



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη και Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Αργιλικών Υλικών



Φοιτήτρια: Μπαργιαμπά Μαρκέλα
ΑΜ: 18394121

Επιβλέπων Καθηγητής
Μπελόκας Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος, 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Diploma Thesis

Study and Modeling of the Mechanical Behaviour of Clay Materials



Student: Bargiampa Markela
Registration Number: 18394121

Supervisor

Belokas Giorgos
Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, July, 2024

Γεώργιος Μπελόκας Επίκουρος Καθηγητής	Μαυρούλη Όλγα Επίκουρη Καθηγήτρια	Τσιάπας Ιωάννης Ακαδ. Υπότροφος
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Μπαργιαμπά Μαρκέλα,
Ιούλιος, 2024**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μπαργιαμπά Μαρκέλα του Χριστοφόρου, με αριθμό μητρώου 18394121 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο/Η Δηλών/ούσα
Μπαργιαμπά Μαρκέλα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Μπελόκα, για την αμέριστη καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η βοήθεια του υπήρξε καθοριστική όχι μόνο για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης, αλλά και για τη γενικότερη πορεία της ακαδημαϊκής και επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τμήμα της Γεωτεχνικής Μηχανικής του Politecnico di Bari, καθώς κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου παρέιχαν απεριόριστη βοήθεια και εκπαίδευση σχετικά με τα αργιλικά εδάφη, καθώς και τη φιλοξενία τους για έναν ολόκληρο χρόνο.

Επιπλέον, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου και τον αδελφό μου, για την απεριόριστη υποστήριξη και τη συνδρομή τους με κάθε δυνατό τρόπο. Η αγάπη, η πίστη και η εμπιστοσύνη τους στις δυνατότητές μου αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα στην επίτευξη των στόχων μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσοι με οποιονδήποτε τρόπο συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και συγκεκριμένα της αργίλου. Συνδυάζεται θεωρητική και πειραματική προσέγγιση με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της αργίλου υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Στο θεωρητικό μέρος παρουσιάζεται μια διερεύνηση της συμπεριφοράς των αργιλικών εδαφών με βάση τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης και το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay και στην συνέχεια αναφέρονται προηγούμενα και νέα πειραματικά δεδομένα της αργίλου Lucera.

Αρχικά στο θεωρητικό μέρος γίνεται ανάλυση των ολικών και των ενεργών τάσεων, καθώς και των κριτηρίων αστοχίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις αναλλοίωτες και τις τυπικές τασικές οδεύσεις, καθώς και στις καταστατικές σχέσεις, όπως γραμμική ισότροπη ελαστικότητα και τον νόμο του Hooke. Διερευνάται επίσης η συμπεριφορά των εδαφών υπό διάφορες τυπικές φορτίσεις, αναλύοντας τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αστοχία ή μη των εδαφών. Επιπλέον, εξετάζεται η γενικευμένη θεωρία πλαστικότητας, που περιλαμβάνει νόμους ροής και κράτυνσης, καθώς και διάφορα προσομοιώματα που βοηθούν στην κατανόηση της ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς των εδαφών. Η ανάλυση της δομής του εδάφους και η διαδικασία αναζύμωσης είναι επίσης κρίσιμες, καθώς επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά των εδαφών. Η διπλωματική αφιερώνει σημαντική προσοχή στα προσομοιώματα κρίσιμης κατάστασης, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της εδαφικής συμπεριφοράς και την πρόβλεψη της απόκρισης των εδαφών υπό διαφορετικές συνθήκες.

Σημαντικό μέρος της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η πειραματική προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από δοκιμές απαραίτητες για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς της αργίλου Lucera. Παρουσιάζονται προηγούμενα πειραματικά δεδομένα της αργίλου Lucera, από Guglielmi (2017) και νέα πειραματικά δεδομένα που πραγματοποιήθηκαν στο Politecnico di Bari της Ιταλίας. Γίνεται αναφορά στα γεωλογικά χαρακτηριστικά της αργίλου Lucera και στα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών όπως η μονοδιάστατη και ισότροπη συμπίεση, καθώς και δοκιμή διάτμησης. Αυτά τα δεδομένα προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες της αργίλου και τη συμπεριφορά της υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Λέξεις – κλειδιά

Αργιλικά εδάφη, Τάσεις, Αναλλοίωτες, Κρίσιμη κατάσταση, Τριαξονική δοκιμή, Μονοδιάστατη συμπίεση, Στερεοποίηση εδαφών.

Abstract

This diploma thesis examines the mechanical behavior of soil materials, particularly clay. It combines theoretical and experimental approaches to better understand how clay responds to various loading conditions. The theoretical section investigates the behavior of clay soils using critical state theory and the Cam-Clay constitutive model. This is followed by a discussion of both previous and new experimental data on Lucera clay, which is located in Apulia, Italy.

Initially, the theoretical part analyzes the total and effective stresses, as well as the failure criteria. Particular emphasis is given to invariants and stress paths, along with constitutive relations such as linear isotropic elasticity and Hooke's law. The behavior of soils under various loadings is also investigated, analyzing the parameters that affect soil failure or stability. Additionally, the elastic and plastic behavior of soils are discussed, as well as the analysis of soil structure and reconstituted soils, which significantly influence the mechanical properties and behavior of soils. The thesis devotes considerable attention to critical state simulations, which are used to interpret soil behavior and predict the response of soils under different conditions.

An important part of the thesis is the experimental approach, which includes a series of tests necessary to evaluate the mechanical behavior of Lucera clay. Previous experimental data from Guglielmi (2017) and new experimental data conducted at Politecnico di Bari, Italy, are presented. The geological characteristics of Lucera clay and the results of laboratory tests, such as one-dimensional and isotropic compression and shear tests, are reported. These data provide valuable information on the mechanical properties of the clay and its behavior under different loading conditions.

Keywords

Clays, Soils, Stress, Invariants, Critical State, Triaxial test, One dimensional compression, Consolidation.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	11
Κατάλογος Εικόνων	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	14
Σκοπός και στόχοι	14
Μεθοδολογία.....	14
Καινοτομία	14
Δομή	14
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΤΑΝΥΣΤΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	16
1.1 Ολικές και Ενεργές Τάσεις.....	17
1.2 Κριτήριο Αστοχίας.....	17
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΑΝΑΛΛΟΙΩΤΕΣ.....	18
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΤΑΣΙΚΕΣ ΟΔΕΥΣΕΙΣ	20
3.1 Τασική όδευση Ισότροπης Συμπίεσης.....	20
3.2 Τριαξονική Θλίψη	21
3.3 Τριαξονικός Εφελκυσμός.....	21
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ.....	23
4.1 Γραμμική Ισότροπη Ελαστικότητα	23
4.2 Διατύπωση Νόμου του Hooke με χρήση τασικών και παραμορφωσιακών αναλλοίωτων:	26
4.3 Αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης	26
5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΤΥΠΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ.....	28
5.1 Τυπικές φορτίσεις που δεν οδηγούν σε αστοχία.....	28
5.1.1 Ισότροπη Συμπίεση.....	28
5.1.2 Μονοδιάστατη στερεοποίηση.....	29
5.2 Τυπικές φορτίσεις που οδηγούν σε αστοχία	34
5.2.1 Τριαξονική Θλίψη και Εφελκυσμός.....	34
5.2.2 Απλή διάτμηση	35
5.2.3 Ανεμπόδιση Θλίψη	36
6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ	37
6.1 Δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες – <i>Consolidated Drained (CD)</i>	38
6.2 Δοκιμή Συμπίεσης με Στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες - <i>Consolidated Undrained (CU)</i> ή Στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες με μέτρηση του νερού των πόρων (<i>CU_{pp}</i>)	39
6.3 Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες - <i>Unconsolidated Undrained (UU)</i>	40
6.4 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης ή Μη Περιορισμένης Πλευρικά Συμπίεσης- <i>Unconfirmed Compression (UC)</i>	40
7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΟΧΛΕΥΣΗ - <i>Soil Structure and Remoulding</i>.....	42
8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ - <i>Critical State Model</i>.....	43
8.1 Στερεοποίηση εδαφών.....	44
8.2 Πρόβλεψη συμπεριφοράς κανονικά και ελαφρώς στερεοποιημένων εδαφών	46
8.2.1 Υπό στραγγισμένες συνθήκες.....	46
8.2.2 Υπό αστράγγιστες συνθήκες.....	47
8.3 Πρόβλεψη συμπεριφοράς ισχυρά υπερστερεοποιημένων εδαφών	48
8.3.1 Υπό στραγγισμένες συνθήκες.....	48
8.3.2 Υπό αστράγγιστες συνθήκες.....	49
8.4 Τυπική συμπεριφορά κανονικά στερεοποιημένων εδαφών σε σύγκριση με ισχυρά στερεοποιημένα εδάφη σε αστράγγιστες συνθήκες.....	50
8.5 Μονοδιάστατα στερεοποιημένα εδάφη – <i>K₀</i> στερεοποιημένα	51

9	ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	53
9.1	Νόμος Ροής	55
9.2	Νόμος κράτυνσης	55
9.3	Προσομοιώματα Κρίσιμης Κατάστασης	56
9.3.1	Προσομοιώματα με Καπέλο (<i>Cap</i>)	56
9.3.2	Ισοτροπικά/Ανισοτροπικά προσομοιώματα (<i>Isotropic/Anisotropic</i>)	56
9.3.3	Προσομοιώματα Γενικευμένης Πλαστικότητας (<i>Generalised Plasticity</i>)	56
9.3.4	Προσομοιώματα Αλληλεμπεριεχόμενων Επιφανειών (<i>Nested-Surfaces</i>)	56
9.3.5	Προσομοιώματα Οριακής Επιφάνειας (<i>Bounding Surface</i>).	57
9.4	Καταστατικό μοντέλο <i>Cam Clay</i>	58
10	ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	59
10.1	ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	59
10.2	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	59
10.2.1	Cauchy ελαστικότητα.....	59
10.2.2	Υποελαστικότητα	59
10.2.3	Ποροελαστικότητα.....	59
10.2.4	Υπερελαστικότητα-Green Ελαστικότητα	60
11	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ LUCERA	61
11.1	Γεωλογικά χαρακτηριστικά της αργίλου Lucera	61
11.2	Εργαστηριακές δοκιμές	62
11.2.1	Μονοδιάστατη (1D) συμπίεση	62
11.2.2	Ισότροπη συμπίεση	66
11.2.3	Δοκιμή διάτμησης.....	69
11.3	Νέες εργαστηριακές δοκιμές της αργίλου Lucera	77
12	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 6.1 Δεδομένα που προσδιορίζουμε μετά από κάθε δοκιμή	41
Πίνακας 11.1 Δοκιμές μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης σε φυσική και αναζυμωμένη άργιλο Lucera.....	62
Πίνακας 11.2 Τιμές σταθερών ενός αργίλου Lucera από τη δοκιμή 1Δ συμπίεσης.....	66
Πίνακας 11.3 Δοκιμές ισότροπης συμπίεσης σε φυσική και αναζυμωμένη άργιλο Lucera.....	66
Πίνακας 11.4 Τιμές σταθερών της αργίλου Lucera που προκύπτουν από την ισότροπη συμπίεση	68
Πίνακας 11.5 Δοκιμές απλής διάτμησης στην αναζυμωμένη άργιλο	69
Πίνακας 11.6 Δοκιμές απλής διάτμησης στη φυσική άργιλο	69
Πίνακας 11.7 Σύνοψη των αποτελεσμάτων των δοκιμών διάτμησης στη φυσική άργιλο Lucera. (Guglielmi, 2017)	73
Πίνακας 11.8 Φυσικός άργιλος: ψευδοκρίσιμες καταστάσεις (Guglielmi, 2017).	75
Πίνακας 11.9 Τιμές σταθερών κρίσιμης κατάστασης.....	76
Πίνακας 11.10 Αρχικές μετρήσεις κατάστασης εδάφους.....	78
Πίνακας 11.11 Στοιχεία εδαφικού δοκιμίου Lucera πριν και μετά την δοκιμή του οιδιμέτρου.....	81

Κατάλογος Εικόνων

Σχήμα 1.1 Θετικές τάσεις σύμφωνα με την τανυστική σύμβαση της Εδαφομηχανικής (Καββαδάς,2005)....	16
Σχήμα 1.2 Ενεργός και Ολικός κύκλος Mohr εδαφικού δείγματος	17
Σχήμα 3.1 Μέσες και εκτροπικές τάσεις (Budhu, 2020)	20
Σχήμα 3.2 Τυπικές τασικές οδεύσεις υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες: 1) Ισότροπη Συμπίεση, 2) Τριαξονική Θλίψη, 3)Τριαξονικός Εφελκυσμός.....	21
Σχήμα 3.3 Κύκλοι Mohr για τις φορτίσεις 1)Ισότροπη συμπίεση, 2)Μονοδιάστατη συμπίεση, 3)Τριαξονική θλίψη, 4)Τριαξονικός “εφελκυσμός”	22
Σχήμα 4.1 Πίεση του νερού των πόρων.....	23
Σχήμα 4.2 Γραμμική ελαστικότητα.	24
Σχήμα 4.3 Τασική όδευση υπό αστραγγιστες συνθήκες στην περίπτωση ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας.....	27
Σχήμα 5.1 Ισότροπη συμπίεση	28
Σχήμα 5.2 Ισοτροπική Γραμμή Κανονικής Φόρτισης INCL.....	29
Σχήμα 5.3 Μονοδιάστατη συμπίεση.....	29
Σχήμα 5.4 Οιδιόμετρο (Guglielmi, 2017).....	30
Σχήμα 5.5 Οιδιόμετρο (Αστερίου, 2022).....	30
Σχήμα 5.6 Καμπύλη παραμόρφωσης – <i>Compression Curve</i>	32
Σχήμα 5.7 Καμπύλη στερεοποίησης (Καββαδάς, 2009)	33
Σχήμα 5.8 Καμπύλη στερεοποίησης (Καββαδάς, 2009)	33
Σχήμα 5.9 Τριαξονική θλίψη	34
Σχήμα 5.10 Τριαξονικός εφελκυσμός	34
Σχήμα 5.11 Κύκλοι Mohr ενεργών τάσεων σε αστοχία για στραγγισμένη τριαξονική συμπίεση και τριαξονικό εφελκυσμό	35
Σχήμα 5.12 Απλή διάτμηση και κύκλοι Mohr δοκιμής	35
Σχήμα 5.13 Ανεμπόδιση Θλίψη.....	36
Σχήμα 6.1 Συσκευή τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού (Καββαδάς, 2009).....	37
Σχήμα 6.2 Τυπικοί κύκλοι Mohr σε αστοχία για δοκιμές UU, CU και CD σε δοκίμια του ίδιου εδάφους και του ίδιου αρχικού δείκτη κενών ελαφρά υπερεστεροποιημένης αργίλου.....	38
Σχήμα 6.3 α) Τάσεις στο πρώτο στάδιο της CD, β) Τάσεις στο δεύτερο στάδιο της CD, γ)Τασικές οδεύσεις στο πρώτο και δεύτερο στάδιο της δοκιμής CD.	38
Σχήμα 6.4 : α)Φάση στερεοποίησης- πρώτο στάδιο της CU, β)Φάση διάτμησης-δεύτερο στάδιο της CU, γ)Τασικές οδεύσεις στο πρώτο και δεύτερο στάδιο όπου φαίνεται η ενεργός και η ολική τασική όδευση..	39
Σχήμα 6.5 Κύκλοι Mohr (Parry, 2005).....	39
Σχήμα 6.6 α) Διατμητικές τάσεις UU δοκιμών, β)Τασική όδευση UU δοκιμών, γ)Κύκλοι Mohr UU δοκιμών	40
Σχήμα 6.7 Για τη δοκιμή UC α) Εφαρμοζόμενες τάσεις, β)Ολική τασική όδευση, γ) Κύκλοι Mohr	40
Σχήμα 8.1 Απεικόνιση των παραμέτρων αντοχής και στερεοποίησης. (Budhu, 2020).....	43

Σχήμα 8.2 α)Γραμμές κρίσιμης κατάστασης με $M=M_c$ για θλίψη και $M=M_e$ για εφελκυσμό, β)Γραμμή αποφόρτισης/επαναφόρτισης και γραμμή κρίσιμης κατάστασης (e,p'), γ) Γραμμή αποφόρτισης/επαναφόρτισης και γραμμή κρίσιμης κατάστασης (e,lnp'). (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)	44
Σχήμα 8.3 Σχέση μεταξύ ολικών και ενεργών τασικών κύκλων εάν η πίεση του νερού των πόρων είναι θετική.	45
Σχήμα 8.4 Σχέση μεταξύ ολικών και ενεργών τασικών κύκλων εάν η πίεση του νερού των πόρων είναι αρνητική.	45
Σχήμα 8.5 Αναμενόμενα αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσης σε στραγγισμένες συνθήκες (CD) σε ελαφρώς υπερστερεοποιημένο έδαφος ($1 < R_o \leq 2$) χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Κρίσιμης Κατάστασης (CSM). (Από Budhu,2020 τροποποιημένο).....	46
Σχήμα 8.6 Αναμενόμενα αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσης με στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες (CU) δοκιμής ελαφρώς στερεοποιημένων εδαφών ($1 < R_o \leq 2$) χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Κρίσιμης Κατάστασης (CSM). (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)	47
Σχήμα 8.7 Απεικόνιση αποτελεσμάτων πρόβλεψης υπό μία τριαξονική CD δοκιμή σε ισχυρά υπερστερεοποιημένο έδαφος ($R_o > 2$) χρησιμοποιώντας το CSM. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο).....	48
Σχήμα 8.8 Απεικόνιση προβλεπόμενων αποτελεσμάτων από μία τριαξονική CU δοκιμή για ισχυρά υπερστερεοποιημένο έδαφος $R_o > 2$. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)	49
Σχήμα 8.9 Τυπικά διαγράμματα διεκτροπικής τάσης και υπερπίεσης του νερού των πόρων έναντι της αξονικής παραμόρφωσης για αστράγγιστες δοκιμές: α) Κανονικά Στερεοποιημένης αργίλου, β)Ισχυρά Υπερστεροποιημένης αργίλου. (από Parry, 2005 τροποποιημένο)	50
Σχήμα 8.10 Επιφάνειες διαρροής. (Budhu, 2020)	51
Σχήμα 8.11 Φόρτιση και αποφόρτιση ενός Κο-στερεοποιημένου λεπτόκοκκου εδάφους. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)	52
Σχήμα 9.1 Ιδεατή καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για ελαστοπλαστικό υλικό.....	53
Σχήμα 9.2 Περιβάλλουσα Πλαστικής Διαρροής και δυνατές καταστάσεις.....	54
Σχήμα 9.3 Μεταβολή μεγέθους περιβάλλουσας πλαστικής διαρροής – Ισότροπη συμπίεση.	55
Σχήμα 9.4 Η Επιφάνεια διαρροής του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam-Clay στο χώρο $p'-q$	58
Σχήμα 11.1 Γεωλογικός χάρτης της Νότιας Ιταλίας (Guglielmi, 2017)	61
Σχήμα 11.2 Καμπύλες παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιάστατης (1D) παραμόρφωσης της αργίλου Lucera σε e, σ'_v (Guglielmi, 2017)	64
Σχήμα 11.3 Καμπύλες παραμόρφωσης μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης της αργίλου Lucera σε άξονες $e, ln \sigma'_v$	64
Σχήμα 11.4 Καμπύλες παραμόρφωσης μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης της αργίλου Lucera σε άξονες $v, ln p'$ (Guglielmi, 2017)	65
Σχήμα 11.5 Καμπύλες παραμόρφωσης μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης της αργίλου Lucera σε άξονες $(ln v, ln p)$ (Guglielmi, 2017).....	65
Σχήμα 11.6 Καμπύλες παραμόρφωσης ισότροπης συμπίεσης αργίλου Lucera (Guglielmi, 2017).....	67
Σχήμα 11.7 Διάγραμμα $ln v - ln p'$ ισότροπης συμπίεσης αργίλου Lucera	67
Σχήμα 11.8 Συμπεριφορά της αργίλου Lucera σε ισότροπη (διακεκομμένες γραμμές) και μονοδιάστατη (συνεχόμενες γραμμές) συμπίεση.....	68
Σχήμα 11.9 Εικόνες δειγμάτων αργίλου Lucera στο τέλος της διατημητικής δοκιμής. Οι πάνω εικόνες είναι φυσική άργιλος, οι κάτω εικόνες είναι η αναζυμωμένη. (Guglielmi, 2017).....	70
Σχήμα 11.10 Διάγραμμα $v - p'$ αναζυμωμένης αργίλου Lucera από τα αποτελέσματα δοκιμών (Guglielmi, 2017)	71
Σχήμα 11.11 Αναζυμωμένο δοκίμιο TRL 1: Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες ($R=1.8$).	71
Σχήμα 11.12 Αναζυμωμένο δοκίμιο TRL 5: Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες ($R=2.8$). (Guglielmi, 2017)	72
Σχήμα 11.13 Αναζυμωμένη άργιλος: συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες ($R=4$). (Guglielmi, 2017).....	72
Σχήμα 11.14 Αναζυμωμένη άργιλος: συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης ισότροπης κανονικά στερεοποιημένης αστράγγιστης δοκιμής ($R=4$). (Guglielmi, 2017)	73
Σχήμα 11.15 Τασικές οδεύσεις αναζυμωμένης αργίλου (Guglielmi, 2017)	74
Σχήμα 11.16 Αναζυμωμένη άργιλος: $v - p'$ όδευση και γραμμή κρίσιμης κατάστασης.....	75
Σχήμα 11.17 Φυσική άργιλος: Τασική όδευση αστράγγιστων δοκιμών.	75

Σχήμα 11.18 Φυσική άργιλος: Οδεύσεις $v-p'$ και κρίσιμη κατάσταση	76
Σχήμα 11.19 Σταθερές κρίσιμης κατάστασης.	76
Σχήμα 11.20 Άνοιγμα μπλοκ φυσικής αργίλου Lucera	77
Σχήμα 11.21 Προετοιμασία δείγματος οιδημέτρου	78
Σχήμα 11.22 Τροποποιημένη συσκευή οιδημέτρου του Politecnico di Bari (Guglielmi, 2017).	79
Σχήμα 11.23 Νέα εργαστηριακά ποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου (μπλε) και σύγκριση με αρχικά αποτελέσματα της Guglielmi, 2017 (μαύρο).	80
Σχήμα 11.24 Διάγραμμα μετατόπισης χρόνου ενός από τα βήματα φόρτισης (6700kPa) και διόρθωση με μέθοδο Casagrande.....	80

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών αποτελεί ένα κρίσιμο πεδίο στη γεωτεχνική μηχανική. Συγκεκριμένα τα αργιλικά υλικά, λόγω της ιδιαίτερης δομής και σύνθεσής τους, παρουσιάζουν σύνθετη συμπεριφορά υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, καθιστώντας τα αντικείμενο διεξοδικής έρευνας. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων της αργίλου, συνδυάζοντας θεωρητικές αναλύσεις και πειραματικές δοκιμές της αργίλου Lucera με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός και η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς της αργίλου, με ιδιαίτερη έμφαση στις τάσεις, τις καταστατικές σχέσεις και τα προσομοιώματα κρίσιμης κατάστασης. Η επιλογή της αργίλου ως υλικό μελέτης προκύπτει από τη σημασία της στη γεωτεχνική μηχανική, καθώς και από την πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς της υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, γεγονός που την καθιστά ένα επίκαιρο και σημαντικό θέμα έρευνας.

Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός της εργασίας είναι να παράσχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των αργιλικών υλικών. Οι κύριοι στόχοι περιλαμβάνουν:

- Την ανάλυση των τάσεων και των κριτηρίων αστοχίας των αργιλικών εδαφών.
- Την εξέταση των καταστατικών σχέσεων και των θεωριών ελαστικότητας και πλαστικότητας.
- Τη διερεύνηση των προηγούμενων και νέων πειραματικών δεδομένων και τη σύγκριση τους με τα θεωρητικά μοντέλα.
- Την ανάπτυξη και εφαρμογή προσομοιωμάτων κρίσιμης κατάστασης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των αργιλικών υλικών.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει:

- Θεωρητική ανάλυση: Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης και τα καταστατικά προσομοιώματα.
- Πειραματική προσέγγιση: Πραγματοποίηση σειράς εργαστηριακών δοκιμών, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών μονοδιάστατης και ισότροπης συμπίεσης, καθώς και δοκιμών διάτμησης.
- Συγκριτική ανάλυση: Σύγκριση προηγούμενων και νέων πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά μοντέλα και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Καινοτομία

Συλλογή προηγούμενων πειραματικών δεδομένων και ανάλυση νέων δεδομένων της αργίλου Lucera, που συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων της.

Δομή

Η διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη ως εξής:

- Εισαγωγή: Παρουσίαση του αντικειμένου, των στόχων, της μεθοδολογίας και της καινοτομίας της έρευνας.
- Θεωρητικό μέρος: Ανάλυση των ολικών και ενεργών τάσεων, των κριτηρίων αστοχίας, των καταστατικών σχέσεων και της θεωρίας της κρίσιμης κατάστασης.
- Πειραματικό μέρος: Παρουσίαση των πειραματικών δοκιμών και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

- Συμπεράσματα: Σύνοψη των ευρημάτων, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

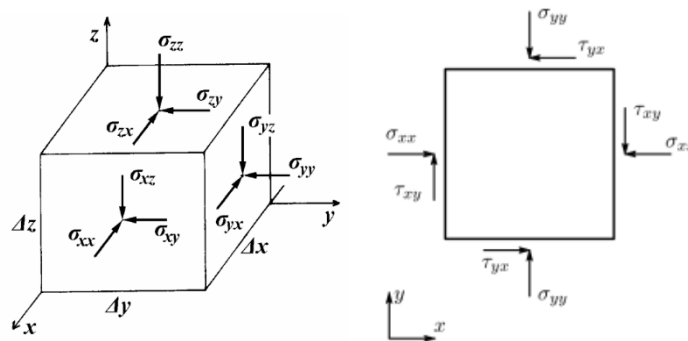
Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην παροχή γνώσεων και την ενίσχυση της κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς των αργιλικών εδαφών, συμβάλλοντας έτσι στην εξέλιξη της γεωτεχνικής επιστήμης.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΤΑΝΥΣΤΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Ο τανυστής τάσεων Cauchy σ (ή πραγματικός τανυστής τάσεων) ή απλούστερα ο τανυστής τάσεων, είναι ένας τανυστής 2ης τάξης, με 9 συνιστώσες σ_{ij} με $i,j=x,y,z$ οποίος προσδιορίζει επακριβώς την εντατική κατάσταση (τάσεις) σε ένα σημείο μέσα στο υλικό στην παραμορφωμένη κατάσταση. Οι εννέα όροι σ_{ij} του τανυστή των τάσεων εκφράζονται σαν διανύσματα επί των πλευρών ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Οι τρεις από τους όρους αυτούς, ασκούνται κάθετα στα τρία Καρτεσιανά επίπεδα (x,y,z) , συμβολίζονται ως $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ και ονομάζονται ορθές τάσεις, ενώ οι υπόλοιποι έξι κείτονται επί των επιπέδων, συμβολίζονται $\sigma_{12}, \sigma_{21}, \sigma_{23}, \sigma_{32}, \sigma_{13}, \sigma_{31}$ και ονομάζονται διατμητικές τάσεις. Οι όροι του τανυστή είναι θετικοί όταν έχουν την ίδια κατεύθυνση με το κάθετο διάνυσμα του επιπέδου στο οποίο ανήκουν. Γενικά, οι θετικές τάσεις αναφέρονται ως εφελκυστικές, ενώ οι αρνητικές ως θλιπτικές. Τέλος, αποδεικνύεται ότι ο τανυστής των τάσεων είναι συμμετρικός, δηλαδή ισχύει η ακόλουθη έκφραση: $\sigma_{jk} = \sigma_{kj}$. Γενικά, ως τανυστής των τάσεων σε ένα τυχαίο σημείο ορίζεται ως:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Έτσι, στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται οι θετικές τάσεις σύμφωνα με την τανυστική σύμβαση της Εδαφομηχανικής. Κατά τη σύμβαση αυτή οι θετικές τιμές των συνιστωσών του τανυστή των τάσεων ορίζονται ως εξής:



Σχήμα 1.1 Θετικές τάσεις σύμφωνα με την τανυστική σύμβαση της Εδαφομηχανικής (Καβαδάς,2005)

Αποτέλεσμα των τάσεων που ασκούνται σε ένα σώμα είναι η εκδήλωση μετακινήσεων, οι οποίες μπορεί να είναι είτε απειροστές είτε σημαντικές. Το μέγεθος αυτών των μετακινήσεων (στρέψη, επιμήκυνση κ.λ.π.) ορίζεται σε όρους παραμορφώσεων – τροπών (*strain*). Στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων, όπως οι τάσεις έτσι και οι παραμορφώσεις σε ένα σημείο μπορούν να προσδιοριστούν από ένα συμμετρικό τανυστή δευτέρας τάξης. Οι τιμές του τανυστή πρακτικά υπολογίζονται από τις παραγώγους των μετατοπίσεων. Υπό την δράση των έξι συνιστωσών του τανυστή των τάσεων σ_{ij} σε ένα σώμα, αναπτύσσονται παραμορφώσεις, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε αξονικές και γωνιακές. Οι αξονικές παραμορφώσεις ορίζονται ως $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$ και προκύπτουν από τις αντίστοιχες ορθές τάσεις $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$, ενώ οι γωνιακές ορίζονται ως $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$, και προκύπτουν από τις διατμητικές τάσεις $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$.

Ο συμμετρικός τανυστής των παραμορφώσεων, ο οποίος χαρακτηρίζει την παραμόρφωση ενός σώματος, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yz} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Όπου οι γωνιακές παραμορφώσεις ορίζονται ως $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ij}$.

1.1 Ολικές και Ενεργές Τάσεις

Θεωρώντας στοιχείο κορεσμένου εδάφους το οποίο υπόκειται σε ορθή τάση σ , η τάση σ ονομάζεται ολική τάση και από το ισοζύγιο των δυνάμεων προκύπτει ότι οι τάσεις στο έδαφος πρέπει να είναι ίσες και αντίθετες ως προς τη τάση σ . Η αντίσταση ή η αντίδραση στη τάση σ παρέχεται από ένα συνδυασμό τάσεων από τους κόκκους, η οποία ονομάζεται ενεργός τάση (σ') και από το νερό στους πόρους η οποία ονομάζεται πίεση του νερού των πόρων (u). Η εξίσωση ισορροπίας γράφεται:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1.3\alpha)$$

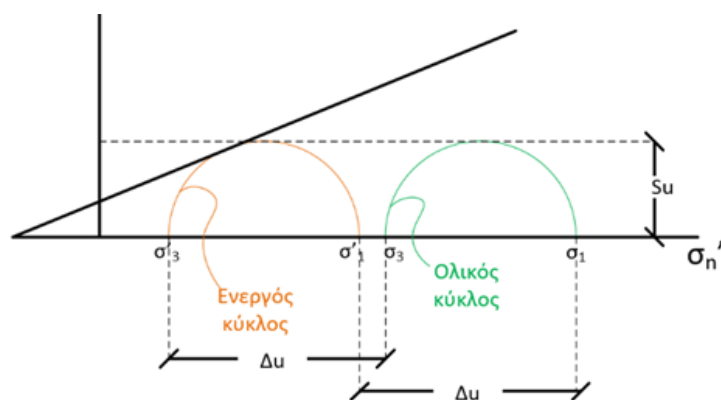
$$\sigma' = \sigma - u \quad (1.3\beta)$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται αρχή της ενεργούς τάσης και διατυπώθηκε από τον *Terzaghi* (1883-1963).

1.2 Κριτήριο Αστοχίας

Για κάθε (εδαφικό) υλικό υπάρχουν ορισμένοι συνδυασμοί τάσεων που οδηγούν σε απεριόριστες παραμορφώσεις. Οι συνδυασμοί αυτοί ονομάζονται εντατικές καταστάσεις αστοχίας. Το σύνολο των εντατικών καταστάσεων αστοχίας (δηλαδή το σύνολο των σημείων στον εξαδιάστατο χώρο των τάσεων) σχηματίζει μία "επιφάνεια" που ονομάζεται περιβάλλουσα των καταστάσεων αστοχίας ή, απλά, περιβάλλουσα αστοχίας. Είναι προφανές ότι, εφόσον οι καταστάσεις αστοχίας συνδέονται με την παραμόρφωση του εδάφους, πρέπει να εκφράζονται ως προς τις ενεργές τάσεις, σύμφωνα με την αρχή των ενεργών τάσεων. Έτσι, οι εντατικές καταστάσεις αστοχίας εκφράζονται από συνδυασμούς των ενεργών τάσεων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, μπορεί να αστοχήσει μόνο ο ενεργός κύκλος του *Mohr*, και όχι ο ολικός. Τα κριτήρια αστοχίας που εφαρμόζονται σήμερα και έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά είναι:

- Κριτήριο μέγιστης ορθής τάσης
- Κριτήριο μέγιστης διατμητικής τάσης (*Tresca*)
- Κριτήριο *Von-Mises*
- Κριτήριο *Mohr-Coulomb*



Σχήμα 1.2 Ενεργός και Ολικός κύκλος *Mohr* εδαφικού δείγματος

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΑΝΑΛΛΟΙΩΤΕΣ

Για δεδομένη εντατική κατάσταση οι τάσεις και οι παραμορφώσεις εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς όπου αυθαίρετα έχει επιλεγεί το Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων. Ωστόσο, για κάθε εντατική κατάσταση μπορούν να οριστούν τασικά μεγέθη, οι τιμές των οποίων είναι ανεξάρτητες του συστήματος αναφοράς. Τα μεγέθη αυτά καλούνται αναλλοιώτες του ταυυστή και επιτρέπουν τη χρήση γενικευμένων παραμέτρων τάσεων και παραμορφώσεων για την ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους. Για παράδειγμα, στην επίπεδη ένταση τα μεγέθη του κύκλου *Mohr* ορίζονται ως:

$$s = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (2.1)$$

$$t = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (2.2)$$

όπου η ακτίνα t και το κέντρο του κύκλου *Mohr*, s , είναι μεγέθη αναλλοιώτα.

Στις τρεις διαστάσεις ορίζεται ο πλήρης ταυυστής και οι τρεις κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ που αποτελούν τις ιδιοτιμές του. Τα ακόλουθα μεγέθη αποτελούν τις αναλλοιώτες τάσεις του ταυυστή.

➤ Μέση (ορθή) τάση (1^η αναλλοιώτη)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (2.3)$$

όπου $p = p' + u$ η ολική τάση και p' η ενεργός τάση.

Σε ένα διάγραμμα με ορθογώνιους άξονες κύριων τάσεων $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, η μέση τάση είναι η διαγώνιος του χώρου (Σχήμα 3.1). Η μέση τάση προκαλεί μεταβολές του όγκου.

➤ Διεκτροπική τάση (2^η αναλλοιώτη)

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.4a)$$

Μια γραμμή κάθετη στη μέση τάση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, αντιπροσωπεύει την διεκτροπική τάση. Η διεκτροπική τάση προκαλεί παραμορφώσεις ή διάτμηση μιας εδαφικής μάζας. Η εξίσωση (2.4a) μπορεί να γραφεί ως προς τις κανονικές και διατμητικές τάσεις ως εξής:

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + ((\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2) + ((\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2)] + \sigma_{\tau_{xy}}^2 + \sigma_{\tau_{yz}}^2 + \sigma_{\tau_{zx}}^2 \right\} \quad (2.4\beta)$$

Η διεύθυνση του διανύσματος της μέσης ορθής τάσης p εξαρτάται από τις ορθές τάσεις. Το διάνυσμα της διεκτροπικής τάσης είναι κάθετο στο διάνυσμα της μέσης ορθής τάσης και αποτελεί ένα μέτρο της διατμητικής τάσης. Η διεύθυνση της διεκτροπικής τάσης q ορίζεται από την τρίτη αναλλοιώτη, η οποία δεν αναλύεται στην παρούσα εργασία.

