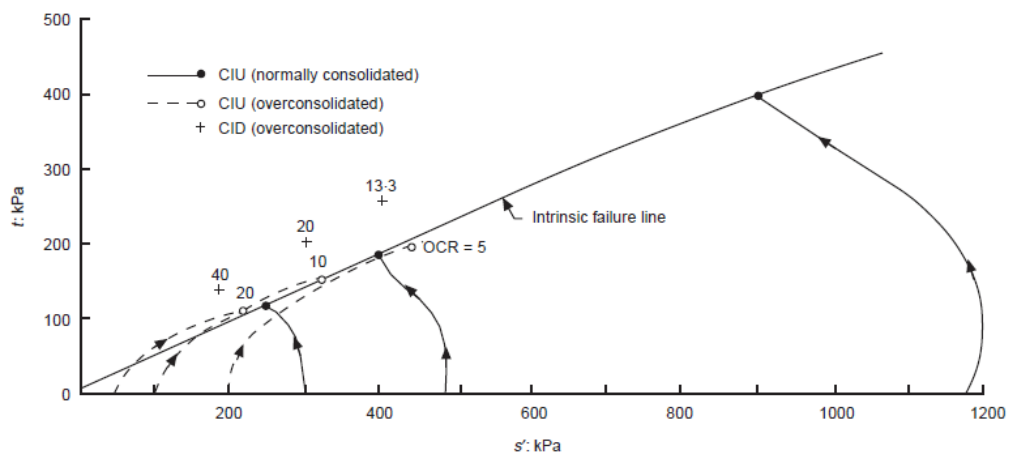
Διάγραμμα 2.3.18: Μέγιστη διατμητική αντοχή και διατμητική αντοχή μετά τη θραύση για φυσικά δείγματα της αργίλου Todi clay.

Η γραμμή που περιγράφει την αντοχή μετά την αστοχία, βρίσκεται κοντά στην εγγενή γραμμή αστοχίας, όπως φαίνεται για την άργιλο London clay στο Ashford Common στο διάγραμμα 2.3.19. Ακόμη, για την ίδια άργιλο διαπιστώθηκε ότι η διατμητική αντοχή δοκιμίων με προϋπάρχουσες επιφάνειες διάτμησης, βρίσκεται κοντά στην περιβάλλουσα αντοχής μετά τη θραύση για τα φυσικά δοκίμια.

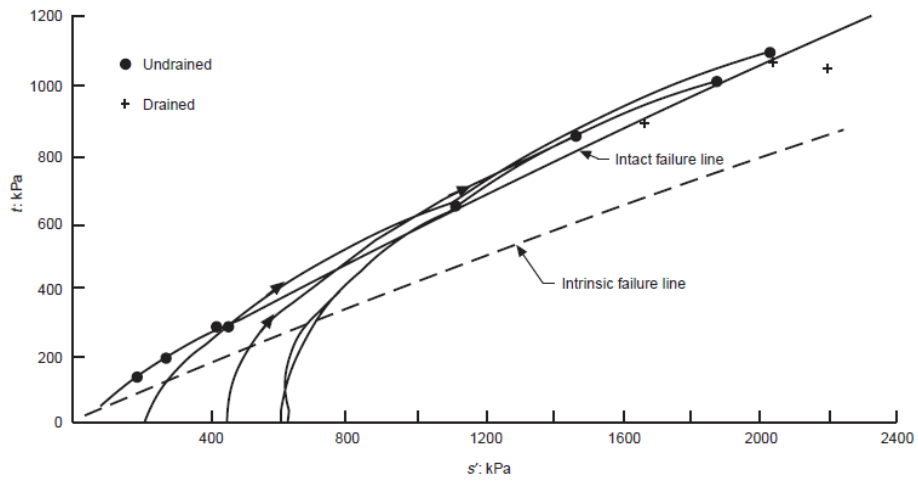


Διάγραμμα 2.3.19: Περιβάλλουσες αστοχία για την άργιλο London clay από το Ashford Common

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε διαγράμματα $t - s'$ για αναζυμωμένα και αδιατάρακτα δοκίμια της τυπικής αργίλου Todi clay.



Διάγραμμα 2.3.20: Διαδρομές τάσεων και μέγιστες διατμητικές αντοχές για αναζυμωμένα δοκίμια της τυπικής αργίλου Todi clay.



Διάγραμμα 2.3.21: Διαδρομές τάσεων και μέγιστες διατμητικές αντοχές για φυσικά δοκίμια της τυπικής αργίλου Todi clay.

3 Το υλικό που μελετήθηκε

3.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου. Το υλικό αυτό αποσπάστηκε από το κανάλι του ισθμού περίπου 1m από το επίπεδο της θάλασσας.

Με τη βοήθεια συρμάτων και κοπτικών μηχανών αποσπάστηκαν τεμάχια φυσικού υλικού, ύψους 40cm και πλάτους 50cm από τα σχεδόν κατακόρυφα πρανή, με προσοχή, ώστε η διατάραξη των δειγμάτων να μειωθεί στο ελάχιστο. Κατευθείαν τα τεμάχια αυτά καλύφθηκαν με μεμβράνες και υγρά καλύμματα για να μη διαταραχθεί η φυσική τους υγρασία, κατόπιν μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Εκεί καλύφθηκαν με κερί και αποθηκεύτηκαν σε χώρο ελεγχόμενης υγρασίας.

Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες σε δείγματα που μελετήθηκαν με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτινών X (X-Ray Diffraction) και με δοκιμές με κυανούν του μεθυλενίου για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων:

ορυκτό	ποσοστό (% επί του συνόλου)
χαλαζίας	16
αλβίτης	3
ασβεστίτης	60
δολομίτης	2
ιλλίτης	7
μοντμοριλλονίτης	7
χλωρίτης	1.5

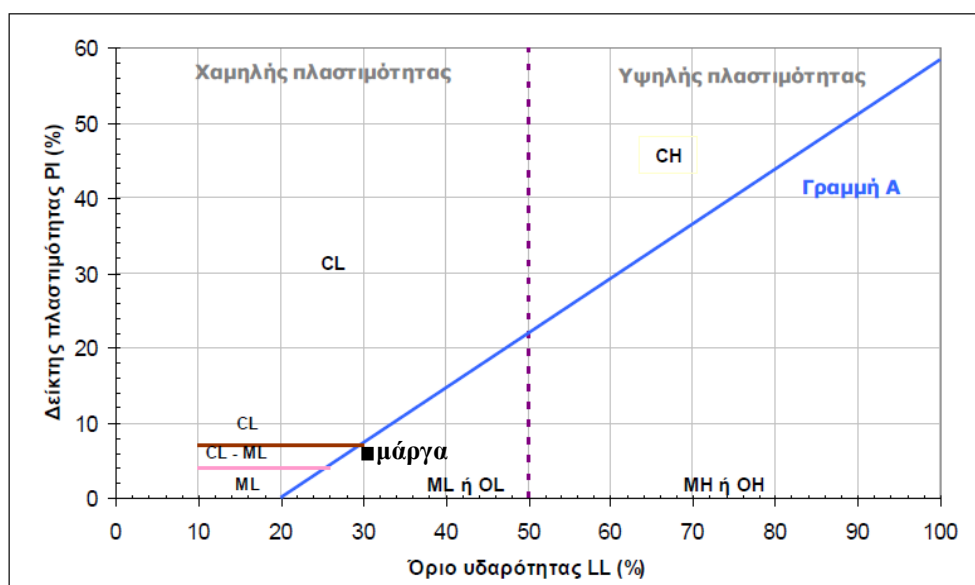
Πίνακας 3.1.1: Κύρια ορυκτά της Μάργας του Ισθμού της Κορίνθου (Μπαρδάνης, Καββαδάς 2006).

Στο εργαστήριο εδαφομηχανικής έγιναν οι απαραίτητες δοκιμές κατάταξης για τον προσδιορισμό το ειδικού βάρους των κόκκων του υλικού (G_s) και των ορίων Atterberg τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Όριο υδαρότητας LL	Όριο πλαστιμότητας PL	Δείκτης πλαστιμότητας PI	Ειδικό βάρος στερεών κόκκων G_s
30%	24%	6%	2.69

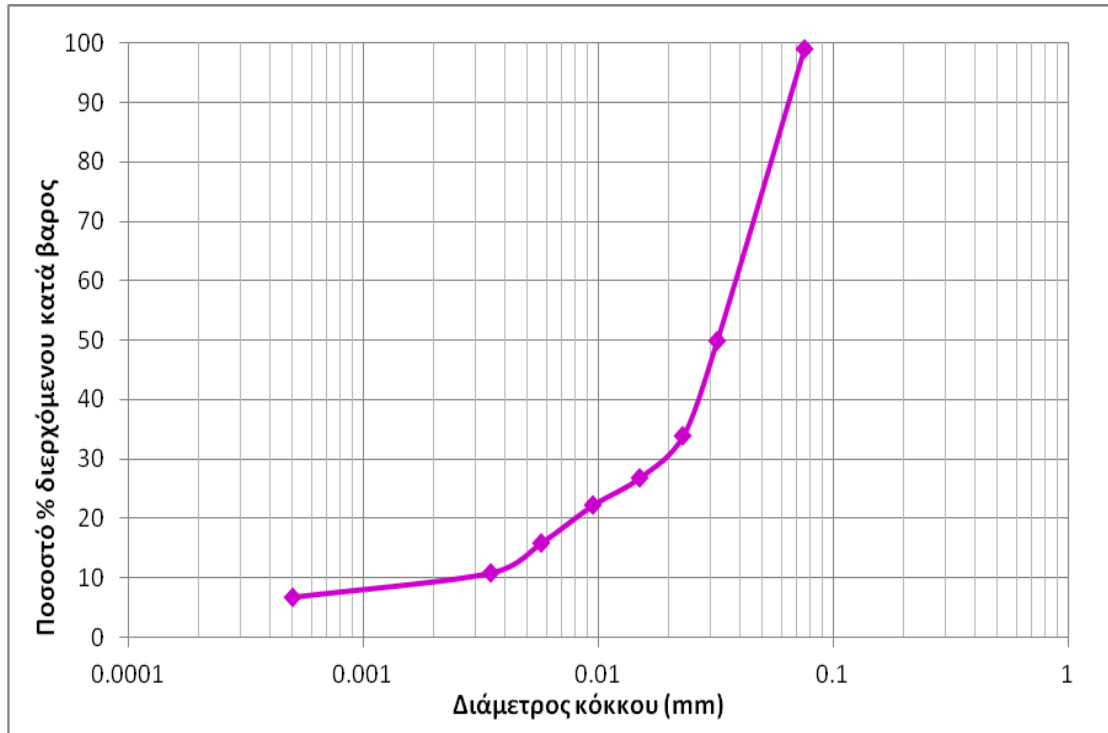
Πίνακας 3.1.2: Όρια Atterberg και ειδικό βάρος κόκκων για τη Μάργα.

Τοποθετώντας το εν λόγω υλικό στο χάρτη πλαστιμότητας του Casagrande βλέπουμε ότι βρίσκεται ελάχιστα χαμηλότερα από τη γραμμή A και χαρακτηρίζεται ως υλικό χαμηλής πλαστιμότητας.



Διάγραμμα 3.1.1: Χάρτης πλαστιμότητας του Casagrande για τη Μάργα.

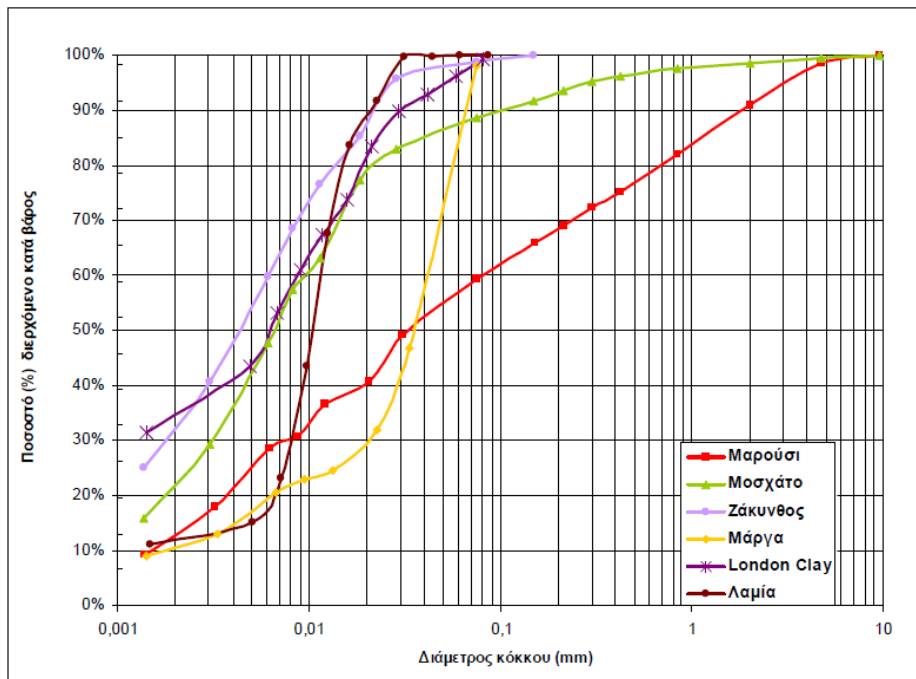
Ύστερα από κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο διαπιστώθηκε η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του φυσικού υλικού, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 3.1.2: Κοκκομετρική καμπύλη για τη Μάργα.

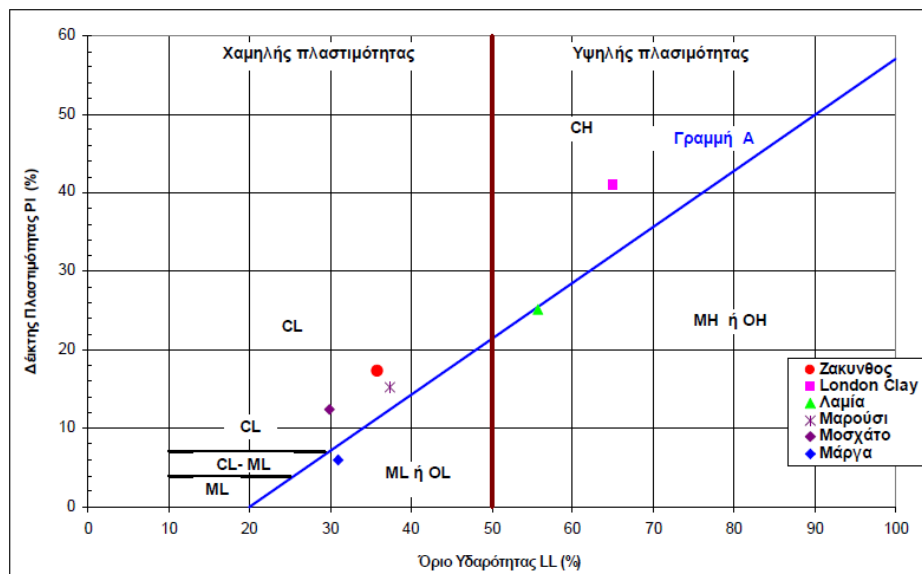
Σύμφωνα λοιπόν με τα διαγράμματα 3.1.1 και 3.1.2, η μάργα του Ισθμού της Κορίνθου χαρακτηρίζεται ως μία ιλύς χαμηλής πλαστιμότητας. Είναι μία καλά διαβαθμισμένη ιλύς με μικρό ποσοστό αργιλικού υλικού (8%).

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται σε ένα κοινό διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης οι κοκκομετρικές καμπύλες διαφόρων τυπικών λεπτόκκοκων υλικών.



Διάγραμμα 3.1.3: Κοκκομετρικές καμπύλες από κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο (πηγή: διπλωματική εργασία Καραγιαννόπουλου, 2011).

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα υλικά του διαγράμματος 3.1.3 στο χάρτη πλαστιμότητας του Casagrande. Στο χάρτη αυτό τα υλικά κατατάσσονται ως προς την πλαστιμότητά τους.



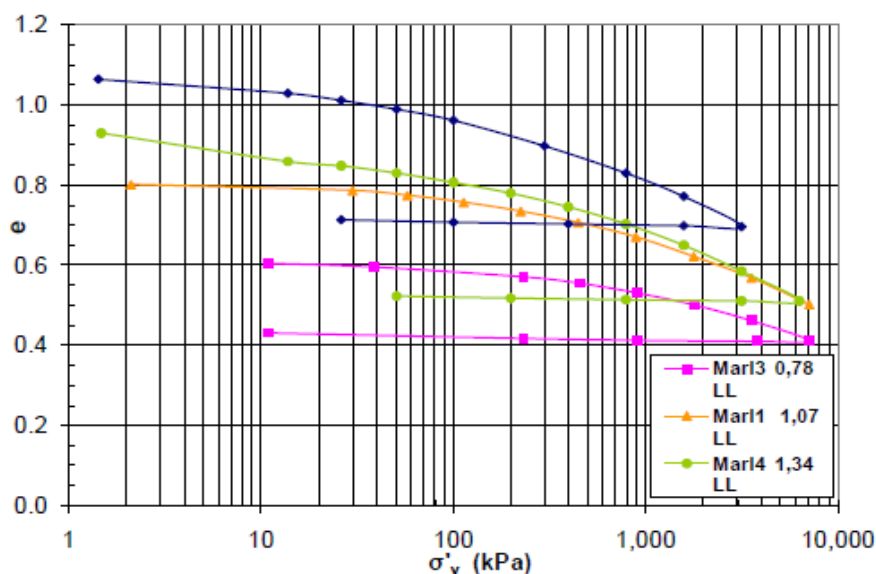
Διάγραμμα 3.1.4: Χάρτης πλαστιμότητας του Casagrande (πηγή: διπλωματική εργασία Καραγιαννόπουλου, 2011).

Παρατηρείται λοιπόν ότι το εδαφικό υλικό από τη Ζάκυνθο, το Μαρούσι και το Μοσχάτο χαρακτηρίζονται ως άργιλοι χαμηλής πλαστιμότητας, ενώ η London clay χαρακτηρίζεται ως άργιλος υψηλής πλαστιμότητας. Το εδαφικό υλικό από τη Λαμία βρίσκεται οριακά κάτω από τη διαχωριστική γραμμή A και μπορεί να χαρακτηριστεί ως αργιλιούς υψηλής πλαστιμότητας. Τέλος η μάργα από τον Ισθμό της Κορίνθου χαρακτηρίζεται όπως πριν, υλός χαμηλής πλαστιμότητας.

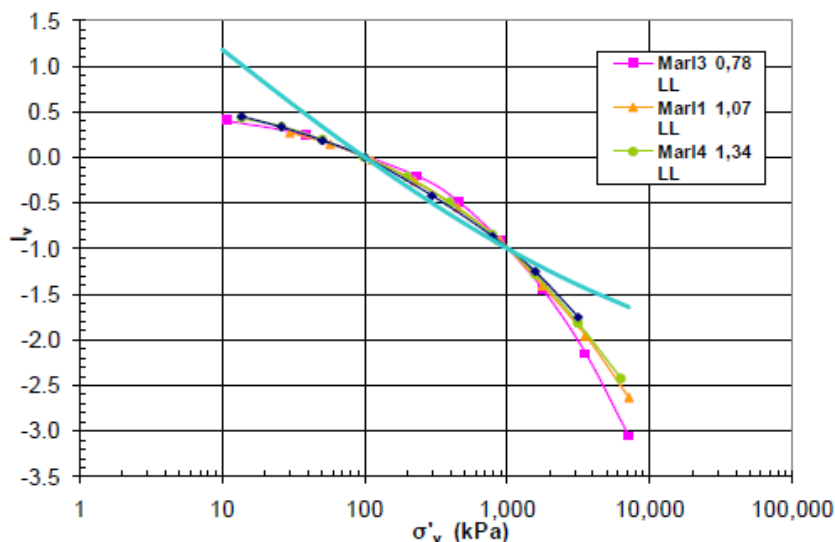
3.2 Παλαιότερες μελέτες πάνω στην μάργα του Ισθμού της Κορίνθου

Η μάργα του Ισθμού της Κορίνθου έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για πολλούς ερευνητές. Αν και το υλικό των μελετών έχει προέλθει από διαφορετικές θέσεις και κατά συνέπεια εμφανίζει διαφορές στην απόκρισή του, μερικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς έχουν παρατηρηθεί σε σχέση με άλλα εδαφικά υλικά της βιβλιογραφίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα διερευνηθούν και στην παρούσα διπλωματική εργασία για μάργα που προήλθε από πρόσφατη δειγματοληψία στον Ισθμό της Κορίνθου.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα μονοαξονικής συμπίεσης αναζυμωμένων δοκιμίων από τη μάργα του Ισθμού της Κορίνθου, όπως παρουσιάστηκαν μετά από εργασία για το πρόγραμμα ενίσχυσης βασικής έρευνας Π.Ε.Β.Ε., 2009. Στο διάγραμμα 3.2.1(α) φαίνεται η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας ανάμιξης στην θέση των καμπυλών στερεοποίησης, ότι είναι παράλληλες μεταξύ τους και δε συγκλίνουν για ορθές τάσεις μέχρι 7 MPa. Στο διάγραμμα 3.2.1(β) οι κανονικοποιημένες ως προς το δείκτη I_v καμπύλες εννοποιούνται σε μία, όμως η μοναδική αυτή καμπύλη δεν ακολουθεί την καμπύλη που περιγράφει τις τυπικές αργίλους κατά το Burland, 1990.



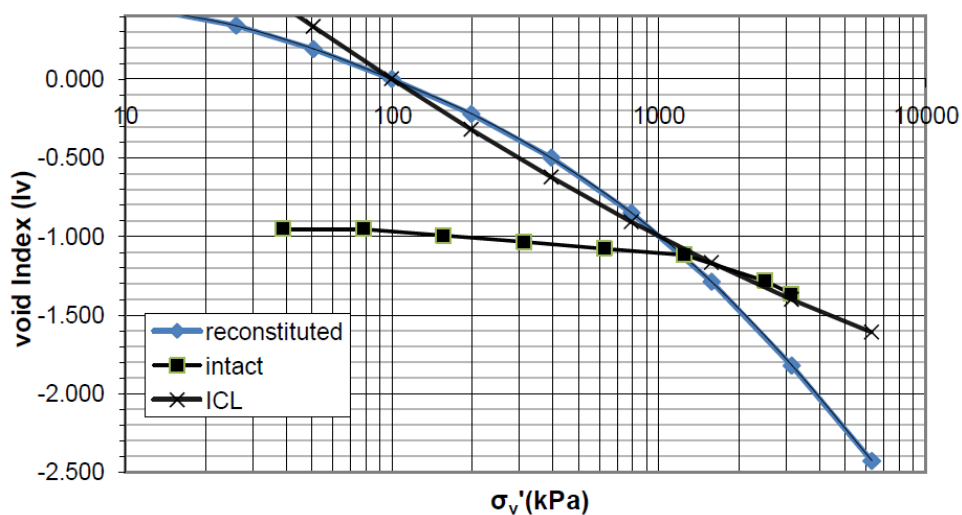
(α)



(β)

Διάγραμμα 3.2.1: (α) Καμπύλες συμπίεσμετρου για αναζυμωμένο υλικό σε αρχικό ποσοστό ανάμιξης 0.78-1.54 φορές το όριο υδαρότητας του φυσικού υλικού, (β) σύγκριση κανονικοποιημένων καμπυλών ως προς το δείκτη I_v με την αντίστοιχη καμπύλη του Burland (1990).

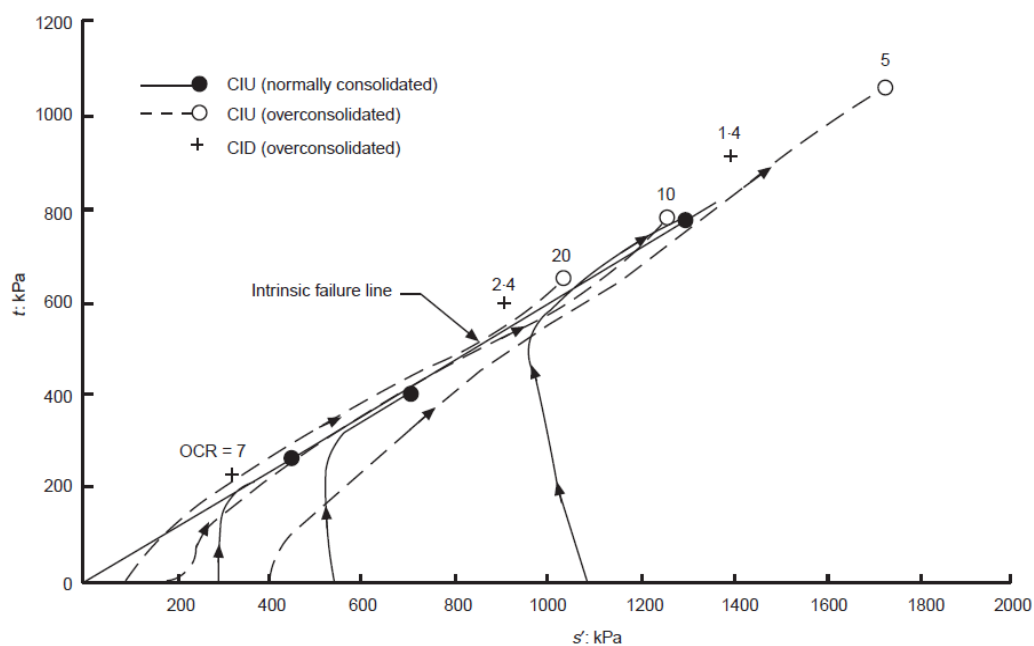
Στο παρακάτω κανονικοποιημένο διάγραμμα συγκρίνονται η καμπύλη στερεοποίησης του φυσικού υλικού, του αναζυμωμένου υλικού και η καμπύλη στερεοποίησης για τυπικές αναζυμωμένες αργίλους του Burland.



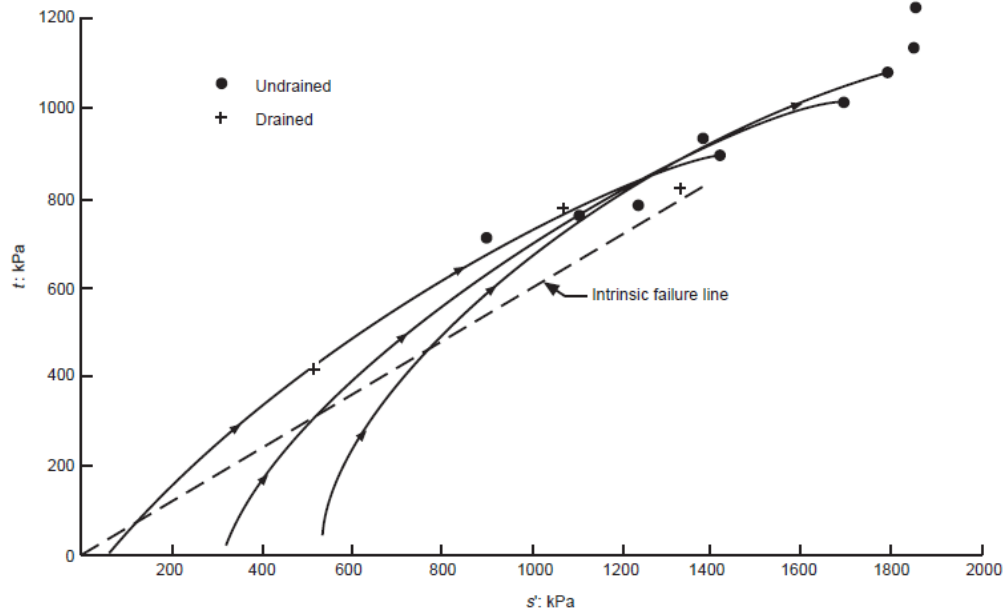
Διάγραμμα 3.2.2: Κανονικοποιημένες καμπύλες στερεοποίησης του φυσικού και αναζυμωμένου υλικού και σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη ICL για τυπικές αναζυμωμένες αργίλους.

Παρατηρείται λοιπόν, ότι η καμπύλη του φυσικού υλικού συναντά την καμπύλη του αναζυμωμένου υλικού σε μεγάλες τάσεις και περνά στα δεξιά της, όπου για τον ίδιο δείκτη κενών το φυσικό υλικό μεταφέρει μεγαλύτερη κατακόρυφη ενεργό τάση. Η προς τα δεξιά μετακίνηση αυτή είναι περιορισμένη και απ' ότι φαίνεται δεν ξεπερνά την καμπύλη ICL που αντιπροσωπεύει μεγάλο αριθμό αργίλων.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε διαγράμματα $t - s'$ για αναζυμωμένα και αδιατάρακτα δοκίμια της μάργας του Ισθμού της Κορίνθου, από παλαιότερη δημοσίευση Burland et al (1996).



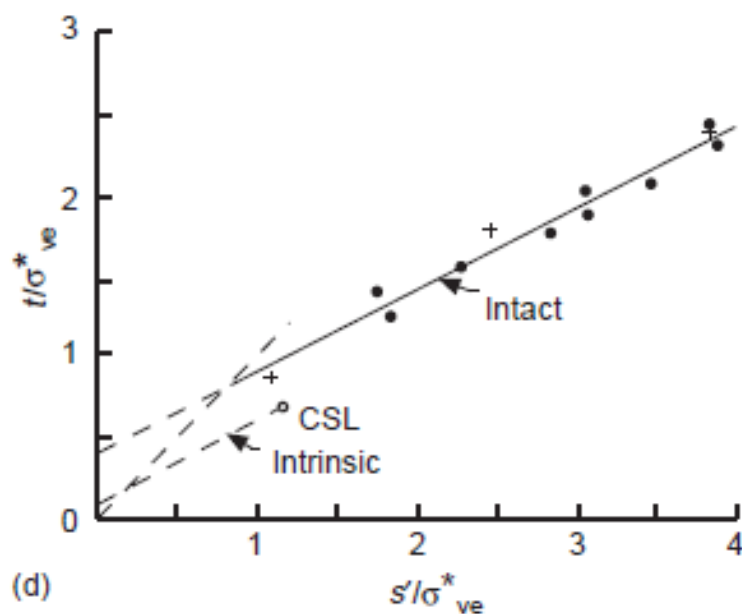
Διάγραμμα 3.2.3: Αναζυμωμένα δοκίμια μάργας Κορίνθου, μέγιστες διατμητικές αντοχές και διαδρομές τάσεων.



Διάγραμμα 3.2.4: Φυσικά δοκίμια μάργας Κορίνθου, μέγιστες διατμητικές αντοχές και διαδρομές τάσεων.

Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά της Μάργας στα παραπάνω διαγράμματα με τα αντίστοιχα της τυπικής αργίλου Todì clay 2.3.20 και 2.3.21 που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρούμε διαφορές στις διαδρομές τάσεων, κυρίως όσον αφορά στα αναζυμωμένα δοκίμια, πράγμα αναμενόμενο καθώς στη Μάργα το ποσοστό αργιλικών είναι μικρό σε σχέση με την ιλύ και τη λεπτόκοκκη άμμο που επικρατούν.

Στο παρακάτω σχήμα έγινε κανονικοποίηση των τιμών t και σ' κατά την αστοχία ως προς την τάση σ_{ve}^* , δηλαδή την ορθή τάση στην καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού η οποία αντιστοιχεί στο δείκτη πόρων κατά την αστοχία.



Διάγραμμα 3.2.5: Σύγκριση των περιβαλλουσών Hvorslev για φυσικά και αναζυμωμένα δοκίμια (Burland et al., 1996).

Μετά την κανονικοποίηση, γίνεται σύγκριση με το αναζυμωμένο υλικό. Παρατηρείται ότι το φυσικό υλικό έχει μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το αναζυμωμένο και η καμπύλη του φυσικού βρίσκεται υψηλότερα από αυτή των αναζυμωμένων. Έτσι γίνεται προφανής η δομή που έχει αναπτύξει η μάργα, πράγμα που είναι και χαρακτηριστικό της. Η σύγκριση των εγγενών χαρακτηριστικών με εκείνα του φυσικού υλικού δίνουν πληροφορίες για τη δομή και τους δεσμούς αυτής.

4 Εργαστηριακές δοκιμές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν περαιτέρω εργαστηριακές δοκιμές, για να διερευνηθεί η συμπεριφορά της μάργας του Ισθμού της Κορίνθου τόσο στην αναζυμωμένη όσο και στη φυσική της κατάσταση.

4.1 Δοκιμές συμπιεσόμετρου

Η δοκιμή του συμπιεσόμετρου αποτελεί μία απ' τις πιο συνηθισμένες δοκιμές στα εργαστήρια εδαφομηχανικής λόγω των εκτεταμένων πρακτικών εφαρμογών της και της εκτέλεσής της με σχετικά απλές διαδικασίες. Η δοκιμή αυτή προσομοιώνει την κατάσταση ενός εδαφικού υλικού υπό συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, δηλαδή την επιβολή ορθής παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών παραμορφώσεων στους οριζόντιους άξονες, καθώς και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων, δηλαδή:

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

Η μονοδιάστατη παραμόρφωση συναντάται στη φύση κατά την ιζηματογένεση κατά την οποία αποτίθενται στρώσεις μεγάλης έκτασης που συμπιέζουν τις υποκείμενες στην κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ ταυτόχρονα λόγω την μεγάλης τους έκτασης παρεμποδίζουν την παραμόρφωση στο οριζόντιο επίπεδο. Ο τύπος αυτός της παραμόρφωσης είναι αρκετά συνήθης στα τεχνικά έργα, καθώς κατακόρυφες φορτίσεις μεγάλης έκτασης σε οριζόντιες στρώσεις οδηγούν σε μονοδιάστατη παραμόρφωση. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα επιχώματα οδοποιίας μεγάλου πλάτους, οι δεξαμενές καυσίμων μεγάλης διαμέτρου, τα κτήρια με μεγάλη επιφάνεια κάτοψης εδραζόμενα σε γενική κοιτόστρωση, ακόμη και κτήρια με μεμονωμένα πέδιλα τα οποία εδράζονται σε στρώσεις μικρού πάχους (σε σχέση με τις διαστάσεις του πεδύλου βέβαια).

Το πείραμα αυτό έχει εφαρμογή σε εδάφη με ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού, που οδηγούν σε σχετικά μικρές τιμές διαπερατότητας. Ένα τέτοιο υλικό είναι η μάργα που μελετάται στην παρούσα εργασία, όπως φαίνεται και από την κοκκομετρική της διαβάθμιση, που φαίνεται στο διάγραμμα 3.1.2.

Κατά τη δοκιμή του συμπιεσόμετρου επιβάλλεται στο δοκίμιο φόρτιση κατά τον κατακόρυφο άξονα με διαδοχικά βήματα αύξησης της τιμής του φορτίου σταδιακά, ανά συγκεκριμένα σταθερά χρονικά διαστήματα. Η ελεύθερη στράγγιση του δοκιμίου εξασφαλίζεται από την πάνω και την κάτω επιφάνειά του, καθώς εκεί τοποθετούνται πορώδεις δίσκοι κατάλληλου μεγέθους. Η παρεμπόδιση της παραμόρφωσης του δοκιμίου κατά την οριζόντια διεύθυνση εξασφαλίζεται μέσω του απαραμόρφωτου, άκαμπτου μεταλλικού δακτυλίου που το περιβάλλει.

4.1.1 Υλικό δοκιμών

Στις δοκιμές συμπιεσομέτρου χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από το φυσικό υλικό του Ισθμού της Κορίνθου, καθώς και αναζυμωμένα δοκίμια που προέκυψαν από αυτό, των οποίων τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.

Για την παρασκευή των αναζυμωμένων δοκιμών το φυσικό υλικό αναμειγνύεται με κατάλληλη ποσότητα νερού, αναδεύεται μέχρι να επιτευχθεί ομοιόμορφη υφή και κατανομή υγρασίας. Το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας που πρέπει να επιτευχθεί θα πρέπει να είναι ανάμεσα στις τιμές $1 - 1.5w_L$, ιδανικά $1.25 w_L$ σύμφωνα με το Burland, 1990.

Στην παρούσα εργασία η μάργα της Κορίνθου αναμείχθηκε με νερό και το αρχικό περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας κυμάνθηκε ανάμεσα στις τιμές $1.18w_L$ και $1.46w_L$.

Ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές διαδικασίες παρασκευής των αναζυμωμένων δοκιμών:

A) Στην περίπτωση αυτή με διαδοχικές αναμιξεις νερού, εξασφαλίζεται η ομοιογένεια του υλικού. Το προϊόν αυτής της διαδικασίας εισάγεται κατευθείαν στο συμπιεσόμετρο, βρισκόμενο σε υδαρή κατάσταση. Στη συνέχεια, τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί με αυτό τον τρόπο θα ονομάζονται τύπου A.

B) Στην περίπτωση αυτή, αμέσως μετά την παρασκευή του αναζυμωμένου υλικού το τοποθετούμε στη συσκευή του λεγόμενου "μεγάλου συμπιεσόμετρου" (στην φάση που το υλικό είναι σε υδαρή κατάσταση). Στη συσκευή αυτή το υλικό φορτίζεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, η στράγγιση είναι ελεύθερη, ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζεται η παραμόρφωσή του κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Η φόρτιση αυτή μοιάζει με την φόρτιση στο κλασικό συμπιεσόμετρο, έχει όμως σημαντικές διαφορές στις αναλογίες διαστάσεων των εντεινόμενων δοκιμίων και στους χρόνους αλλαγής των φορτίων.

Αναλυτικότερα, το αναζυμωμένο υδαρές υλικό τοποθετείται σε ένα μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 152mm και ύψους 365mm. Ακριβώς πριν την τοποθέτηση του υλικού τα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου καλύπτονται με ειδικό λιπαντικό, με σκοπό την ευκολότερη δυνατή εξόλκευσή του από τη συσκευή στο τέλος της διαδικασίας. Στην κάτω επιφάνεια της συσκευής, πάνω στη διάτρητη μεταλλική βάση, καθώς και στην επιφάνεια του μεταλλικού καλύμματος, τοποθετούνται ειδικά χάρτινα φίλτρα, ώστε το υλικό να μπορεί να στραγγίζει ελεύθερα χωρίς απώλεια μέρους αυτού. Το δοχείο τοποθετείται στη βάση μηχανήματος, μέσω του εμβόλου του οποίου επιβάλλεται η επιλεγθείσα κατακόρυφη αξονική τάση, αφού πρώτα προηγηθεί η φάση κατά την οποία το υλικό στερεοποιείται μόνο υπό το βάρος του μεταλλικού καλύμματος στην επιφάνειά του. Τα διαστήματα διατήρησης σταθερής τάσης εξαρτώνται από το χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση για κάθε φάση της φόρτισης. Για να διαπιστωθεί αυτό η καθίζηση μετράται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (συνήθως ανά 24 ώρες) με παχύμετρο σε τέσσερα σημεία της περιμέτρου του δοκιμίου.

Το δοχείο διατηρείται πληρωμένο με νερό (νερό στην κορυφή και στη βάση του δοκιμίου) ώστε το υλικό να διατηρείται κορεσμένο σε όλα τα στάδια της διαδικασίας. Μετά το τέλος της φόρτισης (αφού φτάσουμε στην υψηλότερη τάση που έχει επιλεγεί) ακολουθεί η φάση της αποφόρτισης μέχρι κάποια μικρότερη τιμή τάσης, την οποία θεωρούμε ότι το υλικό θα μπορέσει να διατηρήσει όταν βγει από τη συσκευή και προφανώς χάνει την πλευρική δέσμευση μετακίνησης και την αντίστοιχη πλευρική τάση.

Τέλος, το στερεοποιημένο υλικό εξάγεται με τη βοήθεια ενός εξολκέα, με προσοχή ώστε η διατάραξή του να μειωθεί στο ελάχιστο. Το δοκίμιο έχει πια στερεή μορφή και ακολουθεί ο τεμαχισμός και η κατάλληλη διαμόρφωσή του για δοκιμές στο συμπιεσόμετρο και στην τριαξονική συσκευή.



(α)



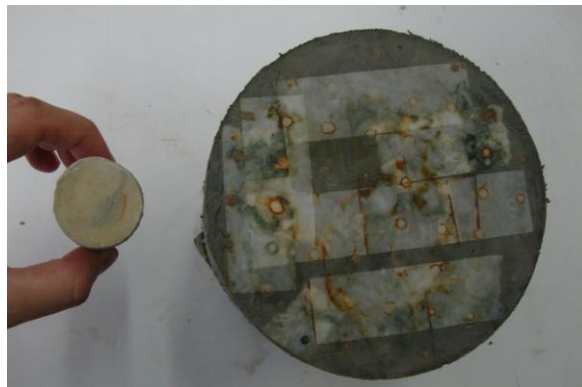
(β)

Εικόνα 4.1.1: (α) Αρχική και (β) τελική φάση εξόλκευσης του αναζυμωμένου υλικού.

Η αναλογία των μεγεθών φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία μέσω της σύγκρισης του εξαγόμενου υλικού από το "μεγάλο συμπιεσόμετρο" με ένα τυπικό δοκίμιο τριαξονικής δοκιμής διαμέτρου 36.7mm και ύψους 78.5mm.



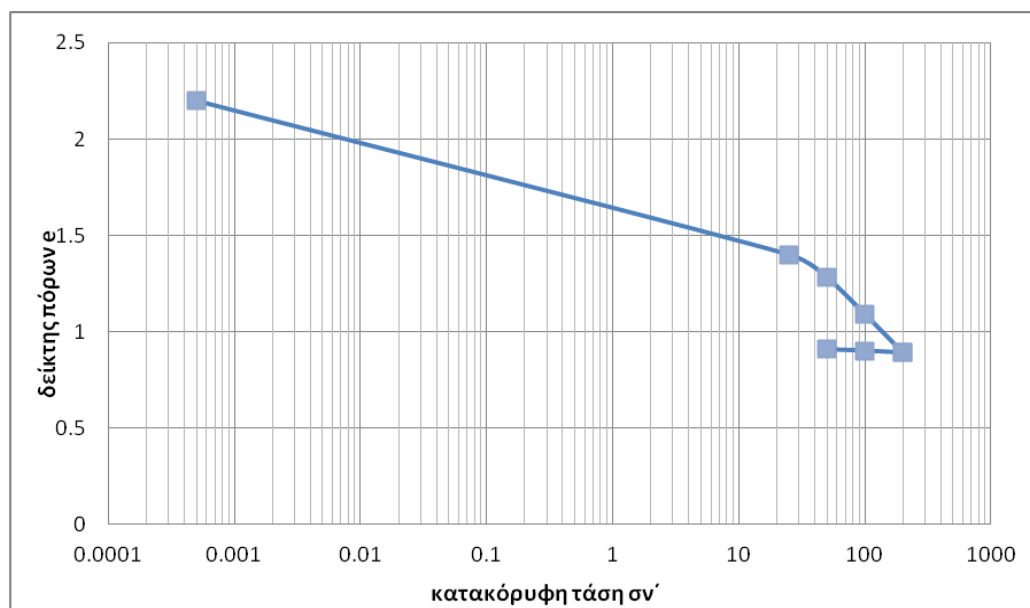
(α)



(β)

Εικόνα 4.1.2: (α) Αναλογία ύψους και (β) διαμέτρου τυπικού δοκιμίου τριαξονικής δοκιμής και υλικού εξαγόμενου από το "μεγάλο συμπιεσόμετρο".

Έχοντας μετρήσει το αρχικό ύψος του ρευστού μίγματος τη στιγμή που αυτό τοποθετήθηκε στο συμπιεσόμετρο, καθώς και την καθίζηση που παρουσίασε σε κάθε στάδιο της φόρτισης, μπορούμε να σχεδιάσουμε την καμπύλη συμπίεσης του υλικού. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε στο υλικό ήταν 200kPa, ενώ στη συνέχεια έγινε αποφόρτιση μέχρι τα 50kPa. Τα δοκίμια τύπου B λοιπόν αναμένεται να παρουσιάσουν αρχική ενεργό τάση 50kPa και μέγιστη τάση προφόρτισης 200kPa. Ακόμη, αναμένεται η αρχή των διαγραμμάτων μονοδιάστατης συμπίεσης δοκιμίων υλικού τύπου B να ταυτίζεται με τον κλάδο φόρτισης του διαγράμματος συμπίεσης από το "μεγάλο συμπιεσόμετρο".



Διάγραμμα 4.1.1: Τυπική καμπύλη στερεοποίησης στο "μεγάλο συμπιεσόμετρο".

4.1.2. Εξοπλισμός

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις συσκευές Wykham Farrance international model 24255 και Matest S260 στο εργαστήριο Εδαφομηχανικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

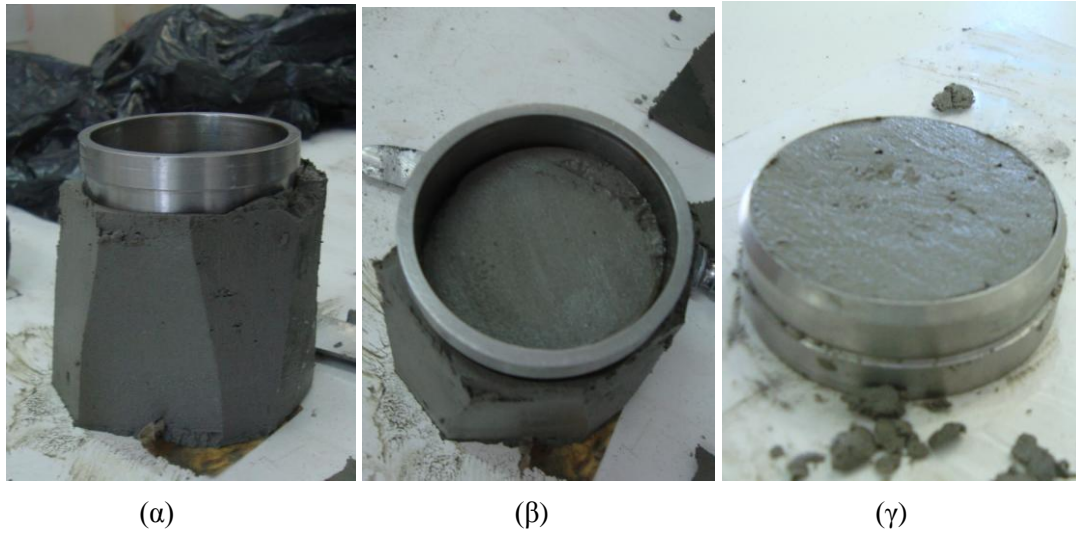
- Μεταλλικοί δίσκοι ονομαστικής διαμέτρου 50mm και 75mm.
- Πορώδεις δίσκοι αντίστοιχων διαμέτρων.
- Μορφωτής δοκιμίου με τα εξαρτήματά του
- Ζυγός ακριβείας 0.1 γραμμαρίων
- Κλίβανος ξηράνσεως θερμοκρασίας $105 \pm 1^{\circ} \text{C}$

4.1.3 Μόρφωση δοκιμίου

Για τα δοκίμια τύπου A: μετά την ανάμιξη του φυσικού υλικού με νερό, την ανάδευση και την τελική ομοιογενοποίησή του, το τοποθετούμε απ' ευθείας στο μεταλλικό δακτύλιο μέσα στην κυψέλη της συσκευής. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη διαδικασία της τοποθέτησης του μίγματος σε στρώσεις, ώστε να μη παγιδευτεί αέρας ή αλλοιωθεί η ομοιογένεια του μίγματος.

Για τα δοκίμια τύπου B: Από το υλικό που εξάγεται από το "μεγάλο συμπιεσόμετρο" αποσπώνται δοκίμια κατάλληλου μεγέθους για τη δοκιμή του συμπιεσόμετρου.

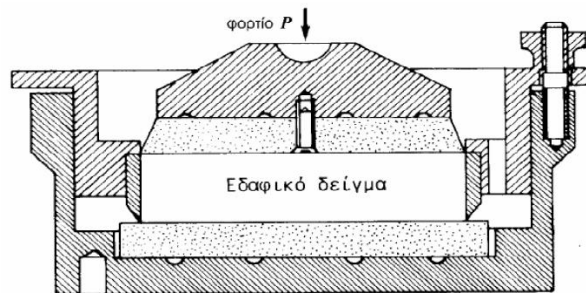
Για τη μόρφωση του δοκιμίου χρησιμοποιείται ειδικός δακτύλιος με κοφτερό άκρο σαν οδηγός, μαχαίρι και σπάτουλα για τη διαμόρφωση των τελικών επιφανειών. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη διαδικασία της μόρφωσης του δοκιμίου, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερη απώλεια της υγρασίας του δείγματος και την ελάχιστη δυνατή διαταραχή αυτού. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διαδικασία μόρφωσης του δοκιμίου.



