



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
Τομέας Μεταλλευτικής
Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων

Διπλωματική Εργασία

**Βαθμονόμηση καταστατικών προσομοιωμάτων για τη
μηχανική συμπεριφορά στείρων υλικών**

Αλέξανδρος Ι. Σηφάκης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Βαθμονόμηση καταστατικών προσομοιωμάτων για τη
μηχανική συμπεριφορά στείρων υλικών**

Αλέξανδρος Ι. Σηφάκης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 18/07/2022

Ιωάννης Ε. Ζευγώλης
Παύλος Νομικός
Ανδρέας Μπενάρδος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενο της εργασίας αφορά στην περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών στειρών λιγνιτωρυχείων στο πλαίσιο της αξιοποίησης τους κατά τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή. Βασικός σκοπός της εργασίας είναι συγκεκριμένα η βαθμονόμηση καταστατικών προσομοιωμάτων για την περιγραφή της μηχανικής απόκρισης των στειρών υλικών με βάση αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών ελληνικών στειρών. Επιπλέον, τα βαθμονομημένα προσομοιώματα εφαρμόστηκαν σε δύο γεωτεχνικά προβλήματα, ένα επιφανειακό κυκλικό θεμέλιο και μία βαθιά εκσκαφή ήπιου πρηνούς.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Ιωάννη Ζευγώλη για την επίβλεψη αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Αλέξανδρο Θεοχάρη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, για την πολύτιμη βοήθειά και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου και συνέφεραν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση του έργου μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών στείρων λιγνιτωρυχείων στο πλαίσιο της αξιοποίησης τους κατά τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή. Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η βαθμονόμηση καταστατικών προσομοιωμάτων για την περιγραφή της μηχανικής απόκρισης με βάση πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης (στερεοποίησης). Αναλύθηκαν και βαθμονομήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα, το γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (αποκαλούμενο και Mohr-Coulomb λόγω της επιφάνειας αστοχίας) και το Hardening Soil. Σκοπός της βαθμονόμησης είναι ο υπολογισμός βασικών εδαφικών παραμέτρων για τα στείρα υλικά υπό εξέταση. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτει ένα μεγάλο εύρος τιμών των εδαφικών παραμέτρων. Σε αυτό το πλαίσιο, η βαθμονόμηση που έγινε αφορούσε την ποσοτικοποίηση τριών μηχανικών συμπεριφορών: της μέσης απόκρισης, και των άνω και κάτω ορίων. Η βαθμονόμηση έγινε κυρίως σε πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής με πίεση κυψέλης 100 kPa, ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση των αποτελεσμάτων με δοκιμές τριαξονικής θλίψης υψηλότερης πίεσης κυψέλης και δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης. Από τη βαθμονόμηση προέκυψε ότι η μέση απόκριση για το προσομοίωμα Mohr-Coulomb έχει μέτρο ελαστικότητας $E=6,5$ MPa, συνοχή $c=10$ kPa και γωνία τριβής $\varphi=22^\circ$, ενώ για το προσομοίωμα Hardening Soil έχει $E_{50}=5,2$ MPa, $c=20$ kPa και $\varphi=25^\circ$. Κατόπιν τα βαθμονομημένα προσομοιώματα εφαρμόστηκαν σε δύο γεωτεχνικές εφαρμογές για να συγκριθεί η επίδραση στην απόκριση τους. Αρχικά, προσομοιώθηκε η εφαρμογή ενός κυκλικού θεμελίου. Σκοπός ήταν η σύγκριση των φορτίων που προκύπτουν από τις διαφορετικές βαθμονομήσεις και προσομοιώματα με την υπολογισμένη φέρουσα ικανότητα κατά Ευρωκώδικα 7 και η παρατήρηση των αστοχιών που προκύπτουν. Τέλος, προσομοιώθηκε η εκσκαφή πρανούς με σκοπό τη σύγκριση της ανύψωσης λόγω της εκσκαφής και ο υπολογισμός της ευστάθειας του πρανούς. Η ανύψωση που παρατηρήθηκε για το προσομοίωμα Mohr-Coulomb ήταν αρκετά μεγάλη (περί των 4 μ) ενώ για το Hardening Soil αισθητά πιο ρεαλιστική (περί των 0,8 μ). Επιπλέον, οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν για το προσομοίωμα Mohr-Coulomb ήταν χαμηλότεροι από αυτούς για το προσομοίωμα Hardening Soil κυρίως λόγω της εξάρτησης της εδαφικής δυσκαμψίας με το βάθος για αυτό το προσομοίωμα.

Λέξεις Κλειδιά: Καταστατικά προσομοιώματα, Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Δοκιμή Οιδημέτρου, Τριαξονική Δοκιμή, Θεμέλιο, Πρανές

Abstract

Calibration of constitutive simulations for the mechanical behaviour of sterile materials

by *Alexandros I. Sifakis*

Thesis Submitted for the Degree
Diploma in Mining and Metallurgical Engineering

School of Mining and Metallurgical Engineering
National Technical University of Athens

Supervisor: Dr. Ioannis E. Zevgolis
Assistant Professor, NTUA

The present thesis focuses on describing the mechanical behavior of lignite spoil materials, in the context of reclamation of spoil areas during the post-lignite era. The thesis aims to calibrate constitutive models for the spoil mechanical response based on experimental results of triaxial and one-dimensional compression (consolidation) tests. Two constitutive models were analyzed and calibrated: the linear elastic perfectly plastic (also called Mohr-Coulomb) and the Hardening Soil model. The calibration's target was to compute the main soil parameters for the spoil material under investigation. From the employed experimental results, a large range for the value of the soil parameters was obtained. In that vein, the calibration aimed at a mean response, an upper and a lower limit. The models were calibrated mainly on the triaxial test results with a cell pressure of 100kPa, and they were further compared with triaxial tests of higher cell pressure and one-dimensional compression consolidation results. From the results, the mean response for the Mohr-Coulomb model had an elastic modulus $E=6.5\text{MPa}$, cohesion $c=10\text{kPa}$, and friction angle $\varphi=22^\circ$, while for the Hardening Soil $E_{50}=5.2\text{MPa}$, $c=20\text{kPa}$, and $\varphi=25^\circ$. Moreover, the calibrated constitutive models were employed to describe the soil response for two geotechnical applications to compare their effects. Initially, a shallow, cyclical footing was simulated. The main aim was to compare the bearing capacity based on the various calibrations and the two models and the Eurocode 7 relations, and to observe the failure mechanisms. Finally, a soil excavation with a mild slope was simulated to compare the differences in upward displacements and the slope's safety. The displacements for the Mohr-Coulomb model were very large due to the model's formulation (about 4m), while they were more realistic for the Hardening Soil (about 0,8 m). Furthermore, the safety factors for the Mohr-Coulomb model were lower for the Hardening Soil, primarily due to the stress-dependent (and thus depth-dependent) stiffness for this model.

Keywords: Constitutive simulations, Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Oedometer Test, Triaxial Test, Foundation, Slope

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο εργασίας	1
1.2	Στόχος εργασίας	3
1.3	Δομή εργασίας.....	6
2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ	8
2.1	Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης	8
2.2	Τριαξονική δοκιμή	15
3	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	22
3.1	Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)	22
3.2	Hardening Soil.....	25
4	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	29
4.1	Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)	29
4.2	Hardening Soil.....	40
5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΤΥΠΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	50
5.1	Επιφανειακή Θεμελίωση	50
5.1.1	Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)	51
5.1.2	Hardening Soil	57
5.2	Εκσκαφή και ευστάθεια πρανούς	63
5.2.1	Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)	64
5.2.2	Hardening Soil.....	69
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
6.1	Σύνοψη	75
6.2	Συμπεράσματα	75
6.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	77
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1- Γενική άποψη της περιοχής (Zevgolis et.al, 2021)	3
Εικόνα 1-2 Διατομή (A'-A'') στον διαμήκη άξονα του σωρού απόθεσης (Zevgolis et.al, 2021)	4
Εικόνα 1-3 Απλοποιημένη κάτοψη του σωρού με τις θέσεις των γεωτρήσεων (Zevgolis et.al, 2021).....	5
Εικόνα 2-1 Πειραματική διάταξη της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης (πηγή: διαδίκτυο)	9
Εικόνα 2-2 Τυπική απόκριση κατακόρυφης (ή ογκομετρικής) παραμόρφωσης με την κατακόρυφη ενεργό τάση (Budhu, 2010)	11
Εικόνα 2-3 Μη γραμμική μορφή απεικόνισης δείκτη πόρων προς τις κατακόρυφες τάσεις (Budhu, 2010).....	11
Εικόνα 2-4 Τυπική απόκριση δείκτη πόρων με τον δεκαδικό λογάριθμο της κατακόρυφης ενεργού τάση (Budhu, 2010).....	12
Εικόνα 2-5 Ενδεικτικό διάγραμμα για τη μέθοδο Casagrande (Καββαδάς, 2005)	13
Εικόνα 2-6 Ενδεικτικό διάγραμμα για μέθοδο Taylor (Καββαδάς, 2005)	14
Εικόνα 2-7 Κελί φόρτισης (πηγή: διαδίκτυο).....	16
Εικόνα 2-8 Συσκευή τριαξονικής φόρτισης (πηγή: διαδίκτυο).....	16
Εικόνα 2-9 Βασικά επιμέρους τμήματα του συστήματος της συσκευής τριαξονικής φόρτισης (Budhu, 2010).....	17
Εικόνα 2-10 Δοκιμή CD: (a) προπαρασκευαστική φάση στερεοποίησης (b) κύριες τάσεις κατά την τριαξονική φόρτιση (c) διαδρομή τάσεων (ESP: effective stress path, TSP: total stress path) (Budhu, 2010).....	18
Εικόνα 2-11 Δοκιμές Τριαξονικής θλίψης σε αργίλους. (Budhu, 2010)	21
Εικόνα 3-1 – Βασικά στοιχεία του γραμμικά ελαστικού τέλεια πλαστικού προσομοιώματος (PLAXIS, 2011).....	23
Εικόνα 3-2 Κύκλοι τάσεων σε διαρροή, χρησιμοποιώντας παραμέτρους πραγματικής αντοχής. Ο ένας αγγίζει την περιβάλλουσα του Coulomb.	24
Εικόνα 3-3 Υπερβολική σχέση Τάσεων- Παραμορφώσεων σε τριαξονική φόρτιση. (PLAXIS, 2011).....	27
Εικόνα 3-4 Διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. (PLAXIS, 2011).....	28
Εικόνα 3-5 Αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε τριαξονική δοκιμή. (PLAXIS, 2011)	28
Εικόνα 4-1 Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(kPa)-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(kPa)-\varepsilon_a(\%)$	31
Εικόνα 4-2 Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(kPa)-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(kPa)-\varepsilon_a(\%)$	31
Εικόνα 4-3 Πίεση κυψέλης 400kPa: α) Διάγραμμα $q(kPa)-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(kPa)-\varepsilon_a(\%)$	32
Εικόνα 4-4 - α) Διάγραμμα $E_s(Mpa)-\sigma'_v(kPa)$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(kPa)$	33

Εικόνα 4-5 $E=2,8\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	34
Εικόνα 4-6 $E=2,8\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	35
Εικόνα 4-7 $E=2,8\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	36
Εικόνα 4-8 $E=2,8\text{Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$	37
Εικόνα 4-9 $E=10,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	37
Εικόνα 4-10 $E=10,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	38
Εικόνα 4-11 $E=10,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	39
Εικόνα 4-12 $E=10,5\text{Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$	39
Εικόνα 4-13 Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	41
Εικόνα 4-14 Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	42
Εικόνα 4-15 Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	43
Εικόνα 4-16 α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$	44
Εικόνα 4-17 - $E_{50}=4\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	45
Εικόνα 4-18 $E_{50}=4\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	45
Εικόνα 4-19 $E_{50}=4\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	46
Εικόνα 4-20 $E_{50}=4\text{Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$	47
Εικόνα 4-21 $E_{50}=6,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	48
Εικόνα 4-22 $E_{50}=6,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	48
Εικόνα 4-23 $E_{50}=6,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$	49
Εικόνα 4-24 $E_{50}=6,5\text{Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$	49
Εικόνα 5-1 Γεωμετρία κυκλικού θεμελίου (PLAXIS, 2011).....	50
Εικόνα 5-2 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές γεωστατικές τάσεις (Mohr-Coulomb).....	51
Εικόνα 5-3 Παραμορφωμένος Κάναβος κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb).....	52
Εικόνα 5-4 Διάγραμμα $q(\text{kPa}) - U_y (\text{m})$ κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb).....	53

Εικόνα 5-5 Σταδιακές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)....	54
Εικόνα 5-6 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)....	55
Εικόνα 5-7 Συνολικές παραμορφώσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)	55
Εικόνα 5-8 Σημεία πλαστικότητας κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)	56
Εικόνα 5-9 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές τάσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil).....	57
Εικόνα 5-10 Παραμορφωμένος Κάναβος κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)	58
Εικόνα 5-11 Διάγραμμα $q(\text{kPa}) - U_y (m)$ κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)	59
Εικόνα 5-12 Τύπος αστοχίας επιφανειακής θεμελίωσης, Διάτρηση (Γεωργιάδης, 2009)...	60
Εικόνα 5-13 Σταδιακές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil) ..	61
Εικόνα 5-14 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil) ..	61
Εικόνα 5-15 Συνολικές παραμορφώσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)	62
Εικόνα 5-16 Σημεία πλαστικότητας κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)	63
Εικόνα 5-17 Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα πρηνούς	63
Εικόνα 5-18 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές γεωστατικές τάσεις.	65
Εικόνα 5-19 Συνολικές μετατοπίσεις για το πρώτο στάδιο εκσκαφής (τρίτη φάση προσομοίωσης)	66
Εικόνα 5-20 Συνολικές μετατοπίσεις για το δεύτερο στάδιο εκσκαφής (Πέμπτη φάση προσομοίωσης)	67
Εικόνα 5-21 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=10 \text{ kPa}$, $\phi=22^\circ$)	67
Εικόνα 5-22 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=0 \text{ kPa}$, $\phi=19^\circ$)	68
Εικόνα 5-23 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=17,5 \text{ kPa}$, $\phi=25,5^\circ$)	69
Εικόνα 5-24 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές γεωστατικές τάσεις (Hardening Soil)	71
Εικόνα 5-25 Συνολικές μετατοπίσεις για το πρώτο στάδιο εκσκαφής (τρίτη φάση προσομοίωσης)	72
Εικόνα 5-26 Συνολικές μετατοπίσεις για το δεύτερο στάδιο εκσκαφής (πέμπτη φάση προσομοίωσης)	72
Εικόνα 5-27 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=20 \text{ kPa}$, $\phi=25^\circ$)	73
Εικόνα 5-28 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=0 \text{ kPa}$, $\phi=22,5^\circ$)	73
Εικόνα 5-29 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=40 \text{ kPa}$, $\phi=27^\circ$)	74

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1 Βασικοί συνδυασμοί παραμέτρων για το προσομοίωμα Mohr-Coulomb	30
Πίνακας 4-2 Τιμές μέτρου ελαστικότητας E.....	34
Πίνακας 4-3 Συνδυασμός παραμέτρων βαθμονόμησης για το προσομοίωμα Hardening Soil	41
Πίνακας 4-4 Εναλλακτικές τιμές μέτρων ελαστικότητας	44

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Για δεκαετίες, η εξόρυξη άνθρακα ήταν μια μεγάλη και σημαντική βιομηχανία που βασίζεται στην εξόρυξη μη ανανεώσιμων πόρων άνθρακα από το έδαφος. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας για την επιφανειακή εξόρυξη, τεράστιες ποσότητες στείρων (ή άγονων) υλικών εκσκάπτονται προκειμένου να επιτευχθεί πρόσβαση στο κοίτασμα άνθρακα. Τα υλικά αυτά έχουν γενικά χαρακτηριστεί ως αδιάφορα απορρίμματα και απορρίπτονται, συχνά χωρίς καμία επεξεργασία ή εξέταση για μελλοντική χρήση ή αξιοποίηση. Παρά τις πρόσφατες προόδους στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η βιομηχανία εξόρυξης άνθρακα παραμένει σημαντική σε παγκόσμιο επίπεδο, και ως τέτοια εξακολουθεί να συμβάλλει στην παγκόσμια παραγωγή απορριμμάτων, με εκτιμήσεις για 1,45 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως (Bian et al., 2012). Αυτές οι τεράστιες ποσότητες στείρων είναι συνήθως ανάμεικτα εδάφη που απορρίπτονται σε σωρούς στείρων (επίσης χαρακτηρίζονται ως αποθέσεις ή αναχώματα στείρων). Η βιώσιμη διαχείριση τους αποτελεί παγκόσμια προτεραιότητα και, ως εκ τούτου, καταβάλλονται πλέον σημαντικές προσπάθειες για την ορθή αξιοποίηση των σωρών απόθεσης στείρων.

Οι σωροί αυτοί αποτελούνται από μια ποικιλία εδαφών που αναμιγνύονται με τυχαίο τρόπο ως αποτέλεσμα των μεθόδων εκσκαφής, μεταφοράς και απόθεσης που χρησιμοποιούνται στα ανθρακωρυχεία. Το αποτέλεσμα είναι ένα μίγμα υλικών με πολύ υψηλό βαθμό μεταβλητότητας, δημιουργώντας μία μεγάλη πρόκληση για την αξιοποίησή τους. Ως εκ τούτου, μέχρι πρόσφατα, η εκμετάλλευση των σωρών στείρων περιοριζόταν σε μεγάλο βαθμό σε χρήσεις όπως η γεωργία, η δασοκομία και οι δημόσιοι χώροι αναψυχής (π.χ. πάρκα, χώροι ψυχαγωγίας), αποφεύγοντας δομικά συστήματα υψηλότερου φορτίου και απαιτήσεων (Bell and Donnelly, 2006). Παρ' όλα αυτά, στις μέρες μας εξετάζονται όλο και πιο αποτελεσματικές επιλογές αξιοποίησης των σωρών, ιδίως λόγω των μεγάλων εκτάσεων που καλύπτουν. Για παράδειγμα, πολλά έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκονται σε εξέλιξη ή προτείνονται σε χώρους εξόρυξης άνθρακα στις ΗΠΑ και την Ευρώπη (Alves Dias et

al., 2018), εξετάζοντας τη χρήση σωρών για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών στοιχείων και αντλιών θερμότητας. Αυτά τα συστήματα κατασκευής περιλαμβάνουν σχετικά υψηλά φορτία και πολύπλοκες διαδρομές τάσεων, θέτοντας προκλήσεις στους μηχανικούς ακόμη και για "κανονικές" εδαφικές συνθήκες. Οι προκλήσεις αυτές εντείνονται από τη φύση των στείρων υλικών και, ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για αυστηρότερο και ακριβέστερο χαρακτηρισμό των υλικών αυτών.

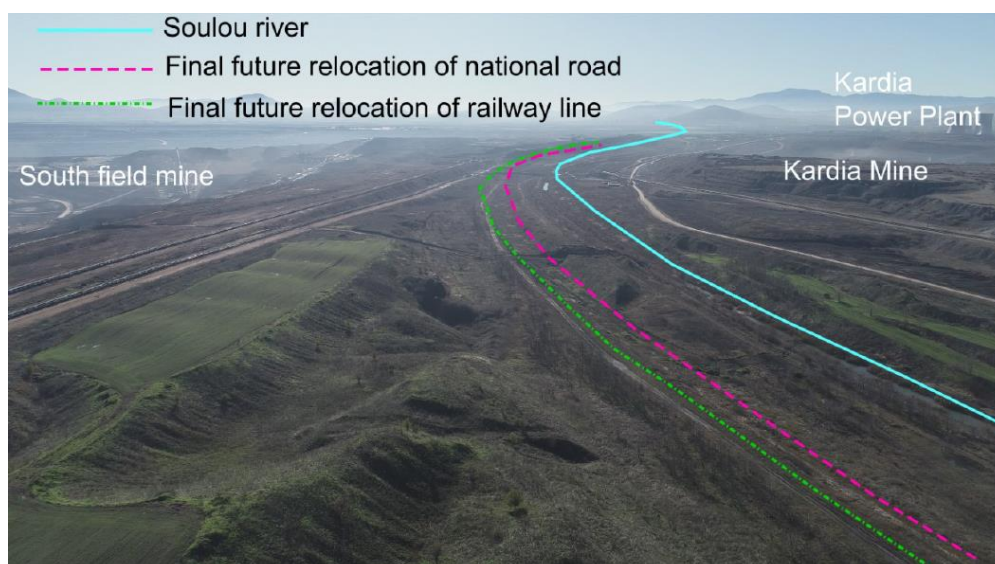
Οι Masoudian κ.ά. (2019) παρουσίασαν μια επισκόπηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών αρκετών ευρωπαϊκών σωρών εκσκαφών ανθρακωρυχείων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ταξινόμηση, οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες των στείρων υποδεικνύουν μια αξιοσημείωτη μεταβλητότητα (μεγαλύτερη από τα συνήθη εδάφη). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ετερογένεια αυτών των μικτών υλικών εκσκαφής δεν επηρεάζεται μόνο από τις φυσικές διεργασίες, αλλά και από άλλους παράγοντες που σχετίζονται με τις διαδικασίες εξόρυξης. Οι δυσκολίες στην ποσοτικοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών εκσκαφής αντικατοπτρίζονται σε διάφορα περιστατικά αστοχίας πρανών, τα οποία συχνά οδηγούν σε περιβαλλοντικούς κινδύνους και προκαλούν την προσοχή και την ανησυχία της κοινωνίας (Brawner and Broughton, 1991- Ulusay et al., 1995- Ulusay et al., 1996- Dawson et al., 1998- Kasmer et al., 2006- Steiakakis et al., 2009- BGS, 2013- Symes and Madill, 2013- Poulsen et al., 2014- Sharma and Roy, 2015).

Για την περιβαλλοντικά φιλική διαχείριση των σωρών εδαφικών στείρων και για την αποτελεσματική εκμετάλλευσή τους, είναι ζωτικής σημασίας η κατανόηση και η ορθή ποσοτικοποίηση των γεωτεχνικών (φυσικών και μηχανικών) ιδιοτήτων του υλικού. Παρόλο που υπάρχουν αρκετές μελέτες που αφορούν την ευστάθεια πρανών σε σωρούς εκσκαφών (βλ. παραπάνω αναφορές), πολύ λίγες περιλαμβάνουν λεπτομερή γεωτεχνικό χαρακτηρισμό του υλικού (Okagbue, 1984- Ulusay et al., 1995- Masoudian et al., 2019). Μια πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση αυτού του σύνθετου υλικού εκσκαφής αναμένεται να οδηγήσει σε καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο των τεχνικών εξελίξεων, οδηγώντας σε βελτιωμένη ανάλυση και σε ασφαλέστερο, οικονομικά αποδοτικό και βιώσιμο σχεδιασμό.

1.2 Στόχος εργασίας

Η Ελλάδα είναι ένας από τους κορυφαίους παραγωγούς λιγνίτη στην Ευρώπη. Το 2017 εξορύχθηκαν 37,7 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι (t) λιγνίτη, η συντριπτική πλειονότητα των οποίων προήλθε από τα βαθιά επιφανειακά ορυχεία της ΔΕΗ (Euracoal, 2018). Αρκετά μεγάλα λιγνιτωρυχεία (που συχνά βρίσκονται σε μέσο βάθος 150-200 m κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, με συνολική κλίση περίπου 10°-15°) έχουν αναπτυχθεί στο μεταλλευτικό πεδίο της Πτολεμαΐδας, που βρίσκεται στη βορειοδυτική Ελλάδα.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τον μεγάλο σωρό άγονων υλικών του Σουλού, που δημιουργήθηκε από υλικά που εκσκάφθηκαν από λιγνιτωρυχεία στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Ο σωρός έχει κατασκευαστεί σε μια εξαντλημένη περιοχή εξόρυξης, ανάμεσα σε δύο κύρια επιφανειακά λιγνιτωρυχεία: το ορυχείο Καρδιάς και το ορυχείο Νοτίου Πεδίου. Στην Εικόνα 1-1 παρουσιάζεται μια γενική άποψη της περιοχής που περιλαμβάνει μέρος του σωρού και τις κοντινές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

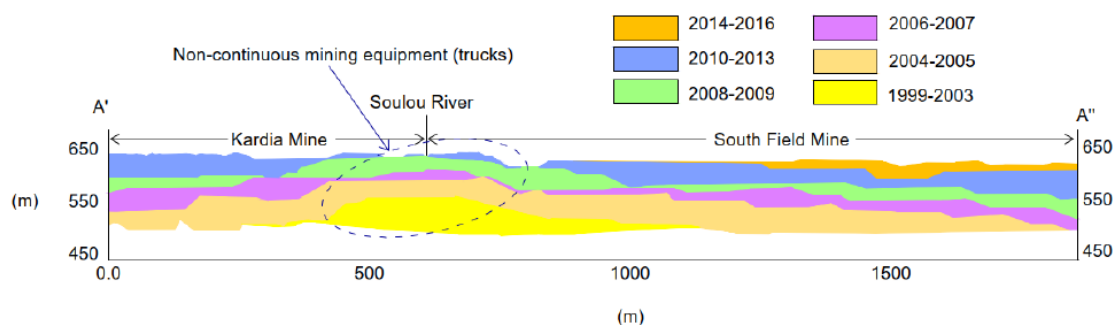


Εικόνα 1-1- Γενική άποψη της περιοχής (Zevgolis et.al, 2021)

Τα προφίλ του εδάφους στις εκσκαφές των ορυχείων Καρδιάς και Νοτίου Πεδίου αποτελούνταν από μια παχιά ζώνη υπερκειμένων από στείρα υλικά (τεταρτογενείς

αποθέσεις μέσου πάχους μερικών δεκάδων μέτρων) που επικάλυπτε τα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη (νεογενείς αποθέσεις). Οι λιγνιτικές αποθέσεις συχνά εναλλάσσονται με ενδιάμεσα λεπτά στρώματα στείρων υλικών. Τα στείρα (τόσο τεταρτογενούς όσο και νεογενούς προέλευσης) αποτελούνται κυρίως από μάργες και αργίλους, συχνά στιφρές.

Η κατασκευή του σωρού απόθεσης ξεκίνησε το 1999 (Ρούμπος και Παπακώστα, 2013). Στην Εικόνα 1-2 παρουσιάζεται μια αντιπροσωπευτική διατομή (A'-A'') στον διαμήκη άξονα του σωρού απόθεσης, μαζί με την ένδειξη των διακριτών περιόδων κατασκευής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την περίοδο 1999-2003, η απόρριψη των στείρων γινόταν με μη συνεχή εξόρυξη (φορτηγά μεταφοράς). Τελικά, η πλευρική διαπλάτυνση του σωρού πραγματοποιήθηκε με εξοπλισμό συνεχούς επιφανειακής εξόρυξης (ταινιόδρομοι με διανομείς), με εξαίρεση μια σχετικά στενή περιοχή πάνω από τον πρώιμο σωρό (1999-2003) που συνέχισε να κατασκευάζεται με φορτηγά (Roumpros et al., 2014). Το μέγιστο ύψος του σωρού επετεύχθη περίπου το 2009- έκτοτε έχει λάβει χώρα μόνο διεύρυνση.

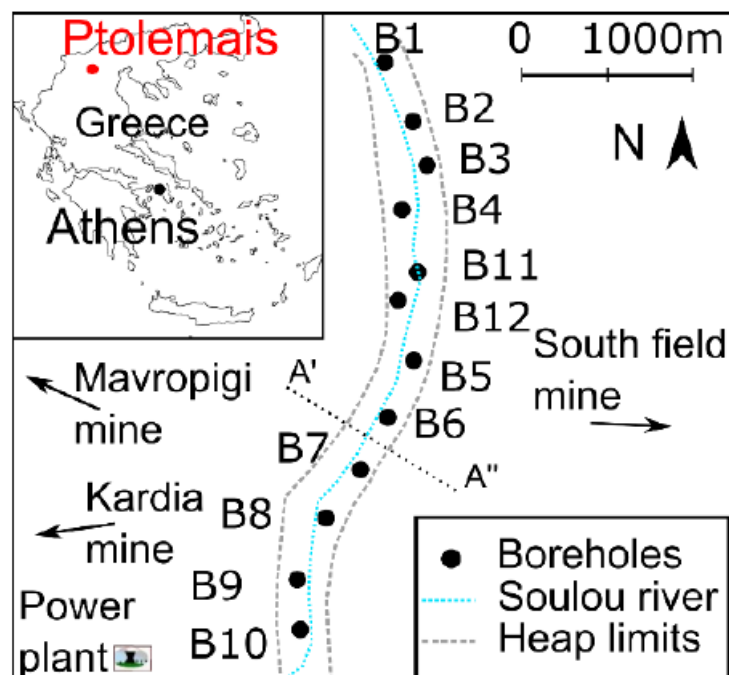


Εικόνα 1-2 Διατομή (A'-A'') στον διαμήκη άξονα του σωρού απόθεσης (Zevgolis et.al, 2021)

Ο σωρός εκσκαφών Σουλου έχει σήμερα μήκος περίπου 5 km, πλάτος 0,4-2,1 km στην κορυφή του, πλάτος 1,8-3,65 km στη βάση του και ύψος 150-170 m. Πρόκειται σαφώς για έναν σημαντικό σε μέγεθος σωρό απόθεσης, ο οποίος φέρει όλες τις σχετικές προκλήσεις που περιγράφηκαν στην εισαγωγή. Με την πάροδο των ετών, έχουν διεξαχθεί διάφορες συζητήσεις σχετικά με τη μακροπρόθεσμη διαχείριση και αξιοποίηση του σωρού εκσκαφών. Οι τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται τα σχέδια

αξιοποίησης δεν έχουν ακόμη επιλυθεί, καθώς η πολυπλοκότητα του υλικού εκσκαφής παρουσιάζει δυσκολίες στην ανάλυση.

Στο πλαίσιο αυτό, και μεταξύ άλλων ενεργειών, η ΔΕΗ διεξήγαγε το 2010 εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα για την εκτίμηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του σωρού των χωματερών. Μεταξύ άλλων, η έρευνα περιελάμβανε δώδεκα δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (B1 έως B12), βάθους περίπου 40-50 m η καθεμία, οι οποίες διανοίχθηκαν κατά μήκος του άξονα του επιχώματος (Εικόνα 1-3). Στα δείγματα που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές: δοκιμές ιδιοτήτων δείκτη (μέγεθος κόκκων με κόσκινα, σε συνδυασμό με δοκιμές υγρού και πλαστικού ορίου), φυσικές ιδιότητες (περιεκτικότητα σε νερό, υγρό μοναδιαίο βάρος, ειδικό βάρος) και μηχανικές ιδιότητες (δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, δοκιμές ενοποιημένης - ανεμπόδιστης τριαξονικής θλίψης με μετρήσεις πίεσης πόρων και δοκιμές 1D παγίωσης).



Εικόνα 1-3 Απλοποιημένη κάτοψη του σωρού με τις θέσεις των γεωτρήσεων (Zevgolis et.al, 2021)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται τη βαθμονόμηση καταστατικών προσομοιωμάτων για τη μηχανική συμπεριφορά ελληνικών στείρων υλικών

λιγνιτωρυχείων. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της εργασίας αναλύθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα, το γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό προσομοίωμα (προσομοίωμα Mohr-Coulomb) και το Hardening Soil. Σκοπός της βαθμονόμησης είναι ο υπολογισμός βασικών εδαφικών παραμέτρων για τα στεία υλικά υπό εξέταση. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτει ένα μεγάλο εύρος τιμών των εδαφικών παραμέτρων. Συνεπώς, η βαθμονόμηση που έγινε αφορούσε την ποσοτικοποίηση τριών μηχανικών συμπεριφορών: της μέσης απόκρισης, και των άνω και κάτω ορίων. Η βαθμονόμηση έγινε βασικά για πειραματικά αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής με πίεση κυψέλης 100 kPa ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση των αποτελεσμάτων με δοκιμές τριαξονικής θλίψης υψηλότερης πίεσης κυψέλης και δοκιμών οιδημέτρου. Κατόπιν τα βαθμονομημένα προσομοιώματα εφαρμόστηκαν σε δύο τυπικές γεωτεχνικές εφαρμογές για να συγκριθεί η επίδραση στην απόκριση τους. Αρχικά, προσομοιώθηκε η εφαρμογή ενός κυκλικού θεμελίου με σκοπό τη σύγκριση των φορτίων που προκύπτουν από τις διαφορετικές βαθμονομήσεις και προσομοιώματα με την υπολογισμένη φέρουσα ικανότητα κατά Ευρωκώδικα 7 (EC7) και η παρατήρηση των τύπων των αστοχιών που προκύπτουν. Τέλος, προσομοιώθηκε η εκσκαφή πρανούς με σκοπό τη σύγκριση των ανυψώσεων λόγω εκσκαφής και ο υπολογισμός της ευστάθειας του πρανούς ανάμεσα στις διαφορετικές βαθμονομήσεις αλλά και στα δύο προσομοιώματα.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2: Περιγράφει τις δύο βασικές δοκιμές εδαφομηχανικής που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Παρουσιάζει συνοπτικά τη δοκιμή συμπίεσομέτρου και την τριαξονική δοκιμή, ώστε να γίνει κατανοητό το αντικείμενο των δοκιμών που θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 3: Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των δύο καταστατικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται στις βαθμονομήσεις και αναλύσεις της εργασίας. Τα προσομοιώματα αυτά είναι το ελαστικό-τέλεια πλαστικό (αναφερόμενο ως Mohr-Coulomb) και το Hardening Soil.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βαθμονόμηση των καταστατικών προσομοιωμάτων Mohr-Coulomb και Hardening Soil. Καταρχάς η βαθμονόμηση

πραγματοποιήθηκε σε πειραματικές δοκιμές τριαξονικής θλίψης για πίεση κυψέλης 100 kPa. Κατόπιν έγινε σύγκριση των βαθμονομημένων προσομοιωμάτων και των αποτελεσμάτων τους σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης με μεγαλύτερη πίεση κυψέλης και με δοκιμές συμπίεσομέτρου.