➤ Ογκομετρική παραμόρφωση

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{vol} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2.5)$$

➤ Διεκτροπική Παραμόρφωση ή Διατμητική Παραμόρφωση

$$\varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2]^{1/2} \quad (2.7)$$

- Στην τριαξονική δοκιμή *TXL* ισχύουν οι αξονοσυμμετρικές συνθήκες $\sigma_2 = \sigma_3$, $\sigma'_2 = \sigma'_3$ και $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \text{ και } p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} = \frac{\sigma_{zz} + 2\sigma_{xx}}{3}$$

$$q = q' = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_{zz} - \sigma_{xx}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{vol} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = \varepsilon_{zz} + 2\varepsilon_{xx}$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) = \frac{2}{3}(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})$$

- Στην επίπεδη παραμόρφωση ισχύει $\varepsilon_2 = 0$:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma_{zz}' + \sigma_{yy}' + \sigma_{xx}'}{3}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{yy} + \sigma_{xx}}{3}$$

$$q = q' = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{vol} = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2 - \varepsilon_1\varepsilon_3)^{1/2} = \frac{2}{3}(\varepsilon_{zz}^2 + \varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx})^{1/2}$$

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΤΑΣΙΚΕΣ ΟΔΕΥΣΕΙΣ

Τασική οδευση είναι η γραφική απεικόνιση (γεωμετρικός τόπος) των τάσεων σε ένα σώμα. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις μπορούν να περιγράψουν από τα αναλλοίωτα (*invariants*) μεγέθη τους, τα οποία είναι ανεξάρτητα από το σύστημα αναφοράς. Συχνά στην εδαφομηχανική οι τασικές οδεύσεις παριστάνονται με τις δύο πρώτες αναλλοίωτες του τανυστή των τάσεων. Διακρίνουμε τις εξής τασικές οδεύσεις:

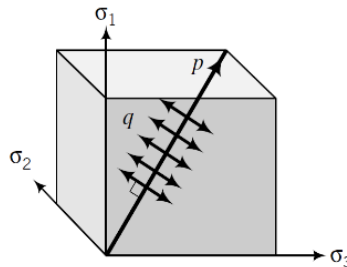
➤ Ολική τασική οδευση (*Total Stress Path*): p - $q \rightarrow TSP$

Η ολική τασική οδευση αναφέρεται στην πορεία των ολικών τάσεων (p, q) που εφαρμόζονται σε ένα δείγμα. Στην ολική τασική οδευση, η συνολική τάση p και η διεκτροπική τάση q περιλαμβάνουν όλες τις εξωτερικές τάσεις που εφαρμόζονται στο δείγμα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι τάσεις στους πόρους του εδάφους (υδροστατικές τάσεις).

➤ Ενεργός τασική οδευση (*Effective Stress Path*): p' - $q \rightarrow ESP$

Η ενεργός τασική οδευση αναφέρεται στην πορεία των ενεργών τάσεων (p', q) που εφαρμόζονται σε ένα δείγμα. Οι ενεργές τάσεις p' λαμβάνουν υπόψη τις τάσεις στους πόρους του εδάφους (υδροστατικές τάσεις). Η ενεργός τάση υπολογίζεται αφαιρώντας την πίεση του νερού στους πόρους (u) από την ολική τάση, δηλαδή $p' = p - u$. Η ενεργός τάση είναι αυτή που ουσιαστικά επηρεάζει τη διάτμηση και την αντοχή του εδάφους.

Στραγγισμένες συνθήκες	<ul style="list-style-type: none"> • Υπερπίεση του νερού των πόρων $\Delta u = 0$ • $TSP \equiv ESP$
Αστράγγιστες συνθήκες	<ul style="list-style-type: none"> • $\Delta \varepsilon_{vol} = 0$ • Υπερπίεση του νερού των πόρων $\Delta u \neq 0$ • $TSP \neq ESP$



Σχήμα 3.1 Μέσες και εκτροπικές τάσεις (Budhu, 2020)

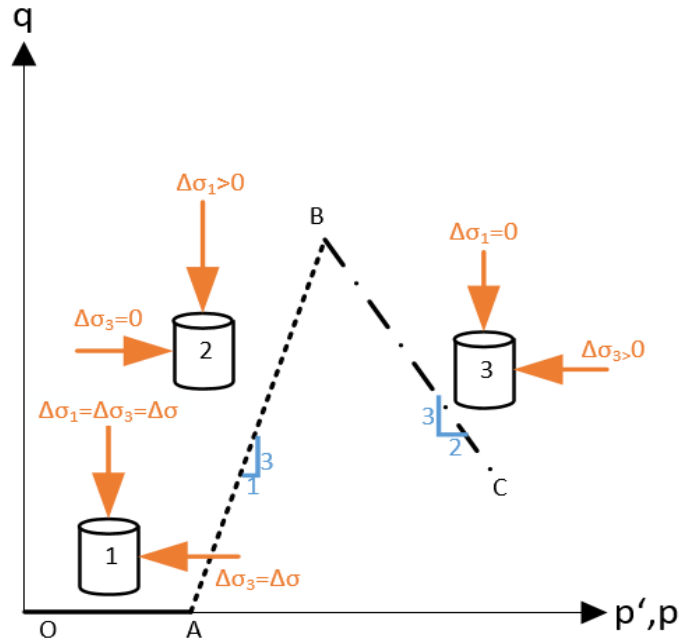
Παρακάτω αναφέρονται κάποιες τασικές οδεύσεις για σειρά φορτίσεων υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες, οι οποίες εργαστηριακά εφαρμόζονται σε κυλινδρικά εδαφικά δείγματα. Θεωρούμε στραγγισμένες συνθήκες, όπου ενεργές και ολικές τάσεις ταυτίζονται, οπότε ο τόνος παραλείπεται.

3.1 Τασική οδευση Ισότροπης Συμπίεσης

Κατά την ισότροπη συμπίεση ισχύει $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Σε αυτή την περίπτωση τα επίπεδα των κυρίων τάσεων συμπίπτουν με τα επίπεδα φόρτισης, δηλαδή ισχύει $\Delta \sigma_z = \Delta \sigma_1$ και $\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_x = \Delta \sigma_y$.

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= \frac{\Delta \sigma_1 + 2\Delta \sigma_3}{3} = \Delta \sigma_1 \\ \Delta q_1 &= \Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 = 0 \\ \frac{\Delta q_1}{\Delta p_1} &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Συνεπώς η τασική οδευση είναι επί του άξονα p , όπως παριστάνεται στο Σχήμα 3.2 από το τμήμα OA.



Σχήμα 3.2 Τυπικές τασικές οδεύσεις υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες:
1) Ισότροπη Συμπίεση, 2) Τριαξονική Θλίψη, 3) Τριαξονικός Εφελκυσμός

3.2 Τριαξονική Θλίψη

Κατά την τριαξονική θλίψη, η σ_3 παραμένει σταθερή ($\Delta\sigma_3=0$) και η σ_1 αυξάνεται ($\Delta\sigma_1>0$).

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= \frac{\Delta\sigma_1 + 2 * 0}{3} = \frac{\Delta\sigma_1}{3} \\ \Delta q_2 &= \Delta\sigma_1 - 0 = \Delta\sigma_1 \\ \frac{\Delta q_2}{\Delta p_2} &= 3 \end{aligned} \quad (3.2)$$

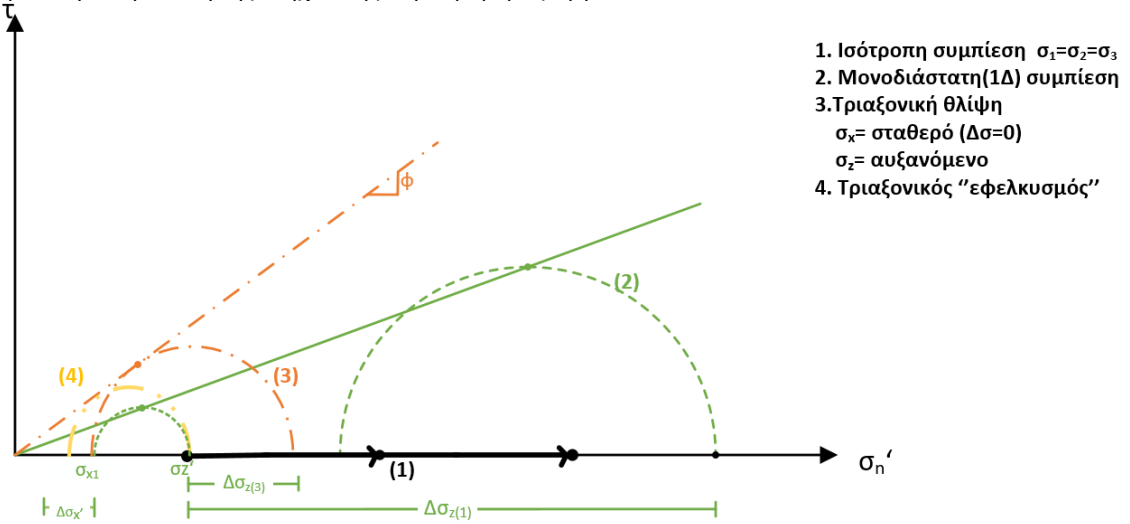
Συνεπώς η τασική όδευση παριστάνεται στο Σχήμα 3.2. από το τμήμα AB.

3.3 Τριαξονικός Εφελκυσμός

Κατά τον τριαξονικό εφελκυσμό μειώνεται η αξονική τάση σ_1 ($\Delta\sigma_1<0$) και αυξάνεται η σ_3 ($\Delta\sigma_3>0$).

$$\begin{aligned} \Delta p_3 &= \frac{0 + 2\Delta\sigma_3}{3} = \frac{2\Delta\sigma_3}{3} \\ \Delta q_3 &= 0 - \Delta\sigma_3 = -\Delta\sigma_3 \\ \frac{\Delta q_3}{\Delta p_3} &= \frac{-3}{2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Συνεπώς η τασική όδευση παριστάνεται στο Σχήμα 3.2 από το τμήμα BC και σημειώνεται ότι στη την τασική όδευση BC η εκτροπική τάση q μειώνεται ενώ η μέση τάση p αυξάνεται.



1. Ισότροπη συμπίεση $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
2. Μονοδιάστατη (1Δ) συμπίεση
3. Τριαξονική θλίψη
 $\sigma_x = \text{σταθερό} (\Delta\sigma = 0)$
 $\sigma_z = \text{αυξανόμενο}$
4. Τριαξονικός "εφελκυσμός"

Σχήμα 3.3 Κύκλοι Mohr για τις φορτίσεις

1) Ισότροπη συμπίεση, 2) Μονοδιάστατη συμπίεση, 3) Τριαξονική θλίψη, 4) Τριαξονικός "εφελκυσμός"

$$M = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3} \rightarrow \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{M(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \quad (3.4)$$

$$\sin(\varphi'_{cs}) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \rightarrow \sigma_1 - \sigma_3 = \sin(\varphi'_{cs})(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3.5)$$

Από τις Σχέσεις (3.4) και (3.5) προκύπτει η Σχέση (3.6) όπου υποδηλώνει την συνάφεια μεταξύ της γωνίας διατμητικής αντοχής φ και της κλίσης M της γραμμής κρίσιμης κατάστασης.

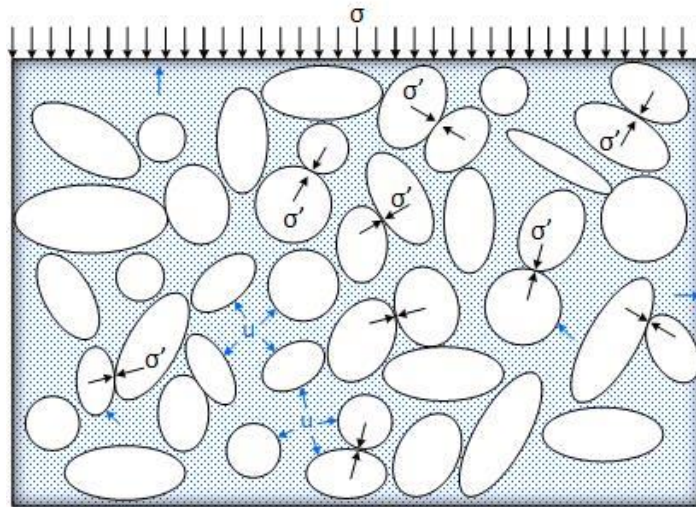
$$\frac{M(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} = \sin(\varphi'_{cs})(\sigma_1 + \sigma_3) \rightarrow$$

$$M = \sin(\varphi'_{cs}) \frac{3(\sigma_1 + \sigma_3)}{(\sigma_1 + 2\sigma_3)} \quad (3.6)$$

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εκφράζεται ποσοτικά με τους καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς οι οποίοι καθορίζουν τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων, δηλαδή τα μεγέθη των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την παραμόρφωση του υλικού. Οι καταστατικοί νόμοι είναι απαραίτητοι κατά την αναλυτική ή αριθμητική επίλυση προβλημάτων που αφορούν φορτίσεις των υλικών, όπως π.χ. κατά τον υπολογισμό των μετακινήσεων (υποχωρήσεων) του εδάφους όταν επιβληθούν εξωτερικά φορτία. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εξαρτάται και από το χρόνο, οπότε στους καταστατικούς νόμους περιγραφής της συμπεριφοράς υπεισέρχεται και ο χρόνος. Οι καταστατικοί νόμοι δεν είναι φυσικοί νόμοι, δεν έχουν δηλαδή τη γενική εφαρμογή των φυσικών νόμων, αλλά είναι συσχετίσεις που βασίζονται είτε στα θερμοδυναμικά αξιώματα (με κάποιες πρόσθετες παραδοχές), όπως π.χ. ο νόμος της γραμμικής ελαστικότητας, είτε σε φαινομενολογικές θεωρήσεις που προκύπτουν από πειραματικές κυρίως μετρήσεις της συμπεριφοράς των υλικών.

Λόγω της πολυφασικότητας των εδαφικών υλικών και κυρίως λόγω της παρουσίας νερού στους πόρους το οποίο αλληλεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό (όπως π.χ. κατά τη στερεοποίηση), οι καταστατικές σχέσεις των εδαφικών υλικών αναφέρονται στον εδαφικό σκελετό, δηλαδή συσχετίζουν τις παραμορφώσεις του εδαφικού σκελετού (που, όμως, ταυτίζονται με τις μακροσκοπικές παραμορφώσεις του εδάφους) με τις ενεργές τάσεις, τις τάσεις δηλαδή που αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό. Στις πρακτικές εφαρμογές ζητείται ο υπολογισμός των τάσεων (και των παραμορφώσεων) που προκαλούνται από κάποια εξωτερική φόρτιση (π.χ. από την κατασκευή ενός κτιρίου). Επειδή, όμως, τα εδάφη είναι συνήθως φορτισμένα και πριν από την επιβολή της συγκεκριμένης εξωτερικής φόρτισης (τυπικά υπόκεινται στις τάσεις λόγω του βάρους των υπερκείμενων εδαφικών σχηματισμών), στην πραγματικότητα ζητείται η σχέση μεταξύ της μεταβολής των ενεργών τάσεων και της αντίστοιχης μεταβολής των παραμορφώσεων που οφείλονται στην εξωτερική φόρτιση.



Σχήμα 4.1 Πίεση του νερού των πόρων

4.1 Γραμμική Ισότροπη Ελαστικότητα

Ο απλούστερος καταστατικός νόμος συμπεριφοράς των εδαφών περιγράφεται από τις σχέσεις της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας. Κατά τη θεωρία αυτή, οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτώνται από δύο θεμελιώδεις παραμέτρους (ιδιότητες του υλικού), το μέτρο Ελαστικότητας (E) και το λόγο του Poisson (ν). Σημαντικά μεγέθη που προκύπτουν από τα προαναφερόμενα είναι:

$$\text{Μέτρο διάτμησης } G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\text{Μέτρο ισόογκης παραμόρφωσης } K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Η γραμμική ελαστικότητα διατυπώθηκε αρχικά από τον Hooke και για το λόγο αυτό συχνά αναφέρεται ως νόμος ελαστικότητας του Hooke (*Hooke's elasticity law*). Σύμφωνα με το νόμο του Hooke, η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης (Σχήμα 4.1):

$$\sigma = C^e : \varepsilon \quad (4.1)$$

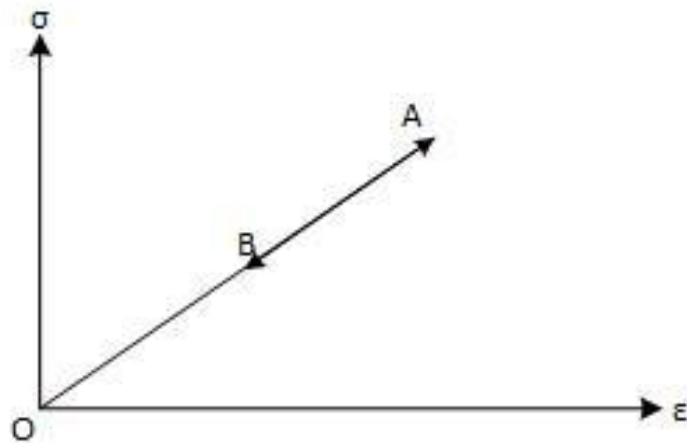
όπου C^e είναι ο τανυστής ελαστικής στιβαρότητας και είναι σταθερός.

Ο τανυστής ελαστικής στιβαρότητας, C^e , αποτελεί μια αμφιμονοσήμαντη απεικόνιση του τανυστή των τάσεων, σ , επί του τανυστή των παραμορφώσεων, ε . Έτσι, σε συγκεκριμένη τάση αντιστοιχεί μία μοναδική παραμόρφωση και αντιστρόφως. Το σύμβολο $:$ συμβολίζει το διπλό εσωτερικό γινόμενο δύο πινάκων και έχει ως αποτέλεσμα ένα βαθμωτό μέγεθος. Γενικά ισχύει η Σχέση 4.2:

$$A : B = A_{ij} B_{ij} \quad (4.2)$$

Η Τανυστική Σύμβαση Einstein εισάγει δύο νέα σύμβολα, το δέλτα του Kronecker δ_{ij} και το σύμβολο μετάθεσης (ή αντισυμμετρικό σύμβολο) ε_{ijk} . Το δέλτα του Kronecker παίρνει το ρόλο του μοναδιαίου πίνακα, I , καθώς ισούται με 1 όταν $i = j$, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση με 0. Συνεπώς, σε έναν πίνακα με δείκτες i και j , τα στοιχεία της διαγωνίου ισούνται με 1 ενώ τα μη διαγώνια με 0. (McGinty, 2012)

Παρακάτω, στο Σχήμα 4.2 αναπαρίσταται η τασική όδευση της γραμμικής ελαστικότητας OABO. Είναι γραμμική με τον κλάδο φόρτισης OBA να έχει ακριβώς την ίδια κλίση με τον κλάδο αποφόρτισης ABO. Κατά την πλήρη αποφόρτιση οι παραμορφώσεις είναι μηδενικές.



Σχήμα 4.2 Γραμμική ελαστικότητα.

Σε μορφή πίνακα, ο νόμος του Hooke για ισότροπα υλικά μπορεί να γραφτεί ως:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

(Wikipedia, 2023)

Όπου $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$ είναι η διατμητική παραμόρφωση στη μηχανική.

Μελέτη και Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Αργιλικών Υλικών, 2024
 Η αντίστροφη σχέση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{bmatrix}$$

(Wikipedia, 2023)

Οι καταστατικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας έχουν την ακόλουθη μορφή:

➤ Ορθές Παραμορφώσεις

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{xx} = \frac{\Delta\sigma'_{xx}}{E} - \nu \left[\frac{\Delta\sigma'_{yy}}{E} + \frac{\Delta\sigma'_{zz}}{E} \right] \\ \Delta\epsilon_{yy} = \frac{\Delta\sigma'_{yy}}{E} - \nu \left[\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{E} + \frac{\Delta\sigma'_{xx}}{E} \right] \\ \Delta\epsilon_{zz} = \frac{\Delta\sigma'_{zz}}{E} - \nu \left[\frac{\Delta\sigma'_{xx}}{E} + \frac{\Delta\sigma'_{yy}}{E} \right] \end{cases}$$

Επίλυση ως προς ν :

$$\begin{cases} \nu = \left[\frac{\Delta\sigma'_{xx}}{\Delta\sigma'_{yy} + \Delta\sigma'_{zz}} - \frac{\Delta\epsilon_{xx}E}{\Delta\sigma'_{yy} + \Delta\sigma'_{zz}} \right] \\ \nu = \left[\frac{\Delta\sigma'_{yy}}{\Delta\sigma'_{zz} + \Delta\sigma'_{xx}} - \frac{\Delta\epsilon_{yy}E}{\Delta\sigma'_{zz} + \Delta\sigma'_{xx}} \right] \\ \nu = \left[\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta\sigma'_{xx} + \Delta\sigma'_{yy}} - \frac{\Delta\epsilon_{zz}E}{\Delta\sigma'_{xx} + \Delta\sigma'_{yy}} \right] \end{cases}$$

Επίλυση ως προς E :

$$\begin{cases} E = \frac{\Delta\sigma'_{xx}}{\Delta\epsilon_{xx}} - \nu * \left[\frac{\Delta\sigma'_{yy}}{\Delta\epsilon_{xx}} + \frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta\epsilon_{xx}} \right] \\ E = \frac{\Delta\sigma'_{yy}}{\Delta\epsilon_{yy}} - \nu \left[\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta\epsilon_{yy}} + \frac{\Delta\sigma'_{xx}}{\Delta\epsilon_{yy}} \right] \\ E = \frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta\epsilon_{zz}} - \nu \left[\frac{\Delta\sigma'_{xx}}{\Delta\epsilon_{zz}} + \frac{\Delta\sigma'_{yy}}{\Delta\epsilon_{zz}} \right] \end{cases}$$

➤ Διατμητικές Παραμορφώσεις:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{xy} = \frac{\Delta\gamma_{xy}}{2} = \frac{\Delta\sigma'_{xy}}{2G} \\ \Delta\epsilon_{yz} = \frac{\Delta\gamma_{yz}}{2} = \frac{\Delta\sigma'_{yz}}{2G} \\ \Delta\epsilon_{zx} = \frac{\Delta\gamma_{zx}}{2} = \frac{\Delta\sigma'_{zx}}{2G} \end{cases}$$

4.2 Διατύπωση Νόμου του Hooke με χρήση τασικών και παραμορφωσιακών αναλλοίωτων:

Οι τασικές και παραμορφωσιακές αναλλοίωτες για ένα ελαστικό υλικό συσχετίζονται ως εξής:

$$\varepsilon_p^e = \varepsilon_{vol} = \frac{1}{K'} p' \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_q^e = \frac{1}{3G} q \quad (4.4)$$

Ο δείκτης e υποδηλώνει ελαστικό υλικό, K' είναι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας (bulk modulus) και G είναι το μέτρο διάτμησης.

$$K' = \frac{p'}{\varepsilon_p^e} = \frac{E'}{3(1 - 2\nu')} \quad (4.5)$$

$$G = G' = \frac{E'}{2(1 + \nu')} \quad (4.6)$$

Ο νόμος του Hooke σε όρους τασικών και παραμορφωσιακών αναλλοίωτων γράφεται ως:

$$\begin{Bmatrix} p' \\ q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K' & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_p^e \\ \varepsilon_q^e \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση οι διατμητικές τάσεις σε ένα ισότροπο γραμμικά ελαστικό υλικό δεν προκαλούν ογκομετρικές μεταβολές και οι μέσες ενεργές τάσεις δεν προκαλούν διατμητικές παραμορφώσεις.

Σχέση για τον γενικευμένο λόγο *Poisson* ν' :

$$E' = 3K'(1 - 2\nu') \quad (4.8)$$

$$E' = 2G(1 + \nu') \quad (4.9)$$

$$\frac{3K'(1 - 2\nu')}{2G(1 + \nu')} = 1 \quad (4.10)$$

$$\nu' = \frac{3K' - 2G}{2G + 6K'} \quad (4.11)$$

Γενικά ισχύει η Σχέση:

$$p * \varepsilon_{vol} + q * \varepsilon_q = \sigma * \varepsilon \quad (4.12)$$

4.3 Αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης

Στην περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης, στην περίπτωση δηλαδή που η φόρτιση είναι πολύ ταχεία ώστε το νερό των πόρων να μην προλαβαίνει να διαφύγει, το έδαφος παραμορφώνεται διατηρώντας σταθερό όγκο ($\Delta\varepsilon_{vol}=0$), ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων Δu , δηλαδή πλεονάζουσα πίεση του νερού των πόρων στην υφιστάμενη ισορροπία της πίεσης του νερού των πόρων. Στην περίπτωση αυτή οι σχέσεις τάσεων- παραμορφώσεων δεν μπορούν να εκφραστούν απευθείας ως προς τις μεταβολές των ολικών τάσεων.

Συνεπώς η ισότροπη γραμμική ελαστικότητα δίνει:

➤ Ορθές παραμορφώσεις

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E_u} [\Delta\sigma_{xx} - \nu_u(\Delta\sigma_{yy} + \Delta\sigma_{zz})] \\ \Delta\varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E_u} [\Delta\sigma_{yy} - \nu_u(\Delta\sigma_{zz} + \Delta\sigma_{xx})] \\ \Delta\varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E_u} [\Delta\sigma_{zz} - \nu_u(\Delta\sigma_{xx} + \Delta\sigma_{yy})] \end{aligned}$$

Επίλυση ως προς E_u :

$$\begin{aligned} E_u &= \frac{1}{\Delta\varepsilon_{xx}} [\Delta\sigma_{xx} - \nu_u(\Delta\sigma_{yy} + \Delta\sigma_{zz})] \\ E_u &= \frac{1}{\Delta\varepsilon_{yy}} [\Delta\sigma_{yy} - \nu_u(\Delta\sigma_{zz} + \Delta\sigma_{xx})] \\ E_u &= \frac{1}{\Delta\varepsilon_{zz}} [\Delta\sigma_{zz} - \nu_u(\Delta\sigma_{xx} + \Delta\sigma_{yy})] \end{aligned}$$

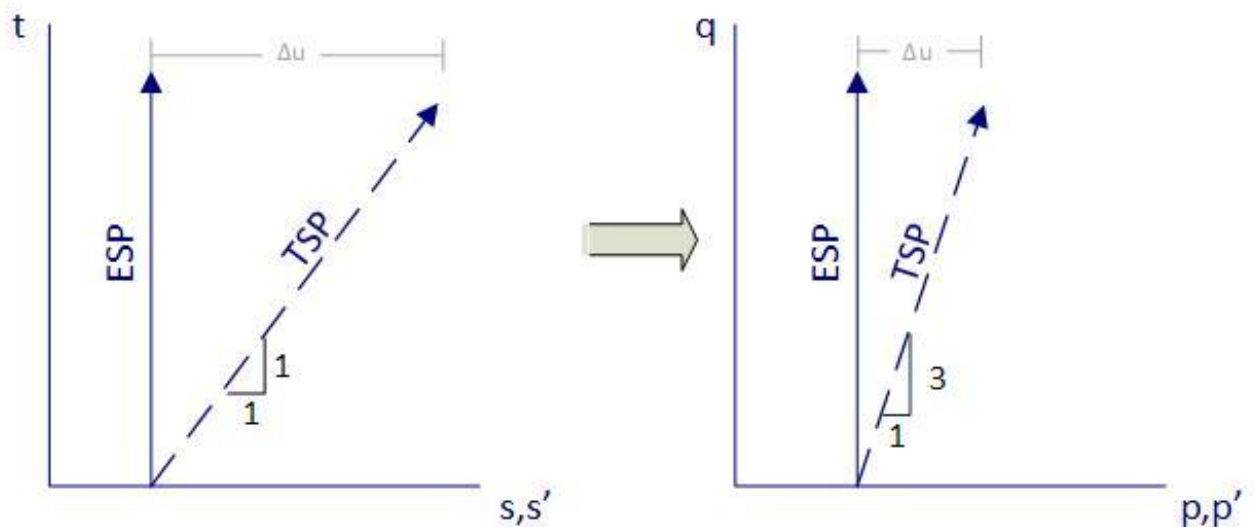
➤ Διατμητικές παραμορφώσεις

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{xy} &= \frac{\Delta\sigma_{xy}}{2G_u} \\ \Delta\varepsilon_{yz} &= \frac{\Delta\sigma'_{yz}}{2G_u} \end{aligned}$$

Όπου $E_u = \frac{3E}{2(1+\nu)}$ είναι το αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας

Αστράγγιστος λόγος Poisson $\nu_u = \frac{1}{2}$,

Ελαστικό μέτρο διάτμησης $G_u = G$



Σχήμα 4.3 Τασική όδευση τριαξονικής θλίψης (η αξονική τάση αυξάνεται και η ακτινική τάση παραμένει σταθερή) για γραμμικό, ισότροπο, ελαστικό έδαφος.

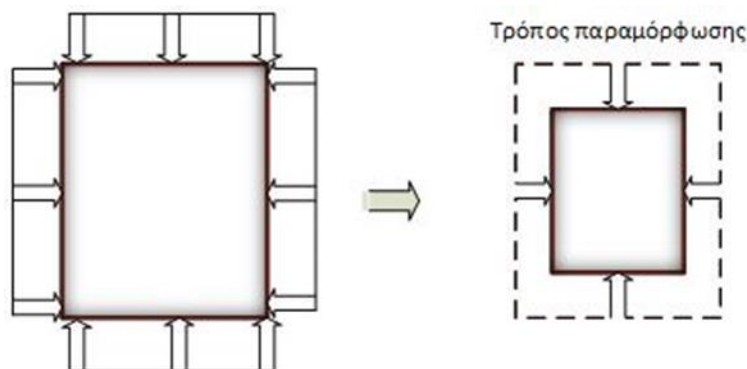
5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΤΥΠΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Η ευστάθεια οποιασδήποτε κατασκευής θεμελιώνεται στο έδαφος εξαρτάται από την αντοχή του εδάφους. Σε περίπτωση εδαφικής αστοχίας υπάρχει πιθανότητα κατάρρευσης της κατασκευής με σημαντικές επιπτώσεις. Συνεπώς ο προσδιορισμός αντοχής των εδαφών είναι υψίστης σημασίας για τους Γεωτεχνικούς Μηχανικούς. Ο όρος αντοχή υποδηλώνει αντοχή σε διάτμηση, η οποία προέρχεται από την εσωτερική αντίσταση λόγω τριβής των εδαφικών κόκκων. Προκειμένου να υπολογίσουμε το μέγεθος της αντοχής του εδάφους επιλέγουμε κάποια εδαφικά δείγματα και τα υποβάλλουμε σε δοκιμές. Οι τυπικές φορτίσεις χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

5.1 Τυπικές φορτίσεις που δεν οδηγούν σε αστοχία

Στις φορτίσεις αυτές οι προκύπτουσες τασικές - παραμορφωσιακές καταστάσεις δεν οδηγούν σε αστοχία όσο και να αυξηθεί το φορτίο και αντιστοιχούν σε συνεχώς κρατυνόμενη συμπεριφορά. Τέτοιες φορτίσεις είναι πολύ συνηθισμένες στο εργαστήριο, όπως η ισότροπη συμπίεση κατά την οποία ισχύει $\sigma_x = \sigma_z = \sigma_y$ και η μονοδιάστατη συμπίεση ή μονοδιάστατη παραμόρφωση κατά την οποία $\varepsilon_x = \varepsilon_z = 0$. Η ισότροπη συμπίεση αποτελεί μια συμμετρική φόρτιση, ενώ η μονοδιάστατη παραμόρφωση μια αξονοσυμμετρική φόρτιση, στην οποία επιτρέπεται παραμόρφωση μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση y . Μάλιστα, για τη μονοδιάστατη συμπίεση αποφεύγεται ο όρος μονοδιάστατη στερεοποίηση διότι αναφέρεται στη διεύθυνση ροής των υγρών κατά τη στερεοποίηση (διαδικασία που υπάρχει μόνο στα λεπτόκοκκα υλικά) και όχι στις συνθήκες παραμόρφωσης του υλικού. Στην ισότροπη και στη μονοδιάστατη συμπίεση δεν μεταβάλλεται ο όγκος του δείγματος ($\Delta\varepsilon_{vol}=0$).

5.1.1 Ισότροπη Συμπίεση



Σχήμα 5.1 Ισότροπη συμπίεση

$$\begin{aligned}\sigma'_{xx} &= \sigma'_{yy} = \sigma'_{zz} = p \\ \sigma'_{xy} &= \sigma'_{zx} = \sigma'_{yz} = 0\end{aligned}$$

Η ισότροπη συμπίεση αποτελεί μια συμμετρική φόρτιση και προσομοιώνεται στο εργαστήριο από συσκευές όπως η τυπική τριαξονική συσκευή (*standard triaxial cell*), η «πραγματική» τριαξονική συσκευή (*“true” triaxial cell*) και η συσκευή κούλου κυλίνδρου (*hollow cylinder cell*). Στην περίπτωση αυτή, όσο και αν αυξηθεί η ισότροπη πίεση, το υλικό δεν αστοχεί (δηλαδή δεν παραμορφώνεται απεριόριστα). (Μπελόκας, 2008)

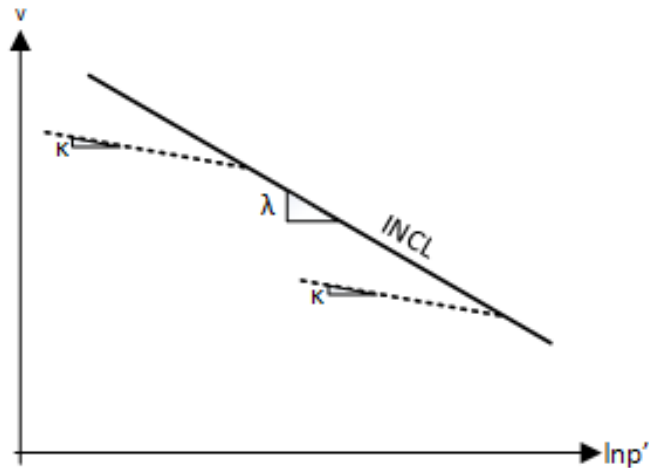
Στις συνθήκες ισότροπης συμπίεσης υπό συνεχώς αυξανόμενο φορτίο και όταν η τρέχουσα μέση ορθή τάση ταυτίζεται με τη μέγιστη μέση ορθή τάση, p' , της ιστορίας φόρτισης του υλικού (δηλαδή $p'=p_{max}'$, όπου η p_{max}' η τάση προφόρτισης), η κατάστασή του (v, p') βρίσκεται επί μιας μοναδικής καμπύλης. Ακολουθώντας τη συνηθισμένη ορολογία, η καμπύλη αυτή καλείται Ισοτροπική Γραμμή Κανονικής Φόρτισης ή Ισοτροπική Καμπύλη Παρθένας Φόρτισης (*Isotropic Normal Compression Line, INCL*) κλίσης λ και αποτελεί μια οριακή κατάσταση του υλικού.

Για την αναζυγωμένη άργιλο, οι ισότροπες καμπύλες συμπίεσης προδίδουν την Ισοτροπική Γραμμή Κανονικής Φόρτισης INCL* με κλίση λ^* .

$$v = N_{iso} - \lambda * \ln p' \quad (5.1)$$

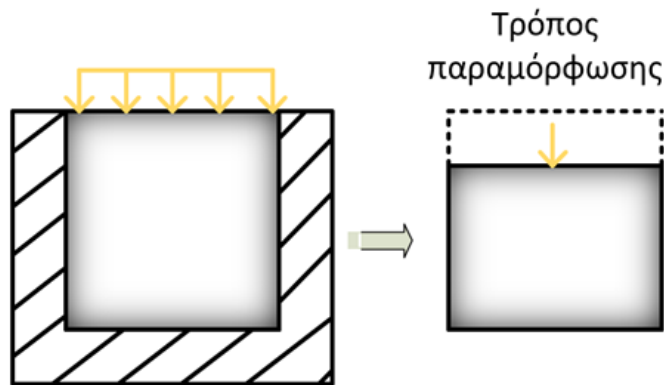
Όπου $v=1+e$ και N_{iso} ο λόγος κενών για $p'=1$ kPa.

Η συμπεριφορά του εδάφους κατά την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση εκφράζεται γενικά ως ευθεία γραμμή με κλίση κ (Σχήμα 5.2). Οι Roscoe et al (1963) περιγράφουν την INCL ως το όριο της χαλαρότερης διάταξης των κόκκων (“loosest packing”) ή του μεγαλύτερου λόγου κενών για μηδενική διατμητική τάση ($\tau=0$).



Σχήμα 5.2 Ισοτροπική Γραμμή Κανονικής Φόρτισης INCL

5.1.2 Μονοδιάστατη στερεοποίηση



Σχήμα 5.3 Μονοδιάστατη συμπίεση

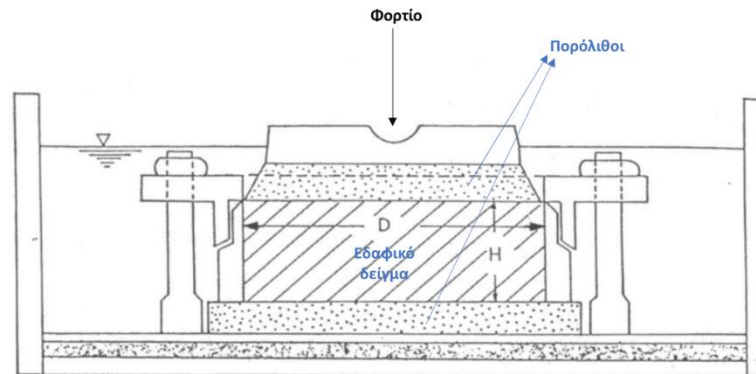
Μονοδιάστατη συμπίεση είναι η φόρτιση ενός εδαφικού στοιχείου κατά την οποία του επιβάλλεται ορθή παραμόρφωση στον κατακόρυφο άξονα (z) με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών παραμορφώσεων στους άξονες (x, y) καθώς και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων, δηλαδή:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &\neq 0 \\ \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} &= 0. \\ \dot{\varepsilon}_y = \dot{\varepsilon}_x &= 0 \\ \eta = \frac{q}{p'} &= ct \end{aligned} \quad (5.2)$$

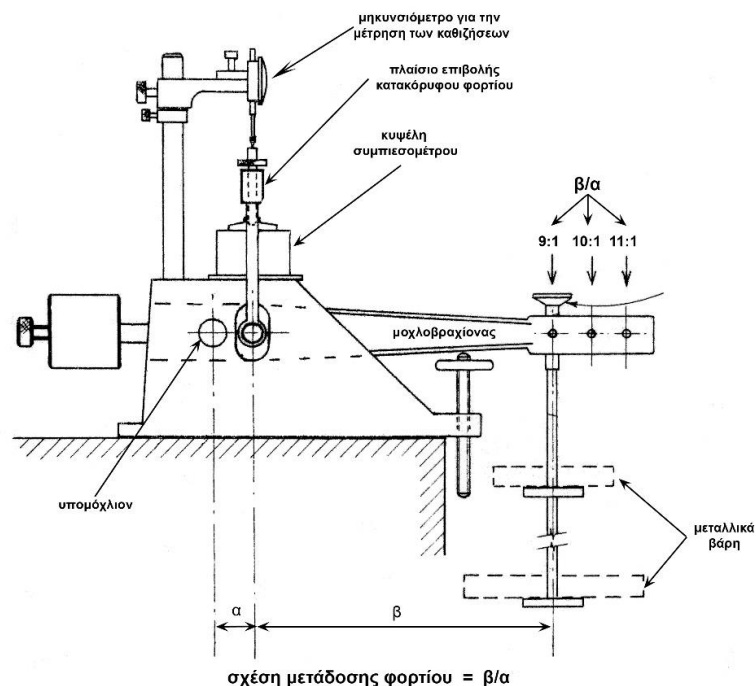
Οι εδαφικοί κόκκοι και το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστα. Έτσι η μεταβολή του όγκου (καθίζηση) πρέπει να συνοδεύεται από ίση ποσότητα διαφυγής ή απορρόφισης νερού. Η κίνηση του νερού πραγματοποιείται μέσω των κενών στους κόκκους του εδάφους και των πόρων, συνεπώς απαιτεί αρκετό χρόνο. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται μία καθυστέρηση μεταξύ της επιβολής φόρτισης και της εκδήλωσης της παραμόρφωσης.

Η μονοδιάστατη συμπίεση είναι συνήθης τρόπος παραμόρφωσης των εδαφικών υλικών, διότι έχει αρκετές πρακτικές εφαρμογές. Ο συγκεκριμένος παραμόρφωσης είναι αρκετά συνήθης καθώς συμβαίνει κατά την ιζηματογένεση καθώς και στα τεχνικά έργα, επειδή οι κατακόρυφες φορτίσεις μεγάλης έκτασης σε οριζόντιες εδαφικές στρώσεις οδηγούν σε μονοδιάστατη συμπίεση. Λόγω των παραπάνω και της δυνατότητας επιβολής της στο εργαστήριο με απλές σχετικά διατάξεις, η μονοδιάστατη συμπίεση αποτελεί τη συνηθέστερη δοκιμή Εδαφομηχανικής (Καββαδάς, 2009).

Περιγραφή πειράματος



Σχήμα 5.4 Οιδήμετρο (Guglielmi, 2017)



Σχήμα 5.5 Οιδήμετρο (Αστερίου, 2022)

Η μελέτη της μονοδιάστατης παραμόρφωσης και στερεοποίησης ενός αδιατάραχτου ή αναζυμωμένου εδαφικού δοκιμίου, υπό την επίδραση κατακόρυφου φορτίου και με περιορισμένη πλευρική παραμόρφωση, μελετάται με τη Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης ή Δοκιμή Οιδημέτρου. Στη συμβατική συσκευή οιδημέτρου πάνω και κάτω από το δοκίμιο τοποθετούνται πορώδεις δίσκοι, οι οποίοι επιτρέπουν την ελεύθερη στράγγιση από το πάνω και κάτω σύνορο.

Οι διαστάσεις του δοκιμίου σχεδιάζονται έτσι ώστε ο λόγος της διαμέτρου προς το ύψος του δοκιμίου να είναι μεγαλύτερος από 2, ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις της πλευρικής τριβής (Bishop and Henkel, 1962).

Το κελί του οιδήμετρου τοποθετείται σε μία άκαμπτη βάση αλουμινίου και ένας μοχλός φόρτισης επιτρέπει την μεταφορά του φορτίου προς το δείγμα. Το δείγμα και ο δακτύλιος βρίσκονται καθ'όλη τη διάρκεια της δοκιμής μέσα σε νερό για να αποτρέπεται η ξήρανση του δείγματος και να επιτρέπεται η απορρόφηση νερού. Το δοκίμιο φορτίζεται στην κατακόρυφη διεύθυνση με διαδοχικά βήματα επιβολής φορτίου, σε καθένα από τα οποία το φορτίο διατηρείται σταθερό επί αρκετό χρόνο ώστε να περατωθεί το φαινόμενο της στερεοποίησης. Μία τυπική αλληλουχία φορτίσεων είναι: 5 kPa (αρχική φόρτιση), 12, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa και κατόπιν αποφόρτιση στα 400, 200, 100, 50 kPa. Όταν εφαρμόζεται η αξονική τάση σ'_v το αρχικό δείγμα ύψους H_0 παραμορφώνεται με τον χρόνο και μεταβάλλεται ο όγκος του.

Κατά τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης συλλέγονται οι εξής παράμετροι:

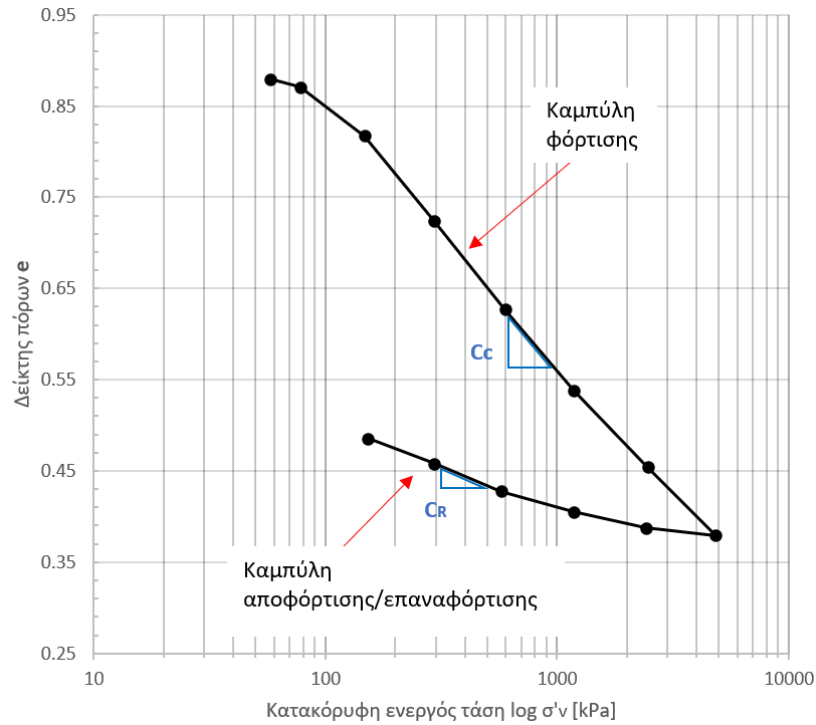
1. Οι αρχικές διαστάσεις και το βάρος του δοκιμίου, η πυκνότητα των στερεών κόκκων και το αρχικό ποσοστό υγρασίας. Από τις τιμές αυτές υπολογίζεται ο αρχικός δείκτης πόρων e από τη σχέση:

$$\frac{M}{V} = \rho = \rho_s \left(\frac{1 + w}{1 + e} \right) \quad (5.3)$$

2. Σε κάθε βήμα επιβολής νέας φόρτισης μετράται η υποχώρηση του δοκιμίου σε διάφορους χρόνους (15 sec, 30 sec, 1 min, 2, 4, 8, 16 min, ...) κατά την εξέλιξη της στερεοποίησης.

Από την υποχώρηση του δοκιμίου στο τέλος κάθε βήματος επιβολής φόρτισης, δηλαδή στο τέλος της στερεοποίησης, υπολογίζεται η ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου $\Delta \varepsilon_{vol} = \Delta \varepsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_0}$, η μεταβολή του δείκτη πόρων $\Delta e = -(1 + e_0) \cdot \Delta \varepsilon_{vol}$ και σχεδιάζεται το διάγραμμα φορτίου – δείκτη πόρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6 που παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα σφιγής αργίλου Lucera. Από τις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων ορίζονται το γνωστό μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης D , ο δείκτης συμπίεστικότητας $a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v}$ και ο συντελεστής συμπίεστικότητας:

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} = \lambda * \ln 10 \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.6 Καμπύλη παραμόρφωσης – *Compression Curve*.

Περαιτέρω αξιοποίηση της δοκιμής συμπιεσομέτρου γίνεται με τις μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης σε κάθε βήμα της φόρτισης. Το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει ένα τέτοιο διάγραμμα και συγκεκριμένα τις ενδείξεις του μηκυνσιομέτρου ως προς το χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα, ενώ το Σχήμα 5.8 παρουσιάζει τις ίδιες ενδείξεις του μηκυνσιομέτρου ως προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Στα Σχήματα αυτά το ύψος του δοκιμίου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και η μείωσή του ισούται με την αύξηση των ενδείξεων του μηκυνσιομέτρου. Έτσι, όταν η ένδειξη του μηκυνσιομέτρου μεταβάλλεται από 6.0 mm σε 5.0 mm, το ύψος του δοκιμίου μειώνεται κατά 1 mm. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η χαρακτηριστική σιγμοειδής καμπύλη της υποχώρησης ως προς το λογάριθμο του χρόνου. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται επίσης ένας συνήθης τρόπος για την εκτίμηση του χρόνου (t_p) που απαιτείται για την περάτωση της στερεοποίησης καθώς και του χρόνου t_{50} που αντιστοιχεί σε βαθμό στερεοποίησης 50% (μέθοδος *Casagrande*). Αφού προσδιορισθεί ο χρόνος t_{50} , ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση:

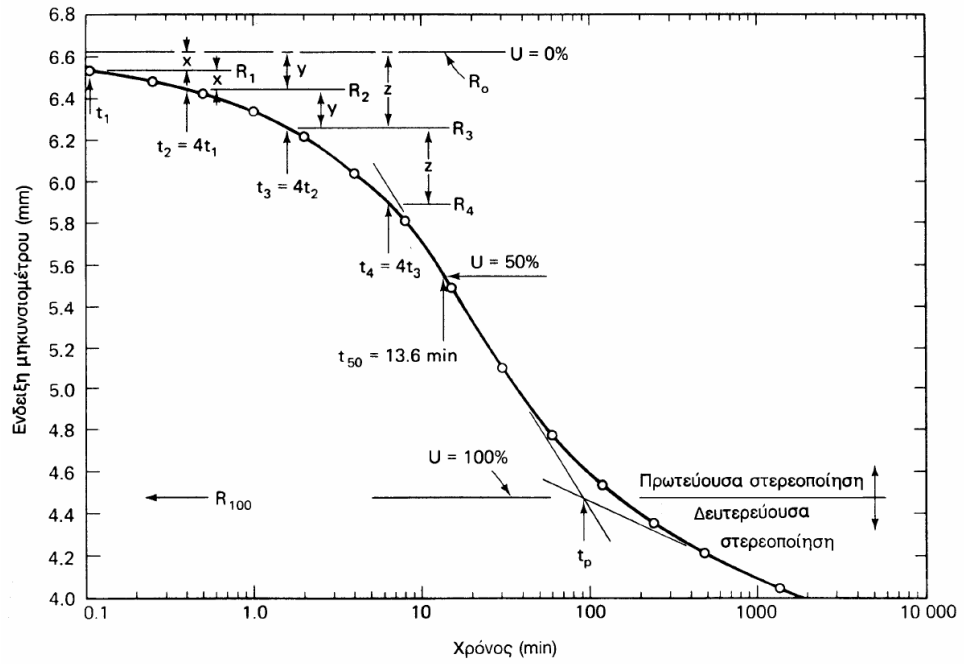
$$C_v = \frac{T_{50} \cdot H_d^2}{t_{50}} \quad (5.5)$$

όπου H_d είναι το ήμισυ του ύψους του δοκιμίου.

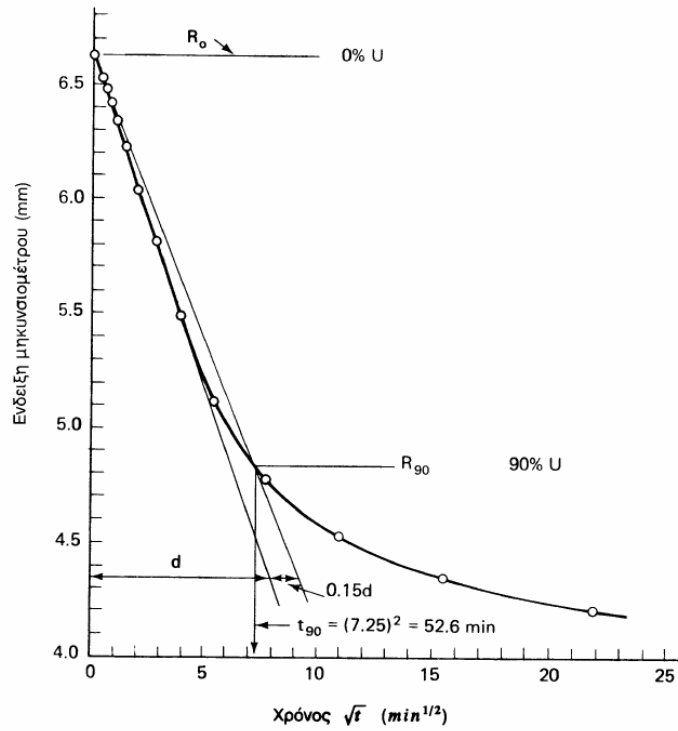
Μία εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού του C_v (η λεγόμενη μέθοδος *Taylor*) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται επίσης η μέθοδος υπολογισμού του t_{90} (δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για να συντελεσθεί το 90% της στερεοποίησης), οπότε ο υπολογισμός του συντελεστή στερεοποίησης γίνεται από τη σχέση:

$$C_v = \frac{T_{90} \cdot H_d^2}{t_{90}} \quad (5.6)$$

Αν το υλικό είχε γραμμική συμπεριφορά, η τιμή του C_v θα ήταν σταθερή (ιδιότητα του υλικού). Στα συνήθη εδάφη, όμως, η τιμή του C_v μεταβάλλεται με την αύξηση του φορτίου. Αυτό πρέπει να αναμένεται, επειδή το C_v είναι ανάλογο του μέτρου συμπίεσης, το οποίο μειώνεται απότομα όταν η τάση υπερβεί την τάση προφόρτισης και, στη συνέχεια, αυξάνει βαθμιαία με τη σκλήρυνση του υλικού. Βεβαίως, το φαινόμενο είναι πίο σύνθετο, επειδή το c_v εξαρτάται και από το συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος μειώνεται συνεχώς με την αύξηση του φορτίου, επειδή μειώνεται ο δείκτης πόρων, δηλαδή η τυπική διάσταση των κενών.



Σχήμα 5.7 Καμπύλη στερεοποίησης (Καββαδάς, 2009)



Σχήμα 5.8 Καμπύλη στερεοποίησης (Καββαδάς, 2009)

5.2 Τυπικές φορτίσεις που οδηγούν σε αστοχία

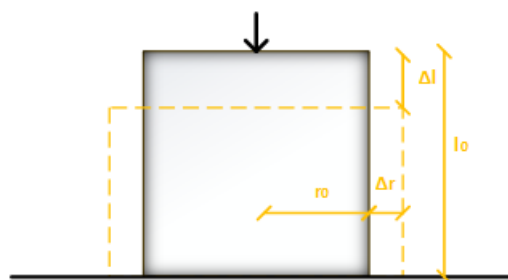
5.2.1 Τριαξονική Θλίψη και Εφελκυσμός

Στην τριαξονική δοκιμή, ένα κυλινδρικό δείγμα εδάφους, συνήθως με λόγο μήκους προς διάμετρο ίσο με 2, υποβάλλεται είτε σε ελεγχόμενες αυξήσεις αξονικών τάσεων είτε σε αξονικές μετατοπίσεις και ακτινικές τάσεις. Το δείγμα περιορίζεται πλευρικά από μια μεμβράνη και οι ακτινικές τάσεις εφαρμόζονται με την πίεση νερού σε ένα θάλαμο. Η δοκιμή πραγματοποιείται στην τριαξονική συσκευή. Εάν η αξονική τάση είναι μεγαλύτερη από την ακτινική τάση, η δοκιμή ονομάζεται τριαξονική συμπίεση. Εάν η ακτινική τάση είναι μεγαλύτερη από την αξονική τάση, η δοκιμή ονομάζεται τριαξονικός εφελκυσμός. Σε κάθε περίπτωση οι εφαρμοζόμενες τάσεις είναι κύριες τάσεις. Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης πραγματοποιείται διατηρώντας σταθερή την πίεση του κελιού και αυξάνοντας την αξονική τάση. Κατά τις δοκιμές αυτές είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε εάν έχουμε στραγγισμένες ή αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης. Πιο αναλυτική αναφορά γίνεται στο [Κεφάλαιο 6](#).

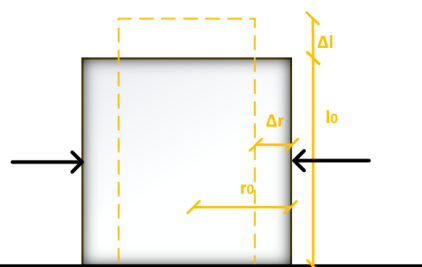
Η αξονική φόρτιση στην τριαξονική δοκιμή εφαρμόζεται συνήθως με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης, αλλά συνά χρησιμοποιούνται μέθοδοι ελέγχου του φορτίου. Στην τριαξονική θλίψη ισχύει $\sigma_1 = \sigma_a$ και $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$. Στον τριαξονικό εφελκυσμό ισχύει $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r$ και $\sigma_3 = \sigma_a$. Αν και σε ορισμένες πρακτικές εφαρμογές, όπως η διερεύνηση των αντοχών του εδάφους στη βάση βαθιών εκσκαφών, η δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού είναι καταλληλότερη από την τριαξονική θλίψη, σπάνια εκτελείται στην πράξη. Είναι ελαφρώς πιο δύσκολη δοκιμή από τη δοκιμή συμπίεσης και καθώς η επιφάνεια του δείγματος μειώνεται, μπορεί να παρουσιάσει κάποια αστάθεια καθώς πλησιάζει η αστοχία. Γενικά ισχύει ότι στην τριαξονική θλίψη $\sigma'_a > \sigma'_r$, ενώ στον τριαξονικό εφελκυσμό ισχύει $\sigma'_a < \sigma'_r$. Επιπρόσθετα, η κλίση M της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης, συνδέεται με τη γωνία φ_c με τις παρακάτω σχέσεις όπως αποδείχθηκε στην Σχέση 3.6. Η σχέση 5.7 ισχύει για την τριαξονική θλίψη και η Σχέση 5.8 για τον τριαξονικό εφελκυσμό.

$$M_c = \frac{6 \sin \varphi'_c}{3 - \sin \varphi'_c} \quad (5.7)$$

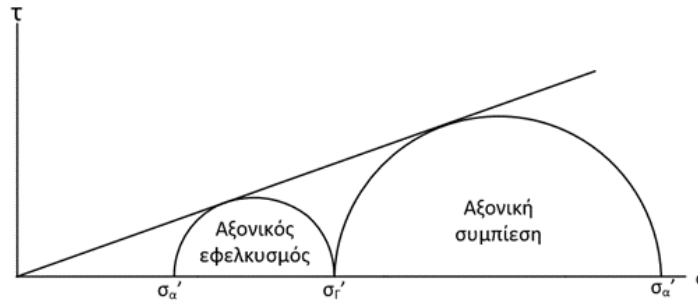
$$M_e = \frac{6 \sin \varphi'_c}{3 + \sin \varphi'_c} \quad (5.8)$$



Σχήμα 5.9 Τριαξονική θλίψη



Σχήμα 5.10 Τριαξονικός εφελκυσμός



Σχήμα 5.11 Κύκλοι Mohr ενεργών τάσεων σε αστοχία για στραγγισμένη τριαξονική συμπίεση και τριαξονικό εφελκυσμό

Γενικά στην τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό ισχύει:

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \Delta \varepsilon_z + 2\Delta \varepsilon_y = 0 \rightarrow \Delta \varepsilon_y = -\frac{\Delta \varepsilon_z}{2} \quad (5.9)$$

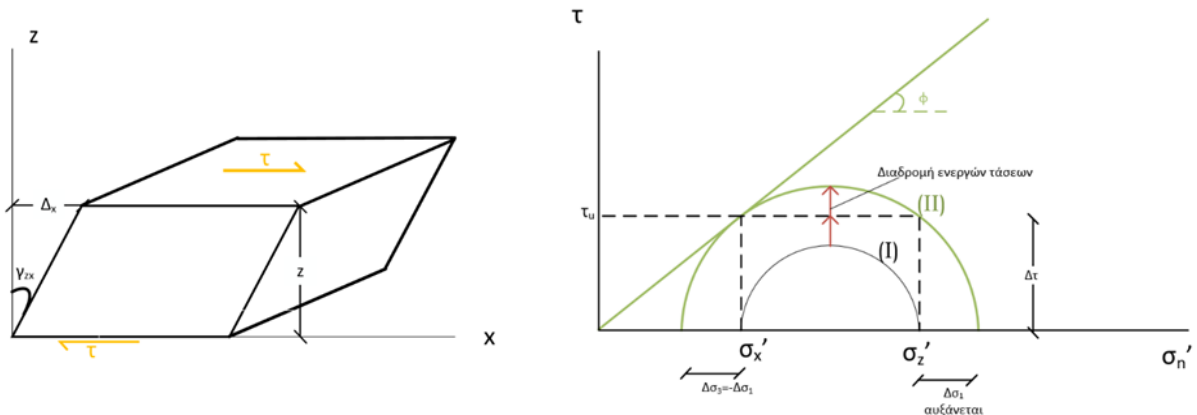
$$\Delta \sigma_z = \Delta \sigma'_z + \Delta u \quad (5.10)$$

$$\Delta \sigma_y = \Delta \sigma'_y + \Delta u = 0 \rightarrow \Delta \sigma'_y = -\Delta u \quad (5.11)$$

Από τις σχέσεις (5.9), (5.10), (5.11) προκύπτει:

$$\Delta \sigma_z = \Delta \sigma'_z - \Delta u \quad (5.12)$$

5.2.2 Απλή διάτμηση



Σχήμα 5.12 Απλή διάτμηση και κύκλοι Mohr δοκιμής

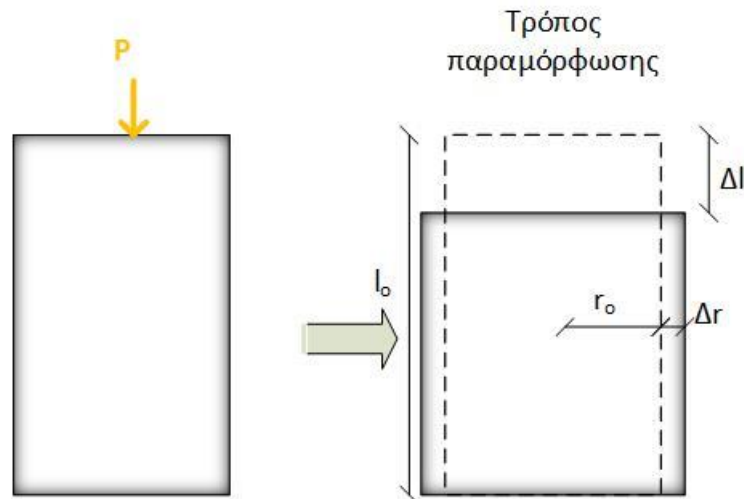
Περιγραφή Πειράματος

Η δοκιμή αυτή επιβάλλει (κατά το δυνατόν) ομοιόμορφη, ελεγχόμενη και γνωστή εντατική κατάσταση στο δοκίμιο. Το κυλινδρικό εδαφικό δείγμα περιβάλλεται με ειδική μεμβράνη που είναι ανένδοτη στην οριζόντια διεύθυνση, ώστε να παρεμποδίζεται η πλευρική ορθή παραμόρφωση αλλά να επιτρέπονται οι διατμητικές παραμορφώσεις.

Η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής είναι: Το δοκίμιο κατ' αρχήν στερεοποιείται με μοναξονική συμπίεση στην κατακόρυφη διεύθυνση και στη συνέχεια υποβάλλεται σε διάτμηση με την εφαρμογή οριζόντιας διατμητικής τάσης. Το Σχήμα 5.12 παρουσιάζει την εντατική κατάσταση του δοκιμίου μετά τη στερεοποίηση (I) και κατά την αστοχία (II) καθώς και τους αντίστοιχους κύκλους Mohr. Οι κύκλοι Mohr κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι ομόκεντροι προς τον αρχικό και συνεπώς η διαδρομή των ενεργών τάσεων είναι κατακόρυφη προς τα άνω μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, που επέρχεται όταν ο κύκλος Mohr έρθει σε επαφή με την περιβάλλουσα αστοχίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το επίπεδο αστοχίας κατά τη δοκιμή της απλής διάτμησης δεν είναι οριζόντιο. Επιπλέον, η διατμητική τάση (τ_f) στο οριζόντιο επίπεδο κατά την αστοχία είναι διαφορετική από τη διατμητική αντοχή (τ_u), που είναι ίση με τη διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας.

Στη δοκιμή της απλής διάτμησης οι συνθήκες στράγγισης του δοκιμίου δεν μπορούν να ελεγχθούν, επειδή δεν εφαρμόζεται αντιπίεση πόρων αλλά απλώς το δοκίμιο είναι βυθισμένο στο νερό. Κατά συνέπεια, η δοκιμή πρέπει να εκτελείται με πολύ αργό ρυθμό ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης στράγγιση. Σε διαφορετική περίπτωση αναπτύσσονται (άγνωστες) υπερπίεσεις πόρων, οπότε οι ενεργές τάσεις δεν ελέγχονται και ο κύκλος *Mohr* των ενεργών τάσεων δεν μπορεί να σχεδιασθεί ούτε κατά τη διάρκεια της δοκιμής ούτε κατά την αστοχία. Αν η φόρτιση γίνει με ταχύ ρυθμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι εξασφαλίζονται αστράγγιστες συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να προσδιορισθεί η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδαφικού δείγματος χωρίς όμως να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της περιβάλλουσας αστοχίας, των κύκλων *Mohr* ενεργών τάσεων κλπ, επειδή οι αναπτυσσόμενες υπερπίεσεις πόρων δεν μπορούν να μετρηθούν.

5.2.3 Ανεμπόδιση Θλίψη



Σχήμα 5.13 Ανεμπόδιση Θλίψη.

Η απλούστερη αστράγγιστη κυλινδρική τριαξονική δοκιμή είναι η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, κατά την οποία ένα κυλινδρικό εδαφικό δείγμα φορτίζεται με ταχύ ρυθμό στην κατακόρυφη διεύθυνση χωρίς πλευρική ένταση $\sigma_3 = 0$ και χωρίς έλεγχο της πίεσης πόρων. Η δοκιμή εκτελείται με μία απλή διάταξη επιβολής κατακόρυφης φόρτισης μέχρι τη θραύση του δείγματος. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε συνθήκες μηδενικής πλευρικής πίεσης (δηλαδή, το δείγμα είναι ελεύθερο να διασταλεί πλευρικά καθώς συμπιέζεται). Επιπλέον, επειδή το δοκίμιο φορτίζεται με ταχύ ρυθμό και έχει σχετικά μεγάλες διαστάσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι η δοκιμή γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες και, συνεπώς, πληρούνται οι προϋποθέσεις για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u . Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$c_u = \frac{1}{2} q_u \quad (5.13)$$

Όπου q_u είναι η τιμή της αξονικής (ολικής) τάσης σ_1 κατά την αστοχία (αντοχή κατά την ανεμπόδιση θλίψη).

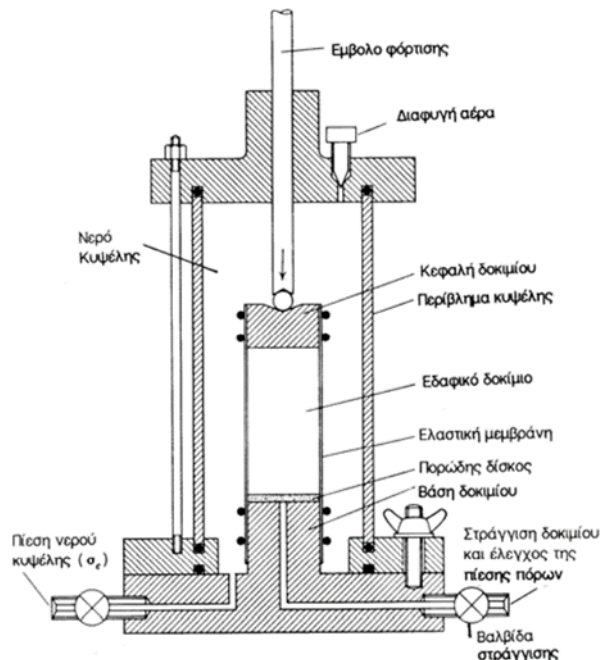
6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

Η τριαξονική συσκευή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων των εδαφών. Παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου των εφαρμοζόμενων αξονικών και ακτινικών τάσεων ανεξάρτητα της μίας με την άλλη, τη διεξαγωγή δοκιμών υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες και τέλος τον πλήρη έλεγχο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων ή τάσεων.

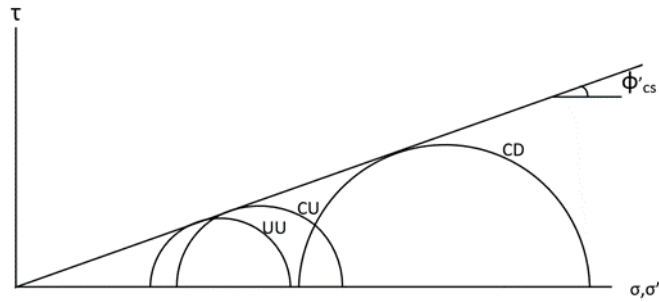
Η τυπική συσκευή τριαξονικής θλίψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται με μια (αδιαπέρατη), ελαστική μεμβράνη, ενώ στη βάση και στην κεφαλή του είναι τοποθετημένοι άκαμπτοι πορώδεις δίσκοι. Το δοκίμιο τοποθετείται στο εσωτερικό μιας κυλινδρικής κυψέλης, η οποία στη 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 συμπιέσει το δοκίμιο, αν του επιβληθεί μια κατάλληλη εξωτερική φόρτιση.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της δοκιμής της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι ο έλεγχος της στράγγισης και της υδατικής πίεσης στο εσωτερικό του δοκιμίου. Στο Σχήμα 6.1 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. (Καβαδάς, 2009)



Σχήμα 6.1 Συσκευή τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού (Καβαδάς, 2009)



Σχήμα 6.2 Τυπικοί κύκλοι Mohr σε αστοχία για δοκιμές UU, CU και CD σε δοκίμια του ίδιου εδάφους και του ίδιου αρχικού δείκτη κενών ελαφρά υπερστερεοποιημένης αργίλου.

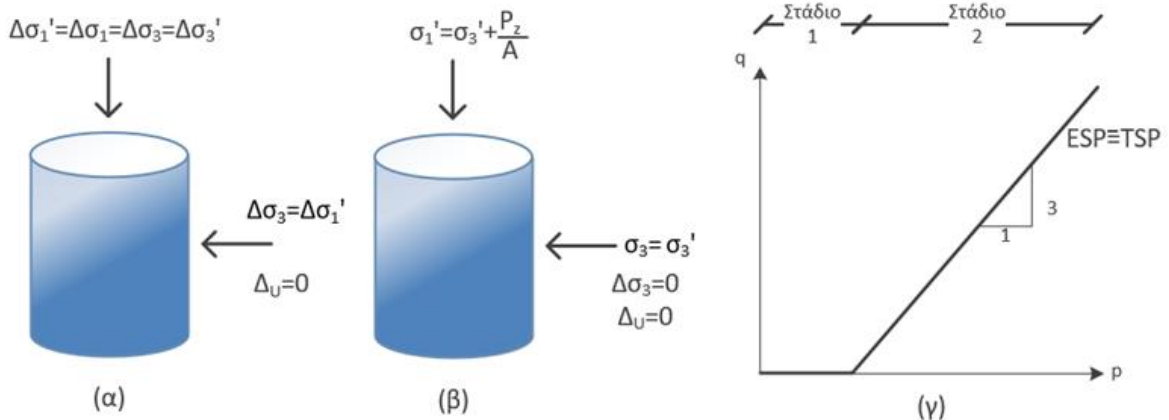
6.1 Δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες – Consolidated Drained (CD)

Σκοπός της δοκιμής CD είναι να προσδιοριστεί η τιμή της διατμητικής αντοχής ϕ'_{cs} και του ενεργού μέτρου Ελαστικότητας στραγγιζόμενων συνθηκών E' . Η δοκιμή εκτελείται σε δύο στάδια τα οποία απεικονίζονται και στο Σχήμα 6.3 (α,β,γ).

1) Στο πρώτο στάδιο το εδαφικό δείγμα στερεοποιείται σε επιθυμητό επίπεδο ενεργής τάσης μέσω της πίεσης του νερού στην κυψέλη, αφήνοντας το εδαφικό δείγμα να στραγγίσει μέχρις ότου εκτονωθεί η υπερπίεση του νερού των πόρων.

2) Στο δεύτερο στάδιο η πίεση στην κυψέλη διατηρείται σταθερή και επιβάλλονται πρόσθετα αξονικά φορτία με αργό ρυθμό έως ότου το εδαφικό δοκίμιο αστοχήσει. Ο ρυθμός φόρτισης που επιβάλλεται πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε να επιτρέπεται η εκτόνωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων μέσω στράγγισης του νερού, η ποσότητα του οποίου μετριέται.

Η CD είναι αργή δοκιμή με στερεοποίηση και αποστράγγιση, ώστε πρακτικά να μην αναπτύσσεται καμία πίεση του νερού των πόρων.



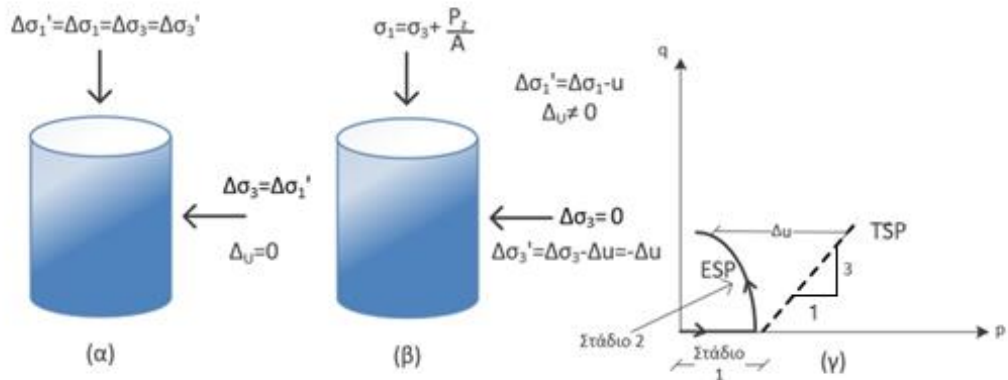
Σχήμα 6.3 α) Τάσεις στο πρώτο στάδιο της CD, β) Τάσεις στο δεύτερο στάδιο της CD, γ) Τασικές οδεύσεις στο πρώτο και δεύτερο στάδιο της δοκιμής CD.