Εικόνα 4.1.3: (α), (β), (γ) Διαδικασία μόρφωσης του δοκιμίου για τη δομική στο συμπιεσόμετρο.

4.1.4. Πειραματική διαδικασία

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής συμπιεσόμετρου.



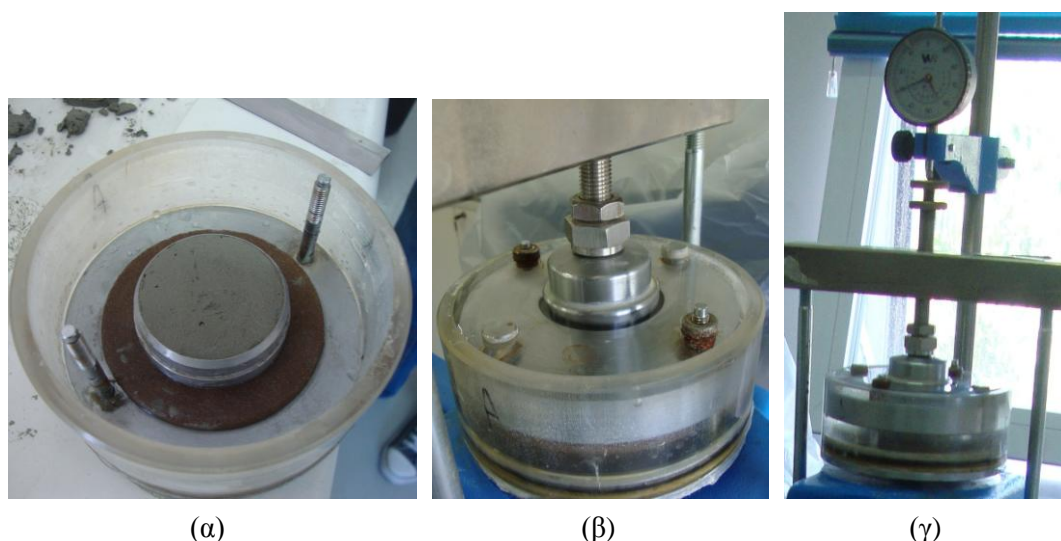
Εικόνα 4.1.4: Κατακόρυφη τομή της εργαστηριακής διάταξης μονοδιάστατης συμπίεσης.

Ο πρώτος πορόλιθος τοποθετείται στη βάση του δοκιμίου και εφαρμόζει στην κυψέλη της συσκευής του συμπιεσόμετρου. Ο δεύτερος πορόλιθος τοποθετείται στην κορυφή του δοκιμίου και συνήθως είναι προσκολλημένος στο μεταλλικό κάλυμμα της συσκευής. Προτού τοποθετηθούν, οι πορόλιθοι διατηρούνται απαερωμένοι και

εμβαπτισμένοι σε νερό, ώστε να είναι πλήρως κορεσμένοι για να μην απορροφήσουν νερό από το δοκίμιο.

Αμέσως μετά η κυψέλη τοποθετείται στη συσκευή φόρτισης. Εκεί πρέπει να εξασφαλίζεται η κατακόρυφη επιβολή του φορτίου. Ακολούθως τοποθετείται το μηκυνσιόμετρο και ασφαρίζεται σε κατάλληλο ύψος, για να καταγράφει τις μετακινήσεις σε όλα τα στάδια της φόρτισης, ακόμα και σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η κυψέλη πληρώνεται με νερό, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το δοκίμιο θα είναι μονίμως κορεσμένο.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διαδικασία τοποθέτησης του δοκιμίου στη συσκευή του συμπιεσόμετρου



Εικόνα 4.1.5: (α) Τοποθέτηση του δακτυλίου με το δοκίμιο στον υποδοχέα της συσκευής, (β) επικάλυψη του δοκιμίου με το μεταλλικό κάλυμμα, (γ) τοποθέτηση του πλαισίου επιβολής φόρτισης το οποίο φέρει και το μετρητή μετακίνησης του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Ακολουθεί η διαδικασία της φόρτισης. Για τα υλικά που τοποθετούνται απ' ευθείας (σε ρευστή κατάσταση) στο συμπιεσόμετρο, συνήθως προηγείται μία πολύ μικρή φόρτιση, η οποία μπορεί να προέρχεται είτε από το βάρος ενός πορόλιθου, είτε από το βάρος του μεταλλικού καλύμματος, τα οποία πρέπει να έχουν ζυγιστεί και τοποθετηθεί πολύ προσεκτικά, ώστε να συμπιέζουν ομοιόμορφα και οριζόντια το υλικό. Έπειτα, η διαδικασία φόρτισης είναι όμοια για δοκίμια τύπου Α και Β.

Μια τυπική σειρά φορτίσεων είναι 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16, 32, 64, 128, 256 (kg). Κάθε φορτίο παραμένει αμετάβλητο για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να ολοκληρωθεί το φαινόμενο της στερεοποίησης. Οι 24 ώρες είναι η συνήθης διάρκεια διατήρησης της ίδια φόρτισης. Σε ειδικές περιπτώσεις ανάλογα με τη συσκευή και τον τρόπο παρασκευής του υλικού κάποια φορτία μπορούν να παραλειφθούν.

Ενδεικτικά σε συγκεκριμένες δοκιμές έγιναν μετρήσεις της καθίζησης του δοκιμίου σε χρόνους 8'', 15'', 30'', 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1h, 2h μετά την επιβολή κάθε νέου φορτίου ξεχωριστά. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μία εικόνα για την εξέλιξη της παραμόρφωσης του δοκιμίου σε συνάρτηση με το χρόνο, πέραν της αρχικής και τελικής τιμής. Καθώς οι συντελεστές στερεοποίησης του υλικού δεν επρόκειτο να μελετηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι μετρήσεις σε αυτούς τους χρόνους έγιναν σε πολύ περιορισμένο αριθμό πειραμάτων.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της αποφόρτισης. Η διαδικασία της αποφόρτισης γίνεται και αυτή σε στάδια αντίστροφα ακριβώς από αυτά της φόρτισης. Κάποια από αυτά είναι δυνατόν να παραλειφθούν, δηλαδή να γίνουν λιγότερες αποφορτίσεις στο δοκίμιο. Γενικά, το δοκίμιο κατά την αποφόρτιση θα πρέπει να φτάσει σε πολύ χαμηλές τάσεις, ώστε στο τέλος της διαδικασίας να διογκωθεί στο ελάχιστο δυνατό. Μετά την απομάκρυνση και του τελευταίου φορτίου, η κυψέλη αποσυναρμολογείται και το δοκίμιο εξάγεται από το δακτύλιο.

Σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας λαμβάνονται μετρήσεις και εξάγονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Πριν από την έναρξη του πειράματος μετρούμε τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου (διάμετρο, ύψος και βάρος του δοκιμίου). Από το πολύ κοντινό υλικό που απομακρύνθηκε από το δοκίμιο κατά τη διάρκεια παρασκευής του, εξάγουμε τα αποτελέσματα για την αρχική υγρασία του δοκιμίου. Υποθέτοντας ότι το υλικό είναι πλήρως κορεσμένο μπορούμε να υπολογίσουμε τον αρχικό δείκτη πόρων (e_0) του δοκιμίου μέσω της σχέσης:

$$e_0 = G_s * w_0$$

(όπου G_s είναι το ειδικό βάρος των κόκκων του υλικού και w_0 το αρχικό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας).

- Από τις μετρήσεις του μηκυνσιόμετρου που είναι τοποθετημένο στην κορυφή του μεταλλικού καλύμματος της κυψέλης παίρνουμε την πληροφορία για την κατακόρυφη μετακίνηση του δοκιμίου. Έτσι στο τέλος της στερεοποίησης σε κάθε φάση μπορούμε να υπολογίσουμε την ογκομετρική παραμόρφωση:

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \Delta \varepsilon_z = - \Delta H / H_0$$

- Γνωρίζοντας λοιπόν την ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίζουμε τη μεταβολή του δείκτη πόρων

$$\Delta e = - (1 + e_0) * \Delta \varepsilon_{vol}$$

και την αντίστοιχη τιμή του δείκτη πόρων σε κάθε φάση

$$e = e_0 - \Delta e$$

Έτσι πλέον είναι δυνατή η σχεδίαση του διαγράμματος φορτίου (σ'_v) – δείκτη πόρων (e).

- Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος εξάγουμε το δοκίμιο από το δακτύλιο και μετά την ξήρασή του στον κλίβανο του εργαστηρίου υπολογίζουμε την τελική του υγρασία. Έτσι ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία υπολογισμού μπορούμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματά μας, καθώς και την ορθότητα της τιμής του αρχικού δείκτη πόρων που έχουμε χρησιμοποιήσει.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με τις φορτίσεις που προκαλεί βάρος 1 kg στο εδαφικό δοκίμιο ανάλογα με τη συσκευή, τη θέση του μοχλοβραχίονα με τον οποίο συνδέεται το σύστημα φόρτισης (οπή 1, 2, 3) και την πραγματική διάμετρο του δακτυλίου, καθώς και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να επιβάλει η κάθε συσκευή

Wykeham Farrance Model: 24255

W = 1 kg (g = 9,81 m/sec ²)	2 ^η σπή (1:9,82)	3 ^η σπή (1:11,04)
d1 = 49,85 mm E = 19,517 cm ²	49,358 kPa	55,490 kPa
d2 = 74,82 mm E = 43,967 cm ²	21,911 kPa	24,633 kPa
d3 = 74,86 mm E = 44,014 cm ²	21,887 kPa	24,606 kPa

• Μέγιστο φορτίο: 400 kg

Πίνακας 4.1.1: Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή WF 24255 για φόρτιση 1kg.

Matest

W = 1 kg (g = 9,81 m/sec ²)	3 ^η σπή (1:11)
d1 = 49,85 mm E = 19,517 cm ²	55,289 kPa
d2 = 74,82 mm E = 43,967 cm ²	24,543 kPa
d3 = 74,86 mm E = 44,014 cm ²	24,517 kPa

• Μέγιστο φορτίο ≈ 165 kg
• W_{μεταλλικού πλαισίου} = 1.800 gr

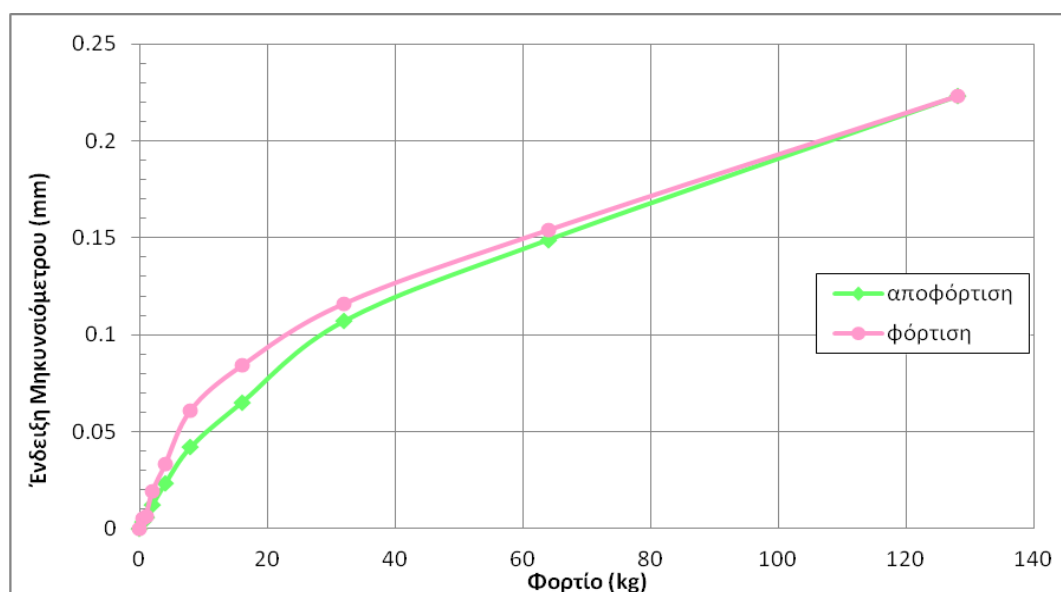
Πίνακας 4.1.2: Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή Matest S260 για φόρτιση 1kg.

4.1.5 Δοκιμές συμμόρφωσης

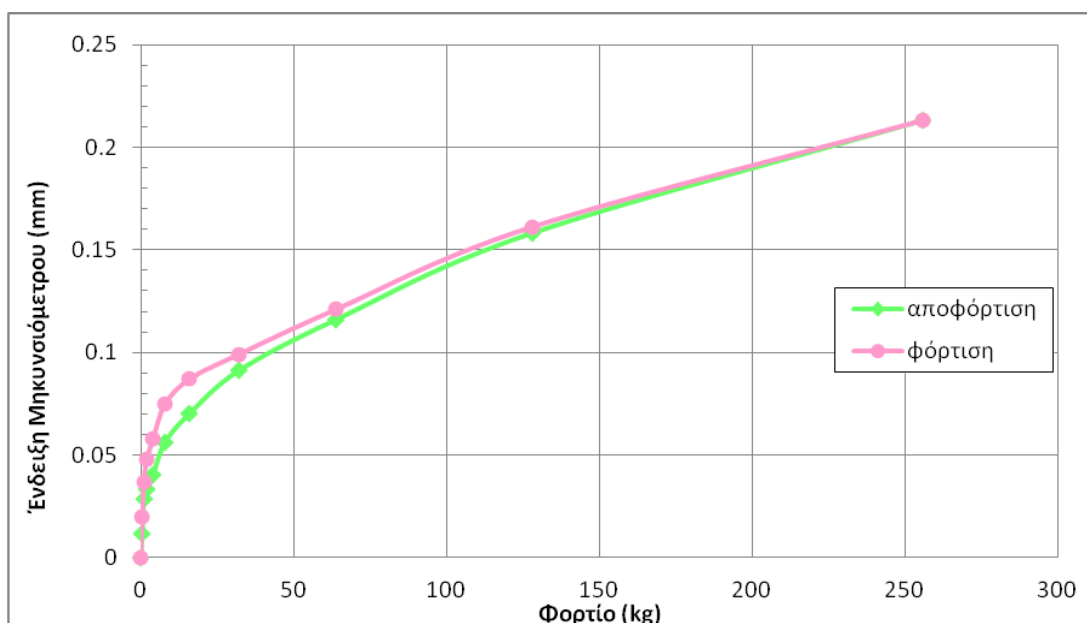
Για κάθε συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα έγινε δοκιμή συμμόρφωσης (compliance test) τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Στη δοκιμή αυτή μετράται η παραμόρφωση της συσκευής κατά την επιβολή των φορτίων. Η παραμόρφωση αυτή οφείλεται, είτε σε ατελή επαφή μεταξύ διαφόρων τμημάτων ή εξαρτημάτων της, είτε σε παραμόρφωση των μεταλλικών τμημάτων της. Η δοκιμή συμμόρφωσης είναι απαραίτητη και τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται στη διόρθωση των μετέπειτα μετρήσεων, με την αφαίρεση των αποτελεσμάτων της από την καθίζηση και τη διόγκωση του εδαφικού δοκιμίου αντίστοιχα. Αντί για εδαφικό δοκίμιο τοποθετούμε στο δακτύλιο ένα αντίστοιχου μεγέθους μεταλλικό δοκίμιο και φορτίζουμε τη συσκευή του συμπιεσόμετρου ακριβώς με την αλληλουχία των φορτίσεων που εφαρμόστηκε στις δοκιμές των εδαφικών δοκιμίων, όπως περιγράφεται παραπάνω. Όμοια είναι και η διαδικασία κατά την αποφόρτιση.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τη δοκιμή συμμόρφωσης:



Διάγραμμα 4.1.2: Αποτελέσματα δοκιμής συμμόρφωσης συσκευής Matest S260 .



Διάγραμμα 4.1.3: Αποτελέσματα δοκιμής συμμόρφωσης συσκευής WF 24255.

4.1.6. Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών συμπιεσόμετρου

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλες οι δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αναφέρονται η ημερομηνία έναρξης του πειράματος, το υλικό, ο τύπος του δοκιμίου καθώς και το αρχικό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας.

α/α δοκιμής	Ημερομηνία έναρξης	Υλικό - Τύπος δοκιμίου	Αρχικό ποσοστό υγρασίας
1	7/6/2013	Μάργα - Τύπος Β	25.56% ή $0.82w_{LL}$
2	8/5/2013	Μάργα - Τύπος Α	39.06% ή $1.26w_{LL}$
3	27/5/2013	Μάργα - Τύπος Α	42.5% ή $1.37w_{LL}$
4	24/6/2013	Μάργα - Τύπος Α	44.5% ή $1.44w_{LL}$
5	4/7/2014	Μάργα - Τύπος Β	25.35% ή $0.82w_{LL}$
6	23/7/2014	Μάργα - Τύπος Β	25.46% ή $0.82w_{LL}$
7	9/7/2013	Μάργα - Φυσικό δοκίμιο	20.3% ή $0.66w_{LL}$
8	21/6/2013	Μάργα - Φυσικό δοκίμιο	21.6% ή $0.70w_{LL}$
9	24/4/2013	Μάργα - Φυσικό δοκίμιο	21.4% ή $0.69w_{LL}$
10	22/4/2013	Μάργα - Φυσικό δοκίμιο	21.6% ή $0.70w_{LL}$
11	15/5/2013	Μάργα - Φυσικό δοκίμιο	22.3% ή $0.72w_{LL}$

Πίνακας 4.1.3: Δοκιμές συμπιεσόμετρου που πραγματοποιήθηκαν.

4.2 Δοκιμές στην τριαξονική συσκευή

Η τριαξονική δοκιμή είναι μία από τις συχνότερες δοκιμές στο εργαστήριο εδαφομηχανικής. Μέσω αυτής αντλούμε σημαντικές πληροφορίες για τη σχέση τάσεων παραμορφώσεων καθώς και για την αντοχή του εδάφους που μελετάμε. Η δοκιμή αυτή μπορεί να προσομοιώσει την εντατική κατάσταση που επιβάλλεται σε ένα εδαφικό στοιχείο σε διάφορα τεχνικά έργα (π.χ. πίσω από ένα τοίχο αντιστήριξης, στην κυκλική επιφάνεια αστοχίας ενός επιχώματος οδοποιίας, μπροστά από μία πλάκα αγκύρωσης και άλλα). Η τριαξονική δοκιμή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι απλούστερων δοκιμών, όπως αυτή της απ' ευθείας διάτμησης, καθώς μας δίνεται η δυνατότητα να ελέγξουμε τη στράγγιση του δοκιμίου και να καταγράψουμε τις πιέσεις πόρων. Ο έλεγχος της στράγγισης και της υδατικής πίεσης στο εσωτερικό του δοκιμίου γίνεται με αγωγό που συνδέει τον πορώδη δίσκο στη βάση του δοκιμίου διαμέσου της βάσης της κυψέλης με τον εξωτερικό χώρο (αγωγός στράγγισης). Ο αγωγός αυτός μπορεί να συνδεθεί με ένα σύστημα επιβολής πίεσης, οπότε η υδατική πίεση στο εσωτερικό του δοκιμίου μπορεί να ελέγχεται. Καθώς η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι συνάρτηση όχι μόνο του μεγέθους της πίεσης που ασκείται σε αυτό και της πίεσης των πόρων, αλλά εξαρτάται και από την εντατική κατάσταση που βρισκόταν το έδαφος πριν από τη δοκιμή του, διάφορες δοκιμές μπορούν να τελεστούν στην εν λόγω συσκευή (π.χ. ταχεία δοκιμή, δηλαδή χωρίς στερεοποίηση και χωρίς αποστράγγιση (UU), με στερεοποίηση και χωρίς αποστράγγιση (CU) και άλλες.) Οι βασικές πληροφορίες που προκύπτουν από την εκτέλεση της δοκιμής είναι η γωνία διατμητικής αντίστασης ϕ' , η συνοχή c' , η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u . Ακόμη μπορούν να προσδιοριστούν παράμετροι όπως το μέτρο διάτμησης G , ο δείκτης συμπίεσης C_c και η διαπερατότητα k .

Η εντατική κατάσταση στο δοκίμιο είναι ομοιόμορφη και αξονοσυμμετρική και οι κύριοι άξονες των τάσεων είναι παράλληλοι με τους άξονες του δοκιμίου. Επομένως έχουμε $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$ και $\sigma_z \geq \sigma_c$. Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται από μία αδιαπέρατη ελαστική μεμβράνη, ενώ στη βάση και στην κεφαλή του τοποθετούνται άκαμπτοι πορώδεις δίσκοι. Η κυλινδρική κυψέλη στην οποία τοποθετείται το δοκίμιο πληρώνεται με νερό το οποίο τίθεται υπό ελεγχόμενη πίεση. Το έμβολο της κυψέλης έχει τη δυνατότητα κίνησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση συμπιέζοντας το δοκίμιο. Η περιβάλλουσα πίεση σ_c επιβάλλεται μέσω της πίεσης του νερού της

κυψέλης ενώ η κατακόρυφη τάση σ_z μέσω της εξωτερικής δύναμης που εφαρμόζεται στο έμβολο (αλλά και της πίεσης του νερού της κυψέλης). Υπό την προϋπόθεση ότι το δοκίμιο είναι κατακόρυφο, η φόρτιση αυτού κεντρική και η συμπεριφορά του ισότροπη, η μέγιστη κύρια τάση (σ_1) που ασκείται στο δοκίμιο είναι κατακόρυφη, ενώ οι άλλες κύριες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους ($\sigma_2=\sigma_3$) και ασκούνται σε κατακόρυφα επίπεδα.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται η τριαξονική συσκευή χαμηλών (εικ.4.2.1(α)) και υψηλών πιέσεων (εικ.4.2.1(β)) αντίστοιχα, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η κυψέλη είναι κατασκευασμένη από πολυκαρβονικό υλικό για πιέσεις έως 800kPa ενώ για υψηλότερες πιέσεις η κυψέλη είναι μεταλλική.



(α)



(β)

Εικόνα 4.2.1: Τριαξονική συσκευή (α) χαμηλών και (β) υψηλών πιέσεων.

4.2.1 Υλικό δοκιμών

Στις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν φυσικά δοκίμια και αναζυμωμένα δοκίμια από τη μάργα του Ισθμού της Κορίνθου με τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3. Τα αναζυμωμένα δοκίμια ήταν τύπου B, με μέγιστη τάση προφόρτισης 200kpa και αρχική ενεργό τάση 50kpa, με χαρακτηριστικά τους όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.1.1.

4.2.2. Εξοπλισμός

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις συσκευές χαμηλών και υψηλών πιέσεων του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω ειδικός και γενικός εξοπλισμός.

Ειδικός εξοπλισμός

- Τριαξονική συσκευή
- Μορφωτής δοκιμίου με τον εξοπλισμό του (μήτρα μορφώσεως δοκιμίου, συρμάτινο πριόνι, μαχαίρι)
- Ελαστική μεμβράνη
- Πορόλιθοι
- Μηκυνσιόμετρα και LVDTs
- Τανυστής μεμβράνης
- Ελαστικοί δακτύλιοι (O rings)

Γενικός εξοπλισμός

- Παροχή απαερομένου και απεσταγμένου νερού
- Ζυγοί
- Ζυγός ακριβείας 0.1 γραμμαρίων
- Κλίβανος ξηράνσεως θερμοκρασίας $105 \pm 1^{\circ}$

4.2.3. Μόρφωση αναζυμωμένου δοκιμίου

Το συμπαγές δοκίμιο που προκύπτει από το “μεγάλο συμπιεσόμετρο” χωρίζεται σε τρία ή τέσσερα τμήματα από τα οποία θα προκύψουν τα δοκίμια. Η διαδικασία εξόλκευσης του μεγάλου δοκιμίου διευκολύνεται από τη λίπανση της εσωτερικής επιφάνειας του “μεγάλου συμπιεσόμετρου” που έχει προηγηθεί της τοποθέτησης του υλικού. Για κάθε ένα από τα μικρότερα δοκίμια χρησιμοποιούμε τον ειδικό κυλινδρικό μορφοτή σαν οδηγό, ενώ με μαχαίρι αφαιρώντας προσεκτικά υλικό απ’ την περίμετρο πλησιάζουμε τις επιθυμητές διαστάσεις. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο περιστροφικός μορφοτής, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη διαδικασία ώστε η διαταραχή του δείγματος να μειωθεί στο ελάχιστο.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται η διάταξη της συσκευής του “μεγάλου συμπιεσόμετρου”, καθώς και η διαδικασία εξαγωγής του υλικού και κατάλληλης διαμόρφωσης αυτού για την τοποθέτηση στην τριαξονική συσκευή.

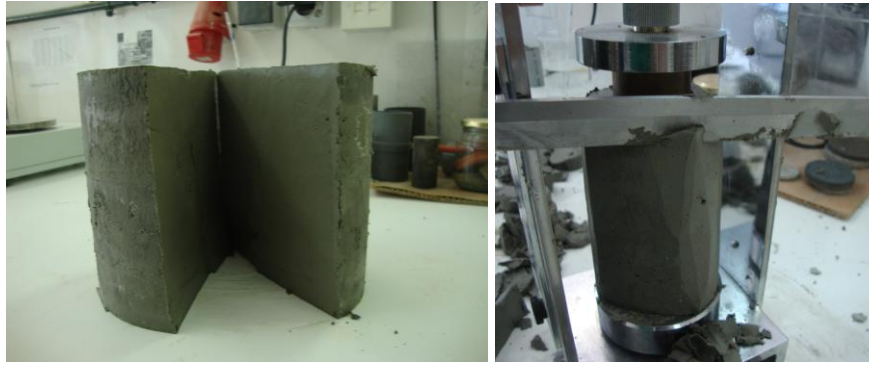


(α)



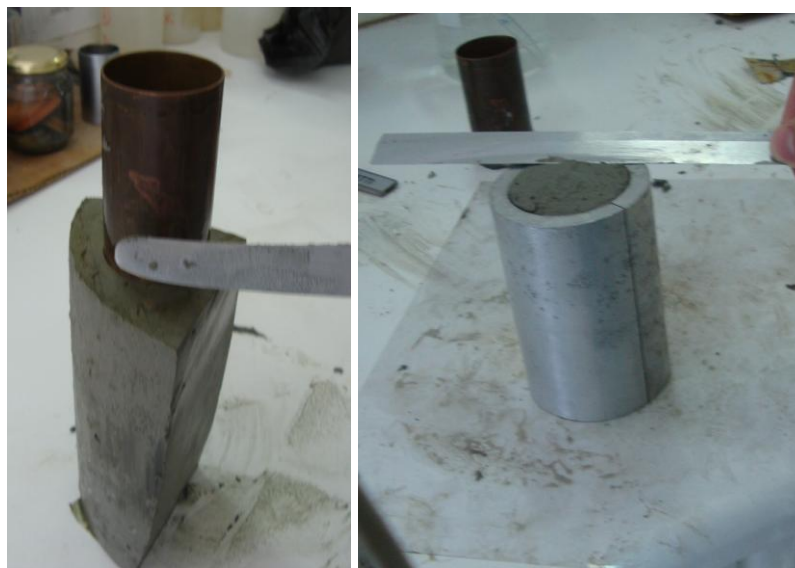
(β)

Εικόνα 4.2.2: (α) Διάταξη συσκευής του “μεγάλου συμπιεσόμετρου” και (β) εξόλκευση του υλικού από τη συσκευή.



(α)

(β)



(γ)

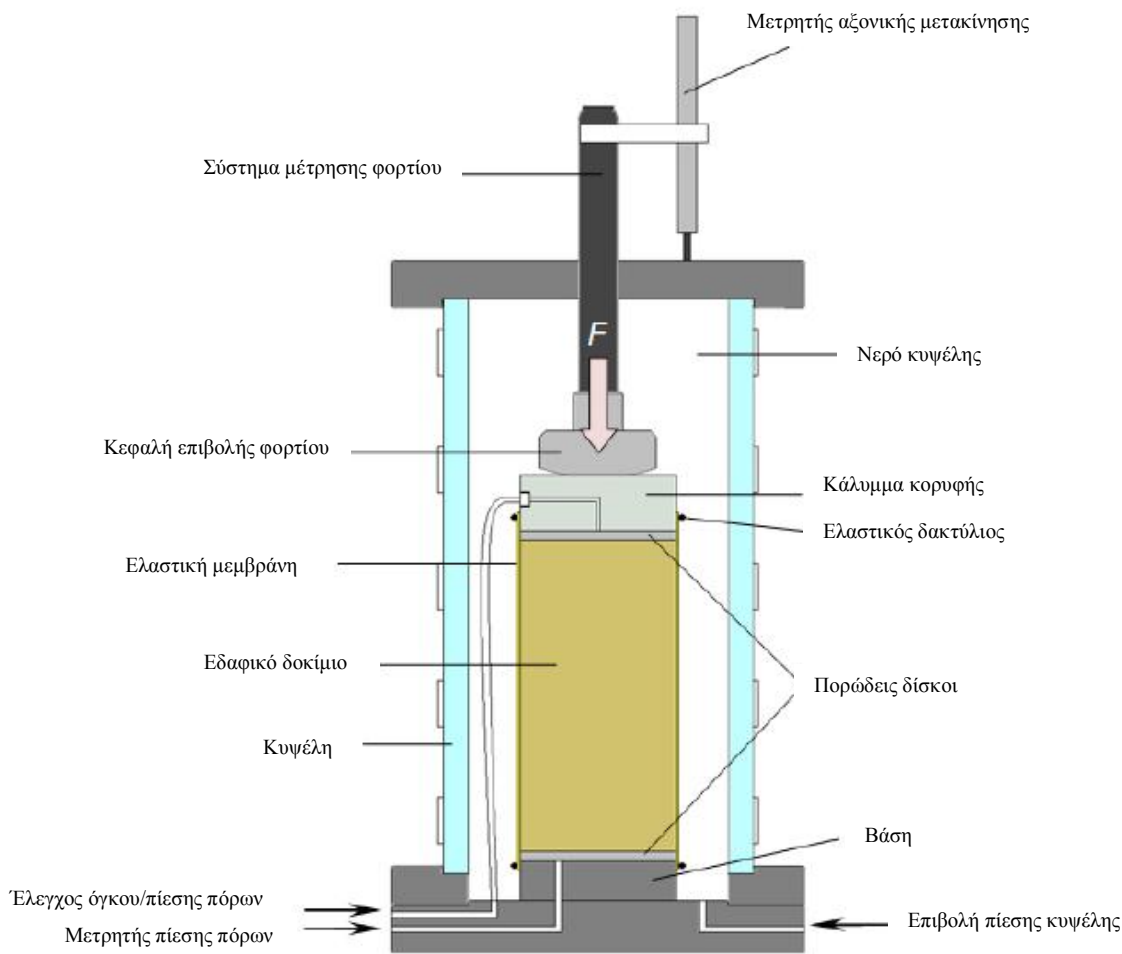
(δ)

Εικόνα 4.2.3: (α), (β), (γ), (δ) Διαδικασία μόρφωσης του αναζυμωμένου δοκιμίου για την τοποθέτηση στην τριαξονική συσκευή.

4.2.4. Πειραματική διαδικασία

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε κορεσμένα δοκίμια υπό αστράγγιστες συνθήκες, στραγγιζόμενες συνθήκες αλλά και συνθήκες σταθερής μέσης ενεργού τάσης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στα ASTM Standards.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τυπική διάταξη τριαξονικής δομικής.



Εικόνα 4.2.4: Τυπική διάταξη τριαξονικής δοκιμής.

Προετοιμασία συσκευής και δοκιμίου

Μετά τη μόρφωση του δοκιμίου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.3 το δοκίμιο περιβάλλεται με την ελαστική μεμβράνη με τη βοήθεια του τανυστή μεμβράνης και κατόπιν ζυγίζεται. Το πάχος της μεμβράνης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% της διαμέτρου του δοκιμίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Ακολουθεί η απαέρωση της βάσης της συσκευής και της σωλήνωσης που γίνεται με έκπλυση με αποσταγμένο νερό.

Στη βάση της συσκευής τοποθετείται επίσης ο πορόλιθος ο οποίος ήταν εμβαπτισμένος σε νερό και είχε απαερωθεί. Κατόπιν το δοκίμιο τοποθετείται πάνω στον πορόλιθο. Η ελαστική μεμβράνη αναδιπλώνεται προσεκτικά και στη βάση ασφαρίζεται με έναν ή δύο ελαστικούς δακτυλίους (O ring). Ένας ακόμη

απαερωμένος πορόλιθος τοποθετείται στην κορυφή του δοκιμίου και πάνω από αυτόν το κάλυμμα (top cup) απ' το οποίο γίνεται η ελεγχόμενη μετακίνηση νερού. Η μεμβράνη αναδιπλώνεται και ασφαρίζεται στην κορυφή αντίστοιχα με τη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στη βάση.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η τοποθέτηση της μεμβράνης, των πορόλιθων και του top cup στο δοκίμιο.



(α)

(β)

Εικόνα 4.2.5: Τοποθέτηση ελαστικής μεμβράνης και πορόλιθων στο δοκίμιο.

Για την τοπική καταγραφή των παραμορφώσεων των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι μετρητών, μικροσκοπικά κλισιόμετρα (iklinometers) και μετρητές μετακίνησης (lvdt's). Οι μετρητές τοποθετούνται σε κεντρική θέση στο δοκίμιο επί της μεμβράνης που το περιβάλλει, σε αντιδιαμετρικές θέσεις και με ειδική κόλλα εφαρμόζονται στη μεμβράνη.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η αρχική θέση του δοκιμίου στην τριαξονική συσκευή, το εσωτερικό μηκυσιόμετρο (lvdt) τοποθετημένο στο δοκίμιο, καθώς και το εξωτερικό μηκυσιόμετρο της συσκευής.



(α)

(β)

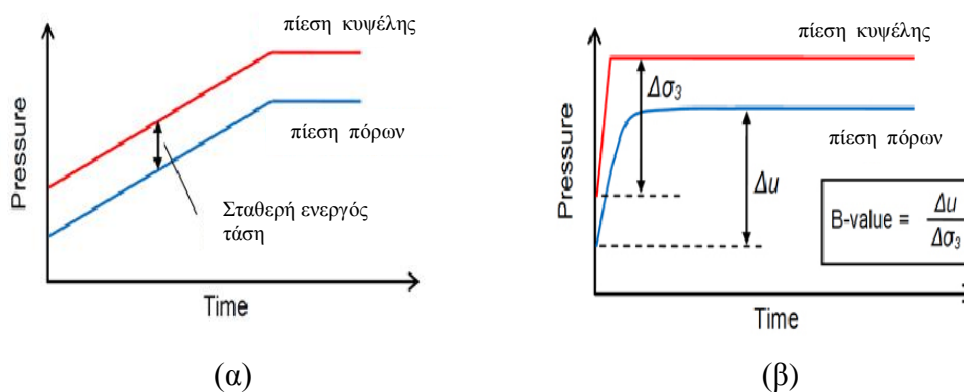
(γ)

Εικόνα 4.2.6: (α) Αρχική θέση του δοκιμίου στην τριαξονική συσκευή, (β) εσωτερικός μετρητής μετακίνησης (Indt), (γ) εξωτερικός μετρητής μετακίνησης.

Στη συνέχεια τοποθετείται η κυψέλη της συσκευής και το έμβολο πλησιάζει οριακά το κάλυμμα της κορυφής του δοκιμίου. Οι κοχλίες σφίγγονται ώστε να επιτευχθεί η στεγάνωση του θαλάμου και ελευθερώνεται η παροχή νερού από τη βαλβίδα ώστε να πληρωθεί η κυψέλη. Μέσω ειδικών καταγραφέων που συνδέονται με το σύστημα στράγγισης του δοκιμίου είναι δυνατή η μέτρηση του όγκου του νερού, που απορροφά ή εκκρίνει το δοκίμιο, αλλά και η υδατική πίεση στο εσωτερικό αυτού κατά τη διάρκεια πλήρωσης της κυψέλης.

Κορεσμός δοκιμίου

Η διαδικασία κορεσμού έχει σκοπό την ολοκληρωτική πλήρωση των κενών του δοκιμίου με νερό, εφόσον τόσο ο αισθητήρας μέτρησης της πίεσης των πόρων (pore pressure transducer), όσο και ο σωλήνας στράγγισης έχουν ήδη απαερωθεί. Αυτό επιτυγχάνεται επιβάλλοντας στο δοκίμιο μία σταθερή μέση ενεργό τάση, ενώ αυξάνεται η πίεση των πόρων του δοκιμίου σταδιακά, ώστε να διαλυθεί ο όποιος αέρας έχει απομείνει. Για τον έλεγχο του βαθμού κορεσμού προσδιορίζεται η παράμετρος B του Skempton. Κρατώντας κλειστή τη βαλβίδα στράγγισης αυξάνουμε την πίεση της κυψέλης κατά περίπου 50kPa και καταγράφουμε τη μεταβολή της υδατικής πίεσης του δοκιμίου. Η παράμετρος B υπολογίζεται ως $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η παράμετρος B εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου (π.χ. για πλήρη κορεσμό μία κανονικά στερεοποιημένη μαλακή άργιλος θα έδινε $B \sim 1.00$, μία πολύ πυκνή άμμος ή μία πολύ στιφρή άργιλος θα έδινε $B \sim 0.91$).



Διάγραμμα 4.2.1: Κορεσμός δοκιμίων (α) διαδικασία κορεσμού και (β) έλεγχος της παραμέτρου B.

Όταν γίνεται η επιβολή της πίεσης της κυψέλης υπό αστράγγιστες συνθήκες, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την τιμή την αρχικής ενεργού τάσης των δοκιμίων, υπολογίζοντας τη διαφορά της πλευρικής πίεσης και της πίεσης του νερού των πόρων που αναπτύσσει το δοκίμιο. Για τα αναζυμωμένα δοκίμια που αποφορτίστηκαν στο "μεγάλο συμπιεσόμετρο" σε 50kPa αυτή είναι και η αρχική ενεργός τάση των δοκιμίων κατά την τοποθέτησή τους στην τριαξονική συσκευή.

Στερεοποίηση

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία του κορεσμού, ακολουθεί αυτή της στερεοποίησης σε περίπτωση που είναι επιθυμητό το δοκίμιο να διατηρηθεί με αρχική τιμή στερεοποίησης μεγαλύτερη απ' την αρχική των 50kPa. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της πίεσης της κυψέλης και της αντιπίεσης πόρων (back pressure) στις κατάλληλες τιμές. Σ' αυτό το στάδιο οι βαλβίδες αποστράγγισης παραμένουν ανοιχτές και η κυκλοφορία νερού στο δοκίμιο είναι ελεύθερη. Αν η αρχική ενεργός τάση του δοκιμίου είναι μικρότερη από την τάση στερεοποίησης, το δοκίμιο αποβάλλει νερό, ενώ αν είναι μεγαλύτερη απορροφά νερό.

Για τη δημιουργία προστερεοποιημένων δοκιμίων ακολουθεί ένα ακόμη στάδιο στερεοποίησης, κατά την οποία το δοκίμιο διογκώνεται σε μικρότερη ενεργό τάση.

Η ποσότητα νερού που αποστραγγίζεται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης μετράται στο μετρητή μεταβολής όγκου του δοκιμίου. Το πέρας της στερεοποίησης γίνεται αντιληπτό από τη σταθεροποίηση του όγκου του δοκιμίου, αλλά και της πίεσης πόρων που μετράται στο μετρητή πίεσης πόρων με τη βαλβίδα αποστραγγίσεως κλειστή, και η οποία πρέπει να είναι ίση με την αρχική επιβαλλόμενη αντιπίεση πόρων.

Αξονική φόρτιση και θραύση του δοκιμίου

Μόλις ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του δοκιμίου ακολουθεί το στάδιο της αξονικής φόρτισης μέχρι τη θραύση. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί η διατηρητική αντοχή του δοκιμίου που αντιστοιχεί στην αρχική τάση ισότροπης στερεοποίησης που προηγήθηκε της διάτμησης. Εκτελέστηκαν τρεις τύποι δοκιμών: υπό αστράγγιστες συνθήκες, υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες με διατήρηση σταθερής μέσης ενεργού τάσης. Στην αστράγγιστη δοκιμή κλείνουμε τις βαλβίδες για να εξασφαλίσουμε ότι θα έχουμε παραμόρφωση υπό σταθερό όγκο και καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος διατηρούμε την πίεση της κυψέλης σταθερή. Το δοκίμιο κινείται προς τα πάνω, με σταθερή ταχύτητα, ενώ η αντίσταση που αναπτύσσεται στον αμετακίνητο μετρητή του φορτίου καταγράφεται. Η ταχύτητα είναι τέτοια ώστε οι υπερπίεσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του δοκιμίου να είναι ομοιόμορφες και οι τυχόν διαφορές τους από θέση σε θέση να εξισώνονται με την κίνηση του νερού των πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου, από θέσεις μεγαλύτερης πίεσης σε θέσεις μικρότερης πίεσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η επιβαλλόμενη παραμόρφωση στο δοκίμιο ήταν 4.5.% την ημέρα. Στη

δοκιμή ελεύθερης στράγγισης οι βαλβίδες παραμένουν ανοικτές και η πίεση του νερού της κυψέλης επίσης διατηρείται σταθερή. Πάλι το δοκίμιο κινείται προς το έμβολο με ταχύτητα αρκετά αργή, ώστε η πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου να παραμένει ομοιόμορφη σε όλο το μήκος του δοκιμίου και σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, ώστε το δοκίμιο να στραγγίζει ομοιόμορφα. Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση στο δοκίμιο ήταν 1.5% την ημέρα, προφανώς μικρότερη απ' αυτή στην αστράγγιστη φόρτιση. Τέλος στη στραγγιζόμενη δοκιμή με διατήρηση σταθερής μέσης ενεργού τάσης, πάλι οι βαλβίδες παραμένουν ανοικτές χωρίς όμως να είναι επιβεβλημένη η διατήρηση σταθερής πίεσης του νερού της κυψέλης. Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή εφαρμόζεται η συνθήκη $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3 = ct$ η οποία τηρείται καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η παραμόρφωση σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε ίση με 1.5% την ημέρα. Έτσι, αύξηση της σ_1' όπως και στην περίπτωση της ελεύθερης στράγγισης συνδυάζεται με μείωση της σ_3' . Το έμβολο συμπιέζει το δοκίμιο εφαρμόζοντας σε αυτό αποκλίνουσα τάση ($\sigma_1 - \sigma_3$). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι το έμβολο δέχεται την πίεση του νερού της κυψέλης ακόμα κι όταν δεν είναι σε επαφή με το δοκίμιο, πράγμα το οποίο προφανώς έχει συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς.

Κατά την αστράγγιστη φόρτιση που ο όγκος του δοκιμίου διατηρείται σταθερός, αν το δοκίμιο έχει τάση να συμπυκνωθεί, αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων και οι ενεργές τάσεις μειώνονται, ενώ αν έχει τάση να διογκωθεί, αναπτύσσονται υποπίεσεις πόρων και οι ενεργές τάσεις αυξάνονται. Η αξονική τάση αυξάνει με την παραμόρφωση του δοκιμίου με βαθμιαία μειούμενο ρυθμό και τελικώς το δοκίμιο παραμορφώνεται χωρίς περεταίρω αύξηση της κατακόρυφης τάσης. Η κατάσταση κατά την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή της αξονικής τάσης ορίζεται συμβατικά ως κατάσταση αστοχίας του δοκιμίου.

Κατά τη στραγγιζόμενη φόρτιση που οι πιέσεις του νερού των πόρων του δοκιμίου διατηρούνται σταθερές αναμένουμε συμπίεση του δοκιμίου εάν αυτό είναι κανονικά στερεοποιημένο ή αρχικά συμπίεση και στη συνέχεια διόγκωση εάν το δοκίμιο είναι ισχυρά προφορτισμένο. Η αξονική τάση αυξάνει με την παραμόρφωση του δοκιμίου και τελικώς το δοκίμιο παραμορφώνεται υπό σταθερή τάση σε μια τιμή σημαντικά μικρότερη της μέγιστης. Πάλι το σημείο στο οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή της αξονικής τάσης ορίζεται ως η κατάσταση αστοχίας του δοκιμίου.

Κατά τη στραγγιζόμενη φόρτιση υπό σταθερή μέση ενεργό τάση ισχύει ότι και στην απλή στραγγιζόμενη φόρτιση, εκτός από τη δέσμευση της σταθερής πίεσης του νερού της κυψέλης και αυτό για μπορεί να επιτευχθεί η συνθήκη $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3 = ct$.

Υπολογισμοί

Στην τριαξονική δοκιμή εξάγονται και αξιολογούνται τα εξής διαγράμματα

- Το διάγραμμα της αποκλίνουσας τάσης Δq σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση p'
- Το διάγραμμα της αποκλίνουσας τάσης Δq σε συνάρτηση με τη αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου ϵ_a .
- Το διάγραμμα της μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων Δu σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση ϵ_a στην περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης ή το διάγραμμα της ογκομετρικής παραμόρφωσης ϵ_v σε συνάρτηση με τη σχετική αξονική παραμόρφωση ϵ_a στην περίπτωση της στραγγιζόμενης φόρτισης.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή: το αξονικό φορτίο, η πίεση του νερού της κυψέλης, η πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου, οι ενδείξεις του εξωτερικού μηκυνσιόμετρου, αλλά και των εσωτερικών μετρητών παραμόρφωσης του δοκιμίου. Ακόμη έχοντας μετρήσει πριν την έναρξη του πειράματος τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου, το βάρος και το ποσοστό της υγρασίας (το οποίο δίνει πληροφορία για το δείκτη πόρων του δοκιμίου, $e = G_s \cdot w$) μπορούμε να υπολογίσουμε τα παρακάτω:

- Τον όγκο του δοκιμίου σε κάθε βήμα εφ' όσον μετράται η μεταβολή αυτού μέσω του μετρητή μεταβολής όγκου ενώ ο αρχικός όγκος είναι γνωστός από τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου. Έτσι σε κάθε βήμα γνωρίζουμε ότι:

$$V = V_0 - \Delta V$$

- Την αξονική παραμόρφωση. Για τον υπολογισμό αυτής χρησιμοποιούμε τους εσωτερικούς μετρητές παραμόρφωσης του δοκιμίου μέχρι την παραμόρφωση 2% όπου και θεωρούνται αξιόπιστοι ενώ για μεγαλύτερες παραμορφώσεις χρησιμοποιούμε το εξωτερικό μετρητή μετακίνησης του δοκιμίου. Έχοντας

μετρήσει την αρχική απόσταση των άκρων των εσωτερικών μετρητών και τη μεταβολή της, ΔL , κατά τη διάρκεια του πειράματος, μπορούμε να υπολογίσουμε την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου,:

$$\varepsilon_{\alpha} = \Delta L / L_0$$

- Τη μέση επιφάνεια του δοκιμίου θεωρώντας ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισής του, το δοκίμιο διατηρεί το κυλινδρικό του σχήμα. Για όλο το μήκος του δοκιμίου θεωρούμε μια μέση επιφάνεια η οποία κάθε φορά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = V / L$$

Το μήκος του δοκιμίου σε κάθε βήμα προκύπτει εύκολα καθώς γνωρίζουμε την αντίστοιχη σχετική παραμόρφωση.

- Την ορθή τάση που ασκείται στο δοκίμιο, γνωρίζοντας το αξονικό φορτίο P και την πίεση της κυψέλης σ_3 :

$$\sigma_1 = P / A + \sigma_3$$

- Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση

$$E = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon_{\alpha}$$

4.2.5. Συγκεντρωτικός πίνακας τριαξονικών δοκιμών

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλες οι τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αναφέρονται η ημερομηνία έναρξης του πειράματος, η συσκευή στην οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, η τάση στερεοποίησης του δοκιμίου πριν τη διάτμηση, ο βαθμός προφόρτισης OCR και οι συνθήκες στράγγισης του δοκιμίου.

α/α δοκιμής	Ημερομηνία έναρξης	συσκευή	τάση στερεοποίησης (kPa)	OCR	στράγγιση
1	13/12/2013	χαμηλών πιέσεων 1	94	1	εμποδιζόμενη
2	5/2/2014	χαμηλών πιέσεων 1	153	2	εμποδιζόμενη
3	24/12/2013	χαμηλών πιέσεων 2	203	1	εμποδιζόμενη
4	28/1/2014	χαμηλών πιέσεων 1	302	1	εμποδιζόμενη
5	1/4/2014	χαμηλών πιέσεων 2	301	1	εμποδιζόμενη
6	9/5/2014	χαμηλών πιέσεων 3	305	1	εμποδιζόμενη
7	25/7/2014	χαμηλών πιέσεων 3	298	1	εμποδιζόμενη
8	18/7/2014	χαμηλών πιέσεων 3	402	1	εμποδιζόμενη
9	10/4/2014	χαμηλών πιέσεων 2	98	2	ελεύθερη, διατήρηση σταθερής μέσης ενεργού τάσης
10	10/7/2014	ψηλών πιέσεων	209	1	ελεύθερη
11	16/7/2014	χαμηλών πιέσεων 2	307	1	ελεύθερη, διατήρηση σταθερής μέσης ενεργού τάσης
12	27/7/2014	υψηλών πιέσεων	402	1	ελεύθερη

Πίνακας 4.2.1: Τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

5 Αποτελέσματα πειραμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των έντεκα δοκιμών στο συμπιεσόμετρο και δώδεκα δοκιμών στην τριαξονική συσκευή που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

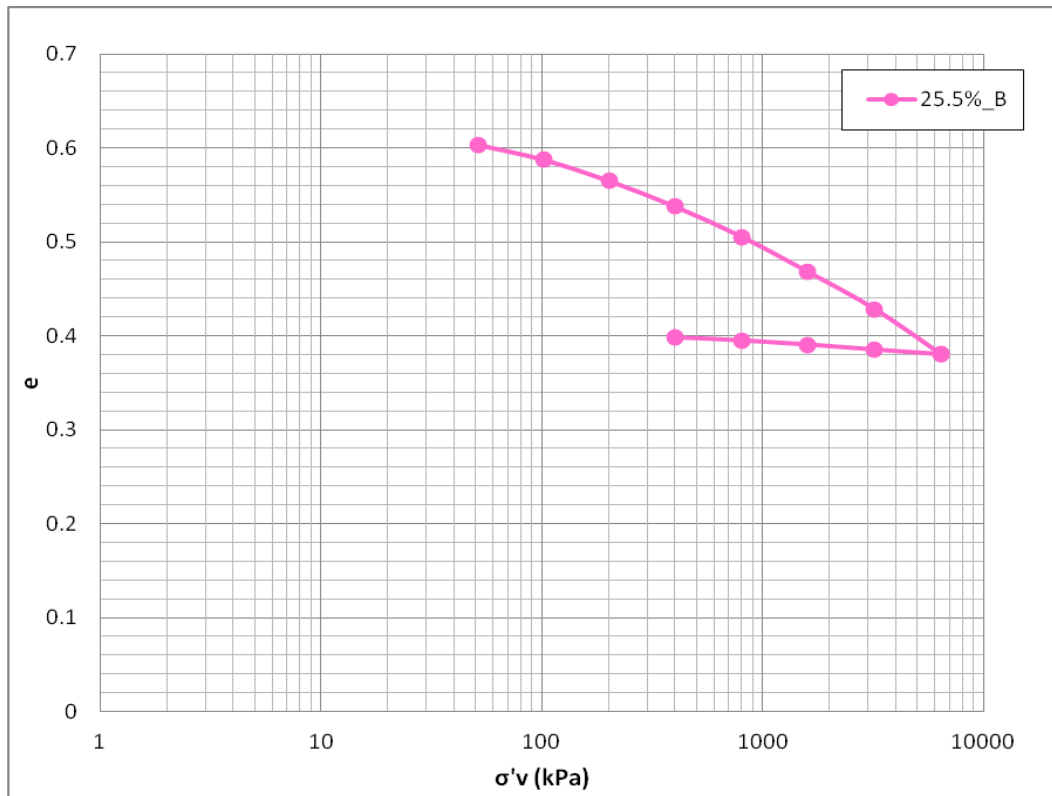
5.1. Δοκιμές συμπιεσομέτρου

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε πείραμα σε διαγράμματα που έχουν στον κατακόρυφο άξονα το δείκτη πόρων (e) και στον οριζόντιο άξονα το λογάριθμο της κατακόρυφης ενεργού τάσης ($\log \sigma_v'$). Για κάθε δοκιμή ακολουθούν τα κανονικοποιημένα διαγράμματα που έχουν στον κατακόρυφο άξονα το δείκτη κενών I_v και στον οριζόντιο άξονα το λογάριθμο της κατακόρυφης ενεργού τάσης ($\log \sigma_v'$), ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται και η πειραματική καμπύλη του Burland. Ξεχωριστά παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα δοκιμές με ίση ή παρεμφερή σχετική αρχική υγρασία. Ακόμη παρουσιάζονται όλες οι δοκιμές συγκεντρωμένες σε ένα διάγραμμα, καθώς και σε ένα ακόμη κοινό διάγραμμα το οποίο περιλαμβάνει και δοκιμές σε όμοιο υλικό που είχαν συντελεστεί σε παλαιότερες εργασίες. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται στα παρακάτω διαγράμματα δίνει την αρχική υγρασία και τον τύπο του δοκιμίου του πειράματος

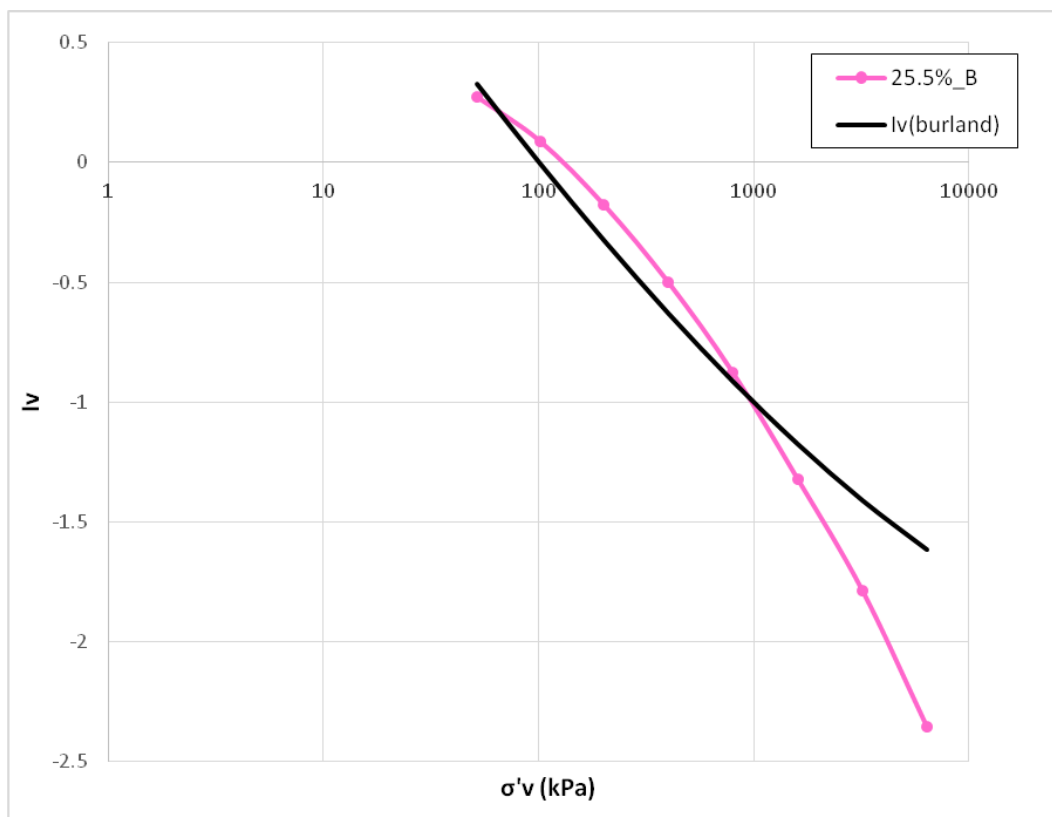
(π.χ. 24%_A αναφέρεται στο δοκίμιο μάργας αρχικής σχετικής υγρασίας $w_0=24\%$ και τύπου A. Τα δοκίμια τύπου A και B έχουν τα χαρακτηριστικά που έχουν οριστεί παραπάνω ενώ για τα φυσικά δοκίμια χρησιμοποιείται ο συμβολισμός N).

5.1.1 Αναζυμωμένα δοκίμια

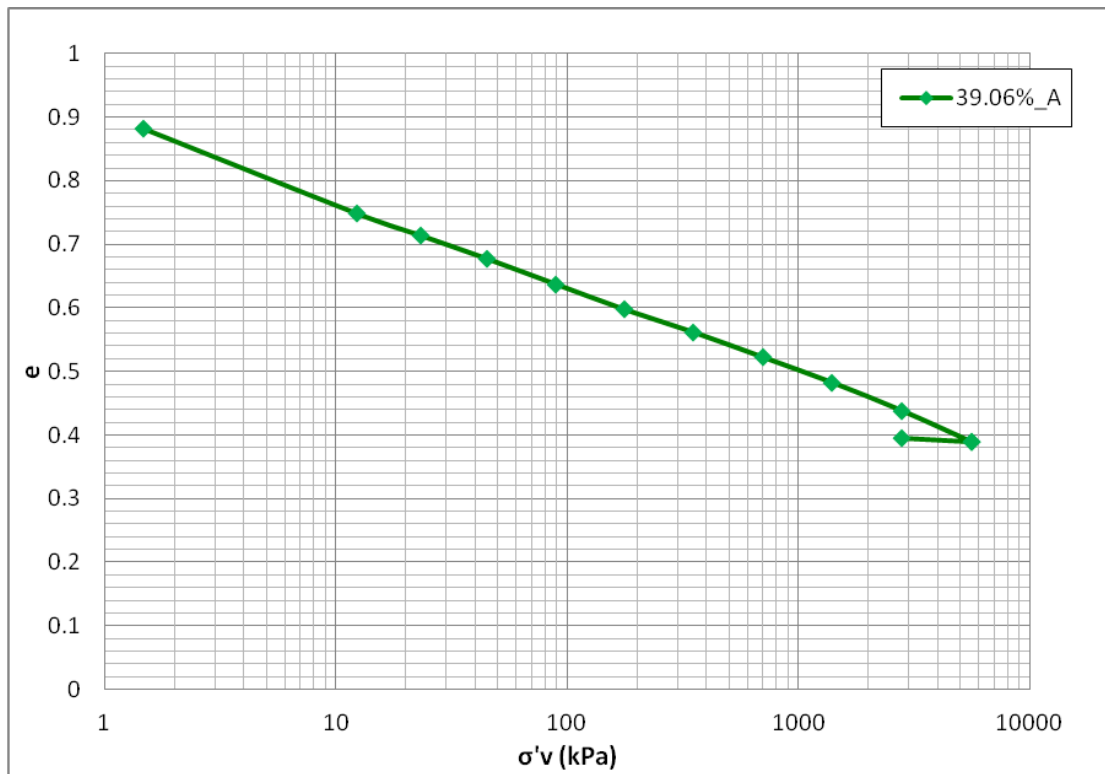
Πραγματοποιήθηκαν έξι δοκιμές σε αναζυμωμένα δοκίμια μάργας του Ισθμού της Κορίνθου για ένα εύρος αρχικών υγρασιών που κυμαίνεται από 25.35% έως 44.5%. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες ονομαστικής διαμέτρου 50mm και 75mm ενώ η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε ήταν 6396.7 kPa.



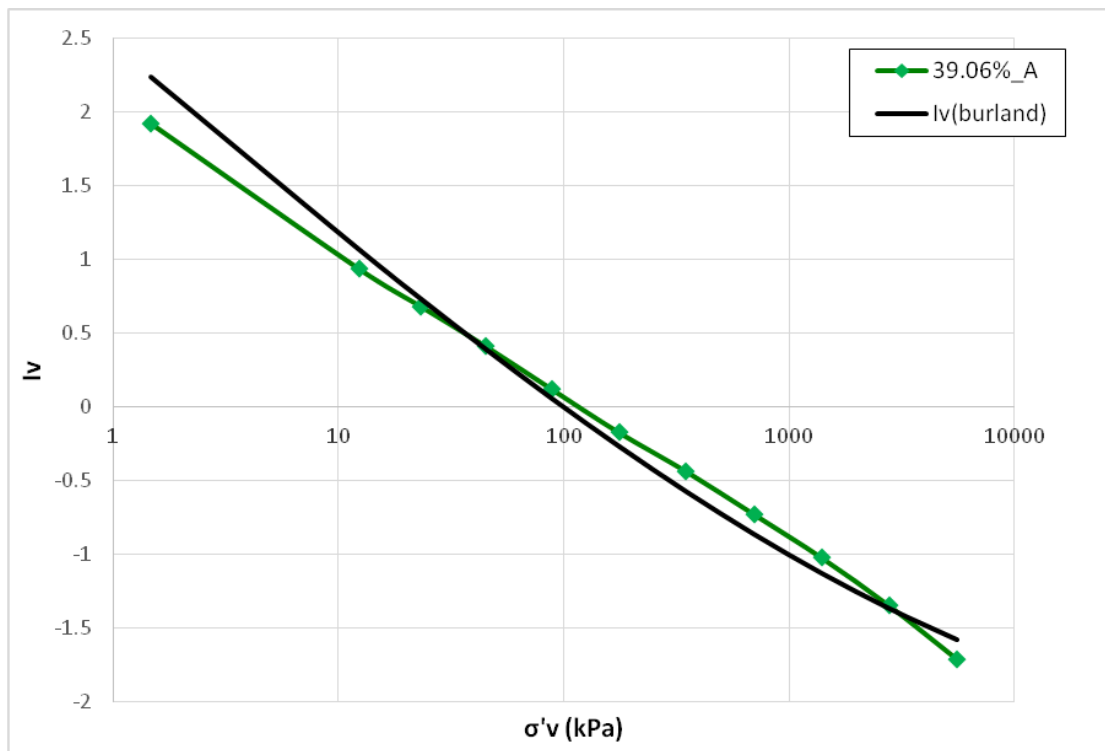
Διάγραμμα 5.1.1: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=25.5\%$



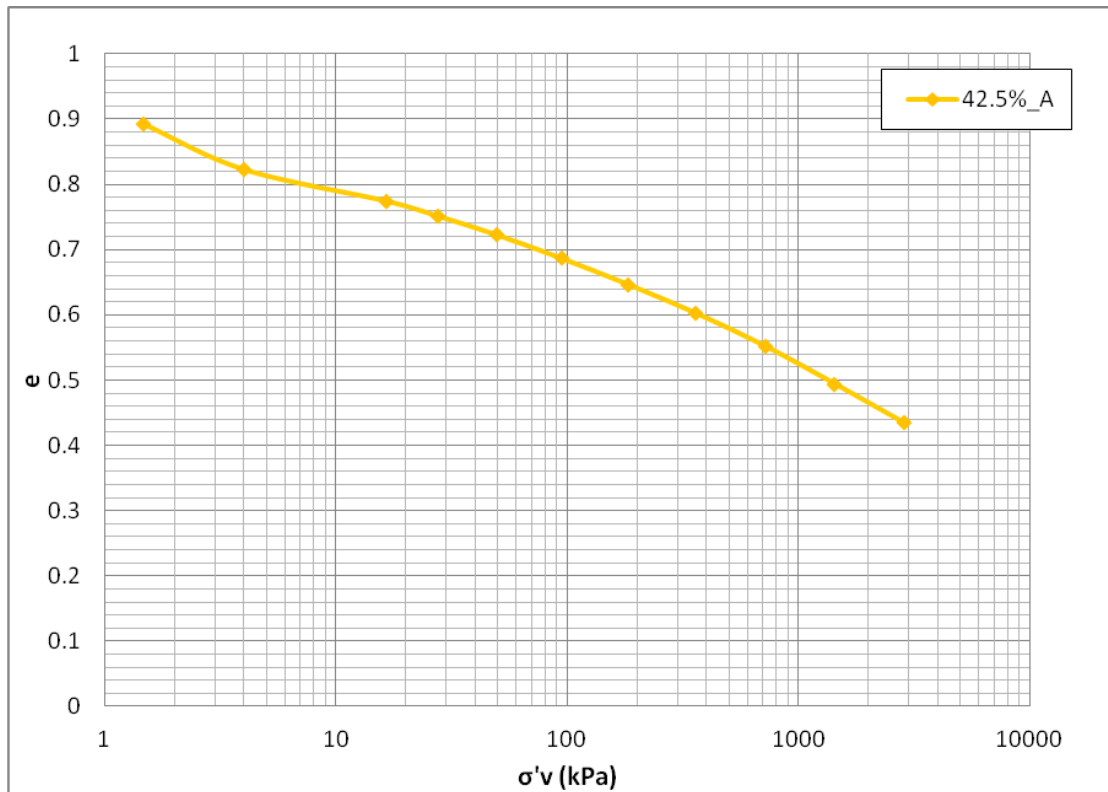
Διάγραμμα 5.1.2: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=25.5\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



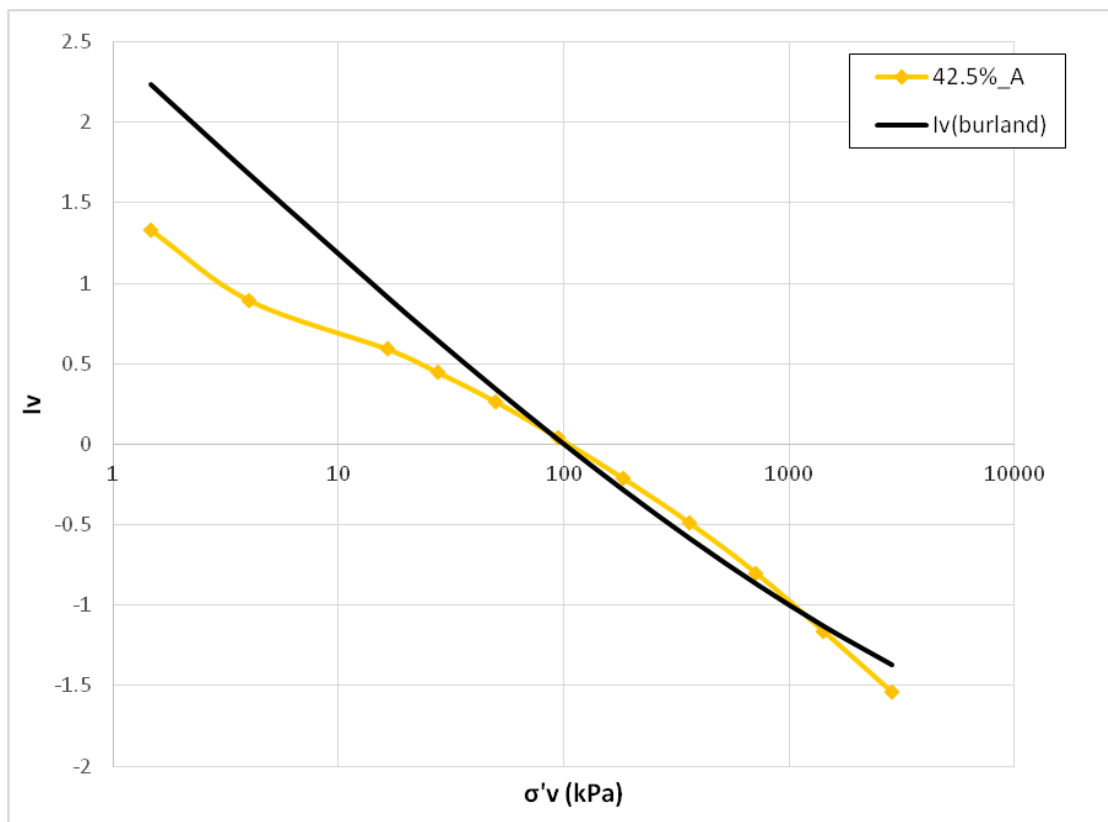
Διάγραμμα 5.1.3: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=39.06\%$



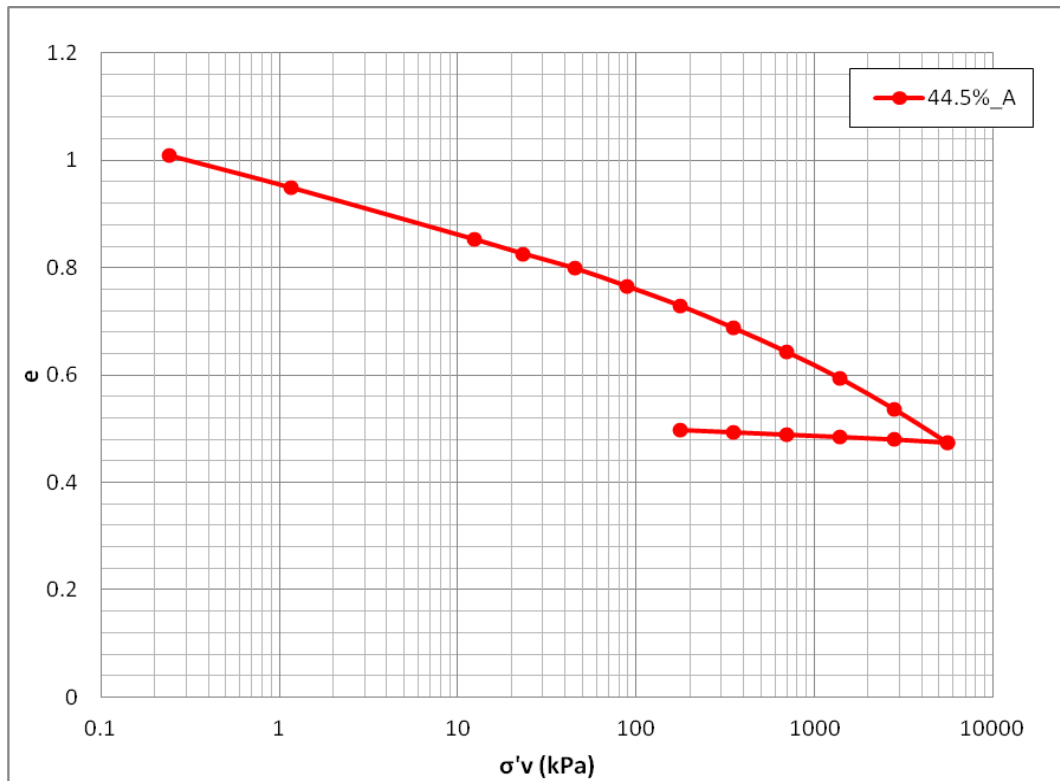
Διάγραμμα 5.1.4: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=39.06\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



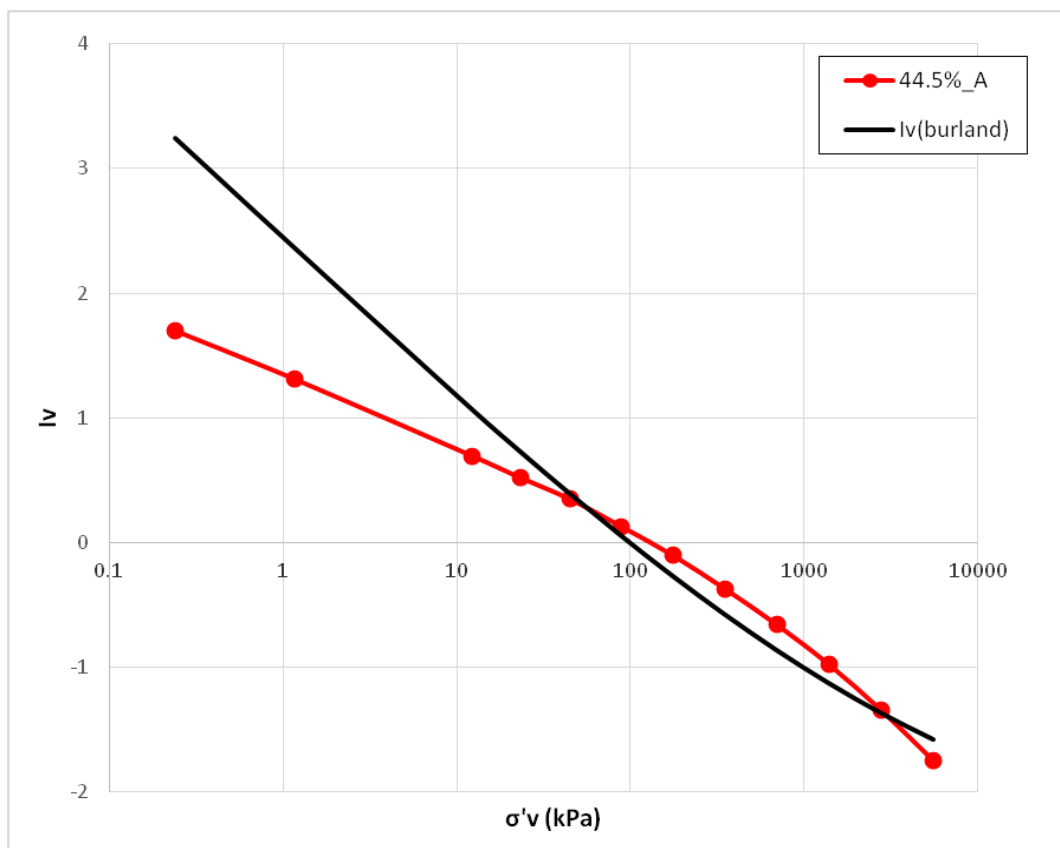
Διάγραμμα 5.1.5: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=42.5\%$



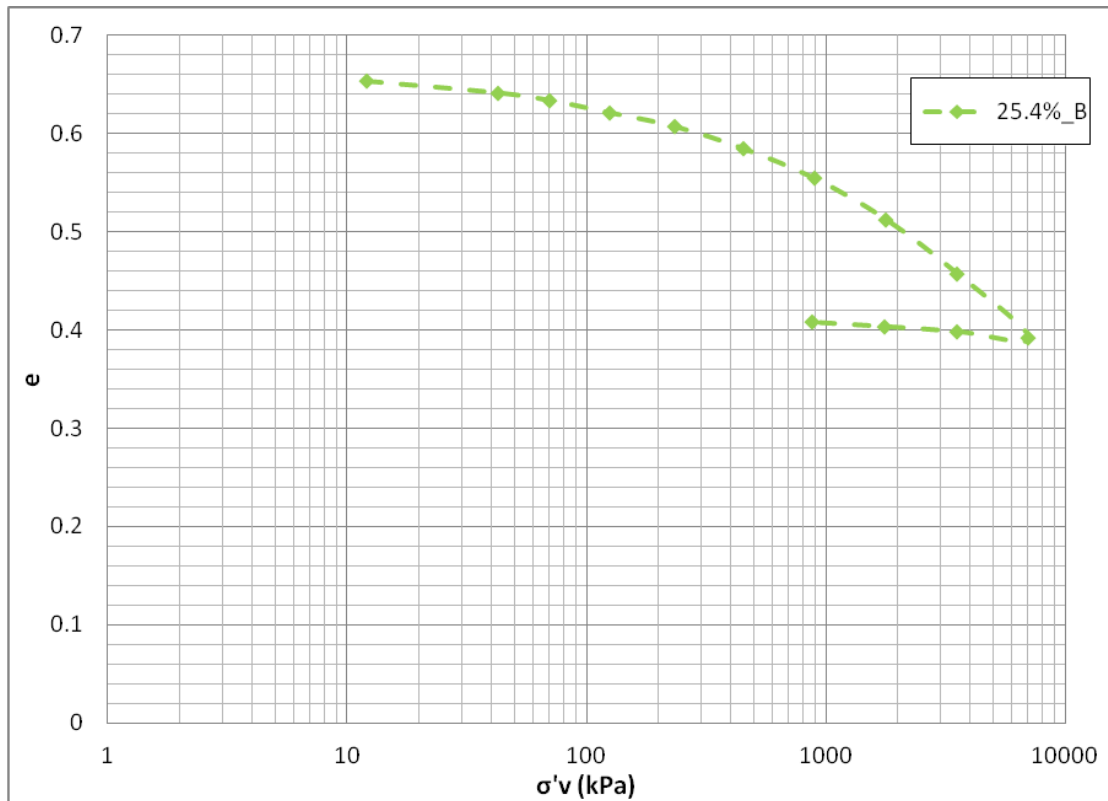
Διάγραμμα 5.1.6: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=42.5\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



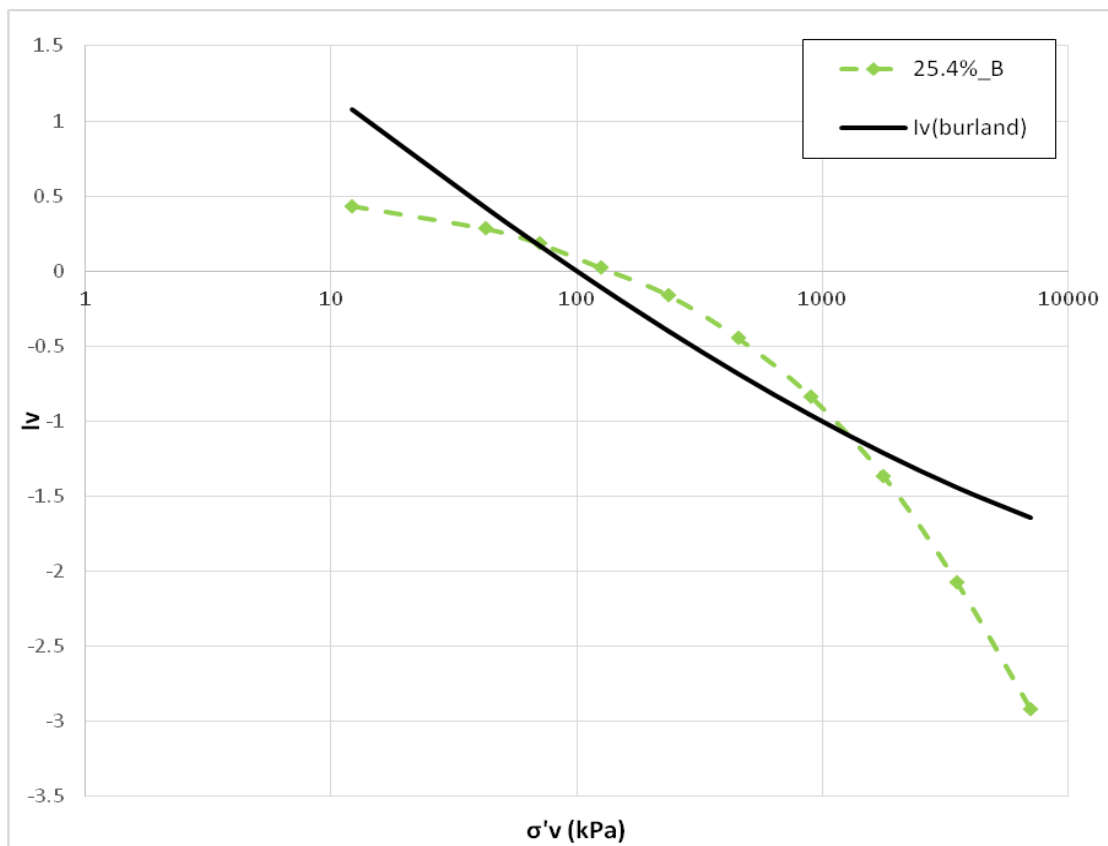
Διάγραμμα 5.1.7: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=44.5\%$



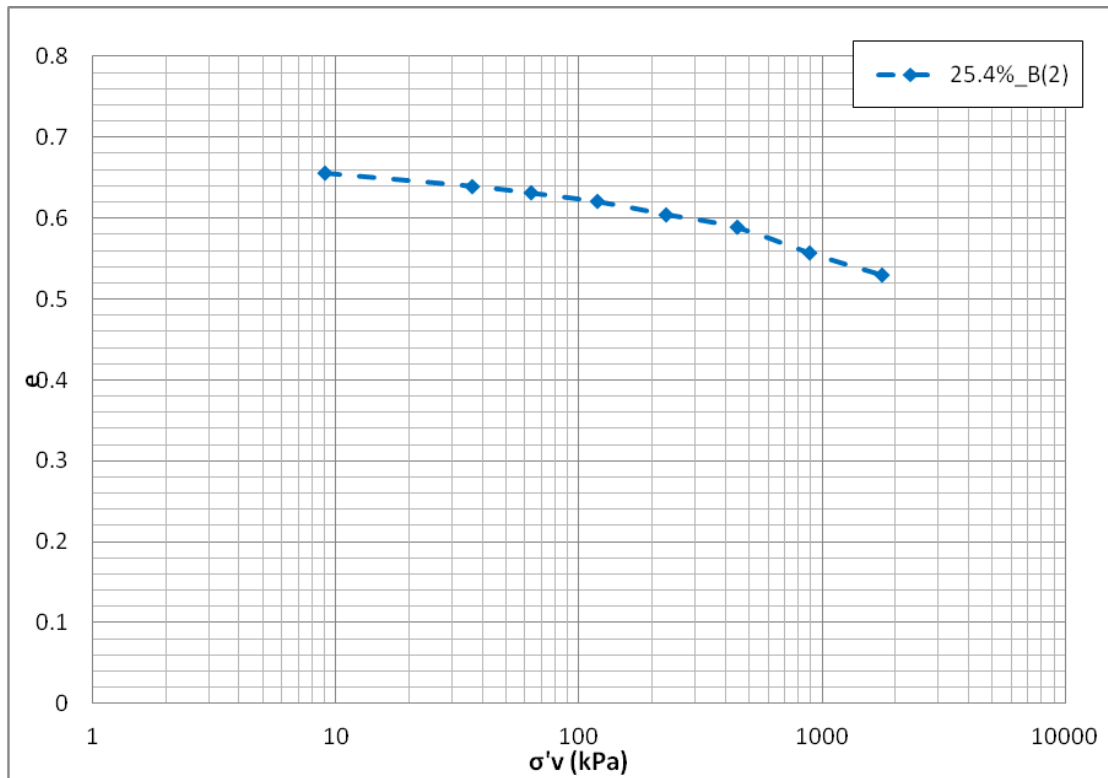
Διάγραμμα 5.1.8: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=44.5\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



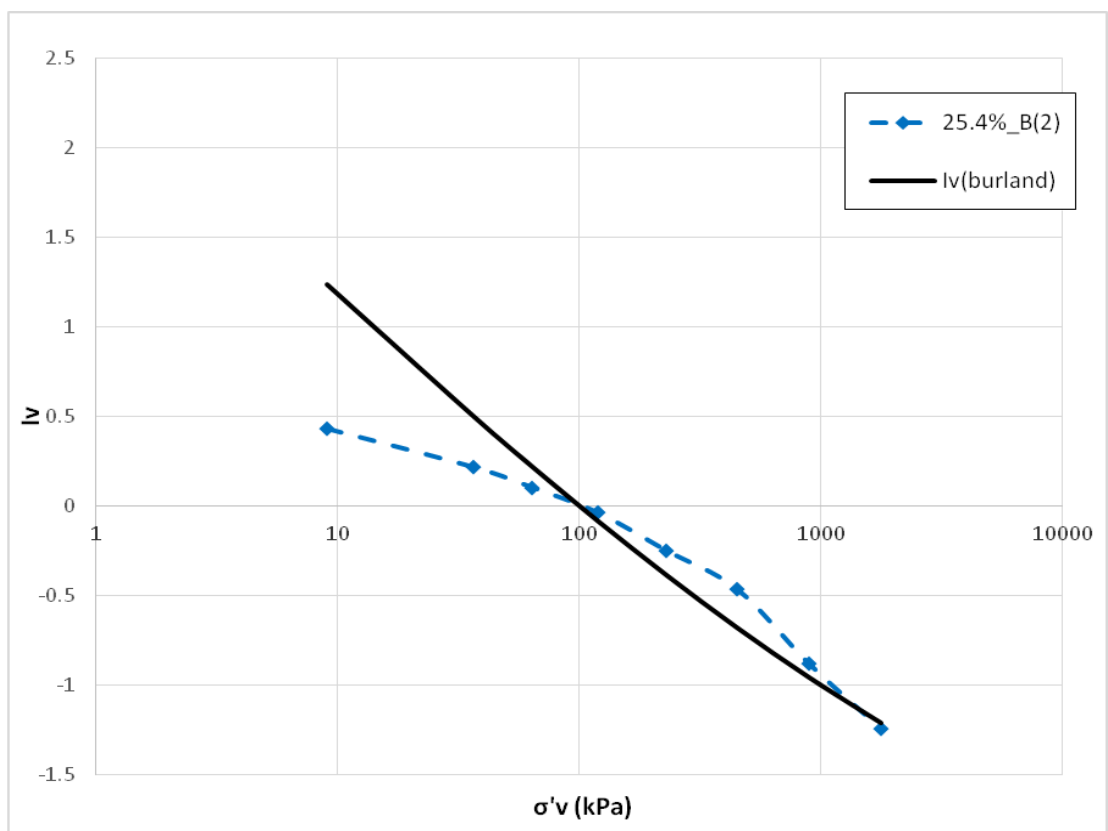
Διάγραμμα 5.1.9: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=25.4\%$



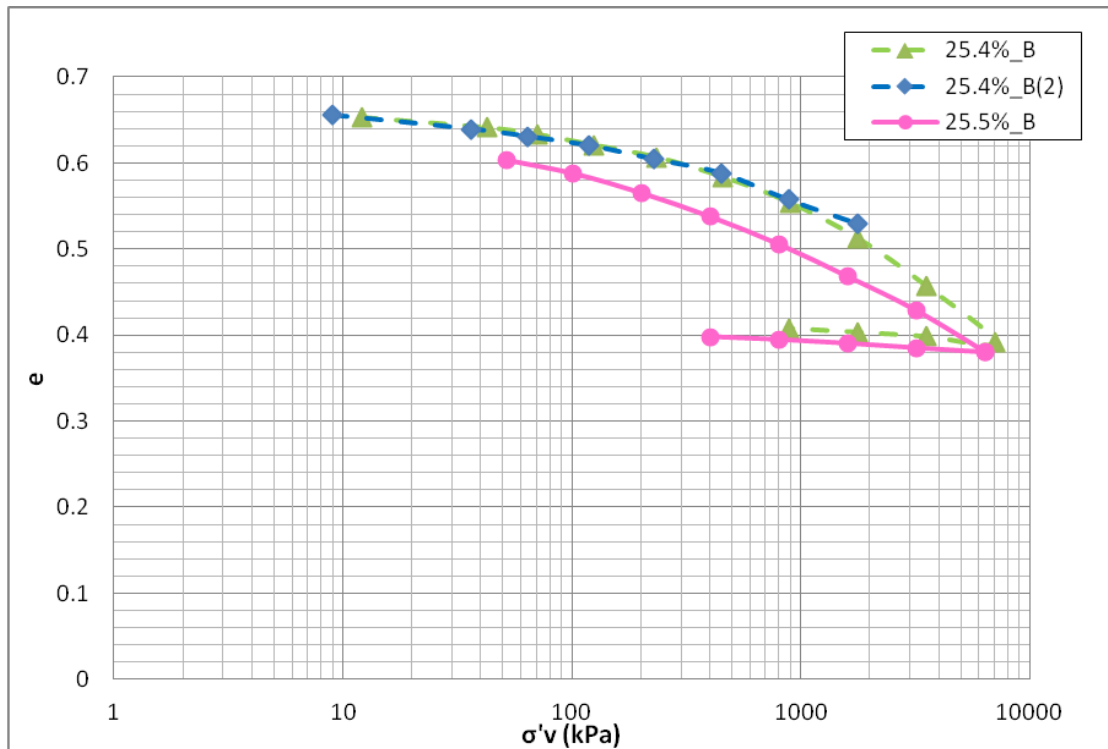
Διάγραμμα 5.1.10: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=25.4\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



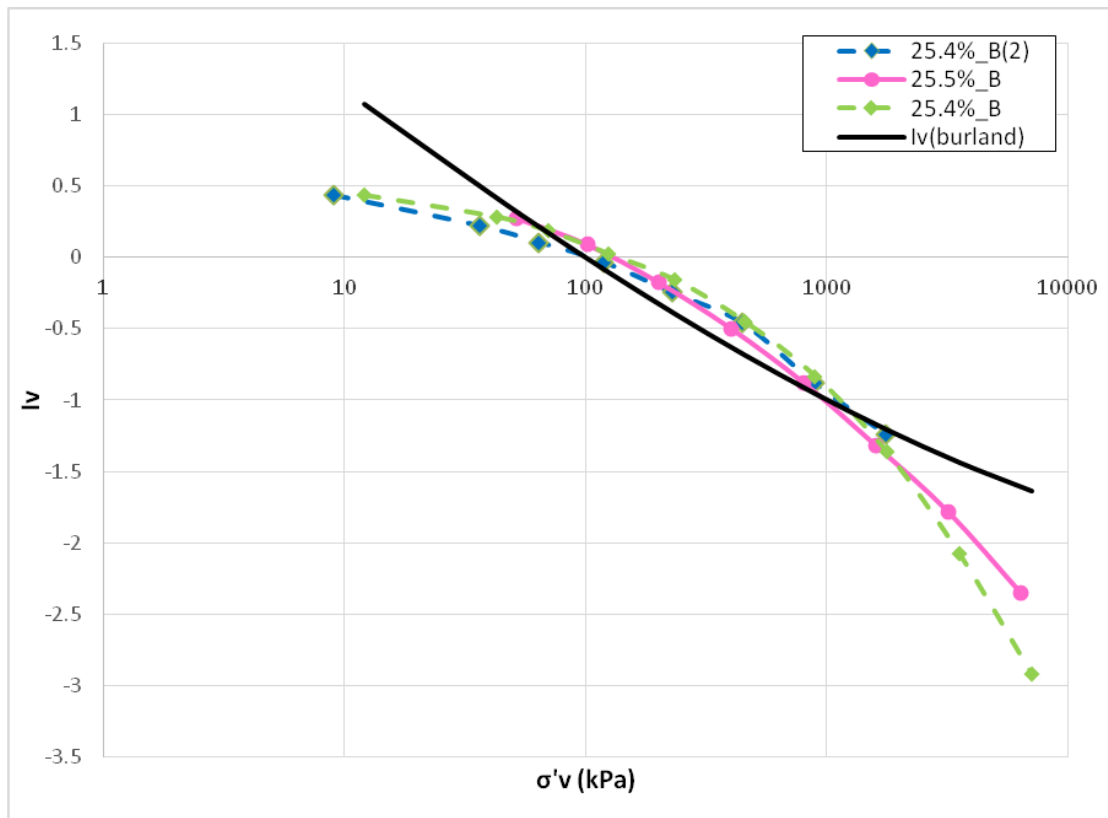
Διάγραμμα 5.1.11: δεύτερη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=25.4\%$



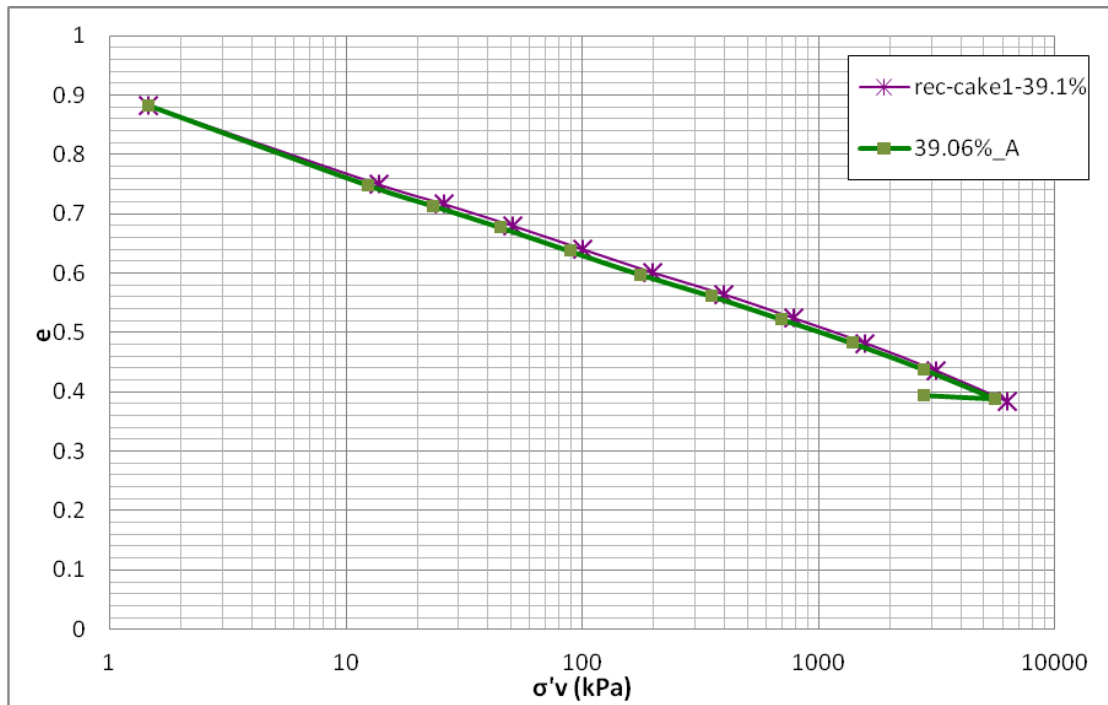
Διάγραμμα 5.1.12: δεύτερη κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=25.4\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



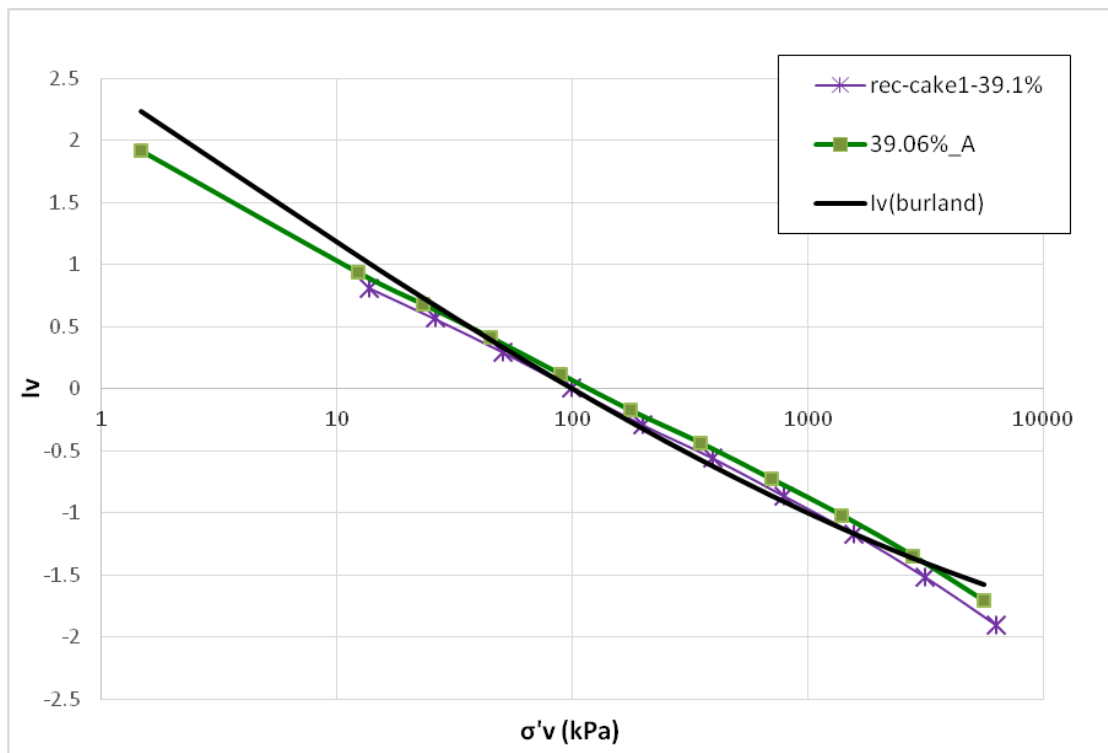
Διάγραμμα 5.1.13: σύγκριση των πειραματικών καμπυλών στερεοποίησης των ανωτέρω πειραμάτων με παρεμφερείς υγρασίες 25.5% και 25.4%.



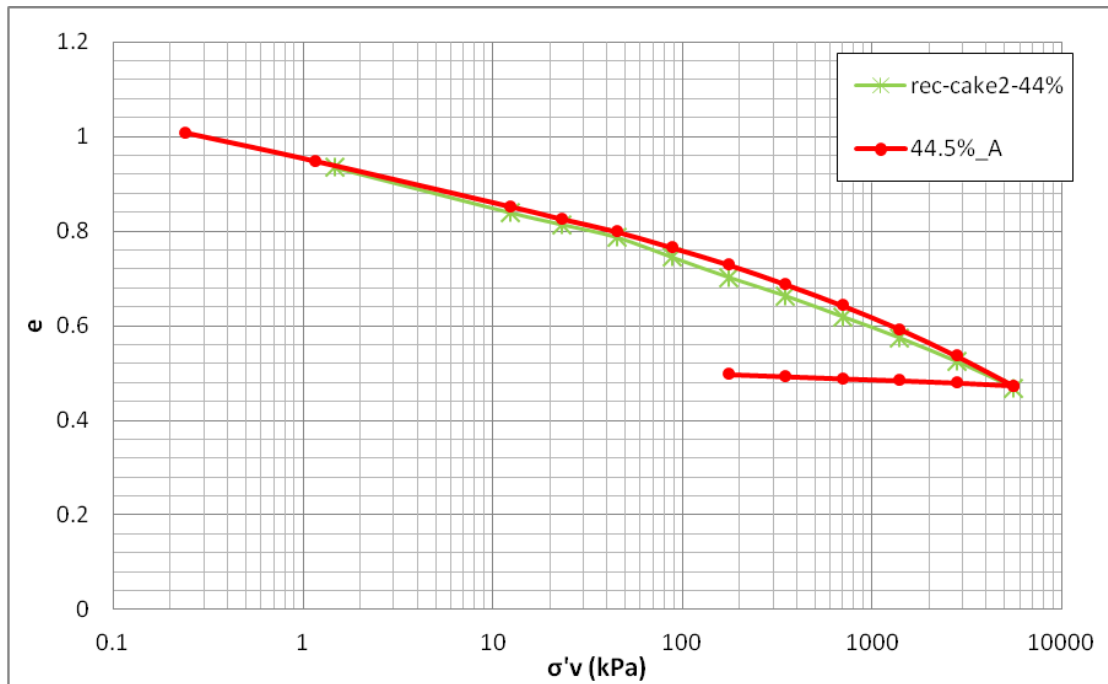
Διάγραμμα 5.1.14: σύγκριση των κανονικοποιημένων πειραματικών καμπυλών στερεοποίησης των ανωτέρω πειραμάτων με παρεμφερείς υγρασίες 25.5% και 25.4%.



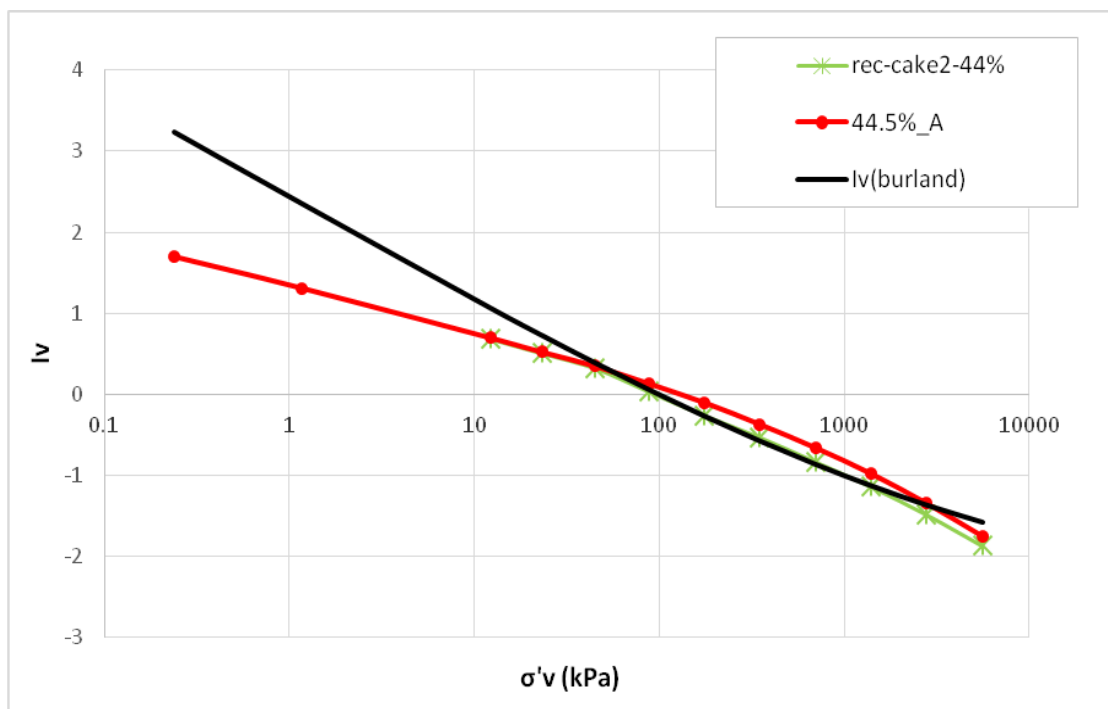
Διάγραμμα 5.1.15: σύγκριση την πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 39% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με ίση αρχική υγρασία.



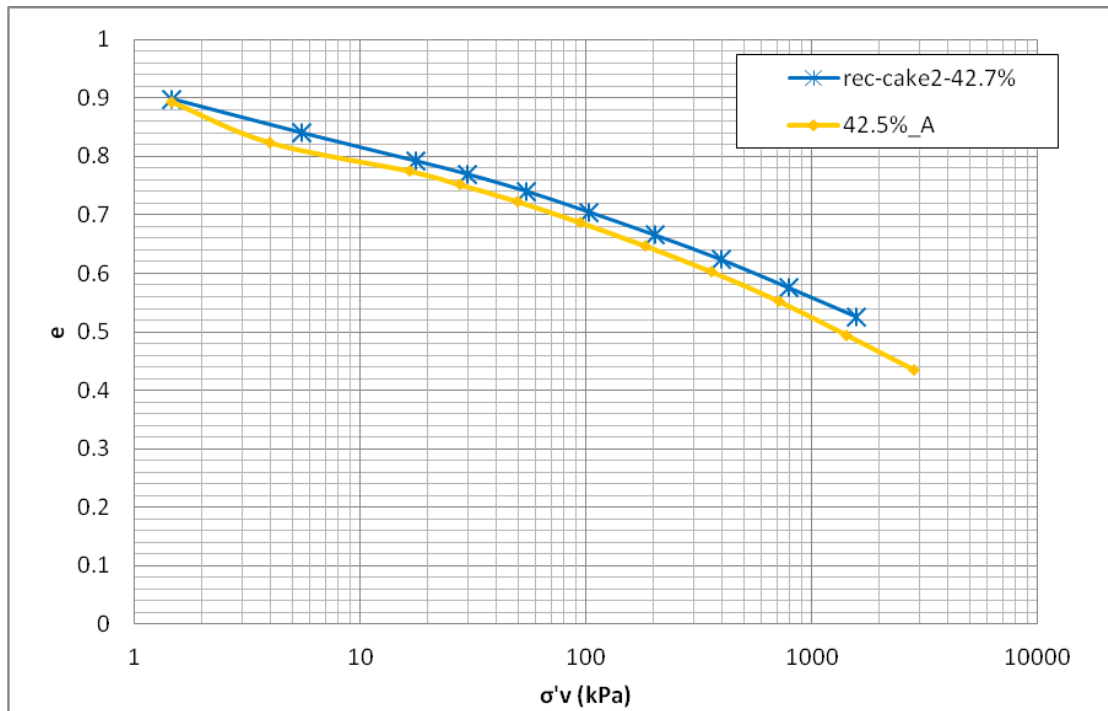
Διάγραμμα 5.1.16: σύγκριση της κανονικοποιημένης πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 39% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με ίση αρχική υγρασία.



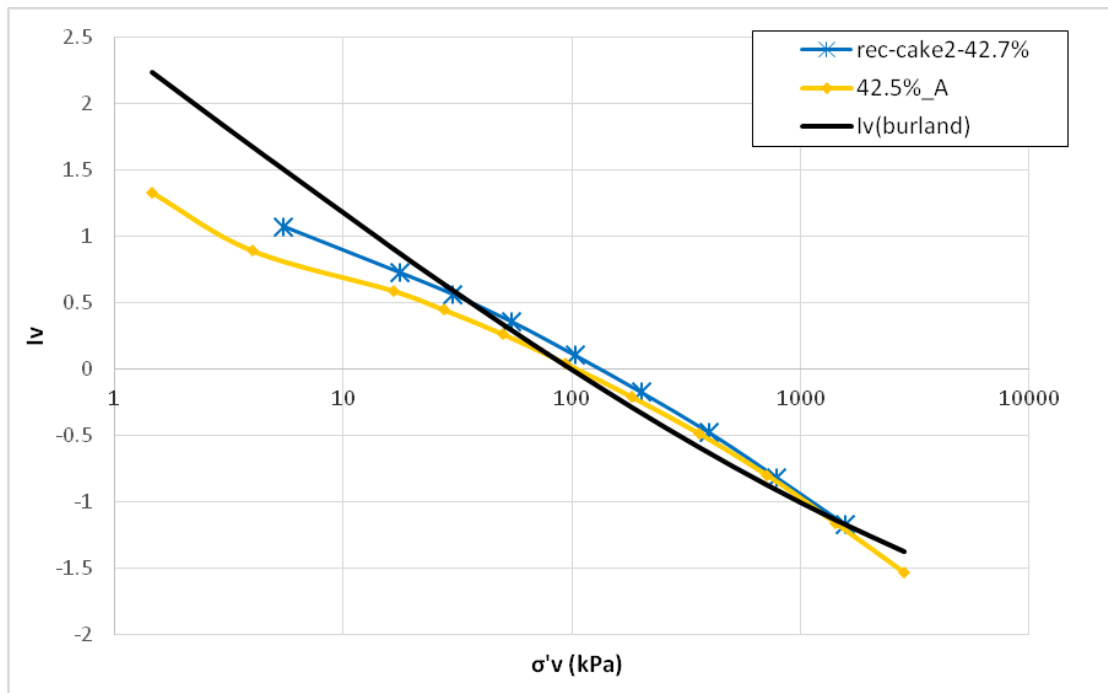
Διάγραμμα 5.1.17: σύγκριση την πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 44.5% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με ίση περίπου αρχική υγρασία.



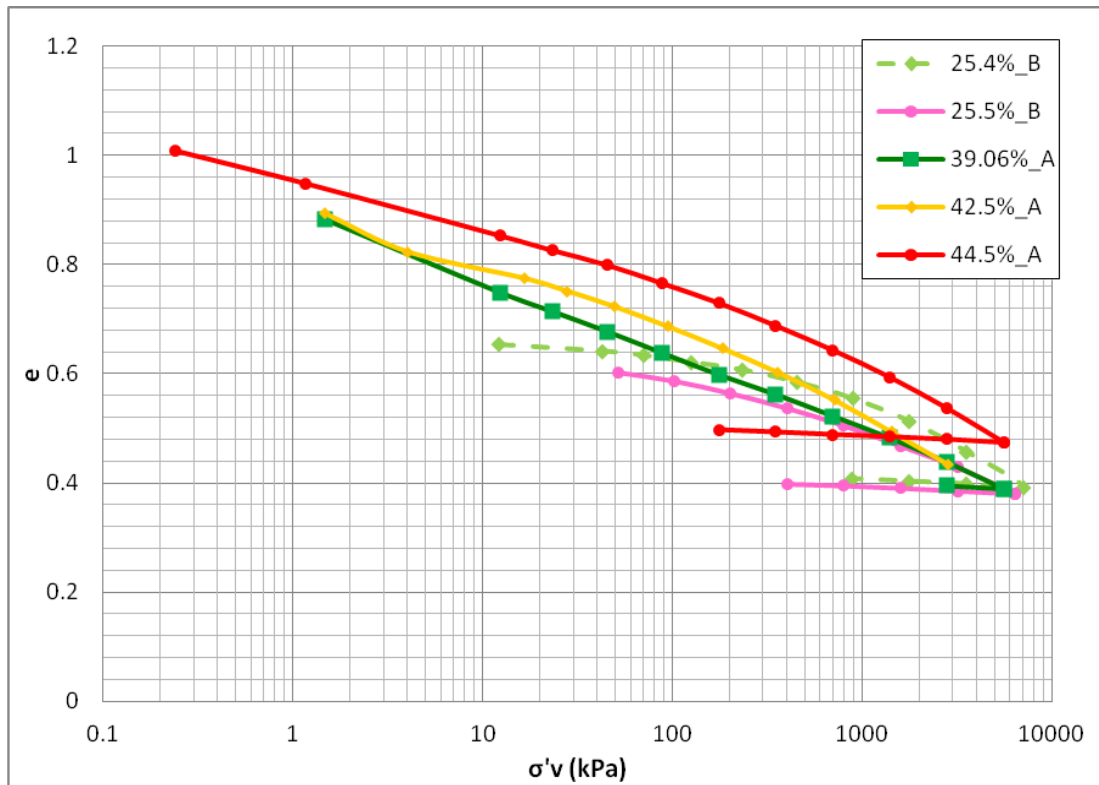
Διάγραμμα 5.1.18: σύγκριση της κανονικοποιημένης πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 44.5% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με ίση περίπου αρχική υγρασία.



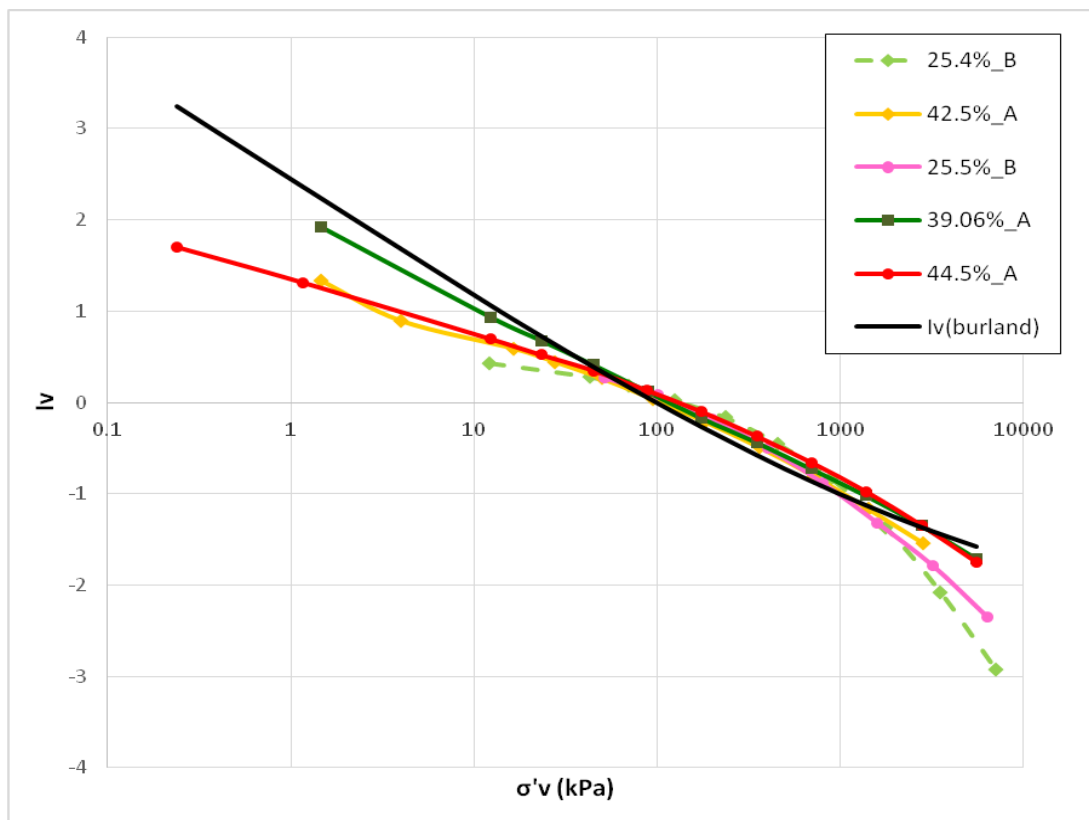
Διάγραμμα 5.1.19: σύγκριση την πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 42.5% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με ίση περίπου αρχική υγρασία.



Διάγραμμα 5.1.20: σύγκριση της κανονικοποιημένης πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 42.5% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με ίση περίπου αρχική υγρασία.



Διάγραμμα 5.1.21: πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 5.1.22: κανονικοποιημένες πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν.

Οι καμπύλες στερεοποίησης των αναζυμωμένων δοκιμίων εμφανίζουν όμοια μεταξύ τους μορφή. Αρχικά παρουσιάζουν πολύ ήπια κλίση, η οποία ακολουθείται από έντονη καμπυλότητα, πράγμα που θυμίζει προφορτισμένα υλικά.

Τα αποτελέσματα για τα δοκίμια τύπου Α και Β δεν παρουσιάζουν κάποια αξιοσημείωτη διαφορά, ενώ η κλίση του κλάδου αποφόρτισης ήταν, όπως αναμενόταν, πολύ μικρή.

Για τα αναζυμωμένα δοκίμια τύπου Β παρατηρείται αλλαγή κλίσης στη μέγιστη τάση προφόρτισής τους (περίπου 200 kPa).

Από τις δοκιμές που επαναλήφθηκαν και από τις συγκρίσεις των καμπυλών δοκιμίων ίσης περίπου αρχικής υγρασίας, φαίνεται η ταύτιση των καμπυλών, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα και την επαναληψιμότητα της πειραματικής διαδικασίας. Παρατηρείται επίσης, ότι για διαφορετικά ποσοστά αρχικής περιεχόμενης υγρασίας, υπάρχει παράλληλη μετάθεση των καμπυλών που για το μεγαλύτερο εύρος τάσεων δεν συγκλίνουν, παρά μόνο για πολύ μεγάλες τάσεις, της τάξεως των 6000 kPa. Η συμπεριφορά αυτή παραπέμπει πιο πολύ σε συμπεριφορά άμμου, ενώ σε μεμονομένα σημεία θυμίζει καμπύλη αναζυμωμένης αργίλου. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στην κοκκομετρία του υλικού, όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, δηλαδή στο ότι η μάργα του Ισθμού της Κορίνθου είναι μία ιλύς με μικρό ποσοστό αργλικών προσμίξεων.

Για τις κανονικοποιημένες καμπύλες δεν παρατηρείται ταύτιση με τη θεωρητική καμπύλη του Burland. Διαφέρουν από τις κανονικοποιημένες καμπύλες για τυπικές αργίλους, οι οποίες είναι σχεδόν ευθείες, καθώς παρουσιάζουν έντονη καμπυλότητα. Οι κανονικοποιημένες καμπύλες παρουσιάζουν έντονη καμπυλότητα για τάσεις μεγαλύτερες των 100 kPa, ενώ για μικρότερες τάσεις είναι σχεδόν ευθείες.

Οι καμπύλες αυτές αποκλίνουν μεταξύ τους για τάσεις μικρότερες των 50 kPa και μεγαλύτερες των 1000 kPa, ενώ ταυτίζονται για ενδιάμεσες τιμές τάσεων.

Έτσι, δε συγκλίνουν σε κανένα σημείο με τη θεωρητική καμπύλη του Burland.

Για τάσεις μικρότερες των 80 kPa και μεγαλύτερες από 1500 kPa ο δείκτης κενών είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της θεωρητικής καμπύλης του Burland, ενώ για τις ενδιάμεσες τιμές τάσεων έχουν μεγαλύτερο δείκτη κενών από αυτή.

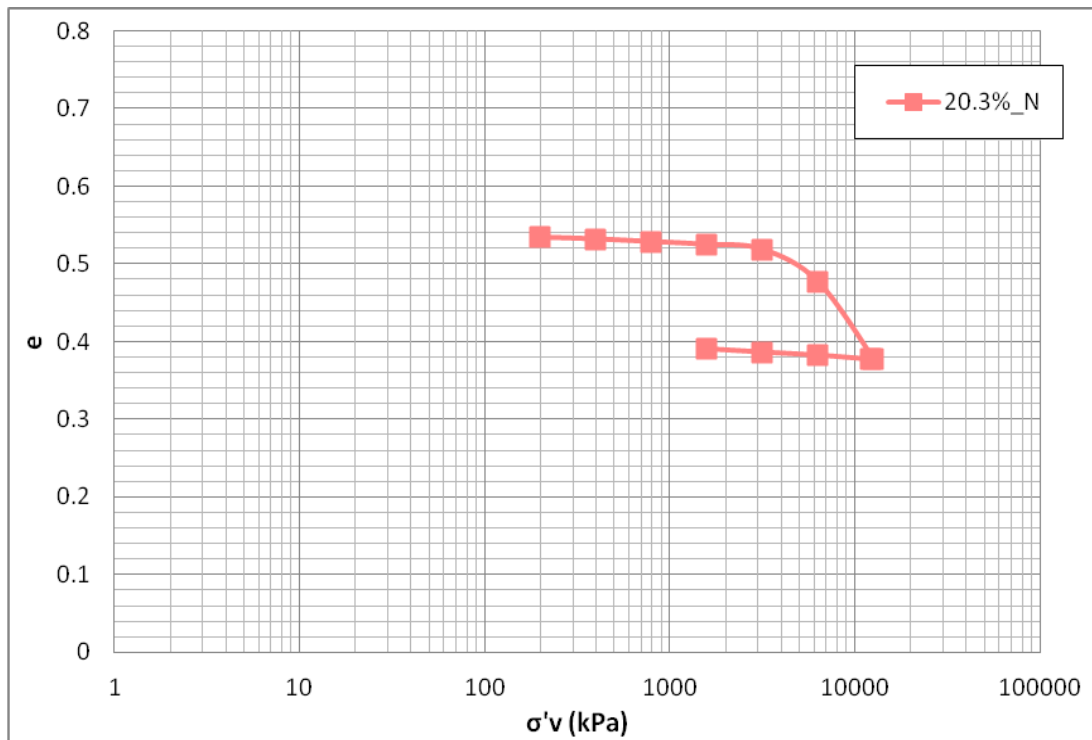
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται για το σύνολο των δοκιμών συμπίεστρον σε αναζυμωμένα δοκίμια, οι τιμές των σταθερών συμπίεστότητας, δηλαδή C_c^* , C_s^* , e^*_{100} , e^*_{1000} , όπως υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις των πειραμάτων.

α/α δοκιμής	Ημερομηνία έναρξης	Τύπος δοκιμίου	Αρχική υγρασία	e^*_{100}	e^*_{1000}	C_c^*	C_s^*
1	7/6/2013	B	25.56%	0.580	0.495	0.085	0.011
2	8/5/2013	A	39.06%	0.621	0.485	0.136	0.012
3	27/5/2013	A	42.50%	0.680	0.520	0.16	-
4	24/6/2013	A	44.50%	0.745	0.590	0.155	0.018
5	4/7/2014	B	25.35%	0.619	0.541	0.078	0.017
6	23/7/2014	B	25.46%	0.623	0.548	0.075	-

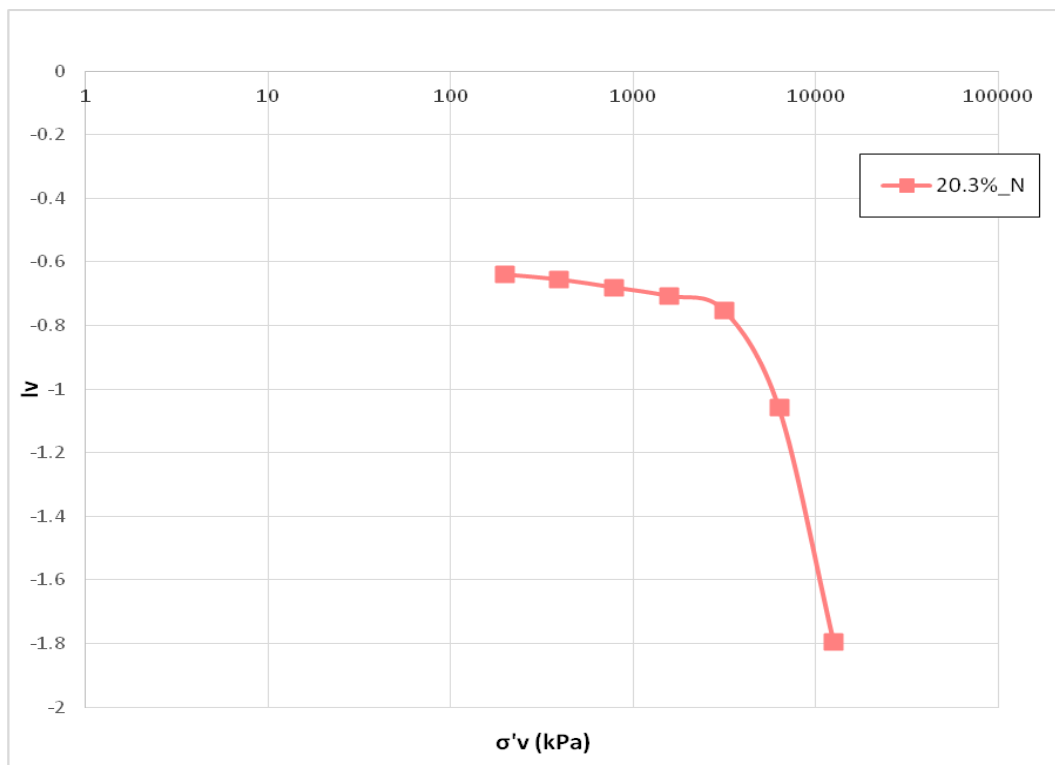
Πίνακας 5.1.1 : σταθερές εγγενούς συμπίεστότητας

5.1.2 Αδιατάρακτα δοκίμια

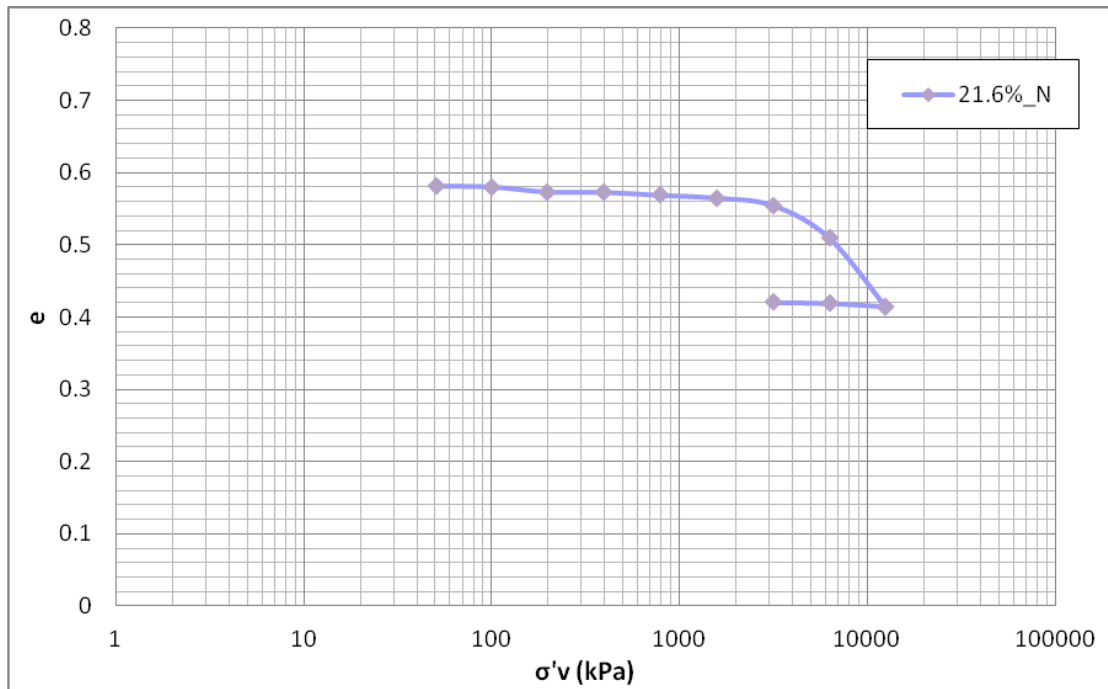
Πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές σε φυσικά δοκίμια με τις αρχικές υγρασίες που μετρήθηκαν να είναι 20.3%, 21.4%, 21.6% και 22.3% αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες ονομαστικής διαμέτρου 50mm και 75mm, ενώ η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε ήταν 12561.7kPa. Για την κανονικοποίηση των διαγραμμάτων των αδιατάρακτων δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης $I_v = (e - e^*_{100}) / (e^*_{100} - e^*_{1000})$ με τις τιμές $e^*_{100} = 0.621$ και $e^*_{1000} = 0.485$ να προκύπτουν από την καμπύλη του αναζυμωμένου υλικού με αρχική υγρασία 39.06%, η οποία θεωρήθηκε πιο αντιπροσωπευτική καθώς συμπίπτει απόλυτα με τις καμπύλες των δοκιμών τύπου B για την αρχική τάση στερεοποίησης στο μεγάλο συμπίεστρο 200 kPa.



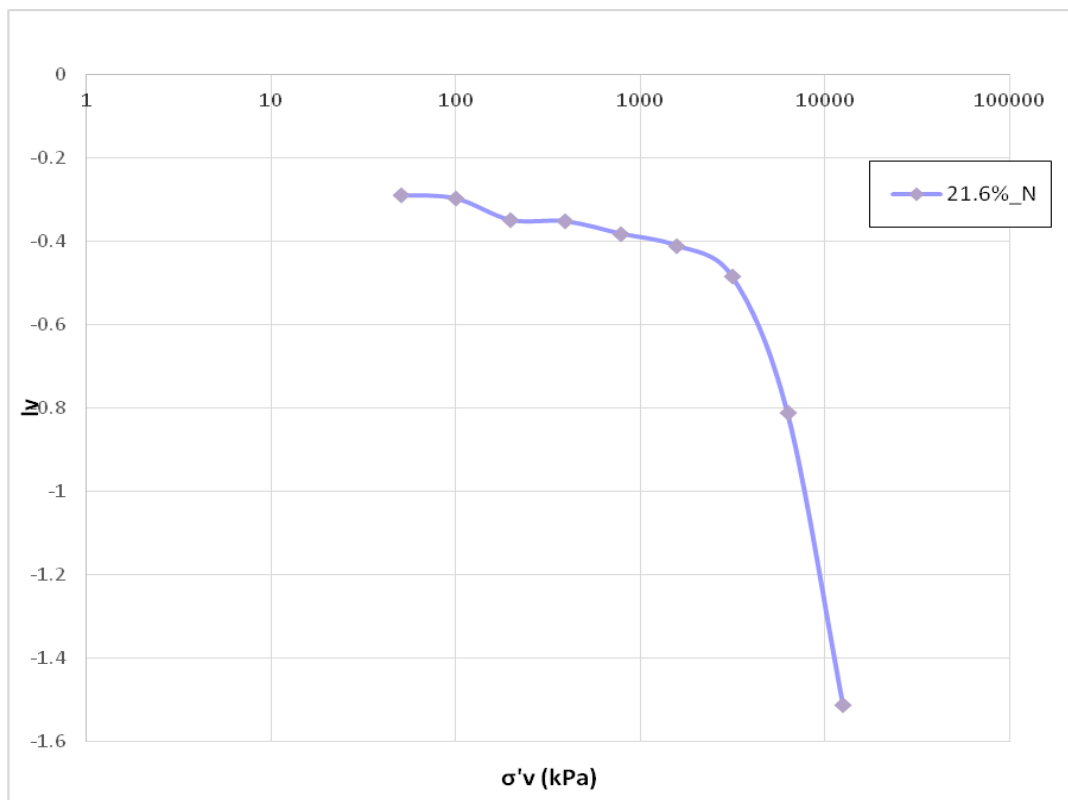
Διάγραμμα 5.1.23: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=20.3\%$



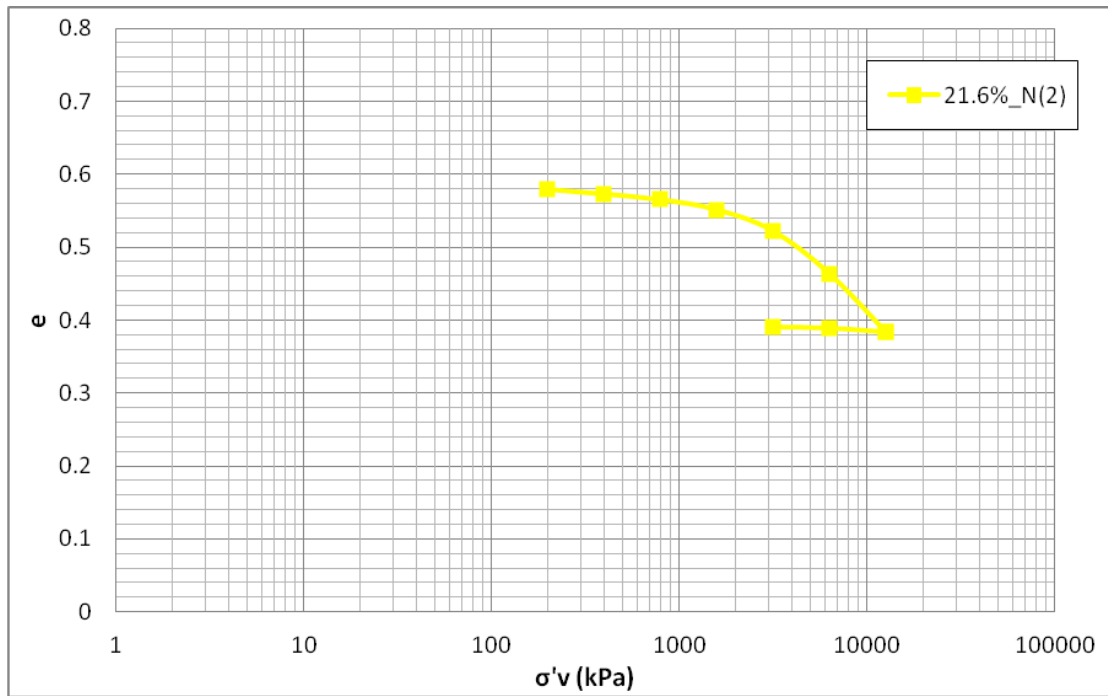
Διάγραμμα 5.1.24: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=20.3\%$



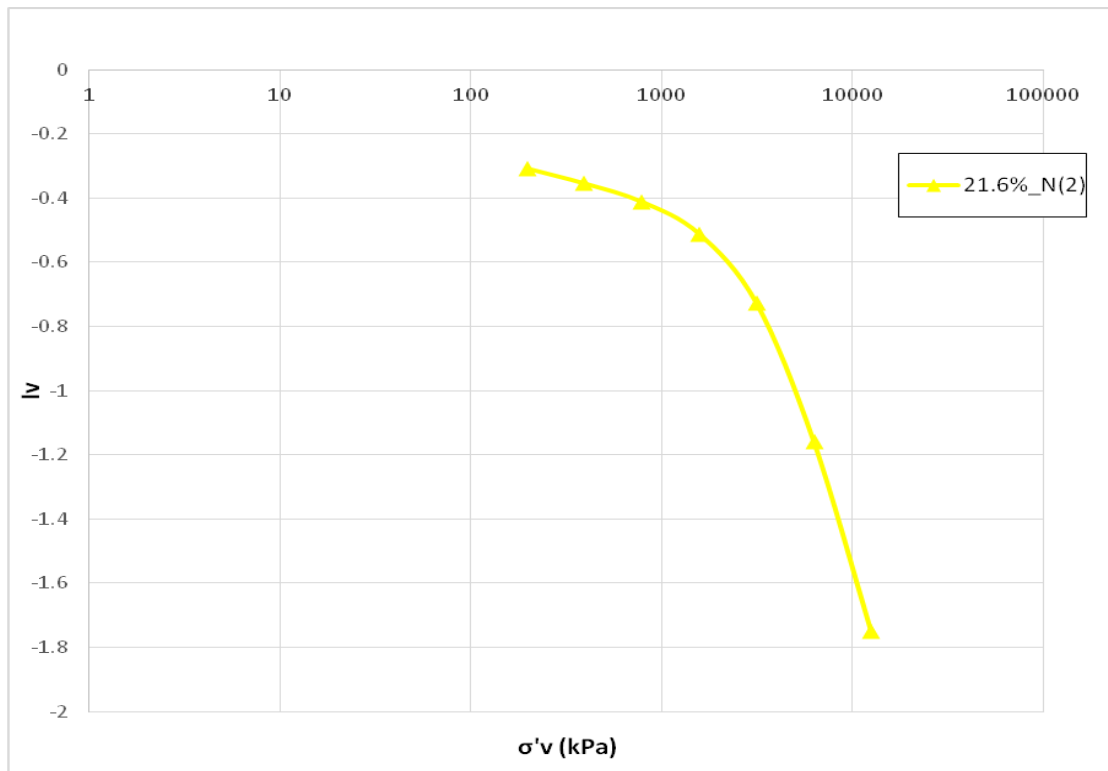
Διάγραμμα 5.1.25: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=21.6\%$



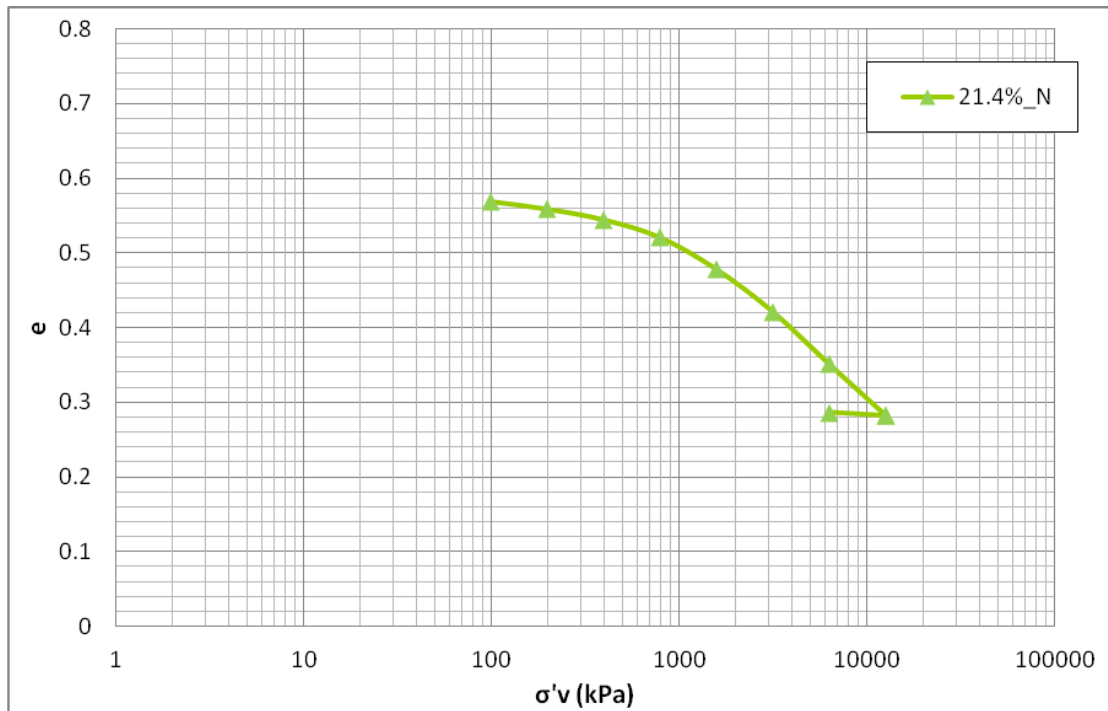
Διάγραμμα 5.1.26: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=21.6\%$



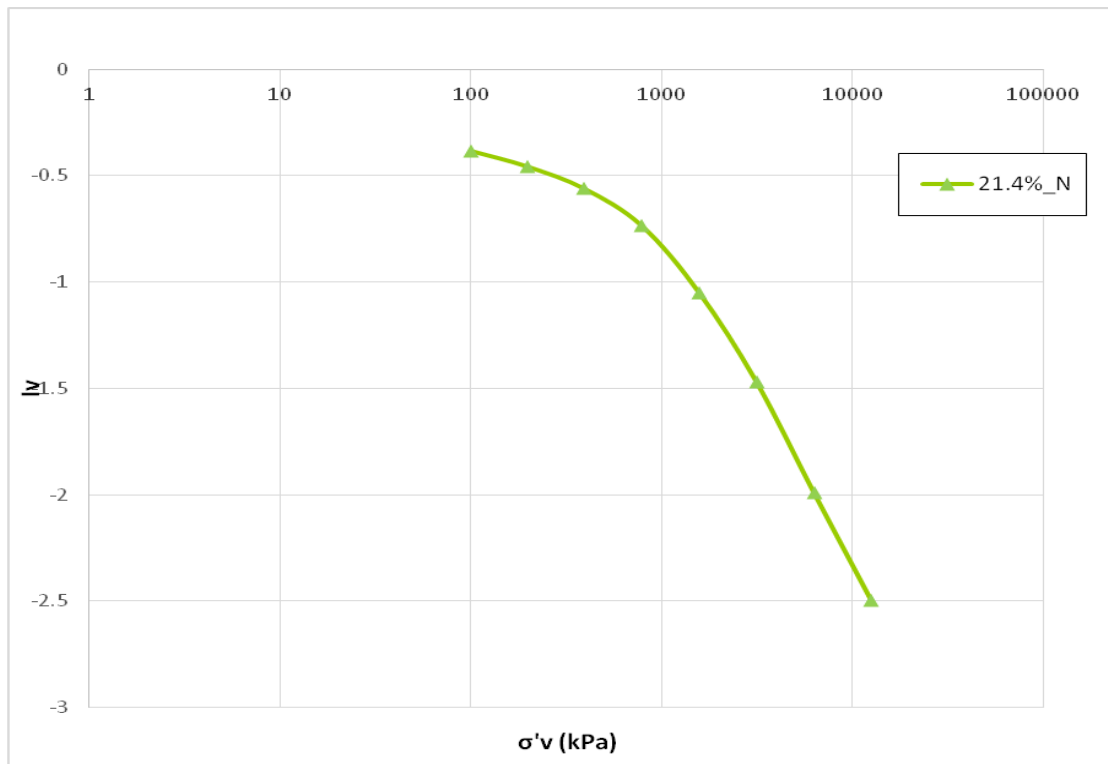
Διάγραμμα 5.1.27: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=21.6\%$



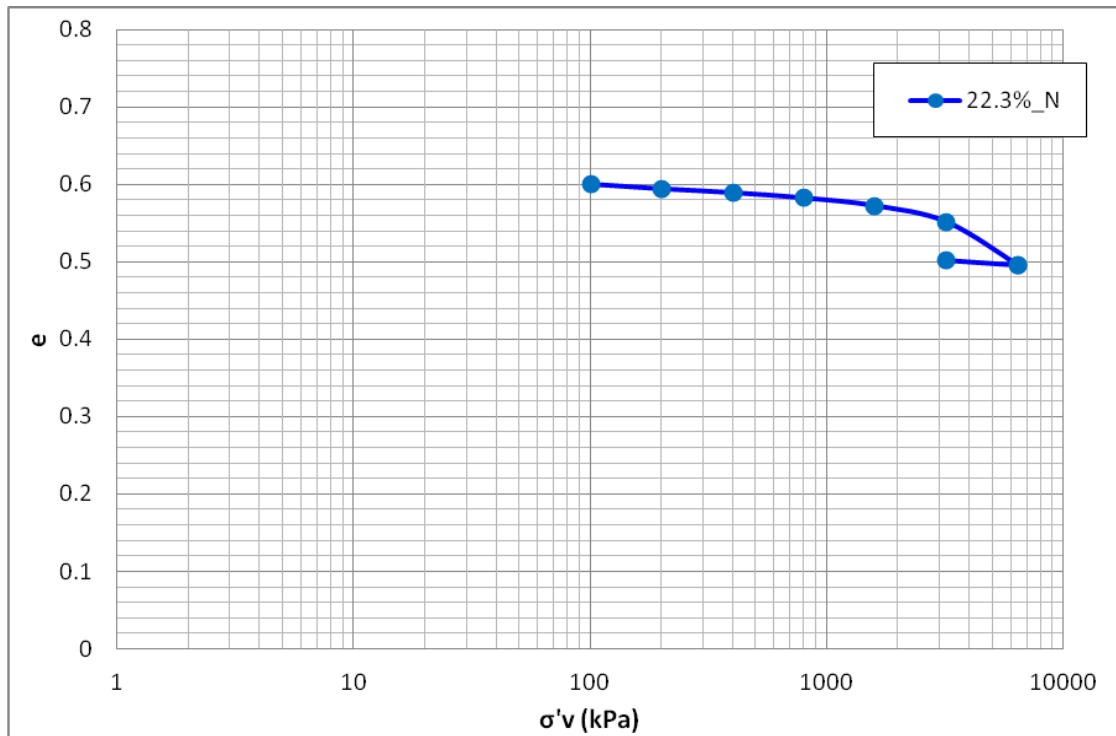
Διάγραμμα 5.1.28: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=21.6\%$



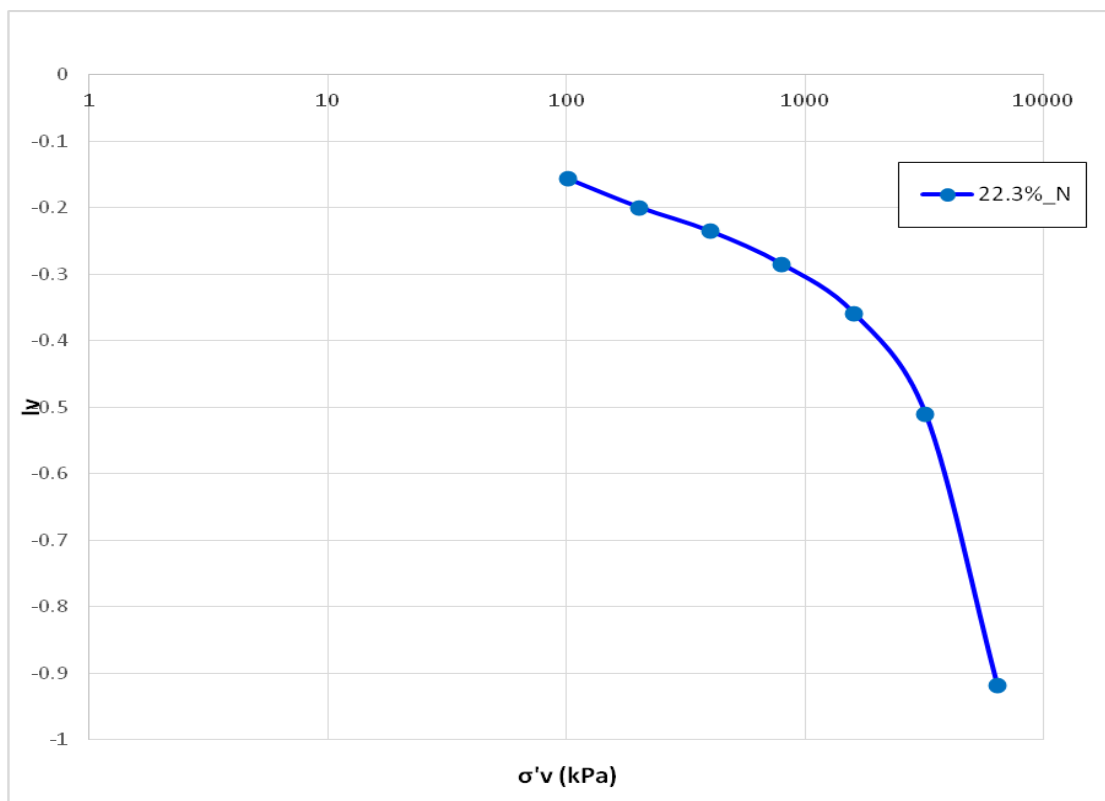
Διάγραμμα 5.1.29: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=21.4\%$



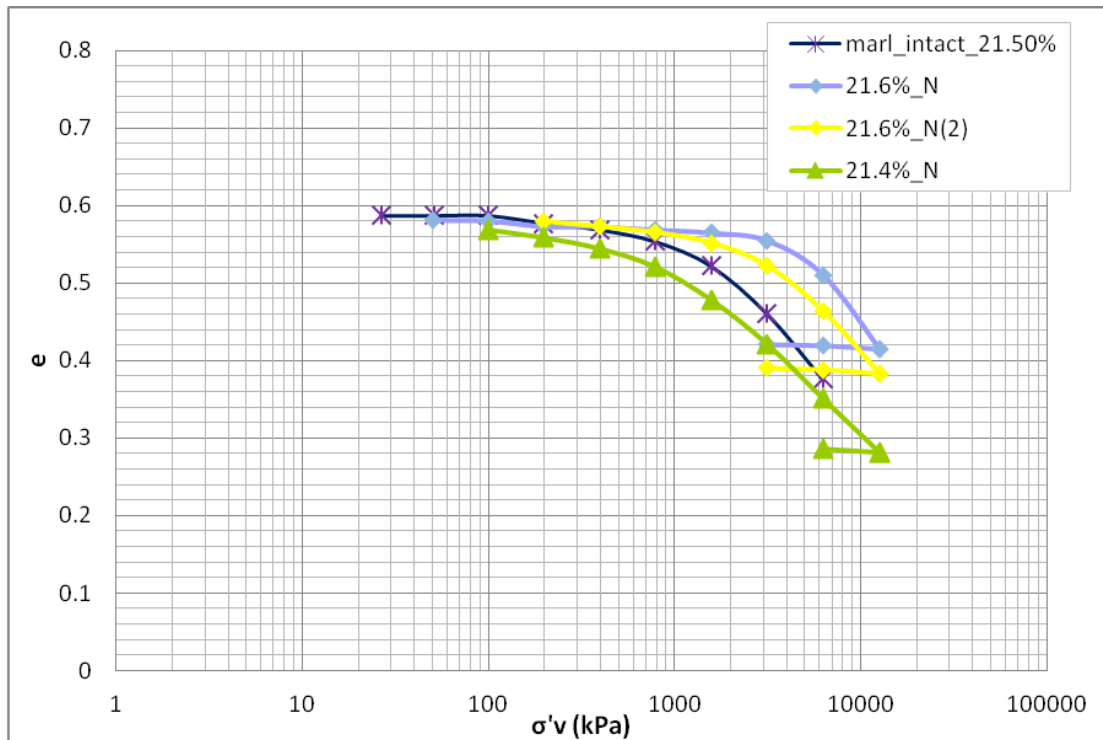
Διάγραμμα 5.1.30: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=21.4\%$



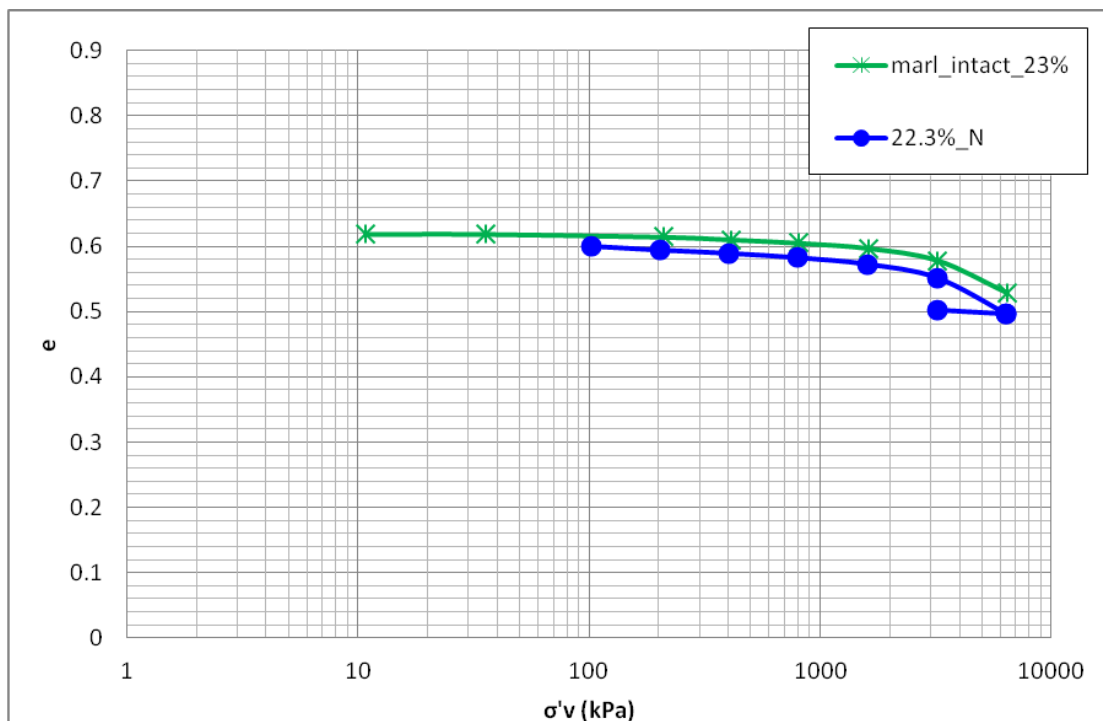
Διάγραμμα 5.1.31: πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=22.3\%$



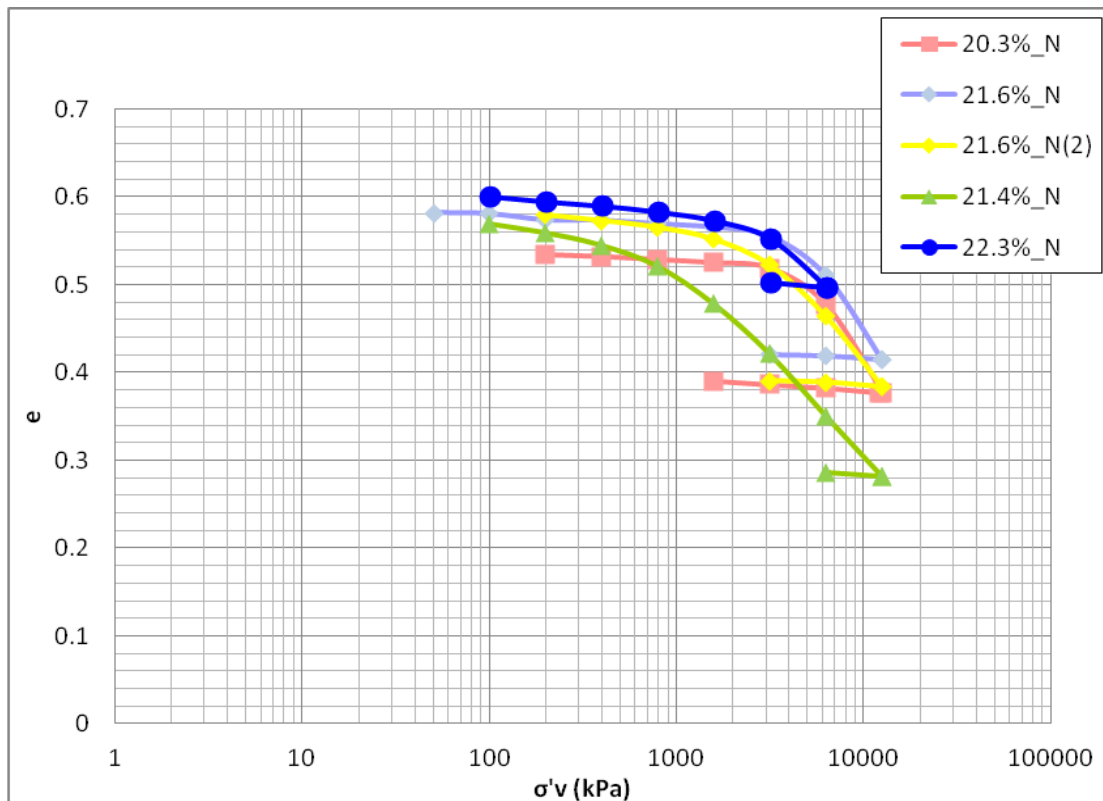
Διάγραμμα 5.1.32: κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αδιατάρακτου δοκιμίου με $w_0=22.3\%$



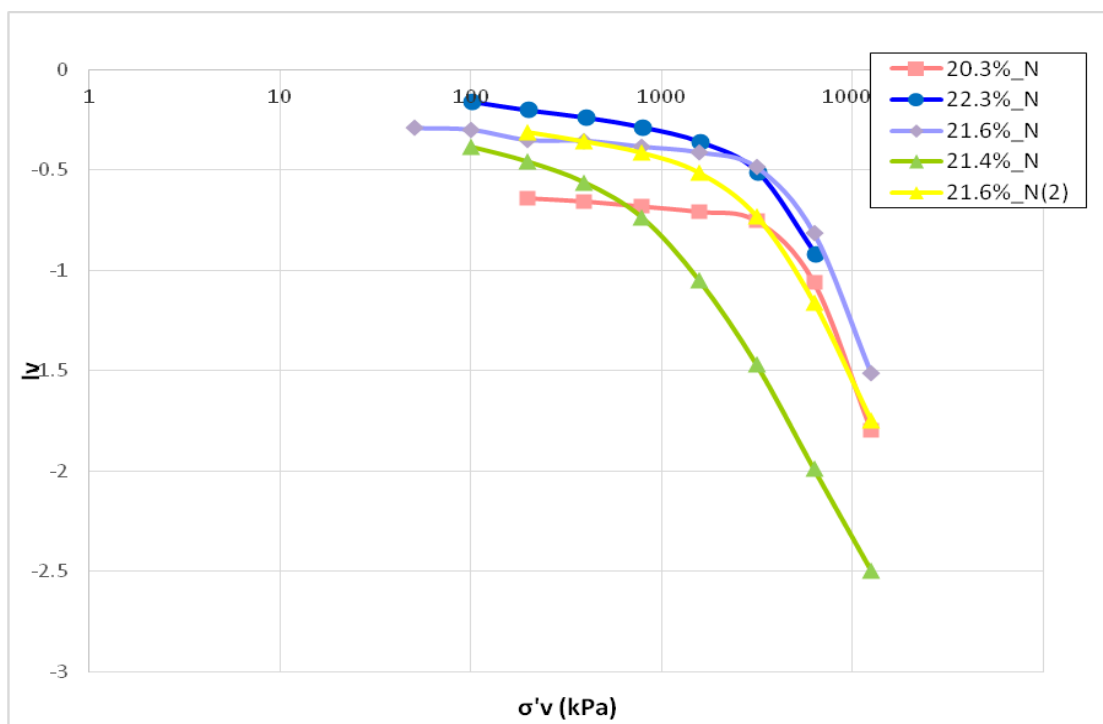
Διάγραμμα 5.1.33: σύγκριση των παραπάνω καμπυλών στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 21.6% και 21.4% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με περίπου ίση αρχική υγρασία (21.5%).



Διάγραμμα 5.1.34: σύγκριση την πειραματικής καμπύλης στερεοποίησης αρχικής υγρασίας 22.3% με παλαιότερη δοκιμή επί του ίδιου υλικού με περίπου ίση αρχική υγρασία (23%).

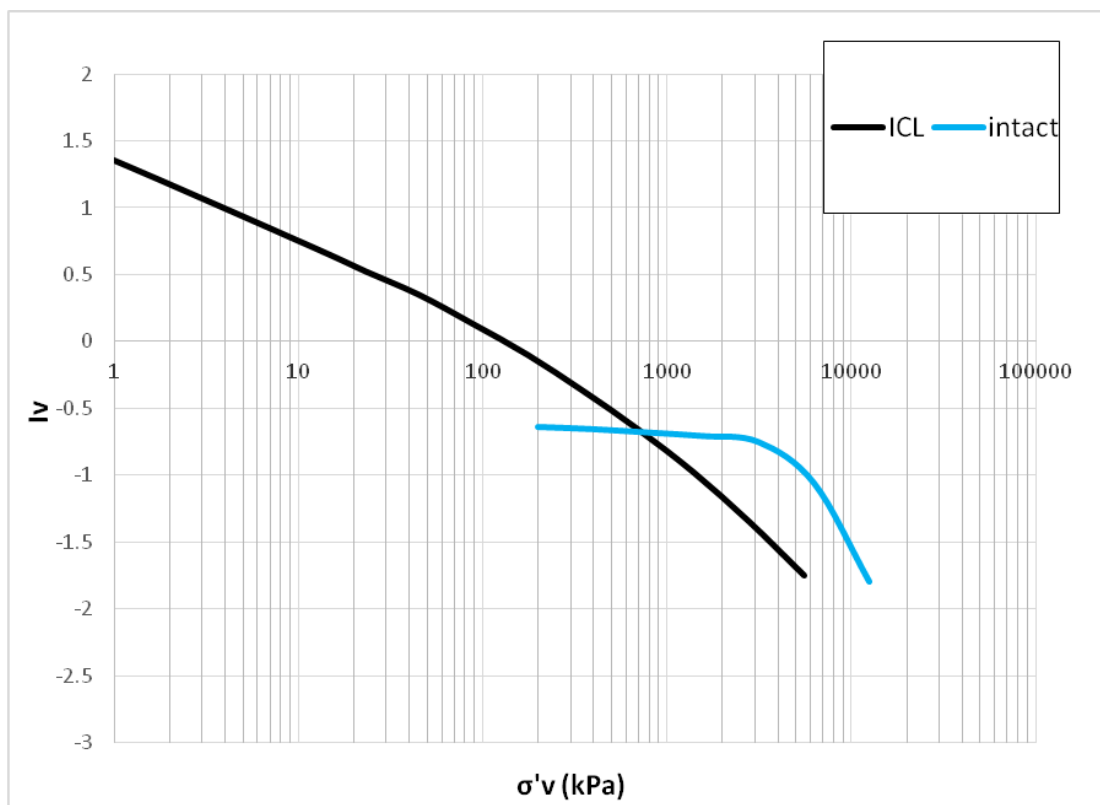


Διάγραμμα 5.1.35: πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών αδιατάρακτων δοκιμίων



Διάγραμμα 5.1.36: κανονικοποιημένες πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών αδιατάρακτων δοκιμίων

Για τη σύγκριση φυσικού με αναζυμωμένο υλικό παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα η μέση κανονικοποιημένη καμπύλη του φυσικού υλικού (4 πειράματα σχεδόν συμπίπτουν), μαζί με την ICL. Η ICL προέκυψε ως ένας μέσος όρος των αποτελεσμάτων που έδωσαν τα αναζυμωμένα υλικά.



Διάγραμμα 5.1.37: αποτελέσματα συμπίεσομέτρου για αδιατάρακτο δείγμα και σύγκριση με την ICL

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η καμπύλη του αδιατάρακτου δείγματος έχει κλίση μικρότερη από την ICL και την συναντά για τάση περίπου 750 kPa. Την ξεπερνά και εμφανίζει έντονη καμπυλότητα από τα 2000 kPa μέχρι τα 5000 kPa, όπου και σταθεροποιεί την κλίση της σε μεγαλύτερη τιμή από αυτή της ICL.

Η σχέση της καμπύλης του φυσικού δείγματος με την ICL φανερώνει την ύπαρξη δεσμών στο φυσικό δείγμα τους οποίους διατηρεί για επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση μέχρι και 2000 kPa η οποία αρκεί για να “καταστρέψει” τους δεσμούς αυτούς.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά για τη Μάργα του Ισθμού της Κορίνθου.

e^*_{100}	e^*_{1000}	C_c^*	C_s^*	C_c	C_s	C_s^*/C_s	σ'_{vy}	$\sigma'_{vy}/\sigma^*_{ve}$
0.621	0.485	0.12	0.0143	0.244	0.0072	1.98	2500	3.125

Πίνακας 5.1.2 : φυσικά και εγγενή χαρακτηριστικά συμπίεσότητας

Ο λόγος C_s^*/C_s (Swelling Sensitivity) είναι μεγαλύτερος της μονάδας, πράγμα που φανερώνει ότι η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε στο συμπίεσόμετρο ήταν αρκετή για να καταστρέψει τους δεσμούς που υπάρχουν στο αδιατάρακτο δείγμα. Ακόμη, η τιμή του λόγου C_s^*/C_s είναι ενδεικτική της ύπαρξης δεσμών στο φυσικό υλικό, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από το λόγο $\sigma'_{vy}/\sigma^*_{ve}$, η τιμή του οποίου είναι ενδεικτική της αυξημένης αντίστασης σε μονοδιάστατη συμπίεση του φυσικού υλικού σε σχέση με το αναζυμωμένο.

5.2 Τριαξονικές δοκιμές

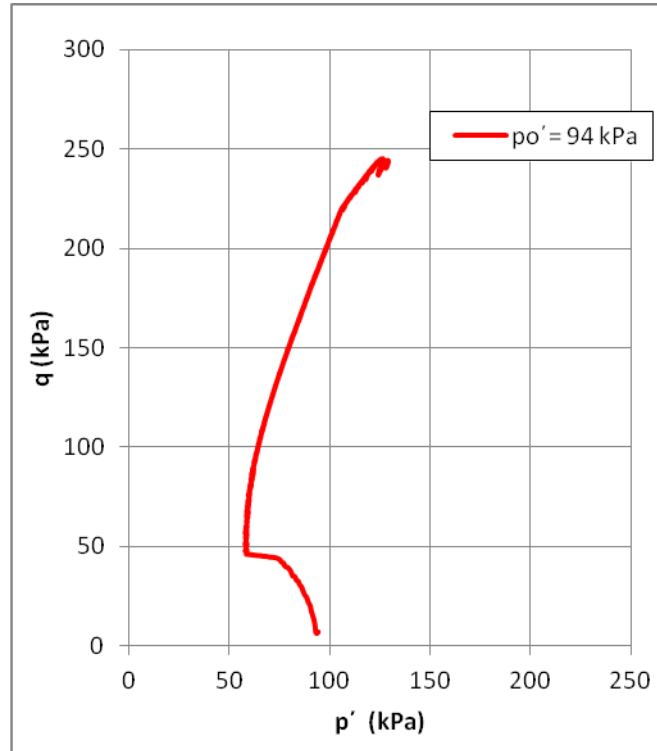
Για τις τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται για κάθε μία ξεχωριστά οι διαδρομές τάσεων σε διαγράμματα $q - p'$ και $t - s'$, τα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, ενώ παρουσιάζονται και τα διαγράμματα διαφοράς πίεσης πόρων – αξονικής παραμόρφωσης ή ογκομετρικής παραμόρφωσης – αξονικής παραμόρφωσης για αστράγγιστες ή στραγγισμένες δοκιμές αντίστοιχα. Στη συνέχεια όλα τα διαγράμματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα σε ένα κοινό διάγραμμα.

Ακόμη παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα $t/\sigma_{ve}^* - s'/\sigma_{ve}^*$, όπου σ_{ve}^* είναι η τάση από την καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού που αντιστοιχεί στο δείκτη πόρων που έχει το δοκίμιο κατά την αστοχία. Η ισοδύναμη τάση αυτή χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση τόσο των αναζυμωμένων όσο και των φυσικών δοκιμών.

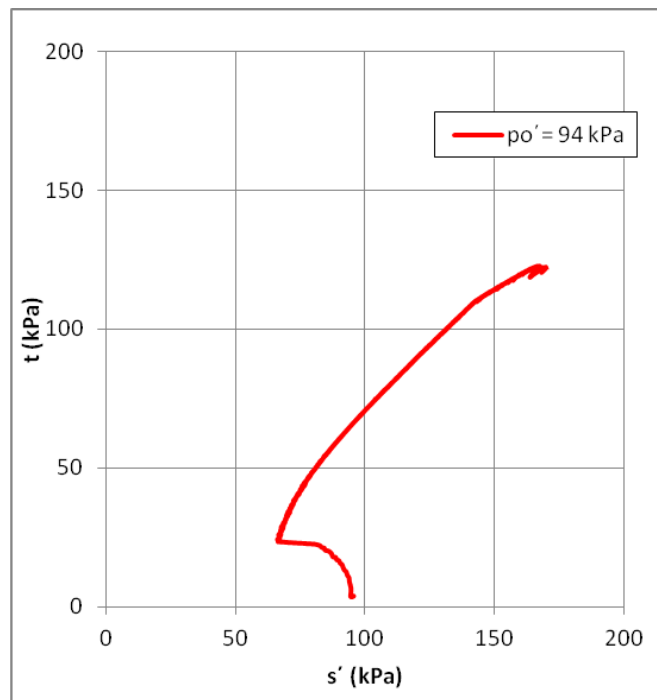
5.2.1. Αναζυμωμένα δοκίμια

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δώδεκα τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν

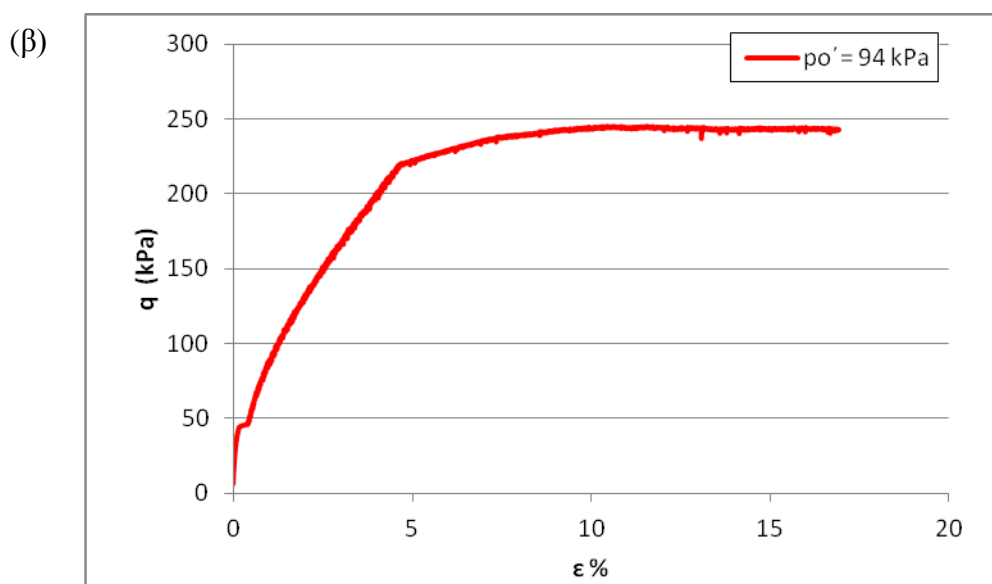
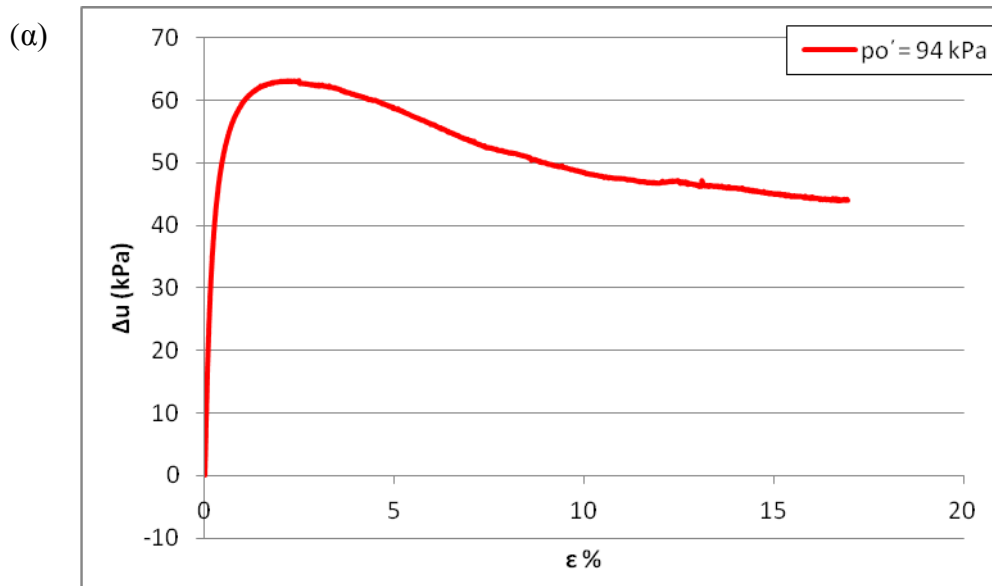
(α)



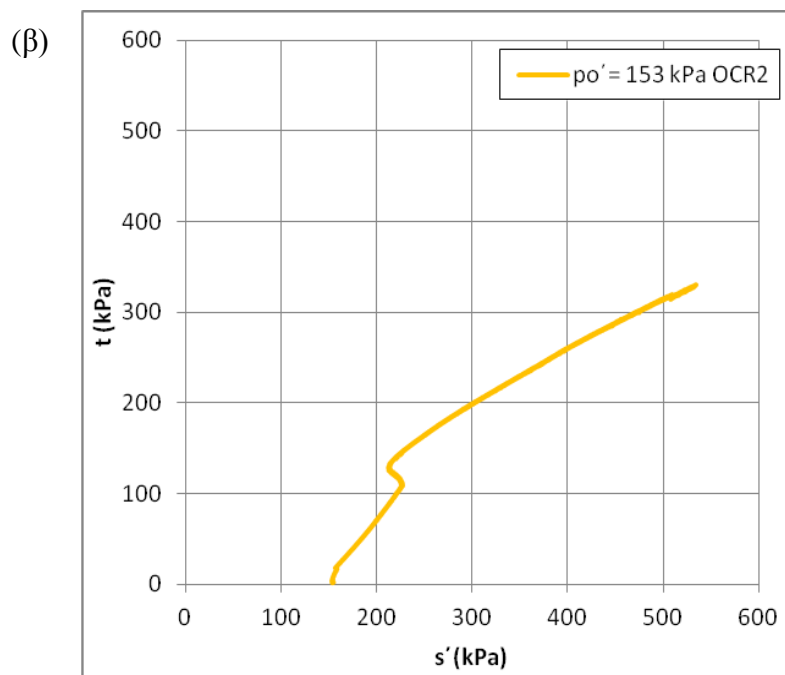
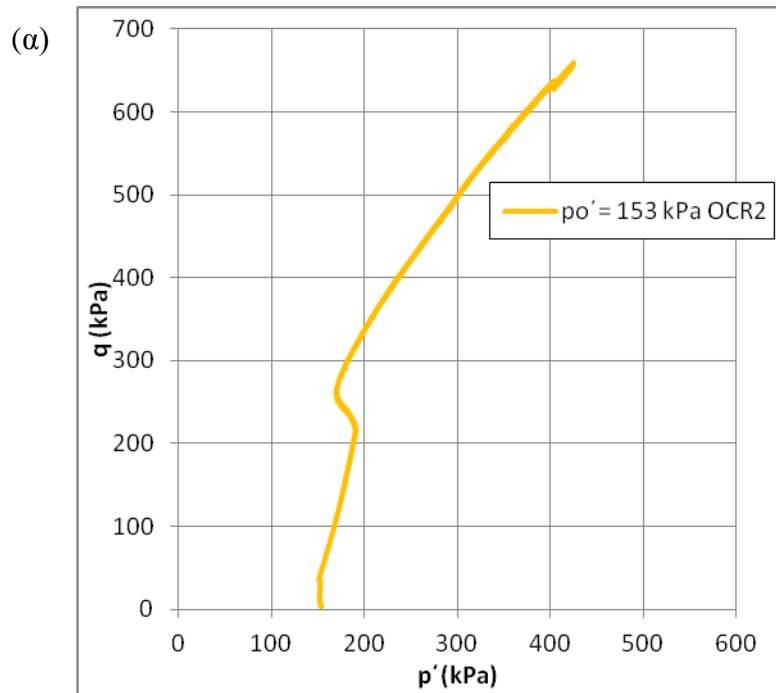
(β)



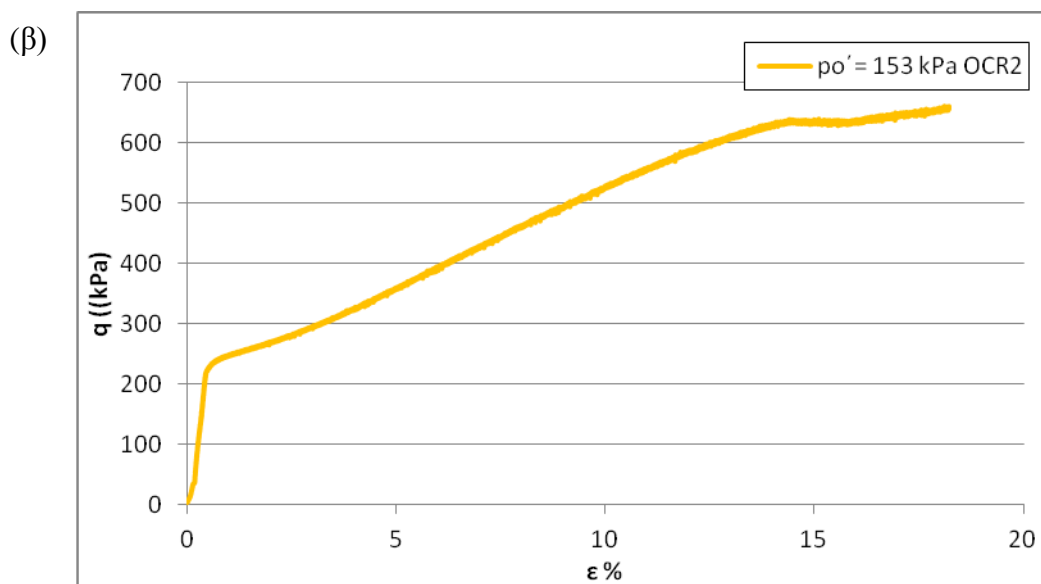
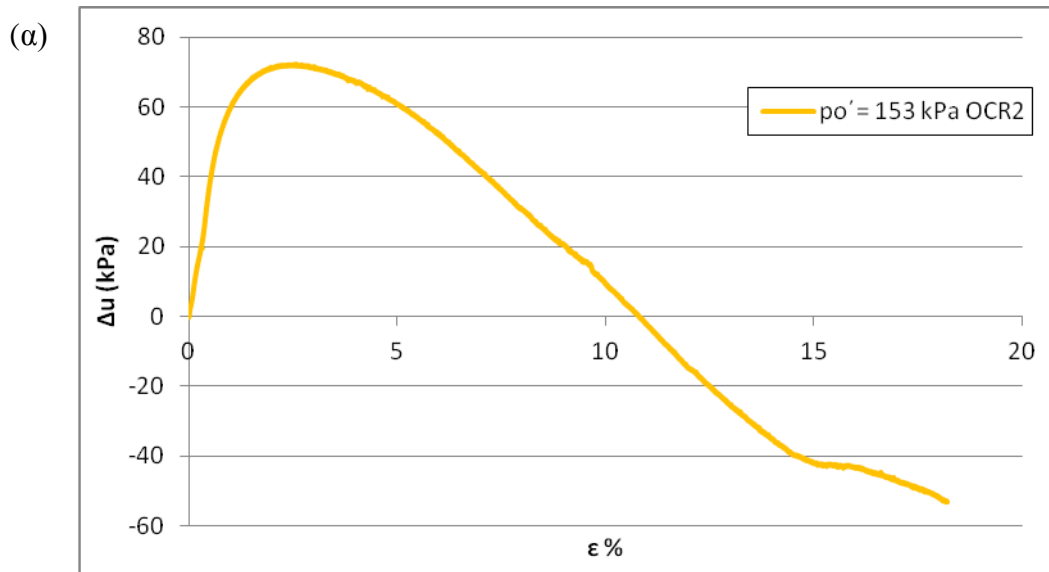
Διάγραμμα 5.2.1: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 94 kPa.



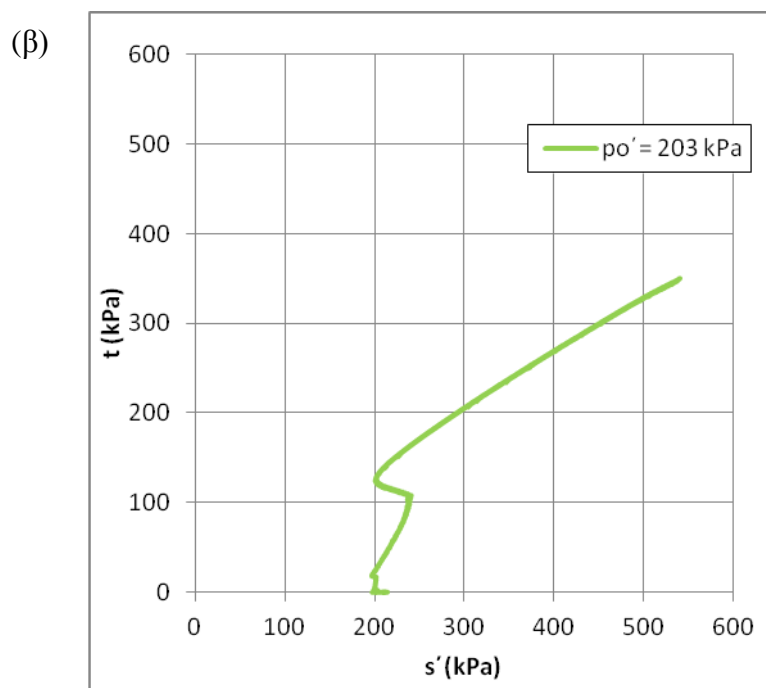
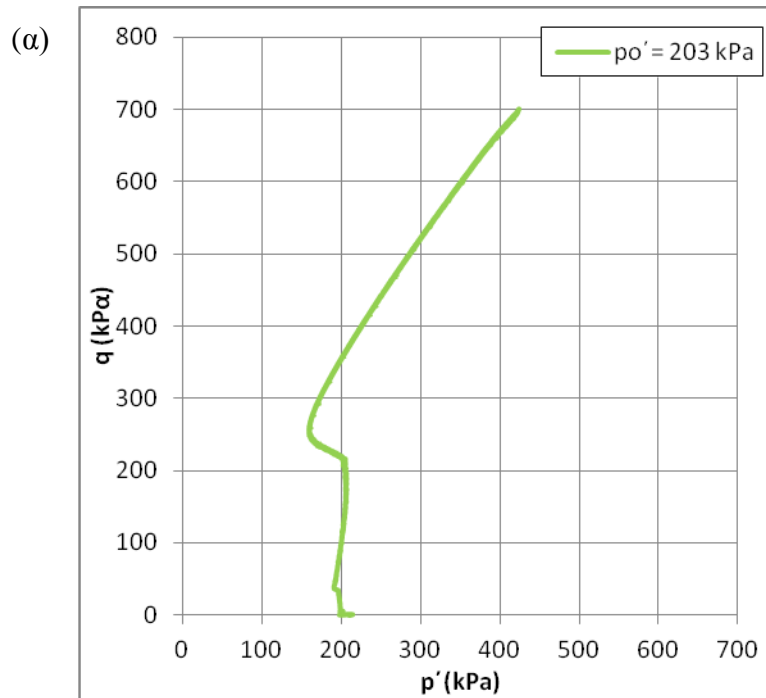
Διάγραμμα 5.2.2: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 94 kPa.



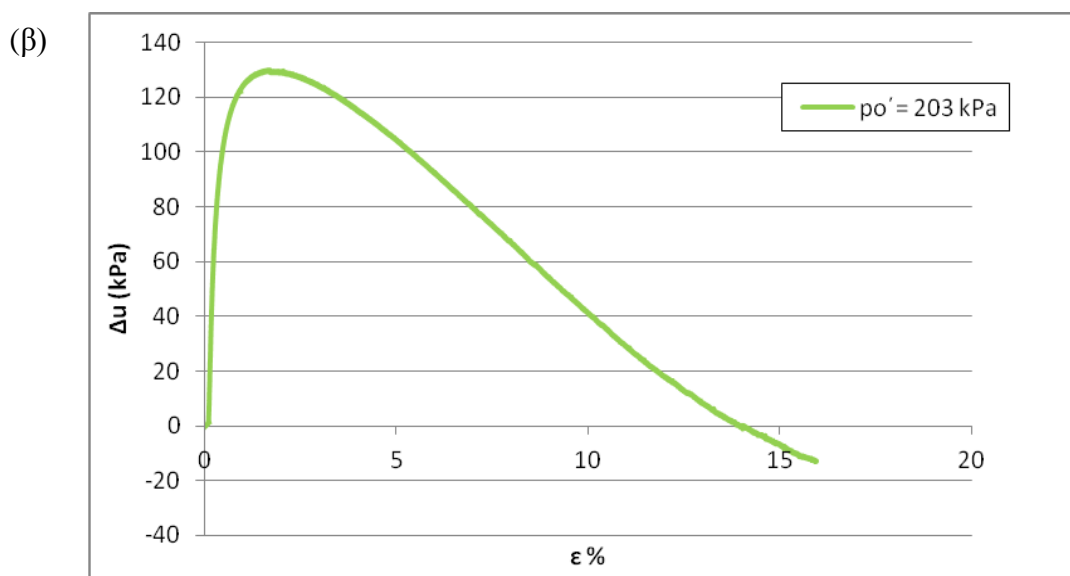
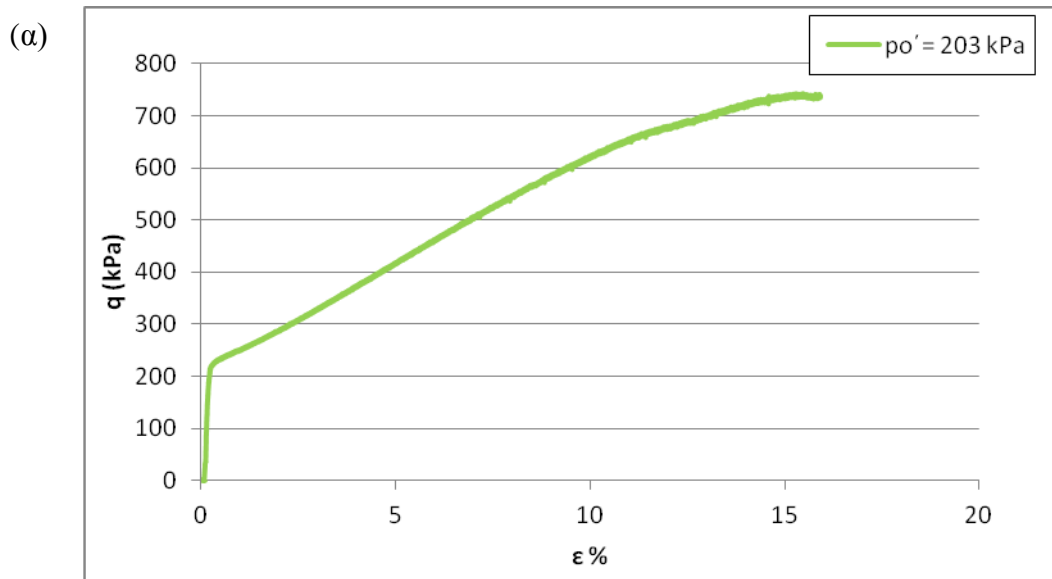
Διάγραμμα 5.2.3: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 153 kPa.



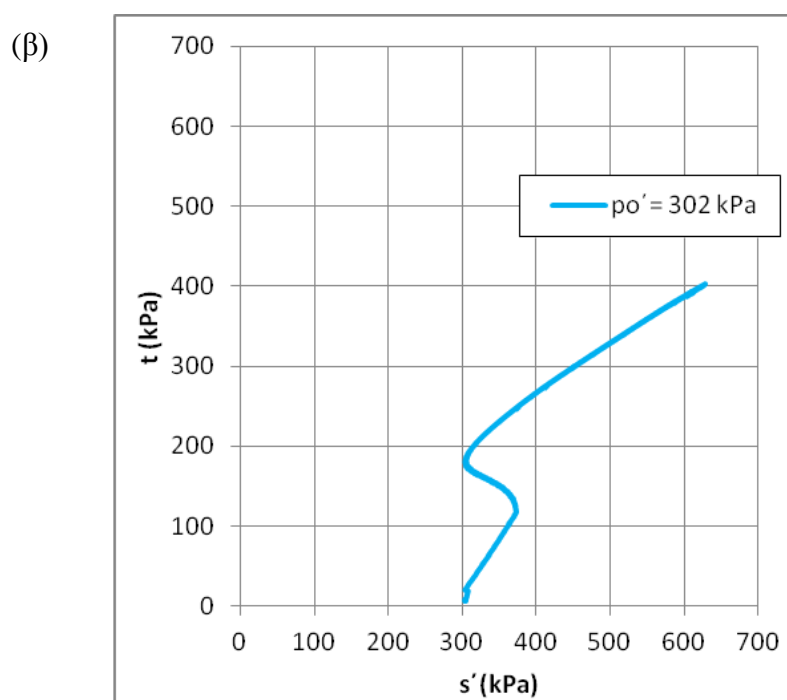
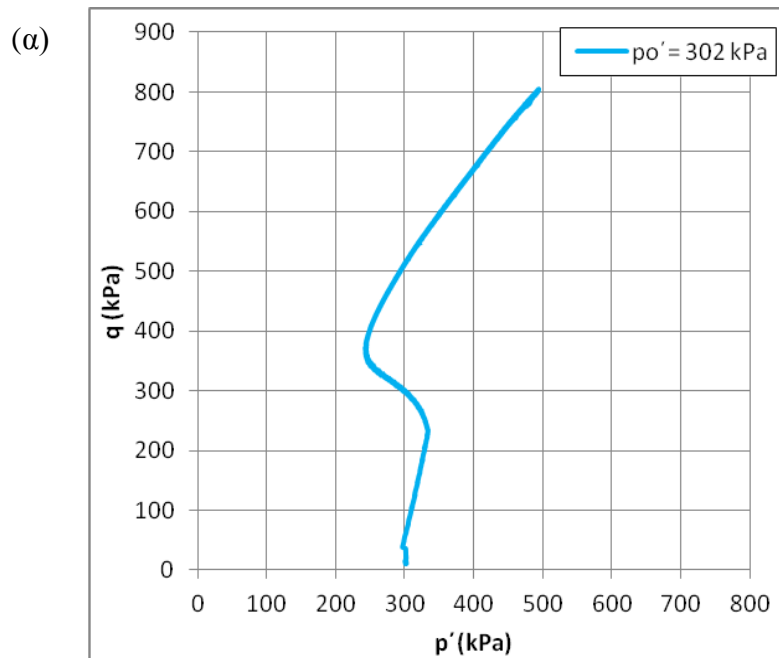
Διάγραμμα 5.2.4: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 94 kPa.



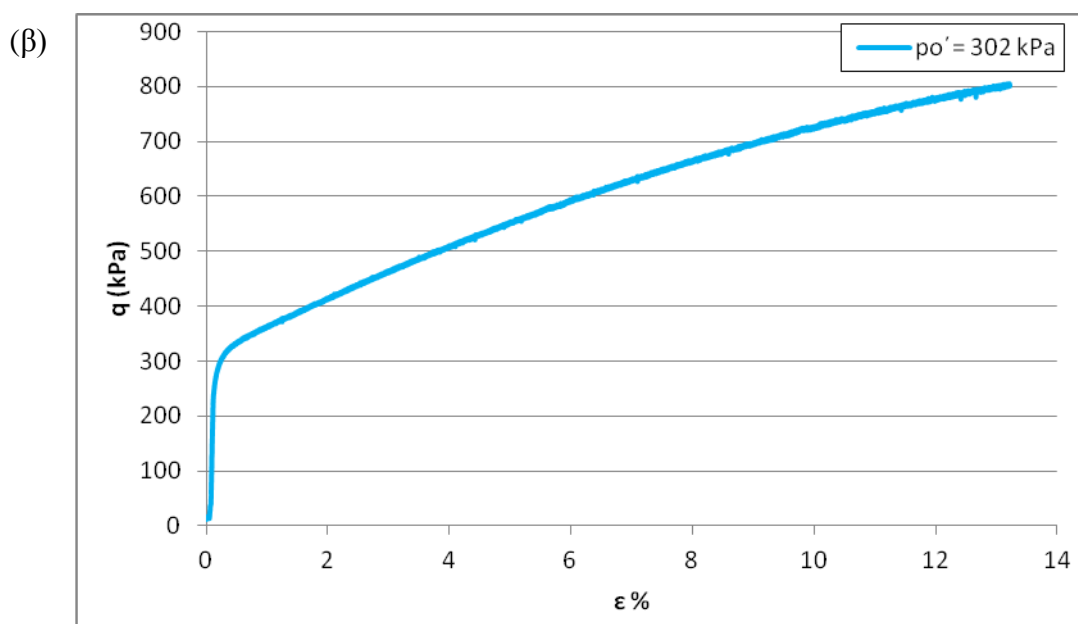
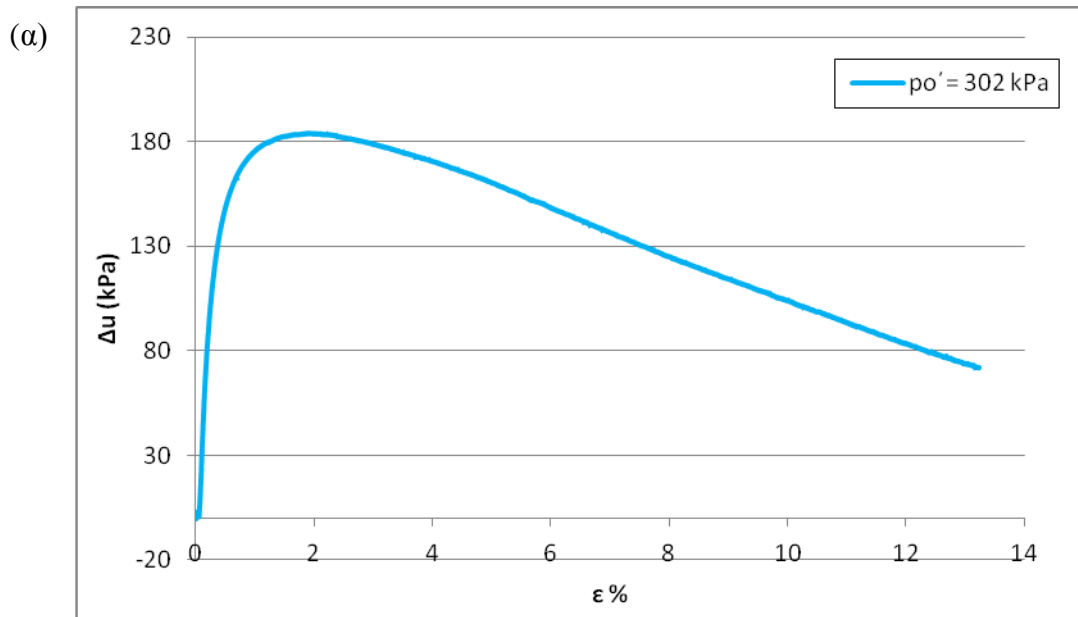
Διάγραμμα 5.2.5: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 203 kPa.



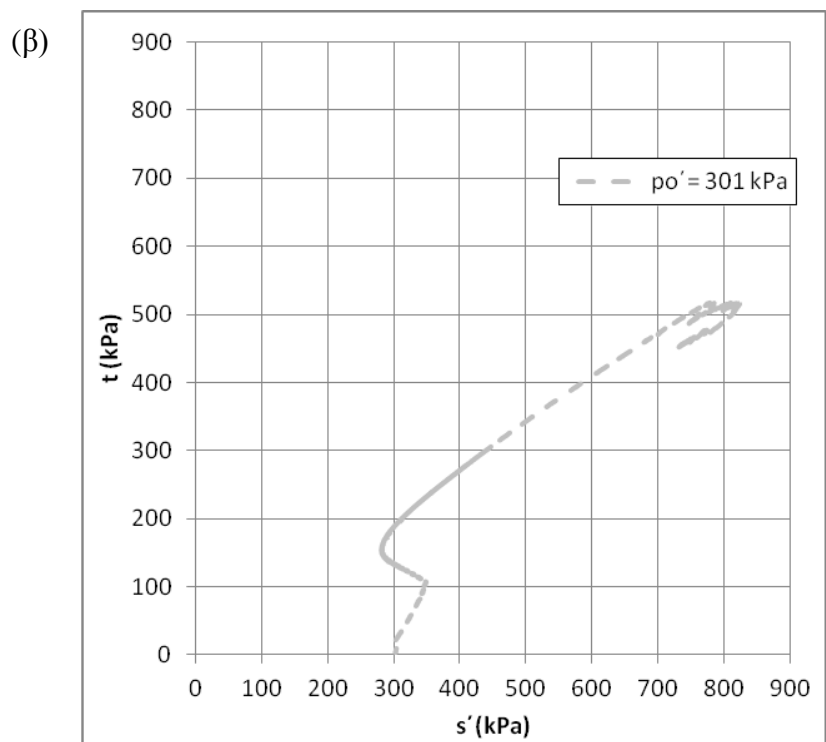
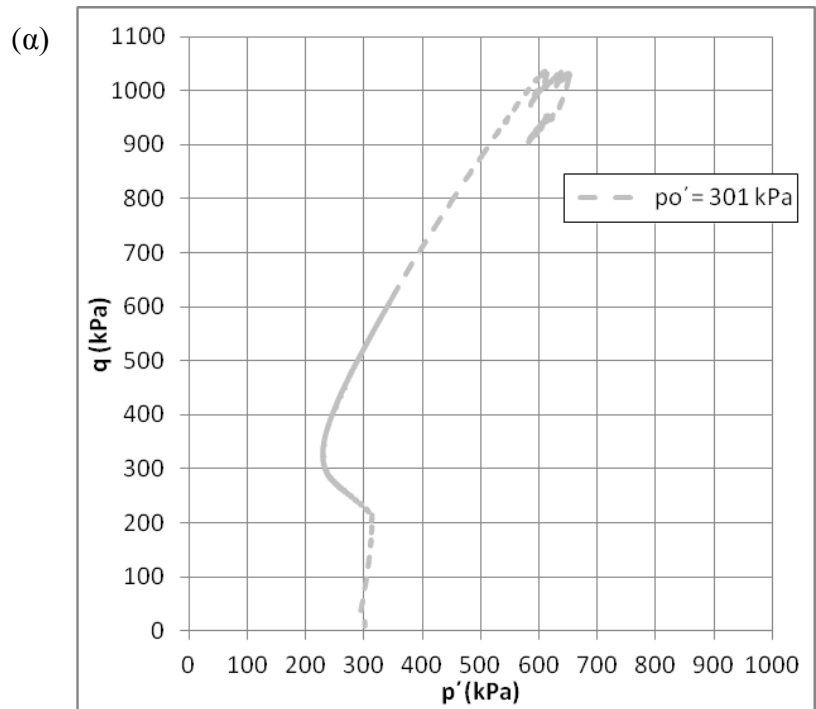
Διάγραμμα 5.2.6: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 203 kPa.



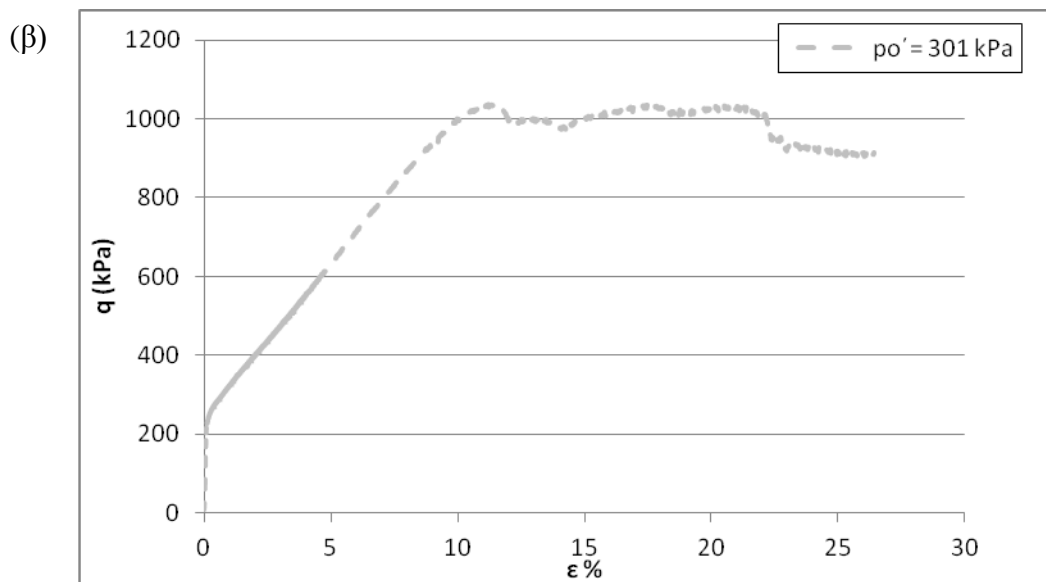
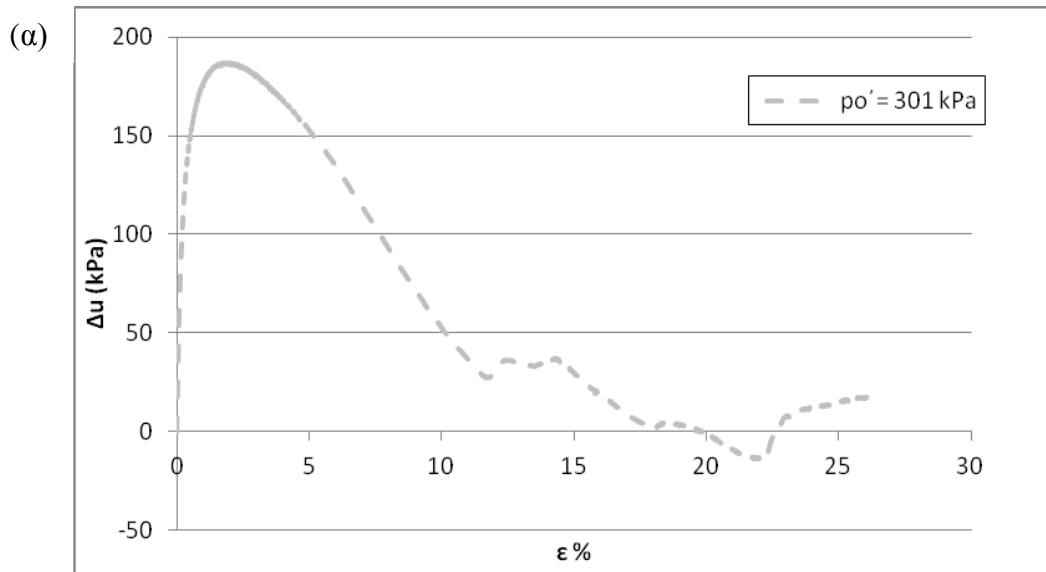
Διάγραμμα 5.2.7: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 302 kPa.



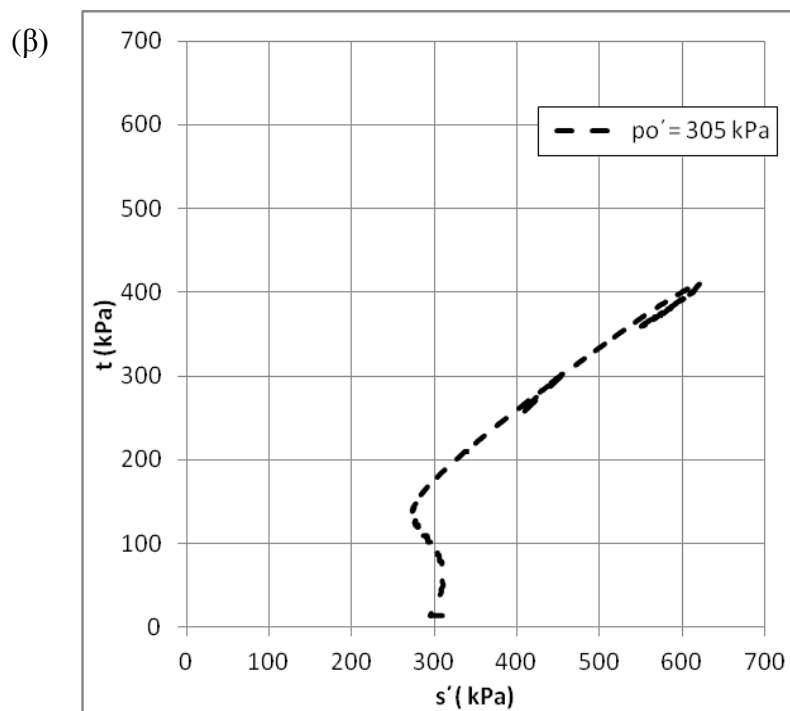
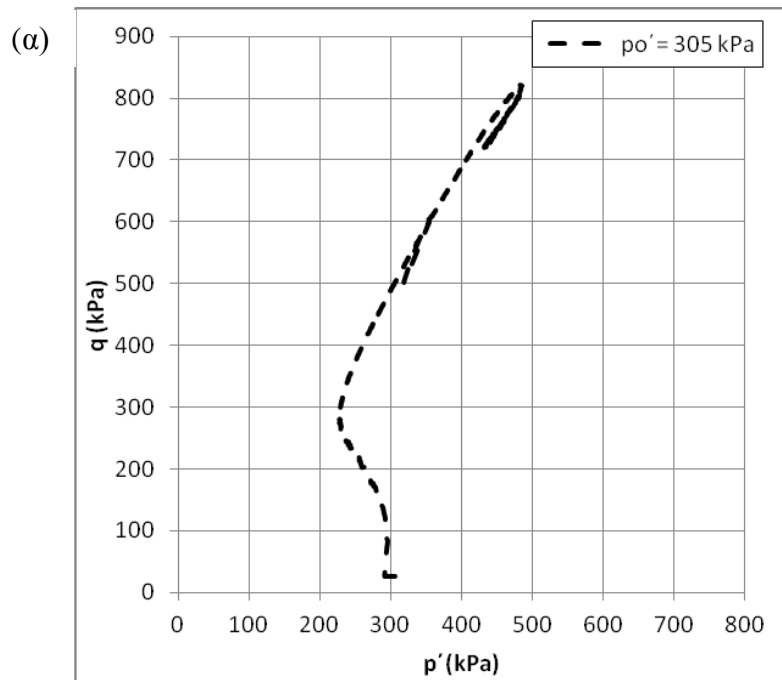
Διάγραμμα 5.2.8: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 302 kPa.



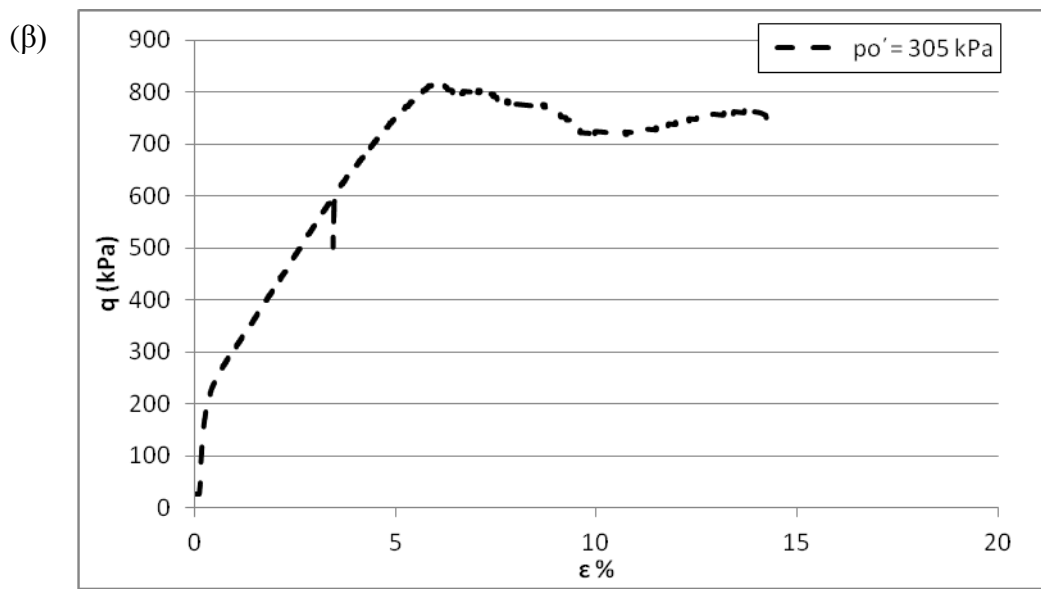
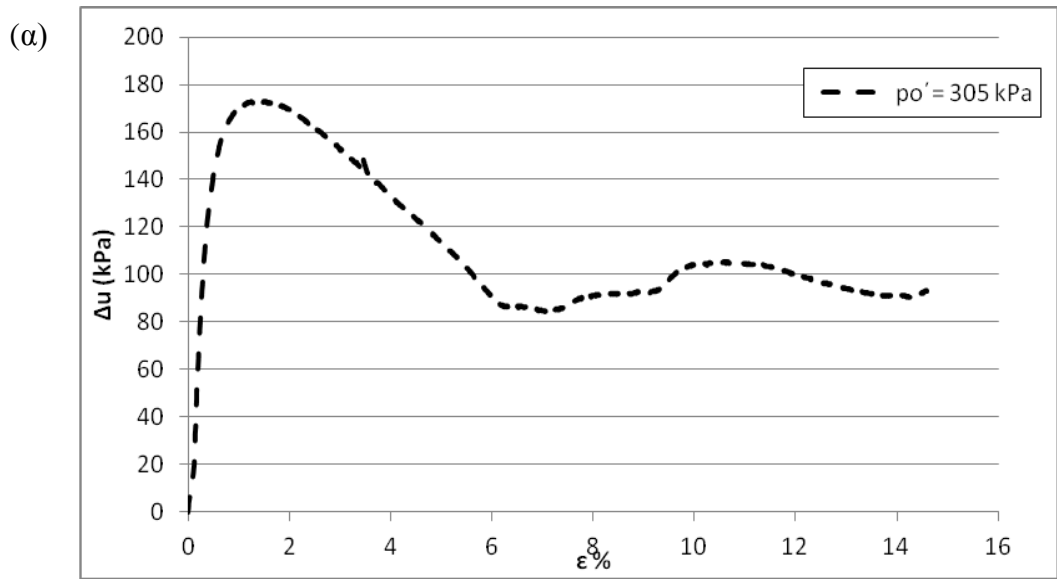
Διάγραμμα 5.2.9: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 301 kPa.



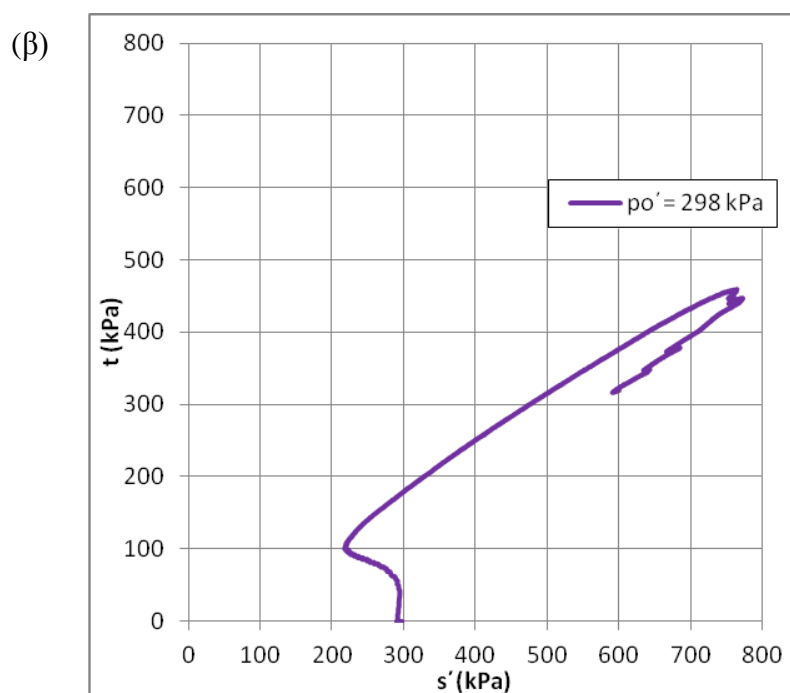
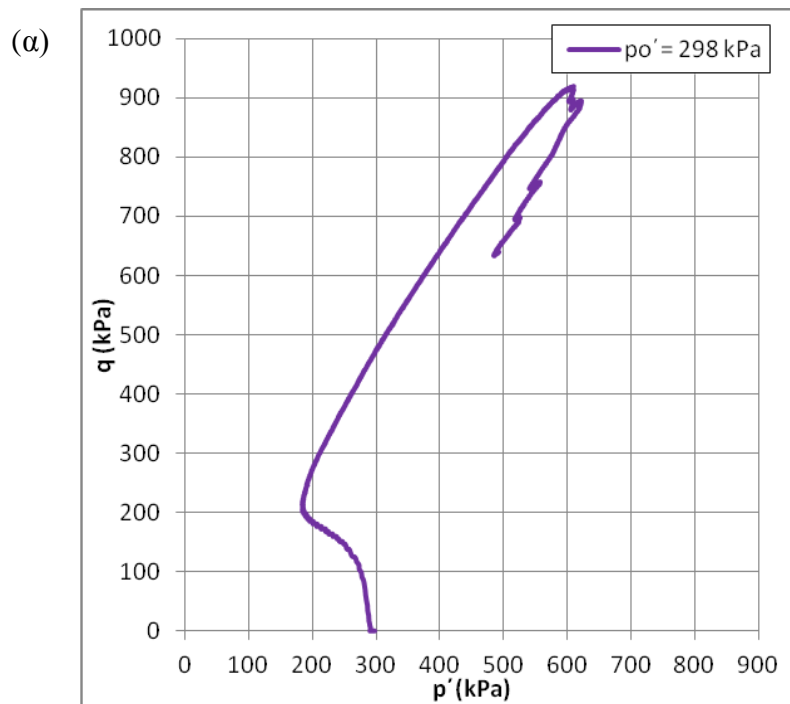
Διάγραμμα 5.2.10: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 301 kPa.



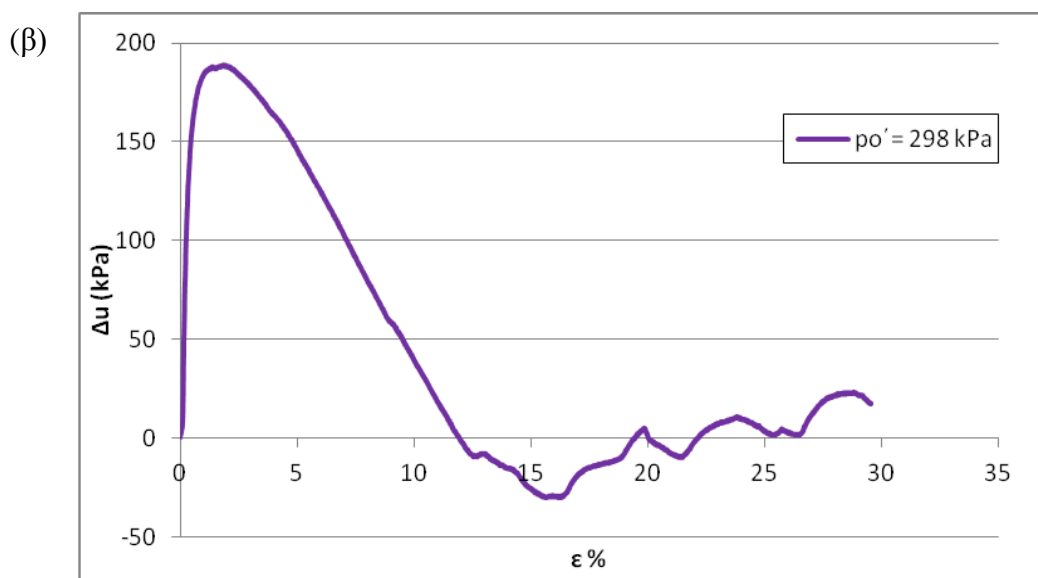
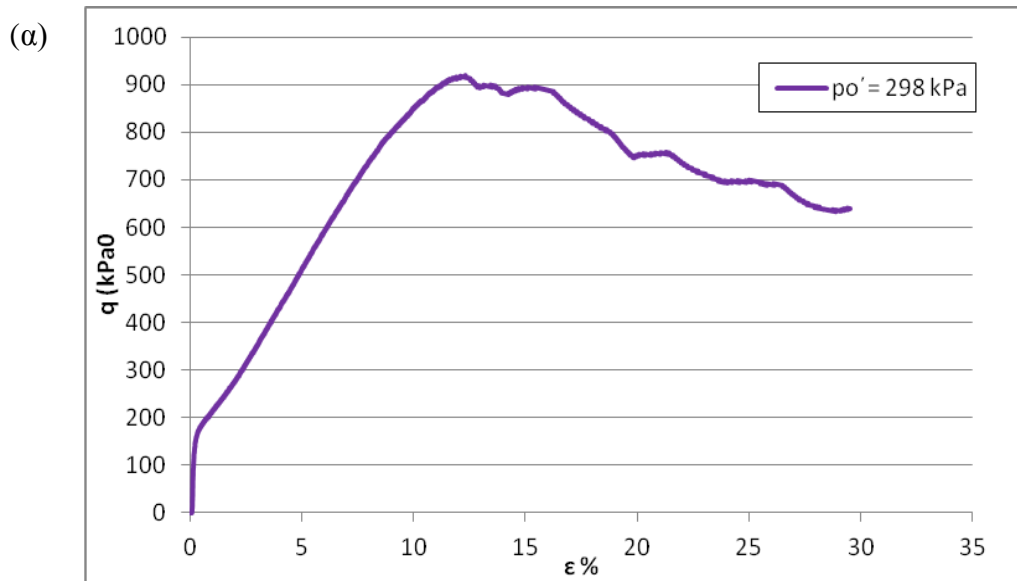
Διάγραμμα 5.2.11: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 305 kPa.



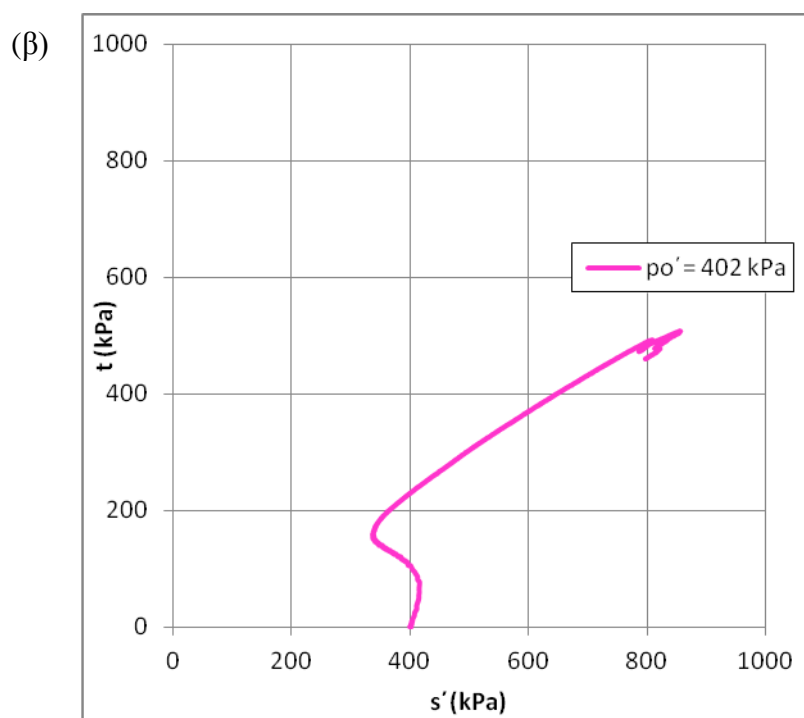
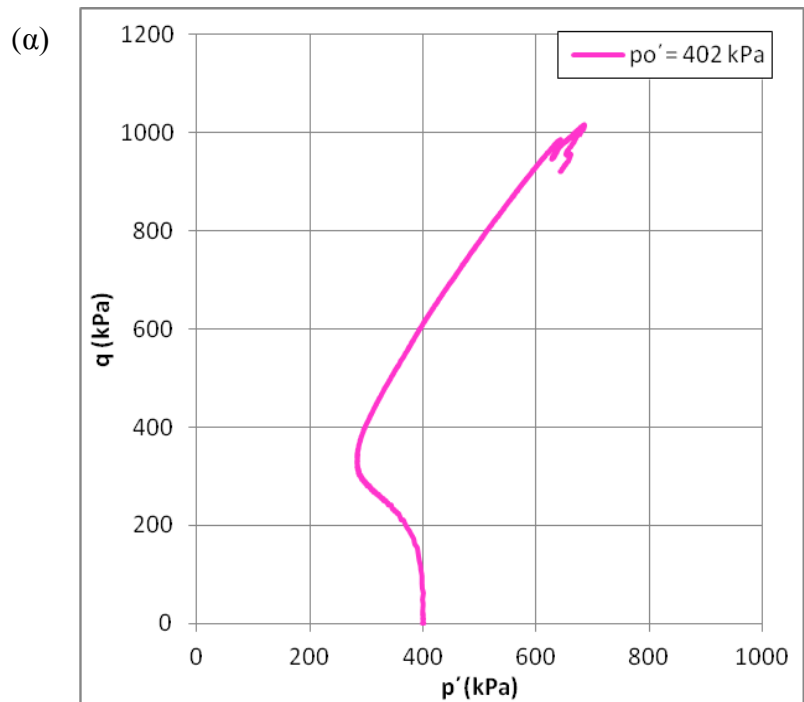
Διάγραμμα 5.2.12: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 305 kPa.



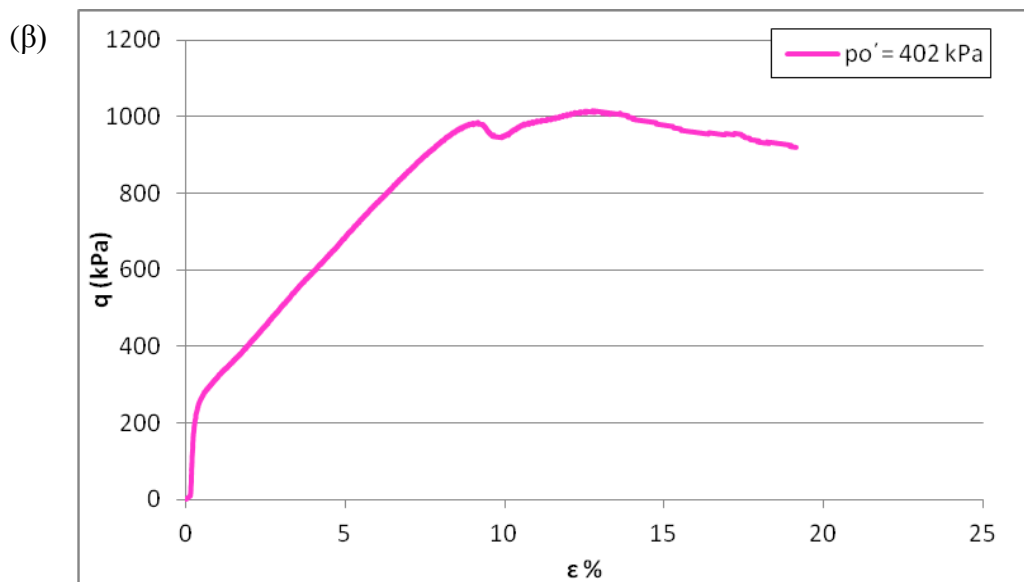
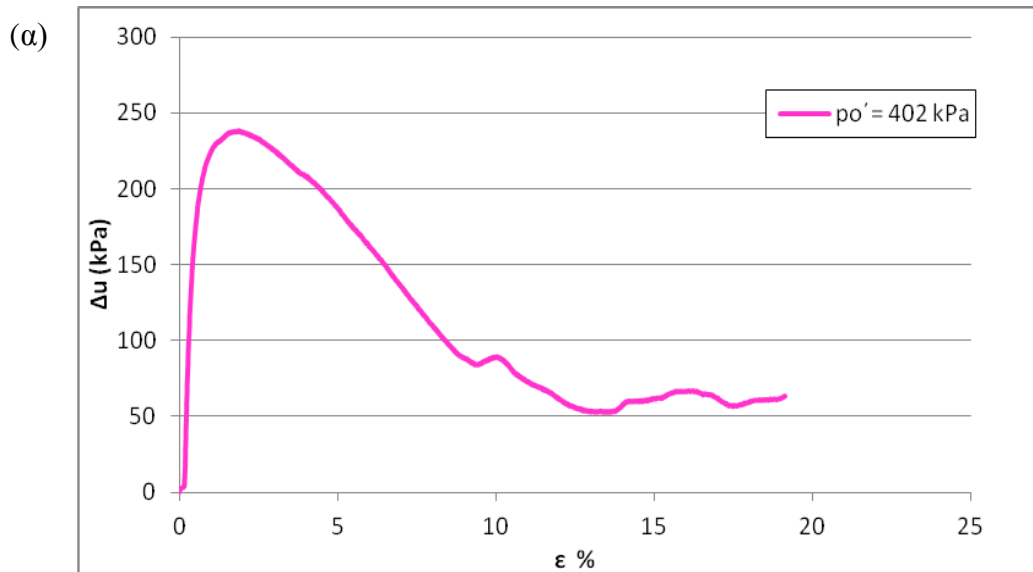
Διάγραμμα 5.2.13: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 298 kPa.



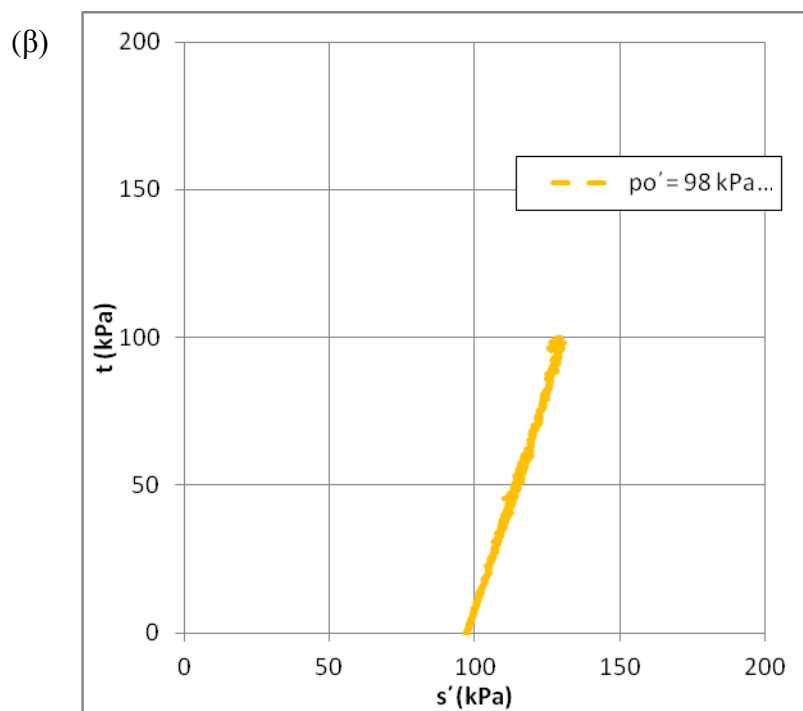
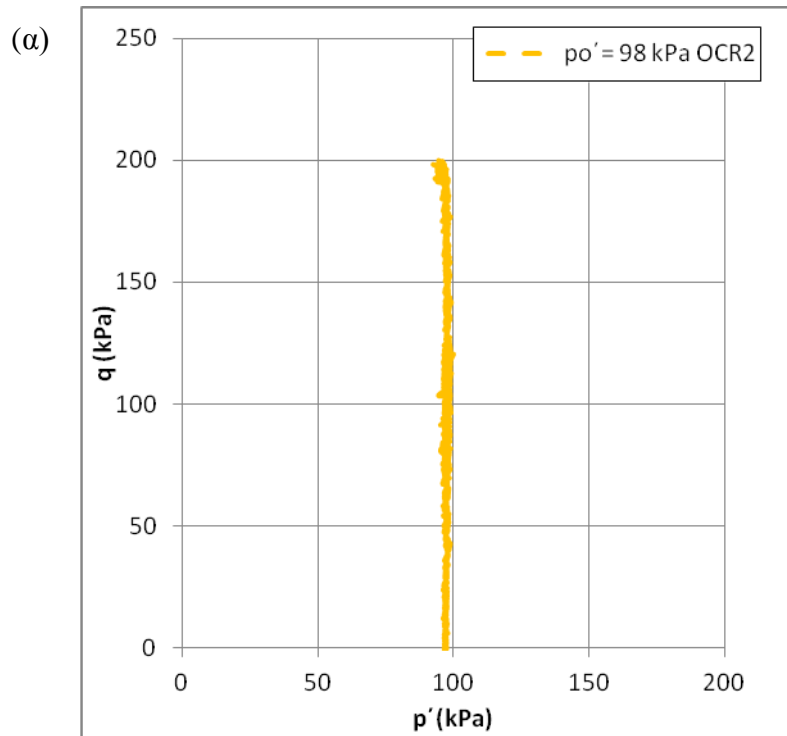
Διάγραμμα 5.2.14: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 298 kPa.



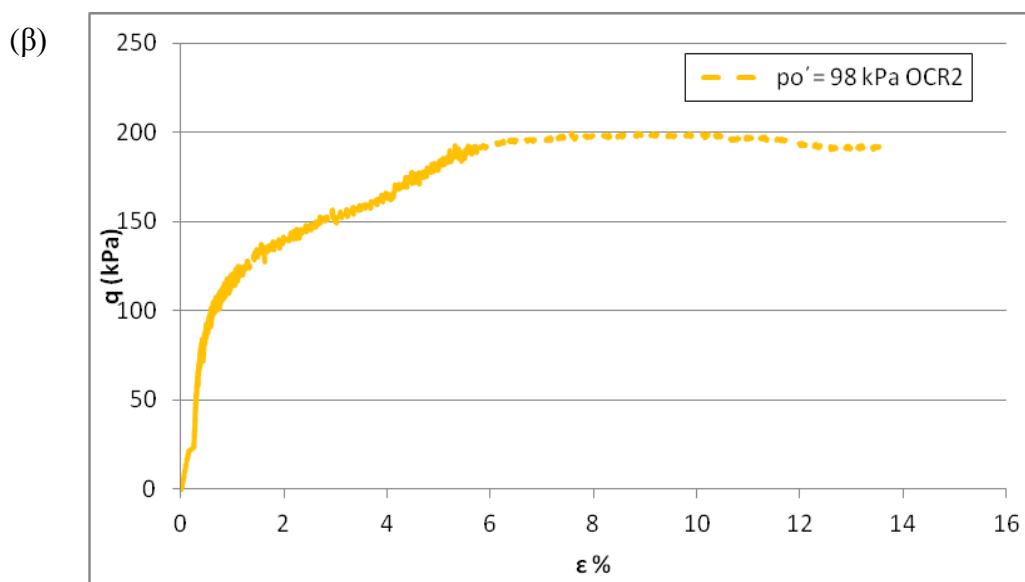
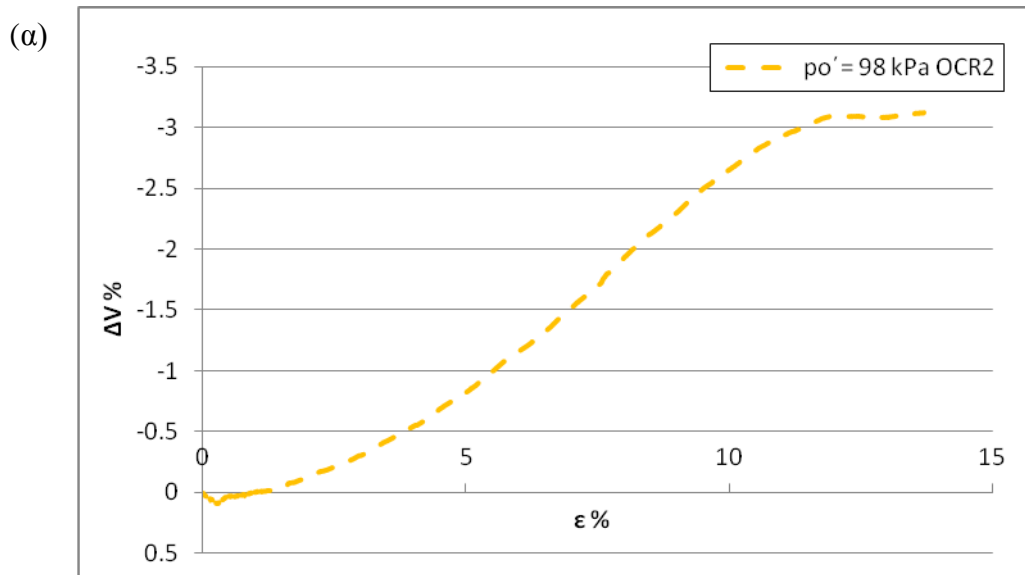
Διάγραμμα 5.2.15: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 402 kPa.



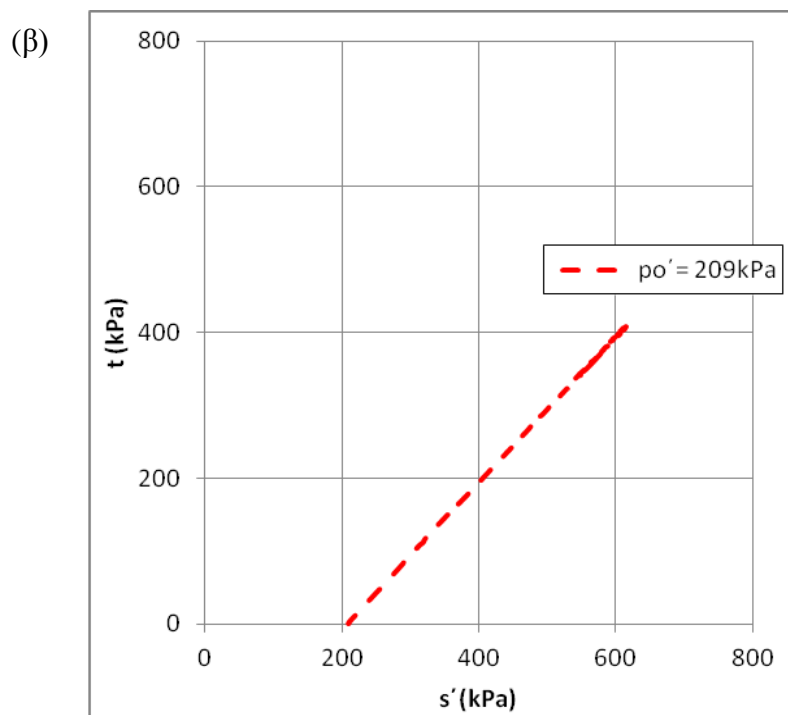
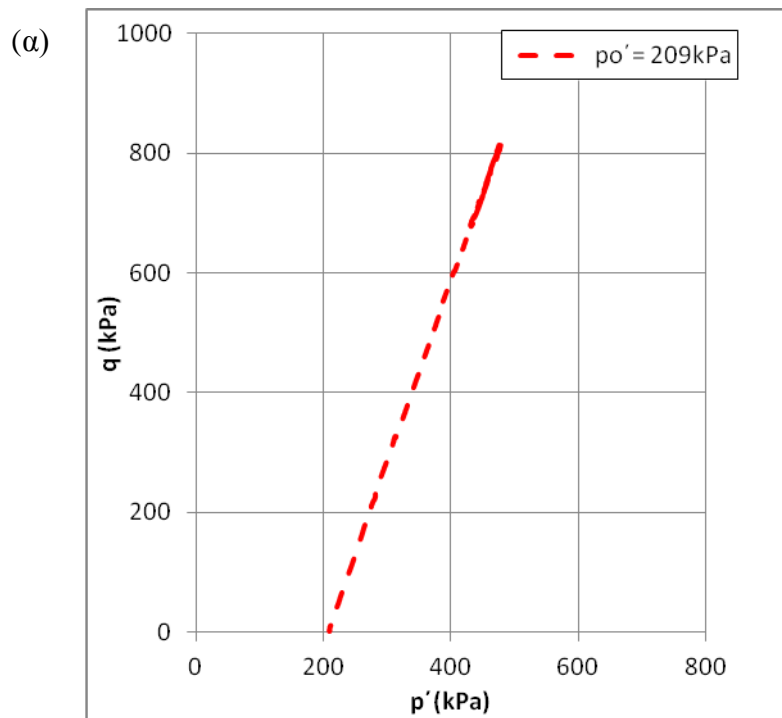
Διάγραμμα 5.2.16: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 402 kPa.



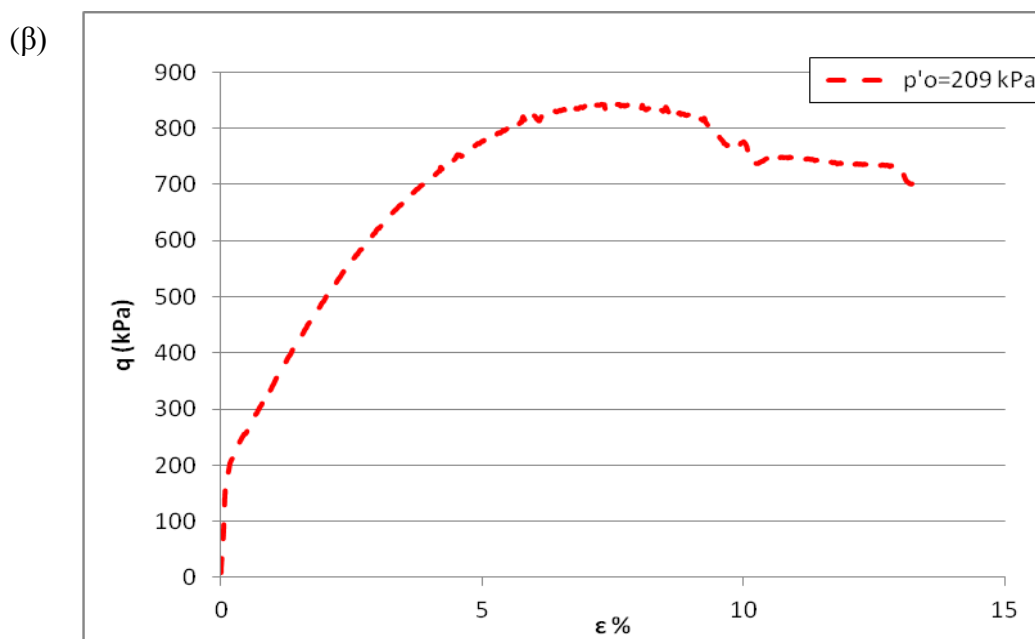
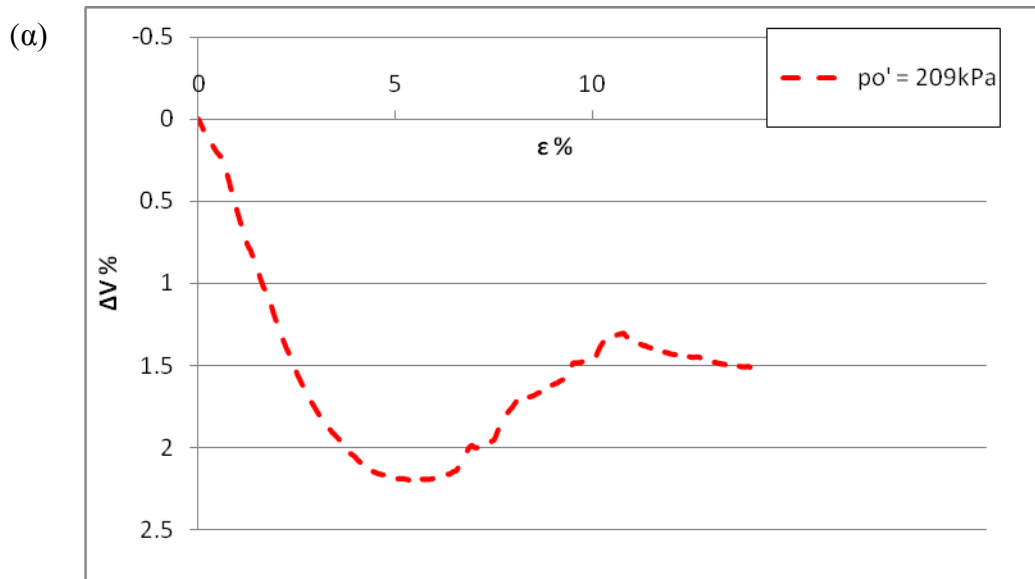
Διάγραμμα 5.2.17: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 98 kPa.



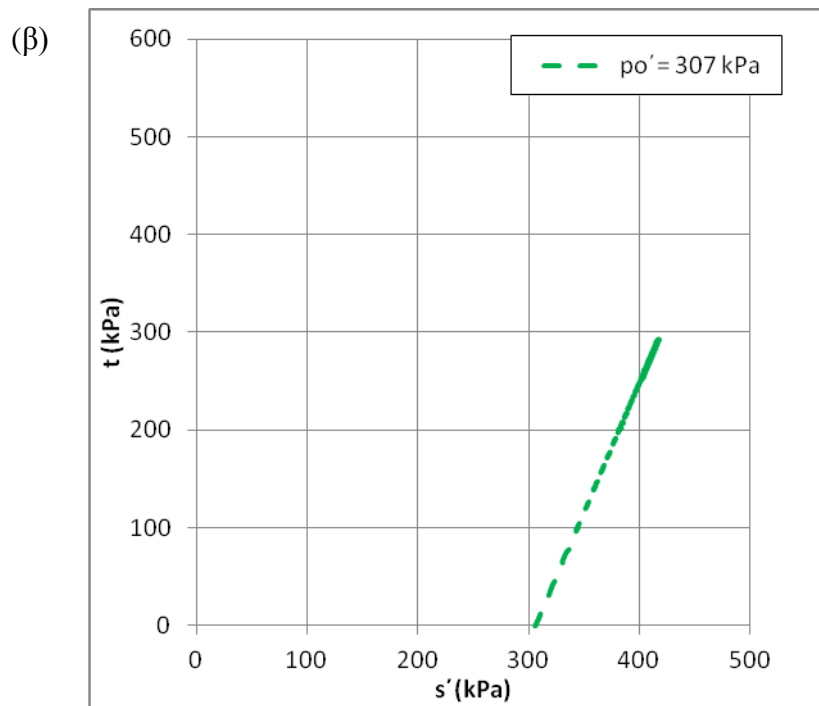
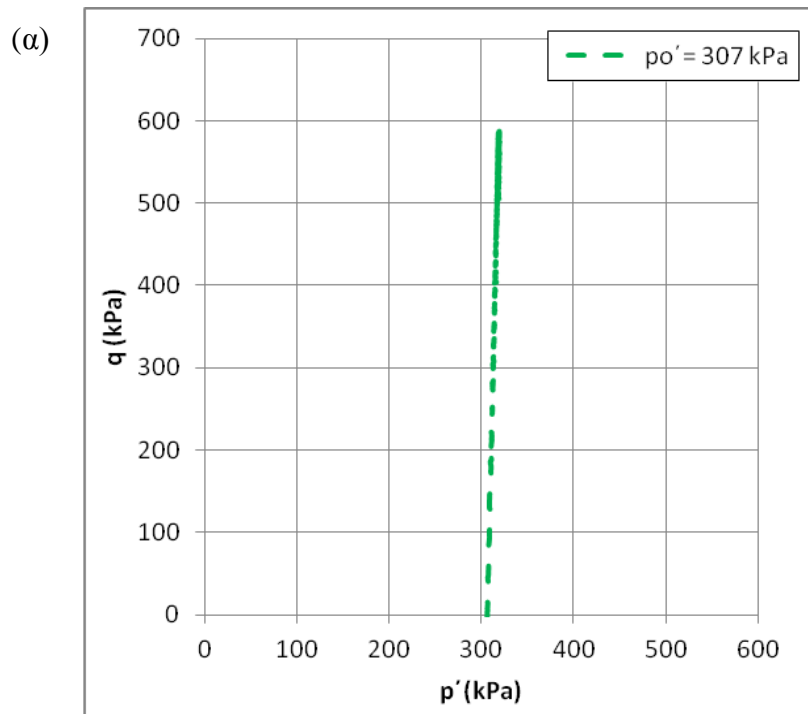
Διάγραμμα 5.2.18: (α) Διάγραμμα μεταβολής όγκου $\Delta V\%$ – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 94 kPa.



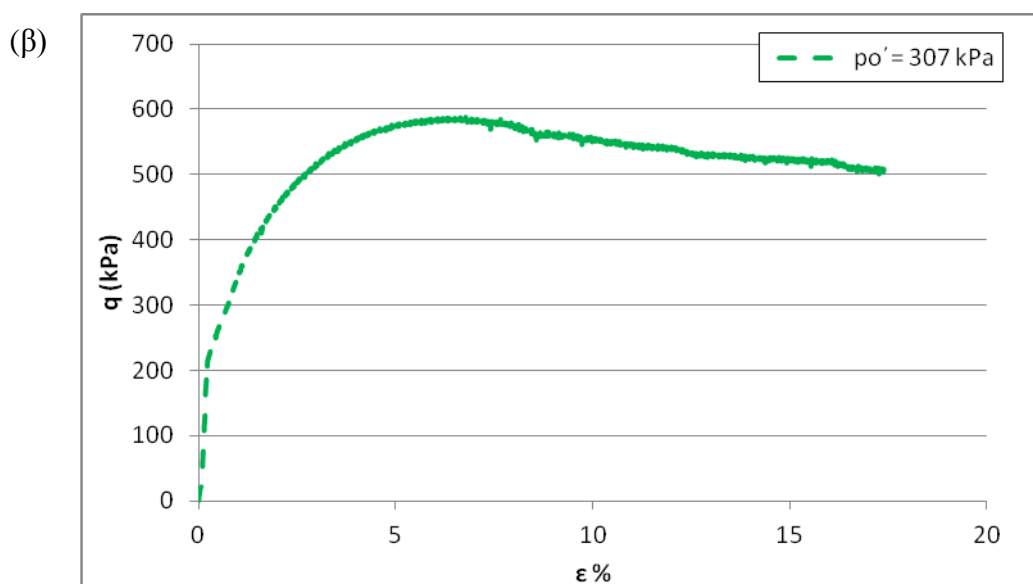
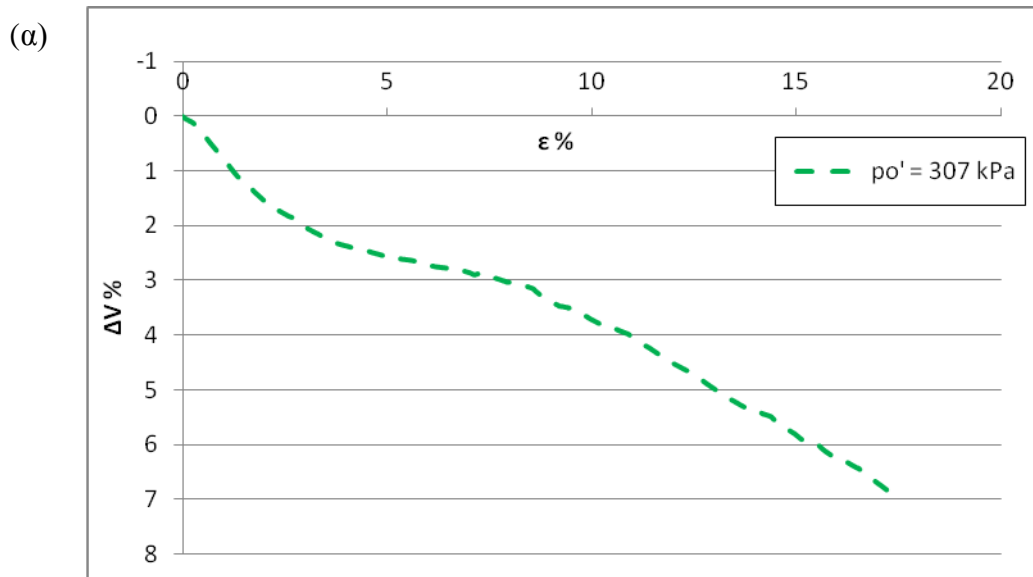
Διάγραμμα 5.2.19: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 209 kPa.



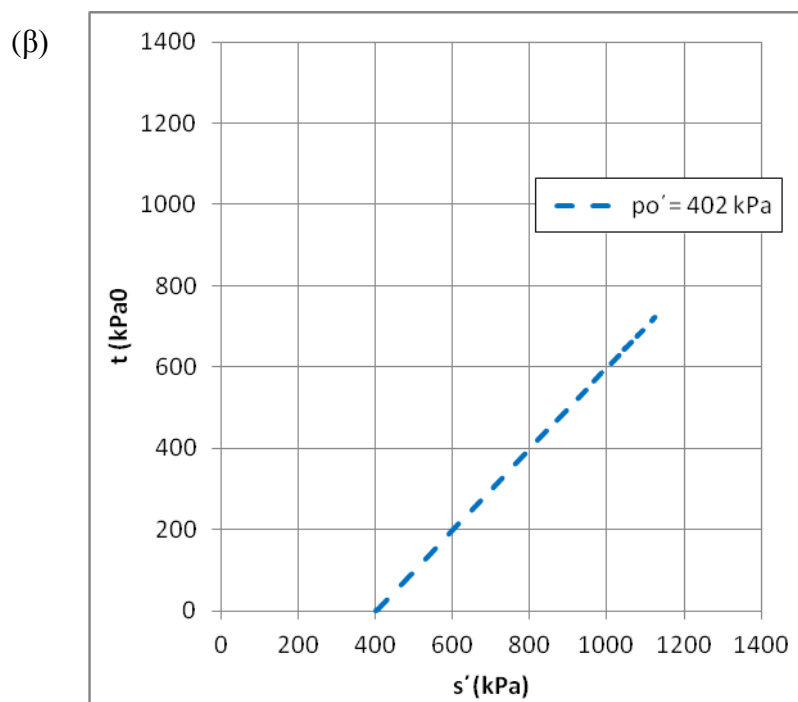
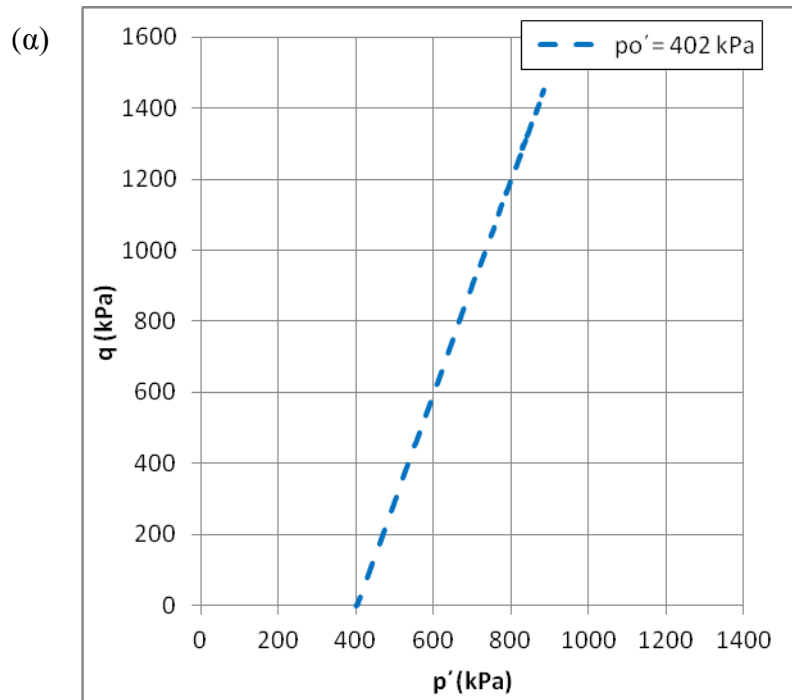
Διάγραμμα 5.2.20: (α) Διάγραμμα μεταβολής όγκου $\Delta V\%$ – αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 209 kPa.



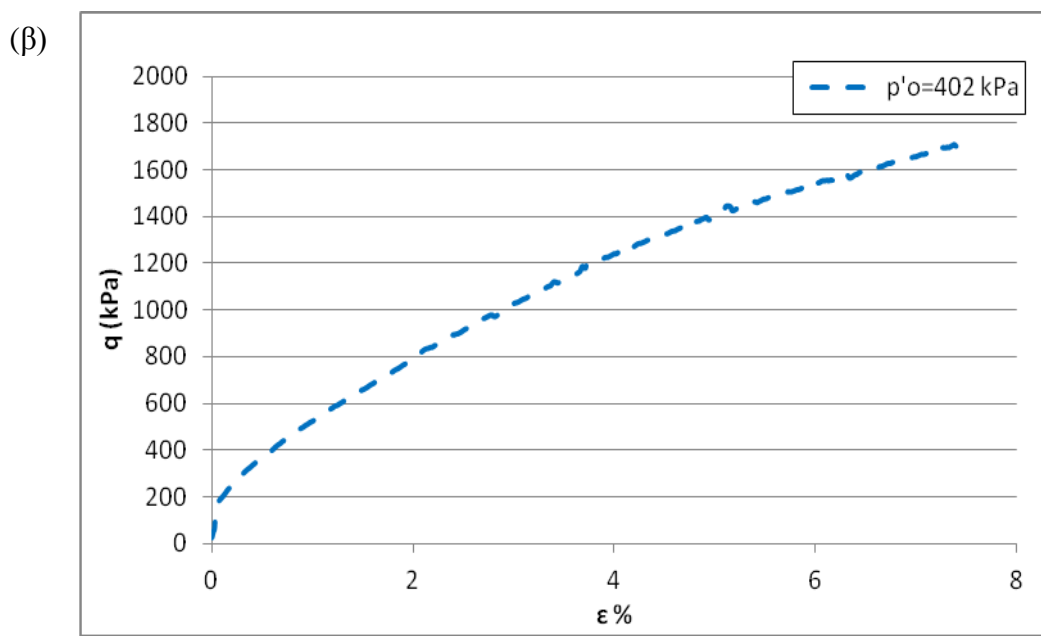
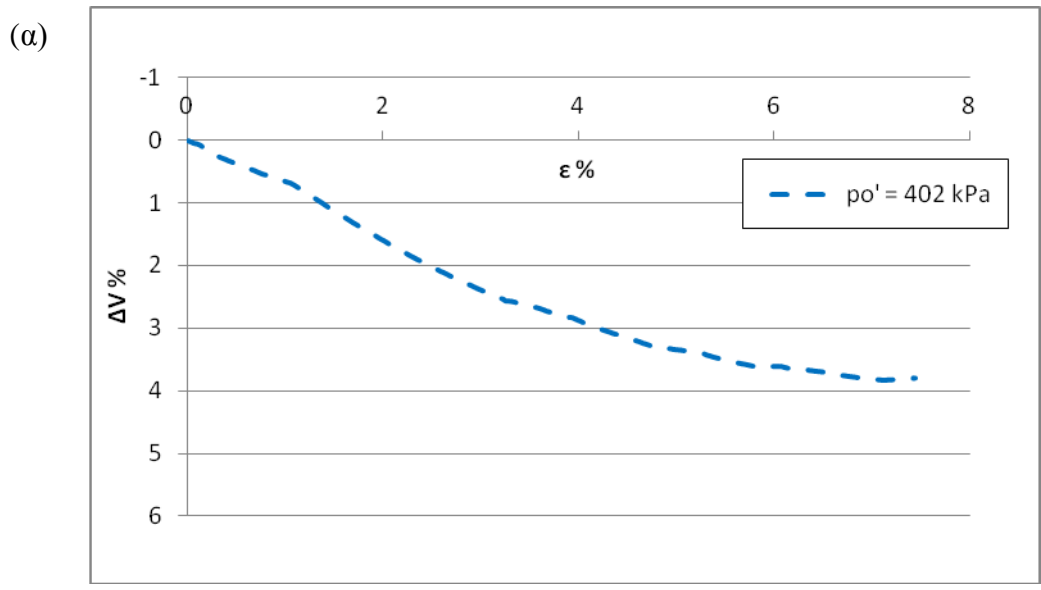
Διάγραμμα 5.2.21: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 307 kPa.



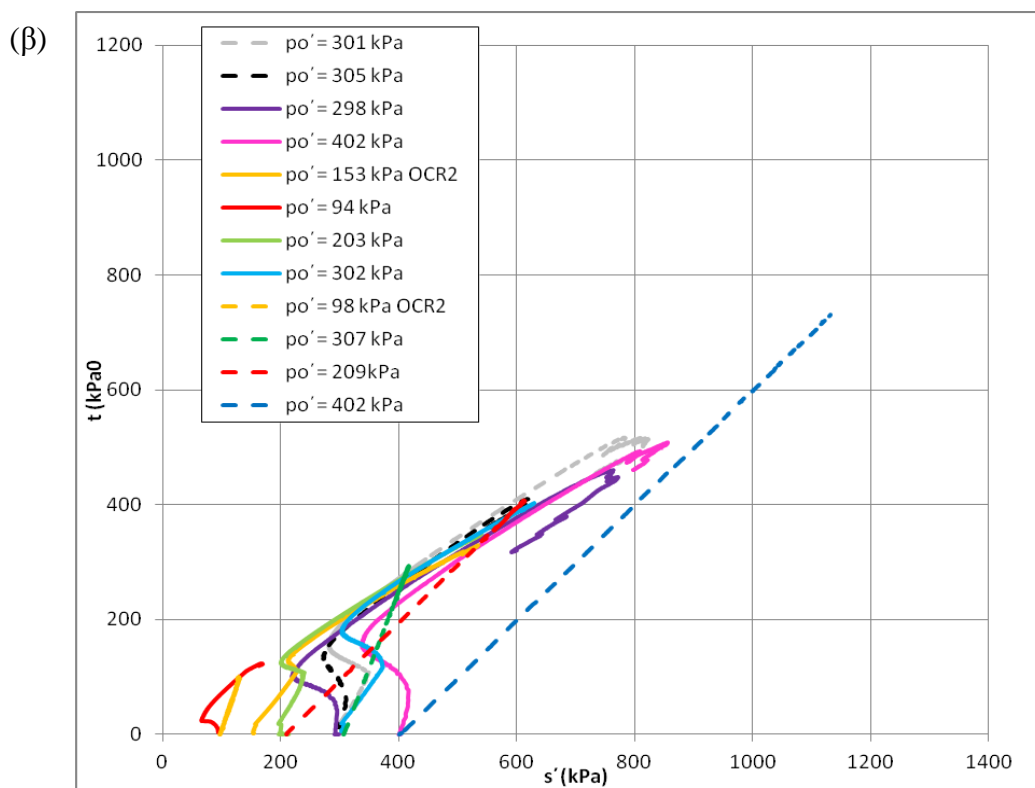
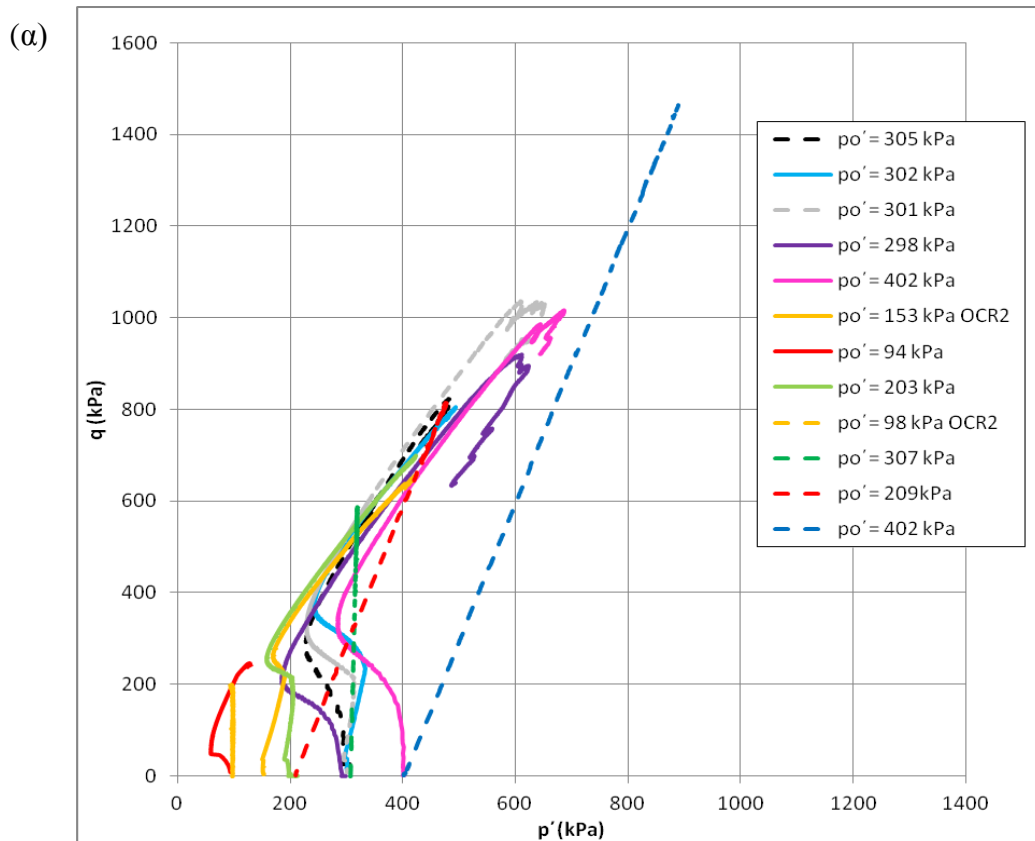
Διάγραμμα 5.2.22: (α) Διάγραμμα μεταβολής όγκου $\Delta V\%$ – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 307 kPa.



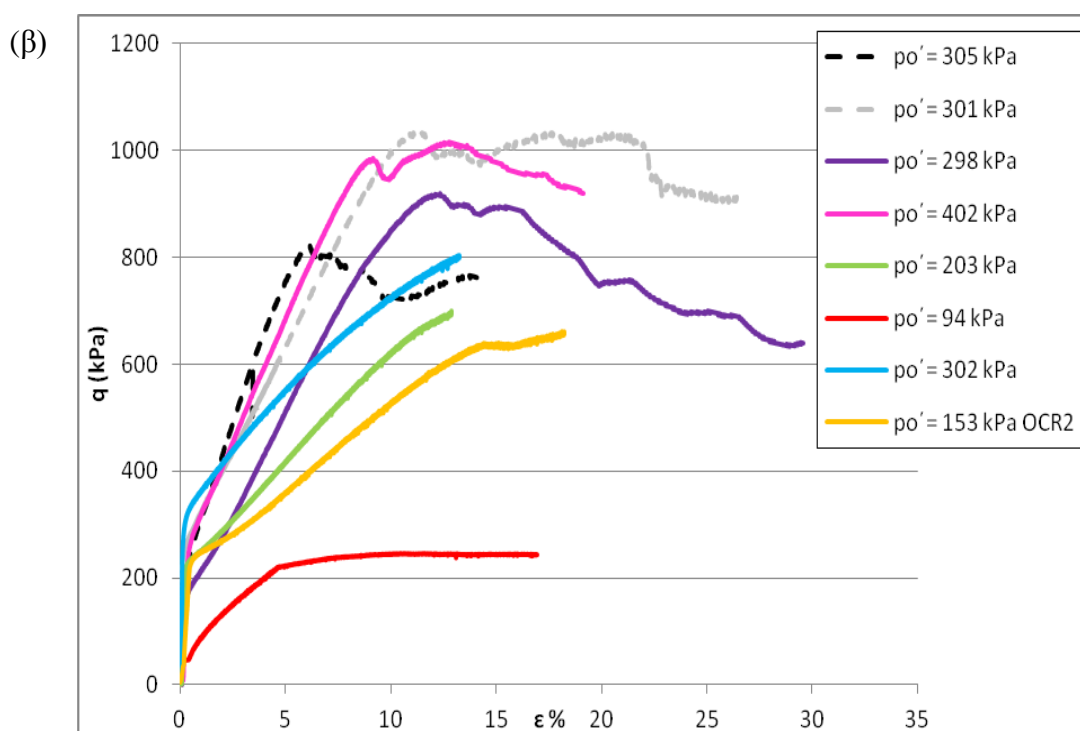
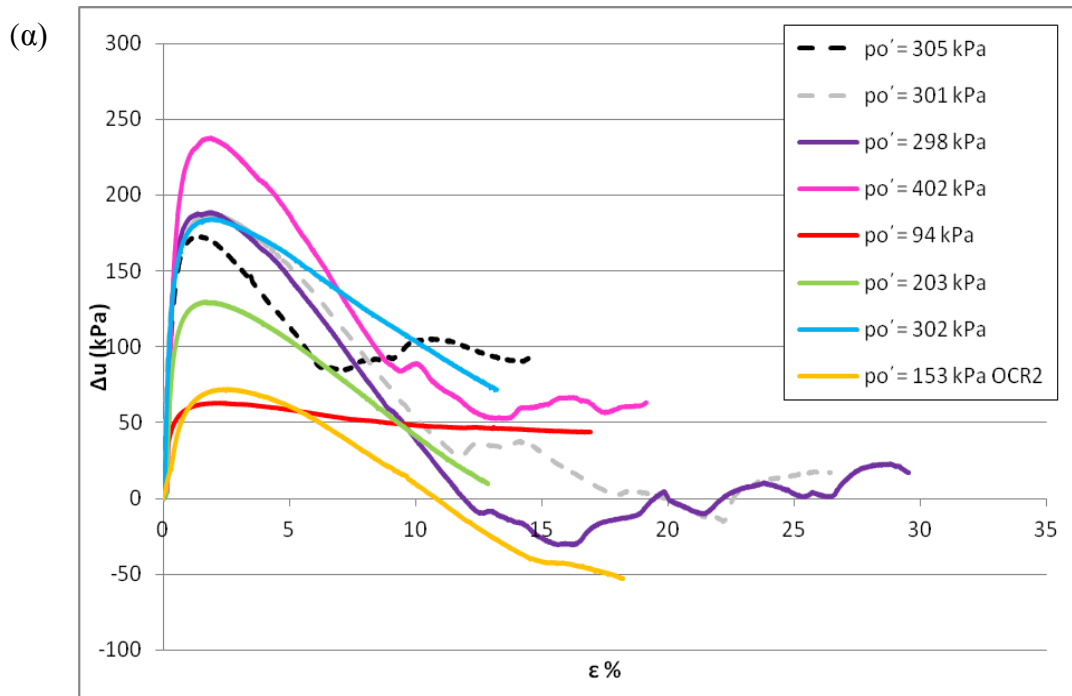
Διάγραμμα 5.2.23: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για τάση στερεοποίησης 402 kPa.



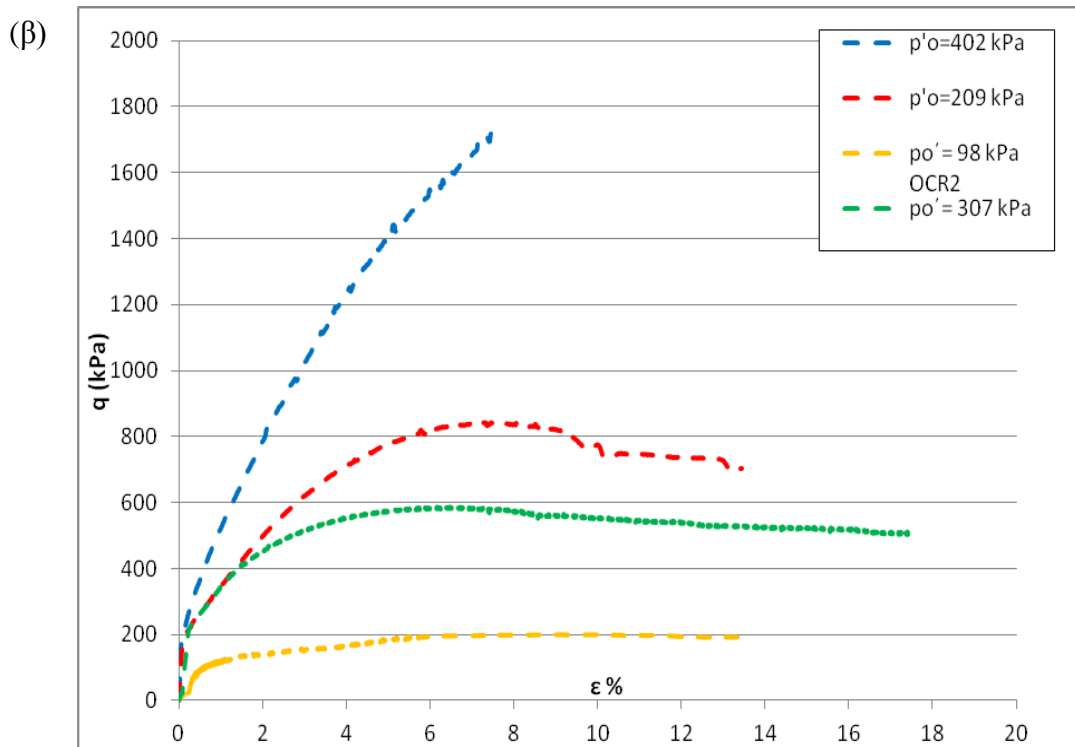
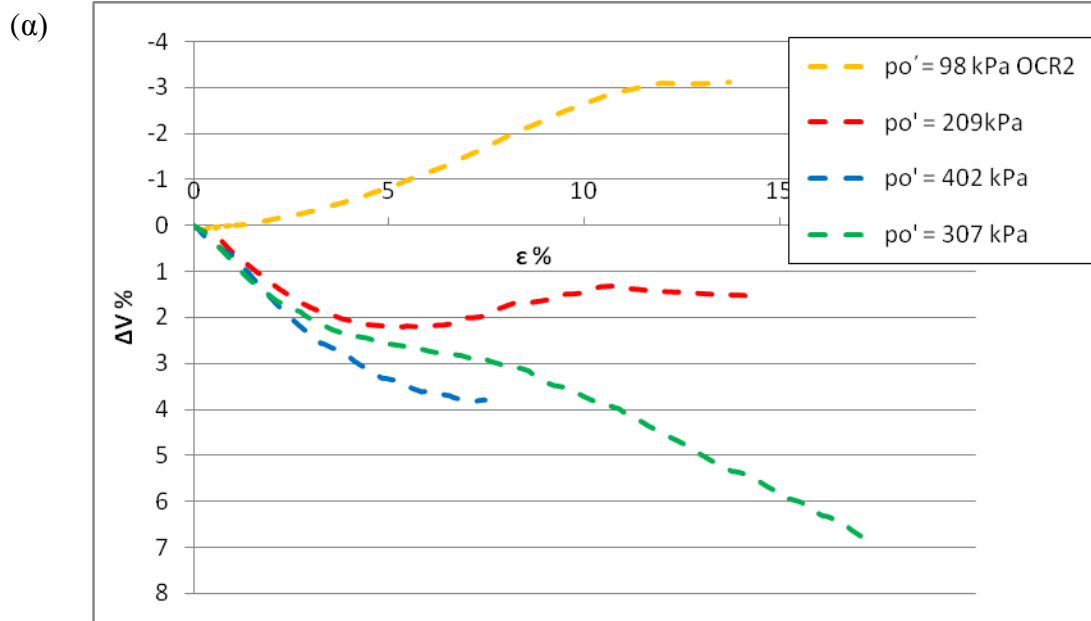
Διάγραμμα 5.2.24: (α) Διάγραμμα μεταβολής όγκου $\Delta V\%$ – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για τάση στερεοποίησης 402 kPa.



Διάγραμμα 5.2.25: Διαδρομές ενεργών τάσεων σε (α) $q - p'$ (β) $t - s'$ για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 5.2.26: (α) Διάγραμμα υπερπίεσης πόρων Δu – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για όλες τις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης που πραγματοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 5.2.27: (α) Διάγραμμα μεταβολής όγκου $\Delta V\%$ – αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$ (β) διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης q - αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon\%$, για όλες τις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης που πραγματοποιήθηκαν.

Όσον αφορά τις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης στα αναζυμωμένα δοκίμια, παρατηρείται ότι για όλα τα δοκίμια το διάγραμμα $q - \varepsilon$ έχει αρχικά μεγάλη κλίση μέχρι $\varepsilon = 0.3\% \sim 0.5\%$. Στο σημείο αυτό η κλίση μειώνεται σημαντικά, μέχρις ότου η αποκλίνουσα τάση q φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Στις δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση 153, 203, 302 kPa δεν παρατηρείται παραμόρφωση υπό σταθερή τάση. Στις δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση 94 και 301 kPa η αποκλίνουσα τάση q σταθεροποιείται περίπου στη μέγιστη τιμή της. Στις δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση 298, 305 και 402 kPa η αποκλίνουσα τάση σταθεροποιείται σε μία χαμηλότερη τιμή για μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Στο διάγραμμα $\Delta u - \varepsilon$, μόνον η δοκιμή με αρχική μέση ενεργό τάση 94 kPa θυμίζει την τυπική συμπεριφορά αργίλου, με σταθεροποίηση της υπερπίεσης του νερού των πόρων στη μέγιστη τιμή αυτής. Οι υπόλοιπες δοκιμές θυμίζουν την τυπική συμπεριφορά πυκνής άμμου. Η μέγιστη τιμή υπερπίεσης του νερού των πόρων εμφανίζεται για παραμόρφωση $1\% \sim 2\%$ και στη συνέχεια έχουμε συνεχή μείωση της τιμής. Στις δοκιμές με αρχική μέση ενεργό τάση 298, 301, 305 και 402 kPa η Δu σχεδόν σταθεροποιείται για πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Η αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος από θετική σε αρνητική φανερώνει τη μετάβαση της συμπεριφοράς του δοκιμίου από τάση για συμπύκνωση αρχικά, σε τάση για διόγκωση στη συνέχεια.

Οι διαδρομές τάσεων επίσης θυμίζουν τη συμπεριφορά πυκνής άμμου, καθώς φανερώνουν την αρχική τάση για συμπύκνωση (κατεύθυνση προς τα αριστερά – μείωση του p') η οποία ακολουθείται από τάση για διόγκωση (κατεύθυνση προς τα δεξιά – αύξηση του p').

Όσον αφορά στις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης στα αναζυμωμένα δοκίμια, παρατηρείται επίσης, ότι για όλα τα δοκίμια το διάγραμμα $q - \varepsilon$ έχει αρχικά μεγάλη κλίση μέχρι $\varepsilon = \sim 1\%$. Στο σημείο αυτό η κλίση μειώνεται σημαντικά μέχρις ότου η αποκλίνουσα τάση q φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Εκτός από τη δοκιμή με αρχική μέση ενεργό τάση 402 kPa, όλα τα δοκίμια φτάνουν σε κατάσταση κατά την οποία παραμορφώνονται υπό σταθερή τάση για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 7%.

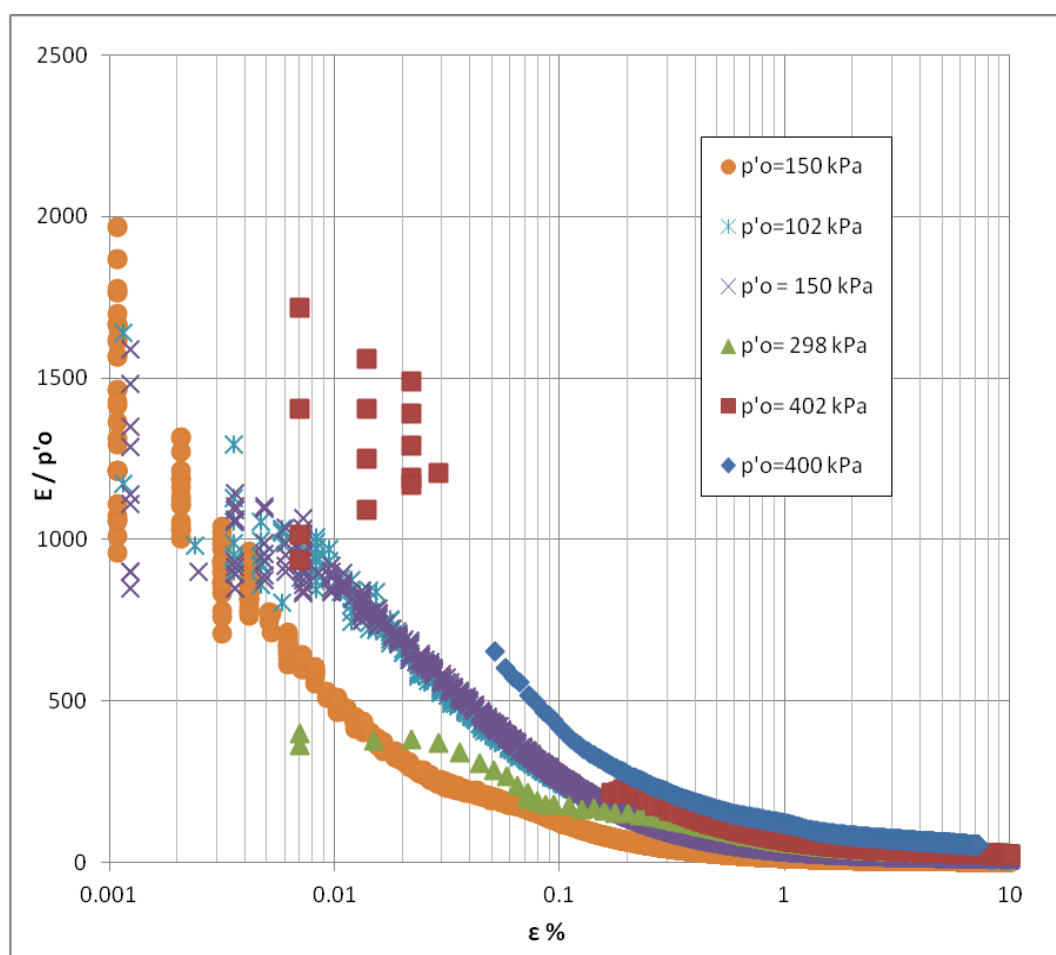
Στο διάγραμμα $\Delta V - \varepsilon$ το δοκίμιο με αρχική μέση ενεργό τάση 98 kPa και OCR2 μειώνει τον όγκο του μέχρι $\varepsilon=1\%$ και στη συνέχεια διογκώνεται, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια μειώνουν τον όγκο τους από την αρχή της παραμόρφωσης.

Στις διαδρομές τάσεων, αφού επιτευχθεί η μέγιστη διατμητική αντοχή, η τιμή της αποκλίνουσας τάσης μειώνεται σε μία μικρότερη τιμή πράγμα που επίσης παραπέμπει στη συμπεριφορά πυκνής άμμου. Βέβαια, η τάση για διαστολικότητα απομειώνεται

για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από περίπου 5%, γεγονός που σαφώς διαφοροποιεί τη Μάργα από μία πυκνή άμμο.

Η μη γραμμικότητα του εδάφους είναι προφανής ήδη από τα διαγράμματα $q - \varepsilon$. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το παρακάτω διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται οι καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας (τεμνον) κανονικοποιημένο ως προς την αρχική τάση στερεοποίησης – παραμόρφωσης $\varepsilon\%$ για μερικές από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

Οι καμπύλες σχεδόν κανονικοποιούνται σε μία καμπύλη, με το μέτρο ελαστικότητας να φθίνει απότομα και για αξονική παραμόρφωση της τάξης του 1% να σταθεροποιείται στην ίδια τιμή για όλα τα δοκίμια.



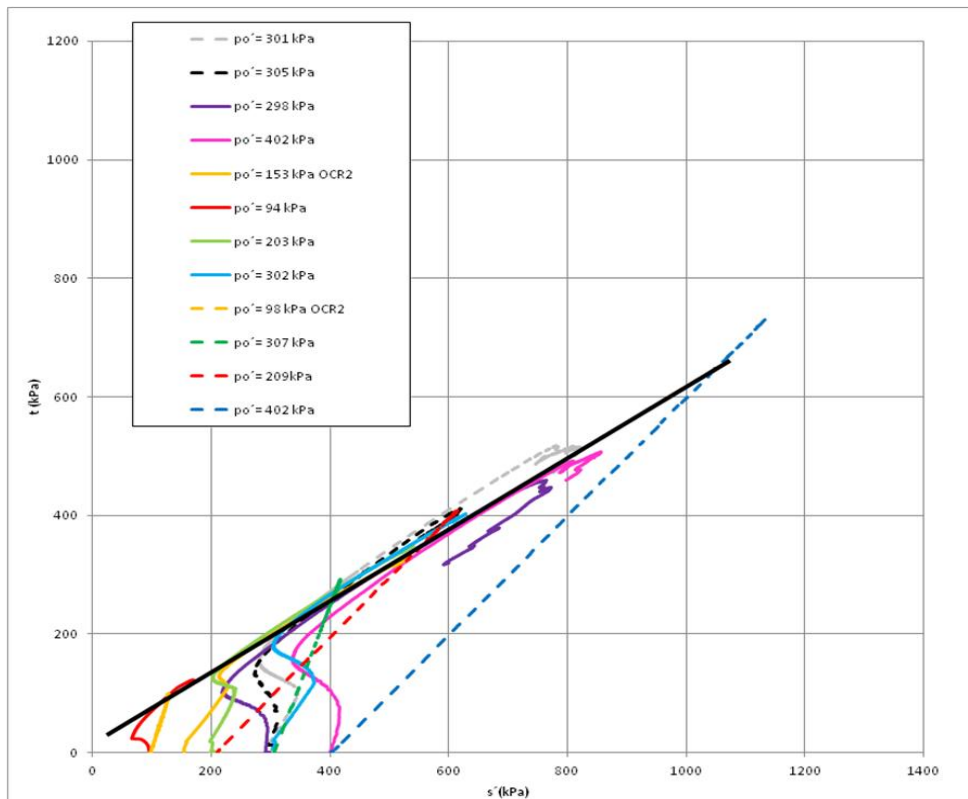
Διάγραμμα 5.2.28: Διάγραμμα εδαφικής δυσστησίας E_u – αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon\%$.

Τα δοκίμια κατά την αστοχία εμφάνισαν φούσκωμα με τα περισσότερα από αυτά να σχηματίζουν επιφάνεια αστοχίας με γωνία ως προς την οριζόντια περίπου 60° .



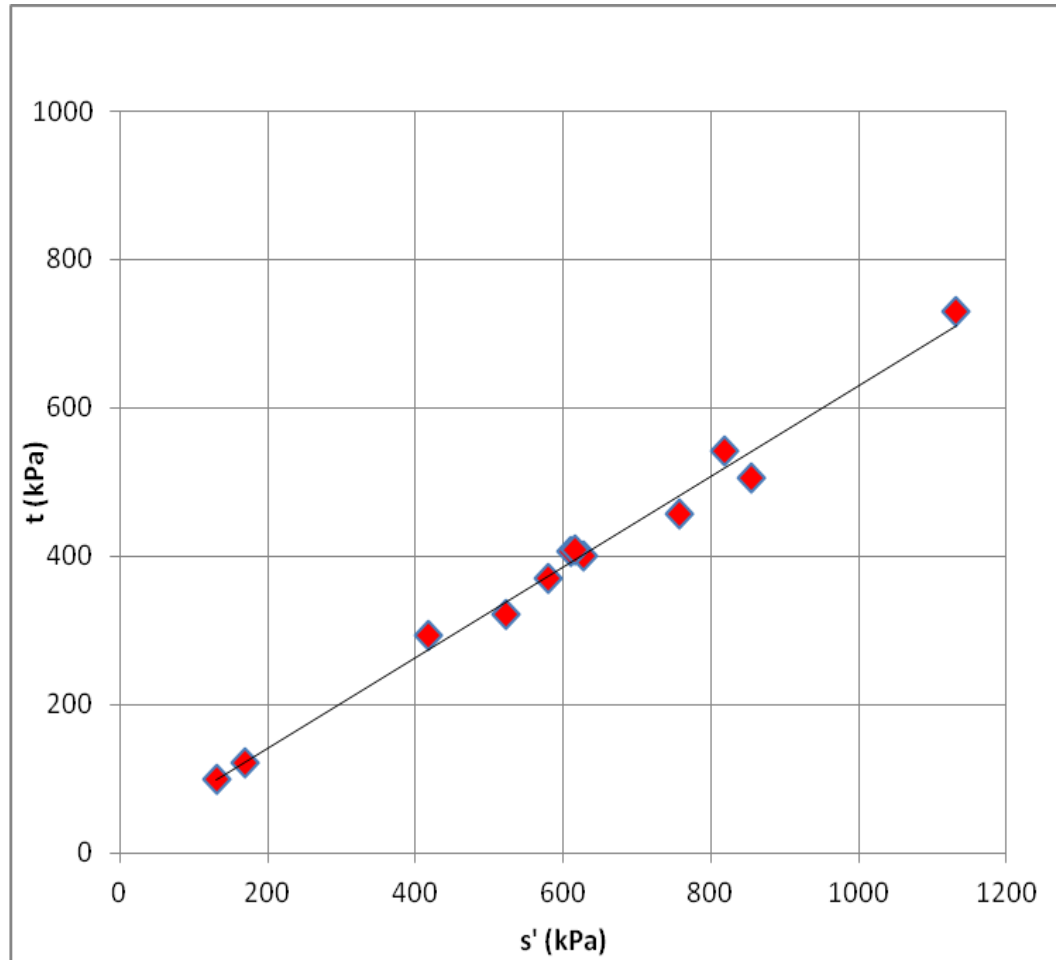
Εικόνα 5.2.1: Σχηματισμός επιπέδου αστοχίας κατά την τριαξονική δοκιμή.

Οι κορυφές των διαδρομών τάσεων όλων των δοκιμών σχηματίζουν μία γραμμή που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η εγγενής καμπύλη αστοχίας



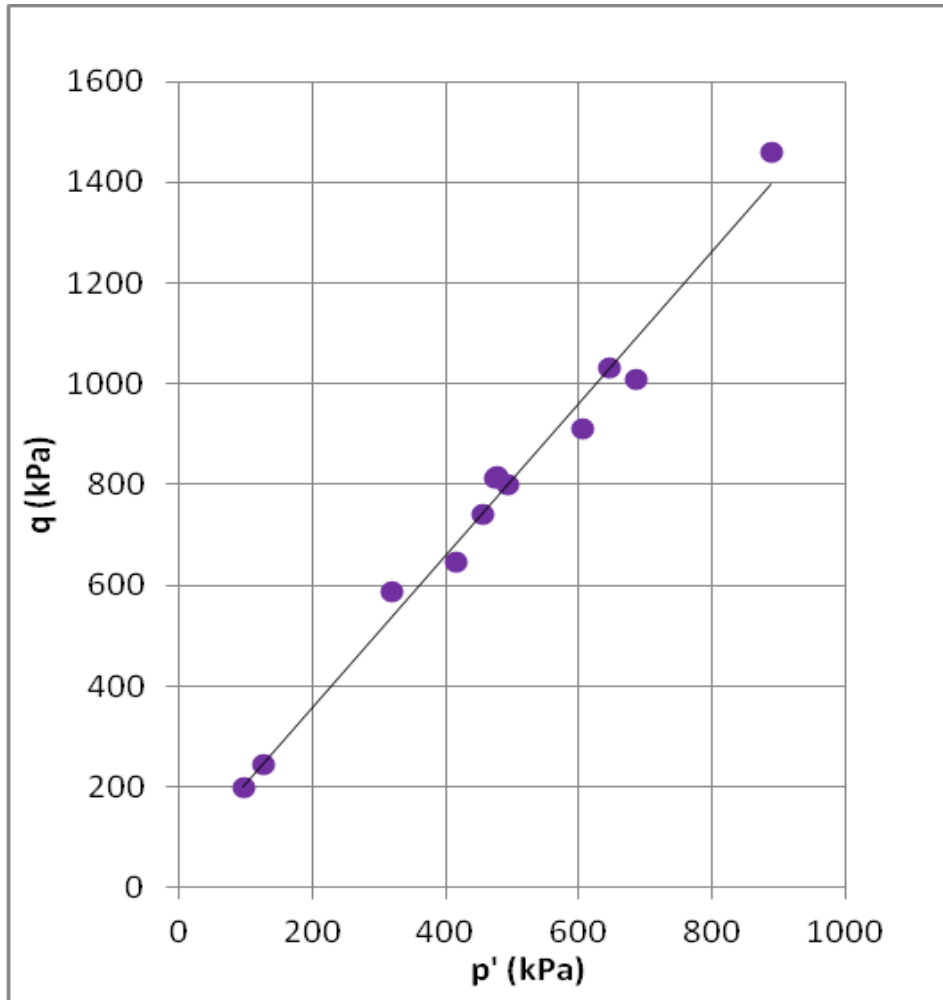
Διάγραμμα 5.2.29: Εγγενής καμπύλη αστοχίας.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές αντοχές των δοκιμίων, σε διάγραμμα $\tau - \sigma'$, απ' όπου προκύπτει η κρίσιμη γωνία διατμητικής αντοχής, $\varphi_{cr} = 31.42^\circ$ ως $\tan a = \sin \varphi_{cr}$ (όπου a η γωνία του διαγράμματος).



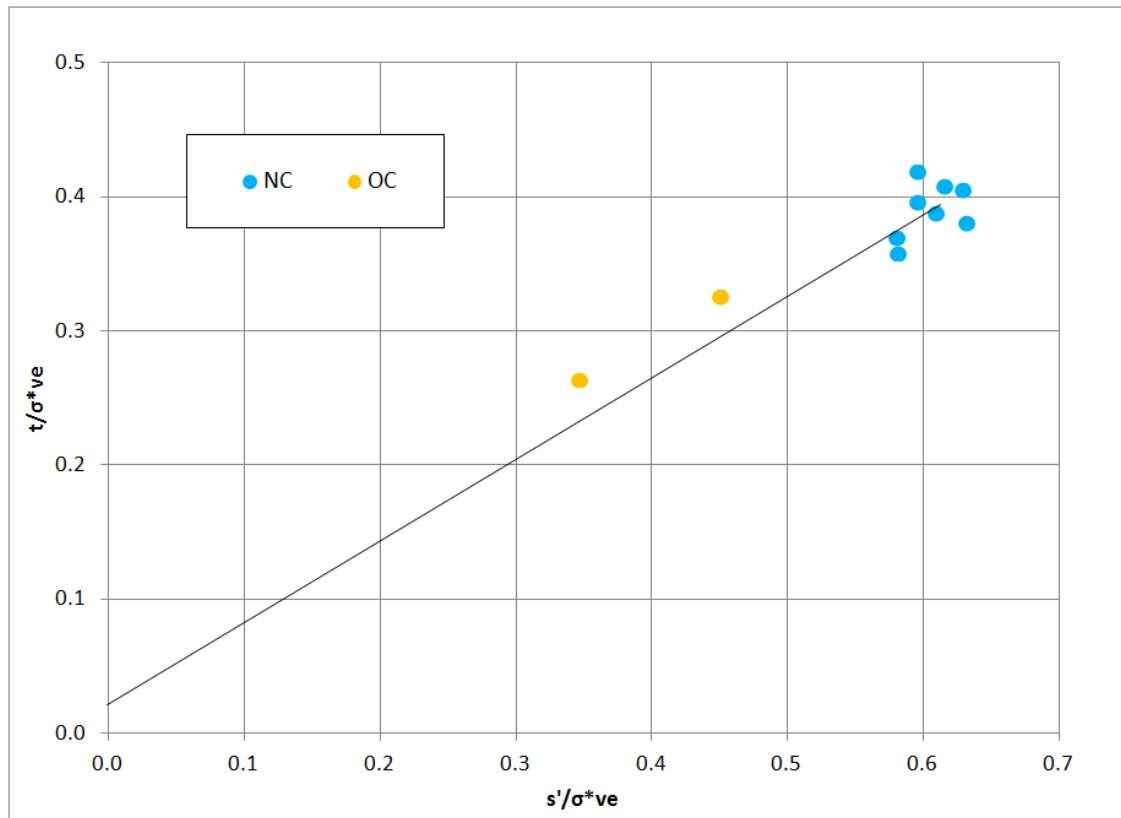
Διάγραμμα 5.2.30: Μέγιστες διατμητικές αντοχές, κρίσιμη γωνία τριβής.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές αντοχές των δοκιμίων, σε διάγραμμα $q - p'$, απ' όπου προκύπτει η σταθερά κρίσιμης κατάστασης, $M = 1.50$



Διάγραμμα 5.2.31: Μέγιστες διατμητικές αντοχές, σταθερά κρίσιμης κατάστασης.

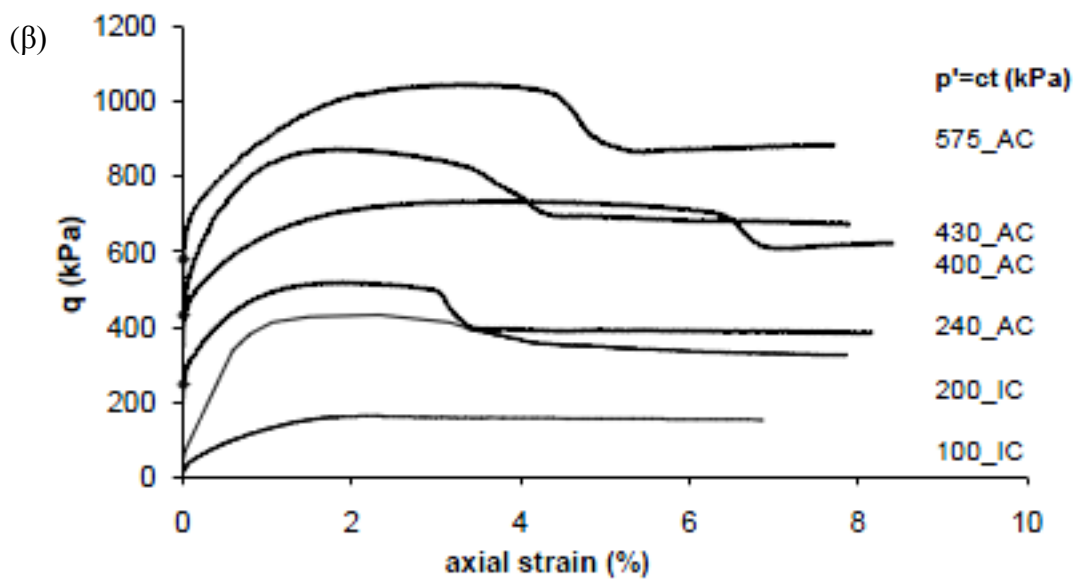
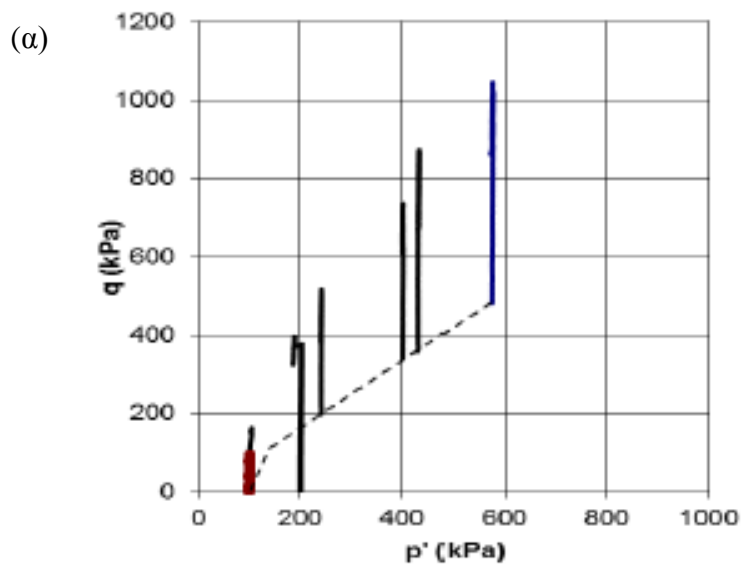
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα $t - s'$ κανονικοποιημένο με την τάση σ_{ve}^* , δηλαδή την ισοδύναμη τάση που αντιστοιχεί στο δείκτη πόρων που είχε αρχικά το δοκίμιο, μετά τη στερεοποίηση, στην καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει η γωνία διατμητικής αντοχής κατά Hvorslev, $\varphi_e^* = 31.4^\circ$

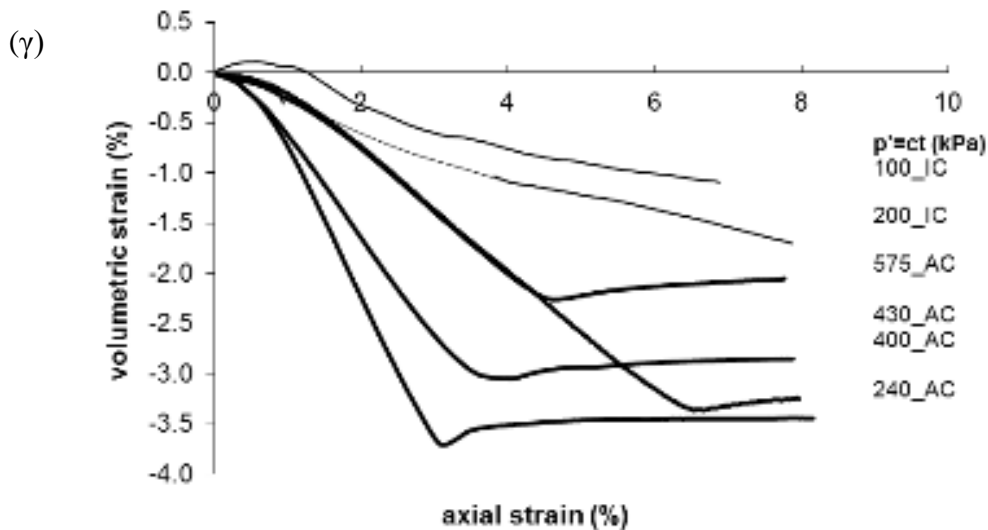


Διάγραμμα 5.2.32: Κανονικοποιημένα αποτελέσματα για τα αναζυμωμένα δοκίμια.

5.2.2. Αδιατάρακτα δοκίμια

Για να γίνει η σύγκριση μεταξύ φυσικών και αναζυμωμένων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών της εργασίας Απόκριση Στιφρών Αργίλων στην Τριαξονική Συσκευή που έγινε στα πλαίσια του προγράμματος ενίσχυσης βασικής έρευνας (B.N.Γεωργιάννου 2009).

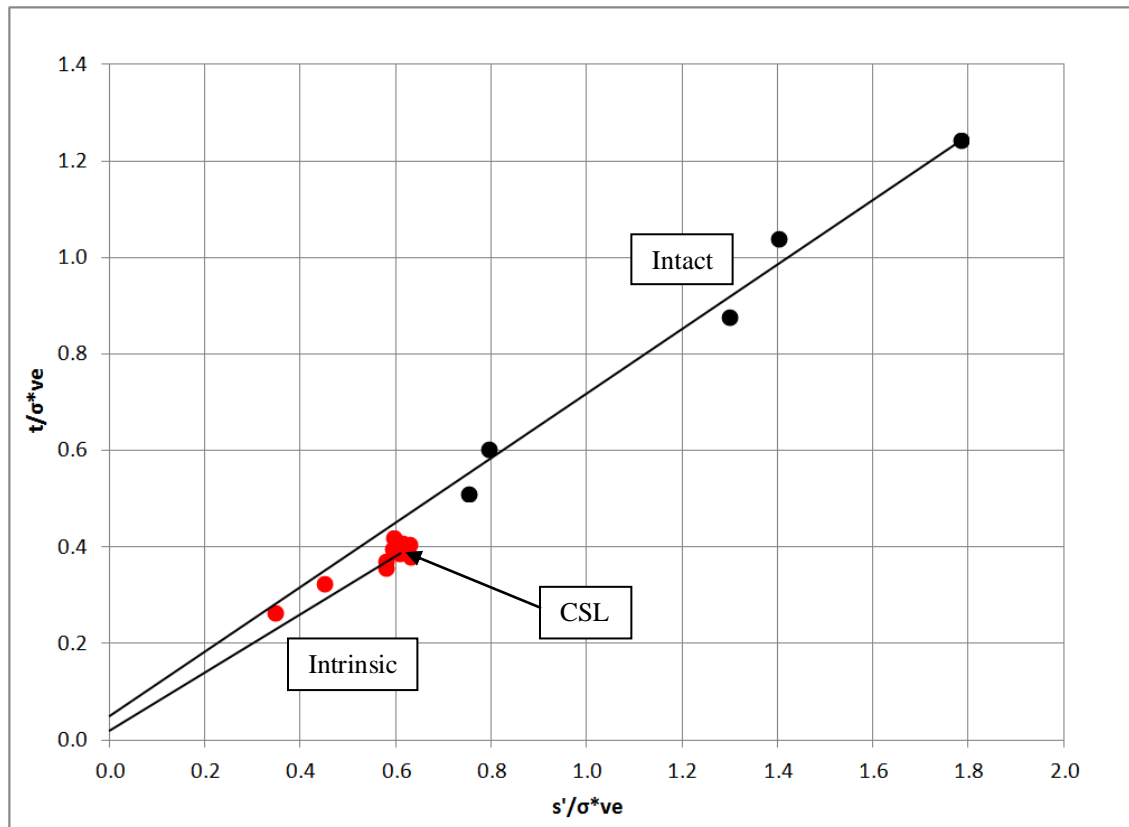




Διάγραμμα 5.2.33: (α) Διαδρομές τάσεων, (β) σχέσεις τάσης - αξονικής παραμορφώσεων, (γ) σχέσεις ογκομετρικής παραμόρφωσης – αξονικής παραμόρφωσης.

Στο διάγραμμα 5.2.33 παρουσιάζεται μία σειρά δοκιμών σε φυσικά δοκίμια μάργας ανισότροπα στερεοποιημένα στην τριαξονική συσκευή. Η διάτμηση των δοκιμών έγινε υπό συνθήκες σταθερής μέσης ενεργού τάσης p' μέχρι την αστοχία. Τα δοκίμια έδειξαν ψαθυρή συμπεριφορά όπως αναμένεται για προστερεοποιημένα δοκίμια

Το κανονικοποιημένο διάγραμμα $t/\sigma_{ve}^* - s'/\sigma_{ve}^*$ για τα φυσικά δοκίμια παρουσιάζεται παρακάτω και συγκρίνεται με το αντίστοιχο που προέκυψε για τα αναζυμωμένα δοκίμια.



Διάγραμμα 5.2.34: Κανονικοποιημένα αποτελέσματα για αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δοκίμια.

Από το παραπάνω διάγραμμα λοιπόν, προκύπτουν οι κανονικοποιημένες παράμετροι $\varphi_e^* = 31.4^\circ$, $\kappa^* = 0.021$ και $\varphi' = 33.8^\circ$, $\kappa = 0.057$ για τα αναζυμωμένα και τα φυσικά δοκίμια αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις παραπάνω καμπύλες παρατηρούμε ότι η καμπύλη του φυσικού υλικού υπέρκειται της καμπύλης του αναζυμωμένου υλικού και εκτείνεται δεξιά από το σημείο CSL αυτής. Ο λόγος κ/κ^* (ration of the cohesive intercepts) και ο λόγος T (strength ratio at the intrinsic critical state) παίρνουν τις τιμές 2.71 και 1.178 αντίστοιχα.

Το γεγονός ότι η καμπύλη Hvorslev του φυσικού υλικού βρίσκεται ελάχιστα πάνω από την αντίστοιχη του αναζυμωμένου υλικού υποδεικνύει ότι οι δεσμοί δεν είναι σημαντικοί. Η επέκταση της καμπύλης Hvorslev του φυσικού υλικού στα δεξιά υποδεικνύει τις σημαντικές διαφορές στη δομή μεταξύ των σωματιδίων του υλικού στη φυσική και στην αναζυμωμένη κατάσταση.

6 Συμπεράσματα

Η Μάργα του Ισθμού της Κορίνθου είναι μία υλός χαμηλής πλαστιμότητας με μικρό ποσοστό αργιλικών προσμίξεων. Η συμπεριφορά της διαφέρει σημαντικά από τη συμπεριφορά μία τυπικής αργίλου. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγιναν εργαστηριακές δοκιμές σε φυσικά δοκίμια που αποσπάστηκαν από τον Ισθμό της Κορίνθου αλλά και σε αναζυμωμένα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο.

- Όσον αφορά στη συμπεριφορά της μάργας σε μονοδιάστατη συμπίεση, η συμπεριφορά του αναζυμωμένου υλικού δεν ακολουθεί την απόκριση τυπικών αργίλων και οι καμπύλες συμπίεσης και διόγκωσης εξαρτώνται από το αρχικό ποσοστό υγρασίας ανάμιξης. Για διαφορετικά αρχικά ποσοστά υγρασίας οι καμπύλες παραμένουν παράλληλες μέχρι και κατακόρυφη τάση της τάξης των 6000kPa, ενώ διατηρούν καμπύλο σχήμα σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Τα εγγενή χαρακτηριστικά συμπίεστικότητας είναι $C_c^* = 0.12$ και $C_s^* = 0.0143$.
- Οι κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης δεν ακολουθούν την καμπύλη που πρότεινε ο Burland για τυπικές αργίλους για όλο το εύρος των τάσεων που επιβλήθηκαν κατά τη δοκιμή του συμπίεσόμετρου. Έχουν καμπύλο σχήμα και βρίσκονται κάτω από την καμπύλη του Burland για τάσεις μικρότερες από 80 kPa και μεγαλύτερες από 1500 kPa, ενώ για ενδιάμεσες τάσεις βρίσκονται πάνω από αυτή.
- Οι καμπύλες συμπίεσης του φυσικού υλικού είναι τυπικές καμπύλες ενός κανονικά στερεοποιημένου υλικού για τάσεις μεγαλύτερες από περίπου 2000kPa. Για μικρότερες τάσεις η συμπεριφορά του ομοιάζει με συμπεριφορά προστερεοποιημένου υλικού, πράγμα το οποίο οφείλεται στη δομή μεταξύ των σωματιδίων του φυσικού υλικού. Από τη σύγκριση της προκύπτουσας ICL με την καμπύλη συμπίεσης του φυσικού υλικού γίνεται φανερό ότι το φυσικό υλικό έχει δομή την οποία μπορεί να διατηρήσει ακόμη και για τάσεις της τάξης των 2500 kPa. Για μεγαλύτερες τάσεις η δομή αυτή “καταστρέφεται” και η κλίση της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης του φυσικού υλικού παρουσιάζει έντονη αλλαγή (καμπύλωση). Η αυξημένη

αντίσταση του φυσικού υλικού σε μονοδιάστατη συμπίεση επιβεβαιώνεται και από την τιμή του λόγου $\sigma'_{vy}/\sigma^*_{ve}$ ($=3.125$).

Όσον αφορά στην απόκριση του υλικού σε διάτμηση, τριαξονικές δοκιμές ελεύθερης και εμποδιζόμενης στράγγισης έγιναν σε σειρά αναζυμωμένων δοκιμίων, προστεροποιημένων και κανονικά στερεοποιημένων.

- Η μάργα του ισθμού της Κορίνθου στην αναζυμωμένη της μορφή συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας της Κρίσιμης Κατάστασης με κρίσιμη γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'_{cr} = 31.42^\circ$, σταθερά κρίσιμη κατάσταση $M = 1.50$ και γωνία διατμητικής αντοχής κατά Hvorslev $\phi_e^* = 31.4^\circ$.
- Το εδαφικό υλικό στη φυσική του μορφή εμφανίζει σημαντικές διαφορές στις διαδρομές τάσεων σε σχέση με το αναζυμωμένο υλικό, υποδεικνύοντας τις σημαντικές διαφορές στη δομή των σωματιδίων του υλικού σε φυσική και αναζυμωμένη μορφή. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την επέκταση της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας αστοχίας του φυσικού υλικού δεξιότερα του σημείου CSL της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας αστοχίας του αναζυμωμένου υλικού.
- Η κανονικοποιημένη περιβάλλουσα αστοχίας του φυσικού υλικού βρίσκεται πάνω από την αντίστοιχη για το αναζυμωμένο υλικό, κοντά όμως σε αυτή. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την αυξημένη αντοχή του φυσικού υλικού σε διάτμηση έναντι του αναζυμωμένου. Οι τιμές των λόγων κ/κ^* ($=2.71$) και T ($=1.178$) επιβεβαιώνουν την ύπαρξη δεσμών στο φυσικό υλικό οι οποίοι ανθίστανται στη διάτμηση, οι χαμηλές τους όμως τιμές δείχνουν ότι η “υπεραντοχή” αυτή δεν είναι σημαντική.

Βιβλιογραφία

Georgiannou V.N., Ferreira P., Altuhafi F., “ Measurement of stiffness of Greek stiff soils ”, proceedings of the 15th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering.

Γεωργιάννου Β.Ν. (2004). “ Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής ”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γκαζέτας Γ. (2003). “ Σημειώσεις Εδαφομηχανικής ”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Καββαδάς Μ. (2003). “ Στοιχεία Εδαφομηχανικής ”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Καραγιαννόπουλος Ν. “ Πειραματική διερεύνηση ιδιοτήτων αργίλων στο συμπιεσόμετρο ”, διπλωματική εργασία.

Μπαρδάνης Μ., Καββαδάς Μ. (2006). “ Συμπιεστότητα, Διαπερατότητα και Συρρίκνωση της Μάργας Κορίνθου ”, 5^ο Πανελλήνιο συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη.

Γεωργιάννου Β.Ν. (2009). “ Απόκριση στιφρών αργίλων στην τριαξονική συσκευή υψηλών πιέσεων ”, Συγκλητική επιτροπή βασικής έρευνας – Π.Ε.Β.Ε. – Ε.Μ.Π.

ASTM designation: D420-D2216. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing of Materials, 1995. Philadelphia, Vol. 04. 08

Attkinson J. ‘An introduction to the mechanics of soils and foundations, Mc GRAW – HILL international series in civil engineering

Burland J.B., Rampello S., Georgiannou V.N. and Calabresi G. (1996) “A laboratory Study of the strength of Four Stiff Clays”, Discussion, Geotechnique, Vol. 46, No. 3, pp. 491-514

Burland J.B. (1990). "On the compressibility and shear strength of natural clays", Geotechnique, Vol. 40, No. 3, pp329-378

Schofield A., Wroth P., " Critical state soil mechanics "

Gasparre A. (2005). " Advanced laboratory characterization of London clay "

Shipton B., Coop M.R. (2012). " On the compression behavior of reconstituted soils ", Soils and Foundations 2012 52(4):668-681

Hong Z.S., Zeng L.L., Cui Y.J. (2012). " Compression behavior of natural and reconstituted Clays " Geotechnique 62, 4(2012), 291-301

A.W. Bishop and D.J. Henkel: " The measurement of soil properties in the triaxial test , Edward Arnold ltd, London (1962)

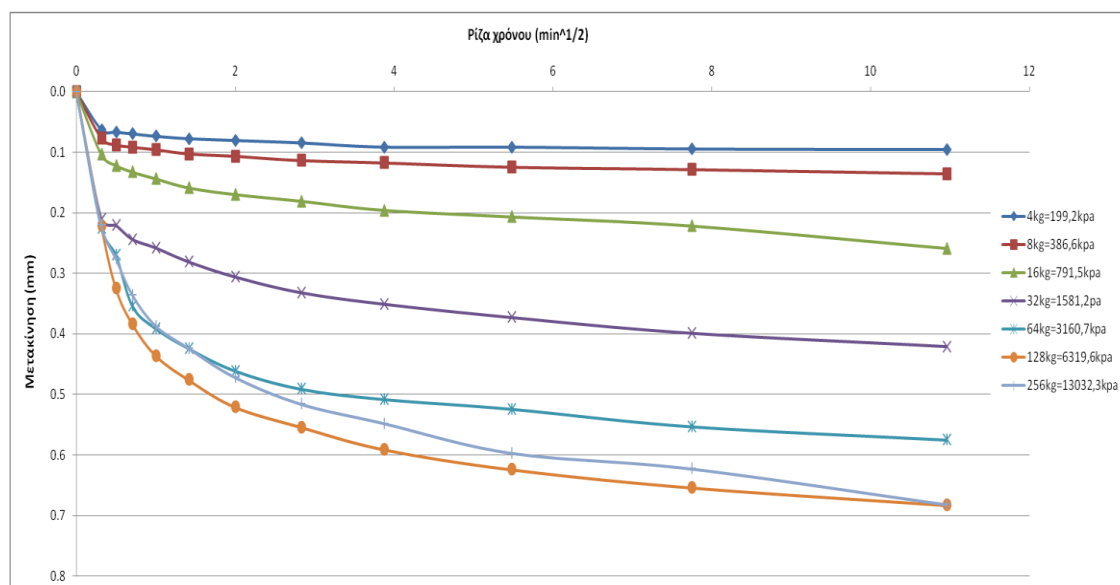
Paul W. Wayne (2006). " Critical state soil Mechanics ", Civil and Enviromental Engineering, Georgia institute of Technology, Atlanta

Παράρτημα

Τυπικός πίνακας υπολογισμού και διάγραμμα μετακίνησης – ρίζας χρόνου.

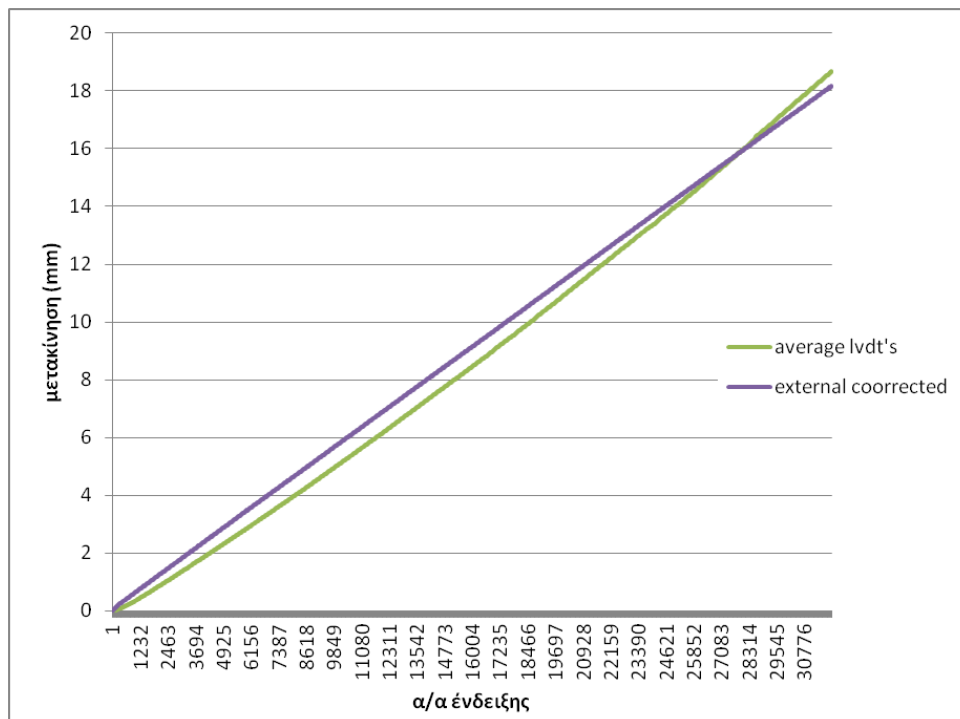
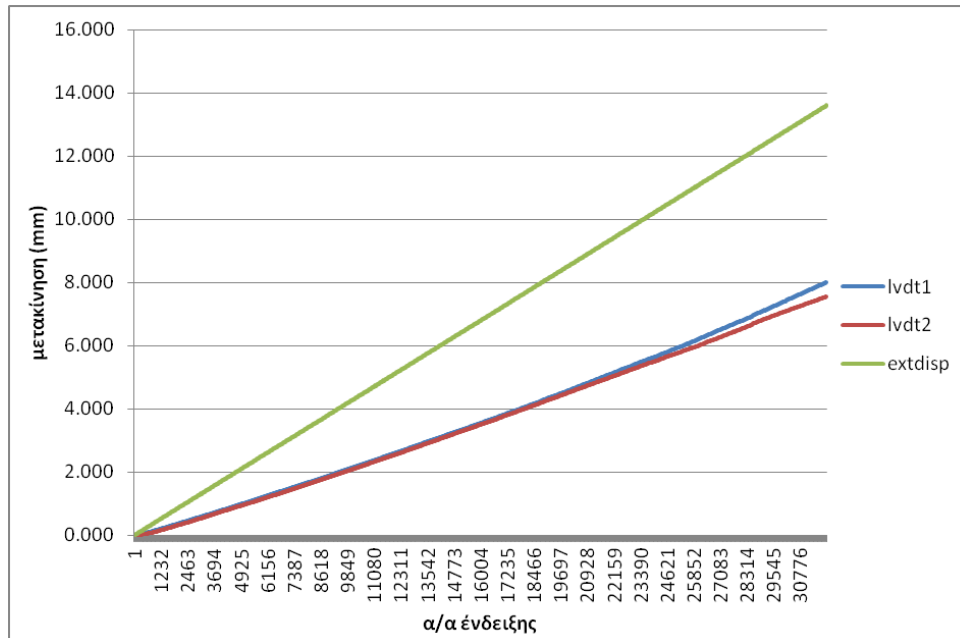
Τα παρακάτω υπολογίστηκαν ενδεικτικά για κάποια πειράματα, για την προσωπική κατανόηση και καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

		4	8	16	32	64	128	256
(min)	sqroot(min)	197.881	394.133	786.637	1571.645	3141.661	6281.693	12561.757
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.316	0.063	0.077	0.104	0.210	0.225	0.222	0.221
0.25	0.500	0.067	0.088	0.122	0.221	0.269	0.325	0.276
0.5	0.707	0.070	0.092	0.133	0.244	0.354	0.384	0.336
1	1.000	0.074	0.096	0.144	0.258	0.391	0.436	0.387
2	1.414	0.078	0.103	0.159	0.281	0.424	0.476	0.424
4	2.000	0.081	0.107	0.170	0.306	0.461	0.521	0.472
8	2.828	0.085	0.114	0.181	0.332	0.491	0.554	0.516
15	3.873	0.092	0.118	0.196	0.351	0.508	0.591	0.548
30	5.477	0.092	0.125	0.207	0.373	0.524	0.624	0.597
60	7.746	0.095	0.129	0.222	0.399	0.553	0.654	0.623
120	10.954	0.096	0.136	0.259	0.421	0.575	0.683	0.682



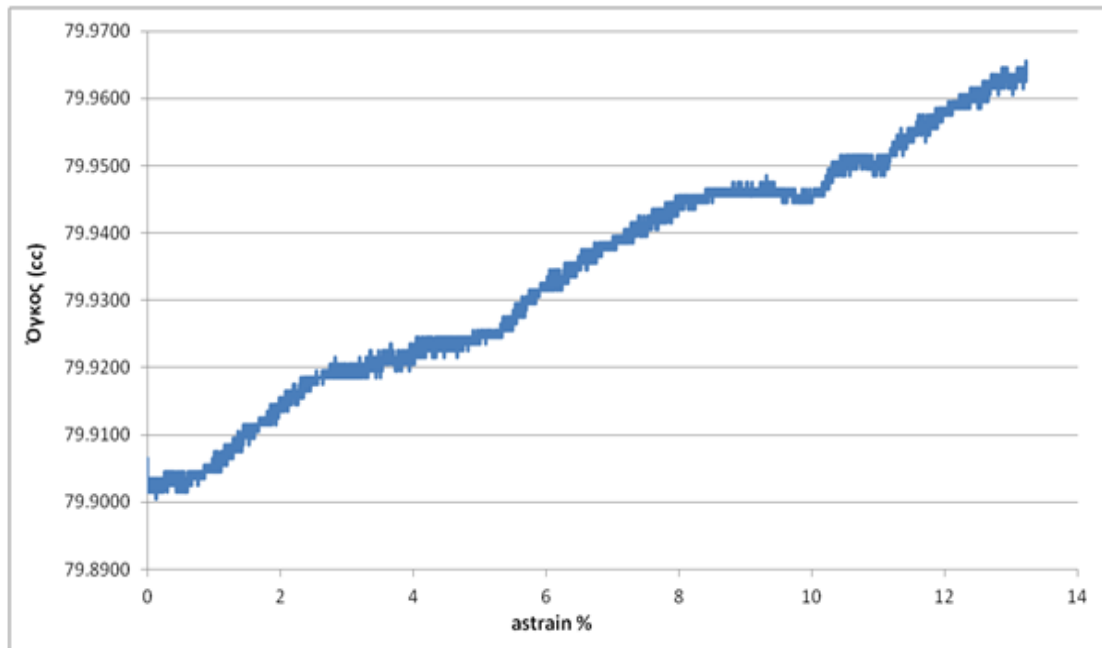
Τυπικές ενδείξεις των εσωτερικών και του εξωτερικού μηκυσιόμετρου.

Η απόκλιση που παρατηρείται στο εξωτερικό μηκυσιόμετρο οφείλεται σε μικρομετακινήσεις των επί μέρους μεταλλικών τμημάτων της συσκευής ή σε ατέλειες στη σύνδεση αυτών και διορθώνεται με κατάλληλο τύπο.



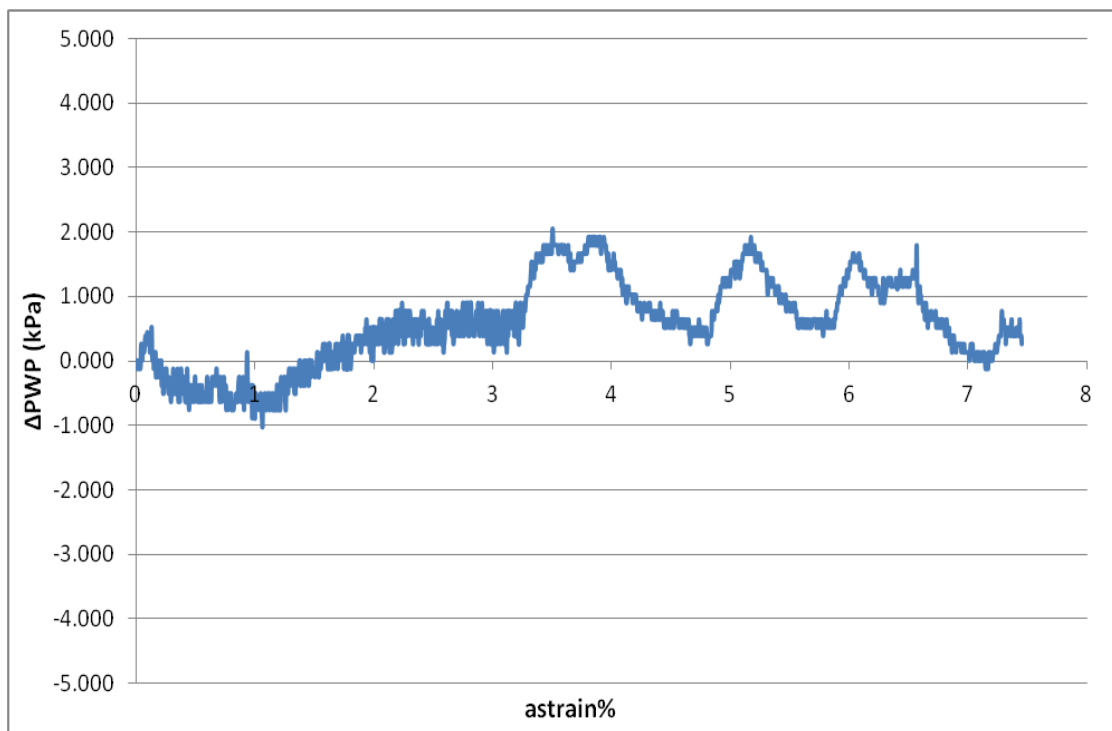
Τυπικό διάγραμμα όγκου δοκιμίου – αξονικής παραμόρφωσης υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Παρ' όλο που η βαλβίδα στράγγισης του δοκιμίου παραμένει κλειστή, παρατηρείται μεταβολή όγκου της τάξης των 10^{-2} cc πράγμα που οφείλεται στην ευαισθησία του μετρητή του όγκου νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από το δοκίμιο.



Τυπικό διάγραμμα μεταβολής πιέσεων πόρων – αξονικής παραμόρφωσης υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες.

Στη διάτμηση με συνθήκες ελεύθερης στράγγισης η ταχύτητα διάτμησης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην αναπτύσσονται υπερπιέσεις (ή υποπιέσεις) στο νερό των πόρων του δοκιμίου. Η μεταβολή των πιέσεων των πόρων καταγράφεται για να επιβεβαιωθεί η συνθήκη αυτή.



Τυπικό φύλλο excel επεξεργασίας δεδομένων συμπιεσόμετρου

Στοιχεία δείγματος και φόρτιση

Εδαφικό Δείγμα			Φόρτιση												
			Φορτίο (kg)	0.108	(TC) 0.525	0.5	1	2	4	8	16	32	64	128	256
G _s =	2.69		Τάση (kPa)	0.240	1.166	12.309	23.212	45.018	88.630	175.854	350.302	699.198	1396.990	2792.574	5583.742
W _{LL} =	31.0	%	Χρόνος 0 h	3.112	7.844 mm	9.30	8.474	8.235	8.000	7.699	7.376	6.995	6.574	6.104	5.551
W _{PL} =	18.0	%	Χρόνος 24 h	1.489	7.327 mm	8.47	8.235	8.000	7.699	7.376	6.995	6.574	6.104	5.551	4.921
PI =	16.0	%	Δh _i (h _{n+1} -h _n)	1.62	0.52	0.83	0.24	0.23	0.30	0.32	0.38	0.42	0.47	0.55	0.63
W_o =	44.5	%	Δh _i (mm)	1.623	0.517	0.830	0.239	0.235	0.301	0.323	0.381	0.421	0.470	0.553	0.630
W_o =	1.44	W_{LL}	Δh' (mm)	1.623	2.140	2.970	3.209	3.444	3.745	4.068	4.449	4.870	5.340	5.893	6.523
e _o =	1.20		Δh compliance			0.008	0.016	0.020	0.030	0.044	0.068	0.104	0.148	0.212	0.302
W _T =		%	Δh (mm)	1.623	2.140	2.962	3.193	3.424	3.715	4.024	4.381	4.766	5.192	5.681	6.221
d ₁ =	75.00	mm	Δh/h ₀	0.086	0.113	0.157	0.169	0.181	0.197	0.213	0.232	0.252	0.275	0.301	0.329
h ₁ =	18.90	mm	Δe	0.189	0.249	0.344	0.371	0.398	0.432	0.468	0.509	0.554	0.604	0.660	0.723
E ₁ =	44.179	cm ²	e	1.008	0.948	0.853	0.826	0.799	0.765	0.729	0.688	0.643	0.594	0.537	0.474
W _{TC1} =	0.525	kgr	log(σ' _v)	-0.620	0.067	1.090	1.366	1.653	1.948	2.245	2.544	2.845	3.145	3.446	3.747
στην 2η στήλη	9,82 :1		I_v	1.699243164	1.3115064	0.695027	0.521783	0.3485393	0.1302967	-0.1014454	-0.369186	-0.6579264	-0.977415463	-1.344152944	-1.749139119
1kg ---->	21.806	kPa	I_v (Burland)	3.243276754	2.364403	1.068519	0.733278	0.3932009	0.0581706	-0.2652622	-0.57251	-0.8600441	-1.124878136	-1.364299065	-1.575727507

Τυπικό φύλλο excel επεξεργασίας δεδομένων συμπιεσόμετρου

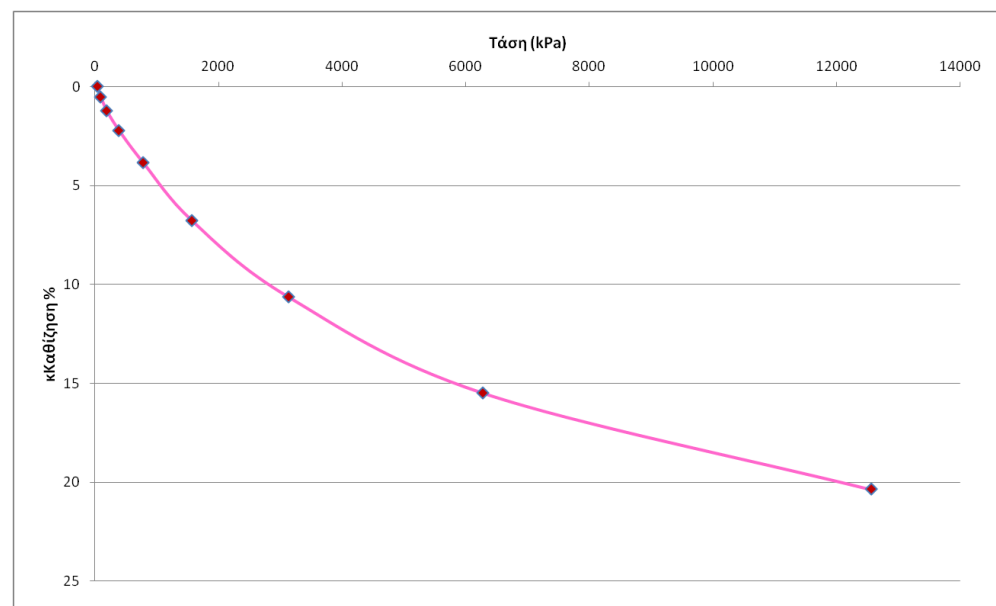
Αποφόρτιση

Αποφόρτιση						
Φορτίο (kg)	256	128	64	32	16	8
Τάση (kPa)	5583.742	2792.574	1396.990	699.198	350.302	175.854
Χρόνος 0 h		4.921	4.973	5.014	5.049	5.088
Χρόνος 24 h		4.973	5.014	5.049	5.088	5.125
$\Delta h_i (h_{n+1}-h_n)$		0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
Δh_i (mm)		-0.052	-0.041	-0.035	-0.039	-0.037
$\Delta h'$ (mm)		-0.052	-0.093	-0.128	-0.167	-0.204
Δh compliance						
Δh (mm)		-0.052	-0.093	-0.128	-0.167	-0.204
$\Delta h/h'_0$		-0.003	-0.005	-0.007	-0.009	-0.011
Δe		-0.006	-0.011	-0.015	-0.019	-0.024
e	0.474	0.480	0.485	0.489	0.493	0.498

Τυπικός πίνακας υπολογισμού και διάγραμμα καθίζησης – χρόνου

Τα παρακάτω υπολογίστηκαν ενδεικτικά για κάποια πειράματα, για την προσωπική κατανόηση και καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Φορτίο (kg)	TC	0.5	1	2	4	8	16	32	64	128	256
Τάση (kPa)	1.629	26.160	50.692	99.755	197.881	394.133	786.637	1571.645	3141.661	6281.693	12561.757
Δh_i (mm)	0.000	0.000	0.000	0.094	0.122	0.173	0.288	0.513	0.682	0.853	0.859
Δh (αθρ)	0.000	0.000	0.000	0.094	0.216	0.389	0.677	1.190	1.872	2.725	3.584
καθίζηση%	0.000	0.000	0.000	0.534	1.227	2.210	3.847	6.761	10.636	15.483	20.364



Τυπικό φύλλο excel επεξεργασίας δεδομένων τριαξονικής δοκιμής

Date	Time	day	hr	min	sec	sec	sec	hour
25/1/2014	23:52:50	25	23	52	50	2E+06	0	0
25/1/2014	23:53:00	25	23	53	0	2E+06	10	0.0028
25/1/2014	23:53:11	25	23	53	11	2E+06	21	0.0058
25/1/2014	23:53:20	25	23	53	20	2E+06	30	0.0083
25/1/2014	23:53:30	25	23	53	30	2E+06	40	0.0111
25/1/2014	23:53:40	25	23	53	40	2E+06	50	0.0139
25/1/2014	23:53:50	25	23	53	50	2E+06	60	0.0167
25/1/2014	23:54:00	25	23	54	0	2E+06	70	0.0194
25/1/2014	23:54:10	25	23	54	10	2E+06	80	0.0222
25/1/2014	23:54:20	25	23	54	20	2E+06	90	0.025
25/1/2014	23:54:30	25	23	54	30	2E+06	100	0.0278
25/1/2014	23:54:40	25	23	54	40	2E+06	110	0.0306
25/1/2014	23:54:50	25	23	54	50	2E+06	120	0.0333
25/1/2014	23:55:01	25	23	55	1	2E+06	131	0.0364
25/1/2014	23:55:10	25	23	55	10	2E+06	140	0.0389
25/1/2014	23:55:20	25	23	55	20	2E+06	150	0.0417
25/1/2014	23:55:30	25	23	55	30	2E+06	160	0.0444
25/1/2014	23:55:41	25	23	55	41	2E+06	171	0.0475

ho=	75.8	mm
do=	36.51	mm
area0=	1046.920	mm ²
vol.0=	79.357	cc
ho lvdt1=	40.36	mm
ho lvdt2=	43.13	mm

load (N)	cell (kPa)	back (kPa)	disp (mm)	vol (cc)	LVDT 2 (mm)	LVDT 1 (mm)
11.438	426.151	279.046		18.224		
0.000	426.151	279.046	5.466	18.224	-1.419	-2.239
0.051	426.151	278.975	5.466	18.223	-1.419	-2.239
0.103	426.165	279.004	5.466	18.223	-1.419	-2.239
0.103	426.165	278.975	5.466	18.223	-1.419	-2.239
0.017	426.151	278.975	5.466	18.223	-1.419	-2.239
0.360	426.179	279.104	5.466	18.224	-1.419	-2.239
1.185	426.165	279.360	5.468	18.223	-1.419	-2.239
1.099	426.151	279.418	5.468	18.223	-1.419	-2.239
1.081	426.165	279.418	5.468	18.224	-1.419	-2.239
1.494	426.179	279.703	5.469	18.223	-1.419	-2.239
1.872	426.137	279.789	5.469	18.223	-1.419	-2.239
2.318	426.165	279.917	5.470	18.223	-1.419	-2.238
2.292	426.165	279.974	5.470	18.223	-1.419	-2.238
3.246	426.151	280.331	5.471	18.224	-1.419	-2.238
3.246	426.151	280.345	5.471	18.224	-1.419	-2.238
3.143	426.162	280.402	5.471	18.223	-1.419	-2.238
3.709	426.151	280.573	5.472	18.223	-1.419	-2.238
3.658	426.179	280.602	5.472	18.223	-1.419	-2.238

lvdt1 (mm)	lvdt2 (mm)	disp ext no compl. (mm)	copl. disp ext. (mm)
0.000	0.000	0.000	-0.0027
0.000	0.000	0.000	-0.0026
0.000	0.000	0.000	-0.0026
0.000	0.000	0.000	-0.0026
0.000	0.000	0.000	-0.0027
0.000	0.000	0.000	-0.0023
0.000	0.000	0.002	-0.0015
0.000	0.000	0.002	-0.0016
0.000	0.000	0.002	-0.0016
0.000	0.000	0.003	-0.0012
0.000	0.000	0.003	-0.0008
0.001	0.000	0.004	-0.0004
0.001	0.000	0.004	-0.0004
0.001	0.000	0.005	0.0005
0.001	0.000	0.005	0.0005
0.001	0.000	0.005	0.0004
0.001	0.000	0.006	0.0010
0.001	0.000	0.006	0.0010

vstrain %	astrain(e) %	astrain(e)2 %	astrain(i6) %	astrain(i7) %	astrain(ia) % raw data	astrain change at 1%	rstrain(e) %	rstarin(i) %
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.001	0	6.72826E-05	0	0	0	0	-0.0006301	-0.00063
-0.001	0	0.000135885	0	0	0	0	-0.0006301	-0.00063
-0.001	0	0.000135885	0	0	0	0	-0.0006301	-0.00063
-0.001	0	2.24275E-05	0	0	0	0	-0.0006301	-0.00063
0	0	0.000474948	0	0	0	0	0	0
-0.001	0.00263852	0.004201995	0	0	0	0	-0.0019493	-0.00063
-0.001	0.00263852	0.004088518	0	0	0	0	-0.0019493	-0.00063
0	0.00263852	0.004064767	0	0	0	0	-0.0013193	0
-0.001	0.00395778	0.005928995	0	0	0	0	-0.002609	-0.00063
-0.001	0.00395778	0.00642781	0	0	0	0	-0.002609	-0.00063
-0.001	0.00527704	0.008335659	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0032686	-0.00125
-0.001	0.00527704	0.008301346	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0032686	-0.00125
0	0.00659631	0.01087974	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0032982	-0.00062
0	0.00659631	0.01087974	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0032982	-0.00062
-0.001	0.00659631	0.010743787	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0039282	-0.00125
-0.001	0.00791557	0.012810159	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0045879	-0.00125
-0.001	0.00791557	0.012742837	0	0.002477701	0.00123885	0.001239	-0.0045879	-0.00125

volume (cc)	hight (e) (mm)	hight (i) (mm)	area (e) (mm ²)	area (i) (mm ²)	sig a (kPa)	sig r (kPa)	sig a' (kPa)	sig r' (kPa)
79.356545	75.8	75.8	1046.9201	1046.9201				
79.356545	75.8	75.8	1046.9201	1046.9201	426.151	426.151	147.105	147.105
79.357545	75.8	75.8	1046.9333	1046.9333	426.1997	426.151	147.225	147.176
79.357545	75.8	75.8	1046.9333	1046.9333	426.2634	426.165	147.259	147.161
79.357545	75.8	75.8	1046.9333	1046.9333	426.2634	426.165	147.288	147.190
79.357545	75.8	75.8	1046.9333	1046.9333	426.1672	426.151	147.192	147.176
79.356545	75.8	75.8	1046.9201	1046.9201	426.5229	426.179	147.419	147.075
79.357545	75.798	75.8	1046.9609	1046.9333	427.2968	426.165	147.937	146.805
79.357545	75.798	75.8	1046.9609	1046.9333	427.2007	426.151	147.783	146.733
79.356545	75.798	75.8	1046.9477	1046.9201	427.1975	426.165	147.780	146.747
79.357545	75.797	75.8	1046.9748	1046.9333	427.606	426.179	147.903	146.476
79.357545	75.797	75.8	1046.9748	1046.9333	427.925	426.137	148.136	146.348
79.357545	75.796	75.799061	1046.9886	1046.9463	428.379	426.165	148.462	146.248
79.357545	75.796	75.799061	1046.9886	1046.9463	428.3541	426.165	148.380	146.191
79.356545	75.795	75.799061	1046.9892	1046.9331	429.2513	426.151	148.920	145.820
79.356545	75.795	75.799061	1046.9892	1046.9331	429.2513	426.151	148.906	145.806
79.357545	75.795	75.799061	1047.0024	1046.9463	429.1639	426.162	148.762	145.760
79.357545	75.794	75.799061	1047.0162	1046.9463	429.6934	426.151	149.120	145.578
79.357545	75.794	75.799061	1047.0162	1046.9463	429.6727	426.179	149.071	145.577

d pwp	p' (kPa)	q (kPa)	q/p'	t (kPa)	s' (kPa)	t/s'
0.000	147.105	0.000	0	0	147.105	0
-0.071	147.1922	0.049	0.000331	0.024357	147.2004	0.000165
-0.042	147.1938	0.098	0.000669	0.049191	147.2102	0.000334
-0.071	147.2228	0.098	0.000669	0.049191	147.2392	0.000334
-0.071	147.1814	0.016	0.00011	0.008119	147.1841	5.52E-05
0.058	147.1896	0.344	0.002338	0.171933	147.2469	0.001168
0.314	147.1823	1.132	0.007694	0.565924	147.3709	0.00384
0.372	147.0829	1.050	0.007136	0.524852	147.2579	0.003564
0.372	147.0912	1.033	0.007019	0.516263	147.2633	0.003506
0.657	146.9517	1.427	0.0097	0.713484	147.1895	0.004847
0.743	146.944	1.788	0.012155	0.894004	147.242	0.006072
0.871	146.986	2.214	0.01505	1.106984	147.355	0.007512
0.928	146.9207	2.189	0.014881	1.094568	147.2856	0.007432
1.285	146.8534	3.100	0.021076	1.550159	147.3702	0.010519
1.299	146.8394	3.100	0.021076	1.550159	147.3562	0.01052
1.356	146.7606	3.002	0.020407	1.500952	147.261	0.010192
1.527	146.7588	3.542	0.024081	1.771224	147.3492	0.012021
1.556	146.7416	3.494	0.02375	1.746869	147.3239	0.011857