Κεφάλαιο 5: Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή και σύγκριση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης των δύο καταστατικών προσομοιωμάτων σε δύο τυπικά γεωτεχνικά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά αφορούν μια εφαρμογή επιφανειακής θεμελίωσης κυκλικής διατομής και μια εφαρμογή εκσκαφής και τον υπολογισμό της ευστάθειας του πρανούς που σχηματίζεται.

Κεφάλαιο 6: Συνοψίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία και παραθέτονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από τα παραπάνω κεφάλαια.

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

2.1 Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης

Μία συνθήκη φόρτισης που εμφανίζεται συχνά στη φύση και σε κατασκευές είναι αυτή της μονοδιάστατης παραμόρφωσης. Η μονοδιάστατη παραμόρφωση λαμβάνει χώρα όταν σε ένα εδαφικό στοιχείο επιβάλλεται κατακόρυφη φόρτιση ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζονται οι πλευρικές παραμορφώσεις. Καθώς οι εδαφικοί κόκκοι και το νερό των πόρων είναι πρακτικά ασυμπίεστα, η μεταβολή του όγκου ενός κορεσμένου εδαφικού στοιχείου πρέπει να συνοδεύεται από ισόποση διαφυγή νερού. Εξαιτίας της περιορισμένης διαπερατότητας των εδαφικών υλικών, η κίνηση του νερού διαμέσου των πόρων απαιτεί χρόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παρατήρηση υστέρησης μεταξύ της επιβολής της φόρτισης και της εκδήλωσης των παραμορφώσεων.

Οι συνθήκες της μονοδιάστατη παραμόρφωσης εμφανίζονται συχνά τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στο τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στην περιοχή των κατασκευών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι κατά την ιζηματογένεση επιβάλλονται κατακόρυφες πιέσεις ενώ ταυτόχρονα λόγω της μεγάλης έκτασης των στρώσεων παρεμποδίζονται οι πλευρικές παραμορφώσεις. Αντίστοιχες συνθήκες παρατηρούνται κάτω από εκτεταμένες θεμελιώσεις αλλά και σε μικρά βάθη κάτω από μεμονωμένα πέδιλα.

Η μελέτη της μονοδιάστατης παραμόρφωσης και στερεοποίησης ενός εδαφικού δοκιμίου, υπό την επίδραση κατακόρυφου φορτίου και με περιορισόμενη πλευρική παραμόρφωση, μελετάται με τη δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης ή δοκιμή οιδημέτρου (Εικόνα 2-1).

Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία της δοκιμής αυτής. Στην περίπτωση κορεσμένων εδαφικών σχηματισμών, ένα κατά το δυνατόν αδιατάρακτο δείγμα της συμπίεστης εδαφικής στρώσης κόβεται προσεκτικά και τοποθετείται στον κυλινδρικό δακτύλιο. Ο δακτύλιος αυτός είναι αρκετά άκαμπτος, ώστε κατά την κατακόρυφη φόρτιση του δοκιμίου να εξασφαλίζεται η μή-παραμόρφωσή του στην οριζόντια

διεύθυνση. Πάνω και κάτω από το δοκίμιο τοποθετούνται πορώδεις δίσκοι, οι οποίοι επιτρέπουν την ελεύθερη στράγγιση από το πάνω και κάτω σύνορο.



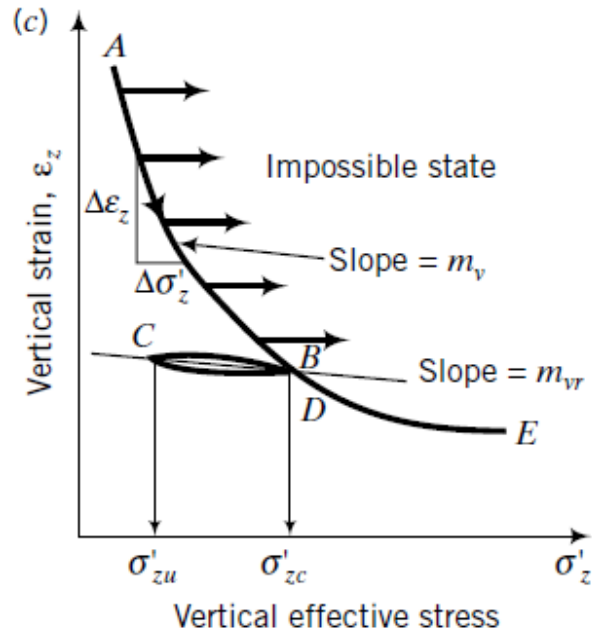
Εικόνα 2-1 Πειραματική διάταξη της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης (πηγή: διαδίκτυο)

Στη συνέχεια, 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 ολοκληρωθεί 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. Κατά τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης μετρούνται 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).

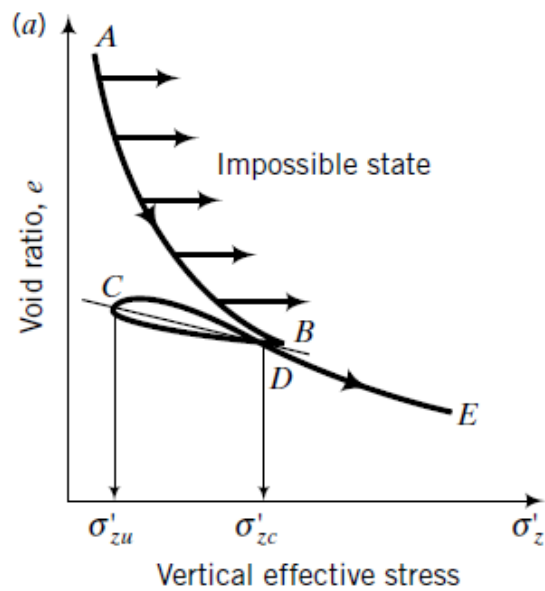
Παράλληλα, σε κάθε βήμα επιβολής νέας φόρτισης μετράται η υποχώρηση του δοκιμίου σε διάφορους χρόνους (15 sec, 30 sec, 1 min, 2, 4, 8, 16 min, κλπ) κατά την εξέλιξη της στερεοποίησης. Από την υποχώρηση του δοκιμίου στο τέλος κάθε

βήματος επιβολής φόρτισης, δηλαδή στο τέλος της στερεοποίησης, υπολογίζεται η ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με βάση τη σχέση $\Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_z = -\Delta H/H_0$, ενώ η μεταβολή του δείκτη πόρων ισούται με $\Delta e = -(1+e_0) \cdot \Delta\varepsilon_v$ και σχεδιάζεται το διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου (σ'_v) - ογκομετρικής παραμόρφωσης (ε_v) (Εικόνα 2-2) ή φορτίου - δείκτη πόρων (Εικόνα 2-3 και Εικόνα 2-4). Στα διαγράμματα η κατακόρυφη τάση μετράται σε γραμμική κλίμακα (Εικόνα 2-3) ή σε λογαριθμική κλίμακα (Εικόνα 2-4). Πολλές φορές προτιμάται η λογαριθμική κλίμακα καθώς η σχέση δείκτη πόρων - δεκαδικού λογαρίθμου της κατακόρυφης τάσης είναι γραμμική ή διγραμμική. Από αυτές τις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων ορίζονται τρία εναλλακτικά και εν μέρει ισοδύναμα μέτρα: το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s = \Delta\varepsilon_z / \Delta\sigma'_v$, ο δείκτης συμπιεστότητας $\alpha_v = -\Delta e / \Delta\sigma'_v$ και ο συντελεστής συμπιεστότητας $C_c = -\Delta e / \Delta \log \sigma'_v$.

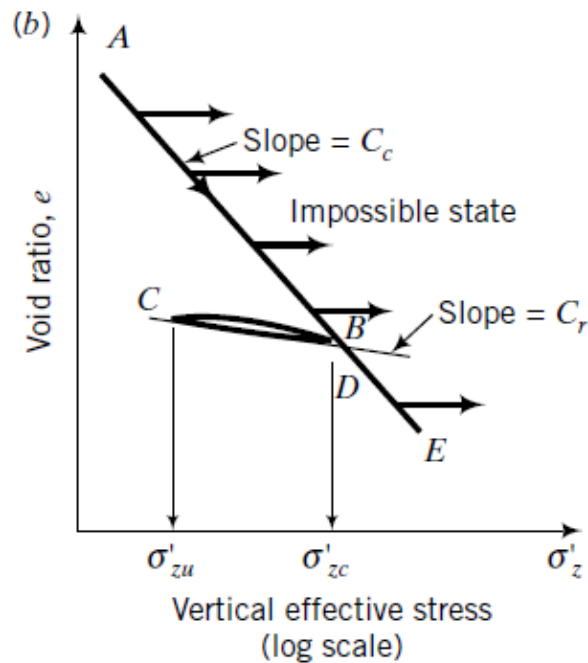
Συχνά στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι η συμπιεστότητα του δοκιμίου αυξάνει απότομα για συγκεκριμένη τιμή της κατακόρυφης τάσης. Η απότομη αύξηση της συμπιεστότητας πραγματοποιείται όταν το δοκίμιο φορτισθεί με τάση ίση με τη μέγιστη τάση που του έχει επιβληθεί στο παρελθόν (τη λεγόμενη τάση προφόρτισης). Με άλλα λόγια, εάν ένα εδαφικό δοκίμιο, που στη φύση υφίσταται κάποια κατακόρυφη τάση, αφαιρεθεί από το έδαφος (οπότε αποφορτίζεται), τοποθετηθεί στη συσκευή του οιδημέτρου και επαναφορτισθεί, τότε κατά την επαναφόρτιση η συμπιεστότητά του είναι μικρή μέχρις ότου η κατακόρυφη τάση φθάσει την προηγούμενη μέγιστη τάση (την τάση προφόρτισης). Με την περαιτέρω αύξηση της κατακόρυφης τάσης, η συμπιεστότητα του δοκιμίου αυξάνει απότομα και, στη συνέχεια, η καμπύλη φόρτισης ακολουθεί τον κλάδο της μονοδιάστατης συμπίεσης, ο οποίος παρουσιάζει τα γνωστά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 2-2 Τυπική απόκριση κατακόρυφης (ή ογκομετρικής) παραμόρφωσης με την κατακόρυφη ενεργό τάση (Budhu, 2010)



Εικόνα 2-3 Μη γραμμική μορφή αλεικόνισης δείκτη πόρων προς τις κατακόρυφες τάσεις (Budhu, 2010)



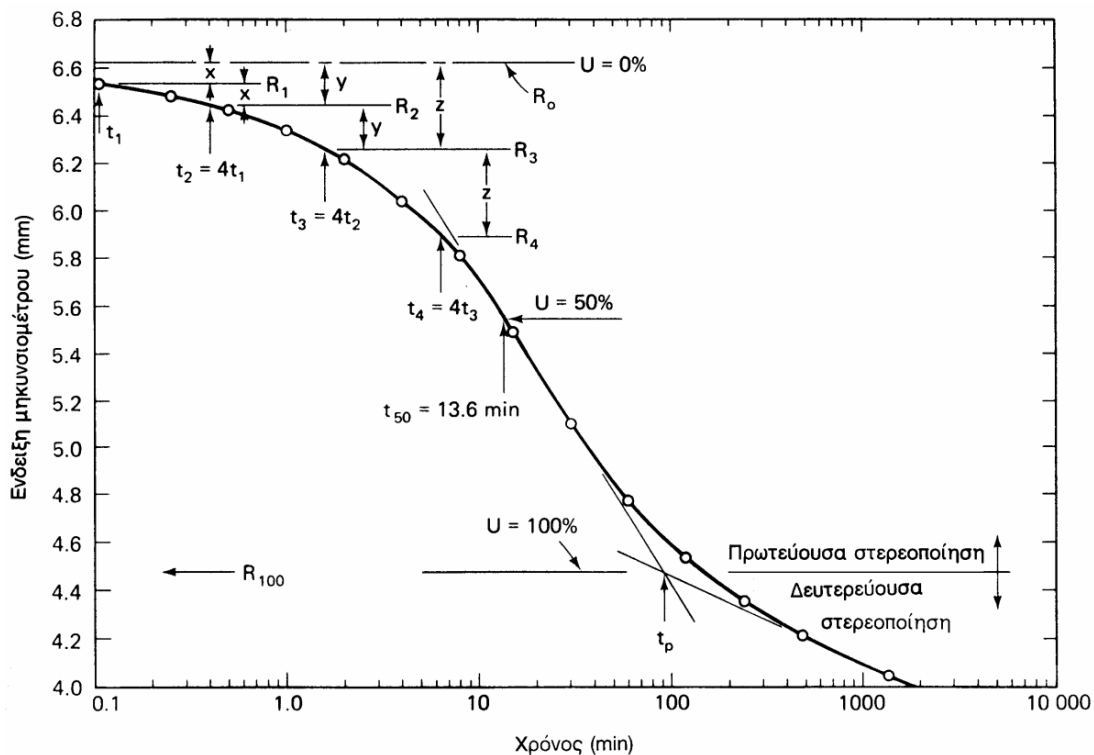
Εικόνα 2-4 Τυπική απόκριση δείκτη πόρων με τον δεκαδικό λογάριθμο της κατακόρυφης ενεργού τάσης (Budhu, 2010)

Το μέτρο ελαστικότητας μονοδιάστασης συμπίεσης E_s χαρακτηρίζει και ποσοτικοποιεί τη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων. Προκύπτει από τη γραφική παράσταση $e_v - \sigma'_v$ και υπολογίζεται για κάθε βαθμίδα φόρτισης. Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτώνται από δύο θεμελιώδεις παραμέτρους (ιδιότητες του υλικού), το μέτρο Ελαστικότητας (E) και το λόγο του Poisson (ν). Σε πολλές περιπτώσεις συνήθων φορτίσεων η επίλυση με τη θεωρία ελαστικότητας δεν απέχει σημαντικά από επιλύσεις με "ακριβέστερους" καταστατικούς νόμους, τουλάχιστον όσον αφορά τις κατανομές των τάσεων στο έδαφος. Τούτο οφείλεται στο ότι οι κατανομές των τάσεων που προκύπτουν με βάση τη θεωρία ελαστικότητας είναι, για ορισμένους τύπους φορτίσεων, ανεξάρτητες του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους, δηλαδή οι κατανομές τάσεων δεν μεταβάλλονται για διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας.

Βεβαίως, δεν θα ισχύει η ίδια κατανομή τάσεων, εάν το έδαφος έχει μή-γραμμική συμπεριφορά. Στις περιπτώσεις αυτές οι κατανομές τάσεων είναι ανεξάρτητες του μέτρου ελαστικότητας, υπό την προϋπόθεση ότι το υλικό είναι ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό και ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι σταθερό και ομοιόμορφο σε ολόκληρη την εδαφική μάζα, δηλαδή δεν μεταβάλλεται από θέση σε θέση ούτε με

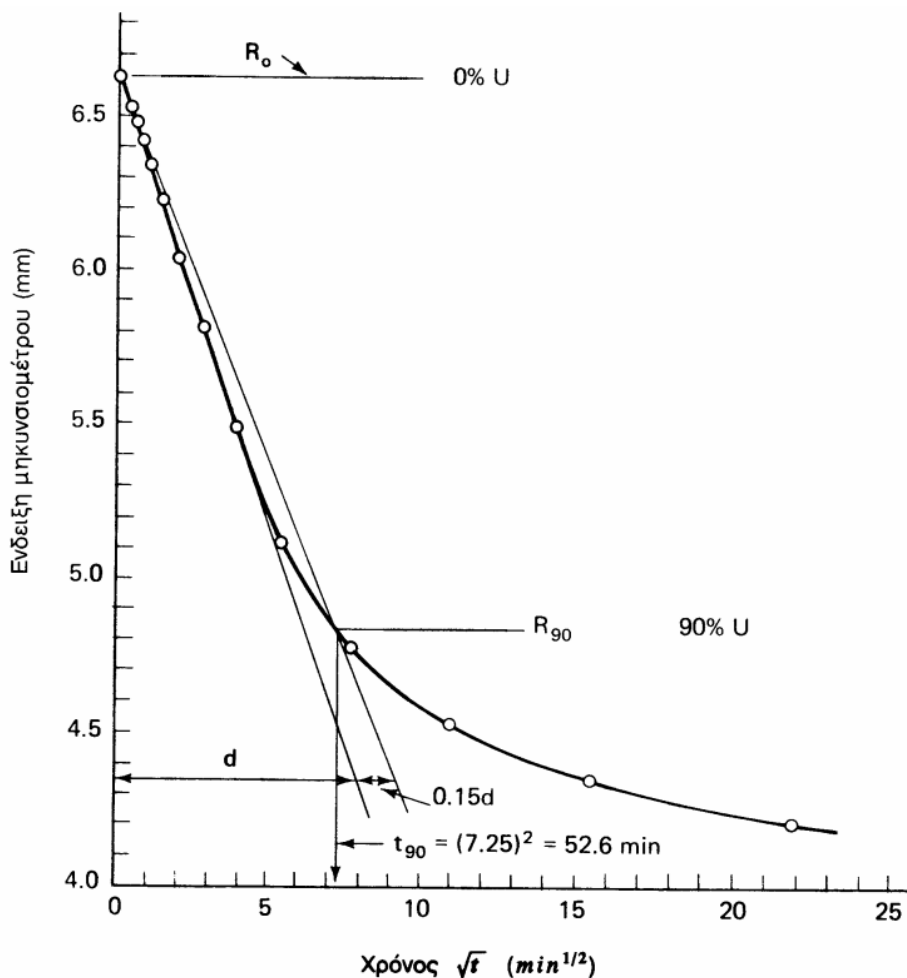
τη μεταβολή της φόρτισης. Πάντως, η παραπάνω ανεξαρτησία των τάσεων από το μέτρο ελαστικότητας μειώνει, γενικά, τα σφάλματα που προκύπτουν κατά την εκτίμηση των τάσεων σε εδαφικά υλικά με θεώρηση γραμμικής ελαστικότητας, ακόμη και στις περιπτώσεις που η συμπεριφορά του εδάφους απέχει σημαντικά από την ελαστικότητα.

Περαιτέρω αξιοποίηση της δοκιμής οιδημέτρου γίνεται με τις μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης σε κάθε βήμα της φόρτισης με απώτερο σκοπό την εκτίμηση του χρόνου στερεοποίησης του εδαφικού υλικού. 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% είναι η μέθοδος Casagrande. Αφού προσδιορισθεί ο χρόνος t_{50} , ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση: $c_v = (T_{50} * H^2_d) / t_{50} = (0,197 * H^2_d) / t_{50}$, όπου H_d είναι το ήμισυ του ύψους του δοκιμίου. Το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2-5) αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα για τον παραπάνω υπολογισμό.



Εικόνα 2-5 Ενδεικτικό διάγραμμα για τη μέθοδο Casagrande (Καββαδάς, 2005)

Μια εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού του c_v , η λεγόμενη μέθοδος Taylor, χρησιμοποιεί τον τύπο $c_v = (T_{90} \cdot H^2_d) / t_{90} = (0,848 \cdot H^2_d) / t_{90}$. Ο χρόνος που απαιτείται για να συντελεσθεί το 90% της στερεοποίησης αποτελεί τον όρο t_{90} και υπολογίζεται από τα αντίστοιχα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις ενδείξεις του μηκυνσιομέτρου ως προς το χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα, όπου αναπαριστάται η καμπύλη στερεοποίησης. Το παρακάτω διάγραμμα (2-6) αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα για τον παραπάνω υπολογισμό.



Εικόνα 2-6 Ενδεικτικό διάγραμμα για μέθοδο Taylor (Καββαδάς, 2005)

Όπως είναι αναμενόμενο, αν στις μετρήσεις μιας δοκιμής οιδημέτρου εφαρμοσθούν και οι δύο μέθοδοι υπολογισμού του c_v (Casagrande και Taylor), τα αποτελέσματα

συνήθως δεν συμπίπτουν, επειδή οι μέθοδοι αυτές θεωρούν ισότροπη και γραμμική συμπεριφορά του εδάφους, πράγμα που δεν είναι γενικά ακριβές. Επιπλέον, ο συντελεστής στερεοποίησης μπορεί να υπολογισθεί από τα αποτελέσματα ενός μόνον βήματος επιβολής φορτίου. Αν οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιηθούν σε όλα τα βήματα επιβολής φορτίου, θα υπολογισθούν διαφορετικές τιμές του c_v σε κάθε βήμα. 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. Τούτο 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 πιο σύνθετο, για παράδειγμα επειδή το c_v εξαρτάται και από το συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος μειώνεται συνεχώς με την αύξηση του φορτίου, επειδή μειώνεται ο δείκτης πόρων.

2.2 Τριαξονική δοκιμή

Η τριαξονική δοκιμή είναι ένας συνήθης τρόπος ποσοτικοποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εφαρμογής της τριαξονικής φόρτισης με κύριο χαρακτηριστικό ότι τα φορτία επιβάλλονται σε τρεις κύριους άξονες (απ' όπου προέρχεται και το όνομα τριαξονική). Κατά την κλασική τριαξονική δοκιμή ένα κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετείται εντός κυψέλης πληρωμένης με νερό και υποβάλλεται σε σταθερή πίεση στις πλευρικές επιφάνειες του. Επιπλέον, φορτίζεται κατά τον κατακόρυφο άξονα με τρόπο που το φορτίο αυξάνεται έως τη θραύση του δοκιμίου.

Το κελί φόρτισης (Εικόνα 2-7) είναι εγκατεστημένο μέσα στην κυψέλη για να εξαιρεθεί η τριβή του εμβόλου και να προκύψουν ακριβείς μετρήσεις. Το κελί φόρτισης είναι για το σκοπό αυτό αδιάβροχο και κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι.

Μία τυπική συσκευή τριαξονικής φόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-8 ενώ ένα επεξηγηματικό σκαρίφημα στην Εικόνα 2-9. Η κυψέλη είναι κατασκευασμένη από υψηλής αντοχής plexiglass ειδικά σχεδιασμένο γι' αυτή τη συσκευή με σύνθητες πάχος 10 mm. Είναι εφοδιασμένη με δύο ελεγκτές πίεσης-όγκου οι οποίοι ταυτόχρονα ελέγχουν και μετράνε τις αλλαγές του όγκου στην κυψέλη και το δείγμα. Οι ελεγκτές ελέγχονται πλήρως από ηλεκτρονικό υπολογιστή με ειδικό λογισμικό το οποίο διατίθεται μαζί με τη συσκευή.

Η μέτρηση της πίεσης γίνεται από έναν μετατροπέα (transducer) ακριβείας ο οποίος στέλνει τα δεδομένα απευθείας στο ηλεκτρονικό σύστημα λήψης δεδομένων. Το σύστημα αυτό συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους αισθητήρες (δυναμοκυψέλη, μετατροπέας πίεσης, ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης θέσης κ.λπ) τα αναλύει και τα στέλνει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η δεξαμενή νερού περιλαμβάνει μαγνητικό αναδευτήρα για την απαέρωση του νερού πριν το διοχετεύσει στο σύστημα. Η διάταξη αυτή μειώνει σημαντικά το χρόνο κορεσμού του δείγματος.



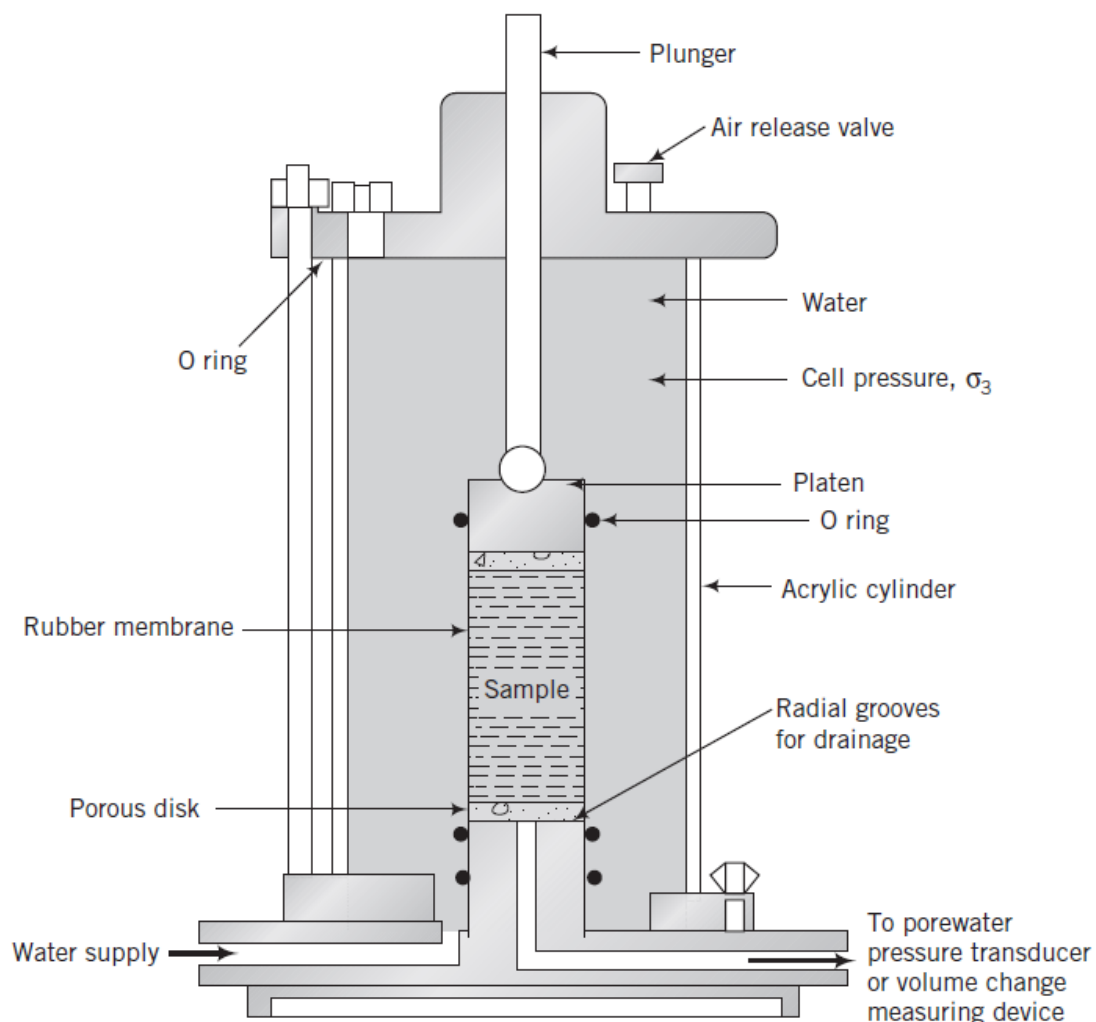
Εικόνα 2-7 Κελί φόρτισης (πηγή: διαδίκτυο)



Εικόνα 2-8 Συσκευή τριαξονικής φόρτισης (πηγή: διαδίκτυο)

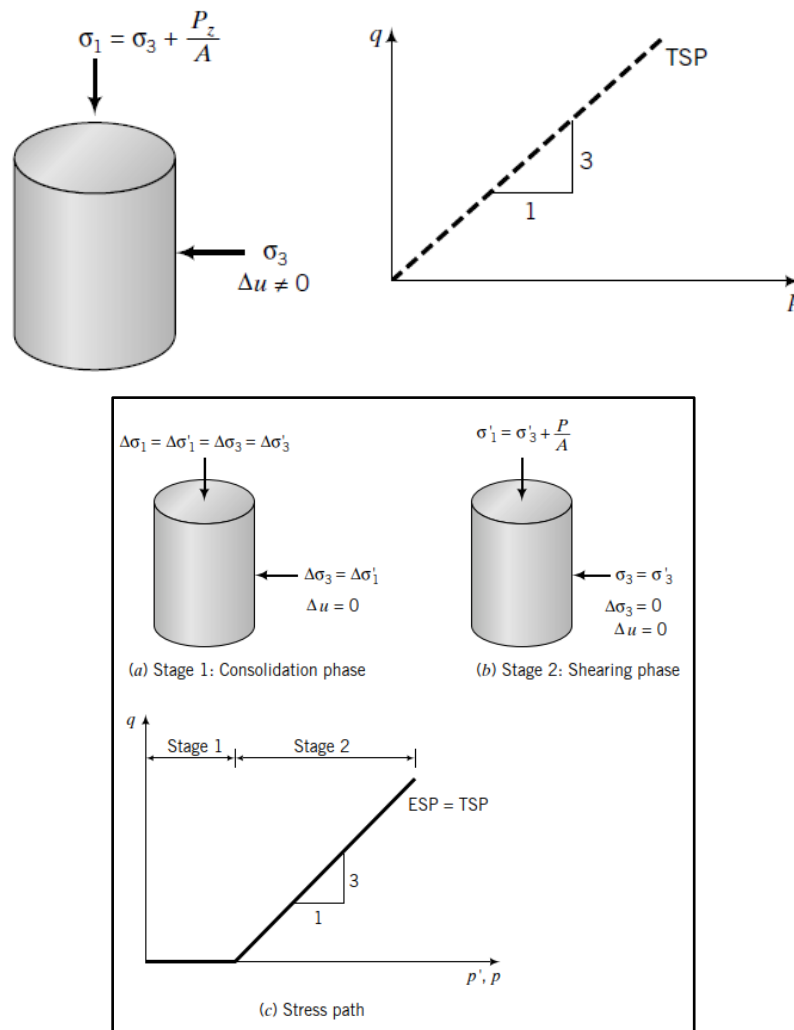
Η αυτοματοποιημένη εκτέλεση της τριαξονικής δοκιμής, μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων, του υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών σε

διάφορες πιθανές εντατικές καταστάσεις και προσδιορισμού της συμπεριφοράς του κατά την εκτέλεση ενός τεχνικού έργου συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης των παρεχόμενων υπηρεσιών εργαστηριακών δοκιμών Εδαφομηχανικής του εργαστηρίου. Η χρήση της τριαξονικής συσκευής συντελεί στην παροχή εξειδικευμένων και ολοκληρωμένων υπηρεσιών σε τομείς όπως οι μελέτες για την ασφαλή κατασκευή των επιφανειακών και υπόγειων τεχνικών έργων (κατολισθήσεις, αυτοκινητόδρομοι, φράγματα, σήραγγες, μέτρα προστασίας κλπ), οι μελέτες οικιστικής καταλληλότητας, η εκπόνηση μικροζωνικών και περιβαλλοντικών μελετών, η προστασία των μνημείων και η εκπόνηση μελετών για την εξεύρεση χώρων υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).



Εικόνα 2-9 Βασικά επιμέρους τμήματα του συστήματος της συσκευής τριαξονικής φόρτισης (Budhu, 2010)

Τρία βασικά είδη τριαξονικής δοκιμής χρησιμοποιούνται που διαχωρίζονται με βάση τις συνθήκες στράγγισης και την αρχική στερεοποίηση πριν την εφαρμογή της δοκιμής. Αρχικά, παρουσιάζεται η ταχεία δοκιμή χωρίς στερεοποίηση - χωρίς στράγγιση (Consolidated Drained - CD). Στην πρώτη φάση πραγματοποιείται στερεοποίηση του δοκιμίου στην αρχική τάση (Εικόνα 2-10 (a) και (c)). Κατά την τριαξονική φόρτιση αυτή γίνεται συνεχής στράγγιση του δοκιμίου και η ταχύτητα φόρτισης του δοκιμίου είναι τόσο βραδεία, ώστε πρακτικά να μην αναπτύσσονται υπερπιέσεις στο νερό των πόρων ($\Delta u=0$). Η δοκιμή αυτού του τύπου αντιστοιχεί στα αμμώδη εδάφη κάτω από οποιεσδήποτε πραγματικές συνθήκες (οδηγεί σε $c=0$ και $\phi \neq 0$), ενώ για τα συνεκτικά εδάφη αντιστοιχεί γενικά στην περίπτωση που ο χρόνος κατασκευής είναι αργός και το φορτίο είναι σχετικά μικρό.



Εικόνα 2-10 Δοκιμή CD: (a) προπαρασκευαστική φάση στερεοποίησης (b) κύριες τάσεις κατά την τριαξονική φόρτιση (c) διαδρομή τάσεων (ESP: effective stress path, TSP: total stress path) (Budhu, 2010)

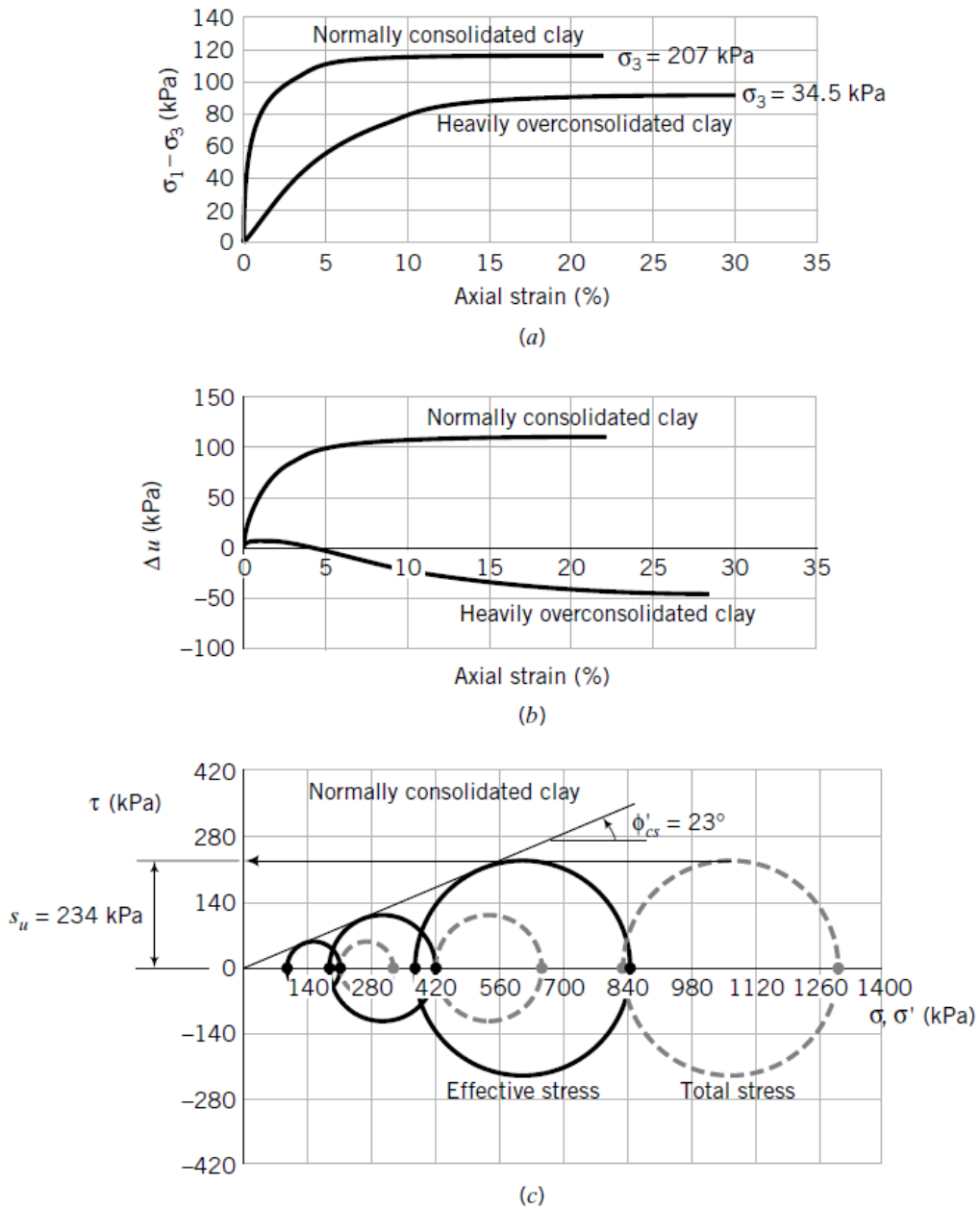
Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται η δοκιμή με στερεοποίηση - χωρίς αποστράγγιση με μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων (CUPP). Κατά τη δοκιμή αυτή εκφράζεται η κατάσταση των τάσεων σ' ένα προστερεοποιημένο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους, όπου κατά την τριαξονική φόρτισή του δεν λαμβάνει χώρα αποστράγγιση του νερού των πόρων αλλά μετράται η υπερπίεση. Κατά τη δοκιμή μετράται η υπερπίεση του νερού των πόρων. Κατά το στάδιο της διάτμησης, η ταχύτητα φόρτισής του θα πρέπει να είναι αρκετά βραδεία ώστε η πίεση των πόρων να είναι περίπου ίδια σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Η τύπου CUPP δοκιμή αντιστοιχεί στην πράξη σε αργιλικά εδάφη, στις περιπτώσεις που το κινητό φορτίο είναι σχετικά σημαντικό.

Τέλος, παρουσιάζεται η ταχεία δοκιμή χωρίς στερεοποίηση - χωρίς αποστράγγιση (UU). Κατά τη δοκιμή αυτή δεν λαμβάνει χώρα αποστράγγιση του νερού των πόρων του δοκιμίου κατά την τριαξονική φόρτιση και δεν πραγματοποιείται η αρχική φάση στερεοποίησης. Η περιβάλλουσα προκύπτει θεωρητικά παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα και τα μηχανικά χαρακτηριστικά έχουν $\varphi = \varphi_u \rightarrow 0$ και $c = c_u$. Κατά τη δοκιμή αυτή δεν μετράται η πίεση του νερού των πόρων. Η τριαξονική UU δοκιμή πρακτικά συμπίπτει με τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης στην οποία δεν υπάρχει διάταξη επιβολής πλευρικής τάσης σ_3 . Κατά τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης μετράται άμεσα η αντίστοιχη αντοχή του δοκιμίου σ και υπολογίζεται εύκολα η αστράγγιστη αντοχή c_u ίση με $\sigma/2$. Η συμπεριφορά των εδαφών και σε άλλες εντατικές καταστάσεις που οδηγούν στην αστοχία είναι ποιοτικά τουλάχιστον όμοια με τη συμπεριφορά τους κατά την κυλινδρική τριαξονική φόρτιση. Συνεπώς, τα συμπεράσματα που θα συναχθούν στα επόμενα με βάση τα αποτελέσματα της κυλινδρικής τριαξονικής δοκιμής ισχύουν κατά ποιοτική προσέγγιση και σε άλλες, περισσότερο σύνθετες, εντατικές καταστάσεις. Η γενίκευση της συμπεριφοράς των εδαφών κατά την κυλινδρική τριαξονική δοκιμή σε άλλες εντατικές καταστάσεις αποτελεί τον κύριο σκοπό των καταστατικών νόμων. Μία από τις πρώτες (και ιδιαίτερα επιτυχημένες) προσπάθειες για την ικανοποιητική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με βάση τη λογική της γενίκευσης της συμπεριφοράς τους κατά την κυλινδρική τριαξονική δοκιμή, έγινε από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Cambridge και φέρει το όνομα "Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης". Η Εικόνα 2-11 παρουσιάζει μία τυπική συμπεριφορά κατά την τριαξονική θλίψη με προστερεοποίηση χωρίς στράγγιση (CUPP) σε αργίλους.

Η συμπεριφορά των κοκκωδών και συνεκτικών εδαφών είναι ποιοτικά ανάλογη και μάλιστα οι χαλαρές άμμοι συμπεριφέρονται όπως οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι, ενώ οι πυκνές άμμοι όπως οι ισχυρά υπερστερεοποιημένες άργιλοι.

Η πραγματική συμπεριφορά πολλών εδαφικών υλικών επηρεάζεται από παράγοντες, όπως η αρχική ανισοτροπία, δηλαδή η στερεοποίηση υπό ανισότροπη εντατική κατάσταση. Ακόμα, ένας παράγοντας θεωρείται η γήρανση, λόγω του μεγάλου χρόνου που παρήλθε από την αρχική στερεοποίηση των πραγματικών εδαφικών σχηματισμών, με συνέπεια την ανάπτυξη θιξοτροπικών δεσμών, δεσμών σιμέντωσης κλπ.

Επιπροσθέτως, η φόρτιση με εντατικές καταστάσεις διάφορες της κυλινδρικής τριαξονικής συμπίεσης, αλλά και η διαφορετική ταχύτητα φόρτισης στη φύση από ότι στο εργαστήριο αποτελούν σημαντικούς παράγοντες επιρροής. Τέλος, με τη μερική εκτόνωση των πιέσεων πόρων στη φύση (η απόλυτα αστράγγιστη φόρτιση είναι οριακή κατάσταση) συνοψίζονται οι παραπάνω παράγοντες.



Εικόνα 2-11 Δοκιμές Τριαξονικής θλίψης σε αργίλους. (Budhu, 2010)

3 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

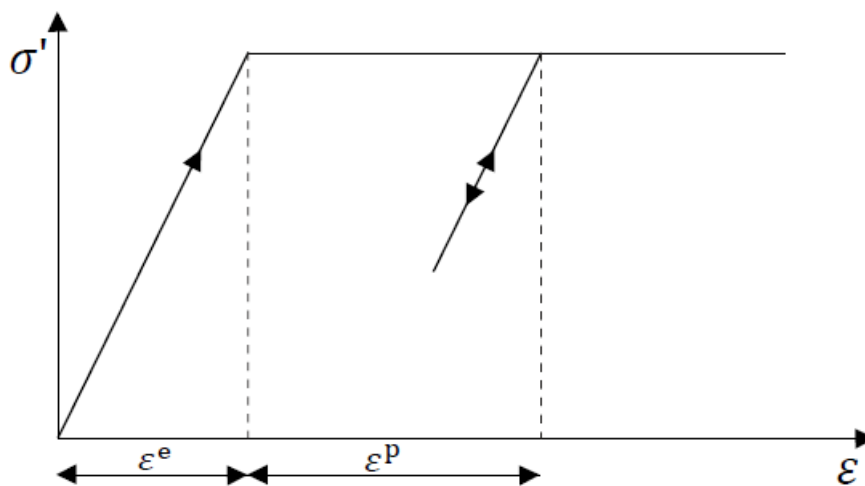
3.1 Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)

Τα εδάφη συμπεριφέρονται συνήθως μη γραμμικά όταν υπόκεινται σε μεταβολές τάσεων ή παραμορφώσεων. Επιπλέον, η δυσκαμψία του εδάφους εξαρτάται τουλάχιστον από το επίπεδο της τάσης, τη διαδρομή των τάσεων και το επίπεδο της παραμόρφωσης. Το πλέον απλό αλλά και ευρέως γνωστό προσομοίωμα είναι το γραμμικά ελαστικό τελείως πλαστικό προσομοίωμα, που αποκαλείται απλουστευτικά προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Παρότι υποθέτει γραμμική συμπεριφορά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια πρώτη προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους. Το γραμμικό ελαστικό μέρος βασίζεται στην ισότροπη γραμμική ελαστική συμπεριφορά (η οποία γενικεύει τον νόμο του Hooke). Το απόλυτα πλαστικό μέρος βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, εξού και το απλουστευμένο όνομα, το οποίο διατυπώνεται σε ένα πλαίσιο μη συσχετισμένης πλαστικότητας. Η Εικόνα 3-1 παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία του προσομοιώματος στο επίπεδο τάσης-παραμόρφωσης. Η σχέση της τάσης με την παραμόρφωση είναι γραμμική και ελαστική (ϵ^e) μέχρι να φτάσει η τάση στο όριο της οπότε και παραμένει σταθερή ενώ αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις (ϵ^p).

Η πλαστικότητα περιλαμβάνει την ανάπτυξη μη αναστρέψιμων παραμορφώσεων. Προκειμένου να αξιολογηθεί εάν εμφανίζεται ή όχι πλαστικότητα εισάγεται μια συνάρτηση διαρροής, f , ως συνάρτηση της τάσης και της παραμόρφωσης. Η πλαστική διαρροή σχετίζεται με τη συνθήκη $f = 0$. Η συνθήκη αυτή μπορεί συχνά να παρουσιαστεί ως επιφάνεια στο χώρο των κύριων τάσεων. Για καταστάσεις τάσεων που αντιπροσωπεύονται από σημεία εντός της επιφάνειας διαρροής, η συμπεριφορά είναι ελαστική και όλες οι παραμορφώσεις είναι αντιστρεπτές.

Το γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb απαιτεί συνολικά πέντε παραμέτρους, οι οποίες είναι γενικά γνωστές στους περισσότερους γεωτεχνικούς μηχανικούς και οι οποίες μπορούν να ληφθούν από βασικές δοκιμές σε

δείγματα εδάφους. Αρχικά, έχουμε το Μέτρο Ελαστικότητας κατά Young το οποίο χρησιμοποιείται ως βασικό μέτρο δυσκαμψίας στο ελαστικό μέρος και συσχετίζει τάσεις και παραμορφώσεις (π.χ. Εικόνα 3-1, περιοχή ϵ^e). Οι τιμές της παραμέτρου δυσκαμψίας που υιοθετούνται σε μία ανάλυση απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, καθώς πολλά γεωυλικά παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά από την αρχή της φόρτισης. Για παράδειγμα, τα βαθιά εδαφικά στρώματα τείνουν να έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία από τα ρηχά στρώματα. Επιπλέον, η παρατηρούμενη δυσκαμψία εξαρτάται από την ακολουθούμενη διαδρομή της τάσης.



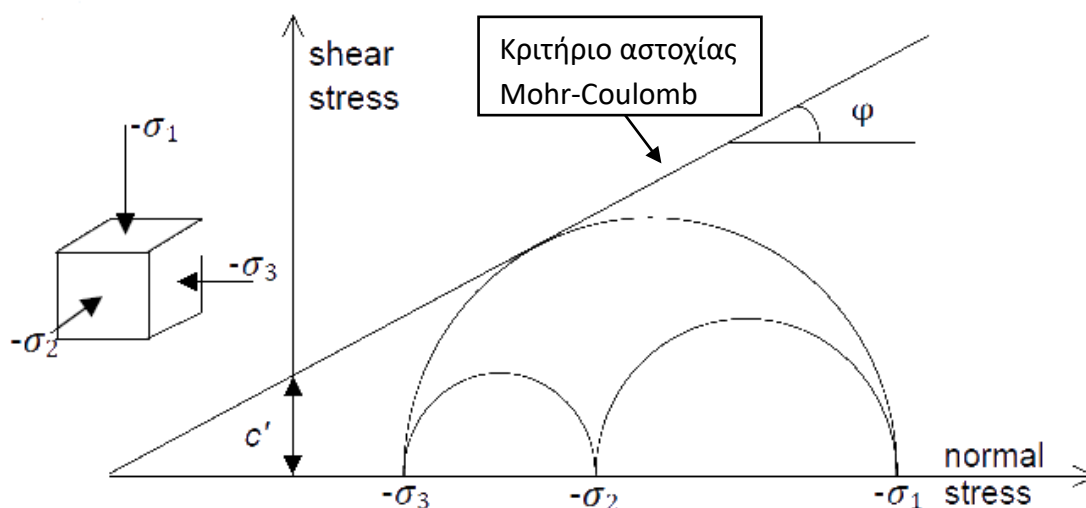
Εικόνα 3-1 – Βασικά στοιχεία του γραμμικά ελαστικού τέλεια πλαστικού προσομοιώματος (PLAXIS, 2011)

Η δυσκαμψία είναι πολύ υψηλότερη για την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση από ότι για την πρωτογενή φόρτιση. Επίσης, η παρατηρούμενη δυσκαμψία του εδάφους σε όρους μέτρου ελαστικότητας Young μπορεί να είναι χαμηλότερη για (στραγγισμένη) συμπίεση από ότι για διάτμηση. Ως εκ τούτου, όταν χρησιμοποιείται ένα σταθερό μέτρο δυσκαμψίας για την αναπαράσταση του εδάφους συμπεριφοράς του εδάφους θα πρέπει να επιλέγεται μια τιμή που να είναι συνεπής με το επίπεδο τάσης και την εξέλιξη της διαδρομής της τάσης.

Επιπλέον, σημαντική παράμετρος είναι ο λόγος Poisson (ν). Ο λόγος αυτός χαρακτηρίζει τη σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων και κατ' επέκταση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μεταβολή του όγκου. Για παράδειγμα, οι συνήθεις

τριαξονικές δοκιμές με στράγγιση μπορεί να δώσουν ένα σημαντικό ποσοστό μείωσης του όγκου στην αρχή της αξονικής φόρτισης και, κατά συνέπεια, χαμηλή αρχική τιμή του λόγου Poisson (ν). Γενικά όταν χρησιμοποιείται το προσομοίωμα Mohr-Coulomb συνιστάται η χρήση υψηλότερης τιμής. Καλύτερη είναι η μέτρηση του λόγου Poisson για χρήση με το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Συνήθεις τιμές του λόγου Poisson κυμαίνονται στο εύρος μεταξύ 0,2 και 0,4.

Δύο παράμετροι χαρακτηρίζουν το κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb και συνεπώς την αντοχή του εδάφους, η συνοχή (c) και η γωνία τριβής (ϕ). Το κριτήριο παρουσιάζεται ως οριακή γραμμή του συνδυασμού ορθής διατμητικής τάσης στην Εικόνα 3-2.



Εικόνα 3-2 Κύκλοι τάσεων σε διαρροή, χρησιμοποιώντας παραμέτρους πραγματικής αντοχής. Ο ένας αγγίζει την περιβάλλουσα του Coulomb.

Η συνοχή έχει τη διάσταση της τάσης και χαρακτηρίζει την τομή της ευθείας του κριτηρίου με τον άξονα όπου η ορθή τάση είναι μηδέν. Με άλλα λόγια, είναι η αντοχή του εδάφους ακόμη και χωρίς την ύπαρξη ορθής τάσης. Η γωνία τριβής ϕ συνήθως χρησιμοποιείται σε μοίρες και αποτελεί μία ακόμη βασική παράμετρο. Γενικά η γωνία τριβής χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της τριβής του εδάφους, σε συνδυασμό με την αποτελεσματική συνοχή c' . Υψηλές γωνίες τριβής,

όπως μερικές φορές επιτυγχάνονται για πυκνές άμμους, θα αυξήσουν σημαντικά την αντοχή. Παρ'όλα αυτά, εδάφη με υψηλή γωνία τριβής μπορεί να υπόκεινται σε συμπεριφορά χαλάρωσης λόγω παραμόρφωσης, πράγμα που σημαίνει ότι τέτοιες υψηλές γωνίες τριβής δεν είναι βιώσιμες υπό (μεγάλη) παραμόρφωση. Η γωνία τριβής καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διατμητική αντοχή μέσω των κύκλων τάσεων του Mohr.

Τέλος, η γωνία διαστολικότητας, ψ (psi), συνήθως εισάγεται σε μοίρες. Εκτός από τα έντονα υπερστερεοποιημένα στρώματα, τα αργιλικά εδάφη τείνουν να παρουσιάζουν μικρή διαστολικότητα ($\psi \approx 0$). Η διαστολικότητα της άμμου εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα όσο και από τη γωνία τριβής. Γενικά, η γωνία διαστολής των εδαφών είναι πολύ μικρότερη από τη γωνία τριβής. Για τιμές ϕ μικρότερες από 30° , η γωνία διαστολής είναι και λαμβάνεται ως επί το πλείστον μηδενική. Μια μικρή αρνητική τιμή για το ψ είναι ρεαλιστική μόνο για εξαιρετικά χαλαρές άμμους. Μια θετική γωνία διαστολής υποδηλώνει ότι σε στραγγισμένες συνθήκες το έδαφος θα συνεχίσει να διαστέλλεται όσο η διάτμηση παραμόρφωση. Αυτό είναι μη ρεαλιστικό, καθώς τα περισσότερα εδάφη θα φτάσουν σε μια κρίσιμη κατάσταση σε κάποιο σημείο και περαιτέρω διατμητική παραμόρφωση θα συμβεί χωρίς αλλαγές στον όγκο. Σε μη στραγγιζόμενες συνθήκες η γωνία διαστολής είναι θετική, σε συνδυασμό με τον περιορισμό των αλλαγών όγκου, οδηγεί στη δημιουργία εφελκυστικών τάσεων πόρων. Σε μια μη στραγγισμένη ανάλυση ενεργών τάσεων, επομένως, η αντοχή του εδάφους μπορεί να υπερεκτιμηθεί στην περίπτωση χρήσης μη μηδενικής γωνίας διαστολικότητας.

3.2 Hardening Soil

Σε αντίθεση με το γραμμικά ελαστικό απόλυτα πλαστικό προσομοίωμα, η επιφάνεια διαρροής ενός προσομοιώματος που χρησιμοποιεί το πλαίσιο της πλαστικότητας δεν είναι σταθερή στο χώρο των κύριων τάσεων, αλλά μπορεί να επεκταθεί ή να αλλάξει λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ δύο κύριων τύπων κράτνσης (hardening), την κράτνση λόγω διάτμησης και την κράτνση λόγω συμπίεσης. Η κράτνση λόγω διάτμησης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μη αντιστρεπτών παραμορφώσεων που οφείλονται σε πρωτογενή διατμητική φόρτιση. Η κράτνση λόγω συμπίεσης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μη αντιστρεπτών πλαστικών παραμορφώσεων που οφείλονται σε πρωτογενή θλίψη σε

οιδημετρική και ισοτροπική φόρτιση. Και οι δύο τύποι κράτυνσης περιέχονται στο παρόν μοντέλο.

Το Hardening Soil είναι ένα προηγμένο προσομοίωμα για τη συμπεριφοράς διαφόρων τύπων εδάφους, τόσο μαλακών όσο και στιφρών. Όταν υποβάλλεται σε πρωτογενή διατμητική φόρτιση, το έδαφος παρουσιάζει φθίνουσα δυσκαμψία και ταυτόχρονα αναπτύσσονται μη αντιστρεπτές πλαστικές παραμορφώσεις. Στην ειδική περίπτωση μιας στραγγιζόμενης τριαξονικής δοκιμής, η σχέση μεταξύ της αξονικής παραμόρφωσης και της αποκλίνουσας τάσης μπορεί να προσεγγιστεί από μια υπερβολή (Εικόνα 3-3).

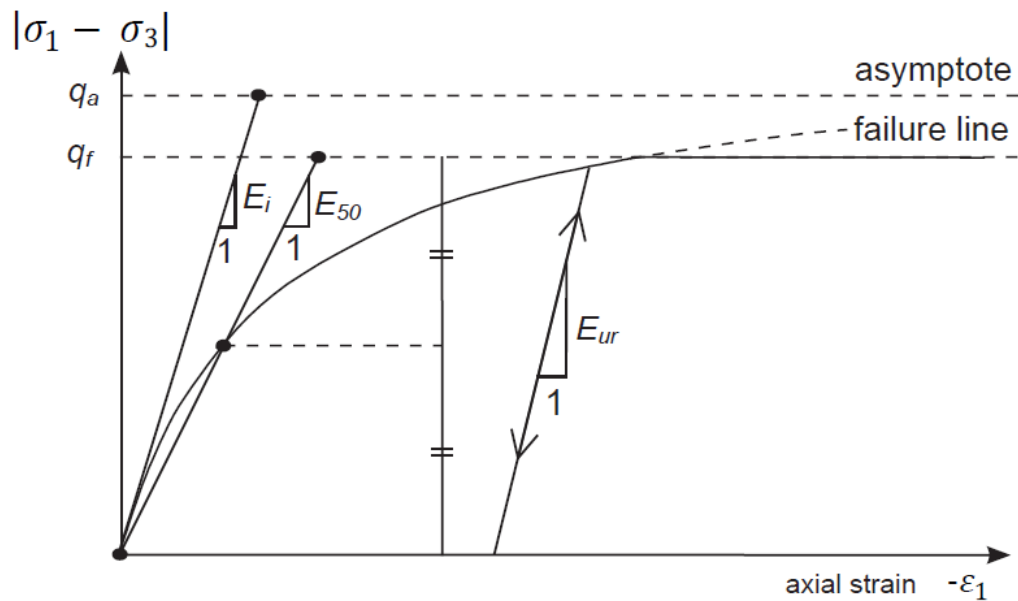
Ορισμένες παράμετροι του Hardening Soil συμπίπτουν με εκείνες του προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Πρόκειται για τις παραμέτρους αντοχής c , ϕ και τη γωνία διαστολικότητας ψ . Το πλεονέκτημα του μοντέλου Hardening Soil έναντι του μοντέλου Mohr-Coulomb δεν είναι μόνο η χρήση μιας μη γραμμικής (υπερβολικής) καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, αλλά και η εξάρτηση του μέτρου δυσκαμψίας (E_{50}) από το επίπεδο των τάσεων. Όταν χρησιμοποιείται το Mohr-Coulomb, επιλέγεται μια σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας Young, ενώ για τα πραγματικά εδάφη αυτή η δυσκαμψία εξαρτάται από το επίπεδο τάσης. Επομένως, είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν τα επίπεδα τάσεων εντός του εδάφους και να χρησιμοποιηθούν αυτά για να ληφθούν οι κατάλληλες τιμές της δυσκαμψίας. Με το Hardening Soil, ωστόσο, αυτή η δύσκολη επιλογή δεν απαιτείται αλλά η τιμή του υμέτρου δυσκαμψίας εξαρτάται από το βάθος. Το βασικό μέτρο δυσκαμψίας για το Hardening Soil είναι το $E_{50,ref}$ που ορίζεται για μία ενεργό τάση αναφοράς. Αυτό το μέτρο ορίζει τη δυσκαμψία στο 50% της μέγιστης αποκλίνουσας τάσης, σε πίεση ίση με την τάση αναφοράς p_{ref} .

Επιπλέον, σε αντίθεση με τα προσομοιώματα που βασίζονται στην ελαστικότητα, το ελαστοπλαστικό μοντέλο Hardening Soil δεν περιλαμβάνει ένα σταθερό σχέση μεταξύ της (στραγγιζόμενης) τριαξονικής δυσκαμψίας E_{50} και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης (ή μετρο οιδημέτρου) E_{oed} (Εικόνα 3-4). Αντ' αυτού, αυτές οι δυσκαμψίες μπορούν να εισαχθούν ανεξάρτητα.

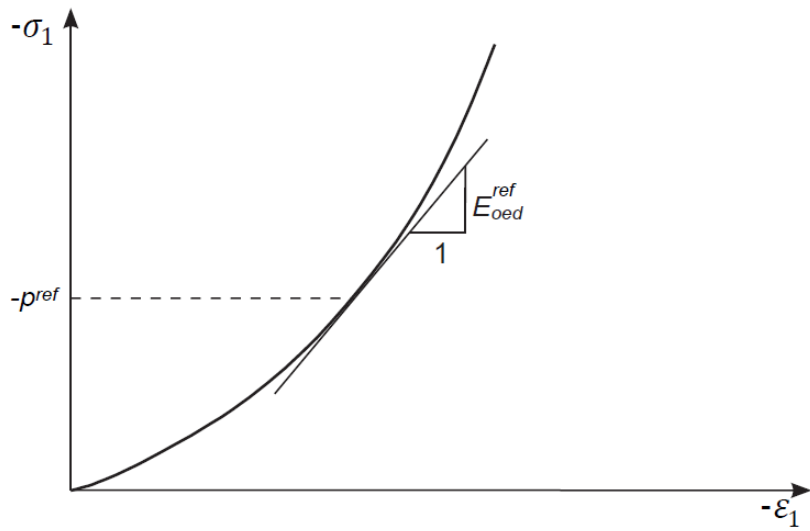
Το μέτρο ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση ($E_{ur,ref}$) στην περίπτωση του Hardening Soil είναι ανεξάρτητο του μέτρου πρωτογενούς φόρτισης σε αντίθεση με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb όπου τα δύο μέτρα είναι εξ' ορισμού ίσα. Αυτό δίνει ένα σαφές πλεονέκτημα στο Hardening Soil στην περίπτωση όπου

προσομοιώνεται στο έδαφος κάποια περίπτωση αποφόρτισης (π.χ. εκσκαφή). Το μέτρο αποφόρτισης/επαναφόρτισης υπολογίζεται μέσω τριαξονικών δοκιμών όπου το υλικό αποφορτίζεται και επαναφορτίζεται. Η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή της αποφόρτισης με το πέρας της και στην συνέχεια την επαναφόρτιση, δίνει το μέτρο αυτό (Εικόνα 3-5). Καθώς τέτοιου τύπου δοκιμές διεξάγονται σπάνια, γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι $E_{ur,ref} = 3E_{50,ref}$.

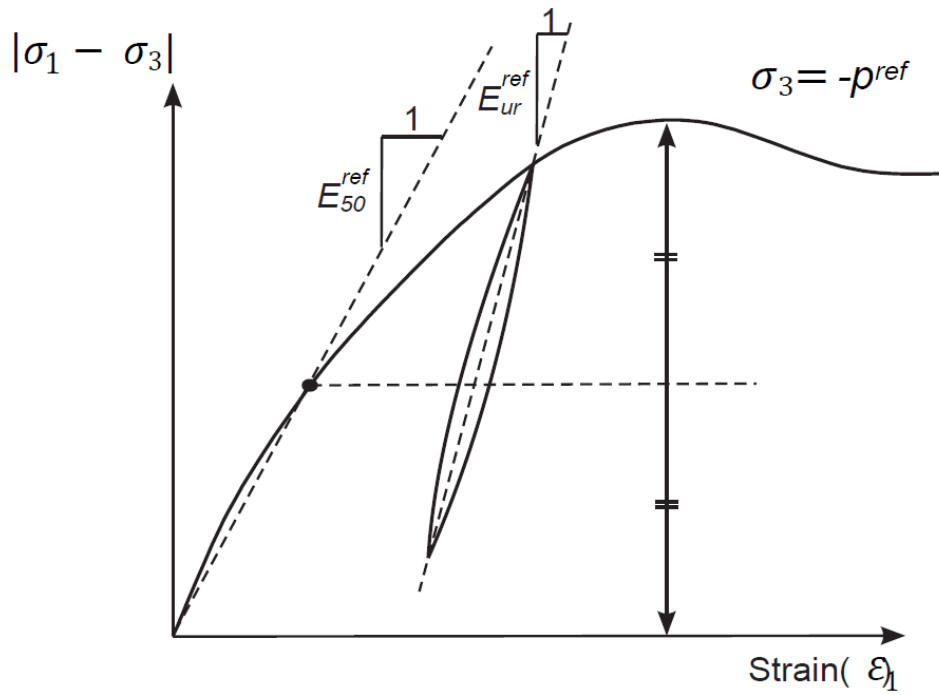
deviatoric stress



Εικόνα 3-3 Υπερβολική σχέση Τάσεων- Παραμορφώσεων σε τριαξονική φόρτιση. (PLAXIS, 2011)



Εικόνα 3-4 Διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. (PLAXIS, 2011)



Εικόνα 3-5 Αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε τριαξονική δοκιμή. (PLAXIS, 2011)

4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Για τη βαθμονόμηση των καταστατικών προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις τριαξονικών δοκιμών από την περιοχή της Σουλού, όπως αυτές περιγράφονται και στο Κεφάλαιο 2. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 23 τριαξονικές δοκιμές CUPP, από τις οποίες επιλέχθηκαν 8 με την πιο κατάλληλη συμπεριφορά για να περιγράψουν τη μέση απόκριση των στείρων. Από τα αποτελέσματα αυτών των τριαξονικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης ($q=\sigma_1-\sigma_3$) με αξονική παραμόρφωση (ϵ_a) και υπερπίεσης πόρων με (u) αξονική παραμόρφωσης (ϵ_a), τα οποία και αξιοποιήθηκαν για τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Δύο προσομοιώματα βαθμονομήθηκαν, το γραμμικά ελαστικό-τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb) και το Hardening Soil. Για το κάθε προσομοίωμα ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία και οδήγησαν σε αντίστοιχα αποτελέσματα βαθμονόμησης.

Βασικός στόχος ήταν να καταλήξουμε σε μία μέση απόκριση όσον αφορά τη συμπεριφορά των στείρων, αλλά και δύο όρια, ένα πάνω και ένα κάτω. Οι τρεις αυτές καμπύλες προσδιορίστηκαν καταρχάς με την αξιοποίηση του διαγράμματος των τριαξονικών δοκιμών για πίεση κυψέλης ίση με 100kPa. Κατόπιν, έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών για πίεση κυψέλης 200kPa και 400kPa αλλά και τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης (οιδήμετρο) για όσες τέτοιες δοκιμές είχαν γίνει. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PLAXIS και συγκεκριμένα η εφαρμογή soil test η οποία δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθεί η συμπεριφορά ενός εδάφους σε διάφορες κλασικές φορτίσεις εδαφομηχανικής.

4.1 Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)

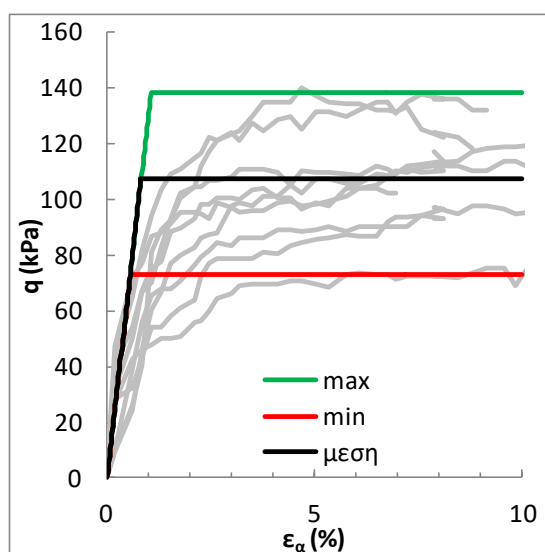
Αρχικά, επιλέχθηκε ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας (E) ίσο με 6,5MPa και ένας τυπικός λόγος Poisson (ν) 0,2. Οι δυο αυτοί παράγοντες (και βασικά το μέτρο ελαστικότητας) επηρεάζουν την αρχική ελαστική κλίση των βαθμονομημένων

καμπυλών-αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν τρεις συνδυασμοί τιμών της συνοχής του εδάφους (c) και της γωνίας τριβής (ϕ) για να καθορίσουν τις τρεις καμπύλες (μέση και πάνω-κάτω όριο). Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει τα ζεύγη τιμών c - ϕ .

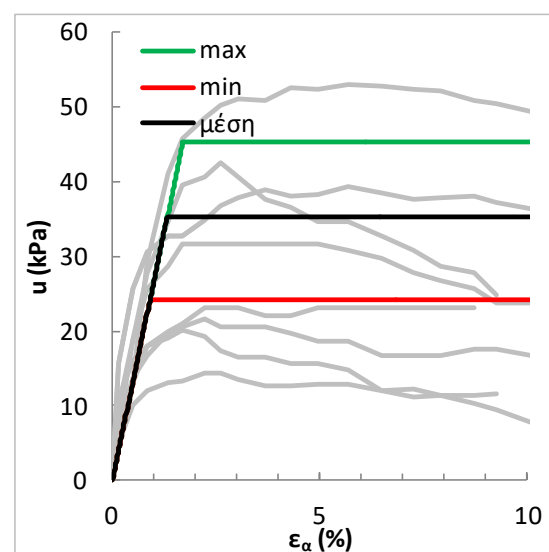
Η Εικόνα 4-1α) αποτελεί το βασικό αποτέλεσμα της βαθμονόμησης, αποκλίνουσα τάση στα 100kPa, με βάση τις παραμέτρους του Πίνακα 4-1. Τα πειραματικά αποτελέσματα των 8 δειγμάτων παρουσιάζονται με γκρι χρώμα, ενώ με μαύρο χρώμα η μέση απόκριση, με πράσινο το πάνω όριο και με κόκκινο το κάτω. Το ίδιο χρωματικό μοτίβο ακολουθείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα. Παράλληλα η Εικόνα 4-1β) παρουσιάζει τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης όσον αφορά την υπερπίεση των πόρων με την αξονική παραμόρφωση (u - ϵ_a) καθότι συμπληρώνει τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής CUPP.

Πίνακας 4-1 Βασικοί συνδυασμοί παραμέτρων για το προσομοίωμα Mohr-Coulomb

	E (MPa)	ν	ϕ (°)	c (kPa)
Minimum	6,5	0,2	19	0
Average	6,5	0,2	22	10
Maximum	6,5	0,2	25,5	17,5



α)

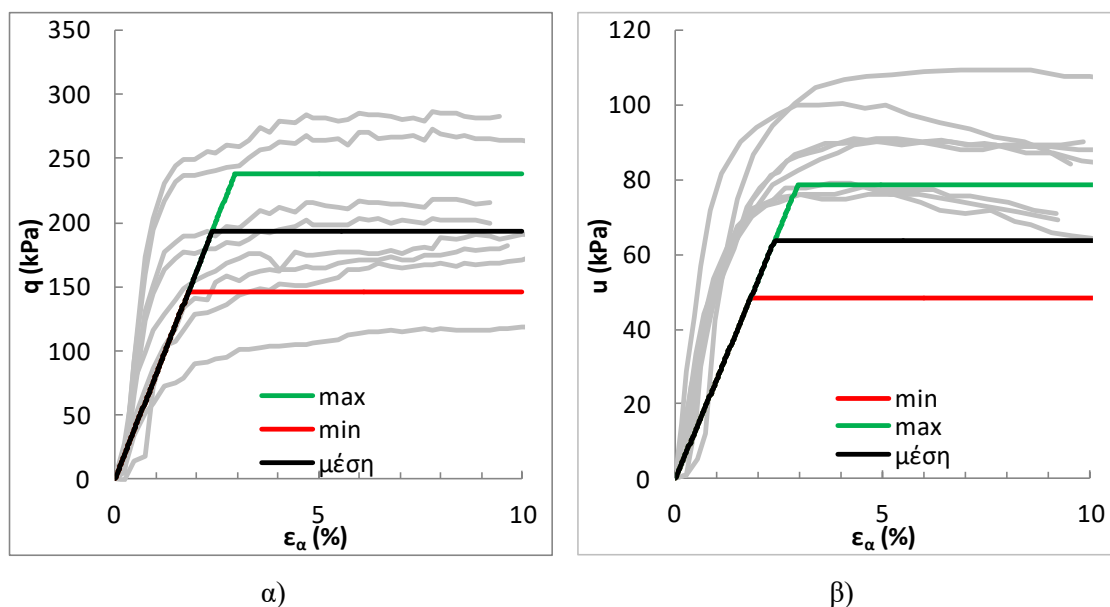


β)

Εικόνα 4-1 Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$

Οι αποκλίνουσες τάσεις (q) αντιστοιχούν άριστα με τη βαθμονόμηση (καθότι εκεί βασίστηκε). Οι πιέσεις πόρων (u) αντιστοιχούν σχετικά καλά υπάρχουν όμως και καμπύλες κάτω από το κάτω όριο, και μια πάνω από το άνω όριο. Ακόμα, παρατηρείται σχετικά καλή συμφωνία με την αρχική κλίση.

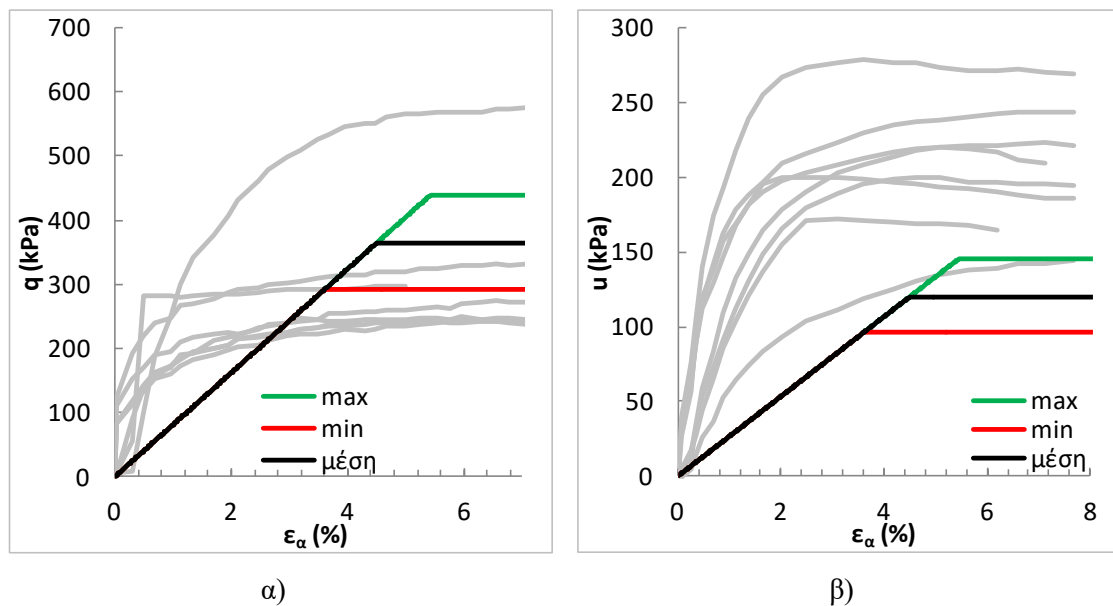
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα διαγράμματα για πίεση κυψέλης στα 200kPa και 400kPa (Εικόνα 4-2 και Εικόνα 4-3 αντίστοιχα). Για τις τιμές αυτές γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προσομοιώσεων, ώστε να κριθεί η ακρίβεια των βαθμονομήσεων.



Εικόνα 4-2 Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$

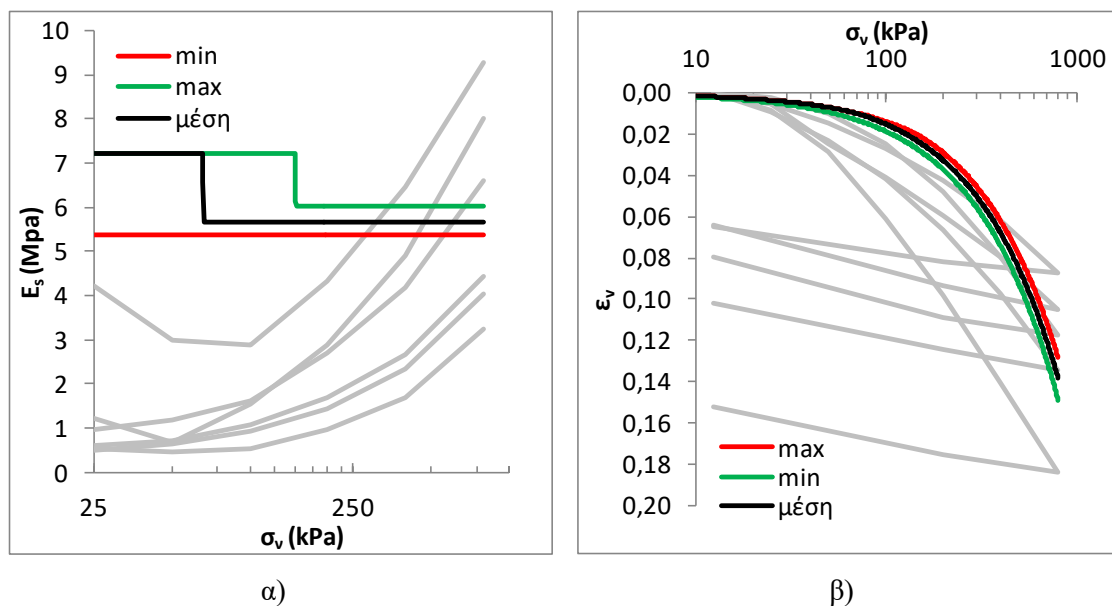
Παρατηρείται ότι οι πιέσεις πόρων γενικώς υποεκτιμούνται από το προσομοίωμα για τις παραπάνω πιέσεις κυψέλης. Το μέτρο ελαστικότητας κρίνεται χαμηλό, καθώς ειδικά για πίεση κυψέλης 400kPa (Εικόνα 4-3) και λιγότερο για πίεση κυψέλης 400kPa (Εικόνα 4-2) η κλίση είναι χαμηλή σε σχέση με τις πειραματικά αποτελέσματα. Η αντοχή σε επίπεδο αποκλίνουσας τάσης συμπίπτει καλύτερα με τα πειραματικά αποτελέσματα, χωρίς όμως να υπάρχει ιδιαίτερη ακρίβεια για πίεση

κυψέλης 400kPa (Εικόνα 4-3). Η μέση καμπύλη είναι καλή στα 200kPa αλλά υπερεκτιμά την αντοχή για 400kPa. Το μέτρο ελαστικότητας είναι επαρκές για τα 200kPa, πολύ χαμηλό για τα 400kPa. Συνολικά η προσομοίωση είναι επαρκής μέχρι περίπου 200kPa αλλά όσο αυξάνεται η τάση (ή το βάθος εφαρμογής του προσομοιώματος) αποκλίνουν από την αναμενόμενη συμπεριφορά.



Εικόνα 4-3 Πίεση κυψέλης 400kPa: α) Διάγραμμα q (kPa)- ϵ_a (%), β) Διάγραμμα u (kPa)- ϵ_a (%)

Κατόπιν, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία για τη σύγκριση της βαθμονόμησης με τα αποτελέσματα της δοκιμής οιδιμέτρου. Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω στο πρόγραμμα PLAXIS αντλήσαμε τα στοιχεία για την δημιουργία των επιθυμητών διαγραμμάτων. Η συνολική πρωτογενείς φόρτιση ήταν 800kPa, παρόμοια με αυτή των πειραματικών δοκιμών και ακολούθησε ένας κλάδος αποφόρτισης. Στην Εικόνα 4-4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ογκομετρικής παραμόρφωσης (ϵ_v) και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης (E_s) με τον δεκαδικό λογάριθμο της τάσης.



Εικόνα 4-4 - α) Διάγραμμα E_s (MPa)- σ'_v (kPa), β) Διάγραμμα ϵ_v - σ'_v (kPa)

Οι καμπύλες ϵ_v - σ'_v (Εικόνα 4-4α) θεωρούνται ικανοποιητικές, καθώς ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα (Εικόνα 4-4α) δεν είναι εμφανής η καμπύλη αποφόρτισης των βαθμονομήσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς ταυτίζεται με την καμπύλη φόρτισης, σε αντίθεση με τις καμπύλες των δοκιμών όπου η καμπύλη αποφόρτισης είναι διαφορετική. Αυτό είναι και ένα βασικό μειονέκτημα του προσομιώματος Mohr-Coulomb.

Μια βασική διαφορά συναντάται στο διάγραμμα E_s - σ'_v (Εικόνα 4-4α) και αφορά τη μορφή των καμπυλών. Διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες των πειραματικών δοκιμών είναι εμφανώς μη γραμμικές, ενώ αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση είναι βηματικές (σταθερές ή με δύο τιμές). Στη μέγιστη και μέση κατάσταση παρατηρούμε μία βηματική αλλαγή του E_s , καθώς απεικονίζεται αρχικά η ελαστική τιμή και κατόπιν η τιμή που αντιστοιχεί στην επιφάνεια αστοχίας Mohr-Coulomb και επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερη τάση. Αντιθέτως, στην ελάχιστη περίπτωση (min) το προσομοίωμα προβλέπει μία τιμή, την τιμή του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης που αντιστοιχεί στην επιφάνεια αστοχίας Mohr-Coulomb λόγω της χαμηλότερης αντοχής.

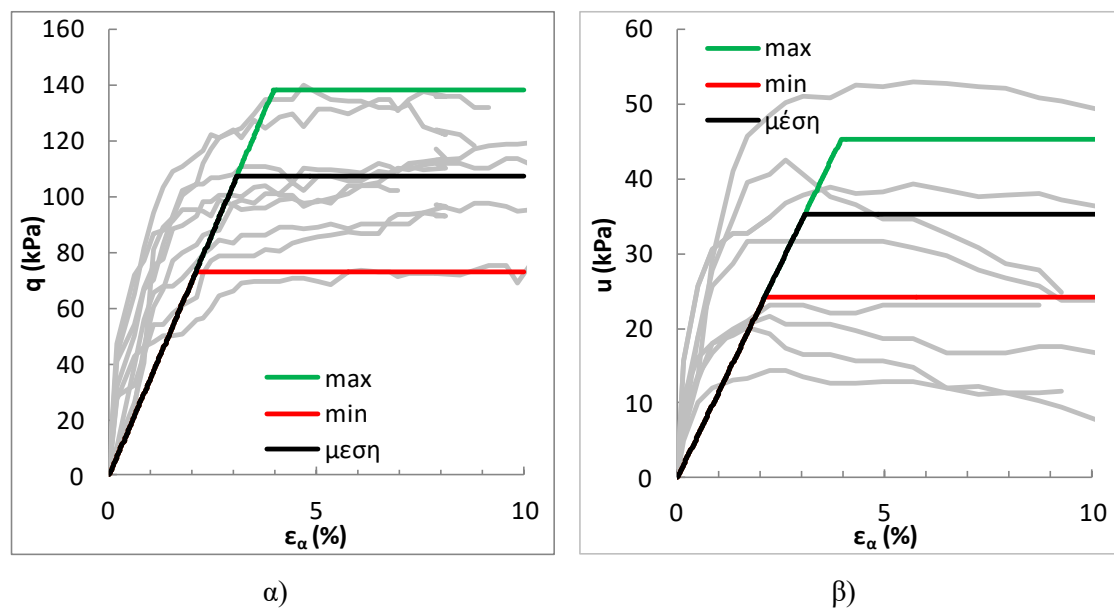
Κατόπιν της παραπάνω βαθμονόμησης, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει ανάλυση και για δύο επιπλέον μέτρα ελαστικότητας, ένα μικρότερο και ένα μεγαλύτερο. Αυτό έγινε για να συγκριθεί η βαθμονόμηση στις μεγαλύτερες φορτίσεις με τις διαφορετικές

κλίσεις που δίνουν τα μέτρα ελαστικότητας. Τα επιπλέον μέτρα που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.

Τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων παρουσιάζονται στις Εικόνα 4-5, Εικόνα 4-6, Εικόνα 4-7 και Εικόνα 4-8 για το $E=2,8\text{MPa}$ και στις Εικόνα 4-9, Εικόνα 4-10, 4-11 και Εικόνα 4-12 για το $E=10,5\text{MPa}$.

Πίνακας 4-2 Τιμές μέτρου ελαστικότητας E

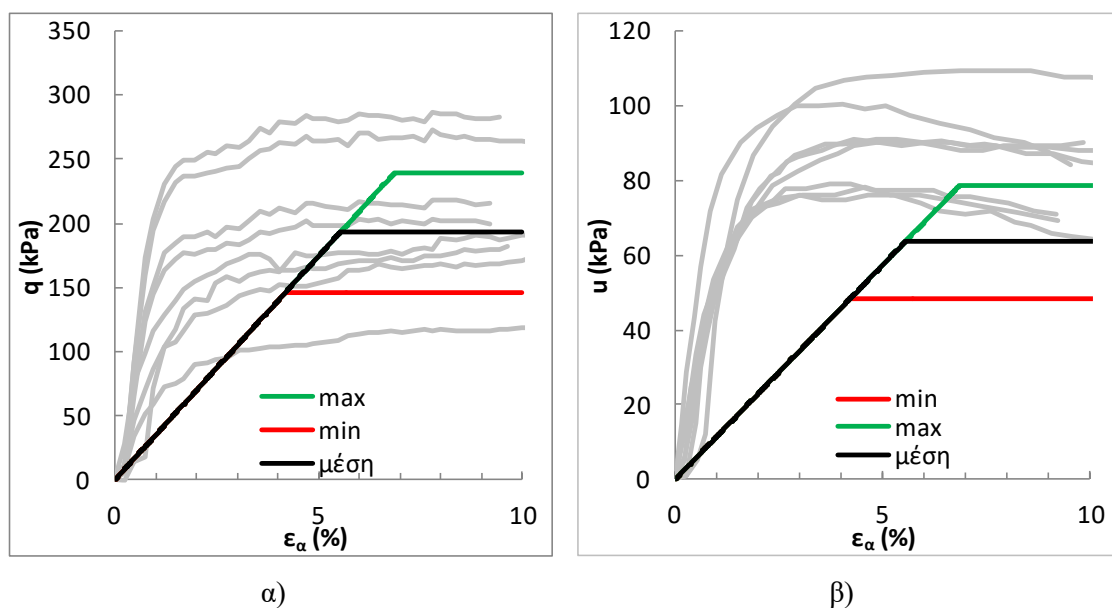
	E (MPa)	ν
Minimum	2,8	0,2
Average	6,5	0,2
Maximum	10,5	0,2



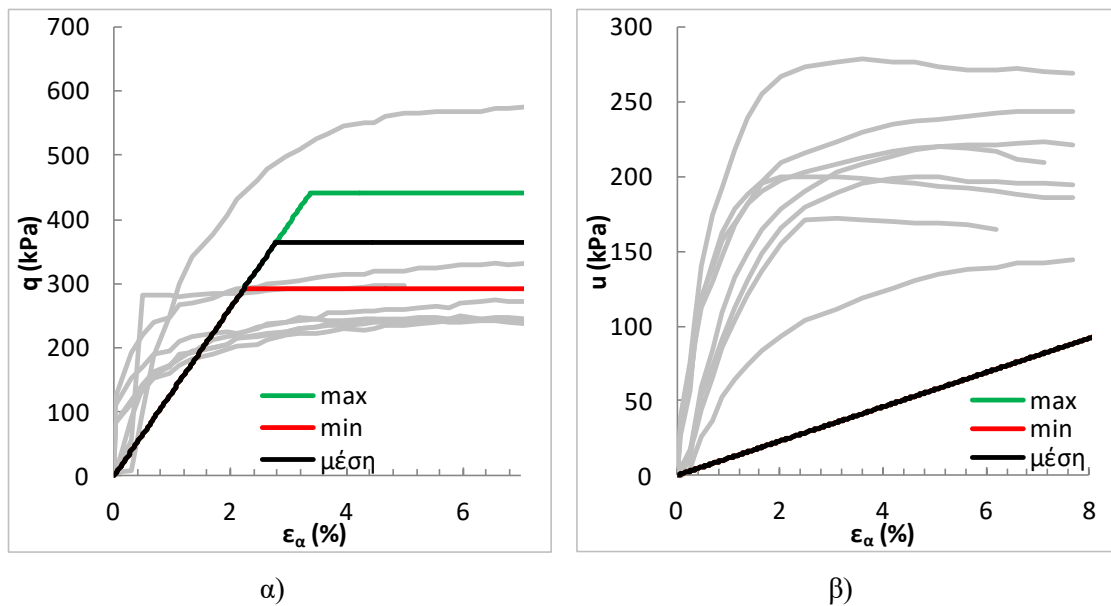
Εικόνα 4-5 $E=2,8\text{MPa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\epsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\epsilon_a(\%)$

Αρχικά, για την περίπτωση του $E=2,8\text{MPa}$ παρατηρείται ότι οι πιέσεις πόρων υποεκτιμούνται από το προσομοίωμα για φόρτιση κυψέλης 200 και 400kPa των

τριαξονικών δοκιμών (Εικόνα 4-6β και Εικόνα 4-7β). Το μέτρο ελαστικότητας είναι γενικά χαμηλό παράγοντας χαμηλές κλίσεις στις καμπύλες, με ενδεικτικό παράδειγμα την Εικόνα 4-7β. λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας οι καμπύλες των βαθμονομήσεων δεν συμπίπτουν καθόλου με αυτές των πειραματικών δοκιμών, με αποτέλεσμα να μην είναι ορατές στον χώρο των τιμών που μελετάμε στο συγκεκριμένο διάγραμμα.

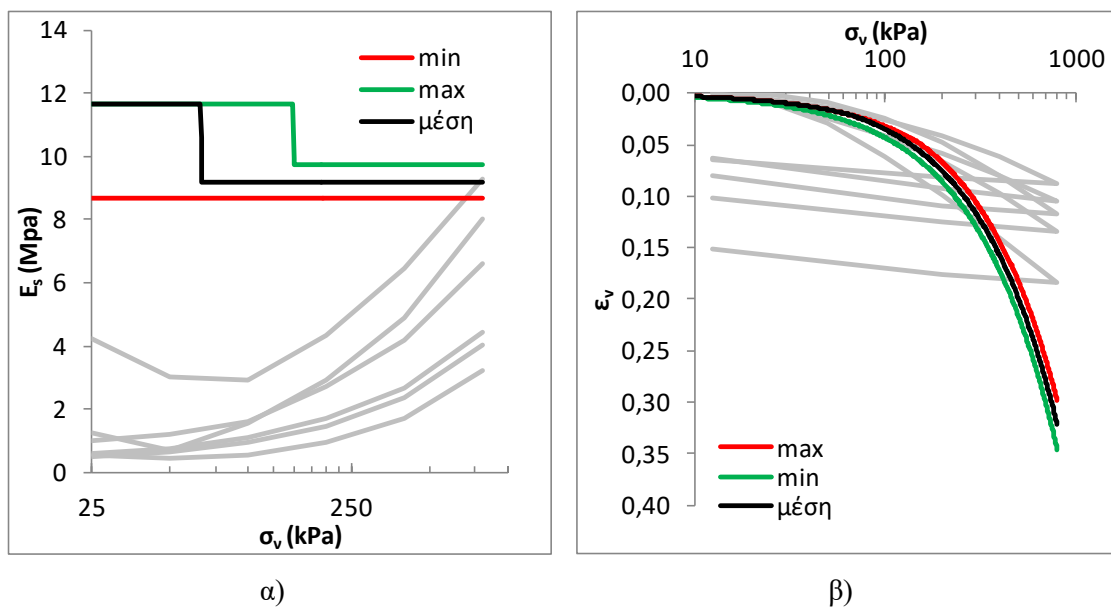


Εικόνα 4-6 $E=2,8\text{MPa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$



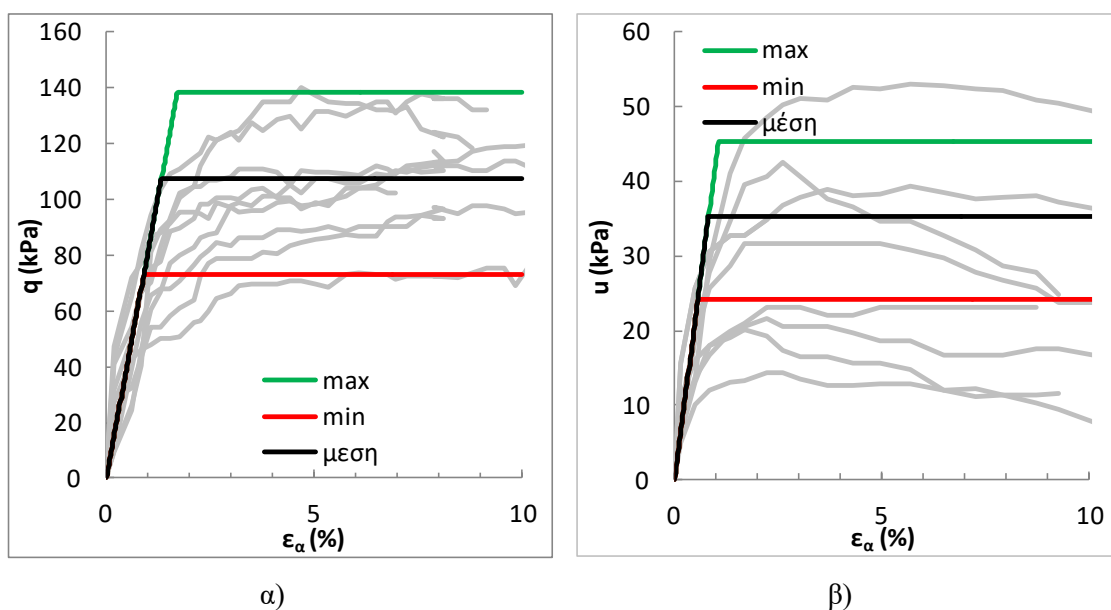
Εικόνα 4-7 $E=2,8\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$

Αρκετά μεγάλη είναι η διαφορά μεταξύ βαθμονόμησης και δοκιμών στα αποτελέσματα του οιδημέτρου και χαρακτηριστικά στο διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-8α). Οι καμπύλες των βαθμονομήσεων ακολουθούν μεγαλύτερες τιμές από αυτές των πειραματικών δοκιμών, με τη μόνη τους συμφωνία να βρίσκεται στις ανώτατες τιμές φόρτισης. Παρόμοιες είναι οι παρατηρήσεις μας και για το διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v$ (Εικόνα 4-8β) προσθέτοντας ότι η κλίση των καμπυλών της βαθμονόμησης είναι αισθητά διαφορετική από αυτή των δοκιμών.



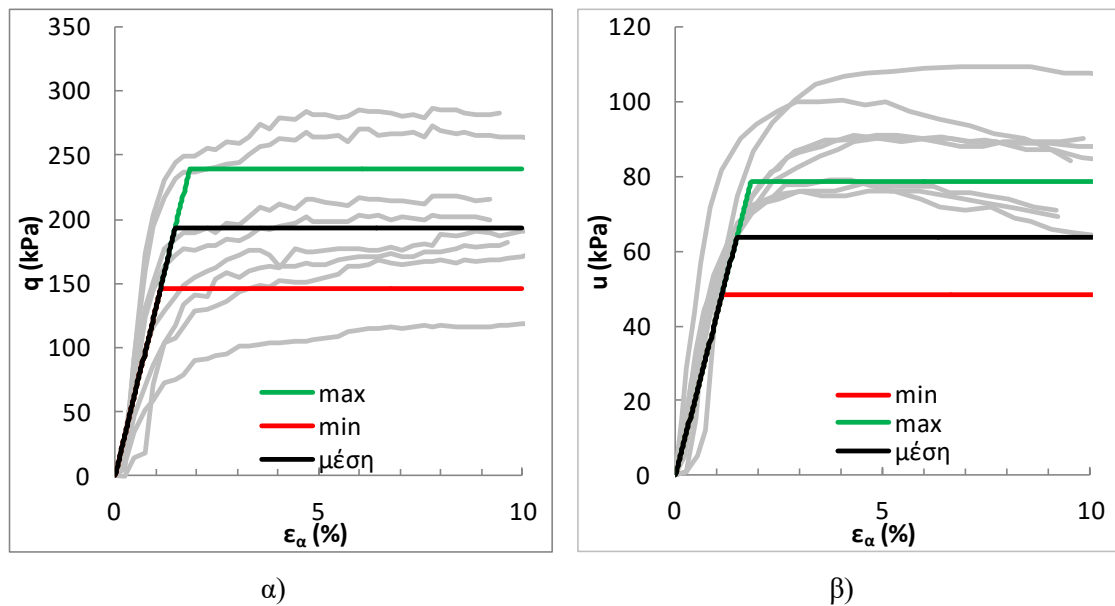
Εικόνα 4-8 $E=2,8\text{Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$

Για $E=10,5\text{Mpa}$ παρατηρείται ότι οι πιέσεις πόρων (u) αντιστοιχούν σχετικά καλά με τη βαθμονόμηση για πίεση κυψέλης 100kPa (Εικόνα 4-9β), παρόλο που υπάρχουν και πάλι αρκετές κάτω από το κάτω όριο. Σχετικά καλή είναι η συμφωνία με την αρχική κλίση.

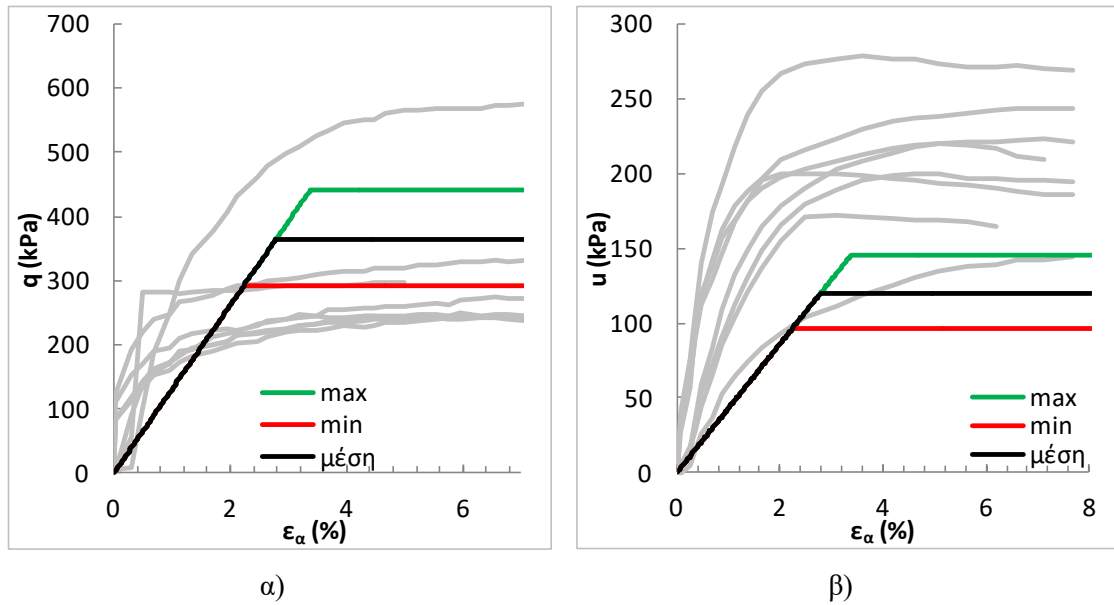


Εικόνα 4-9 $E=10,5\text{Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$

Για τις δυο μεγαλύτερες τιμές φόρτισης κρίνεται ότι οι πιέσεις πόρων υποεκτιμούνται από το προσομοίωμα. Οι τάσεις των πειραμάτων συμπίπτουν καλύτερα με το προσομοίωμα με τη μέση καμπύλη να είναι καλή στα 200kPa (Εικόνα 4-10α) αλλά να υπερεκτιμά την αντοχή για 400kPa (Εικόνα 4-11α). Το μέτρο ελαστικότητας είναι επαρκές για τα 200kPa, αλλά οριακά χαμηλό για τα 400kPa λόγω της μικρής του κλίσης.

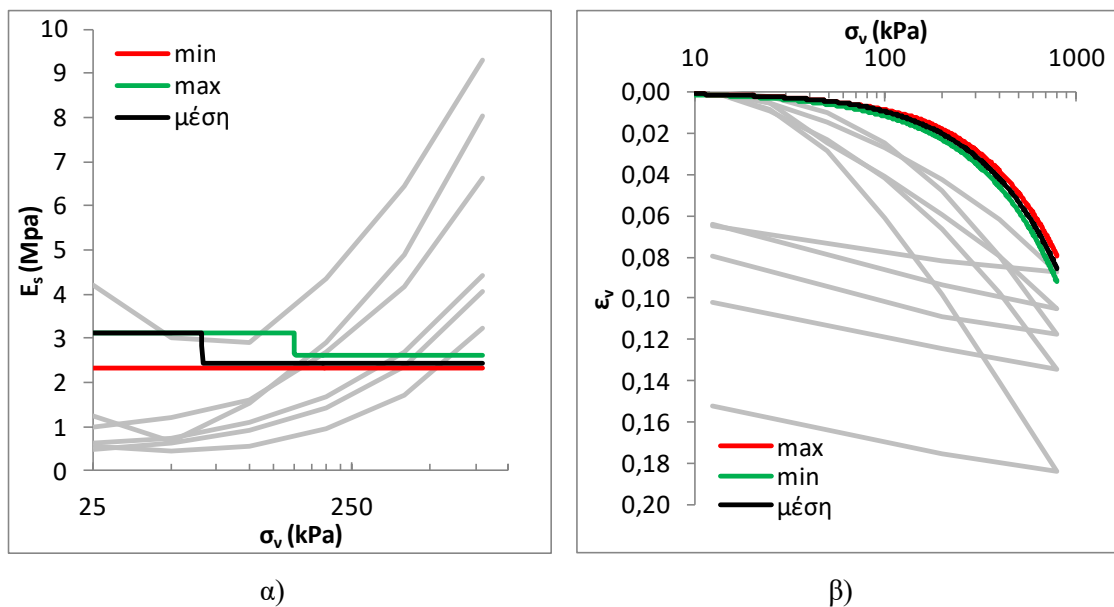


Εικόνα 4-10 $E=10,5\text{MPa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$



Εικόνα 4-11 $E=10,5\text{Mpa}$: Πίεση κυνέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\epsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\epsilon_\alpha(\%)$

Σε αυτή την περίπτωση του μεγάλου E , μικρή διαφορά παρατηρείται μεταξύ βαθμονόμησης και δοκιμών στο διάγραμμα $\epsilon_v-\sigma'_v$ (Εικόνα 4-12β). Αυτό σηματοδοτεί και σε συνδυασμό με τα παραπάνω διαγράμματα, ότι και ένα μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας θα μπορούσε να είναι αποδεκτό υπό συνθήκες.