6.2 Δοκιμή Συμπίεσης με Στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες - Consolidated Undrained (CU) ή Στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες με μέτρηση του νερού των πόρων (CU_{pp})

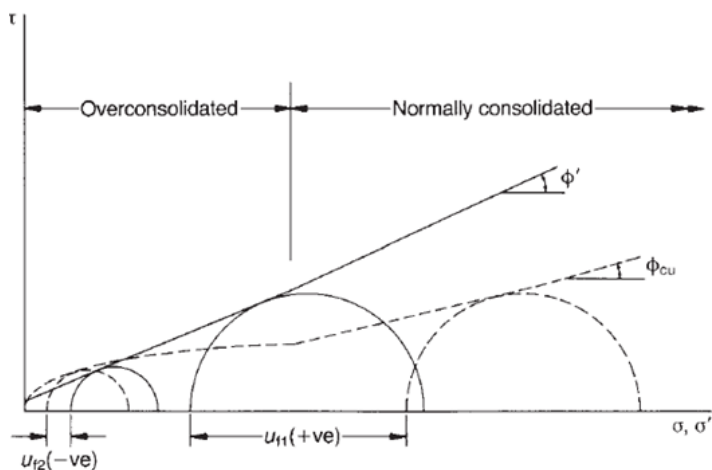
Στη δοκιμή CU τρία ή περισσότερα δοκίμια καταπονούνται σε διαφορετικές πιέσεις κυψέλης, επιτρέποντας την εκτόνωση τη υπερπίεσης του νερού των πόρων. Σκοπός της δοκιμής CU είναι να προσδιοριστούν οι τιμές s_u και ϕ' . Διεξάγεται παρόμοια με τη CD , δηλαδή σε δύο στάδια που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.4, με τη διαφορά ότι μετά την ολοκλήρωση της ιστροπικής στερεοποίησης το αξονικό φορτίο αυξάνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες και μετρείται η υπερπίεση του νερού των πόρων.

Η CU_{pp} είναι δοκιμή με στερεοποίηση, χωρίς αποστράγγιση, με μέτρηση της πίεσης πόρων. Η μέτρηση της υπερπίεσης του νερού των πόρων αυξάνει σημαντικά την αξία της δοκιμής καθώς επιτρέπει να προσδιοριστούν οι ολικές και οι ενεργές παράμετροι. Εδώ εκφράζεται η κατάσταση των τάσεων σε ένα προστερεοποιημένο δοκίμιο, χωρίς να λαμβάνει χώρα αποστράγγιση κατά την τριαξονική φόρτιση. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετράται η πίεση του νερού των πόρων η οποία θα πρέπει να είναι περίπου η ίδια σε όλο το ύψος του δοκιμίου.

Για να επιτευχθεί αυτό η ταχύτητα φόρτισης είναι βραδεία.



Σχήμα 6.4 : α)Φάση στερεοποίησης- πρώτο στάδιο της CU , β)Φάση διάτμησης-δεύτερο στάδιο της CU , γ)Τασικές οδεύσεις στο πρώτο και δεύτερο στάδιο όπου φαίνεται η ενεργός και η ολική τασική όδευση

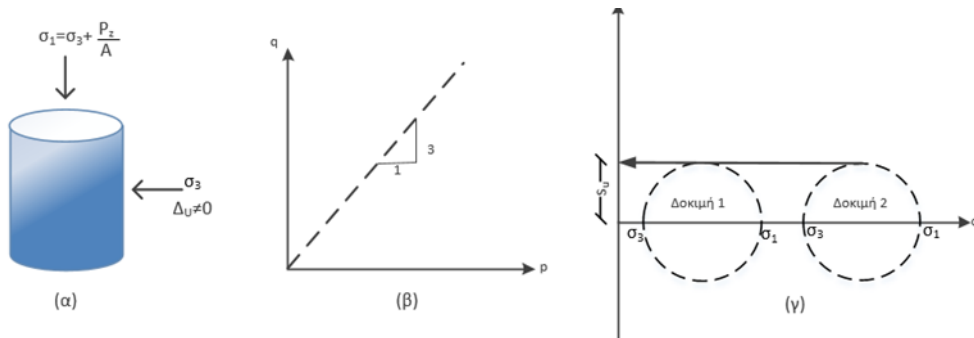


Σχήμα 6.5 Κύκλοι Mohr (Parry, 2005)

6.3 Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες - *Unconsolidated Undrained (UU)*

Κατά τη δοκιμή *UU* εφαρμόζεται πίεση κυψέλης στο εδαφικό δοκίμιο χωρίς στράγγιση του νερού των πόρων με σταδιακή αύξηση των αξονικών τάσεων. Συνήθως δύο διαφορετικά δοκίμια του ίδιου εδάφους και του ίδιου αρχικού δείκτη κενών ελέγχονται σε διαφορετική τιμή πίεσης κυψέλης. Παρακάτω στο Σχήμα 6.6 β) φαίνεται ότι μόνο η ολική τασική όδευση είναι γνωστή καθώς οι πιέσεις του νερού των πόρων δεν μετρούνται για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τις ενεργές τάσεις. Στο σχήμα (γ) φαίνονται οι κύκλοι Mohr όπου έχουν το ίδιο μέγεθος και στις δύο δοκιμές, αλλά αλλάζει το μέγεθος πίεσης της κυψέλης.

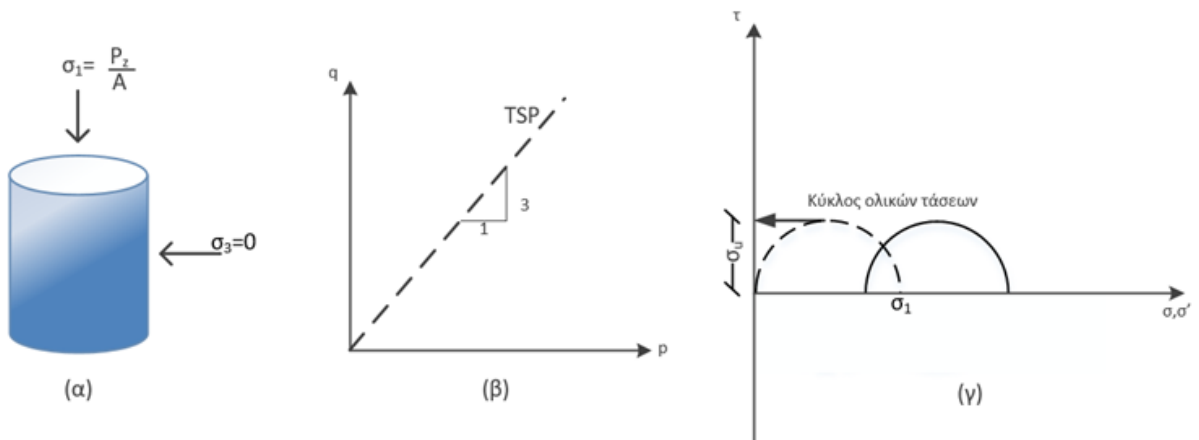
Η δοκιμή *UU* είναι ταχεία, εκτελείται εντός ολίγων λεπτών ή ωρών, χωρίς να επιτραπεί η στερεοποίηση ή η αποστράγγιση του δοκίμιου.



Σχήμα 6.6 α) Διατμητικές τάσεις *UU* δοκιμών, β) Τασική όδευση *UU* δοκιμών, γ) Κύκλοι Mohr *UU* δοκιμών

6.4 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης ή Μη Περιορισμένης Πλευρικά Συμπίεσης- *Unconfined Compression (UC)*

Κάνουμε τη δοκιμή *UC* με σκοπό να προσδιορίσουμε την αστράγγιστη διατμητική αντοχή των κορεσμένων αργίλων. Εφαρμόζουμε αξονική δύναμη P_z με γρήγορο ρυθμό μέχρι την αστοχία, χωρίς ακτινική τάση ($\sigma_3=0$). Ο όγκος του εδαφικού δείγματος παραμένει σταθερός καθώς η φόρτιση εφαρμόζεται ταχέως και δεν στραγγίζεται το νερό των πόρων. Οι μεταβολές τις πίεσης του νερού των πόρων δεν καταγράφονται, συνεπώς δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την ενεργό τασική όδευση.



Σχήμα 6.7 Για τη δοκιμή *UC* α) Εφαρμοζόμενες τάσεις, β) Ολική τασική όδευση, γ) Κύκλοι Mohr

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα δεδομένα που λαμβάνουμε για κάθε μία από τις προαναφερθέντες δοκιμές.

ΔΟΚΙΜΗ	c'	ϕ'	ν'	E'	γ'	c_u	E_u	ϕ
CD($\Delta_u=0$)	✓	✓	✓	✓				
CU, CUpp						✓	✓	✓
UU						✓	✓	
q_u						✓	✓	

Πίνακας 6.1 Δεδομένα που προσδιορίζουμε μετά από κάθε δοκιμή

7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΟΧΛΕΥΣΗ - Soil

Structure and Remoulding

Σύμφωνα με τον ορισμό των *Lambe & Whitmann*(1969), η μικροδομή του εδάφους χαρακτηρίζεται από τον προσανατολισμό και την κατανομή των σωματιδίων της εδαφικής μάζας, αποκαλούμενη ως εδαφικός ιστός, και των δυνάμεων μεταξύ των όμορων σωματιδίων του υλικού.

Η μηχανική συμπεριφορά των γεωυλικών εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση και τη δομή. Η δομή έχει δύο συνιστώσες, την ιστορία φόρτισης και τη δέση. Ως δέση νοείται οποιαδήποτε διεργασία που οδηγεί σε αυξημένη διακοκκώδη αντίσταση σε σχέση με αυτή που δικαιολογεί η ιστορία φόρτισης του υλικού. Η ανάπτυξη δέσης οδηγεί σε αυξημένη στιβαρότητα, αντοχή και διαστολικότητα και υπό ειδικές συνθήκες σε καταρρεύσιμη συμπεριφορά. Διεργασίες ανάπτυξης δέσης είναι για παράδειγμα η θιξοτροπία, η γήρανση και η τσιμέντωση με συγκολλητική ύλη. Η ιστορία φόρτισης επίσης μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη στιβαρότητα και αντοχή, όταν η κατάσταση του υλικού σε χαμηλότερη από τη μέγιστη μέση ορθή τάση της ιστορίας φόρτισής του (προφόρτιση). Παράδειγμα αποτελούν οι προστερεοποιημένες άργιλοι, στις οποίες αναπτύσσεται μια ηλεκτροχημικής μορφής συγκόλληση μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων. Έτσι, η δέση έχει παρόμοια επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά των γεωυλικών με την ιστορία φόρτισης δηλαδή την προφόρτιση.

Διαφορές στη δέση έχουν μεγάλη επίδραση στη συμπεριφορά αργίλων με διαφορετική δομή. Η δέση που αναπτύσσεται σε μία άργιλο εξαρτάται από το φυσικό και χημικό περιβάλλον, όπως πίεση, θερμοκρασία, περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά και από τις μηχανικές οριακές συνθήκες. Σε συνέχεια του ορισμού της δομής, θα πρέπει να συζητηθεί ο ορισμός της αναζύμωσης των γεωυλικών. Ο *Burland* (1990) όρισε ως αναζυμωμένα (*reconstituted*) στο εργαστήριο εδαφικά υλικά μία τυπική περίπτωση γεωυλικών χωρίς δέση, τα οποία προκύπτουν από αναμόχλευση του μητρικού γεωυλικού περί το όριο υδαρότητάς του. Το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας για να επιτευχθεί ομοιόμορφη υφή και κατανομή υγρασίας είναι από 1 έως 1.5 του ορίου υδατόρητας τους (ιδανικά 1.25), ύστερα απαιτείται τοποθέτηση σε συσκευή οιδημέτρου και στερεοποίηση. Η αναμόχλευση γίνεται ώστε να χαθεί κάθε ίχνος δέσης, ενώ λόγω της τυποποιημένης διαδικασίας δίνεται η δυνατότητα επαναληψιμότητας των δοκιμών σε απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες και αυτός είναι ο βασικός λόγος μελέτης της συμπεριφοράς αναζυμωμένων υλικών.

Τα υλικά αυτά μπορούν να αναπτύξουν δέση λόγω γήρανσης. Συνήθως, τα γεωυλικά στο φυσικό τους περιβάλλον έχουν δέση σαν αποτέλεσμα των διάφορων φυσικών διεργασιών σε όλη τη γεωλογική τους ιστορία, οι οποίες οδηγούν σε αύξηση (π.χ. θιξοτροπία, τσιμέντωση και γήρανση) ή μείωση (π.χ. διάβρωση) της δέσης. Επίσης, υποβάλλονται σε διάφορες φορτίσεις, όπως μονοδιάστατη παραμόρφωση κατά την ιζηματογένεση και αποφόρτιση κατά την επιφανειακή αποσάθρωση. Συνεπώς, οι δύο παράγοντες δομής, η ιστορία φόρτισης και η δέση, μπορεί να συνυπάρχουν ή να δρουν ανεξάρτητα.

8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ - *Critical State Model*

Η μελέτη των αναζυγωμένων υλικών (Roscoe et al, 1963) έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη της Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης (*Critical State Theory*) και επέτρεψε την αναζήτηση εμπειρικών συσχετίσεων προσδιορισμού βασικών μηχανικών ιδιοτήτων (όπως η συμπιεστότητα και η αντοχή) ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά.

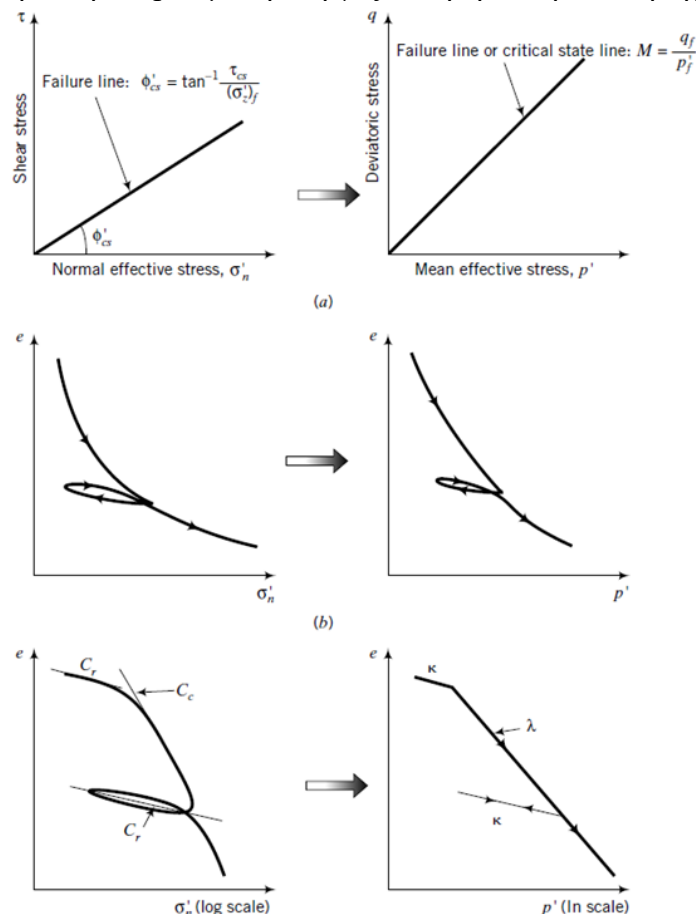
Το *CSM* χρησιμοποιείται όταν δεν μπορούμε να διεξάγουμε επαρκείς εδαφικές δοκιμές για να χαρακτηριστεί πλήρως το έδαφος του πεδίου ή όταν πρέπει να προβλέψουμε εδαφικές αποκρίσεις σε μία κατασκευή. Η κεντρική ιδέα αυτού του προσομοιώματος είναι ότι όλα τα εδάφη θα αστοχήσουν σε μία μοναδική επιφάνεια αστοχίας στον (p', q, e) χώρο.

Η γραμμή αστοχίας Mohr – Coulomb στο (σ_n', τ) κλίσης $\phi = \tan^{-1}[\tau_{cs}/\sigma_n' (f)]$ τώρα απεικονίζεται στον (p', q) χώρο ως γραμμή κρίσιμης κατάστασης (*Critical State Line - CSL*) με κλίση: $M = q_f / qp$ όπου f =failure και υποδηλώνει την αστοχία. Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης τέμνει κάθε επιφάνεια διαρροής στην κορυφή της.

Επίσης, η γραμμή κανονικής στερεοποίησης (*Normal Consolidation Line - NCL*) είναι στον χώρο (p', e) και η κλίση της ορίζεται ως $\lambda = \frac{C_c}{\ln(10)}$, ενώ η κλίση της γραμμής αποφόρτισης/επαναφόρτισης (*Unloading/Reloading Line - URL*) ορίζεται ως κ . Τα κ, λ έχουν και τα δύο θετικό πρόσημο στη θλίψη. Στις συνήθεις περιπτώσεις ο λόγος κ/λ κυμαίνεται μεταξύ 1/10 έως 1/5 (Budhu, σελ.317). Ο λόγος προστερεοποίησης είναι:

$$R_o = \frac{p_c'}{p_o'} \quad (8.1)$$

όπου p_o' = αρχική μέση τάση και p_c' = μέση ενεργός τάση προστερεοποίησης.



Σχήμα 8.1 Απεικόνιση των παραμέτρων αντοχής και στερεοποίησης. (Budhu, 2020)

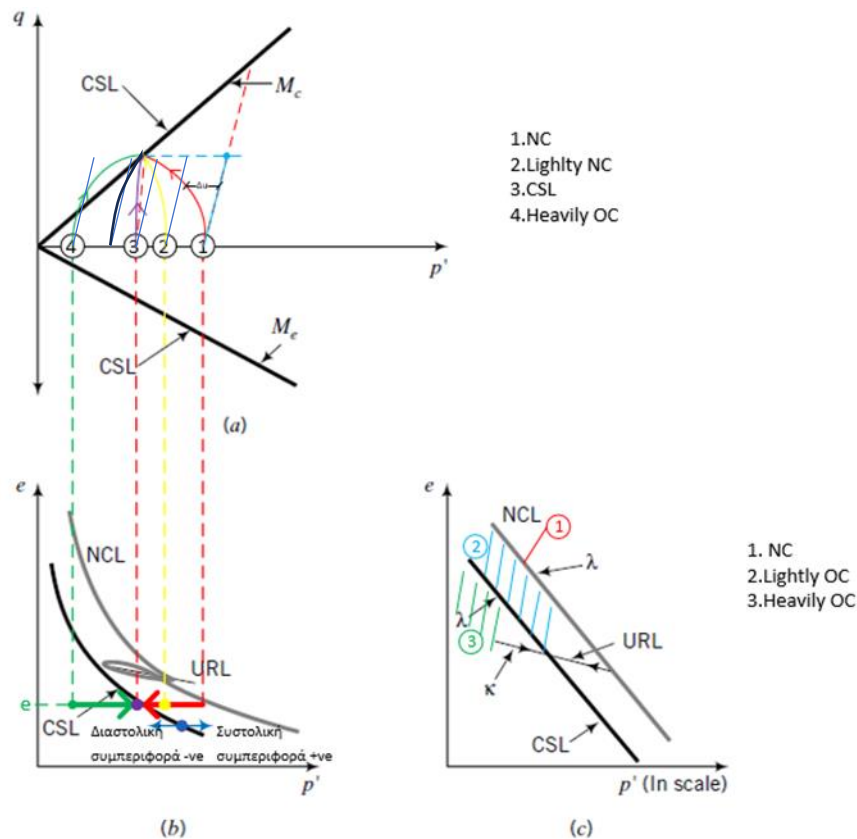
8.1 Στερεοποίηση εδαφών

Στερεοποίηση καλείται η διεργασία κατά την οποία λαμβάνει χώρα μείωση του όγκου του εδάφους, υπό την επίδραση στατικής φόρτισης, εξαιτίας της απομάκρυνσης του νερού των πόρων και της αντίστοιχης μείωσης του πορώδους. Εδάφη τα οποία δεν υποβλήθηκαν ποτέ σε ενεργές τάσεις μεγαλύτερες από αυτές του ιδίου βάρους τους ονομάζονται κανονικά στερεοποιημένα ενώ εδάφη όπου στο παρελθόν έχουν υποβληθεί σε μεγαλύτερες ενεργές τάσεις από τις υφιστάμενες ενεργές τάσεις ονομάζονται υπερστερεοποιημένα.

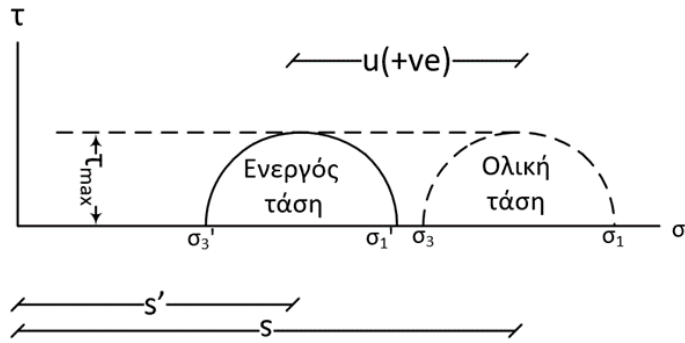
- Κανονικά στερεοποιημένο έδαφος *Normally Consolidated(NC)*: $R_o=1$
- Ελαφρά υπερστερεοποιημένο έδαφος *Lightly Overconsolidated(OC)*: $1 < R_o \leq 2$
- Ισχυρά υπερστερεοποιημένο έδαφος *Heavily Overconsolidated* ($R_o > 2$)
-

Στις αστράγγιστες συνθήκες το e είναι σταθερό $e = ct$ και $\dot{e} = 0$.

Στο Σχήμα 8.2. (α) απεικονίζεται η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης με κλίση M_c για τριαξονική θλίψη (όπου c σημαίνει compression) και με κλίση M_e για τριαξονικό εφελκισμό. Στο Σχήμα 8.2. (β) παρατηρούμε ότι τα Κανονικά στερεοποιημένα εδάφη παρουσιάζουν διαστολική συμπεριφορά πριν την αστοχία. Ομοίως και τα Ελαφρά υπερστερεοποιημένα εδάφη, με τη διαφορά ότι παρουσιάζουν και αυξημένη αντοχή πριν την αστοχία. Αντιθέτως, τα Ισχυρά υπερστερεοποιημένα εδάφη παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά πριν την αστοχία, καθώς το υλικό υποχωρεί και συμπιέζεται. Με την αύξηση της τάσης, το έδαφος μπορεί να παρουσιάσει έντονη διαστολή πριν την αστοχία καθώς και αυξημένη αντοχή. Στο Σχήμα 8.2. (c) απεικονίζεται με διαφορετικά χρώματα τα σημεία στο διάγραμμα $(e-\ln p')$ όπου μπορεί να βρεθεί το κάθε εδαφικό δείγμα. Τα Ισχυρά υπερστερεοποιημένα εδάφη συνήθως κινούνται αριστερά της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης ενώ τα ελαφρώς υπερστερεοποιημένα βρίσκονται μεταξύ των δύο ευθειών. Είναι αυτονόητο ότι τα Κανονικά στερεοποιημένα κινούνται πάνω στην Γραμμή Κανονικής Στερεοποίησης.



Σχήμα 8.2 α) Γραμμές κρίσιμης κατάστασης με $M=M_c$ για θλίψη και $M=M_e$ για εφελκισμό, β) Γραμμή αποφόρτισης/επαναφόρτισης και γραμμή κρίσιμης κατάστασης (e, p') , γ) Γραμμή αποφόρτισης/επαναφόρτισης και γραμμή κρίσιμης κατάστασης $(e, \ln p')$. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)

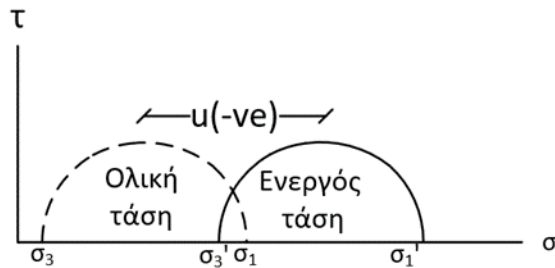


Σχήμα 8.3 Σχέση μεταξύ ολικών και ενεργών τασικών κύκλων εάν η πίεση του νερού των πόρων είναι θετική.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (8.2)$$

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (8.3)$$

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (8.4)$$



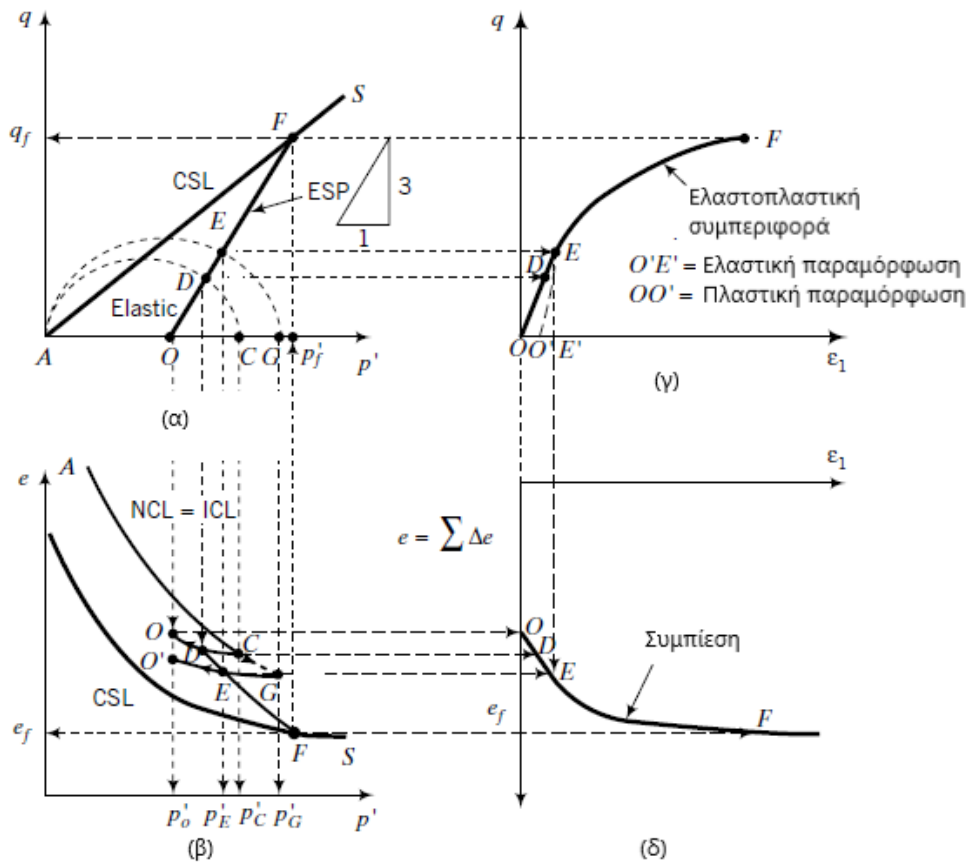
Σχήμα 8.4 Σχέση μεταξύ ολικών και ενεργών τασικών κύκλων εάν η πίεση του νερού των πόρων είναι αρνητική.

8.2 Πρόβλεψη συμπεριφοράς κανονικά και ελαφρώς στερεοποιημένων εδαφών

8.2.1 Υπό στραγγισμένες συνθήκες

Έστω ένα εδαφικό δείγμα ελαφρώς στερεοποιημένο με αρχικό λόγο κενών e_0 σε μια τυπική CD δοκιμή, όπου έχει στερεοποιηθεί ισότροπα και κατόπιν του επιβάλλονται αξονικά φορτία διατηρώντας την πίεση της κυψέλης σταθερή. Θα στερεοποιήσουμε το εδαφικό δείγμα μέχρι μία μέγιστη μέση ενεργό τάση p_c' και μετά θα το αποφορτίσουμε μέχρι μία μέση ενεργό τάση p_o' έτσι ώστε $R_o = p_c'/p_o' < 2$. Παρακάτω, στο Σχήμα 8.5 αναπαρίσταται: Στο διάγραμμα (p', e) η όδευση ισότροπης στερεοποίησης στο τμήμα AC . Το τμήμα AC αποτελεί τη γραμμή κανονικής στερεοποίησης (*Normal Consolidation Line – NCL*) με κλίση λ , και εφόσον η φόρτιση είναι ισότροπη ταυτίζεται με την Γραμμή Ισότροπης Στερεοποίησης (*Isotropic Consolidation Line – ICL*). Δηλαδή $NCL \equiv ICL$. Στο διάγραμμα (p', q) όσο στερεοποιούμε το έδαφος σταδιακά από A σε C και μετά αποφορτίζουμε στο O η τασική όδευση θα είναι $A \rightarrow C$, $C \rightarrow O$ και στο διάγραμμα (p', e) η καμπύλη CO θα αποτελεί τη γραμμή αποφόρτισης / επαναφόρτισης με κλίση κ .

Η γραμμή AS στο διάγραμμα (p', q) αποτελεί την Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης CSL με κλίση M_c . Στο (p', e) η CSL είναι παράλληλη με τη γραμμή κανονικής στερεοποίησης. Επίσης, στο (p', q) η Ενεργός Τασική Όδευση (ESP) αναπαρίσταται από τη γραμμή OF κλίσης $q/p' = 3$ (Αποδείχθηκε παραπάνω). Καθώς η δοκιμή είναι υπό αστράγγιστες συνθήκες η Ενεργός Τασική Όδευση είναι ίση με την Ολική Τασική Όδευση ($ESP \equiv TSP$). Η ενεργός τασική όδευση τέμνει την αρχική επιφάνεια διαρροής στο σημείο D (p', q) συνεπώς το έδαφος από το O μέχρι το D συμπεριφέρεται ελαστικά. Στο διάγραμμα (ϵ_1, q) τάσης-παραμόρφωσης απεικονίζουμε τη ελαστική απόκριση του εδάφους. Παραπάνω φόρτιση στην τασική όδευση OF πάνω από το σημείο D προκαλεί διαρροή του εδάφους.

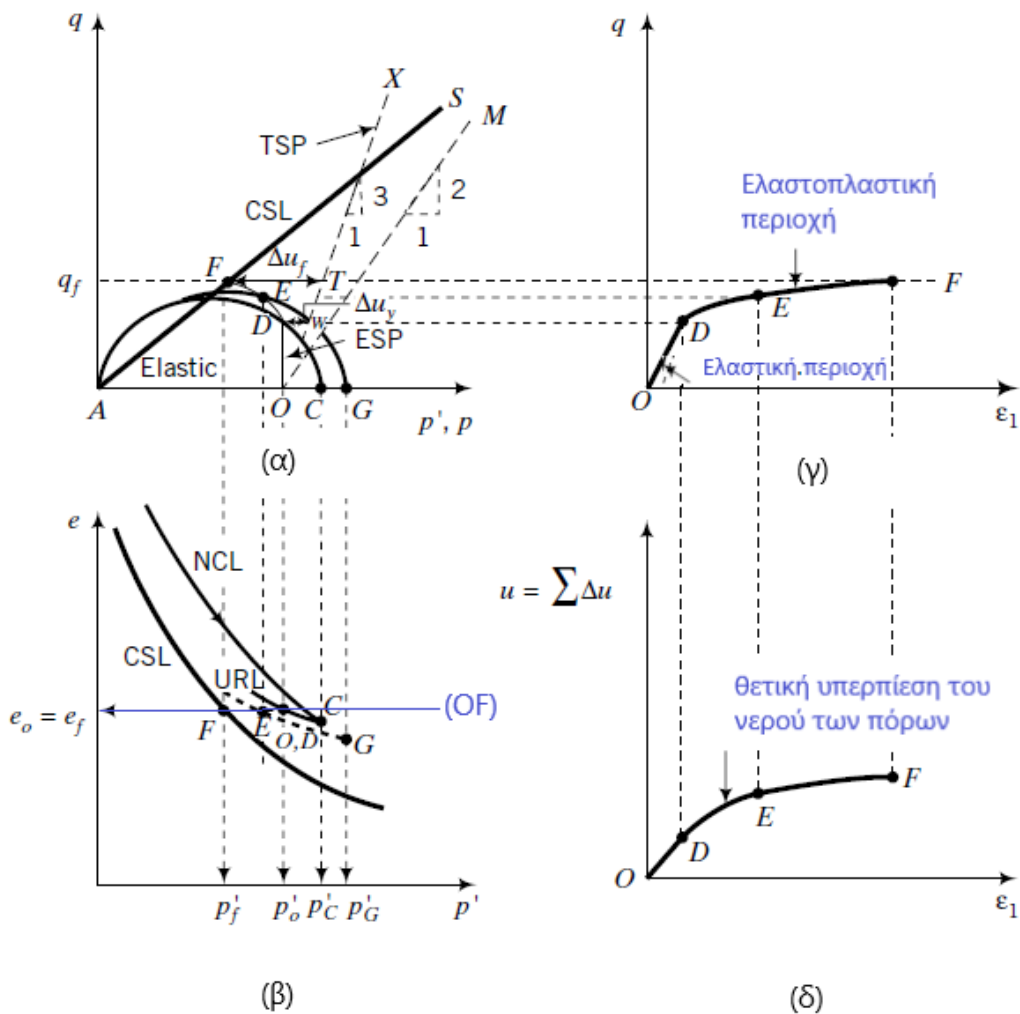


Σχήμα 8.5 Αναμενόμενα αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσης σε στραγγισμένες συνθήκες (CD) σε ελαφρώς υπερστερεοποιημένο έδαφος ($1 < R_o \leq 2$) χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Κρίσιμης Κατάστασης (CSM). (Από Budhu, 2020 τροποποιημένο)

8.2.2 Υπό αστράγγιστες συνθήκες

Σε μία τυπική *CU* δοκιμή (Αστράγγιστη θλίψη με προηγούμενη στερεοποίηση του δείγματος) η κλίση της Ολικής Τασικής Όδευσης (*TSP*) είναι ίση με 3 (αποδείχθηκε παραπάνω), ενώ η μορφή της Ενεργού Τασικής Όδευσης (*ESP*) είναι άγνωστη. Επειδή όπως αναφέραμε παραπάνω η μεταβολή του όγκου είναι μηδενική στις αστράγγιστες συνθήκες ($\Delta e = 0$) θα αναπαραστήσουμε τη μέση ενεργό τάση στην αστοχία με την οριζόντια γραμμή *OF* από τον αρχικό λόγο κενών όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6 (β) όπου *O, D* ταυτίζονται. Η *ESP* προκαλεί ελαστική απόκριση και η αλλαγή στη μέση ενεργό τάση είναι μηδενική.

Συνεχίζοντας τη φόρτιση πέραν της αρχικής διαρροής προκαλείται διόγκωση της αρχικής επιφάνειας διαρροής, και ταυτόχρονα η υπερπίεση του νερού των πόρων αυξάνεται σημαντικά. Η απόκριση του εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι ανεξάρτητη από την ολική τασική όδευση.



Σχήμα 8.6 Αναμενόμενα αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσης με στερεοποίηση σε αστράγγιστες συνθήκες (*CU*) δοκιμής ελαφρώς στερεοποιημένων εδαφών ($1 < R_o \leq 2$) χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Κρίσιμης Κατάστασης (*CSM*). (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)

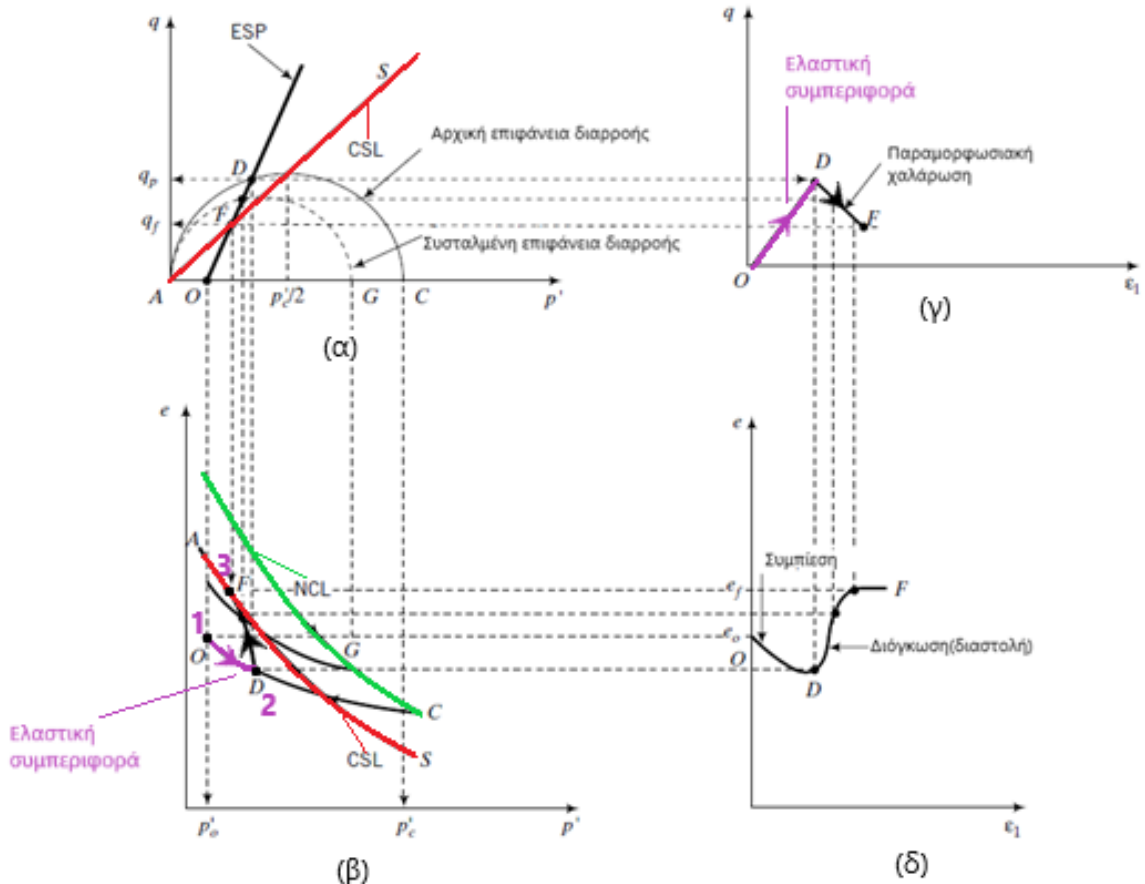
8.3 Πρόβλεψη συμπεριφοράς ισχυρά υπερστερεοποιημένων εδαφών

8.3.1 Υπό στραγγισμένες συνθήκες

Η πιθανότητα το έδαφος να συμπεριφερθεί με έναν κανονικά στερεοποιημένο τρόπο ή με έναν ελαφρώς/ισχυρά υπερστερεοποιημένο τρόπο εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο προστεροποίησης R_o και την ενεργό τασική όδευση. Για να προσομοιώσουμε ένα ισχυρά προστεροποιημένο έδαφος θα χρειαστεί να το αποφορτίσουμε από την τάση προστεροποίησης έτσι ώστε $p_c'/p_o' > 2$ το οποίο απεικονίζουμε με το σημείο O στο σχήμα 8.7 (α,β). Τα ισχυρά υπερστερεοποιημένα εδάφη έχουν αρχικές τάσικες καταστάσεις που βρίσκονται στα αριστερά της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στον (p', e) χώρο. Η ESP για μια τυπική τριαξονική δοκιμή CD έχει κλίση ίση με 3 και τέμνει την αρχική επιφάνεια διαρροής στο σημείο D .

Επομένως στο Σχήμα 7.6 (β,γ) με την OD απεικονίζεται το έδαφος να συμπεριφέρεται ελαστικά. Η τομή της ESP με τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης βρίσκεται στο σημείο F 8.7 (α), έτσι ώστε η επιφάνεια διαρροής να συστέλλεται καθώς το έδαφος φορτίζεται προς την αστοχία. Από το D ο όγκος του εδάφους αυξάνεται (Σχήμα 8.7 β,γ) και το έδαφος χαλαρώνει παραμορφωσιακά οπότε ακολουθεί την όδευση $O \rightarrow D \rightarrow F$.

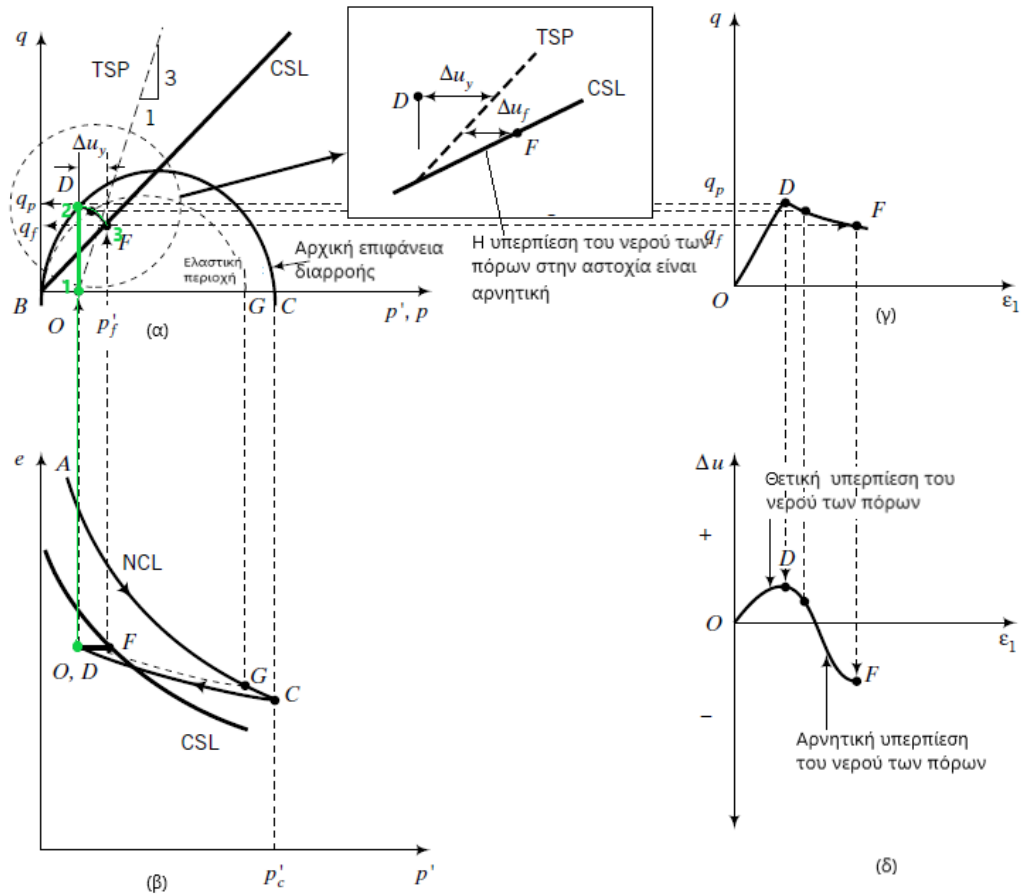
Στο Σχήμα 8.7 (δ) απεικονίζεται η ογκομετρική απόκριση. Στο OD είναι η ελαστική φάση όπου το έδαφος συστέλλεται και στη συνέχεια μετά τη διαρροή στο OF διογκώνεται μέχρι την αστοχία. Τελικά παραμένει σε σταθερό όγκο και σταθερό λόγο κενών. Ως συμπέρασμα, το CSM προσομοιώνει τα ισχυρά υπερστερεοποιημένα υλικά ως ελαστικά και μετά την διαρροή ως ελαστοπλαστικά διότι η επιβαλλόμενη φόρτιση προκαλεί στο έδαφος χαλάρωση όσο η κατάσταση κατευθύνεται προς τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης.



Σχήμα 8.7 Απεικόνιση αποτελεσμάτων πρόβλεψης υπό μία τριαξονική CD δοκιμή σε ισχυρά υπερστερεοποιημένο έδαφος ($R_o > 2$) χρησιμοποιώντας το CSM. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)

8.3.2 Υπό αστράγγιστες συνθήκες

Υπό αστράγγιστη φόρτιση ο όγκος παραμένει σταθερός και η απόκριση του εδάφους είναι ανεξάρτητη από την ολική τασική όδευση. Στην περίπτωση μίας τυπικής τριαξονικής *CU* δοκιμής σε ένα ισχυρά υπερστερεοποιημένο έδαφος η όδευση προς στην αστοχία θα είναι η $O \rightarrow D \rightarrow F$ του Σχήματος 8.8 και δεν υπάρχουν αλλαγές στον όγκο. Το έδαφος θα διαρρέψει στο σημείο *D* και θα αστοχήσει στο *F*. Από το *O* έως το *D* είναι η αρχική επιφάνεια διαρροής στο (α) οπότε το έδαφος συμπεριφέρεται ως ελαστικό υλικό. Μετά την διαρροή το έδαφος μπορεί να χαλαρώσει παραμορφωσιακά (συστολή αρχικής επιφάνειας διαρροής) ή μπορεί να κρατυνθεί παραμορφωσιακά (διαστολή αρχικής επιφάνειας διαρροής). Η επιφάνεια διαρροής από το *D* στο *F* συστέλλεται. Η τάση του εδάφους στο *OD* συστέλλεται με αποτέλεσμα να προκαλεί θετική υπερπίεση του νερού των πόρων ενώ στο *DF* διαστέλλεται και προκαλεί αρνητική υπερπίεση του νερού των πόρων.

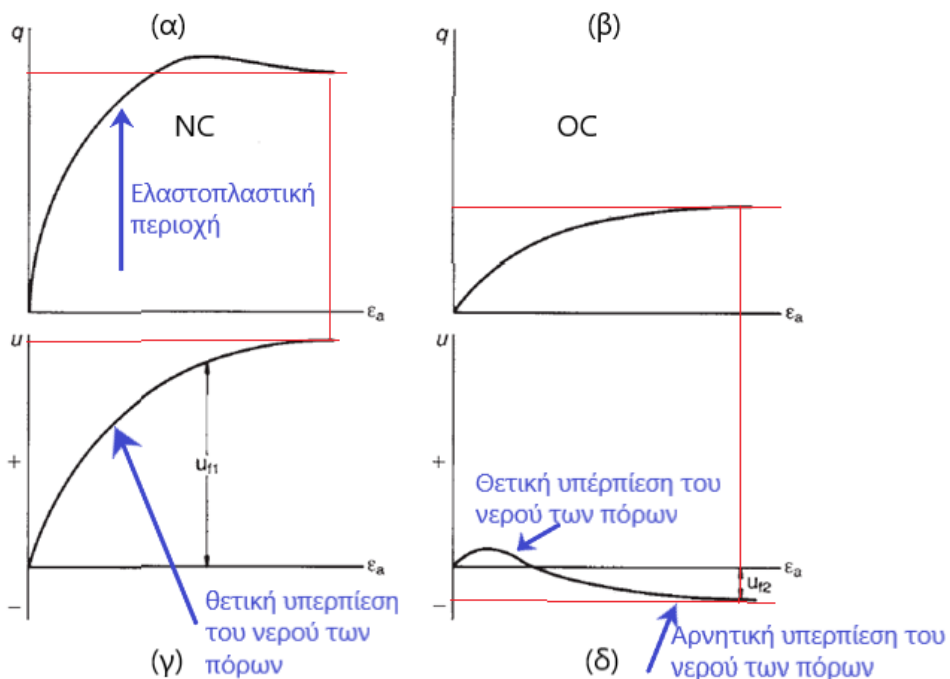


Σχήμα 8.8 Απεικόνιση προβλεπόμενων αποτελεσμάτων από μία τριαξονική *CU* δοκιμή για ισχυρά υπερστερεοποιημένο έδαφος $Ro > 2$. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)

8.4 Τυπική συμπεριφορά κανονικά στερεοποιημένων εδαφών σε σύγκριση με ισχυρά στερεοποιημένα εδάφη σε αστράγγιστες συνθήκες

Γνωρίζουμε ότι υπό αστράγγιστες συνθήκες ο όγκος του εδάφους παραμένει σταθερός δηλαδή $\Delta e_{vol} = 0$. Αυτό σημαίνει ότι η ελαστική ογκομετρική παραμόρφωση εξισορροπείται από ένα ίσο και αντίθετο μέγεθος πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων. Τα κανονικά στερεοποιημένα εδάφη δεν εμφανίζουν αρχική ελαστική απόκριση. Διαρρέουν αμέσως μετά την επιβολή φόρτισης. Φόρτιση πέρα της αρχικής διαρροής προκαλεί στο έδαφος να συμπεριφέρεται ως ένα παραμορφωσιακά κρατυνόμενο ελαστοπλαστικό υλικό. Η αρχική επιφάνεια διαρροής διογκώνεται, και υπάρχει θετική υπερπίεση του νερού των πόρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.9 (α) και (γ).

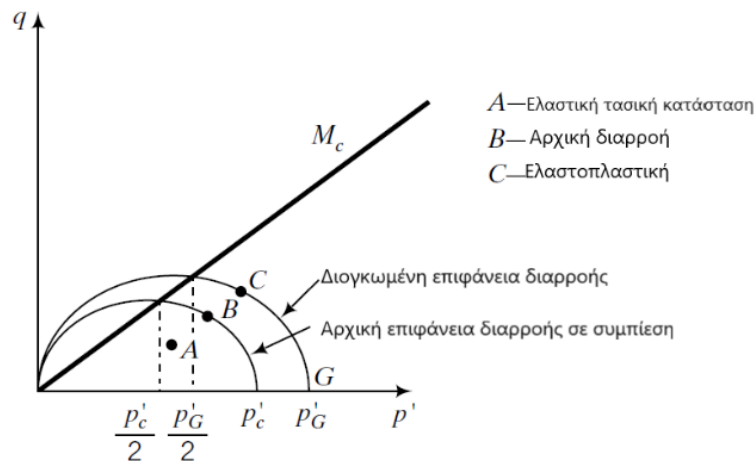
Το ισχυρά υπερστεροποιημένο έδαφος αρχικά συμπεριφέρεται ως ελαστικό υλικό μέχρι τη κορυφαία διατμητική τους τάση και κατόπιν ως ελαστοπλαστικά καθώς η υποβαλλόμενη φόρτιση προκαλεί στο έδαφος παραμορφωσιακή χαλάρωση. Κατά τη διάρκεια της ελαστικής παραμόρφωσης το έδαφος αναπτύσει θετικές υπερπίεσεις του νερού των πόρων ενώ μετά την αρχική διαρροή αναπτύσει αρνητικές υπερπίεσεις του νερού των πόρων μέχρι την κρίσιμη κατάσταση. Κατόπιν, η υπερπίεση του νερού των πόρων παραμένει σταθερή όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.9 (δ).



Σχήμα 8.9 Τυπικά διαγράμματα διεκτροπικής τάσης και υπερπίεσης του νερού των πόρων έναντι της αξονικής παραμόρφωσης για αστράγγιστες δοκιμές: α) Κανονικά Στερεοποιημένης αργίλου, β) Ισχυρά Υπερστεροποιημένης αργίλου. (από Parry, 2005 τροποποιημένο)

8.5 Μονοδιάστατα στερεοποιημένα εδάφη – K_o στερεοποιημένα

Υπάρχει μία επιφάνεια διαρροής στον χώρο των τάσεων που διαχωρίζει τις τασικές καταστάσεις που παράγουν ελαστικές αποκρίσεις από τις τασικές καταστάσεις που παράγουν πλαστικές αποκρίσεις. Πλέον, η επιφάνεια διαρροής που χρησιμοποιούμε δεν ανήκει στον (σ_1, σ_3) χώρο, αλλά στον (p', q) χώρο καθώς θέλουμε η ερμηνεία των εδαφικών αποκρίσεων να είναι ανεξάρτητη από το σύστημα αξόνων. Η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) τέμνει κάθε επιφάνεια διαρροής στην κορυφή της, συνεπώς η τομή της αρχικής επιφάνειας διαρροής και της γραμμής κρίσιμης κατάστασης βρίσκεται στη μέση ενεργό τάση $\frac{p'_c}{2}$ και για τη διογκωμένη επιφάνεια διαρροής είναι για $\frac{p'_G}{2}$.



Σχήμα 8.10 Επιφάνειες διαρροής. (Budhu, 2020)

Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι επιφάνεια διαρροής εξαρτάται από τη μέση ενεργό τάση προστερεοποίησης. Όσο υψηλότερη είναι η τάση προστερεοποίησης τόσο μεγαλύτερη είναι και η αρχική έλλειψη. Η εξίσωση για την επιφάνεια διαρροής είναι μία εξίσωση έλλειψης που δίνεται από:

$$(p')^2 = p'_c p' + \frac{q^2}{M^2} = 0$$

ή

$$p'_c = p' + \frac{q^2}{M^2 p'} \quad (8.5)$$

Ο λόγος της οριζόντιας κύριας ενεργούς τάσης προς την κατακόρυφη κύρια ενεργό τάση ονομάζεται συντελεστής πλευρικών τάσεων σε ηρεμία K_o :

$$K_o = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = \frac{\sigma'_x}{\sigma'_z} = ct \quad (8.6)$$

Η κατάσταση ηρεμίας υποδηλώνει ότι δεν υφίστανται παραμορφώσεις και ο συντελεστής K_o αφορά μόνο τις ενεργές κύριες τάσεις και όχι τις ολικές. Στα κανονικά στερεοποιημένα εδάφη ο συντελεστής $K_o = K_o^{nc}$ εκτιμάται από την εξίσωση του Jaky (1944):

$$K_o^{nc} = 1 - \sin \varphi'_{cs} \quad (8.7)$$

Όπου φ'_{cs} : γωνία τριβής κρίσιμης κατάστασης.

Για υπερστερεοποιημένα εδάφη οι τιμές του συντελεστή K_o δεν είναι σταθερές και συμβολίζεται ως K_o^{oc} . Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η σχέση Meyerhof(1976):

$$K_o^{oc} = K_o^{nc} (OCR)^{\frac{1}{2}} = (1 - \sin \varphi'_{cs}) * (OCR)^{\frac{1}{2}} \quad (8.8)$$

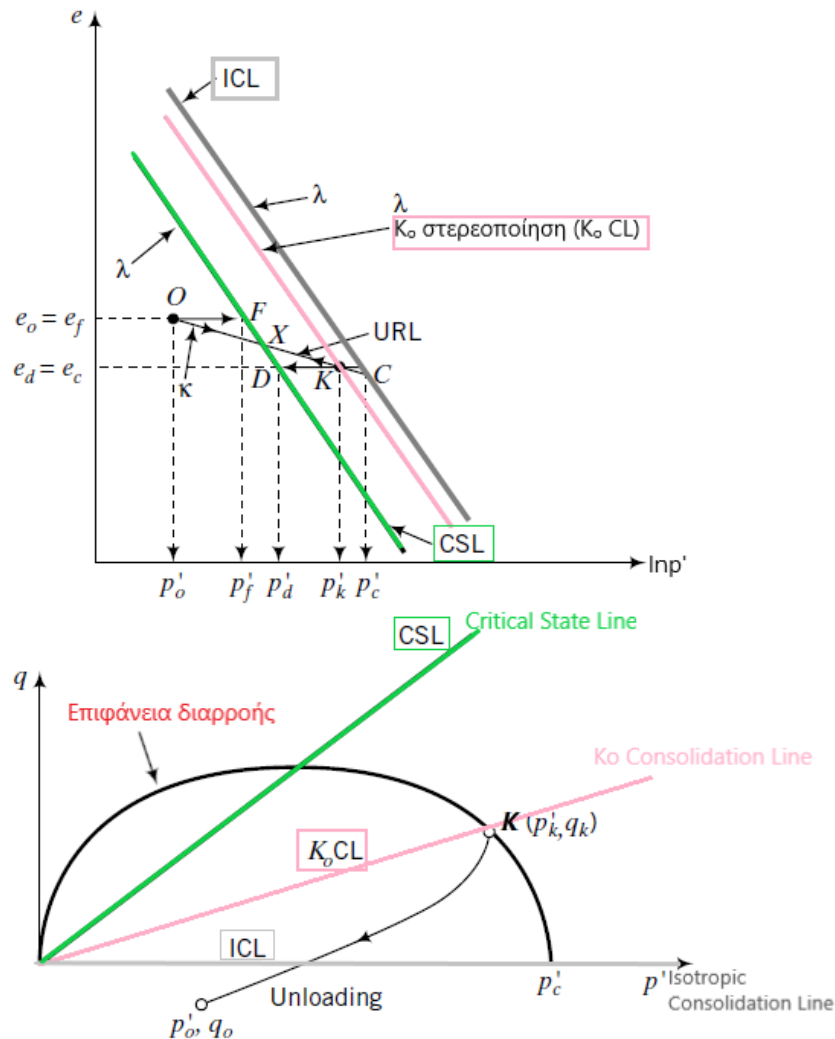
όπου το $OCR = \frac{\text{Παρελθούσα κατακόρυφη ενεργός τάση}}{\text{Υφιστάμενη κατακόρυφη ενεργός τάση}}$ είναι ο λόγος προστερεοποίησης και για κανονικά στερεοποιημένα εδάφη προφανώς ισχύει $OCR=1$ (Budhu, 2020).

Τα εδάφη στο πεδίο είναι μονοδιάστατα (1D, 1D) στερεοποιημένα ή αλλιώς K_o στερεοποιημένα. Η K_o γραμμή στερεοποίησης είναι παράλληλη με την γραμμή ισότροπης στερεοποίησης (ICL) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10. Υπενθυμίζοντας, η 1D παραμόρφωση δεν οδηγεί σε αστοχία, ($\eta=q/p'=ct$ στο επίπεδο $p'-q$) και ισχύει:

$$\eta = \eta_o = \frac{\sigma'_z - \sigma'_x}{\frac{\sigma'_{z1} + 2\sigma'_{x1}}{3}} = \frac{\sigma'_z - K_o\sigma'_z}{\frac{\sigma'_{z1} + 2K_o\sigma'_{z1}}{3}} = \frac{3(1 - K_o)}{1 + 2K_o} \quad (8.9)$$

$$K_o^{oc} = K_o^{nc}(OCR)^{\tan\phi'} = K_o^{oc} \frac{\sigma_{zmax}^{\tan\phi'}}{\sigma_z} \quad (8.10)$$

Οι μορφές των τασικών οδεύσεων υπό αστράγγιστες είναι όμοιες, δηλαδή μπορούν να κανονικοποιηθούν. Υπό $\eta = \text{σταθ.}$ τασική οδεύση μπορούν να αποτυπωθούν τα σημεία διαρροής. Εάν κανονικοποιήσουμε τις τασικές οδεύσεις ως προς το μέγεθος p'_e , τότε πρακτικά πέφτουν στην ίδια καμπύλη. Το ίδιο ισχύει και για τις στραγγισμένες TXL. Αυτή η καμπύλη είναι η καμπύλη οριακής κατάστασης (State Boundary Surface - SBS) και τη χρησιμοποιούμε ως επιφάνεια διαρροής.



Σχήμα 8.11 Φόρτιση και αποφόρτιση ενός K_o -στερεοποιημένου λεπτόκοκκου εδάφους. (από Budhu, 2020 τροποποιημένο)

9 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η Θεωρία της πλαστικότητας θεωρείται ως η πρώτη προσπάθεια ολοκληρωμένης προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς υλικών που μπορούν να θεωρηθούν με ακρίβεια ως συνεχή μέσα. Στήριχθηκε σε παρατηρήσεις για τη συμπεριφορά μετάλλων αλλά αργότερα εξελίχθηκε, και εξειδικεύθηκε και στα εδάφη. Βασικό χαρακτηριστικό της θεωρίας πλαστικότητας είναι ο διαχωρισμός των παραμορφώσεων σε ελαστικές (αντιστρεπτές) και πλαστικές (ανελαστικές):

$$\varepsilon = \varepsilon^p + \varepsilon^e \quad (9.1)$$

Όπου ε : τανυστής των παραμορφώσεων, ε^e : τανυστής ελαστικών παραμορφώσεων και ε^p : τανυστής πλαστικών παραμορφώσεων.

Η Θεωρία της Πλαστικότητας είναι κατάλληλη όταν το έδαφος υπόκειται σε υψηλές τάσεις, έχει μη γραμμική συμπεριφορά και μεγάλες παραμορφώσεις. Αντίθετα, η θεωρία της Ελαστικότητας είναι κατάλληλη σε χαμηλές τάσεις, γραμμική συμπεριφορά του εδάφους και μικρές παραμορφώσεις.

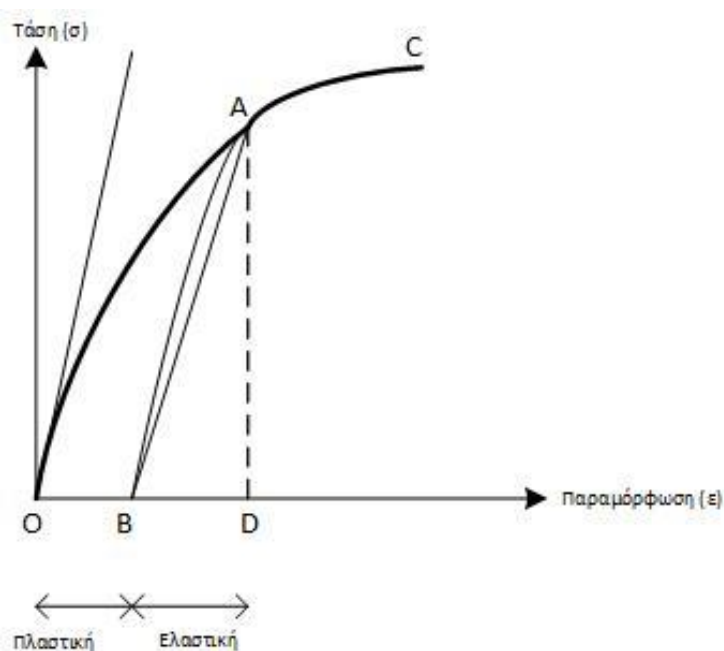
$$\sigma = C: [\varepsilon - \varepsilon^p] \quad (9.2)$$

Όπου σ : Τανυστής των τάσεων και C : Τανυστής ελαστικής στιβαρότητας.

Τα υλικά ανάλογα με τη συμπεριφορά τους χωρίζονται σε ελαστικά και ανελαστικά/πλαστικά. Ελαστικά υλικά είναι τα υλικά όπου επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση κατά την αποφόρτιση σύμφωνα με τον νόμο του Hooke ενώ τα πλαστικά υλικά δεν επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση κατά την αποφόρτιση.

Τα ελαστοπλαστικά υλικά ανακτούν μέρος των παραμορφώσεων κατά την αποφόρτιση και η μη ανακτώμενη παραμόρφωση ονομάζεται παραμένουσα ή πλαστική. Σε μικρές παραμορφώσεις τα εδάφη συμπεριφέρονται ως ελαστικά γραμμικά υλικά και στη συνέχεια ως ελαστοπλαστικά υλικά. Το εύρος παραμόρφωσης ή τάσης για το οποίο η συμπεριφορά είναι ελαστική, είναι γενικά μικρό και το όριο μετάβασης από την ελαστική στην ανελαστική συμπεριφορά περιγράφει τη διαρροή του υλικού.

Η διάκριση μεταξύ ελαστικών και πλαστικών καταστάσεων επιτυγχάνεται μέσω της επιφάνειας διαρροής.

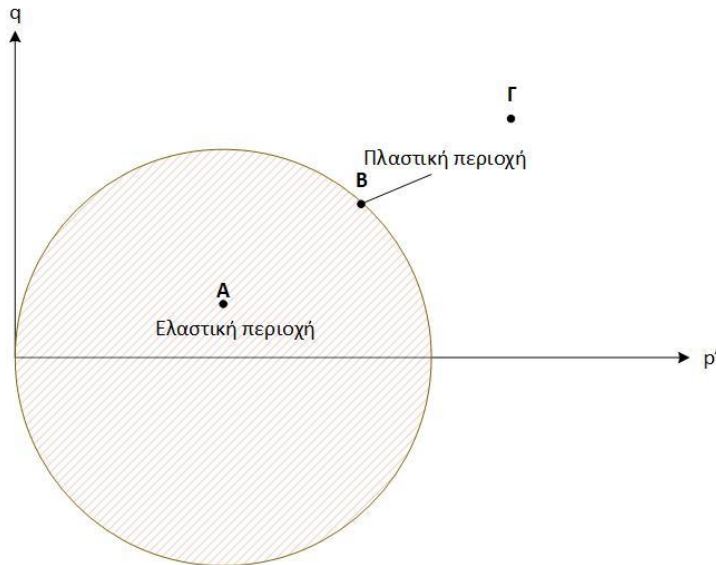


Σχήμα 9.1 Ιδεατή καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για ελαστοπλαστικό υλικό.

Οι δύο αυτές δυνατές καταστάσεις ορίζονται ως προς το όριο διαρροής που περιγράφεται τανυστικά από την Περιβάλλουσα Πλαστικής Διαρροής (*Plastic Yield Envelope, PYE*).

Όταν η τασική κατάσταση του υλικού βρίσκεται στο εσωτερικό της *PYE* (Σημείο Α στο Σχήμα 9.2), τότε η αρχική κατάστασή του είναι ελαστική, ενώ κάθε κατάσταση επί της *PYE* είναι πλαστική (Σημείο Β στο Σχήμα 8.2).

Καταστάσεις στο εξωτερικό της *PYE* (Σημείο Γ στο Σχήμα 9.2) είναι αδύνατες. Η οποιαδήποτε μεταβολή της *PYE* καλείται κράτυνση, ενεργοποιείται μόνο στις πλαστικές εντάσεις και περιγράφεται παρακάτω από τους νόμους κράτυνσης ([Παράγραφος 9.2](#)).



Σχήμα 9.2 Περιβάλλουσα Πλαστικής Διαρροής και δυνατές καταστάσεις

9.1 Νόμος Ροής

Ο νόμος ροής (*flow rule*) καθορίζει το σχετικό μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων στις διάφορες διευθύνσεις.

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{L} * P \quad (9.3)$$

Όπου L είναι το μέτρο επαύξησης (δίνει την κατεύθυνση του διανύσματος), P ονομάζεται το πλαστικό δυναμικό και είναι ο τανυστής 2ας τάξης που δίνει τη 'διεύθυνση' των πλαστικών παραμορφώσεων (δηλαδή το σχετικό μέγεθος τους στις διάφορες διευθύνσεις).

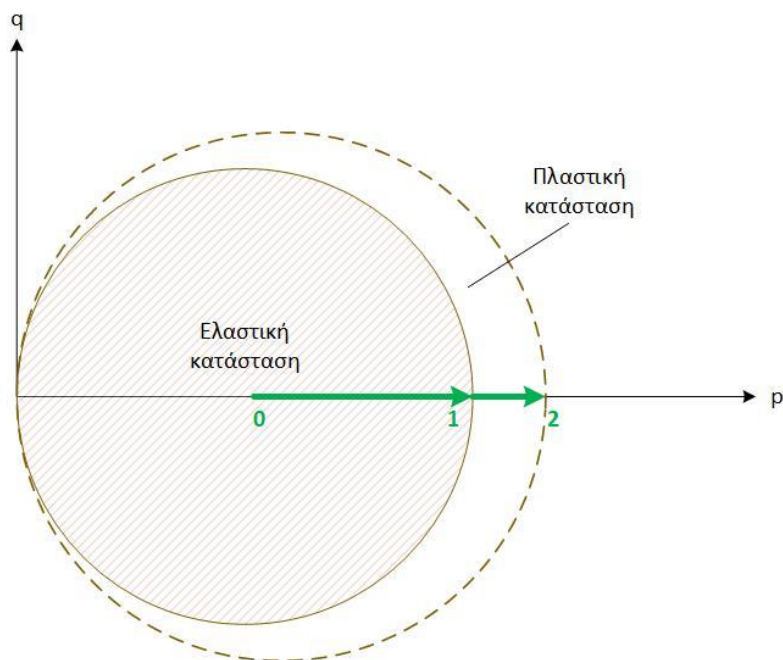
9.2 Νόμος κράτνσης

Οι μεταβλητές κράτνσης, q , καθορίζουν το μέγεθος, τη θέση και το σχήμα της Περιβάλλουσας Πλαστικής Διαρροής και μαζί με την τασική κατάσταση, σ , αποτελούν τις μεταβλητές της συνάρτησης πλαστικής διαρροής. Ο νόμος κράτνσης (*hardening rule*) καθορίζει τον τρόπο μεταβολής των παραμέτρων κράτνσης κατά τις πλαστικές εντάσεις, εξασφαλίζοντας πως η τρέχουσα κατάσταση βρίσκεται πάντα επί της περιβάλλουσας πλαστικής διαρροής. (Μπελόκας, 2008)

Ανάλογα με τον τρόπο κράτνσης υπάρχουν τριών ειδών νόμοι:

- α) ισοτροπικός, όπου μεταβάλλεται το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής,
- β) ανισοτροπικός/κινηματικός όπου μεταβάλλεται η θέση της επιφάνειας διαρροής και
- γ) παραμορφωτικός, όπου μεταβάλλεται το σχήμα της επιφάνειας διαρροής. (Παπαδημητρίου, 1999)

Το q εκφράζει τις μεταβλητές κράτνσης ως ένα σύνολο τανυστικών και βαθμωτών μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη "μνήμη" του εδαφικού στοιχείου, η οποία επηρεάζει τις επόμενες φορτίσεις μέσω των νόμων κράτνσης. Έτσι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3, η περιβάλλουσα πλαστικής διαρροής κρατύνεται και ακολουθεί τη μεταβολή $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2$. Στο σημείο 0 (ελαστική κατάσταση) ισχύει $f(\sigma) < 0$, στα σημεία 1 και 2 (πλαστική κατάσταση) ισχύει $f(\sigma) = 0$.



Σχήμα 9.3 Μεταβολή μεγέθους περιβάλλουσας πλαστικής διαρροής – Ισότροπη συμπίεση.

9.3 Προσομοιώματα Κρίσιμης Κατάστασης

Η ταξινόμηση των προσομοιωμάτων Κρίσιμης Κατάστασης γίνεται με βάση τον τρόπο με τον οποίο διαφοροποιούνται στη μαθηματική τους διατύπωση από τα προσομοιώματα του Cambridge. Έτσι διαχωρίζουμε πέντε (5) γενικές κατευθύνσεις προσομοίωσης. (Παπαδημητρίου, 1999)

9.3.1 Προσομοιώματα με Καπέλο (*Cap*)

Με τον όρο προσομοιώματα με "καπέλο" συνοψίζονται τα ελαστοπλαστικά προσομοιώματα που χαρακτηρίζονται από μια επιφάνεια αστοχίας (π.χ. Drucker and Prager 1952) και μια επιφάνεια διαρροής ("καπέλο") που τέμνεται τόσο με την επιφάνεια αστοχίας όσο και με τον υδροστατικό άξονα p . (Παπαδημητρίου, 1999)

9.3.2 Ισοτροπικά/Ανισοτροπικά προσομοιώματα (*Isotropic/Anisotropic*)

Στην γενική κατηγορία αυτή συνοψίζονται προσομοιώματα Κρίσιμης Κατάστασης, τα οποία σε αντίθεση με τα προσομοιώματα με "καπέλο", δε χρησιμοποιούν επιφάνεια αστοχίας (αυτό τα καθιστά πιο ακριβή) και η επιφάνεια διαρροής έχει συνήθως κυρτό σχήμα, χωρίς αναγκαστική συμμετρία ως προς τον υδροστατικό άξονα p . Ένα προσομοίωμα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά χαρακτηρίζει το έδαφος ως ισότροπο, αν για περιστροφή των τάσεων γύρω από τον υδροστατικό άξονα p η προβλεπόμενη μηχανική συμπεριφορά δεν αλλάζει. Στην περίπτωση αυτή, το προσομοίωμα έχει συνήθως μόνο ισοτροπική κράτνυση.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν οι εξής αδυναμίες:

α) Δεν προβλέπουν ανισοτροπία (εγγενή λόγω απόθεσης ή λόγω φόρτισης),

β) Δεν προβλέπουν διαστολικότητα για άμμους,

γ) Δεν προβλέπουν συνήθως πλαστική παραμόρφωση σε αντιστροφή της φόρτισης, συνεπώς δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη ανακυκλικής φόρτισης οποιουδήποτε εδάφους.

Η έμμεση προσπάθεια πρόβλεψης πλαστικής παραμόρφωσης στο εσωτερικό της επιφάνειας διαρροής κατά την αποφόρτιση υπό μορφής ισοτροπικής απομείωσης της δυσμησίας (*Jefferies* 1997c) θεωρείται πολύπλοκη.

Υπάρχουν και προσομοιώματα που έχουν τα προαναφερθέντα γενικά χαρακτηριστικά της κατηγορίας, μα έχουν επιπλέον στόχο την πρόβλεψη της ανισοτροπίας, δηλαδή έχουν ένα λιγότερο μειονέκτημα από τα προαναφερθέντα. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με αύξηση της συνθετότητας των καταστατικών εξισώσεων, η οποία συνδέεται με: α) Εισαγωγή ανισοτροπικής (κινηματικής) κράτνυση, β) χρήση μη ισοτροπικής επιφάνειας διαρροής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης αποκτά τον επιθετικό προσδιορισμό ανισοτροπικό. (Παπαδημητρίου, 1999)

9.3.3 Προσομοιώματα Γενικευμένης Πλαστικότητας (*Generalised Plasticity*)

Με τον όρο προσομοιώματα Γενικευμένης Πλαστικότητας συνοψίζονται προσομοιώματα τα οποία, σε σχέση με τα ισοτροπικά/ανισοτροπικά, έχουν μια πολύ βασική διαφοροποίηση: χρησιμοποιείται μη συσχετισμένος νόμος ροής, δηλαδή το πλαστικό δυναμικό R_{ij} δεν ισούται με το κάθετο επί της επιφάνειας διαρροής διάνυσμα L_{ij} . Ο ορισμός του διανύσματος R_{ij} ανάγεται σε μια νέα επιφάνεια στο χώρο των τάσεων, την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού (*plastic potential surface*) επί της οποίας το διάνυσμα R_{ij} είναι κάθετο. Γίνεται σαφές, ότι η επιφάνεια διαρροής και η επιφάνεια πλαστικού δυναμικού συμπίπτουν στην περίπτωση που νόμος ροής είναι συσχετισμένος, δηλαδή $R_{ij} = L_{ij}$.

9.3.4 Προσομοιώματα Αλληλεμπεριεχόμενων Επιφανειών (*Nested-Surfaces*)

Σημαντικές θεωρητικές εξελίξεις στη θεωρία πλαστικότητας από τους *Mroz* (1967) και *Iwan* (1967) για τη μελέτη μετάλλων έδειξαν ότι η συνεχιζόμενη διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί με μια ομάδα από αλληλεμπεριεχόμενες επιφάνειες διαρροής. Συγκεκριμένα, πρότειναν τη θεώρηση στον τασικό χώρο ενός συνόλου από αλληλεμπεριεχόμενες επιφάνειες διαρροής κάθε μια από τις οποίες ορίζει

τον γεωμετρικό τόπο των καταστάσεων με σταθερό μέτρο πλαστικής κράτυνσης K_p . Κατά τη διάρκεια φόρτισης ($L > 0$), η ενεργοποιημένη επιφάνεια (επάνω στην οποία βρίσκεται η τρέχουσα κατάσταση) υπόκειται σε κινηματική κράτυνση μέχρι αυτή να φθάσει στην αμέσως μεγαλύτερου μεγέθους επιφάνεια διαρροής η οποία ενεργοποιείται τότε με τη σειρά της. Οι αλληλεμπεριεχόμενες επιφάνειες δεν τέμνονται ποτέ και κινούνται μόνο όταν έρχονται σε επαφή με την αμέσως μικρότερου μεγέθους επιφάνεια. Συνήθως, παράλληλα με την κινηματική εφαρμόζεται και ιστροπική κράτυνση όλων των αλληλεμπεριεχομένων επιφανειών ανάλογα με το σχετικό τους μέγεθος.

9.3.5 Προσομοιώματα Οριακής Επιφάνειας (*Bounding Surface*).

Η έννοια της Οριακής Επιφάνειας προτάθηκε πρώτα για μέταλλα από τους *Dafalias, Popov* (1975) και *Krieg* (1975) ως επέκταση προσομοιωμάτων με δύο αλληλεμπεριεχόμενες επιφάνειες διαρροής. Υπό τον όρο "Προσομοιώματα Οριακής Επιφάνειας" συνοψίζονται διαφορετικές υπο-κατηγορίες προσομοιωμάτων:

- α) προσομοιώματα με επιφάνεια υπο-φόρτισης (*subloading surface models*, π.χ. *Hachiguchi and Ueno* 1977),
- β) προσομοιώματα τύπου "φουσαλίδας" (*'bubble' models*, π.χ. *Mroz et al* 1978),
- γ) προσομοιώματα Οριακής Επιφάνειας (*Boundary surface models*) όπως ορίστηκαν αρχικά από τους *Dafalias & Hermann* (1980),
- δ) προσομοιώματα με εκφυλισμένη σε σημείο επιφάνεια διαρροής (*vanishing yield surface models*, π.χ. *Mroz et al* 1979). (Παπαδημητρίου, 1999)

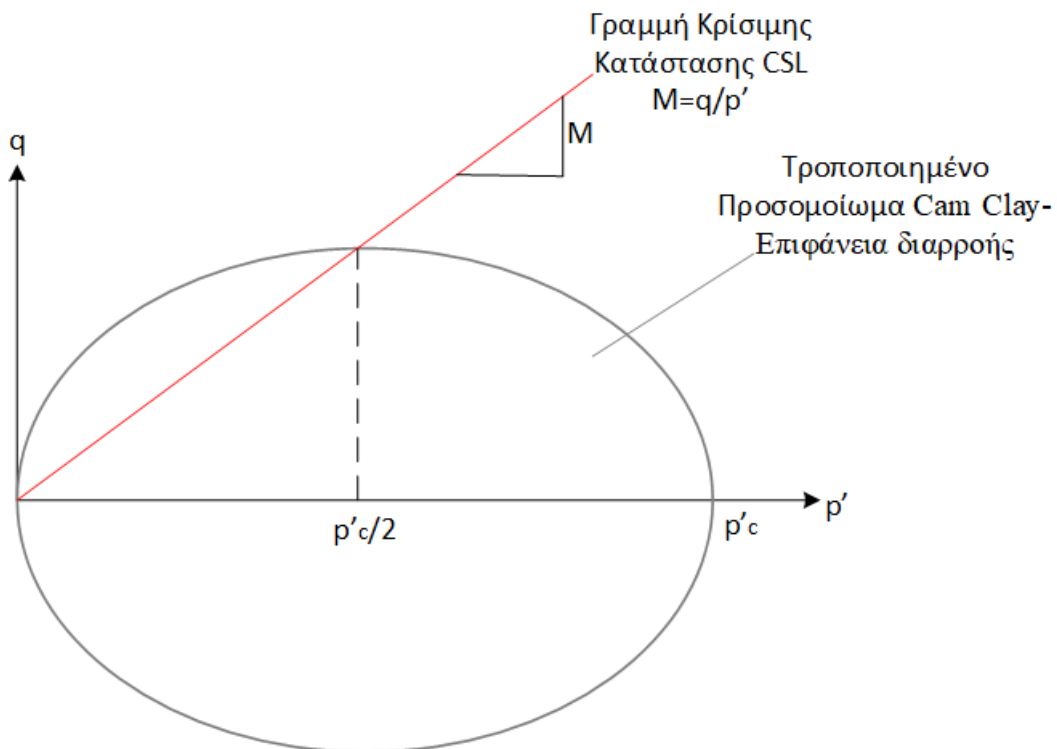
9.4 Καταστατικό μοντέλο *Cam Clay*

Το καταστατικό μοντέλο *Cam Clay* αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του *Cambridge* (Roscoe and Schofield, 1963) και θεμελιώθηκε πάνω σε δεδομένα από συμβατικές δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης, σε ισότροπα στερεοποιημένες αργίλους με βάση τη θεωρία κρίσιμης κατάστασης. Επειδή τα γεωυλικά στην πραγματικότητα είναι ισχυρά μη γραμμικά, ανελαστικά, ανισότροπα και συχνά παρουσιάζουν χαλάρωση έως και κατάρρευση, η μηχανική συμπεριφορά τους δεν μπορεί να προσομοιωθεί από απλά ελαστικά προσομοιώματα.

Η προσπάθεια να προσομοιωθεί η ανελαστικότητα και η αστοχία των εδαφικών υλικών οδήγησε στην ανάπτυξη προσομοιωμάτων που εφαρμόζουν τις αρχές της Γενικευμένης Θεωρίας Πλαστικότητας (*Generalized Theory of Plasticity*) με βασικότερο το «Τροποποιημένο Προσομοίωμα *Cam Clay*» (*Modified Cam Clay Model*) των Roscoe & Burland (1968), το οποίο κάνει χρήση της Θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης (*Critical State Theory*, Schofield & Wroth, 1968).

Στο καταστατικό προσομοίωμα *Modified Cam Clay* η επιφάνεια διαρροής περιγράφεται από μία ισότροπη ελλειψοειδή επιφάνεια στον χώρο των τάσεων ενώ η αστοχία σχετίζεται με την κρίσιμη κατάσταση των εδαφικών υλικών, κατά την οποία ένα εδαφικό στοιχείο παραμορφώνεται υπό συνθήκες ισόογκης παραμόρφωσης χωρίς περαιτέρω αύξηση της έντασης (Σχήμα 9.4). Κατά τη διάρκεια πλαστικών τασικών οδεύσεων και πριν την αστοχία η επιφάνεια διαρροής κρατώνεται είτε αυξάνοντας είτε μικραίνοντας σε μέγεθος.

Τα μοντέλα *Cam-Clay* είναι τα πιο κοινά αποδεκτά πλαστικά μοντέλα για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς τάσης - παραμόρφωσης των συνεκτικών εδαφών που υπόκεινται τρισδιάστατες τασικές καταστάσεις.



Σχήμα 9.4 Η Επιφάνεια διαρροής του καταστατικού προσομοιώματος *Modified Cam-Clay* στο χώρο p' - q

10 ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι περιγραφής της ελαστικής συνιστώσας της παραμόρφωσης που εφαρμόζονται στα εδαφικά υλικά είναι η Cauchy ελαστικότητα, η υποελαστικότητα, η ποροελαστικότητα και η υπερελαστικότητα. (Μπελόκας, 2008)

$$\dot{\sigma} = K\dot{\varepsilon}^e + X^e : \dot{\varepsilon}^e \quad (10.1)$$

10.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η γραμμική ελαστικότητα διατυπώθηκε αρχικά από τον Hooke και σύμφωνα με τον οποίο η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης:

$$\sigma = C^e : \varepsilon \quad (10.2)$$

10.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Το έδαφος ή ο βράχος σπάνια συμπεριφέρονται ως γραμμικά ελαστικά υλικά. Έτσι, μια καλύτερη προσέγγιση θα ήταν να τα μοντελοποιήσουμε ως μη γραμμικά ελαστο-πλαστικά υλικά. Για να καθορίσουμε πλήρως την ελαστο-πλαστική σχέση τάσης-παραμόρφωσης για ένα γεω-υλικό, είναι απαραίτητο να καθορίσουμε μια μη γραμμική, σταδιακά αυξανόμενη, ελαστική σχέση τάσης-παραμόρφωσης. (Hai-Sui Yu, 2010)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία μιας μη γραμμικής ελαστικής σχέσης τάσης-παραμόρφωσης. Η μη γραμμική Cauchy ελαστικότητα, η ποροελαστικότητα και οι μη γραμμικές μορφές της υποελαστικότητας και της υπερελαστικότητας. Οι πολυωνυμικοί νόμοι, η υποελαστικότητα και υπερελαστικότητα είναι δυνατόν σε ειδικές περιπτώσεις να μεταπέσουν στο γραμμικό ελαστικό νόμο (ελαστικότητα Hooke).

10.2.1 Cauchy ελαστικότητα

Στην Cauchy ελαστικότητα η τρέχουσα τασική κατάσταση, σ , εξαρτάται από την τρέχουσα παραμορφωσιακή κατάσταση, ε , και αντίστροφα.

10.2.2 Υποελαστικότητα

Στην θεωρία της υποελαστικότητας, ο καταστατικός νόμος διατυπώνεται στην επαυξητική μορφή τάσεων – παραμορφώσεων.

Πρακτικά, η υποελαστικότητα εφαρμόζεται για να περιγράψει φαινόμενα υπό μονοτονική φόρτιση, όχι απλά μη γραμμικά αλλά και εξόχως ανελαστικά, μέσω της χρήσης των μεταβλητών μέτρων ελαστικότητας

10.2.3 Ποροελαστικότητα

Η ποροελαστικότητα έχει προκύψει από την παρατήρηση πως κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση υπό συνθήκες ισότροπης και μονοδιάσταστατης παραμόρφωσης η συμπεριφορά μπορεί να προσομοιωθεί γραμμικά στο επίπεδο $v - \ln\sigma$ (Σχέση 10.3).

$$v = v_0 - \kappa \ln \frac{p}{p_0} \quad (10.3)$$

$$\ln v = \ln v_0 - \rho_s \ln \frac{p}{p_0} \quad (10.4)$$

όπου v_0 ο αρχικός ειδικός όγκος, σ_0 η αρχική μέση ορθή τάση και κ σταθερά που εκφράζει την κλίση σε επίπεδο $v - \ln\sigma$.

Σύμφωνα με τον *Gens* οι κλάδοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης για διάφορα επίπεδα τάσης προφόρτισης και διάφορους λόγους τάσης $\eta = \eta = et$ είναι όμοιοι μεταξύ τους στο επίπεδο $\nu - p'$. Η σχέση 10.3 αποτελεί μια διατύπωση της ποροελαστικότητας, ενός νόμου ψευδοελαστικού ενώ η σχέση 10.4 μπορεί να προκύψει από τη θεώρηση συνάρτησης ελαστικού δυναμικού.

Συνεπώς, η μεταβολή του όγκου εξαρτάται και από την αρχική κατάσταση, δηλαδή από την τάση προφόρτισης. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει δομή λόγω ιστορίας φόρτισης. Στις άμμους, όσο αυξάνει η θραύση των κόκκων και συνεπώς το υλικό γίνεται καλύτερα διαβαθμισμένο, τόσο λιγότερο ομαλή είναι η μετάβαση από την καμπύλη επαναφόρτισης στην ICC.

10.2.4 Υπερελαστικότητα-Green Ελαστικότητα

Η θεωρία της υπερελαστικότητας ή green ελαστικότητας υποθέτει ότι υπάρχει μια συνάρτηση παραμόρφωσης ενέργειας ε_{ij} και μια συμπληρωματική συνάρτηση ενέργειας σ_{ij} για τις οποίες ισχύει:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U_s}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (10.5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial U_c}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10.6)$$

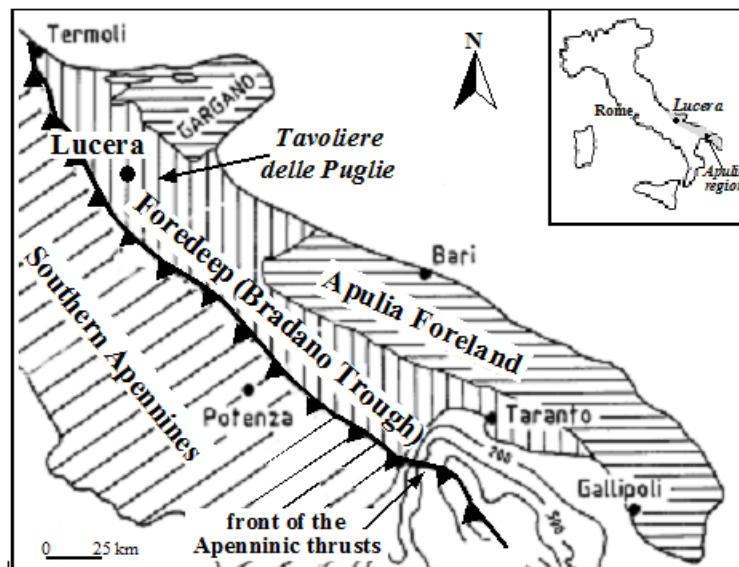
11 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ LUCERA

Το παρόν Κεφάλαιο 11 ασχολείται με την προσομοίωση πειραματικών δεδομένων, η οποία έγινε στην αναζυμωμένη και στη φυσική άργιλο Lucera, με δεδομένα από τη διατριβή της Simona Guglielmi, 2017. Στη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία αναπτύσσεται και ερμηνεύεται η μηχανική απόκριση των εδαφών, ιδίως των ιταλικών αργίλων Lucera και Pappadai, και συνδυάζεται η διερεύνηση της μακρο-συμπεριφοράς των εδαφικών στοιχείων, μέσω εργαστηριακών πειραματικών δοκιμών, με την παρατήρηση των χαρακτηριστικών και των διεργασιών του εδάφους σε μικροκλίμακα. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζουμε κυρίως στην άργιλο Lucera και τα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιούνται προκειμένου να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά της αργίλου υπό διαφορετικές τασικές οδεύσεις, πριν και μετά την τάση διαρροής, σε θλίψη και διάτμηση.

11.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της αργίλου Lucera

Η φυσική σκληρή άργιλος Lucera που μελετήθηκε ανήκει στον σχηματισμό των μπλε αργίλων στα Απέννινα όρη. Εμφανίζεται στις λοφώδεις πλαγιές της πόλης Lucera, στη βόρεια Απουλία. Τον τελευταίο αιώνα, οι δύσκαμπτες αργιλικές πλαγιές αυτού του λόφου υποβλήθηκαν σε εντατική λατομική εκσκαφή, η οποία άλλαξε τη μορφολογία τους και επηρέασε σοβαρά τη σταθερότητά τους. Δύο από αυτά τα λατομεία βρίσκονται στη ρίζα της βόρειας πλαγιάς του λόφου Lucera, το λατομείο Fiamma όπου εξακολουθεί να είναι ενεργό και το λατομείο Pca του οποίου η εκσκαφή σταμάτησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το λατομείο Pca βρισκόταν στην πλαγιά του πρανούς ενός νοσοκομείου, του οποίου η αστάθεια προκάλεσε την ανάγκη διεύρυνσης του πρανούς. Το νοσοκομείο έχει πλέον σταθεροποιηθεί αλλά η άργιλος Lucera συνεχίζει να μελετάται.

Στον λόφο Lucera πραγματοποιήθηκαν αρκετές γεωτρήσεις βάθους 10 έως 70 μέτρων. Ακολούθησαν μελέτες για τις γεωτεχνικές ιδιότητες και την μηχανική συμπεριφορά των αδιατάρακτων αργιλικών δειγμάτων.



Σχήμα 11.1 Γεωλογικός χάρτης της Νότιας Ιταλίας (Guglielmi, 2017)

Τα εδάφη του λόφου Lucera ανήκουν στον σχηματισμό Sub-Apennine Blue Clay. Στην περιοχή που μελετήθηκε, παρατηρήθηκε ότι αυτές οι θαλάσσιες ακολουθίες αποτελούνται από αλλουβιακές αποθέσεις άμμου και κροκαλοπαγή.

Συνολικά, οι άργιλοι της περιοχής χαρακτηρίζονται ως σκληρές, ιλυώδεις, γκριζου χρώματος και περιλαμβάνουν αμμώδη και ιλυώδη στρώματα. Επιπλέον, το ανώτερο τμήμα αυτών των αργίλων, πάχους περίπου 6 m, είναι συχνά αποσαθρωμένο, κίτρινου χρώματος και με υψηλότερη περιεκτικότητα σε ιλύ και άμμο (Amorosi et al., 2003- Santaloia et al., 2004).

Από τα εδαφικά αδιατάρακτα δείγματα που λήφθηκαν, το ένα, στα 25 μέτρα βάθος, μελετήθηκε από την Cotecchia (2003). Ύστερα η (Guglielmi, 2017) χρησιμοποίησε το δεύτερο εδαφικό δείγμα και σύγκρινε τα δεδομένα. Τα αποτελέσματα και των δύο δείχνουν ότι οι διαφορές μεταξύ των δειγμάτων είναι αμελητέες, και επομένως η περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα άκαμπτο γκρίζο απόθεμα αργίλου με ομοιόμορφες γεωτεχνικές ιδιότητες.

Η άργιλος Lucera παρουσιάζει περιεκτικότητα σε νερό w περίπου 20%, σχετικά χαμηλό δείκτη πόρων e περίπου 0.55, μέτρια πλαστικότητα $PI = 24-25\%$. Τα δείγματα που ερευνήθηκαν αποτελούνται κυρίως από φυλλοπυριτικά άλατα, ακολουθούμενα από χαλαζία και ασβεστίτη, με δευτερεύοντα τα αστίδια. Τα κυρίαρχα αργιλικά ορυκτά είναι ο ενδοστρωματικός ιλλίτης/σμεκτίτης, με 40-45% στρώματα ιλλίτη, ακολουθούμενα από καολινίτη, ιλλίτη και χλωρίτη.

11.2 Εργαστηριακές δοκιμές

Για την άργιλο Lucera πραγματοποιήθηκε ένα εκτενές πρόγραμμα μικροδοκιμών και μακροδοκιμών. Για την συγκεκριμένη άργιλο η συγγραφέας Simona Guglielmi χρησιμοποίησε προηγούμενα δεδομένα δοκιμών από τους Longo (2003) και Losacco (2004) σε φυσική αλλά και αναζυμωμένη άργιλο προκειμένου να συγκρίνει την συμπεριφορά του υλικού. Πιο αναλυτικά, από τη συγγραφέα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης και ισότροπης συμπίεσης στη φυσική και αναζυμωμένη άργιλο Lucera, όπως και δοκιμές διάτμησης, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της σε διαφορετικές τασικές οδεύσεις και σε διαφορετικά επίπεδα τάσης-παραμόρφωσης πριν και μετά την τάση διαρροής. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματά τους αναγράφονται παρακάτω.

11.2.1 Μονοδιάστατη (1D) συμπίεση

Τα αποτελέσματα της δοκιμής οιδημέτρου αναφέρονται παρακάτω και συζητείται η σχέση μεταξύ των παραμέτρων δυσκαμψίας M , του συντελεστή μονοδιάστατης στερεοποίησης C_v , του δείκτη συμπίεστότητας C_c , του δείκτη διόγκωσης C_s , της υδραυλικής αγωγιμότητας k και του λόγου τάσης διαρροής $YSR = \sigma'_{vy} / \sigma'_{vo}$. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν έξι δοκιμές σε φυσική άργιλο και δύο δοκιμές σε αναζυμωμένη.

Δοκιμή	Δείγμα	$W_o(\%)$	e_o	$Sr\%$	Φόρτιση / Αποφόρτιση	σ'_{vo}	$\sigma'_{v_{max}}$ ή $\sigma'_{v_{min}}$
EDOL1	Φυσική άργιλος Lucera	19.86	0.563	95.73	Φόρτιση	800	5000
EDOL2	Φυσική άργιλος Lucera	19.71	0.564	94.91	Φόρτιση	800	18450
EDOL3	Φυσική άργιλος Lucera	19.42	0.545	96.69	Φόρτιση	800	1440
EDOL4	Φυσική άργιλος Lucera	19.60	0.565	94.14	Φόρτιση	840	5000
EDOL6	Φυσική άργιλος Lucera	18.08	0.545	95.30	Αποφόρτιση- Φόρτιση- Αποφόρτιση	800	10-5000
EDOL7	Φυσική άργιλος Lucera	18.08	0.534	92.04	Αποφόρτιση	880	20
LUCR1	Αναζυμωμένη άργιλος Lucera	33.36	0.936	96.79	Φόρτιση	100	15000
EDORS	Αναζυμωμένη άργιλος Lucera	31.97	0.890	97.57	Φόρτιση- Αποφόρτιση	60	5000-10

Πίνακας 11.1 Δοκιμές μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης σε φυσική και αναζυμωμένη άργιλο Lucera

Οι καμπύλες της μονοδιάστατης συμπίεσης της αργίλου Lucera σχεδιάστηκαν στο παρακάτω διάγραμμα. Παρατηρείται με χρήση της μεθόδου Casagrande ([Ενότητα 5.1.2](#)) ότι η τάση διαρροής είναι περίπου $\sigma'_{y} = 2600 \text{ kPa}$ για λόγω κενών $e = 0.51$, σε αντίθεση με της Guglielmi $\sigma'_{y} = 2700 - 2800 \text{ kPa}$.

Στο Σχήμα 11.2 και 11.3 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε άξονες $e-\ln\sigma'_v$. Παρατηρείται ότι το αναζυμωμένο δοκίμιο (EDORS) ήταν αρχικά ελαφρώς υπερστερεοποιημένο λόγω της μείωσης της μύζησης (*suction*) ως συνέπεια της αποφόρτισης στο οιδήμετρο. Στη δοκιμή EDOL6 η τασική όδευση κατά την επαναφόρτιση μετά από σημαντική διόγκωση παρατηρείται ότι τέμνει την αρχική κατάσταση της αργίλου (e_0, σ'_{v0}) και στη συνέχεια συνεχίζει προς την τάσης διαρροής. Η καμπύλη φαίνεται να είναι σε συμφωνία με τη δοκιμή EDOL1, που εμφανίζεται ελαφρώς χαμηλότερα, επίσης συμπίεσμένη από την αδιατάρακτη κατάσταση. Η ομοιότητα μεταξύ των καμπυλών συμπίεσης υποδηλώνει ότι στατικές αλλαγές ίσως προκύψουν λόγω της μύζησης, παρότι οι τασική όδευση της αποφόρτισης είναι αρκετά μεγάλη.

Η Εγγενής Καμπύλη Συμπίεσης Μονοδιάστατης Παραμόρφωσης (*One Dimensional Intrinsic Compression Curve*) K_0 -ICC προσομοιώνεται από τις σχέσεις 11.1 και 11.2 (οι οποίες είναι αντίστοιχες των σχέσεων 11.6 και 11.7). Μάλιστα, είναι καλή προσέγγιση, οι καμπύλες ICC και K_0 -INCL να θεωρούνται παράλληλες.

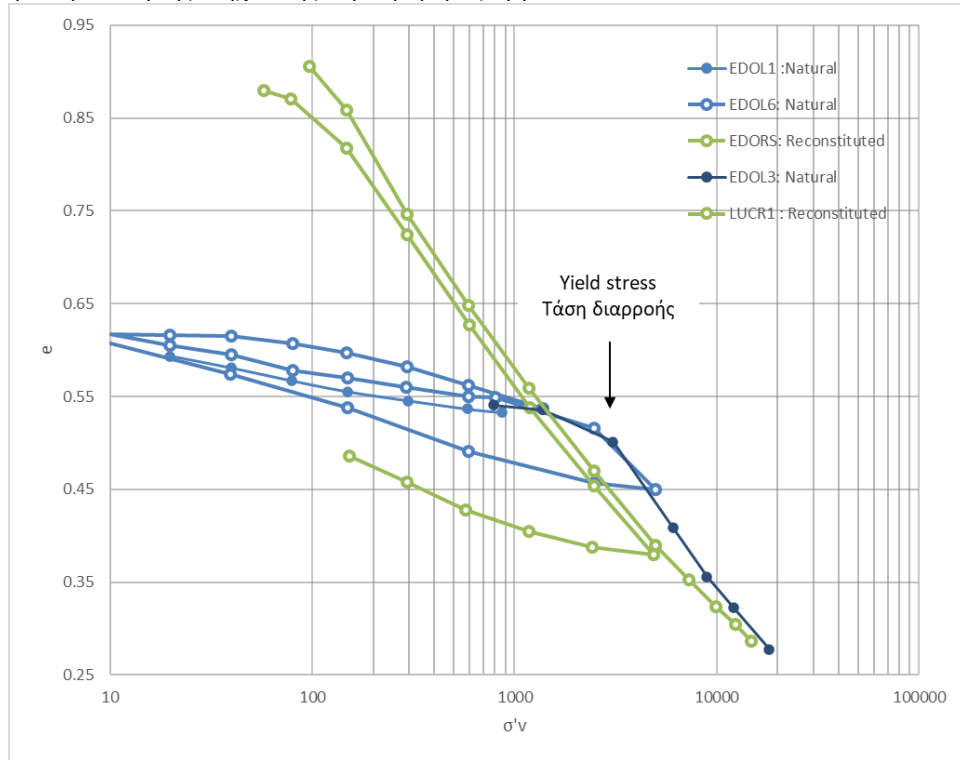
$$v = N_{K0} - \lambda_{K0} \cdot \ln p' \quad (11.1)$$

$$\ln v = \ln N_{K0} - \rho_{K0} \cdot \ln p' \quad (11.2)$$

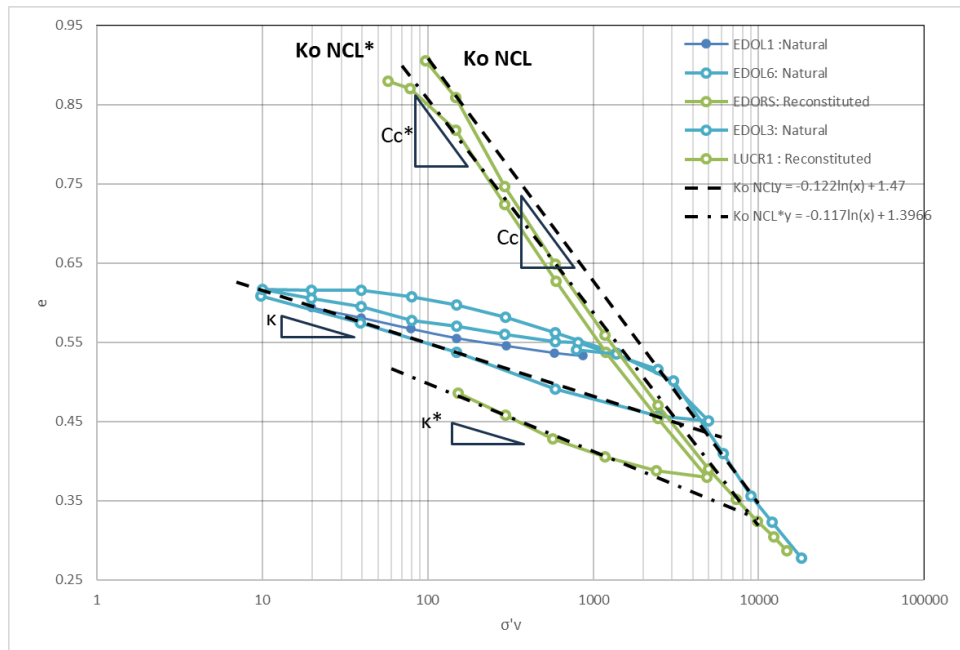
Ύστερα έγινε μετατροπή των αξόνων του Σχήματος 11.3 από $e-\ln\sigma'_v$ σε $v-\ln p'$ (Σχήμα 11.4) προκειμένου να μελετηθούν επιπλέον παράμετροι χρησιμοποιώντας τη σχέση του ειδικού όγκου $v=1+e$ και την Σχέση 11.3:

$$p' = \left(1 + \frac{2 * K_0}{3}\right) * \sigma'_v \quad (11.3)$$

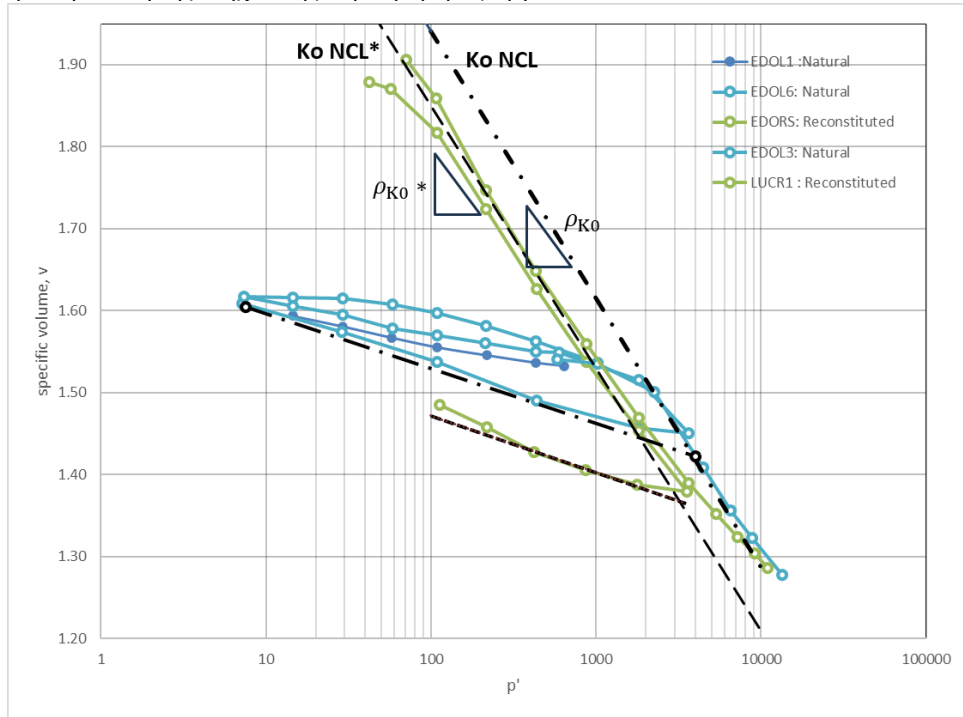
Σύμφωνα με το διάγραμμα $e-\ln\sigma'_v$ βρέθηκε $N_{K0}=2.47$ και $N_{K0}^*=2.3966$ ενώ στο διάγραμμα $v-\ln p'$ βρέθηκε $N_{K0}=2.59$ και $N_{K0}^*=2.49$. Επομένως οι τιμές κυμαίνονται σε κοντινά πλαίσια. Στο Σχήμα 11.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε άξονες $(\ln v, \ln p')$. Η επεξεργασία του Σχήματος 11.5 έγινε για λόγους βαθύτερης κατανόησης της αντίδρασης των δοκιμών στην μονοδιάστατη συμπίεση και για να ερμηνευτούν οι σταθερές της δοκιμής, όπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.2. Επιπρόσθετα, η κλίση της γραμμής K_0 NCL στο διάγραμμα $v, \ln p'$ βρέθηκε $\rho_{K0}=0,142$ και για την αναζυμωμένη άργιλο βρέθηκε $\rho_{K0}^*=0,139$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.4



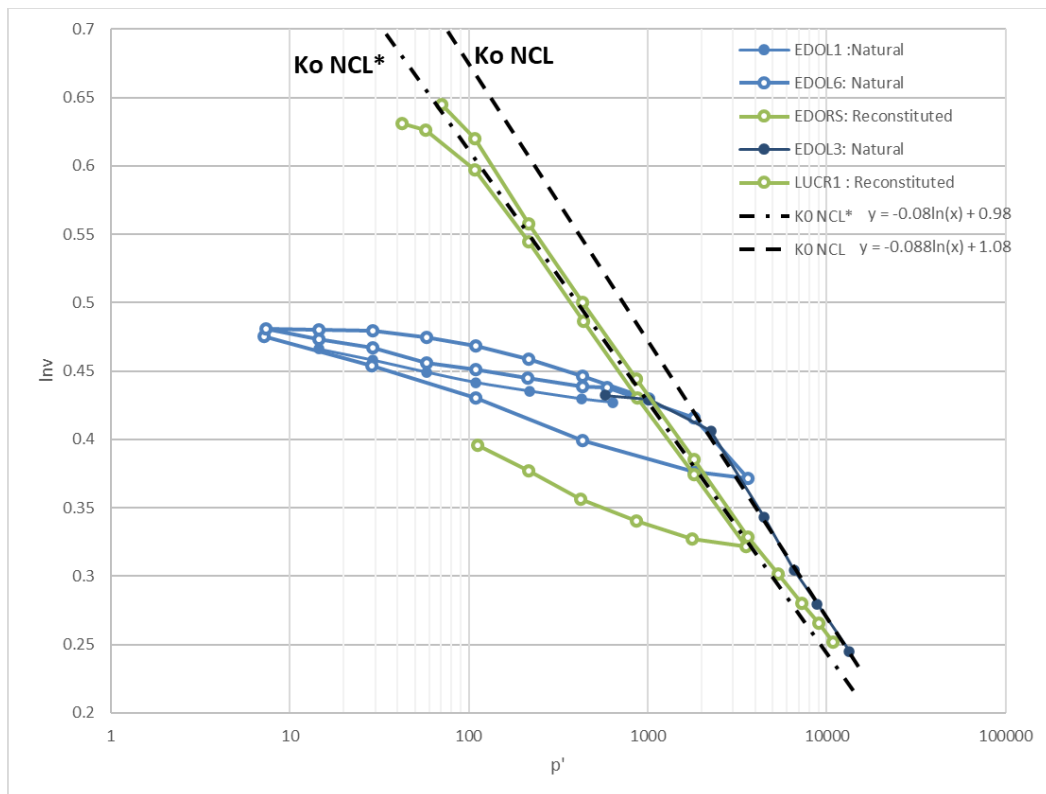
Σχήμα 11.2 Καμπύλες παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιάστατης (1D) παραμόρφωσης της αργίλου Lucera σε ϵ, σ' (Guglielmi, 2017)



Σχήμα 11.3 Καμπύλες παραμόρφωσης μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης της αργίλου Lucera σε άξονες $\epsilon, \ln \sigma'$



Σχήμα 11.4 Καμπύλες παραμόρφωσης μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης της αργίλου Lucera σε άξονες $v, \ln p'$ (Guglielmi, 2017)



Σχήμα 11.5 Καμπύλες παραμόρφωσης μονοδιάστατης (1D) συμπίεσης της αργίλου Lucera σε άξονες $(\ln v, \ln p')$ (Guglielmi, 2017)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης παρατηρήθηκε για τη φυσική άκαμπτη άργιλο, η δοκιμή του οιδημέτρου φαίνεται να κλείνει κυρίως ενός μεγαλύτερους πόρους μεταξύ των αδρανών, ως συνέπεια ενός μείωσης του λόγου κενών. Πριν από τη διαρροή, εμφανίζονται πολύ μικρές αλλαγές στην κατανομή των πόρων, με αντίστοιχες πολύ περιορισμένες τροποποιήσεις του ιστού.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων ενός Guglielmi, 2017 οδηγεί ενός εγγενείς ιδιότητες του Πίνακα 11.2, που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

	$\rho_{K0,Cc}$	N_{K0}	ρ_{K0^*,Cc^*}	N^*_{K0}	κ	κ^*	K_0
Lucera	0.142	2.595	0.139	2.49	0.029	0.037	0.6011

Πίνακας 11.2 Τιμές σταθερών ενός αργίλου Lucera από τη δοκιμή 1Δ συμπίεσης.

Πιο αναλυτικά, ο υπολογισμός του K_0 έγινε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$K_{0(NC)} = 1 - \sin\phi \text{ (Jacky)} \quad (11.4)$$

$$M = \frac{6\sin\phi}{3 - \sin\phi} \quad (11.5)$$

11.2.2 Ισότροπη συμπίεση

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές ισότροπης συμπίεσης στη φυσική άργιλο σε μέσες πιέσεις (TNL 5 και TNL12) και μία δοκιμή (LUCRISO) στην αναζυμωμένη άργιλο ενός φαίνεται στον Πίνακα 11.3.

Όνομα δοκιμής	Δείγμα	$W_o(\%)$	e_o	Sr%	Φόρτιση ή αποφόρτιση	σ'_{v_o}	$\sigma'_{v_{max}}$ ή $\sigma'_{v_{min}}$
TNL5	Φυσική άργιλος Lucera	19.76	0.549	95.73	Φόρτιση	800	5000
TNL12	Φυσική άργιλος Lucera	19.70	0.564	94.91	Φόρτιση	800	18450
LUCRISO	Αναζυμωμένη άργιλος Lucera	33.55	0.545	96.69	Φόρτιση	800	1440

Πίνακας 11.3 Δοκιμές ισότροπης συμπίεσης σε φυσική και αναζυμωμένη άργιλο Lucera

Τα αποτελέσματα της ισότροπης συμπίεσης προδίδουν την Ισοτροπική Γραμμή Κανονικής Φόρτισης (*Isotropic Normal Compression Line, INCL*), με κλίση $\lambda=0,14$. Για την αναζυμωμένη άργιλο, οι ισότροπες καμπύλες συμπίεσης προδίδουν την Ισοτροπική Γραμμή Κανονικής Φόρτισης *INCL** με κλίση $\lambda^*=0.139$.

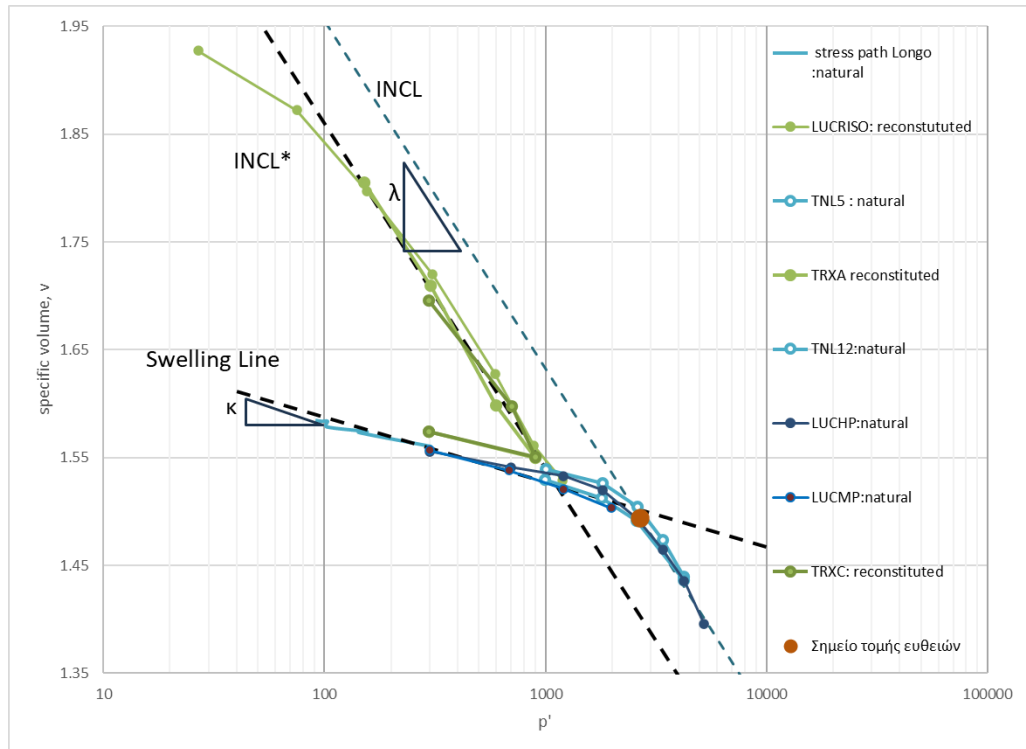
$$v = N_{iso} - \lambda \cdot \ln p' \quad (11.6)$$

Όπου $v = 1 + e$ και N_{iso} ο λόγος κενών για $p'=1$ kPa.

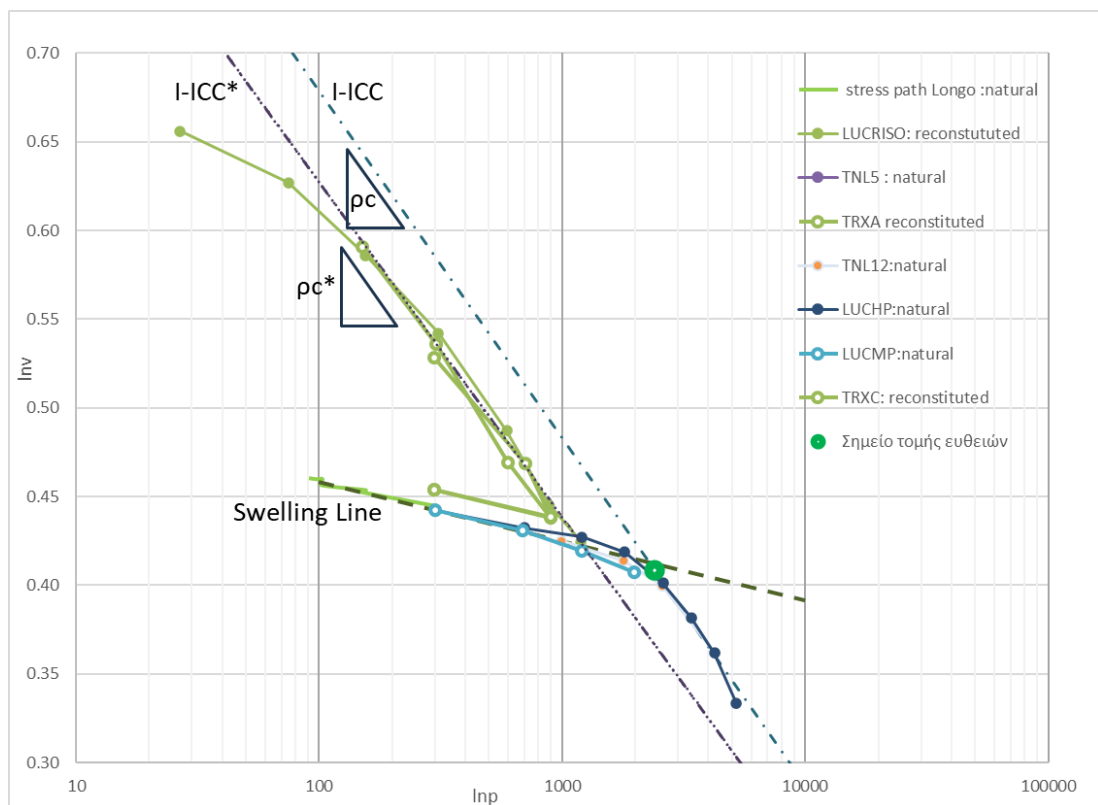
Εναλλακτικά η *INCL* περιγράφεται από τη Σχέση 11.7 (Hashiguchi, 1995, 1977; Butterfield 1979), η οποία αποτελεί καλύτερη προσέγγιση για μεγαλύτερο εύρος εφαρμοζόμενων τάσεων, με πλεονέκτημα το ότι δεν μπορεί να προβλέψει αρνητικό λόγο κενών. Επιπλέον, η γραμμική απόκριση $\ln v - \ln p$ μπορεί να προκύψει από θερμοδυναμικές θεωρήσεις ενός δυναμικού ενέργειας παραμόρφωσης, Houlsby (1982).

$$\ln v = \ln N_{iso} - \rho_c \cdot \ln p' \quad (11.7)$$

Στη σχέση 11.7 τα N_{iso} και ρ_c αποτελούν σταθερές που εκφράζουν τη θέση και την κλίση της Ισοτροπικής Εγγενούς Καμπύλης Συμπίεσης (Isotropic Intrinsic Compression Curve) I-ICC στο επίπεδο $\ln v - \ln p'$. (Σχήμα 11.7).



Σχήμα 11.6 Καμπύλες παραμόρφωσης ισότροπης συμπίεσης αργίλου Lucera (Guglielmi, 2017)



Σχήμα 11.7 Διάγραμμα $\ln v - \ln p'$ ισότροπης συμπίεσης αργίλου Lucera

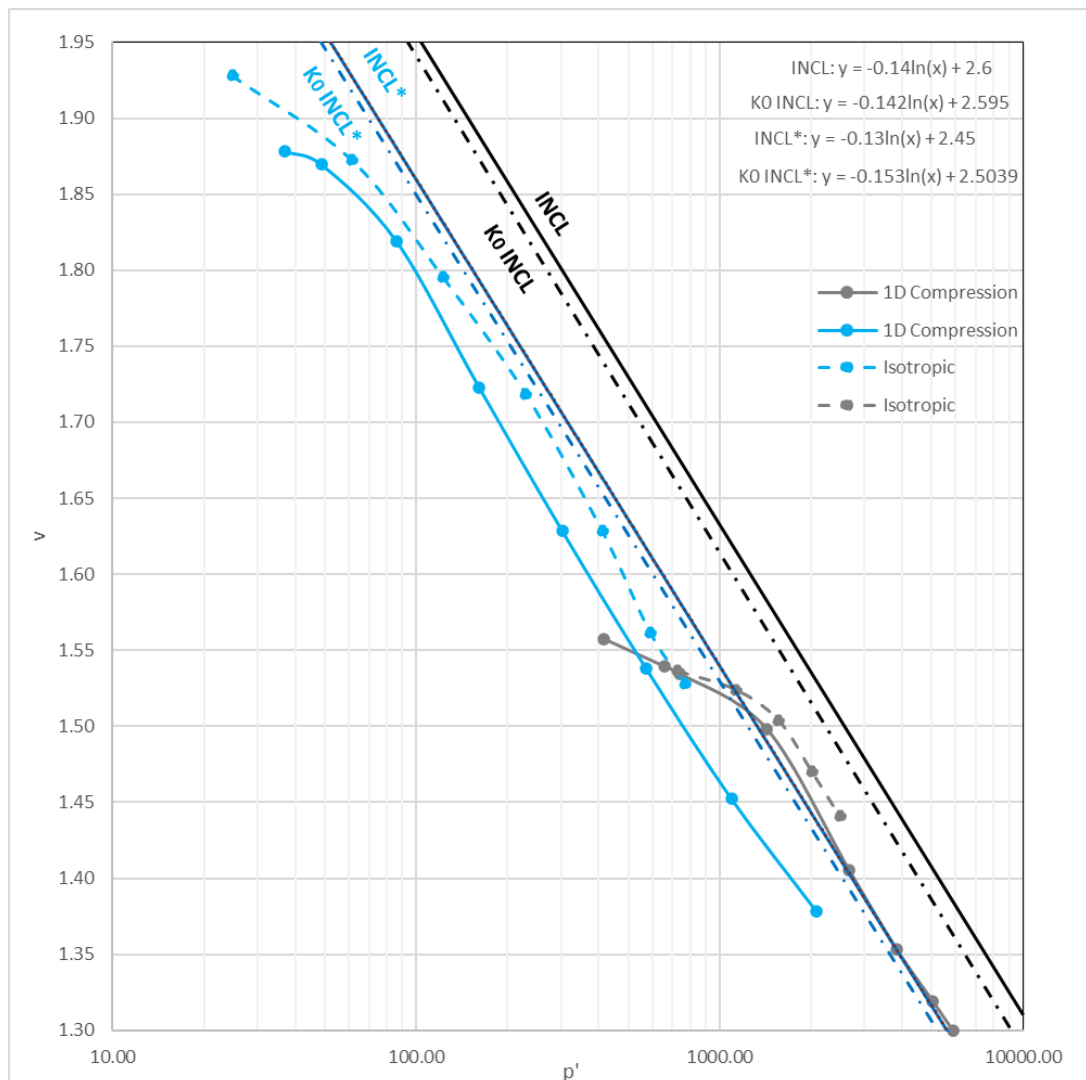
Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε τάση διαρροής για $p' = 2400-2700$ kPa η οποία φαίνεται στο σημείο τομής των ευθειών του Σχήματος 11.6 και 11.7.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ισότροπης συμπίεσης της Guglielmi, 2017 οδηγεί στις εγγενείς ιδιότητες του Πίνακα 11.4 που προκύπτουν από την παρούσα εργασία. Η κλίση της γραμμής επαναφόρτισης βρέθηκε $\kappa = 0.026$, ίδια με της μονοδιάστατης συμπίεσης.

	λ_{iso}	N_{iso}	λ^*	N^*_{iso}	κ	ρ_c	ρ_c^*
Lucera	0.14	2.6	0.139	2.5	0.026	0.085	0.082

Πίνακας 11.4 Τιμές σταθερών της αργίλου Lucera που προκύπτουν από την ισότροπη συμπίεση

Παρακάτω, στο Σχήμα 11.8 απεικονίζονται τα δεδομένα από τις δοκιμές μονοδιάστατης και ισότροπης συμπίεσης ταυτόχρονα. Οι γραμμές INCL και K_0 INCL φαίνονται να είναι παράλληλες, επιβεβαιώνοντας την θεωρία κρίσιμης κατάστασης.



Σχήμα 11.8 Συμπεριφορά της αργίλου Lucera σε ισότροπη (διακεκομμένες γραμμές) και μονοδιάστατη (συνεχόμενες γραμμές) συμπίεση.

11.2.3 Δοκιμή διάτμησης

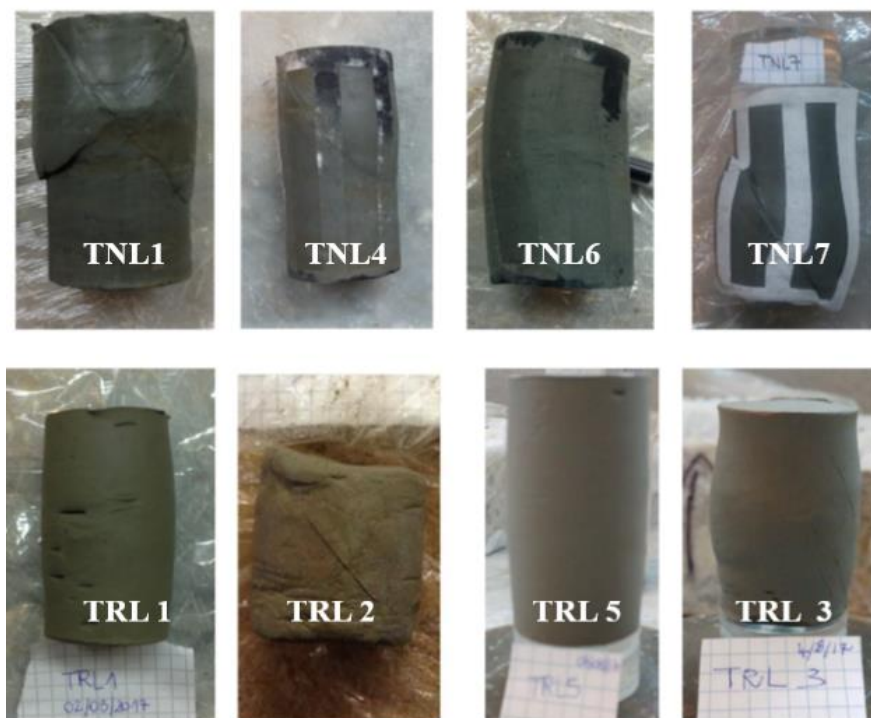
Οι δοκιμές διάτμησης στην αναζυμωμένη και φυσική άργιλο Lucera αναφέρονται στον Πίνακα 11.5 και 11.6. Όλα τα δοκίμια της αναζυμωμένης άργιλου στερεοποιήθηκαν από πολύ σε κατακόρυφη τάση ίση με 100 kPa. Τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ισότροπα σε καταστάσεις είτε πριν είτε μετά τη διαρροή και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε διάτμηση, είτε στραγγισμένη είτε αστράγγιστη. Οι δοκιμές διάτμησης στην φυσική άργιλο έχουν σκοπό την ανάλυση της συμπεριφοράς της άργιλου πριν αλλά και μετά την Επιφάνεια Οριακής Κατάστασης SBS ([Κεφάλαιο 8.5](#)), γιατί πραγματοποιήθηκαν δύο αστράγγιστες (*undrained*) δοκιμές οι οποίες διακόπηκαν στα μισά της τασικής όδευσης. Παρατίθεται φωτογραφίες μετά το τέλος των δοκιμών από κάποια δείγματα στο Σχήμα 11.9.

Όνομα δοκιμής	Δείγμα	Wo (%)	eo	Sr (%)	P'p (kPa)	e πριν την παραμόρφωση	Είδος δοκιμής	Ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης (%/min)
TRL1	Αναζυμωμένη άργιλος Lucera	34.16	0.936	99	65	0.878	D	0.0003
TRL2		33.50	0.926	99	30	0.926	U	0.003
TRL3		32.97	0.900	99	442	0.657	U	0.003
TRL5		32.83	0.897	99	43	0.859	D	0.0003

Πίνακας 11.5 Δοκιμές απλής διάτμησης στην αναζυμωμένη άργιλο

Όνομα δοκιμής	Δείγμα	Wo (%)	eo	Sr (%)	P'p (kPa)	YSR	e πριν την παραμόρφωση	Διάτμηση	Ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης (%/min)
TNL1	Φυσική άργιλος Lucera	19.87	0.544	99	881	3	0.546	U	0.003
TNL4		19.86	0.544	99	879	3	0.544	D	0.0003
TNL6		20.11	0.547	100	1637	1.6	0.523	U	0.003
TNL7		18.64	0.528	96	1590	1.6	0.518	D	0.0003
TNL10		18,87	0.531	96	878	3	0.569	U	0.003
TNL11		18.51	0.531	95	1675	1.6	0.529	U	0.003
TNL12		18.12	0.524	94	4004	1	0.431	U	0.003

Πίνακας 11.6 Δοκιμές απλής διάτμησης στη φυσική άργιλο

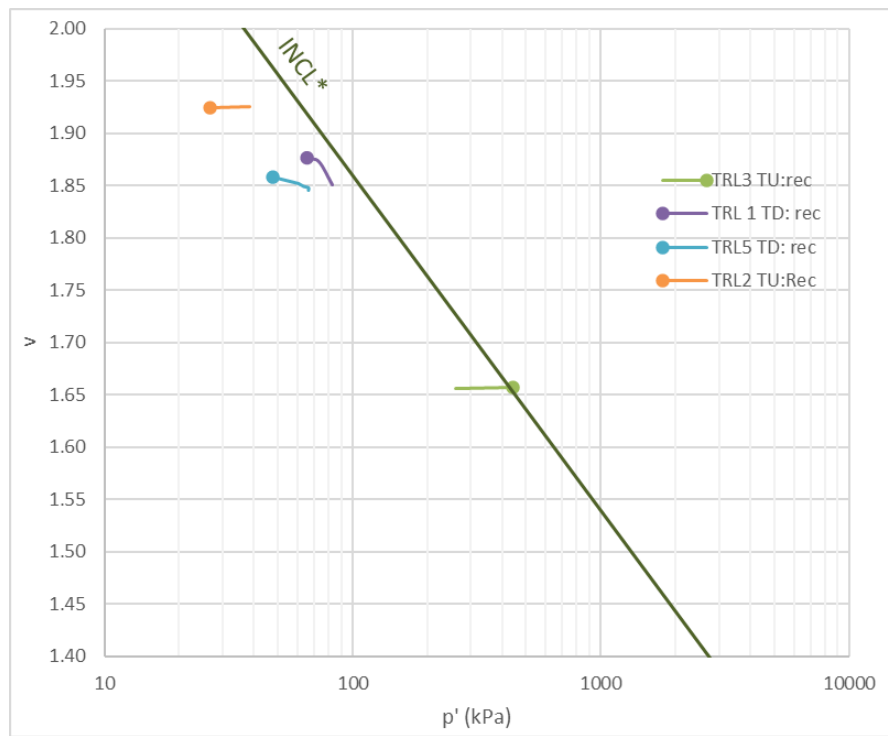


Σχήμα 11.9 Εικόνες δειγμάτων αργίλου Lucera στο τέλος της διατμητικής δοκιμής. Οι πάνω εικόνες είναι φυσικός άργιλος, οι κάτω εικόνες είναι η αναζυμωμένη. (Guglielmi, 2017)

Το δοκίμιο TNL1 παρατηρείται ότι έχει παραμορφωθεί συμμετρικά, παρουσιάζει διατμητική αστοχία σχήματος X. Το δοκίμιο TNL 4 παρουσιάζει διαφοροποίηση στη διατομή του και ξεκάθαρη διατμητική αστοχία χωρίς διόγκωση, με επιφάνεια αστοχίας να σχηματίζει γωνία περίπου 45°. Το δοκίμιο TNL 6 και TNL 7 παρουσιάζουν έντονη παραβολική διόγκωση παραμόρφωση στη διατομή τους η οποία φαίνεται από την απορροφητική λευκή ταινία. Τα TRL 1, TRL5, TRL3 παραμορφώθηκαν σε ευκρινές σχήμα βαρελιού, αλλά δεν υπήρχαν ορατά επίπεδα διάτμησης. Παρατηρείται επίσης ότι το μέγεθος του αναζυμωμένου δοκιμίου TRL2 είναι μικρότερο από ό,τι αμέσως μετά τη δοκιμή διάτμησης, καθώς η φωτογραφία έχει ληφθεί μετά την κοπή των άκρων του δοκιμίου για την τελική μέτρηση της περιεκτικότητας σε νερό. Οι φωτογραφίες των δοκιμίων TNL10 και TNL11 δεν δίδονται, και δεν ελήφθησαν φωτογραφίες στο δοκίμιο TNL12. Για τα δοκίμια στα οποία σχηματίστηκε επιφάνεια αστοχίας (TNL1, TNL4, TNL7, TNL6, TRL2), λήφθηκαν τμήματα από το εσωτερικό και το εξωτερικό της διατμητικής ζώνης και υποβλήθηκαν χωριστά σε αναλύσεις.

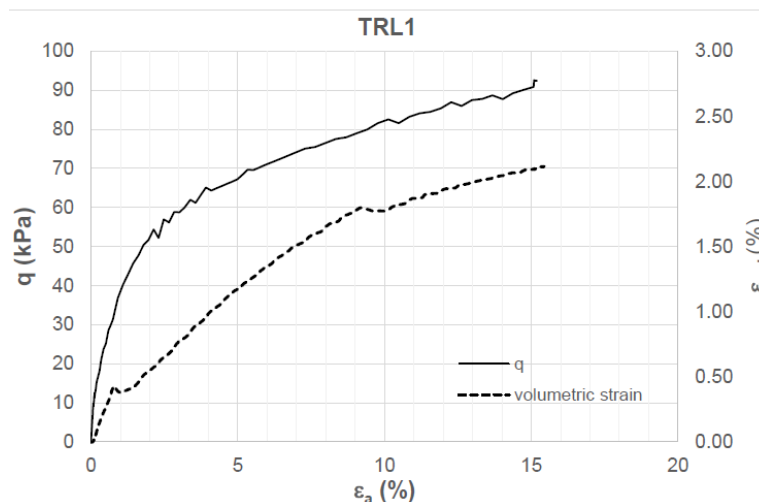
11.2.3.1 Συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης αργίλου Lucera

Στην παρακάτω παράγραφο συζητούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης της αργίλου Lucera και το Σχήμα 11.10 με το διάγραμμα ν-p' της αναζυμωμένης αργίλου. Παρατηρείται ότι το TRL2, TRL3 έχουν διαστολική συμπεριφορά ενώ το TRL1 και το TRL5 συστολική.



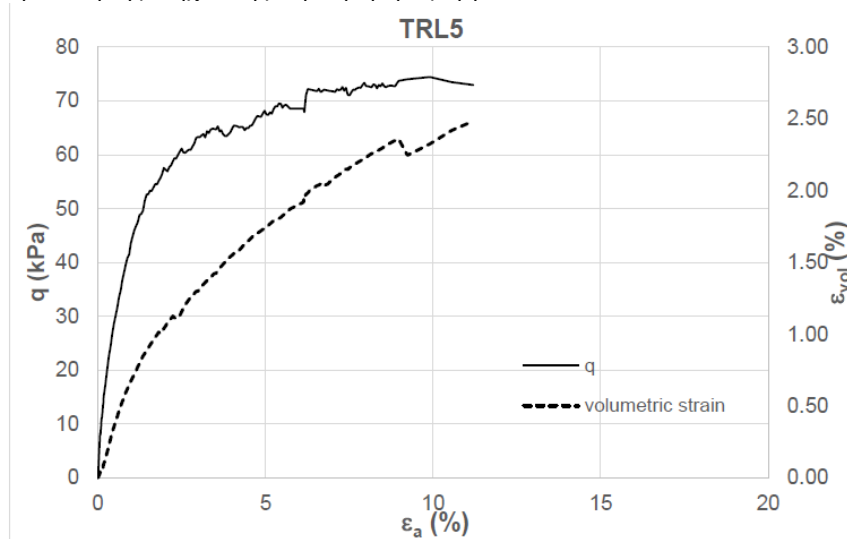
Σχήμα 11.10 Διάγραμμα $v-p'$ αναζυμωμένης αργίλου Lucera από τα αποτελέσματα δοκιμών (Guglielmi, 2017)

Στη διατμητική δοκιμή TRL1 το δοκίμιο στερεοποιήθηκε ισότροπα στα 65 kPa, χωρίς να φτάνει την ισότροπη τάση διαρροής, με αποτέλεσμα ένα ελαφρώς υπερστερεοποιημένο δοκίμιο με λόγο υπερστερεοποίησης $R=1,8$. Στο Σχήμα 11.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής διάτμησης του δοκιμίου TRL 1. Προκύπτει ότι η συμπεριφορά της αργίλου είναι συστολική, και παρατηρείται παραμορφωσιακή σκλήρυνση. Μέχρι το τέλος της δοκιμής, η κρίσιμη κατάσταση δεν επιτεύχθηκε, αν και η ογκομετρική παραμόρφωση πλησίαζε μια σταθερή τιμή και ένα αντίστοιχο q/p' ίσο με 0,88, το οποίο θα είχε ξεπεραστεί εάν η δοκιμή είχε προχωρήσει περαιτέρω.



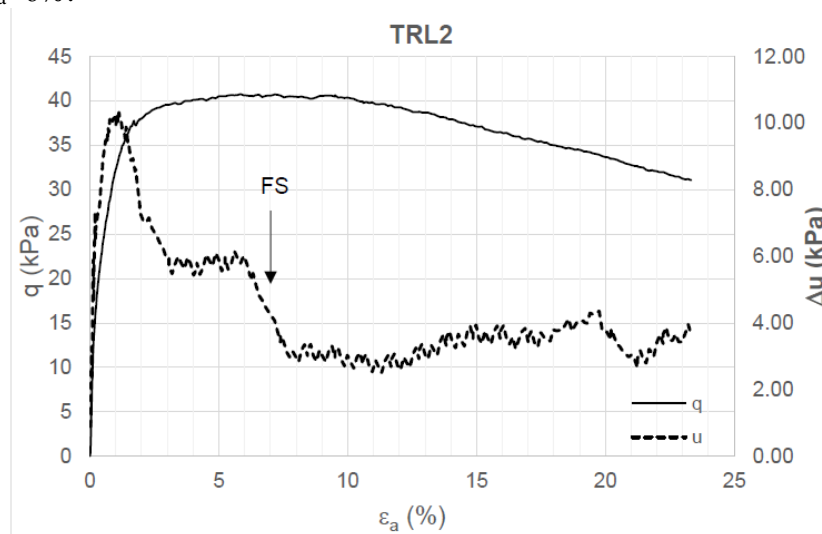
Σχήμα 11.11 Αναζυμωμένο δοκίμιο TRL 1: Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες ($R=1.8$).

Η διάτμηση του TRL 5 υπό στραγγισμένες συνθήκες παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.12. Η άργιλος συμπίεστηκε ισότροπα σε μέση ενεργή τάση ίση με την μύζηση (*suction*) της, η οποία μετρήθηκε ίση με 43 kPa στην τριαξονική συσκευή. Ως εκ τούτου, το δοκίμιο πριν από τη διάτμηση ήταν υπερσυμπυκνωμένο και χαρακτηρίστηκε από λόγο υπερστερεοποίησης $R=2,8$. Λόγω τεχνικών προβλημάτων, η δοκιμή έπρεπε να διακοπεί σε αξονική παραμόρφωση περίπου 11%. Η άργιλος είχε συστολική συμπεριφορά μέχρι το τέλος της δοκιμής, δεδομένου ότι η ογκομετρική παραμόρφωση δεν έφτασε σε σταθερή τιμή, και παρουσίασε συμπεριφορά σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης.



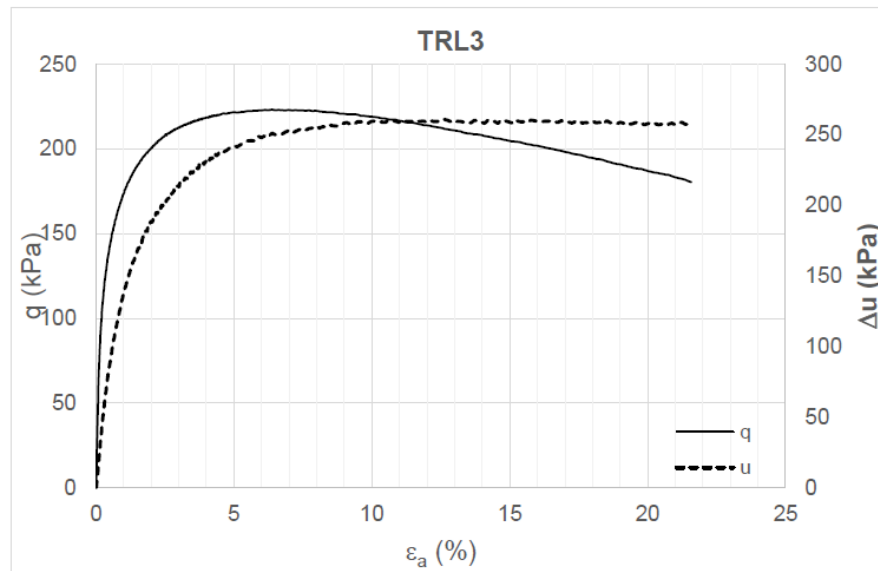
Σχήμα 11.12 Αναζυμωμένο δοκίμιο TRL 5: Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες (R=2.8). (Guglielmi, 2017)

Επιπρόσθετα, και το δοκίμιο TRL 2 στερεοποιήθηκε ισότροπα σε μέση ενεργό τάση ίση με την τάση μύζησης του (*suction*), όπου υπολογίστηκε σε αρχική αστράγγιστη φόρτιση ίση με 30 kPa, δίνοντας λόγο υπερστερεοποίησης R=4. Η αστράγγιστη διατμητική συμπεριφορά του δοκιμίου (Σχήμα 11.13) συνδέεται με μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, καθώς και μείωση της διεκτροπικής τάσης μετά από $\epsilon_a \approx 2\%$. Επίσης παρατηρήθηκε παραμορφωσιακή χαλάρωση (*strain softening*) η οποία οδήγησε σε μία επιφάνεια αστοχίας, όπου εμφανίστηκε στο στάδιο της μείωσης της πίεσης του νερού των πόρων για $\epsilon_a \approx 6\%$.



Σχήμα 11.13 Αναζυμωμένη άργιλος: συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή συμπίεσης με Στερεοποίηση σε στραγγισμένες συνθήκες (R=4). (Guglielmi, 2017)

Στην αστράγγιστη δοκιμή TRL 3, το δοκίμιο στερεοποιήθηκε ισότροπα και κανονικά. Η συμπεριφορά του στο Σχήμα 11.14 είναι συστολική και παρατηρείται παραμορφωσιακή σκλήρυνση (*strain – hardening*) για $\epsilon_a > 10\%$ όταν ξεκίνησε η μείωση της διεκτροπικής τάσης q. Η πίεση του νερού των πόρων κατά το τέλος της δοκιμής παρέμεινε σταθερή.



Σχήμα 11.14 Αναζυμωμένη άργιλος: συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης ισότροπης κανονικά στερεοποιημένης αστράγγιστης δοκιμής (R=4). (Guglielmi, 2017)

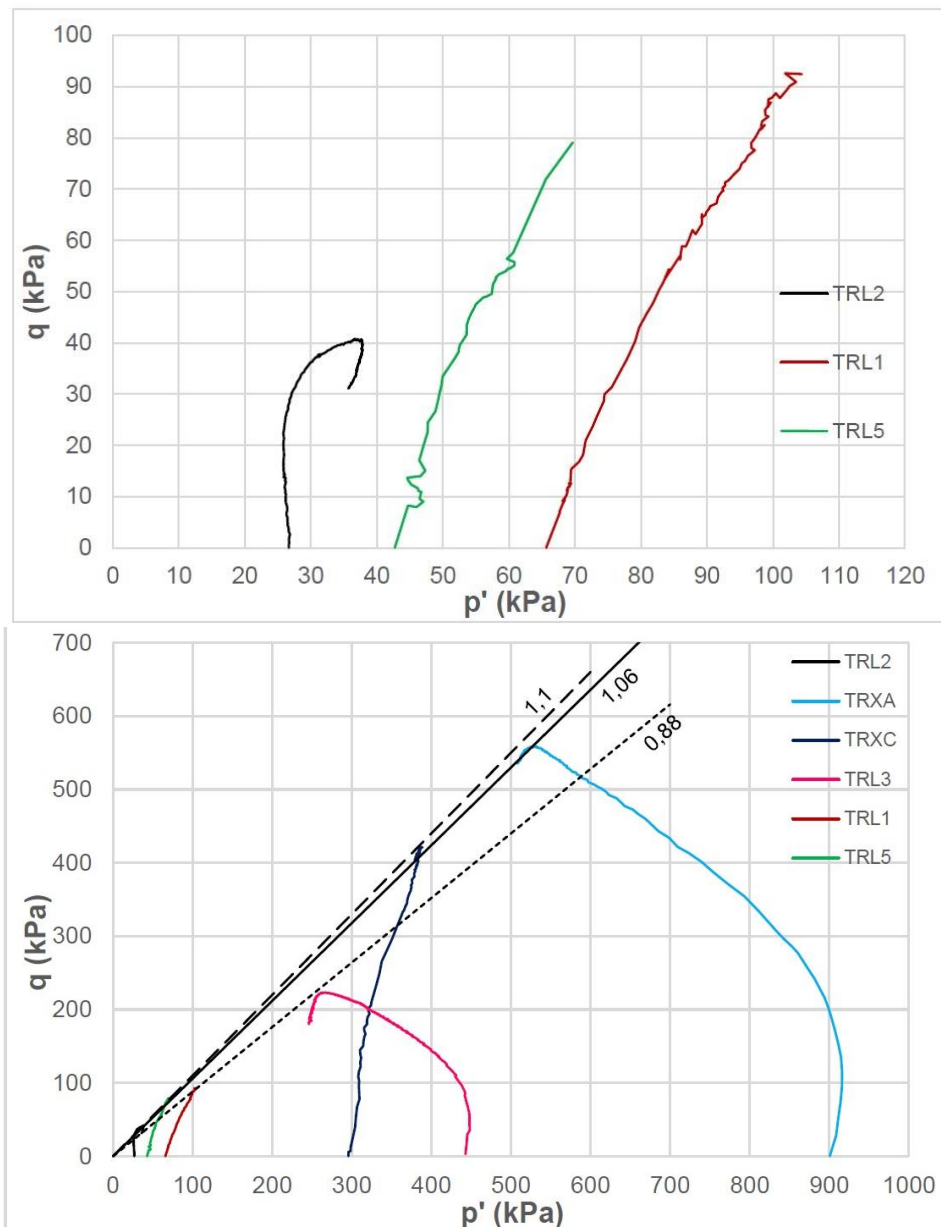
Συνολικά, όλες οι αστράγγιστες δοκιμές οδήγησαν σε σταθερή τιμή της υπερπίεσης του νερού των πόρων, ενώ αντίθετα οι στραγγισμένες δοκιμές φαίνεται να πλησιάζουν αλλά όχι να φτάνουν σε έναν σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης.

	TEST	YSR _{is}	ε _{af} (%)	(q/p') _y	(q/p') _f	α (°)
UNDRAINED	TNL1	3	15	1.1	0.85	50
	TNL7	1.6	13	0.99	0.79	50
	TNL12	1	20	0.67	0.67	47
	TRX1	7.5	13.2	1.51	0.91	60
	TRX2	3.8	21	1.27	0.84	56
	LUCMP	1.35	23	0.96	0.92	-
	LUCHP	1	19	0.78	0.89	-
DRAINED	TNL4	3	6	1.03	0.92	-
	TNL6	1.6	18	0.69	0.79	50

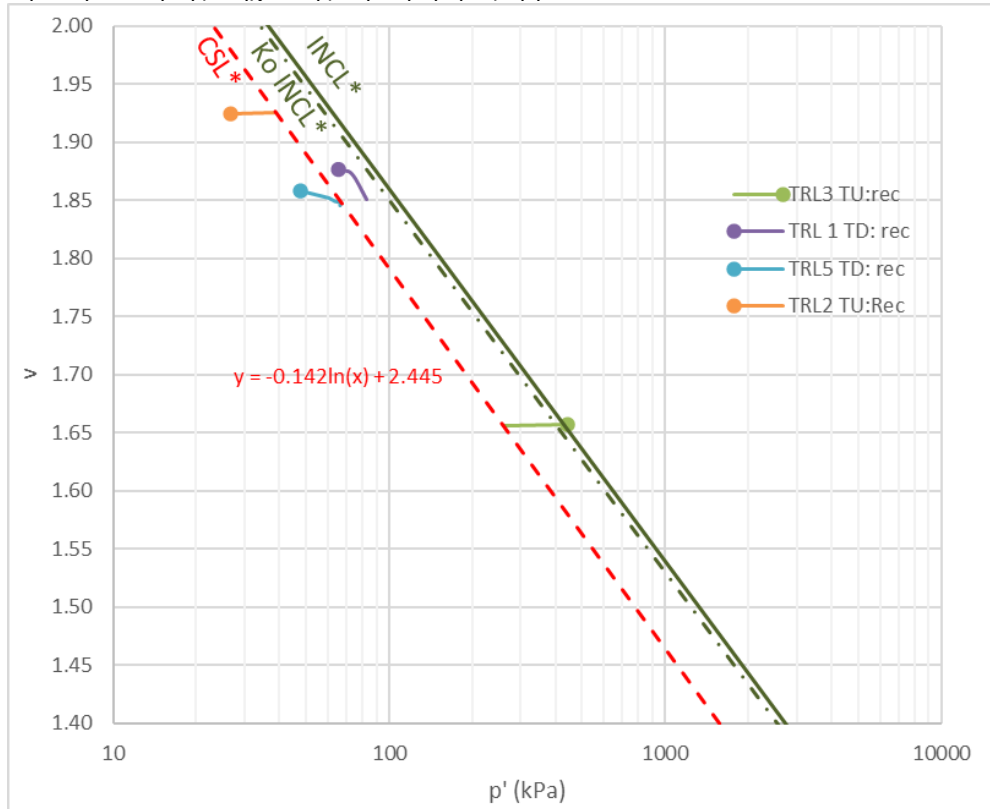
Πίνακας 11.7 Σύνοψη των αποτελεσμάτων των δοκιμών διάτμησης στη φυσική άργιλο Lucera. (Guglielmi, 2017)

11.2.3.2 Κρίσιμη Κατάσταση

Οι τασικές οδεύσεις της αναζυμωμένης αργίλου των δοκιμών TRL 1 ($R = 1,8$), TRL 2 ($R=4$) και TRL 5 ($R=2,8$) παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.15 σε άξονες $q-p'$. Δεν θα σχολιαστούν οι δοκιμές TRX A και TRX C καθώς δεν αφορούν δοκιμές της Giulielmi. Παρατηρείται ότι δοκίμια δεν έφτασαν όλα στην κρίσιμη κατάσταση, το TRL 1 διακόπηκε πολύ νωρίς, και το TRL 3 παρουσίασε ανώμαλη συμπεριφορά οπότε δεν ήταν δυνατό να οριστεί η γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Εμπειρικά με βάση τις τελικές καταστάσεις που θα έφταναν τα δοκίμια, προτάθηκε μία γραμμή κλίσης $M^* = 0,88$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.15. (Αγνοούμε τις δοκιμές TRX A και TRX C καθώς δεν συμπεριλαμβάνονται στις δοκιμές της Guglielmi, 2017 η οποία επέλεξε $M=1,06$). Η γραμμή αυτή είναι παράλληλη με τις γραμμές συμπίεσης και βρέθηκε να έχει κλίση $\lambda^*=0.141$ και τομή με τον άξονα x για $p'=1$, $\Gamma^* = 2.445$. Οι τασικές οδεύσεις σε άξονες $v-\ln p'$ κατά τη διάρκεια της διάτμησης αναπαριστώνται στο Σχήμα 11.16 στο οποίο αναφέρεται επίσης η δοκιμαστική CSL^* , μαζί με την $INCL^*$ και την $K_0 INCL^*$, όπου φαίνεται ότι είναι παράλληλες.

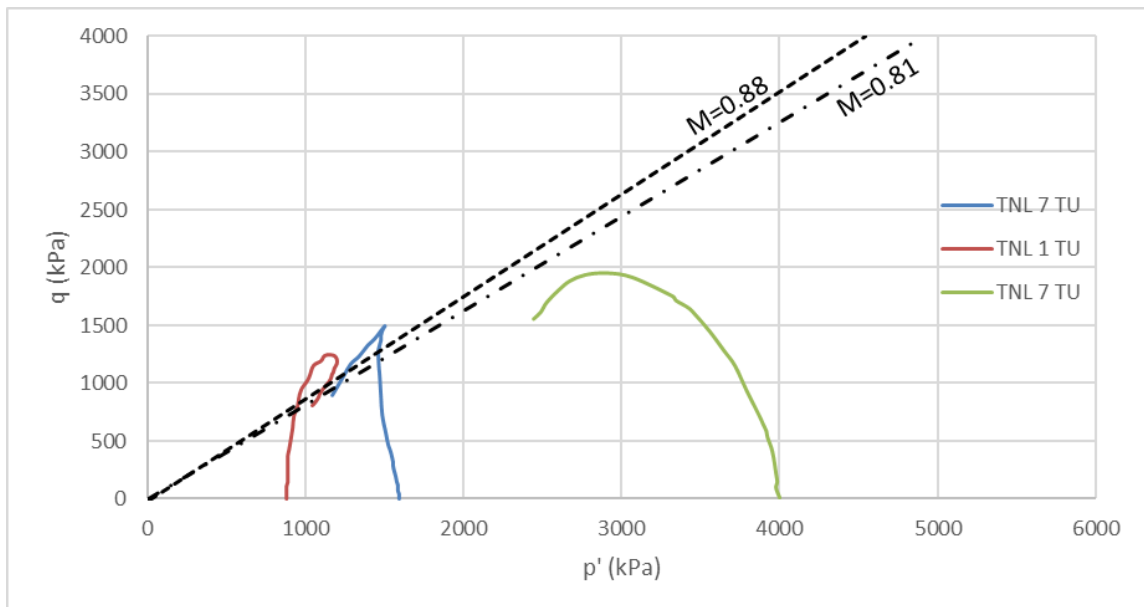


Σχήμα 11.15 Τασικές οδεύσεις αναζυμωμένης αργίλου (Guglielmi, 2017)



Σχήμα 11.16 Αναζυμωμένη άργιλος: ν - p' όδευση και γραμμή κρίσιμης κατάστασης.

Οι αστράγγιστες τασικές οδεύσεις της φυσικής αργίλου φαίνονται στο Σχήμα 11.15. Παρατηρείται ότι μετά την μέγιστη τάση λες οι οδεύσεις φαίνεται να πέφτουν προς τα κάτω. Η τιμή $M=0.81$ βρέθηκε χαμηλότερη από της αναζυμωμένης αργίλου, όπου ήταν $M^*=1.06$.

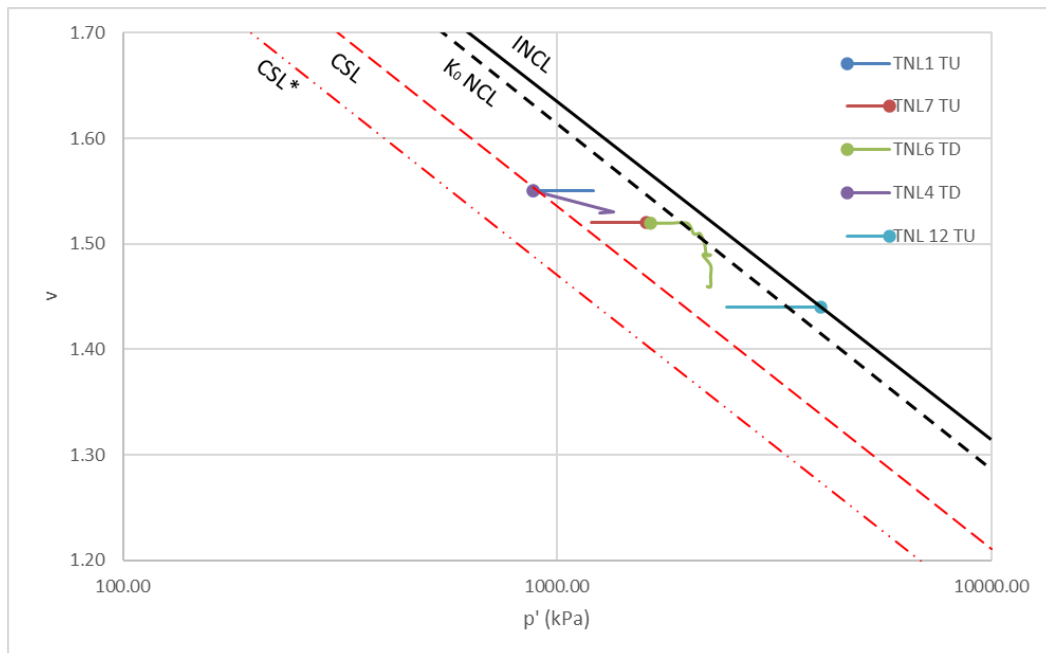


Σχήμα 11.17 Φυσική άργιλος: Τασική όδευση αστράγγιστων δοκιμών.

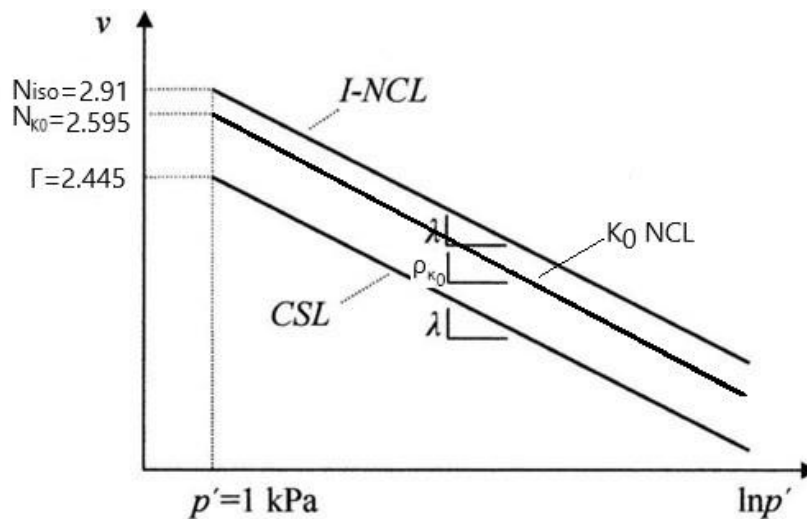
TEST	YSR_{is}	ϵ_{af} (%)	M
TNL1	3	15	0.85
TNL7	1.6	13	0.79
TNL6	1.6	18	0.8

Πίνακας 11.8 Φυσικός άργιλος: ψευδοκρίσιμες καταστάσεις (Guglielmi, 2017).

Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης μπορεί να αναπαρασταθεί με ευθεία γραμμή, παράλληλη στην INCL και στην K_0 NCL με κλίση $\lambda = 0.14$ και τομή $\Gamma = 2.445$ σε $p' = 1$ kPa. Η οδεύσεις που δεν καταλήγουν σε κρίσιμη κατάσταση φαίνεται να προσεγγίζουν αυτή την ευθεία. (Σχήμα 11.18)



Σχήμα 11.18 Φυσική άργιλος: Οδεύσεις v - p' και κρίσιμη κατάσταση



Σχήμα 11.19 Σταθερές κρίσιμης κατάστασης.

	λ	Γ	M	φ_c
Lucera	0.142	2.445	0.92	23.50°

Πίνακας 11.9 Τιμές σταθερών κρίσιμης κατάστασης

11.3 Νέες εργαστηριακές δοκιμές της αργίλου Lucera

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε νέες εργαστηριακές δοκιμές της αργίλου Lucera. Πιο αναλυτικά, ένα από τα εδαφικά δείγματα της αργίλου Lucera που είχε συλλέξει η Simona Giuglelmi διατηρήθηκε καλυμμένο με μεμβράνη και κερί σε χαμηλή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης στο Politecnico di Bari, ανοίχθηκε και υποβλήθηκε σε διάφορες δοκιμές. Μία από αυτές ήταν η δοκιμή του οιδημέτρου, η οποία πραγματοποιήθηκε προκειμένου να μελετηθούν οι συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης σε εργαστηριακό περιβάλλον. Παρακάτω περιγράφεται λεπτομερώς η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, τα αποτελέσματα που προέκυψαν και η ανάλυση αυτών των αποτελεσμάτων, προσφέροντας πολύτιμες γνώσεις για τις μηχανικές ιδιότητες της αργίλου Lucera υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης.

Περιγραφή πειράματος: Αρχικά, αφού ανοίχθηκε το μπλοκ της αργίλου, κόπηκε σε μικρότερα δείγματα και ένα από αυτά χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του δείγματος της δοκιμής του οιδημέτρου.



Σχήμα 11.20 Άνοιγμα μπλοκ φυσικής αργίλου Lucera

Στη συνέχεια, απομονώθηκαν κομμάτια εδαφικού υλικού, τα οποία ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν στον φούρνο στους 105°C για τουλάχιστον 24 ώρες, προκειμένου να προσδιοριστεί η αρχική περιεκτικότητα σε νερό.

Τοποθετήθηκαν στον φούρνο συνολικά τέσσερα δείγματα από διαφορετικά σημεία του αρχικού μπλοκ, ένα από το πλάι, ένα από το εσωτερικό και δύο από το πάνω και κάτω εσωτερικό μέρος. Προκειμένου να υπολογιστεί ο όγκος των κομματιών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του υδραργύρου. Οι μετρήσεις είναι οι εξής:

Δείγμα	1 πλάι	2 άνω εσωτερικό	3 κάτω εσωτερικό	4 εσωτερικό
Αρχικό βάρος[g]	139.42	132.40	110.07	98.62
Ξηρό βάρος [g]	36.53	29.59	55.16	30.90
Όγκος δείγματος [m ³]	2.01166E-05	1.69127E-05	3.16403E-05	1.75727E-05
Περιεκτικότητα σε νερό[%]	17.57%	18.96%	18.67%	17.86%
Ολικό ειδικό βάρος [kN/m ³]	20.9448252	20.41726911	20.29569431	20.33153079
Ξηρό ειδικό βάρος [kN/m ³]	17.81407368	17.16326684	17.10220742	17.24998082
Βαρος στερεών κόκκων[kN/m ³]	26.7813	26.7813	26.7813	26.7813
$v=1+e$	1.50337876	1.560384759	1.565955747	1.552540857
Λόγος κενών e	0.50337876	0.560384759	0.565955747	0.552540857
Πορώδες n	0.33483163	0.359132423	0.36141235	0.355894568
Βαθμός κορεσμού [%]	95.31%	92.36%	90.07%	88.26%

Πίνακας 11.10 Αρχικές μετρήσεις κατάστασης εδάφους

Παρατηρήθηκε με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα ότι τα δείγματα 3 και 4 είχαν αρκετά χαμηλό βαθμό κορεσμού. Αυτό ως αποτέλεσμα δημιούργησε την ανάγκη διερεύνησης του μπλοκ στα σημεία αυτά. Βρέθηκε μία μεγάλη στρώση άμμου, έτοιμη προς θραύση, οπότε αποφεύχθηκε η δημιουργία δοκιμίου για το οιδήμετρο από αυτό το σημείο του μπλοκ. Στη συνέχεια, διαμορφώθηκαν με τη βοήθεια του δακτυλίου του οιδημέτρου δείγματα ύψους 20 mm και διαμέτρου 58 mm (Σχήμα 11.2) και τοποθετήθηκαν σε τροποποιημένο οιδήμετρο του εργαστηρίου στο Politecnico di Bari. Κατά την διαμόρφωση του δείγματος εξασφαλίζονται επίπεδες και παράλληλες επιφάνειες για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος που οφείλεται στην ατελή ευθυγράμμιση της άνω πλάκας με τον δακτύλιο, η οποία μπορεί να προκαλέσει εσφαλμένη ανάγνωση των μετατοπίσεων.



Σχήμα 11.21 Προετοιμασία δείγματος οιδημέτρου

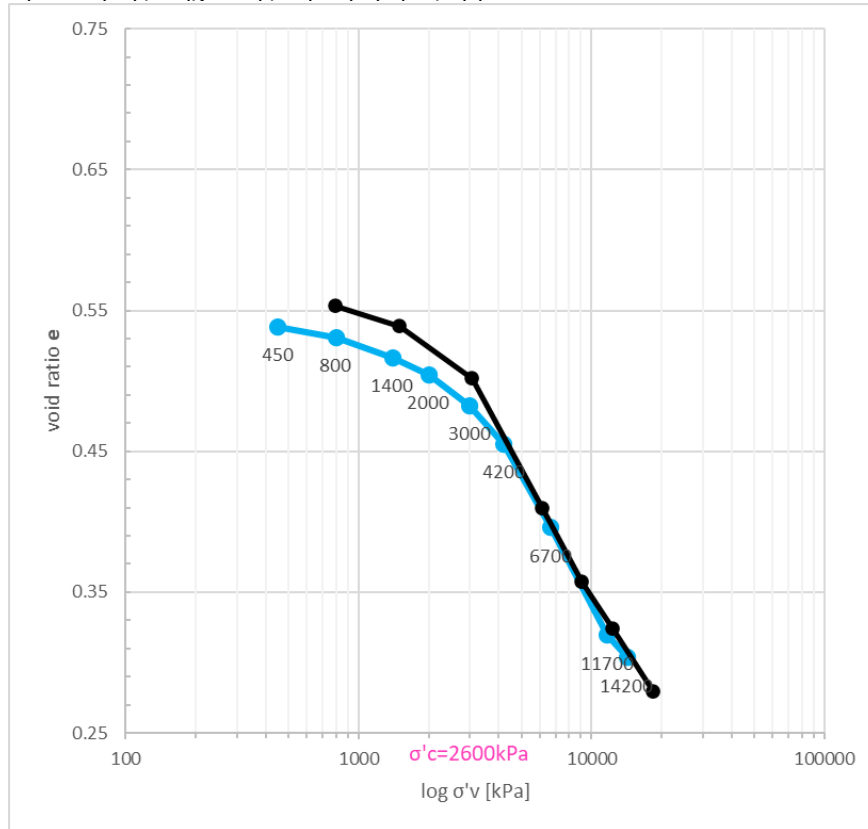
Σε αντίθεση με το κλασικό οιδήμετρο, το τροποποιημένο επιτρέπει μέγιστη κατακόρυφη δύναμη έως και $\sigma'_v = 15$ MPa αντί για 5 MPa, με τη χρήση ενός συστήματος τριπλασιαστή πίεσης που τοποθετείται στο τέλος του βραχίονα όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.22.



Σχήμα 11.22 Τροποποιημένη συσκευή οιδημέτρου του Politecnico di Bari (Guglielmi, 2017).

Κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης έγινε εφαρμογή μιας ακολουθίας φορτίων στο δείγμα το οποίο είναι πλευρικά περιορισμένο, έτσι η παραμόρφωση και η ροή του νερού επιτρέπονται μόνο στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η διάρκεια κάθε βήματος φόρτισης σχετίζεται με την επίτευξη ενός πολύ χαμηλού ρυθμού καθίζησης (περίπου 0,003-0,005 mm/h), όταν δηλαδή η πρωτεύουσα στερεοποίηση θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι έχει ολοκληρωθεί. Για κάθε βήμα φόρτισης, η πρωτεύουσα στερεοποίηση διήρκεσε περίπου 48-72 ώρες. Σκοπός είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του υπό συνθήκες που προσομοιάζουν αυτές του φυσικού περιβάλλοντος. Οι στόχοι του πειράματος είναι πολλαπλοί. Πρώτον, επιδιώκεται η καταγραφή των παραμορφώσεων που υφίσταται το δείγμα υπό την εφαρμογή διαδοχικών φορτίων. Δεύτερον, εξετάζεται η ικανότητα του δείγματος να επιτρέπει τη ροή του νερού σε κατακόρυφη διεύθυνση, καθώς και η επίδραση αυτής της ροής στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τέλος, το πείραμα στοχεύει στην απόκτηση δεδομένων που θα συμβάλλουν στην κατανόηση των συνθηκών συμπίεσης και στην ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά του υλικού σε πρακτικές εφαρμογές.

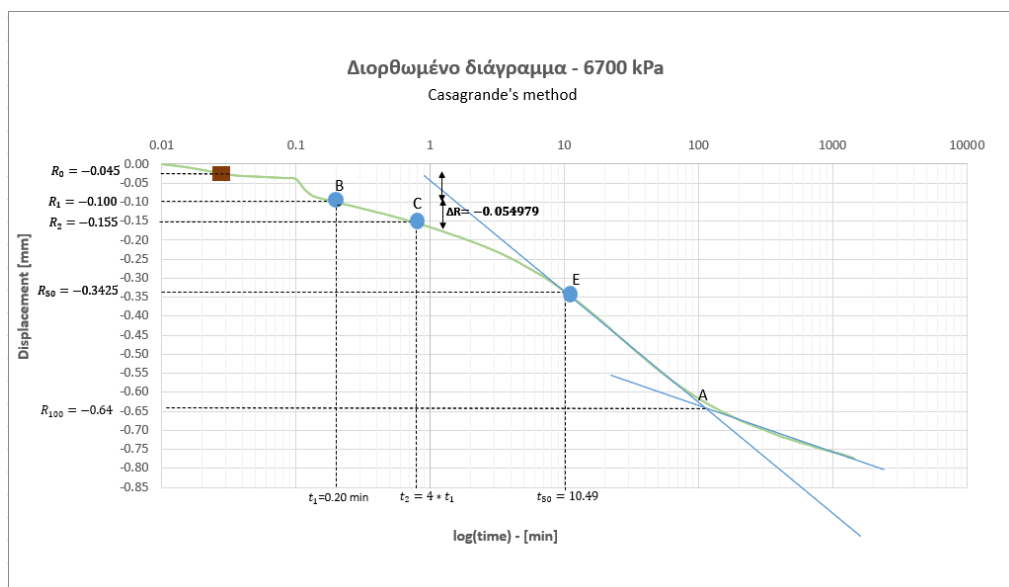
Η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης για την άργιλο Lucera απεικονίζεται στο Σχήμα 11.23 με αλληλουχία φορτίσεων 450, 800, 1400, 2000, 3000, 4200, 6700, 11700, 14200kPa και στη συνέχεια συγκρίνεται με εκείνη της Guglielmi, 2017(μαύρη). Υπολογίστηκαν ότι το αρχικό ύψος του δοκιμίου από $H_0 = 20\text{mm}$ παραμορφώθηκε σε τελικό ύψος $H_{\text{final}} = 17.044\text{mm}$, και ο αρχικός λόγος κενών $e_{\text{initial}} = 0.5384$ στο τέλος της δοκιμής είναι $e_{\text{final}} = 0.3035$.



Σχήμα 11.23 Νέα εργαστηριακά ποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου (μπλε) και σύγκριση με αρχικά αποτελέσματα της Guglielmi, 2017 (μαύρο).

Παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο καμπυλών, η οποία οφείλεται κυρίως σε διαφορετική αλληλουχία δυνάμεων και στην πάροδο του χρόνου, η οποία προφανώς αλλοίωσε τα χαρακτηριστικά του αρχικού εδαφικού μπλοκ. Με τη βοήθεια της μεθόδου Casagrande υπολογίστηκε η τάση διαρροής $\sigma'_c = 2600 \text{ kPa}$, ενώ η τάση διαρροής της Guglielmi (2017) βρέθηκε $2700\text{-}2800 \text{ kPa}$. Η διαφορά αυτή δεν αποτελεί σημείο ανησυχίας.

Προκειμένου να διαμορφωθεί η καμπύλη συμπίεσης (Σχήμα 11.23) χρειάστηκε για κάθε βήμα φόρτισης να γίνει ανάλυση των δεδομένων-αποτελεσμάτων του μηκυνσιόμετρου. Τα αρχικά αποτελέσματα είναι σε μορφή μετατόπισης-χρόνου. Στη συνέχεια αφού τοποθετήθηκαν σε διάγραμμα για κάθε βήμα φόρτισης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Casagrande όπως αναφέρθηκε στην [Ενότητα 5.1.2](#).



Σχήμα 11.24 Διάγραμμα μετατόπισης χρόνου ενός από τα βήματα φόρτισης (6700kPa) και διόρθωση με μέθοδο Casagrande.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν σύμφωνα με την μέθοδο Casagrande είναι τα εξής (Παράδειγμα για την φόρτιση των 6700kPa): Αρχικά στο διάγραμμα καθίζησης συναρτήσε του χρόνου σε λογαριθμικό άξονα (Σχήμα 11.24) προεκτάθηκαν τα ευθύγραμμα τμήματα πριν και μετά την αλλαγή καμπυλότητας (μπλε ευθείες) και το σημείο τομής είναι η μέτρηση στο 100% της στερεοποίησης ($U=100\%$) $R_{100}=-0.64$ mm (σημείο A). Έπειτα επιλέχθηκε ένα τυχαίο σημείο (t_1, R_1) = (0.20, -0.10) στο πρώτο κομμάτι της καμπύλης (σημείο B). Στη συνέχεια βρέθηκε το σημείο της καμπύλης με τετραπλάσιο χρόνο από το σημείο B όπου (t_2, R_2)=(0.80, -0.155) (σημείο C). Υπολογίστηκε η διαφορά μέτρησης των δύο σημείων B και C: $\Delta R = R_2 - R_1 = -0.054979$ mm. Η μέτρηση στην αρχή της στερεοποίησης R_0 ισούται με: $R_0 = R_1 - \Delta R = -0.045$ mm (σημείο D). Η μέτρηση στο 50% της στερεοποίησης είναι: το $R_{50} = (R_0 + R_{100})/2 = -0.3425$ mm και τον χρόνο για $U=50\%$ $t_{50} = 10.49$ min από το σχήμα (σημείο E). Υπολογίστηκε η καθίζηση για $U=50\%$, $\Delta H_{50} = R_{50} - R_m - R_0 = -0.297430$ mm και το αντίστοιχο μήκος ροής $H_{dr} = (H_0 - \Delta H_{50})/2 = 10.148$ mm. Τελικά, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή στερεοποίησης c_v που αντιστοιχεί σε $U=50\%$ (δηλ. για $T_v = 0.196$) $c_v = (0.196 H_{dr}^2)/2 = 1.924$ mm²/min. Επίσης υπολογίζεται ο συντελεστής διαπερατότητας $k = (c_v E_s)/\gamma_w = 3.69 \cdot 10^{-12}$ m/sec.

Για το εδαφικό υλικό της δοκιμής, έγιναν κάποιες μετρήσεις πριν και μετά την μονοδιάστατη συμπίεση οι οποίες αναγράφονται στον Πίνακα 11.11. Μικρό μέρος του δείγματος απομονώθηκε και τοποθετήθηκε στον φούρνο προκειμένου να υπολογιστεί η τελική περιεκτικότητα σε νερό.

Αρχική κατάσταση δοκιμίου		Μετά την δοκιμή(Υποθέτοντας $S_r=100\%$)	
Βάρος δακτυλίου[g]	82.90	Βάρος κορεσμένου δοκιμίου[g]	100.60
Βάρος δείγματος[g]	103.81	Ύψος[mm]	17.04
Ύψος[mm]	20.00	Διάμετρος[mm]	58.00
Διάμετρος[mm]	58.00	Όγκος δοκιμίου[mm ³]	45031.32
Όγκος δοκιμίου[mm ³]	52841.59	γ ολικό[kN/m ³]	21.92
e αρχικό	0.63	γ ξηρό[kN/m ³]	18.73
γ ολικό[kN/m ³]	19.27	γ στερεών κόκκων[kN/m ³]	26.78
γ ξηρό[kN/m ³]	16.47	Ξηρό δείγμα- μετά τον φούρνο	
γ στερεών κόκκων[kN/m ³]	26.78	Βάρος κορεσμένου δείγματος[g]	20.10
Αρχική περιεκτικότητα σε νερό [%]	17.00%	Ξηρό βάρος δείγματος[g]	17.48
		Περιεκτικότητα σε νερό	14.99%

Πίνακας 11.11 Στοιχεία εδαφικού δοκιμίου Lucera πριν και μετά την δοκιμή του οιδημέτρου.

12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας. Σκοπός είναι η ολοκληρωμένη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των αργιλικών υλικών, εστιάζοντας στην άργιλο Lucera. Γενικότερα, η μελέτη και η κατανόηση των ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητη για ένα μεγάλο εύρος τεχνικών και περιβαλλοντικών εφαρμογών. Το έδαφος είναι ένα βασικό υλικό για τις περισσότερες κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων κτιρίων, δρόμων, γεφυρών και άλλων υποδομών. Η γνώση των χαρακτηριστικών του εδάφους όπως η φέρουσα ικανότητα, η συμπίεσιμότητα και η διατμητική αντοχή έχει μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό ανθεκτικών κατασκευών. Διαφορετικά, τα έργα μπορεί να εμφανίσουν προβλήματα όπως καθιζήσεις ή μετατοπίσεις και να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των ανθρώπων.

Η μελέτη αυτών των προβλημάτων αποτελεί μέρος της γεωτεχνικής μηχανικής, και ουσιώδες παράδειγμα για τη διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί η άργιλος Lucera. Η μελέτη της ξεκίνησε λόγω της αστάθειας που προκλήθηκε στο νοσοκομείο της πλαγιάς Lucera και την ανάγκη ενίσχυσης του. Στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκαν κρίσιμες έννοιες και θεωρίες που σχετίζονται με τη μηχανική των εδαφών. Αρχικά, εξετάστηκε ο τανυστής των τάσεων και τα κριτήρια αστοχίας, εισάγοντας τις έννοιες των αναλλοίωτων, δηλαδή την μέση (ορθή) τάση p και την διεκτροπική τάση q . Ακολούθως, αναλύθηκαν οι τασικές οδεύσεις υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες, οι οποίες εφαρμόζονται σε κυλινδρικά εδαφικά δείγματα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν η ισότροπη συμπίεση, η τριαξονική θλίψη και ο τριαξονικός εφελκυσμός, ενώ αναλύθηκαν επίσης οι καταστατικές σχέσεις, όπως η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα και ο νόμος του Hooke με χρήση τασικών και παραμορφωσιακών αναλλοίωτων.

Στη συνέχεια, εξετάστηκαν διάφορες τυπικές φορτίσεις που σχετίζονται με τη σταθερότητα των κατασκευών. Αναλύθηκαν φορτίσεις που δεν οδηγούν σε αστοχία, όπως η ισότροπη συμπίεση και η μονοδιάστατη στερεοποίηση, καθώς και φορτίσεις που οδηγούν σε αστοχία, όπως η τριαξονική θλίψη, η απλή διάτμηση και η ανεμπόδιστη θλίψη. Η τριαξονική δοκιμή αναλύθηκε λεπτομερώς, καλύπτοντας τις δοκιμές συμπίεσης υπό στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες, καθώς και τα διάφορα είδη φόρτισης.

Επιπρόσθετα, αναφέρθηκε η αναμόχλευση των γεωυλικών και η θεωρία κρίσιμης κατάστασης, η οποία βασίζεται στη μελέτη των αναζυμωμένων υλικών και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφών υπό διάφορες συνθήκες. Η ανάλυση της συμπεριφοράς των εδαφών, είτε κανονικά στερεοποιημένων είτε ισχυρά υπερστερεοποιημένων, εξετάστηκε με βάση τη συμπεριφορά τους υπό στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας διαρροής. Τέλος, η γενικευμένη θεωρία πλαστικότητας καλύπτει βασικές έννοιες όπως ο νόμος ροής και ο νόμος κράτνωσης, καθώς και διάφορα προσομοιώματα κρίσιμης κατάστασης, όπως τα προσομοιώματα με καπέλο, τα ισότροπα/ανισότροπα προσομοιώματα και τα προσομοιώματα αλληλεμπεριεχόμενων επιφανειών. Το καταστατικό μοντέλο Cam Clay και η ανάλυση της ελαστικότητας, τόσο της γραμμικής όσο και της μη γραμμικής, ολοκληρώνουν τη θεωρητική βάση της εργασίας, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών.

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν προηγούμενα πειραματικά δεδομένα της άργιλου Lucera. Η επιλογή της συγκεκριμένης άργιλου έγινε λόγω της ενασχόλησής μου με αυτό το υλικό κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης στο Politecnico di Bari, όπου μελέτησα σε βάθος την άργιλο και ολοκλήρωσα νέα πειράματα σε φυσικό υλικό. Η Guglielmi (2017) πραγματοποίησε πολυάριθμες δοκιμές σε φυσική και αναζυμωμένη άργιλο, όπως μονοδιάστατη (1D) συμπίεση, ισότροπη συμπίεση και δοκιμή διάτμησης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών αναλύθηκαν περαιτέρω στην παρούσα διατριβή και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της Guglielmi. Παρά τις μικρές διαφορές, σε γενικές γραμμές, η άργιλος Lucera παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά και τα εξής χαρακτηριστικά: Από τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης προέκυψαν τα ακόλουθα δεδομένα: $\rho_{K0}=0.142$, $N_{K0}=2.595$, $\rho_{K0}^*=0.139$, $N_{K0}^*=2.49$, $\kappa=0.029$, $\kappa^*=0.037$, χρησιμοποιώντας την εμπειρική

διατύπωση που πρότεινε ο Jaky (1944) βρέθηκε το $K_0=0.6011$. Από την ισότροπη συμπίεση προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: $\lambda_{iso}=0.14$, $N_{iso}=2.6$, $\lambda_{iso}^*=0.139$, $N_{iso}^*=2.5$, $\kappa=0.026$, $\rho_c=0.085$, $\rho_c^*=0.082$. Από τη δοκιμή διάτμησης βρέθηκαν οι εξής τιμές: $\lambda=0.142$, $\Gamma=2.445$, $M=0.92$, $\phi_c=23.50^\circ$. Τα δεδομένα αυτά αποδεικνύουν την αντοχή και τη συμπεριφορά της αργίλου Lucera υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά της για τεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Υπήρχαν διαφορές σε σχέση με τις τελικές τιμές που επιλέχθηκαν από την Guglielmi, όπου επέλεξε την τιμή 0.60.

Τέλος, διεξήχθησαν νέες εργαστηριακές δοκιμές στην άργιλο Lucera κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης στο Politecnico di Bari που αποκάλυψαν σημαντικά ευρήματα σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά του υλικού. Αρχικά λήφθηκαν 4 διαφορετικά δείγματα από το εδαφικό μπλοκ της Guglielmi, και έγιναν μετρήσεις σε καθένα από αυτά. Η περιεκτικότητα σε νερό και το πορώδες των δειγμάτων παρουσίασαν παρόμοιες τιμές, με την περιεκτικότητα σε νερό να κυμαίνεται περίπου από 17% έως 19% και το πορώδες περίπου από 33% έως 36%. Αυτές οι μετρήσεις υποδεικνύουν ότι τα δείγματα είχαν ομοιογενή υγρασία και πορώδη δομή, κάτι που είναι σημαντικό για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους υπό φόρτιση. Ο λόγος κενών (e) ήταν περίπου 0.5-0.56 και ο βαθμός κορεσμού κυμαινόταν από 88.26% έως 95.31%. Τα σημεία με τον χαμηλότερο βαθμό κορεσμού δημιούργησαν την ανάγκη διερεύνησης του μπλοκ, όπου βρέθηκε μία μεγάλη στρώση άμμου, έτοιμη προς θραύση, και αποφεύχθηκε η χρήση τους. Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα της μελέτης για την άργιλο Lucera είναι θετικά και υποδηλώνουν ικανοποιητική αντοχή και συμπιεστικές ιδιότητες.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- Budhu, M. (2020). *Soil Mechanics and Foundations* (3η Έκδοση ed.). GOTSIS.
- Guglielmi, S. (2017). *Evolution of the clay micro-structure in compression and shearing loading paths*. Bari: Politecnico di Bari.
- Hai-Sui Yu. (2010). *Plasticity and Geotechnics* (1 εκδ.). Springer New York, NY.
doi:<https://doi.org/10.1007/978-0-387-33599-5>
- McGinty, B. (2012). *Tensor Notation (Basics)*. Retrieved from Continuum Mechanics:
<https://www.continuummechanics.org/tensornotationbasic.html>
- Parry, R. G. (2005). *Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics*. 29 West 35th Street, New York, NY 10001.
- W.F. CHEN, G. B. (1985). *Soil Plasticity: Theory and Implementation*. Elsevier Science.
- Wikipedia. (2023, March). *Wikipedia*. Retrieved from Cauchy stress tensor:
https://en.wikipedia.org/wiki/Cauchy_stress_tensor
- Αστερίου, Π. (2022). Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης. *Σημειώσεις ΠΑ.Δ.Α.*
- Καββαδάς, Μ. (2009). *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- Μπελόκας, Γ. Α. (2008). *Προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς δομημένων και ανισότροπων εδαφικών υλικών*. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής.
- Παπαδημητρίου. (1999). *Ελαστοπλαστική προσομοίωση της μονοτονικής και δυναμικής συμπεριφοράς εδαφών*. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής.
- Σιταρένιος, Π. (2016). *Καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς μη κορεσμένων εδαφών*. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο(ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής.