



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ
ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΑΟΛΙΝΗ**

**TRIAXIAL TESTS ON ANISOTROPICALLY
CONSOLIDATED KAOLIN**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΥΡΕΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Β.Ν. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα κα.Β.Ν. Γεωργιάννου, αναπληρώτρια καθηγήτρια της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για τον χρόνο που διέθεσε και για την ουσιαστική της καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τον κ. Στυλιανό Τσεντίδη, τεχνικό του εργαστηρίου εδαφομηχανικής, για την απαραίτητη βοήθεια του στη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτωρα Στυλιανό Χαβιάρα για την άριστη συνεργασία που είχαμε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτωρα Παναγιώτη Τριαντάφυλλο για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Περίληψη

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία διερευνάται η μηχανική συμπεριφορά του αργιλικού υλικού καολινίνη. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπιεσομέτρου και τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε αναζυμωμένα, ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολινίτη. Η ανισότροπη στερεοποίηση έγινε είτε με έλεγχο των τάσεων είτε με έλεγχο των ακτινικών παραμορφώσεων.

Αρχικά παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική αναφορά στη συμπεριφορά των αργιλικών υλικών και εκτενέστερα στη συμπεριφορά του καολινίτη σε παλαιότερες μελέτες. Στη συνέχεια περιγράφονται οι δοκιμές κατάταξης, με τις οποίες προσδιορίζονται τα όρια Atterberg, το ειδικό βάρος κόκκων και η κοκκομετρία του υλικού. Ο καολινίτης της παρούσας μελέτης έχει σημαντικά μειωμένο όριο υδαρότητας και δείκτη πλασιμότητας σε σχέση με αυτά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Αφού γίνει η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπιεσομέτρου. Παρατίθενται η καμπύλη στερεοποίησης και η κανονικοποίησή της με τη χρήση του δείκτη κενών και προσδιορίζονται οι εγγενείς σταθερές συμπιεστότητας του υλικού e^*_{100} , C^*_c και C^*_s . Η σύγκριση της κανονικοποιημένης καμπύλης συμπίεσης με την προβλεπόμενη από τη βιβλιογραφία καμπύλη Burland, η οποία περιγράφει την συμπεριφορά πολλών φυσικών αργίλων, δείχνει διαφοροποίηση της καμπύλης συμπίεσης του καολινίτη.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού για διάφορες τάσεις στερεοποίησης, αφού πρώτα γίνει περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και της λειτουργίας της συσκευής. Γίνεται εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων, ως προς τις διαδρομές τάσεων, την μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης και της πίεσης του νερού των πόρων με την παραμόρφωση. Επίσης, εξετάζεται μία μέθοδος ανισότροπης στερεοποίησης και προσδιορισμού του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 με τον έλεγχο της ακτινικής παραμόρφωσης του δοκίμιου μέσω μετρητή επί του δοκίμιου. Από το σύνολο των δοκιμών προκύπτει η ευθεία κρίσιμης κατάστασης και οι εγγενείς παράμετροι διατμητικής αντοχής ϕ^*_{cs} , M^* , λ^* , ϕ^*_e και κ^* του υλικού.

Abstract

In this Diploma Thesis the mechanical behaviour of kaolin clay is investigated. Tests are carried out in the oedometer and the triaxial apparatus.

A detailed literature review is presented regarding the behaviour of clays and particularly the mechanical behaviour of kaolin.

First, the physical characteristics of the kaolin are determined such as the specific weight, the Atterberg limits and the grading curve. The results indicate lower liquid limit and plasticity values compared to those reported in the literature. Second, slurry samples are placed in the oedometer at various initial water contents and the intrinsic compression curve of the material is determined. The curve is normalized with the use of the Void Index, I_v , and is compared with Burland's Intrinsic Compression Line which describes a large number of natural clays. The normalized intrinsic compression line of the kaolin differs from Burland's ICL in several important respects: it is concave downwards and diverges from the ICL at low and high stress levels.

Finally, triaxial compression and extension tests were carried out on reconstituted, one-dimensionally consolidated specimens of kaolin, under undrained conditions. Two methods of one-dimensional consolidation were used, one based on stress control and another based on radial control through an on sample placed radial belt. Detailed analysis of the results shows that for the majority of tests, the undrained stress-strain and pore pressure-strain curves show flat peaks which are indicative of well-defined critical states at failure. Based on these results, the intrinsic strength characteristics of the soil (ϕ_{cs}^* , M^* , λ^* , ϕ_e^* and κ^*) are determined.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγικά Στοιχεία	3
1.1	Εισαγωγή.....	3
1.2	Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	4
2	Βιβλιογραφική επισκόπηση	6
2.1	Μηχανικές ιδιότητες αργιλικών εδαφών.....	6
2.2	Γενικά στοιχεία για το αργιλικό ορυκτό καολίνη.....	9
2.3	Αναζυμωμένα υλικά.....	12
2.4	Θεωρία κρίσιμης κατάστασης.....	17
2.4.1	Επιφάνεια Roscoe-Rendulic.....	21
2.4.2	Επιφάνεια Hvorslev.....	25
2.5	Κριτήριο αστοχίας εδάφους Mohr-Coulomb.....	27
2.6	Τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη.....	30
2.6.1	Τριαξονική δοκιμή σε καολινίτη από Burland (1990).....	30
2.6.2	Τριαξονικές δοκιμές σε κανονικά στερεοποιημένο καολινίτη από M.Sinnarath et al. (1966).....	32
2.6.3	Τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη από Roscoe και Thuraiajah (1964).....	37
2.6.4	Τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη από Jian Hu et al. (2007).....	37
2.6.5	Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια καολίνη από τους Wroth και Loudon (1967).....	41
2.6.6	Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια καολίνη από τον Stipho (1978).....	43
2.6.7	Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια καολίνη από τους Yu-Hsing Wang et al. (2011).....	51
2.6.8	Αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή θλίψης σε καολινίτη από τους Robinson et al. (2010) 53	
2.6.9	Τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε δοκίμια καολίνη από τους Atkinson et al. (1987).....	55
3	Εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού	60
3.1	Προσδιορισμός της φυσικής υγρασίας του δοκιμίου.....	60
3.2	Προσδιορισμός ειδικού βάρους κόκκων Gs.....	61
3.3	Προσδιορισμός ορίων Atterberg του εδαφικού υλικού.....	64
3.4	Κατάταξη του εδαφικού υλικού στον χάρτη πλαστιμότητας Casagrande.....	70
3.5	Κοκκομετρική διαβάθμιση με αραιόμετρο.....	71

4	Δοκιμές συμπιεσόμετρου.....	73
4.1	Αρχές λειτουργίας του συμπιεσομέτρου	73
4.2	Πειραματική διαδικασία	74
4.3	Δοκιμές συμμόρφωσης για τα συμπιεσόμετρα Matest S260 και WF 24255	78
4.4	Αποτελέσματα δοκιμών συμπιεσόμετρου.....	80
5	Δοκιμές στην τριαξονική συσκευή.....	91
5.1	Λειτουργία της τριαξονικής συσκευής.....	92
5.2	Υλικό δοκιμών	95
5.3	Πειραματική διαδικασία	99
5.3.1	Προετοιμασία δοκιμίου και συσκευής	99
5.3.2	Κορεσμός του Δοκιμίου.....	100
5.3.3	Στερεοποίηση	101
5.3.4	Αξονική Φόρτιση και Θραύση του Δοκιμίου.....	115
5.4	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών.....	117
5.4.1	Ενδεικτική δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες	118
5.4.2	Ενδεικτική δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες.	123
5.4.3	Επαναληψιμότητα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης.....	127
5.4.4	Επίδραση του συντελεστή $K=\sigma'_3/\sigma'_1$ κατά τη στερεοποίηση, στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης	137
5.4.5	Συμπεριφορά πυκνότερων δοκιμών κατά την τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες	142
5.4.6	Προσδιορισμός γωνίας κρίσιμης κατάστασης ϕ_{cr} για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό.....	146
5.4.7	Προσδιορισμός τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυσστησίας (Secant Young's Modulus) 152	
6	Συμπεράσματα	156
	Παράρτημα	158
	Ευρετήριο εικόνων	158
	Ευρετήριο πινάκων	158
	Ευρετήριο σχημάτων.....	159
	Βιβλιογραφία	168

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πλειοψηφία των υπαρχόντων δεδομένων για κανονικά στερεοποιημένα ή ελαφρώς υπερστερεοποιημένα αναζυμωμένα και αναμοχλευμένα εδαφικά υλικά προέρχεται από τριαξονικές δοκιμές σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια. Γενικά η ισότροπη στερεοποίηση πριν την διάτμηση ακόμα και των φυσικών υλικών προτιμάται της ανισότροπης λόγω ευκολίας. Τα περισσότερα μαθηματικά εδαφικά μοντέλα, είτε είναι απλά ελαστικά, καθαρά πλαστικά ή πιο γενικά ελαστοπλαστικά μοντέλα (π.χ. Cam clay ή modified Cam clay) είναι ισότροπα και προβλέπουν τις ίδιες αντοχές, συμμετρικές ευθείες αστοχίας και ίδια μεταβολή τάσεων - παραμορφώσεων για δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης και εφελκυσμού.

Στη φύση ωστόσο, τα εδάφη στερεοποιούνται και διογκώνονται κατά την μεταφορά τους και επανατοποθέτησή τους μονοδιάστατα με μηδενική οριζόντια παραμόρφωση. Υπό αυτές τις συνθήκες ο λόγος των οριζοντίων προς τις κατακόρυφες ενεργές τάσεις σ'_h/σ'_v δίνεται από τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K_0 . Η σχέση τάσεων - παραμορφώσεων και η αντοχή των εδαφών είναι γνωστό ότι εξαρτώνται από την ιστορία φορτίσεων των εδαφών και για αυτό αναμένουμε διαφορές ανάμεσα στα ισότροπα και τα ανισότροπα στερεοποιημένα δείγματα. Διάφορα μαθηματικά μοντέλα έχουν εκσυγχρονιστεί ώστε να περιλαμβάνουν την επίδραση της ανισότροπης προφόρτισης και τα περισσότερα από αυτά ανήκουν στη γενική κατηγορία των μοντέλων κρίσιμης κατάστασης.

Δεδομένα από δοκιμές σε ισότροπα στερεοποιημένα αναζυμωμένα υλικά δείχνουν ότι οι ευθείες αστοχίας Mohr-Coulomb και οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων είναι σχεδόν συμμετρικές για εφελκυσμό και συμπίεση. Αντίθετα, τα αποτελέσματα δοκιμών σε μονοδιάστατα στερεοποιημένα αναζυμωμένα και φυσικά αδιατάρακτα δοκίμια δείχνουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Κάποιοι ερευνητές (Graham, Henkel et al) εξέτασαν τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων και την αντοχή μονοδιάστατα στερεοποιημένων αναζυμωμένων υλικών, ενώ άλλοι (Balasubramaniam et al) εξέτασαν αδιατάρακτα δείγματα μαλακών αργίλων. Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών δείχνουν ότι στα μονοδιαδιαστατα κανονικά στερεοποιημένα ή ελαφρά υπερστερεοποιημένα δείγματα, οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων, γνωστές και ως επιφάνεια Roscoe, δεν είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα της μέσης ενεργού τάσης. Αυτή η συμπεριφορά έρχεται, για παράδειγμα, σε αντίθεση με το μοντέλο Cam clay. Τα συμπεράσματα όσον αφορά στην επίδραση της μονοδιάστατης στερεοποίησης στην διατμητική αντοχή των εδαφών είναι ανακριβή, καθώς πολλές από τις δοκιμές έγιναν με έλεγχο των τάσεων, μέθοδο δηλαδή που δεν δίνει ακριβή εικόνα της αστοχίας.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της μηχανική συμπεριφοράς αναζυμωμένων δοκιμίων καολινίτη σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης και εφελκυσμού. Όλες οι τριαξονικές δοκιμές έγιναν με έλεγχο των παραμορφώσεων για να έχουμε μια ξεκαθαρή εικόνα της συμπεριφοράς του υλικού κατά την αστοχία.

Για να προσομοιώσουμε καλύτερα τις συνθήκες ανισοτροπίας του εδάφους και για να εστιάσουμε στην επίδραση της μονοδιάστατης στερεοποίησης, όλα τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ανισότροπα είτε με έλεγχο των αξονικών και πλευρικών τάσεων, είτε με έλεγχο των ακτινικών παραμορφώσεων. Αναλυτικότερα το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής έχει χωριστεί στα παρακάτω κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1**
Παρουσιάζεται συνοπτικά ο σκοπός, το περιεχόμενο της διπλωματικής και η διάρθρωσή της.
- **Κεφάλαιο 2**
Παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία για τη φύση και τις μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών υλικών και κυρίως του καολινίτη. Επίσης αναλύεται ο όρος των αναζυμωμένων υλικών καθώς με αυτά θα ασχοληθούμε καθ'όλη τη διπλωματική. Δίνονται πληροφορίες για την κρίσιμη κατάσταση και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παλαιότερων τριαξονικών δοκιμών σε καολινίτη.
- **Κεφάλαιο 3**
Γίνεται αναφορά στη μεθοδολογία των μετρήσεων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφών, όπως τα όρια Atterberg, το ειδικό βάρος στερεών κόκκων G_s και η κοκκομετρική διαβάθμιση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών.
- **Κεφάλαιο 4**
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία των δοκιμών συμπίεσομέτρου και αναφέρεται όλη η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Επίσης παρουσιάζεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και παρατίθενται οι εγγενείς καμπύλες στερεοποίησης και αποφόρτισης του αναζυμωμένου εδαφικού υλικού. Στη συνέχεια γίνεται κανονικοποίηση των κλάδων φόρτισης ως προς το δείκτη κενών I_v και οι κανονικοποιημένες καμπύλες συγκρίνονται με την πρότυπη πειραματική του Burland. Μετά από τέσσερις επαναλήψεις της δοκιμής συμπίεσομέτρου υπολογίζονται οι εγγενείς σταθερές συμπίεστότητας.
- **Κεφάλαιο 5**
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία της αστράγγιστης τριαξονικής δοκιμής και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων και τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών.

Περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια του κορεσμού, της στερεοποίησης και της διάτμησης του δοκιμίου. Ακολουθήθηκαν δύο μέθοδοι στερεοποίησης, μία με έλεγχο των τάσεων και μία πολυπλοκότερη, με έλεγχο των ακτινικών παραμορφώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα διαγράμματα διαδρομών τάσεων, πίεσης πόρων και αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την παραμόρφωση. Εξετάζονται η επίδραση στη τριαξονική φόρτιση παραγόντων, όπως η πυκνότητα των δοκιμίων και ο συντελεστής K_0 που χρησιμοποιήθηκε κατά την ανισότροπη στερεοποίηση. Τέλος από το σύνολο των δοκιμών προκύπτουν οι ευθείες κρίσιμης κατάστασης για συμπίεση και εφελκυσμό και οι εγγενείς παράμετροι διατμητικής αντοχής ϕ^*_{cs} , M^* , λ^* , ϕ^*_e και κ^* του υλικού.

- **Κεφάλαιο 6**

Γίνεται ανασκόπηση των συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Τα αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν μια ιδιαιτέρως ενδιαφέρουσα συμπεριφορά, η οποία κυρίως οφείλεται στην φύση των αργιλικών ορυκτών και στην δομή του εδάφους. Ως δομή του εδάφους ορίζουμε την γεωμετρική “οργάνωση” των εδαφικών πλακιδίων μέσα στην εδαφική μάζα. Αυτή εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος και τον προσανατολισμό των πλακιδίων. Με πιο απλά λόγια εάν το κάθε πλακίδιο ξεχωριστά βρίσκεται πολύ κοντά στα άλλα, ο δείκτης πόρων είναι μικρός και το συνολικό έδαφος πιο πυκνό και πιο δυνατό. Αντιθέτως εάν τα πλακίδια είναι διατεταγμένα έτσι ώστε τα κενά να είναι μεγαλύτερα, το έδαφος είναι πιο χαλαρό και πιο αδύναμο.

Σημαντικότερο όμως ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών διαδραματίζει η φύση και τα χαρακτηριστικά των ορυκτών. Εξ’ άλλου ο τύπος των ορυκτών αυτών καθορίζει τις σημαντικότερες ιδιότητες της αργίλου, προσδίδοντας της παράλληλα συνοχή και πλαστικότητα.

Είναι γνωστό πως οι βαρυτικές δυνάμεις των εδαφικών κόκκων είναι ανάλογες της μάζας και κατ’ επέκταση του όγκου τους. Με άλλα λόγια όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων, τόσο ισχυρότερες είναι οι δυνάμεις βαρύτητας. Από την άλλη πλευρά οι επιφανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων εξαρτώνται από το μέγεθος της επιφάνειας και όχι του όγκου. Το εμβαδόν της επιφάνειας σχετίζεται με το μέγεθος του όγκου, όμως οι επιφανειακές δυνάμεις γίνονται πιο ισχυρές όταν το μέγεθος των κόκκων είναι μικρό, δηλαδή καθώς το μέγεθος των κόκκων μειώνεται η επίδραση των επιφανειακών δυνάμεων στους κόκκους αρχίζει να υπερισχύει της επιδράσεως των βαρυτικών. Έτσι απαραίτητως ορίστηκε το μέγεθος της ειδικής επιφάνειας το οποίο δίνει το μέγεθος του εμβαδού της επιφάνειας ανά μονάδα όγκου (ή μάζας).

Στα χονδρόκοκκα εδάφη οι τιμές της ειδικής επιφάνειας είναι μικρές, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζουν πλαστικότητα και συνοχή. Αντιθέτως στα λεπτόκοκκα εδάφη και ιδιαιτέρως στα αργιλικά, που οι δομές των κόκκων των ορυκτών είναι πολύ πεπλατυσμένες και έχουν την μορφή πλακιδίων, συναντάμε πολύ μεγαλύτερες τιμές.

Ένας κόκκος μεσόκοκκης άμμου έχει τιμή ειδικής επιφάνειας $2,3 \text{ m}^2/\text{kg}$, ενώ η αντίστοιχη τιμή του αργιλικού ορυκτού καολίνη είναι $15.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ και του μοντμοριλλονίτη $800.000 \text{ m}^2/\text{kg}$. Όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει η ειδική επιφάνεια των κόκκων τόσο πιο ισχυρές είναι οι επιφανειακές δυνάμεις έναντι των βαρυτικών. Τα υλικά με αυτό το γνώρισμα ονομάζονται κολλώδη και τα αργιλικά εδάφη με κόκκους μικρότερου μεγέθους των 2 μικρών, είναι κυρίως κολλώδους φύσεως.

Οι επιφανειακές αυτές δυνάμεις στις αργίλους είναι ηλεκτρικής φύσεως (έλξης και άπωσης) και η έντασή τους είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις

βαρυτικές δυνάμεις. Ειδικότερα η άνω και κάτω επιφάνειες φέρουν αρνητικά φορτία με την περιφέρεια να φέρει ίσα και αντίθετα θετικά. Αποτέλεσμα αυτών των δυνάμεων είναι η συνοχή που παρουσιάζουν τα αργιλικά εδάφη, τα οποία ονομάζονται και συνεκτικά.

Επίσης όπως γνωρίζουμε τα αργιλικά όρυκτα αλληλεπιδρούν με τα μόρια νερού δημιουργώντας μια ζώνη προσροφημένου νερού γύρω από τα πλακίδια, γνωστή ως διπλή στρώση. Η πλαστικότητα που παρουσιάζουν τα αργιλικά εδάφη οφείλεται στην ασηνύθιστη μοριακή δομή του νερού, το οποίο αν και ηλεκτρικά ουδέτερο συμπεριφέρεται ως ηλεκτρικό δίπολο. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αργίλους με χρήση ενός μη πολικού υγρού (αντί του νερού), όπως η κηροζίνη, απέδειξαν ότι η πλαστικότητα απουσιάζει παντελώς και τα αργιλικά εδάφη συμπεριφέρονταν σαν τα χονδρόκοκκα αμμώδη εδάφη.

Όταν λοιπόν τα αργιλικά πλακίδια βρεθούν σε υδάτινο περιβάλλον η σύνδεση των αρνητικά φορτισμένων επιφανειών τους με τα μόρια νερού γίνεται με τρεις τρόπους. (α) προσανατολισμός των διπόλων τέτοιος ώστε ο θετικός πόλος τους να συνδέεται με τις αρνητικές επιφάνειες. (β) Μέσω ελεύθερων κατιόντων τα οποία συνδέονται με τις αρνητικές επιφάνειες και ακολούθως τα δίπολα του νερού συνδέονται σε αυτά μέσω του αρνητικού τους πόλου. (γ) Σύνδεση επιφάνειας και μορίων νερού μέσω δημιουργίας δεσμών υδρογόνου στα άτομα οξυγόνου των μορίων νερού και των αργιλικών πλακιδίων.

Πιστεύεται επίσης ότι η διπλή στρώση αποτελείται αρχικά από μια πολύ λεπτή μεμβράνη νερού, που συνδεεται ισχυρότατα με την επιφάνεια των πλακιδίων πάχους περίπου 10 \AA . Ακολουθεί μια δεύτερη λιγότερο σταθερή στρώση μέχρι τα όρια των ελκτικών δυνάμεων, η οποία είναι γνωστή ως διάχυτη διπλή στρώση. Αυτή είναι πάχους περίπου 400 \AA και μέσα στο εσωτερικό της το νερό ονομάζεται προσροφημένο ή προσανατολισμένο, ενώ εκτός ορίων της τα μόρια νερού είναι ελεύθερα.

Για ένα δεδομένο εδαφικό πλακίδιο, το πάχος της σταθερής στρώσης των κατιόντων εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση και το σθένος των κατιόντων. Τα μονοσθενή κατιόντα όπως το Na^+ , δημιουργούν μία πιο χοντρή στρώση σε σύγκριση με τα δισθενή, όπως το Ca^{2+} . Απαιτείται διπλάσιος αριθμός μονοσθενών κατιόντων από ότι δισθενών. Επίσης αυξάνοντας την συγκέντρωση των κατιόντων κοντά στην επιφάνεια των πλακιδίων, μειώνεται το πάχος της στιβαρής στρώσης κατιόντων που απαιτείται για να εξουδετερώσει το αρνητικό φορτίο των επιφανειών.

Αυτή η αύξηση του σθένους ή της συγκέντρωσης των κατιόντων που αρχικώς οδηγεί στη μείωση του πάχους της στιβαρής στρώσης, εν συνεχεία προκαλεί μείωση των απωστικών δυνάμεων μεταξύ δύο πλακιδίων. Οι απωστικές δυνάμεις δημιουργούνται μεταξύ ιόντων ίδιων φορτίων που υπάρχουν στις διπλές στρώσεις των πλακιδίων, και όπως εξηγήθηκε εξαρτώνται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των διπλών στρώσεων. Από την άλλη οι ελκτικές δυνάμεις Vander Waal μεταξύ των πλακιδίων δεν σχετίζονται με την λεπτή στρώση αλλά με την απόσταση μεταξύ των πλακιδίων. Συγκεκριμένα μειώνονται εκθετικά καθώς η απόσταση μεγαλώνει. Συνεπάγεται λοιπόν ότι η συνολική καθαρή δύναμη ανάμεσα στα πλακίδια, προκύπτει από τα σχετικά μεγέθη των απωστικών και των ελκτικών δυνάμεων. Έτσι

στα αργιλικά εδάφη συναντώνται κυρίως δύο είδη σχηματικών διατάξεων των πλακιδίων, η ιξώδης και η διεσπαρμένη.

Στην ιξώδη δομή αναπτύσσεται σύνδεση των πλακιδίων μέσω των θετικά φορτισμένων άκρων τους και των αρνητικά φορτισμένων επιφανειών τους, και η καθαρή δύναμη που προκύπτει ανάμεσα στα πλακίδια είναι ελκτική. Η δομή αυτή διατηρείται ακόμα και αν η άργιλος βρεθεί σε υδάτινο περιβάλλον. Ο ιξώδης όμως χαρακτήρας της δομής ποικίλει, ανάλογα με τον τύπο των ορυκτών των πλακιδίων, το πλήθος τους αλλά και την αλατότητα του νερού. Οι άργιλοι που εμβαπτίζονται σε αλμυρό νερό έχουν πιο ιξώδη και συμπαγή δομή από αυτές σε γλυκό. Αυτό διότι το αλμυρό νερό με τα κατιόντα που έχει δρά σαν ηλεκτρολύτης, μειώνοντας τις απωστικές δυνάμεις ανάμεσα στα πλακίδια.

Τα εδάφη με ιξώδη δομή είναι ελαφριά με υψηλό δείκτη πόρων και ποσοστό υγρασίας. Παρόλα αυτά είναι αρκετά δυνατά και μπορούν να αντισταθούν σε εξωτερικές δυνάμεις εξαιτίας των ισχυρών ελκτικών δεσμών των πλακιδίων τους. Επίσης είναι ανθεκτικά στις δονήσεις, και γενικότερα παρουσιάζουν χαμηλή συμπίεστικότητα, υψηλή διαπερατότητα και διατμητική αντοχή.

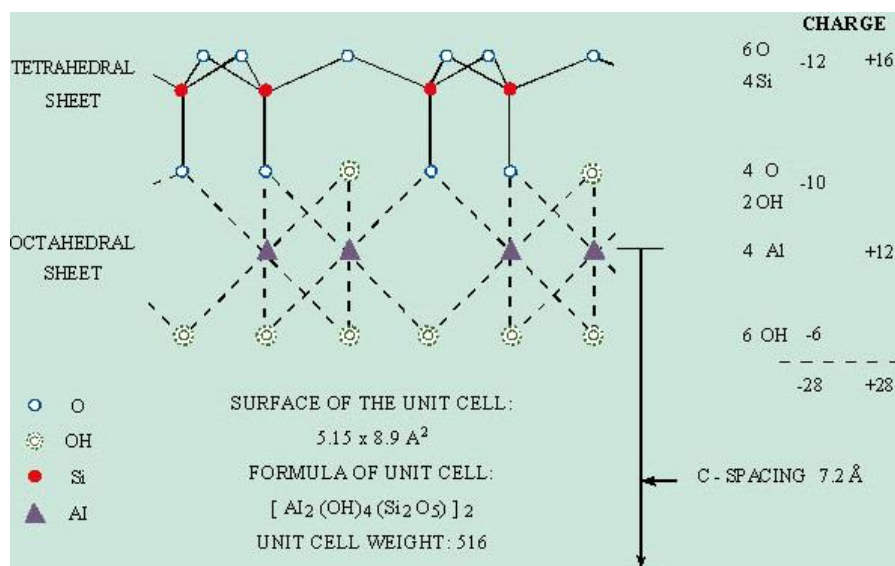
Η διασκορπισμένη δομή εμφανίζεται κυρίως στις αναμοχλευμένες αργίλους. Τα πλακίδια αναπτύσσονται λιγότερο ή περισσότερο σε μια περίπου παράλληλη στοίχιση. Δηλαδή ο προσανατολισμός “άκρου – επιφάνειας” μεταπίπτει σε έναν “επιφάνειας – επιφάνειας”. Στην φύση αυτή η δομή συναντάται όταν υπερτερούν οι απωστικές δυνάμεις των ελκτικών και η καθαρή δύναμη που προκύπτει ανάμεσα στα πλακίδια είναι απωστική. Τα εδάφη με διασκορπισμένη δομή παρουσιάζουν χαμηλή διατμητική αντοχή και διαπερατότητα αλλά και υψηλή συμπίεστικότητα.

Η αναμόχλευση προκαλεί απώλεια αντοχής στα συνεκτικά εδάφη, όμως με το πέρασμα του χρόνου το έδαφος ανακτά κάποια από την χαμένη του αντοχή. Αυτό διότι με την διατάραξη, η χημική ισορροπία μεταξύ των πλακιδίων, των εισροφημένων ιόντων, και των μορίων νερού της διπλής στρώσης, χάνεται αρχικά ενώ στη συνέχεια αρχίζει να επανέρχεται σε κάποιο βαθμό. Το παραπάνω φαινόμενο της ανάκτησης της αντοχής των αργιλικών εδαφών με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να υπάρχει αλλαγή στο ποσοστό υγρασίας, είναι γνωστό ως θιξοτροπία και οι δεσμοί που δημιουργούνται ως θιξοτροπικοί δεσμοί.

2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΓΙΛΙΚΟ ΟΡΥΚΤΟ ΚΑΟΛΙΝΗ

Οι καολίνες είναι πετρώματα με χρώμα λευκό ή υπόλευκο, που αποτελούνται από ένυδρα αργιλοπυριτικά ορυκτά του γενικού τύπου $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Δηλαδή, ο καολίνης δεν είναι ορυκτό αλλά ένα βιομηχανικό πέτρωμα, κύριο συστατικό του οποίου είναι αργιλικά ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, όπως είναι ο καολινίτης, ο νακρίτης, ο δικίτης, ο ανωξίτης, ο αλουνίτης και ο αλλοφανής. Τα ορυκτά αυτά έχουν την ίδια, σχεδόν, χημική σύσταση αλλά διαφορετικές οπτικές ιδιότητες και διαφορετική εσωτερική δομή των κρυστάλλων τους, γεγονός που επιβεβαιώνεται από μελέτες με τη μέθοδο των ακτίνων-Χ. Χαρακτηριστικό των καολίνων είναι το ορυκτό καολινίτης και τα υπόλοιπα ορυκτά της ομάδας του. Περιέχουν όμως και άλλα αργιλοπυριτικά ορυκτά, όπως ιλλίτη, αλουσίτη, χριστοβαλίτη, αστρίους κ.α. Όταν ο καολινίτης περιέχει Fe ή Mn, τότε ο καολίνης παίρνει μια ελαφρά κίτρινη ή φαιά απόχρωση.

Η ονομασία του καολινίτη (ή china clay ή μαλακή λευκή άργιλος) έχει κινέζικη προέλευση από το Κ'αο λινγκ ("ψηλό βουνό"), το οποίο βρίσκεται στην επαρχία Jiangxi, στην Κίνα και όπου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το υλικό αυτό γύρω στον 3ο αιώνα. Ο καολινίτης περιγράφηκε, αρχικά, ως ορυκτό είδος το 1867 σε μία εμφάνιση στη λεκάνη των ποταμών Jarí της Βραζιλίας. Ο καολινίτης αποτελείται από εναλλαγές δομικών επιπέδων από οκτάεδρα αργιλίου και επιπέδων από τετράεδρα πυριτίου. Πρόκειται για ένα ένυδρο πυριτικό άλας του αργιλίου, του οποίου ο χημικός τύπος είναι $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$ και η θεωρητική του σύσταση είναι: $SiO_2=46,54\%$, $Al_2O_3=39,5\%$ και $H_2O=13,96\%$. Υπάρχει σχετικά μικρή ιοντική υποκατάσταση στο πλέγμα του και είναι κυρίως αργιλίου-σιδήρου. Ο βαθμός κρυσταλλικότητάς του ποικίλει σημαντικά.



Σχήμα 2.2.1 Κρυσταλλικό πλέγμα του αργιλικού υλικού καολίνης

Οι γεωλογικές διαδικασίες κατά τις οποίες σχηματίζονται τα περισσότερα αργιλικά ορυκτά της ομάδας του καολινίτη είναι η αποσάθρωση και η υδροθερμική εξαλλοίωση από επίδραση θερμών διαλυμάτων, σε μαγματικά πετρώματα πλούσια σε αργίλιο και πυρίτιο (γρανίτες, γνεύσιοι, ηφαιστίτες), οπότε και επέρχεται εξαλλοίωση των καλιούχων αστρίων (καολινιτίωση). Στη φύση σπάνια συναντάμε καθαρό καολινίτη. Τα συνήθη, αυτά, πρωτογενή κοιτάσματα καολίνη περιέχουν καολινίτη σε ποσοστό 10-60 %. Οι καολίνες απαντώνται σε διαφορετικού τύπου κοιτάσματα. Συχνά βρίσκονται με την μορφή φακών και ασυνεχών στρωμάτων μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα (θαλάσσιων ή λιμναίων). Τα περισσότερα κοιτάσματα αυτού του τύπου είναι Κρητιδικής ηλικίας ή νεότερα. Το πάχος και η εξάπλωση τέτοιων κοιτασμάτων ποικίλλουν. Κοιτάσματα πάχους 30 m είναι συνηθισμένα σε ορισμένες περιοχές, ενώ είναι γνωστά κοιτάσματα καολίνη που εκτείνονται σε έκταση μεγαλύτερη των 2 km.

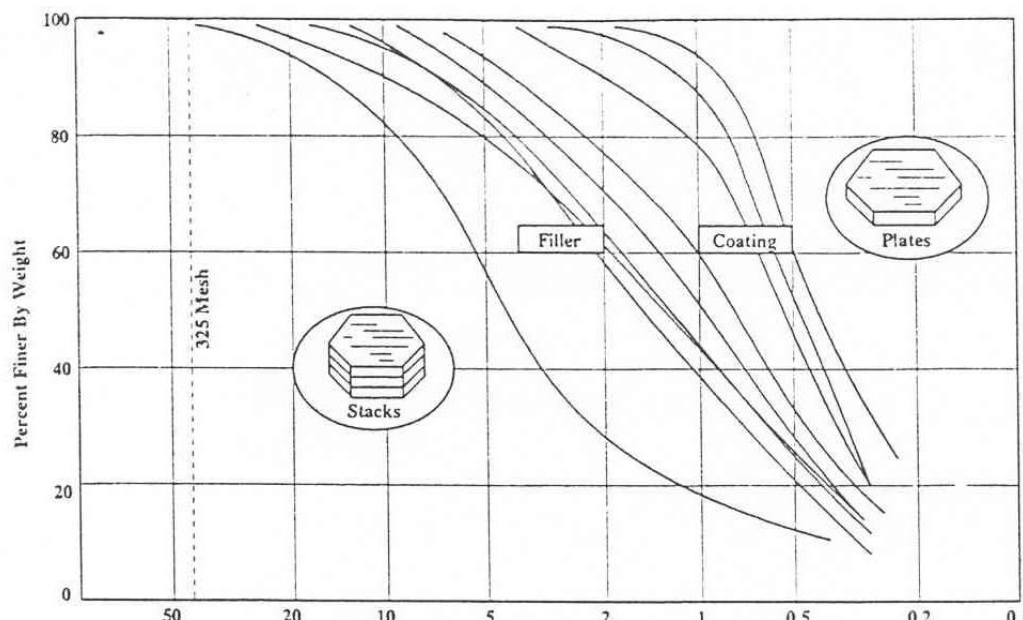
Οι περισσότεροι καολίνες είναι μαλακοί και πλαστικοί όταν υπάρχει φυσική υγρασία ή όταν προστεθεί νερό στο ξηρό υλικό. Ο ξηρός καολίνης είναι συνήθως εύθρυπτος και μια συνηθισμένη διαγνωστική του ιδιότητα είναι η κολλητική του συμπεριφορά, όταν τον ακουμπήσουμε στην γλώσσα. Μερικοί τύποι καολίνη, οι οποίοι έχουν βρεθεί κάτω από μεγάλη λιθοστατική πίεση ή περιέχουν διοξείδιο του πυριτίου είναι συμπαγείς, σκληροί και συχνά αναφέρονται σαν flint καολίνες.

Εκτεταμένα κοιτάσματα καολίνη απαντώνται σε διάφορες χώρες του κόσμου. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ανά ήπειρο είναι στη Βόρειο Αμερική: Η.Π.Α., Μεξικό, στη Νότιο Αμερική: Αργεντινή, Βραζιλία, Γουιάνα, Χιλή, Κολομβία, Βενεζουέλα, Περού, Παραγουάη, Ισημερινός, στην Ευρώπη: Πρώην Σοβιετική Ένωση, Τσεχία, Σλοβακία, Ιταλία, Ισπανία, Πολωνία, Γερμανία, Γαλλία, Βουλγαρία, Ρουμανία, Σουηδία, Πορτογαλία, Γιουγκοσλαβία, Βέλγιο, στην Αφρική: Δημοκρατία της Νότιας Αφρικής, Σουαζιλάνδη, στην Ασία: Σρι Λάνκα, Ινδία, Ινδονησία, Ιράν, Ιαπωνία, Κορέα, Κίνα, Μαλαισία, Φιλιππίνες, Τουρκία και στην Ωκεανία: Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία.

Στην Ελλάδα υπάρχουν αξιόλογα κοιτάσματα καολίνη στη Μήλο, κατάλληλα για χρήση στα τσιμέντα, τα κεραμικά και την πλήρωση χάρτου, ενώ εμφανίσεις μέτριας ποιότητας υλικού υπάρχουν στη Λέσβο, την Κίμωλο και τη Θήρα. Άλλα αξιόλογα κοιτάσματα υπάρχουν, επίσης, στη Δράμα, καθώς και σε άλλες περιοχές. Ωστόσο, οι εμφανίσεις αυτές δεν έχουν αξιολογηθεί πλήρως καθώς δεν έχουν ακόμη ερευνηθεί συστηματικά.

Τα κοιτάσματα καολίνη στη Μήλο είναι γενικά φτωχά και περιέχουν υψηλό ποσοστό πυριτίου, ένα μέρος του οποίου βρίσκεται σε κolloειδή μορφή και επομένως είναι δύσκολο να απομακρυνθεί. Περιέχουν, επίσης, σχετικά υψηλά ποσοστά επιβλαβών προσμίξεων όπως σιδηροξείδια, αλουμίτη και θείο. Σημειώνεται ότι, στη Μήλο η κύρια εμφάνιση καολίνη απαντάται κοντά στην περιοχή Βάνι (Pflumio et al., 1991). Ο καολίνης στη Μήλο είναι προϊόν υδροθερμικής εξαλλοίωσης ηφαιστειακών πετρωμάτων, γεγονός που ερμηνεύει και τη σύγχρονη εμφάνιση οπαλίωσης στις ίδιες περιοχές. Οι εμφανίσεις με μορφή φλεβών, θυλάκων ή με ακανόνιστο σχήμα εκτείνονται σε βάθος μέσα στο μητρικό πέτρωμα. Λόγω της μορφής αυτής των κοιτασμάτων, η εκμετάλλευσή τους γίνεται εκλεκτικά, με αποτέλεσμα να παραμένει ανεκμετάλλευτο μεγάλο μέρος υλικού κατώτερης ποιότητας, το οποίο δε θα είναι εκμεταλλεύσιμο σε μελλοντικό στάδιο επανάληψης των εργασιών. Έτσι, παρόλο που

οι εμφανίσεις καολίνη στη Μήλο είναι σημαντικές δεν έχει γίνει προσπάθεια για πλήρη αξιοποίηση των αποθεμάτων του, τόσο για την παραγωγή εξευγενισμένων προϊόντων υψηλής τιμής, όπως είναι για παράδειγμα ο εμπλουτισμένος καολίνης για επίχριση χαρτιού όσο και για την παραγωγή άλλων χαμηλότερης τιμής εμπορεύσιμων προϊόντων, όπως είναι τα πληρωτικά.

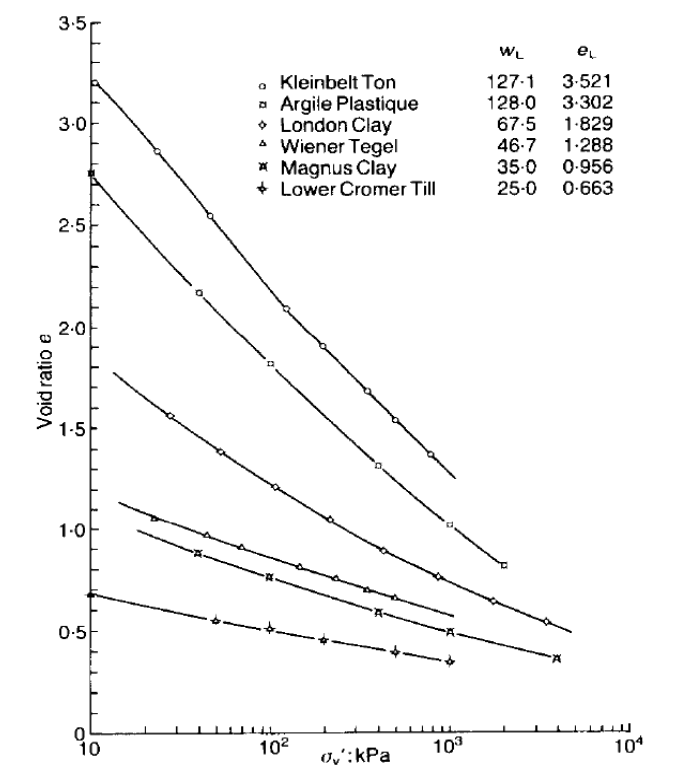


Σχήμα 2.2.2 Χρήσεις καολινών ανάλογα με την κοκκομετρική τους διασπορά

Οι κυριότερες χρήσεις των καολινών είναι στην βιομηχανία χαρτιού, τα κεραμικά και τη βιομηχανία ελαστικών. Το 70 % περίπου της παγκόσμιας παραγωγής καολίνη απορροφάται από τη χαρτοβιομηχανία για επικάλυψη και πλήρωση του χαρτιού, καθώς και για τον έλεγχο της διαπερατότητας του. Απαιτείται υψηλή ποιότητα υλικού που καθορίζεται από αυστηρές προδιαγραφές. Χρησιμοποιούνται, επίσης, σε μεγάλη κλίμακα, στη βιομηχανία κεραμικών. Ο καολινίτης αποτελεί το κύριο συστατικό για την παρασκευή της παγκόσμια γνωστής κινεζικής πορσελάνης. Η υψηλή θερμοκρασία τήξεως και το λευκό του χρώμα μετά από φρύξη είναι χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για την παρασκευή της κοινής πορσελάνης και των πυρίμαχων υλικών. Επιπροσθέτως, σημαντικές ποσότητες καολίνη χρησιμοποιούνται και στην κατεργασία των ελαστικών, ώστε να βελτιωθεί η μηχανική αντοχή τους και η αντίσταση στη φθορά λόγω τριβής. Τέλος, ο καολίνης βρίσκει εφαρμογές και στην τσιμεντοβιομηχανία, για την παρασκευή λευκού τσιμέντου, καθώς και στη βιομηχανία χρωμάτων. Μικρές σχετικά ποσότητες χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές όπως: σε καλλυντικά, στη μελάνη, σε οργανικά πλαστικά, στην φαρμακευτική, σε υλικά χυτεύσεως, σε μουσα-μάδες, σε απορροφητικά υλικά, σαν βάση για εντομοκτόνα κ. ά.

2.3 ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

Σύμφωνα με τον Burland (1990) αναζυμωμένα υλικά είναι αυτά που έχουν αναμειχθεί με ποσότητα νερού ίση ή μεγαλύτερη από το όριο υδαρότητας w_L . Στο παρακάτω Σχήμα 2.3.1 φαίνονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης για διάφορες αναζυμωμένες αργίλους που καλύπτουν διάφορες πλασιμότητες.



Σχήμα 2.3.1 Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης για διάφορες αναζυμωμένες αργίλους (Πηγή: Burland 1990)

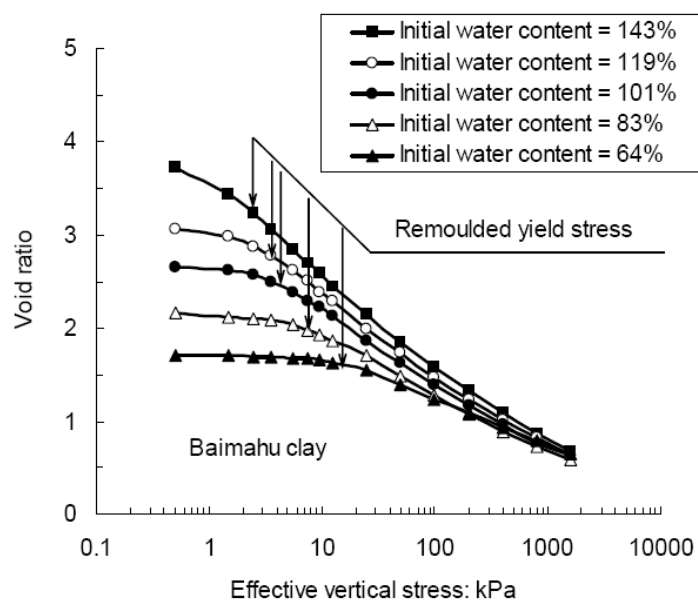
Για κάθε άργιλο στο Σχήμα 2.3.1 δίνονται οι τιμές του ορίου υδαρότητας w_L και του δείκτη πόρων e_L που αντιστοιχεί σε αυτό. Παρατηρούμε ότι παρόλο που οι άργιλοι Kleinbelt Ton και Argile Plastique έχουν σχεδόν ίδιο όριο υδαρότητας διαφέρουν στο e_L λόγω διαφορετικού ειδικού βάρους. Η άργιλος Argile Plastique έχει μικρότερο ειδικό βάρος από την Kleinbelt Ton άρα και μικρότερο δείκτη πόρων. Φαίνεται ότι ο δείκτης πόρων στο όριο υδαρότητας είναι πιο καθοριστικός παραγοντας από το όριο υδαρότητας. Για δεδομένη τιμή ενεργού τάσης ο δείκτης πόρων e αυξάνεται καθώς αυξάνεται το e_L . Παρατηρούμε επιπλέον ότι οι καμπύλες μονοδιαστατης συμπίεσης συγκλίνουν καθώς αυξάνεται η τάση. Τέλος φαίνεται ότι οι καμπύλες των διάφορων αργίλων είναι παρόμοιες σχηματικά, με μικρή καμυλότητα με τα κοίλα προς τα άνω.

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.

Ο όρος 'εγγενείς' χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ιδιότητες των αργίλων που έχουν αναζυμωθεί με ποσοτητα νερού μεταξύ w_L και $1,5w_L$ (ιδανικά $1,25 w_L$) και, χωρίς να ξηραθούν στον αέρα ή σε κλίβανο, στερεοποιούνται κατα προτίμηση υπο συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Ιδανικά η χημική σύσταση του νερού θα πρέπει να είναι ίδια με αυτή του νερού στους πόρους της αργίλου στο φυσικό της περιβάλλον. Τα εγγενή χαρακτηριστικά μίας αργίλου είναι ανεξάρτητα από αυτά στο φυσικό της περιβάλλον.

Οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης στο Σχήμα 2.3.2 αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά αργίλων οι οποίες έχουν αναζυμωθεί με ποσοστά υγρασίας μεταξύ w_L και $1,5w_L$. Στο Σχήμα 2.3.3 φαίνεται η εγγενής καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης για μία άργιλο. Οι ποσότητες e^*_{100} και e^*_{1000} είναι οι εγγενείς δείκτες πόρων που αντιστοιχούν σε τάσεις $\sigma'_v = 100$ kPa και $\sigma'_v = 1000$ kPa αντίστοιχα. Ο εγγενής δείκτης συμπίεσότητας C_c^* ορίζεται ως $e^*_{100} - e^*_{1000}$. Σύμφωνα με τον Terzaghi (1925) οι παράμετροι e^*_{100} και C_c^* αποτελούν τις εγγενείς σταθερές συμπίεσότητας. 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.

Στο Σχήμα 2.3.2 φαίνεται η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας στην αρχική θέση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσότητας της ίδιας αναζυμωμένης αργίλου, Baimahu clay, σύμφωνα με σειρά πειραμάτων που παρουσίασαν οι Hong et al. (2010). Για υψηλές ενεργές τάσεις οι καμπύλες φαίνεται να συγγλίνουν.



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

Για να εξαλειφθεί η επιρροή που ασκούν τα διαφορετικά αρχικά ποσοστά υγρασίας, προτείνεται από τον Burland σαν δείκτης κανονικοποίησης ο δείκτης κενών I_v . Ο δείκτης κενών ορίζεται από τη σχέση:

$$I_v = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} = \frac{e - e^*_{100}}{C_c^*}$$

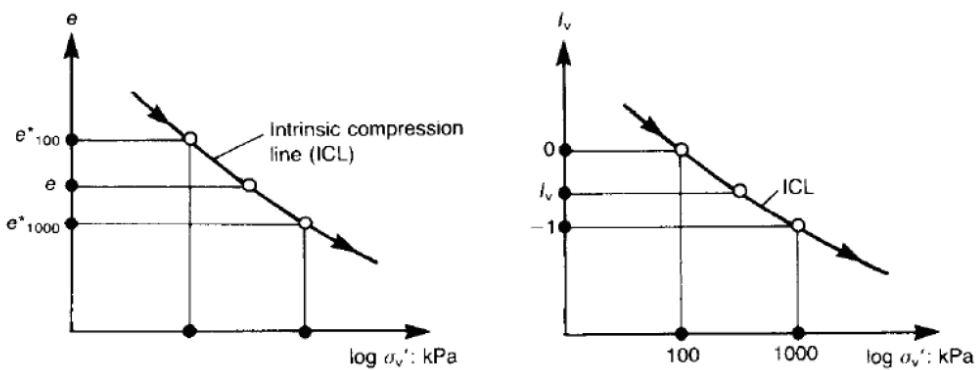
Οι καμπύλες στο Σχήμα 2.3.1 μπορούν να κανονικοποιηθούν δίνοντας καθορισμένες τιμές στα e^*_{100} και e^*_{1000} . Έτσι από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης στο Σχήμα 2.3.3 προκύπτει η κανονικοποιημένη καμπύλη, όπου ο δείκτης κενών I_v παίρνει τιμές στον κατακόρυφο άξονα. Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι όταν $e = e^*_{100}$, $I_v=0$ και όταν $e = e^*_{1000}$ τότε $I_v= -1$. Ο δείκτης κενών I_v μπορεί να αποτελέσει μέτρο για το πόσο συμπαγές είναι ένα εδαφικό υλικό. Όταν $I_v < 0$ τότε μπορούμε να πούμε ότι το εδαφικό υλικό είναι συμπαγές ενώ όταν $I_v > 0$ τότε είναι χαλαρό.

Ο δείκτης κενών I_v θυμίζει το δείκτη υδαρότητας $\{ = (w - w_p) / (w_L - w_p) \}$. Προσδιορίζεται από δύο μετρήσιμες μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού (e^*_{100} , C_c) με μία δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης. Αντίθετα ο δείκτης υδαρότητας προκύπτει από δύο εμπειρικές δοκιμές (όριο υδαρότητας και όριο πλασιμότητας) οι οποίες υποβάλλουν το εδαφικό υλικό σε πολύπλοκες φυσικές διεργασίες.

Για τα υλικά που βρίσκονται πάνω από τη γραμμή A του χάρτη πλασιμότητας 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):

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

$$C_c^* = 0.256e_L - 0.04$$

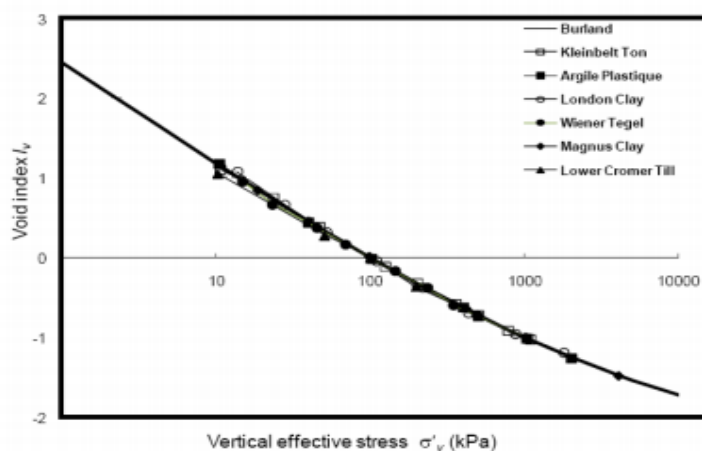


Σχήμα 2.3.3 Η χρήση του δείκτη κενών I_v για την κανονικοποίηση της εγγενούς καμπύλης συμπίεσότητας (Πηγή: Burland, 1990)

Τρεις από τις καμπύλες από το Σχήμα 2.3.1 που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ορίων υδαρότητας και πιέσεων έχουν επανασχεδιαστεί στο Σχήμα 2.3.4 σε όρους δείκτη κενών I_v και $\log \sigma'_v$. Φαίνεται ότι και οι τρεις καμπύλες συντρέχουν πάνω σε μία καμπύλη η οποία ονομάζεται εγγενής καμπύλη συμπίεσης (ICL). Οι συντεταγμένες της ICL δίνονται στο Σχήμα 2.3.4 και μπορούν να αναπαρασταθούν σύμφωνα με τον Burland με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση:

$$I_v = 2,45 - 1,285x + 0,015x^3$$

όπου $x = \log \sigma'_v$ σε kPa.



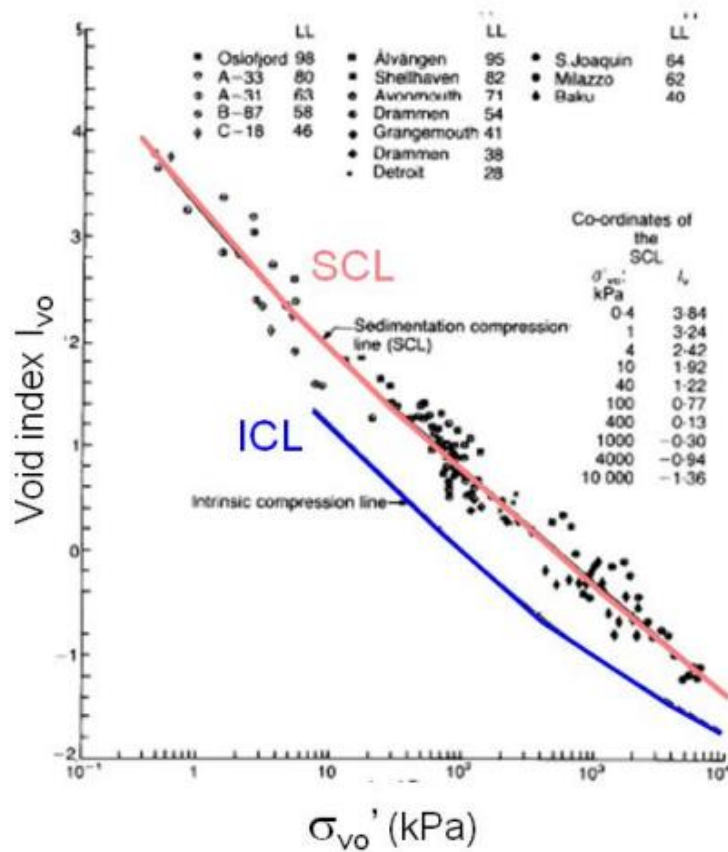
Σχήμα 2.3.4 Η εξίσωση του Burland και αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα (Πηγή: Burland, 1990)

Η εγγενής καμπύλη συμπίεσότητας μπορεί να προσδιοριστεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης για μία άργιλο ή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση. Επιπλέον μπορούμε να μετατρέψουμε την ICL σε όρους δείκτη πόρων (e) και $\log \sigma'_v$ χρησιμοποιώντας τη σχέση :

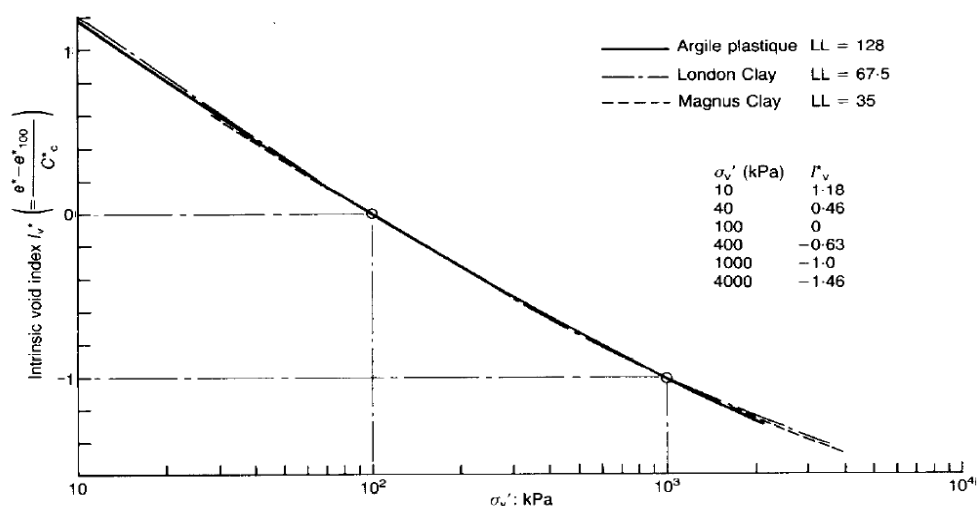
$$e = I_v C^*_v + e^*_{100}$$

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 συμπίεσότητας του αντίστοιχου αναζυμωμένου υλικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.5. 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 Σχήμα 2.3.5 απεικονίζεται η ICL (εγγενής καμπύλη συμπίεσότητας) καθώς και τα αποτελέσματα από τη συμπίεση αδιατάρακτων αργίλων, τα οποία μπορούν να παρασταθούν σε μία ευθεία, την SCL (καμπύλη συμπίεσης φυσικών υλικών). Παρατηρείται ότι για συγκεκριμένες περιοχές τάσεων (π.χ. από 10kPa μέχρι 100kPa) η SCL και η ICL είναι σχεδόν παράλληλες.



Σχήμα 2.3.5 Η εγγενής καμπύλη συμπίεσης (ICL) και η καμπύλη συμπίεσης απο ιζηματογένεση (SCL) (Πηγή: Burland, 1990)

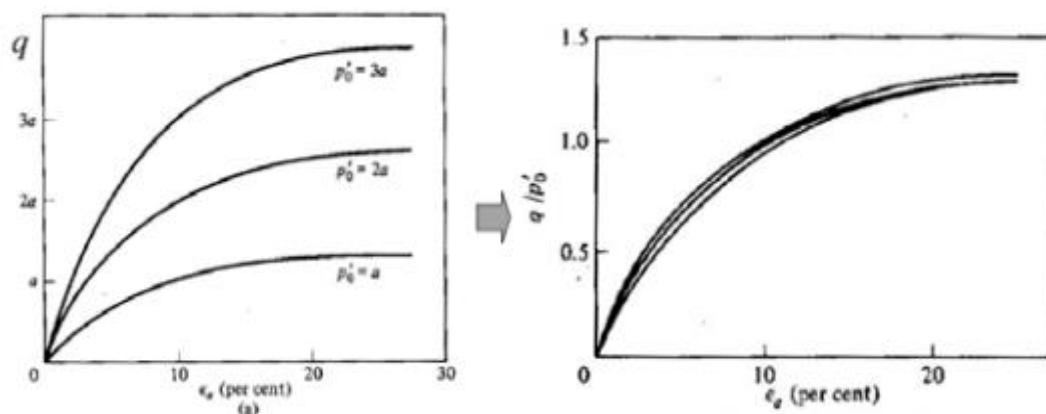


Σχήμα 2.3.6 Κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που συντρέχουν πάνω στην εγγενή καμπύλη συμπίεσης (ICL) (Πηγή: Burland, 1990)

2.4 ΘΕΩΡΙΑ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

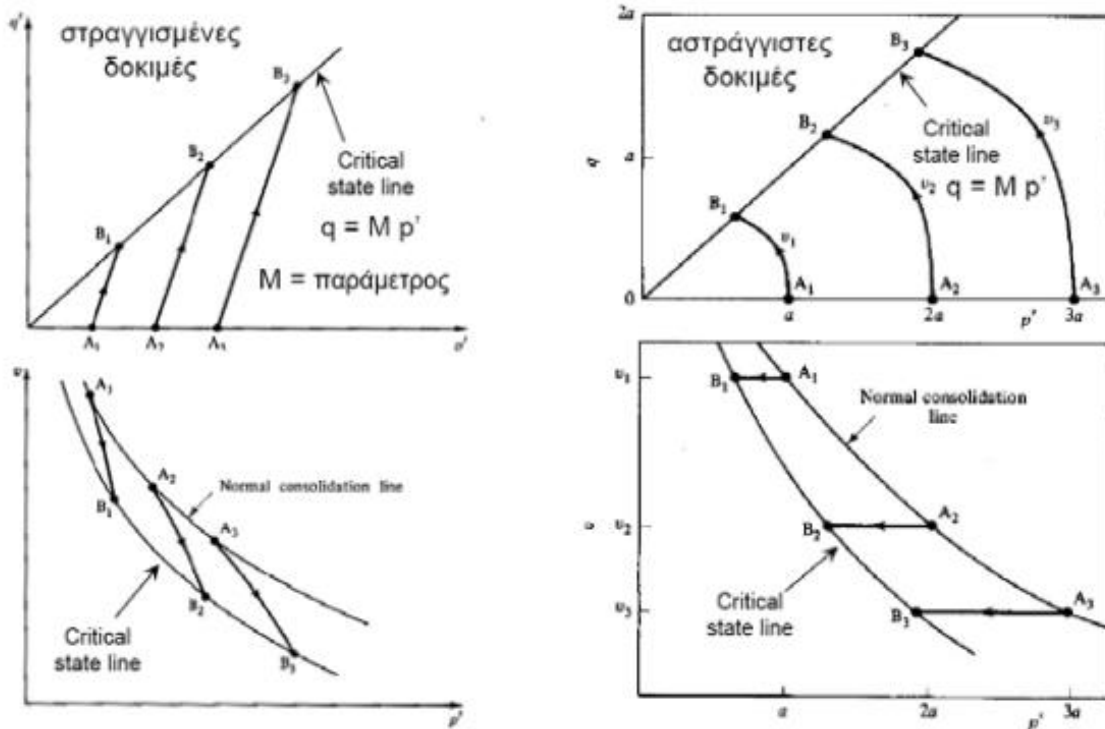
Στην περίπτωση της αστράγγιστης τριαξονικής συμπίεσης θεωρούμε τρία διαφορετικά δείγματα κανονικά στερεοποιημένης αργίλου τα οποία έχουν συμπιεστεί σε διαφορετική μέση ενεργό τάση. Την αύξουσα τάση ισότροπης συμπίεσης την συμβολίζουμε με p'_0 και δίνουμε τιμές $p'_0 = \alpha, 2\alpha, 3\alpha$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a – αποκλίνουσας τάσης q (Σχήμα 2.4.1). Βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τάση ισότροπης στερεοποίησης p'_0 τόσο μεγαλύτερη είναι και η αποκλίνουσα τάση q κατά την αστοχία. Επίσης όλες οι καμπύλες έχουν παρόμοιο σχήμα ανεξάρτητα από την αρχική τάση συμπίεσης.

Μπορούμε να κανονικοποιήσουμε τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης των τριών εδαφικών δειγμάτων, διαιρώντας την αποκλίνουσα τάση q ως προς τη τάση ισότροπης συμπίεσης p'_0 και προκύπτει ότι οι τρεις κανονικοποιημένες καμπύλες ταυτίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια (Σχήμα 2.4.1). Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από στραγγιζόμενες δοκιμές.



Σχήμα 2.4.1 Διαγράμματα παραμόρφωσης-αποκλίνουσας τάσης σε δείγματα με διαφορετικές τάσεις συμπίεσης και αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

Προβάλλοντας τα αποτελέσματα των τριών δοκιμών στο επίπεδο των ενεργών τάσεων $p' - q'$ και στο επίπεδο $p' - \nu$, τόσο κατά τις στραγγιζόμενες όσο και κατά τις αστράγγιστες δοκιμές, προκύπτουν τα διαγράμματα του Σχήματος 2.4.2.

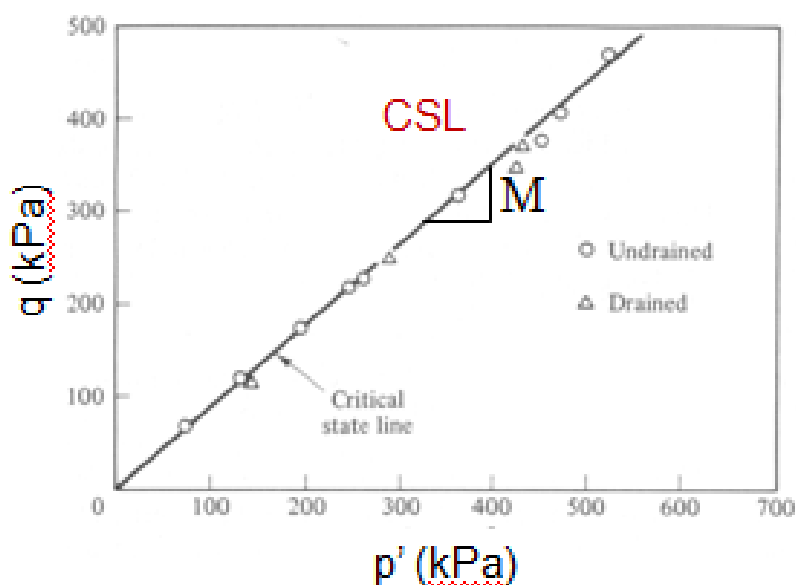


Σχήμα 2.4.2 Διαδρομές τάσεων σε δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης για στραγγιζόμενες και αστράγγιστες δοκιμές συμπίεσης (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

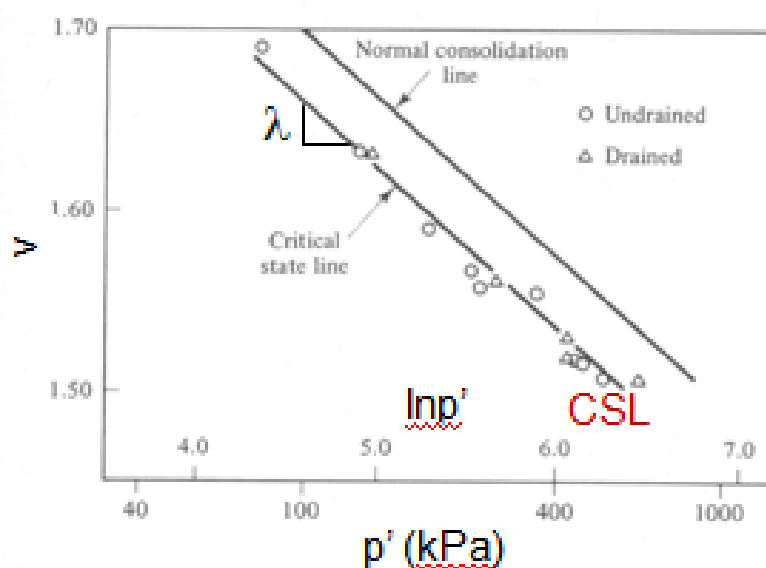
Στο επίπεδο των ενεργών τάσεων $p' - q'$, τα σημεία περιγραφής της αρχικής εντατικής κατάστασης των εδαφικών στοιχείων (A_1, A_2, A_3) βρίσκονται στον άξονα της μέσης ενεργού τάσης p' . Κατά τις στραγγιζόμενες δοκιμές, οι διαδρομές των τάσεων και των τριών δειγμάτων είναι παράλληλες ευθείες υπό κλίση 3:1, όπως αναμενόταν άλλωστε. Κατά τις αστράγγιστες δοκιμές, οι διαδρομές των τάσεων και των τριών δειγμάτων είναι παράλληλες καμπύλες με μειούμενη μέση ενεργό τάση p' και αυξανόμενη αποκλίνουσα τάση q , όπως επίσης αναμενόταν. Τα σημεία αστοχίας των τριών δειγμάτων (B_1, B_2, B_3) κείτονται επί μιας κοινής ευθείας η οποία περνάει από την αρχή των αξόνων. Η γραμμή αυτή ονομάζεται γραμμή κρίσιμης κατάστασης (Critical State Line) και αποτελεί μία περιβάλλουσα αστοχίας του εδαφικού δοκιμίου. Στο επίπεδο συμπίεσης $p' - v$, τα σημεία της αρχικής κατάστασης των τριών εδαφικών δοκιμών (A_1, A_2, A_3) βρίσκονται επί της καμπύλης ισότροπης συμπίεσης. Κατά τις στραγγιζόμενες δοκιμές, αυξάνοντας τη μέση ενεργό τάση p' ο ειδικός όγκος v μειώνεται μέχρι την αστοχία του δείγματος. Κατά τις αστράγγιστες δοκιμές, μειώνοντας την p' , καθώς αυξάνεται η αξονική παραμόρφωση ϵ_a , ο ειδικός όγκος v των δειγμάτων παραμένει σταθερός μέχρι την αστοχία. Τα σημεία αστοχίας (B_1, B_2, B_3) ορίζουν μία καμπύλη παράλληλη με την καμπύλη ισότροπης συμπίεσης. Η γραμμή αυτή είναι η γραμμή κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο συμπίεσης.

Στην τριαξονική δοκιμή, ανάλογα με τον τύπο της (εμποδιζόμενη ή ελεύθερη στράγγιση), ακολουθούνται διαφορετικές διαδρομές ενεργών τάσεων, όμως όλες καταλήγουν στην γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL). Ως αστοχία, ορίζουμε την κατάσταση κατά την οποία το εδαφικό υλικό παρουσιάζει μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις υπό σταθερές τάσεις και όγκο.

Τα παρακάτω Σχήματα 2.4.3 και 2.4.4 παρουσιάζουν την μορφή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, CSL, βάσει μεγάλου αριθμού πειραματικών δεδομένων σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο Weald clay.



Σχήμα 2.4.3 Ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο $q-p'$ όπως προκύπτει από δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)



Σχήμα 2.4.4 Ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο $v-\ln p'$ όπως προκύπτει από δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)

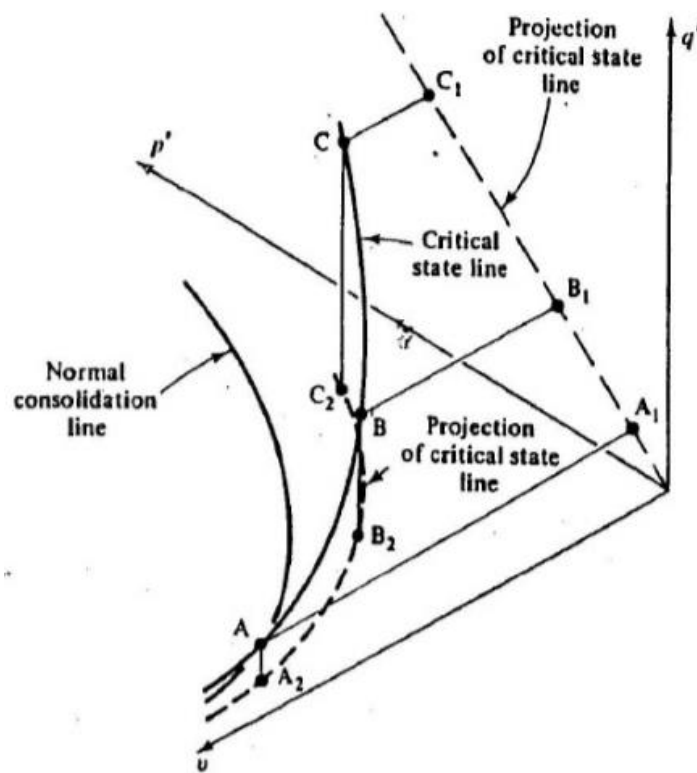
Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη CSL στα επίπεδα $q-p'$ και $v-\ln p'$ είναι αντίστοιχα:

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

όπου M είναι η κλίση της γραμμής και αποτελεί μία σταθερά τριβής του υλικού, Γ η τιμή του ειδικού όγκου v, που αντιστοιχεί σε μέση ενεργό τάση $p' = 1.0 \text{ kN/m}^2$ επί της

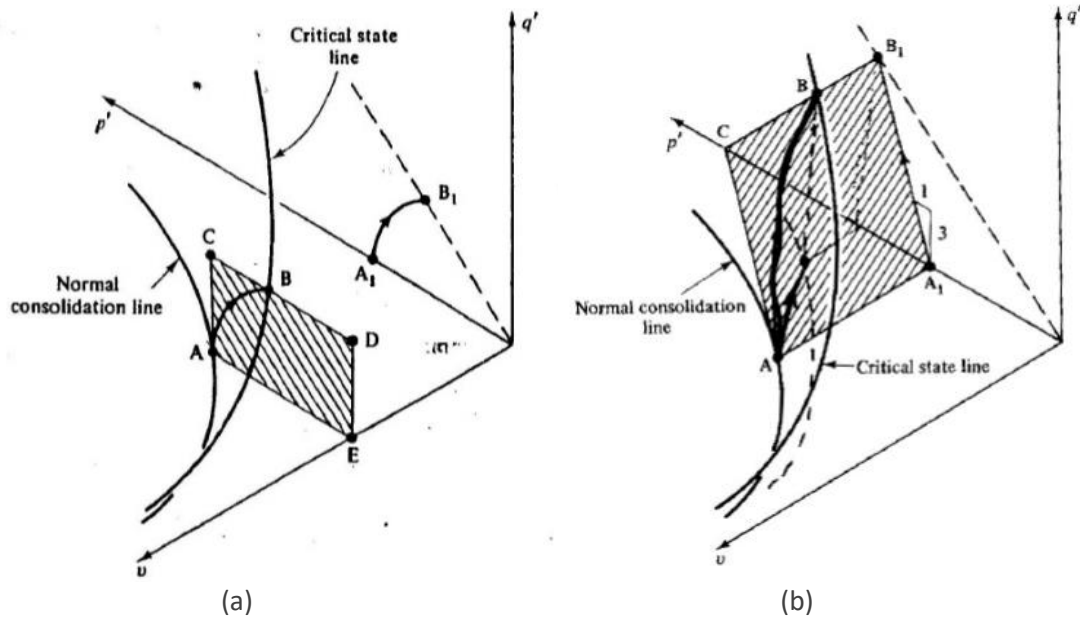
γραμμής κρίσιμης κατάστασης και προσδιορίζει τη θέση της γραμμής της κρίσιμης κατάστασης, και λ η κλίση της ευθείας κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο v - $\ln p'$. Οι παράμετροι αυτοί M , Γ , λ θεωρούνται σταθερές του εδάφους και προσδιορίζονται πειραματικά. Η CSL είναι παράλληλη με την NCL και βρίσκεται αριστερά αυτής.

Τα παραπάνω Σχήματα 2.4.3 και 2.4.4 αποτελούν τις προβολές της καμπύλης κρίσιμης κατάστασης στα επίπεδα $(q$ - $p')$ και $(v$ - $p')$ αντίστοιχα. Στα παρακάτω Σχήματα 2.4.5 και 2.4.6, φαίνεται η καμπύλη κρίσιμης κατάστασης στον τρισδιάστατο χώρο $(q$ - p' - v) καθώς και η διαδρομή τάσεων που ακολουθείται κατά μία αστράγγιστη και μία στραγγιζόμενη τριαξονική δοκιμή.



Σχήμα 2.4.5 Καμπύλη κρίσιμης κατάστασης στον τρισδιάστατο $(q$ - p' - v) χώρο (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)

Ένα δοκίμιο συμπιέζεται ισότροπα στο σημείο A και μετά υφίσταται αστράγγιστη τριαξονική συμπίεση μέχρι να αστοχήσει στο σημείο B, πάνω στη γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Αυτή η διαδρομή τάσεων προβάλλεται στο p' - q' ως A_1B_1 . Φαίνεται ότι λόγω αστράγγιστων συνθηκών ο όγκος δεν μεταβάλλεται και έτσι ο δείκτης πόρων και ο ειδικός όγκος παραμένει σταθερός (επίπεδο ACDE).



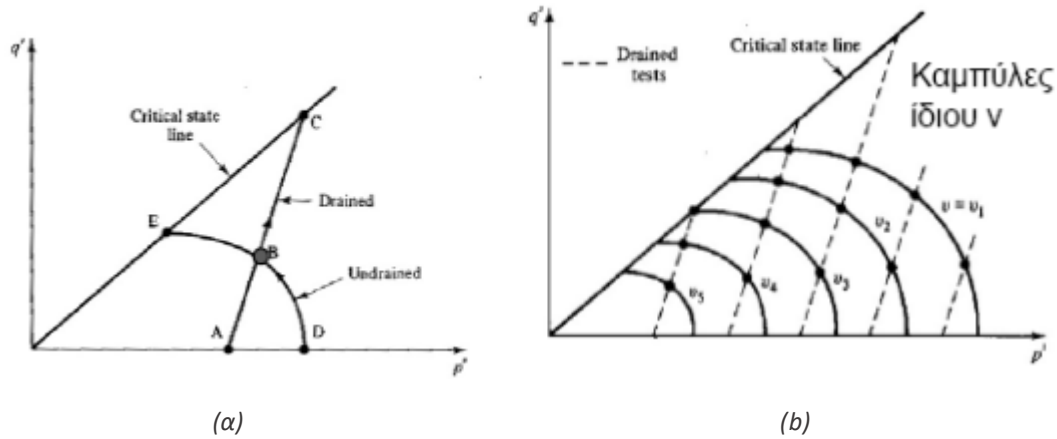
Σχήμα 2.4.6 Διαδρομή τάσεων σε αστράγγιστη(a) και στραγγιζόμενη(b) τριαξονική δοκιμή (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)

Στην παραπάνω Σχήμα 2.4.6(b), φαίνεται η διαδρομή τάσεων σε δοκιμή υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Η διαδρομή των τάσεων σε μια στραγγιζόμενη τριαξονική συμπίεση είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση 3:1 στο επίπεδο p' - q' . Το δείγμα συμπιέζεται (ή διογκώνεται) και γι' αυτό ο ειδικός όγκος αλλάζει. Η αρχική κατάσταση του δείγματος πάνω στη γραμμή κανονικής στερεοποίησης περιγράφεται από το σημείο A και καταλήγει στο σημείο B όπου και αστοχεί. Η προβολή στο p' - q' είναι η διαδρομή A_1B_1 . Το ακριβές σχήμα εξαρτάται από την σχέση μεταξύ της ογκομετρικής αλλαγής και την αύξηση της q' , ωστόσο η διαδρομή των τάσεων AB παραμένει πάντα επί του στραγγιζόμενου επιπέδου ACB_1A_1 .

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η γνώση της θέσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, για ένα εδαφικό στοιχείο, μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τις τάσεις και τον ειδικό όγκο κατά την αστοχία κανονικά στερεοποιημένων δειγμάτων για μια πλειάδα διαδρομών τάσεων.

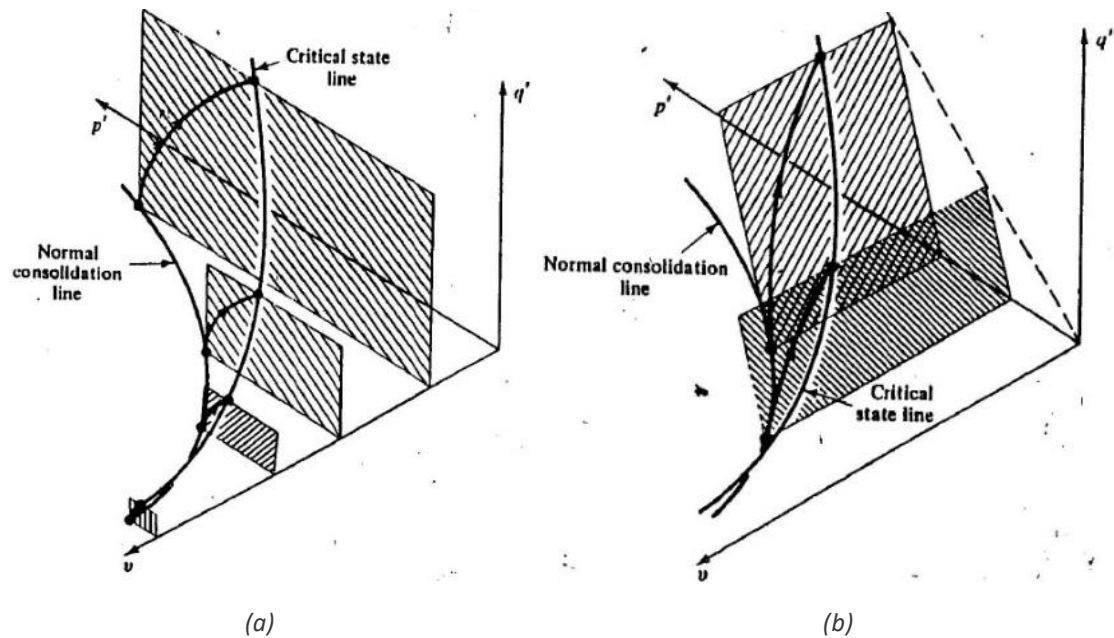
2.4.1 Επιφάνεια Roscoe-Rendulic

Προηγουμένως είδαμε ότι κάθε εντατική διαδρομή ενός κανονικά στερεοποιημένου εδαφικού στοιχείου, κινείται επί ενός επιπέδου φόρτισης (αστράγγιστο ή στραγγιζόμενο επίπεδο) από την καμπύλη ισότροπης συμπίεσης έως τη γραμμή της κρίσιμης κατάστασης. Για να προσδιορίσουμε κατά πόσο οι δύο αυτές επιφάνειες ταυτίζονται, πρέπει να προσδιοριστεί εάν δύο όμοια εδαφικά στοιχεία τα οποία υποβάλλονται σε μία στραγγιζόμενη και μια αστράγγιστη δοκιμή τριαξονικής συμπίεσης αντίστοιχα, έχουν το ίδιο ειδικό όγκο v όταν σε αυτά ασκούνται οι ίδιες ενεργές τάσεις.



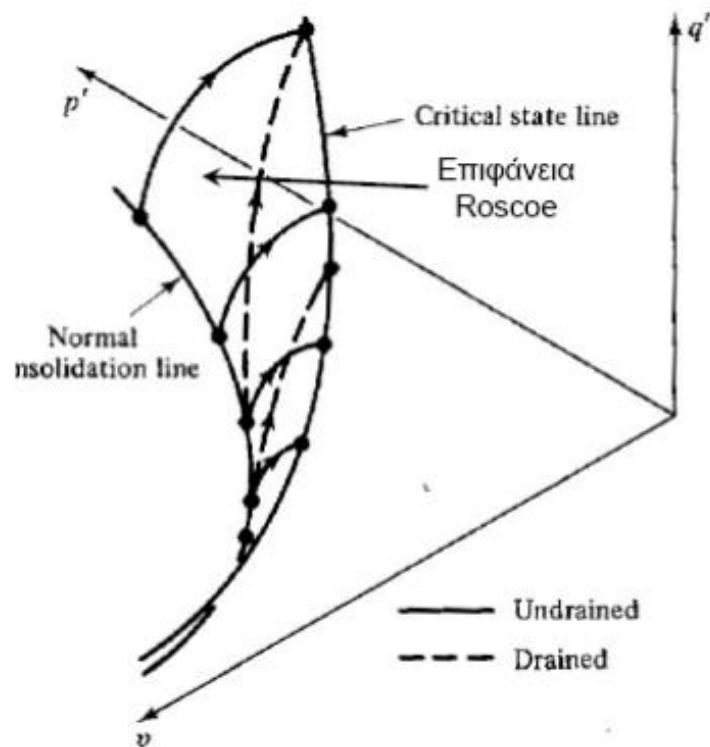
Σχήμα 2.4.7 (α) Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $q'-p'$ για αστράγγιστη και στραγγιζόμενη δοκιμή (β) επιφάνειες ειδικού όγκου (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

Οι αστράγγιστες και οι στραγγιζόμενες δοκιμές ορίζουν μια τρισδιάστατη επιφάνεια, η οποία ονομάζεται επιφάνεια Roscoe και συνδέει την γραμμή κανονικής στερεοποίησης με την γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Η επιφάνεια αυτή είναι μοναδική και είναι ίδια για τις στραγγιζόμενες και τις αστράγγιστες δοκιμές. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι η στραγγιζόμενη διαδρομή ABC έχει το ίδιο ειδικό όγκο στο σημείο B με την αστράγγιστη διαδρομή DBE.



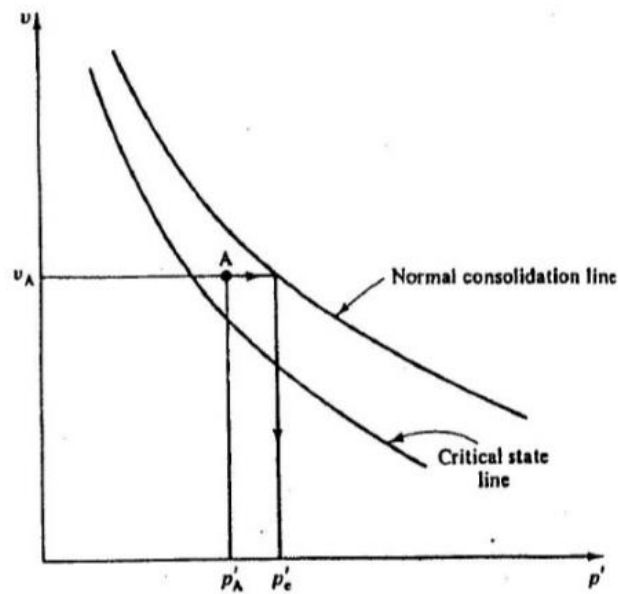
Σχήμα 2.4.8 (α) Τέσσερα αστράγγιστα επίπεδα και (β) δύο στραγγιζόμενα επίπεδα στο τρισδιάστατο χώρο $p'-q'-v$ (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

Οι αστράγγιστες δοκιμές βοήθησαν στον ορισμό της επιφάνειας, καθώς για κάθε αστράγγιστη δοκιμή υπάρχει και ένα επίπεδο με σταθερό v που τέμνει την γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Οι στραγγιζόμενες δοκιμές ακολουθούν διαδρομές τάσεων που τέμνουν κάθετα τις αστράγγιστες διαδρομές.



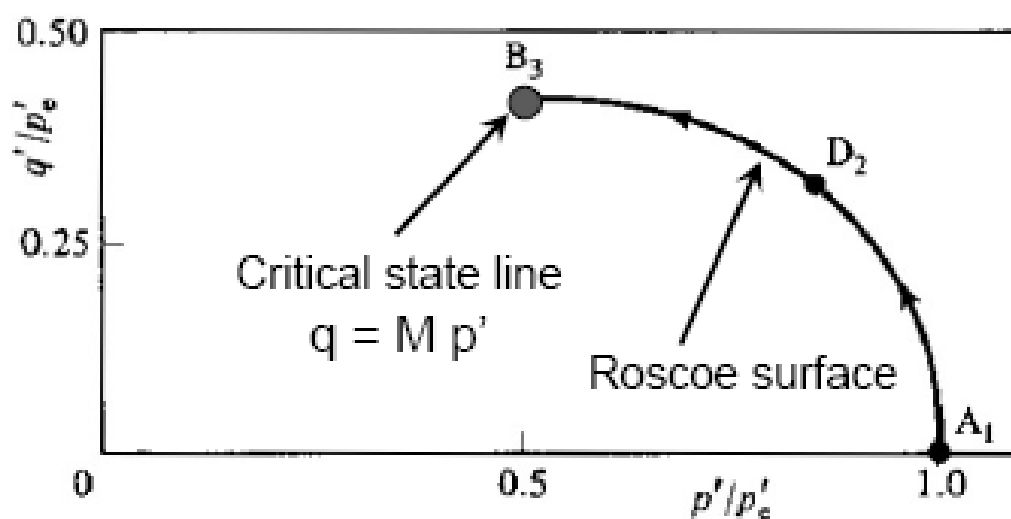
Σχήμα 2.4.9 Αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές επί της επιφάνειας Roscoe (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)

Η μεταβολή του ειδικού όγκου v κατά τη στραγγιζόμενη δοκιμή δεν μας επιτρέπει μια απευθείας σύγκριση της διαδρομής των τάσεων στα δύο είδη δοκιμών. Για να λύσουμε το πρόβλημα αυτό μπορούμε να κανονικοποιήσουμε τις καμπύλες ως προς την ισοδύναμη μέση πίεση p'_e ή τάση Hvorslev. Η p'_e είναι η αντίστοιχη τιμή μέσης ενεργού τάσης p' στην καμπύλη συμπίεσης NCL για τον εκάστοτε λόγο κενών (specific volume) v που είχε στη συγκεκριμένη κατάσταση το δοκίμιο (Σχήμα 2.4.10).

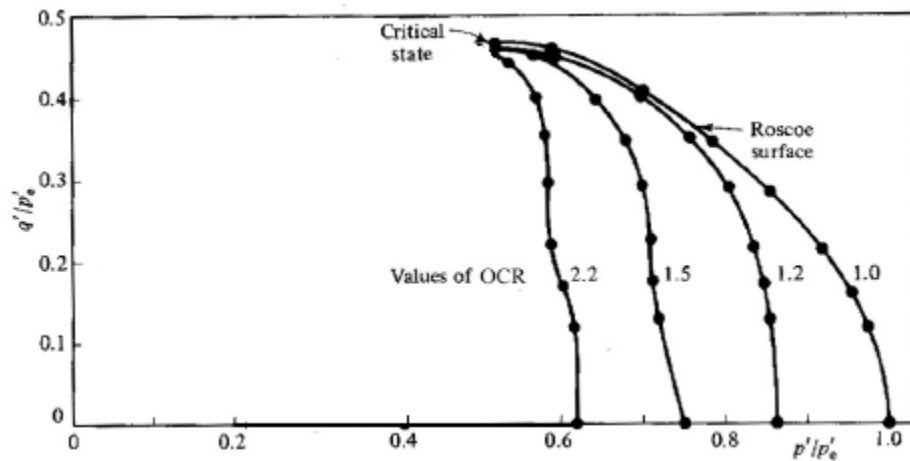


Σχήμα 2.4.10 Προσδιορισμός ισοδύναμης μέσης πίεσης p'_e μέσω της καμπύλης στερεοποίησης (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης CSL του προηγούμενου Σχήματος μετά την κανονικοποίηση φαίνεται ως το σημείο B_3 στο Σχήμα 2.4.11. 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 στο σημείο κρίσιμης κατάστασης (Σχήμα 2.4.11). Η επιφάνεια Roscoe αποτελεί όριο, καθώς ελαφρά υπερστερεοποιημένες άργιλοι κινούνται κοντά και αριστερά, ποτέ όμως δεξιά αυτής, καταλήγοντας επίσης στο σημείο κρίσιμης κατάστασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.12



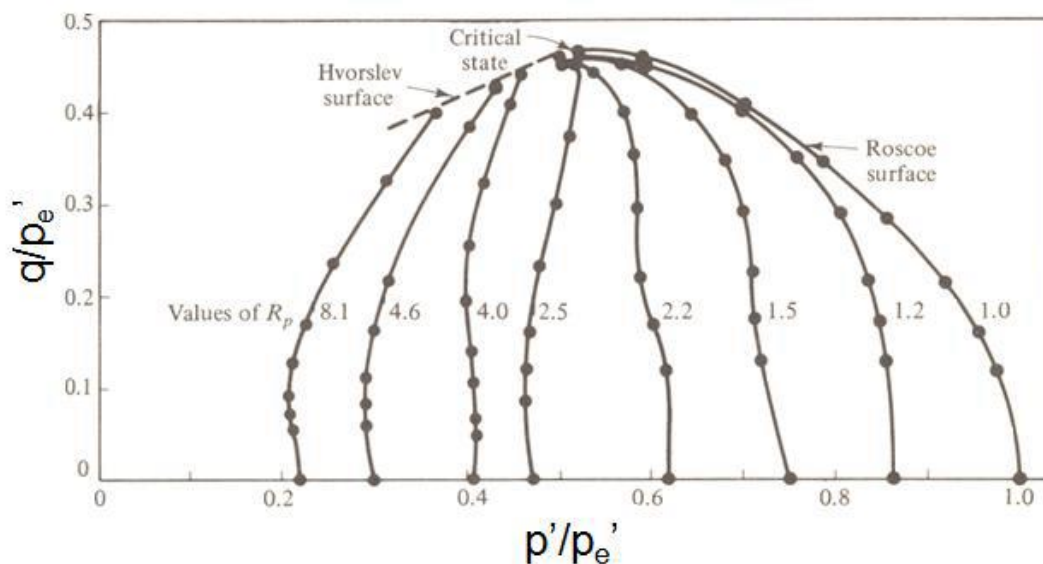
Σχήμα 2.4.11 Η καμπύλη Roscoe και το σημείο κρίσιμης κατάστασης στο κανονικοποιημένο επίπεδο $q/p'_e - p'/p'_e$ (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)



Σχήμα 2.4.12 Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για ελαφρά υπερστερεοποιημένες αργίλους (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

2.4.2 Επιφάνεια Hvorslev

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

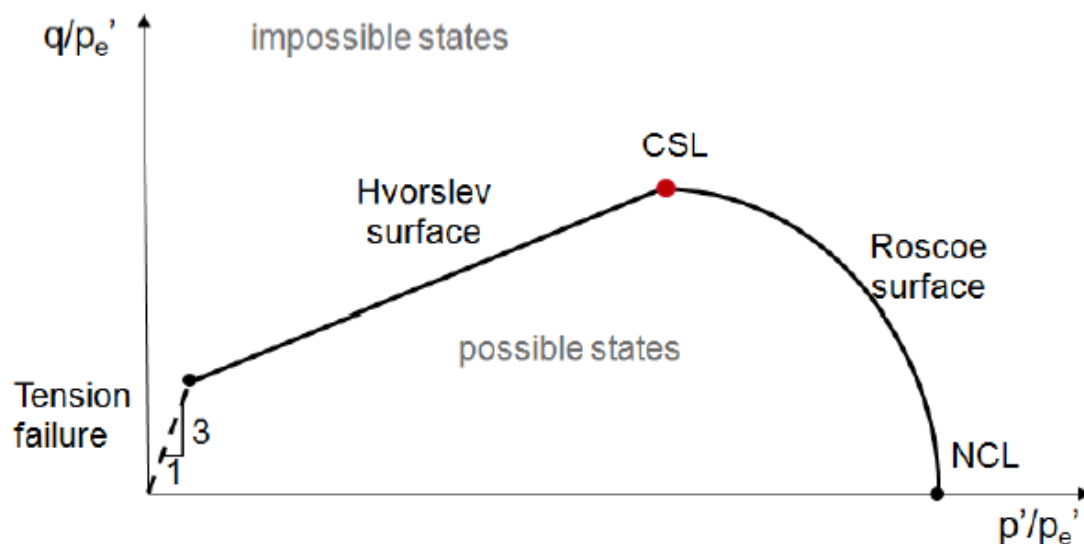


Σχήμα 2.4.13 Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων υπερστερεοποιημένων δοκιμών καολίνη σε αστραγγιστες δοκιμές (Πηγή: Loudon 1967).

Η περιβάλλουσα αστοχίας του Hvorslev περιγράφεται από την εξίσωση:

$$t/s'_e = \kappa^* + (s'/s'_e) \tan\phi^*_e$$

Η κατάσταση των αναζυμωμένων αργιλικών υλικών είναι δυνατόν να περιγράφεται μόνο από διαδρομές τάσεων που βρίσκονται στο εσωτερικό της επιφάνειας του Σχήματος 2.4.14, με τις επιφάνειες Roscoe και Hvorslev να αποτελούν αυστηρό σύνορο.



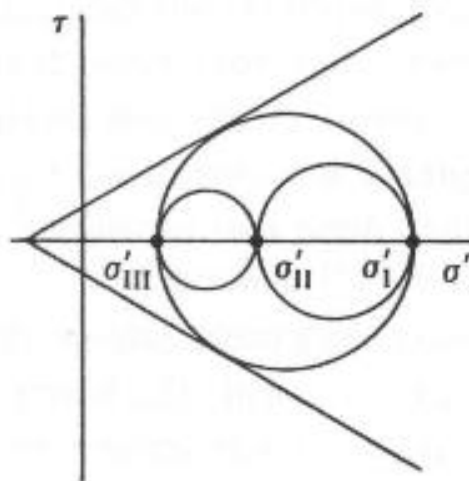
Σχήμα 2.4.14 Ολοκληρωμένη κανονικοποιημένη περιβάλλουσα πιθανών εδαφικών καταστάσεων (Πηγή: Atkinson, Brandsby, 1977)

2.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ MOHR-COULOMB

Το κριτήριο του Mohr- Coulomb ορίζει την αστοχία επί μιας επιφάνειας θραύσης εντός του εδάφους, όπου το έδαφος αστοχεί όταν η διατμητική τάση τ , σε οποιοδήποτε επίπεδο στο έδαφος, φτάσει την κρίσιμη τιμή:

$$\tau = \pm (c' + \sigma' \tan \phi') \quad (1)$$

όπου σ' η ενεργός τάση που δρα στο έδαφος, c' η συνοχή του εδάφους, αν αυτό έχει, και ϕ' η γωνία τριβής του εδάφους. Η εξίσωση αυτή ορίζει ένα ζευγάρι ευθειών στο επίπεδο των τάσεων σ' - τ . Αν ο κύκλος των ενεργών τάσεων του Mohr τμήσει αυτές τις ευθείες τότε το έδαφος θα αστοχήσει και η διατμητική τάση τ ξεπερνάει το άθροισμα $c' + \sigma' \tan \phi'$.



Σχήμα 2.5.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στο επίπεδο t - s' (Πηγή: Wood 1990)

Η αστοχία κατά Mohr-Coulomb ορίζεται επίσης και με τις κύριες τάσεις: σ'_1, σ'_3

$$\frac{\sigma'_1 + c' \cot \phi'}{\sigma'_3 + c' \cot \phi'} = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (2)$$

Η αστοχία Mohr-Coulomb αφορά συνθήκες αστοχίας σε ένα επίπεδο για αυτό η ενδιάμεση τάση σ'_2 δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Στην τριαξονική κυλινδρική συμπίεση η ομοιόμορφη τάση που ασκείται ισούται με την ελάχιστη κύρια τάση σ'_3 και άρα ισχύει η συνθήκη $\sigma'_2 = \sigma'_3$. Για τη μέση ενεργό τάση p' και την αποκλίνουσα τάση q ισχύει ότι :

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (3) \quad \text{και} \quad q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (4)$$

Με βάση τα παραπάνω η σχέση του κριτηρίου Mohr-Coulomb γίνεται:

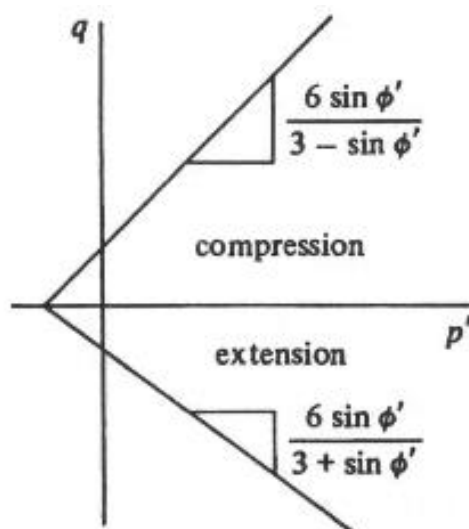
$$\frac{q}{p' + c' \cot \phi'} = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (5)$$

Στην τριαξονική διόγκωση, όπου η ομοιόμορφη τάση που ασκείται ισούται με την μέγιστη κύρια τάση σ'_1 , ανταποκρίνεται η συνθήκη $\sigma'_1 = \sigma'_2$. Τότε για τη μέση ενεργό p' και την αποκλίνουσα τάση q ισχύει ότι:

$$p' = \frac{2\sigma'_1 + \sigma'_3}{3} \quad \text{και} \quad q = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

Με βάση τα παραπάνω, η σχέση του κριτηρίου Mohr-Coulomb γίνεται:

$$\frac{q}{p' + c' \cot \phi'} = \frac{-6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (6)$$



Σχήμα 2.5.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στο επίπεδο q - p' (Πηγή: Wood 1990)

Η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης που ορίζει τις κρίσιμες καταστάσεις περιγράφεται στο χώρο p' - q από την εξίσωση:

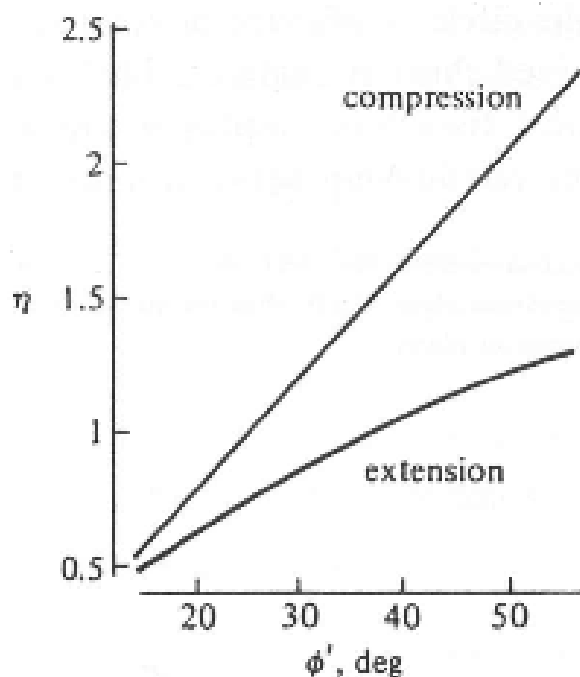
$$n = \frac{q}{p'} = M \quad (7)$$

Από τις σχέσεις (5) και (7) θέτοντας $c' = 0$ στην τριαξονική θλίψη ισχύει:

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (8) \quad \text{ή} \quad \sin \phi' = \frac{3M}{6 + M} \quad (9)$$

Αντίστοιχα, από τις σχέσεις (6) και (7), για $c' = 0$ στον τριαξονικό εφελκυσμό προκύπτει:

$$M = \frac{-6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (10) \quad \text{ή} \quad \sin \phi' = \frac{3M}{6 - M} \quad (11)$$



Σχήμα 2.5.3 Σχέση μεταξύ του λόγου των τάσεων $\nu=q/p'$ και της γωνίας τριβής ϕ' κατά την τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό (Πηγή:Wood 1990)

Παρατηρούμε πως αν γνωρίζουμε τη γωνία τριβής, και αν το έδαφος έχει φτάσει στην κρίσιμη κατάσταση ($c=0$), τόσο στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης όσο και του τριαξονικού εφελκυσμού, τότε δεν είναι δυνατό η τιμή του M να είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης το M δίνεται από τη σχέση:

$$M \approx \frac{\phi'}{25} \quad (12)$$

Και στην περίπτωση του τριαξονικού εφελκυσμού από τη σχέση:

$$M \approx \frac{\phi'}{35} \quad (13)$$

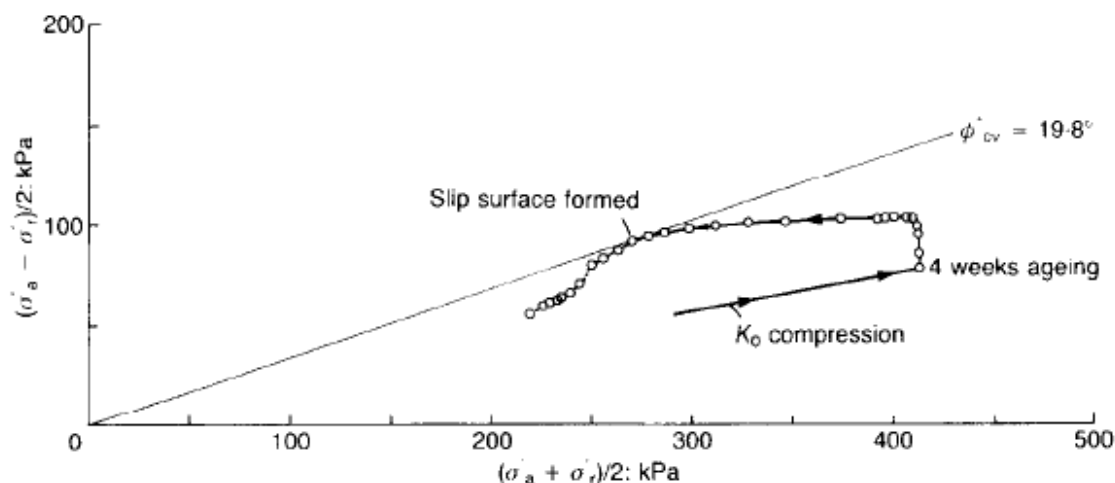
2.6 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΑΟΛΙΝΙΤΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική αναφορά σε παλαιότερες τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη, προκειμένου να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης για τα αποτελέσματα των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής.

2.6.1 Τριαξονική δοκιμή σε καολινίτη από Burland (1990)

Ο Burland σε δοκιμές που πραγματοποίησε σε ανισότροπα στερεοποιημένο καολινίτη παρατήρησε τη δημιουργία επιφανειών αστοχίας ακόμα και στα κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια. Στο Σχήμα 2.6.1 φαίνεται η διαδρομή των ενεργών τάσεων για αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή σε ανισότροπα στερεοποιημένο καολινίτη. Το δοκίμιο πριν υποστεί τη δοκιμή διάτμησης παρέμεινε υπό καθεστώς ερπυσμού για τέσσερις εβδομάδες. Ο ερπυσμός (aging) στο τέλος της στερεοποίησης μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη διατμητική αντοχή του δοκιμίου.

Η μέγιστη διατμητική αντοχή καταγράφεται αρκετά νωρίτερα από την αστοχία του δοκιμίου. Έπειτα παρατηρείται παραμόρφωση του δοκιμίου και μικρή μείωση στην διατμητική αντοχή, και τελικά το δοκίμιο αστοχεί μόλις η διαδρομή τάσεων φτάσει στην γραμμή κρίσιμης κατάστασης, οπότε και παρατηρείται απότομη μείωση της αντοχής. Η γωνία τριβής διαμορφώνεται από τη συγκεκριμένη δοκιμή στις $19,8^\circ$.

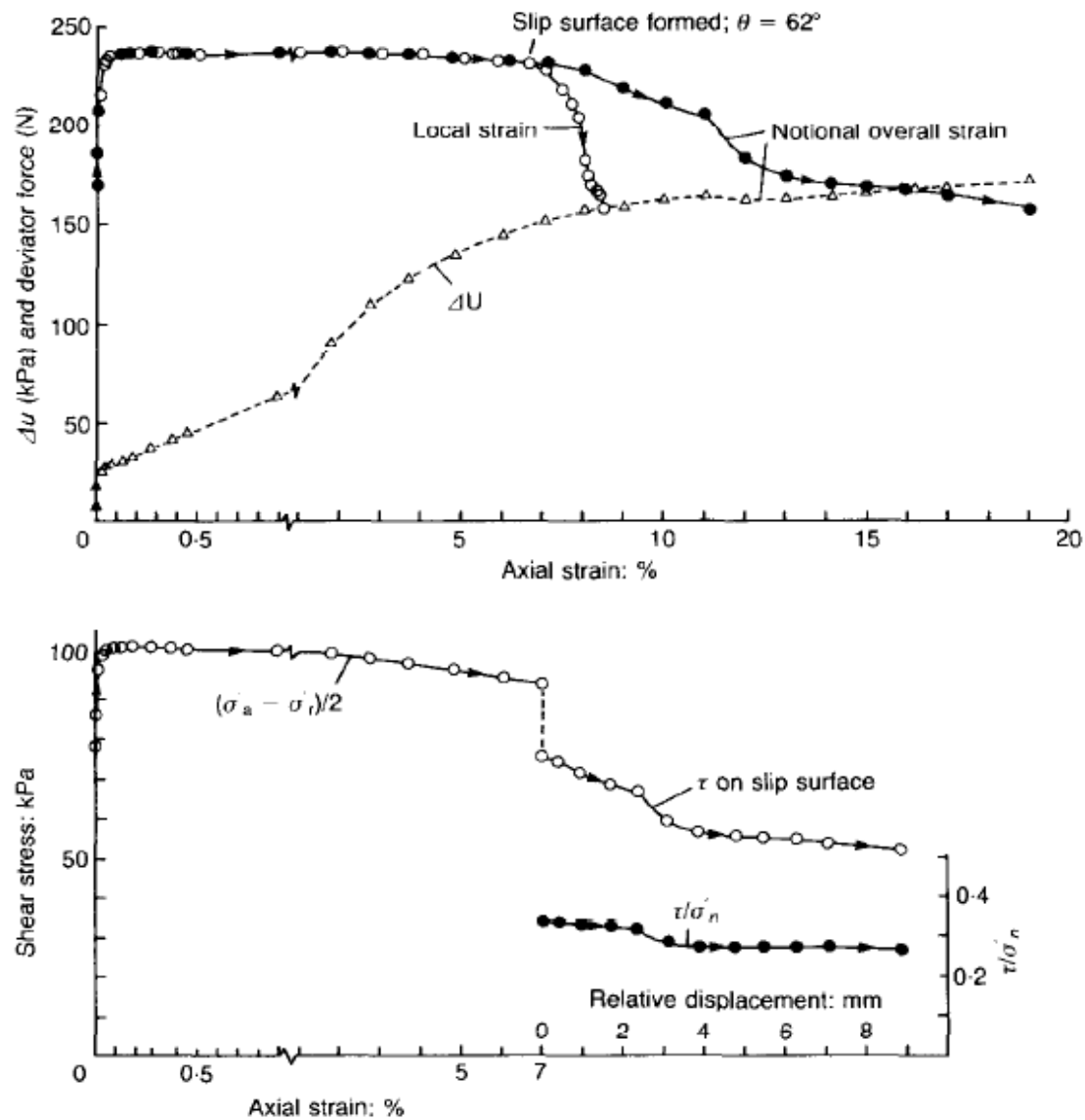


Σχήμα 2.6.1 Διαδρομή τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ σε αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή καολινίτη (Πηγή: Burland, 1990)

Στο Σχήμα 2.6.2 φαίνεται η μεταβολή της αποκλίνουσας δύναμης και πίεσης του νερού των πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση. Οι συμπαγείς κουκίδες στο διάγραμμα απεικονίζουν τις ολικές παραμορφώσεις ενώ οι κενές κουκίδες τις τοπικές. Για παραμόρφωση περίπου 7% παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στις 2 παραμορφώσεις. Αυτό υποδηλώνει τον σχηματισμό επιφάνειας διατμητικής

αστοχίας κατα μήκος της οποίας κινούνται τα δύο τμήματα του δοκιμίου ως στερεά σώματα.

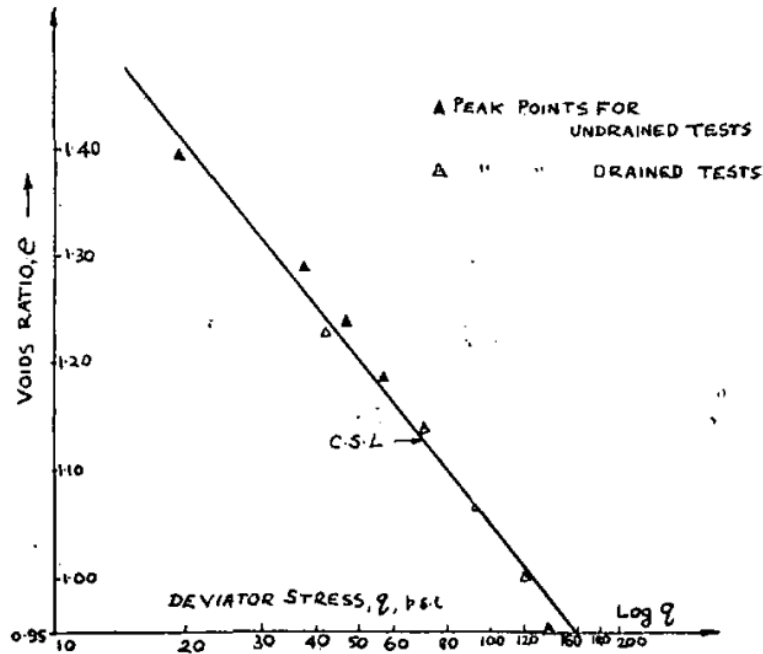
Το Σχήμα 2.6.2 απεικονίζει μία ανάλυση των τάσεων πριν και μετά την αστοχία. Ο λόγος τ/σ_n τη στιγμή της αστοχίας μειώνεται απότομα και σταθεροποιείται περίπου στην τιμή 0,27 μετά από σχετική μετατόπιση 5 mm. Η παραμένουσα γωνία τριβής για τον καολινίτη σύμφωνα με τον Burland είναι $12,4^\circ$.



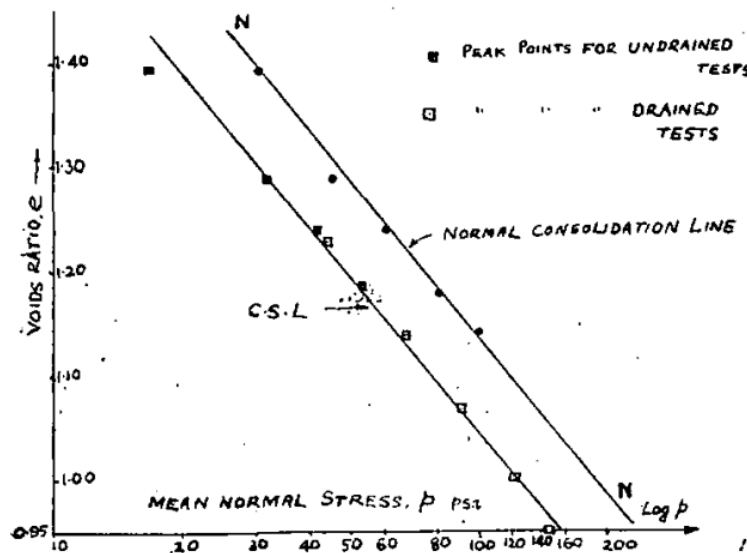
Σχήμα 2.6.2 Μεταβολή πίεσης πόρων, κατακόρυφου φορτίου και αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε αστράγγιστη δοκιμή σε καολίνη (Πηγή: Burland, 1990)

2.6.2 Τριαξονικές δοκιμές σε κανονικά στερεοποιημένο καολινίτη από M.Sinnarropo et al. (1966)

Στα πλαίσια έρευνας του Sinnarropo πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια καολινίτη με εμποδιζόμενη στράγγιση. Τα δοκίμια αυτά προηγουμένως στερεοποιήθηκαν στην τριαξονική δοκιμή σε διάφορες τάσεις κυψέλης.



Σχήμα 2.6.3 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης σε όρους e και $\log(q)$ για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: M.Sinnarropo, 1966)

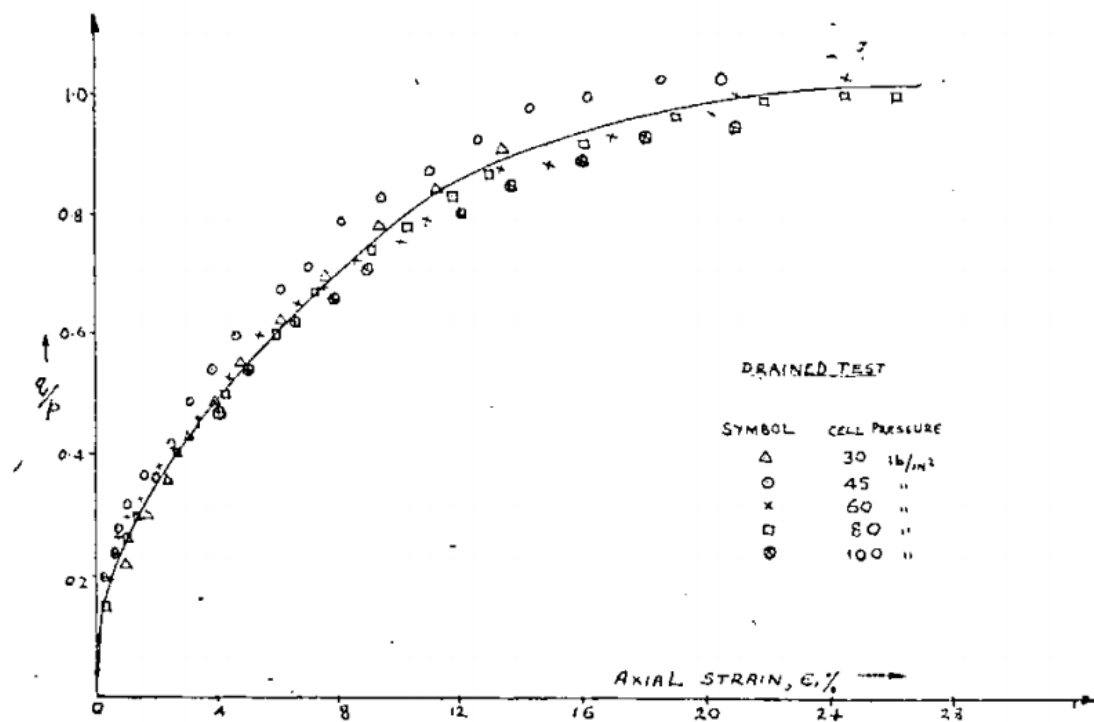


Σχήμα 2.6.4 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης σε όρους e και $\log(p)$ για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: M.Sinnarropo, 1966)

Στα παραπάνω Σχήματα 2.6.3 και 2.6.4 φαίνονται οι μέγιστες τιμές q και p' και οι αντίστοιχοι δείκτες πόρων που προκύπτουν από δοκιμές σε διάφορα δοκίμια

σχηματίζουν την γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL). Τα σημεία πάνω στη γραμμή κανονικής στερεοποίησης δίνουν τις αρχικές τιμές e και p των δοκιμών ακριβώς πριν ξεκινήσουν την δοκιμή διάτμησης. Οι γραμμές CSL και NCL είναι παράλληλες.

Τα μεγέθη q και p' , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.5, μεταβάλλονται παρόμοια συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης, για αστράγγιστες και για στραγγιζόμενες συνθήκες, και σταθεροποιούνται σε κάποια τιμή λίγο πριν την τελική αστοχία. Η αποκλίνουσα τάση στην αστράγγιστη δοκιμή παίρνει μέγιστες τιμές για αξονικές παραμορφώσεις περίπου 15%. Αυτό υποδηλώνει ότι το δοκίμιο αστοχεί για μικρότερη παραμόρφωση συγκριτικά με την δοκιμή ελεύθερης στράγγισης.

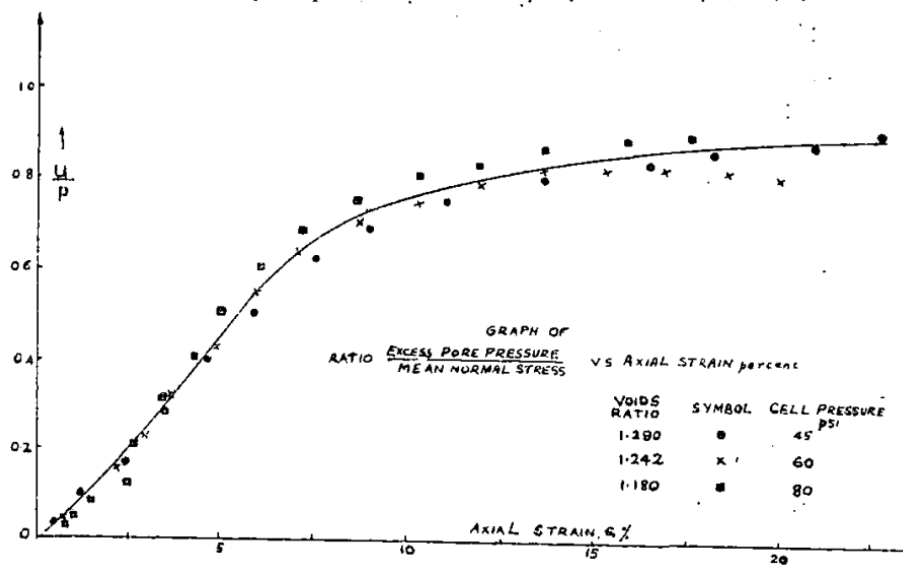


Σχήμα 2.6.5 Μεταβολή q/p και αξονικής παραμόρφωσης για καολινίτη με διάφορες τιμές στερεοποίησης (Πηγή: M.Sinnaratho, 1966)

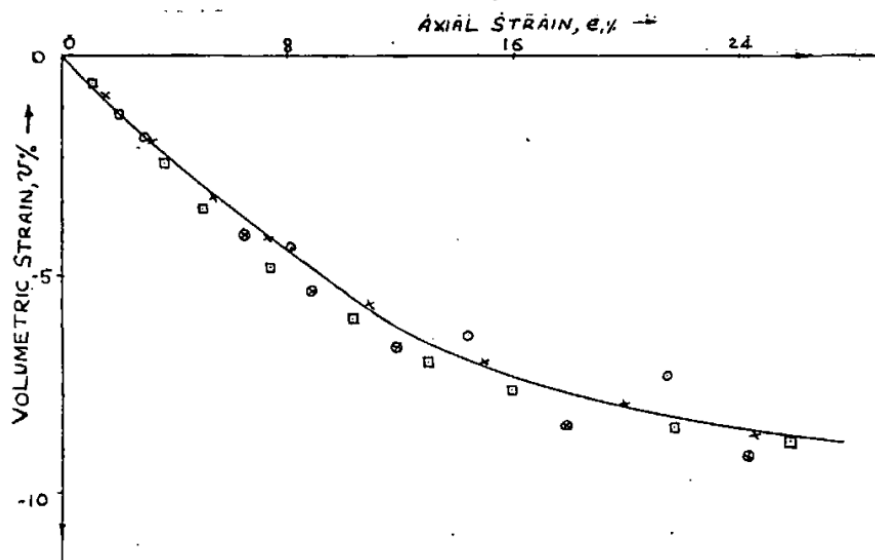
Η πίεση του νερού των πόρων αφού φτάσει την μέγιστη τιμή της παραμένει σταθερή για αξονική παραμόρφωση της τάξης περίπου του 17,5% και μετά ακολουθεί φθίνουσα πορεία για μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις των Roscoe και Thurairajah (1964), σύμφωνα με τους οποίους οι πιέσεις του νερού των πόρων ακολουθούσαν αύξουσα πορεία ακόμα και για αξονική παραμόρφωση 25% ενώ η μέγιστη αποκλίνουσα τάση σημειώθηκε για περίπου 12% παραμόρφωση. Σύμφωνα με τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης η πίεση πόρων θα έπρεπε να μένει σταθερή μετά την αστοχία.

Στο Σχήμα 2.6.6 φαίνεται η σχέση της κανονικοποιημένης πίεσης πόρων και της αξονικής παραμόρφωσης για δοκιμές διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για

δοκίμια με τρεις διαφορετικούς δείκτες πόρων. Στην κρίσιμη κατάσταση η μεταβολή είναι παρόμοια με αυτήν της ογκομετρικής παραμόρφωσης για σταγγιζόμενες δοκιμές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.7

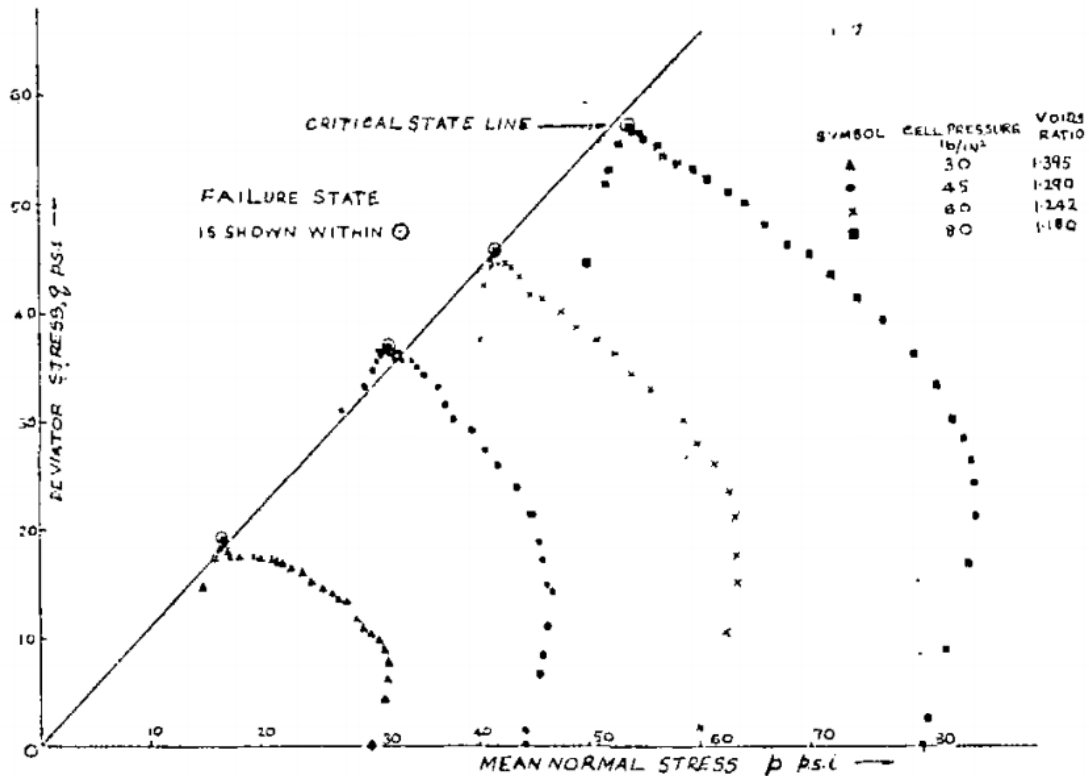


Σχήμα 2.6.6 Μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης πόρων με την αξονική παραμόρφωση (ϵ_1) για αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια με διαφορετικά e (Πηγή: M.Sinnararo, 1966)



Σχήμα 2.6.7 Ογκομετρική παραμόρφωση σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε σταγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: M.Sinnararo, 1966)

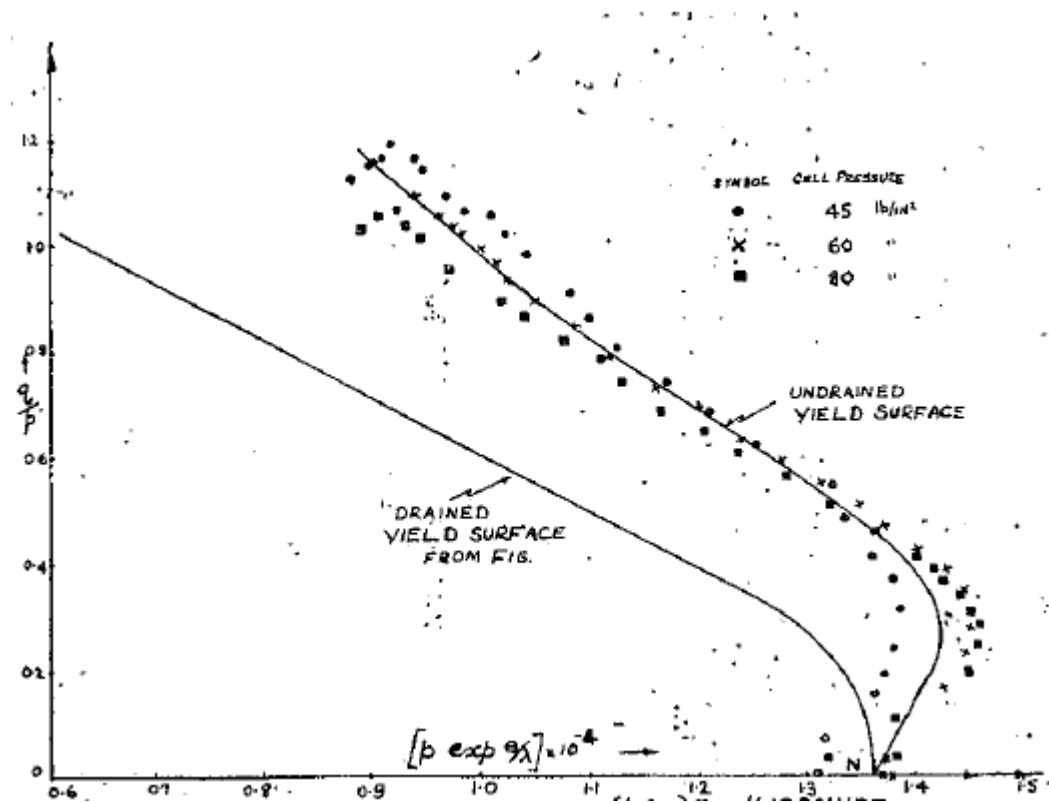
Στο Σχήμα 2.6.8 φαίνονται οι διαδρομές τάσεων για τέσσερις αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη. Και οι τέσσερις καταλήγουν πάνω στην γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL) και είναι γεωμετρικά παρόμοιες.



Σχήμα 2.6.8 Διαδρομές τάσεων από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια καολινίτη (Πηγή: M.Sinnararro,1966)

Ο M.Sinnararro εκανε κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων του παραπάνω διαγράμματος σε ένα διάγραμμα με άξονες q/p και $p * \exp(e/\lambda)$, όπου λ είναι η κλίση της γραμμής κανονικής στερεοποίησης (Σχήμα 2.6.9). Σύμφωνα με την υπόθεση των Roscoe, Schofield και Wroth οι διαδρομές τάσεων όλων των δοκιμών σε κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια θα έχουν αφετηρία την επιφάνεια διαρροής και θα καταλήγουν στην γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Στο διδιάστατο χώρο η ευθεία κρίσιμης κατάστασης προβάλεται σε ένα σημείο. Στο Σχήμα 2.6.9 απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές.

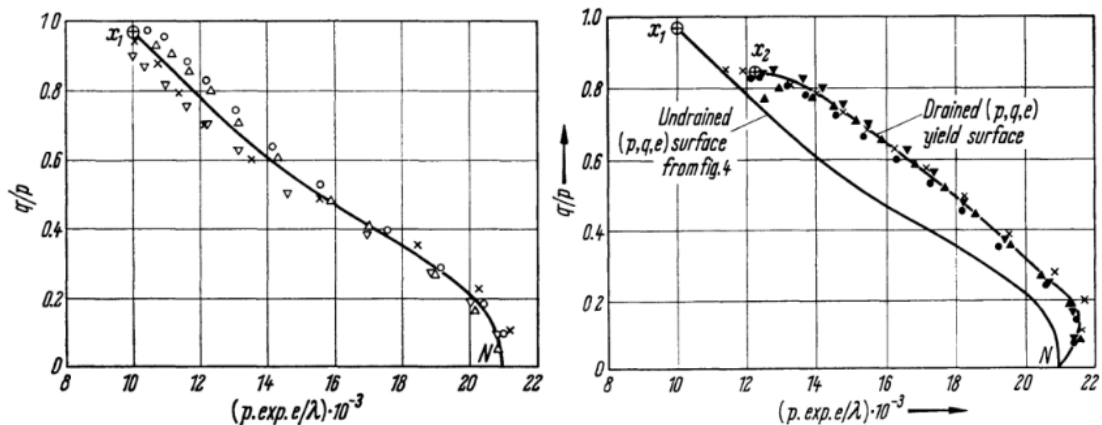
Φαίνεται ότι η επιφάνεια ενδοσιμότητας για τις αστράγγιστες δοκιμές βρίσκεται δεξιά της αντίστοιχης για τις στραγγιζόμενες δοκιμές. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των Roscoe και Thurairajah (1964) σύμφωνα με τους οποίους συμβαίνει το αντίθετο.



Σχήμα 2.6.9 Επιφάνεια ενδοσιμότητας για στραγγιζόμενες και αστραγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε καολίνη (Πηγή: M.Sinnarsoo, 1966)

2.6.3 Τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη από Roscoe και Thurairajah (1964)

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές των Roscoe και Thurairajah πάνω σε δοκίμια καολινίτη έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του M.Sinnarathna. Τα διαγράμματα στο Σχήμα 2.6.10 δείχνουν τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα τεσσάρων τριαξονικών δοκιμών σε αστράγγιστες συνθήκες και τεσσάρων με ελεύθερη στράγγιση. Οι δοκιμές αυτές είναι ενδεικτικές από ένα σύνολο είκοσι πειραμάτων που πραγματοποίησαν οι Roscoe και Thurairajah σε κανονικά στερεοποιημένο καολινίτη. Ο αρχικός δείκτης πόρων των δοκιμών που εξετάστηκαν κυμάνθηκε από $e=1.18$ έως $e=1.40$. Στο Σχήμα 2.6.10 φαίνονται οι κανονικοποιημένες επιφάνειες ενδοσιμότητας όπως προκύπτουν από τις στραγγιζόμενες και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές. Η επιφάνεια διαρροής για τις δοκιμές με ελεύθερη στράγγιση βρίσκεται δεξιά της επιφάνειας που προκύπτει από τις αστράγγιστες δοκιμές.



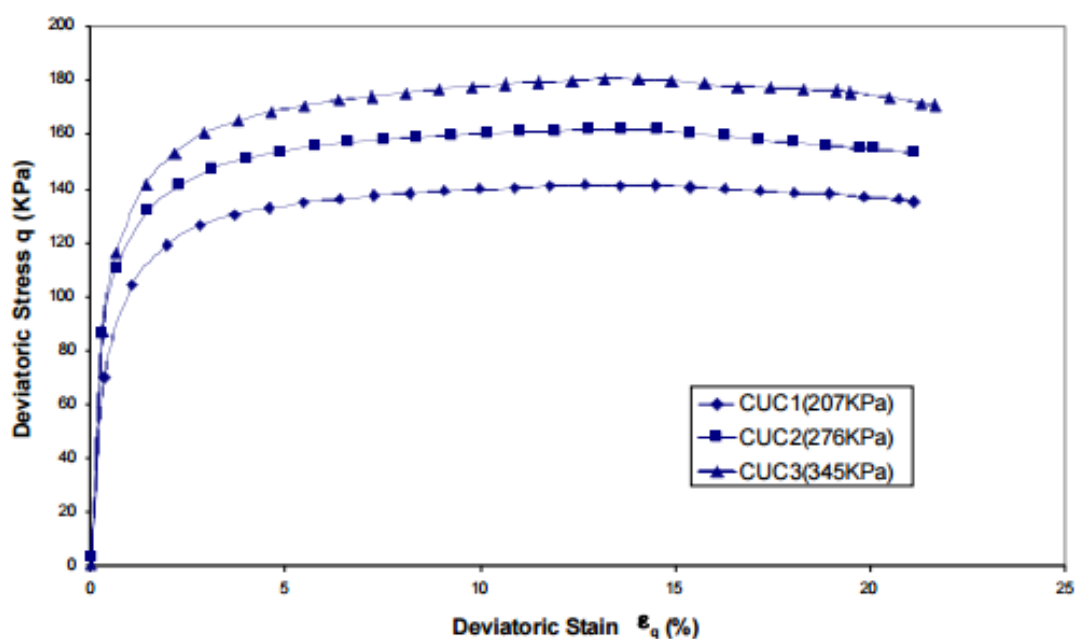
Σχήμα 2.6.10 Επιφάνειες ενδοσιμότητας (p,q,e) για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές σε κανονικά στερεοποιημένο καολινίτη (Πηγή: Roscoe και Thurairajah 1964)

2.6.4 Τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη από Jian Hu et al. (2007)

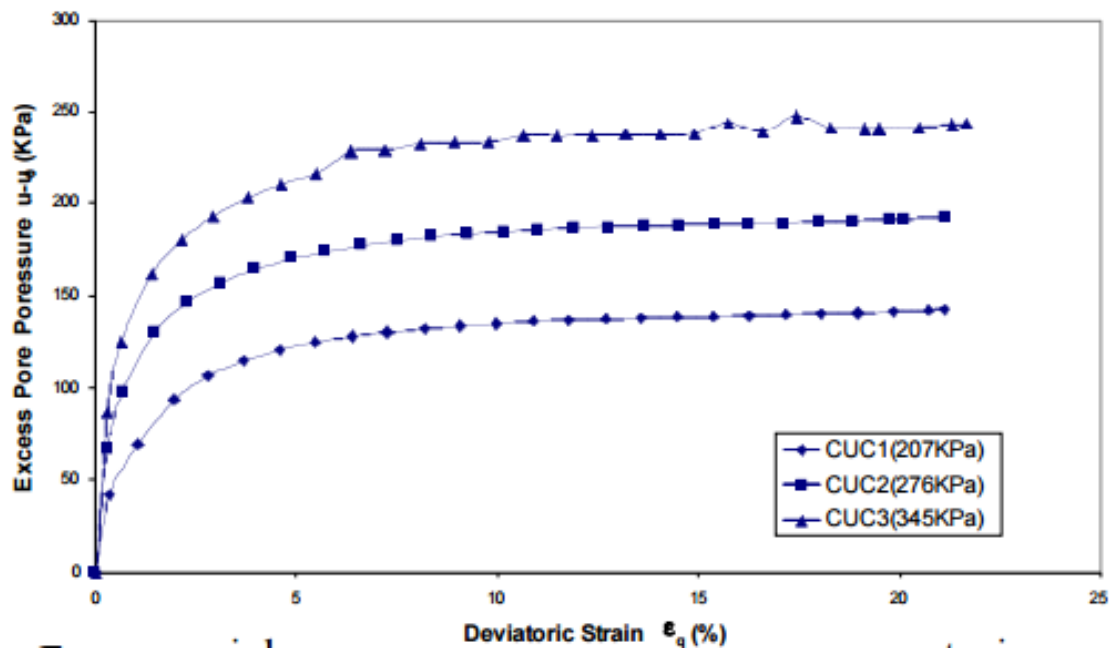
Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε τριαξονική συσκευή με την εφαρμογή στα δοκίμια αξονικών και ακτινικών φορτίσεων. Διεξήχθησαν δοκιμές υπό αστράγγιστες

και στραγγιζόμενες συνθήκες. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο και ύψος περίπου 100mm και δημιουργήθηκαν μετά τη στερεοποίηση ενός υδαρούς μίγματος καολινίτη με υψηλό αρχικό ποσοστό υγρασίας. Το πρώτο αυτό σταδιο στερεοποίησης πραγματοποιήθηκε σε ειδική συσκευή υπό σταθερή επιβαλόμενη κατακόρυφη τάση 207 kPa. Στο τέλος αυτού του πρώτου σταδίου στερεοποίησης υπό K_0 συνθήκες μετρήθηκε η υγρασία του μίγματος σε διαφορες θέσεις περιμετρικά και καθ' ύψος του δοκιμίου ώστε να εκτιμηθεί η ομοιομορφία του δείκτη πόρων. Έπειτα, τα δοκίμια που προέκυψαν επήλθαν σε κορεσμό με τον έλεγχο της πίεσης πόρων και στερεοποιήθηκαν ισότροπα στην τριαξονική συσκευή σε μέσες ενεργές τάσεις από 207 kPa μέχρι 345 kPa. Τα ποσοστά υγρασίας που ξαναμετρήθηκαν έδειξαν επαναληψιμότητα και ομοιογένεια του δείκτη πορων των δοκιμίων μετά την ισότροπη στερεοποίηση.

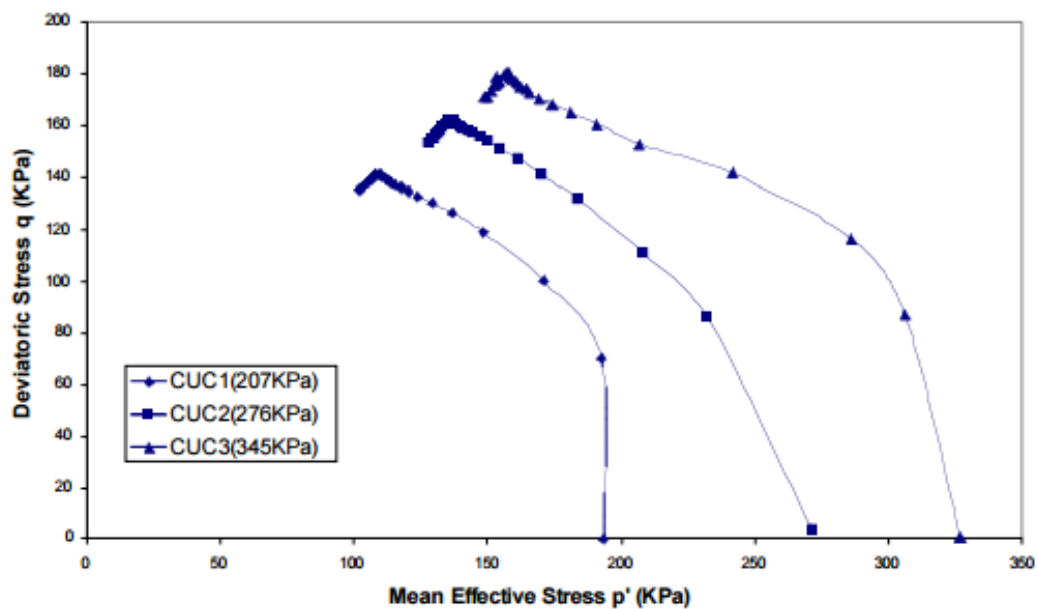
Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε διάτμηση με έλεγχο των παραμορφώσεων υπό αστραγγιστες η στραγγιζόμενες συνθήκες. Για τις αστράγγιστες δοκιμές ο ρυθμός επιβολής της αξονικής παραμόρφωσης ήταν 0.05% ανα λεπτό ενώ για τις στραγγιζόμενες 0.005% ανά λεπτό. Και στις δύο περιπτώσεις η πίεση κυψέλης διατηρείται σταθερή μετά το τέλος της στερεοποίησης.



Σχήμα 2.6.11 Αστράγγιστες δοκιμές : αποκλίνουσα τάση q -αξονική παραμόρφωση ϵ_q (Πηγή: Jian Hu et al., 2007)



Σχήμα 2.6.12 Αστράγγιστες δοκιμές : πίεση πόρων $u-u$ αξονική παραμόρφωση ϵ_q (Πηγή: Jian Hu et al., 2007)



Σχήμα 2.6.13 Αστράγγιστες δοκιμές : διαδρομές τάσεων (Πηγή: Jian Hu et al., 2007)

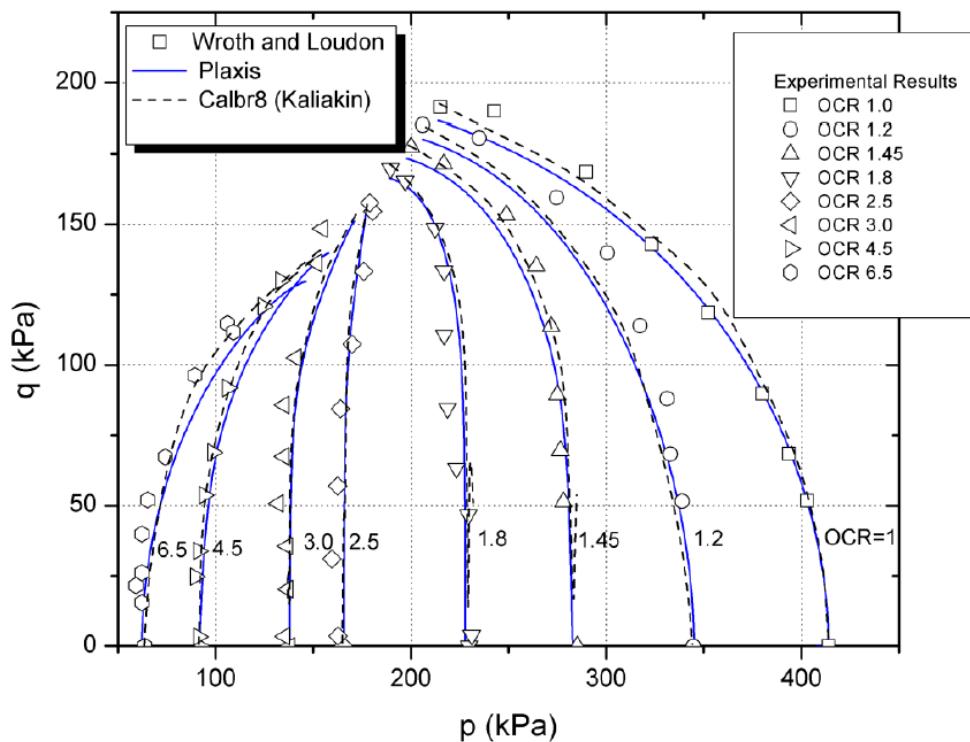
Στα Σχήματα 2.6.11, 2.6.12 και 2.6.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις τρεις τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες. Κάθε δοκιμή έχει διαφορετική

αρχική τάση ισότροπης στερεοποίησης (207, 276, 345 Kpa) και άρα και διαφορετικό αρχικό δείκτη πόρων. Παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή σημειώνεται για αξονικές παραμορφώσεις περίπου 14% και για τις τρεις δοκιμές. Η μέγιστη διατμητική τάση αυξάνεται με την αύξηση της αρχικής τάσης ισότροπης στερεοποίησης. Μετά την μέγιστη τιμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.13, η αποκλίνουσα τάση ακολουθεί φθίνουσα πορεία κατά μήκος μίας ευθείας γραμμής. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρείται τάση για συστολή των δοκιμίων, η οποία φαίνεται και από την συνεχή αύξηση της πίεσης των πόρων.

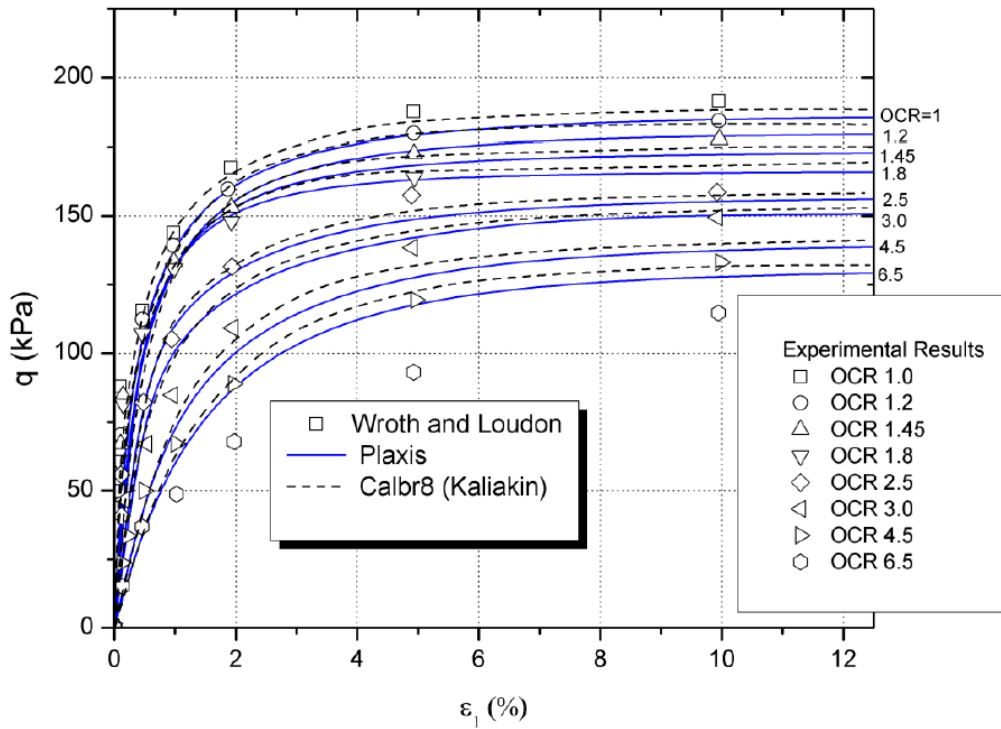
Από τις διαδρομές τάσεων των τριών δοκιμών προκύπτει η κλίση M της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο (p', q) . Οι Jian Hu, Dayakar Renumadu, Dmitry I. Garagash υπολόγισαν την κλίση αυτή $M = 1,195$. Επίσης από δοκιμές ισότροπης συμπίεσης και αποφόρτισης υπολογίστηκαν και οι παράμετρος $\lambda=0,13$ και $\kappa=0,06$.

2.6.5 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια καολίνη από τους Wroth και Loudon (1967)

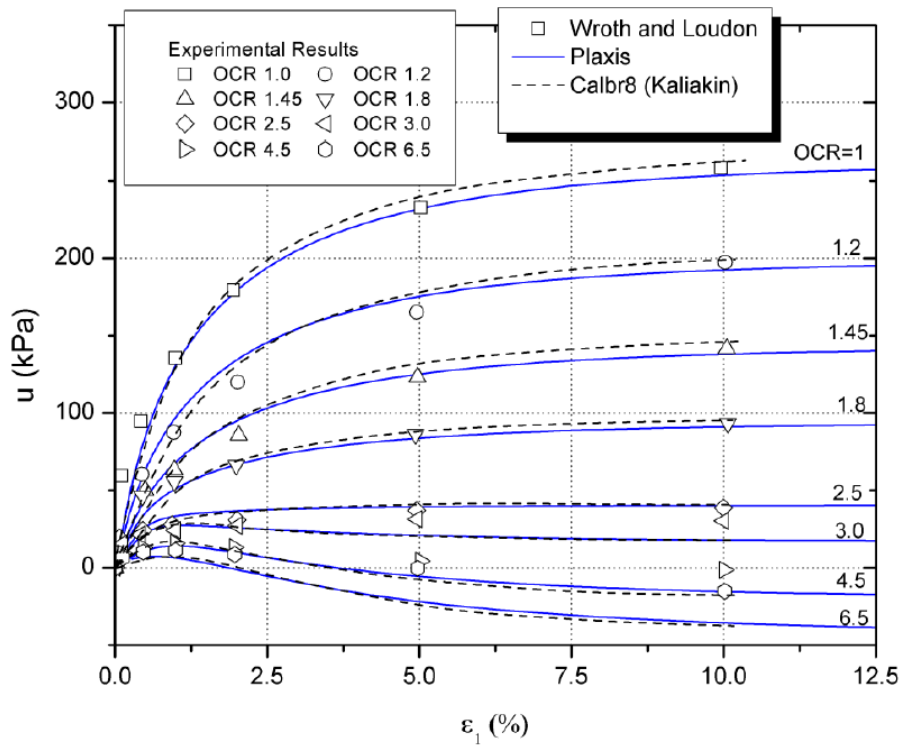
Οι Loudon και Wroth πραγματοποίησαν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια καολινίτη τα οποία στερεοποιήθηκαν ισότροπα και υπερστερεοποιήθηκαν σε διάφορους βαθμούς όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.14. Η διαδρομές τάσεων μεταβάλλονται και γίνονται πιο κατακόρυφες καθώς αυξάνεται ο βαθμός στερεοποίησης. Για βαθμούς στερεοποίησης από OCR=1 έως OCR=1,8 τα δοκίμια καολινίτη παρουσιάζουν τάση για συστολή κατά την τριαξονική θλίψη και αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα μεταβολής πίεσης πόρων στο Σχήμα 2.6.16. Αντίθετα τα δοκίμια με βαθμούς στερεοποίησης μεγαλύτερους από OCR=2,5 εμφανίζουν μία τάση για διαστολή καθώς πλησιάζουν την κρίσιμη κατάσταση. Αυτό φαίνεται και από τις πιέσεις πόρων στο Σχήμα 2.6.16. Μετά από αξονική παραμόρφωση περίπου 1% η πίεση πόρων ξεκινάει πτωτική πορεία, η οποία είναι πιο έντονη όσο αυξάνεται ο βαθμός στερεοποίησης. Το σχήμα 2.6.15 παρουσιάζει τη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμορφωση.



Σχήμα 2.6.14 Διαδρομές τάσεων για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπερστερεοποιημένα δοκίμια (Πηγή: Loudon, 1967)



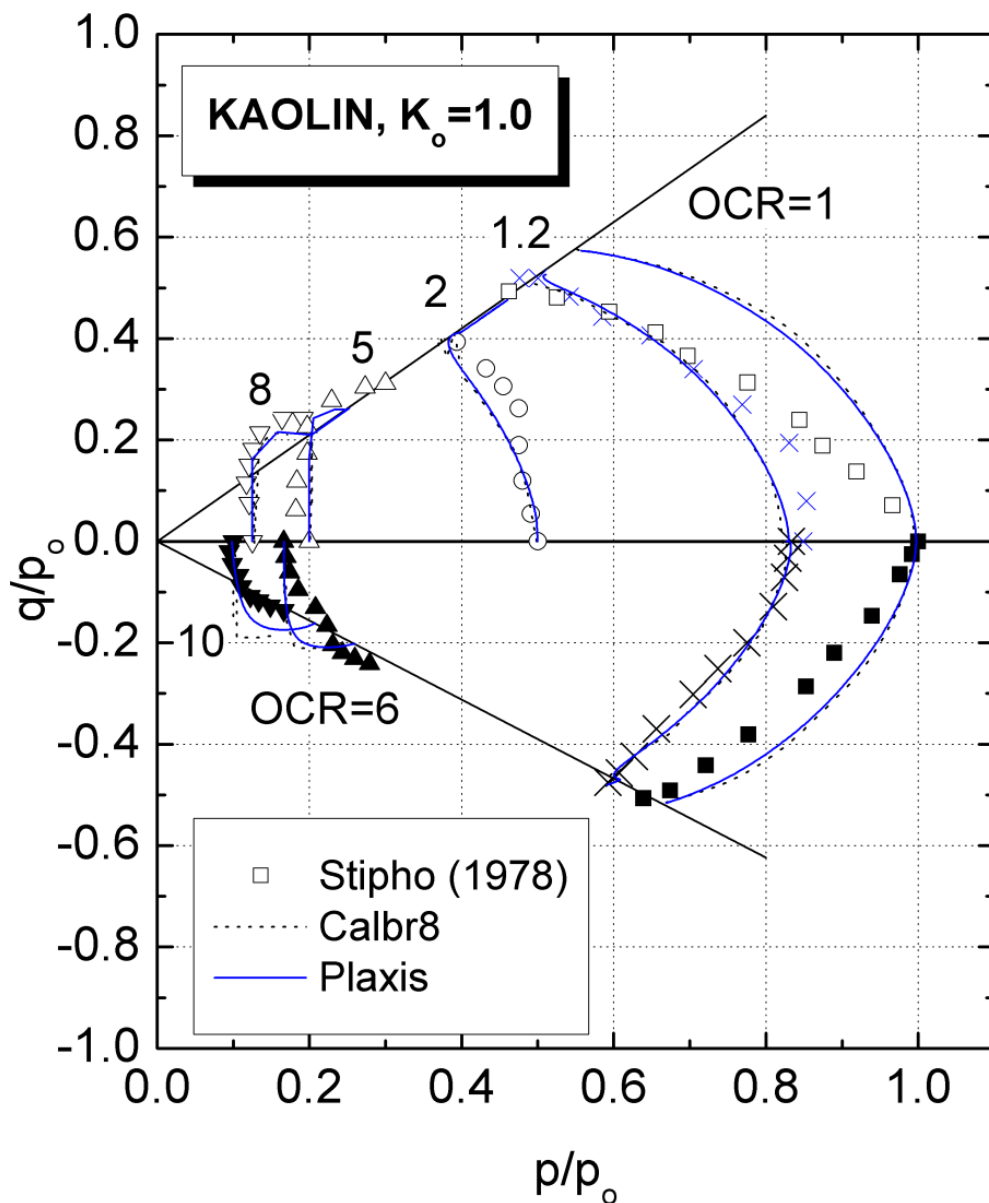
Σχήμα 2.6.15 Μεταβολή αποκλινοσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπεστερεοποιημένα δοκίμια (Πηγή: Loudon,1967)



Σχήμα 2.6.16 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπεστερεοποιημένα δοκίμια (Πηγή: Loudon,1967)

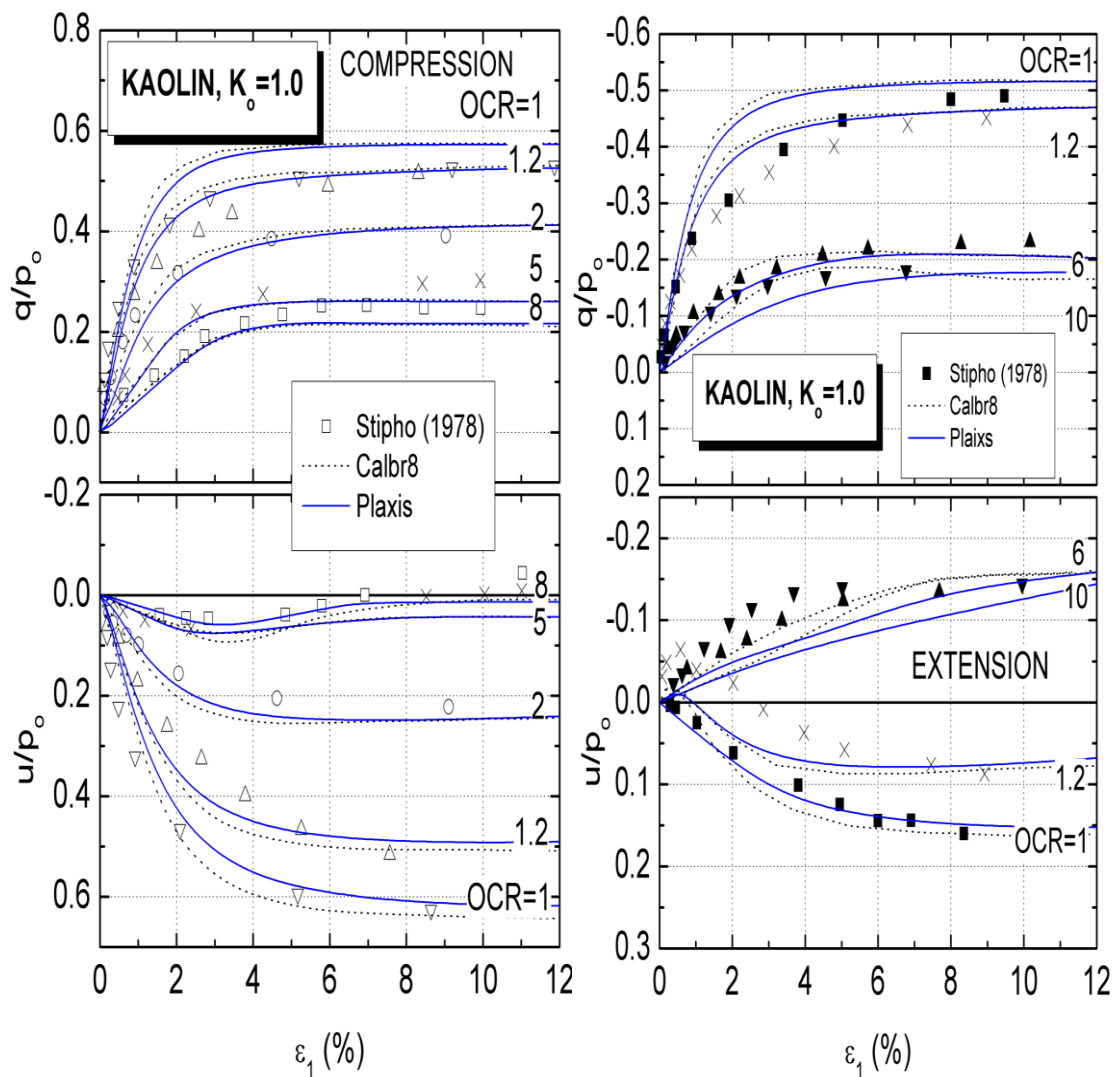
2.6.6 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια καολίνη από τον Stipho (1978)

Ο Stipho πραγματοποίησε τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια καολινίτη τα οποία παρασκεύασε αναμειγνύοντας το υλικό με απεσταγμένο νερό σε αναλογία κατά βάρος 1:1. Κατά τη στερεοποίηση χρησιμοποίησε τέσσερις διαφορετικούς συντελεστές K_0 με σκοπό να εξετάσει την επίδραση της ανισοτροπίας στη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάτμηση ή τον εφελκυσμό. Επιπλέον, έκανε δοκιμές σε υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Τα διαγράμματα στα παρακάτω σχήματα δείχνουν τις διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο q - p' και τη μεταβολή της πίεσης πόρων και της αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση.



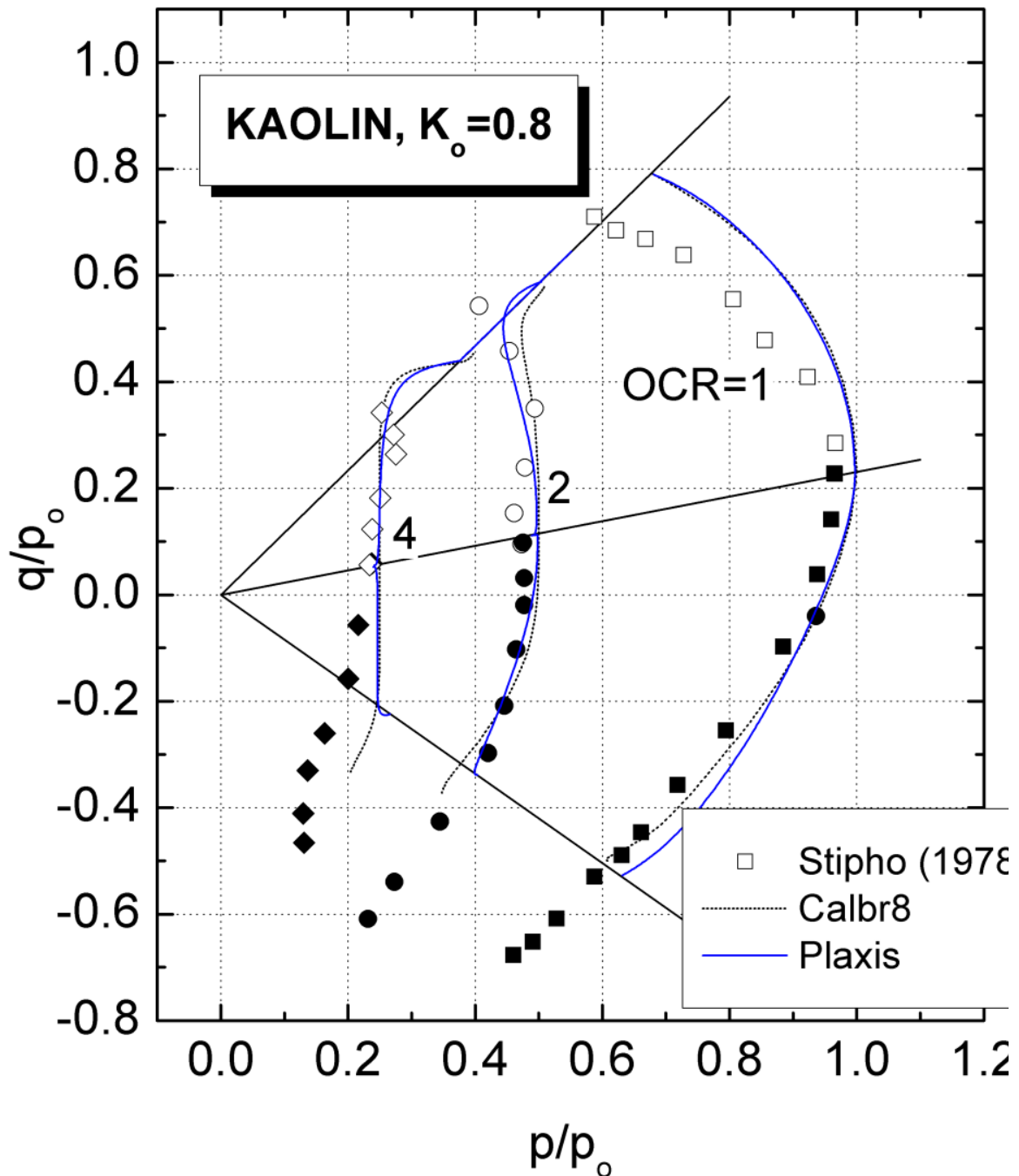
Σχήμα 2.6.17 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_o=1$ (Πηγή: Stipho 1978)

Το Σχήμα 2.6.14 δείχνει τις διαδρομές τάσεων για τις δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης στο κανονικοποιημένο επίπεδο $q/p_0 - p/p_0$ για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Στις δοκιμές θλίψης φαίνεται η αργλική φύση του υλικού και η τάση για συστολή. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης πόρων στο Σχήμα 2.6.15. Καθώς αυξάνεται η αποκλίνουσα τάση, η πίεση πόρων αυξάνεται προκαλώντας μείωση της μέσης ενεργού τάσης. Καθώς αυξάνεται ο βαθμός στερεοποίησης η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης και της πίεσης πόρων μειώνεται, ενώ στους μεγαλύτερους βαθμούς στερεοποίησης ($OCR=5$ και $OCR=8$) τα δοκίμια παρουσιάζουν τάση για διαστολή κατά τη διάτμηση. Επίσης από τις κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων, φαίνεται ότι για την ισότροπη στερεοποίηση, τα δοκίμια συμπεριφέρονται κατά την αστοχία σύμφωνα με το μοντέλο θραύσης του εδάφους Mohr-Coulomb, δηλαδή, οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων είναι σχεδόν συμμετρικές για θλίψη και εφελκυσμό.

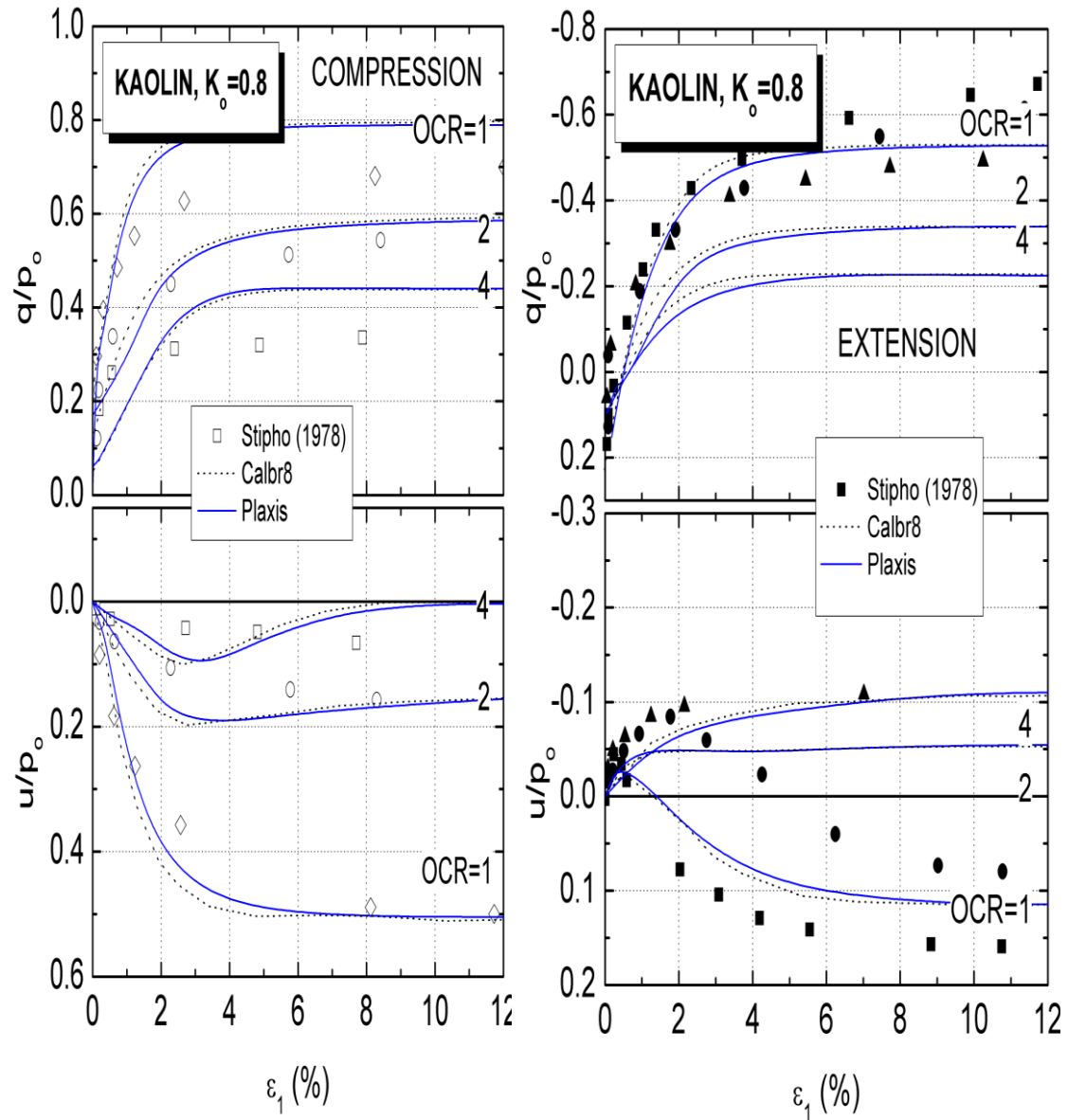


Σχήμα 2.6.18 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=1$ (Πηγή: Stipho 1978)

Ομοίως στα Σχήματα 2.6.16 και 2.6.17 παρουσιάζονται οι διαδρομές τάσεων και η μεταβολή της αποκλινουσας τάσης και αξονικής παραμορφωσης για δοκίμια στερεοποιημένα ανισότροπα με συντελεστή $K_0=0,8$. Σε αντίθεση με τις δοκιμές σε ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια, η ανισοτροπία εδώ διαφοροποιεί τις κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων σε θλίψη και εφελκυσμό.

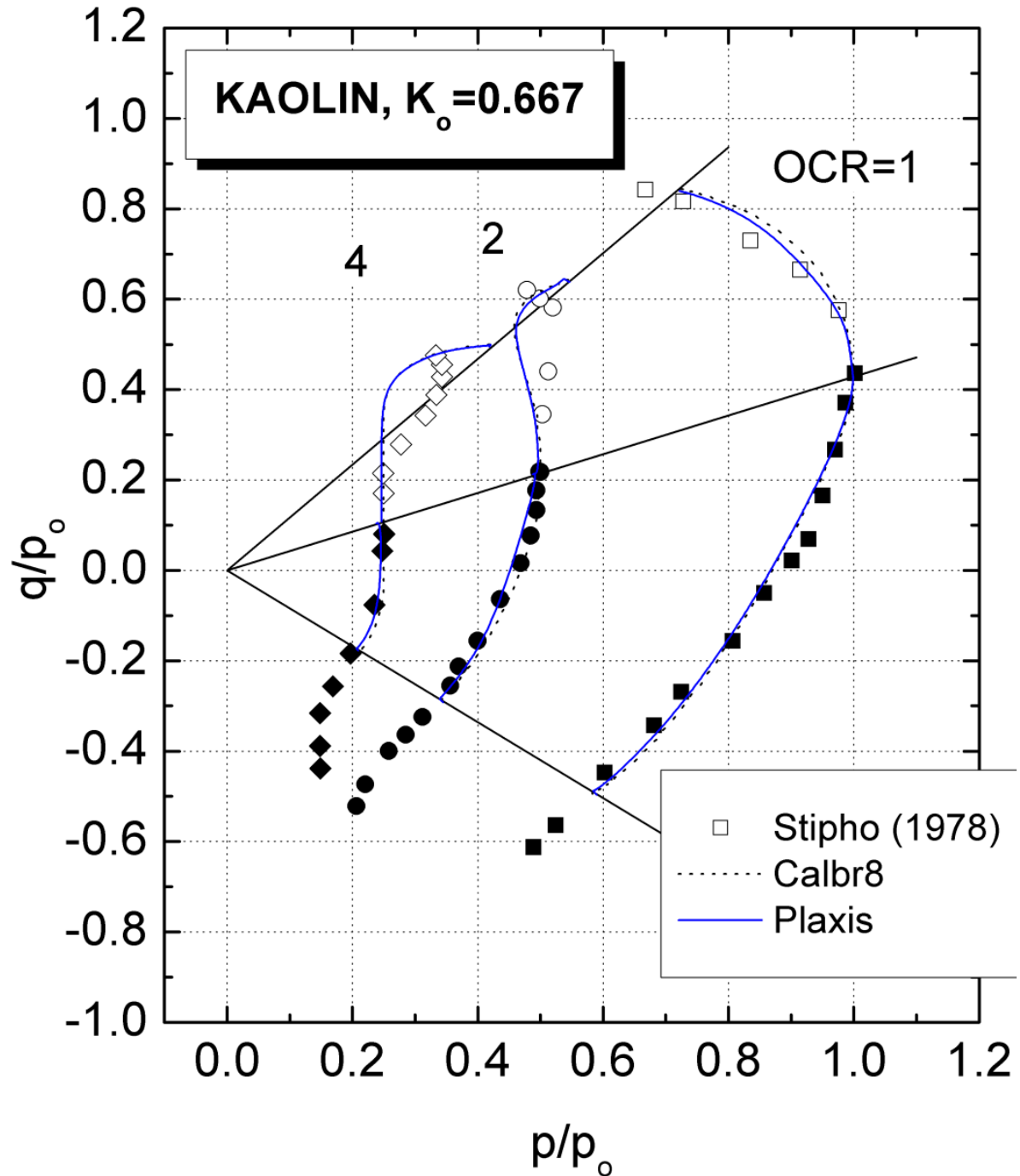


Σχήμα 2.6.19 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,8$ (Πηγή: Stipho 1978)

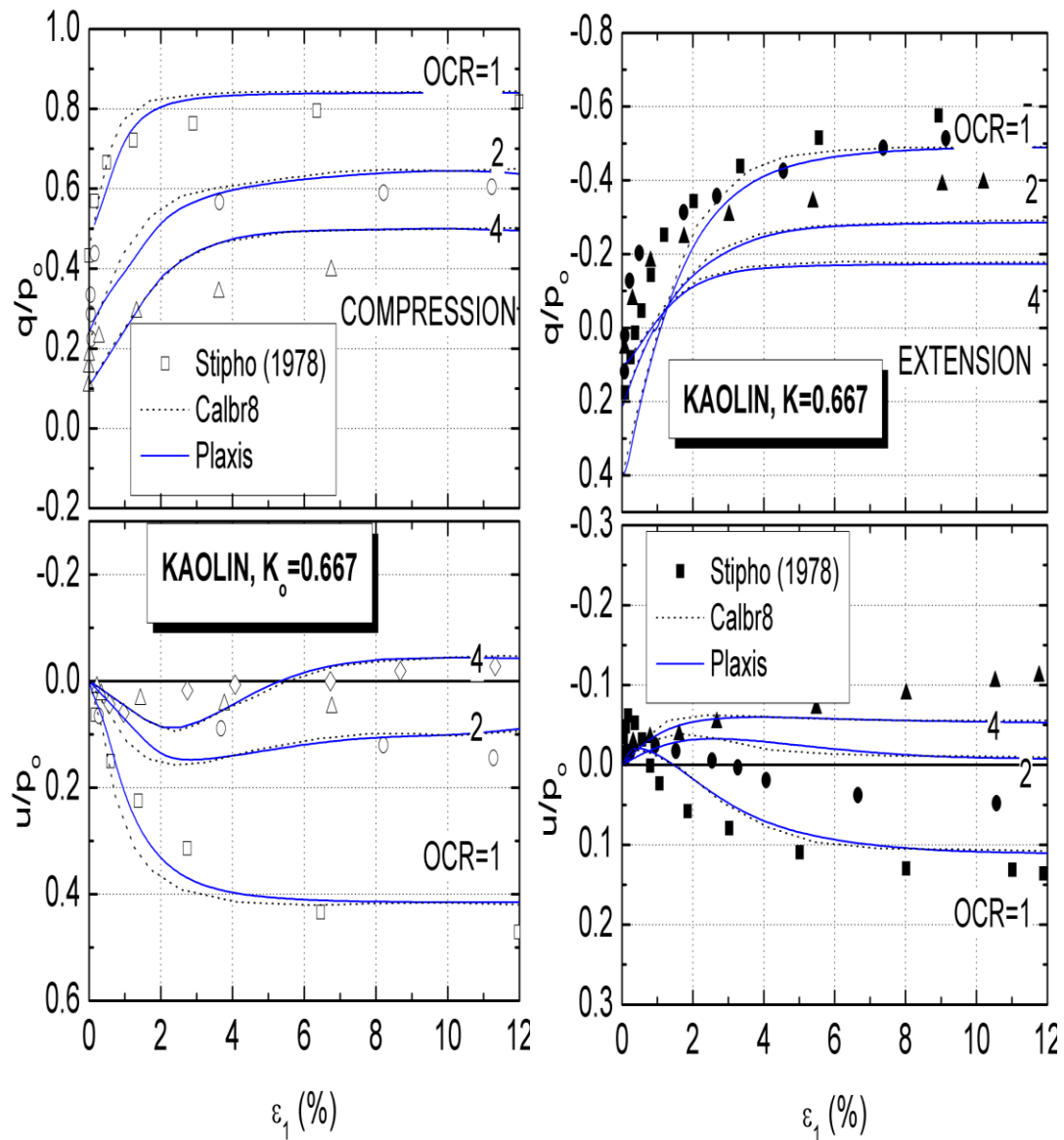


Σχήμα 2.6.20 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.8$ (Πηγή: Stipho 1978)

Τα σχήματα 2.6.18 και 2.6.19 παρουσιάζουν τις διαδρομές τάσεων και τη μεταβολή της αποκλινουσας τάσης και αξονικής παραμορφωσης για δοκίμια στερεοποιημένα ανισότροπα με συντελεστή $K_0=0,667$.



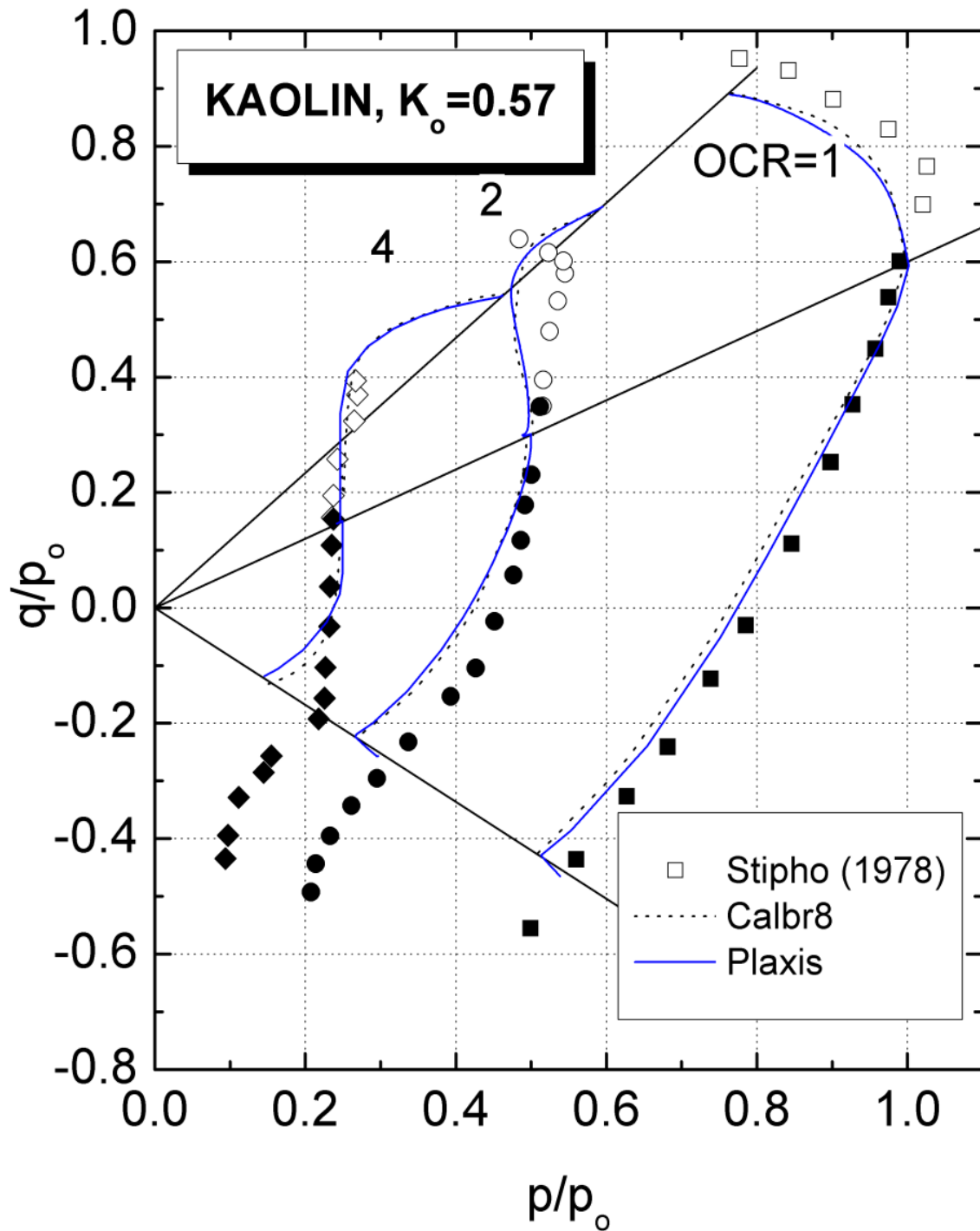
Σχήμα 2.6.21 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,667$ (Πηγή: Stipho 1978)



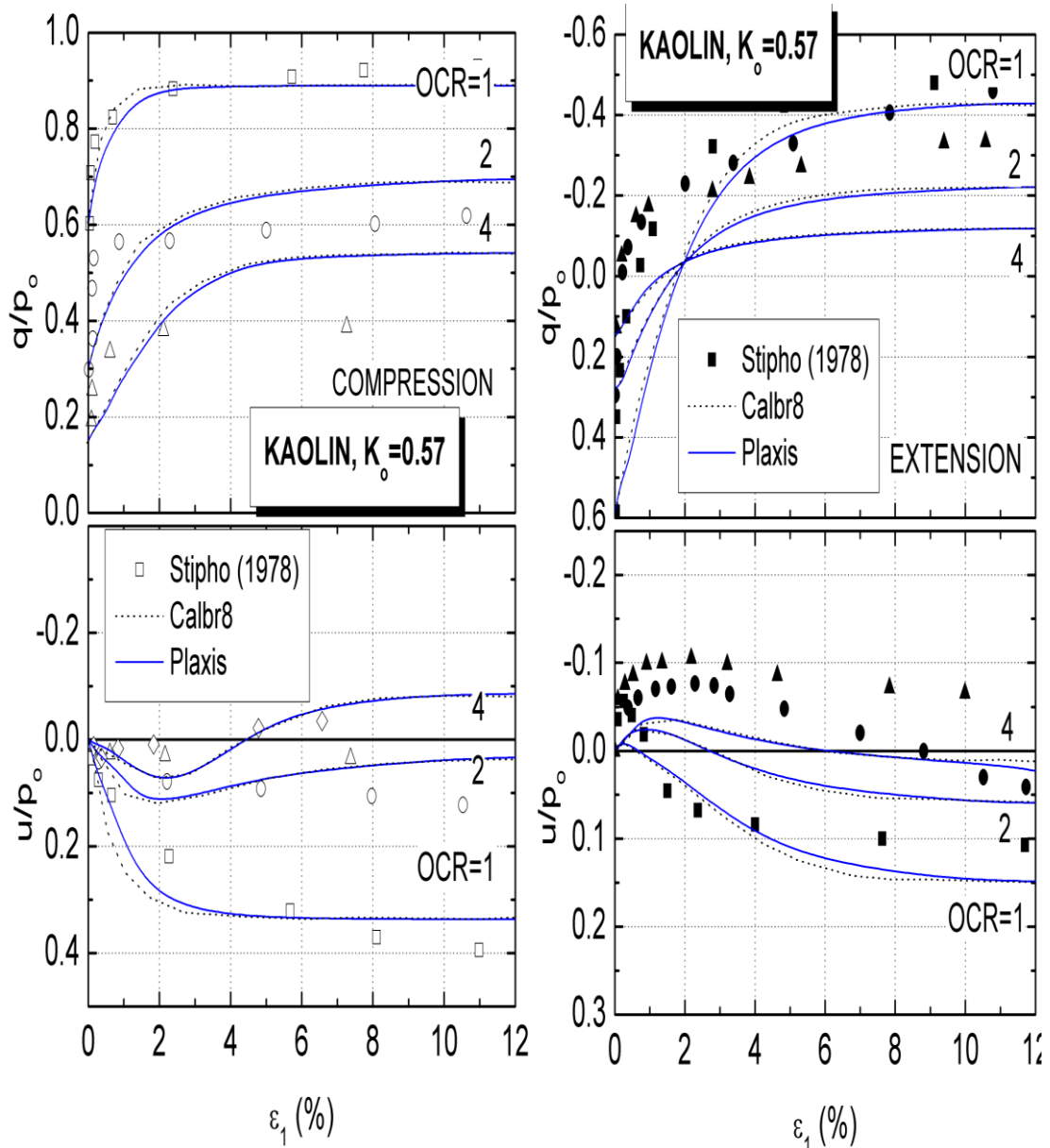
Σχήμα 2.6.22 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.667$ (Πηγή: Stipho 1978)

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα μεταβολής πόρων στα σχήματα 2.6.15, 2.6.17 και 2.6.17 και 2.6.19 παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται ο συντελεστής K_0 κατά τη στερεοποίηση, η κανονικοποιημένη πίεση πόρων μειώνεται επίσης. Η μεταβολή αυτή αποδίδεται σύμφωνα με το Stipho στο συντελεστή A της θεωρητικής σχέσης του Skerpton(1954) για κορεσμένα δοκίμια : $\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$. Η παράμετρος A σύμφωνα με τον Stipho μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η ανισοτροπία του εδαφικού υλικού.

Τα σχήματα 2.6.23 και 2.6.24 παρουσιάζουν τις διαδρομές τάσεων και τη μεταβολή της αποκλινουσας τάσης και αξονικής παραμορφωσης για δοκίμια στερεοποιημένα ανισότροπα με συντελεστή $K_0=0,57$.



Σχήμα 2.6.23 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,57$ (Πηγή: Stipho 1978)



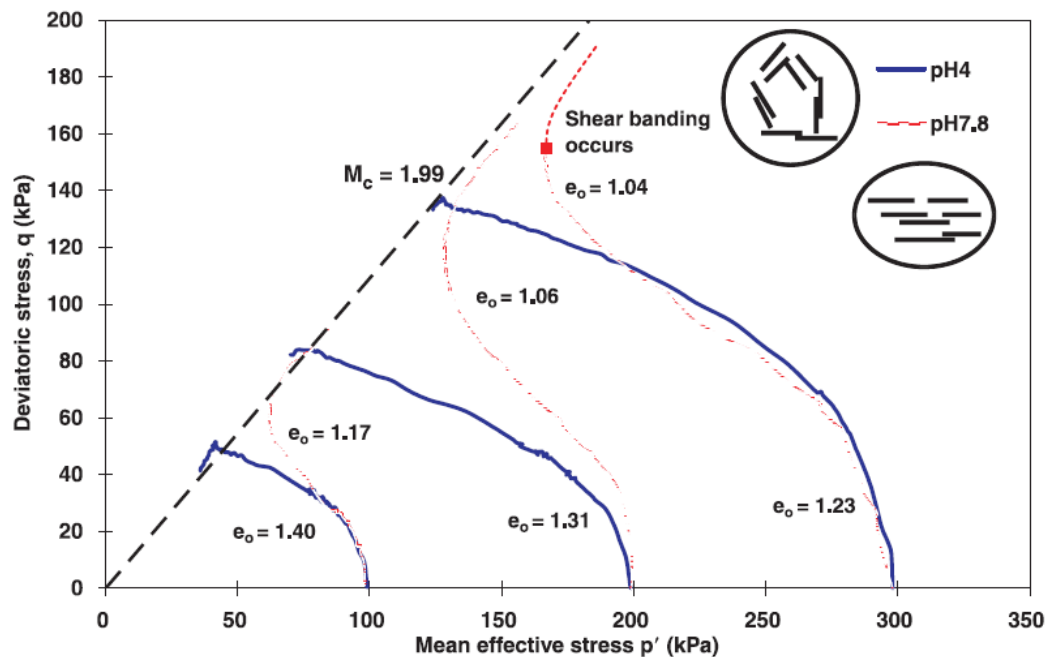
Σχήμα 2.6.24 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.57$ (Πηγή: Stipho 1978)

Από τις δοκιμές στα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια ο Stipho κατέληξε στις σταθερές κρίσιμης κατάσταση $M_c=1,05$ και $M_e=0,85$ για θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα, που αντιστοιχούν σε γωνίες κρίσιμης κατάσταση $\phi'_c=25,7^\circ$ και $\phi'_e=24,1^\circ$. Για τις δοκιμές συμπίεσης με συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,8$ η γωνία κρίσιμης κατάσταση υπολογίστηκε $\phi'_c=24,72^\circ$, για τις δοκιμές συμπίεσης με $K_0=0,667$ υπολογίστηκε $\phi'_c=24,03^\circ$ και για τις δοκιμές συμπίεσης με $K_0=0,57$ υπολογίστηκε $\phi'_c=23,58^\circ$. Οι δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού στα ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια δεν οδήγησαν σε αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους αστοχίας του υλικού.

2.6.7 Τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες σε δοκίμια καολίνη από τους Yu-Hsing Wang et al. (2011)

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα ονομάζεται Speswhite Kaolin. Τα δείγματα μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση που κράτησε από μια εβδομάδα έως ένα μήνα (ανάλογα με το pH του δείγματος), περικόπηκαν ώστε να σχηματιστούν δοκίμια διαμέτρου 50 mm και ύψους 100 mm και τοποθετήθηκαν στην τριαξονική συσκευή. Οι αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές έγιναν σε μία CKC τριαξονική συσκευή. Επιβλήθηκε ρυθμός κατακόρυφης παραμόρφωσης 0,015%/min για όλα τα δείγματα. Προκείμενου τα δοκίμια να μην είναι υπερστερεοποιημένα από τη μονοδιάστατη στερεοποίηση επιβλήθηκε ελάχιστη μέση ενεργός τάση (p') 100 kPa, διπλάσια από την ενεργό τάση κατά τη μονοδιάστατη στερεοποίηση.

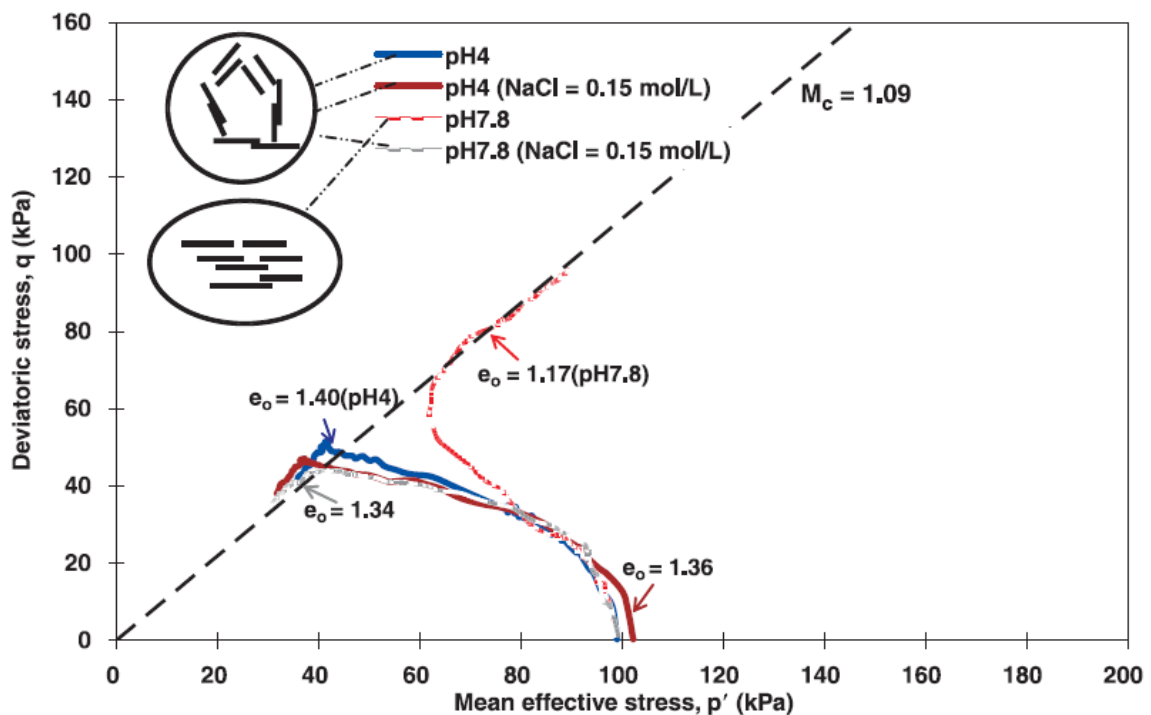
Το Σχήμα 2.6.25 παρουσιάζει τις διαδρομές τάσεων σε όρους q και p' για δείγματα με pH 4 και pH 7,8 κάτω από 3 διαφορετικές ενεργές τάσεις p' (100kPa, 200kPa, 300kPa). Τα δείγματα με pH 4 παρουσιάζουν τάση για συστολή καθ'όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Από τα πειράματα αυτά προκύπτει μία γραμμή κρίσιμης κατάστασης με $M_c = 1,09$ που αντιστοιχεί σε γωνία τριβής $\phi'_c = 27,5^\circ$. Τα δείγματα με pH 7,8 παρουσιάζουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Η τάση για συστολική συμπεριφορά που παρουσιάζουν αρχικά μετατρέπεται σε τάση για διαστολή υπό σταθερό λόγο τάσεων καθώς πλησιάζουν την γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Παρόλο που τα δείγματα με pH 7,8 συμπεριφέρθηκαν τελείως διαφορετικά από αυτά με pH 4, όλα τα δείγματα φαίνεται να προσεγγίζουν την ίδια ευθεία κρίσιμης κατάστασης. Η τάση για διαστολική συμπεριφορά του καολινίτη με pH 7,8 μπορεί να αποδοθεί στις μικρές αποστάσεις των πλακιδίων και τις μεγάλες αποθητικές δυνάμεις που δημιουργούνται. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στις άμμους.



Σχήμα 2.6.25 Διαδρομές τάσεων για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολίνη με διαφορετική διάταξη πλακιδίων (Πηγή: Yu-Hsing Wang, 2011)

Στο Σχήμα 2.6.26 φαίνονται οι διαδρομές τάσεων για τα δοκίμια με μέση ενεργό τάση $p' = 100$ kPa στην περίπτωση που προστεθεί ηλεκτρολύτης 0.15 mol/L NaCl . Επίσης φαίνονται, για τη σύγκριση, τα αρχικά δοκίμια χωρίς ηλεκτολύτη. Τα δοκίμια με pH 4 και pH 7,8 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με το αρχικό δοκίμιο χωρίς ηλεκτρολύτη με pH 4. Το διαλυμα NaCl μεταβάλλει τη διάταξη των πλακιδίων καολινίτη και αλλάζει έτσι και τη συμπεριφορά του σε διάτμηση. Τα δείγματα που έχουν κροκιδωμένη σύσταση ακολουθούν παρόμοιες διαδρομές τάσεων κατά τη διάτμηση. Παρόλα αυτά φαίνεται και εδώ ότι η γραμμή κρίσιμης κατάστασης είναι ανεξάρτητη από τις δυνάμεις μεταξύ των πλακιδίων και τη μεταξύ τους δομή, αλλά εξαρτάται κυρίως από το είδος του γεωυλικού.

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τα πειράματα του Yu-Hsing Wang η γραμμή κρίσιμης κατάστασης για τον καολινίτη καθορίζεται από την φύση του γεωυλικού και όχι από τη διάταξη και τις δυνάμεις μεταξύ των πλακιδίων.



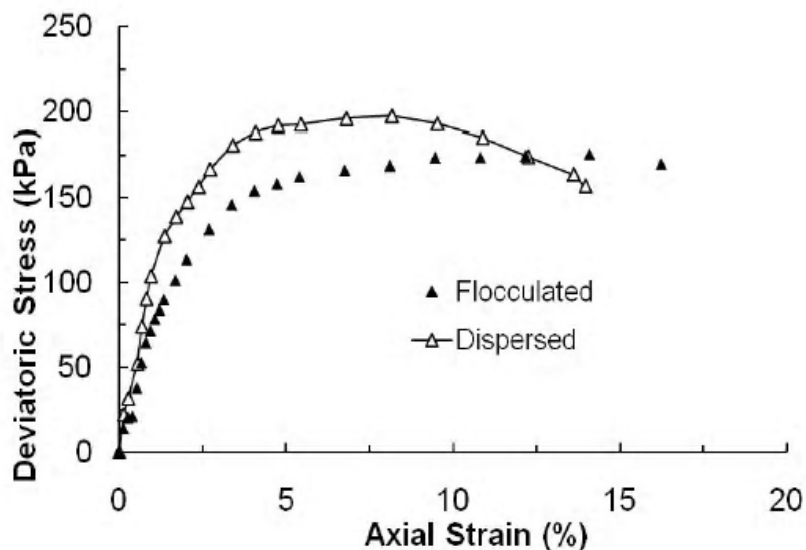
Σχήμα 2.6.26 Διαδρομές τάσεων για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολίνη στα 100 kPa με διαφορετική διάταξη πλακιδίων (Πηγή: Yu-Hsing Wang, 2011)

2.6.8 Αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή θλίψης σε καολινίτη από τους Robinson et al. (2010)

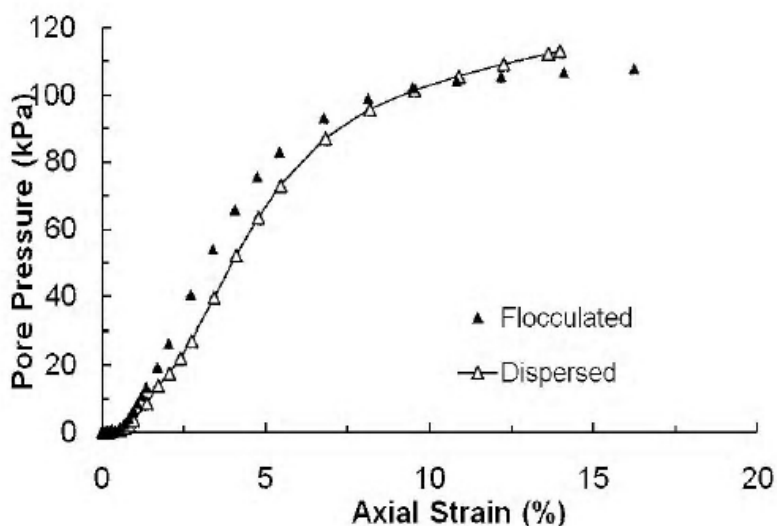
Στα πλαίσια της έρευνας αυτής χρησιμοποιήθηκε καολινίτης του εμπορίου, του οποίου το 38% των σωματιδίων ανήκουν στο εύρος της ιλύος (0,002mm με 0,075mm), και το υπόλοιπο 62% είναι αργιλικά (<0,002mm). Ο καολινίτης αναμείχθηκε με απεσταγμένο νερό σε ποσότητα περίπου διπλάσια της υγρασίας στο όριο υδαρότητας του. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης χημικοί παράγοντες για να καθορίσουν τη δομή των σωματιδίων του καολινίτη (για τα δοκίμια με διασκορπισμένη διάταξη σωματιδίων). Το υδαρές υλικό στη συνέχεια στερεοποιήθηκε υπό κατακόρυφη πίεση 100 kPa σε κυλινδρική μήτρα με διάμετρο 150 mm και ύψος 230 mm. Όταν η στερεοποίηση ολοκληρώθηκε δημιουργήθηκαν δοκίμια με 38 mm διάμετρο και ύψος 76 mm τα οποία τοποθετήθηκαν στη τριαξονική συσκευή. Πριν τη διάτμηση, προηγήθηκε κορεσμός με έλεγχο της πίεσης πόρων ώστε η παράμετρος B να είναι μεγαλύτερη από 0,95, και ισότροπη στερεοποίηση των δοκιμίων.

Το Σχήμα 2.6.27 περιγράφει τη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε μία τυπική αστράγγιστη δοκιμή θλίψης. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, τα δείγματα με τη διασκορπισμένη δομή (dispersed) μετά τη μέγιστη διατμητική αντοχή παρουσιάζουν μείωση της αντοχής για περαιτέρω παραμόρφωση. Αντίθετα, τα δείγματα με κροκυδωμένη δομή (flocculated) διατηρούν σταθερή την διατμητική αντοχή όταν αυτή πάρει τη μέγιστη τιμή της, συμπεριφορά η οποία είναι χαρακτηριστική για τις κανονικά στερεοποιημένες αργίλους. Μία εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά είναι η αρχική αντοχή σε συμπίεση λόγω των παράλληλα προσανατολισμένων σωματιδίων στην περίπτωση της διασκορπισμένης δομής. Στις μεγαλύτερες όμως παραμορφώσεις η αναδιάταξη των σωματιδίων οδηγεί σε πτώση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Όπως φαίνεται εξάλλου στο Σχήμα 2.6.27, και οι δύο τύποι δοκιμίων φαίνεται να έχουν την ίδια διατμητική αντοχή στις μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Η μεταβολή της πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση, για τα δύο είδη δοκιμίων, κατά την αστράγγιστη τριαξονική θλίψη περιγράφεται στο Σχήμα 2.6.28. Οι καμπύλες και για τα δύο είδη δοκιμίων φαίνεται να συμπίπτουν, πράγμα το οποίο υποδηλώνει ότι δομή και ο προσανατολισμός των σωματιδίων δεν επηρεάζει τη μεταβολή της πίεσης των πόρων.

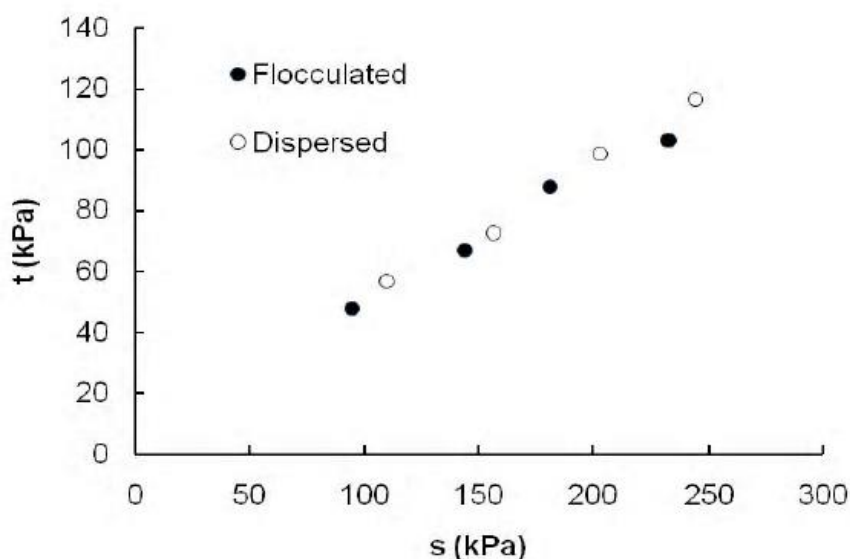


Σχήμα 2.6.27 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για υλικά με διαφορετική διάταξη σωματιδίων (Πηγή: Robinson et al., 2010)



Σχήμα 2.6.28 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για υλικά με διαφορετική διάταξη σωματιδίων (Πηγή: Robinson et al., 2010)

Το Σχήμα 2.6.29 παρουσιάζει τα σημεία αστοχίας των δοκιμών με διασκορπισμένη και κροκυδωμένη δομή στο διδιάστατο επίπεδο $t-s'$. Η γωνία τριβής για το υλικό με διασκορπισμένη δομή διαμορφώνεται στις $28,7^\circ$, ενώ για αυτό με τη κροκυδωμένη δομή λίγο χαμηλότερα στις $27,5^\circ$.



Σχήμα 2.6.29 Σημεία αστοχίας για τα δοκίμια με διαφορετικές μικροδομές (Πηγή: Robinson et al., 2010)

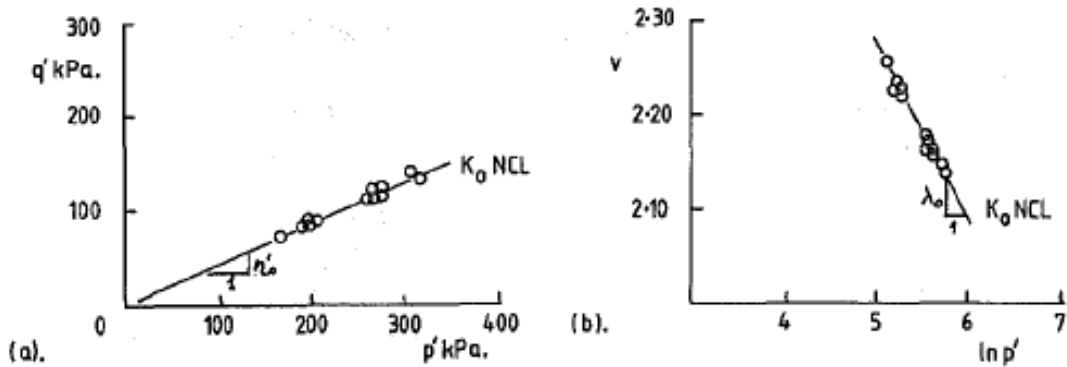
2.6.9 Τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σε δοκίμια καολίνη από τους Atkinson et al. (1987)

Οι Atkinson et al., στα πλαίσια της έρευνάς τους, διεξήγαγαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού σε δοκίμια καολίνη Speswhite σε τριαξονική κυψέλη τύπου Bishop/Wesley. Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 38 mm και ύψος 76 mm και προέκυψαν από ανάμειξη καολίνη Speswhite (LL = 65, PL = 35) με απεσταγμένο νερό, σε ποσότητα περίπου ίση με το 150% του ορίου υδαρότητας του υλικού. Στη συνέχεια στερεοποιήθηκαν μονοδιάστατα υπό κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_v = 60$ kPa. Στο τέλος της αρχικής στερεοποίησης τα δοκίμια είχαν ποσοστά υγρασίας 57% - 59% και αστράγγιστη αντοχή περίπου $s_u = 20$ kPa, αρκετή ώστε να μπορούν να σταθούν στην τριαξονική συσκευή.

Όταν τα δοκίμια εγκαταστάθηκαν στην τριαξονική κυψέλη, φορτίστηκαν έτσι ώστε να αποκτήσουν τις τάσεις που είχαν στο τέλος της μονοδιάστατης στερεοποίησης, αλλά με πίεση πόρων 150 kPa. Στη συνέχεια φορτίστηκαν υπό σταθερή πίεση πόρων, συνθήκες πλήρους στραγγίσης και μηδενική ακτινική παραμόρφωση, με ρυθμό μεταβολής αξονικού φορτίου 5 kPa/hr. Στο τέλος της στερεοποίησης, εφαρμόστηκε καθεστώς σταθερών τάσεων στα δοκίμια, για 4-6 ώρες, για να εκτονωθούν οι οποιεσδήποτε ερπυστικές παραμορφώσεις. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού, υπό αστράγγιστες ή στραγγιζόμενες συνθήκες. Οι ρυθμοί φόρτισης των δοκιμών ήταν αρκετά μικροί, ώστε να γίνεται πλήρης εκτόνωση των πιέσεων πόρων στις στραγγιζόμενες δοκιμές, και να μεταβάλλονται ομοιόμορφα σε όλο το δοκίμιο στις αστράγγιστες.

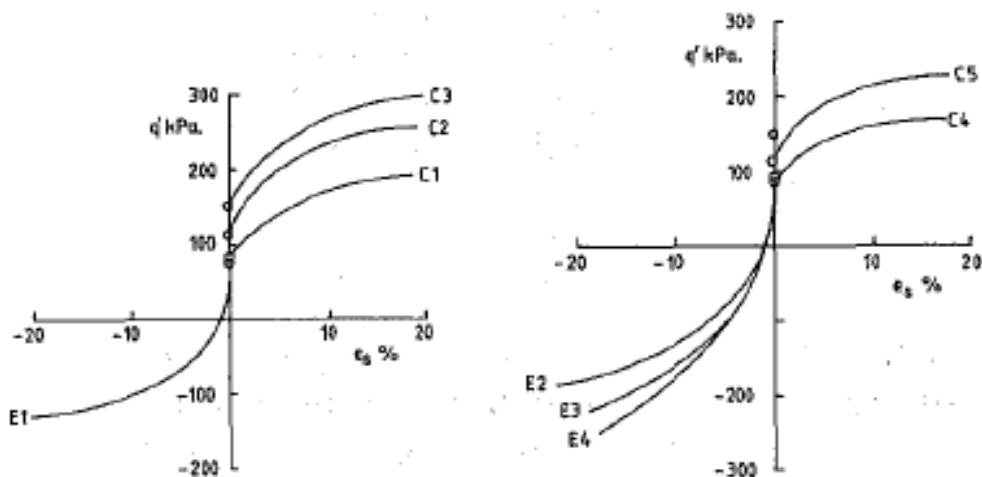
Το διάγραμμα (α) στο Σχήμα 2.6.30 δείχνει τις τάσεις στα δοκίμια στο τέλος της στερεοποίησης, δηλαδή την αρχική κατάσταση των δοκιμών πριν τις δοκιμές

διάτμησης και εφελκυσμού. Τα ζευγη τάσεων είναι σημεία που σχηματίζουν την γραμμή μονοδιάστατης στερεοποίησης K_0 στο επίπεδο $q-p'$. Φαίνεται επίσης στο διάγραμμα (b) του σχήματος 2.6.30 η γραμμή μονοδιάστατης στερεοποίησης στο επίπεδο $(v, \ln p')$ όπου $v=1+e$ και $p' = (\sigma'_v+2\sigma'_a)/3$.

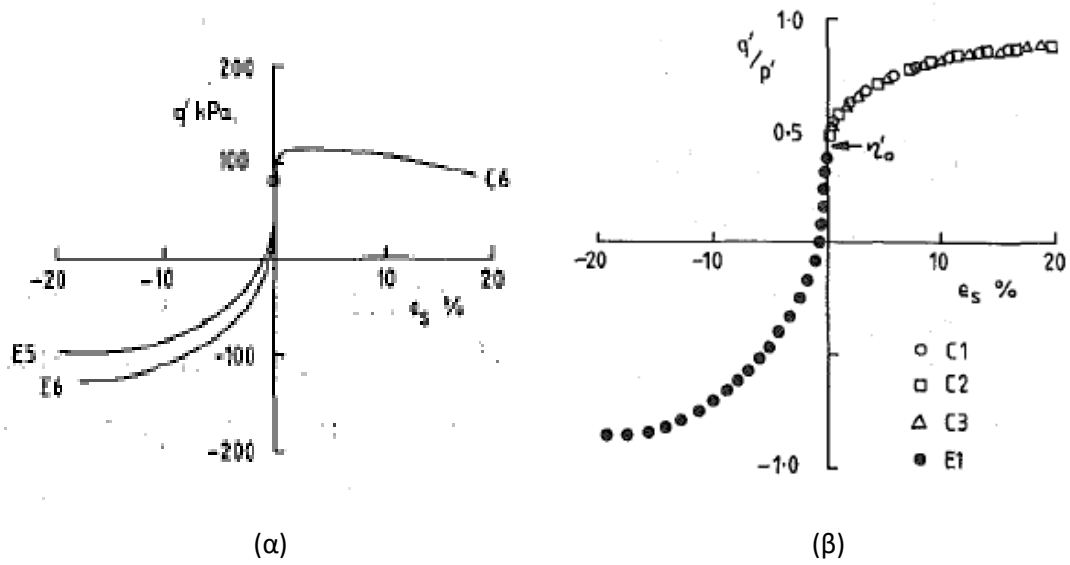


Σχήμα 2.6.30 Ευθεία μονοδιάστατης συμπίεσης στο επίπεδο (α) $q-p'$ και στο επίπεδο (b) $v-\ln p'$ (Πηγή: Atkinson et al., 1987)

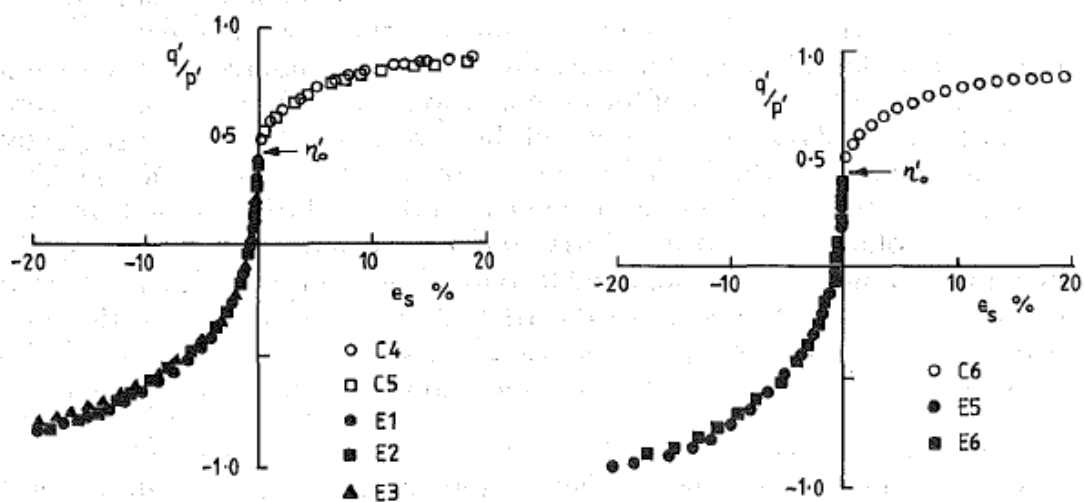
Τα διαγράμματα στο Σχήμα 2.6.31 δείχνουν τις καμπύλες μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης q σε σχέση με την παραμόρφωση ϵ_s , όπου $\epsilon_s = 2/3 (\epsilon_a - \epsilon_r)$ για όλες τις αστραγγιστες, στραγγιζόμενες και υπό σταθερή τάση p' δοκιμές. Ακολουθούν στα Σχήματα 2.6.32 και 2.6.33 τα διαγράμματα μεταβολής του λόγου τάσεων q/p' σε σχέση με την παραμόρφωση ϵ_s για όλες τις δοκιμές. Τέλος στο Σχήμα 2.6.34 φαίνονται οι μεταβολές του όγκου σε σχέση με την διατμητική παραμόρφωση ϵ_s στις στραγγιζόμενες και στις υπό σταθερή τάση p' δοκιμές.



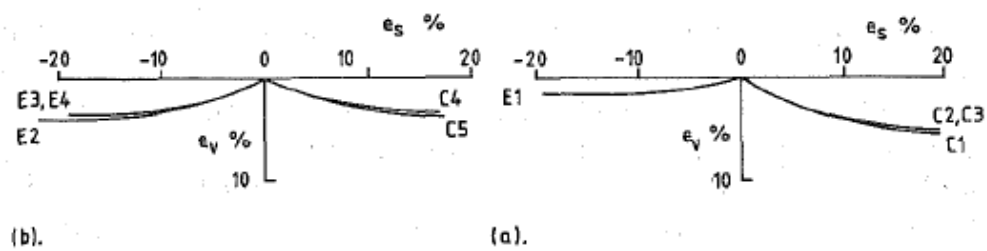
Σχήμα 2.6.31 Αποκλίνουσα τάση-διατμητική παραμόρφωση (Πηγή: Atkinson et al., 1987)



Σχήμα 2.6.32 (α) Αποκλίνουσα τάση-παραμόρφωση (β) Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση-παραμόρφωση (Πηγή: Atkinson et al., 1987)

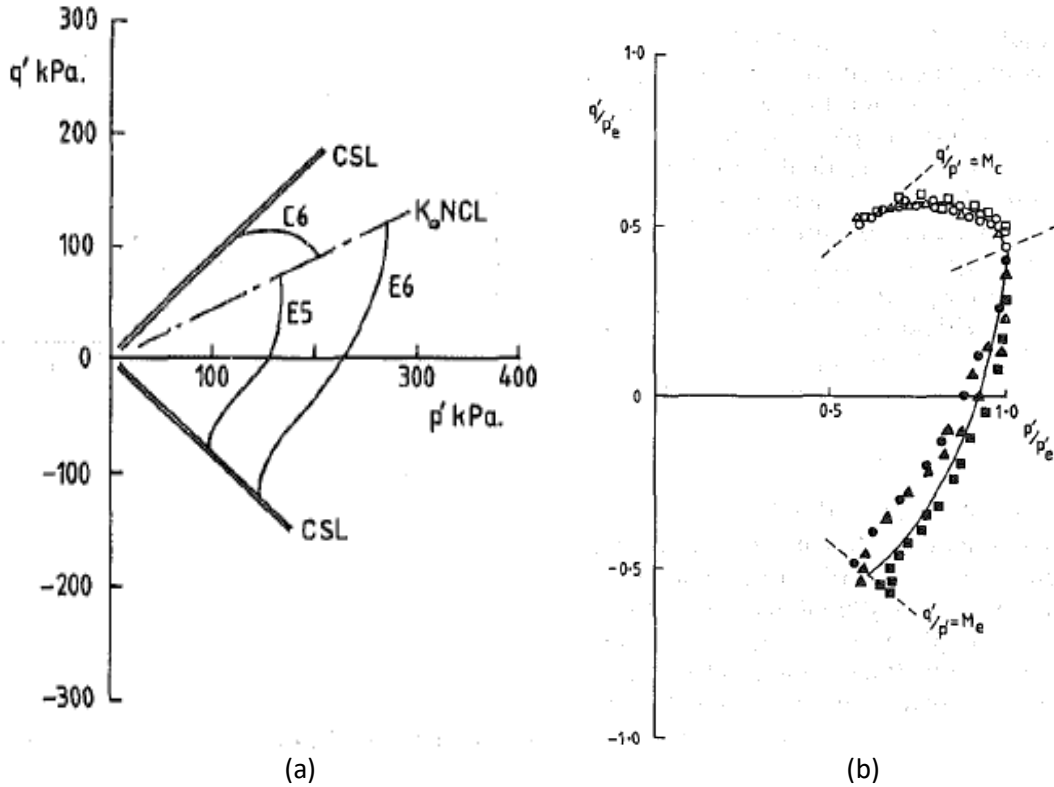


Σχήμα 2.6.33 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση-παραμόρφωση (Πηγή: Atkinson et al., 1987)



Σχήμα 2.6.34 Ογκομετρικές μεταβολές για τις στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: Atkinson et al., 1987)

Στο Σχήμα 2.6.35 φαίνονται οι διαδρομές τάσεων για τις αστράγγιστες δοκιμές στο επίπεδο q - p' , καθώς και οι κανονικοποιημένες τάσεις ως προς την τάση p'_e που αντιστοιχεί στον δείκτη πόρων του κάθε δοκιμίου.



Σχήμα 2.6.35 (α) Διαδρομές τάσεων για δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες (β) Αντίστοιχες κανονικοποιημένες διαδρομές (Πηγή: Atkinson et al., 1987)

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μονοδιάστατη στερεοποίηση όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι :

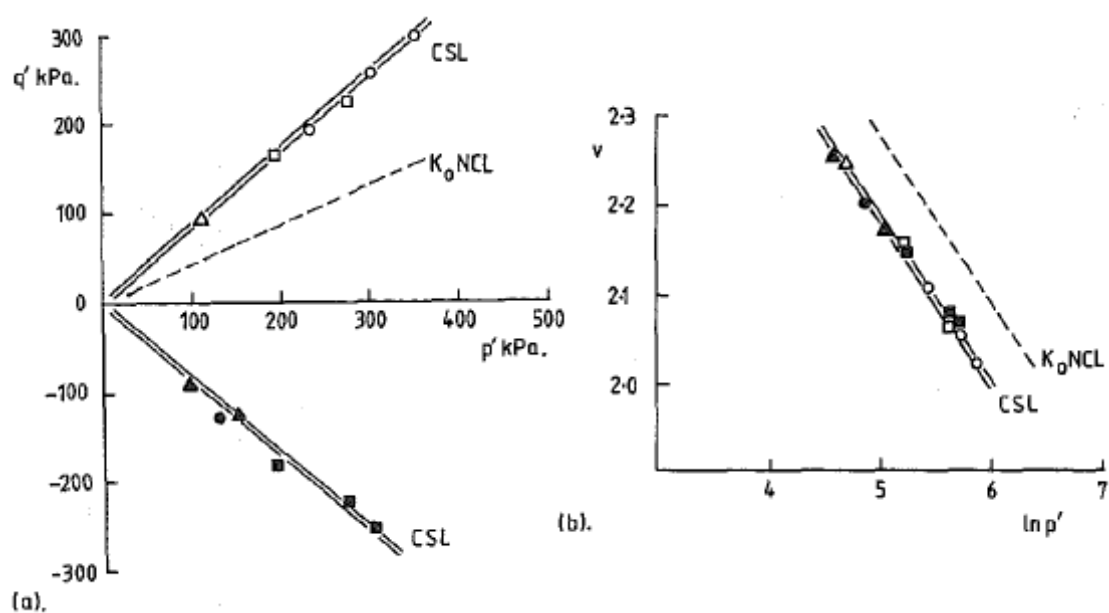
$$q' = n_o * p'$$

$$v = N_o - \lambda_o * \ln p'$$

όπου n_o ο λόγος τάσεων (q/p') στο τέλος της μονοδιάστατης στερεοποίησης και N_o και λ_o καθορίζουν τη δεύτερη ευθεία (λ_o : κλίση και N_o ο δείκτης κενών που αντιστοιχεί σε $\ln p'=1$).

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις δοκιμές συμπέφτουν πάνω στις παραπάνω ευθείες με πολύ μικρές αποκλίσεις και έτσι προκύπτουν οι παράμετροι $n_o=0,43$ $N_o=3,23$ και $\lambda_o = 0,19$. Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνονται και από παλαιότερες δοκιμές σε δοκίμια ίδιου τύπου καολίνη. Ο λόγος τάσεων $n_o=0,43$ αντιστοιχεί σε συντελεστή ουδετέρων τάσεων $K_o=0,66$. Με δεδομένη την γωνία τριβής του καολίνης $\phi'_c=22^\circ$, με τη χρήση της σχέσης του Jaky $K_o=1-\sin \phi'$, ο συντελεστής K_o υπολογίζεται $0,63$ δηλαδή με μικρή απόκλιση. Για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια ($n'=0$) οι παραπάνω σταθερές υπολογίστηκαν $N=3,29$ και $\lambda=0,19$.

Από τα διαγράμματα στα Σχήματα 2.6.32 και 2.6.33 φαίνεται ότι τα περισσότερα δοκίμια έφτασαν σε κρίσιμη κατάσταση σε παραμορφώσεις $\epsilon_s=15\%$ με $\epsilon_s=20\%$. Ωστόσο σε μερικά δοκίμια (E3, E4 και C6) η αποκλίνουσα τάση q δεν σταθεροποιήθηκε ακόμα και για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 20% παρόλο που η πίεση πόρων, οι λόγοι τάσεων και η ογκομετρική παραμόρφωση παρέμεναν σταθερές. Σε όλα τα δοκίμια σχηματίστηκαν εμφανείς επιφάνειες αστοχίας και η παραμορφωσή τους συνεχίστηκε υπό σταθερό λόγο τάσεων, σταθερή πίεση πόρων και ογκομετρική παραμόρφωση. Οι μέγιστες διατμητικές αντοχές και οι αντίστοιχες μέσες ενεργές τάσεις φαίνονται στο διάγραμμα (α) του Σχήματος 2.6.36.



Σχήμα 2.6.36 Ευθείες κρίσιμης κατάστασης στα επίπεδα $q-p'$ και $v-\ln p'$ (Πηγή: Atkinson et al., 1987)

Στο Σχήμα 2.6.36 φαίνονται οι απεικονίσεις των ευθειών κρίσιμης κατάστασης (για θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα):

$$q' = M_c p' \quad \text{και} \quad q' = M_e p'$$

$$v = \Gamma_c - \lambda_c \ln p' \quad \text{και} \quad v = \Gamma_e - \lambda_e \ln p'$$

όπου M , Γ και λ είναι οι παράμετροι του εδάφους και οι δείκτες c και e αναφέρονται σε θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα. Από τα δεδομένα του παραπάνω διαγράμματος οι παράμετροι υπολογίζονται $M_c = M_e = 0.85$, $\Gamma_c = \Gamma_e = 3.14$ και $\lambda_c = \lambda_e = 0.19$, δηλαδή οι ευθείες είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα p' . Αυτές οι τιμές M αντιστοιχούν σε κρίσιμες γωνίες τριβής $\phi_c' = 22^\circ$ και $\phi_e' = 29^\circ$ για θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με άλλους ερευνητές που υπολόγισαν ίσες γωνίες τριβής για θλίψη και εφελκυσμό σε μονοδιάστατα στερεοποιημένα δοκίμια. Για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολίνη Speswhite οι παραπάνω παράμετροι υπολογίστηκαν $M_c = 0.95$, $M_e = 0.80$, $\Gamma_c = \Gamma_e = 3.16$ και $\lambda_c = \lambda_e = 0.19$. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε γωνίες τριβής $\phi_c' = 24^\circ$ και $\phi_e' = 27^\circ$ για θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα.

3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν εργαστηριακές δοκιμές για να διερευνηθεί η συμπεριφορά του καολινίτη. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τον προσδιορισμό της υγρασίας των δοκιμίων, το ειδικό βάρος κόκκων του υλικού, τα όρια υδαρότητας και πλασιμότητας και την κοκκομετρική διαβάθμιση το υλικού. Τα αποτελέσματα από αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν αργότερα για τις δοκιμές συμπίεσομέτρου και τις τριαξονικές δοκιμές.

3.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Η υγρασία μιας εδαφικής μάζας (w) καθορίζεται ως ο λόγος του βάρους του νερού W_w προς το βάρος των ξηρών κόκκων του εδάφους W_s και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Κατάλληλοι υποδοχείς τέτοιοι ώστε να προλαμβάνεται απώλεια υγρασίας κατά τη διάρκεια της ζυγίσεως.
- Μεταλλικά κουτιά.
- Κλίβανος θερμοκρασίας 110°C.
- Ζυγός ευαισθησίας 0,01g.

Τρόπος εργασίας

Για να μειωθεί η επίδραση της επιφανειακής ξήρανσης πρέπει η όλη διαδικασία να εκτελεστεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Η περιεχόμενη υγρασία του κάθε δοκιμίου είναι προτιμότερο να προκύψει ως ο μέσος όρος της υγρασίας του δοκιμίου αλλά και τριμμάτων αυτού κατά την κοπή του. Επίσης υπολογισμός της περιεχόμενης υγρασίας γίνεται στα δοκίμια και μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων στερεοποίησης.

Αρχικά το δοκίμιο ζυγίζεται προσεκτικά και εν συνεχεία ξηραίνεται σε φούρνο θερμοκρασίας 105-110°C μέχρι σταθερού βάρους. Ο χρόνος ξηράνσεως εξαρτάται από τον τύπο, την ποσότητα και το σχήμα του δοκιμίου. Για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αρκούσε μια μέρα για να ξηραθούν πλήρως. Μετά την απομάκρυνση του από το φούρνο το δοκίμιο ψύχεται και ζυγίζεται. Η φυσική υγρασία εκφράζεται επί τοις εκατό και είναι αριθμός με ακρίβεια δεκάτου.

3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΙΔΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΚΟΚΚΩΝ G_s

Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των εδαφών και ο υπολογισμός του απαιτείται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων δοκιμών. Το ειδικό βάρος ενός εδάφους είναι ο λόγος του βάρους ορισμένου όγκου κόκκων προς το βάρος ίσου όγκου απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4°C. Το ειδικό βάρος ενός εδάφους συνήθως χρησιμοποιείται για τον συσχετισμό του βάρους του εδάφους προς τον όγκο του. Στο εργαστήριο εδαφομηχανικής έγιναν οι απαραίτητες δοκιμές για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους κόκκων του καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε στις τριαξονικές δοκιμές.

Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Πυκνόμετρο χωρητικότητας 100 ml, είτε λύκηθος χωρητικότητας 50 ml.
- Απεσταγμένο νερό
- Αντλία κενού (προαιρετικά)
- Ζυγός ακρίβειας 0,01g.
- Εστία θερμάνσεως
- Κλίβανος
- Ξηραντήρας
- Θερμόμετρο με ακρίβεια 0,1°C.
- Δοχεία ζέσεως
- Σταγονόμετρο ή προχοϊδα.

Τρόπος εργασίας

Το πυκνόμετρο καθαρίζεται, ξηραίνεται, ζυγίζεται και το βάρος αυτό αναγράφεται. Στη συνέχεια το πυκνόμετρο γεμίζεται με απεσταγμένο νερό πραγματικής θερμοκρασίας δωματίου. Προσδιορίζεται κατόπιν το βάρος του πυκνομέτρου με το νερό (W_a) και καταγράφεται. Στη συνέχεια βυθίζεται ένα θερμόμετρο μέσα στο νερό

και προσδιορίζεται η θερμοκρασία του (T_i) με προσέγγιση αέρα βυθού. Από το βάρος W_a που προσδιορίζεται στη θερμοκρασία T_i , συντάσσεται πίνακας διαφόρων βαρών W_a , που αντιστοιχούν σε σειρά θερμοκρασιών, που είναι πιθανόν να επικρατούν κατά τον προσδιορισμό των βαρών W_b που ακολουθεί παρακάτω.

Το έδαφος που θα χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή του ειδικού βάρους, μπορεί ή να περιέχει τη φυσική του υγρασία ή να έχει ξηρανθεί σε κλίβανο. Το βάρος του δείγματος με βάση αυτό που προκύπτει από την ξήρανση σε κλίβανο πρέπει να είναι τουλάχιστον 25g όταν χρησιμοποιείται ογκομετρική φιάλη και 10g όταν χρησιμοποιείται λύκηθος. Το δείγμα τοποθετείται μέσα στο πυκνόμετρο, αφού ληφθεί πρόνοια ώστε να μην υπάρχει απώλεια εδάφους στην περίπτωση που το δείγμα έχει ζυγιστεί.

Προστίθεται απεσταγμένο νερό μέχρι να γεμίσει η ογκομετρική φιάλη περίπου κατά τα 3/4, ή όταν πρόκειται για λυκθήτους περίπου κατά το ήμισυ.

Ο αέρας που έχει κατά τύχη παγιδευτεί απομακρύνεται με ελαφρύ βρασμό για τουλάχιστον 10 λεπτά. Το πυκνόμετρο στη συνέχεια γεμίζεται με απεσταγμένο νερό, καθαρίζεται και ξηραίνεται εξωτερικά με τη βοήθεια καθαρού στεγνού υφάσματος. Λαμβάνεται το βάρος W_b του πυκνομέτρου με το περιεχόμενό του, και η θερμοκρασία T_x του περιεχομένου σε °C. Έτσι το ειδικό βάρος των εδαφικών κόκκων, ως προς νερό θερμοκρασίας T_x υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$G_s, \frac{T_x}{T_x} = \frac{W_0}{W_0 + (W_a - W_b)}$$

όπου W_0 το βάρος του ξηρού σε κλίβανο δείγματος εδάφους σε g, και T_x η θερμοκρασία του περιεχομένου του πυκνομέτρου, κατά τη μέτρηση του βάρους W_b σε °C.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μετρήσεις από τις δοκιμές αυτές. Υπολογίζοντας το μέσο όρο από 4 επαναλήψεις του πειράματος καταλήγουμε στο ότι το G_s του συγκεκριμένου καολινίτη είναι 2,61.

Εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού

αριθμός φιάλης	όγκος φιάλης (ml)	βάρος φιάλης W1 (gr)	βάρος φιάλης με νερό W4 (gr)	βάρος φιάλης με άμμο W2 (gr)	βάρος μετά το βρασμό W3 (gr)	θερμοκρασία (°C)	ειδικό βάρος νερού γ_w	ειδικό βάρος νερού $\gamma_w(20^\circ\text{C})$	διορθωτικός συντελεστής K	φαινόμενο βάρος κόκκων Gs	φαινόμενο βάρος κόκκων Gs (20°C)	M.O
1	500	123,27	621,06	34,68	642,76	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6618	2,6566	2,637
2	500	128,32	626,35	35,33	648,26	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6228	2,6176	
1	500	123,27	621,06	33,56	641,92	19	0,9984	0,9982	1,0002	2,6384	2,6389	2,615
2	500	128,32	626,35	31,35	645,64	19	0,9984	0,9982	1,0002	2,5954	2,5960	
3	250	118,12	367,24	15,87	377,04	19	0,9984	0,9982	1,0002	2,6104	2,6109	
1	500	123,27	621,06	37,72	644,51	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6334	2,6282	2,622
2	500	128,32	626,35	37,4	649,39	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,5947	2,5896	
1	250	92,97	342,01	18,73	353,71	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6543	2,6491	
1	250	123,14	371,8	18,81	383,36	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,5848	2,5797	2,581
2	250	128,94	377,69	19,2	389,43	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,5641	2,5591	
3	500	142,5	640,84	38,6	664,71	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6107	2,6056	
											M.O.	2,614

Πίνακας 3.2.1 Υπολογισμός ειδικού βάρους κόκκων

Για περαιτέρω σύγκριση πραγματοποιήθηκε η ίδια δοκιμή σε διαφορετικό τύπο καολινίτη που προέρχεται από το Imperial College και στις προδιαγραφές του αναφέρεται $G_s = 2,61$. Οι δύο καολινίτες φαίνεται να έχουν ίδια ειδικά βάρη κόκκων.

αριθμός φιάλης	όγκος φιάλης (ml)	βάρος φιάλης W1 (gr)	βάρος φιάλης με νερό W4 (gr)	βάρος φιάλης με άμμο W2 (gr)	βάρος μετά το βρασμό W3 (gr)	θερμοκρασία (°C)	ειδικό βάρος νερού γ_w	ειδικό βάρος νερού $\gamma_w(20^\circ\text{C})$	διορθωτικός συντελεστής K	φαινόμενο βάρος κόκκων Gs	φαινόμενο βάρος κόκκων Gs (20°C)	M.O
1	250	123,14	371,8	18,3	383,14	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6195	2,6143	2,615
2	250	128,94	377,69	17,81	388,7	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6093	2,6042	
3	500	142,5	640,84	37,58	664,2	28	0,9963	0,9982	0,9980	2,6329	2,6277	

Πίνακας 3.2.2 Υπολογισμός ειδικού βάρους κόκκων για καολινίτη από το Imperial College

3.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ATTERBERG ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Τα όρια υδαρότητας και πλαστιμότητας έχουν προταθεί από τον A. Atterberg και περιγράφουν την μετάπτωση του εδάφους από την υγρή στην πλαστική και στην συνέχεια στην ημιστερεή και στην στερεή κατάσταση, σύμφωνα με τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας. Δείχνουν ουσιαστικά την συμπεριφορά ενός εδάφους ανάλογα με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και καταδεικνύουν αν κάποιο έδαφος είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υγρασίας (χαρακτηριστικό που είναι υψηλού ενδιαφέροντος για υλικά που χρησιμοποιούνται σε έργα οδοποιίας.). Η περιγραφή των ορίων είναι η εξής:

- **Όριο υδαρότητας (LL ή w_L):** Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από την υδαρή κατάσταση. Δηλαδή για περιεχόμενη υγρασία πάνω από το όριο υδαρότητας το έδαφος συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ρευστή μάζα (λάσπη). Αμέσως κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Το όριο προσδιορίζεται με χρήση της συσκευής Casagrande και είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας για την οποία τα τοιχώματα διαμορφωμένης εγκοπής δείγματος εδάφους που τοποθετείται στην συσκευή, έρχονται σε επαφή μεταξύ τους μετά από 25 κρούσεις.
- **Όριο πλαστιμότητας (PL ή w_P):** Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από ισχνή κατάσταση. Εάν δηλαδή, η περιεχόμενη υγρασία είναι μεταξύ του ορίου πλαστιμότητας και του ορίου υδαρότητας, το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος όντας κορεσμένα ή μη τείνει να είναι εύθρυπτο όταν επιχειρήσουμε να το πλάσουμε. Ο προσδιορισμός γίνεται με την εύρεση της περιεχόμενης υγρασίας σε εδαφικό δείγμα το οποίο θα αρχίσει να θρυμματίζεται όταν πλάθεται σε λεπτές ίνες, διαμέτρου 3 mm ή μικρότερες
- **Όριο συρρίκνωσης (SL):** Είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας κάτω από την οποία ο όγκος του εδαφικού δείγματος παραμένει σταθερός με συνεχιζόμενη ξήρανση. Για μικρότερη περιεκτικότητα νερού, το δείγμα παύει να είναι κορεσμένο.

Τα όρια υδαρότητας και πλαστιμότητας χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αναγνώριση και κατάταξη των εδαφών με βάση το διάγραμμα Casagrande και σε συνδυασμό με την μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές ASTM. Ειδικά το όριο συρρίκνωσης χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές όπου τα εδάφη υφίστανται μεγάλες αλλαγές στον όγκο τους όταν εναλλάσσονται κύκλοι υγρασίας και ξηρασίας.

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg πραγματοποιούνται σε εδάφη που διέρχονται από το κόσκινο No40. Συνήθως τα δείγματα που παίρνουμε από την γεώτρηση χρειάζονται ξήρανση έτσι ώστε να διέρχονται από το κόσκινο No40. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί είτε πραγματοποιώντας τη διαδικασία του κοσκινίσματος με το περιεχόμενο υγρασίας που έχει το δείγμα στο πεδίο, είτε αφήνοντας το δείγμα να ανακτήσει τα πραγματικά του όρια μετά από 24 ή και 48 ώρες.

Μέσω των ορίων Atterberg προσδιορίζονται οι παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές (δείκτες):

- **Δείκτης πλαστιμότητας (PI):** Είναι το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας στο οποίο το έδαφος είναι πλαστικό. Όσο πιο λεπτομερές είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης πλαστιμότητας. Μεγάλη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας δείχνει μεγάλο εύρος για την περιεχόμενη υγρασία, διατηρώντας το έδαφος σε πλαστική κατάσταση. Ο δείκτης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PI = LL - PL$$

- **Δείκτης υδαρότητας (LI):** Μας επιτρέπει να συγκρίνουμε την πλαστικότητα ενός εδάφους με την περιεχόμενη υγρασία. Εάν $LI=100\%$ το έδαφος είναι στο όριο υδαρότητας, ενώ αν $LI=0\%$ το έδαφος είναι στο όριο πλαστικότητας. Ο δείκτης

$$LI = (w_L - PL)/PI$$

Προσδιορισμός του ορίου υδαρότητας.

Το όριο υδαρότητας εδάφους αντιστοιχεί εξ ορισμού στην υγρασία στην οποία το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην υδαρή κατάσταση, όπως αυτή προσδιορίζεται από τη δοκιμή του ορίου υδαρότητας.

Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Κάψα από πορσελάνη διαμέτρου περίπου 120 mm.
- Μικρό μαχαίρι ή σπαθίδα με λεπίδα μήκους περίπου 80 mm και πλάτους 20 mm.
- Συσκευή ορίου υδαρότητας (Συσκευή Casagrande). Μηχανική συσκευή που συνίσταται από ένα ορειχάλκινο κύπελο και μία βάση που είναι κατασκευασμένη σύμφωνα με το σχέδιο και τις διαστάσεις που ορίζονται από τις προδιαγραφές που παρουσιάζονται στο Φ.Ε.Κ 955/31-12-86B (Προδιαγραφές Ε 105-86).
- Όργανο χαράξεως συνδυασμένο με μετρητή στο πίσω μέρος, σύμφωνα με τις διαστάσεις που ορίζονται από τις προδιαγραφές στο Φ.Ε.Κ 955/31-12-86B (Προδιαγραφές Ε 105-86).
- Υποδοχείς γυάλινοι που παρεμποδίζουν την απώλεια υγρασίας κατά τη ζύγιση.
- Ζυγός με ευαισθησία 0,01g .



Εικόνα 3.3.1 Συσκευή Casagrande

Προκαταρκτικές εργασίες

Λαμβάνεται δείγμα βάρους περίπου 100g από το κλάσμα του υλικού που έχει ά αναμειχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο Νο.40. Η συσκευή του ορίου υδαρότητας, η οποία δίνεται διαγραμματικά στην Εικόνα 3.3.2, πρέπει να επιθεωρείται για να διαπιστωθεί η καλή κατάσταση λειτουργίας, ότι δεν έχει επέλθει φθορά στον πείρο που συγκρατεί το κύπελο, ότι είναι σφιγμένοι οι κοχλίες συνδέσεως του κυπέλου, και ότι δεν έχει χαραχτεί το κύπελο λόγω χρήσεως. Με τον μετρητή που υπάρχει στο πίσω μέρος του οργάνου χαράξεως, ρυθμίζεται το ύψος στο οποίο θα ανυψώνεται το κύπελο. Στη συνέχεια σταθεροποιείται η πλάκα ρυθμίσεως σφίγγοντας τους κοχλίες. Με τον μετρητή ακόμη στη θέση, ελέγχεται η ρύθμιση περιστρέφοντας το στρόφαλο μερικές φορές.

Εάν η ρύθμιση είναι καλή θα ακούγεται ένας ελαφρύς ήχος, όταν η προεξοχή του στροφάλου εφάπτεται της προεξοχής του κυπέλου. Εάν το κύπελο ανυψώνεται ή δεν ακούγεται ο ελαφρύς ήχος πρέπει να γίνει ξανά η ρύθμιση.

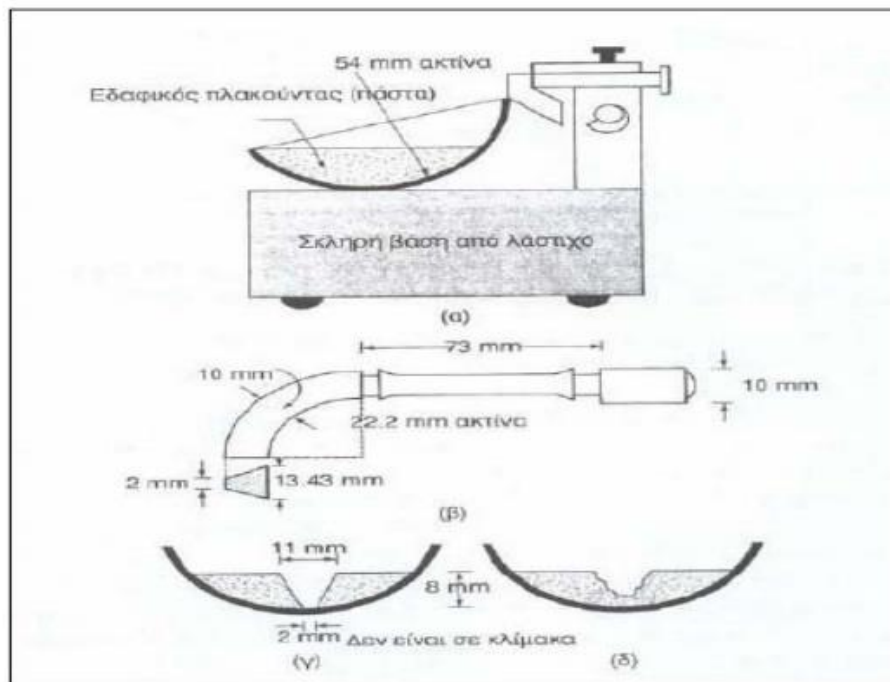
Τρόπος εργασίας

Αρχικά τοποθετείται το δείγμα εδάφους μέσα σε μία κάψα και στη συνέχεια προστίθενται 15–20 cm³ απεσταγμένου νερού. Ακολούθως το μείγμα ανακατεύεται πάρα πολύ καλά με την σπαθίδα μέχρις ότου κατανεμηθεί ομοιόμορφα το νερό στο δείγμα. Παραπάνω προσθήκη νερού γίνεται σε ποσότητα 1-3 cm³ και ακολουθεί η ανάμιξη ως ανωτέρω. Κατόπιν το δείγμα τοποθετείται στον υγραντήρα επί 30 λεπτά για ωρίμανση. Στη συνέχεια λαμβάνεται μέρος της ομοιόμορφης πεικτικής μάζας και τοποθετείται στο κύπελο της συσκευής και στο μέρος πάνω από το σημείο που ακουμπά το κύπελο στη βάση της συσκευής. Απλώνεται το υλικό με τη βοήθεια της σπαθίδας με ταυτόχρονη προσπάθεια να μην εγκλειστούν φυσαλίδες μέσα στο δείγμα. Μετά την ισοπέδωση το μεγαλύτερο βάθος του δείγματος πρέπει να είναι 1 cm, το υπόλοιπο απομακρύνεται. Το εντός του κυπέλου έδαφος διαιρείται με μία σταθερή διαδρομή του οργάνου χαράξεως κατά μήκος της διαμέτρου που διέρχεται

από το μέσο του στηρίγματος του κυπέλου, έτσι ώστε να σχηματιστεί καθαρή και απότομη χαραγή κατάλληλων διαστάσεων.

Προς αποφυγή δημιουργίας σχισμών επί των πλευρών της χαραγής ή ολισθήσεως του εδάφους, επιτρέπονται μέχρι έξι τέτοιοι χειρισμοί. Το βάθος της χαραγής πρέπει να αυξάνει με κάθε χειρισμό, στο τέλος δε, πρέπει να φαίνεται ο πυθμένας του κυπέλου. Με περιστροφή του στρόφαλου με ταχύτητα δύο στροφές ανά δευτερόλεπτο, ανυψώνεται και πέφτει το κύπελο με το παρασκεύασμα, μέχρις ότου οι δύο πλευρές του δείγματος ενωθούν στον πυθμένα της χαραγής και σε μήκος 12,7 χιλιοστά περίπου. Αναγράφεται ο αριθμός των κτύπων που απαιτήθηκαν για να κλείσει έτσι η χαραγή. Όταν περιστρέφεται ο στρόφαλος η συσκευή πρέπει να κρατιέται με το άλλο χέρι. Τμήμα εδάφους ίσο περίπου με το πλάτος της σπαθίδας εκτεινόμενο από άκρο σε άκρο του πλακούντα του εδάφους, κάθετα προς τη χαραγή και περιλαμβάνοντας το μέρος της χαραγής που ενώθηκε το έδαφος, τοποθετείται σε γυάλινο υποδοχέα, ζυγίζεται και ξηρένεται μέχρι σταθερού βάρους σε κλίβανο θερμοκρασίας 110° C, και ζυγίζεται πάλι. Καταγράφεται το ξηρό βάρος, ως επίσης και το νερό που έχασε κατά την ξήρανση. Η πιο πάνω διαδικασία, επαναλαμβάνεται τουλάχιστον σε δύο επιπλέον τμήματα του δείγματος, στα οποία έχει προστεθεί αρκετό νερό για να γίνει το δείγμα περισσότερο ρευστό. Ο σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η επίτευξη δειγμάτων τέτοιας συστάσεως ώστε να γίνεται τουλάχιστον ένας προσδιορισμός σε κάθε μία από τις ακόλουθες τρεις περιοχές κτύπων: 25-35, 20-30, 15-25.

Στη συνέχεια επί λογαριθμικού διαγράμματος σχηματίζεται η καμπύλη ροής, που παριστά την σχέση μεταξύ περιεχόμενης υγρασίας και αντίστοιχου αριθμού κτύπων, με τα ποσοστά υγρασίας ως τετμημένες στη γραμμική κλίμακα και τον αριθμό των κτύπων ως τεταγμένες, στην λογαριθμική κλίμακα. Η καμπύλη ροής θα σχεδιάζεται ως ευθεία γραμμή όσο δυνατόν πλησιέστερα προς τα τρία αποτυπωθέντα σημεία. Το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στην καμπύλη ροής με την τεταγμένη των 25 κτύπων λαμβάνεται ως όριο υδαρότητας. Το όριο υδαρότητας αναφέρεται σε ακέραιες μονάδες (στρογγυλεμένο στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό). Για υλικά με δείκτη πλαστιμότητας μικρότερο του 10, το όριο υδαρότητας εκφράζεται με ακρίβεια 0,1.



Σχήμα 3.3.1 Σχηματική απεικόνιση συσκευής Casagrande και οργάνου χαράξεως

Προσδιορισμός του ορίου πλαστιμότητας.

Το όριο πλαστιμότητας εδάφους αντιστοιχεί, στο χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεή κατάσταση και μπορεί να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο διαμέτρου 3 mm χωρίς ο ραβδίσκος να θραύεται.

Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Κάψα από πορσελάνη διαμέτρου περίπου 120 mm.
- Σπαθίδα ή σπάτουλα με λεπίδα μήκους 80 mm και πλάτους 20 mm περίπου.
- Επιφάνεια για την κυλίνδρωση: Γυάλινη πλάκα σμυριδωμένη ή κομμάτι ομαλού και αστίλβωτου χαρτιού για την κυλίνδρωση του δείγματος.
- Κατάλληλοι υποδοχείς, ώστε να προσαρμόζονται ύαλοι ωρολογίου για την πρόληψη απώλειας υγρασίας κατά τη διάρκεια της ζυγίσεως.
- Κλίβανος θερμοκρασίας 110° C.
- Ζυγός ακριβείας 0,001g.

Τρόπος εργασίας

Λαμβάνεται ποσότητα εδάφους περίπου 20g από μέρος του υλικού που έχει αναμειχθεί καλά, του διερχόμενου από το κόσκινο Νο.40. Τοποθετείται το έδαφος, που έχει ξηρανθεί στον αέρα, μέσα σε κάψα από πορσελάνη και αναμειγνύεται καλά με απεσταγμένο νερό, μέχρι που η μάζα καταστεί αρκετά πλαστική ώστε να μορφώνεται εύκολα σε βώλο. Σαν δείγμα δοκιμής λαμβάνεται μέρος του βώλου αυτού, βάρους περίπου 8g.

Συμπιέζεται και μορφώνεται το δείγμα δοκιμής των 8g σε μάζα ελλειψοειδούς σχήματος. Η μάζα αυτή κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και της σμυριδωμένης γυαλίνης πλάκας (ή του χαρτιού), με την ακριβώς απαιτούμενη πίεση ώστε να κυλινδρωθεί η μάζα σε ραβδίσκο ομοιόμορφης διαμέτρου σε όλο το μήκος του. Ο αριθμός κυλινδρώσεως πρέπει να είναι μεταξύ 80-90 κινήσεων ανά λεπτό, υπολογιζόμενης της κινήσεως σαν μια πλήρη κίνηση του χεριού προς τα εμπρός και προς τα πίσω στη θέση εκκινήσεως. Όταν η διάμετρος του ραβδίσκου καταστεί 3mm, ο ραβδίσκος θραύεται ξανά σε έξι ή οχτώ κομμάτια. Συμπιέζονται τα κομμάτια μαζί μεταξύ των δακτύλων και των αντιχειρών και των δύο χεριών προς ομοιόμορφη μάζα, χονδρικά ελλειψοειδούς σχήματος και επαναλαμβάνεται η κυλίνδρωση.

Η εναλλαγή συνεχίζεται με κυλίνδρωση σε ραβδίσκο 3 διαμέτρου mm, με συλλογή (συνένωση). Με αναζύμωση και επανακυλίνδρωση, μέχρι που ο ραβδίσκος θρυμματιστεί με την απαιτούμενη για την κυλίνδρωση πίεση, και το έδαφος δεν μπορεί πλέον να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο. Ο θρυμματισμός μπορεί να προέλθει όταν ο ραβδίσκος έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 3 mm. Αυτό πρέπει να θεωρηθεί ικανοποιητικό σημείο περατώσεως, με τον όρο ότι το έδαφος κυλινδρώθηκε προηγουμένως σε ραβδίσκο διαμέτρου 3 mm. Συγγεντρώνονται μαζί τα μέρη του θραυσθέντος εδάφους και τοποθετούνται μέσα σε κατάλληλο προζυγισμένο υποδοχέα. Ο υποδοχέας με το έδαφος ζυγίζεται και καταγράφεται το βάρος. Το έδαφος που είναι μέσα στον υποδοχέα, ξηραίνεται σε κλίβανο μέχρι σταθερού βάρους, σε θερμοκρασία 110° C και ζυγίζεται. Το βάρος αυτό καταγράφεται. Η απώλεια βάρους αναφέρεται στο βάρος ύδατος. Ο προσδιορισμός του ορίου υδαρότητας προκύπτει σαν ο μέσος όρος τριών δοκιμών.

Το όριο πλαστιμότητας υπολογίζεται σαν το ποσοστό επί τοις εκατό (%) του νερού, κατά βάρος, που περιέχεται στους ραβδίσκους των 3 mm που ξηράνθηκαν στον κλίβανο μέχρι του ξερού βάρους, ως εξής:

$$\text{Όριο πλαστιμότητας} = \frac{\text{βάρος νερού}}{\text{βάρος εδάφους που ξηράνθηκε στον κλίβανο}} \times 100$$

Στο εργαστήριο εδαφομηχανικής έγιναν οι απαραίτητες παραπάνω δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg και τον προσδιορισμό του καολινίτη πάνω στο χάρτη πλαστιμότητας Casagrande. Τα όρια Atterberg για τον καολινίτη συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα :

Όριο υδαρότητας LL	Όριο πλαστιμότητας PL	Δείκτης πλαστιμότητας PI
47%	35%	12%

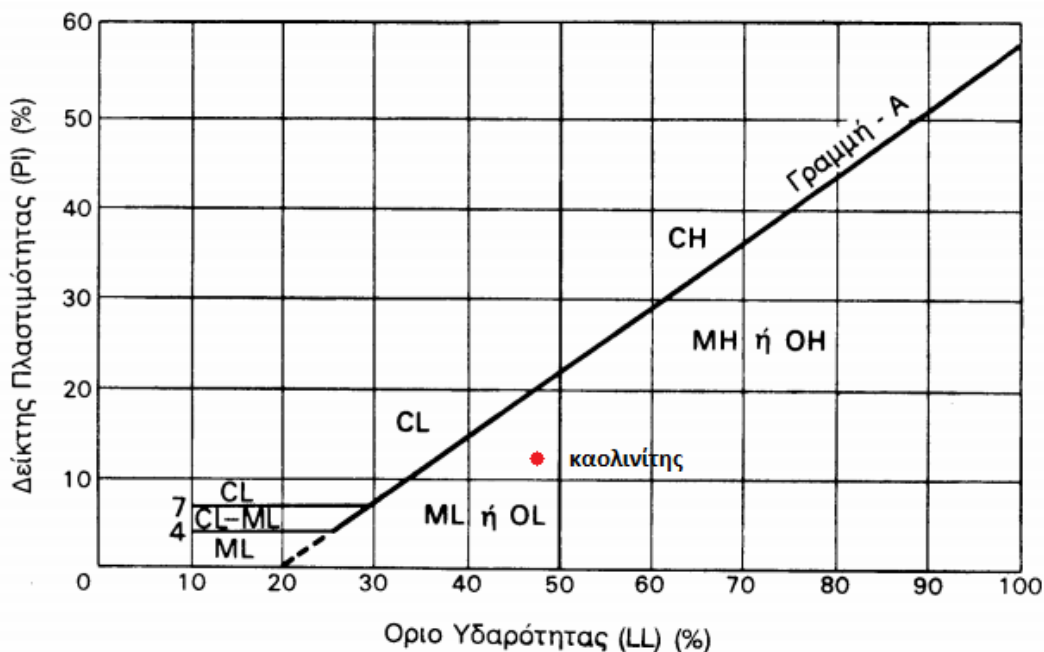
Πίνακας 3.3.1 Όρια Atterberg για τον καολινίτη

Τα όρια Atterberg διαφέρουν για τα διάφορα είδη καολινιτών και μπορεί να έχουν μεγάλες αποκλίσεις. Επίσης λόγω της αργλικής φύσης του καολινίτη τα όρια Atterberg και γενικά τα ποσοστά υγρασίας μπορούν να επηρεάσουν πολύ τις μηχανικές του ιδιότητες.

3.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΧΑΡΤΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ CASAGRANDE

Ο ακριβής τύπος του εκάστοτε εδάφους προσδιορίζεται με βάση τα όρια Atterberg μέσω του “Χάρτη Πλαστιμότητας του Casagrande”. Η γραμμή-A έχει εξίσωση: $I_p = 0,73 (w_L - 20)$ και χωρίζει τις λείες από τις αργίλους. Ενώ η κάθετη ευθεία που αντιστοιχεί σε ποσοστό ορίου υδαρότητας 50% διαχωρίζει τα υλικά με βάση την πλαστιμότητα – συμπιεστότητά τους.

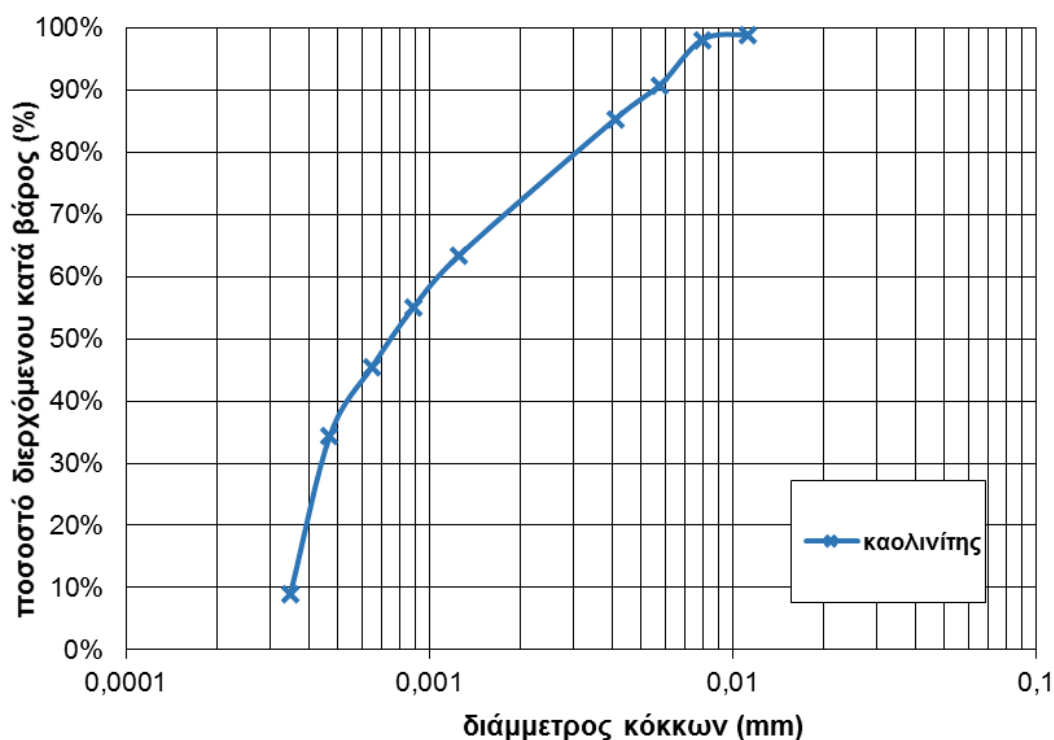
Με βάση τα παραπάνω όρια τοποθετώντας τον καολινίτη πάνω στο χάρτη πλαστιμότητας Casagrande (Σχήμα 3.4.1) φαίνεται ότι βρίσκεται χαμηλότερα από την γραμμή A στην περιοχή ML-OL, δηλαδή στην περιοχή των ιλύων. Ωστόσο αυτό συμβαίνει λόγω του πολύ χαμηλού δείκτη πλαστιμότητας του συγκεκριμένου καολινίτη. Από την κοκκομετρία του υλικού, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 3.5, καθίσταται προφανές πως πρόκειται για καθαρά αργλικό υλικό με χαμηλό ποσοστό ιλύων.



Σχήμα 3.4.1 Θέση του καολινίτη πάνω στο χάρτη πλαστικότητας Casagrande

3.5 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΕ ΑΡΑΙΟΜΕΤΡΟ

Ύστερα από κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο διαπιστώθηκε η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του υλικού, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Κατά την δοκιμή δεν χρησιμοποιήθηκαν αντιθρομβωτικοί παράγοντες όπως στα αντίστοιχα πειράματα με αμμοϊλίες, επειδή όταν χρησιμοποιήθηκε διάλυμα NaCO_3 δημιουργήθηκαν συσσωματώματα καθώς επηρεάστηκαν οι δεσμοί μεταξύ των πλακιδίων καολινίτη. Ο πλήρης διαχωρισμός των πλακιδίων βασίστηκε αποκλειστικά σε πολύ καλή ανάδευση.

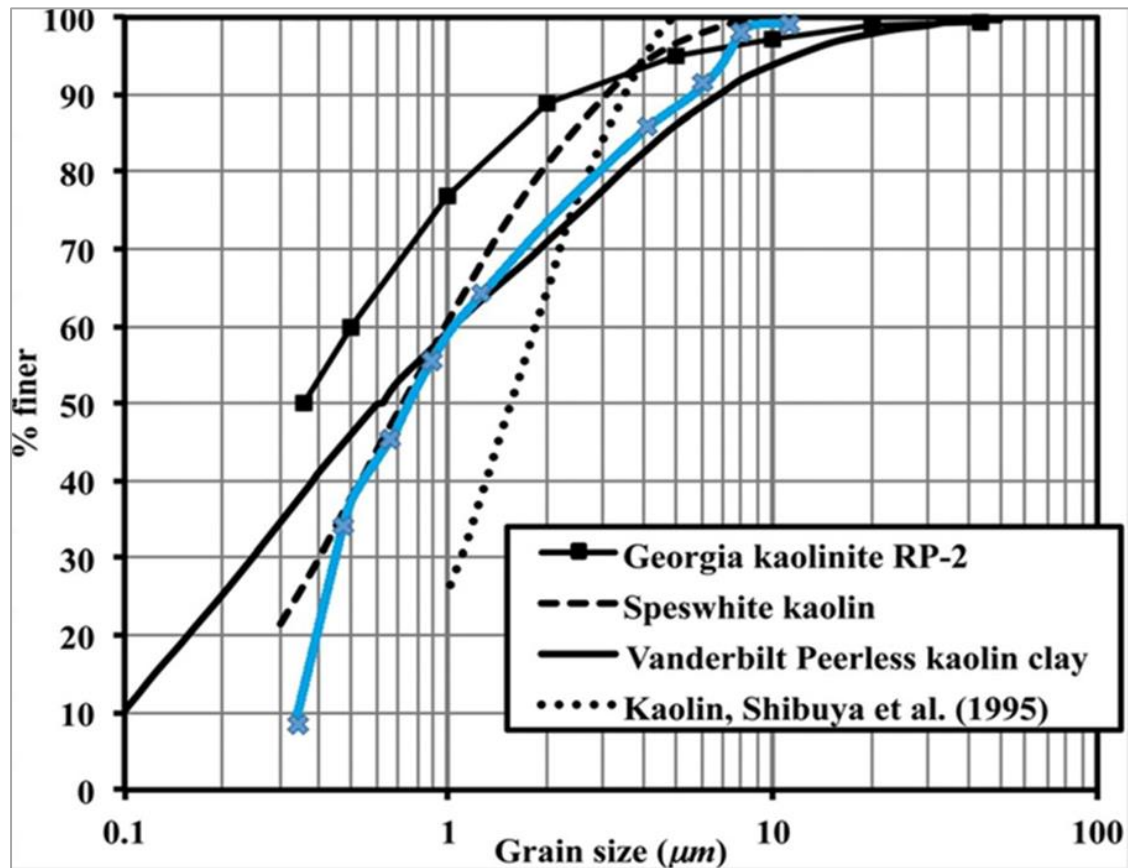


Σχήμα 3.5.1 Κοκκομετρική καμπύλη με αραιόμετρο για καολινίτη

Όπως φαίνεται από την παραπάνω κοκκομετρική καμπύλη στο Διάγραμμα 3.5.1 περίπου το 72 % του υλικού έχει διάμετρο κόκκων μικρότερη από 0,002 mm, δηλαδή το μεγαλύτερο ποσοστό του υλικού (72%) είναι αργιλικό ενώ ένα 27 % ανήκει στο φάσμα της ιλύος.

Το Σχήμα 3.5.2 παρουσιάζει τις κοκκομετρικές καμπύλες για τέσσερα διαφορετικά είδη καολινίτη. Παρατηρούμε ότι κάθε είδος καολινίτη έχει αρκετά διαφορετική κοκκομετρία, ωστόσο και τα τέσσερα είδη διαθέτουν ποσοστό σε αργιλικά σωματίδια

μεγαλύτερο από 60%. Παρατίθεται επίσης για σύγκριση η κοκκομετρική καμπύλη του καολινίτη της συγκεκριμένης διπλωματικής.



Σχήμα 3.5.2 Κοκκομετρικές καμπύλες για 4 διαφορετικούς καολινίτες (Πηγή: Xin Kang et al. 2014)

4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

4.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

Η εργαστηριακή δοκιμή του συμπίεσομέτρου για την μελέτη της συμπίεστότητας των εδαφών πραγματοποιείται σε μία συσκευή που ονομάζεται συμπίεσόμετρο ή οιδήμετρο. Η δοκιμή αυτή αποτελεί μία απ' τις πιο συνηθισμένες δοκιμές στα εργαστήρια εδαφομηχανικής λόγω των εκτεταμένων πρακτικών εφαρμογών της και της εκτέλεσής της με σχετικά απλές διαδικασίες. 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 ($\epsilon_{zz} \neq 0$, $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$). Κατά τη δοκιμή του συμπίεσομέτρου επιβάλλεται στο δοκίμιο φόρτιση κατά τον κατακόρυφο άξονα με διαδοχικά βήματα αύξησης της τιμής του φορτίου, 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 απαράμορφωτου, άκαμπτου μεταλλικού δακτυλίου που το περιβάλλει.

Δεδομένου ότι η στράγγιση του δοκιμίου επιτρέπεται μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και ότι τόσο το νερό των πόρων όσο και οι κόκκοι του εδάφους θεωρούνται ασυμπίεστοι, η όποια μεταβολή του όγκου κατά τη στερεοποίηση του δείγματος ισούται με την καθίζηση του δείγματος. Συνεπώς:

$$\Delta \epsilon_v = -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta H}{H} = -\frac{\Delta \nu}{\nu}$$

Επιπλέον, η σχέση που συνδέει τις οριζόντιες με τις κατακόρυφες τάσεις είναι:

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_v$$

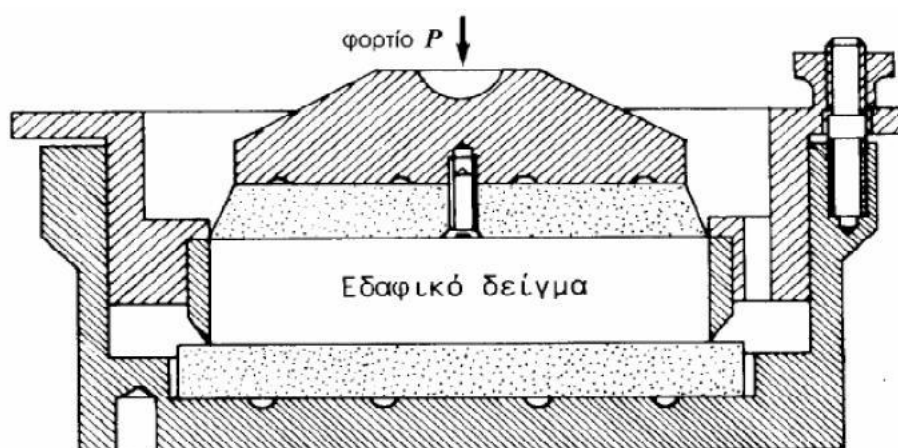
όπου K_o ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης, ο οποίος δεν είναι σταθερός για ένα συγκεκριμένο έδαφος αλλά ποικίλει με τον λόγο υπερστερεοποίησης. Για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους η τιμή του K_o είναι περίπου 0,7, ενώ για έντονα υπερστερεοποιημένους αργίλους μπορεί να είναι και μεγαλύτερη της μονάδας. Ο πιο συνήθης τρόπος για να υπολογιστεί το K_o είναι σύμφωνα με το Jaky: $K_o = 1 - \sin \phi$ (όπου ϕ η γωνία τριβής). Με την παραδοχή της γραμμικής ισότροπης ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$K_o = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης συμπίεσης μπορούν να παρουσιασθούν σε διάγραμμα $\ln p' - v$, όπου η μέση ενεργός τάση p' συνδέεται με την κατακόρυφη σ'_v και την οριζόντια σ'_h ενεργό τάση, οι οποίες θεωρούνται κύριες τάσεις, μέσω της σχέσης:

$$p' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - u_o = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$$

Μπορούν επίσης να παρουσιαστούν σε διάγραμμα $\ln \sigma'_v - v$, από το οποίο προκύπτουν και οι σταθερές συμπίεστότητας.



Εικόνα 4.1.1 Κατακόρυφη τομή της εργαστηριακής διάταξης της δοκιμής συμπιεσόμετρου (Πηγή: Καββαδάς, 2007)

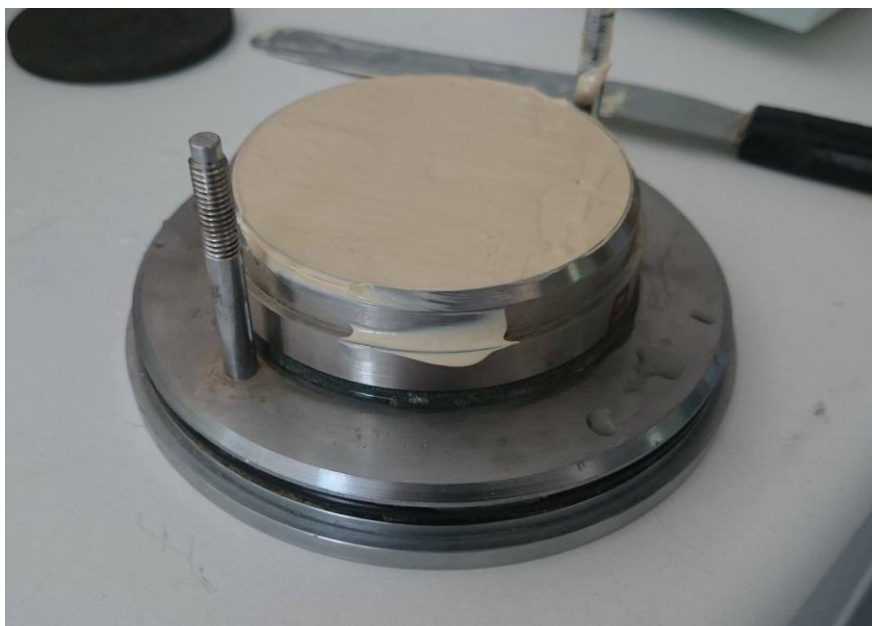
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

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

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν δημιουργήθηκαν από αναζυμωμένο καολινίτη. Παρασκευάστηκαν με ανάμειξη του υλικού με απεσταγμένο νερό. Το φυσικό υλικό αναμείχθηκε με νερό ώστε να επιτευχθούν σχετικές υγρασίες περίπου 1,4 έως 1,5 W_{LL} , όπου W_{LL} το όριο υδαρότητας. Η υγρασία αυτή επιλέχθηκε σύμφωνα με τον Burland ο οποίος στα πειράματά του χρησιμοποίησε αναζυμωμένα υλικά με υγρασίες από 1 W_{LL} έως 1,5 W_{LL} .

Στη συνέχεια το υλικό τοποθετείται στο μεταλλικό δακτύλιο μέσα στην κυψέλη της συσκευής με προσοχή ώστε να μην παγιδευτούν φυσαλίδες αέρα μέσα στο δοκίμιο. Προκειμένου να διαφύγει ο πιθανά παγιδευμένος αέρας υποβάλουμε την κυψέλη σε

μικροδομήσεις μέχρι να σταματήσουν να εμφανίζονται φυσαλίδες στην επιφάνειά του υλικού. Πάνω και κάτω από το δοκίμιο τοποθετούνται δύο πορώδεις δίσκοι (πορόλιθοι). Οι πορόλιθοι βρίσκονται ήδη εμβαπτισμένοι σε απεσταγμένο νερό ώστε τα κενά πόρων να είναι κορεσμένα με νερό και να μην απορροφήσουν υγρασία από το δοκίμιο. Ο κάτω πορόλιθος εφαρμόζει πάνω στην κυψέλη και ο πάνω ανάλογα με την κυψέλη, είτε είναι βιδωμένος στο μεταλλικό τμήμα (top cup), μέσω του οποίου επιβάλλεται το φορτίο, είτε είναι μεμονωμένος και τοποθετείται κάτω από το top cup. Έτσι εξασφαλίζεται η πλήρης πάνω και κάτω στράγγιση του δοκιμίου χωρίς να υπάρχει απώλεια εδαφικού υλικού. Στη συνέχεια τοποθετείται το μεταλλικό τμήμα (top cup) πάνω στο δοκίμιο και ρυθμίζεται κατάλληλα η συσκευή ώστε να εξαλειφθούν οι διαφορικές καθιζήσεις και οι μετρήσεις του μηκυνσιομέτρου για τα διάφορα φορτία να είναι έγκυρες. Το top cup έχει υπολογίσιμο βάρος και προκαλεί σημαντική καθίζηση στο δοκίμιο που βρίσκεται σε υδαρή κατάσταση. Έτσι μετά την τοποθέτηση του γίνεται καταγραφή της ένδειξης του μηκυνσιομέτρου και υπολογίζεται το νέο ύψος του δοκιμίου. Παράλληλα πρέπει να ρυθμιστεί ο βραχίονας της συσκευής ώστε να έχει επαρκές εύρος κίνησης στην αρχή του πειράματος ώστε να μη χρειαστεί η διακοπή του εξαιτίας περιορισμού στη μετακίνηση του βραχίονα. Τέλος όταν όλα έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα, η κυψέλη πληρώνεται με νερό και παραμένει έτσι ώστε το δοκίμιο να διατηρείται κορεσμένο καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 4.2.1 Υλικό σε υδαρή κατάσταση στην κυψέλη συμπιεσομέτρου

Ακολουθεί η διαδικασία φόρτισης του δοκιμίου. Επειδή το δοκίμιο βρίσκεται σε υδαρή κατάσταση όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προηγήθηκε μία μικρή φόρτιση με το βάρος του πορόλιθου και του μεταλλικού καλύμματος (top cup), η οποία έγινε με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μη διαφύγει το υλικό από τα όρια κυψέλης - πορόλιθου. Έπειτα ακολουθεί η τυπική σειρά φορτίσεων η οποία περιλαμβάνει τα

παρακάτω βάρη: 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16, 32, 64, 128, 256 (kg) για τη συσκευή WF και 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16, 32, 64, 128 (kg) για τη συσκευή Matest. Κάθε φορτίο παραμένει αμετάβλητο για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση. Οι 24 ώρες είναι μία συνήθης διάρκεια διατήρησης της ίδιας φόρτισης. Οι συντελεστές στερεοποίησης δεν πρόκειται να μελετηθούν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επομένως δεν έγιναν καταγραφές στις πρώτες δύο ώρες των 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. Μετά την απομάκρυνση και του τελευταίου φορτίου, η κυψέλη αποσυναρμολογείται και το δοκίμιο εξάγεται από τον 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 (διάμετρος, 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 μηκυσιόμετρου 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:

$$\Delta \epsilon_{vol} = \Delta \epsilon_z = - \Delta H / H_0$$

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

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

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 ξήρανσή 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 4.2.1 και 4.2.2 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		
W=1kG	2 ^η τρύπα	3 ^η τρύπα
(g=9,81 m/sec ²)	(1:9,82)	(1:11,04)
d=50mm	49,358	55,490
E=19,635 cm ²		
d=75mm	21,911	24,633
E=44,179 cm ²		
Μέγιστο φορτίο : 400 kg		

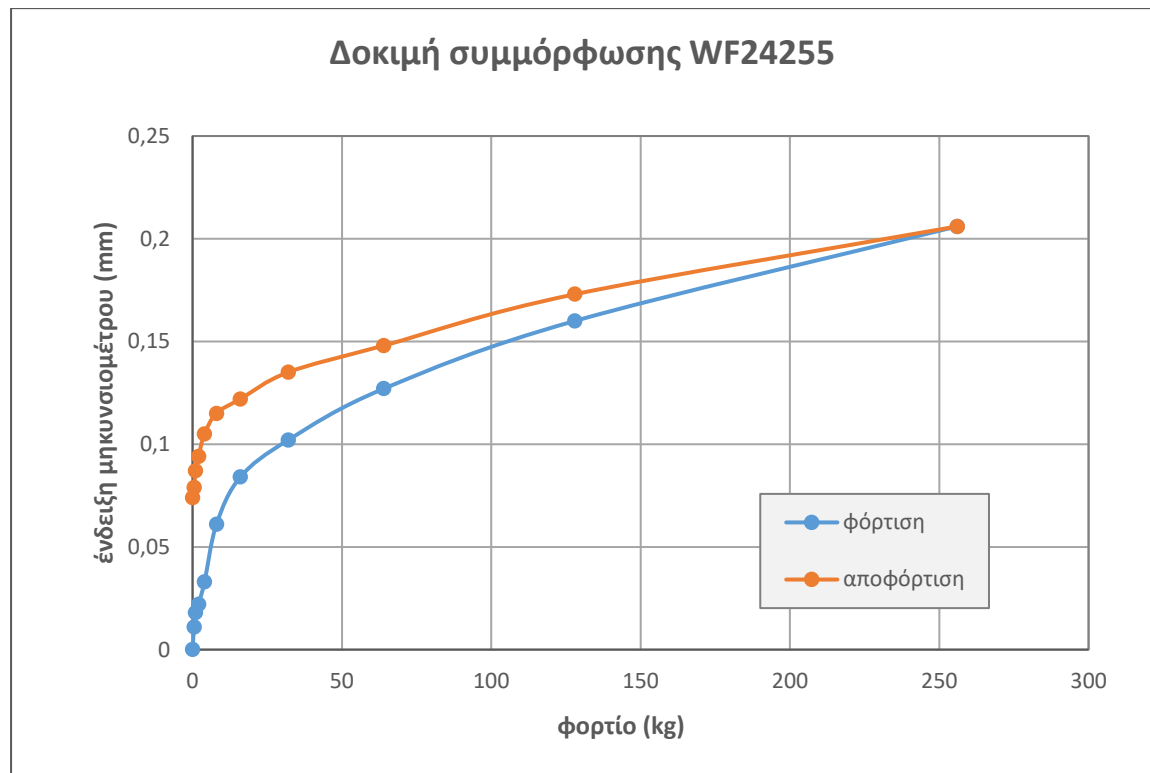
Πίνακας 4.2.1 Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή WF 24255 για φόρτιση 1 kg

Matest			
W=1kG	1 ^η τρύπα	2 ^η τρύπα	3 ^η τρύπα
(g=9,81 m/sec ²)	(1:9)	(1:10)	(1:11)
d=50mm	44,966	49,962	54,958
E=19,635 cm ²			
d=70mm	22,942	25,401	28,04
E=38,485 cm ²			
d=75mm	19,985	22,205	24,426
E=44,179 cm ²			
Μέγιστο φορτίο : 165 kg			
Wμεταλλικού πλαισίου : 1800 kg			

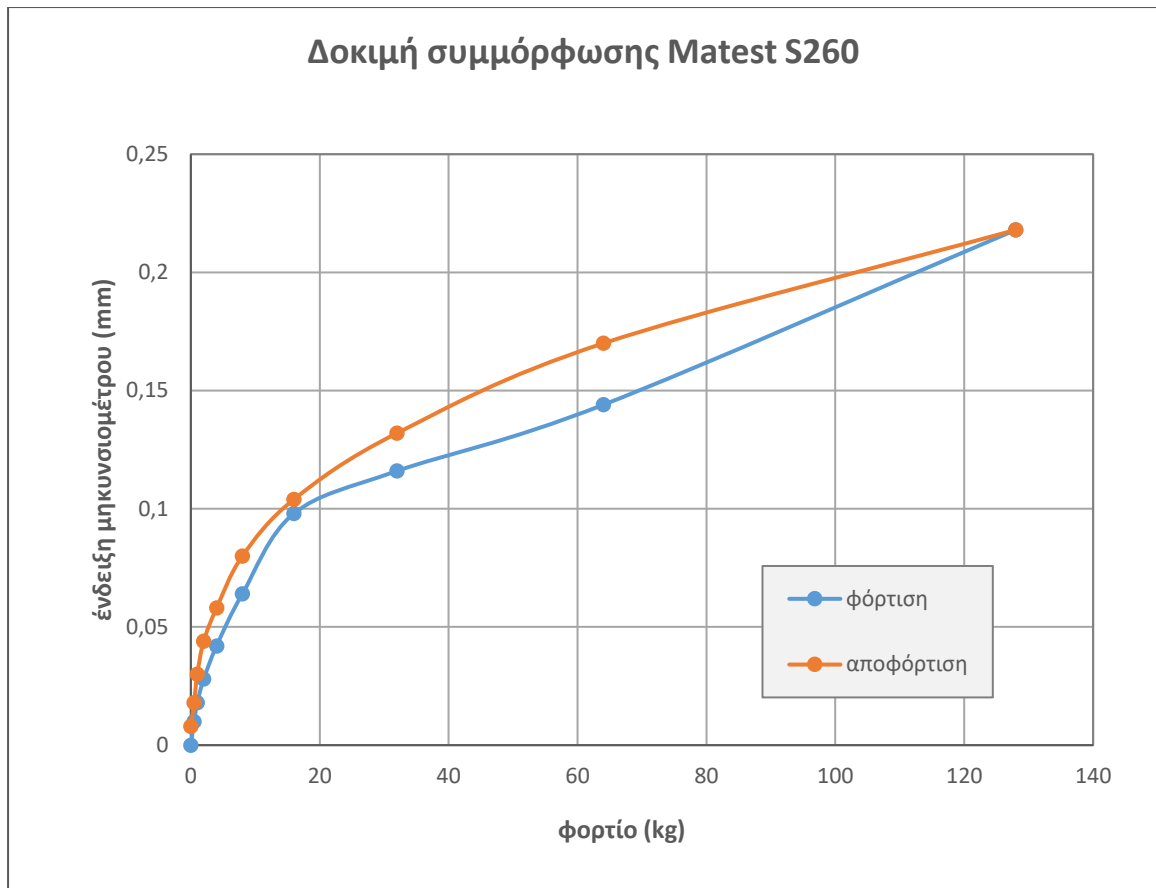
Πίνακας 4.2.2 Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή Matest S260 για φόρτιση 1 kg

4.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΑ ΜΑΤΕΣΤ S260 ΚΑΙ WF 24255

Κατά τη δοκιμή συμμόρφωσης τοποθετείται στη συσκευή συμπιεσομέτρου μεταλλικό δοκίμιο αντι για εδαφικό και φορτίζεται με την ίδια ακολουθία φορτίσεων που αντιστοιχεί στα εδαφικά δοκίμια. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε να ληφθεί υπόψιν η ελαστικότητα του πλαισίου και οι όποιες επιρροές της κάμψης των επιφανειών φόρτισης. Έτσι το μέγεθος της παραμόρφωσης που θα μετράται κατά το πείραμα και θα οφείλεται στη συσκευή θα αφαιρείται από το ολικό. Ακολουθούν τα διαγράμματα των δοκιμών συμμόρφωσης για κάθε συσκευή:



Σχήμα 4.3.1 Αποτελέσματα της δοκιμής συμμόρφωσης της συσκευής WF24255



Σχήμα 4.3.2 Αποτελέσματα της δοκιμής συμμόρφωσης της συσκευής Matest S260

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

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 ($\log \sigma'_v$). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3 (αναζυμωμένα υλικά) οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης μπορούν να κανονικοποιηθούν με τη χρήση του δείκτη κενών I_v , ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*}$$

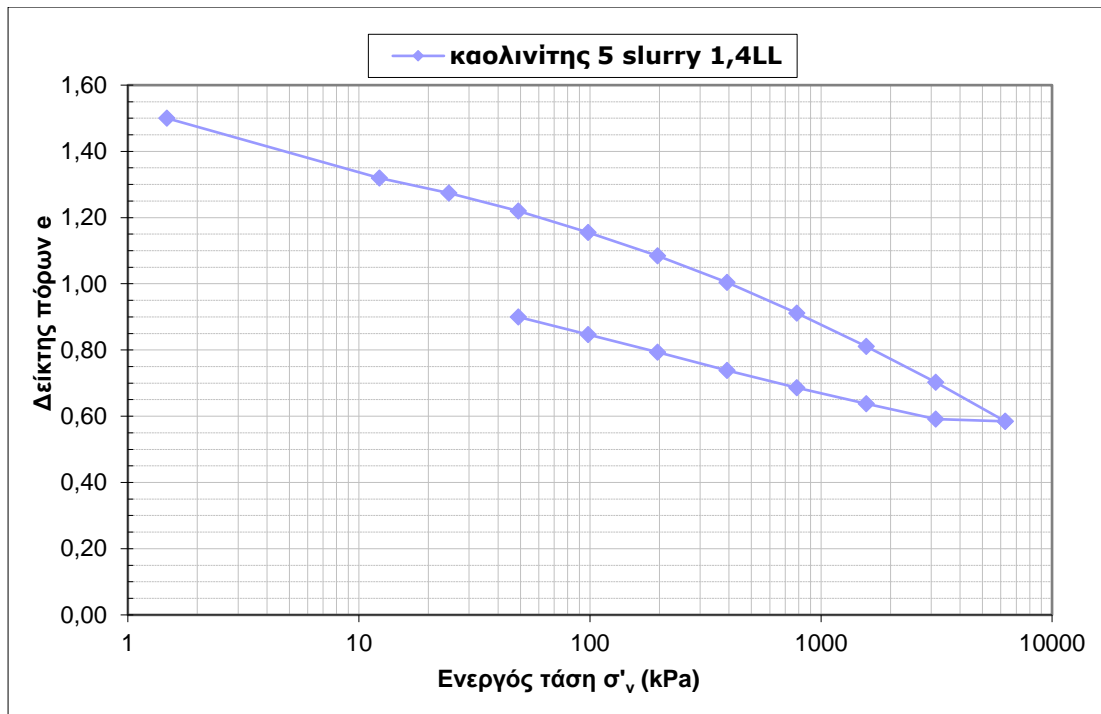
Ο αστερίσκος (*) αναφέρεται στις εγγενείς ιδιότητες, δηλαδή σε μετρήσεις που αφορούν το αναζυμωμένο υλικό, ενώ ο δείκτης του συμβόλου στο μέγεθος της κατακόρυφης ενεργού τάσης, δηλαδή:

e_{100}^* : ο δείκτης κενών του αναζυμωμένου υλικού για $\sigma'_v=100$ kPa

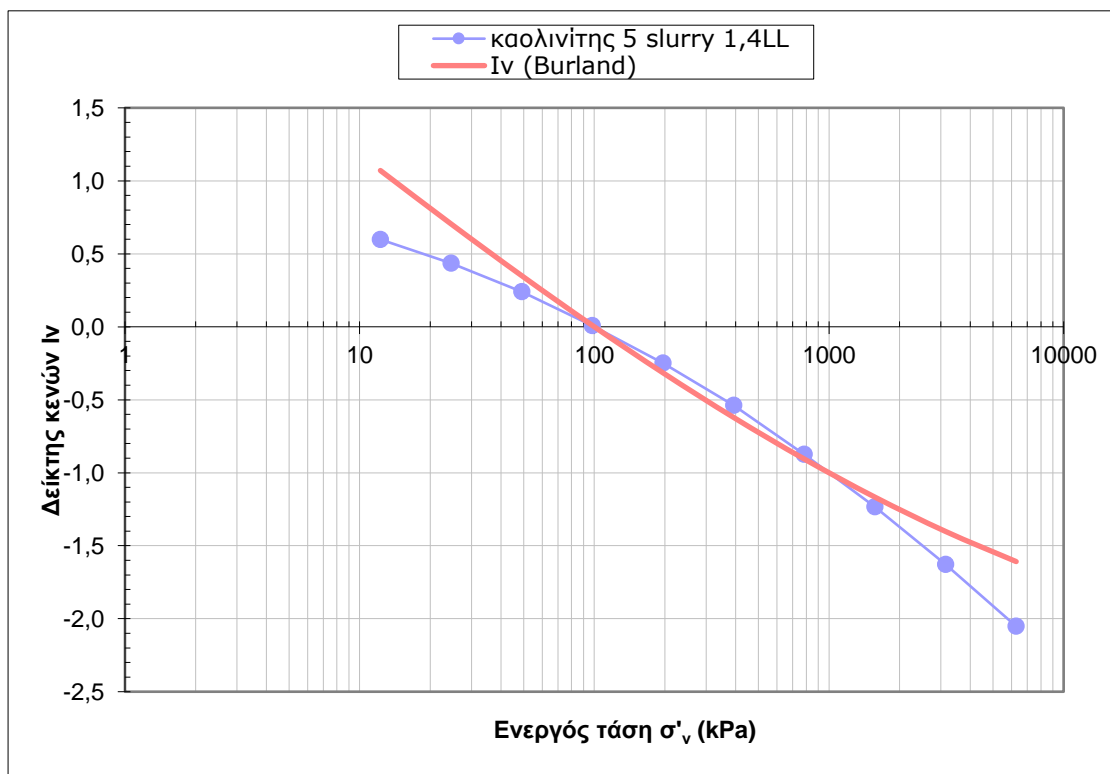
e_{1000}^* : ο δείκτης κενών του αναζυμωμένου υλικού για $\sigma'_v=1000$ kPa

Έτσι 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 θεωρητική καμπύλη του Burland(1990) που προκύπτει από τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στο τέλος παρουσιάζονται όλες οι δοκιμές συγκεντρωμένες σε ένα διάγραμμα. Για κάθε δοκίμιο δίνεται η υγρασία του στην αρχή του πειράματος συναρτήσει του ορίου υδαρότητας W_{LL} του υλικού.

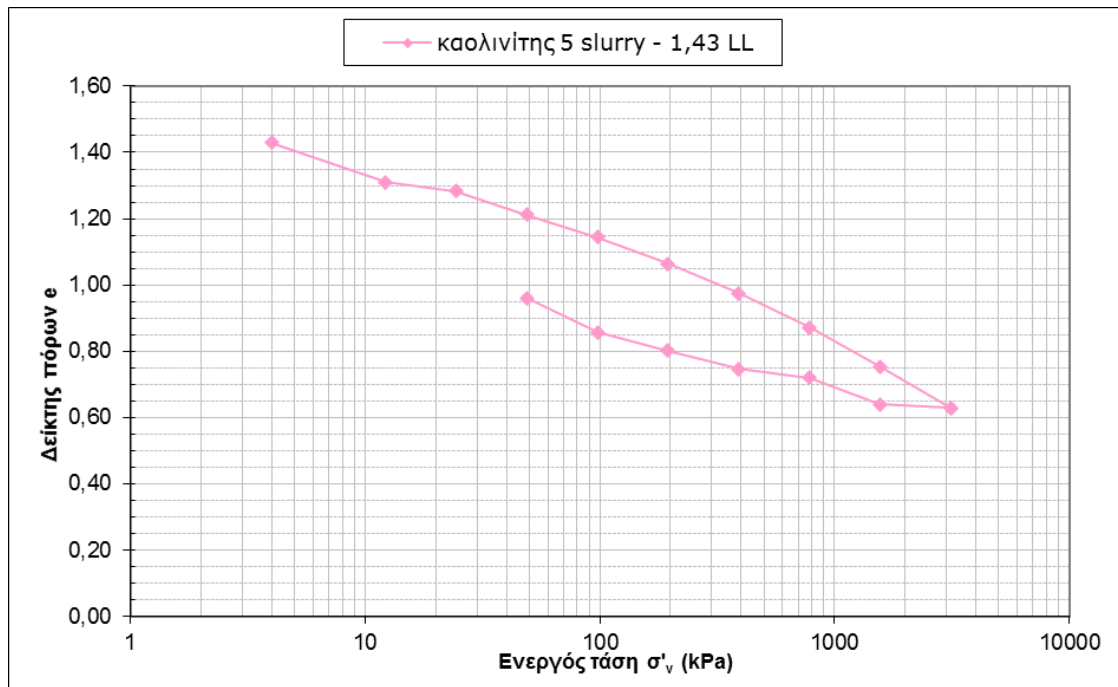
Τα τέσσερα δείγματα είχαν λίγο διαφορετικά ποσοστά υγρασίας που κυμαίνονταν από 1,4LL που αντιστοιχεί σε ποσοστό υγρασίας 66% έως 1,49LL που αντιστοιχεί σε 70,2% ποσοστό υγρασίας. Οι αρχικές τιμές δείκτη πόρων προσδιορίστηκαν μεσω της σχέσης $e_L=W_{LL} \cdot G_s$. Τα διαγράμματα στα παρακάτω σχήματα δείχνουν τις καμπύλες στερεοποίησης και αποφόρτισης για τις 4 δοκιμές συμπιεσόμετρου που πραγματοποιήθηκαν.



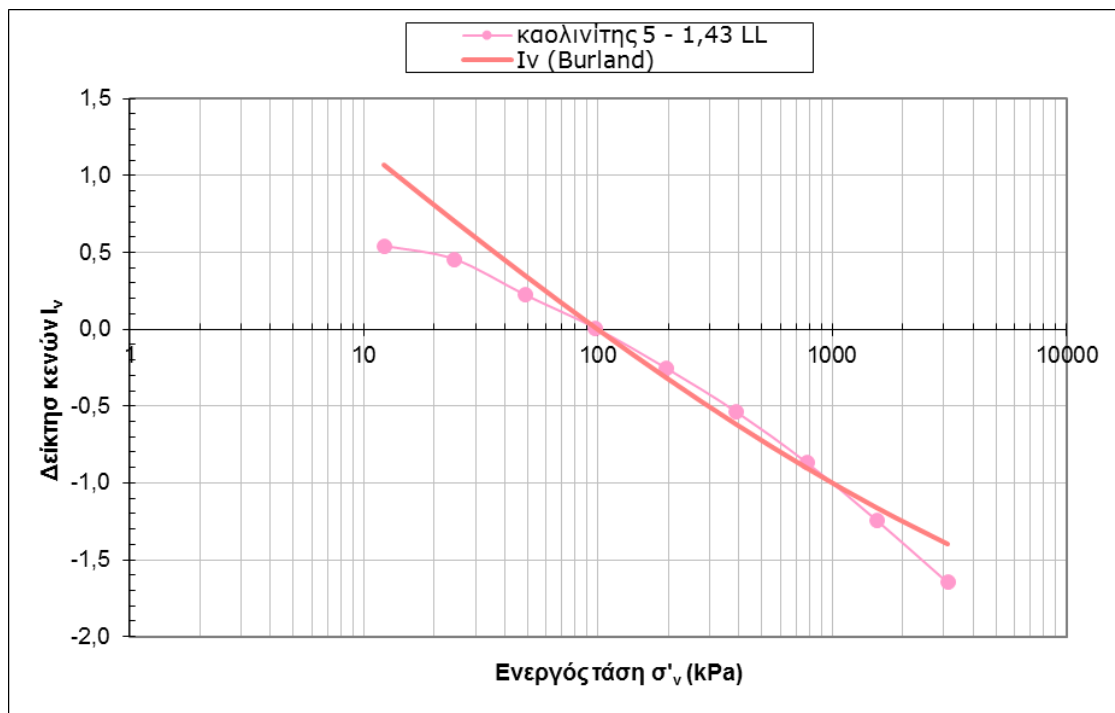
Σχήμα 4.4.1 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_o=1,4LL=66\%$



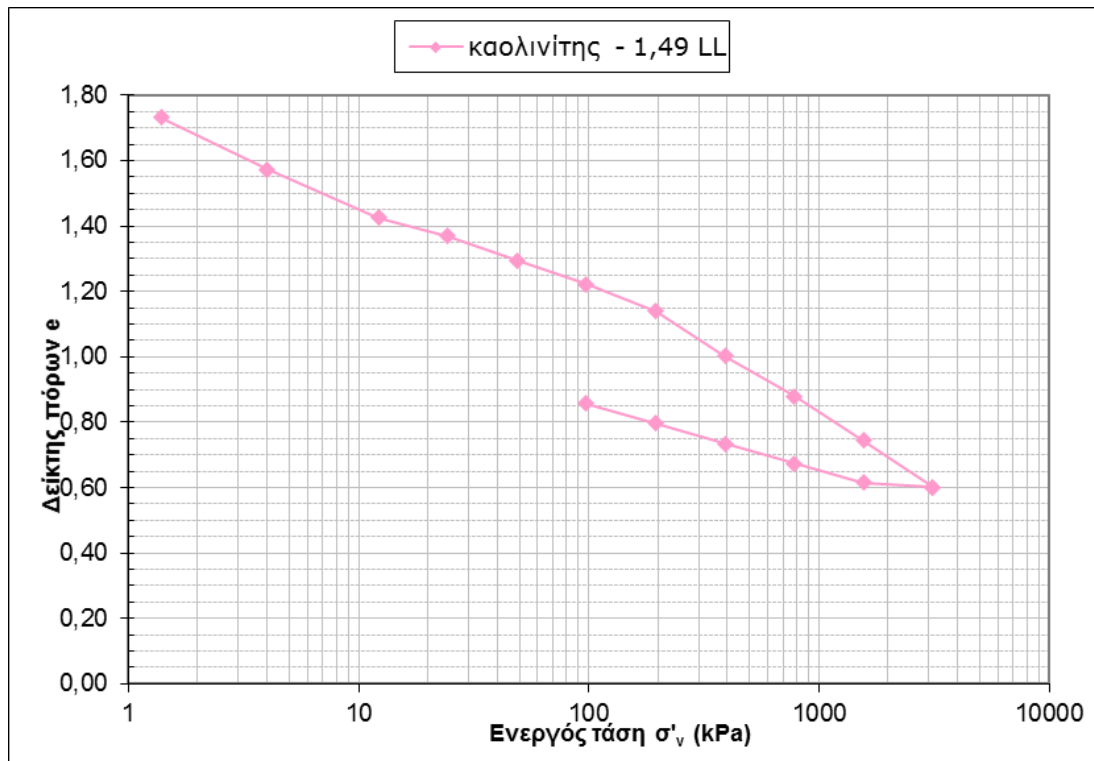
Σχήμα 4.4.2 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_o=1,4LL=66\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



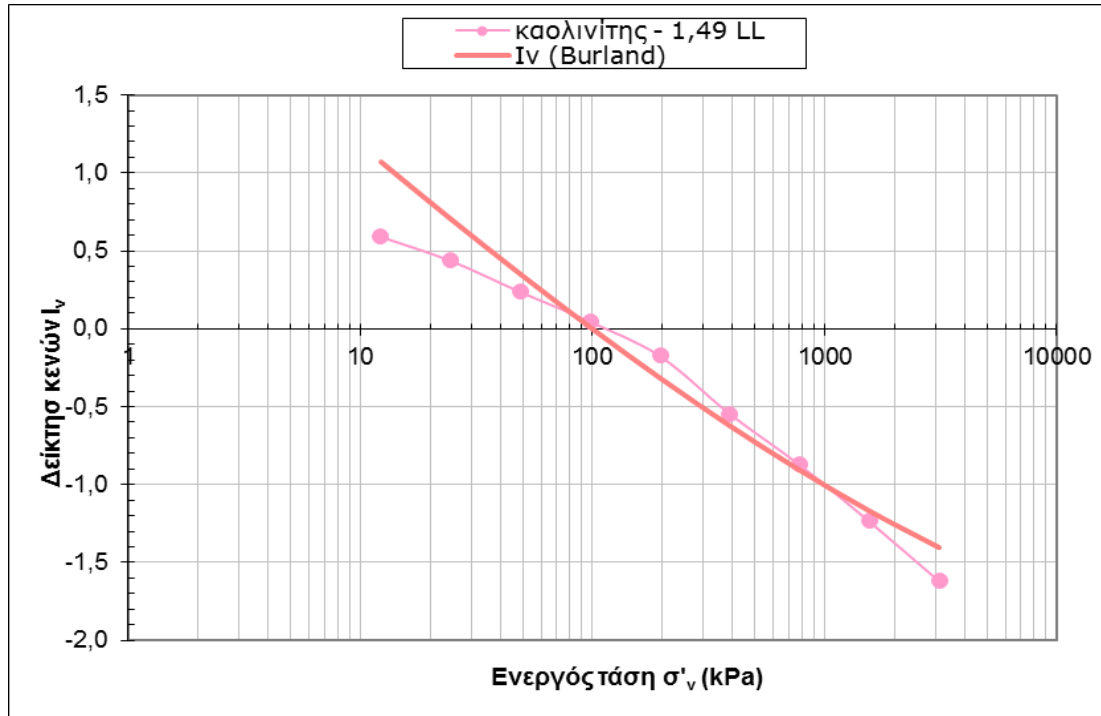
Σχήμα 4.4.3 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_o=1,43LL=67\%$



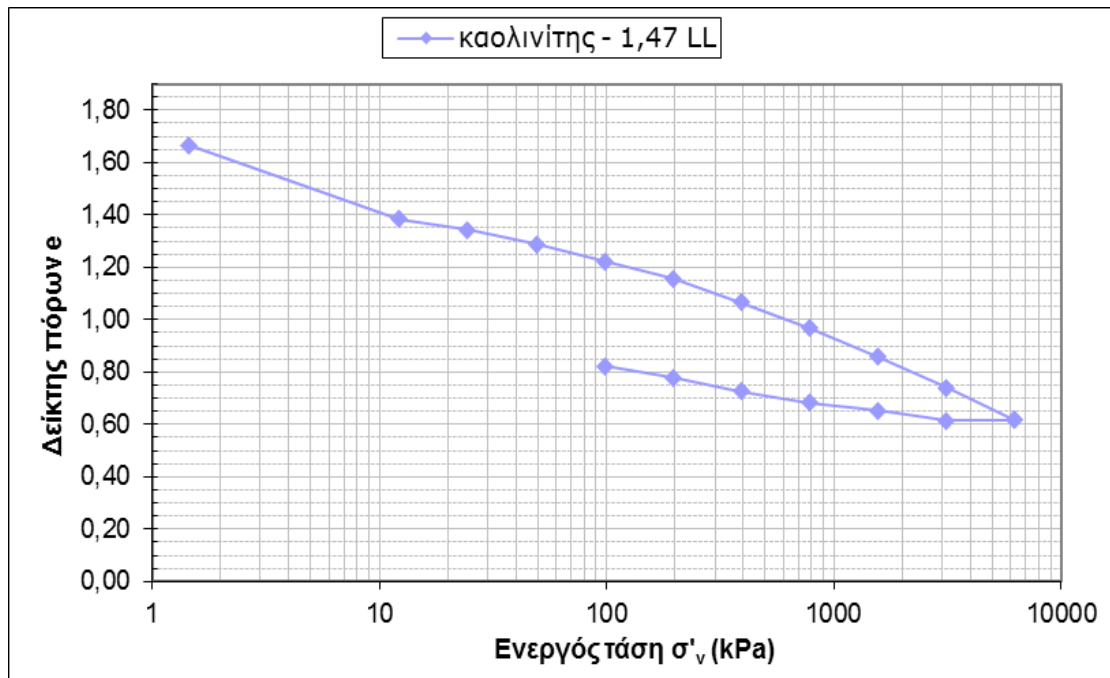
Σχήμα 4.4.4 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_o=1,43LL=67\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



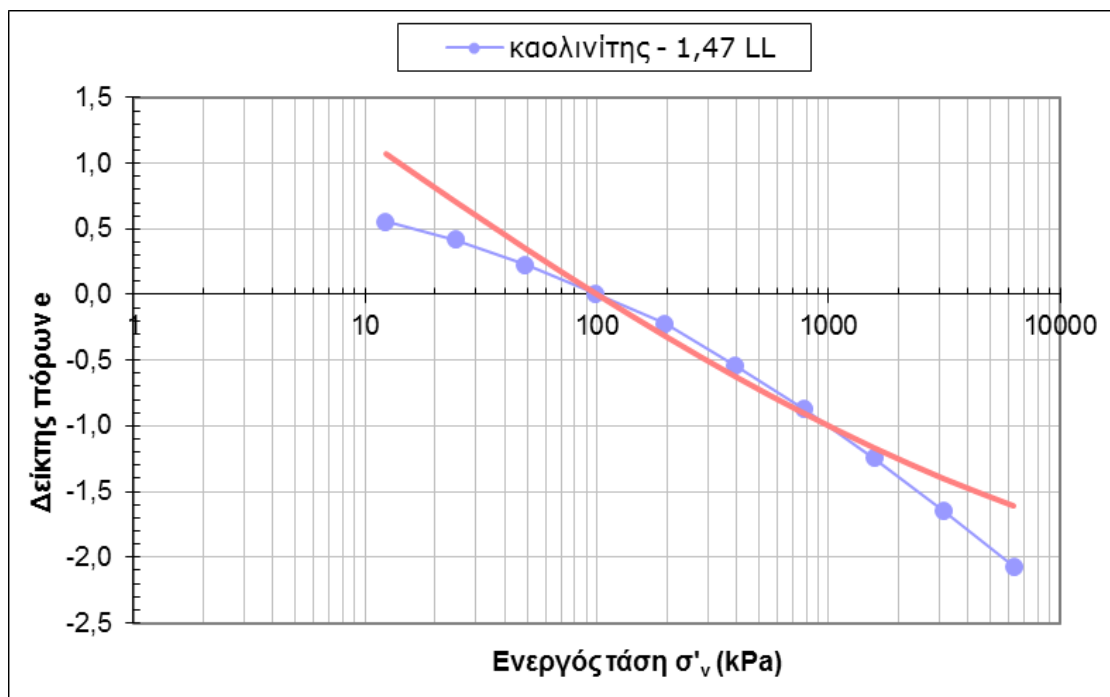
Σχήμα 4.4.5 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_o=1,49LL=70,2\%$



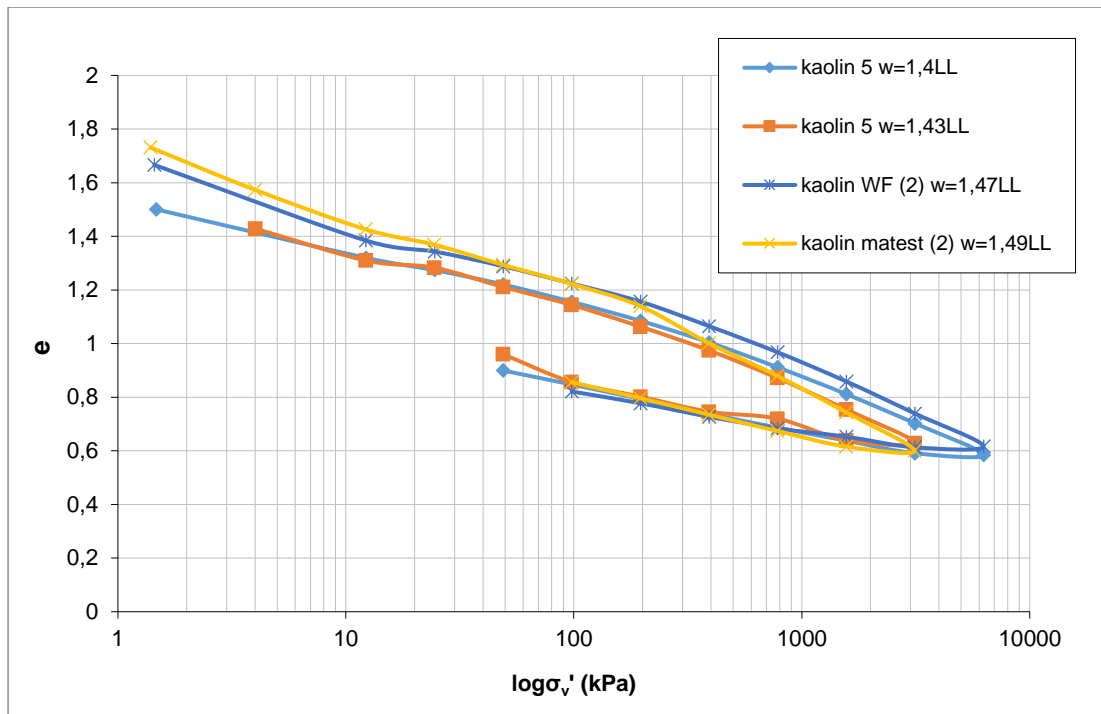
Σχήμα 4.4.6 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_o=1,49LL=70,2\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland



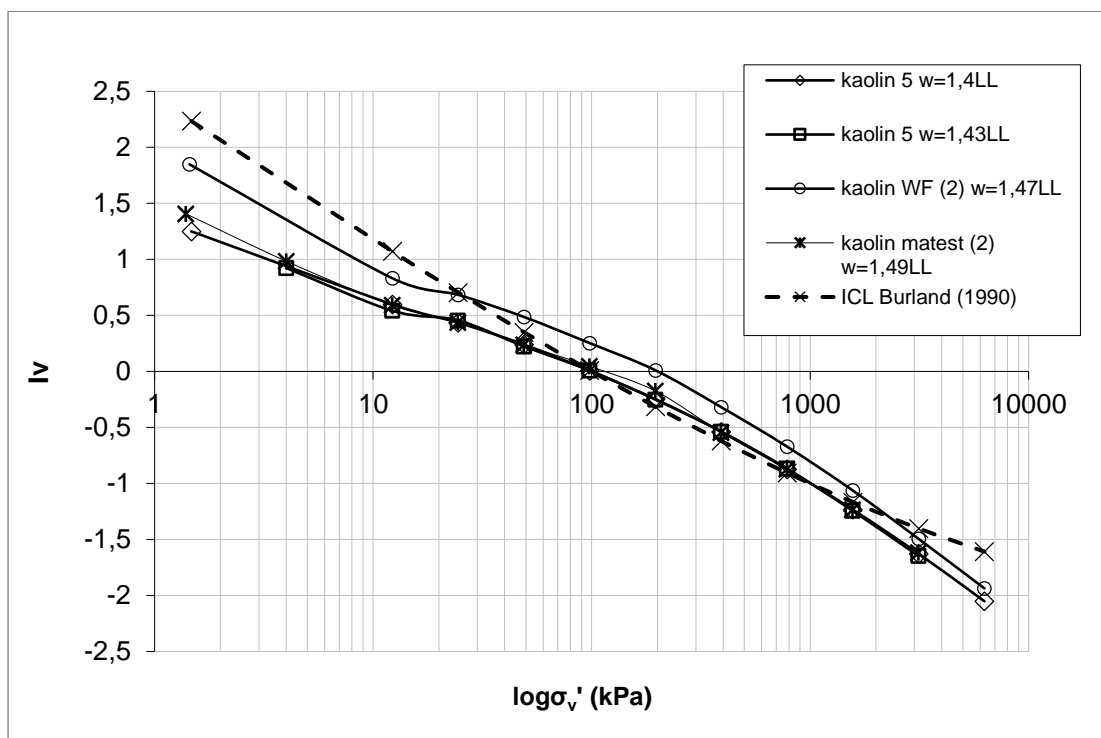
Σχήμα 4.4.7 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_0=1,47LL=69,3\%$



Σχήμα 4.4.8 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=1,47LL=69,3\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland

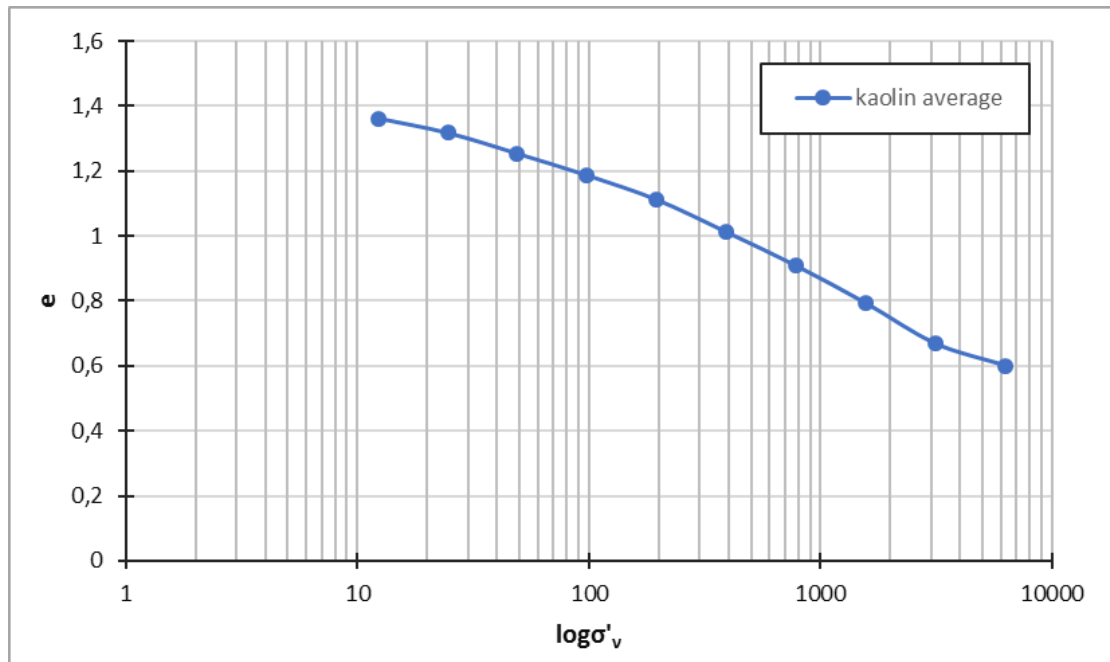


Σχήμα 4.4.9 Πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν

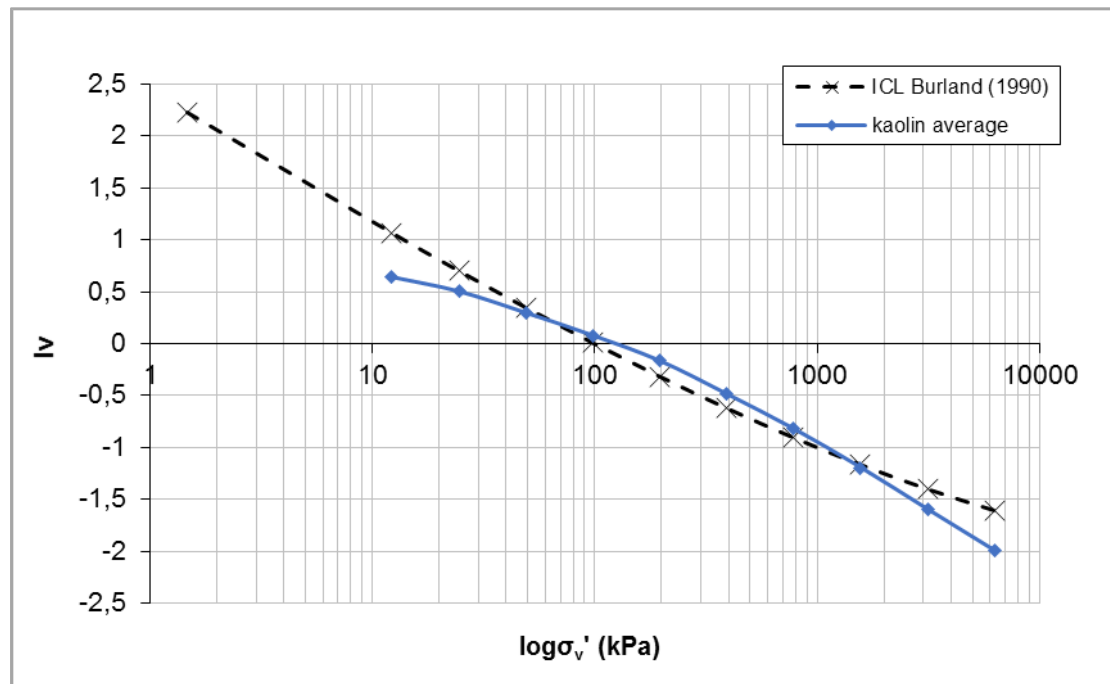


Σχήμα 4.4.10 Πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν και σύγκριση με τη θεωρητική καμπύλη Burland

Τα διαγράμματα 4.4.11 και 4.4.12 προκύπτουν από το μέσο όρο των παραπάνω καμπυλών στερεοποίησης. Επιλέχθηκε να ληφούν οι τιμές για φόρτιση μετά τα 10 kPa, καθώς οι προηγούμενες μετρήσεις αφενός επηρεάζονται από τα ποσοστά υγρασίας και αφετέρου από τη διαδικασία με την οποία πραγματοποιούμε τη δοκιμή σε υδαρή δείγματα.

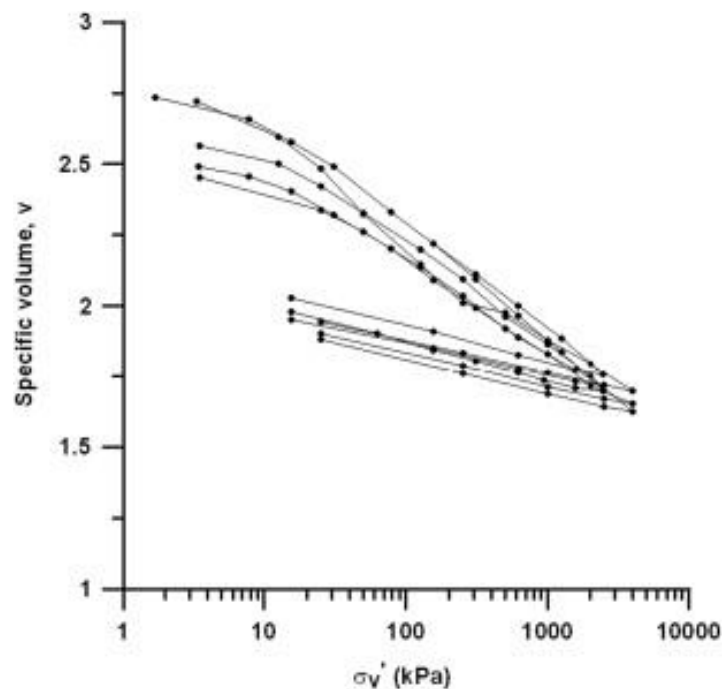


Σχήμα 4.4.11 Μέση καμπύλη στερεοποίησης



Σχήμα 4.4.12 Κανονικοποιημένη μέση καμπύλη στερεοποίησης

Από τα αποτελέσματα των συμπίεσομέτρων παρατηρούμε ότι οι καμπύλες στερεοποίησης συντρέχουν με μικρή διασπορά και για τις τέσσερις δοκιμές το οποίο φαίνεται και όταν κανονικοποιούνται στο διάγραμμα με τον δείκτη κενών I_v . Τα διαφορετικά σημεία αφετηρίας των καμπυλών στερεοποίησης στα διαγράμματα e - $\log \sigma'_v$ οφείλονται στις μικρές διαφορές στην αρχική υγρασία των δειγμάτων καολινίτη. Όσο αυξάνεται όμως η ενεργός τάση οι καμπύλες φαίνεται να ταυτίζονται και δεν παρατηρείται παράλληλη μετάθεση, η οποία είναι χαρακτηριστικό συμπεριφοράς των άμμων. Σε όλες τις δοκιμές παρατηρούμε αλλαγή της κλίσης των κλάδων φόρτισης μετά τα πρώτα 10 kPa. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στην διαδικασία διεξαγωγής της δοκιμής. Επειδή το υλικό βρίσκεται σε υδαρή κατάσταση όταν τοποθετείται στην κυψέλη του συμπίεσομέτρου, αρχικά φορτίζεται σταδιακά με μικρά βάρη για να μην υπάρξει διαφυγή υλικού από τα όρια πορόλιθου-κυψέλης. Δηλαδή, η διαφορά στην κλίση οφείλεται στους διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης. Παρατηρούμε ακόμα ότι οι καμπύλες στερεοποίησης δεν είναι ευθείες γραμμές όπως θα περιμέναμε από μία αναζυμωμένη άργιλο σύμφωνα με τον Burland. Αυτό φαίνεται περισσότερο στα κανονικοποιημένα διαγράμματα δείκτη κενών I_v όπου οι καμπύλες συγκρίνονται με τη θεωρητική του Burland. Οι κλάδοι φόρτισης του υλικού παρουσιάζουν ήπια καμπυλότητα με τα κοίλα προς τα κάτω. Έτσι οι καμπύλες ξεκινούν και καταλήγουν κάτω από τη θεωρητική καμπύλη Burland, ενώ την ξεπερνούν για ενεργό κατακόρυφη τάση από 100 kPa έως 1000 kPa. Η καμπύλωση αυτή είναι πιθανό να οφείλεται στο πολύ χαμηλό όριο πλαστιμότητας του συγκεκριμένου καολινίτη, που πλησιάζει αυτό της μάργας. Παρατηρούμε επίσης πως ο κλάδος αποφόρτισης έχει μεγάλη σχετικά κλίση, χαρακτηριστικό της ελαστικότητας του υλικού.



Σχήμα 4.4.13 Καμπύλες στερεοποίησης αναζυμωμένου καολινίτη (Πηγή: Shipton, Coop)

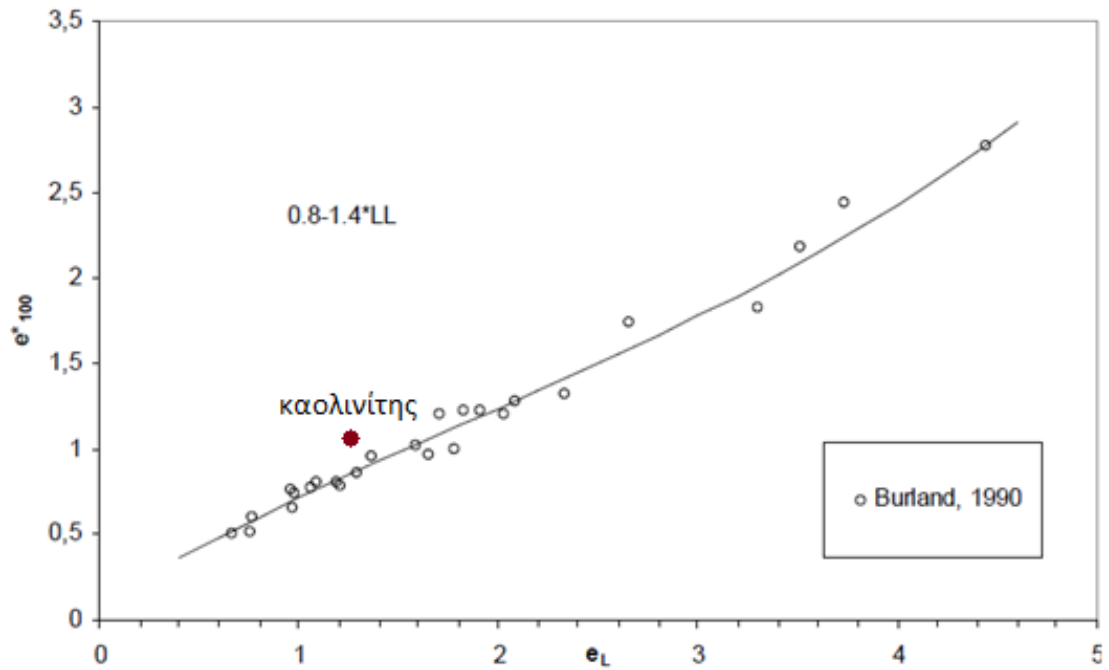
Στο Σχήμα 4.4.13 φαίνονται οι καμπύλες στερεοποίησης για έναν αναζύμωμένο καολινίτη σύμφωνα με τους Shipton και Coop. Σε αντίθεση με τον καολινίτη αυτής της διπλωματικής εργασίας, οι ευθύγραμμοι κλάδοι φόρτισης του Σχήματος 4.4.13 δείχνουν την αργλική συμπεριφορά του υλικού.

Στον Πίνακα 4.4.1 συγκεντρώνονται τα εγγενή χαρακτηριστικά του υλικού όπως προέκυψαν από τις 4 δοκιμές συμπίεσομέτρου. Οι τιμές του δείκτη πόρων στα 100 kPa και στα 1000 kPa (e_{100}^* και e_{1000}^*) υπολογίστηκαν με γραμμική παρεμβολή των κοντινών τιμών δείκτη πόρων και ενεργού τάσης. Οι σταθερές συμπίεστότητας όπως προέκυψαν από τις τέσσερις δοκιμές συμπίεσομέτρου δίνονται στον Πίνακα 4.4.1. Ο μέσος όρος αυτών των τιμών υπολογίστηκε $C_c^*=0,314$ και $C_s^*=0,172$. Η υψηλή τιμή του C_s^* επιβεβαιώνει την μεγάλη κλίση του κλάδου αποφόρτισης που παρατηρήσαμε στα παραπάνω διαγράμματα.

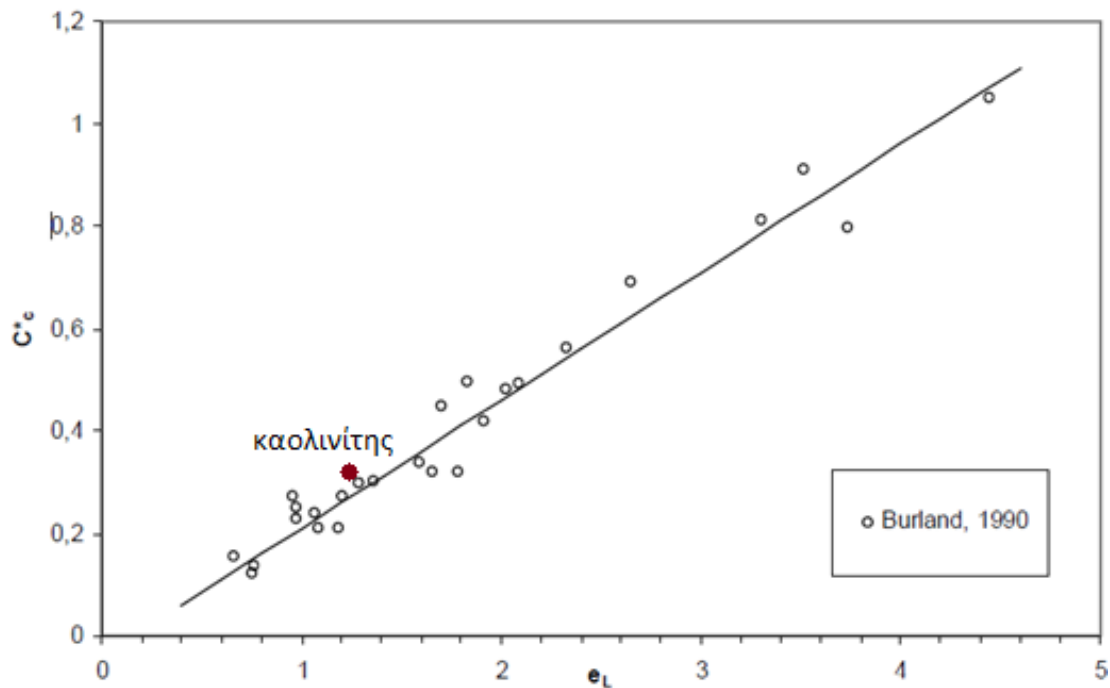
α/α δοκιμής	Αρχική υγρασία	e_{100}^*	e_{1000}^*	C_c^*	C_s^*
1	66%	1,154	0,876	0,277	0,176
2	67%	1,141	0,830	0,311	0,164
3	70,2%	1,205	0,831	0,374	0,201
4	69,3%	1,222	0,930	0,292	0,147
	Μέσος όρος :	1,181	0,867	0,314	0,172

Πίνακας 4.4.1 Δοκιμές συμπίεσομέτρου που πραγματοποιήθηκαν

Ο Burland εισήγαγε μία μέθοδο συσχέτισης των σταθερών εγγενούς συμπίεστότητας C_c και e_{100} και των ορίων Atterberg με βάση τα πινακοποιημένα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης σε μεγάλο πλήθος αναζυμωμένων υλικών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία κατέληξε ο Burland, καθώς και η θέση του καολινίτη πάνω σε αυτά.



Σχήμα 4.4.14 Καμπύλη συσχέτισης e^*_{100} και e_L και θέση καοлинίτη (Πηγή: Burland, 1990)



Σχήμα 4.4.15 Καμπύλη συσχέτισης C^*_c και e_L και θέση καοлинίτη (Πηγή: Burland, 1990)

Το Σχήμα 4.4.14 δείχνει τη σχέση του δείκτη πόρων του αναζυμωμένου υλικού για ενεργό τάση $\sigma'_v = 100$ kPa (e^*_{100}) με το δείκτη πόρων του υλικού που αντιστοιχεί στο όριο υδαρότητας και υπολογίζεται από τη σχέση $e_L = W_{LL} * G_s$, ενώ στο Σχήμα 4.4.15 παρουσιάζεται η συσχέτιση του δείκτη συμπίεσότητας C^*_c με το e_L .

Με στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων κατέληξε στις εξής σχέσεις :

$$e^*_{100}=0,109+0,679e_L-0,089e_L^2+0,016e_L^3$$

$$C^*_c=0,256e_L-0,04$$

όπου e_L ο δείκτης πόρων του εδαφικού υλικού για υγρασία ίση με το όριο υδαρότητας.

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τιμές του e_L μεταξύ 0,6 και 4,5. Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι για εδαφικά υλικά που βρίσκονται κάτω από τη γραμμή A του χάρτη Casagrande οι σχέσεις αυτές μπορεί να δώσουν ανακριβή αποτελέσματα.

Το όριο υδαρότητας του καολίνη έχει υπολογιστεί $W_{LL}=47\%$, το οποίο αντιστοιχεί σε $e_L=1,227$ και άρα από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει $e^*_{100}=0,838$ και $C^*_c=0,274$. Οι τιμές αυτές είναι μικρότερες από αυτές που υπολογίσαμε πειραματικά ($e^*_{100}=1,181$ και $C^*_c=0,314$), αλλά βρίσκονται στα όρια της διασποράς των πειραματικών δεδομένων στα διαγράμματα του Burland. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το υλικό μας βρίσκεται χαμηλότερα από τη γραμμή A στο χάρτη πλασιμότητας και όπως προαναφέρθηκε οι τιμές των εξισώσεων μπορεί να είναι ανακριβείς για τα υλικά που βρίσκονται κάτω από την γραμμή A.

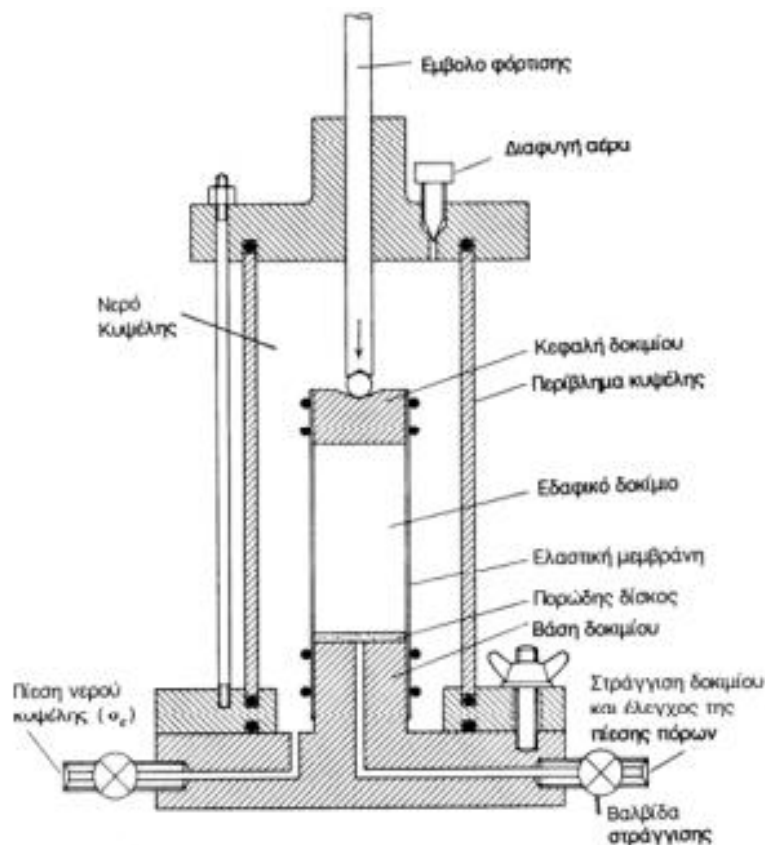
5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΗΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ



Εικόνα 4.4.1 Τριαξονική συσκευή εργαστηρίου εδαφομηχανικής ΕΜΠ

5.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Στο σχήμα 5.1.1 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη της κυψέλης κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης:



Εικόνα 5.1.1 Συσκευή τριαξονικής συμπίεσης (Πηγή: Καβαδαός, 2007)

Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται με μια αδιαπέρατη ελαστική μεμβράνη, ενώ στη βάση και στην κεφαλή του είναι τοποθετημένοι άκαμπτοι πορώδεις δίσκοι. Το δοκίμιο τοποθετείται στο εσωτερικό μιας κυλινδρικής κυψέλης, η οποία στη συνέχεια πληρώνεται με νερό που μπορεί να τεθεί υπό ελεγχόμενη πίεση. Τέλος, το έμβολο στο κέντρο της κυψέλης μπορεί να κινηθεί στην κατακόρυφη διεύθυνση και να συμπίεσει το δοκίμιο, αν του επιβληθεί μια κατάλληλη εξωτερική φόρτιση. Αν z είναι ο κατακόρυφος άξονας συστήματος, στο κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο μπορεί να επιβληθεί η εξής εντατική κατάσταση:

- Στην περιφέρεια του δοκιμίου ασκείται η πίεση του νερού της κυψέλης (ορθή τάση), δηλαδή $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$, όπου σ_c είναι η πίεση του νερού της κυψέλης.
- Η εξωτερική δύναμη που ασκείται στο έμβολο (αλλά και η πίεση του νερού της κυψέλης, η οποία εφαρμόζεται και στην κεφαλή του δοκιμίου) επιβάλλουν στο δοκίμιο μια κατακόρυφη ορθή τάση σ_z ($\sigma_z \geq \sigma_c$).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπό ορισμένες προϋποθέσεις (κατακόρυφος προσανατολισμός του δοκιμίου, κεντρική εφαρμογή του αξονικού φορτίου,

περιορισμένη τριβή μεταξύ δοκιμίου και πορωδών δίσκων και τέλος, αρχικώς ισότροπη συμπεριφορά του εδαφικού δείγματος ή τουλάχιστον ανισότροπη με τους κύριους άξονες ανισοτροπίας παράλληλους με τους άξονες του δοκιμίου), η εντατική κατάσταση στο δοκίμιο είναι ομοιόμορφη και αξονοσυμμετρική και οι κύριοι άξονες των τάσεων (αλλά και των παραμορφώσεων) είναι παράλληλοι με τους άξονες του δοκιμίου. Επιπλέον, οι συνθήκες φόρτισης στο έμβολο είναι τέτοιες, ώστε η μέγιστη κύρια τάση (σ_1) να είναι κατακόρυφη (δηλαδή ασκείται σε οριζόντιο επίπεδο), ενώ οι δύο άλλες κύριες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους ($\sigma_2 = \sigma_3$) και ασκούνται σε κατακόρυφα επίπεδα.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της δοκιμής της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι ο έλεγχος της στράγγισης και της υδατικής πίεσης στο εσωτερικό του δοκιμίου. Στο Σχήμα παραπάνω φαίνεται ο αγωγός 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 (πίεση πόρων) μπορεί να ελέγχεται. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο αγωγός στράγγισης επικοινωνεί ελεύθερα με τον εξωτερικό χώρο χωρίς την παρεμβολή ειδικού συστήματος επιβολής υδατικής πίεσης. Και στην περίπτωση, όμως, αυτή η πίεση στο σύστημα στράγγισης ελέγχεται, δεδομένου ότι στην ουσία διατηρείται σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Τέλος, η κεφαλή του δοκιμίου μπορεί επίσης να συνδεθεί με σύστημα επιβολής πίεσης διαμέσου κατάλληλου εύκαμπτου σωληνίσκου, οπότε και η υδατική πίεση στην κεφαλή του δοκιμίου ελέγχεται είτε ανεξάρτητα είτε με το ίδιο σύστημα που ελέγχει την πίεση πόρων στη βάση του δοκιμίου.

Ειδικότερα:

- Εάν η βαλβίδα στράγγισης που επιτρέπει την επικοινωνία του εσωτερικού του δοκιμίου με το σύστημα ελέγχου της πίεσης πόρων είναι κλειστή, παρεμποδίζεται η διαφυγή νερού από το εσωτερικό του δοκιμίου (ή η εισρόφηση νερού από το δοκίμιο), οπότε η παραμόρφωση του εδάφους γίνεται υπό σταθερό όγκο. Ο τύπος αυτός της φόρτισης ονομάζεται αστράγγιστη φόρτιση ή φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, επειδή η στράγγιση του δοκιμίου παρεμποδίζεται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, εφόσον κατά τη δοκιμή παρεμποδίζεται η στράγγιση του δοκιμίου, η υδατική πίεση πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου μεταβάλλεται ώστε να ικανοποιηθεί η συνθήκη της μή-μεταβολής του όγκου. Ο αγωγός στράγγισης συνήθως συνδέεται με ένα καταγραφέα της υδατικής πίεσης (pore pressure transducer), με τον οποίο μετράται η μεταβαλλόμενη υδατική πίεση στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η μέτρηση της υδατικής πίεσης είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των ενεργών τάσεων του δοκιμίου ($\sigma'_i = \sigma_i - u$) από τις οποίες, ως γνωστόν, εξαρτάται η διατμητική αντοχή.
- Εάν η βαλβίδα στράγγισης διατηρείται ανοικτή, το σύστημα επιβολής της υδατικής πίεσης βρίσκεται σε ελεύθερη επικοινωνία με το εσωτερικό του δοκιμίου και έτσι μπορεί να διατηρεί οποιαδήποτε σταθερή πίεση στο εσωτερικό του δοκιμίου. Ο μόνος περιορισμός (εκτός προφανώς από τους περιορισμούς μηχανικής αντοχής των υλικών του συστήματος κυψέλης, αγωγών κλπ.) είναι ότι η επιβαλλόμενη υδατική πίεση στο εσωτερικό του

δοκιμίου πρέπει να είναι μικρότερη από την πίεση του νερού της κυψέλης (σ_c), αλλιώς η ελαστική μεμβράνη που περιβάλλει το δοκίμιο θα φουσκώσει, επειδή στο εσωτερικό της επιβάλλεται πίεση μεγαλύτερη απ' ό,τι στο εξωτερικό της. Στην περίπτωση επιβολής σταθερής υδατικής πίεσης στη βάση (ή/και την κεφαλή) του δοκιμίου, η διαφυγή νερού από το δοκίμιο ή η είσοδος νερού στο δοκίμιο διαμέσου του αγωγού στράγγισης δεν παρεμποδίζονται. Ειδικότερα, αν κατά τη φόρτιση του δοκιμίου το εδαφικό υλικό τείνει να συμπιεσθεί (δηλαδή να μειωθεί ο όγκος του), εφόσον το δοκίμιο είναι κορεσμένο, η μείωση του όγκου θα συνοδευθεί από τη διαφυγή ίσου όγκου νερού των πόρων διαμέσου του αγωγού στράγγισης προς τον εξωτερικό χώρο. Στην περίπτωση που η φόρτιση είναι αρκετά ταχεία και δεν διατίθεται επαρκής χρόνος για τη διαφυγή του νερού των πόρων, οι υδατικές πιέσεις στο εσωτερικό του δοκιμίου θα αυξηθούν, με συνέπεια η στράγγιση του δοκιμίου να μην είναι πλήρης. Αν, αντίθετα, κατά τη φόρτιση του δοκιμίου το εδαφικό υλικό τείνει να διογκωθεί (δηλαδή να αυξηθεί ο όγκος του), τότε το δοκίμιο θα εισροφήσει νερό από τον εξωτερικό χώρο διαμέσου του αγωγού στράγγισης. Και στην περίπτωση αυτή, αν η φόρτιση είναι αρκετά ταχεία, θα δημιουργηθούν υποπίεσεις στο εσωτερικό του δοκιμίου με συνέπεια την ανεπαρκή εισρόφηση νερού. Όταν η φόρτιση του δοκιμίου είναι αρκετά αργή, ώστε σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η πίεση πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου να είναι ίση με την εξωτερικώς επιβαλλόμενη στη βάση (ή/και την κεφαλή) του δοκιμίου, η φόρτιση ονομάζεται πλήρως στραγγισμένη.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου ισούται με τον όγκο του νερού που διαφεύγει ή εισρέει στο δοκίμιο, εφόσον το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο. Η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου μετράται με κατάλληλο σύστημα συνδεδεμένο με τον αγωγό στράγγισης του δοκιμίου.

Συνοψίζοντας, τα συστήματα ελέγχου της δοκιμής κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι :

1. Το σύστημα επιβολής της πλευρικής πίεσης ή πίεσης κυψέλης (σ_c).
2. Το σύστημα επιβολής της υδατικής πίεσης πόρων ή αντιπίεσης πόρων (u) στο εσωτερικό του δοκιμίου καθώς και το σύστημα μέτρησης της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου με τη μέτρηση του όγκου (ΔV) του νερού που εισρέει στο δοκίμιο ή διαφεύγει από αυτό.
3. Το σύστημα επιβολής φόρτισης στο κατακόρυφο έμβολο που επιβάλλει είτε συγκεκριμένο φορτίο είτε συγκεκριμένη μετακίνηση. Κατά τη φόρτιση μετράται η μετακίνηση του εμβόλου, που ισούται με τη μεταβολή του μήκους του δοκιμίου, καθώς και το φορτίο του εμβόλου.

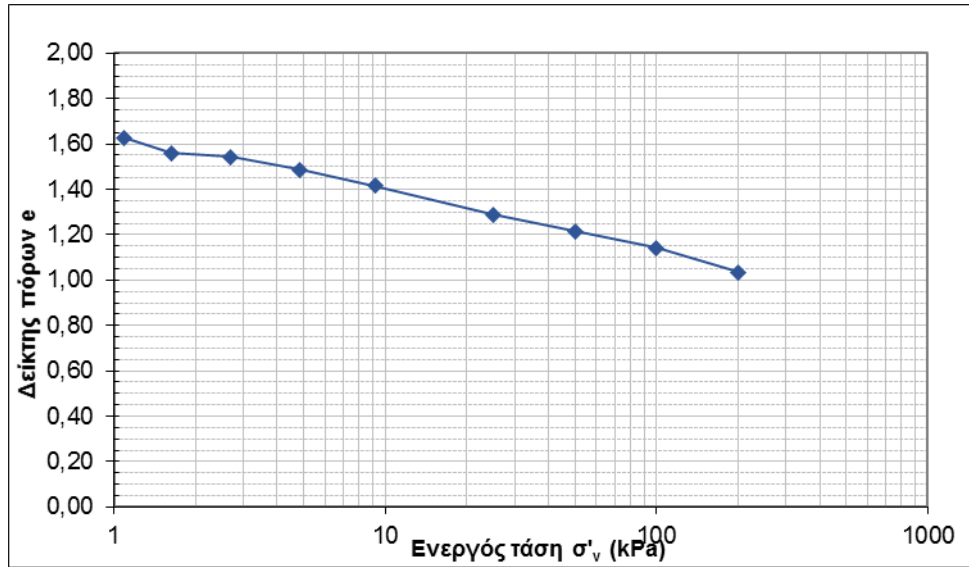
5.2 ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στην παρούσα εργασία το υλικό каоλινίτης αναμείχθηκε με απεσταγμένο νερο και το αρχικό ποσοστό υγρασίας διαμορφώθηκε γύρω από την τιμή 1.4 w_L. Σύμφωνα με τον Burland η τιμή αυτή για τα αναζυμωμένα υλικά πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ w_L και 1,5 w_L, όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2.3. Με διαδοχικές αναμειξεις εξασφαλίζεται ότι το υλικό είναι ομοιογενές και έχει την ίδια υγρασία σε όλα τα σημεία του.

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 μεταλλικές κυλινδρικές μήτρες με διαμέτρους 152mm, 101mm και 63mm και αντίστοιχα ύψη 365mm, 235mm και 300 mm. 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 επιλεχθείσα 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.

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. Τα δοκίμια αναμένεται να παρουσιάσουν λοιπόν μέγιστη τάση προφόρτισης 200kPa. Ακόμη, αναμένεται η αρχή των διαγραμμάτων μονοδιάστατης συμπίεσης δοκιμίων υλικού τύπου Β να ταυτίζεται με τον κλάδο φόρτισης του διαγράμματος συμπίεσης από το "μεγάλο συμπιεσόμετρο". Ωστόσο λόγω των μεγάλων διαστάσεων της κυψέλης του μεγάλου συμπιεσομέτρου είναι πιο πιθανά λάθη στις μετρήσεις λόγω διαφορικών καθιζήσεων του μεταλλικού καλύμματος, σε σχέση με τα τυπικά συμπιεσόμετρα.



Σχήμα 5.2.1 Τυπική καμπύλη μονοδιαστατης συμπίεσης από το μεγάλο συμπιεσόμετρο

Τέλος, το στερεοποιημένο υλικό εξάγεται με τη βοήθεια ενός εξολκέα, με προσοχή ώστε η διατάραξή του να μειωθεί στο ελάχιστο. Η διαδικασία εξόλκευσης διευκολύνεται με τη λίπανση της εσωτερικής επιφάνειας του μεγάλου συμπιεσομέτρου πριν τοποθετηθεί σε αυτό το υδαρές ακόμα υλικό. Η αναλογία των μεγεθών φαίνεται στις Εικόνες 5.2.2(α) και 5.2.2(β) όπου συγκρίνεται το εξαγόμενο υλικό από το "μεγάλο συμπιεσόμετρο" με ένα τυπικό δοκίμιο τριαξονικής δοκιμής διαμέτρου 38 mm και ύψους 76 mm.



(α)



(β)

Εικόνα 5.2.1 (α) Συσκευή μεγάλου συμπιεσομέτρου (β) δείγμα μετά την εξόλκευση από τη συσκευή μεγάλου συμπιεσομέτρου



(α)

(β)

Εικόνα 5.2.2 (α),(β) Σύγκριση διαστάσεων δοκιμίου μεγάλου συμπιεσομέτρου και δοκιμίου τριαξονικής συσκευής

Μετα το πέρας του πειράματος, το δοκίμιο έχει πια στερεή μορφή και ακολουθεί ο τεμαχισμός και η κατάλληλη διαμόρφωσή του για τις δοκιμές στην τριαξονική συσκευή. Το δοκίμιο χωρίζεται σε τμήματα ανάλογα με τις διαστάσεις της κυψέλης του «μεγάλου συμπιεσομέτρου». Για κάθε ένα από τα μικρότερα δοκίμια χρησιμοποιούμε τον ειδικό περιστροφικό μορφωτή σαν οδηγό, ενώ με μαχαίρι αφαιρώντας προσεκτικά υλικό απ' την περίμετρο πλησιάζουμε τις επιθυμητές διαστάσεις. Το υλικό που αφαιρούμε χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υγρασίας των δοκιμίων που προκύπτουν. Καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η διατάραξη των δοκιμίων να μειωθεί στο ελάχιστο. Στις φωτογραφίες της εικόνας 5.2.3 φαίνεται η διαδικασία τεμαχισμού του καολινίτη μετά την εξαγωγή του από το μεγάλο συμπιεσόμετρο και η μόρφωση των δοκιμίων, με διαστάσεις κατάλληλες για την τριαξονική συσκευή.



(α)

(β)

(γ)



(δ)

Εικόνα 5.2.3 (α),(β),(γ),(δ) Διαδικασία μόρφωσης δοκιμίων καολίνη για την τριαξονική συσκευή

5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.3.1 Προετοιμασία δοκιμίου και συσκευής

Μετά τη μόρφωση του δοκιμίου όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό ζυγίζεται και περιβάλλεται με την ελαστική μεμβράνη με τη βοήθεια του τανυστή μεμβράνης. Το πάχος της μεμβράνης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% της διαμέτρου του δοκιμίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Στο πάνω και κάτω μέρος του δοκιμίου τοποθετούνται πορόλιθοι (εμβαπτισμένοι σε απεσταγμένο νερό και πλήρως απαερωμένοι για να μην επηρεάσουν την υγρασία του δοκιμίου). Η ελαστική μεμβράνη αναδιπλώνεται προσεκτικά και στη βάση και την κορυφή ασφαλίζεται με δύο ελαστικούς δακτυλίους (O ring). Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η τοποθέτηση των πορόλιθων, της μεμβράνης και η απαέρωσή της.



Εικόνα 5.3.1 Τοποθέτηση ελαστικής μεμβράνης και πορόλιθων στο δοκίμιο

Για την τοπική καταγραφή των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο μετρητές μετακίνησης (lvdt) και ένας μετρητής ακτινικής παραμόρφωσης. Οι μετρητές τοποθετούνται σε κεντρική θέση στο δοκίμιο επί της μεμβράνης που το περιβάλλει, σε αντιδιαμετρικές θέσεις, και με ειδική κόλλα εφαρμόζονται στη μεμβράνη. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα δοκίμια για τριαξονική φόρτιση έχουν διάμετρο 38 mm και ύψος 76 mm. 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 καταγραφών που συνδέονται με το σύστημα στράγγισης του δοκιμίου είναι δυνατή η μέτρηση του όγκου του νερού, που απορροφά ή



Εικόνα 5.3.2 Δοκίμιο καολίνη τοποθετημένο πάνω στη τριαξονική συσκευή

εκκρίνει το δοκίμιο, αλλά και η υδατική πίεση στο εσωτερικό αυτού κατά τη διάρκεια πλήρωσης της κυψέλης. Στην Εικόνα 5.3.2 φαίνεται το δοκίμιο με τους μετρητές παραμορφώσεων πριν το σφράγισμα της τριαξονικής κυψέλης.

5.3.2 Κορεσμός του Δοκιμίου

Μετά την τοποθέτηση του εδαφικού δοκιμίου στο εσωτερικό της κυψέλης και την πλήρωση της κυψέλης με νερό, επιχειρείται ο κορεσμός του δοκιμίου, δηλαδή η πλήρωση των πόρων του με νερό. Τούτο επιτυγχάνεται συνήθως με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και τη διάλυση της (μικρής γενικά) ποσότητας του αέρα που υπάρχει στους πόρους, αφού η διαλυτότητα των αερίων στο νερό αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της πίεσης. Προφανώς, η αύξηση της πίεσης πόρων πρέπει να συνοδεύεται και από ισόποση αύξηση της πίεσης της κυψέλης, για να αποφευχθεί η διόγκωση της μεμβράνης που περιβάλλει το δοκίμιο. Έτσι, η πίεση της κυψέλης και η αντιπίεση πόρων αυξάνονται βαθμιαία και ισόποσα, μέχρι να επιτευχθεί ο κορεσμός του δοκιμίου.

Ο έλεγχος του βαθμού κορεσμού που έχει επιτευχθεί γίνεται με τη **μέθοδο του συντελεστή B**. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μεγάλη διαφορά συμπίεσότητας μεταξύ του νερού των πόρων και του εδαφικού σκελετού, με συνέπεια, όταν σε ένα κορεσμένο εδαφικό δοκίμιο αυξηθεί ισότροπα η επιβαλλόμενη ολική πίεση (κατά $\Delta\sigma$) χωρίς μεταβολή του όγκου, η πίεση πόρων να αυξάνει ισόποσα, δηλαδή: $\Delta u = \Delta\sigma$. Όταν το δοκίμιο δεν είναι πλήρως κορεσμένο, η αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων είναι μικρότερη, δηλαδή $\Delta u < \Delta\sigma$. Με βάση τα ανωτέρω μπορεί να θεωρηθεί ότι ο συντελεστής:

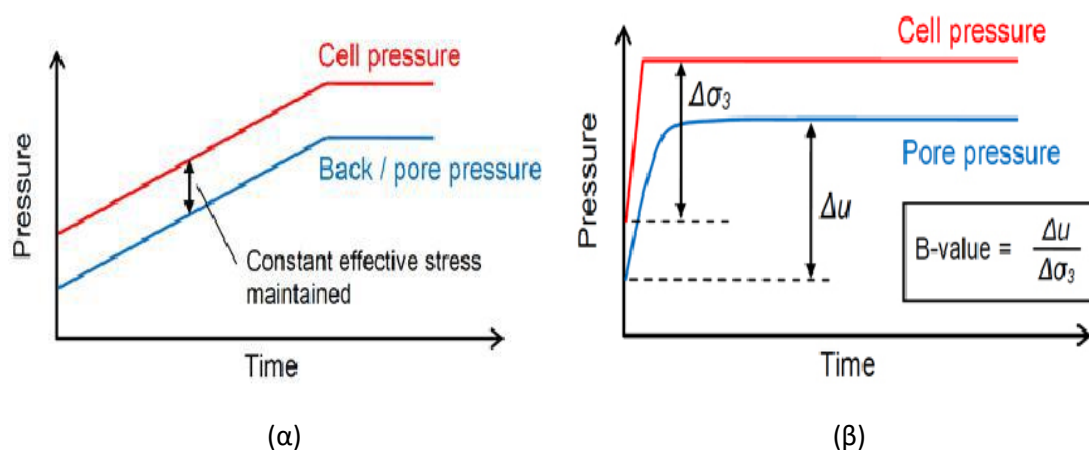
$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma}$$

Ο συντελεστής B συνδέεται με το βαθμό κορεσμού (S) του δοκιμίου, με την έννοια ότι όταν το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο (δηλαδή $S = 1$) τότε $B = 1$, ενώ όσο μικρότερη είναι η μετρούμενη τιμή του B τόσο μικρότερος είναι και ο βαθμός κορεσμού. Βεβαίως, τα ανωτέρω ισχύουν σε μαλακά σχετικά εδάφη, όπου πράγματι η συμπίεσότητα του εδαφικού σκελετού είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συμπίεσότητα του νερού των πόρων. Σε σκληρά εδάφη (ημιβράχους, σκληρές αργίλους κλπ.), στα οποία η διαφορά συμπίεσότητας σκελετού-νερού δεν είναι πολύ μεγάλη, ο συντελεστής B είναι μικρότερος της μονάδος ακόμη και όταν είναι πλήρως κορεσμένα.

Συνοψίζοντας, η μέτρηση του B γίνεται με αύξηση της πίεσης του νερού της κυψέλης κατά $\Delta\sigma_c$, ενώ διατηρείται κλειστή η βαλβίδα στράγγισης (αστράγγιστες συνθήκες) και μετράται η αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων Δu , οπότε:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_c}$$

"Πλήρης" κορεσμός θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί στα συνήθη εδάφη για τιμές του B πάνω από 0.95. Στα διαγράμματα του Σχήματος 5.3.1 φαίνεται η διαδικασία κορεσμού και ο έλεγχος της παραμέτρου B.



Σχήμα 5.3.1 Κορεσμός των δοκιμών στην τριαξονική συσκευή (α) διαδικασία κορεσμού (β) έλεγχος της παραμέτρου B

5.3.3 Στερεοποίηση

Η διατμητική αντοχή των εδαφών εξαρτάται από τις επιβαλλόμενες ενεργές τάσεις. Συνεπώς, ένας από τους σκοπούς της δοκιμής της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι η μέτρηση της διατμητικής αντοχής για διάφορες τιμές των ενεργών τάσεων. Με τη μέθοδο αυτή προκύπτουν περισσότεροι του ενός κύκλοι (Mohr) αστοχίας, οπότε η περιβάλλουσα αστοχίας μπορεί να προσδιορισθεί σαν η κοινή τους εφαπτομένη. Η διαδικασία της στερεοποίησης μας επιτρέπει να επιβάλουμε στο δοκίμιο κάθε φορά τις επιθυμητές τάσεις πριν ξεκινήσει η διαδικασία της διάτμησης. Έτσι, όταν ολοκληρωθεί ο κορεσμός του δοκιμίου, δηλαδή όταν ο συντελεστής B λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 0,95, ξεκινάει η διαδικασία της στερεοποίησης. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εξόλκευση του υλικού από το συμπιεσόμετρο, όπως αναφέραμε στην προετοιμασία του δοκιμίου, αυτό αποφορτίζεται καθώς οι ολικές τάσεις που ασκούνται στο δοκίμιο μηδενίζονται. Η διαδικασία της στερεοποίησης μέσα στην τριαξονική συσκευή μας επιτρέπει την επαναφορά των επιθυμητών τάσεων στο δοκίμιο και τη διατήρησή τους μέχρι την έναρξη της δοκιμής διάτμησης.

Συνήθως, για λόγους ευκολίας επιλέγεται η ισότροπη στερεοποίηση του δοκιμίου, δηλαδή η επιβολή ίσων κατακόρυφων και οριζοντίων τάσεων με αύξηση της πίεσης του νερού της κυψέλης. Ωστόσο, για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής επιλέχθηκε η ανισότροπη στερεοποίηση καθώς το καθεστώς τάσεων που επιβάλουμε έτσι στο δοκίμιο αντιπροσωπεύει καλύτερα το πεδίο τάσεων στο φυσικό έδαφος. Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε η ανισότροπη στερεοποίηση αναλύονται στο Κεφάλαιο 1.1. Οι τάσεις που επιβάλλονται στο φυσικό έδαφος, γεωστατικές ως επί το πλείστον είναι άνισες και ίσες με :

$$\sigma'_v = \rho' \cdot g \cdot h \quad \text{και} \quad \sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v$$

Ένας από τους πιο επιτυχημένους εμπειρικούς τρόπους προσδιορισμού του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων είναι αυτό που προτάθηκε από τον Jaky (1944), και προϋποθέτει τη γνώση της γωνίας τριβής ϕ' του εδάφικου υλικού:

$$K_0 = 1 - \sin\phi'$$

Η στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή πρέπει να γίνεται υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Δηλαδή η ακτινική παραμόρφωση του δοκιμίου πρέπει να είναι μηδενική, αφού αυτό συμβαίνει και στο φυσικό έδαφος. Επιπλέον οι βαλβίδες στράγγισης διατηρούνται ανοιχτές καθ' όλη τη στερεοποίηση ώστε να έχουμε πλήρη στράγγιση του δοκιμίου. Ο ρυθμός επιβολής των τάσεων διατηρείται χαμηλός για να μην δημιουργούνται υπερπιέσεις πορων στο εσωτερικό του δοκιμίου. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ποσοστιαία αξονική παραμόρφωση πρέπει να είναι ίση με την ποσοστιαία μεταβολή του όγκου του δοκιμίου, δηλαδή την ποσότητα νερού που αποβάλλει το δοκίμιο από τους πόρους του.

Η στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με έλεγχο των κατακόρυφων και οριζόντιων τάσεων είτε με έλεγχο των ακτινικών παραμορφώσεων. Σε κάθε περίπτωση, όταν επιτύχουμε την επιθυμητή ενεργό μέση τάση διατηρούμε σταθερό αξονικό φορτίο και πίεση κυψέλης για διάστημα λίγων ημερών για να ολοκληρωθούν οι ερπυστικές παραμορφώσεις του δοκιμίου.

Καθόλη τη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται από τον υπολογιστή το αξονικό φορτίο, η πίεση του νερού της κυψέλης, ο όγκος νερού που αποβάλλει ή απορροφά το δοκίμιο, η πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου, οι ενδείξεις του εξωτερικού μηκυνσιόμετρου, αλλά και των εσωτερικών μετρητών παραμόρφωσης του δοκιμίου (Invds) και οι ενδείξεις του μετρητή ακτινικής παραμόρφωσης.

Στον Πίνακα 5.3.1 δίνονται τα στοιχεία όλων των δοκιμών στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή. Συγκεκριμένα αναγράφεται η ονομασία του δοκιμίου, το ποσοστό υγρασίας στην αρχή της τριαξονικής συσκευής, η μέση ενεργός τάση στην αρχή και στο τέλος της στερεοποίησης και ο δείκτης πόρων και το ύψος των δοκιμών στην αρχή και το τέλος της στερεοποίησης. Τέλος αναγράφεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε, δηλαδή, αν η στερεοποίηση έγινε με έλεγχο τάσεων ή έλεγχο ακτινικών παραμορφώσεων.

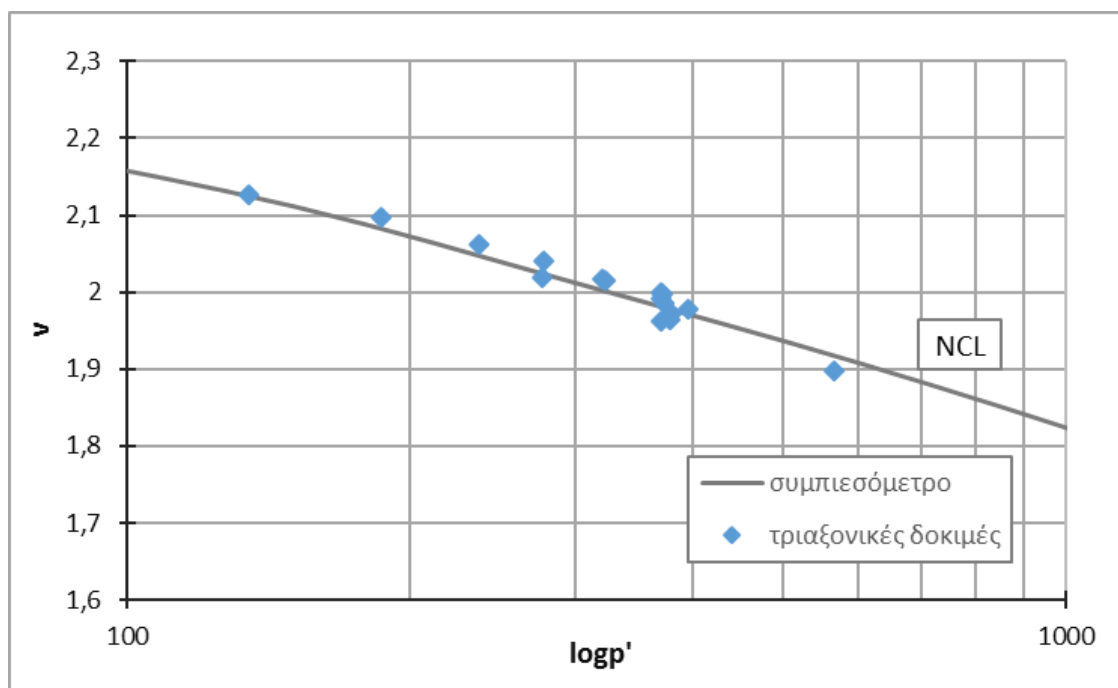
α/α δοκιμής	ποσοστό υγρασίας w (%)	μέθοδος στερεοποίηση- σης	μέση ενεργός τάση s' (kPa)		e _(before consolidation)	e _(after consolidation)	h _(before consolidation)	h _(after consolidation)
			πριν τη στερεοποίηση	μετά τη στερεοποίηση				
kaolin 1	42,78	stress control	125	400	1,105	0,986	76,41	70,4
kaolin 2	42,49		100	300	1,114	1,02	76,31	72,75
kaolin 3	42,29		100	250	1,104	1,024	76,52	72,51
kaolin 4	42,79		100	300	1,109	0,995	76,58	73,61
kaolin 5	41,17		130	250	1,077	1,02	76,38	75,1
kaolin 6	39,40		210	400	1,028	0,992	77,3	75
kaolin 7	45,92		36	300	1,214	1,041	76,35	69,31
kaolin 8	45,44		45	440	1,192	0,982	76,72	67,43
kaolin 9	45,47	radial control	50	400	1,169	0,999	76,96	71,18
kaolin 10	45,52	stress control	50	200	1,188	1,098	76,41	72,63
kaolin 11	43,03		100	415	1,123	0,971	77,83	70,38
kaolin 12	42,33		100	415	1,13	0,964	76,69	69,37
kaolin 13	44,34		100	150	1,157	1,126	76,72	74,69
kaolin 14	42,24		100	410	1,102	0,967	76,6	69,35
kaolin 15	42,21		70	600	1,075	0,898	99,89	91,3
kaolin 16	43,49		100	350	1,13	1,016	76,82	72,36
kaolin 17	44,68		100	340	1,166	1,014	76,79	73,7
kaolin 18	40,36	radial	100	255	1,052	0,997	76,54	73,09
kaolin 19	40,16	control	100	350	1,047	0,962	76,53	72,28

Πίνακας 5.3.1 Σύνολο δοκιμών στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή

Το διάγραμμα στο Σχήμα 5.3.2 δείχνει την κατάσταση των δοκιμών στο τέλος της στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή στο επίπεδο v - $\ln p'$. Φαίνεται επίσης η καμπύλη μονοδιάστατης στερεοποίησης όπως προέκυψε από τις δοκιμές συμπίεσομέτρου στο Κεφάλαιο 4. Παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση των σημείων πάνω στην καμπύλη, που δείχνει ότι η στερεοποίηση έγινε επιτυχημένα στην τριαξονική συσκευή. Από τα δεδομένα του Σχήματος 5.3.2 υπολογίζουμε τις εγγενείς σταθερές της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης:

$$v = N_o - \lambda_o * \ln p'$$

Οι σταθερές αυτές υπολογίστηκαν $N_o=2,93$ και $\lambda_o=0,16$.



Σχήμα 5.3.2 Καμπύλη στερεοποίησης

Στα παρακάτω κεφάλαια 5.3.3.1 και 5.3.3.2 αναλύονται εκτενώς οι δύο μέθοδοι που ακολουθήσαμε σε αυτή τη διπλωματική για την ανισότροπη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή.

5.3.3.1 Στερεοποίηση με έλεγχο των τάσεων

Σε αυτή τη διαδικασία στερεοποίησης διατηρείται σταθερός ο λόγος οριζοντίων και κατακόρυφων τάσεων (σ'_h/σ'_v) μέσω του προγράμματος TRIAX. Η γωνία τριβής ϕ του καολινίτη σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι 21° και έτσι από τη σχέση του Jaky, $K_0 = 1 - \sin \phi$, θεωρούμε για τις δοκιμές μας συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0 = 0,65$.

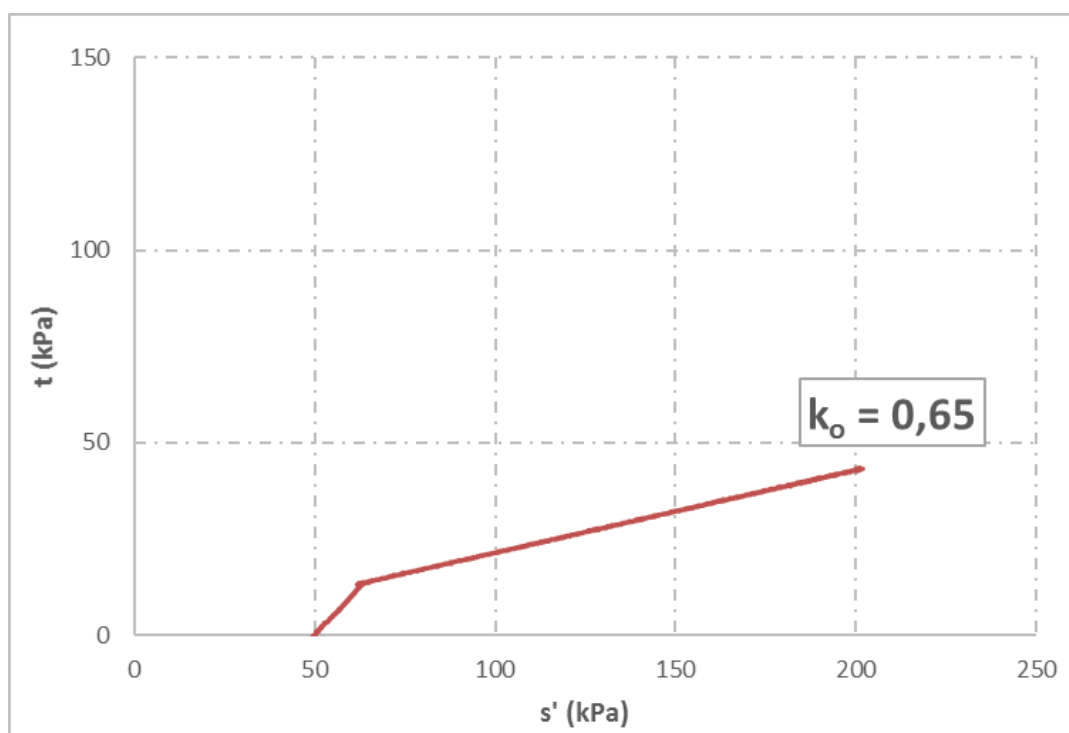
Παρακάτω αναλύεται η στερεοποίηση με έλεγχο του λόγου οριζοντίων προς κατακόρυφων τάσεων του δοκιμίου kaolin 10 στην τριαξονική συσκευή triax1 και παρατίθενται τα σημαντικότερα διαγράμματα που περιγράφουν τη διαδικασία αλλά και τη συμπεριφορά του δοκιμίου.

Στο Σχήμα 5.3.3 φαίνεται η διαδρομή ενεργών τάσεων στο επίπεδο t-s' καθ' όλη τη διάρκεια της στερεοποίησης του δοκιμίου. Το σημείο από το οποίο ξεκινάει η στερεοποίηση αντιπροσωπεύει την κατάσταση του δοκιμίου στο τέλος της διαδικασίας κορεσμού. Έτσι φαίνεται ότι μετά τον κορεσμό το δοκίμιο kaolin 10 έχει μέση ενεργό τάση $s' = 50$ kPa. Θυμίζουμε ότι το δοκίμιο μετά την πρώτη στερεοποίηση στο συμπιεσόμετρο μεγάλων διαστάσεων αποφορτίζεται και μειώνεται η ενεργός του τάση. Το συγκεκριμένο δοκίμιο ενώ αρχικά στερεοποιήθηκε μονοδιάστατα με κατακόρυφη τάση 200 kPa μετά την αποφόρτιση κράτησε μόνο τα 50 kPa. Με την έναρξη της στερεοποίησης το έμβολο έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο

και η συσκευή αυξάνει ισόποσα την κατακορυφή ενεργό τάση t και τη μέση ενεργό τάση s' (κλίση 1:1) μέχρι την ευθεία που αντιστοιχεί σε συντελεστή πλευρικών ωθήσεων $K_o = 0,65$. Στη συνέχεια διατηρείται σταθερός ο λόγος τάσεων σ'_h/σ'_v και ίσος με τον επιθυμητό συντελεστή K_o μέχρι το τέλος της στερεοποίησης. Συγκεκριμένα η κλίση της ευθείας στερεοποίησης στο επίπεδο $t-s'$ προκύπτει :

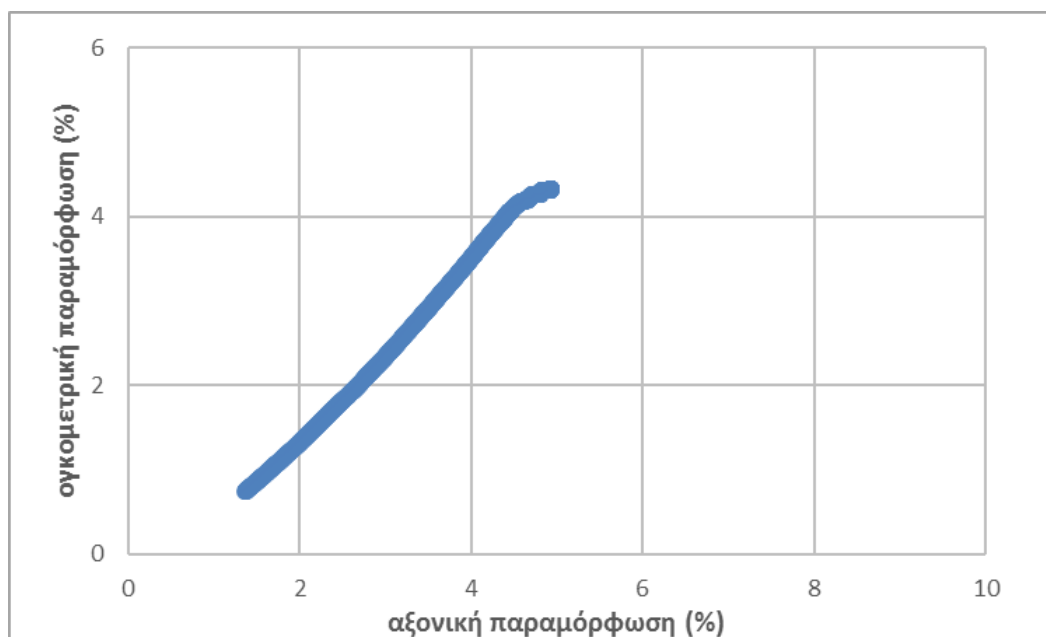
$$\frac{t}{s'} = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{\sigma'_v + \sigma'_h} = \frac{1 - K_o}{1 + K_o}$$

Η στερεοποίηση του kaolin 10 ολοκληρώνεται όταν το δοκίμιο φορτιστεί με μέση ενεργό τάση $s' = 200$ kPa όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.3.3.



Σχήμα 5.3.3 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ κατά την στερεοποίηση

Όπως αναφέραμε παραπάνω η στερεοποίηση με συντελεστή ουδετέρων τάσεων K_o γίνεται χωρίς ακτινικές παραμορφώσεις. Στο Σχήμα 5.3.4 φαίνεται η μεταβολή της ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με την αξονική.

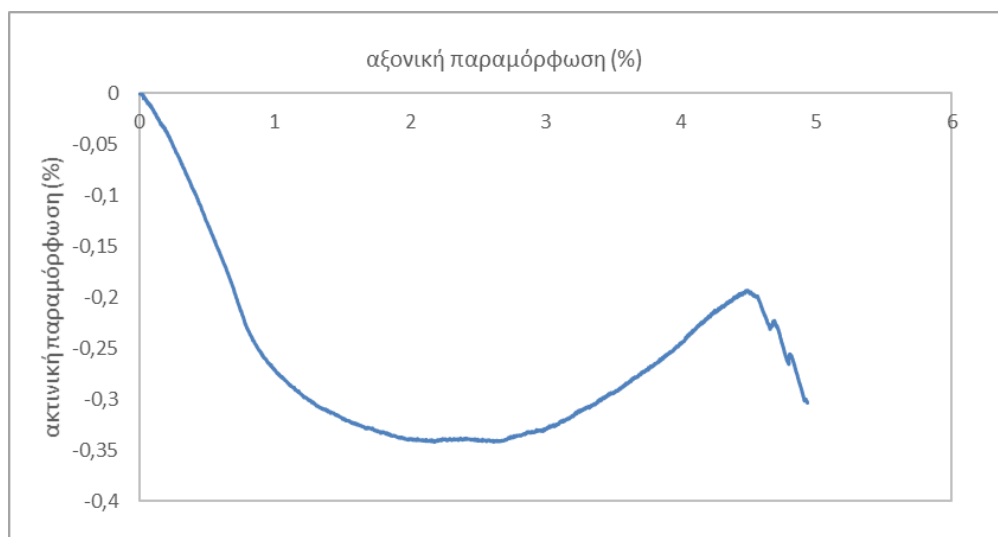


Σχήμα 5.3.4 Ογκομετρική παραμόρφωση(%) σε σχέση με αξονική παραμόρφωση(%) κατά τη στερεοποίηση

Η ακτινική παραμόρφωση συνδέεται με την αξονική και την ογκομετρική σύμφωνα με τη σχέση:

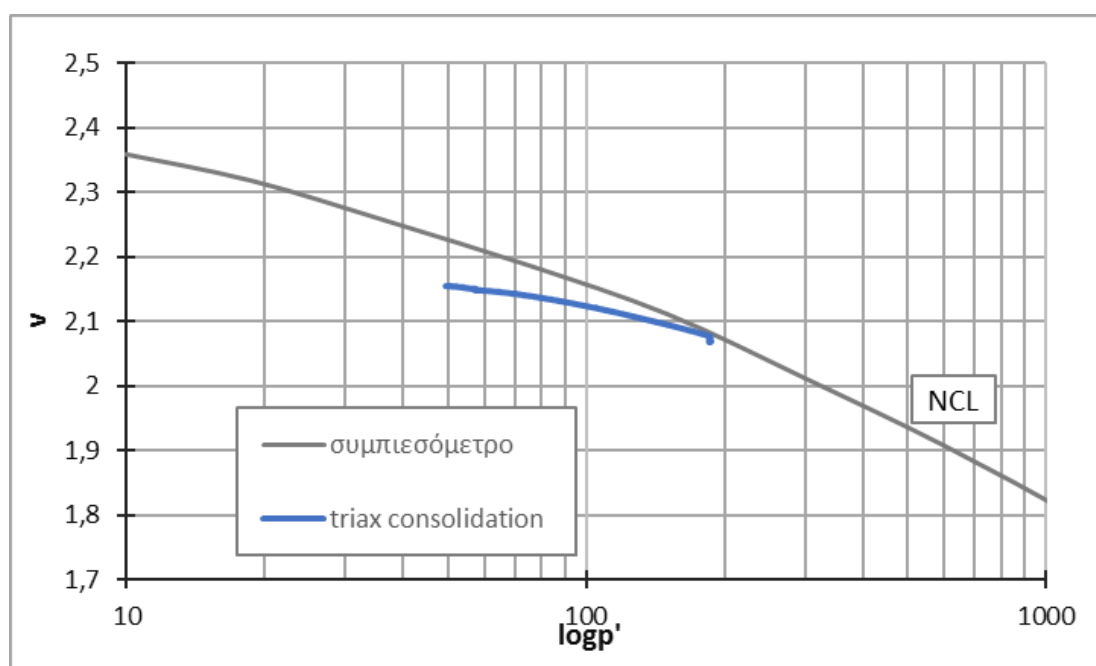
$$\Delta r = \frac{\Delta V - \Delta h}{2}$$

όπου Δr η ακτινική, ΔV η ογκομετρική και Δh η αξονική ποσοστιαία παραμόρφωση. Από το διάγραμμα μεταβολής ογκομετρικής και αξονικής παραμόρφωσης (Σχήμα 5.3.4) φαίνεται ότι αυτές μεταβάλλονται ισόποσα. Οι ακριβείς τιμές παραμορφώσεων εξαρτώνται από την αρχική και τελική μέση ενεργό τάση. Από την παραπάνω σχέση οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ακτινική παραμόρφωση παραμένει σχεδόν μηδενική. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 5.3.5 που δείχνει την μεταβολή της ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με την αξονική. Φαίνεται ότι καθόλη τη διάρκεια της στερεοποίησης η ακτινική παραμόρφωση διατηρείται σε τιμές μικρότερες του 0,35%. Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης συμβαίνει κατά την αρχική 1:1 φόρτιση, η οποία ολοκληρώνεται για αξονική παραμόρφωση περίπου 1,2%. Οι αρνητικές τιμές ακτινικής παραμόρφωσης στο διάγραμμα δηλώνουν μικρή διόγκωση του δοκιμίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την καταγραφή των μετατοπίσεων κατά τη στερεοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι εσωτερικοί μετρητές (lvdts) που θεωρούνται ακριβέστεροι σε μικρές μετατοπίσεις.



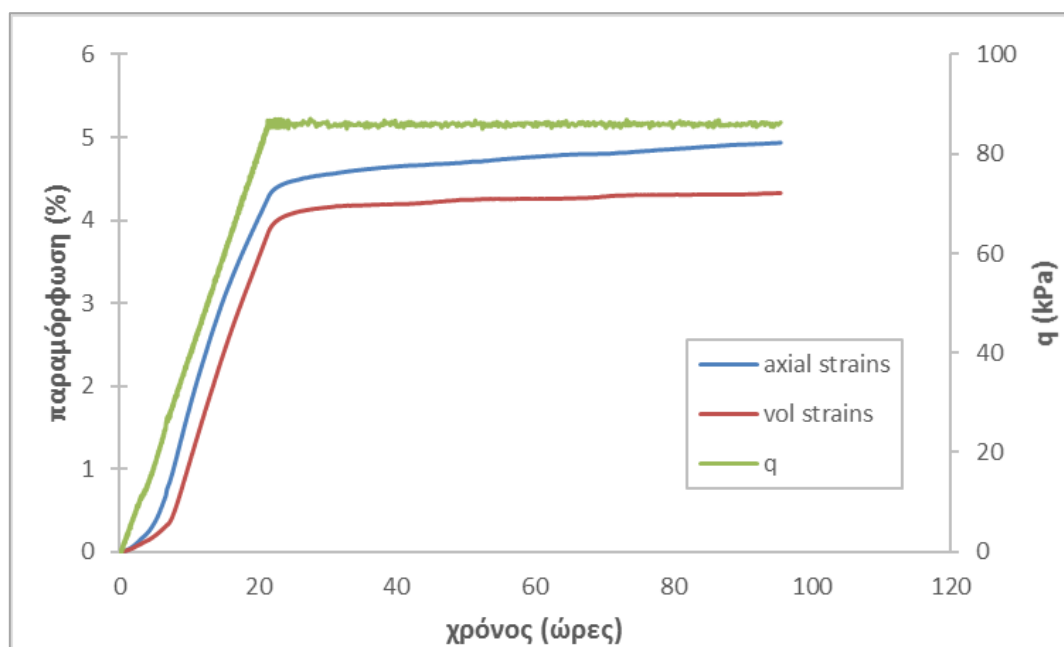
Σχήμα 5.3.5 Μεταβολή ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με αξονική παραμόρφωση

Εφόσον οι βάνες παραμένουν ανοιχτές η ογκομετρική παραμόρφωση ισοδυναμεί με διαφυγή νερού από τους πόρους του δοκιμίου και μεταβολή του δείκτη πόρων. Το Σχήμα 5.3.6 δείχνει την μεταβολή του ειδικού όγκου v σε σχέση με την μέση ενεργό τάση που ασκείται στο δοκίμιο. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, κατά τη στερεοποίηση, σημειώθηκε μείωση του δείκτη πόρων από 1,156 σε 1,067. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η $\Delta p'$ τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η μεταβολή του δείκτη πόρων. Το διάγραμμα στο Σχήμα 5.3.6 ουσιαστικά δείχνει ένα κλάδο επαναφόρτισης, καθώς το δοκίμιο στερεοποιήθηκε αρχικά στο μεγάλο συμπιεσόμετρο, στη συνέχεια αποφορτίστηκε και στην τριαξονική συσκευή επαναφορτίστηκε σε μέση ενεργό τάση $p'=186$ kPa.



Σχήμα 5.3.6 Μεταβολή ειδικού όγκου κατά τη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή

Τέλος, στο Σχήμα 5.3.7 φαίνεται το τελευταίο στάδιο της στερεοποίησης, δηλαδή η παραμόρφωση του δοκιμίου υπό καθεστώς σταθερών τάσεων (ερπυσμός) που σκοπό έχει την εκτόνωση των ερπυστικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 5.3.7 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης, αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο κατά τη στερεοποίηση

Μετά από 20 ώρες φόρτισης του δοκιμίου, ο εκτροπέας τάσεων διατηρείται σταθερός μέχρι το τέλος της στερεοποίησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.7 λιγές ώρες μετά την σταθεροποίηση της τάσης στα 85 kPa ο ρυθμός μεταβολής αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης μηδενίζεται. Στο διάγραμμα μπορούμε ακόμα να παρατηρήσουμε την ισόποση μεταβολή αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης που σχολιάσαμε προηγουμένως. Όταν ολοκληρωθούν οι παραμορφώσεις από τη στερεοποίηση το δοκίμιο είναι έτοιμο να ξεκινήσει τη διάτμηση.

5.3.3.2 Στερεοποίηση με έλεγχο ακτινικής παραμόρφωσης

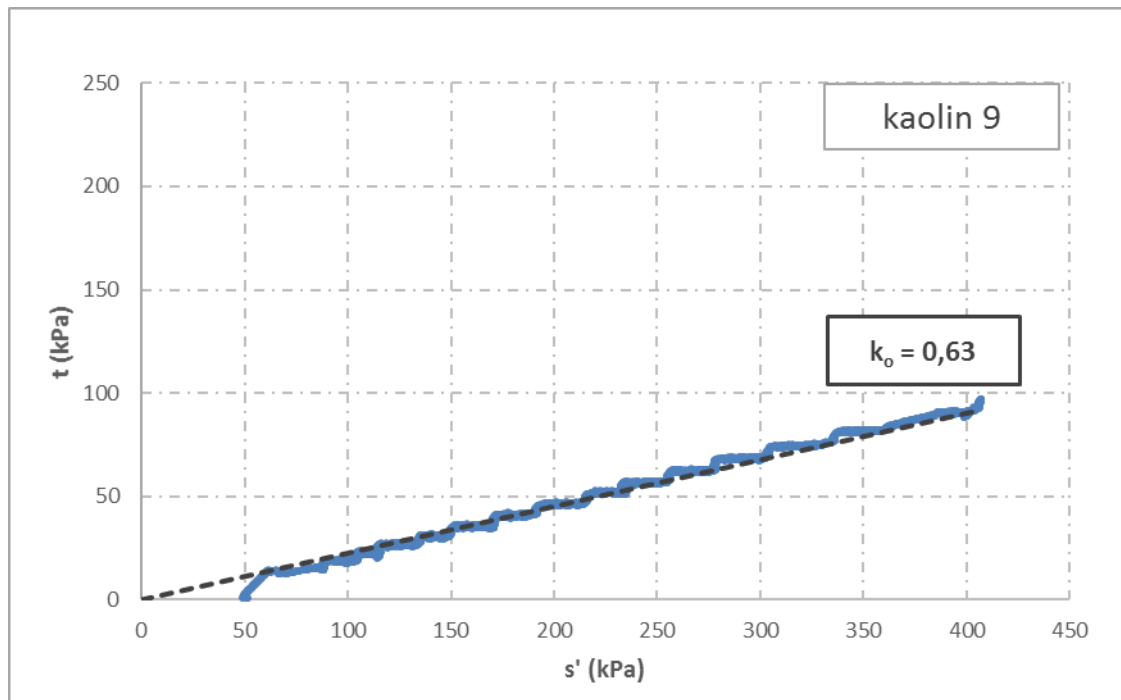
Σε αυτή τη μέθοδο στερεοποίησης, προκειμένου να προσομοιώσουμε συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης, ορίζουμε μέσω του προγράμματος TRIAX τα όρια της επιτρεπόμενης ποσοστιαίας ακτινικής παραμόρφωσης. Τα όρια που τέθηκαν ήταν πολύ μικρά, της τάξης του $\pm 0,002\%$ για διόγκωση και συμπίεση του δοκιμίου. Η κατακόρυφη και η πλευρική τάση μεταβάλλονται από το πρόγραμμα με σκοπό την ικανοποίηση αυτών των ορίων. Όταν το δοκίμιο τείνει να διογκωθεί, η κατακόρυφη τάση διατηρείται σταθερή και αυξάνεται η πίεση κυψέλης για να περιοριστεί η ακτινική διόγκωση. Αντίθετα, όταν το δοκίμιο ξεπερνάει το επιτρεπόμενο όριο ακτινικής συμπίεσης, η πίεση κυψέλης διατηρείται σταθερή και συνεχίζεται η κατακόρυφη φόρτιση. Σκοπός της δοκιμής αυτής δεν είναι μόνο η στερεοποίηση του δοκιμίου, αλλά και ο προσδιορισμός του συντελεστή ουδέτερων τάσεων K_o του εδαφικού υλικού.

Στα παρακάτω Σχήματα 5.3.8 και 5.3.9 φαίνονται οι διαδρομές τάσεων στο επίπεδο t - s' για τα δοκίμια kaolin 9 και kaolin 19 που στερεοποιήθηκαν με αυτή τη διαδικασία. Τα δύο δοκίμια ξεκινούν τη στερεοποίηση από διαφορετικές ενεργές τάσεις. Και εδώ αρχικά γίνεται μία υπόθεση της γωνίας τριβής του εδάφους και μέσα από τη σχέση του Jaky $K_o = 1 - \sin\phi$ εκτιμούμε ένα συντελεστή ουδέτερης ώθησης K_o . Αρχικά φορτίζουμε τα δοκίμια με ισόποση αποκλίνουσα και μέση ενεργό κατακόρυφη τάση (κλίση 1:1) μέχρι να συναντήσουμε την ευθεία στερεοποίησης για τον υποθετικό συντελεστή K_o . Κατά την αρχική 1:1 φόρτιση, αναμένεται να έχουμε κάποιες ακτινικές παραμορφώσεις τις οποίες όμως στη συνέχεια θα ελέγξει το πρόγραμμα με την ανάλογη μεταβολή των t και s' . Όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 5.3.8 και 5.3.9 η αρχική ακτινική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη για το δοκίμιο kaolin 19, το οποίο ξεκίνησε τη στερεοποίηση από τα 100 kPa και άρα φορτίστηκε για μεγαλύτερο διάστημα με ισόποσες t και s' . Για αυτό, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 5.3.14, όταν ολοκληρώθηκε η 1:1 φόρτιση, διατηρήσαμε σταθερή την αποκλίνουσα τάση ώστε να εκτονωθούν οι ερπυστικές παραμορφώσεις και να γίνει καλύτερα ο έλεγχος της ακτινικής παραμόρφωσης. Επίσης, παρατηρούμε μεγαλύτερη διακύμανση των τάσεων στη δοκιμή kaolin 19, η οποία θα φανεί και στις ακτινικές παραμορφώσεις του δοκιμίου.

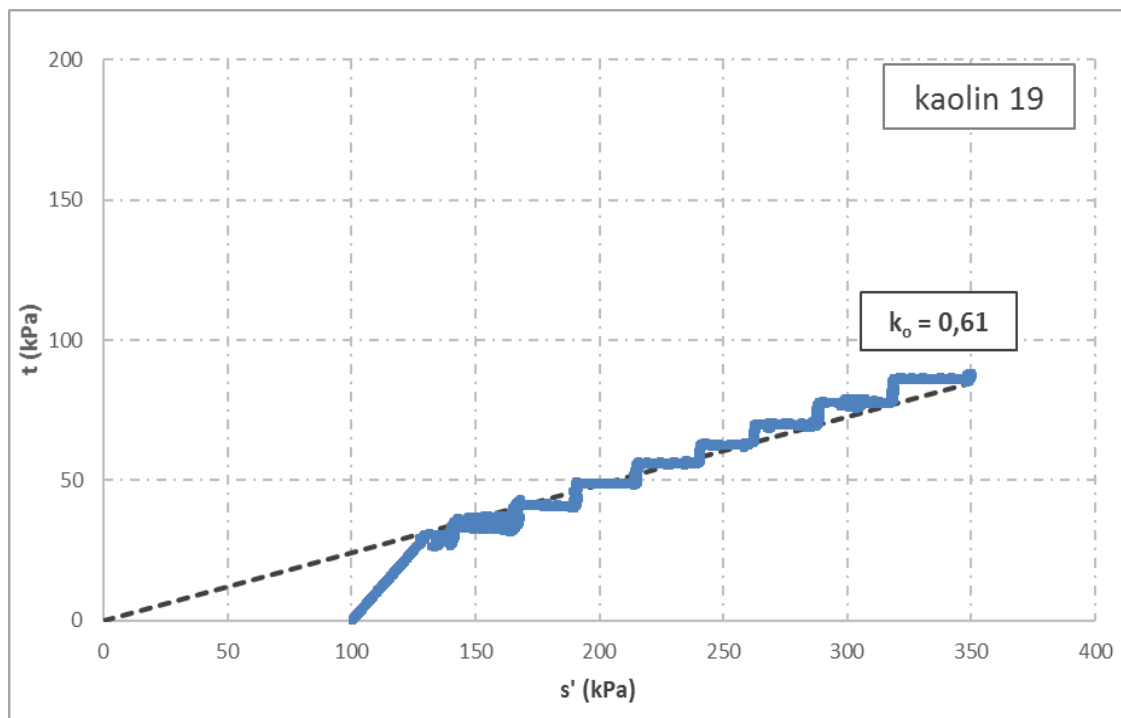
Από τις κλίσεις των παρακάτω διαγραμμάτων και με τη χρήση της σχέσης :

$$\frac{t}{s'} = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{\sigma'_v + \sigma'_h} = \frac{1 - K_o}{1 + K_o}$$

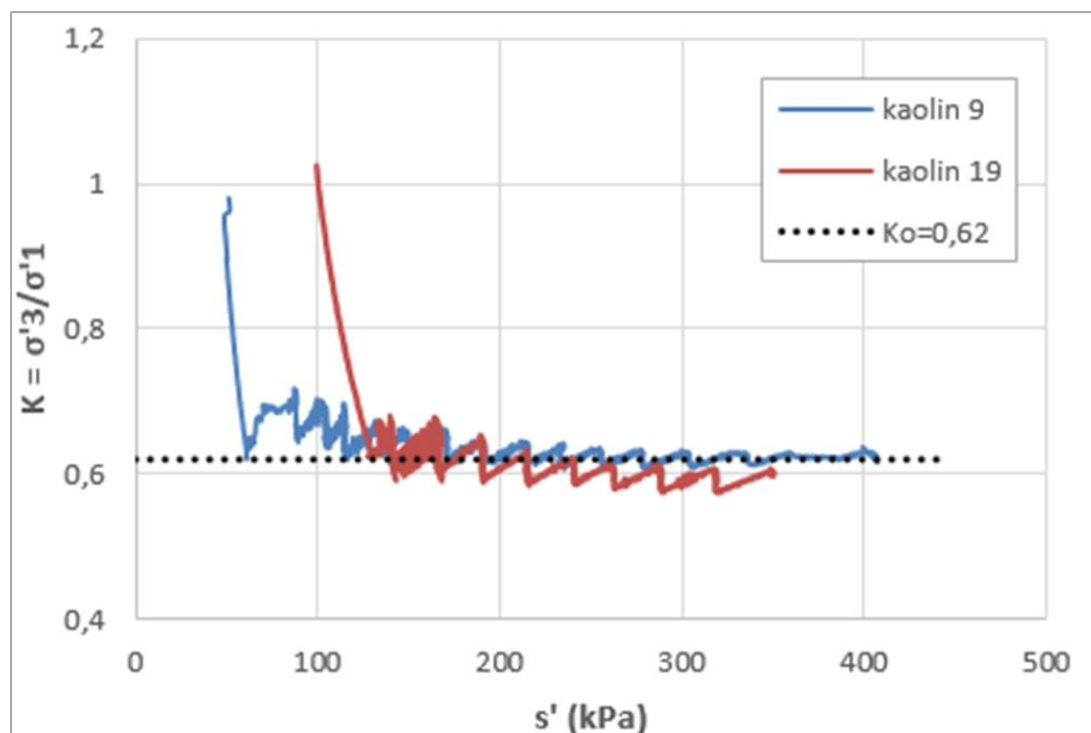
υπολογίστηκαν οι συντελεστές ουδέρων τάσεων $K_o=0,63$ για το δοκίμιο kaolin 9 και $K_o=0,61$ για το δοκίμιο kaolin 19, δηλαδή λίγο μικρότεροι από την αρχική μας υπόθεση. Θεωρώντας ένα μέσο όρο από τις δύο δοκιμές, και με χρήση της σχέσης του Jaky προκύπτει γωνία τριβής για τον καολίνη $\phi'=22,33^\circ$. Όπως θα δούμε παρακάτω, από τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης η γωνία διατμητικής αντοχής υπολογίστηκε $\phi'=20,52^\circ$ που αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή $K_o=0,65$, δηλαδή τιμή λίγο μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίστηκε από τη δοκιμή στερεοποίησης.



Σχήμα 5.3.8 Διαδρομή τάσεων κατά τη στερεοποίηση με έλεγχο ακτινικών παραμορφώσεων για το δοκίμιο kaolin 9



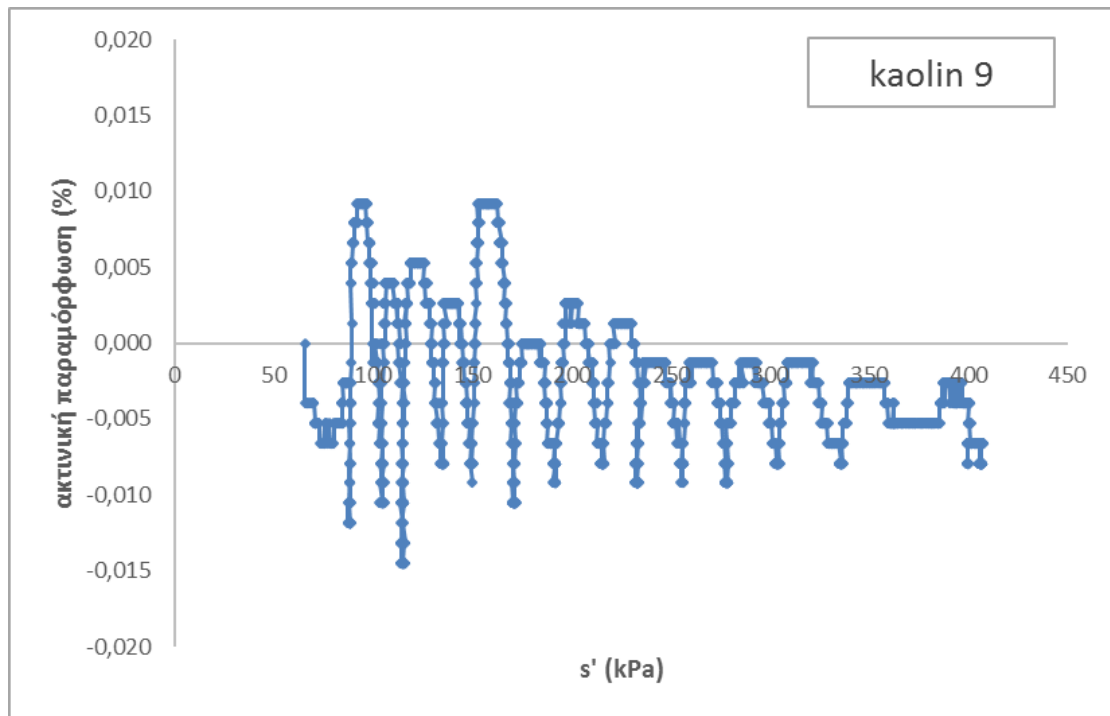
Σχήμα 5.3.9 Διαδρομή τάσεων κατά τη στερεοποίηση με έλεγχο ακτινικών παραμορφώσεων για το δοκίμιο kaolin 19



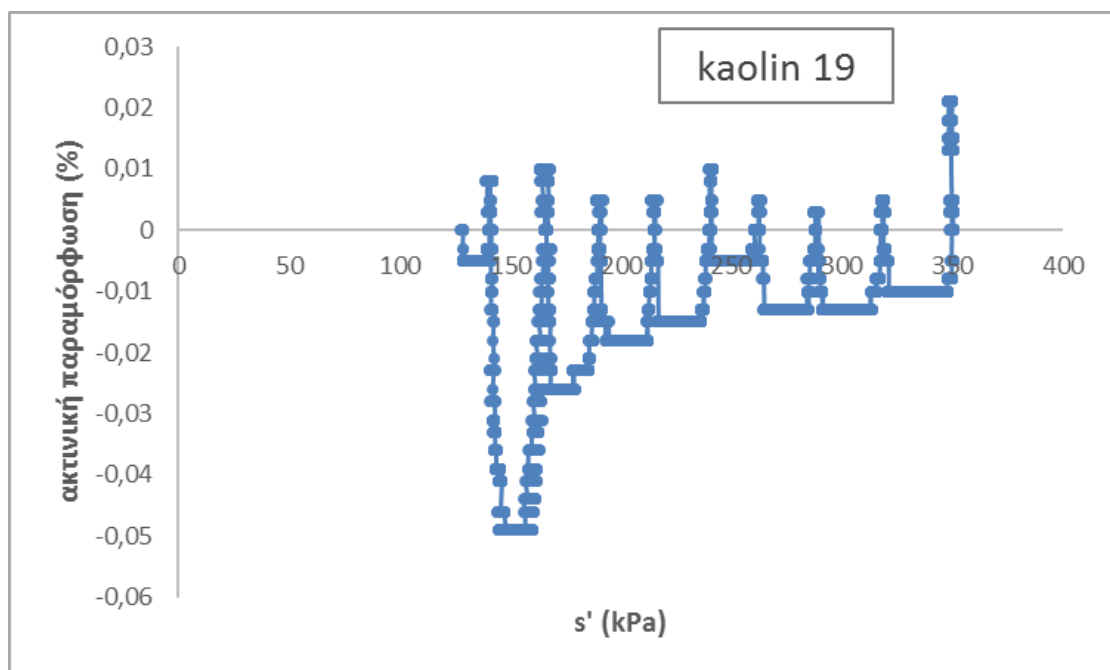
Σχήμα 5.3.10 Μεταβολή του συντελεστή K_0 σε σχέση με τη μέση ενεργό τάση για τα δοκίμια kaolin 9 και 19

Στο Σχήμα 5.3.10 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή ουδετέρων τάσεων σε σχέση με τη μέση ενεργό τάση. Όπως εξηγήσαμε και προηγουμένως οι αρχικές τιμές που ξεκινούν από τη μονάδα αφορούν στο στάδιο της 1:1 φόρτισης. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι οι συντελεστές K_0 σταθεροποιούνται γύρω από τις τιμές 0,63 και 0,61 για τα δύο δοκίμια αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 5.3.11 και 5.3.12 φαίνεται η μεταβολή της ακτινικής παραμόρφωσης καθώς αυξάνεται η μέση ενεργός τάση s' . Παρόλο που το όριο είχε τεθεί στα $\pm 0,002\%$, η συσκευή δεν μπορούσε πάντα να περιορίσει την ακτινική παραμόρφωση. Έτσι παρατηρούμε και στις δύο δοκιμές αποκλίσεις. Ιδιαίτερα στη δεύτερη δοκιμή σε ενεργό τάση περίπου 150 kPa αγγίζει παραμόρφωση 0,05%. Οι μεγάλες ακτινικές παραμορφώσεις στην αρχή της στερεοποίησης στη δεύτερη δοκιμή (Σχήμα 5.3.12) είναι πιθανόν να οφείλονται στην προσπάθεια της συσκευής να εξισορροπήσει τις ακτινικές παραμορφώσεις του δοκιμίου κατά την 1:1 φόρτιση. Η αδυναμία της συσκευής να τηρήσει τα επιτρεπόμενα όρια ακτινικής παραμόρφωσης μπορεί να οφείλεται στην ίδια τη συμπεριφορά του υλικού ή στην αδυναμία της τριαξονικής συσκευής και των υπολοίπων οργάνων να ελέγξουν τόσο μικρές παραμορφώσεις.

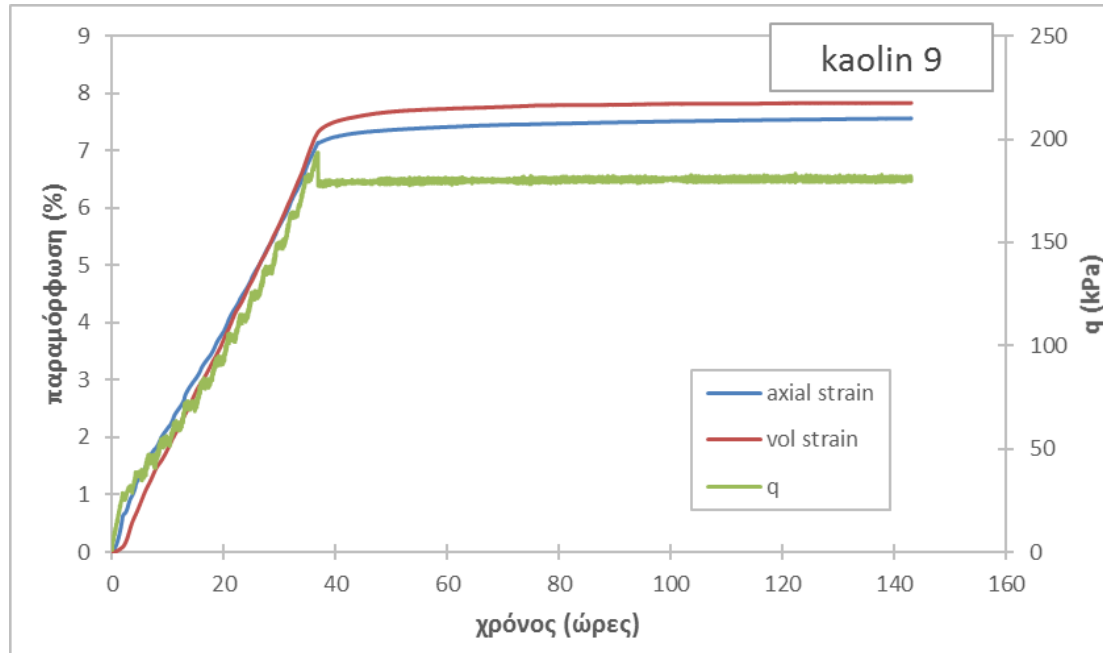


Σχήμα 5.3.11 Διακύμανση ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με την μέση ενεργό τάση s' για το δοκίμιο kaolin 9

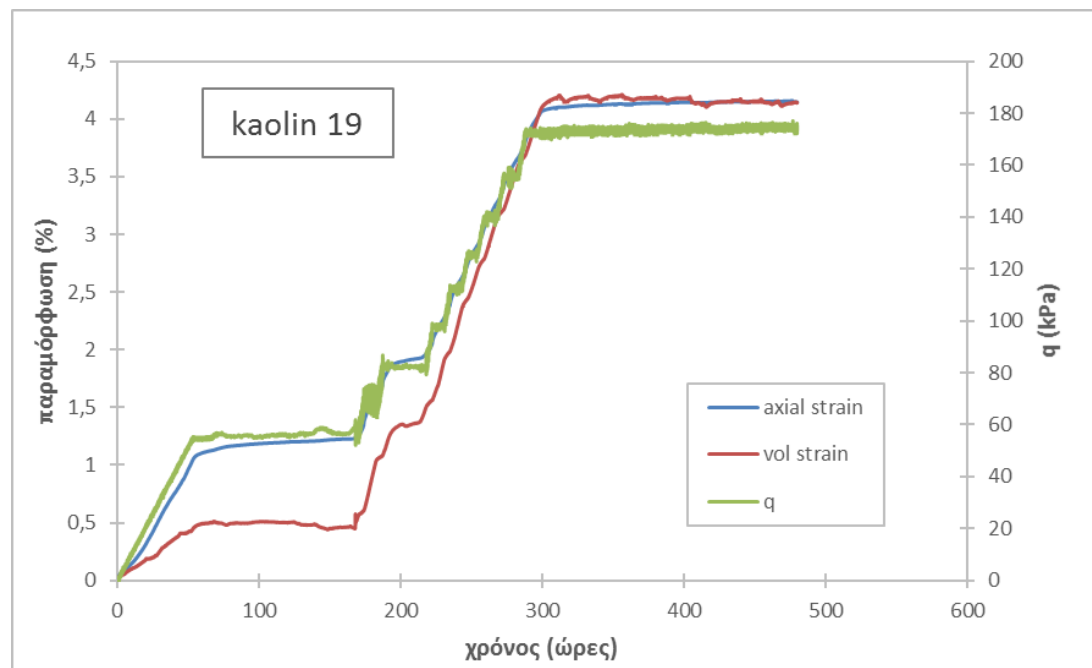


Σχήμα 5.3.12 Διακύμανση ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με την μέση ενεργό τάση s' για το δοκίμιο kaolin 19

Στα Σχήματα 5.3.13 και 5.3.14 φαίνονται οι αξονικές και ογκομετρικές παραμορφώσεις καθώς και η μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με το χρόνο. Όπως είναι φυσικό, επειδή οι ακτινικές παραμορφώσεις είναι σχεδόν μηδενικές, οι αξονικές και οι ογκομετρικές μεταβάλλονται ισόποσα. Στο δοκίμιο kaolin 19 είναι εμφανές ότι κατά την 1:1 φόρτιση η αξονική παραμόρφωση υπερίσχυσε της ογκομετρικής. Ωστόσο με τον κατάλληλο έλεγχο των t και s' με την πάροδο του χρόνου ταυτίστηκαν.



Σχήμα 5.3.13 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης και αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για το δοκίμιο kaolin 9

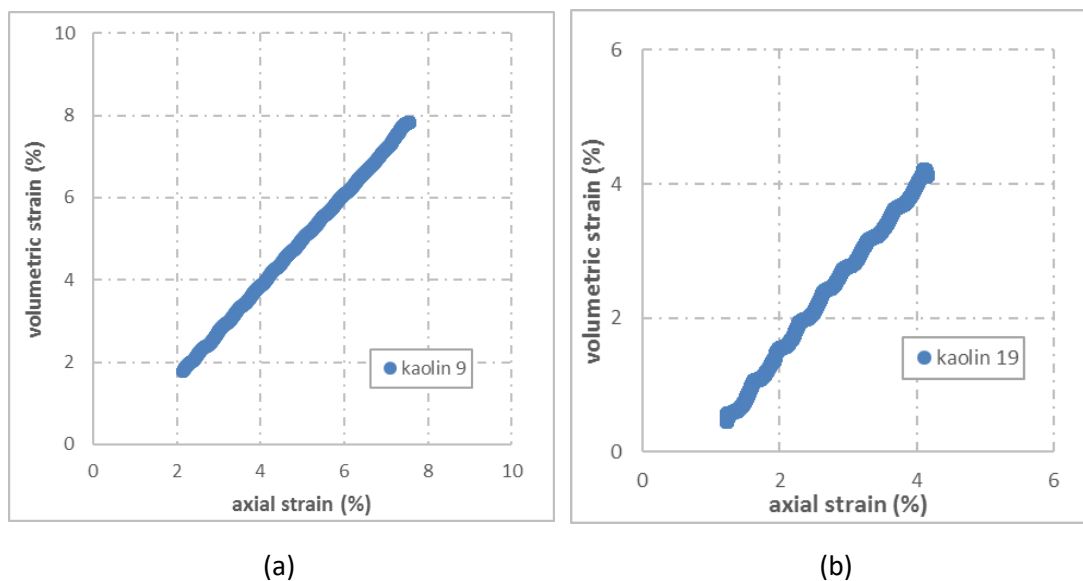


Σχήμα 5.3.14 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης και αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για το δοκίμιο kaolin 19

Στα διαγράμματα του Σχήματος 5.3.15 φαίνεται η μεταβολή της ποσοστιαίας ογκομετρικής σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση. Η σταθερή κλίση των ευθειών και στα δύο διαγράμματα περίπου στις 45° επαληθεύει την μηδενική ακτινική παραμόρφωση όπως προκύπτει από τη σχέση:

$$\Delta r = \frac{\Delta V - \Delta h}{2}$$

όπου Δr η ακτινική, ΔV η ογκομετρική και Δh η αξονική ποσοστιαία παραμόρφωση. Όπως ήταν αναμενόμενο, το δοκίμιο kaolin 9 που στερεοποιήθηκε από τάση $s'=50$ kPa σε $s'=410$ kPa παραμορφώθηκε περισσότερο (~8%) από το kaolin 19 (~4%) που στερεοποιήθηκε από $s'=100$ kPa μέχρι $s'=350$ kPa.



Σχήμα 5.3.15 Μεταβολή ογκομετρικής παραμόρφωσης(%) σε σχέση με την αξονική(%) για τα δοκίμια (a)kaolin 9 και (b)kaolin 19

5.3.4 Αξονική Φόρτιση και Θραύση του Δοκιμίου

Μετά τη στερεοποίηση του δοκιμίου, ακολουθεί το στάδιο της αξονικής φόρτισής του, (διάτμησης) μέχρι τη θραύση (αστοχία). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί η διατμητική αντοχή του δοκιμίου που αντιστοιχεί στην τάση της στερεοποίησης (σ'_c) που προηγήθηκε. Κατά το στάδιο αυτό η πίεση της κυψέλης διατηρείται σταθερή ($\sigma_c = \sigma_3$), ενώ ταυτόχρονα το έμβολο κινείται προς τα κάτω, συμπιέζει το δοκίμιο και του επιβάλλει την αποκλίνουσα τάση ($\sigma_1 - \sigma_3$). Το αξονικό φορτίο επιβάλλεται με μια διάταξη που κινεί το έμβολο προς τα κάτω με σταθερή ταχύτητα, προκαλώντας σταθερό ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης μετράται το φορτίο (P) του εμβόλου, οπότε η αξονική τάση (σ_1) υπολογίζεται από τη σχέση:

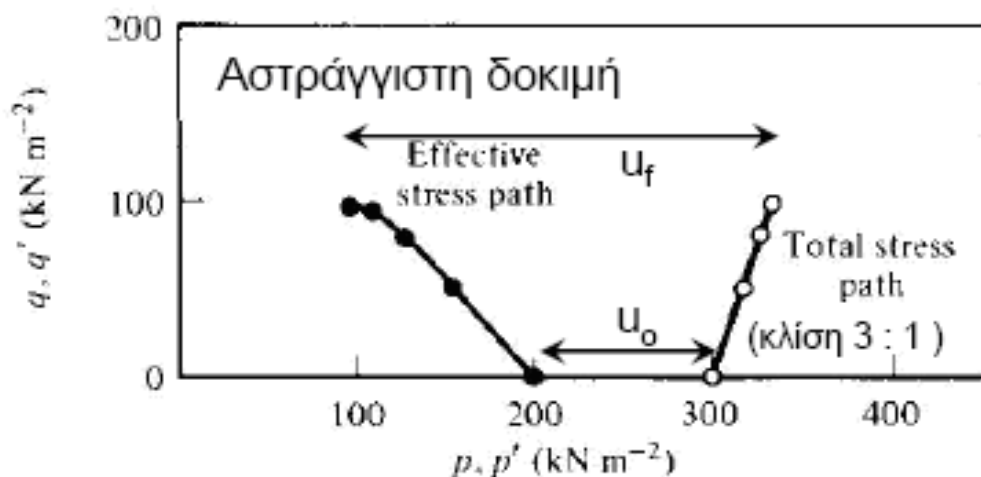
$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_c \cdot \left(1 - \frac{a}{A}\right)$$

όπου (A) είναι η διατομή του δοκιμίου και (a) η διατομή του εμβόλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το έμβολο δέχεται και την πίεση του νερού της κυψέλης, που ισοδυναμεί με δύναμη ($F = \sigma_c \cdot a$) (με διεύθυνση προς τα άνω), ακόμη και στην περίπτωση που δεν βρίσκεται σε επαφή με το δοκίμιο. Στις συσκευές τριαξονικής συμπίεσης του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν η αξονική τάση (σ_1) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_c$$

Η αξονική φόρτιση του δοκιμίου μέχρι τη θραύση μπορεί να γίνει είτε υπό αστράγγιστες είτε υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες. Οι δοκιμές διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έγιναν υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Κατά την **αστράγγιστη** φόρτιση η βαλβίδα στραγγίσης διατηρείται κλειστή και έτσι η φόρτιση του δοκιμίου γίνεται υπό σταθερό όγκο. Αν το δοκίμιο έχει τάση για μείωση του όγκου, αναπτύσσονται (θετικές) υπερπιέσεις πόρων και οι ενεργές τάσεις μειώνονται. Αν, αντίθετα, το δοκίμιο έχει τάση για διόγκωση, αναπτύσσονται (αρνητικές) υποπιέσεις πόρων και οι ενεργές τάσεις αυξάνουν. Η ταχύτητα της αξονικής παραμόρφωσης κατά την αστράγγιστη φόρτιση δεν υπόκειται σε άλλο περιορισμό παρά μόνο πρέπει να είναι αρκετά μικρή, ώστε οι υπερπιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του δοκιμίου να είναι ομοιόμορφες και οι τυχόν διαφορές τους από θέση σε θέση (λόγω τριβών στα άκρα, ανομοιομορφίας του εδαφικού υλικού κλπ.) να εξισώνονται με την κίνηση του νερού των πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου από θέσεις μεγαλύτερης πίεσης προς θέσεις μικρότερης πίεσης. Έτσι διαμορφώσαμε την ταχύτητα παραμόρφωσης των δοκιμίων περί τα 0,1287 mm/h. Η αξονική τάση αυξάνει με την παραμόρφωση του δοκιμίου με βαθμιαία μειούμενο ρυθμό και τελικώς το δοκίμιο παραμορφώνεται χωρίς περαιτέρω αύξηση της κατακόρυφης τάσης. Η κατάσταση κατά την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή της αξονικής τάσης ορίζεται συμβατικά ως κατάσταση αστοχίας του δοκιμίου.



Σχήμα 5.3.16 Διαδρομές ενεργών και ολικών τάσεων κατά την αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή (Πηγή: Atkinson , Brandsby (1977))

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή: το αξονικό φορτίο, η πίεση του νερού της κυψέλης, ο όγκος νερού που αποβάλλει ή απορροφά το δοκίμιο, η πίεση του νερού των πόρων του δοκιμίου, οι ενδείξεις του εξωτερικού μηκυσιόμετρου, 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, εφόσον 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 (Invt's) 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:

$$\epsilon_a = \Delta L / L_0$$

- 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 καθώς και την τρέχουσα μέση επιφάνεια του δοκιμίου :

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

- Την πίεση πόρων
- Την αποκλίνουσα τάση $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$
- Την μέση ενεργό τάση $p = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3$
- Το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = \Delta q / \Delta \epsilon$$

5.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν συνολικά 16 δοκιμές τριαξονικής θλίψης και 3 δοκιμές τριαξονικού εφελκυσμού σε πλήρως κορεσμένα, ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολινίτη. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται η ονομασία των δοκιμών, η ημερομηνία έναρξης των δοκιμών, το είδος της δοκιμής, το όνομα της τριαξονικής συσκευής, ο βαθμός προφόρτισης, η τάση στερεοποίησης και η αρχική υγρασία των δοκιμών πριν τοποθετηθούν στην τριαξονική συσκευή.

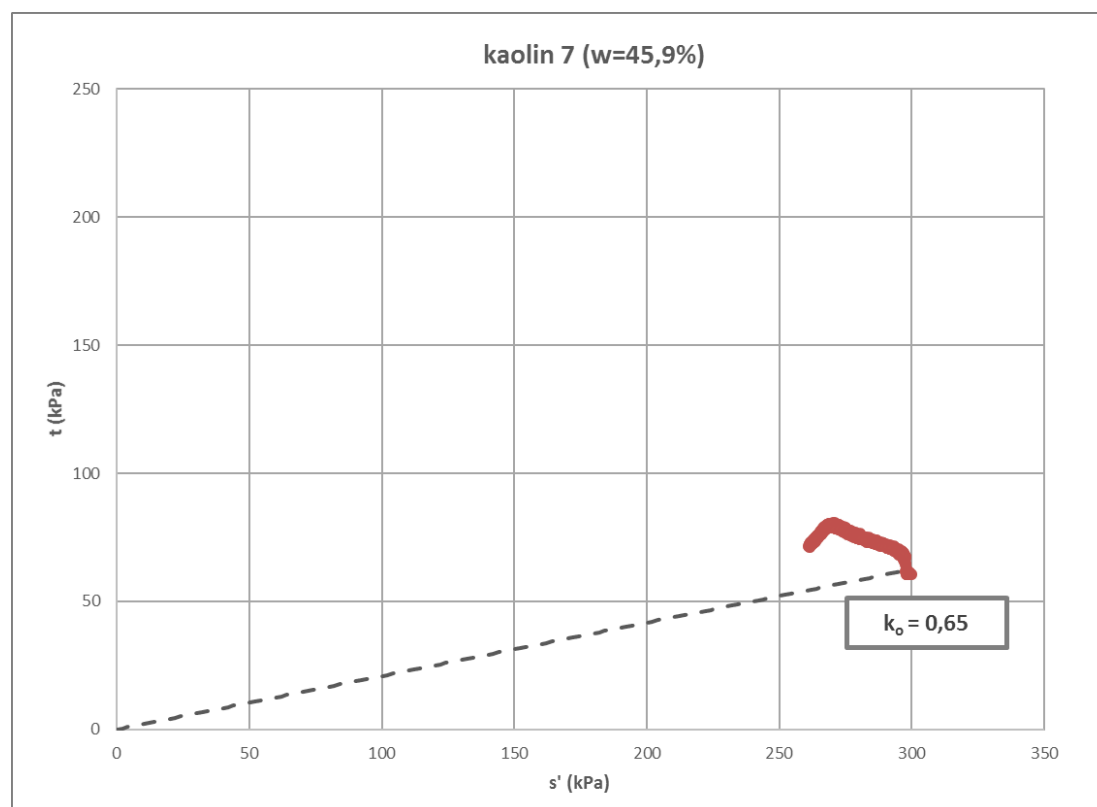
α/α δοκιμής	είδος δοκιμής	Ημερομηνία έναρξης	τριαξονική συσκευή	OCR	Τάση στερεοποίησης s' (kPa)	ποσοστό υγρασίας $w(\%)$
kaolin 1	extension CU	7/9/2015	triax 1	1	400	42,78
kaolin 2		25/9/2015	triax 1	1	300	42,49
kaolin 3		9/10/2015	triax 1	1	250	42,29
kaolin 4	compression CU	25/9/2015	triax 2	1	300	42,79
kaolin 5		9/10/2015	triax 2	1	250	41,17
kaolin 6		24/11/2015	triax 1	1	400	39,40
kaolin 7		16/2/2016	triax 1	1	300	45,92
kaolin 8		15/2/2016	triax 2	1	440	45,44
kaolin 9		1/3/2016	triax 2	1	400	45,47
kaolin 10		29/2/2016	triax 1	1	200	45,52
kaolin 11		12/4/2016	triax 2	1	415	43,03
kaolin 12		20/4/2016	triax 2	1	415	42,33
kaolin 13		29/3/2016	triax 2	1	150	44,34
kaolin 14		18/5/2016	triax 2	1	410	42,24
kaolin 15		27/5/2016	triax 3	1	600	41,21
kaolin 16		24/6/2016	triax 2	1	350	43,49
kaolin 17		24/6/2016	triax 1	1	340	44,68
kaolin 18		5/9/2016	triax 1	1	255	40,36
kaolin 19		5/9/2016	triax 2	1	350	40,16

Πίνακας 5.4.1 Τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν

5.4.1 Ενδεικτική δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες

Παρακάτω θα αναλυθεί η συμπεριφορά του δοκιμίου kaolin 7. Το δοκίμιο προέρχεται από το συμπιεσόμετρο μεγάλων διαστάσεων (συμπιεσόμετρο 3) όπου στερεοποιήθηκε αρχικά σε τάση 200 kPa. Ωστόσο μετά την εξόλκευση, αποφορτίστηκε και έτσι η δεύτερη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή (2) ξεκίνησε από μέση ενεργό τάση $s'=36$ kPa και ολοκληρώθηκε στα $s'=298$ kPa. Η αρχική υγρασία του δοκιμίου υπολογίστηκε 45,9 % και στο τέλος της στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή ο δείκτης πόρων του δοκιμίου ήταν $e=1,041$.

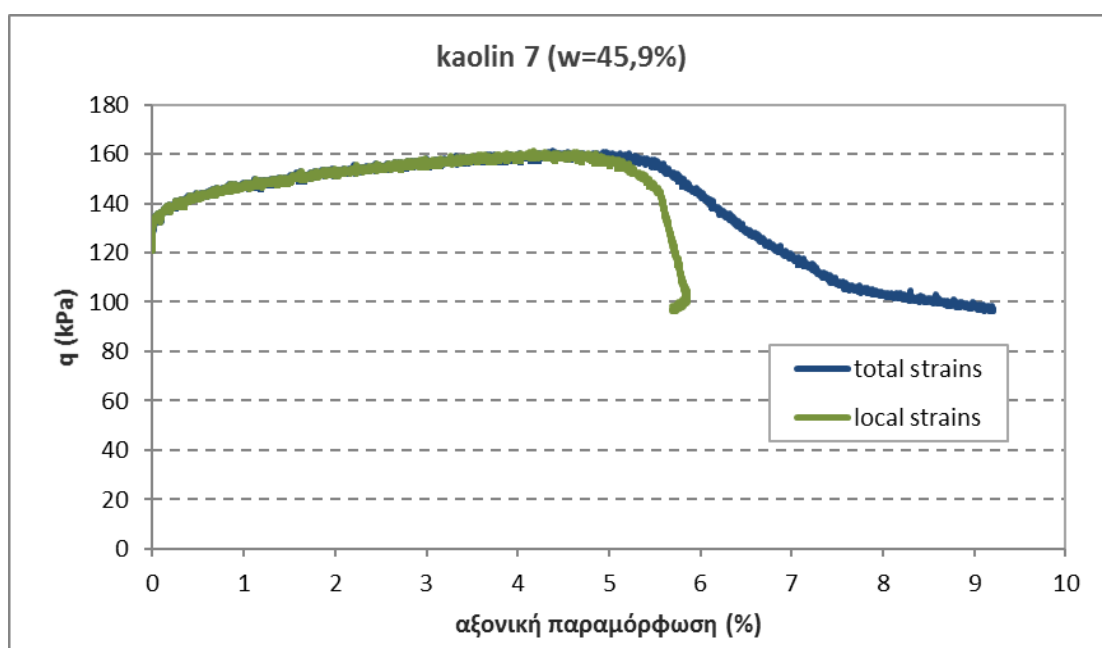
Στο Σχήμα 5.4.1 φαίνεται η διαδρομή τάσεων στο δισδιάστατο επίπεδο $t-s'$ καθώς και η ευθεία στερεοποίησης που ακολουθήθηκε. Καθ' όλη τη διάρκεια της διάτμησης, η μέση ενεργός τάση του καολινίτη μειώνεται, γεγονός που δείχνει την τάση για συστολή του υλικού κατά την τριαξονική θλίψη, και άρα την αργλική συμπεριφορά του υλικού. Η μέγιστη διατμητική αντοχή που αναπτύσσει το δοκίμιο είναι $t=80,7$ kPa και σημειώνεται για μέση ενεργό τάση $s'=270$ kPa.



Σχήμα 5.4.1 Διαδρομή ενεργών τάσεων για το δοκίμιο kaolin 7 στο επίπεδο $t-s'$

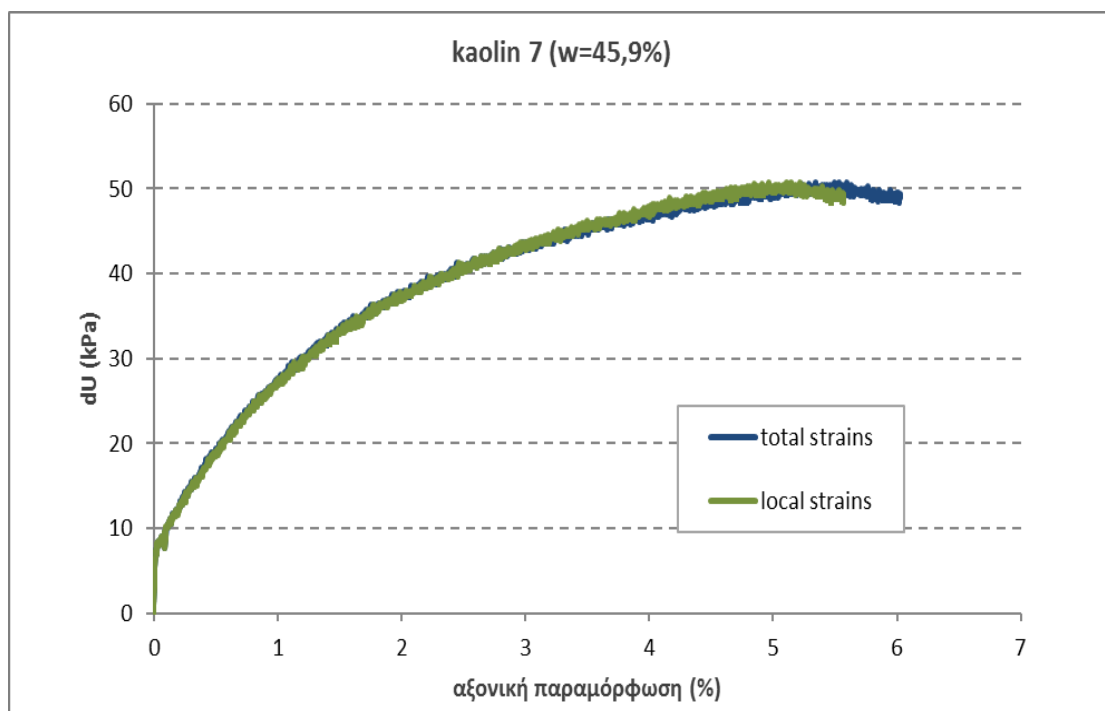
Το διάγραμμα στο Σχήμα 5.4.2 δείχνει τη μεταβολή του εκτροπέα τάσης q (kPa) σε συνάρτηση με την ποσοστιαία αξονική παραμόρφωση. Στο διάγραμμα φαίνονται οι αξονικές παραμορφώσεις όπως έχουν καταγραφεί από τον εξωτερικό μετρητή της τριαξονικής συσκευής (total strains), αλλά και από τους εσωτερικούς μετρητές (local strains). Από την αρχή του πειράματος η αποκλίνουσα τάση αυξάνεται κατακόρυφα για πολύ μικρές παραμορφώσεις της τάξης $<0,3\%$. Στη συνέχεια η κλίση της καμπύλης

μειώνεται μέχρι τη δημιουργία επιπέδου αστοχίας. Η μέγιστη τιμή διατμητικής αντοχής καταγράφεται για παραμόρφωση 5%. Σε αυτό το σημείο ο ρυθμός παραμόρφωσης, σύμφωνα με τους εσωτερικούς μετρητές, σχεδόν μηδενίζεται, γεγονός που υποδηλώνει τη δημιουργία επιφάνειας αστοχίας. Σε παραμόρφωση 5% η διατμητική αντοχή ακολουθεί πτωτική πορεία. Παρατηρείται επίσης ότι η τιμή του εκτροπέα τάσης σταθεροποιείται κοντά στη μέγιστη τιμή της (160 kPa), για παραμόρφωση στο εύρος 3% - 5%. Οι παραμορφώσεις υπό σταθερή αποκλίνουσα τάση δηλώνουν ότι το δοκίμιο έφτασε σε κρίσιμη κατάσταση όταν σημείωσε μέγιστη διατμητική αντοχή.



Σχήμα 5.4.2 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης q σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση (%) για το δοκίμιο kaolin 7

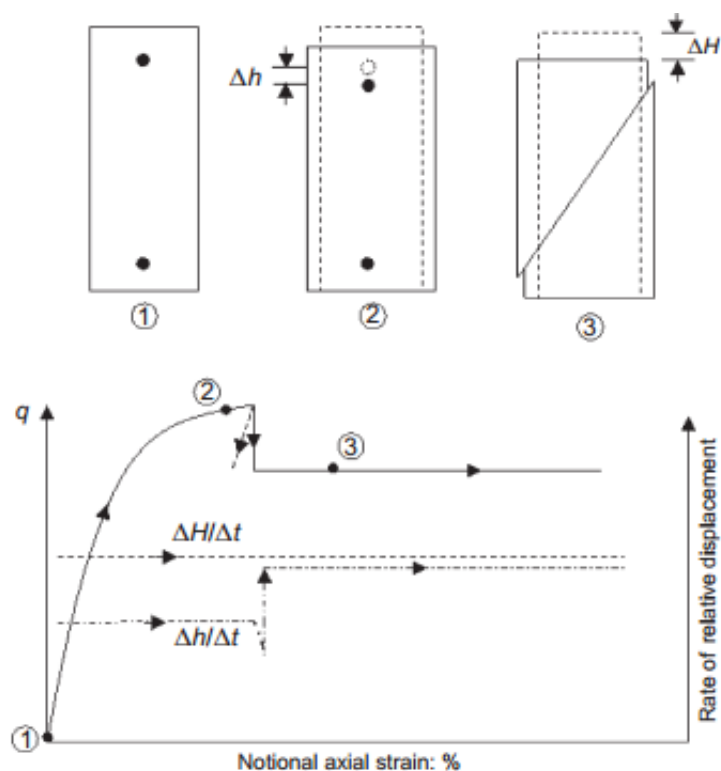
Στο Σχήμα 5.4.3 φαίνεται η μεταβολή της πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση καταγεγραμμένη από τον εξωτερικό και τους εσωτερικούς μετρητές. Όταν το δοκίμιο παραμορφωθεί κατά 4,5%, η πίεση πόρων σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή της (50 kPa), και παραμένει σταθερή μέχρι και το τέλος της δοκιμής. Η μεταβολή της πίεσης πόρων επιβεβαιώνει ότι το δοκίμιο έφτασε σε κρίσιμη κατάσταση. Παρατηρούμε ότι πρώτα σταθεροποιείται η αποκλίνουσα τάση (Σχήμα 5.4.2) για παραμόρφωση περίπου 3%, και έπειτα ακολουθεί η σταθεροποίηση της πίεσης πόρων για παραμόρφωση περίπου 4,5%.



Σχήμα 5.4.3 Μεταβολή πίεσης πόρων dU σε σχέση με αξονική παραμόρφωση (%) για το δοκίμιο kaolin 7

Οι Georgiannou και Burland προτείνουν ένα τρόπο ακριβούς προσδιορισμού της στιγμής που δημιουργείται το επίπεδο αστοχίας. Στο Σχήμα 5.4.4 φαίνονται οι ρυθμοί παραμόρφωσης όπως καταγράφονται από το εσωτερικό και τα εξωτερικά μηκυνσιόμετρα. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η μεταβολή του εκτροπέα κατακόρυφης τάσης q σε σχέση με την ποσοστιαία αξονική παραμόρφωση καταγεγραμμένη από τον εσωτερικό μετρητή.

Στο σημείο αυτό οι Georgiannou και Burland προσπαθούν να προσδιορίσουν την ακριβή αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου τη στιγμή που δημιουργείται το επίπεδο αστοχίας με τη χρήση των μετρήσεων από τα LVDTs και τη μεταβολή του εκτροπέα τάσεων (q). Η ιδανική συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη δημιουργία επιφάνειας αστοχίας περιγράφεται από το Σχήμα 5.4.4.



Σχήμα 5.4.4 Ιδεατή συμπεριφορά κατά το σχηματισμό επιπέδου αστοχίας (Πηγή: Georgiannou, Burland 2006)

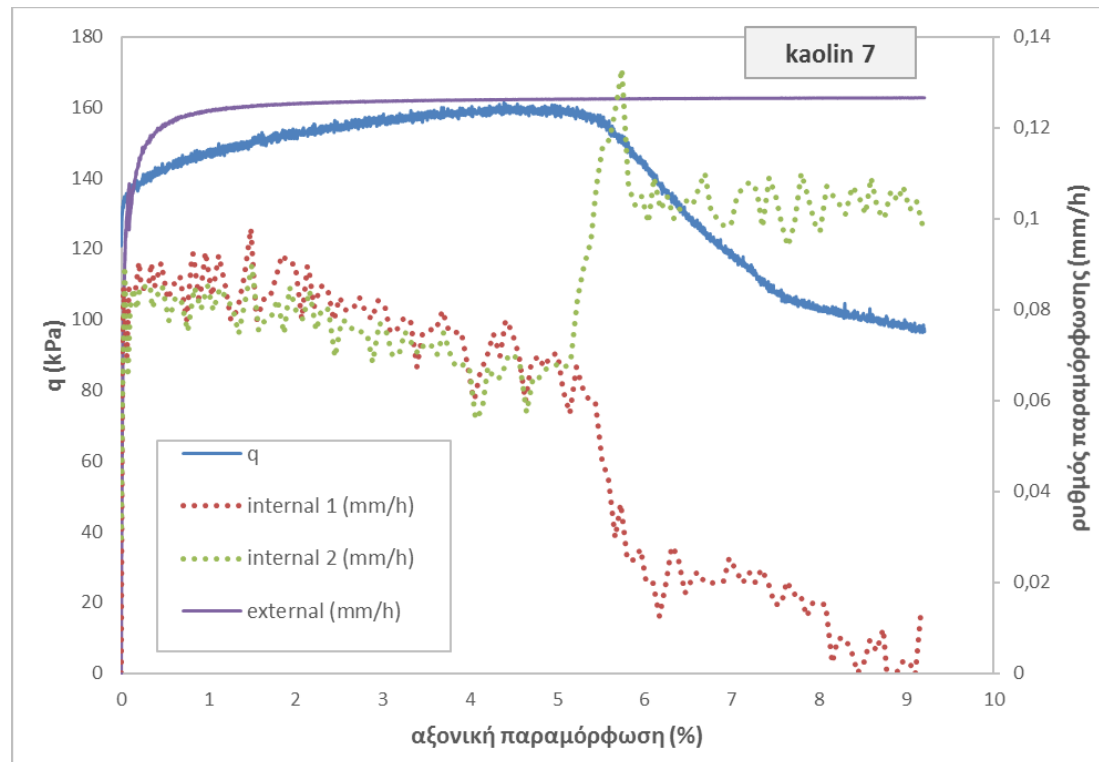
Το δοκίμιο στη φάση (1) του Σχήματος 5.4.4 αντιστοιχεί στην αρχική κατάσταση και τα μαύρα σημεία είναι οι αρχικές θέσεις στις οποίες έχουν τοποθετηθεί οι βάσεις ενός εσωτερικού μηκυσιομέτρου. Καθώς το δοκίμιο παραμορφώνεται, και πριν τη δημιουργία επιπέδου αστοχίας ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης που καταγράφεται από τα εσωτερικά μηκυσιοόμετρα είναι ομοιογενής και σταθερός (δοκίμιο στη φάση(2)). Κατά τη δημιουργία της επιφάνειας αστοχίας η αντοχή του δοκιμίου πέφτει ακαριαία και στη συνέχεια παραμένει σταθερή στη νέα της τιμή.

Στην περίπτωση που τα σημεία επαφής των μηκυσιομέτρων βρίσκονται σε διαφορετικά τμήματα του δοκιμίου (τα οποία προκύπτουν από την επιφάνεια αστοχίας), τότε, καθώς δημιουργείται η επιφάνεια αστοχίας το δοκίμιο αποφορτίζεται μερικώς και έτσι τα μηκυσιοόμετρα καταγράφουν έναν μικρό εφελκυσμό του δοκιμίου που οφείλεται στην ελαστική συμπεριφορά του. Στη συνέχεια ο ρυθμός παραμόρφωσης που καταγράφουν τα εσωτερικά μηκυσιοόμετρα μηδενίζεται, καθώς τα δύο τμήματα του δοκιμίου δεν παραμορφώνονται άλλο και όλη η μετατόπιση συμβαίνει κατά την επιφάνεια αστοχίας.

Στην περίπτωση που η επιφάνεια αστοχίας διαπερνάει τα σημεία επαφής των μηκυσιομέτρων με το δοκίμιο, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη. Στην ιδανική περίπτωση, όταν δημιουργείται η επιφάνεια αστοχίας ο ρυθμός παραμόρφωσης που καταγράφουν τα μηκυσιοόμετρα αυξάνεται και προσεγγίζει τον ρυθμό που καταγράφει ο εξωτερικός μετρητής. Αυτό συμβαίνει γιατί τα δύο τμήματα του δοκιμίου είναι πλέον απαραμόρφωτα και όλη η παραμόρφωση που επιβάλλεται από τη συσκευή, συμβαίνει κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας. Έτσι τα μηκυσιοόμετρα καταγράφουν την μετατόπιση κατά μήκος της επιφάνειας αυτής. Αν συμβαίνει

διόγκωση εντός της επιφάνειας αστοχίας ο εξωτερικός και οι εσωτερικοί μετρητές έχουν αποκλίσεις.

Στο αντίστοιχο Σχήμα 5.4.5 της δοκιμής μας, φαίνεται η αποκλινούσα τάση q , και οι ρυθμοί μεταβολής της παραμόρφωσης του δοκιμίου σύμφωνα με τον εξωτερικό και τους εσωτερικούς μετρητές. Όπως αναμένεται, επειδή η διάτμηση γίνεται με έλεγχο των παραμορφώσεων (strain control) ο ρυθμός παραμόρφωσης του εξωτερικού μετρητή είναι σταθερός (0,128 mm/h). Οι ρυθμοί τοπικής παραμόρφωσης υπολογίστηκαν εφαπτομενικά, το οποίο εξηγεί και τις μικρές διακυμάνσεις στο διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι όπως συμβαίνει και με το ρυθμό ολικής παραμόρφωσης, οι ρυθμοί τοπικής παραμόρφωσης αυξάνονται αμέσως με την έναρξη της διάτμησης και σταθεροποιούνται γύρω από μία τιμή μικρότερη του ρυθμού ολικής παραμόρφωσης. Για παραμόρφωση 5 % οι ρυθμοί τοπικής παραμόρφωσης διαφοροποιούνται. Ο ρυθμός από το μετρητή 1 πέφτει απότομα και μηδενίζεται, ενώ ο ρυθμός από το μετρητή 2 αυξάνεται στιγμιαία και προσεγγίζει τον ρυθμό που επιβάλλει η συσκευή. Από τη συμπεριφορά τους συμπεραίνουμε πως ο εσωτερικός μετρητής 1 έχει και τα δύο άκρα του στο ίδιο τμήμα του δοκιμίου (που σχηματίζεται από το επίπεδο αστοχίας). Αντίθετα, ο μετρητής 2 έχει καθε άκρο σε διαφορετικό τμήμα του δοκιμίου και έτσι καταγράφει στιγμιαία, τη στιγμή της αστοχίας, ρυθμό ίσο με αυτόν του εξωτερικού μετρητή, και έπειτα η τιμή του σταθεροποιείται στα 0,1 mm/h. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι το επίπεδο αστοχίας δημιουργείται για παραμόρφωση 5% όπως επιβεβαιώνει και η πτώση της αποκλινούσας τάσης.

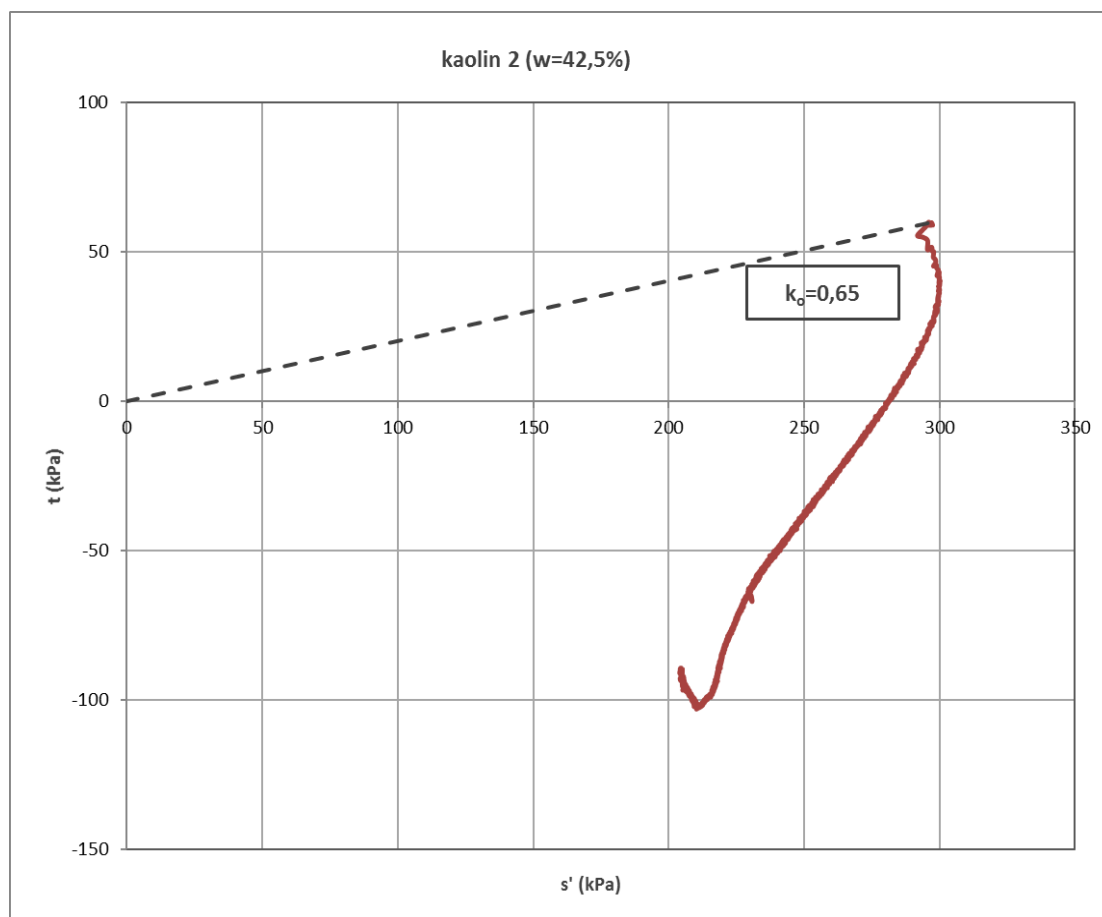


Σχήμα 5.4.5 Συμπεριφορά κατά το σχηματισμό επιπέδου αστοχίας: ρυθμοί μεταβολής της αξονικής παραμόρφωσης και μεταβολή αποκλινούσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για το δοκίμιο kaolin 7

5.4.2 Ενδεικτική δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες

Παρακάτω θα γίνει ανάλυση της δοκιμής εφελκυσμού του δοκιμίου kaolin 2. Το δοκίμιο αρχικά στερεοποιήθηκε στο συμπιεσόμετρο μεσαίων διαστάσεων (2) σε τάση 200 kPa. Μετά την εξόλκευση και την αποφόρτιση, πραγματοποιήθηκε δεύτερη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή (triax 1), η οποία ξεκίνησε από μέση ενεργό τάση $s'=98$ kPa και ολοκληρώθηκε σε τάση $s'=297$ kPa με συντελεστή $K_0=0,65$. Η αρχική υγρασία του δοκιμίου υπολογίστηκε 42,5%, ενώ ο δείκτης πόρων μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης ήταν $e=1,020$.

Στο Σχήμα 5.4.5 φαίνεται η διαδρομή τάσεων στο διδιάστατο επίπεδο $t-s'$ καθώς και η ευθεία στερεοποίησης που ακολουθήθηκε. Στην αρχή γίνεται αποφόρτιση του δοκιμίου, αφού αυτό έχει στερεοποιηθεί ανισότροπα. Η ελάχιστη τιμή του εκτροπέα τάσεων είναι $t=-103,1$ kPa και σημειώνεται κατά την αστοχία του δοκιμίου σε μέση ενεργό τάση $s'=210,1$ kPa. Η διαδρομή τάσεων εδώ είναι παρόμοια με τις διαδρομές τάσεων στις δοκιμές εφελκυσμού στις μελέτες του Atkinson.



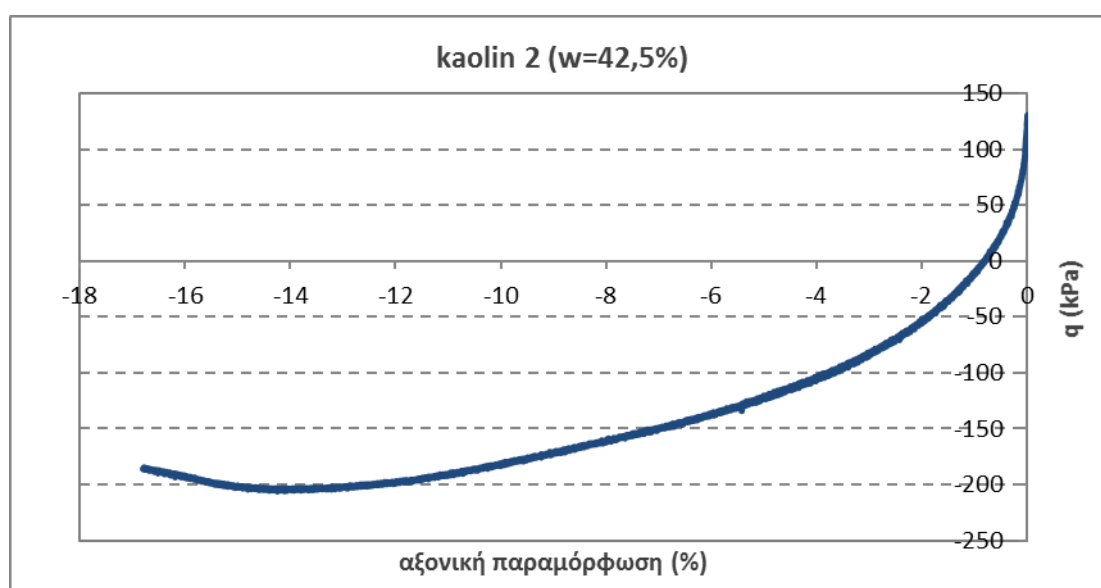
Σχήμα 5.4.6 Διαδρομή ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού στο δοκίμιο kaolin 2

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης (q) - αξονικής παραμόρφωσης (Σχήμα 5.4.7), μεταβολής πίεσης πόρων (dU) - αξονικής

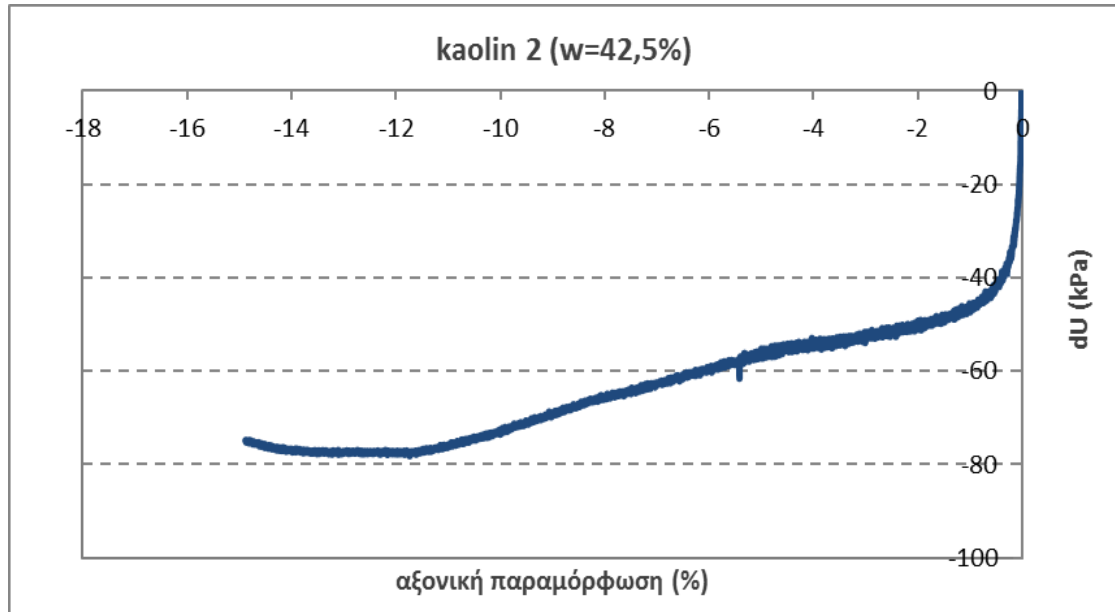
παραμόρφωσης (Σχήμα 5.4.8), καθώς και τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα των δοκιμών kaolin 2 και kaolin 3. Η αξονική παραμόρφωση καταγράφεται εδώ μόνο από το εξωτερικό μηκυσιόμετρο, καθώς οι μεγάλες παραμορφώσεις έθεσαν τα εσωτερικά εκτός λειτουργίας. Όπως αναμενόταν, κατά τον εφελκυσμό του υλικού, έχουμε μείωση της αποκλίνουσας τάσης, της μέσης ενεργού τάσης και της πίεσης του νερού των πόρων. Η παραμόρφωση του δοκιμίου μετά την αστοχία συνεχίζεται εξ' ολοκλήρου κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας.

Από το Σχήμα 5.4.7, παρατηρούμε ότι για πολύ μικρές παραμορφώσεις, της τάξης 1%, η αποκλίνουσα τάση μειώνεται απότομα. Στη συνέχεια μειώνεται με χαμηλότερο ρυθμό και τελικά σταθεροποιείται κοντά στην ελάχιστη τιμή της για παραμόρφωση 12,5%. Το επίπεδο αστοχίας φαίνεται να δημιουργείται για παραμόρφωση περίπου 14,5%-15%, οπότε ξεκινάει και η αύξηση της αποκλίνουσας τάσης.

Κατά τον εφελκυσμό υπάρχει τάση για διόγωση του δοκιμίου, δημιουργούνται υποπίεσεις στους πόρους του δοκιμίου και όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο Σχήμα 5.4.8 η πίεση πόρων μειώνεται, αρχικά κατακόρυφα (παραμόρφωση 1%) και στη συνέχεια με μικρότερο ρυθμό, μέχρι να σταθεροποιηθεί στην ελαχιστη τιμή της. Η σταθεροποίηση προηγείται του σχηματισμού επιπέδου αστοχίας, και συμβαίνει για παραμόρφωση περίπου 11,5%.

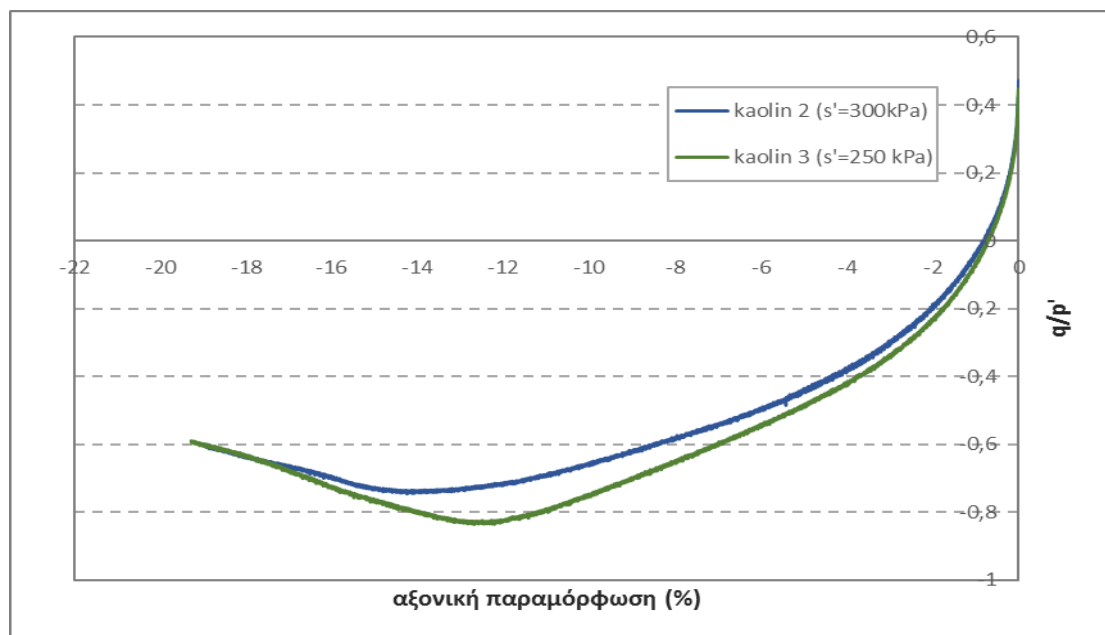


Σχήμα 5.4.7 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για τη δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού kaolin 2

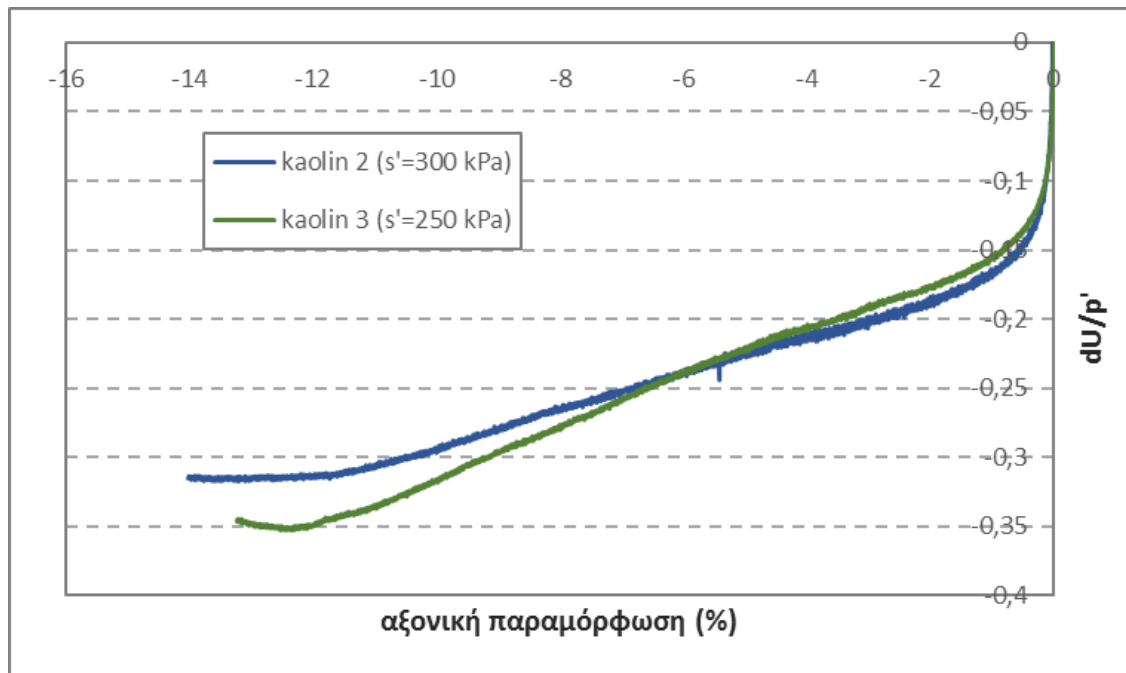


Σχήμα 5.4.8 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για τη δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού kaolin 2

Τα διαγράμματα στα Σχήματα 5.4.9 και 5.4.10 είναι τα κανονικοποιημένα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης και πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 2 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές ενεργές τάσεις. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των διαγραμμάτων είναι παραπλήσιες, με τη διαφορά ότι η αστοχία του kaolin 3 συμβαίνει περίπου για παραμόρφωση 12,5%, δηλαδή νωρίτερα από το kaolin 2. Παρόλα αυτά, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.4.10 οι πιέσεις πόρων σταθεροποιούνται ταυτόχρονα.



Σχήμα 5.4.9 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για 2 δοκιμές εφελκυσμού

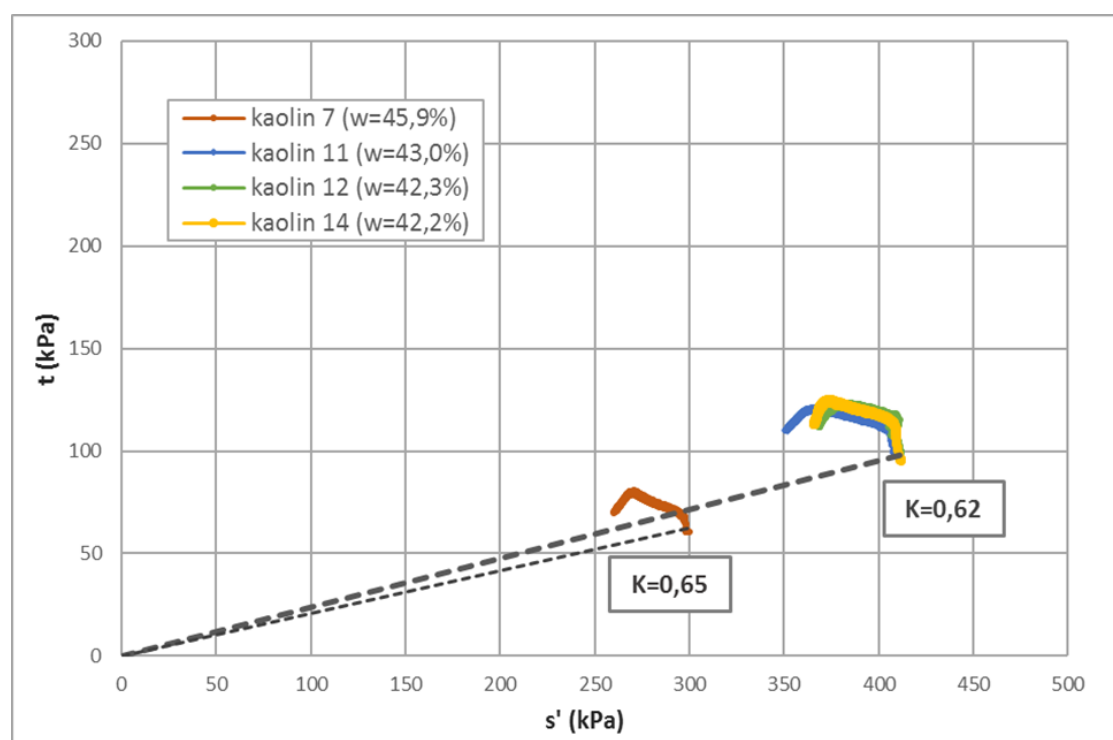


Σχήμα 5.4.10 Κανονικοποιημένη μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για 2 δοκιμές εφελκυσμού

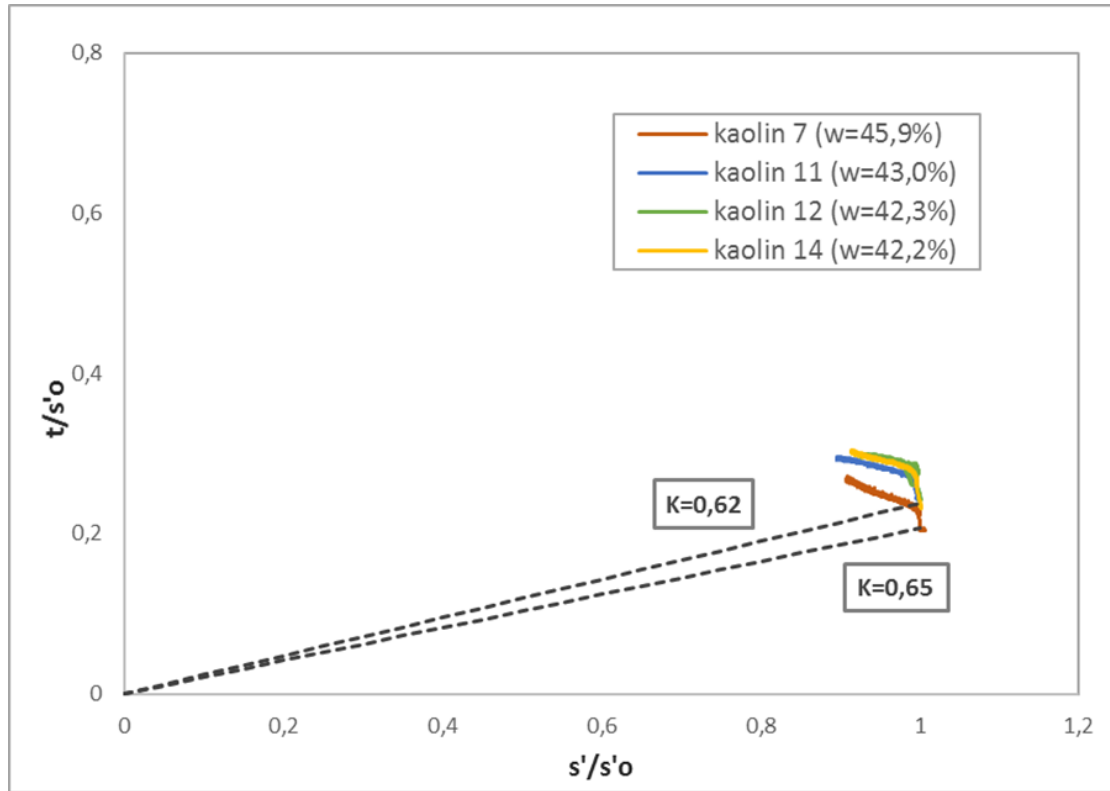
5.4.3 Επαναληψιμότητα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατίθενται τα αποτελέσματα τεσσάρων δοκιμών διάτμησης. Στις τρεις από αυτές, τα δοκίμια καολίνη στερεοποιήθηκαν με συντελεστή ουδέτερης ώθησης $K_0=0,62$ σε μέση ενεργό τάση $s'=410$ kPa, και στην τέταρτη με συντελεστή ουδέτερης ώθησης $K_0=0,65$ σε μέση ενεργό τάση $s'=300$ kPa. Οι αρχικές υγρασίες των δοκιμών πριν τη στερεοποίηση αναγράφονται πάνω στα διαγράμματα και κυμαίνονται από $w=42,2\%$ έως $w=45,9\%$.

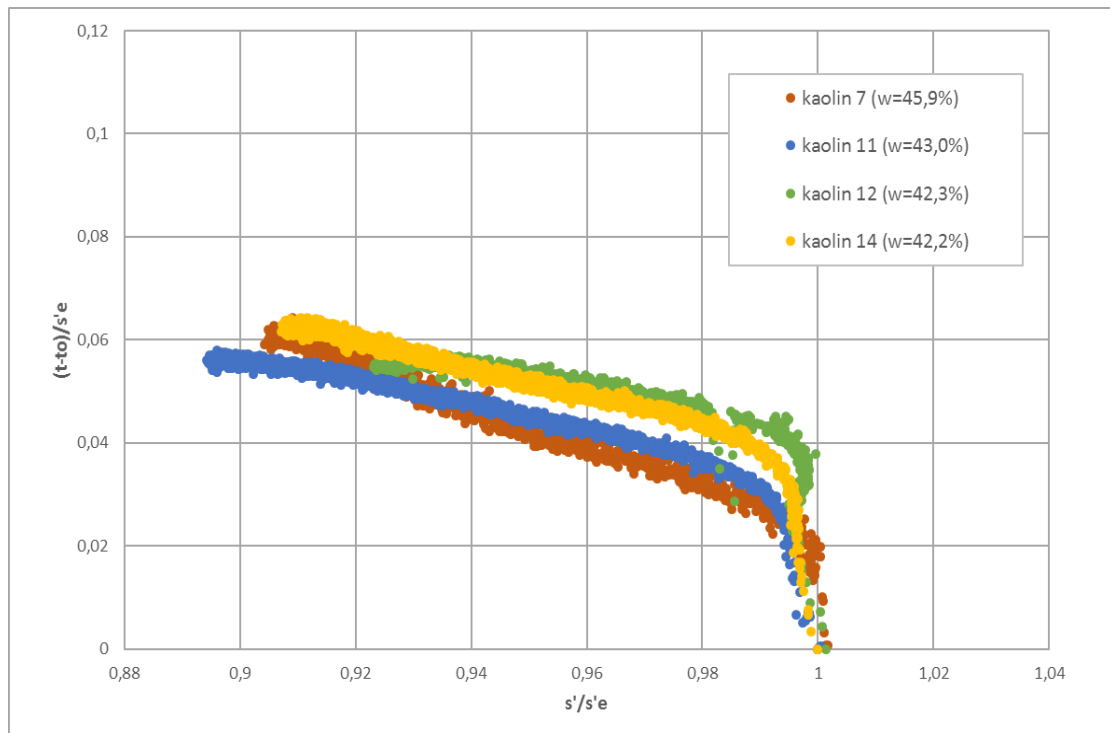
Τα παρακάτω διαγράμματα περιγράφουν τη διαδρομή τάσεων κατά τη δοκιμή διάτμησης στο δισδιάστατο επίπεδο $t-s'$ (Σχήμα 5.4.11), καθώς και την κανονικοποιημένη διαδρομή ως προς την ενεργό τάση στερεοποίησης s'_e (Σχήμα 5.4.12). Η διαφορά στον συντελεστή ουδέτερης ώθησης φαίνεται στο κανονικοποιημένο διάγραμμα του Σχήματος 5.4.12, καθώς η αφετηρία της καμπύλης για το δοκίμιο kaolin 7 βρίσκεται χαμηλότερα από τα άλλα δοκίμια, όπως είναι αναμενόμενο. Στο δεύτερο όμως κανονικοποιημένο διάγραμμα στο Σχήμα 5.4.13, φαίνεται ότι οι καμπύλες συντρέχουν και για τα 4 δοκίμια. Παρατηρείται μείωση της μέσης ενεργού τάσης (s') καθ' όλη τη διάρκεια της διάτμησης, με την αποκλίνουσα τάση αρχικά να αυξάνεται απότομα, και στη συνέχεια με μικρότερη κλίση, μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η τάση για συμπύκνωση των δοκιμών είναι χαρακτηριστικό της αργιλικής φύσης του καολινίτη. Οι μικρές διαφορές στην υγρασία δεν φαίνεται να επηρεάζουν την συμπεριφορά των δοκιμών.



Σχήμα 5.4.11 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για 4 δοκιμές



Σχήμα 5.4.12 Κανονικοποιημένες διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t/s'_e - s'/s'_e$ για 4 δοκιμές



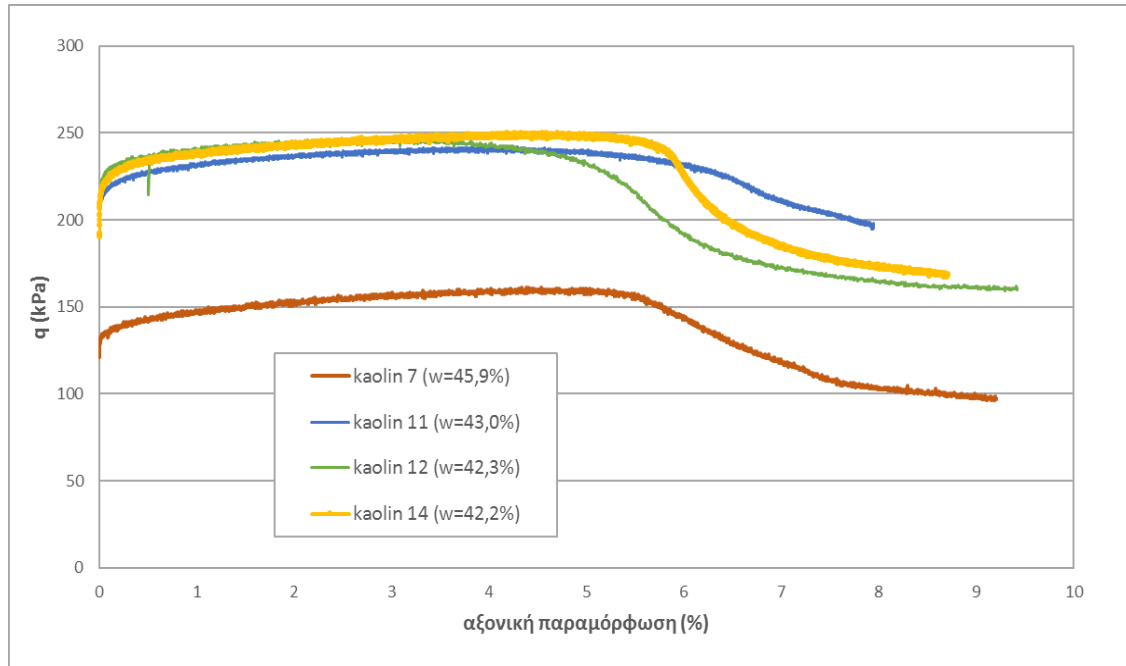
Σχήμα 5.4.13 Επαναληψιμότητα κανονικοποιημένων διαδρομών ενεργών τάσεων για 4 δοκιμές

Σε όλες τις δοκιμές εμποδιζόμενης στράγγισης, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.4.14 και 5.4.16, η απολίνουσα τάση αυξάνεται κατακόρυφα για πολύ μικρές παραμορφώσεις. Στη συνέχεια η κλίση μειώνεται σημαντικά μέχρι η αποκλίνουσα τάση q να φτάσει τη μέγιστη τιμή της. Ακολουθεί παραμόρφωση των δοκιμών υπό σταθερή κατακόρυφη τάση, μέχρι την αστοχία, μετά την οποία η τάση μειώνεται απότομα. Η διατμητική αντοχή φαίνεται να μειώνεται και στα τέσσερα δοκίμια για παραμόρφωση 5%-5,5%, το οποίο υποδηλώνει ότι η επιφάνεια αστοχίας δημιουργείται μέσα σε αυτό το διάστημα. Παρατηρούμε επίσης πως για ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων η αποκλίνουσα τάση μένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της. Πιο συγκεκριμένα, η αποκλίνουσα τάση αυξάνεται κατακόρυφα για πολύ μικρές παραμορφώσεις της τάξης $<0,3\%$ και έπειτα σταθεροποιείται μέχρι και την αστοχία (5%-5,5%). Αυτή τη συμπεριφορά δηλώνει ότι όλα τα δοκίμια έφτασαν στην κρίσιμη κατάσταση.

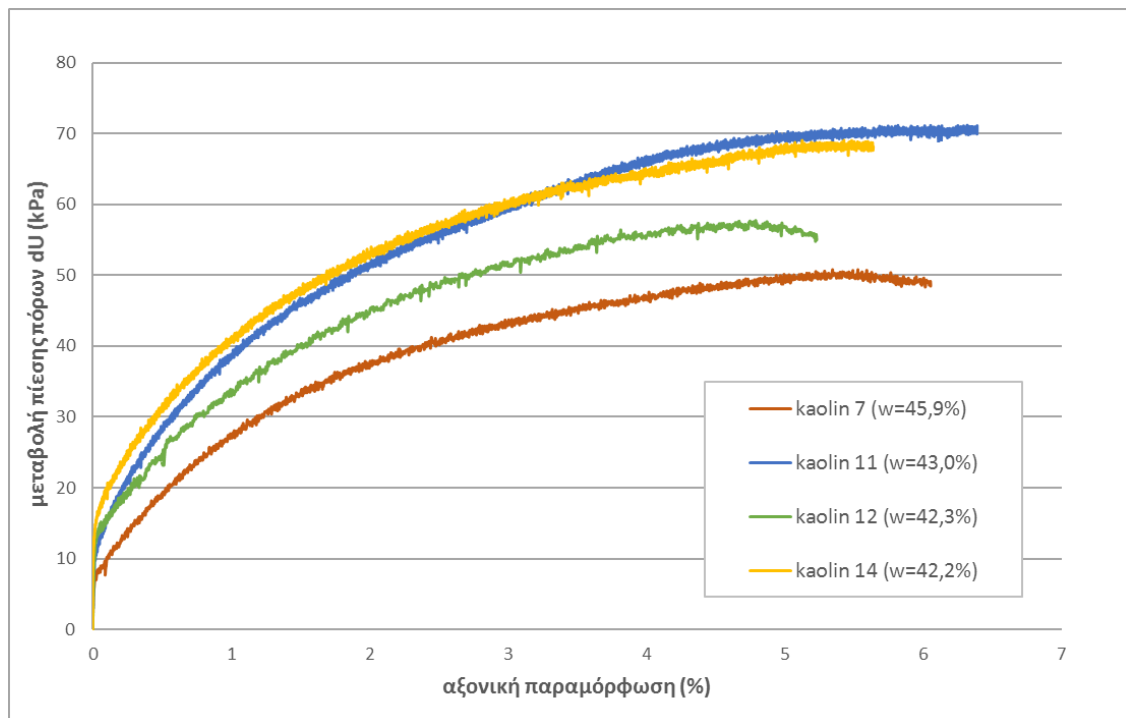
Τα διαγράμματα των Σχήμάτων 5.4.15 και 5.4.17, όπως και οι διαδρομές τάσεων στα προηγούμενα διαγράμματα, δείχνουν την τάση για συστολή του υλικού κατά την τριαξονική θλίψη. Η πίεση πόρων αυξάνεται απότομα σε όλα τα δοκίμια για πολύ μικρές παραμορφώσεις ($<1\%$) και στη συνέχεια η κλίση της καμπύλης μειώνεται. Στα τρία από τα δοκίμια η πίεση πόρων σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή της για παραμόρφωση 5% ενώ στο δοκίμιο kaolin 12 σταθεροποιείται για λίγο μικρότερη παραμόρφωση (4%-4,5%).

Παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή σταθερή αποκλίνουσα τάση από πολύ μικρή παραμόρφωση, παραπλήσια μεταβολή πίεσης πόρων και αστοχία σε μικρές παραμορφώσεις συναντάμε στη δοκιμή του Burland. Αντίθετα, στις δοκιμές των Atkinson και Stipho το επίπεδο αστοχίας δημιουργήθηκε σε παραμορφώσεις 10% και 15%-20% αντιστοίχα. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στον διαφορετικό τύπο καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα ο καολινίτης που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές μας έχει πολύ μικρότερο δείκτη πλαστιμότητας ($PI=12$) σε σχέση με τον Speswhite ($PI=30$). Έτσι οι μικρότερες παραμορφώσεις στις δοκιμές μας αποδίδονται στον πολύ μικρότερο δείκτη πλαστιμότητας.

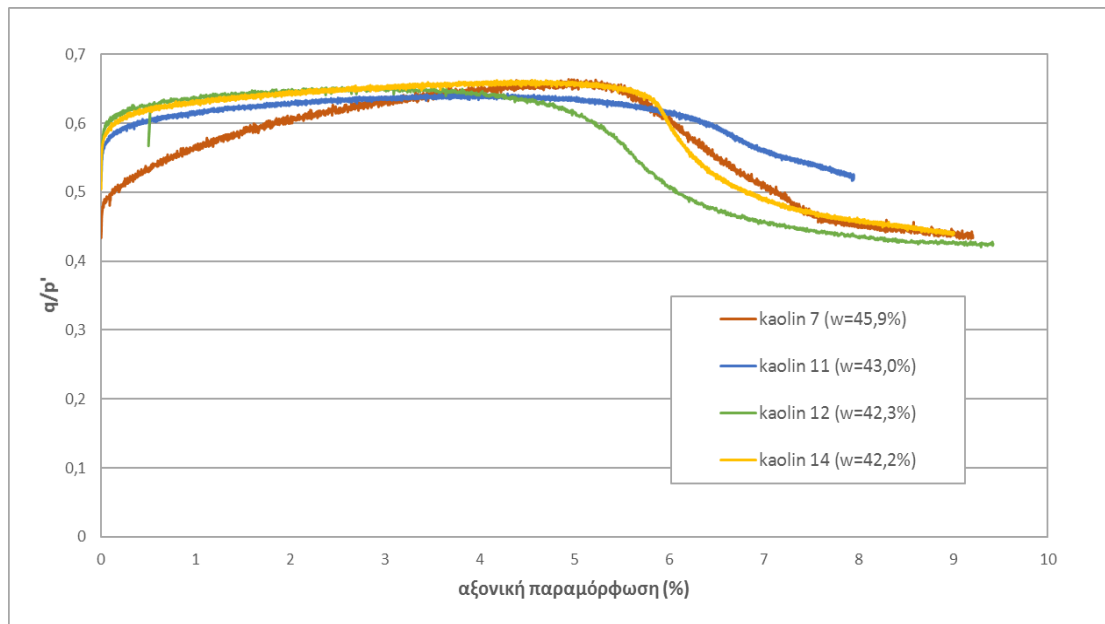
Μία διαφορά σε σχέση με τη δοκιμή του Burland είναι το σημείο κρίσιμης κατάστασης πάνω στις διαδρομές τάσεων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κρίσιμη κατάσταση στις δοκιμές μας συμβαίνει όταν το δοκίμιο φτάσει τη μέγιστη διατμητική αντοχή του. Αντίθετα στη δοκιμή του Burland, η κρίσιμη κατάσταση συμβαίνει μετά τη μέγιστη διατμητική αντοχή του δοκιμίου.



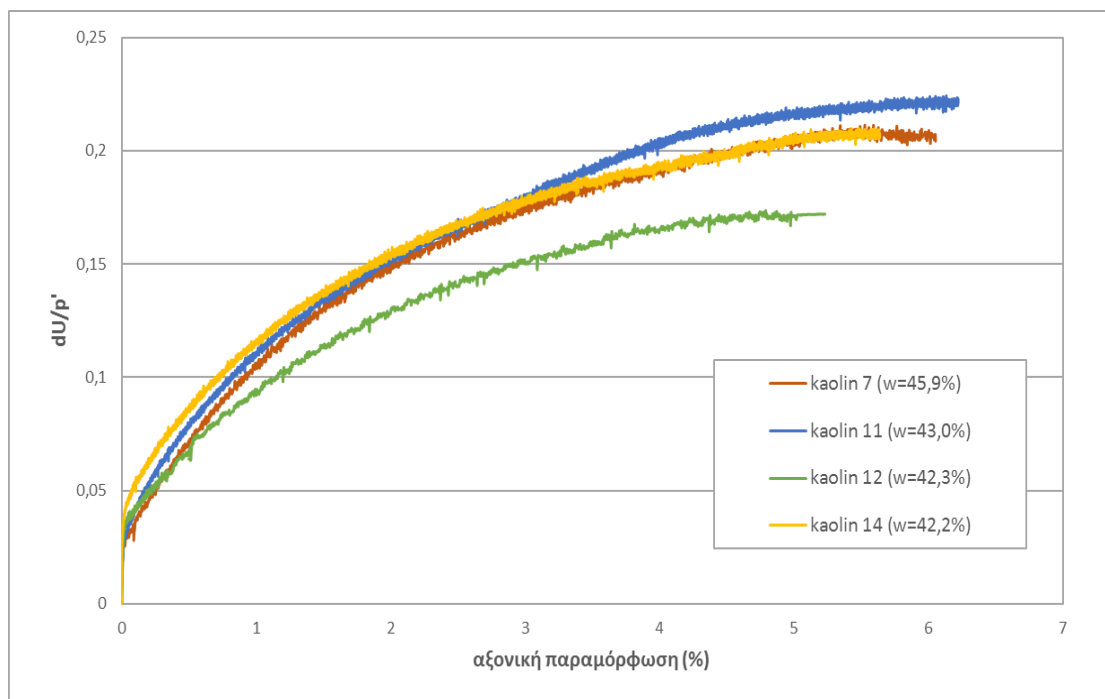
Σχήμα 5.4.14 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές



Σχήμα 5.4.15 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές

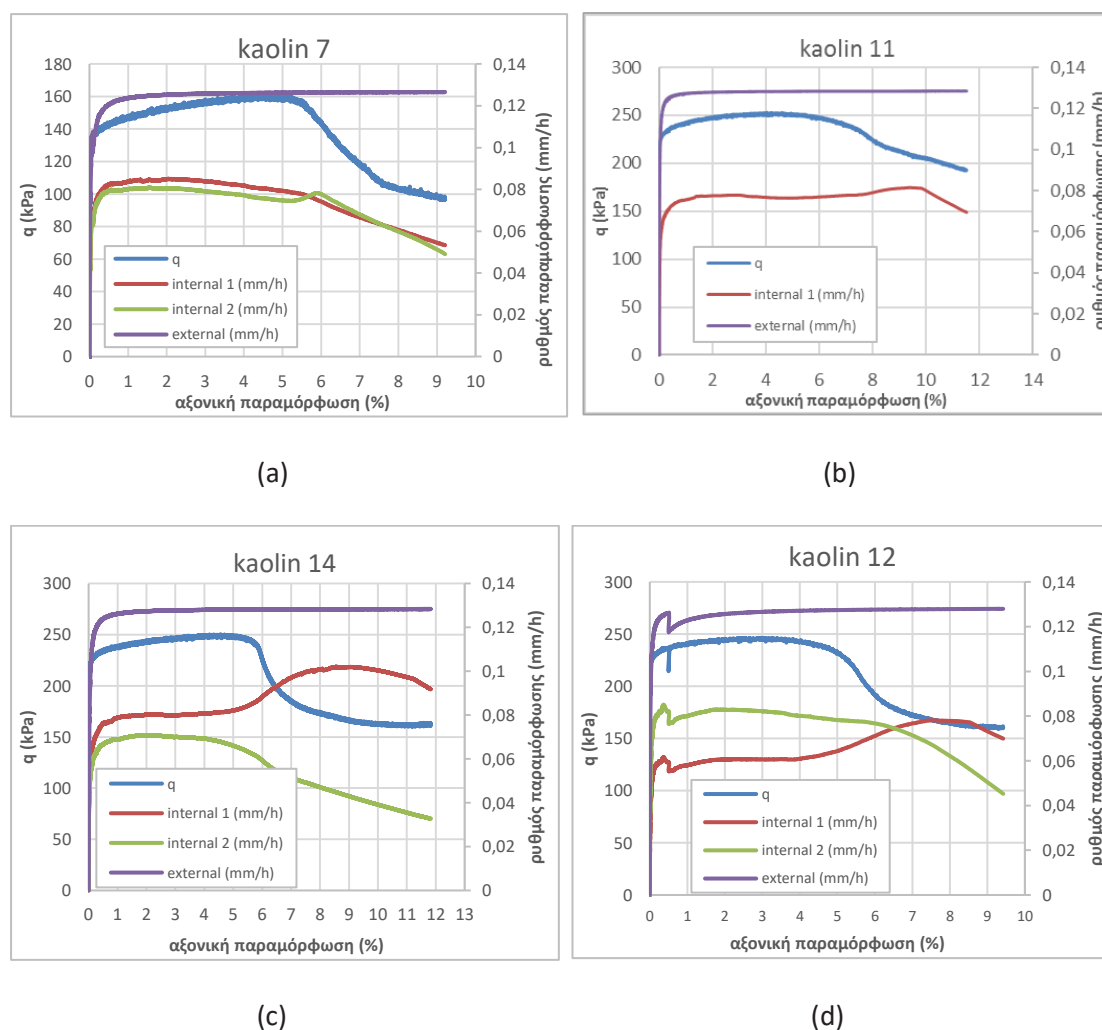


Σχήμα 5.4.16 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές



Σχήμα 5.4.17 Μεταβολή κανονικοποιημένης πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές

Στα παρακάτω διαγράμματα του Σχήματος 5.4.18 χρησιμοποιούνται οι καταγραφές των μηκυνσιομέτρων για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της παραμόρφωσης κατά την οποία δημιουργείται το επίπεδο αστοχίας. Παρατηρούμε ότι στο δοκίμιο kaolin 11 η μείωση της αποκλίνουσας τάσης q μετά την αστοχία γίνεται πιο αργά από τις υπόλοιπες δοκιμές. Αυτό φαίνεται και από τη μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσης. Συμπεραίνουμε πως στο δοκίμιο kaolin 11 η επιφάνεια αστοχίας δημιουργήθηκε με πιο αργό ρυθμό σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές. Στα άλλα τρία δοκίμια, τα δεδομένα από τα μηκυνσιομέτρα επαληθεύουν τη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης για τη δημιουργία της επιφάνειας αστοχίας. Παρατηρείται ακόμα ότι απότομη πτώση της q ακολουθείται και από απότομη αλλαγή στο ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης.

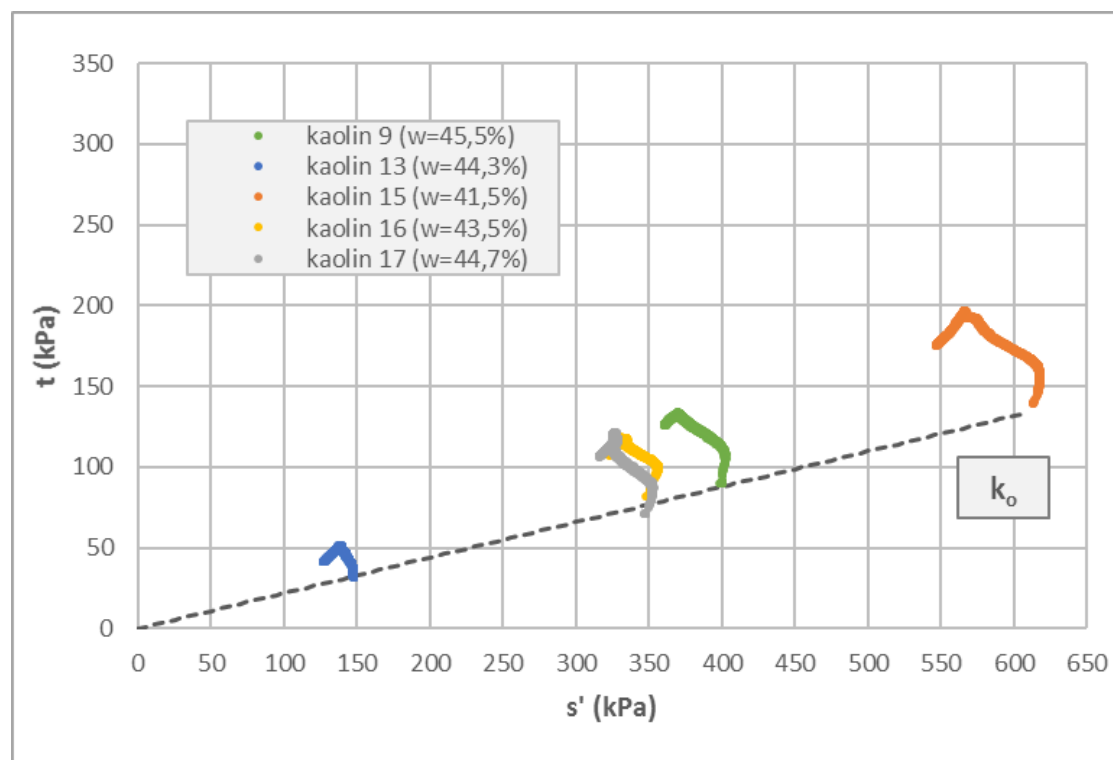


Σχήμα 5.4.18 Συμπεριφορά κατά το σχηματισμό επιφάνειας αστοχίας: ρυθμοί μεταβολής της αξονικής παραμόρφωσης και μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για τα δοκίμια (a) kaolin 7, (b) kaolin 11, (c) kaolin 14, (d) kaolin 12

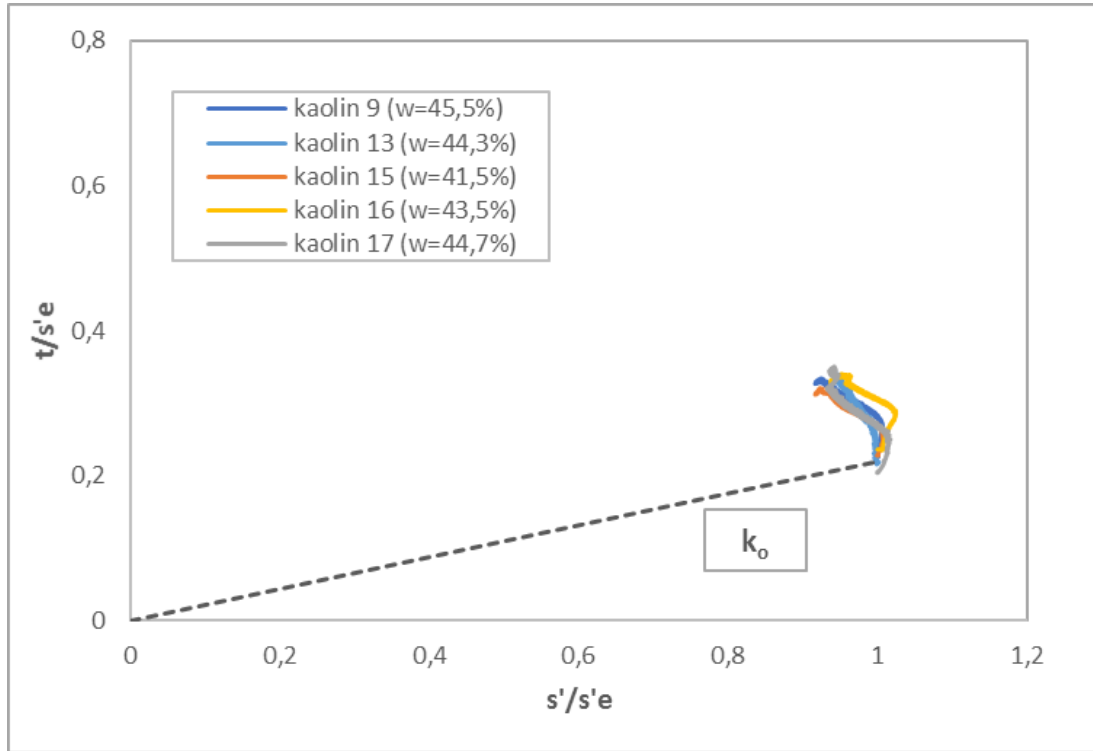
Στο Σχήμα 5.4.19 φαίνεται μία δεύτερη ομαδοποίηση δοκιμών τριαξονικής θλίψης. Στο διάγραμμα φαίνονται οι διαδρομές τάσεων για πέντε δοκίμια που στερεοποιήθηκαν σε διαφορετικές ενεργές τάσεις. Όταν οι διαδρομές τάσεων κανονικοποιηθούν ως προς την μέση ενεργό τάση s'_e , συντρέχουν στο επίπεδο $t/s'_e - s/s'_e$, παρουσιάζοντας όμως μία μικρή διασπορά (Σχήμα 5.4.20), σε σχέση με τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα του Atkinson. Οι μικρές διαφορές στα ποσοστά υγρασίας δεν φαίνεται ούτε εδώ να επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δοκιμών. Υπενθυμίζουμε ότι τα αναγραφόμενα ποσοστά υγρασίας αναφέρονται στην κατάσταση των δοκιμών πριν τη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή.

Σε σύγκριση με τις παραπάνω δοκιμές, οι διαδρομές τάσεων εδώ έχουν μεγαλύτερες κλίσεις. Επιπλέον όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.4.21 και 5.4.23 αποκλίνουσας τάσης-παραμόρφωσης, η πτώση της αποκλίνουσας τάσης και η δημιουργία επιφάνειας αστοχίας συμβαίνουν για παραμορφώσεις της τάξης 6%-6,5%, δηλαδή λίγο μεγαλύτερες σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές.

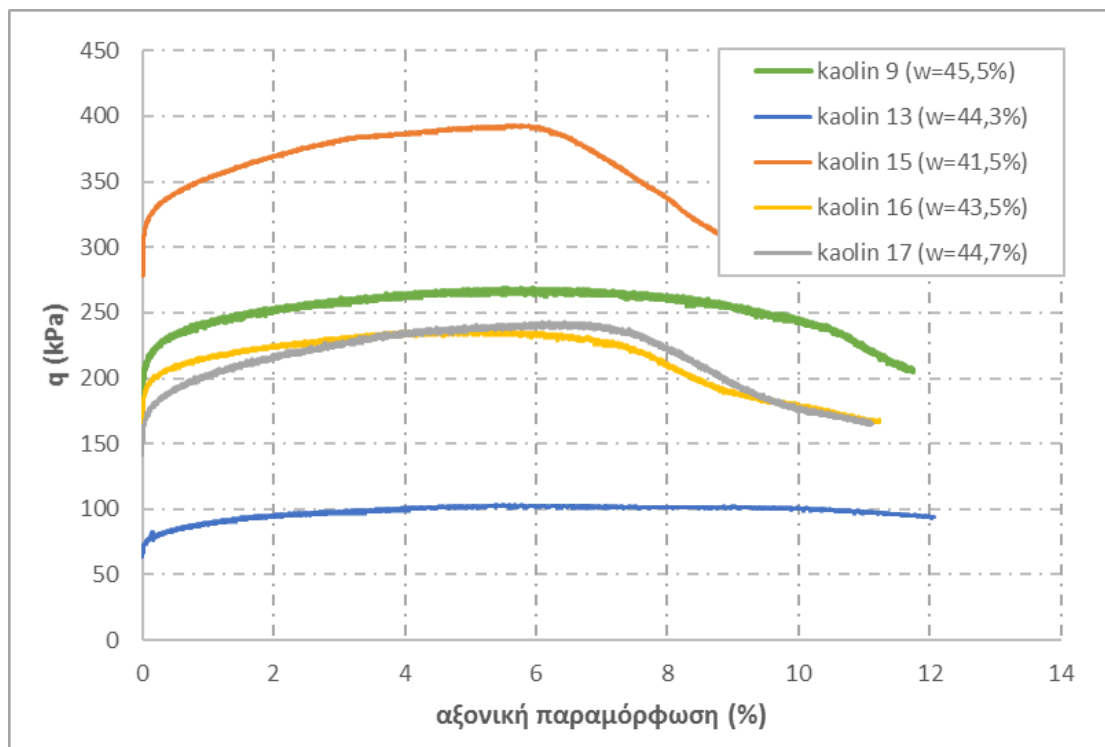
Όσον αφορά στα Σχήματα 5.4.21 και 5.4.22, είναι εμφανείς οι διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης των δοκιμών, με τα στερεοποιημένα σε μεγαλύτερες τάσεις δοκίμια να αναπτύσσουν υψηλότερες διατμητικές αντοχές και πιέσεις πόρων. Ωστόσο όταν οι τιμές κανονικοποιηθούν οι καμπύλες συντρέχουν μεταξύ τους όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.4.23 και 5.4.24. Η απόκλιση των δοκιμών kaolin 16 και kaolin 17 που παρατηρείται στο κανονικοποιημένο διάγραμμα πίεσης πόρων οφείλεται σε διαφορές στο συντελεστή K_0 κατά τη στερεοποίηση όπως θα δούμε και παρακάτω.



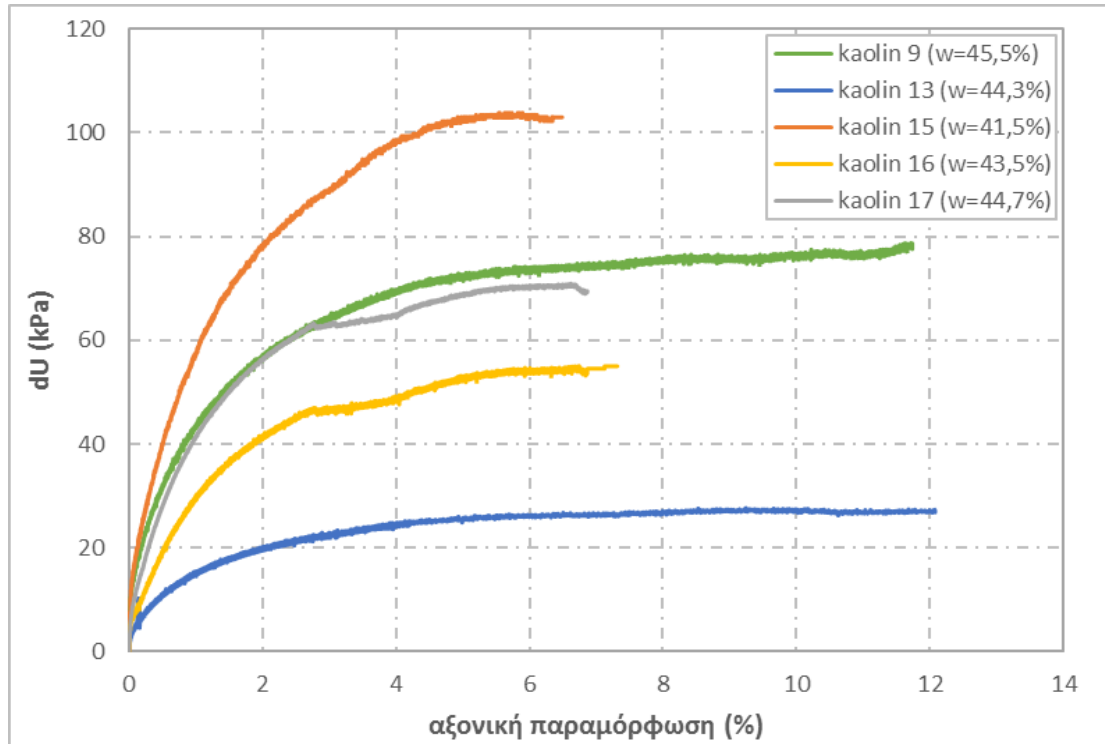
Σχήμα 5.4.19 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις



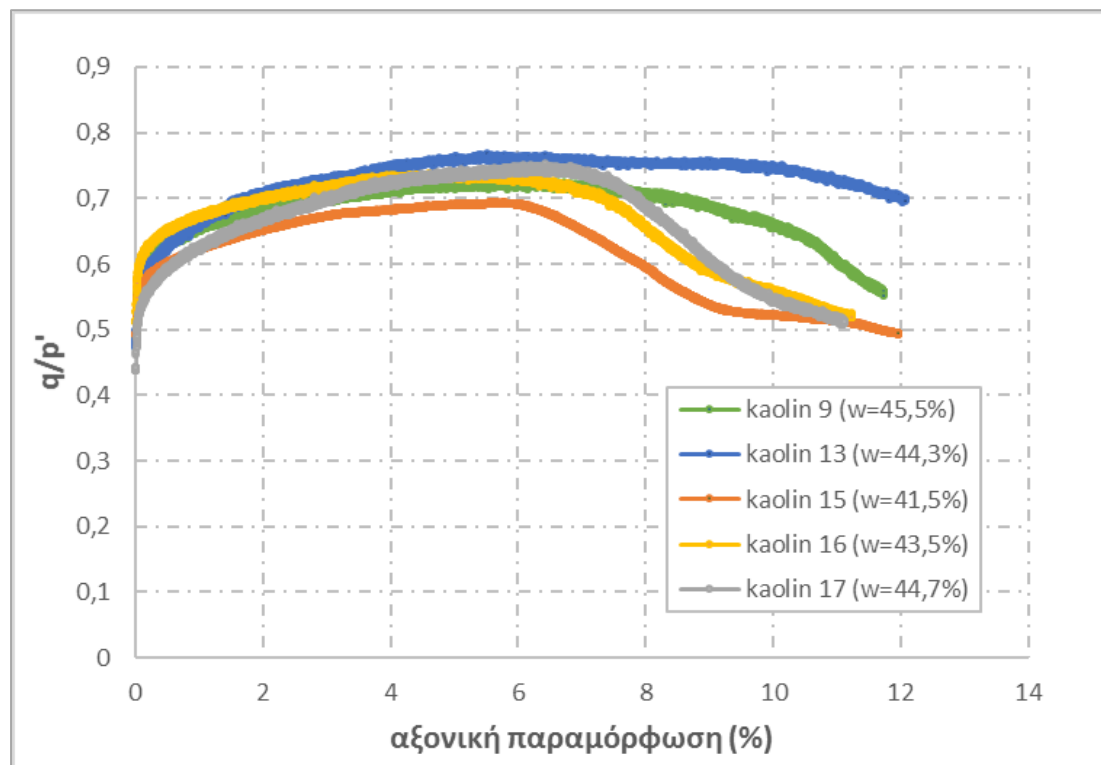
Σχήμα 5.4.20 Κανονικοποιημένες διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις



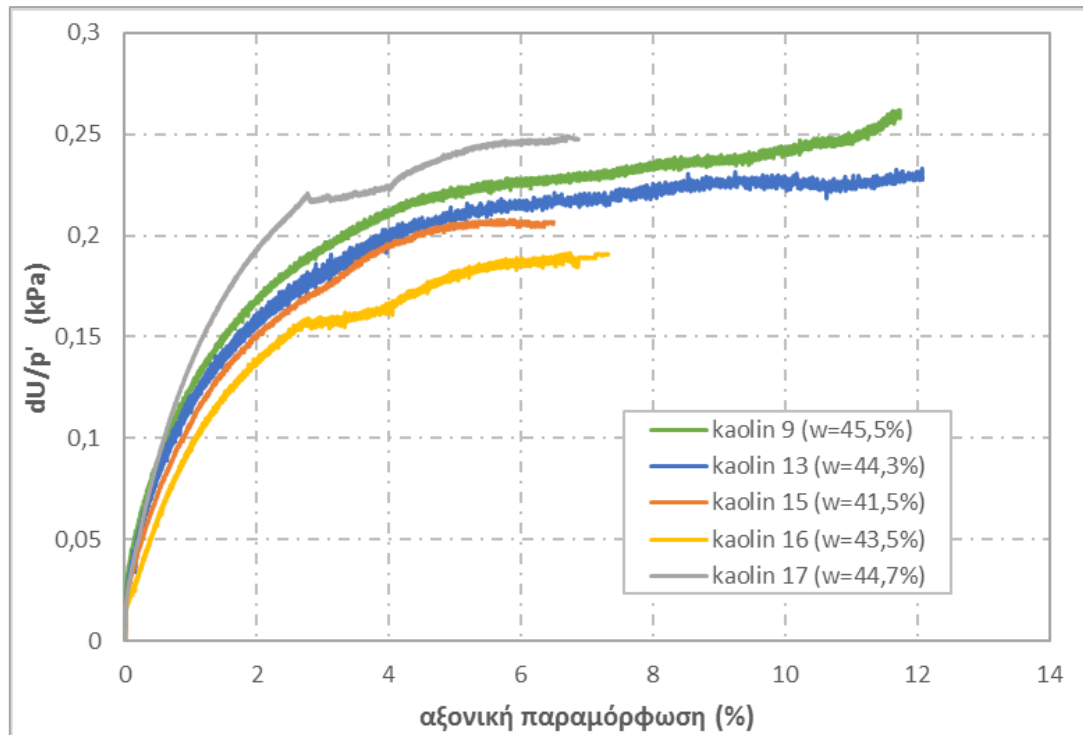
Σχήμα 5.4.21 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης q σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις



Σχήμα 5.4.22 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις



Σχήμα 5.4.23 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις



Σχήμα 5.4.24 Μεταβολή κανονικοποιημένης πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις

Μία πιθανή αιτία που διαφοροποιεί τις διαδρομές τάσεων των πέντε αυτών δοκιμών σε σχέση με τις προηγούμενες του Σχήματος 5.4.11 είναι ο βαθμός ανισοτροπίας των δοκιμών. Οι τρεις από τις τέσσερις δοκιμές του Σχήματος 5.4.11 στερεοποιήθηκαν με $K_0=0,62$, ενώ οι τέσσερις από τις 5 δοκιμές του Σχήματος 5.4.19 στερεοποιήθηκαν με $K_0=0,65$.

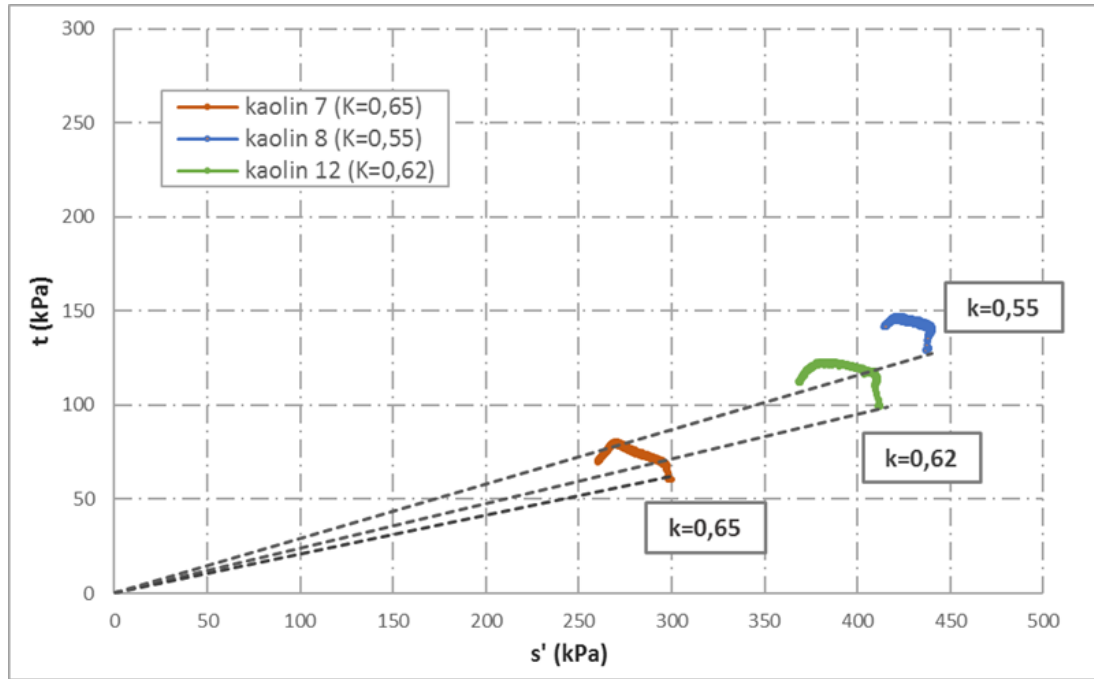
5.4.4 Επίδραση του συντελεστή $K=\sigma'_3/\sigma'_1$ κατά τη στερεοποίηση, στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα από τρεις δοκιμές σε δοκίμια που στερεοποιήθηκαν με διαφορετικούς συντελεστές $K=\sigma'_3/\sigma'_1$. Συγκεκριμένα το δοκίμιο kaolin 7 στερεοποιήθηκε σε μέση ενεργό τάση $s'=300$ kPa με συντελεστή $K=0,65$, το δοκίμιο kaolin 12 στα 410 kPa με $K=0,62$ και το δοκίμιο kaolin 8 στα 440 kPa με $K=0,55$.

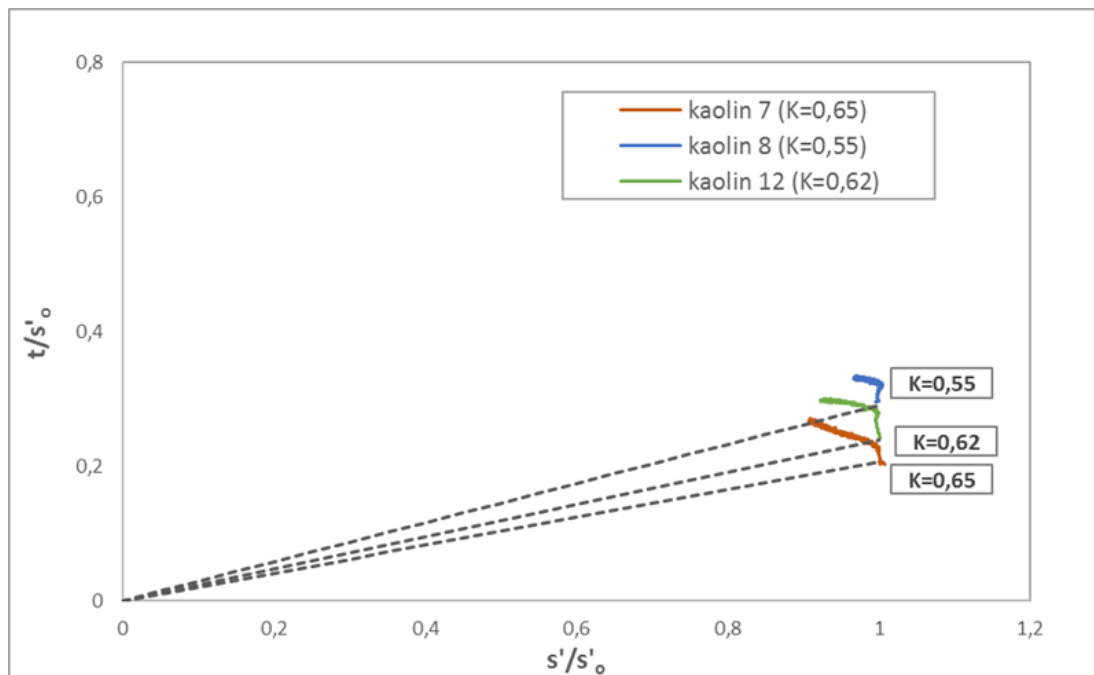
Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής τάσεων K , τόσο μικρότερος είναι και ο λόγος των πλευρικών προς τις κατακόρυφες φορτίσεις κατά τη στερεοποίηση, και επομένως τόσο πιο ψηλά στο επίπεδο $t-s'$ βρίσκεται η αφετηρία της τριαξονικής θλίψης. Παρατηρούμε ότι, στο επίπεδο $t-s'$ (Σχήμα 5.4.25), και πιο έντονα στο κανονικοποιημένο επίπεδο $t/s'_e-s'/s'_e$ (Σχήμα 5.4.26), οι διαδρομές τάσεων είναι μικρότερες για τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν με μικρότερους συντελεστές K . Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν με μικρότερο συντελεστή K είναι πιο κοντά στην ευθεία κρίσιμης κατάστασης και έτσι αστοχούν πιο γρήγορα. Οι διαφορές στις διαδρομές τάσεων φαίνονται και στις δοκιμές του Stipho με διαφορετικούς βαθμούς ανισοτροπίας.

Η πιο γρήγορη αστοχία των δοκιμών που στερεοποιήθηκαν με μικρότερο K , φαίνεται και στα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης-αξονικής παραμόρφωσης των Σχήματων 5.4.27 και 5.4.28. Καθώς αυξάνεται η ανισοτροπία (μειώνεται ο συντελεστής K), η αποκλίνουσα τάση ξεκινάει πτωτική πορεία σε μικρότερες παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα για το δοκίμιο kaolin 8 ($k=0,55$) η αποκλίνουσα τάση αρχίζει να μειώνεται σε παραμόρφωση περίπου 3%-3,5%, για το δοκίμιο kaolin 12 ($k=0,62$) σε παραμόρφωση 3,5%-4% και για το δοκίμιο kaolin 7 ($k=0,65$) για παραμόρφωση 5%-5,5%. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο κανονικοποιημένο διάγραμμα στο Σχήμα 5.4.28 όπου η αποκλίνουσα τάση κανονικοποιείται ως προς τις διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις.

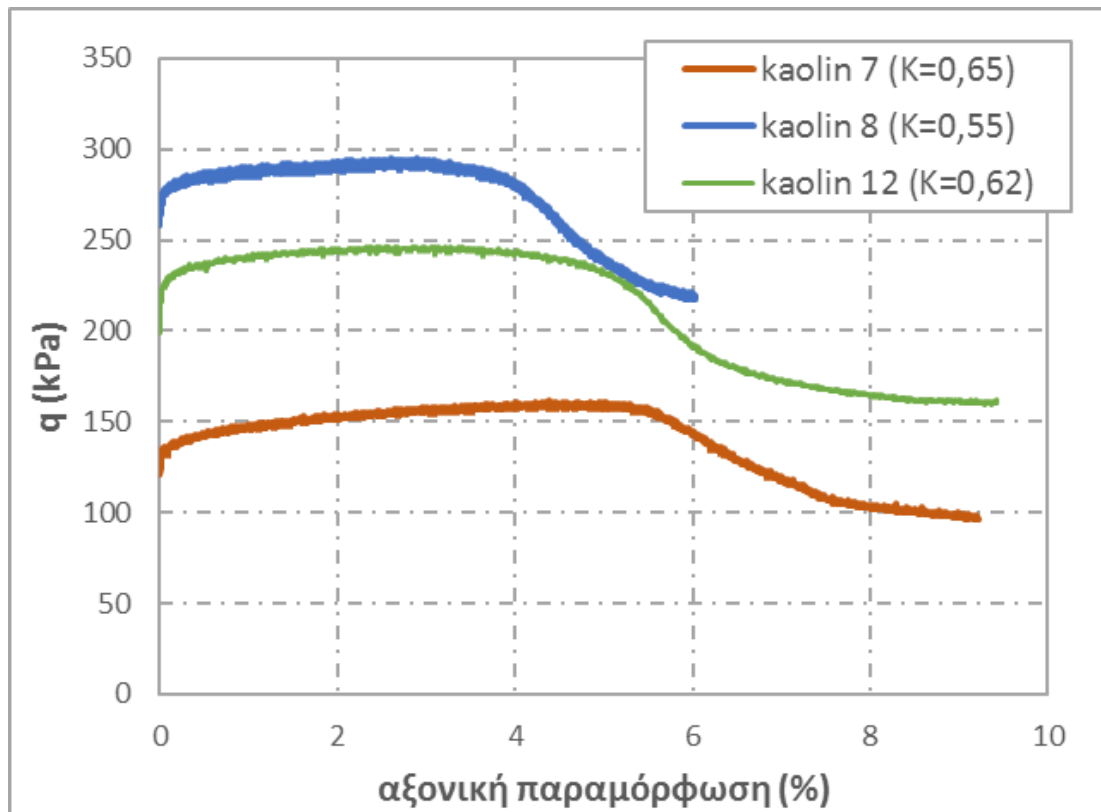
Η επίδραση του συντελεστή στερεοποίησης φαίνεται και στη μεταβολή των πιέσεων του νερού των πόρων. Η επίδραση αυτή δεν γίνεται αντιληπτή στο διάγραμμα του Σχήματος 5.4.29, καθώς οι διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης παίζουν πιο ενεργό ρόλο στη μεταβολή των πιέσεων πόρων. Όταν όμως οι πιέσεις πόρων κανονικοποιηθούν ως προς την μέση ενεργό τάση στο διάγραμμα του Σχήματος 5.4.30, παρατηρούμε ότι, όσο μειώνεται ο συντελεστής K κατά την στερεοποίηση, τόσο μικρότερες πιέσεις πόρων αναπτύσσονται κατά την τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες. Την ίδια συμπεριφορά ως προς τη μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων κατά την τριαξονική θλίψη, για διαφορετικούς συντελεστές K κατά την στερεοποίηση, παρατήρησε στις μελέτες του ο Stipho.



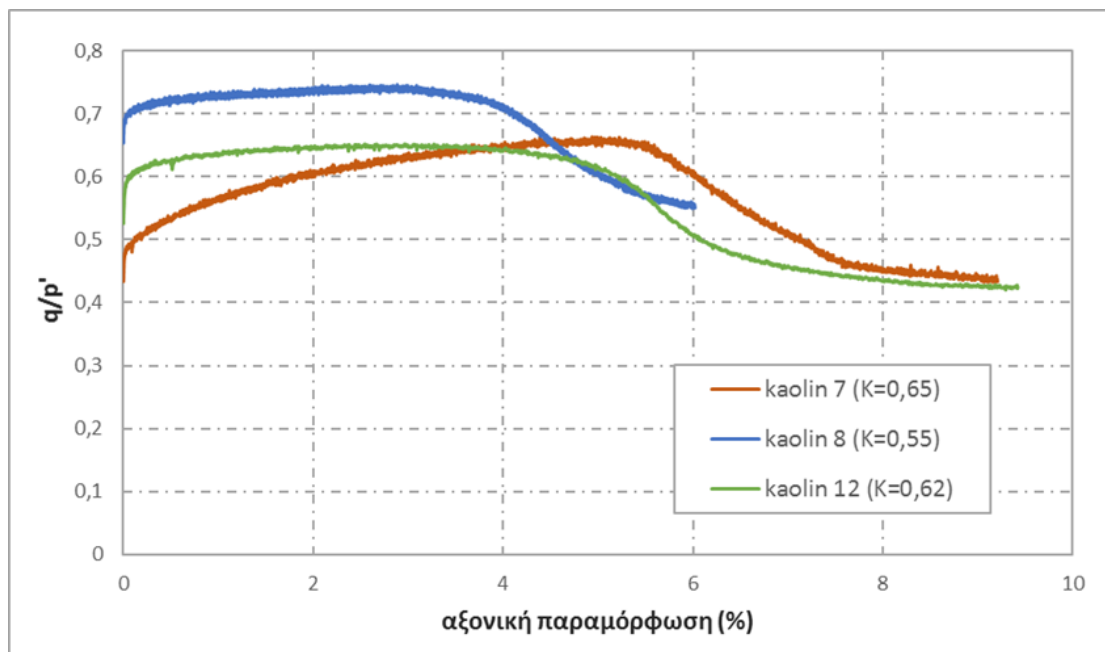
Σχήμα 5.4.25 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K



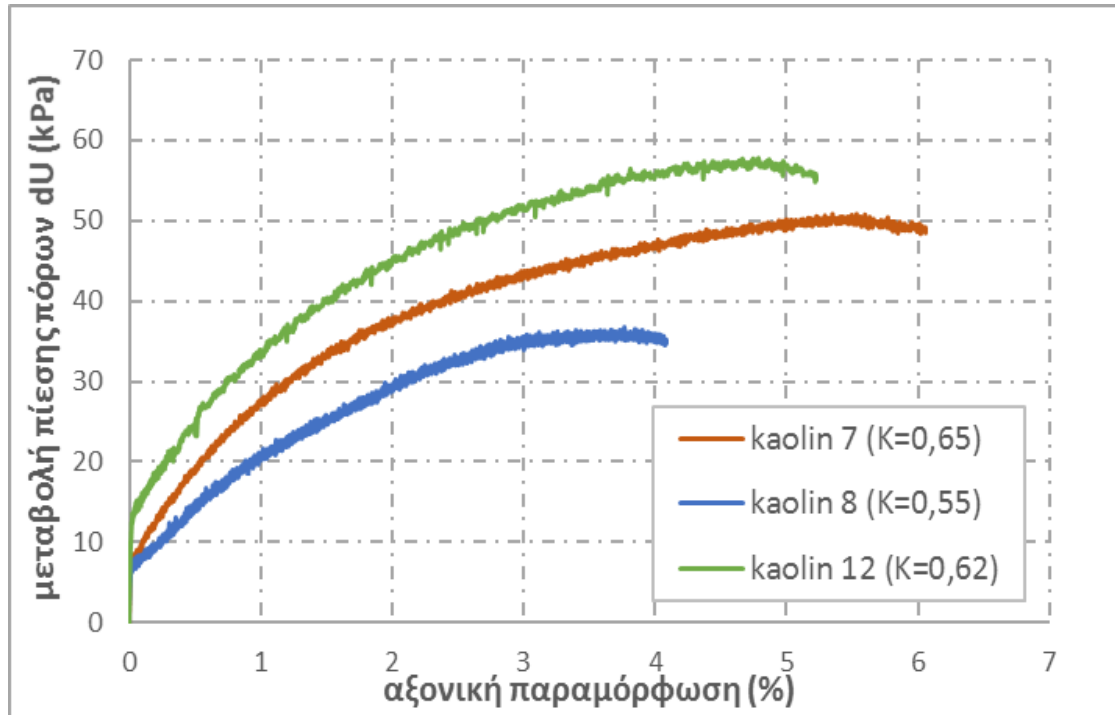
Σχήμα 5.4.26 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K



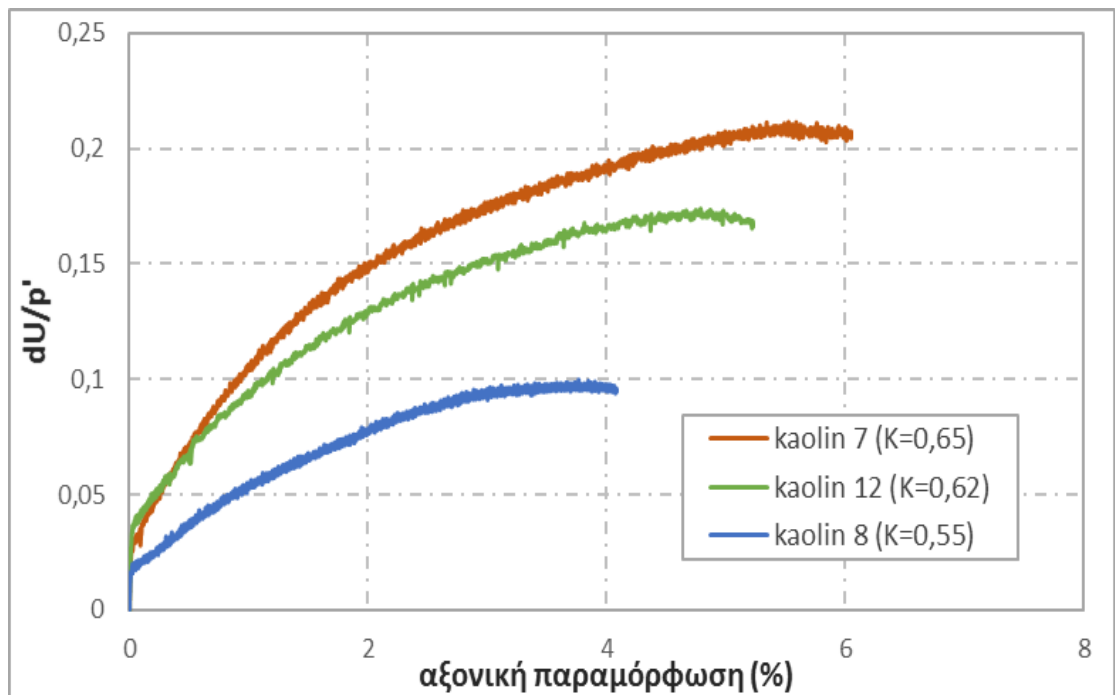
Σχήμα 5.4.27 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K



Σχήμα 5.4.28 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K

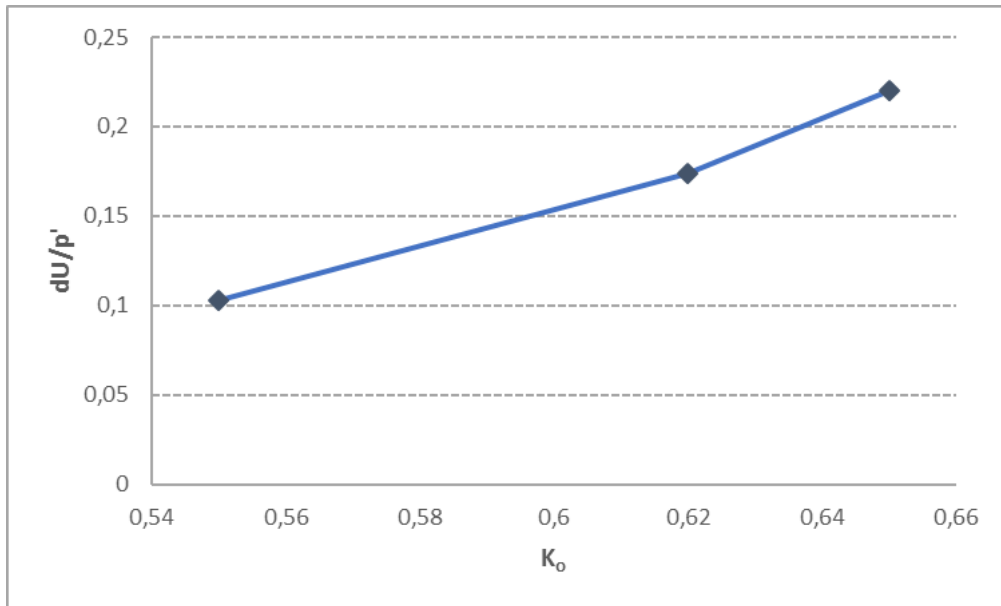


Σχήμα 5.4.29 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K



Σχήμα 5.4.30 Μεταβολή κανονικοποιημένης πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K

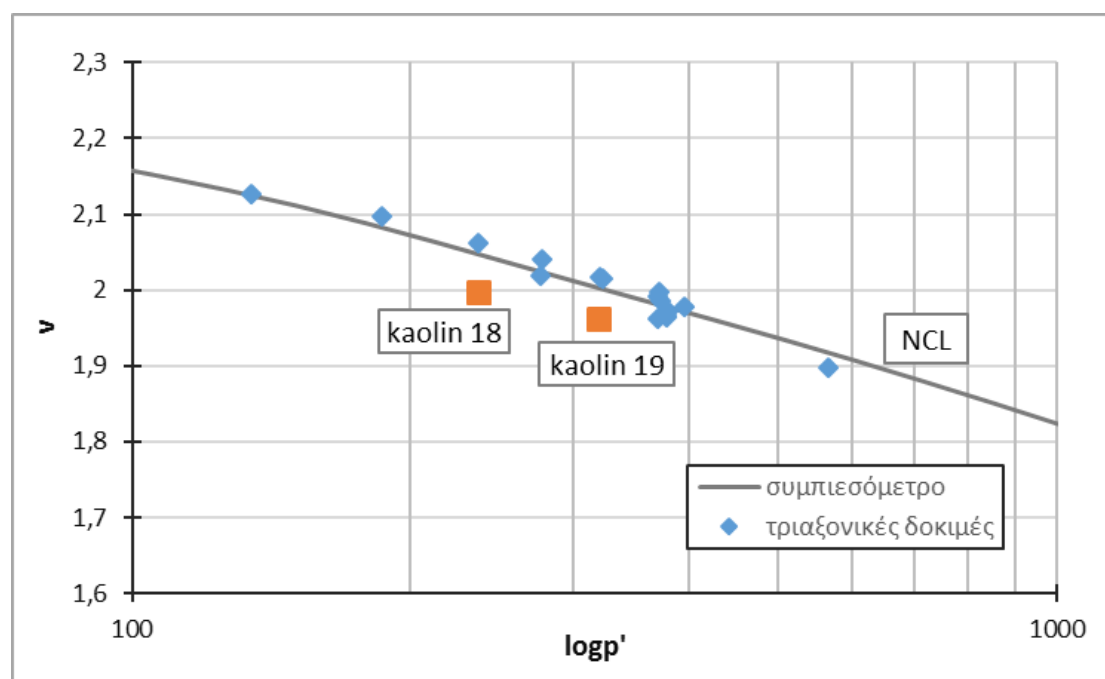
Στο Σχήμα 5.4.31 φαίνονται οι μέγιστες κανονικοποιημένες πιέσεις πόρων που αναπτύχθηκαν στις τρεις παραπάνω δοκιμές, για κάθε συντελεστή στερεοποίησης K .



Σχήμα 5.4.31 Μέγιστες κανονικοποιημένες πιέσεις πόρων ανάλογα με το συντελεστή K

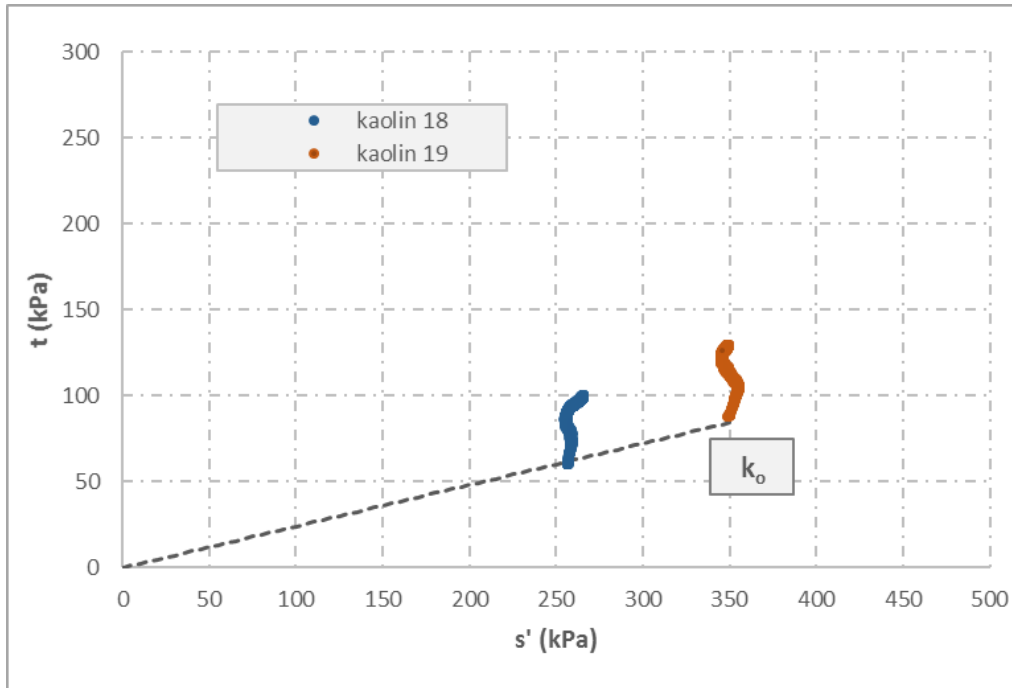
5.4.5 Συμπεριφορά πυκνότερων δοκιμών κατά την τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις τριαξονικές δοκιμές των kaolin 18 και kaolin 19, τα οποία στερεοποιήθηκαν σε μέσες ενεργές τάσεις 250 kPa και 350 kPa και είχαν ποσοστά υγρασίας $w=40,3\%$ και $w=40,1\%$ στο τέλος της στερεοποίησης αντίστοιχα. Η διαφορά τους σε σχέση με τα άλλα δοκίμια είναι η διαδικασία στερεοποίησης τους στο μεγάλο συμπιεσόμετρο. Αρχικά στερεοποιήθηκαν στα 200 kPa όπως και όλα τα άλλα δείγματα, μετά όμως αποφορτίστηκαν στα 80 kPa και έμειναν εκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ παράλληλα μειώθηκε η υγρασία τους. Όταν όμως τα τοποθετήσαμε πάνω στη τριαξονική συσκευή και έγινε έλεγχος της παραμέτρου B , διαπιστώσαμε ότι παρέμειναν κορεσμένα. Η παρατεταμένη φόρτιση σε συνδυασμό με την μείωση της υγρασίας είχαν σαν αποτέλεσμα τα δοκίμια να γίνουν πυκνότερα. Έτσι, όπως φαίνεται και από την ευθεία στερεοποίησης στο Σχήμα 5.4.32, τα δοκίμια kaolin 18 και 19 βρίσκονται κάτω από την ευθεία, δηλαδή είναι πιο πυκνά. Συγκεκριμένα οι τάσεις s'_e υπολογίστηκαν 384 kPa και 448 kPa για τα kaolin 18 και 19 αντίστοιχα. Οι διαδρομές τάσεων για τα πιο πυκνά δοκίμια διαφέρουν από τις προηγούμενες καθώς είναι πιο απότομες και πριν την αστοχία παρατηρείται μία τάση για διαστολικότητα των δοκιμών. Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι τα δοκίμια ακολουθούν διαδρομές τάσεων ελαφρώς υπερστερεοποιημένων δοκιμών. Στο Σχήμα 5.4.32 παρατίθενται η ευθεία μονοδιάστατης στερεοποίησης στο επίπεδο $v-p'$, όπως προέκυψε από το σύνολο των δοκιμών συμπιεσόμετρο στο Κεφάλαιο 4.3, και οι θέσεις των δοκιμών kaolin 18 και 19 στο επίπεδο αυτό μετά τη στερεοποίησή τους στην τριαξονική συσκευή. Επίσης παρατίθενται για σύγκριση και οι θέσεις των υπολοίπων δοκιμών στο τέλος της στερεοποίησης τους στην τριαξονική συσκευή.

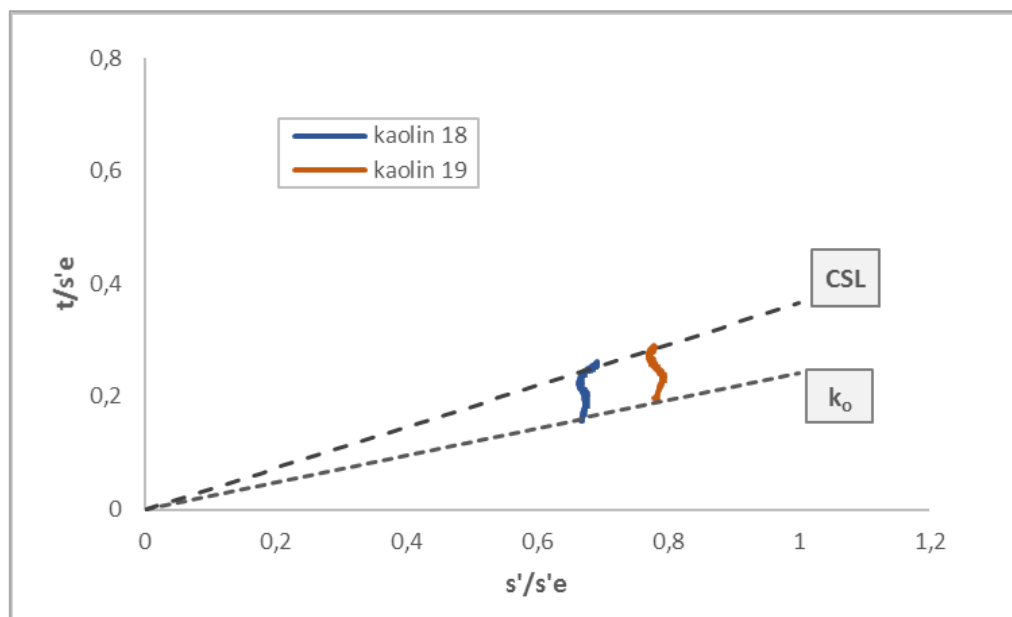


Σχήμα 5.4.32 Θέση των δοκιμών kaolin 18 και kaolin 19 στο επίπεδο $v-p'$ σε σχέση με την ευθεία στερεοποίησης

Το Σχήμα 5.4.33 δείχνει τις διαδρομές τάσεων για τα δύο πυκνά δοκίμια στο επίπεδο $t-s'$ και το Σχήμα 5.4.34 τις κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων. Η κανονικοποίηση έγινε ως προς την μέση ενεργό τάση s'_e , δηλαδή την ισοδύναμη τάση που αντιστοιχεί στο δείκτη πόρων που είχε αρχικά το δοκίμιο, μετά τη στερεοποίηση, στην καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού. Ο δείκτης πόρων των kaolin 18 και 19 αντιστοιχούσε σε υψηλότερη τάση στερεοποίησης, και έτσι οι κανονικοποιημένες καμπύλες βρίσκονται πιο αριστερά από τα υπόλοιπα δοκίμια στο Σχήμα 5.4.34.

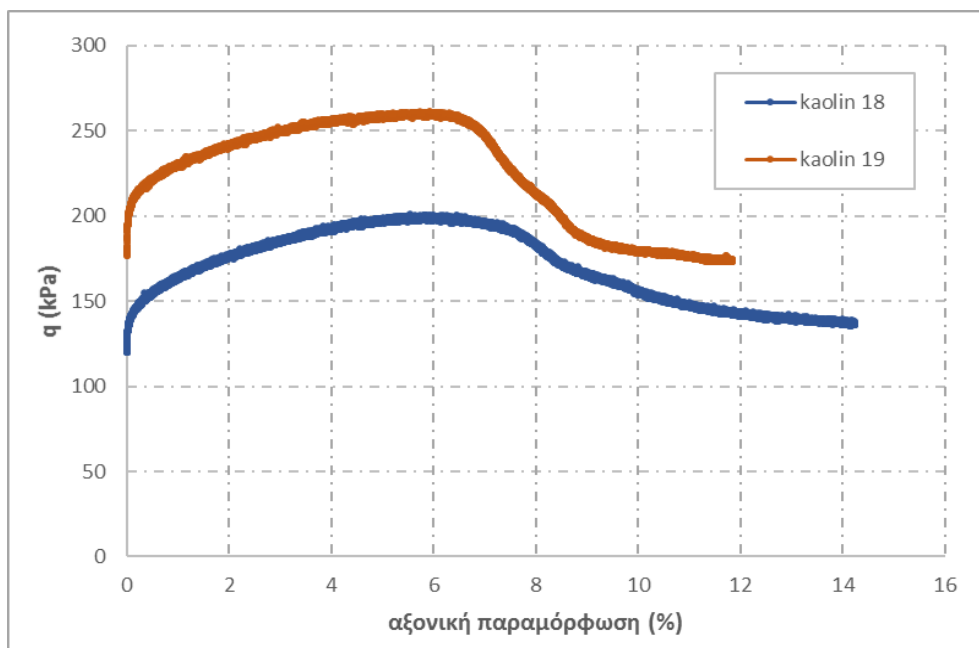


Σχήμα 5.4.33 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για πυκνά δοκίμια

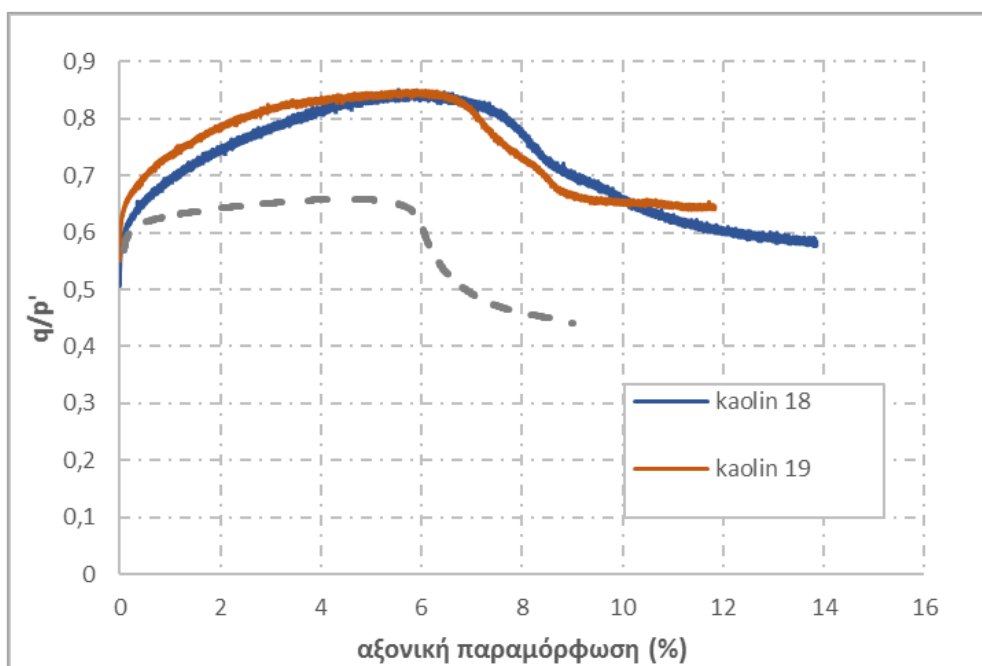


Σχήμα 5.4.34 Κανονικοποιημένες διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για πυκνά δοκίμια

Από τα Σχήματα 5.4.35 και 5.4.36 παρατηρούμε ότι η αστοχία συμβαίνει και για τα δύο δοκίμια για παραμόρφωση περίπου 6%-6,5% με το kaolin 19 να προηγείται λίγο από το kaolin 18. Μετά την αστοχία η αντοχή των δοκιμίων πέφτει κατακόρυφα. Στο Σχήμα 5.4.36 παρατίθεται για σύγκριση και η κανονικοποιημένη μεταβολή τάσης για το δοκίμιο kaolin 14. Είναι εμφανής, αφενός η μεγαλύτερη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης στα πυκνότερα δοκίμια και αφετέρου η αστοχία σε μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης.

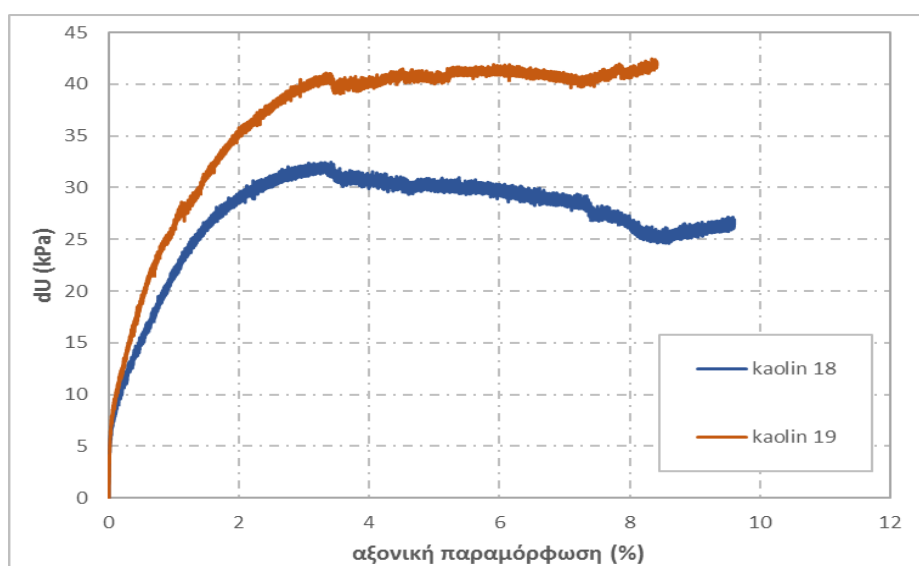


Σχήμα 5.4.35 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια

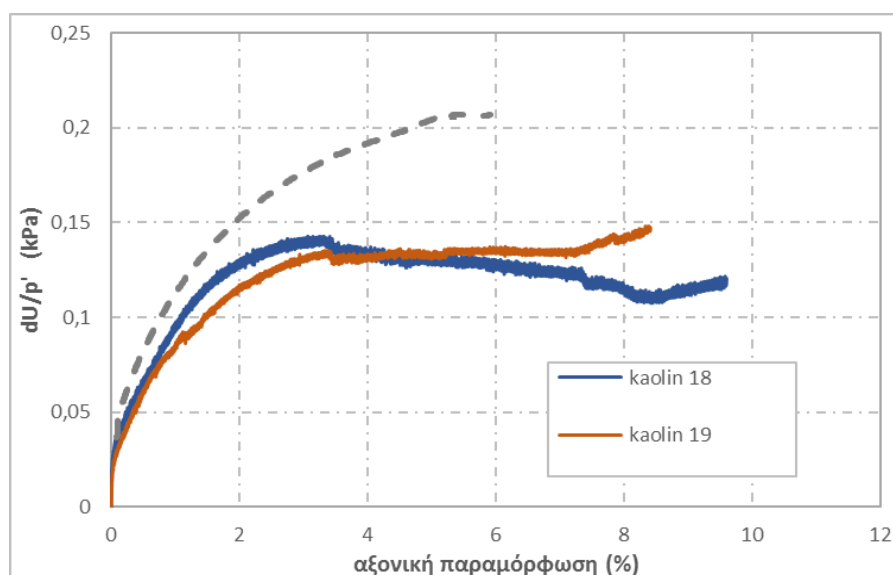


Σχήμα 5.4.36 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια και σύγκριση με το δοκίμιο kaolin 14

Από τα Σχήματα 5.4.37 και 5.4.38 φαίνεται πως η πίεση πόρων αυξάνεται ραγδαία για πολύ μικρές παραμορφώσεις και φτάνει τη μέγιστη τιμή της για παραμόρφωση περίπου 3% και για τα δύο δοκίμια, δηλαδή αρκετά πριν την αστοχία τους και αρκετά πριν την σταθεροποίηση της αποκλίνουσας τάσης. Επίσης, στο δοκίμιο kaolin 18 παρατηρούμε μία μικρή μείωση της πίεσης πόρων όταν αυτή φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Αυτή τη συμπεριφορά τη συναντάμε στα ελαφρώς υπερστερεοποιημένα δοκίμια. Ενδιαφέρον έχει ακόμα ότι, όπως μπορούμε να δούμε από τα διαγράμματα των δοκιμών με μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας, η σταθεροποίηση της αποκλίνουσας τάσης προηγείται της σταθεροποίησης της πίεσης πόρων, ενώ στα Σχήματα 5.4.37 και 5.4.38 φαίνεται να συμβαίνει το αντίθετο. Στο Σχήμα 5.4.38 παρατίθεται για σύγκριση η κανονικοποιημένη πίεση πόρων του δοκιμίου kaolin 14.



Σχήμα 5.4.37 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια



Σχήμα 5.4.38 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια και σύγκριση με kaolin 14

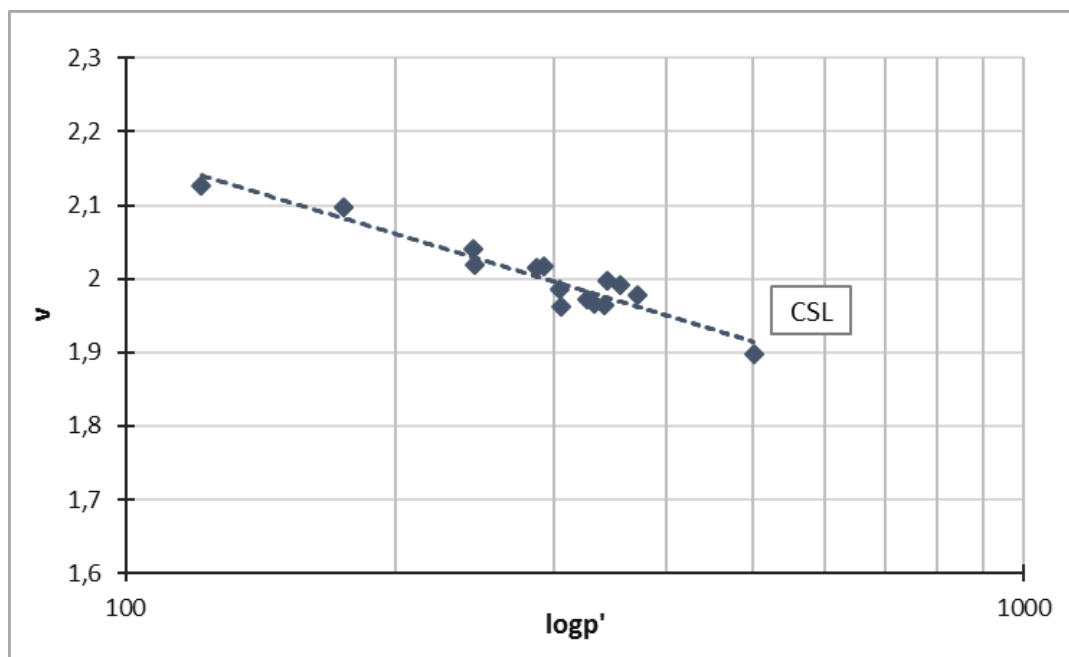
5.4.6 Προσδιορισμός γωνίας κρίσιμης κατάστασης ϕ_{cr} για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κρίσιμη κατάσταση όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι:

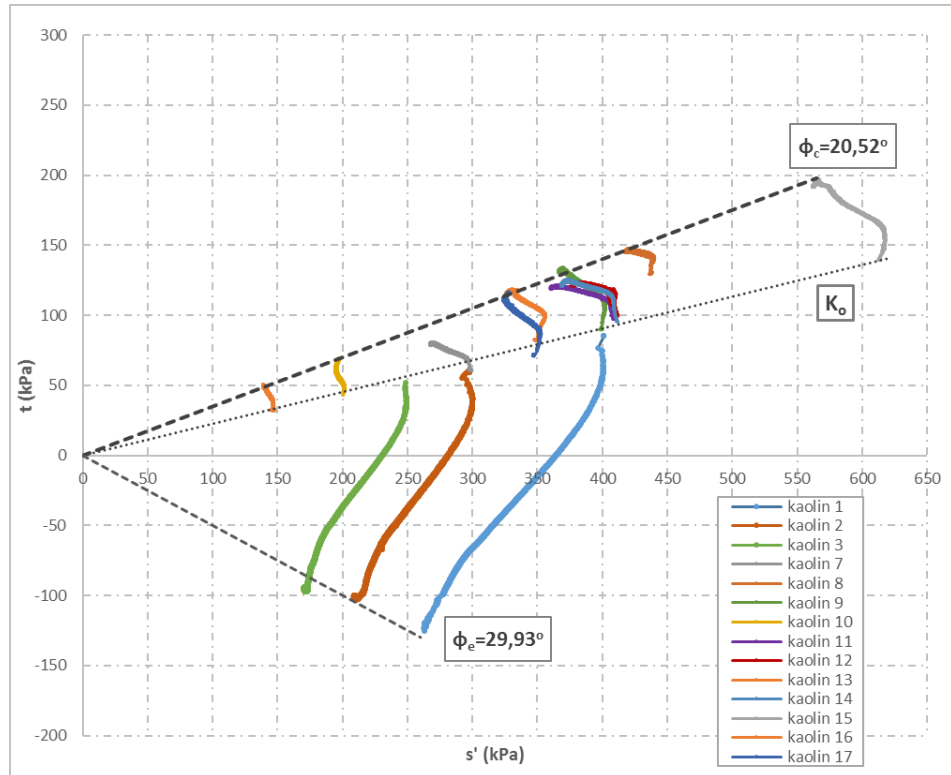
$$q' = M_c p' \quad \text{και} \quad q' = M_e p' \\ v = \Gamma_c - \lambda_c \ln p' \quad \text{και} \quad v = \Gamma_e - \lambda_e \ln p'$$

όπου M , Γ και λ είναι οι παράμετροι του εδάφους και οι δείκτες c και e αναφέρονται σε συμπίεση και εφελκυσμό αντίστοιχα. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι απεικονίσεις των ευθειών αυτών στα επίπεδα $t-s'$, $q-p'$ και $v-\ln p'$ όπως προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα. Οι παράμετροι κρίσιμης κατάστασης υπολογίζονται $M_c=0,79$ και $M_e=0,86$, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες κρίσιμης κατάστασης $\phi'_c=20,52^\circ$ και $\phi'_e=29,93^\circ$ αντίστοιχα. Επιπλέον από την ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο $v-\ln p'$ υπολογίζουμε $\Gamma_c=\Gamma_e=2,90$ και $\lambda_c=\lambda_e=0,16$.

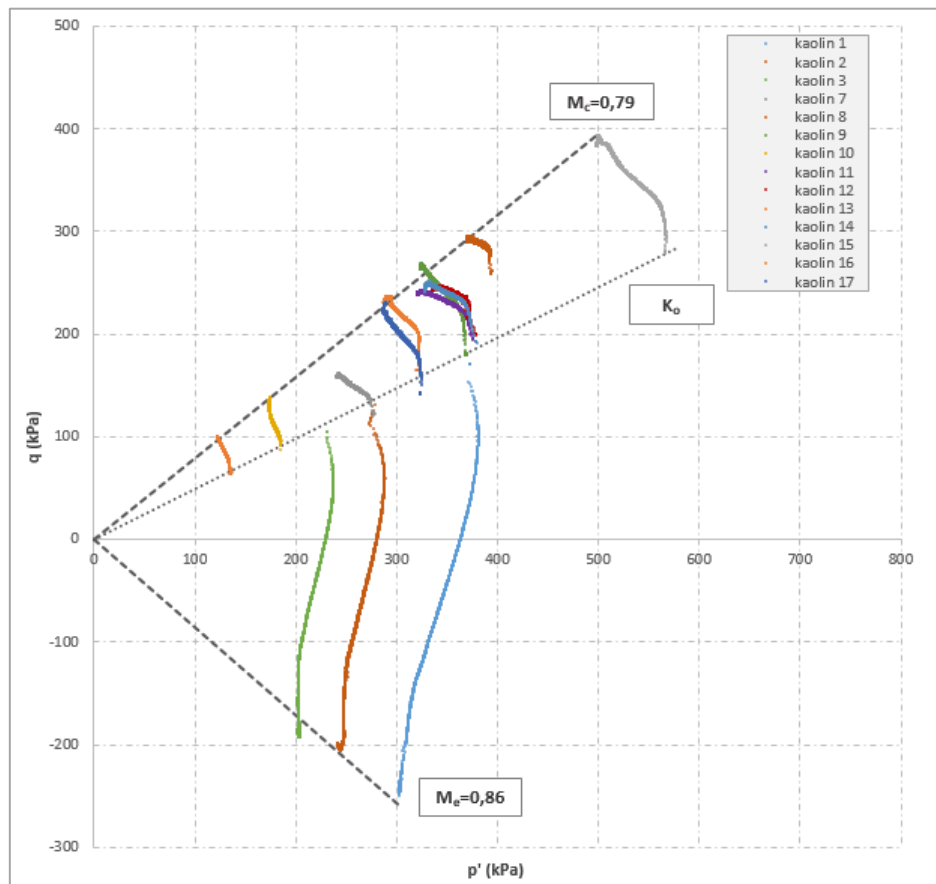
Παρατηρούμε ότι οι ευθείες κρίσιμης κατάστασης δεν είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα p' , όπως συνέβη και με τις δοκιμές των Atkinson et al, ούτε συμμετρικές ως προς τον άξονα s' όπως έπρεπε να συμβεί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Ωστόσο οι τιμές των παραμέτρων κρίσιμης κατάστασης είναι παραπλήσιες με αυτές των Atkinson et al και υπάρχει συμφωνία στο ότι στις ανισότροπα στερεοποιημένες δοκιμές η γωνία τριβής για τον εφελκυσμό προκύπτει μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής για τη θλίψη. Οι αντίστοιχες τιμές των Atkinson et al ήταν $\phi'_c=22^\circ$, $\phi'_e=29^\circ$, $\Gamma_c=\Gamma_e=3,14$ και $\lambda_c=\lambda_e=0,19$. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οφείλονται στο διαφορετικό τύπο καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε. Ο Speswhite καολίνης έχει διαφορετικά όρια υδαρότητας και πλαστιμότητας, και κυρίως πολύ μεγαλύτερο δείκτη πλαστιμότητας από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική. Αυτό φάνηκε και στις πολύ μικρότερες παραμορφώσεις κατά τη συμπίεση του καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική σε σχέση με τη βιβλιογραφία.



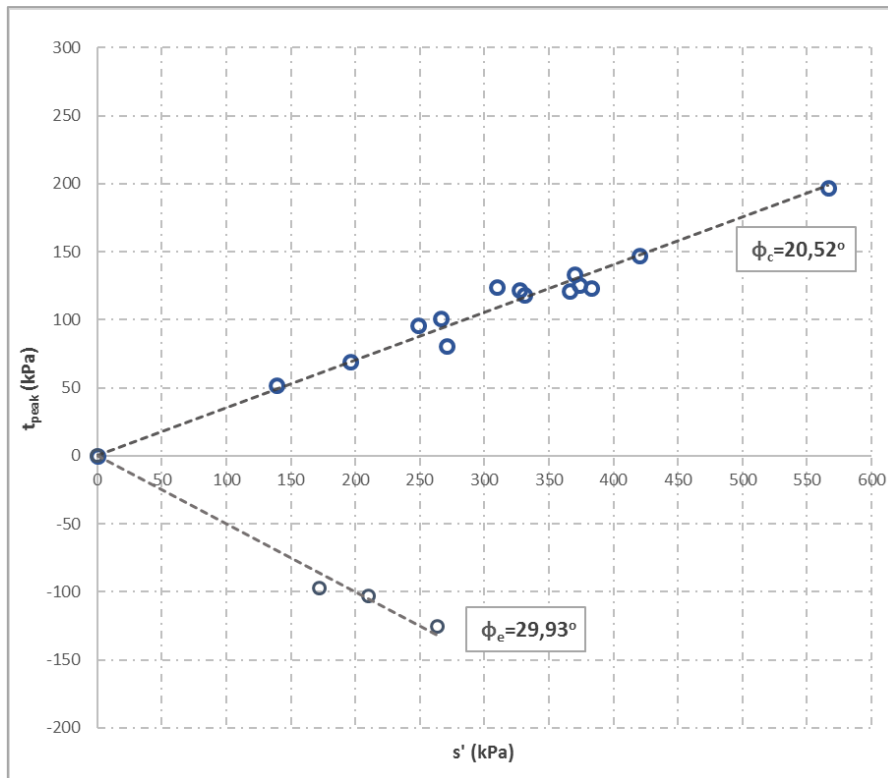
Σχήμα 5.4.39 Ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο $v-\ln p'$



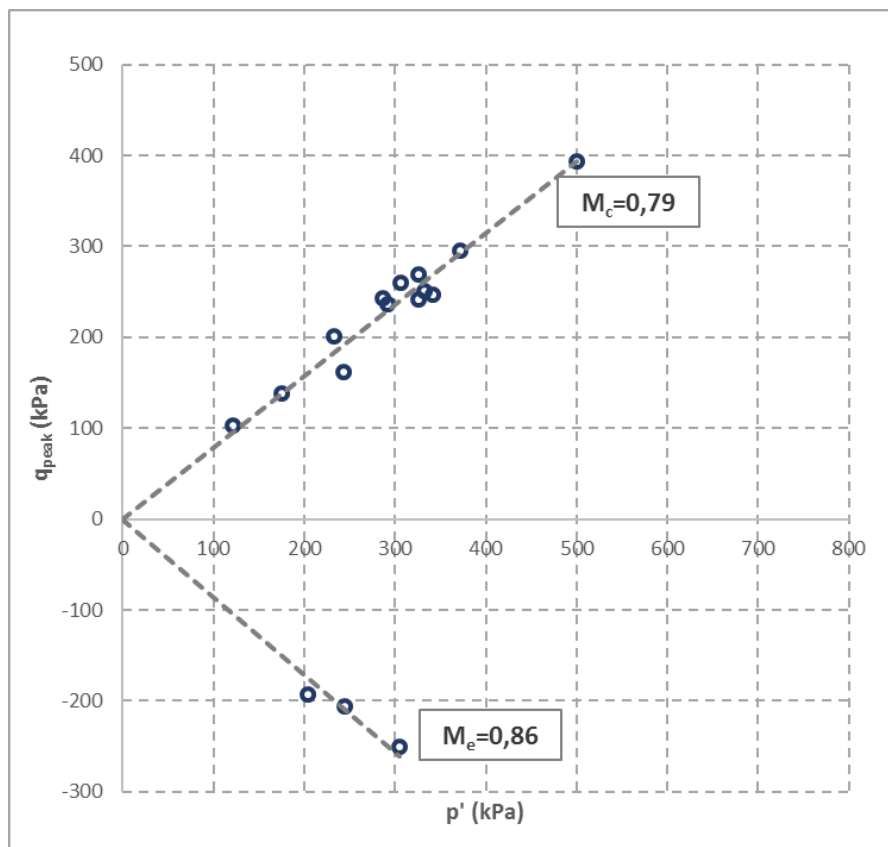
Σχήμα 5.4.40 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο t - s' και κρίσιμες γωνίες τριβής για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό



Σχήμα 5.4.41 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο q - p' και ευθείες κρίσιμης κατάστασης για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό



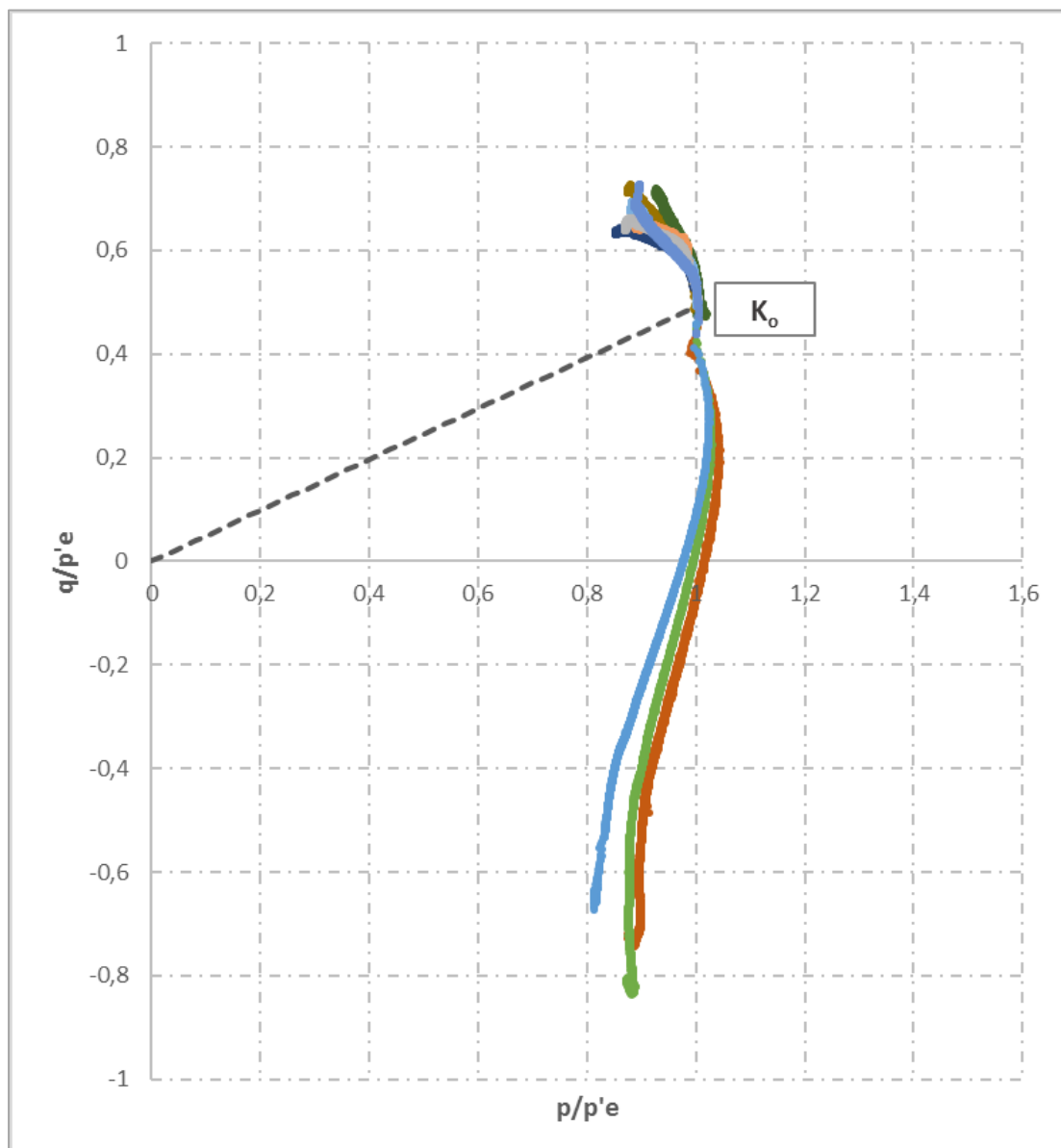
Σχήμα 5.4.42 Σημεία αστοχίας t_{peak} στο επίπεδο $t-s'$ για όλες τις δοκιμές



Σχήμα 5.4.43 Σημεία αστοχίας q_{peak} στο επίπεδο $q-p'$ για όλες τις δοκιμές

Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι, κατά τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης, τα δοκίμια αστόχησαν πολύ κοντά στην ευθεία κρίσιμης κατάστασης ανεξάρτητα από την διαδρομή τάσεων που ακολουθήθηκε. Δηλαδή διαφορές στην υγρασία, στην ομοιογένεια του υλικού, στην αρχική τάση στερεοποίησης και άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την διαδρομή τάσεων και την τάση για συστολή ή διαστολή του δοκιμίου κατά την αστράγγιστη συμπίεση, δεν επηρέασαν τη μέγιστη διατμητική αντοχή του.

Στο Σχήμα 5.4.44 φαίνονται οι κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού. Παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποια διασπορά των αποτελεσμάτων και στη θλίψη και τον εφελκυσμό, ωστόσο φαίνεται να σχηματίζεται μία επιφάνεια Roscoe για ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια.

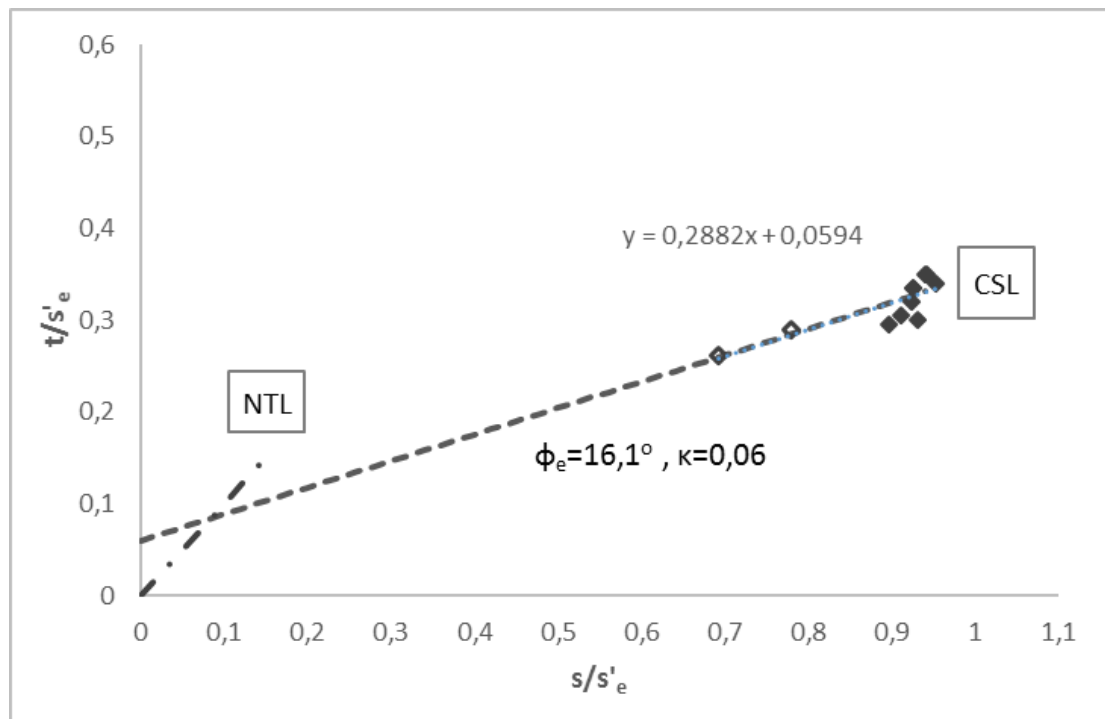


Σχήμα 5.4.44 Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια

Στο Σχήμα 5.4.45 φαίνεται η περιβάλλουσα αστοχίας Hvorslev, όπως αυτή προκύπτει από τα δύο πιο πυκνά δοκίμια kaolin 18 και kaolin 19. Στο διάγραμμα φαίνεται ακόμα η ευθεία κρίσιμης κατάστασης που προβάλλεται στο επίπεδο $t/s'_e - s/s'_e$ ως σημείο. Από την εξίσωση Hvorslev:

$$t/s'_e = \kappa^* + (s'/s'_e) \tan\phi_e^*$$

και το παρακάτω διάγραμμα υπολογίζονται οι σταθερές $\phi_e^* = 16,1^\circ$ και $\kappa = 0,06$.



Σχήμα 5.4.45 Περιβάλλουσα αστοχίας του Hvorslev

Σε όλα τα δοκίμια, κατά την αστοχία τους, σχηματίστηκαν ευδιάκριτα επίπεδα αστοχίας. Το πάχος των επιπέδων αστοχίας ήταν μικρό και τα δοκίμια δεν εμφάνισαν ιδιαίτερο φούσκωμα. Η κλίση του επιπέδου αστοχίας υπολογίστηκε περίπου στις 55° . Στην εικόνα 5.4.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο δοκίμια καολίνη μετά από αστοχία σε τριαξονική θλίψη.



Εικόνα 5.4.1 Επίπεδο αστοχίας κατά την τριαξονική θλίψη σε δύο δοκίμια καολίνη

Στον πίνακα 5.4.1 συγκεντρώνονται οι σταθερές μονοδιάστατης στερεοποίησης και κρίσιμης κατάστασης για τον αναζυμωμένο καολινίτη, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

N_o	λ_o	ϕ'_c	ϕ'_e	M_c	M_e	Γ	λ	ϕ'_e (Hvorslev)	κ	$(t/s'_e)_{peak}$
0,93	0,16	20,52°	29,93°	0,79	0,85	2,90	0,16	16,1°	0,06	0,32

Πίνακας 5.4.1 σταθερές μονοδιάστατης συμπίεσης και κρίσιμης κατάστασης για αναζυμωμένο καολινίτη

5.4.7 Προσδιορισμός τέμνοντος μέτρου εδαφικής δυσστησίας (Secant Young's Modulus)

Η εδαφική δυσστησία $E_u = \Delta q/\varepsilon$ (όπου Δq είναι η μεταβολή της διαφοράς της αποκλίνουσας τάσης q , και ε είναι η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβολή), υπό αστράγγιστες συνθήκες μπορεί να προσδιορισθεί με τη χρήση της τριαξονικής συσκευής. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι οι σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων είναι έντονα μη γραμμικές για ευρύ φάσμα εδαφικών υλικών. Οι εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι η ακαμψία των εδαφικών υλικών μειώνεται σημαντικά (τουλάχιστον κατά 10 φορές) στην περιοχή των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις πρακτικές εφαρμογές. Η έντονα μη γραμμική απόκριση του εδάφους επηρεάζει τελικά και την επιλογή της κατάλληλης δοκιμής. Τα εργαστηριακά πειράματα στα οποία οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο εδαφικό υλικό είναι οι μόνες που μπορούν να προσδιορίσουν τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών.

Για τον υπολογισμό του τέμνοντος μέτρου δυσστησίας μεγάλη σημασία πρέπει να δοθεί στα όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων του δοκιμίου. Ο εξωτερικός μετρητής συνήθως δεν είναι αρκετός για τη μέτρηση των πολύ μικρών αρχικών παραμορφώσεων γιατί η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων είναι περιορισμένη λόγω των ακόλουθων προβλημάτων:

- Παραμορφωσιμότητα της ίδιας της συσκευής (π.χ. συμπίεση της μονάδας μέτρησης φορτίου, της κυψέλης, του υλικού των άκρων του δοκιμίου, του εμβόλου κλπ.)
- Κλίση του δοκιμίου
- Ατελής επαφή δοκιμίου και άκρων
- Ανομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων λόγω των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλουν τα άκαμπτα και τραχέα ακρα

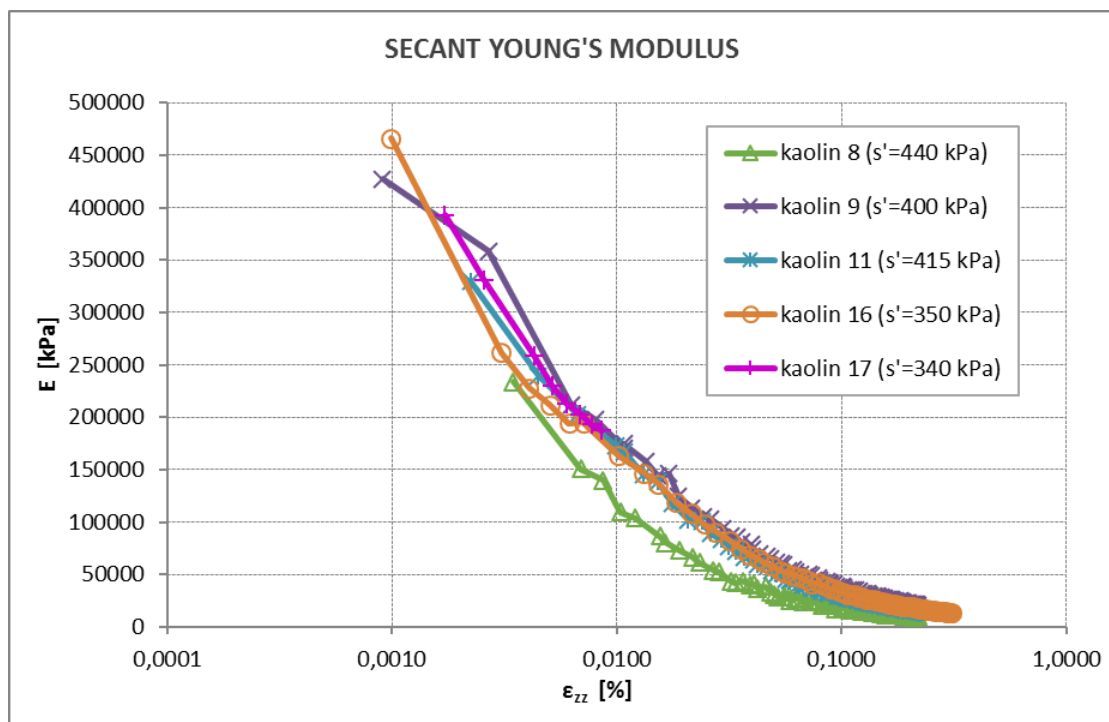
Για τους ανωτέρω λόγους είναι βασικό να μετράται η παραμόρφωση μέσα στην κυψέλη, επί του δοκιμίου και στο κεντρικό τμήμα του το οποίο είναι σχετικά απαλλαγμένο από την επιρροή των άκρων. Η ακριβής μέτρηση της εδαφικής δυσστησίας προϋποθέτει λεπτομέρεια στη μέτρηση των παραμορφώσεων. Έτσι στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν δύο μηκυσιομέτρα (lvdt's). Για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσστησίας χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις αυτών των μηκυσιομέτρων και όχι του εξωτερικού μετρητή.

Ας σημειωθεί ότι, ενώ συμβατικά η παραμόρφωση του δοκιμίου ορίζεται σαν $\varepsilon_z = \Delta H/H_0$, όπου ΔH είναι η μετακίνηση που μετράται από τον μετρητή έξω από την κυψέλη και H_0 είναι το αρχικό ύψος του δοκιμίου, η επί του δοκιμίου μετρούμενη παραμόρφωση ορίζεται σαν $\varepsilon'_z = \Delta H'/H'_0$ όπου $\Delta H'$ είναι η τοπικά μετρούμενη μετακίνηση και H'_0 είναι το αρχικό μήκος του οργάνου που τοποθετείται στο δοκίμιο.

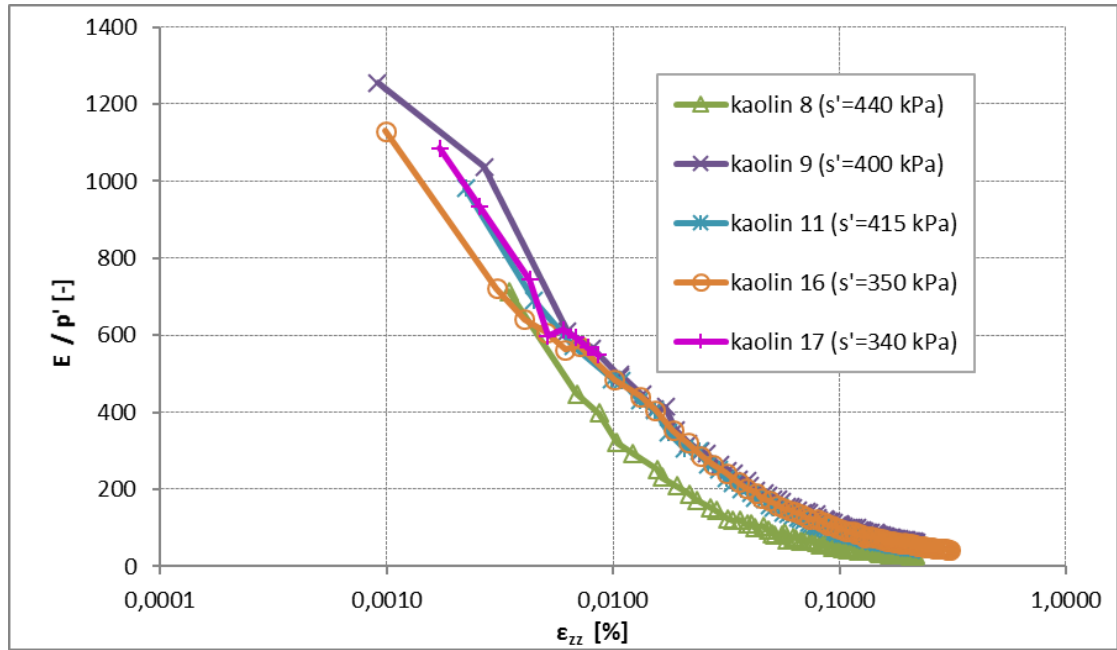
Ο καολινίτης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής είχε μικρό δείκτη πλαστιμότητας και έτσι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4.48, η αποκλίνουσα τάση αυξάνεται σημαντικά για πολύ μικρές παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι σε παραμόρφωση 0,005% η αποκλίνουσα τάση φτάνει την τιμή των 10 kPa. Έτσι δικαιολογούνται και οι υψηλές τιμές του τέμνοντος μέτρου διάτμησης Young. Το

μέτρο διάτμησης επηρεάζεται από την μέση ενεργό τάση στερεοποίησης. Ωστόσο, τα δοκίμια των οποίων οι μετρήσεις θεωρήθηκαν έγκυρες για τον προσδιορισμό του μέτρου Young στερεοποιήθηκαν σε παραπλήσιες τάσεις και έτσι οι καμπύλες $E-\epsilon_{zz}$ συντρέχουν ακόμα και στο μη κανονικοποιημένο διάγραμμα. Η μη γραμμικότητα του εδάφους φαίνεται και από τις καμπύλες του μέτρου ελαστικότητας. Η ελάχιστη δυνατή παραμόρφωση που κατέγραψαν οι μετρητές μας ήταν της τάξης $10^{-3}\%$ όπου τα δοκίμια σημειώνουν περίπου τιμή $E/\rho'=1200\text{kPa}$. Στη συνέχεια το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται απότομα και μη γραμμικά και σταθεροποιείται για παραμόρφωση 0,1% για όλα τα δοκίμια.

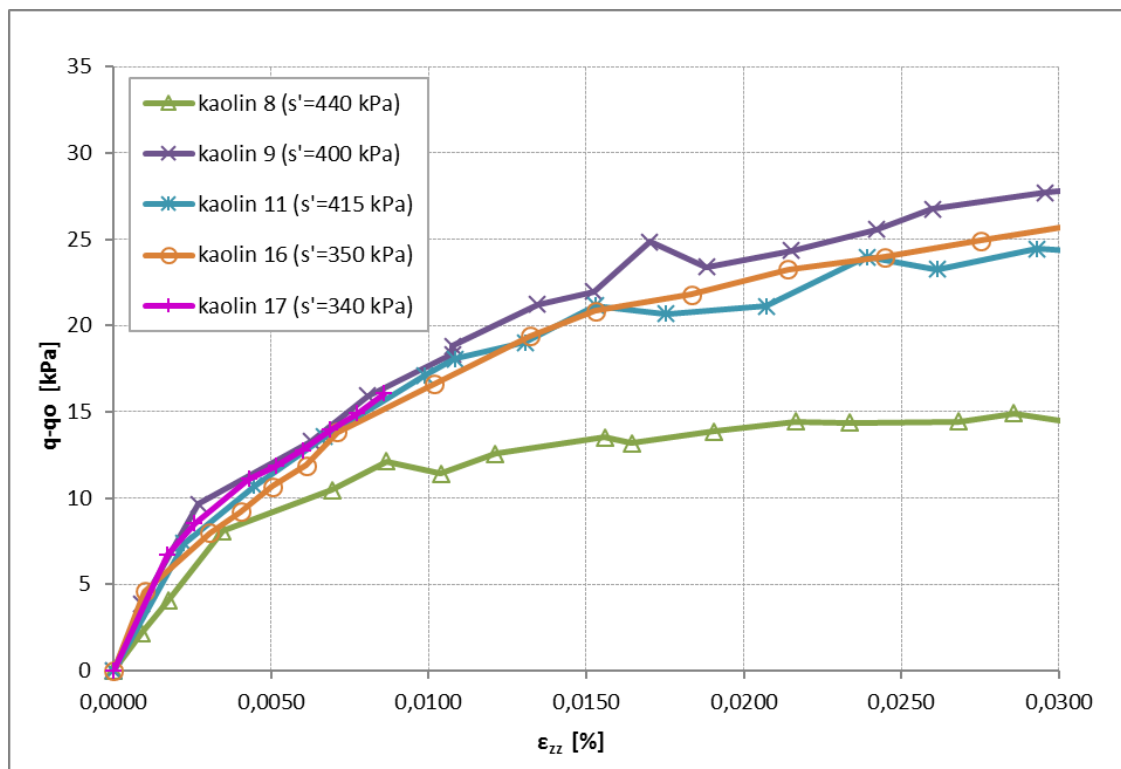
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση της ανισοτροπίας στη δυσμησία του υλικού. Το δοκίμιο kaolin 8 στερεοποιήθηκε με συντελεστή $K_0=0,55$ σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν με συντελεστή $K_0=0,65$. Παρατηρείται ότι η αύξηση της ανισοτροπίας προκαλεί μείωση του μέτρου εδαφικής δυσμησίας.



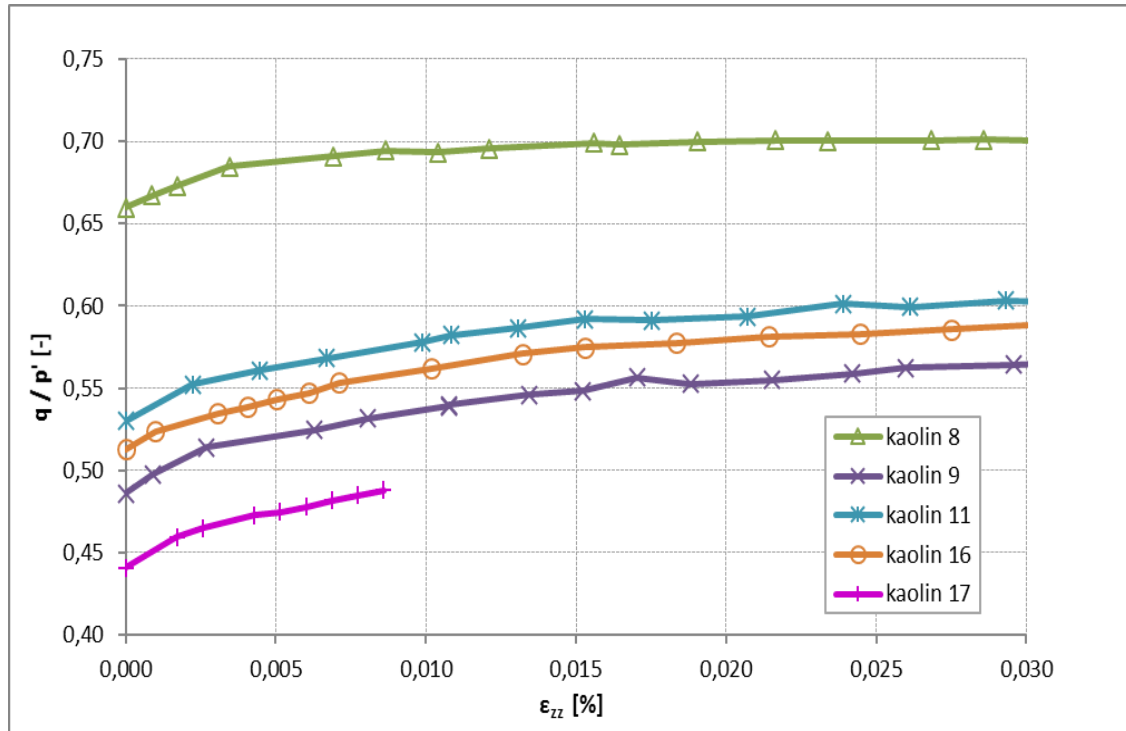
Σχήμα 5.4.46 Τέμνον μέτρο Young εδαφικής δυσμησίας



Σχήμα 5.4.47 Κανονικοποιημένο μέτρο Young ως προς την τάση στερεοποίησης p'



Σχήμα 5.4.48 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης στις πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις



Σχήμα 5.4.49 Κανονικοποιημένη μεταβολή αποκλίνουσας τάσης στις πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα εργαστηριακά πειράματα για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του καολινίτη, τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης στα συμπιεσόμετρα και τις τριαξονικές δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης σε αναζυμωμένα δοκίμια καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο καολινίτης που χρησιμοποιήθηκε είναι μία άργιλος χαμηλής πλαστιμότητας. Συγκεκριμένα το όριο υδαρότητας υπολογίστηκε $W_{LL}=47\%$ και ο δείκτης πλασιμότητας $PI=12$. Όσον αφορά στην κοκκομετρία του υλικού, το 72% των σωματιδίων ανήκουν στο αργιλικό φάσμα, ενώ το υπόλοιπο 28% στο φάσμα των ιλύων. Το ειδικό βάρος κόκκων προσδιορίστηκε: $G_s=2,61$
- Όσον αφορά στη συμπεριφορά του καολινίτη σε μονοδιάστατη συμπίεση, η απόκριση του αναζυμωμένου υλικού δεν ακολουθεί τη συμπεριφορά μίας τυπικής αναζυμωμένης άργιλου. Η καμπύλη συμπίεσης εμφανίζει μία καμπυλότητα με τα κοίλα προς τα κάτω. Η καμπυλότητα αυτή φαίνεται και στην κανονικοποιημένη καμπύλη συμπίεσης η οποία δεν συντρέχει με την πειραματική καμπύλη που πρότεινε ο Burland για τις αναζυμωμένες άργιλους. Βρίσκεται οριακά πάνω από αυτή για φόρτιση από 100 kPa έως 1000 kPa, ενώ για το υπόλοιπο εύρος τάσεων βρίσκεται κάτω από αυτή.
- Οι κλάδοι συμπίεσης, κατά τη διάρκεια της φόρτισης στο συμπιεσόμετρο καταλήγουν να συμπίπτουν ανεξαρτήτως από τα διαφορετικά αρχικά ποσοστά υγρασίας. Οι κλάδοι αποφόρτισης διατηρούν μεγάλη κλίση, γεγονός που φανερώνει κάποια ελαστικότητα των παραμορφώσεων. Οι εγγενείς σταθερές συμπίεσότητας υπολογίστηκαν $e^*_{100}=1,181$, $C^*_c=0,314$ και $C^*_s=0,172$.
- Ο καολινίτης, στην αναζυμωμένη του μορφή συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας κρίσιμης κατάστασης, με κρίσιμη γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'_c=20,52^\circ$ για την τριαξονική θλίψη και $\phi'_e=29,93^\circ$ για τον εφελκυσμό. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις σταθερές κρίσιμης κατάστασης $M_c=0,79$ και $M_s=0,86$ για θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα. Τα δοκίμια αστοχούν πάνω στην ευθεία κρίσιμης κατάστασης ανεξάρτητα από τη διαδρομή ενεργών τάσεων που ακολουθούν.
- Από την ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο ειδικού όγκου $v\text{-ln}p'$ προσδιορίστηκαν οι σταθερές $\Gamma=2,90$ και $\lambda=0,16$. Από την καμπύλη μονοδιάστατης στερεοποίησης υπολογίστηκαν οι σταθερές $N_o=2,93$ και $\lambda_o=0,16$. Από την εξίσωση Hvorslev, που προέκυψε από δύο πυκνότερα υπερστερεοποιημένα δοκίμια, προσδιορίστηκαν οι σταθερές $\phi^*_e=16,1^\circ$ και $\kappa=0,06$.

- Όλα τα κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια κατά την τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες παρουσιάζουν τάση για συστολή. Οι πιέσεις του νερού των πόρων αυξάνονται απότομα για παραμορφώσεις μικρότερες από 0,5% και στις περισσότερες δοκιμές σταθεροποιούνται όταν φτάσουν τη μέγιστη τιμή τους για παραμόρφωση περίπου 5%-6%. Στον τριαξονικό εφελκυσμό η πίεση του νερού των πόρων σταθεροποιείται για παραμόρφωση περίπου 12%.
- Η αποκλίνουσα τάση κατά την τριαξονική συμπίεση αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό για παραμορφώσεις μικρότερες από 0,3%. Κατά την κρίσιμη κατάσταση η αποκλίνουσα τάση παραμένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της μέχρι και την αστοχία του δοκιμίου. Όταν δημιουργηθεί το επίπεδο αστοχίας η διατμητική αντοχή του δοκιμίου μειώνεται.
- Ο συντελεστής τάσεων $K = \sigma'_3 / \sigma'_1$ ο οποίος ακολουθείται κατά τη διάρκεια της ανισότροπης στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή επηρεάζει τη συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την τριαξονική θλίψη. Η μείωση του K προκαλεί μείωση των πιέσεων πόρων, μείωση της μέγιστης αναπτυσσόμενης αποκλίνουσας τάσης μέχρι την αστοχία, αστοχία σε μικρότερες παραμορφώσεις, καθώς και μείωση του μέτρου δυσμησίας του εδαφικού υλικού.
- Τα πυκνότερα δοκίμια ακολουθούν σχεδόν κατακόρυφες διαδρομές τάσεων μέχρι την αστοχία σε διάγραμμα q - p' και αναπτύσσουν μικρότερες πιέσεις πόρων σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.
- Στα περισσότερα δοκίμια σχηματίζεται επίπεδο αστοχίας για παραμορφώσεις περίπου 5%-6%. Το επίπεδο είναι ευδιάκριτο, έχει κλίση περίπου 55° και τα δοκίμια δεν παρουσιάζουν έντονη πλευρική διόγκωση.
- Το τέμνον μέτρο εδαφικής δυσμησίας προσδιορίστηκε περίπου $E/p' = 1200$, κανονικοποιημένο ως προς τη μέση ενεργό τάση στερεοποίησης.
- Με τη δοκιμή στερεοποίησης με έλεγχο ακτινικών παραμορφώσεων, μέσω μετρητού επί του δοκιμίου, στην τριαξονική συσκευή προσδιορίστηκε ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων $K_0 = 0,62$, δηλαδή μικρότερος από αυτόν που προκύπτει από την εξίσωση του Jaky για $\phi' = 20,5^\circ$ ($K_0 = 0,65$).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.3.1 Συσσκευή Casagrande.....	66
Εικόνα 4.1.1 Κατακόρυφη τομή της εργαστηριακής διάταξης της δοκιμής συμπίεσόμετρου (Πηγή: Καββαδάς, 2007)	74
Εικόνα 4.2.1 Υλικό σε υδαρή κατάσταση στην κυψέλη συμπίεσομέτρου.....	75
Εικόνα 4.4.1 Τριαξονική συσκευή εργαστηρίου εδαφομηχανικής ΕΜΠ	91
Εικόνα 5.1.1 Συσσκευή τριαξονικής συμπίεσης (Πηγή: Καββαδάς, 2007)	92
Εικόνα 5.2.1 (α) Συσσκευή μεγάλου συμπίεσομέτρου (β)δείγμα μετά την εξόλκευση από τη συσκευή μεγάλου συμπίεσομέτρου	96
Εικόνα 5.2.2 (α),(β) Σύγκριση διαστάσεων δοκιμίου μεγάλου συμπίεσομέτρου και δοκιμίου τριαξονικής συσκευής.....	97
Εικόνα 5.2.3 (α),(β),(γ),(δ) Διαδικασία μόρφωσης δοκιμίων καολίνη για την τριαξονική συσκευή.....	98
Εικόνα 5.3.1 Τοποθέτηση ελαστικής μεμβράνης και πορόλιθων στο δοκίμιο.....	99
Εικόνα 5.3.2 Δοκίμιο καολίνη τοποθετημένο πάνω στη τριαξονική συσκευή	99
Εικόνα 5.4.1 Επίπεδο αστοχίας κατά την τριαξονική θλίψη σε δύο δοκίμια καολίνη	151

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.2.1 Υπολογισμός ειδικού βάρους κόκκων	63
Πίνακας 3.2.2 Υπολογισμός ειδικού βάρους κόκκων για καολινίτη από το Imperial College.....	63
Πίνακας 3.3.1 Όρια Atterberg για τον καολινίτη	69
Πίνακας 4.2.1 Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή WF 24255 για φόρτιση 1 kg.....	77
Πίνακας 4.2.2 Τάσεις που εφαρμόζει η συσκευή Matest S260 για φόρτιση 1 kg.....	77
Πίνακας 4.4.1 Δοκιμές συμπίεσομέτρου που πραγματοποιήθηκαν	88
Πίνακας 5.3.1 Σύνολο δοκιμών στερεοποίησης στην τριαξονική συσκευή.....	103
Πίνακας 5.4.1 σταθερές μονοδιάστατης συμπίεσης και κρίσιμης κατάστασης για αναζυμωμένο καολινίτη.....	151

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2.1 Κρυσταλλικό πλέγμα του αργιλικού υλικού καολίνη	9
Σχήμα 2.2.2 Χρήσεις καολινών ανάλογα με την κοκκομετρική τους διασπορά	11
Σχήμα 2.3.1 Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης για διάφορες αναζυμωμένες αργίλους (Πηγή: Burland 1990)	12
Σχήμα 2.3.2 Καμπύλες στερεοποίησης της αναζυμωμένης αργίλου Baimahu clay για διαφορετικά ποσοστά αρχικής υγρασίας (Πηγή: Hong et al 2010).	13
Σχήμα 2.3.3 Η χρήση του δείκτη κενών I_v για την κανονικοποίηση της εγγενούς καμπύλης συμπίεστικότητας (Πηγή: Burland, 1990)	14
Σχήμα 2.3.4 Η εξίσωση του Burland και αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα (Πηγή: Burland, 1990).....	15
Σχήμα 2.3.5 Η εγγενής καμπύλη συμπίεσης (ICL) και η καμπύλη συμπίεσης απο ιζηματογένεση (SCL) (Πηγή: Burland, 1990).....	16
Σχήμα 2.3.6 Κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που συντρέχουν πάνω στην εγγενή καμπύλη συμπίεσης (ICL) (Πηγή: Burland, 1990)	16
Σχήμα 2.4.1 Διαγράμματα παραμόρφωσης-αποκλίνουσας τάσης σε δείγματα με διαφορετικές τάσεις συμπίεσης και αντίστοιχα κανονικοποιημένα διαγράμματα (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	17
Σχήμα 2.4.2 Διαδρομές τάσεων σε δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης για στραγγιζόμενες και αστράγγιστες δοκιμές συμπίεσης (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	18
Σχήμα 2.4.3 Ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο q - p' όπως προκύπτει από δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	19
Σχήμα 2.4.4 Ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο v - $\ln p'$ όπως προκύπτει από δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	19
Σχήμα 2.4.5 Καμπύλη κρίσιμης κατάστασης στον τρισδιάστατο (q - p' - v) χώρο (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	20
Σχήμα 2.4.6 Διαδρομή τάσεων σε αστράγγιστη(a) και στραγγιζόμενη(b) τριαξονική δοκιμή (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	21
Σχήμα 2.4.7 (a) Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο q' - p' για αστράγγιστη και στραγγιζόμενη δοκιμή (b) επιφάνειες ειδικού όγκου (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	22
Σχήμα 2.4.8 (a) Τέσσερα αστράγγιστα επίπεδα και (b) δύο στραγγιζόμενα επίπεδα στο τρισδιάστατο χώρο p' - q' - v (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977).....	22
Σχήμα 2.4.9 Αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές επί της επιφάνειας Roscoe (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	23

Σχήμα 2.4.10 Προσδιορισμός ισοδύναμης μέσης πίεσης p'_e μέσω της καμπύλης στερεοποίησης (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	24
Σχήμα 2.4.11 Η καμπύλη Roscoe και το σημείο κρίσιμης κατάστασης στο κανονικοποιημένο επίπεδο $q/p'_e - p'/p'_e$ (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	24
Σχήμα 2.4.12 Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για ελαφρά υπερστερεοποιημένες αργίλους (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	25
Σχήμα 2.4.13 Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων υπερστερεοποιημένων δοκιμών καολίνη σε αστραγγιστες δοκιμές (Πηγή: Loudon 1967).	25
Σχήμα 2.4.14 Ολοκληρωμένη κανονικοποιημένη περιβάλλουσα πιθανών εδαφικών καταστάσεων (Πηγή: Atkinson , Brandsby, 1977)	26
Σχήμα 2.5.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στο επίπεδο $t-s'$ (Πηγή:Wood 1990)	27
Σχήμα 2.5.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στο επίπεδο $q-p'$ (Πηγή:Wood 1990)	28
Σχήμα 2.5.3 Σχέση μεταξύ του λόγου των τάσεων $v=q/p'$ και της γωνίας τριβής ϕ' κατά την τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό (Πηγή:Wood 1990).....	29
Σχήμα 2.6.1 Διαδρομή τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ σε αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή καολινίτη (Πηγή: Burland, 1990)	30
Σχήμα 2.6.2 Μεταβολή πίεσης πόρων, κατακόρυφου φορτίου και αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε αστράγγιστη δοκιμή σε καολίνη (Πηγή: Burland, 1990).....	31
Σχήμα 2.6.3 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης σε όρους e και $\log(q)$ για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: M.Sinnarpo, 1966).....	32
Σχήμα 2.6.4 Γραμμή κρίσιμης κατάστασης σε όρους e και $\log(p)$ για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: M.Sinnarpo, 1966).....	32
Σχήμα 2.6.5 Μεταβολή q/p και αξονικής παραμόρφωσης για καολινίτη με διάφορες τιμές στερεοποίησης (Πηγή: M.Sinnarpo, 1966).....	33
Σχήμα 2.6.6 Μεταβολή της κανονικοποιημένης πίεσης πόρων με την αξονική παραμόρφωση (ϵ_1) για αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια με διαφορετικά e (Πηγή: M.Sinnarpo, 1966)	34
Σχήμα 2.6.7 Ογκομετρική παραμόρφωση σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: M.Sinnarpo, 1966).....	34
Σχήμα 2.6.8 Διαδρομές τάσεων από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε κανονικά στερεοποιημένα δοκίμια καολινίτη (Πηγή: M.Sinnarpo,1966).....	35
Σχήμα 2.6.9 Επιφάνεια ενδοσιμότητας για στραγγιζόμενες και αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε καολινίτη (Πηγή: M.Sinnarpo, 1966)	36

Σχήμα 2.6.10 Επιφάνειες ενδοσιμότητας (ρ, μ, ϵ) για αστράγγιστες και στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές σε κανονικά στερεοποιημένο καολινίτη (Πηγή: Roscoe και Thurairajah 1964).....	37
Σχήμα 2.6.11 Αστράγγιστες δοκιμές : αποκλίνουσα τάση q-αξονική παραμόρφωση ϵ_q (Πηγή: Jian Hu et al., 2007).....	38
Σχήμα 2.6.12 Αστράγγιστες δοκιμές : πίεση πόρων u-αξονική παραμόρφωση ϵ_q (Πηγή: Jian Hu et al., 2007).....	39
Σχήμα 2.6.13 Αστράγγιστες δοκιμές : διαδρομές τάσεων (Πηγή: Jian Hu et al., 2007).....	39
Σχήμα 2.6.14 Διαδρομές τάσεων για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπεστερεοποιημένα δοκίμια (Πηγή: Loudon,1967)	41
Σχήμα 2.6.15 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπεστερεοποιημένα δοκίμια (Πηγή: Loudon,1967).....	42
Σχήμα 2.6.16 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για ισότροπα κανονικά στερεοποιημένα και υπεστερεοποιημένα δοκίμια (Πηγή: Loudon,1967).....	42
Σχήμα 2.6.17 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=1$ (Πηγή: Stipho 1978).....	43
Σχήμα 2.6.18 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=1$ (Πηγή: Stipho 1978).44	
Σχήμα 2.6.19 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,8$ (Πηγή: Stipho 1978).....	45
Σχήμα 2.6.20 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.8$ (Πηγή: Stipho 1978).....	46
Σχήμα 2.6.21 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,667$ (Πηγή: Stipho 1978).....	47
Σχήμα 2.6.22 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.667$ (Πηγή: Stipho 1978).....	48
Σχήμα 2.6.23 Διαδρομές τάσεων για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0,57$ (Πηγή: Stipho 1978).....	49
Σχήμα 2.6.24 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση και πίεση πόρων σε δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για συντελεστή στερεοποίησης $K_0=0.57$ (Πηγή: Stipho 1978).....	50
Σχήμα 2.6.25 Διαδρομές τάσεων για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολίνη με διαφορετική διάταξη πλακιδίων (Πηγή: Yu-Hsing Wang, 2011).....	51

Σχήμα 2.6.26 Διαδρομές τάσεων για ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια καολίνη στα 100 kPa με διαφορετική διάταξη πλακιδίων (Πηγή: Yu-Hsing Wang, 2011)	52
Σχήμα 2.6.27 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για υλικά με διαφορετική διάταξη σωματιδίων (Πηγή: Robinson et al., 2010)	54
Σχήμα 2.6.28 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για υλικά με διαφορετική διάταξη σωματιδίων (Πηγή: Robinson et al., 2010)	54
Σχήμα 2.6.29 Σημεία αστοχίας για τα δοκίμια με διαφορετικές μικροδομές (Πηγή: Robinson et al., 2010)	55
Σχήμα 2.6.30 Ευθεία μονοδιάστατης συμπίεσης στο επίπεδο (α) $q-p'$ και στο επίπεδο (β) $v-lnp'$ (Πηγή: Atkinson et al., 1987).....	56
Σχήμα 2.6.31 Αποκλίνουσα τάση-διατμητική παραμόρφωση (Πηγή: Atkinson et al., 1987)	56
Σχήμα 2.6.32 (α)Αποκλίνουσα τάση-παραμόρφωση (β) Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση-παραμόρφωση (Πηγή: Atkinson et al., 1987).....	57
Σχήμα 2.6.33 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση-παραμόρφωση (Πηγή: Atkinson et al., 1987)	57
Σχήμα 2.6.34 Ογκομετρικές μεταβολές για τις στραγγιζόμενες δοκιμές (Πηγή: Atkinson et al., 1987)	57
Σχήμα 2.6.35 (α) Διαδρομές τάσεων για δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες (β) Αντίστοιχες κανονικοποιημένες διαδρομές (Πηγή: Atkinson et al., 1987)	58
Σχήμα 2.6.36 Ευθείες κρίσιμης κατάστασης στα επίπεδα $q-p'$ και $v-lnp'$ (Πηγή: Atkinson et al., 1987)	59
Σχήμα 3.3.1 Σχηματική απεικόνιση συσκευής Casagrande και οργανου χαράξεως.	68
Σχήμα 3.4.1 Θέση του καολινίτη πάνω στο χάρτη πλαστικότητας Casagrande	70
Σχήμα 3.5.1 Κοκκομετρική καμπύλη με αραιόμετρο για καολινίτη	71
Σχήμα 3.5.2 Κοκκομετρικές καμπύλες για 4 διαφορετικούς καολινίτες (Πηγή: Xin Kang et al. 2014)	72
Σχήμα 4.3.1 Αποτελέσματα της δοκιμής συμμόρφωσης της συσκευής WF24255....	78
Σχήμα 4.3.2 Αποτελέσματα της δοκιμής συμμόρφωσης της συσκευής Matest S260	79
Σχήμα 4.4.1 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_0=1,4LL=66\%$	81
Σχήμα 4.4.2 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=1,4LL=66\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland.....	81

Σχήμα 4.4.3 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_0=1,43LL=67\%$	82
Σχήμα 4.4.4 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=1,43LL=67\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland.....	82
Σχήμα 4.4.5 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_0=1,49LL=70,2\%$	83
Σχήμα 4.4.6 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=1,49LL=70,2\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland.....	83
Σχήμα 4.4.7 Πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με αρχική υγρασία $w_0=1,47LL=69,3\%$	84
Σχήμα 4.4.8 Κανονικοποιημένη πειραματική καμπύλη στερεοποίησης αναζυμωμένου δοκιμίου με $w_0=1,47LL=69,3\%$ και σύγκριση με τη θεωρητική του Burland.....	84
Σχήμα 4.4.9 Πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν	85
Σχήμα 4.4.10 Πειραματικές καμπύλες στερεοποίησης όλων των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν και σύγκριση με τη θεωρητική καμπύλη Burland.....	85
Σχήμα 4.4.11 Μέση καμπύλη στερεοποίησης.....	86
Σχήμα 4.4.12 Κανονικοποιημένη μέση καμπύλη στερεοποίησης	86
Σχήμα 4.4.13 Καμπύλες στερεοποίησης αναζυμωμένου καολινίτη (Πηγή: Shipton, Coop).....	87
Σχήμα 5.2.1 Τυπική καμπύλη μονοδιαστατης συμπίεσης από το μεγάλο συμπιεσόμετρο	96
Σχήμα 5.3.1 Κορεσμός των δοκιμών στην τριαξονική συσκευή (α) διαδικασία κορεσμού (β) έλεγχος της παραμέτρου B	101
Σχήμα 5.3.2 Καμπύλη στερεοποίησης.....	104
Σχήμα 5.3.3 Διαδρομές τάσεων στο επίπεδο t-s' κατά την στερεοποίηση	105
Σχήμα 5.3.4 Ογκομετρική παραμόρφωση(%) σε σχέση με αξονική παραμόρφωση(%) κατά τη στερεοποίηση.....	106
Σχήμα 5.3.5 Μεταβολή ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με αξονική παραμόρφωση.....	107
Σχήμα 5.3.6 Μεταβολή ειδικού όγκου κατά τη στερεοποίηση στην τριαξονική συσκευή	107

Σχήμα 5.3.7 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης, αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο κατά τη στερεοποίηση.....	108
Σχήμα 5.3.8 Διαδρομή τάσεων κατά τη στερεοποίηση με έλεγχο ακτινικών παραμορφώσεων για το δοκίμιο kaolin 9.....	110
Σχήμα 5.3.9 Διαδρομή τάσεων κατά τη στερεοποίηση με έλεγχο ακτινικών παραμορφώσεων για το δοκίμιο kaolin 19.....	110
Σχήμα 5.3.10 Μεταβολή του συντελεστή K_0 σε σχέση με τη μέση ενεργό τάση για τα δοκίμια kaolin 9 και 19.....	111
Σχήμα 5.3.11 Διακύμανση ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με την μέση ενεργό τάση s' για το δοκίμιο kaolin 9.....	112
Σχήμα 5.3.12 Διακύμανση ακτινικής παραμόρφωσης σε σχέση με την μέση ενεργό τάση s' για το δοκίμιο kaolin 19.....	112
Σχήμα 5.3.13 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης και αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για το δοκίμιο kaolin 9.....	113
Σχήμα 5.3.14 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης και αξονικής και ογκομετρικής παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για το δοκίμιο kaolin 19.....	113
Σχήμα 5.3.15 Μεταβολή ογκομετρικής παραμόρφωσης(%) σε σχέση με την αξονική(%) για τα δοκίμια (a)kaolin 9 και (b)kaolin 19.....	114
Σχήμα 5.3.16 Διαδρομές ενεργών και ολικών τάσεων κατά την αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή (Πηγή: Atkinson , Brandsby (1977)).....	116
Σχήμα 5.4.1 Διαδρομή ενεργών τάσεων για το δοκίμιο kaolin 7 στο επίπεδο t-s'..	118
Σχήμα 5.4.2 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης q σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση (%) για το δοκίμιο kaolin 7.....	119
Σχήμα 5.4.3 Μεταβολή πίεσης πόρων dU σε σχέση με αξονική παραμόρφωση (%) για το δοκίμιο kaolin 7.....	120
Σχήμα 5.4.4 Ιδεατή συμπεριφορά κατά το σχηματισμό επιπέδου αστοχίας (Πηγή: Georgiannou, Burland 2006).....	121
Σχήμα 5.4.5 Συμπεριφορά κατά το σχηματισμό επιπέδου αστοχίας: ρυθμοί μεταβολής της αξονικής παραμόρφωσης και μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για το δοκίμιο kaolin 7.....	122
Σχήμα 5.4.6 Διαδρομή ενεργών τάσεων στο επίπεδο t-s' για δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού στο δοκίμιο kaolin 2.....	123
Σχήμα 5.4.7 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για τη δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού kaolin 2.....	124
Σχήμα 5.4.8 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για τη δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού kaolin 2.....	125

Σχήμα 5.4.9 Κανονικοποιημένη αποκλίνουσα τάση σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για 2 δοκιμές εφελκυσμού	125
Σχήμα 5.4.10 Κανονικοποιημένη μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με αξονική παραμόρφωση για 2 δοκιμές εφελκυσμού	126
Σχήμα 5.4.11 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για 4 δοκιμές	127
Σχήμα 5.4.12 Κανονικοποιημένες διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t/s'_e - s'/s'_e$ για 4 δοκιμές.....	128
Σχήμα 5.4.13 Επαναληψιμότητα κανονικοποιημένων διαδρομών ενεργών τάσεων για 4 δοκιμές.....	128
Σχήμα 5.4.14 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές	130
Σχήμα 5.4.15 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές.....	130
Σχήμα 5.4.16 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές	131
Σχήμα 5.4.17 Μεταβολή κανονικοποιημένης πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 4 δοκιμές	131
Σχήμα 5.4.18 Συμπεριφορά κατά το σχηματισμό επιφάνειας αστοχίας: ρυθμοί μεταβολής της αξονικής παραμόρφωσης και μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για τα δοκίμια (a) kaolin 7, (b) kaolin 11, (c) kaolin 14, (d) kaolin 12.....	132
Σχήμα 5.4.19 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις	133
Σχήμα 5.4.20 Κανονικοποιημένες διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις.....	134
Σχήμα 5.4.21 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης q σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις	134
Σχήμα 5.4.22 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις.....	135
Σχήμα 5.4.23 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις	135
Σχήμα 5.4.24 Μεταβολή κανονικοποιημένης πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για 5 δοκίμια στερεοποιημένα σε διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις	136
Σχήμα 5.4.25 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο $t-s'$ για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K	138

Σχήμα 5.4.26 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο t-s' για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K	138
Σχήμα 5.4.27 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K.....	139
Σχήμα 5.4.28 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K	139
Σχήμα 5.4.29 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K	140
Σχήμα 5.4.30 Μεταβολή κανονικοποιημένης πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για δοκίμια στερεοποιημένα με διαφορετικούς συντελεστές K	140
Σχήμα 5.4.31 Μέγιστες κανονικοποιημένες πιέσεις πόρων ανάλογα με το συντελεστή K.....	141
Σχήμα 5.4.32 Θέση των δοκιμίων kaolin 18 και kaolin 19 στο επίπεδο v-p' σε σχέση με την ευθεία στερεοποίησης	142
Σχήμα 5.4.33 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο t-s' για πυκνά δοκίμια	143
Σχήμα 5.4.34 Κανονικοποιημένες διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο t-s' για πυκνά δοκίμια.....	143
Σχήμα 5.4.35 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια	144
Σχήμα 5.4.36 Μεταβολή κανονικοποιημένης αποκλίνουσας τάσης σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια και σύγκριση με το δοκίμιο kaolin 14 ...	144
Σχήμα 5.4.37 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια.....	145
Σχήμα 5.4.38 Μεταβολή πίεσης πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση για πυκνά δοκίμια και συγκριση με kaolin 14.....	145
Σχήμα 5.4.39 Ευθεία κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο v-lnp'	146
Σχήμα 5.4.40 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο t-s' και κρίσιμες γωνίες τριβής για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό	147
Σχήμα 5.4.41 Διαδρομές ενεργών τάσεων στο επίπεδο q-p' και ευθείες κρίσιμης κατάστασης για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό	147
Σχήμα 5.4.42 Σημεία αστοχίας t_{peak} στο επίπεδο t-s' για όλες τις δοκιμές.....	148
Σχήμα 5.4.43 Σημεία αστοχίας q_{peak} στο επίπεδο q-p' για όλες τις δοκιμές	148
Σχήμα 5.4.44 Κανονικοποιημένες διαδρομές τάσεων για δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού σε ανισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια	149
Σχήμα 5.4.45 Περιβάλλουσα αστοχίας του Hvorslev	150

Σχήμα 5.4.46 Τέμνον μέτρο Young εδαφικής δυσστησίας.....	153
Σχήμα 5.4.47 Κανονικοποιημένο τέμνον μέτρο Young ως προς την τάση στερεοποίησης ρ'	154
Σχήμα 5.4.48 Μεταβολή αποκλίνουσας τάσης στις πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις	154
Σχήμα 5.4.49 Κανονικοποιημένη μεταβολή αποκλίνουσας τάσης στις πολύ μικρές αξονικές παραμορφώσεις	155

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Kang, X., Kang, G.-C., and Bate, B., "Measurement of Stiffness Anisotropy in Kaolinite Using Bender Element Tests in A Floating Wall Consolidometer" *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 37, No. 5, 2014, pp.1–15

Robinson, R.G., Boominathan, A., Pillai, Rakesh J., "Shear Strength Behavior of Kaolinite with Different Microfabrics" *Indian Geotechnical Conference*, 2010

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

Jian Hu, Dayakar Penumadu, Dmitri I. Garagash, Constitutive "Modeling of Kaolin Clay under Undrained and Drained Condition", *International Workshop on Constitutive Modeling - Development, Implementation, Evaluation, and Application*, Hong Kong, China, 2007

Atkinson JH, Richardson D, Robinson PJ. 1987. "Compression and extension of K_0 normally consolidated kaolin clay". *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)* 113: 1468-1482

Atkinson J.H, Bransby P.L. (1977) "The mechanics of the soils. An Introduction to Critical State Soil Mechanics" Mc Graw Hill Company (UK) Maidenhead, Berkshire, England

Yu-Hsing Wang, "Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties" *Canadian Geotechnical Journal* 43(6):601-617, January 2011

Roscoe, K.H. and A. Thurairajah (1964), "On the Uniqueness of Yield Surfaces for Wet Clays", *Proc. Int. Symp. Rheology and Soil Mech., IUTAM, Grenoble*, pp.364-381

Loudon, P.A., and Wroth, C.P., (1967) "The Correlation of Strains within a Family of Triaxial Tests on Overconsolidated Samples of Kaolin," *Proc. of the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, NGI, Oslo, Norway, pp.159-167.

Stipho, A. S., "Theoretical and Experimental Investigation of The Behavior of Anisotropically Consolidated Kaolin," Ph.D. thesis, University College, Cardiff, England (1978).

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

Ching Hung, 2013, "Enhanced Anisotropic Bounding Surface Model: Implementation and Simulation of Excavation in Soft Cohesive Soils", Columbia University Academic Commons

M.Sinnappoo, B.Sc. Eng. (Cey.), 1966, "Triaxial Compression Tests on Normally Consolidated Kaolin" University of Ceylon, Peradeniya

Georgiannou, V. N. & Burland, J. B. (2006), "A laboratory study of slip surface formation in an intact natural stiff clay" Geotechnique 56, No. 8, 551–559

Κατερινόπουλος, Α. και Σταματάκης, Μ., 1995. "Εφαρμοσμένη Ορυκτολογία-Πετρολογία. Τα βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα και οι χρήσεις τους", Αθήνα, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο

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

Καβαδάς Μ. (2003). " Στοιχεία Εδαφομηχανικής " , Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

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