Εικόνα 4-12 $E=10,5\text{Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\epsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$

4.2 Hardening Soil

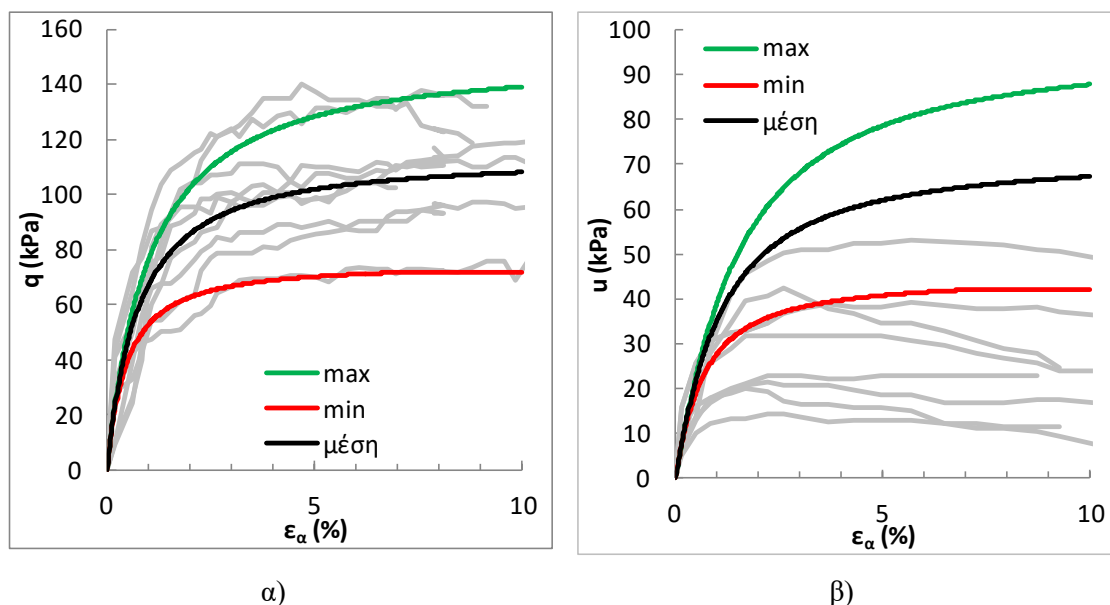
Για τη βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος Hardening Soil ακολουθήθηκε διαδικασία παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω για το προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα λόγω και της διαφορετικής διατύπωσης και των διαφορετικών στοιχείων του, αντί για το κλασικό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιείται το λεγόμενο E_{50} , δηλαδή το τέμνον μέτρο στο ήμισυ της αντοχής. Αυτή είναι και η βασική παράμετρος που καθορίζει τη συμπεριφορά σε διάτμηση, ορίζεται για μία ενεργό τάση αναφοράς και είναι μη γραμμική με την τάση. Η παράμετρος αυτή επηρεάζεται από το m , την ισχύς για την εξάρτηση της δυσκαμψίας από το επίπεδο τάσης δηλαδή, όπου το ορίζουμε ως 0,5. Επιπλέον, χρησιμοποιείται το ελαστικό μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης ($E_{oed} = E_s$) το οποίο είναι για το προσομοίωμα ανεξάρτητο του E_{50} και της διάτμησης. Συνήθως όπως και σε αυτή την εργασία για λόγους απλότητας και με βλαση διεθνή δεδομένα λαμβάνεται ότι $E_{50} = E_{oed}$. Τέλος, το μέτρο αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι διαφορετικό και χαρακτηρίζει τη διαφορά μεταξύ πρωτογενούς φόρτισης και επαναφόρτισης. Συνηθίζεται όπως και στην παρούσα εργασία και λαμβάνεται $E_{ur,ref} = 3E_{50,ref}$. Το μέτρο αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι και αυτό μη γραμμικό με την τάση όπως και το E_{50} .

Προέκυψαν νέοι συνδυασμοί οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3 με σκοπό τον προσδιορισμό των ορίων και της μέσης απόκρισης. Παρατηρείται μικρότερη διακύμανση της γωνίας τριβής (φ) σε σχέση με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb, κάτι που είναι επιθυμητό καθώς συμβαδίζει περισσότερο με τα πειραματικά αποτελέσματα για τα εδαφικά στείρα της υπό εξέτασης περιοχής. Γενικότερα, το συγκεκριμένο προσομοίωμα είναι πιο προχωρημένο και κρίνεται ακριβέστερο σε σχέση με το Mohr-Coulomb, οπότε και συνήθως προτιμάται η χρήση του όταν υπάρχει η δυνατότητα.

Η Εικόνα 4-13α παρουσιάζει τα αποτελέσματα των 8 πειραματικών δοκιμών με γκρι χρώμα, με μαύρο τη μέση απόκριση, με πράσινο το πάνω όριο και με κόκκινο το κάτω. Το ίδιο μοτίβο ακολουθείται και στα υπόλοιπα διαγράμματα. Παράλληλα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για τις πιέσεις πόρων οι οποίες πάντα συμπληρώνουν τις τάσεις στην περίπτωση αστράγγιστων συνθηκών.

Πίνακας 4-3 Συνδυασμός παραμέτρων βαθμονόμησης για το προσομοίωμα Hardening Soil

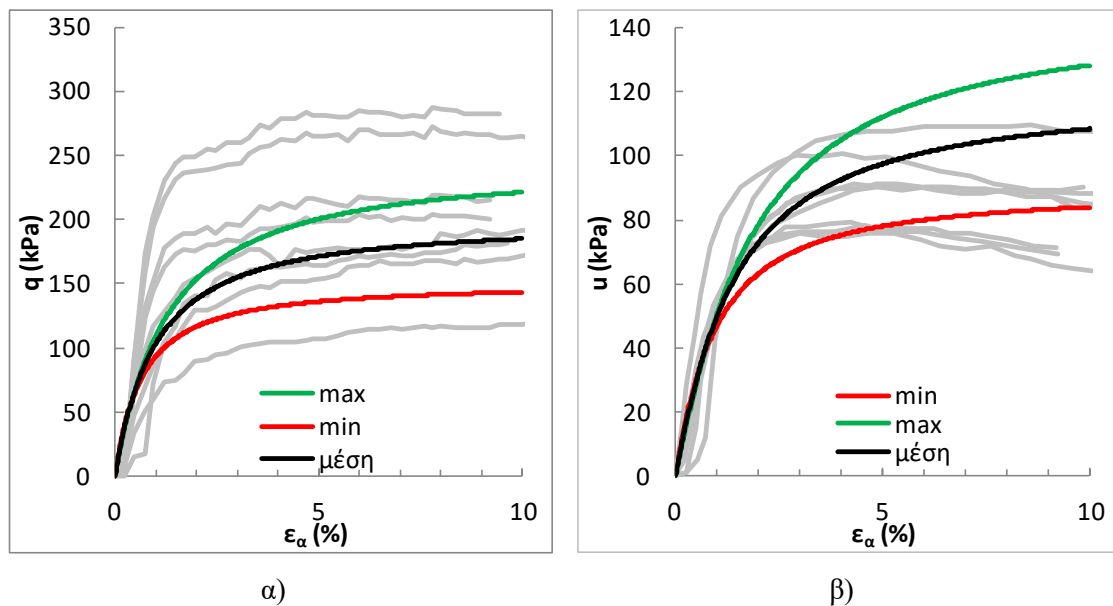
	E_{ur} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{50} (MPa)	ν	ϕ (°)	c (kPa)
Minimum	15,6	5,2	5,2	0,2	22,5	0
Average	15,6	5,2	5,2	0,2	25	20
Maximum	15,6	5,2	5,2	0,2	27	40

Εικόνα 4-13 Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα q (kPa)- ϵ_a (%), β) Διάγραμμα u (kPa)- ϵ_a (%)

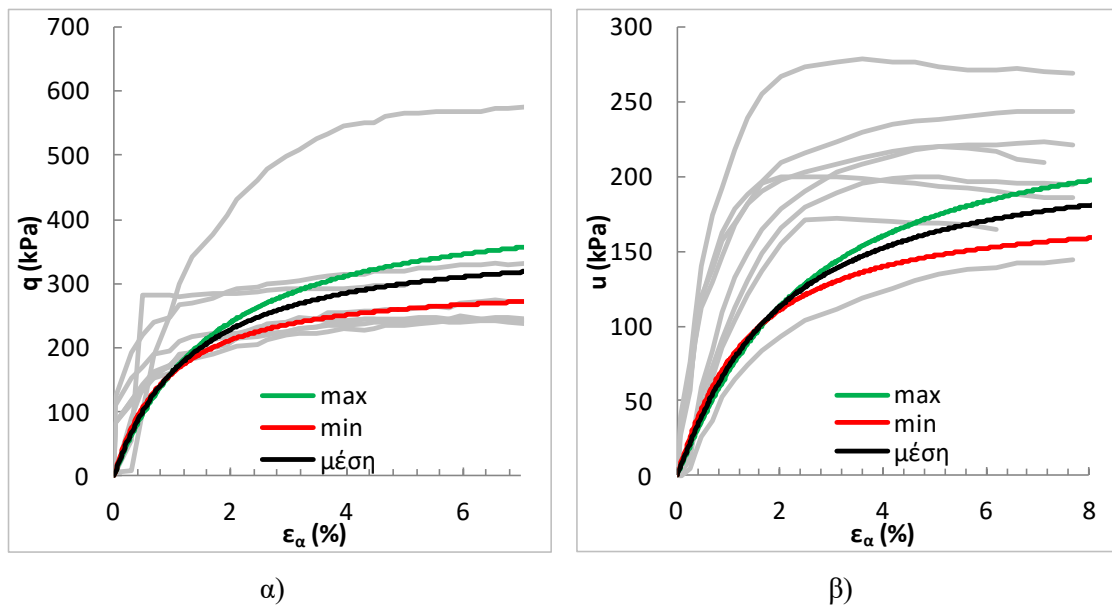
Οι πιέσεις πόρων (u) (Εικόνα 4-13β) δεν αντιστοιχούν καλά με τη βαθμονόμηση, η οποία τις υπερεκτιμά. Κατά την πλειοψηφία τους βρίσκονται κάτω από το κάτω όριο. Αντίθετα, παρατηρείται σχετικά καλή συμφωνία με την αρχική κλίση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για πίεση κυψέλης στα 200kPa και 400kPa (Εικόνα 4-14 και Εικόνα 4-15 αντίστοιχα). Παρατηρείται ότι οι πιέσεις πόρων υποεκτιμούνται ελαφρώς από το προσομοίωμα για πίεση κυψέλης 400kPa (Εικόνα 4-15β), ενώ απεικονίζονται σχετικά καλά για πίεση κυψέλης 200kPa (Εικόνα 4-14β). Η αποκλίνουσα τάση των πειραμάτων συμπίπτει καλύτερα με το προσομοίωμα για πίεση κυψέλης 400kPa (Εικόνα 4-15α) με μια μόνο δοκιμή να

ξεφεύγει αισθητά από το άνω όριο. Για πίεση κυψέλης 200kPa (Εικόνα 4-14α) τα αποτελέσματα είναι σχετικά καλά, θα ήταν όμως επιθυμητή μια μεγαλύτερη διακύμανση για το άνω και κάτω όριο. Η μέση καμπύλη εκτιμά σωστά και στις δυο περιπτώσεις την αντοχή. Το μέτρο ελαστικότητας είναι επαρκές για τα 200kPa, ενώ θεωρείται χαμηλό για τα 400kPa.



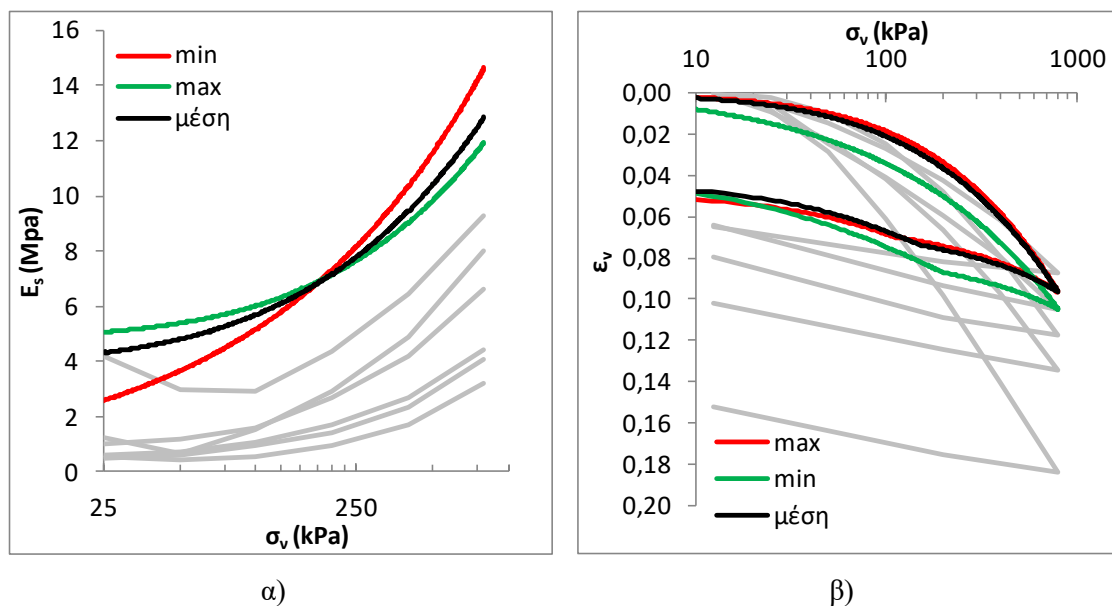
Εικόνα 4-14 Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα q (kPa)- ϵ_a (%), β) Διάγραμμα u (kPa)- ϵ_a (%)



Εικόνα 4-15 Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_{\alpha}(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_{\alpha}(\%)$

Έπειτα, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία για τη σύγκριση της βαθμονόμησης με τα αποτελέσματα της δοκιμής οιδιμέτρου. Η πρωτογενής φόρτιση ήταν 800kPa, παρόμοια με αυτή των δοκιμών και ακολούθησε μία φάση αποφόρτισης. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-16α) και $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-16β).

Οι καμπύλες που σχηματίστηκαν στο διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v$ (Εικόνα 4-16β) θεωρούνται ικανοποιητικές, καθώς ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις δοκιμές παρότι υποεκτιμούνται ελαφρώς. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα (Εικόνα 4-16β) είναι εμφανής η καμπύλη αποφόρτισης των προσομοιώσεων σε αντίθεση με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb, η οποία και παρουσιάζει καλή (τουλάχιστον ποιοτικά) συσχέτιση με τις δοκιμές. Για το Hardening Soil δεν παρατηρούμε διαφορά στον τύπο των καμπυλών του διαγράμματος $E_s-\sigma'_v$ καθότι και στις δύο περιπτώσεις επικρατεί μία μη γραμμική αύξηση του E_s με την τάση (Εικόνα 4-16α). Επιπλέον οι τιμές των E_s είναι γενικά στην ίδια τάξη μεγέθους και αρκετά κοντά μεταξύ τους με το προσομοίωμα να βρίσκεται συστηματικά από επάνω.



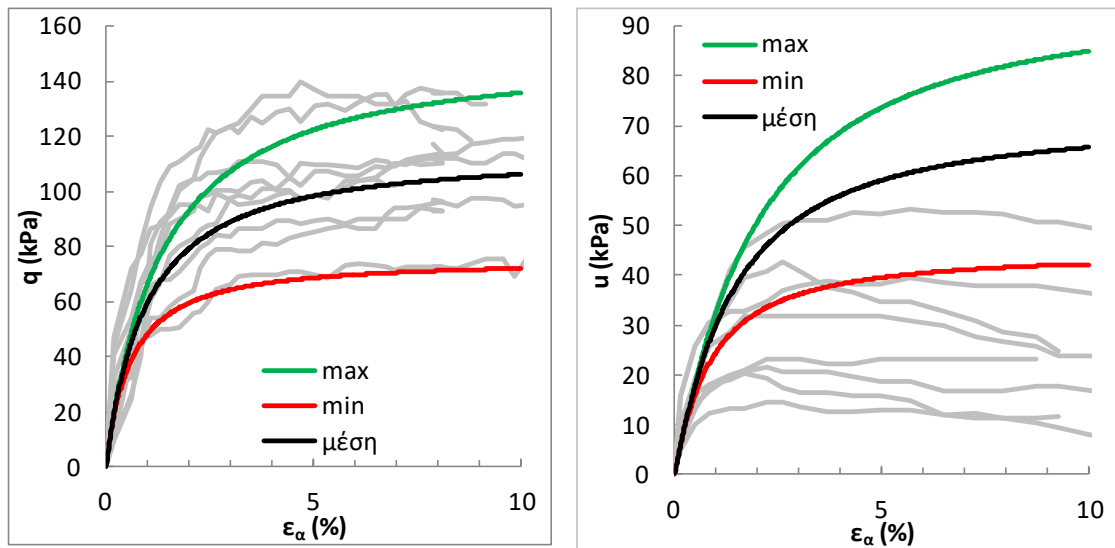
Εικόνα 4-16 α) Διάγραμμα $E_s(\text{MPa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\epsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$

Κρίθηκε σκόπιμο να γίνει ανάλυση και για άλλα δύο μέτρα ελαστικότητας όπως και στο προηγούμενο προσομοίωμα, ένα μικρότερο και ένα μεγαλύτερο. Αυτό έγινε για να συγκριθεί η βαθμονόμηση στις μεγαλύτερες φορτίσεις με τις διαφορετικές κλίσεις που δίνουν τα μέτρα ελαστικότητας. Τα μέτρα που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4 Εναλλακτικές τιμές μέτρων ελαστικότητας

	E_{ur} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{50} (MPa)	ν
Minimum	12	4	4	0,2
Average	15,6	5,2	5,2	0,2
Maximum	19,5	6,5	6,5	0,2

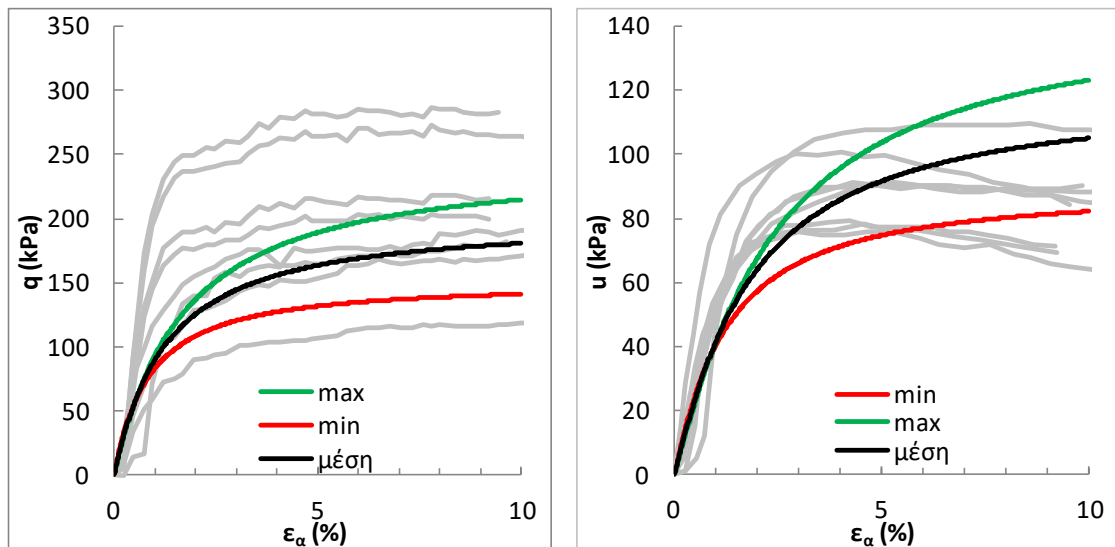
Τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στις Εικόνα 4-17,4-Εικόνα 4-18,4-Εικόνα 4-19 και 4-Εικόνα 4-20 για το $E_{50}=4\text{MPa}$ και στις Εικόνα 4-21, 4-Εικόνα 4-22, 4-Εικόνα 4-23 και Εικόνα 4-12 για το $E_{50}=6,5\text{MPa}$.



α)

β)

Εικόνα 4-17 - $E_{50} = 4 \text{ Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$



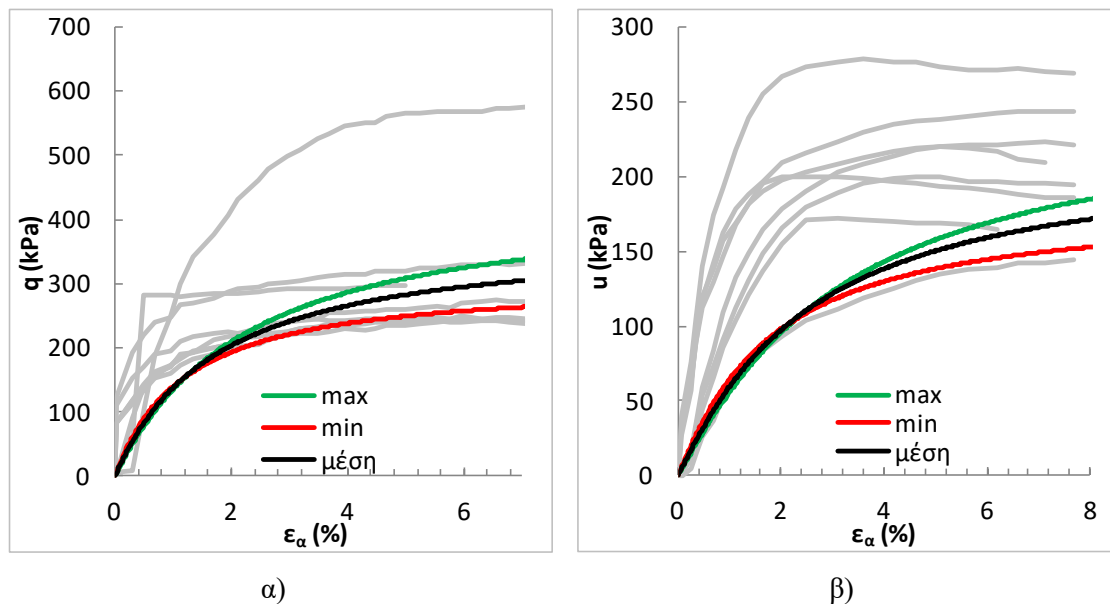
α)

β)

Εικόνα 4-18 $E_{50} = 4 \text{ Mpa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$

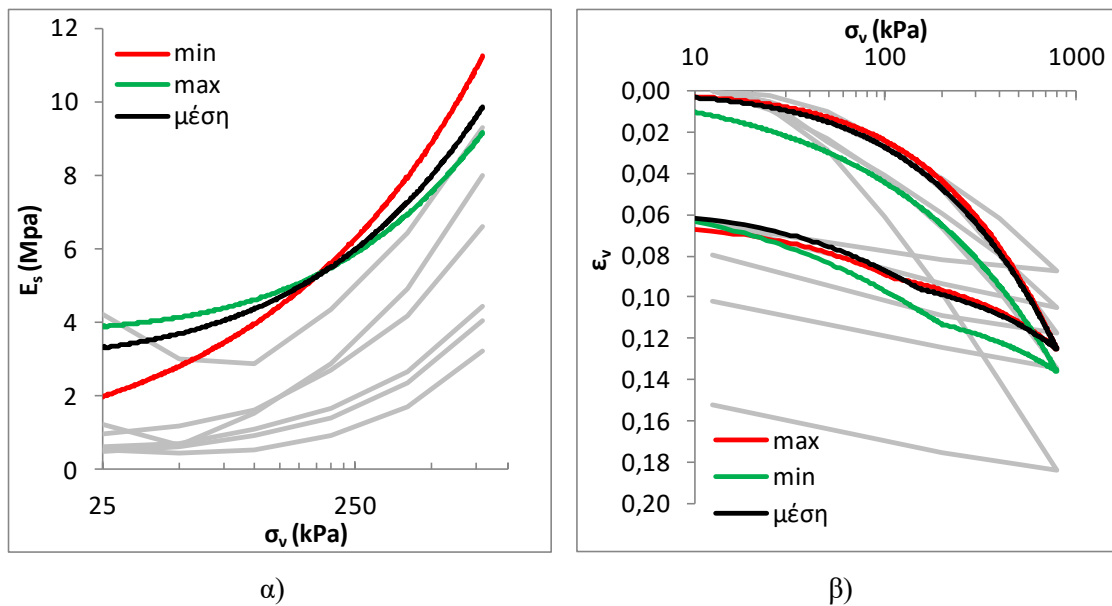
Αρχικά, για $E_{50} = 4 \text{ Mpa}$ παρατηρείται ότι οι πιέσεις πόρων υποεκτιμούνται από το προσομοίωμα για φόρτιση κυψέλης 400kPa (Εικόνα 4-19β), υπερεκτιμούνται για 100kPa (Εικόνα 4-17β), ενώ είναι καλές για 200kPa των τριαξονικών δοκιμών

(Εικόνα 4-18β). Το μέτρο ελαστικότητας είναι ελαφρώς χαμηλό παράγοντας χαμηλές κλίσεις στις καμπύλες, κάτι που γίνεται εμφανέστερο στις μεγαλύτερες φορτίσεις.



Εικόνα 4-19 $E_{50} = 4\text{MPa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_a(\%)$

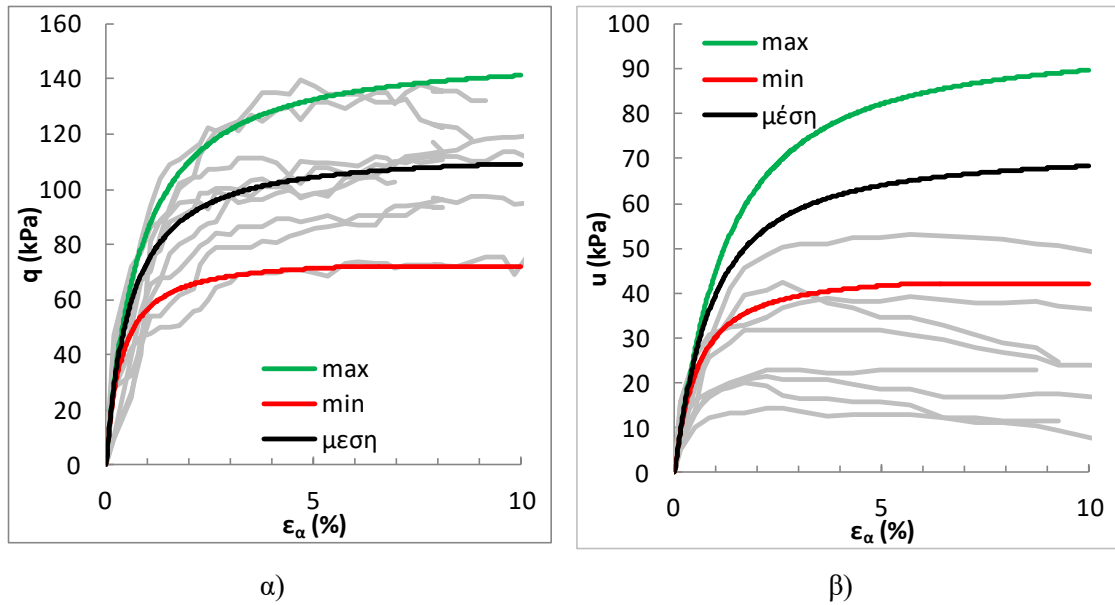
Ακόμα, πολύ κοντά στις δοκιμές θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η βαθμονόμηση στο διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-20β), καθώς βλέπουμε πως οι τρεις καμπύλες των βαθμονομήσεων κυμαίνονται στις μέσες τιμές των δοκιμών. Αντιθέτως, στο διάγραμμα $E_s(\text{MPa})-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-20α) οι καμπύλες των βαθμονομήσεων παίρνουν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές από αυτές των δοκιμών



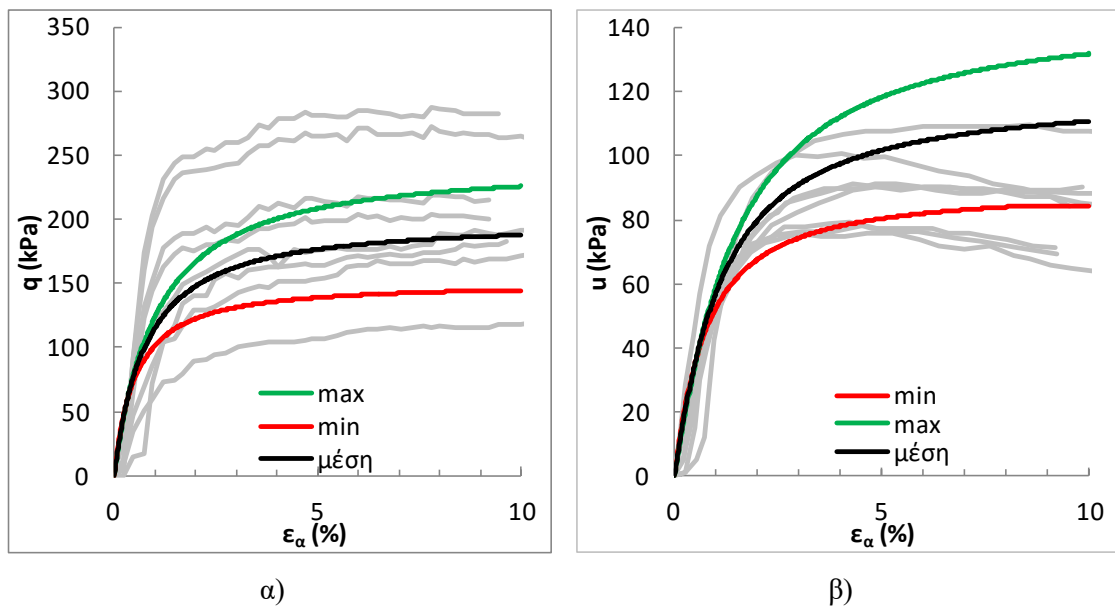
Εικόνα 4-20 $E_{50}=4\text{MPa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{MPa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\epsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$

Για $E_{50}=6,5\text{MPa}$ παρατηρείται ότι οι πιέσεις πόρων (u) αντιστοιχούν σχετικά καλά με τη βαθμονόμηση για πίεση κυψέλης 200kPa (Εικόνα 4-22β). Σχετικά καλή είναι η συμφωνία με την αρχική κλίση. Για φόρτιση 100 kPa (Εικόνα 4-21α) κρίνεται ότι οι πιέσεις πόρων υπερεκτιμούνται από το προσομοίωμα, ενώ για φόρτιση 400kPa (Εικόνα 4-23β) ότι υποεκτιμούνται. Οι τάσεις των πειραμάτων συμπίπτουν καλύτερα με το προσομοίωμα με τη μέση καμπύλη να είναι καλή και στις τρεις τιμές φόρτισης. Το μέτρο ελαστικότητας είναι επαρκές για τα 200kPa , οριακά χαμηλό για τα 400kPa .

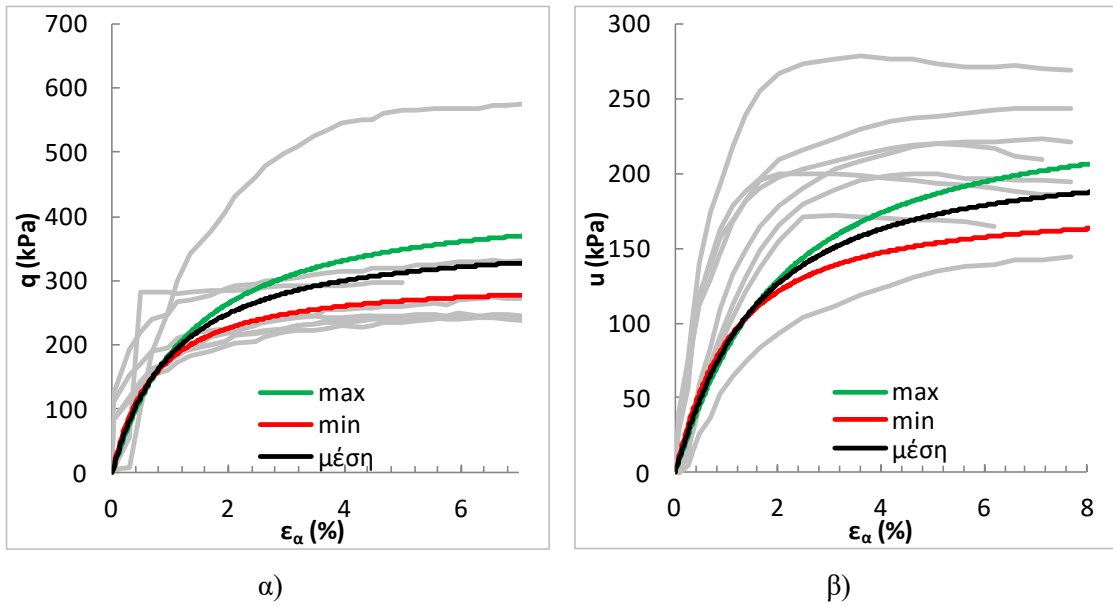
Στο Διάγραμμα $E_s(\text{MPa})-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-24α) παρατηρείται πως οι βαθμονόμηση δεν συμπίπτει σωστά με τις πειραματικές δοκιμές, καθώς οι τιμές που παίρνει είναι ψηλότερες. Μικρή διαφορά παρατηρείται μεταξύ βαθμονόμησης και δοκιμών στο διάγραμμα $\epsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$ (Εικόνα 4-24β). Οι τιμές των καμπυλών της βαθμονόμησης φαίνεται να κυμαίνονται κοντά σε αυτές των χαμηλότερων δοκιμών.



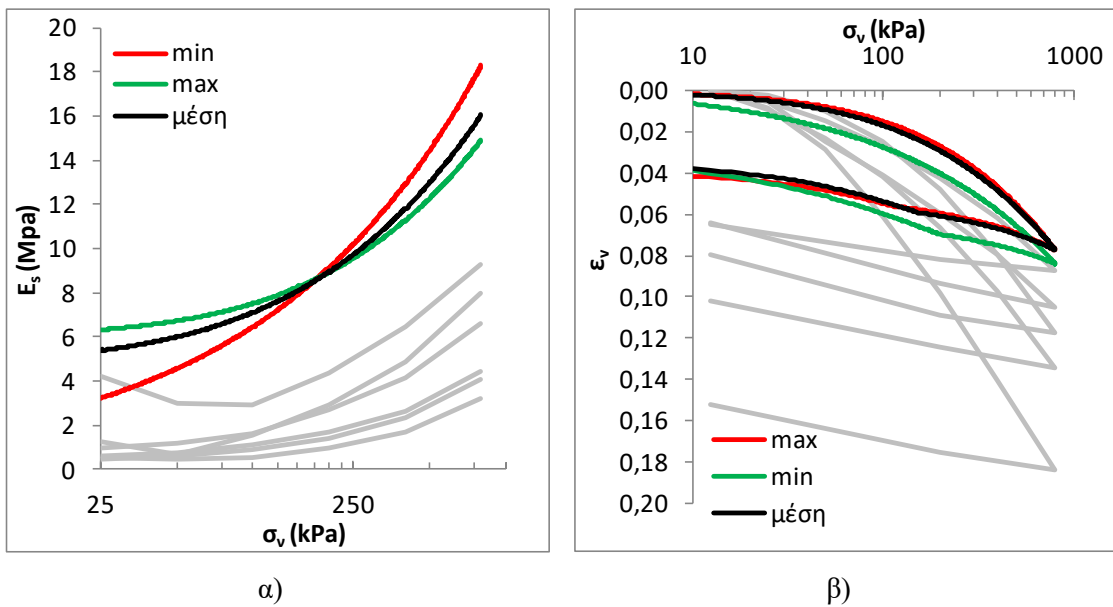
Εικόνα 4-21 $E_{50} = 6,5 \text{ Mpa}$: Πίεση κυψέλης 100kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\epsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\epsilon_\alpha(\%)$



Εικόνα 4-22 $E_{50} = 6,5 \text{ Mpa}$: Πίεση κυψέλης 200kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\epsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\epsilon_\alpha(\%)$



Εικόνα 4-23 $E_{50} = 6,5 \text{ Mpa}$: Πίεση κυψέλης 400kPa α) Διάγραμμα $q(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$, β) Διάγραμμα $u(\text{kPa})-\varepsilon_\alpha(\%)$



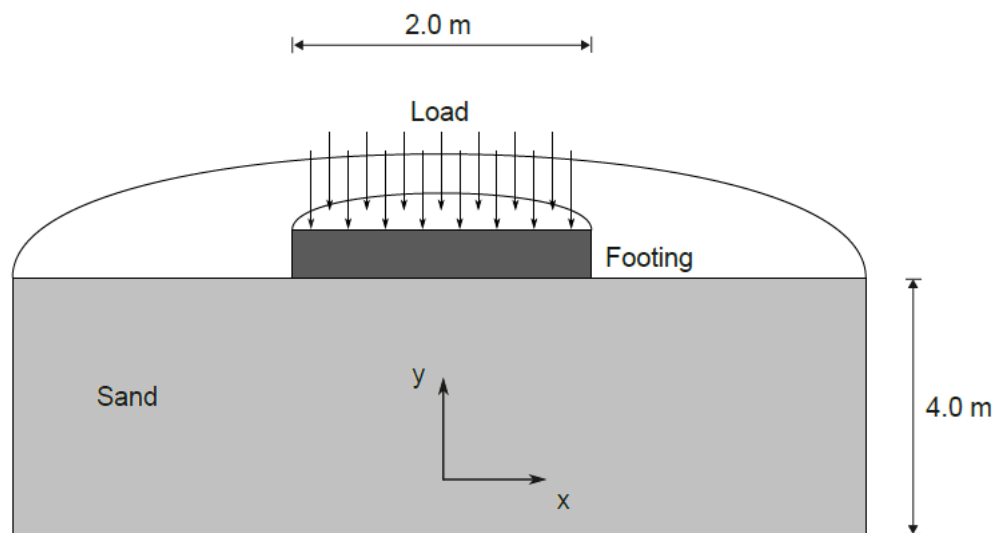
Εικόνα 4-24 $E_{50} = 6,5 \text{ Mpa}$: α) Διάγραμμα $E_s(\text{Mpa})-\sigma'_v(\text{kPa})$, β) Διάγραμμα $\varepsilon_v-\sigma'_v(\text{kPa})$

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΤΥΠΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

5.1 Επιφανειακή Θεμελίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η συμπεριφορά ενός κυκλικού θεμελίου σε έδαφος με παραμέτρους όπως αυτές προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του προηγούμενου κεφαλαίου.

Ένα κυκλικό θεμέλιο ακτίνας 1,0 m τοποθετείται σε εδαφικό στρώμα πάχους 4,0 m, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1. Ο σκοπός είναι να βρεθούν οι μετατοπίσεις και οι τάσεις στο έδαφος που προκαλούνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο κυκλικό πέδιλο. Για να καταστεί δυνατός κάθε πιθανός μηχανισμός στο έδαφος και για να αποφευχθεί οποιαδήποτε επιρροή του κατακόρυφου εξωτερικού ορίου, το μοντέλο όπως φαίνεται στο σχήμα επεκτείνεται στην οριζόντια διεύθυνση σε μια συνολική ακτίνα 5,0 m.

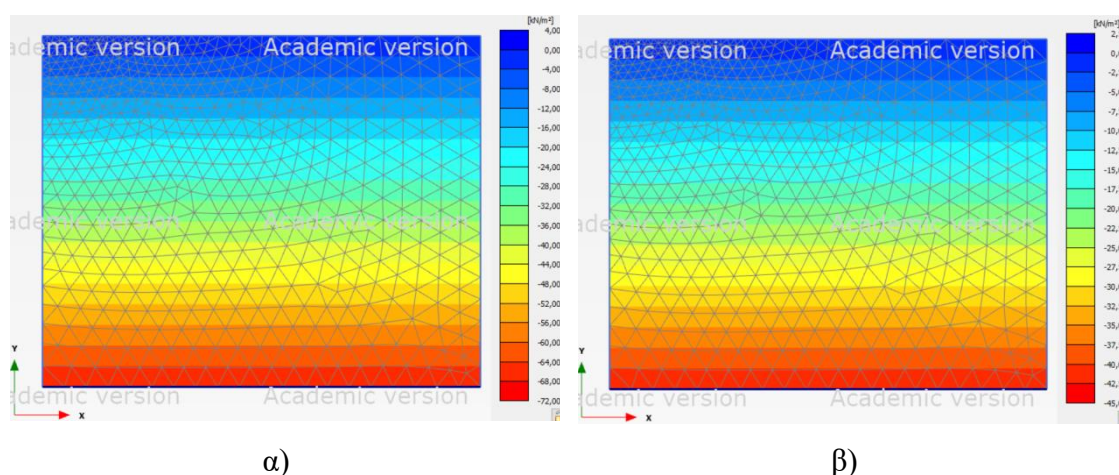


Εικόνα 5-1 Γεωμετρία κυκλικού θεμελίου (PLAXIS, 2011)

Το θεμέλιο θεωρείται άκαμπτο και τραχύ. Το άκαμπτο θεμέλιο προσομοιώθηκε ως μία κατακόρυφη μετακίνηση χωρίς καθόλου οριζόντια συνιστώσα αγνοώντας την ύπαρξη δοκιμών στοιχείων για την απλούστερη και ταχύτερη ανάλυση. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε ένα απλό αλλά αρκετά ακριβές προσομοίωμα, αλλά έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, δεν παρέχει καμία πληροφορία για τις δομικές δυνάμεις στο πέδιλο.

5.1.1 Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)

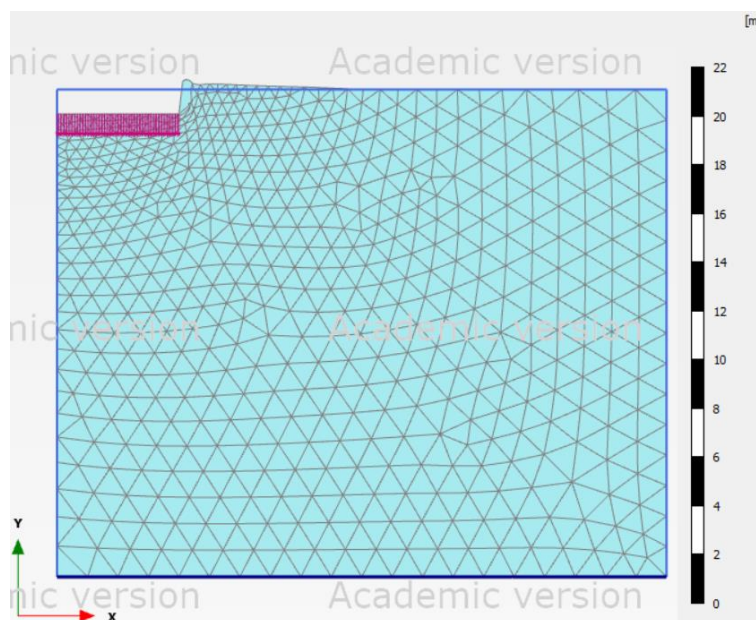
Στο πρόγραμμα PLAXIS αναπτύχθηκε το πρόβλημα σε δύο φάσεις. Αρχικά, σχηματίστηκε ο κανάβος με διαστάσεις 4 μέτρα στο βάθος και 5 μέτρα στο πλάτος του. Στις εδαφικές παραμέτρους εισήχθησαν τα στοιχεία που δημιουργήθηκαν στις βαθμονομήσεις που διενεργήσαμε στο Κεφάλαιο 4.1 (Πίνακας 4-1) για την εκάστοτε περίπτωση που πραγματοποιήσαμε την ανάλυση. Για κάθε συνδυασμό των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E , της συνοχής του εδάφους c και της γωνίας τριβής ϕ πραγματοποιήθηκε και μια ξεχωριστή ανάλυση. Επιπλέον, ορίστηκαν οι παράμετροι για το ακόρεστο και κορεσμένο μοναδιαίο βάρος, $\gamma_{\text{unsat}}=17\text{kN/m}^3$ και $\gamma_{\text{sat}}=20\text{kN/m}^3$ αντίστοιχα. Ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε να βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του κανάβου, ώστε να μην επηρεάζει την ανάλυση. Στην πρώτη φάση εφαρμόζεται στον κανάβο η βαρύτητα και υπολογίζονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις (Εικόνα 5-2α και Εικόνα 5-2β).



Εικόνα 5-2 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές γεωστατικές τάσεις (Mohr-Coulomb)

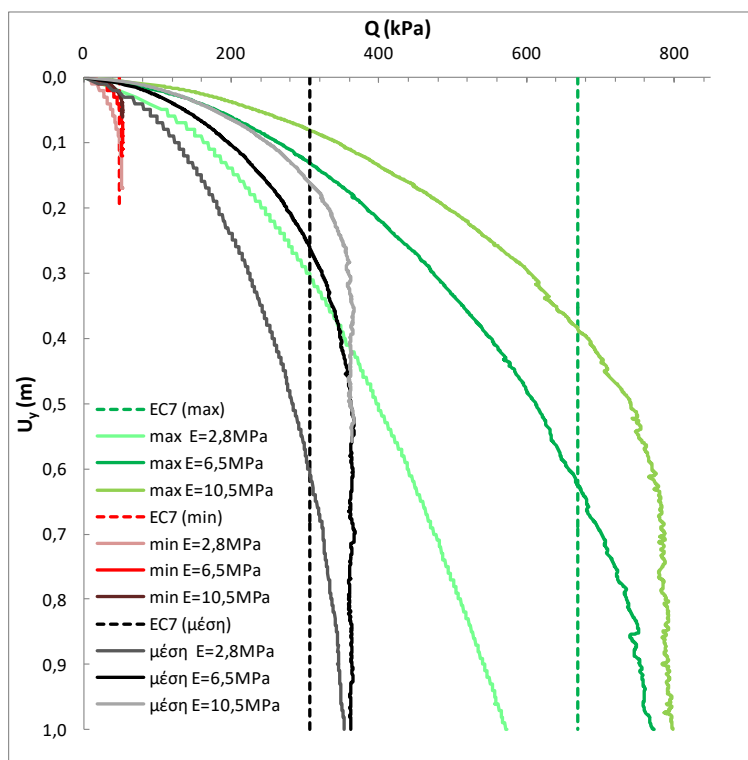
Στις Εικόνα 5-2α) και 5-Εικόνα 5-2β) παρατηρούμε την αναλογική αύξηση των τάσεων με την αύξηση του βάθους. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο και επιβεβαιώνει ότι οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις έχουν κατατασθεί σωστά στον κανάβο μας. Επίσης, με βάση την κλίμακα που βρίσκεται δεξιά του κανάβου, συμπεραίνουμε ότι οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις είναι σωστές και επιβεβαιώνουν τον τύπο από τον οποίο τις υπολογίζουμε ως $\gamma \cdot h$, δηλαδή στην περίπτωση μας $17 \text{ kN/m}^3 \cdot 4 \text{ m} = 68 \text{ kN/m}^2$. Οι οριζόντιες ενεργές τάσεις υπολογίζονται ως $K_0 \cdot \gamma \cdot h = (1 - \sin \phi) \cdot \gamma \cdot h = 0,625 \cdot 68 \text{ kN/m}^2 = 42,52 \text{ kN/m}^2$.

Κατά την δεύτερη φάση εισαγάγαμε στο πρόγραμμα PLAXIS την προσομοίωση ενός κυκλικού θεμελίου ακτίνας 1 μέτρου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για μέγιστες καθιζήσεις 1 μέτρου, καθώς μέχρι αυτήν την τιμή θεωρούμε λογική και δόκιμη την ανάλυση. Κατά την προσομοίωση με τις παραμέτρους για τη μέση κατάσταση του μέτρου ελαστικότητας $E = 6,5 \text{ Mpa}$ παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-3 ο παραμορφωμένος κανάβος που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή του θεμελίου. Σε αυτόν παρατηρείται μια παραμόρφωση δεξιά από το δεξί άκρο του θεμελίου, κάτι αναμενόμενο μετά την προσομοίωση της καθιζήσης ενός μέτρου.



Εικόνα 5-3 Παραμορφωμένος Κανάβος κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)

Από τις αναλύσεις προκύπτει το διάγραμμα του φορτίου Q (kPa) σε σχέση με τις καθιζήσεις U_y (m) που προσομοιώθηκαν. Με τις τρεις πράσινες συνεχείς αποχρώσεις παρουσιάζονται οι συνδυασμοί εδαφικών παραμέτρων των άνω ορίων των βαθμονομήσεων, ενώ με τις τρεις συνεχείς κόκκινες οι συνδυασμοί των κάτω ορίων. Με μαύρο και γκρι παρουσιάζονται οι συνδυασμοί εδαφικών παραμέτρων για τις μέσες καταστάσεις των βαθμονομήσεων. Οι αντίστοιχες διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν την τιμή της φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7) που υπολογίστηκαν για τα αντίστοιχα c και ϕ για το πέδιλο θεμελίου που προσομοιώσαμε.

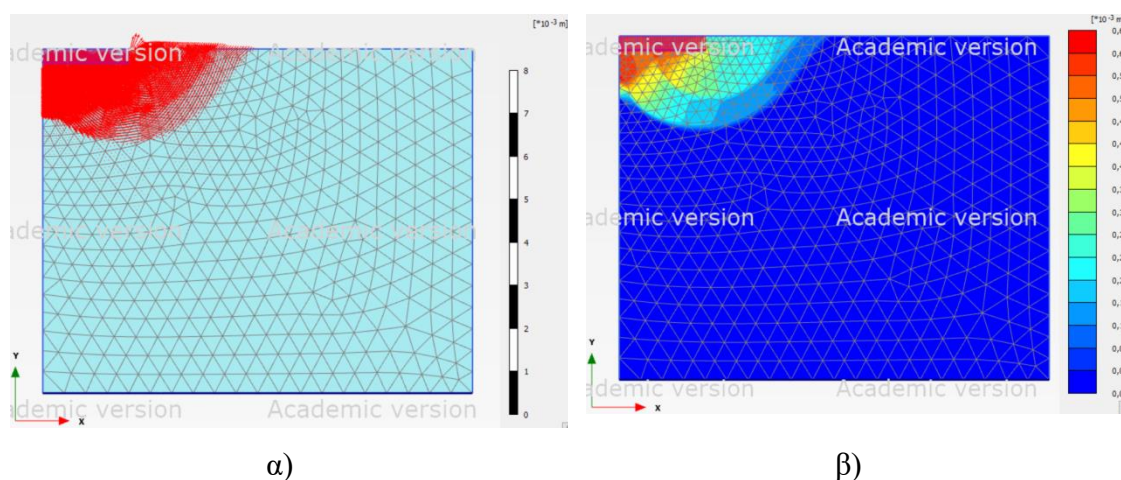


Εικόνα 5-4 Διάγραμμα Q (kPa) - U_y (m) κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)

Παρατηρούμε πως στις περιπτώσεις της μέσης τιμής και του άνω ορίου οι τιμές του φορτίου Q ξεπερνούν τις τιμές της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7) μετά από κάποιες τιμές καθιζήσεων. Γενικότερα, η απόκλιση που παρατηρείται ανάμεσα στα τελικά φορτία Q (kPa) και στις τιμές της φέρουσας

ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7) είναι της τάξης του 15-20%. Στην περίπτωση που το μέτρο ελαστικότητας E έχει τιμή $E=2,8\text{Mpa}$ βλέπουμε ότι η καμπύλη του φορτίου του άνω ορίου δεν έχει φτάσει ακόμα την τιμή της φέρουσας ικανότητας. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς η ανάλυση έχει διενεργηθεί για μέγιστες καθιζήσεις ενός μέτρου και φαίνεται ξεκάθαρα πως για μεγαλύτερες είναι σε πορεία να τη φτάσει και ίσως να την ξεπεράσει. Στις περιπτώσεις του κατώτατου ορίου των βαθμονομήσεων μας παρατηρείται πως στο σημείο που έχουμε την οριζοντιοποίηση των καμπυλών να υπάρχει σχετική συμφωνία με την τιμή της φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7).

Στην Εικόνα 5-5 α) και β) απεικονίζονται οι σταδιακές μετατοπίσεις που παράχθηκαν κατά την προσομοίωση της εφαρμογής του κυκλικού θεμελίου. Στην Εικόνα 5-5α) οι μετατοπίσεις παρουσιάζονται με κόκκινα βέλη ενώ στην Εικόνα 5-5β) παρουσιάζονται με διάφορα χρώματα που αντιστοιχούν στην κλίμακα που υπάρχει δεξιά του κανάβου.

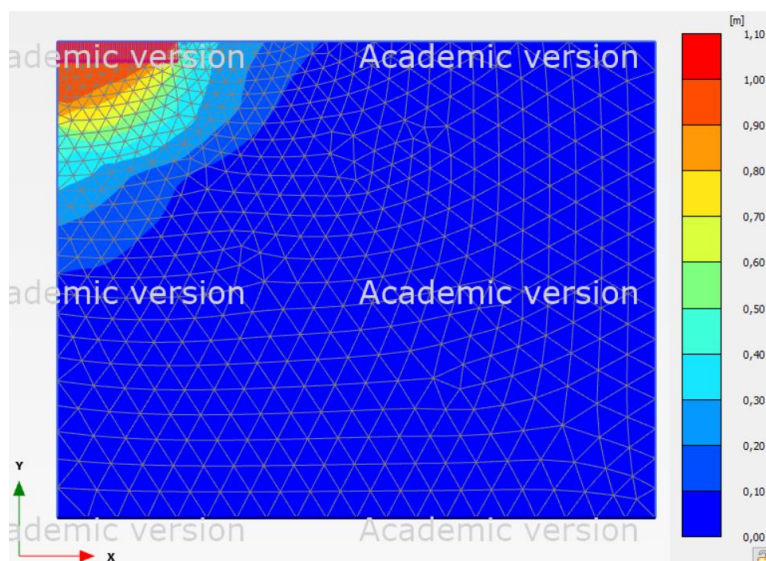


Εικόνα 5-5 Σταδιακές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)

Όπως είναι φυσιολογικό παρατηρούνται εντονότερες μετατοπίσεις ακριβώς κάτω από το πέδιλο που εφαρμόστηκε. Γενικά, παρατηρείται μια ημικυκλική συμπεριφορά των μετατοπίσεων, με διαφορετικό μέγεθος και φθίνουσα συμπεριφορά.

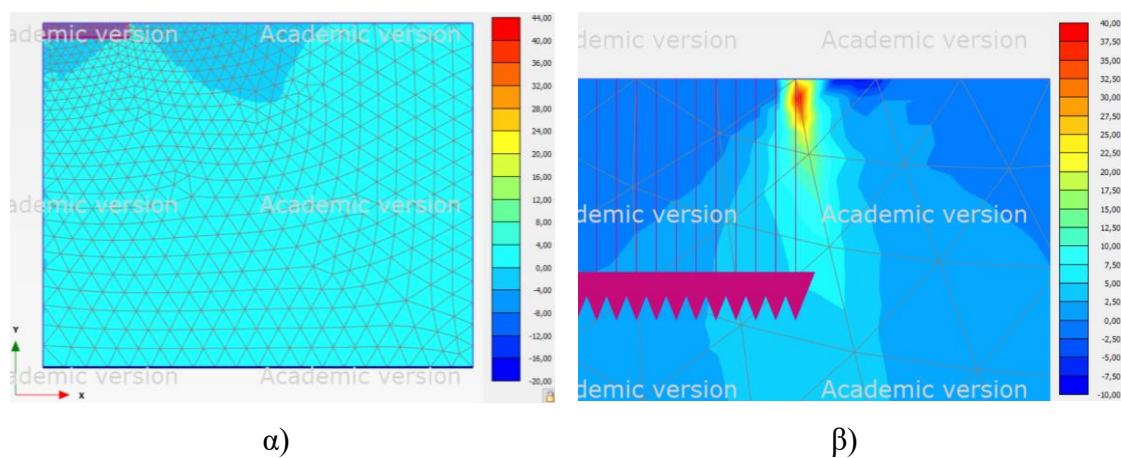
Στην Εικόνα 5-6 παρουσιάζονται οι συνολικές μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν στον κανάβο. Με τα διάφορα χρώματα ποσοτικοποιείται η μετατόπιση στο κάθε

σημείο με βάση την κλίμακα που βρίσκεται στα δεξιά του κανάβου. Από την εικόνα παρατηρούμε πως το βάθος επιρροής μετά την εφαρμογή του θεμελίου αγγίζει στην συγκεκριμένη περίπτωση τα δύο μέτρα. Οι συνολικές μετατοπίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες ακριβώς κάτω από το πέδιλο, ενώ όσο μεγαλώνει η απόσταση από αυτό παρατηρείται και σημαντική μείωση στις μετατοπίσεις.



Εικόνα 5-6 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)

Στην Εικόνα 5-7 παρουσιάζονται οι συνολικές παραμορφώσεις που σημειώθηκαν κατά την εφαρμογή του πέδιλου θεμελίωσης.

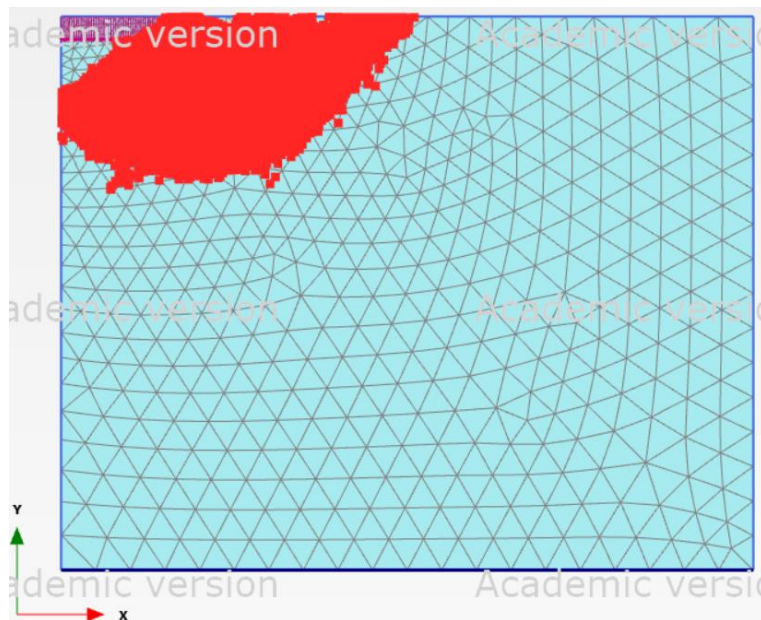


α)

β)

Εικόνα 5-7 Συνολικές παραμορφώσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)

Μετά τη μελέτη της Εικόνα 5-7 γίνεται αντιληπτό πως οι παραμορφώσεις που σημειώνονται στον κανάβο δεν είναι μεγάλες και αναπτύσσονται κάτω από το εφαρμοσμένο θεμέλιο αλλά και στα δεξιά του, εκτός από τις παραμορφώσεις που σημειώνονται ακριβώς στο δεξί άκρο του θεμελίου. Εκεί παρατηρείται μια μεγάλη, σχεδόν σημειακή, αύξηση των παραμορφώσεων και εκτείνεται σε πολύ μικρό κομμάτι του κανάβου. Η έκταση που επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από την εφαρμογή του θεμελίου είναι σίγουρα αυτή δεξιά του, καθώς και κάτω από τον κανάβο οι παραμορφώσεις περιορίζονται σε ένα κυκλικό τεταρτημόριο.

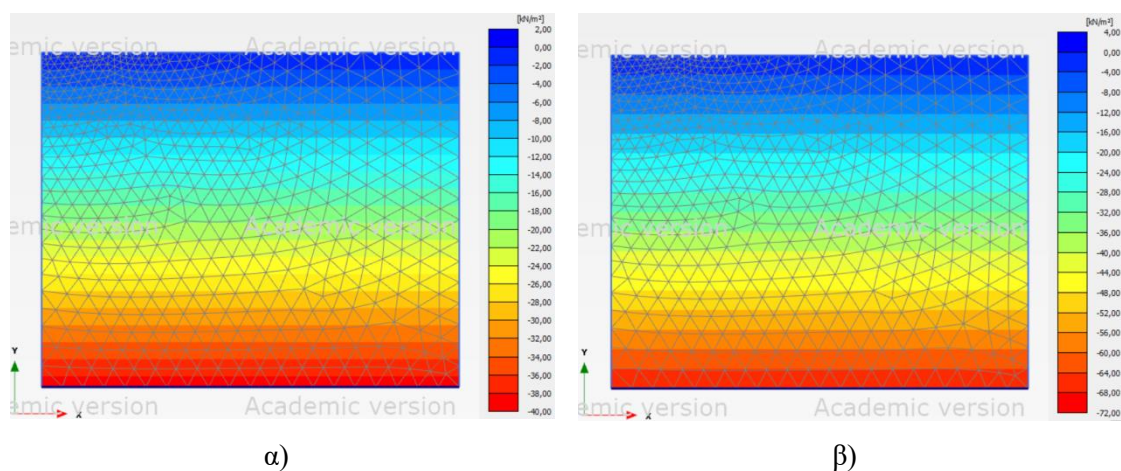


Εικόνα 5-8 Σημεία πλαστικότητας κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Mohr-Coulomb)

Τα σημεία πλαστικότητας μετά την εφαρμογή του θεμελίου εμφανίζουν αναμενόμενη συμπεριφορά και παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-8. Εκτείνονται σε περίπου ίση απόσταση από το δεξί άκρο του θεμελίου αλλά κάτω από αυτό παρουσιάζοντας μια ημικυκλική μορφή, παρόμοια με αυτή των σταδιακών μετατοπίσεων. Εντός του συγκεκριμένου ημικυκλίου παρατηρούνται συγκεκριμένα κενά που δεν σημειώνονται σημεία πλαστικότητας, ένα μεγάλο ακριβώς κάτω από το αριστερό άκρο του θεμελίου και ένα μικρότερο δεξιά του δεξιού άκρου.

5.1.2 Hardening Soil

Όπως και κατά την ανάλυση του προβλήματος μέσω του μοντέλου Mohr Coulomb, έτσι και μέσω του μοντέλου Hardening Soil στο πρόγραμμα PLAXIS αναπτύχθηκε το πρόβλημα σε δύο φάσεις. Αρχικά, σχηματίστηκε ο κανάβος με διαστάσεις 4 μέτρα στο βάθος και 5 μέτρα στο πλάτος του. Στις εδαφικές παραμέτρους εισήχθησαν τα στοιχεία που δημιουργήθηκαν στις βαθμονομήσεις που διενεργήσαμε στο Κεφάλαιο 4.2 (Πίνακας 4-3) για την εκάστοτε περίπτωση που πραγματοποιήσαμε την ανάλυση. Για κάθε συνδυασμό των τιμών του E_{50} , της συνοχής του εδάφους c και της γωνίας τριβής φ πραγματοποιήθηκε και μια ξεχωριστή ανάλυση. Έπειτα, ορίστηκαν οι παράμετροι για το ακόρεστο και κορεσμένο μοναδιαίο βάρος, $\gamma_{\text{unsat}}=17\text{kN/m}^3$ και $\gamma_{\text{sat}}=20\text{kN/m}^3$ αντίστοιχα. Ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε να βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του κανάβου, ώστε να μην φέρει επιρροή στις αναλύσεις μας. Στην πρώτη φάση εφαρμόζεται στον κανάβο η βαρύτητα και υπολογίζονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις (Εικόνα 5-9α και 5-Εικόνα 5-9β).

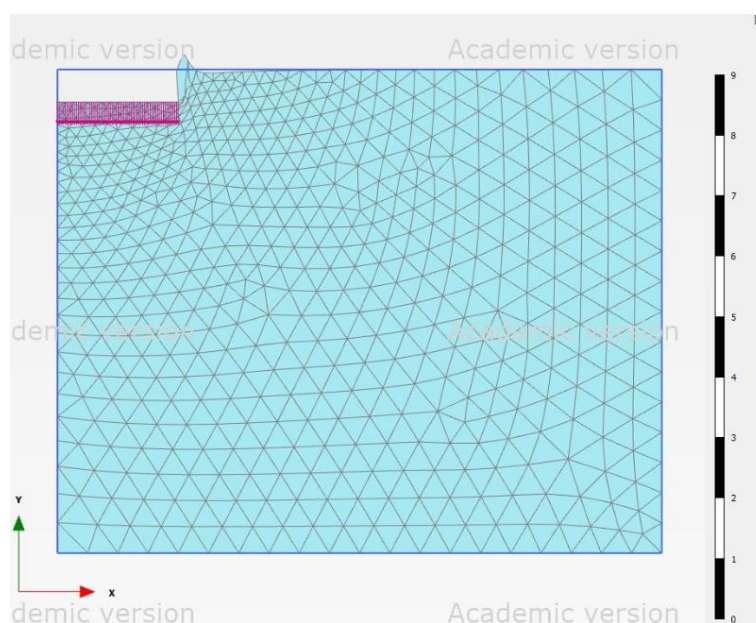


Εικόνα 5-9 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές τάσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)

Στις Εικόνα 5-9α) και 5-Εικόνα 5-9β) παρατηρούμε, όπως και στο μοντέλο Hardening Soil την αναλογική αύξηση των τάσεων με την αύξηση του βάθους. Με βάση την κλίμακα που βρίσκεται δεξιά του κανάβου, συμπεραίνουμε ότι οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις είναι σωστές και επιβεβαιώνουν τον τύπο από τον οποίο τις υπολογίζουμε ως $\gamma \cdot h$, δηλαδή στην περίπτωση μας $17\text{kN/m}^3 \cdot 4\text{m} = 68\text{ kN/m}^2$. Οι

οριζόντιες ενεργές τάσεις υπολογίζονται ως $K_0 \cdot \gamma \cdot h = (1 - \sin \phi) \cdot \gamma \cdot h = 0,577 \cdot 68 \text{ kN/m}^2 = 39,26 \text{ kN/m}^2$. Άρα δεν έχουμε κάποια αλλαγή σε σχέση με το μοντέλο Mohr-Coulomb.

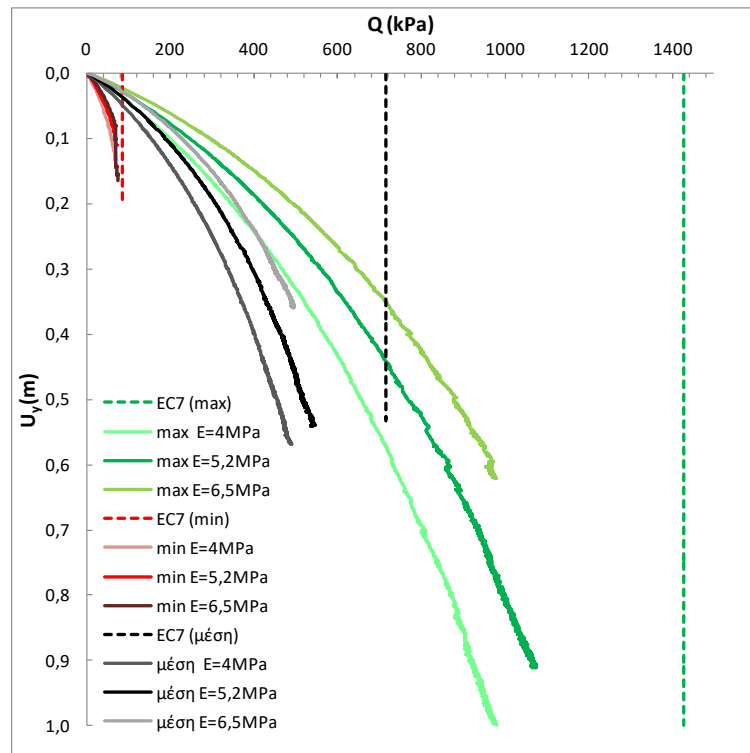
Κατά την δεύτερη φάση εισάγαμε στο πρόγραμμα PLAXIS την προσομοίωση ενός κυκλικού θεμελίου ακτίνας 1 μέτρου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για μέγιστες καθιζήσεις 1 μέτρου, καθώς μέχρι αυτήν την τιμή είναι λογική η διερεύνηση τους. Κατά την προσομοίωση με τις παραμέτρους για τη μέση κατάσταση του $E_{50} = 5,2 \text{ Mpa}$ παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-10 ο παραμορφωμένος κάναβος που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή του θεμελίου. Σε αυτόν παρατηρείται μια μικρή παραμόρφωση στο δεξί άκρο του σημείου εφαρμογής του θεμελίου, κάτι αναμενόμενο μετά την προσομοίωση της καθίζησης ενός μέτρου και την αστοχία του.



Εικόνα 5-10 Παραμορφωμένος Κάναβος κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)

Από τις αναλύσεις αντλήθηκε το διάγραμμα του φορτίου Q (kPa) σε σχέση με τις καθιζήσεις U_y (m) που προσομοιώθηκαν. Στην Εικόνα 5-11 με τις τρεις πράσινες συνεχείς αποχρώσεις παρουσιάζονται οι συνδυασμοί εδαφικών παραμέτρων των άνω ορίων των βαθμονομήσεων μας, ενώ με τις τρεις συνεχείς κόκκινες οι συνδυασμοί των κάτω ορίων. Με μαύρο και γκρι παρουσιάζονται οι συνδυασμοί εδαφικών

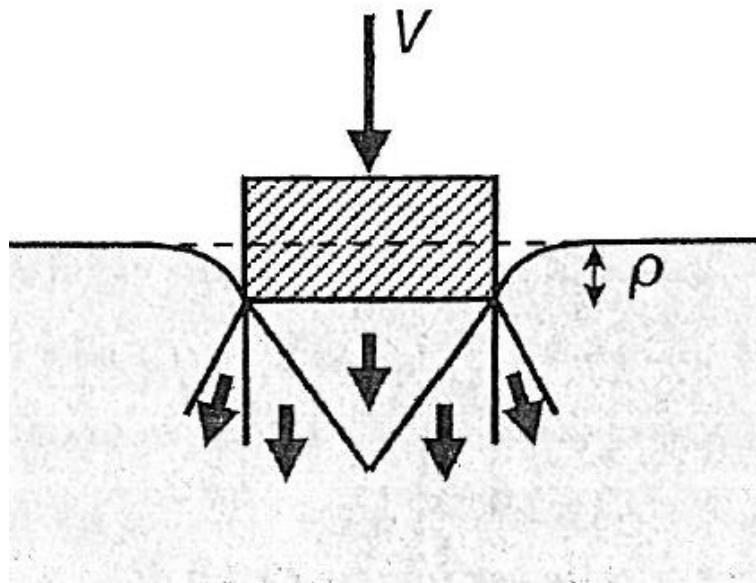
παραμέτρων για τις μέσες καταστάσεις των βαθμονομήσεων. Οι αντίστοιχες διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν την τιμή της φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7) που υπολογίστηκαν για τα αντίστοιχα c και ϕ για το πέδιλο θεμελίου που προσομοιώσαμε.



Εικόνα 5-11 Διάγραμμα q (kPa) - U_y (m) κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)

Παρατηρούμε πως στις περιπτώσεις της μέσης τιμής και του άνω ορίου οι τιμές του φορτίου Q δεν φτάνουν τις τιμές της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7) μετά από κάποιες τιμές καθιζήσεων. Γενικότερα, κατά πλειοψηφία τα μοντέλα έφτασαν σε κατάσταση αστοχίας πριν φτάσουν στην τιμή της μέγιστης καθιζήσης που είχε οριστεί στο ένα μέτρο. Η αστοχία αυτή έχει τη μορφή της διάτρησης (Εικόνα 5-12), κάτι που εμφανίστηκε μόνο κατά τη χρήση του μοντέλου Hardening Soil. Αυτό έχει να κάνει με τους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων που αναλύθηκαν ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Στην περίπτωση που το $E_{50}=4$ Mpa βλέπουμε ότι η καμπύλη του φορτίου του άνω ορίου δεν έχει φτάσει ακόμα την τιμή της φέρουσας ικανότητας χωρίς να έχει αστοχήσει, ωστόσο βρίσκεται

αρκετά μακριά από την τιμή της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7). Στις περιπτώσεις του κατώτατου ορίου των βαθμονομήσεων μας παρατηρείται πως στο σημείο που έχουμε την οριζοντιοποίηση των καμπυλών να υπάρχει σχετική συμφωνία με την τιμή της φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7).



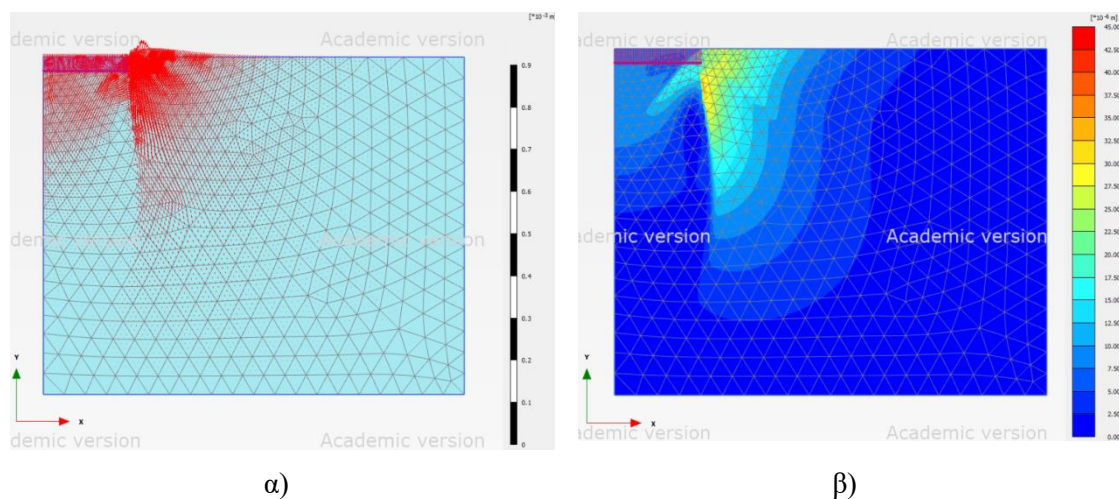
Εικόνα 5-12 Τύπος αστοχίας επιφανειακής θεμελίωσης, Διάτρηση (Γεωργιάδης, 2009)

Στην Εικόνα 5-13α) και β) απεικονίζονται οι σταδιακές μετατοπίσεις που παράχθηκαν κατά την προσομοίωση της εφαρμογής του κυκλικού θεμελίου για το τελευταίο αριθμητικό βήμα. Στην Εικόνα 5-13α) οι μετατοπίσεις παρουσιάζονται με κόκκινα βέλη ενώ στην Εικόνα 5-13β) παρουσιάζονται με διάφορα χρώματα που αντιστοιχούν στην κλίμακα που υπάρχει δεξιά του κανάβου.

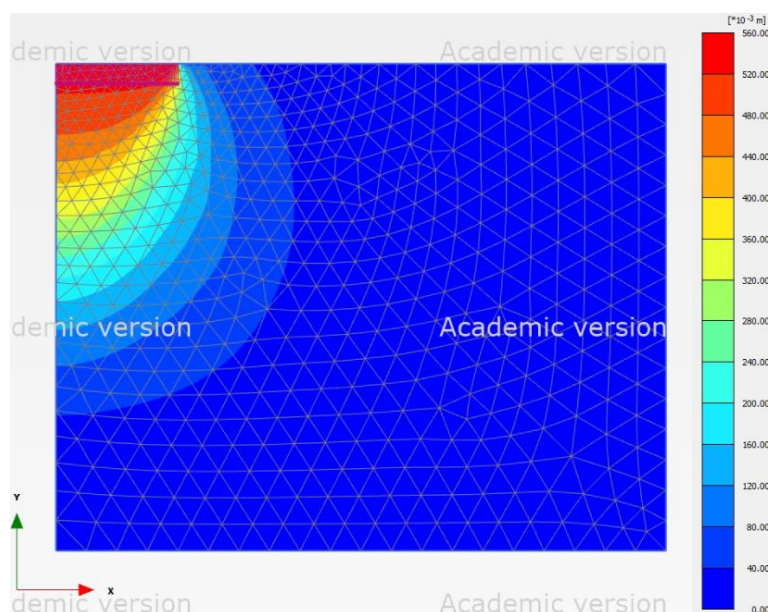
Παρατηρούνται εντονότερες μετατοπίσεις δεξιά του πεδύλου και σχεδόν μηδενικές κάτω από αυτό. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται καθώς έχει επέλθει αστοχία. Παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις εκτείνονται σε σημαντικό βάθος. Εν γένει η μορφή αυτών των παραμορφώσεων συνάδει με τη μορφή αστοχίας τύπου διάτρησης.

Στην Εικόνα 5-14 παρουσιάζονται οι συνολικές μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν στον κανάβο. Με τα διάφορα χρώματα ποσοτικοποιείται η μετατόπιση στο κάθε

σημείο με βάση την κλίμακα που βρίσκεται στα δεξιά του κανάβου. Από την εικόνα παρατηρούμε πως το βάθος επιρροής μετά την εφαρμογή του θεμελίου αγγίζει στην συγκεκριμένη περίπτωση τα τρία μέτρα, βάθος μεγαλύτερο από αυτό στην αντίστοιχη ανάλυση με το μοντέλο Mohr Coulomb. Οι συνολικές μετατοπίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες ακριβώς κάτω από το πέδιλο, ενώ όσο μεγαλώνει η απόσταση από αυτό παρατηρείται και σημαντική μείωση στις μετατοπίσεις.

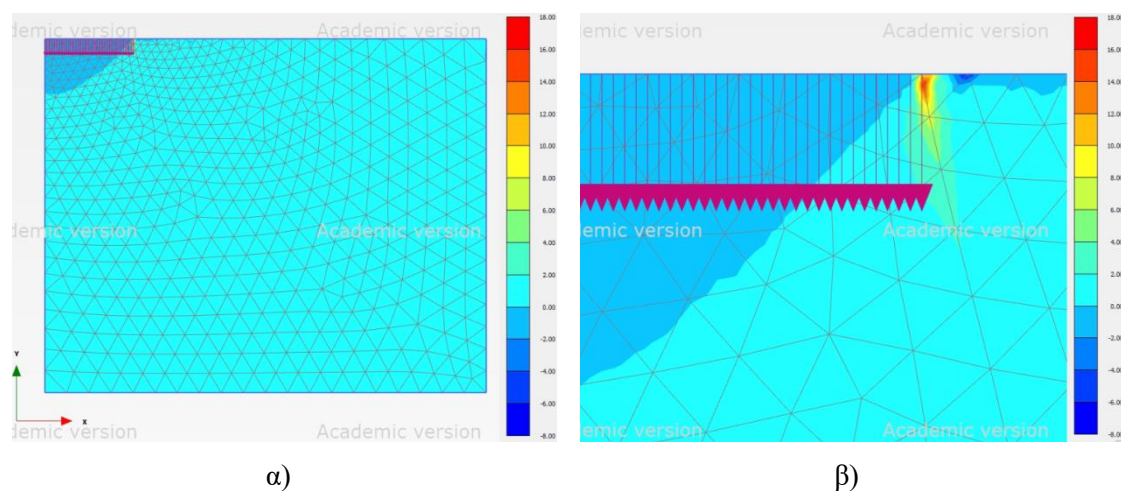


Εικόνα 5-13 Σταδιακές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)



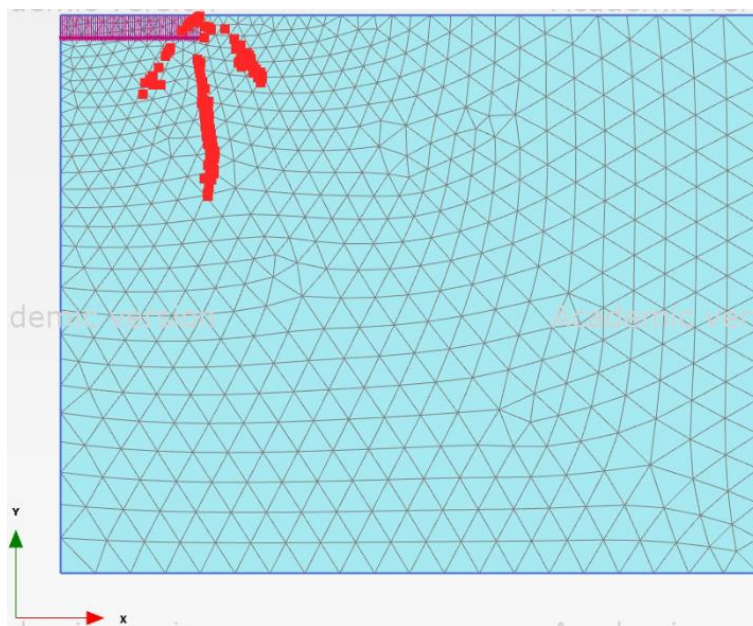
Εικόνα 5-14 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)

Στην Εικόνα 5-15 α και β παρουσιάζονται οι συνολικές παραμορφώσεις που σημειώθηκαν κατά την εφαρμογή του πέλδου θεμελίωσης. Γίνεται αντιληπτό πως οι συνολικές παραμορφώσεις που σημειώνονται κάτω από το εφαρμοσμένο θεμέλιο στον κανάβο δεν είναι μεγάλες, εκτός από τις παραμορφώσεις που σημειώνονται ακριβώς στο δεξί άκρο του θεμελίου. Εκεί παρατηρείται μια μεγάλη, σχεδόν σημειακή, αύξηση των παραμορφώσεων και εκτείνεται σε πολύ μικρό κομμάτι του κανάβου. Για να γίνει εύκολη η παρατήρηση αυτού του σημείου έχει παρατεθεί εικόνα μεγεθυμένη στο συγκεκριμένο σημείο (Εικόνα 5-15β).



Εικόνα 5-15 Συνολικές παραμορφώσεις κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)

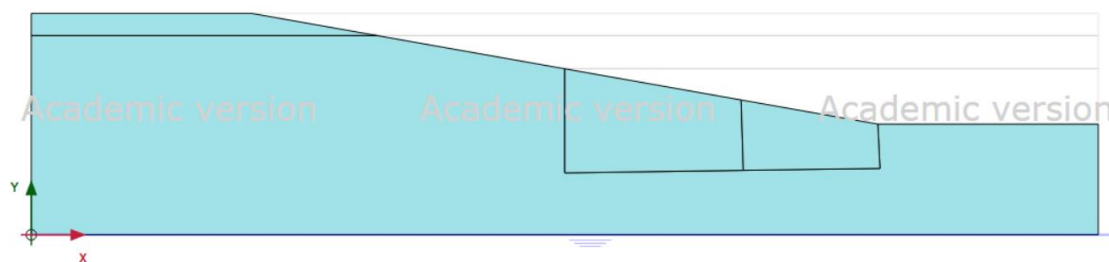
Τα σημεία πλαστικότητας μετά την εφαρμογή του θεμελίου εμφανίζουν αναμενόμενα διαφορετική συμπεριφορά από αυτή του μοντέλου Mohr-Coulomb και παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-16. Παρατηρείται μια μορφή βέλους που έχει σχηματιστεί από αυτά, συνάδει με τη μορφή των σταδιακών μετατοπίσεων και την αστοχία τύπου διάτρησης.



Εικόνα 5-16 Σημεία πλαστικότητας κατά την εφαρμογή θεμελίωσης (Hardening Soil)

5.2 Εκσκαφή και ευστάθεια πρανούς

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η εκσκαφή και η ευστάθεια πρανούς σε έδαφος με εδαφικές παραμέτρους όμοιες με αυτές των βαθμονομήσεων. Η εφαρμογή εξετάστηκε με βάση τα δύο καταστατικά μοντέλα Mohr-Coulomb και Hardening Soil και χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PLAXIS για την προσομοίωση του. Το μοντέλο πρανούς που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-17.



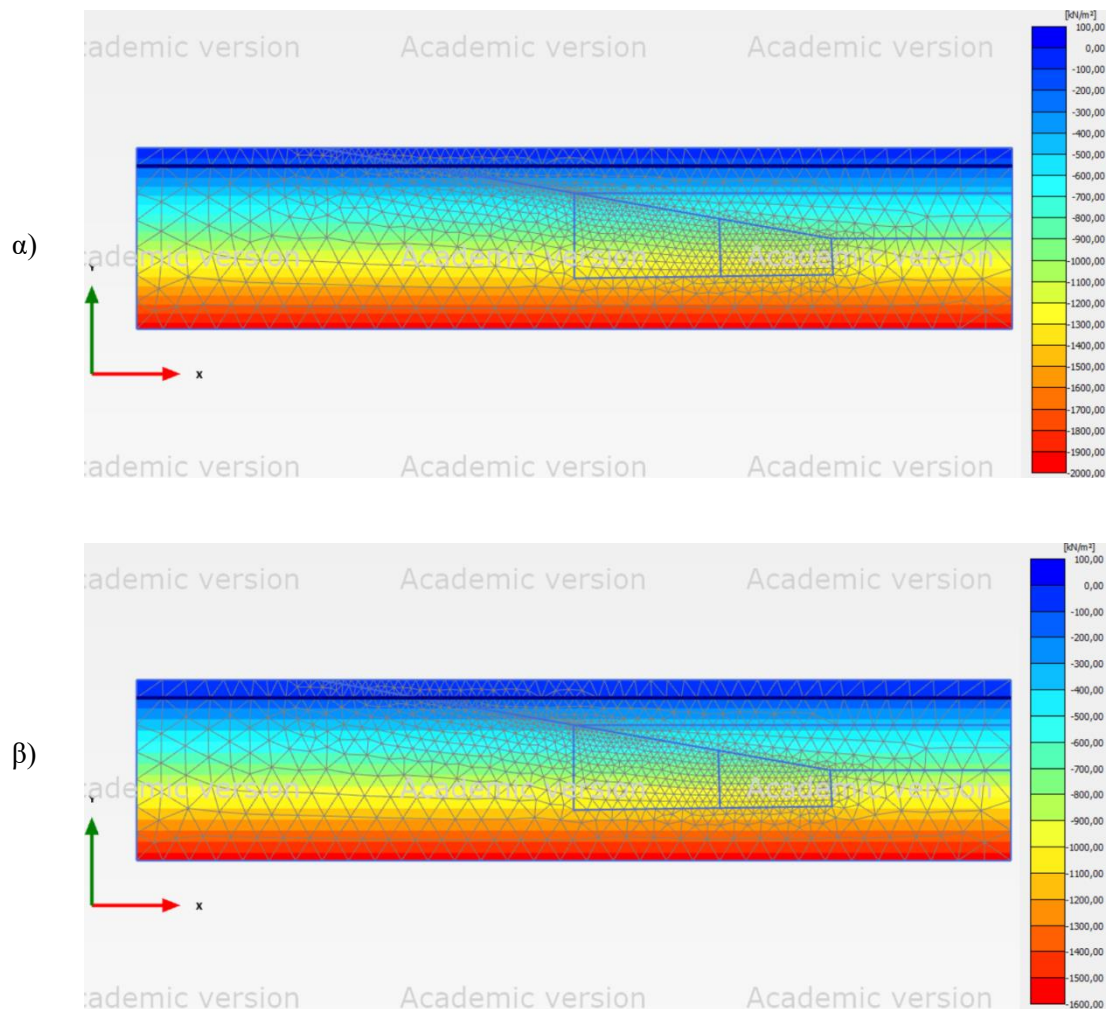
Εικόνα 5-17 Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα πρανούς

Ως ύψος H ορίστηκαν τα 100 μέτρα, αρχικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο αριστερό άκρο της προσομοίωσης H_w τα 90 μέτρα και η γωνία α επιλέχθηκε να είναι 10 μοίρες. Το πρόβλημα αναπτύχθηκε σε 6 διαφορετικές φάσεις, ώστε να

σιγουρευτούμε για την ομαλή του λειτουργία και προσομοίωση. Στην πρώτη φάση εφαρμόζεται στον κানাβο η βαρύτητα και υπολογίζονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις. Στην δεύτερη φάση προσομοιώθηκε η εφαρμογή του υδροφόρου ορίζοντα στο ύψος της πρώτης εκσκαφής, ενώ κατά τη τρίτη φάση προσομοιώθηκε το πρώτο κομμάτι εκσκαφής σε ύψος 75 μέτρων. Ομοίως, στην τέταρτη φάση προσομοιώθηκε η εφαρμογή του υδροφόρου ορίζοντα στο ύψος της δεύτερης εκσκαφής, ενώ κατά τη πέμπτη φάση προσομοιώθηκε το δεύτερο κομμάτι εκσκαφής σε ύψος 50 μέτρων. Τέλος, στην έκτη φάση ζητήθηκε από το πρόγραμμα ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς που δημιουργήσαμε. Κατά την δημιουργία του κανάβου, επιλέχθηκε η πύκνωση του στον πόδα του πρανούς με σκοπό την αποφυγή τοπικών αστοχιών που θα επηρέαζαν την προσομοίωση του προβλήματος. Επιπλέον, ορίστηκαν οι παράμετροι για το φαινόμενο και κορεσμένο μοναδιαίο βάρος, $\gamma_{\text{unsat}}=17\text{kN/m}^3$ και $\gamma_{\text{sat}}=20\text{kN/m}^3$ αντίστοιχα.

5.2.1 Γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό (Mohr-Coulomb)

Αφού το πρόβλημα της εκσκαφής σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα PLAXIS σειρά είχε η εισαγωγή των εδαφικών παραμέτρων. Για το μοντέλο Mohr-Coulomb επιλέχθηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E να είναι 6,5 Mpa και του λόγου Poisson 0,2, ενώ οι συνδυασμοί των τιμών της συνοχής του εδάφους c και της γωνίας τριβής ϕ επιλέχθηκαν βάση του Πίνακα 4-1, δηλαδή της βαθμονόμησης του προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Αρχικά εφαρμόζονται οι παράμετροι της μέσης κατάστασης, όπου και τα αποτελέσματα των φάσεων παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Στην πρώτη φάση εφαρμόζεται στον κানাβο η βαρύτητα και υπολογίζονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στις Εικόνα 5-18α) και β).



Εικόνα 5-18 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές γεωστατικές τάσεις

Στις Εικόνα 5-18α) και 5-Εικόνα 5-18β) παρατηρούμε την αναλογική αύξηση των τάσεων με την αύξηση του βάθους. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο και επιβεβαιώνει ότι οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις έχουν κατανομηθεί σωστά στον κάναβο μας. Οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις επιβεβαιώνονται ως:

$$\sigma_v = \gamma_{\text{unsat}} * h + \gamma_{\text{sat}} * H_w$$

δηλαδή στην περίπτωση μας

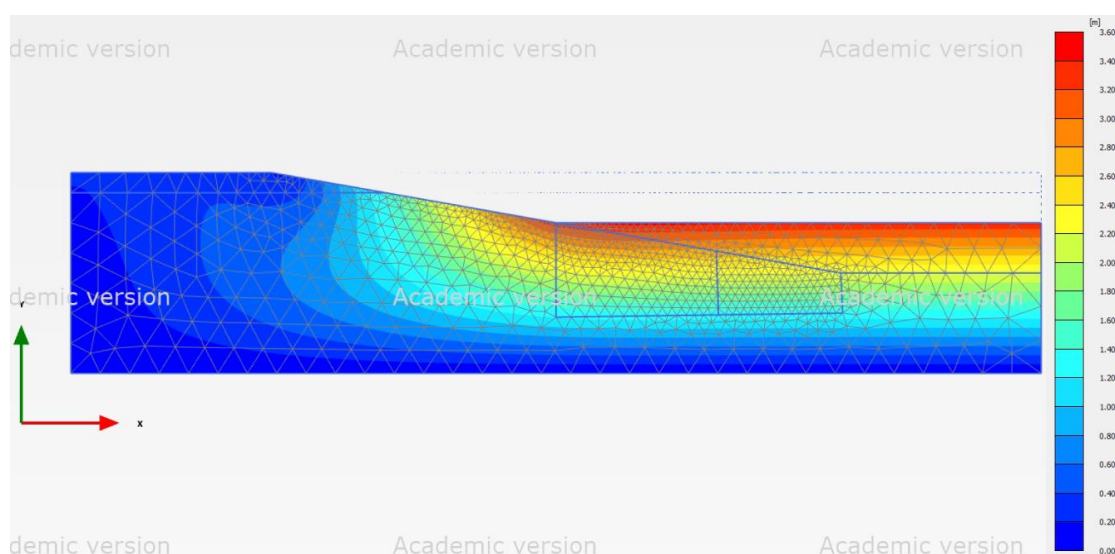
$$17\text{kN/m}^3 * 10\text{m} + 20\text{kN/m}^3 * 90\text{m} = 1970\text{kN/m}^2$$

Οι οριζόντιες ενεργές τάσεις υπολογίζονται ως

$$\sigma_h = K_0 * [(\gamma_{\text{unsat}} * h + \gamma_{\text{sat}} * H_w) - u] + u = (1 - \sin\phi) * (1970 \text{ kN/m}^2 - 90 * 10) =$$

$$= 0,625 * 1070 \text{ kN/m}^2 + 900 = 1568,75 \text{ kN/m}^2$$

Κατά τη δεύτερη φάση έγινε η προσαρμογή του υδροφόρου ορίζοντα στο επιθυμητό επίπεδο και στην τρίτη φάση έγινε η εκσκαφή έως τα 75 μέτρα. Στην φάση αυτή καταγράφηκε η Εικόνα 5-19 που απεικονίζει τις συνολικές μετατοπίσεις στον κάναβο.



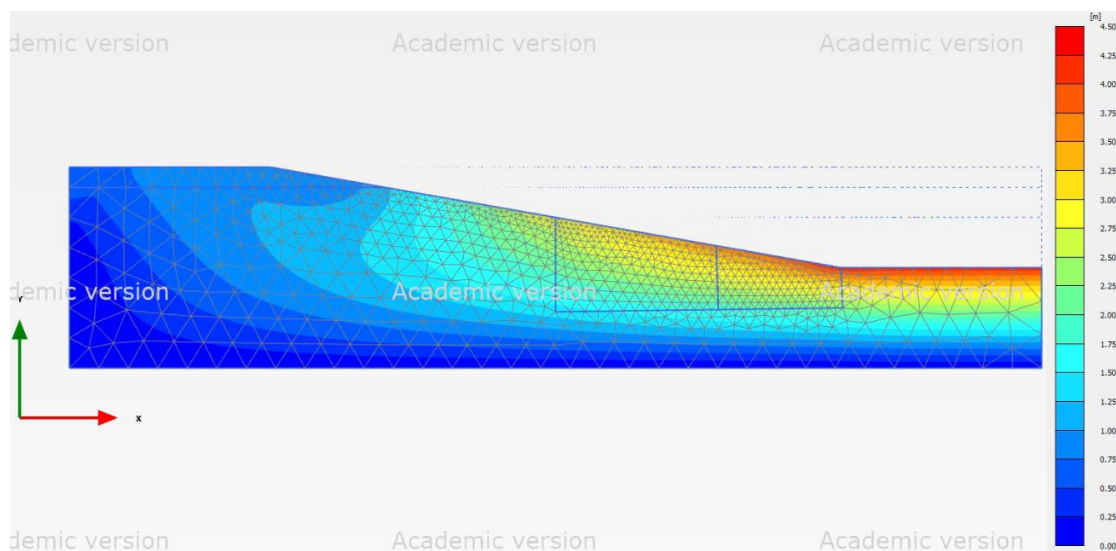
Εικόνα 5-19 Συνολικές μετατοπίσεις για το πρώτο στάδιο εκσκαφής (τρίτη φάση προσομοίωσης)

Η εικόνα των μετατοπίσεων μοιάζει ικανοποιητική καθώς παρατηρείται ομοιομορφία σε αυτές από τον πόδα του πρανούς έως και το δεξί άκρο της γεωμετρίας που έχει επιλεγθεί. Οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις που σημειώθηκαν ήταν 3,47 m.

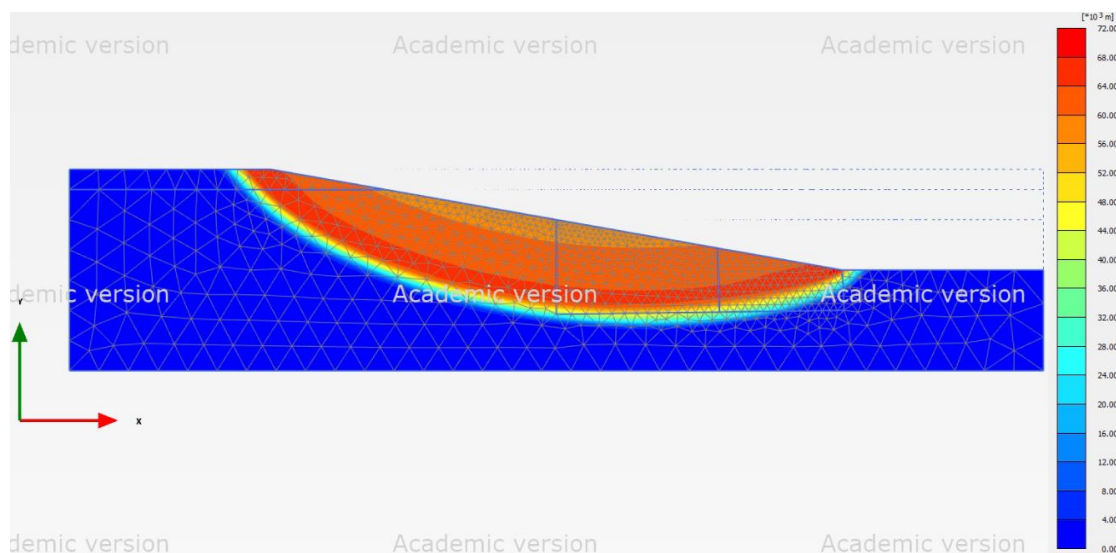
Κατά τη τέταρτη φάση έγινε η προσαρμογή του υδροφόρου ορίζοντα στο επιθυμητό επίπεδο. Έτσι, στην πέμπτη φάση έγινε η εκσκαφή έως τα 50 μέτρα βάθος, όπου είχε οριστεί να φτάσει ο υδροφόρος ορίζοντας. Στην φάση αυτή καταγράφηκε η Εικόνα 5-20 που απεικονίζει τις συνολικές μετατοπίσεις στον κάναβο.

Η εικόνα των μετατοπίσεων μοιάζει ικανοποιητική καθώς παρατηρείται ομοιομορφία σε αυτές από τον πόδα του πρανούς έως και το δεξί άκρο της γεωμετρίας που έχει

επιλεχθεί. Το μέγεθος τους είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρήθηκε στην δεύτερη φάση και φτάνουν τα 4,27 m, μία αρκετά μεγάλη ανύψωση για αυτή την εκσκαφή.



Εικόνα 5-20 Συνολικές μετατοπίσεις για το δεύτερο στάδιο εκσκαφής (Πέμπτη φάση προσομοίωσης)



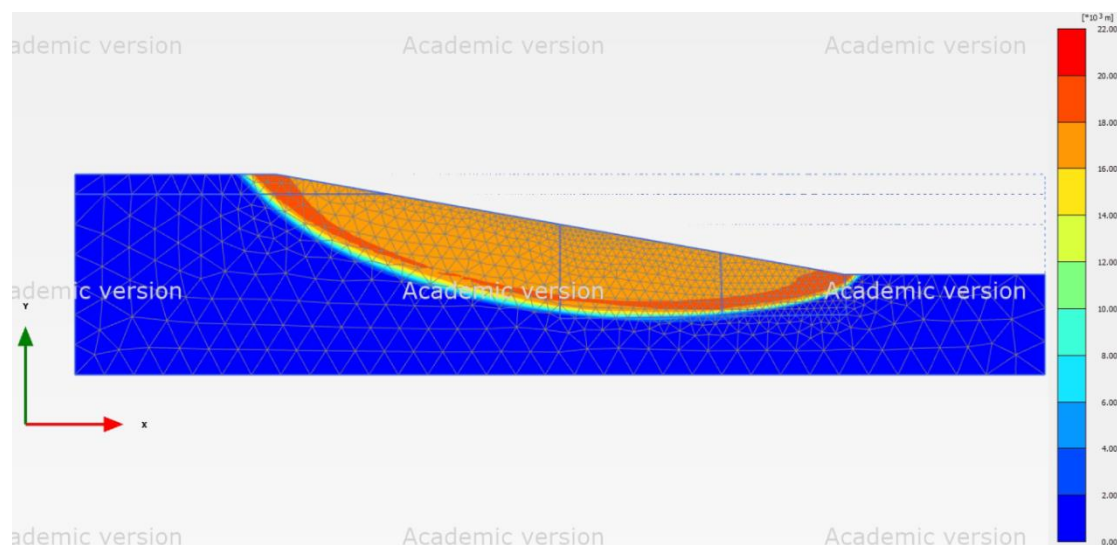
Εικόνα 5-21 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=10$ kPa, $\phi=22^\circ$)

Ο συντελεστής ασφαλείας των συγκεκριμένων παραμέτρων υπολογίστηκε $SF=1,84$. Η απεικόνιση των συνολικών μετατοπίσεων κατά τη φάση του υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας (Εικόνα 5-21) μας δείχνει καθαρά την επιφάνεια ολίσθησης.

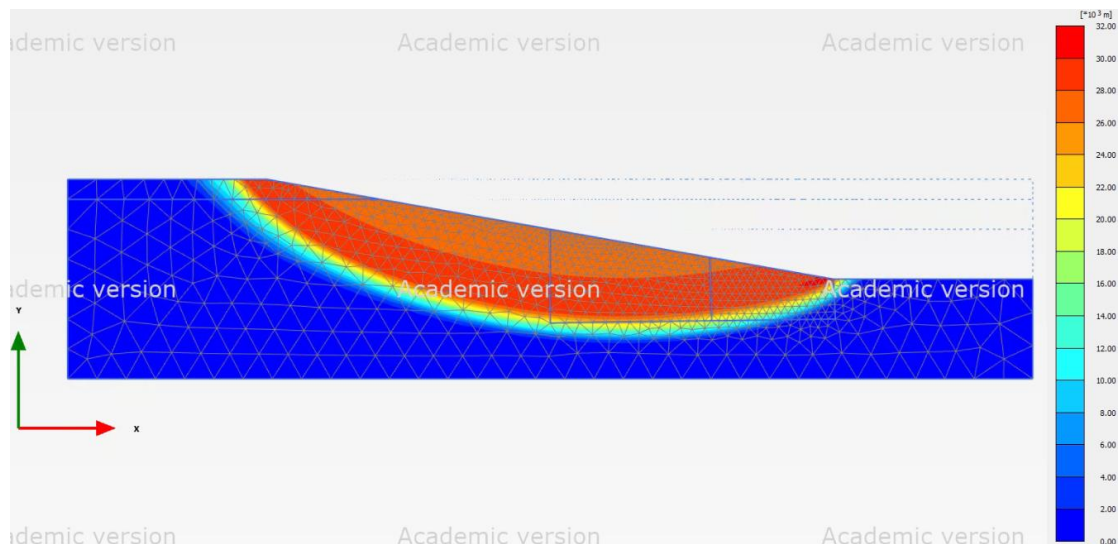
Ακόμα, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και για τους συνδυασμούς εδαφικών παραμέτρων του άνω και κάτω ορίου της βαθμονόμησης. Για τους συνδυασμούς αυτούς παρουσιάζεται στις Εικόνα 5-22 και Εικόνα 5-23 το στάδιο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας της κάθε περίπτωσης.

Στην περίπτωση των παραμέτρων του κάτω ορίου, δηλαδή για $c=0$ kPa και $\varphi=19$ μοίρες, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται 1,46. Παράλληλα οι συνολικές μετατοπίσεις (Εικόνα 5-22) εμφανίζουν την επιφάνεια αστοχίας που είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή στη μέση κατάσταση.

Στην περίπτωση των παραμέτρων του άνω ορίου, δηλαδή για $c=17,5$ kPa και $\varphi=25,5$ μοίρες, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται 2,25. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι αναμενόμενα η μεγαλύτερη από τις 3 περιπτώσεις. Παράλληλα οι συνολικές μετατοπίσεις (Εικόνα 5-23) εμφανίζουν την επιφάνεια αστοχίας που είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή στη μέση κατάσταση.



Εικόνα 5-22 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=0$ kPa, $\varphi=19^\circ$)



Εικόνα 5-23 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=17,5$ kPa, $\varphi=25,5^\circ$)

5.2.2 Hardening Soil

Για το μοντέλο Hardening Soil επιλέχθηκε η τιμή του E_{50} , δηλαδή το τέμνον μέτρο στο ήμισυ της αντοχής, να είναι 5,2 Mpa και του λόγου Poisson 0,2, ενώ οι συνδυασμοί των τιμών της συνοχής του εδάφους c και της γωνίας τριβής φ επιλέχθηκαν βάση του Πίνακα 4-3, δηλαδή της βαθμονόμησης. Στην πρώτη φάση εφαρμόζεται στον κάρναβο η βαρύτητα και υπολογίζονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στις Εικόνα 5-24α) και β).

Κατά τη δεύτερη φάση έγινε η προσαρμογή του υδροφόρου ορίζοντα στο επιθυμητό επίπεδο. Έτσι, στην τρίτη φάση έγινε η εκσκαφή έως τα 75 μέτρα, όπου είχε οριστεί να φτάσει ο υδροφόρος ορίζοντας. Η Εικόνα 5-25 απεικονίζει τις συνολικές μετατοπίσεις στον κάρναβο στη φάση αυτή.

Η εικόνα των μετατοπίσεων μοιάζει ικανοποιητική καθώς παρατηρείται ομοιομορφία σε αυτές από τον πόδα του πρανούς έως και το δεξί άκρο της γεωμετρίας που έχει επιλεγεί. Η μέγιστη τιμή που σημειώνεται είναι τα 0,59 m, τιμή σαφώς μικρότερη από αυτή του προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Κάποιες μικρές μετατοπίσεις είναι εμφανείς και στα αριστερά του πρανούς.

Κατά τη τέταρτη φάση έγινε η προσαρμογή του υδροφόρου ορίζοντα στο επιθυμητό επίπεδο. Έτσι, στην πέμπτη φάση έγινε η εκσκαφή έως τα 50 μέτρα βάθος, όπου είχε

οριστεί να φτάσει ο υδροφόρος ορίζοντας. Στην φάση αυτή καταγράφηκε η Εικόνα 5-26 που απεικονίζει τις συνολικές μετατοπίσεις στον κάναβο.

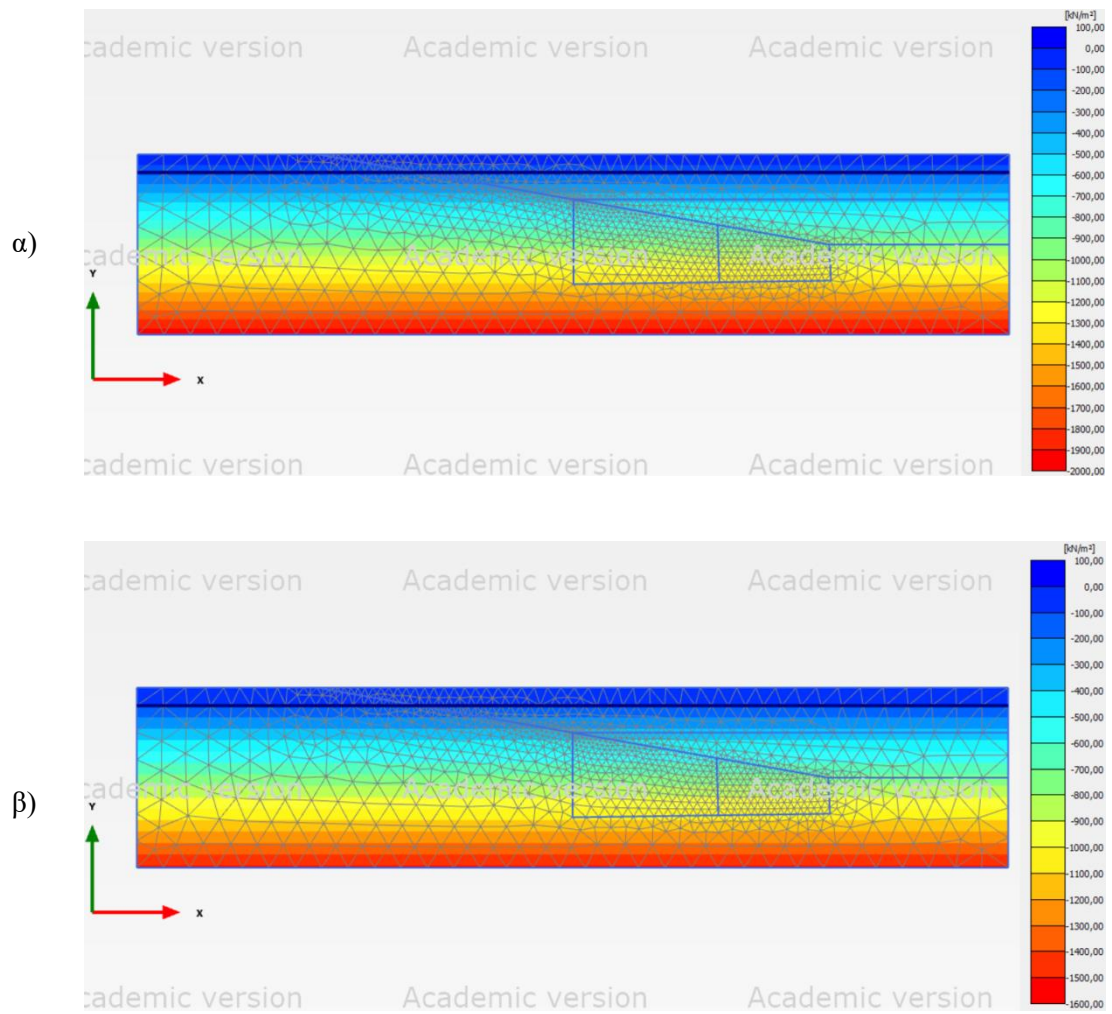
Η εικόνα των μετατοπίσεων μοιάζει ικανοποιητική καθώς παρατηρείται ομοιομορφία σε αυτές από τον πόδα του πρανούς έως και το δεξί άκρο της γεωμετρίας που έχει επιλεχθεί. Το μέγεθος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρήθηκε στην δεύτερη φάση φτάνοντας τα 0,84 m, ενώ οι μετατοπίσεις στα αριστερά του πρανούς φαίνεται να πληθαίνουν. Γενικότερα, η διαφορά στις τιμές των μετατοπίσεων μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων είναι αισθητή.

Ο συντελεστής ασφαλείας των συγκεκριμένων παραμέτρων υπολογίστηκε από το πρόγραμμα ως 2,22. Η απεικόνιση των συνολικών μετατοπίσεων κατά τη φάση του υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας (Εικόνα 5-27) μας δείχνει καθαρά την επιφάνεια ολίσθησης.

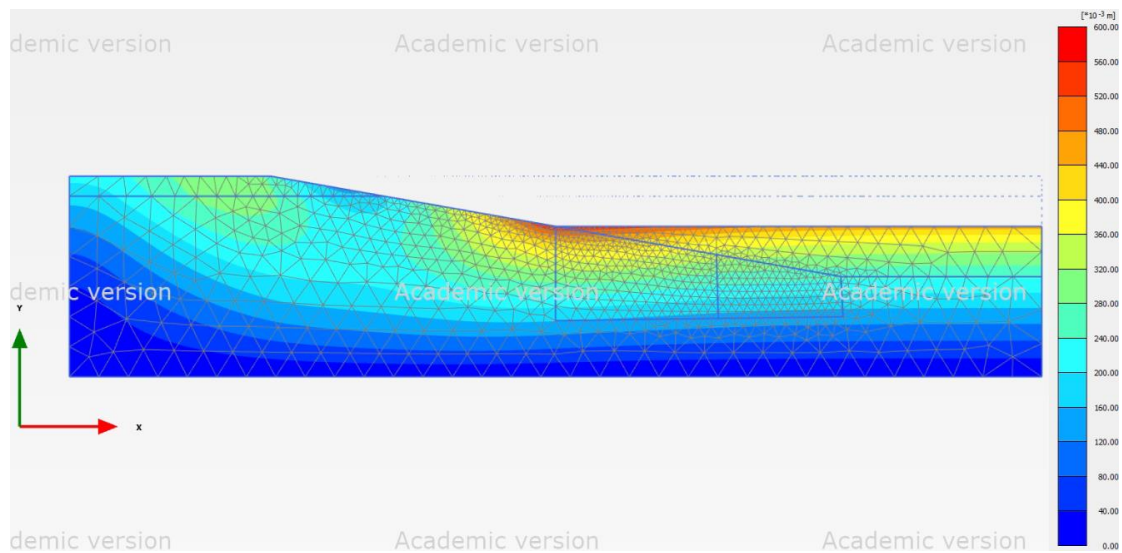
Ακόμα, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και για τους συνδυασμούς εδαφικών παραμέτρων του άνω και κάτω ορίου της βαθμονόμησης. Για τους συνδυασμούς αυτούς παρουσιάζεται στις Εικόνα 5-28 και Εικόνα 5-29 το στάδιο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας της κάθε περίπτωσης.

Στην περίπτωση των παραμέτρων του κάτω ορίου, δηλαδή για $c=0\text{kPa}$ και $\varphi=22,5$ μοίρες, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται 1,78. Παράλληλα οι συνολικές μετατοπίσεις (Εικόνα 5-28) εμφανίζουν την επιφάνεια αστοχίας που είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή στη μέση κατάσταση.

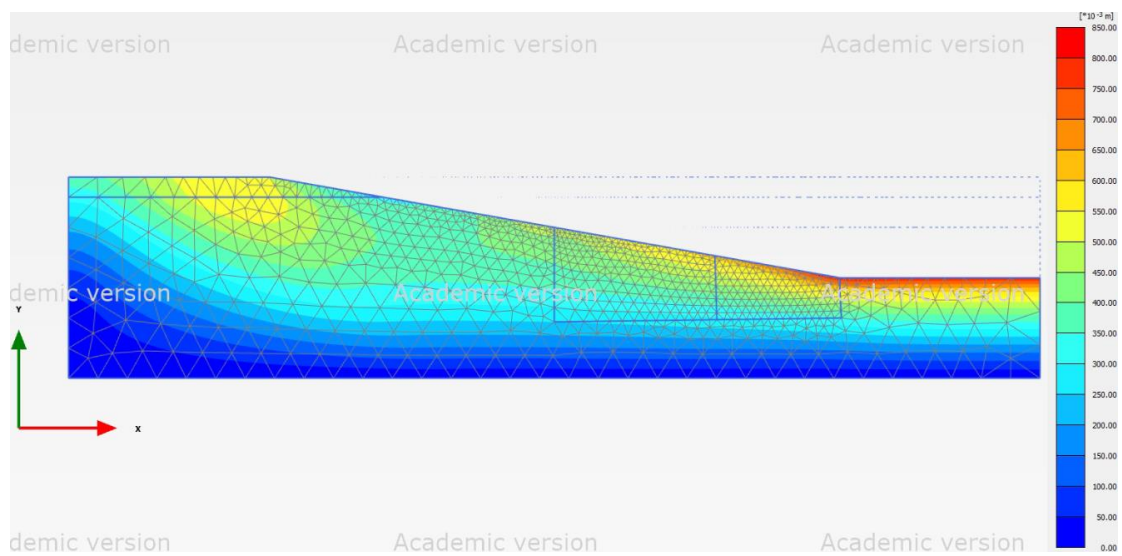
Στην περίπτωση των παραμέτρων του άνω ορίου, δηλαδή για $c=40\text{ kPa}$ και $\varphi=27$ μοίρες, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται 2,66. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι αναμενόμενα η μεγαλύτερη από τις 3 περιπτώσεις. Παράλληλα οι συνολικές μετατοπίσεις (Εικόνα 5-29) εμφανίζουν την επιφάνεια αστοχίας που είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή στη μέση κατάσταση.



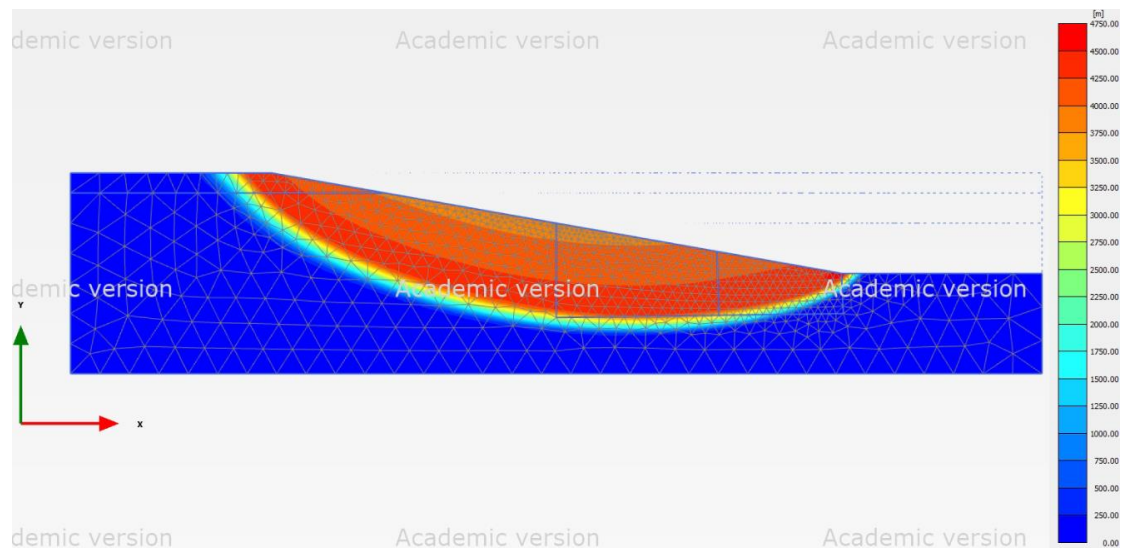
Εικόνα 5-24 α) Κατακόρυφες ενεργές τάσεις, β) Οριζόντιες ενεργές γεωστατικές τάσεις (Hardening Soil)



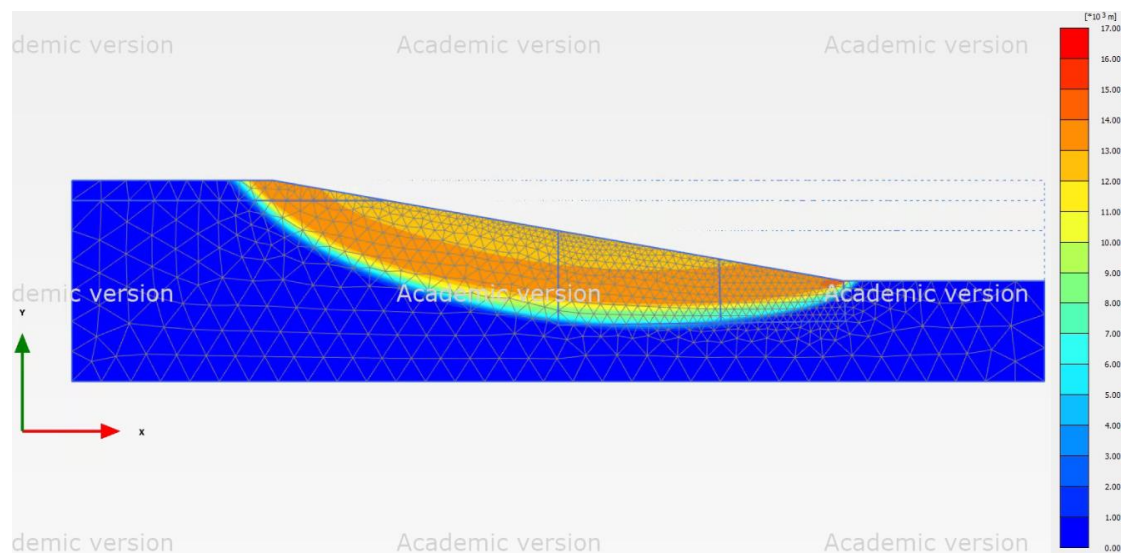
Εικόνα 5-25 Συνολικές μετατοπίσεις για το πρώτο στάδιο εκσκαφής (τρίτη φάση προσομοίωσης)



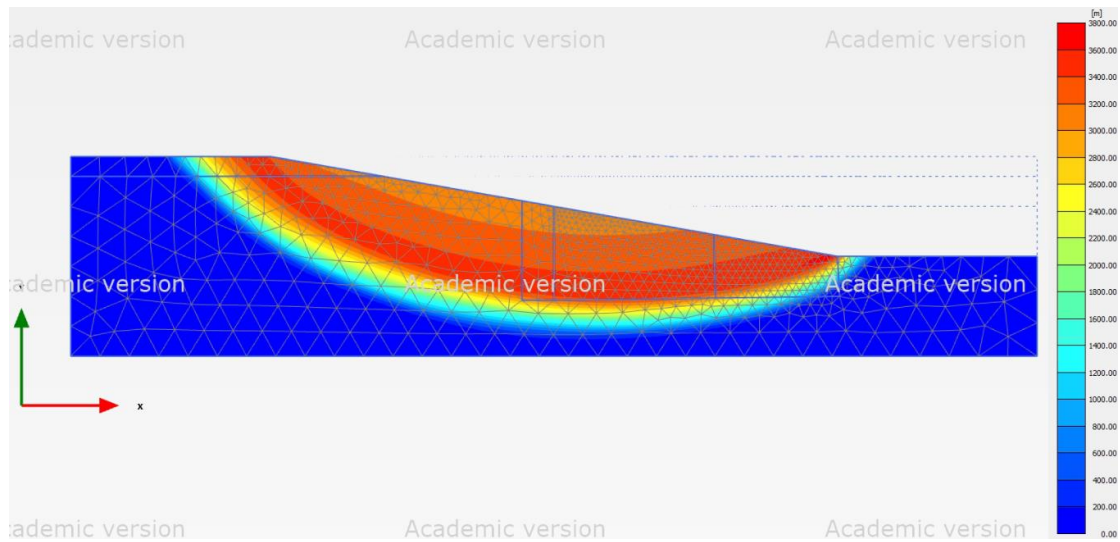
Εικόνα 5-26 Συνολικές μετατοπίσεις για το δεύτερο στάδιο εκσκαφής (πέμπτη φάση προσομοίωσης)



Εικόνα 5-27 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=20 \text{ kPa}$, $\phi=25^\circ$)



Εικόνα 5-28 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=0 \text{ kPa}$, $\phi=22,5^\circ$)



Εικόνα 5-29 Συνολικές μετατοπίσεις κατά την ανάλυση ασφαλείας που χαρακτηρίζουν και την επιφάνεια ολίσθησης ($c=40 \text{ kPa}$, $\phi=27^\circ$)

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική αφορά κυρίως τη βαθμονόμηση καταστατικών προσομοιωμάτων για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφικών στείρων λιγνιτωρυχείων. Σε αυτή την κατεύθυνση χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά αποτελέσματα ελληνικών στείρων από δύο βασικές δοκιμές εδαφομηχανικής, του οιδημέτρου και της τριαξονικής θλίψης. Με βάση αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα βαθμονομήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα, το θεμελιώδες για εδάφη Mohr-Coulomb και το προχωρημένο, ελαστο-πλαστικό Hardening Soil. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης βασίστηκαν κατά κύριο λόγο στην τριαξονική δοκιμή με πίεση κυψέλης 100kPa. Επιπλέον, έγινε σύγκριση των βαθμονομημένων προσομοιωμάτων με τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής για πίεση κυψέλης 200kPa και 400kPa και με δοκιμές οιδημέτρου.

Κατόπιν τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων εφαρμόστηκαν σε δύο τυπικές γεωτεχνικές εφαρμογές για να συγκριθούν οι διαφορές που προκύπτουν σε πρακτικά προβλήματα. Πρώτον, ελέγχθηκε η επιρροή των προσομοιωμάτων στη μηχανικής απόκριση μεμονωμένου, επιφανειακού, κυκλικού θεμελίου. Κατόπιν, εξετάστηκε η επίδραση των προσομοιωμάτων στην ανύψωση μιας βαθιάς εκσκαφής και στην ευστάθεια ενός μεγάλου πρανούς με μικρή κλίση. Έτσι, τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων εφαρμόστηκαν σε τυπικές εφαρμογές με σκοπό την περαιτέρω αξιολόγηση τους.

6.2 Συμπεράσματα

Για κάθε προσομοίωμα βαθμονομήθηκαν τρεις συνδυασμοί αντοχής που να ανταποκρίνονται στη μέση, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των πειραματικών αποτελεσμάτων. Το προσομοίωμα Mohr-Coulomb μας έδωσε στις βαθμονομήσεις εδαφικές παραμέτρους σχετικά χαμηλότερες από το αναμενόμενο. Η συνοχή c κυμάνθηκε γενικά σε χαμηλές τιμές από 0 έως 17,5 kPa. Η γωνία τριβής ορίστηκε στην οριακά χαμηλή τιμή των 19° για τον κάτω όριο της βαθμονόμησης, ενώ έφτασε στις $25,5^\circ$ για το άνω όριο. Η διακύμανση αυτή της τιμής της γωνίας τριβής είναι

σχετικά μεγάλη και η κατώτατη τιμή μικρή. Για το μέτρο ελαστικότητας αναλύθηκαν επίσης τρεις τιμές, μία μέση τιμή αντιπροσωπευτική για τις τυπικές συμπεριφορές των δοκιμών, ενώ μια χαμηλότερη και μια υψηλότερη τιμή χαρακτήρισαν το πλήρες εύρος που εμφανίζεται. Η μέση τιμή ορίστηκε στα 6,5 MPa, η χαμηλότερη στα 2,8 MPa και η υψηλότερη στα 10,5 MPa. Η συμπεριφορά της μέσης τιμής ήταν η επιθυμητή. Για το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας παρατηρήθηκαν μεγάλες κλίσεις σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα στην τριαξονική δοκιμή με πίεση κυψέλης 100 kPa, όμως στις μεγαλύτερες πιέσεις των 200 και 400 kPa οι κλίσεις που παρατηρήθηκαν δεν απείχαν πολύ από αυτές των δοκιμών. Αντίθετα, για το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε όλες τις περιπτώσεις πιέσεων η κλίση που παρατηρήθηκε στις καμπύλες των βαθμονομήσεων μας ήταν αισθητά μικρότερη από αυτή των δοκιμών.

Ακριβέστερα θεωρούνται τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων με τη χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Hardening Soil. Στις βαθμονομήσεις αυτές οι τιμές της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ κυμάνθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα. Η συνοχή έλαβε τιμή από 0 έως και 40 kPa για τα άνω όρια, ενώ η γωνία τριβής κυμάνθηκε από 22,5° και 27° για τα κάτω και άνω όρια αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η διακύμανση της τιμής της γωνίας τριβής είναι αισθητά μικρότερη για αυτό το προσομοίωμα. Χαρακτηριστικό ελαστικό μέτρο για τη δυσκαμψία του προσομοιώματος Hardening Soil είναι το τέμνον μέτρο στο ήμισυ της αντοχής, δηλαδή το μέτρο E_{50} . Επιλέχθηκαν τρεις τιμές στην ίδια λογική με το προηγούμενο προσομοίωμα αλλά προέκυψε σαφώς μικρότερη διακύμανση από αυτή του προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Η μέση τιμή βαθμονομήθηκε στα 5,2 MPa παρουσιάζοντας πολύ σωστά την μέση κλίση των δοκιμών στις πιέσεις κυψέλης των 100 και 200 kPa, ενώ κρίθηκε λίγο χαμηλή στα 400 kPa. Το μικρότερο E_{50} που χρησιμοποιήθηκε ήταν 4 MPa, παράγοντας οριακά μικρότερες κλίσεις, υποεκτιμώντας όμως τις τάσεις και τις πιέσεις πόρων. Αντιθέτως, το μεγαλύτερο E_{50} που τέθηκε ως 6,5 MPa, παρήγαγε αρχικά μεγαλύτερες από το επιθυμητό κλίσεις, είχε όμως σωστή εκτίμηση των τάσεων και των πιέσεων πόρων στις πιέσεις κυψέλης των 200 και 400 kPa.

Αρκετές διαφορές παρατηρήθηκαν στην απόκριση της κυκλικής θεμελίωσης μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων. Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκαν βαθμονομήσεις με τρεις αντοχές (κάτω όριο, μέση απόκριση, πάνω όριο) και τρεις δυσκαμψίες. Οι τρεις διαφορετικές δυσκαμψίες δεν επηρέαζαν

όπως αναμενόταν την φέρουσα ικανότητα για κάθε βαθμονόμηση αλλά μόνο τον τρόπο εξέλιξης των καθιζήσεων. Στο προσομοίωμα Mohr-Coulomb σημειώθηκε καλή συμφωνία των φορτίων των κάτω ορίων της αντοχής σε σχέση με την τιμή της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7). Όμως, παρατηρήθηκε ότι η τιμή της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7) ξεπεράστηκε κατά 15-20% από τα φορτία των συνδυασμών των μέσων τιμών και των άνω ορίων. Αυτή η διαφορά στις τιμές θεωρείται αποδεκτή λόγω της συντηρητικής προσέγγισης του ευρωκώδικα στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας. Αντίθετα, στο προσομοίωμα Hardening Soil παρατηρήθηκε αστοχία μορφής διάτρησης στις περιπτώσεις της μέσης και της μέγιστης αντοχής. Αυτό παρατηρήθηκε στην αδυναμία των φορτίων να φτάσουν κοντά στις τιμές της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας κατά ευρωκώδικα 7 (EC7), αλλά και μέσω των διάφορων απεικονίσεων των μετατοπίσεων, των παραμορφώσεων και των σημείων πλαστικότητας. Μολαταύτα, για το κάτω όριο της αντοχής τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα με το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Τέλος, έγινε σύγκριση της απόκρισης και της ευστάθειας μιας βαθιάς εκσκαφής για τα δύο προσομοιώματα και τις διάφορες βαθμονομήσεις. Στην περίπτωση του Mohr-Coulomb σημειώθηκαν χαμηλότεροι συντελεστές ασφαλείας και η ανύψωση που παρατηρήθηκε ήταν γενικά μεγάλη. Οι τιμές που σημειώθηκαν έφτασαν τα 4,27 m μία αρκετά μεγάλη ανύψωση. Γενικά ο συντελεστής ασφαλείας κυμάνθηκε από 1,46 έως 2,25, με τη μέση αντοχή να δίνει 1,84. Στο Hardening Soil, οι συνδυασμοί εδαφικών παραμέτρων που δοκιμάστηκαν μας έδωσαν μεγαλύτερες τιμές συντελεστών ασφαλείας σε κάθε μια από τις περιπτώσεις, ενώ σημειώθηκαν και σημαντικά χαμηλότερες τιμές ανύψωσης. Το μέγεθος των ανυψώσεων έφτασε τα 0,84 m, τιμή σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Στην προκειμένη περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας κυμάνθηκε από 1,78 έως 2,66, με τη μέση τιμή να μας δίνει 2,22. Συνεπώς οι συνδυασμοί των εδαφικών παραμέτρων που καταλήξαμε από την βαθμονόμηση στο μοντέλο Hardening Soil προσδίδουν σημαντικά ασφαλέστερες συνθήκες.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η βαθμονόμηση αποτελεί το πρώτο βήμα προς την αριθμητική προσομοίωση και ανάλυση των εδαφικών στείρων λιγνιτωρυχειών. Όσον αφορά την καταστατική προσομοίωση θα μπορούσε να δοκιμαστεί και η χρήση και βαθμονόμηση ενός πιο

προχωρημένου προσομοιώματος όπως το modified Cam-Clay. Παρ'όλ'αυτά, επισημαίνεται ότι και το Hardening Soil πιθανώς είναι επαρκές για την πλειονότητα των αριθμητικών εφαρμογών. Επιπλέον, για την πληρέστερη γνώση του υλικού δοκιμές ανακυκλικής φόρτισης θα προσέθεταν στο κομμάτι της ανάλυσης σχετικών φορτίων, όπως σεισμικών φορτίων ή ανακυκλικών φορτίσεων ανεμογεννητριών. Πηγαίνοντας προς την κατεύθυνση των εφαρμογών, στοχευμένες εφαρμογές που αφορούν το ανάχωμα της Σουλού, απ' όπου προέρχονται και τα πειραματικά αποτελέσματα, θα αναδείξουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη χρησιμότητα των βαθμονομήσεων που έγιναν σε αυτή την εργασία. Τέλος, η μεγάλη διασπορά στη συμπεριφορά των στείων υλικών φαίνεται και σε αυτή την εργασία λόγω της μεγάλης απόκλισης των μέσω και οριακών αντοχών και δυσκαμψιών των βαθμονομήσεων. Σε αυτή την κατεύθυνση πιθανοτικές και στοχαστικές αναλύσεις μπορεί να φανούν χρήσιμες σε μελλοντικές εργασίες που αφορούν την ανάλυση αποθέσεων στείων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Alves Dias, P., Kanellopoulos, K., Medarac, H., Kapetaki, Z., Miranda-Barbosa, E., Shortall, R., Czako, V., Telsnig, T., Vazquez-Hernandez, C., Lacal Arántegui, R., Nijs, W., Gonzalez Aparicio, I., Trombetti, M., Mandras, G., Peteves, E., and Tzimas, E. 2018. *EU coal regions: opportunities and challenges ahead - EUR 29292 EN*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [2] Bell, F. G., and Donnelly, L. J. 2006. *Mining and its Impact on the Environment*, Taylor & Francis.
- [3] BGS 2013. "Hatfield Colliery landslide, South Yorkshire - February 2013." <<http://www.bgs.ac.uk/landslides/hatfieldFeb2013.html>>. (February 4, 2020).
- [4] Bian, Z., Miao, X., Lei, S., Chen, S.-e., Wang, W., and Struthers, S. 2012. "The Challenges of Reusing Mining and Mineral-Processing Wastes". *Science*, 337(6095), 702-703.
- [5] Brawner, C. O., and Broughton, S. 1991. "Recent problems with waste rock spoil dumps." In *Proc., Proceedings of the 15th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium*, 85-93.
- [6] Dawson, R. F., Morgenstern, N. R., and Stokes, A. W. 1998. "Liquefaction flowslides in Rocky Mountain coal mine waste dumps". *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), 328-343.
- [7] Euracoal 2018. "EURACOAL Market Report 1/2018 - April 2018." European Association for Coal and Lignite.
- [8] Kasmer, O., Ulusay, R., and Gokceoglu, C. 2006. "Spoil pile instabilities with reference to a strip coal mine in Turkey: mechanisms and assessment of deformations". *Environmental Geology*, 49(4), 570-585.
- [9] Kavvadas, M., Roumpos, C., and Schilizzi, P. 2020. "Stability of Deep Excavation Slopes in Continuous Surface Lignite Mining Systems". *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 791-812.
- [10] Masoudian, M. S., Zevgolis, I. E., Deliveris, A. V., Marshall, A. M., Heron, C. M., and Koukoulas, N. C. 2019. "Stability and characterisation of spoil heaps in European surface lignite mines: a state-of-the-art review in light of new data". *Environmental Earth Sciences*, 78(16), 505.

- [11] Okagbue, C. O. 1984. "The geotechnical characteristics and stability of a spoil heap at a southwestern pennsylvania coal mine, U.S.A". *Engineering Geology*, 20(4), 325-341.
- [12] Poulsen, B., Khanal, M., Rao, A. M., Adhikary, D., and Balusu, R. 2014. "Mine Overburden Dump Failure: A Case Study". *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2), 297-309.
- [13] Roumpos, C., and Papacosta, E. 2013. "Strategic mine planning of surface mining projects incorporating sustainability concepts." In *Proc., 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2013)*, 645-651: Heliotopos.
- [14] Roumpos, C., Partsinevelos, P., Agioutantis, Z., Makantasis, K., and Vlachou, A. 2014. "The optimal location of the distribution point of the belt conveyor system in continuous surface mining operations". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 47, 19-27.
- [15] Roumpos, C., Pavludakis, F., Liakoura, A., Nalmpanti, D., and Arampatzis, K. 2018. "Utilisation of Lignite Resources within the Context of a Changing Electricity Generation Mix." In *Proc., 10th Jubilee International Brown Coal Mining Congress*, 355-365.
- [16] Sharma, S., and Roy, I. 2015. "Slope Failure Of Waste Rock Dump At Jayant Opencast Mine, India: A Case Study". *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(13), 3306-33012.
- [17] Steiakakis, E., Kavouridis, K., and Monopolis, D. 2009. "Large scale failure of the external waste dump at the "South Field" lignite mine, Northern Greece". *Engineering Geology*, 104(3), 269-279.
- [18] Symes, C., and Madill, P. 2013. "Trouble down the line." *New Civil Engineer*, <<http://www.nce.co.uk/features/geotechnical/trouble-down-the-line/8644799.article>>. (February 4, 2020).
- [19] Ulusay, R., Arıkan, F., Yoleri, M. F., and Çağlan, D. 1995. "Engineering geological characterization of coal mine waste material and an evaluation in the context of back-analysis of spoil pile instabilities in a strip mine, SW Turkey". *Engineering Geology*, 40(1), 77-101.
- [20] Ulusay, R., Çağlan, D., Arıkan, F., and Yoleri, M. F. 1996. "Characteristics of biplanar wedge spoil pile instabilities and methods to improve stability". *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), 58-79.
- [21] Zevgolis, I. E., Deliveris, A. V., and Koukouzias, N. C. 2019. "Slope failure incidents and other stability concerns in surface lignite mines in Greece". *Journal of Sustainable Mining*, 18(4), 182-197.

[22] Καββαδάς Μ. 2005. "Στοιχεία Εδαφομηχανικής". ΕΜΠ.

[23] Theocharis, A. I., Zevgolis, I. E., and Koukouzas, N. C. 2020. "Validation of constitutive models for spoil material of brown coal mines." In Proc., 3rd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG)