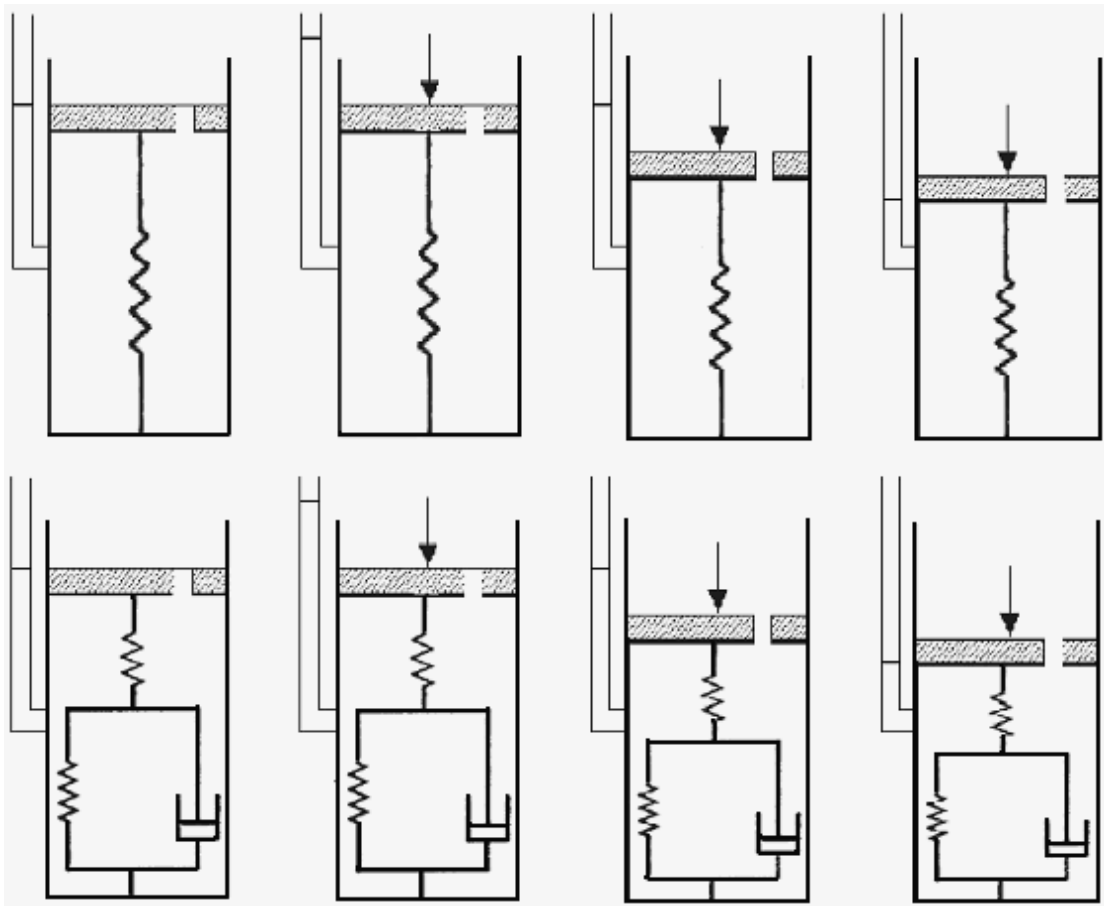




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής

Διπλωματική εργασία

Αναλύσεις στερεοποίησης αργιλικών στρώσεων
κάτω από δοκιμαστικό επίχωμα



Επιβλέπων: Καββαδάς Μιχαήλ,
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σπουδαστής: Ασπρής Άγγελος

Μάρτιος 2012

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας τη διπλωματική μου εργασία αρχίζω να συνειδητοποιώ ότι έφτασε το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Βέβαια, αυτός ο στόχος δε θα είχε επιτευχθεί χωρίς τη σημαντική συμβολή κάποιων ανθρώπων που με στήριξαν και με καθοδήγησαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο.

Κατ' αρχάς, επιθυμώ να ευχαριστήσω του γονείς μου, τα αδέρφια μου και την ευρύτερη οικογένεια μου για τη συνολική στήριξη τους στις σπουδές μου αλλά και στη ζωή μου γενικότερα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μιχαήλ Καββαδά για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Καλό Αλέξανδρο, για τη σημαντική συμβολή του και την αμέριστη βοήθεια του, καθώς χωρίς τη γενικότερη στήριξη του θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο φιλικό μου περιβάλλον για τη συμπαράστασή που μου παρείχαν.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	-ii-
Περίληψη.....	-vii-
Abstract.....	-viii-
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	
1.1 Εισαγωγή.....	-1-
1.2 Αντικείμενο της εργασίας.....	-1-
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	-2-
Κεφάλαιο 2 ^ο : Συνοπτική Περιγραφή Χρησιμοποιούμενων Καταστατικών Προσομοιωμάτων	
2.1 Γενικά.....	-4-
2.2 Υπομνήσεις από τη θεωρία της ελαστικότητας.....	-5-
2.2.1 Ισότροπη γραμμική ελαστικότητα.....	-5-
2.2.2 Ισότροπη ποροελαστικότητα.....	-6-
2.3 Καταστατικό προσομοίωμα του τροποποιημένου Cam-Clay.....	-7-
Κεφάλαιο 3 ^ο : Θεωρία Στερεοποίησης	
3.1 Γενικά.....	-14-
3.2 Μονοδιάστατη στερεοποίηση ισότροπου γραμμικού εδάφους.....	-16-
3.3 Μη γραμμική ανάλυση μονοδιάστατης στερεοποίησης.....	-19-
3.3.1 Μονοδιάστατη στερεοποίηση των Davis & Raymond.....	-19-
3.3.2 Μονοδιάστατη στερεοποίηση του Gibson.....	-22-
3.4 Θεωρία διδιάστατης και τριδιάστατης στερεοποίησης.....	-25-
3.4.1 Τριδιάστατη στερεοποίηση του Biot.....	-26-
Κεφάλαιο 4 ^ο : Αριθμητική Διερεύνηση Στερεοποίησης Αργλικών Στρώσεων	
4.1 Εισαγωγή.....	-30-
4.2 Γενικά στοιχεία αριθμητικού προσομοιώματος.....	-30-
4.3 Αριθμητική διερεύνηση με χρήση της ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας....	-34-
4.3.1 Μονοδιάστατη στερεοποίηση – θεωρητική σύγκριση (benchmarking)....	-34-
4.3.2 Διδιάστατη Ανάλυση.....	-36-
4.3.3 Κατακόρυφες μετακινήσεις μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης..	-39-

4.3.4	Ανισότροπη υδραυλική διαπερατότητα στη διδιάστατη στερεοποίηση...	-43-
4.3.5	Πιέσεις πόρων στη μονοδιάστατη και διδιάστατη ανάλυση.....	-45-
4.4	Αριθμητική διερεύνηση με χρήση του τροποποιημένου Cam-Clay.....	-46-
4.4.1	Μονοδιάστατη στερεοποίηση.....	-46-
4.4.2	Διδιάστατη ανάλυση.....	-49-
4.4.3	Κατακόρυφες μετακινήσεις μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης..	-51-
4.4.4	Ανισότροπη υδραυλική διαπερατότητα στη διδιάστατη στερεοποίηση...	-54-
4.4.5	Πιέσεις πόρων στη μονοδιάστατη και διδιάστατη ανάλυση.....	-56-
4.4.6	Διαδρομές τάσεων.....	-59-
4.5	Σύνοψη - Συμπεράσματα.....	-61-
Κεφάλαιο 5 ^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις		
5.1	Εισαγωγή.....	-65-
5.2	Στοιχεία για το χωματοургικό έργο H420.....	-65-
5.3	Εναλλακτικός σχεδιασμός χωματοургικού έργου H420.....	-67-
5.3.1	Γενικά στοιχεία για το δοκιμαστικό επίχωμα.....	-68-
5.3.2	Γεωτεχνική παρακολούθηση δοκιμαστικού επιχώματος.....	-69-
5.3.2.1	Γεωτεχνική διερεύνηση κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.....	-73-
5.3.3	Μετρήσεις γεωτεχνικών οργάνων: Εισαγωγή.....	-75-
5.3.3.1	Μετρήσεις καθιζήσεων κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.....	-76-
5.3.3.2	Μετρήσεις υπερπίεσης πόρων.....	-78-
5.3.3.3	Μετρήσεις μετακινήσεων γύρω από το δοκιμαστικό επίχωμα.....	-81-
5.4	Σύνοψη - Συμπεράσματα.....	-81-
Κεφάλαιο 6 ^ο : Ανάστροφες Αναλύσεις και Σύγκριση με Μετρήσεις		
6.1	Εισαγωγή.....	-83-
6.2	Χαρακτηριστική διατομή και παραδοχές για ανάστροφες αναλύσεις.....	-83-
6.3	Σύγκριση με μετρήσεις.....	-87-
6.3.1	Σύγκριση καθιζήσεων στο κέντρο του δοκιμαστικού επιχώματος.....	-87-
6.3.2	Σύγκριση υπερπίεσης πόρων.....	-88-
6.4	Διαδρομές τάσεων σε ανάστροφες αναλύσεις.....	-95-
6.5	Σύνοψη - Συμπεράσματα.....	-98-

Κεφάλαιο 7^ο : Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα.....-102-

7.2 Προτάσεις – Σχολιασμός.....-104-

Βιβλιογραφία.....-105-

Παράρτημα Α – Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων ABAQUS

Παράρτημα Β – Φωτογραφίες από το Έργο και Ενδεικτικές Τομές Γεωτεχνικών Οργάνων

Παράρτημα Γ – Πρόσθετες Αριθμητικές Αναλύσεις Στερεοποίησης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το φαινόμενο της στερεοποίησης αργιλικών σχηματισμών. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επιρροή των επιμέρους παραμέτρων που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους κατά την εξέλιξη της στερεοποίησης με αφορμή την κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος. Διερευνήθηκε αριθμητικά η στερεοποίηση με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10. Η υδραυλική διαπερατότητα (ισότροπη και ανισότροπη συμπεριφορά), η συμπιεστότητα του εδάφους και η διάρκεια κατασκευής εξετάστηκαν παραμετρικά. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις, οι πιέσεις πόρων και οι διαδρομές τάσεων υπολογίζονται σε ενδεικτικά σημεία και προσδιορίζεται η επιρροή των παραμέτρων μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ελαστοπλαστική απόκριση που προβλέπεται από το τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay.

Στο τελικό στάδιο της εργασίας, διενεργήθηκαν ανάστροφες αναλύσεις για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα. Οι ανάστροφες αναλύσεις προβλέπουν κατακόρυφη χωρική ανισοτροπία μέσω της εναλλαγής στρωμάτων, των οποίων η μηχανική συμπεριφορά καθορίζεται από τα καταστατικά προσομοιώματα Mohr-Coulomb και τροποποιημένο Cam-Clay. Στην περιοχή του δοκιμαστικού επιχώματος δίνονται επιπλέον λεπτομέρειες για το γεωλογικό προφίλ και το γεωτεχνικό σύστημα παρακολούθησης. Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους που προβλέπεται από τις αριθμητικές αναλύσεις συγκρίνεται με τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και επιτόπου μετρήσεων.

Abstract

The present diploma thesis elaborates on the phenomenon of clayey-soil consolidation. Considering the construction of a trial embankment, the influence of various soil parameters on the consolidation process dominating the overall behaviour is investigated. Numerical analyses have been conducted using the commercial Finite Element Code ABAQUS 6.10. The factors considered are the hydraulic conductivity (isotropic and anisotropic behaviour), the compressibility and the duration of the construction. Furthermore, vertical displacements, pore pressures and stress paths were computed and the influence of each individual parameter examined is highlighted in comparative plots. Special emphasis is given to the elastoplastic response predicted on the assumption of the Modified Cam-Clay constitutive model.

Finally, back-analyses were carried out in order to redefine the soil properties under the trial embankment. The numerical analyses assume spatial inhomogeneity in the vertical direction. The mechanical behaviour of the underlying soil layers is controlled by either the Mohr-Coulomb or the elastoplastic Modified Cam-Clay constitutive model. Regarding the trial embankment, details on the geological profile as well as on the geotechnical field instrumentation are provided. Laboratory data and in-situ measurements are compared to the numerical results in order to gain a deeper insight in the mechanical behaviour of the soil stratum.

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Όταν το έδαφος υποβάλλεται σε δεδομένη φόρτιση παρατηρείται, μια αναπτυσσόμενη μηχανική αλληλεπίδραση, λόγω διαφοράς συμπιεστότητας, μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης του εδαφικού στοιχείου. Η αλληλεπίδραση οδηγεί στην από κοινού ανάληψη της εξωτερικής επιβαλλόμενης επιφόρτισης, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση της πίεσης πόρων και κατά συνέπεια, ροής προς περιοχές μικρότερης υδραυλικής πίεσης. Η ανακατανομή του φορτίου ανάμεσα στις δύο φάσεις είναι συνεχής και χρονικά εξαρτημένη. Όμοια οι προκύπτουσες παραμορφώσεις του εδαφικού στοιχείου παρουσιάζουν χρονική εξέλιξη. Όπου λοιπόν υπάρχουν συνθήκες στράγγισης το νερό διαφεύγει σταδιακά μέσα από τους πόρους και οι υπερπίεσεις υφίστανται αποτόνωση. Αυτό το φυσικό φαινόμενο ονομάζεται στερεοποίηση και είναι εντονότερο σε αργιλικά εδάφη, λόγω των μικρών δυνατοτήτων διαφυγής του νερού από τους πόρους. Φυσικά, η διαπερατότητα εκφράζει ακριβώς την “ευκολία” με την οποία η υγρή φάση μπορεί να κινηθεί δια μέσου της στερεάς φάσης.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Όπως κατέστη εμφανές, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης αργιλικών σχηματισμών. Αιτία για αυτό αποτέλεσε μελέτη κατασκευής δοκιμαστικού επιχώματος από την OMIKRON KAPPA consulting για την κοινοπραξία Maliakos Kleidi Construction JV. Η μελέτη του δοκιμαστικού επιχώματος, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5, επιτεύχθηκε με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων που θα είχε η πλήρη ή μερική αντικατάσταση της διογκωμένης πολυστερίνης με συμβατικά υλικά κατασκευής επιχώματος για το χωματοουργικό έργο H420. Δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας των παραμέτρων του εδαφικού σχηματισμού κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα, κρίθηκε αναγκαίος ο επαναπροσδιορισμός τους μέσω ανάστροφων αναλύσεων. Προκειμένου να επιτευχθούν τα άνωθεν, αρχικώς διενεργείται αριθμητική διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης, με σκοπό να γίνει κατανοητό ποιοτικά αλλά και ποσοτικά πώς επηρεάζεται το φαινόμενο της στερεοποίησης από τις γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα καταστατικά προσομοιώματα της ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας και του ελαστοπλαστικού Cam-Clay.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιμερίζεται σε επτά κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου του εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις βασικές αρχές των καταστατικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην αριθμητική διερεύνηση όσο και στις ανάστροφες αναλύσεις. Ιδιαίτερη έμφαση

δίνεται στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά και πιο συγκεκριμένα στο καταστατικό προσομοίωμα του τροποποιημένου Cam-Clay.

Στο τρίτο κεφάλαιο, δίνονται οι βασικότερες αναλυτικές θεωρίες στερεοποίησης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται ως προς τις παραδοχές στις οποίες βασίζονται, ενώ παράλληλα επισημαίνεται συνοπτικά το πεδίο εφαρμογή τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η αριθμητική διερεύνηση της στερεοποίησης. Τα καταστατικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται, όπως αναφέρεται και άνωθεν, αφορούν την ισότροπη γραμμική ελαστικότητα και το ελαστοπλαστικό Cam-Clay. Οι αριθμητικές αναλύσεις διαχωρίζονται σε μονοδιάστατη και διδιάστατη στερεοποίηση. Επιπλέον, δίνεται η παραμετρική ανάλυση ως προς τις παραμέτρους συμπίεστικότητας στις οποίες βασίζεται ο κάθε καταστατικός νόμος συμπεριφοράς. Παράλληλα, η διερεύνηση επεκτάθηκε στην επιρροή της μεταβολής της υδραυλικής διαπερατότητας (ισότροπη και ανισότροπη) και στη διακύμανση της κατασκευαστικής διάρκειας. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται για ενδεικτικά σημεία οι κατακόρυφες¹ μετακινήσεις και οι πιέσεις πόρων σε συνάρτηση με το χρόνο. Επίσης, δίνονται συγκεκριμένες διαδρομές τάσεων, ώστε να αποσαφηνιστεί η επιρροή των αναπτυσσόμενων πλαστικών παραμορφώσεων στο φαινόμενο της στερεοποίησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, δίνονται τα αίτια για το σκοπό της κατασκευής του δοκιμαστικού επίχωμας και γίνεται αναφορά στη γεωμετρία της κατασκευής. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα, ενώ γίνεται αναφορά στη συσχέτιση που έχει αυτή με την περιοχή του χωματουργικού έργου H420. Παράλληλα, αναφέρονται συνοπτικές πληροφορίες για το γεωτεχνικό σύστημα παρακολούθησης. Κλείνοντας το κεφάλαιο, δίνονται οι μετρήσεις από ενδεικτικά σημεία του υπεδάφους, οι οποίες αξιολογούνται γεωτεχνικά ώστε να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του εδάφους κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.

Ακολούθως, στο έκτο κεφάλαιο, αναλύονται οι παραδοχές του προσομοιώματος των ανάστροφων αναλύσεων και επισημαίνονται οι παραδοχές και προσεγγίσεις. Οι παραδοχές και η δομή του νέου προσομοιώματος κατευθύνθηκαν από την αριθμητική διερεύνηση (Κεφάλαιο 4 και τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ) και τη γεωτεχνική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του εδάφους κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα (Κεφάλαιο 5). Επιπρόσθετα, παρατίθεται η σύγκριση των ανάστροφων αναλύσεων με τις μετρήσεις, ενώ δίνονται οι διαδρομές τάσεων αλλά και η ζώνη των πλαστικών παραμορφώσεων κάτω από το επίχωμα.

Στο έβδομο κεφάλαιο, συνοψίζονται βασικά συμπεράσματα από την ανάλυση, και τίθενται κάποιοι προβληματισμοί ως προς την απόκλιση των ανάστροφων αναλύσεων σε σχέση με την πραγματικότητα. Επίσης, δίνονται περαιτέρω προτάσεις για διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης.

¹ Τονίζεται, ότι η μελέτη των οριζόντιων μετακινήσεων δεν αποτελεί αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου.

Στο **Παράρτημα Α** δίνεται ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Στο **Παράρτημα Β** παρατίθενται φωτογραφίες από την περιοχή κατασκευής του δοκιμαστικού επιχώματος. Επίσης, παρουσιάζονται ενδεικτικά σκαριφήματα με βασικές λεπτομέρειες των γεωτεχνικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση εδάφους κάτω από το επίχωμα. Τέλος, στο **Παράρτημα Γ** παρατίθενται πρόσθετα σχήματα που συνδέονται με επιπλέον αναλύσεις (πέρα από αυτές που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 4 και 6) στερεοποίησης αργιλικών σχηματισμών.

Κεφάλαιο 2^ο : Συνοπτική Περιγραφή Χρησιμοποιούμενων Καταστατικών Προσομοιωμάτων

2.1 Γενικά

Για την πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς ενός εδαφικού συνεχούς μέσου, είναι απαραίτητη η γνώση και σωστή προσομοίωση τριών συστημάτων εξισώσεων:

- Οι εξισώσεις ισορροπίας.
- Οι εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων.
- Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων (καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς).



Σχήμα 2.1 Σύστημα εξισώσεων που απαιτείται για την περιγραφή της εδαφομηχανικής συμπεριφοράς.

Οι καταστατικές εξισώσεις δίνονται από σχέσεις της μορφής:

$$\sigma = \zeta : \varepsilon \quad (2.1)$$

Το μητρώο δυσκαμψίας ζ πρέπει να προσδιοριστεί ώστε να καταστεί δυνατή η περιγραφή της καταστατικής (ελαστικής, ελαστοπλαστικής, χρονικά εξαρτημένης ελαστοπλαστικής) συμπεριφοράς του υλικού.

Για την ακριβή κατάστρωση των καταστατικών εξισώσεων των εδαφικών υλικών είναι απαραίτητη η γνώση:

1. Της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού.
2. Της επιφάνειας διαρροής.
3. Της διεύθυνσης της πλαστικής παραμόρφωσης.
4. Των νόμων κράτυνσης.

Με δεδομένη την αρχική κατάσταση ενός εδαφικού σχηματισμού, που περιγράφεται από τον τανυστή των τάσεων σ , τον τανυστή των παραμορφώσεων ε και τις παραμέτρους κράτυνσης q_n , επιβάλλουμε μία γνωστή, πρόσθετη, απειροστή παραμόρφωση $d\varepsilon$ και αναζητούμε τη νέα εντατική κατάσταση του

υλικού, προσπαθώντας να υπολογίσουμε τη μεταβολή των τάσεων $d\sigma$ και των παραμέτρων κράτυσης dq_n .

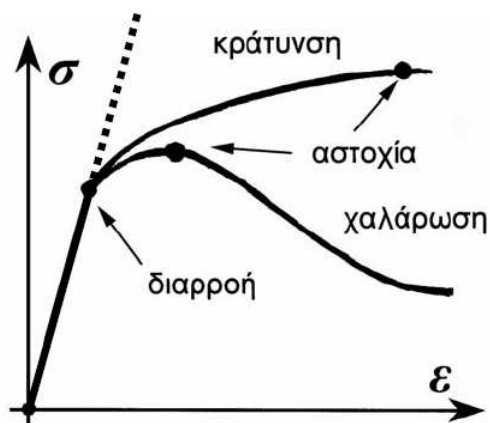
Συνεπώς, η νέα κατάσταση δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}\sigma &= \bar{\sigma} + d\sigma \\ \varepsilon &= \bar{\varepsilon} + d\varepsilon \\ q_n &= \bar{q}_n + dq_n\end{aligned}\quad (2.2)$$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διενεργούνται αναλύσεις με την ισότροπη γραμμική ελαστικότητα και τα ελαστοπλαστικά προσομοιώματα Cam-Clay και Mohr Coulomb (το Mohr-Coulomb είναι καταστατικό προσομοίωμα απολύτως ελαστικό απολύτως πλαστικό).

2.2 Υπομνήσεις από τη θεωρία της Ελαστικότητας

Η θεωρία της ελαστικότητας μπορεί να εφαρμοσθεί στα αρχικά στάδια της φόρτισης του εδάφους και πριν αυτό διαρρέυσει (βλ. Σχήμα 2.2). Μετά τη διαρροή, η συμπεριφορά του υλικού γίνεται έντονα μη-γραμμική και τελικά το υλικό οδηγείται στην αστοχία.



Σχήμα 2.2 Ελαστική συμπεριφορά, σημείο διαρροής, κράτυση, χαλάρωση και αστοχία.

2.2.1 Ισότροπη γραμμική ελαστικότητα

Για ένα εδαφικό υλικό, οι δύο ανεξάρτητες σταθερές του Lamé μπορούν να συσχετιστούν με το μέτρο διόγκωσης K (bulk modulus) (που συνδέει τη μεταβολή της ισότροπης συμπίεσης dp με αυτή της ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης $d\varepsilon_{vol}^e$) και το μέτρο διάτμησης G (shear modulus) που συνδέει τη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης $d\bar{s}$ με αυτή της ελαστικής αποκλίνουσας παραμόρφωσης $d\bar{\varepsilon}^e$. Συνεπώς, οι καταστατικές σχέσεις για το εδαφικό στοιχείο μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned} dp &= K \cdot d\varepsilon_{vol}^e \\ d\varepsilon &= 2G \cdot d\varepsilon^e \end{aligned} \quad (2.3)$$

με $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ και $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

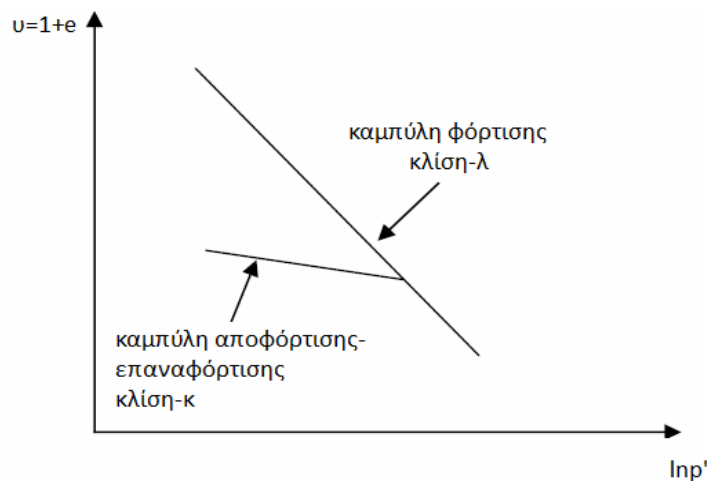
2.2.2 Ισότροπη ποροελαστικότητα

Στην περίπτωση της ισότροπης ποροελαστικότητας, απαιτούνται πάλι δύο παράμετροι για τον προσδιορισμό του τανυστή ελαστικής δυσκαμψίας, οι οποίες και εξαρτώνται από το επίπεδο των τάσεων και τον λόγο κενών.

Το μέτρο διόγκωσης K μεταβάλλεται ανάλογα με την ισότροπη συνιστώσα της ενεργού τάσης p' (με p συμβολίζεται η ολική) και δίδεται από τη σχέση:

$$K = \frac{\nu}{\kappa} p' \quad (2.4)$$

όπου $\nu \equiv 1+e$ (όπου e είναι ο δείκτης πόρων του εδάφους) είναι ο μοναδιαίος όγκος (specific volume) του υλικού και κ είναι η κλίση της καμπύλης αποφόρτισης σε διάγραμμα $\ln p' - \nu$ που χαρακτηρίζει την ελαστική παραμορφωσιμότητα του υλικού (βλ. Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης-επαναφόρτισης.

Το μέτρο διάτμησης G θεωρούμε ότι προσδιορίζεται με βάση το μέτρο διόγκωσης K υποθέτοντας ένα σταθερό λόγο του Poisson ν . Συνεπώς, εξαρτάται από τη μέση ορθή ενεργό τάση p' και δίδεται από τη σχέση:

$$G = \frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \quad (2.5)$$

Λόγω της μεταβλητότητας του μέτρου διόγκωσης K και του μέτρου διατμήσεως G , το μητρώο δυσκαμψίας \underline{C} παύει να έχει σταθερή τιμή και συνεπώς, δεν υπάρχει πλέον γραμμική συσχέτιση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης άλλα μια συσχέτιση δευτέρου βαθμού.

2.3 Καταστατικό προσομοίωμα του τροποποιημένου Cam-Clay

Το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Cambridge και βασίζεται στη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης. Το 1968 τροποποιήθηκε από τους Roscoe και Burland το 1968 ώστε να δίνει πιο ρεαλιστικές προβλέψεις λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή του σχήματος της επιφάνειας διαρροής. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται μόνο το τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay, (Modified Cam-Clay, MCC).

(α) Ποροελαστική συμπεριφορά και Cam-Clay

Η ελαστική συμπεριφορά στο μοντέλο Cam-Clay, περιγράφεται από την θεωρία της ποροελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, η ελαστική συμπεριφορά εκφράζεται με την καμπύλη αποφόρτισης-επαναφόρτισης:

$$v = v_{\kappa} - \kappa \ln p'$$

Επομένως, κατά την ελαστική κατάσταση, η μεταβολή του ειδικού όγκου δίδεται από την κάτωθι σχέση:

$$dv = dv^e = -\kappa \frac{dp'}{p} \Rightarrow d\varepsilon_{vol}^e = \kappa \frac{dp'}{v_0 p} \quad (2.6)$$

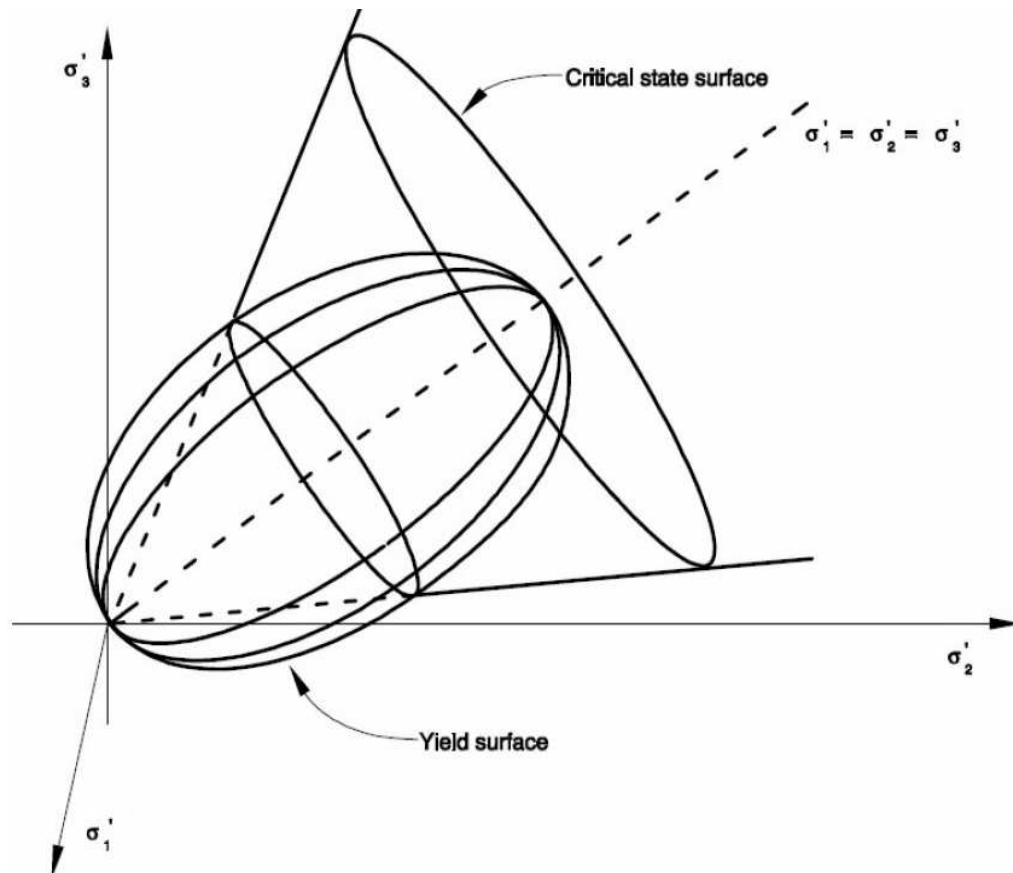
Συνεπώς, με βάση την εξίσωση 2.6, η μεταβολή της ελαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης $d\varepsilon_{vol}^e$ είναι ανάλογη της μεταβολής της ενεργού μέσης ισότροπης τάσης dp' . Η μεταβολή της ελαστικής αποκλίνουσας παραμόρφωσης $d\varepsilon_q^e$, είναι ευθέως ανάλογη της μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης dq και δίνεται από την εξίσωση:

$$d\varepsilon_q^e = \frac{dq}{3G} \quad (2.7)$$

(b) Επιφάνεια διαρροής του Cam-Clay

Το καταστατικό μοντέλο Cam-Clay θεωρεί ότι η επιφάνεια διαρροής στο χώρο των τάσεων-παραμέτρων κράτυνσης $p - \underline{s} - q_n$, περιγράφεται από ένα υπερελλειψοειδές εκ περιστροφής γύρω από τον ισότροπο άξονα (Σχήμα 2.4). Η τομή της οριακής επιφάνειας με το υπερεπίπεδο των παραμέτρων κράτυνσης q_n , δίνει στο χώρο των τάσεων $p - \underline{s}$ μια ελλειπτική επιφάνεια. Εάν ο υποχώρος των αποκλίνουσων τάσεων \underline{s} αντικατασταθεί με το μέτρο των αποκλίνουσων τάσεων q ,

η επιφάνεια διαρροής είναι μια έλλειψη στο επίπεδο $p' - q$, της οποίας ο μεγάλος άξονας βρίσκεται επί του άξονα της μέσης ενεργού τάσης p' (Σχήμα 2.5).

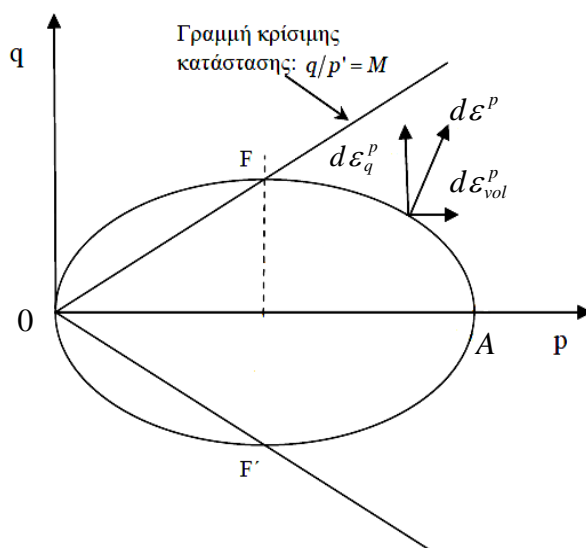


Σχήμα 2.4 Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Cam-Clay, Πηγή: HAI-SUI YU, PLASTICITY AND GEOTECHNICS Vol.13, Springer.

Η ελλειπτική επιφάνεια διαρροής, και συνεπώς, η συνάρτηση διαρροής του μοντέλου Cam-Clay δίνεται από την εξίσωση:

$$f(p', q, v) \equiv q^2 + M^2 p'(p' - p'_m) = 0 \quad (2.8)$$

Η ανωτέρα εξίσωση, περιγράφει μια έλλειψη η οποία τέμνει τον άξονα των μέσων ενεργών τάσεων p' στα σημεία 0 και $A(p'_m, 0)$ (βλ. Σχήμα 2.5). Επίσης, για $p = p'_m / 2$ στην εξίσωση της επιφάνειας διαρροής λαμβάνεται $q = Mp'$, δηλαδή η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης τέμνει την επιφάνεια στο σημείο $F\left(\frac{p'_m}{2}, M \frac{p'_m}{2}\right)$.



Σχήμα 2.5 Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Cam-Clay $p' - q$, Πηγή: Wood D.M (1990) "Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics" Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Βασικό χαρακτηριστικό της επιφάνειας διαρροής του μοντέλου Cam-Clay είναι ότι ο λόγος του μεγάλου προς το μικρό άξονα της έλλειψης παραμένει σταθερός και εξαρτάται από την σταθερά M του υλικού. Συνεπώς, το σχήμα της επιφάνειας διαρροής εξαρτάται από τη σταθερά M , ενώ το μέγεθος της έλλειψης συνδέεται με την παράμετρο p'_m . Η παράμετρος p'_m , αποτελεί παράμετρο κράτυνσης του προσομοιώματος και η μεταβολή της κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης, επιτρέπει στην επιφάνεια διαρροής να διαστέλλεται (ή να συστέλλεται). Έτσι, το μοντέλο μπορεί να αποδώσει τη δυνατότητα της αύξησης αντοχής των συνήθων στερεοποιημένων αργιλικών εδαφών.

Η συνάρτηση διαρροής του μοντέλου Cam-Clay, εκφράζεται βάση των αναλλοίωτων τάσεων (μέση ενεργός τάση p' , αποκλίνουσα τάση q) και επομένως, είναι ανεξάρτητη από τις φυσικές διευθύνσεις των κύριων τάσεων. Συνεπώς, αν μία εντατική κατάσταση οδηγεί το εδαφικό στοιχείο σε διαρροή, τότε οποιοσδήποτε άλλος συνδυασμός τάσεων του ίδιου μεγέθους αλλά διαφορετικού προσανατολισμού (δηλαδή, ένας συνδυασμός τάσεων με ίδιες συνιστώσες ως προς το μέτρο τους, αλλά διαφορετικές ως προς τη διεύθυνση) οδηγεί κι αυτός το εδαφικό υλικό σε διαρροή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο Cam-Clay προβλέπει ισότροπη διαρροή, καθώς οι αναλλοίωτες των τάσεων p' και q των δύο εντατικών καταστάσεων είναι ίσες.

(c) Νόμος ροής καταστατικού προσομοιώματος Cam-Clay

Ο νόμος ροής ενός ελαστοπλαστικού μοντέλου, καθορίζει τη διεύθυνση του διανύσματος μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων. Στην περίπτωση του μοντέλου Cam-Clay έχει επιλεγεί ένας συσχετισμένος νόμος ροής που δίδεται από την κάτωθι σχέση:

$$\underline{Q} = \underline{P} \Rightarrow \frac{\partial f(\underline{\sigma}, \underline{q}_n)}{\partial \underline{\sigma}} = \frac{\partial g(\underline{\sigma}, \underline{q}_n)}{\partial \underline{\sigma}} \quad (2.9)$$

Η επιλογή του συσχετισμένου νόμου ροής συνεπάγεται ότι το μητρώο ευκαμψίας του μοντέλου (οριζόμενο ως το αντίστροφο του μητρώου δυσκαμψίας όταν και μόνο καθίσταται δυνατός ο ορισμός του) είναι συμμετρικό. Επίσης, οι προβολές του διανύσματος αύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων $d\varepsilon^p$ στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, είναι ίσες με την ογκομετρική $d\varepsilon_{vol}^p$ και την αποκλίνουσα $d\varepsilon_q^p$ συνιστώσα της μεταβολής των παραμορφώσεων. Επομένως, στην περίπτωση που επιβάλλεται ισότροπη φόρτιση στο εδαφικό στοιχείο, θα επιτυγχάνεται αύξηση μόνο της ογκομετρικής συνιστώσας των πλαστικών παραμορφώσεων ($d\varepsilon_q^p = 0$). Αντιθέτως, αν επιβάλλεται φόρτιση τέτοια ώστε το διάνυσμα αύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων να βρίσκεται στην κορυφή της έλλειψης (σημείο F , Σχήμα 2.5) θα συνεπάγεται αύξηση μόνο της αποκλίνουσας συνιστώσας ($d\varepsilon_{vol}^p = 0$). Στις υπόλοιπες ενδιάμεσες καταστάσεις, εμφανίζεται αύξηση και στις δύο συνιστώσες της πλαστικής παραμόρφωσης $d\varepsilon^p (d\varepsilon_{vol}^p, d\varepsilon_q^p)$.

Συνδυάζοντας την εξίσωση μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων $d\varepsilon^p = \langle d\Lambda \rangle \underline{P}$ και το συσχετισμένο νόμο ροής του μοντέλου Cam-Clay συνεπάγεται ότι:

$$d\varepsilon_{vol}^p = \langle d\Lambda \rangle \cdot \frac{\partial f}{\partial p'} = M^2 (2p' - p'_m) \cdot \langle d\Lambda \rangle = \left(M^2 p' - \frac{q^2}{p'} \right) \cdot \langle d\Lambda \rangle \quad (2.10)$$

$$d\varepsilon_q^p = \langle d\Lambda \rangle \cdot \frac{\partial f}{\partial q} = 2q \cdot \langle d\Lambda \rangle \quad (2.11)$$

όπου ο δείκτης φόρτισης $d\Lambda$ εκφράζεται από τη σχέση:

$$d\Lambda = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \right) : \underline{C}^e : d\underline{\varepsilon}}{K_p + \left(\frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \right) : \underline{C}^e : \underline{P}} \quad (2.12)$$

Συσχετίζοντας την 2.12¹ με τις εξισώσεις 2.5, 2.6, 2.10, και 2.11 λαμβάνεται:

$$d\Lambda = \frac{K \left(\frac{\partial f}{\partial p'} \right) d\varepsilon_{vol} + 3G \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right) d\varepsilon_q}{K_p + K \left(\frac{\partial f}{\partial p'} \right)^2 + 3G \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right)^2} \quad (2.13)$$

¹ (Το ελαστοπλαστικό μέτρο K_p υπολογίζεται παρακάτω)

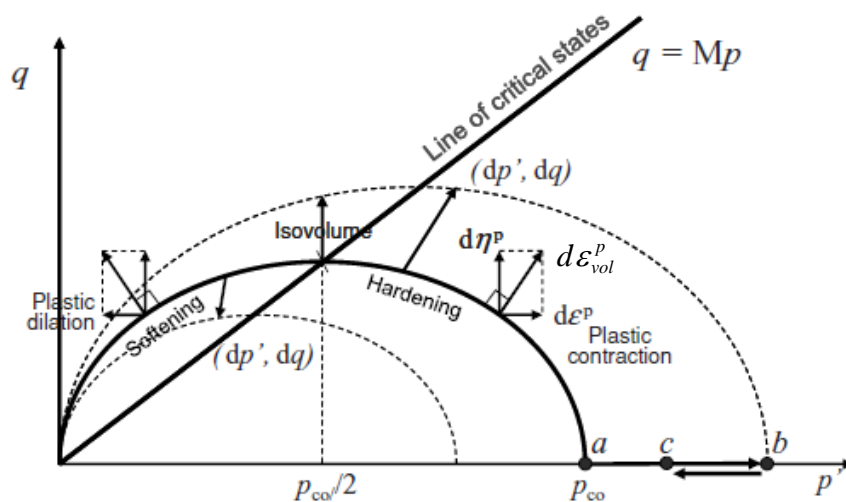
Ο συνδυασμός των εξισώσεων 2.10 και 2.11, ορίζει τη διεύθυνση του διανύσματος αύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων ως ακολούθως:

$$\frac{d\varepsilon_{vol}^p}{d\varepsilon_q^p} = \frac{1}{2} \left(M^2 \frac{p'}{q} - \frac{q}{p'} \right) \quad (2.14)$$

(d) *Νόμος κράτνσης του Cam-Clay*

Ο νόμος κράτνσης ορίζεται με την εξέλιξη των παραμέτρων κράτνσης του ελαστοπλαστικού μοντέλου κατά την πλαστική φόρτιση του εδαφικού στοιχείου. Οι παράμετροι κράτνσης δεν μεταβάλλονται κατά την ελαστική φόρτιση (ή αποφόρτιση). Επειδή το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay έχει μόνο μία παράμετρο κράτνσης, ο λόγος του μικρού προς τον μεγάλο άξονα της επιφάνειας διαρροής παραμένει σταθερός κατά την εξέλιξη της παραμόρφωσης. Η μέση τάση ισότροπης στερεοποίησης του εδαφικού στοιχείου p'_m μεταβάλλεται κατά την πλαστική παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου.

Το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay υιοθετεί ένα νόμο ισότροπης κράτνσης. Με βάση αυτόν η επιφάνεια διαρροής διαστέλλεται ή συρρικνώνεται ομοιόθετα, με πόλο την αρχή των αξόνων του χώρου των τάσεων, χωρίς όμως να μεταβάλλεται ως προς το σχήμα, την θέση και τον προσανατολισμό της (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 Κράτνση (διόγκωση) και χαλάρωση επιφάνειας διαρροής μοντέλου Cam-Clay, Πηγή: Coussy O. "Mechanics of Physics of Porous Solids", Wiley & Sons.

Στην αρχική εντατική κατάσταση του εδαφικού στοιχείου, η τιμή της παραμέτρου κράτνσης p'_m , πριν την έναρξη της διαρροής, δίδεται παρακάτω:

$$p'_m = \exp\left(\frac{N - \nu - \kappa \ln p'}{\lambda - \kappa}\right)$$

όπου λ, κ είναι η κλίση της καμπύλης συμπίεσης και αποφόρτισης-επαναφόρτισης αντίστοιχα και N η παράμετρος της γραμμής ισότροπης συμπίεσης. Στη συνέχεια,

με βάση την εξίσωση της ισότροπης συμπίεσης υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου του εδαφικού στοιχείου:

$$v = N - \lambda \ln p'_m \Rightarrow v = -\lambda \frac{dp'_m}{p'_m} \quad (2.15)$$

Όμοια με την εξίσωση της καμπύλης αποφόρτισης-επαναφόρτισης, συνεπάγεται ότι:

$$v = v_\kappa - \kappa \ln p'_m \Rightarrow dv^e = -\kappa \frac{dp'_m}{p'_m} \quad (2.16)$$

Επίσης, είναι γνωστό ότι: $dv^p = -v \cdot d\varepsilon_{vol}^p$

$$\begin{aligned} \text{Επομένως: } dv = dv^e + dv^p &\Rightarrow -\lambda \frac{dp'_m}{p'_m} = -\kappa \frac{dp'_m}{p'_m} - v \cdot d\varepsilon_{vol}^p \\ &\Rightarrow dp'_m = \left(\frac{v}{\lambda - \kappa} p'_m \right) d\varepsilon_{vol}^p \end{aligned} \quad (2.17)$$

Η άνωθεν σχέση αναλύεται και σε μορφή μητρώου ως ακολούθως:

$$dq_n = \underline{R} : d\underline{\varepsilon}^p \quad (2.18)$$

όπου $\underline{R} = \left(\frac{v}{\lambda - \kappa} p'_m, 0 \right)$ και $d\underline{\varepsilon}^p = (d\varepsilon_{vol}^p, d\varepsilon_q^p)$.

Από τις προαναφερθέντες σχέσεις παρατηρείται ότι η κράτυνση του μοντέλου Cam-Clay, εξαρτάται μόνο από την ογκομετρική συνιστώσα των πλαστικών παραμορφώσεων ε_{vol}^p και αγνοεί πλήρως την επίδραση των αποκλίνουσων πλαστικών παραμορφώσεων ε_q^p . Αυτό είναι αναμενόμενο, καθότι το μοντέλο υιοθετεί το νόμο της ισότροπης κράτυνσης.

(e) Υπολογισμός ελαστοπλαστικού μέτρου κράτυνσης

Υπολείπεται πλέον, για τον πλήρη ορισμό του προσομοιώματος Cam-Clay, ο προσδιορισμός του ελαστοπλαστικού μέτρου κράτυνσης K_p . Το μέτρο K_p καθορίζει το μέγεθος της μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων του εδαφικού στοιχείου και προσδιορίζεται από την συνθήκη συμβατότητας. Το ελαστοπλαστικό μέτρο κράτυνσης ορίζεται ως:

$$K_p = - \left(\frac{\partial f}{\partial \underline{q}_n} \right) : d\underline{q}_n$$

Εάν αντικατασταθεί το dq_n από τη σχέση 2.18, λαμβάνεται:

$$K_p = - \left(\frac{\partial f}{\partial q_n} \right) (\underline{R} : \underline{P}) \quad (2.19)$$

Όμως, $\underline{R} = \left(\frac{\nu}{\lambda - \kappa} p'_m, 0 \right)$, $\underline{P} = \left(\frac{\partial f}{\partial p}, \frac{\partial f}{\partial q} \right)$ και $\frac{\partial f}{\partial q_n} = \frac{\partial f}{\partial p'_m} = -M^2 p'$.

Συνεπώς:

$$K_p = \frac{\nu}{\lambda - \kappa} M^4 p'_m (2p' - p'_m) \quad (2.20)$$

Από τη σχέση 2.20 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Για εντατικές καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής που έχουν μέση ενεργό τάση $p' > p'_m/2$ ($OCR < 2$), το καταστατικό σημείο βρίσκεται κάτω από την γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Επομένως, το εδαφικό στοιχείο συμπιέζεται και υφίσταται πλαστική κράτυνση ενώ η επιφάνεια διαρροής διαστέλλεται (βλ. Σχήμα 2.6).
2. Για καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής που έχουν μέση ενεργό τάση $p' < p'_m/2$ ($OCR > 2$), το καταστατικό σημείο βρίσκεται πάνω από την γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Συνεπώς, το υλικό διογκώνεται και υφίσταται πλαστική χαλάρωση καθώς η επιφάνεια διαρροής συρρικνώνεται (βλ. Σχήμα 2.6).
3. Για καταστάσεις επί της επιφάνειας διαρροής που έχουν μέση ενεργό τάση $p' = p'_m/2$, το καταστατικό σημείο βρίσκεται επί της γραμμή κρίσιμης κατάστασης. Οι καταστάσεις αυτές αντιστοιχούν σε καταστάσεις αστοχίας και αντιστοιχούν σε σημεία στην κορυφή της έλλειψης.

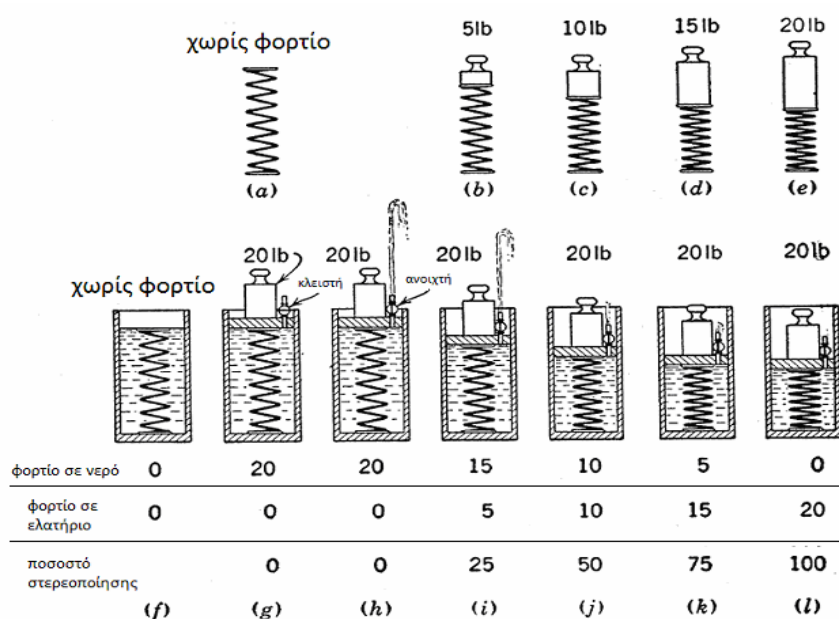
Συνοψίζοντας, η γραμμή κρίσιμης κατάστασης αποτελεί την περιβάλλουσα των καταστάσεων αστοχίας και την περιβάλλουσα των κρίσιμων καταστάσεων. Στο σημείο αυτό, ολοκληρώνεται η περιγραφή των στοιχείων που χρειάζονται για τον προσδιορισμό του μοντέλου Cam-Clay².

² Από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά του μοντέλου Cam-Clay, εικάζεται ότι το μοντέλο είναι ισότροπο, αφού προβλέπει ισότροπη διαρροή και ταύτιση των κύριων αξόνων τάσεων και παραμορφώσεων. Αυτό όμως δεν ισχύει, καθώς ισότροπη συμπεριφορά σημαίνει πλήρης έλλειψη προτιμώμενων διευθύνσεων στο χώρο. Ωστόσο, το μοντέλο Cam-Clay έχει προτιμώμενες διευθύνσεις που είναι αυτές των κύριων αξόνων της εκάστοτε κατάστασης. Το γεγονός αυτό, συνεπάγεται την αδυναμία της πρόβλεψης οποιαδήποτε πιθανής ανισοτροπίας του υλικού πριν την εφαρμογή των τάσεων της παρούσας κατάστασης.

Κεφάλαιο 3^ο : Θεωρία Στερεοποίησης

3.1 Γενικά

Όταν το έδαφος υποβάλλεται σε δεδομένη φόρτιση παρατηρείται, μια αναπτυσσόμενη μηχανική αλληλεπίδραση, λόγω διαφοράς συμπιεστότητας, μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης του εδαφικού στοιχείου. Η αλληλεπίδραση οδηγεί στην από κοινού ανάληψη της εξωτερικής επιβαλλόμενης επιφόρτισης, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση της πίεσης πόρων και κατά συνέπεια, ροής προς περιοχές μικρότερης υδραυλικής πίεσης. Η ανακατανομή του φορτίου ανάμεσα στις δύο φάσεις είναι συνεχής και οι προκύπτουσες παραμορφώσεις του εδαφικού στοιχείου παρουσιάζουν χρονική εξέλιξη. Όπου λοιπόν οι συνθήκες στράγγισης το επιτρέπουν το νερό διαφεύγει σταδιακά μέσα από τον στερεό ιστό και οι υπερπιέσεις υφίστανται αποτόνωση (στραγγισμένες συνθήκες). Το σύνθετο αυτό φυσικό φαινόμενο ονομάζεται στερεοποίηση και είναι εντονότερο στα (λεπτόκοκκα) αργιλικά εδάφη, λόγω των μικρών δυνατοτήτων διαφυγής του νερού από τους πόρους. Όλα τα προαναφερθέντα, ερμηνεύονται ικανοποιητικώς με το ακόλουθο υδρομηχανικό ανάλογο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Υδρομηχανικό ανάλογο της στερεοποίησης των εδαφών [Taylor D. W. (1948)].

Η προσομοίωση του φαινομένου στερεοποίησης είναι πολύπλοκη στην γενική (πραγματική) περίπτωση τριδιάστατου, μη-κορεσμένου, ανομοιογενούς εδαφικού στοιχείου και μη-μόνιμης ροής συμπιεστού ρευστού υπό μεταβαλλόμενη θερμοκρασία. Παρά ταύτα, στα επόμενα παρουσιάζονται οι μαθηματικές διατυπώσεις των σχέσεων που διέπουν το φαινόμενο της στερεοποίησης με τις εξής παραδοχές:

- Το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο¹.
- Οι στερεοί "κόκκοι" και το νερό των πόρων είναι ασυμπίεστα.

¹ Ο βαθμός κορεσμού S_r κυμαίνεται από 0-100% στη γενική περίπτωση.

- Ο εδαφικός ιστός συμπεριφέρεται ως ισότροπο ελαστικό είτε ισότροπο ποροελαστικό υλικό (βλ. Κεφάλαιο 2), ανάλογα με την περίπτωση. Για παράδειγμα στην τριδιάστατη κατάσταση ισχύει:

$$\frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial t} = \frac{1}{K} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (3.1)$$

όπου t ο παράγων χρόνος και σ' η μέση ορθή ενεργός τάση. Το K νοείται μεταβλητό όταν αλλάζει ο δείκτης πόρων e . Επισημαίνεται, ότι στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, δεν θα αναλυθούν περιπτώσεις μη γραμμικής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς με το φαινόμενο της στερεοποίησης.

- Η υδατική ροή διαμέσου των πόρων του εδάφους είναι μόνιμη και στρωτή ενώ διέπεται από το νόμο του Darcy:

$$\underline{v} = -\underline{k} : \nabla h \quad (3.2)$$

όπου \underline{v} ο τανυστής των ταχυτήτων του νερού, \underline{k} ο τανυστής των υδραυλικών διαπερατοτήτων, $h = z + \frac{u}{\gamma_w}$ το υδραυλικό φορτίο για υψομετρική θέση z ως προς τυχαίο σύστημα αναφοράς και u είναι το πιεζομετρικό φορτίο.

- Οι παραμορφώσεις του εδάφους θεωρούνται απειροστές και κατά συνέπεια μπορούν να εφαρμοστούν οι γνωστοί ορισμοί της παραμόρφωσης (βλ. Κεφάλαιο 2), είτε βασίζονται στην θεωρία των μεγάλων παραμορφώσεων (βλ. θεωρία στερεοποίησης του Gibson παράγραφο 3.3.2).
- Το εδαφικό στρώμα θεωρείται ομοιογενές επομένως, δεν θα αναλυθούν μαθηματικά περιπτώσεις με πολυστρωματικό έδαφος.

Επίσης, θεωρείται ότι ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας δηλαδή, θεωρώντας τυχαίο όγκο $\Delta V (= \Delta x \Delta y \Delta z)$ εδαφικού στοιχείου που εξαρτάται από τις παραμορφώσεις, και περικλείεται από επιφάνεια S , η ροή δια μέσου της επιφάνειας του με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας, είναι ίση και αντίθετη με την αύξηση της μάζας του νερού των πόρων στον εσωτερικό του όγκου V .

Με βάση τα άνωθεν, λαμβάνοντας την εξίσωση ισορροπίας του εδαφικού στοιχείου όγκου V που δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial (n \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (n \rho_f \underline{v}) = 0 \quad (3.3)$$

όπου n το πορώδες και ρ_f η πυκνότητα του εκάστοτε υγρού και χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση που έχει με το δείκτη πόρων e :

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (3.4)$$

συνεπάγεται, ότι:

$$-\int_V \rho_f \cdot \text{div}(\underline{v}) dV = \int_V \rho_f \frac{\partial e}{\partial t} \frac{1}{1+e} dV \quad (3.5)$$

Επομένως, εκφράζεται η εξίσωση της αρχής διατήρησης της μάζας με την κάτωθι σχέση:

$$\text{div}(\underline{v}) = -\frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial t} \quad (3.6)$$

Τονίζεται, ότι πέρα από την πρωτογενή στερεοποίηση προκαλούνται στο εδαφικό στοιχείο και δευτερεύουσες καθιζήσεις (ερπυστική συνιστώσα) υπό συνεχή σταθερή συμπίεση, οι οποίες εκδηλώνονται μετά την αποτόνωση των υπερπλίσεων του νερού των πόρων και ουσιαστικά με την τυπική λήξη του φαινομένου της στερεοποίησης. Επομένως, λόγω του ότι δεν αναλύεται το φαινόμενο του ερπυσμού στην συγκεκριμένη εργασία, δεν θα γίνει αναφορά στις δευτερεύουσες καθιζήσεις, ενδεικτικά όμως αναφέρεται ότι εξαρτώνται κυρίως από: α) τον χρόνο που απαιτείται για την αποτόνωση των υπερπλίσεων πόρων, β) τον τύπο του εδάφους, γ) το λόγο *OCR*.

Η μελέτη του φαινομένου της στερεοποίησης των εδαφών χωρίς τις ανωτέρω (απλοποιητικές) παραδοχές υπερβαίνει το σκοπό αυτής της εργασίας.

3.2 Μονοδιάστατη στερεοποίηση ισότροπου γραμμικού εδάφους

Η θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης (Terzaghi, 1924) απλοποιεί σημαντικά την μαθηματική επίλυση του φαινομένου και βασίζεται στις ακόλουθες επί πλέον παραδοχές:

- (a) Η συμπίεση του εδαφικού ιστού και η ροή του νερού δια μέσου αυτού συμβαίνουν μόνο κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση, εφόσον τα άκρα του (άνω ή / και κάτω) νοούνται ως διαπερατά.
- (b) Ο συντελεστής κατακόρυφης διαπερατότητας k_z κατά Darcy παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης.
- (c) Ο συντελεστής μεταβολής όγκου είναι σταθερός, πρόκειται δηλαδή για γραμμική ισότροπη ελαστικότητα:

$$m_v = \frac{d\varepsilon_z}{d\sigma'_z} = \frac{1}{D} = \text{σταθερός} \quad (3.7)$$

όπου $D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ και ονομάζεται μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης.

Υπό αυτές τις συνθήκες η καταστατική διαφορική εξίσωση ροής δια μέσου ομογενούς πορώδους εδάφους εκφράζεται με την κάτωθι σχέση:

$$k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.8)$$

Με βάση τις άνωθεν σχέσεις συνεπάγεται, ότι η μεταβολή του όγκου του εδαφικού στοιχείου νοείται ως μεταβολή όγκου των κενών του, εφόσον οι εδαφικοί "κόκκοι" λαμβάνονται ως απαραμόρφωτοι.

Με μερική παραγωγή της αρχής των ενεργών τάσεων ως προς τον χρόνο και το βάθος και συσχετίζοντας την με τη σχέση 3.8 προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_o} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.9)$$

Πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας το δεύτερο μέρος της ως άνω διαφορικής εξίσωσης με $\partial \sigma'$ θα προκύψει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \left(\frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right) \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (3.10)$$

Η παράμετρος μέσα στην παρένθεση δεν εκφράζει παρά το συντελεστή μεταβολής όγκου m_v υπό την προϋπόθεση γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους, οπότε θα ισχύει τελικώς η ακόλουθη διαφορική εξίσωση της μονοδιάστατης στερεοποίησης κατά Terzaghi:

$$\frac{k_z}{\gamma_w \cdot m_v} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.11)$$

όπου $c_z = k/(\gamma_w \cdot m_v)$ ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης.

Η λύση της εξίσωσης 3.11 θα πρέπει να ικανοποιεί κατάλληλες συνοριακές συνθήκες όπως για παράδειγμα:

- Όταν $z = 0 \Rightarrow \Delta u = 0$.
- Όταν $z = 2H \Rightarrow \Delta u = 0$.
- Όταν $t = 0 \Rightarrow \Delta u = u_o$.

όπου $2H$ το πάχος του αργλικού στρώματος του οποίου το άνω ($z = 0$) και κάτω ($z = 2H$) όριο είναι σε επαφή με σχηματισμούς που επιτρέπουν άμεση αποστράγγιση. Η τρίτη, κατά σειρά, συνθήκη ορίου υποδηλώνει ότι αμέσως πριν την αρχή του φαινομένου της στερεοποίησης ($t = 0$), η πίεση πόρων στο εδαφικό στοιχείο έχει μια αρχική τιμή u_o , όχι απαραίτητα μηδέν, εφόσον μπορεί να ισχύει για παράδειγμα καθεστώς υδροστατικής ισορροπίας.

Η μαθηματική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της μονοδιάστατης στερεοποίησης κατά Terzaghi, με βάση της άνωθεν συνοριακές συνθήκες, δίνεται παρακάτω:

$$\Delta u(z,t) = \Delta \sigma_z \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \exp(-M^2 T_z) \right] \quad (3.12)$$

όπου $M = (2m+1)\pi/2$ και $T_z = c_z t / H^2$. Ο όρος T_z ονομάζεται χρονικός παράγων, ο οποίος εκφράζει το φαινόμενο που συνδέει τον συντελεστή διαπερατότητας k_z και τον συντελεστή μεταβολής όγκου m_v συναρτήσει του χρόνου, υπό δεδομένη πάντοτε διαδρομή (H) στράγγισης. Βέβαια είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε αντίθεση με τη θεωρία Terzaghi έχει παρατηρηθεί πως όσο εξελίσσεται η στερεοποίηση, τόσο μειώνονται οι k_z και m_v , ο λόγος των οποίων όμως δεν παραμένει πάντα σταθερός για σημαντικό εύρος πιέσεων. Κατά συνέπεια, το ότι ο συντελεστής στερεοποίησης c_z στη θεωρία Terzaghi παραμένει σταθερός είναι κάτι το οποίο δεν αντιπροσωπεύει την “πειραματική” πραγματικότητα.

Για την ολοκλήρωση της περιγραφής της στερεοποίησης χρειάζεται να ορισθεί ο βαθμός στερεοποίησης U_z , που είναι η ποσότητα της υπερπίεσης πόρων που έχει εκτονωθεί σε χρόνο t ως προς την αρχική τιμή u_o της πίεσης πόρων, δηλαδή εάν:

$$U_z = 1 - \frac{u_t}{u_o} \approx 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{2}{M^2} \exp\{-M^2 T_z\} \right) \quad (3.13)$$

Η θεωρία δίνει την δυνατότητα εκτίμησης και του μέσου βαθμού στερεοποίησης ενός εδαφικού στρώματος σε κάθε χρονική στιγμή. Από την χωρική και χρονική κατανομή των υπερπίεσεων πόρων υπολογίζεται η υποχώρηση της επιφάνειας του εδαφικού στρώματος από τη σχέση:

$$\delta(t) = \frac{1}{D} \int_0^{2H} \Delta \sigma'(z,t) dz^2 \quad (3.14)$$

Επομένως, η χρονική εξέλιξη των υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους και κατ' επέκταση του φαινομένου της στερεοποίησης περιγράφεται με την κάτωθι αδιάστατη μορφή:

$$\bar{U}_z = \frac{\delta(t)}{\delta(\infty)} = \frac{2H \frac{\Delta \sigma_z}{D} - \frac{1}{D} \int_0^{2H} \Delta u(z,t) dz}{2H \frac{\Delta \sigma_z}{D}} \Rightarrow \bar{U}_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \cdot e^{-M^2 T_z} \quad (3.15)$$

² Επομένως, παρατηρείται ότι το μέγεθος της καθίζησης ως τελικό αποτέλεσμα της στερεοποίησης, εξαρτάται από την συμπίεστικότητα του εδαφικού ιστού και ελάχιστα έχει να κάνει με τις λεπτομέρειες της διαδικασίας της στερεοποίησης.

όπου $\delta(\infty)$ είναι η καθίζηση στο τέλος της στερεοποίησης.

Επιπρόσθετα, από την ανάπτυξη της θεωρίας μονοδιάστατης στερεοποίησης του Terzaghi που προηγήθηκε προκύπτουν οι ακόλουθες ενδιαφέρουσες επισημάνσεις:

- (a) Αμέσως μετά την επιβολή της επιφόρτισης παρουσιάζονται πολύ μεγάλες υδραυλικές κλίσεις όπου υπάρχουν συντομικές συνθήκες στράγγισης, αλλά μηδενικές κλίσεις όπου υπάρχει αδιαπέρατο όριο. Κατά συνέπεια, τα στραγγιζόμενα όρια του στρώματος μεταβάλλουν γρήγορα τον όγκο τους, ενώ μηδενική μεταβολή του όγκου χαρακτηρίζει τα εδαφικά στοιχεία πλησίον του αδιαπέρατου ορίου.
- (b) Σε μετέπειτα χρόνο που το νερό έχει αρχίσει να αποβάλλεται από τον εδαφικό ιστό με διεύθυνση τα όρια στράγγισης, η μεταβολή των ενεργών τάσεων καθ' ύψος δεν θα είναι σταθερή και θα εξαρτάται από την ελάχιστη διαδρομή αποστράγγισης του νερού των πόρων.

3.3 Μη γραμμική ανάλυση μονοδιάστατης στερεοποίησης

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 η θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης του Terzaghi στηρίζεται στο ότι ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης c_v παραμένει σταθερός, παραδοχή που στην πραγματικότητα δεν ισχύει.

Επίσης, περαιτέρω έρευνες κατέδειξαν ότι προκύπτουν σφάλματα από τη θεωρία Terzaghi, καθώς υπάρχει μεταβλητότητα του συντελεστή διαπερατότητας κατά την διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης, στην κατά προσέγγιση ισχύ του νόμου του Darcy σε πολύ χαμηλές τιμές της υδραυλικής κλίσης. Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι υφίσταται μια μη γραμμική συσχέτιση της σχέσης $\sigma' - e$ επομένως, ο συντελεστής μεταβολής όγκου m_v δεν είναι σταθερός.

Συνεπώς, είναι επιτακτικό να γίνει αναφορά σε θεωρητικές μονοδιάστατες αναλύσεις που λαμβάνουν πιο ρεαλιστικές παραδοχές από αυτές του Terzaghi, όπως τις θεωρίες των Davis & Raymond (1965) και του Gibson (1967). Τονίζεται, σύμφωνα με τον Battagio et al. (2001) στο άρθρο "Non-linear consolidation models of clay which change type", ότι οι αναλύσεις αυτές αναπτύχθηκαν με την προϋπόθεση να μην υπάρχει μεταβλητότητα στον τύπο αργίλου (change type), από κανονικώς στερεοποιημένες σε υπερστερεοποιημένες κατά τη διάρκεια του φαινομένου της στερεοποίησης.

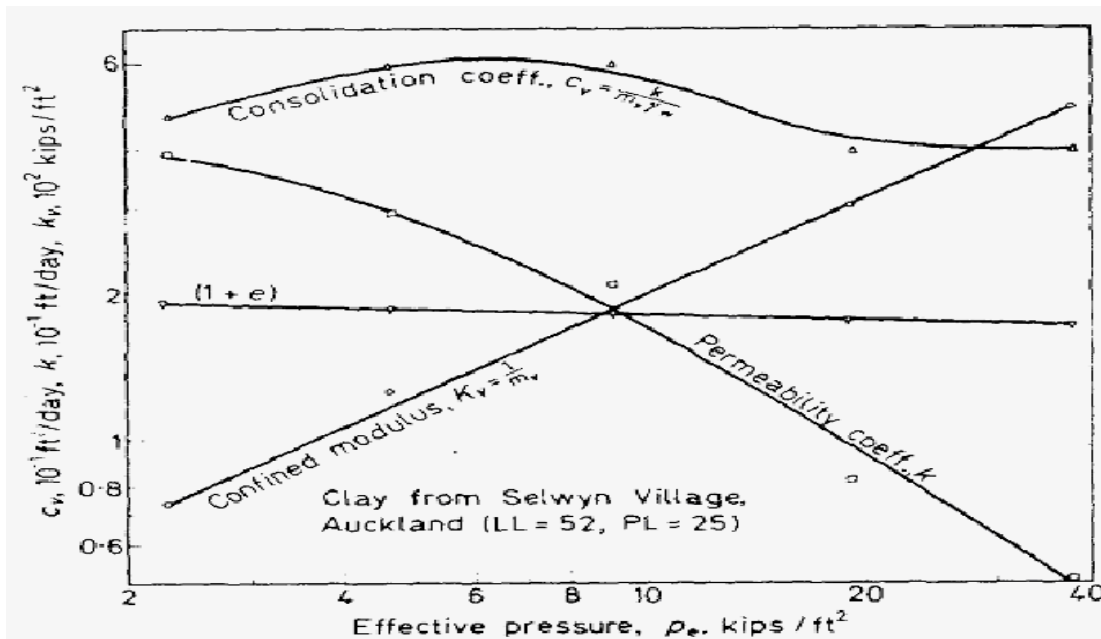
3.3.1 Μονοδιάστατη στερεοποίηση των Davis & Raymond

Η θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης του Terzaghi χρησιμοποίησε ως εξαρτημένη μεταβλητή (dependent variable) την πίεση του νερού των πόρων. Παρά ταύτα, μεταγενέστερες θεωρίες εξέφρασαν το φαινόμενο της στερεοποίησης λαμβάνοντας άλλες εξαρτημένες μεταβλητές. Για παράδειγμα, πρώτοι οι Davis & Raymond (1965) έλαβαν υπόψη τους την μεταβολή της συμπιεστότητας και της διαπερατότητας του εδάφους ως εξαρτημένες μεταβλητές. Επιπρόσθετα, στην

ανάλυση των Davis & Raymond χρησιμοποιήθηκε ως κυρίαρχη μεταβλητή (dominant variable) η ενεργός τάση (ποροελαστικότητα).

Η μη γραμμική ανάλυση της στερεοποίησης των Davis & Raymond έχει τις ακόλουθες επιπρόσθετες παραδοχές:

- (a) Όπως και η θεωρία Terzaghi είναι μονοδιάστατη η συμπίεση.
- (b) Ο συντελεστής στερεοποίησης $c_v (= c_z)$ θεωρείται περίπου σταθερός σε δεδομένο χρονικό βήμα. Παρά ταύτα, οι παράμετροι διαπερατότητας και συμπιεστότητας στην όλη διάρκεια του φαινομένου της στερεοποίησης δεν είναι σταθεροί (βλ. Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 Μεταβλητότητα του συντελεστή μονοδιάστατης στερεοποίησης, της υδραυλικής διαπερατότητας και του συντελεστή μεταβολής όγκου σε συνάρτηση με την ενεργό τάση (για συγκεκριμένο τύπο αργίλου) [Davis H. E. et al. (1965)].

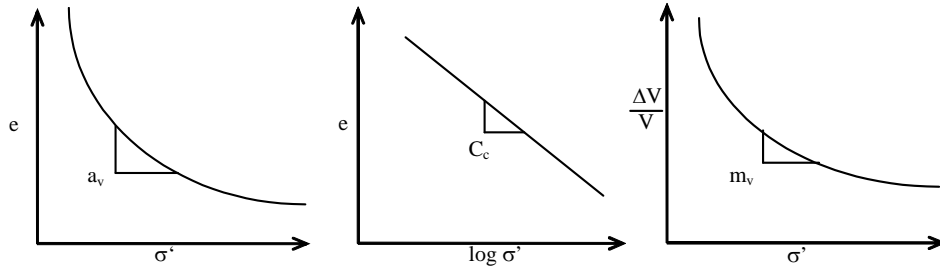
- (c) Η συμπεριφορά του εδάφους εκφράζεται μέσω της ποροελαστικότητας (βλ. Κεφάλαιο 2) και μάλιστα, ο δείκτης πόρων e δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$e = e_o - C_c \cdot \log \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_o} \right) \quad (3.16)$$

όπου e είναι τελική τιμή του δείκτη πόρων, e_o ο αρχικό δείκτης πόρων, C_c είναι ο συντελεστής (δείκτης συμπίεσης-compression index-) κλίσης της ευθείας σε διάγραμμα εντατικής συμπεριφοράς $\log \sigma' - e$, σ' και σ'_o η τελική και αρχική πίεση πόρων αντιστοίχως (βλ. Σχήμα 3.3).

- (d) Ο συντελεστής συμπιεστότητας m_v δίνεται από τη σχέση:

$$m_v = - \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.3 Συνήθη διαγράμματα που προκύπτουν από την ποροελαστικότητα.

Με την παραγωγή της σχέσης 3.16 ως προς τις ενεργές τάσεις και αντικαθιστώντας στην 3.17 λαμβάνεται:

$$m_v = \frac{0.434C_c}{(1+e)\sigma'} \quad (3.18)$$

- (e) Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ο όρος $(1+e)$, λόγω της παραδοχής της θεωρίας των μικρών παραμορφώσεων, θεωρείται περίπου σταθερός.

Με βάση τα παραπάνω, λαμβάνοντας ότι ισχύει η εξίσωση Darcy για την κατακόρυφη διεύθυνση z εξάγεται ότι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial z} dz &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{-k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial z} dz &= -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{c_v m_v \gamma_w}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial z} dz = -c_v A \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma'} \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (3.19)$$

όπου ο συντελεστής $A \approx \frac{C_c}{1+e_0} (0.434)$.

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας την εξίσωση της μεταβολής του όγκου του νερού με την μεταβολή του όγκου των πόρων σε πάχος εδάφους dz λαμβάνεται ότι:

$$\frac{\partial v}{\partial z} dz = -c_v A \left[\frac{1}{\sigma'} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{\sigma'} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{d\sigma'}{dz} \right] dz \quad (3.20)$$

Θεωρώντας λοιπόν, ότι η σχέση τάσεων και παραμορφώσεων δίνεται ως:

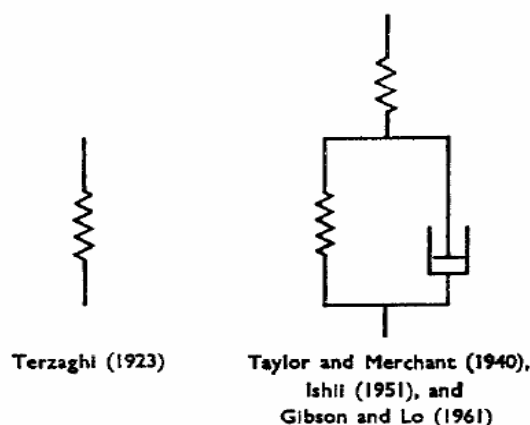
$$\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} = \frac{A}{\sigma'} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (3.21)$$

και συσχετίζοντας την με την εξίσωση 3.20 συνεπάγεται ότι:

συμπιεστότητα του εδάφους μεταβάλλονται, όπως έκαναν οι Davis & Raymond και ο Mikasa, με την προϋπόθεση όμως να μην ισχύει η θεωρία μικρών παραμορφώσεων, αλλά και ότι ο συντελεστής της μονοδιάστατης στερεοποίησης c_v δεν είναι σταθερός.

Παρά ταύτα, σε αντίθεση με τους Davis & Raymond και Mikasa στην ανάλυση του ο Gibson χρησιμοποίησε ως εξαρτημένη μεταβλητή το δείκτη πόρων e , από τον οποίο εξαρτάται η υδραυλική διαπερατότητα $k(e)$ και η συμπιεστότητα $m_v(e)$ ⁴.

Τονίζεται, με βάση το άρθρο του Christie F. I. "A Re-Appraisal Of Merchants Contribution To The Theory Of Consolidation" ότι το μοντέλο ρεολογικής συμπεριφοράς του Gibson (όπως των Davis & Raymond και Mikasa) διαφέρει από τις παραδοχές του Terzaghi (βλ. Σχήμα 3.5)

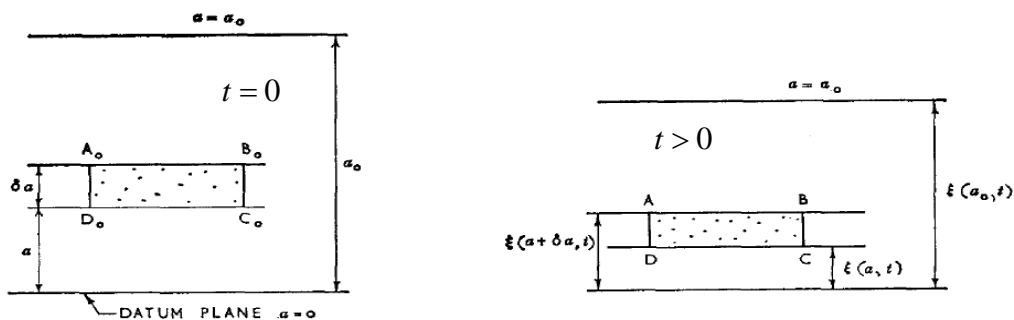


Σχήμα 3.9 Ρεολογικό προσομοίωμα καταστατικής συμπεριφοράς που παρουσιάζει τη συμπιεστότητα του εδαφικού σκελετού [Christie F. I. (1964)].

Επομένως, με βάση το Σχήμα 3.5 φαίνεται ότι το ελατήριο είναι η γραμμική συμπεριφορά, που χρησιμοποίησε ο Terzaghi, ενώ το παράλληλο σύστημα αποσβεστήρα και ελατηρίου εκφράζει τη συμπεριφορά που προκύπτει από την ποροελαστικότητα, την οποία χρησιμοποίησαν όσοι υπέθεσαν μεταβλητή συμπιεστότητα και υδραυλική διαπερατότητα.

Επανερχόμενοι, στην ανάλυση της θεωρίας του Gibson, θεωρείται στρώμα εδάφους που αρχικά έχει πάχος $a = a_0 = H$ για χρονική στιγμή $t = 0$ (βλ. Σχήμα 3.6). Το στρώμα εδάφους περιέχει εδαφικό στοιχείο (εδαφική περιοχή) $A_0 B_0 C_0 D_0$ με γνωστές αρχικές συντεταγμένες ως προς το σύστημα αναφοράς που βρίσκεται στον πυθμένα του στρώματος. Σε κάποια χρονική στιγμή που συμβαίνει στερεοποίηση το στρώμα έχει πάχος $\xi(a_0, t) = z(H, t)$ ενώ το εδαφικό στοιχείο έχει μετατοπιστεί και αλλάξει πάχος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 ($ABCD$).

⁴ Με την υπόθεση ότι το έδαφος είναι ομοιογενές, χωρίς να εμφανίζει φαινόμενα ερπυσμού και ότι το φαινόμενο της στερεοποίησης είναι μονοτονικό. (Gibson et al. (1967), "The Theory Of One-Dimensional Consolidation Of Saturated Clays", Geotechnique, 17:261-273)



Σχήμα 3.6 Συντεταγμένες για αρχική (αριστερά) και τυχαία (δεξιά) χρονική στιγμή του μονοδιάστατου φαινομένου στερεοποίησης, Πηγή: Christie F. I. "A Re-Appraisal Of Merchants Contribution To The Theory Of Consolidation", Geotechnique, Volume 14, Issue 4.

Η σχέση της μεταβλητής Lagrange $\xi(a_o, t) = z(H, t)$ σύμφωνα με τους Xie H. K. & Leo J. C. (2004) στη θεωρία του Gibson⁵ δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{1+e}{1+e_o} \quad (3.24)$$

όπου e και e_o η τυχαία (για χρόνο $t > 0$) και η αρχική τιμή του δείκτη πόρων.

Η κατακόρυφη εξίσωση ισορροπίας (ως προς z) του εδαφικού στοιχείου ($ABCD$) δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} \pm (e\gamma_w + \gamma_s) = 0 \quad (3.25)$$

όπου τα γ_w, γ_s είναι οι πυκνότητες του υγρού και της στερεάς φάσης αντίστοιχα και θεωρούνται σταθερές και σ η ολική τάση. Σημειώνεται, ότι το θετικό πρόσημο λαμβάνεται αν το σύστημα αύξησης των συντεταγμένων έχει την φορά της βαρύτητας, διαφορετικά είναι αρνητικό.

Επιπρόσθετα, με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας λαμβάνεται η σχέση:

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial z} \pm \gamma_w \frac{\partial \xi}{\partial z} = 0 \quad (3.26)$$

όπου p είναι η απόλυτη πίεση του νερού των πόρων, u η υπερπίεση του νερού των πόρων και ξ η μεταβλητή του Lagrange που εκφράζει την απόσταση του εδαφικού στρώματος από το επίπεδο αναφοράς.

Επίσης, θεωρώντας ότι ισχύει η μόνιμη ροή και ο νόμος Darcy εξάγεται ότι:

⁵ Περαιτέρω ανάλυση στη θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης του Gibson δίνεται από τους Xie H. K. & Leo J. C. στο άρθρο "Analytical Solution of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays" (Elsevier, Computers and Geotechnics, Vol. 31)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{e(v_w - v_s)}{1+e} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{e(v_w - v_s)}{k_z} \pm (1+e) + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.27)$$

όπου $(v_w - v_s)$ είναι η σχετική διαφορά των ταχυτήτων ανάμεσα σε υγρή και στερεά φάση.

Συσχετίζοντας τις άνωθεν σχέσεις δίνεται τελικώς η εξίσωση της μονοδιάστατης στερεοποίησης ως εξής:

$$\pm \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{k_z(e)}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_z(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (3.28)$$

η οποία είναι έντονα μη γραμμική εξίσωση.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η συγκεκριμένη σχέση λαμβάνει υπόψη και το βάρος του εδάφους, αν γίνει η παραδοχή να αμεληθεί τότε μορφώνεται η σχέση 3.28 ως εξής:

$$c_v \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.29)$$

όπου ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης c_v δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$c_v = - \frac{k(e)(1+e_o)^2}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (3.30)$$

Συνεπώς, φαίνεται ότι ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης δεν είναι σταθερός με βάση τη σχέση του Gibson, σε αντίθεση με τη σχέση του Terzaghi. Επομένως, η συγκεκριμένη έκφραση αποτελεί μια γενική περίπτωση που περιλαμβάνει τόσο τη γραμμική θεωρία του Terzaghi όσο και τη μη γραμμική των Davis & Raymond και Mikasa. Στην πράξη ο συντελεστής στερεοποίησης είναι μεταβλητός για ορισμένους τύπους αργίλου, ιδιαίτερα για σημαντικές επιφορτίσεις. Επομένως, συνεπάγεται ότι η σχέση του Gibson δίνει πιο ρεαλιστικές προβλέψεις για το φαινόμενο της στερεοποίησης.

3.4 Θεωρία διδιάστατης και τριδιάστατης στερεοποίησης

Στην πραγματικότητα, κάθε άλλο παρά είναι μονοδιάστατη (άρα και πλευρικώς παρεμποδιζόμενη) η στερεοποίηση ενός εδαφικού στρώματος το οποίο φέρει λ.χ. τα φορτία ενός επιχώματος, πρόκειται δηλαδή για τριδιάστατη έκφραση του φαινομένου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η εξωτερικώς επιβαλλόμενη φόρτιση ασκείται σε μικρή μόνον επιφάνεια (σε σχέση με το πάχος της συμπιεστής στρώσης) καθώς και σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας ή συνοριακών

συνθηκών στράγγισης, το φαινόμενο της στερεοποίησης είναι πολυδιάστατο, επειδή η στράγγιση γίνεται σε δύο (ή γενικότερα σε τρεις) διαστάσεις.

Σύμφωνα με τους Carter & Small (2007) αναφέρεται, ότι οι διερευνήσεις των Davis & Roulos κατέδειξαν ότι η επιρροή των άλλων δύο διαστάσεων στο φαινόμενο της στερεοποίησης συνίσταται στο ότι ο απαιτούμενος χρόνος για την στερεοποίηση του στρώματος μειώνεται με: α) τη μείωση των διαστάσεων του φορτίου, β) τη μείωση του πάχους του στρώματος, γ) την αύξηση της οριζόντιας διαπερατότητας. Αποδείχθηκε επίσης ότι η τριδιάστατη στερεοποίηση είναι ταχύτερη της διδιάστατης, και μάλιστα η ταχύτητα αυξάνεται με την παρουσία αποστραγγιστικών στρώσεων στην στερεοποιούμενη αργιλική μάζα.

Στις περιπτώσεις αυτές η έκφραση του φαινομένου της στερεοποίησης είναι ακόμα πιο δύσκολη με αναλυτικές μεθόδους και συνήθως, απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων (π.χ. Πεπερασμένων Διαφορών ή Πεπερασμένων Στοιχείων) και η αριθμητική ολοκλήρωση στο χρόνο.

Η πρώτη μαθηματική θεωρία τριδιάστατης στερεοποίησης αναπτύχθηκε από τον Biot (1941 & 1954), όπου το έδαφος αντιμετωπίστηκε ως ελαστικό⁶, η οποία αναλύεται ακολούθως. (Βέβαια, υπάρχουν και μεταγενέστερες θεωρίες όπως η τριδιάστατη στερεοποίηση του Cryer κ.α.)

3.4.1 Τριδιάστατη στερεοποίηση του Biot

Στην τριδιάστατη ανάλυση του φαινομένου της στερεοποίησης, ο Biot (1941) λαμβάνοντας γραμμική συσχέτιση τάσεων και παραμορφώσεων (ελαστικότητα) ανέπτυξε την τριδιάστατη εξέλιξη της στερεοποίησης για ισότροπη συμπεριφορά υλικών, ενώ το 1954 επέκτεινε τη σχέση λαμβάνοντας όμως ανισότροπη συμπεριφορά υλικών. Επιπρόσθετα, εκτός από τα άνωθεν στην ανάλυση του Biot χρησιμοποιήθηκε η θεωρία των μικρών παραμορφώσεων (βλ. Κεφάλαιο 2). Επίσης, θεωρείται στη θεωρία του Biot ότι οι μεν οι κόκκοι είναι ασυμπίεστοι αλλά το νερό είναι συμπιεστό, καθώς περιέχουν οι πόροι φυσαλίδες αέρα.

Θεωρείται λόγω της ισότροπης συμπεριφοράς ότι δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις στο εδαφικό στοιχείο, υπό την επιβολή της πίεσης u του νερού των πόρων. Επίσης, για τον ίδιο λόγο η επιρροή της πίεσης του νερού των πόρων είναι ίδια προς κάθε διεύθυνση. Επομένως, με βάση τα άνωθεν οι σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων στην τριδιάστατη μορφή εκφράζονται ως εξής:

⁶ Πιο σύγχρονες θεωρίες για την τριδιάστατη στερεοποίηση αναπτύχθηκαν από τους Carter, Small & Brooker, που βασίζονται όμως στη θεωρία των πεπερασμένων διαφορών επομένως, δεν θα αναφερθούν καθώς υπερβαίνουν το σκοπό αυτής της εργασίας. Τονίζεται, για λόγους πληρότητας, ότι η προσπάθεια αυτή εξελίχθηκε και σε ελαστοπλαστική συμπεριφορά επεκτείνοντας το θεώρημα του Biot. ("Elastoplastic Consolidation Of Soil", Int. Journal Solids Structures, 1976, Vol. 12)

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\sigma_{xx}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \frac{\sigma}{H} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\sigma_{yy}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) + \frac{\sigma}{H} \\
 \varepsilon_{zz} &= \frac{\sigma_{zz}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{yy} + \sigma_{xx}) + \frac{\sigma}{H} \\
 \tau_{xy} &= G\varepsilon_{xy} \\
 \tau_{zx} &= G\varepsilon_{zx} \\
 \tau_{yz} &= G\varepsilon_{yz}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

όπου H είναι φυσική σταθερά και εξαρτάται από τον ποσοστό του κορεσμού του εδαφικού στοιχείου και σ^7 είναι η μέση πίεση πόρων. Στην συγκεκριμένη εργασία, επειδή θεωρείται $S_r = 100\%$ δηλαδή πλήρης κορεσμός συνεπάγεται ότι $H = 1$.

Επίσης, γνωρίζοντας ότι ισχύει η σχέση για την ογκομετρική παραμόρφωση $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ και ότι $G = E/[2(1+\nu)]$, οι τρισδιάστατες εξισώσεις ισορροπίας εκφράζονται με τον κάτωθι τρόπο:

$$\begin{aligned}
 G\nabla^2 u_i + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial x} - \frac{2(1+\nu)G}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= 0 \\
 G\nabla^2 u_j + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial y} - \frac{2(1+\nu)G}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial y} &= 0 \\
 G\nabla^2 u_k + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)G}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

όπου u_i, u_j, u_k είναι οι άγνωστες μετατοπίσεις κατά x, y, z αντίστοιχα που συνδέονται με την διατμητική παραμόρφωση ε_{ij} (βλ. Κεφάλαιο 2), μέσω της θεωρίας μικρών παραμορφώσεων.

Συσχετίζοντας την τριδιάστατη έκφραση του Darcy (και θεωρώντας σταθερή υδραυλική διαπερατότητα) με την αρχή διατήρησης της μάζας και τη σχέση ισορροπίας 3.32 εξάγεται ότι:

$$k \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} = \frac{2(1+\nu)G}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial t} \tag{3.33}$$

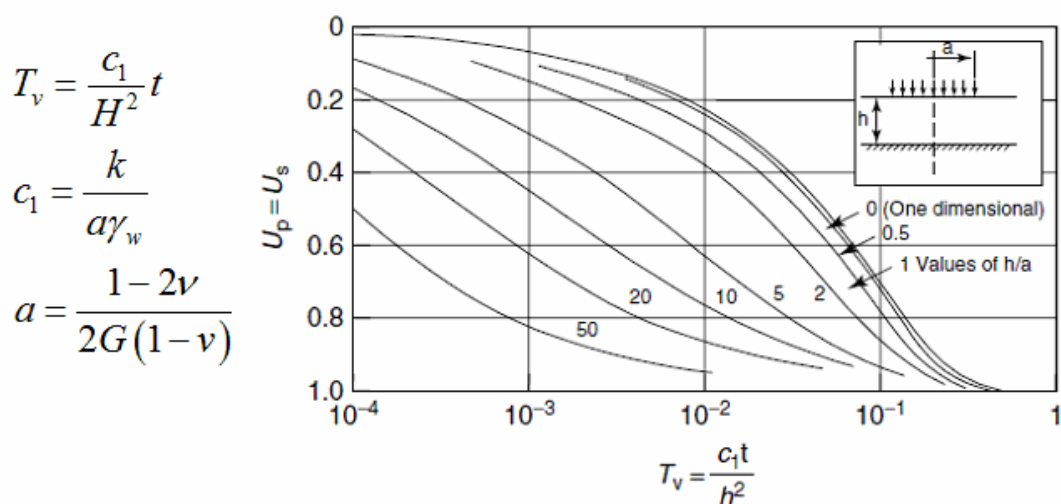
όπου k είναι σταθερή η υδραυλική διαπερατότητα κατά Darcy στις διευθύνσεις x, y, z .

⁷ Ισχύει δηλαδή ότι η μεταβλητή σ ισούται με την πίεση πόρων (u) / 3.

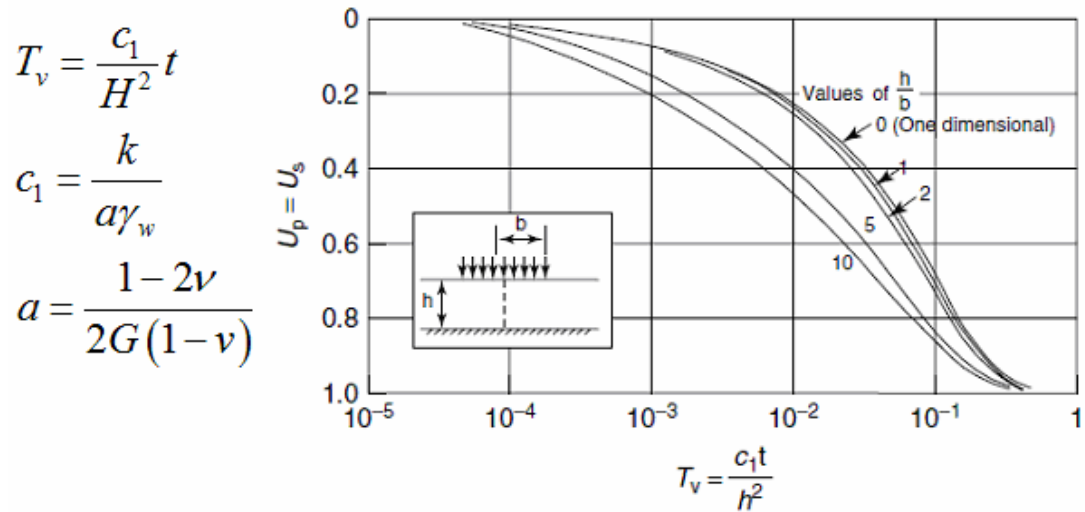
Τονίζεται, ότι αν δεν γινόταν η παραδοχή ότι οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι, δηλαδή $S_r < 100\%$, τότε η τελική εξίσωση θα εκφραζόταν ως εξής:

$$k \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left(e \frac{\partial S_r}{\partial t} + S_r \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (3.34)$$

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στερεοποίησης εδαφικού στρώματος πάχους (h) βασιζόμενα στη θεωρία του Biot, χωρίς στράγγιση στη βάση, λόγω φόρτισης από επιφανειακό θεμέλιο ακτίνας (a), που υπολογίστηκαν από τον MacNamee (1960). Στο σχήμα φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής του βαθμού στερεοποίησης ως προς το χρονικό παράγοντα που αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές του λόγου (h/a). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο ($h/a=0$) είναι η γνωστή καμπύλη της μονοδιάστατης στερεοποίησης (Terzaghi), επειδή η επιφάνεια επιβολής της φόρτισης είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με το πάχος της συμπιεστής στρώσης. Οι διαφορετικές τιμές της σχέσης $U_p = U_s$ σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη ανάλυση του Terzaghi οφείλονται στον ελαφρά διαφορετικό ορισμό του χρονικού παράγοντα, ο οποίος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, εκφράζεται συναρτήσει του μέτρου διάτμησης G αντί του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης D . Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, η δραστική μείωση του χρόνου που απαιτείται για να συντελεσθεί η στερεοποίηση με τη μείωση του εύρους της φορτιζόμενης επιφάνειας. Τούτο οφείλεται στην ενεργοποίηση και του μηχανισμού στράγγισης στην οριζόντια διεύθυνση εκτός από τη (γνωστή) στράγγιση στην κατακόρυφη διεύθυνση. Όμοια ο Gibson (1960) υπολόγισε τα αποτελέσματα του φαινομένου της στερεοποίησης εδαφικού στρώματος πάχους (h), χωρίς στράγγιση στη βάση, λόγω φόρτισης από επιφανειακό θεμέλιο ακτίνας (b) (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.7 Βαθμός στερεοποίησης για κυκλική φόρτιση, με στραγγισμένο άνω όριο και αδιαπέρατο κάτω σύνορο [Small C. J. et al. (2007)].



Σχήμα 3.8 Βαθμός στερεοποίησης για φόρτιση με λωρίδα άπειρου μήκους, με στραγγισμένο άνω όριο και αδιαπέρατο κάτω σύνορο [Small C. J. et al. (2007)].

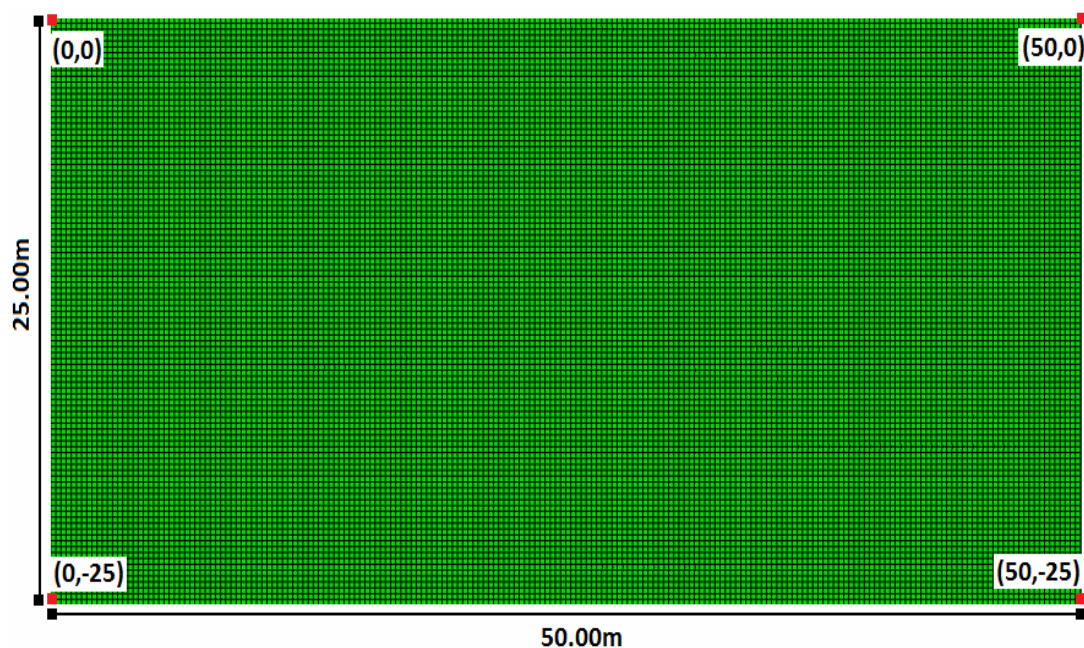
Κεφάλαιο 4^ο : Αριθμητική Διερεύνηση Στερεοποίησης Αργιλικών Στρώσεων

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις αριθμητικές αναλύσεις του φαινομένου της στερεοποίησης, με τη χρήση διάφορων καταστατικών προσομοιωμάτων, με σκοπό να γίνει κατανοητή η επιρροή αυτών στο φαινόμενο της στερεοποίησης. Αρχικά, χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus¹, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με βάση την ισότροπη γραμμική ελαστικότητα και έπειτα, δίνονται τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης που βασίζονται στο ελαστοπλαστικό καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay. Στηριζόμενοι στην ακόλουθη ανάλυση αλλά και σε όσα αναφέρονται στο Παράρτημα Γ, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του φαινομένου της στερεοποίησης, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο Κεφάλαιο 6 για τις ανάστροφες αναλύσεις στερεοποίησης αργιλικών στρώσεων κάτω από δοκιμαστικό επίχωμα. Τονίζεται, ότι το εύρος των γεωτεχνικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική διερεύνηση έχει σχέση με τα στοιχεία της γεώτρησης B420-6 (για περισσότερα βλ. Κεφάλαιο 5) αλλά και με τιμές που δίνει η διεθνής βιβλιογραφία (π.χ. "Craig's Soil Mechanics" 7th edition κ.α.).

4.2 Γενικά στοιχεία αριθμητικού προσομοιώματος

Αρχικά, στην αριθμητική διερεύνηση του μονοδιάστατου και διδιάστατου φαινομένου της στερεοποίησης, προσομοιώνεται λόγω της συμμετρίας του προβλήματος το μισό επίχωμα και υπέδαφος, το οποίο έχει διαστάσεις 50m×25m. Η γεωμετρία του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Γεωμετρία του διδιάστατου προσομοιώματος που χρησιμοποιείται προς αριθμητική διερεύνηση.

¹ Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Η φόρτιση θεωρείται ομοιόμορφη (200kPa) στη μονοδιάστατη ανάλυση του φαινομένου της στερεοποίησης, ενώ στη διδιάστατη διερεύνηση ακολουθεί τραπεζοειδή κατανομή (ισοδύναμη φόρτιση επιχώματος), με σταθερό φορτίο 200kPa στα πρώτα 10m (από τα αριστερά), το οποίο μειώνεται με κλίση 2:3 ως τα 25m (βλ. Σχήμα 4.1). Στην περίπτωση που η συμπεριφορά του εδάφους μελετάται με την ισότροπη γραμμική ελαστικότητα, θεωρείται ότι η επιφόρτιση τίθεται ταχύτατα, ενώ στην περίπτωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς καθίσταται μεταβλητή με το χρόνο και αυξάνεται με "βήμα" 2 ημερών έως στις 20 ή 60 ημέρες (θα αναφέρεται) από την αρχή του φαινομένου της στερεοποίησης (για την αποφυγή κινητοποίησης της φέρουσας ικανότητας του εδάφους). Με βάση τα άνωθεν είναι εμφανές, ότι στην διδιάστατη ανάλυση το άθροισμα των καθιζήσεων οφείλεται στις άμεσες (πριν από οποιαδήποτε στράγγιση) και εκ στερεοποίησης καθιζήσεις (οι ερπυστικές δεν λαμβάνονται υπόψη).

Το υπέδαφος διακριτοποιήθηκε σε 25 διαδοχικές στρώσεις πάχους 1m έκαστη. Στην περίπτωση της ισότροπης ελαστικότητας όλες οι στρώσεις είχαν τις ίδιες εδαφικές ιδιότητες, ενώ στην περίπτωση της ελαστοπλαστικής κατάστασης (Cam-Clay) οι ιδιότητες διαφέρουν, περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται παρακάτω συναρτήσει του χρησιμοποιούμενου καταστατικού προσομοιώματος. Στα σύνορα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων τοποθετήθηκαν συνθήκες τύπου κύλισης, τόσο κατά τον οριζόντιο όσο και κατά τον κατακόρυφο άξονα. Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες στράγγισης, τέθηκαν στην επιφάνεια του μοντέλου ($p=0$) και στο δεξί όριο ($p=\gamma_w \cdot h$ -υδροστατική κατανομή-) για τη διδιάστατη ανάλυση. Στη μονοδιάστατη ανάλυση στερεοποίησης σύνορο στράγγισης τέθηκε μόνον στην επιφάνεια.

Επίσης, το προσομοίωμα αναλύεται ως πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης (strain plane) και για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 8-κομβικά τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου CPE8, τα οποία δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια για τέτοιου είδους προβλήματα. Επιπρόσθετα, στο υπέδαφος λόγω της παρουσίας του νερού, αλλά και λόγω της προσομοίωσης της φόρτισης του εδάφους ως ταχείας, χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία CPE8P, δηλαδή στοιχεία με τα οποία επιτρέπεται η ενεργοποίηση της πίεσης πόρων στο έδαφος (coupled analyses). Για σκοπούς απλοποίησης της ανάλυσης, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, κατά την αριθμητική προσομοίωση, θεωρείται ότι είναι στην επιφάνεια του εδάφους. Όσον αφορά τα στοιχεία του μοντέλου, θεωρούνται τετραγωνικά πεπερασμένα με την απόσταση των κόμβων να είναι 0.125m. Η υδραυλική διαπερατότητα που έχει το έδαφος τίθεται για ισότροπη και ανισότροπη συμπεριφορά (cross-anisotropic hydraulic conductivity) και στα δύο καταστατικά προσομοιώματα.

Στην αριθμητική διερεύνηση, ο προσδιορισμός των εδαφικών ιδιοτήτων με το βάθος υπολογίζεται με βάση εύλογες παραδοχές, που αφορούν το ειδικό βάρος των "κόκκων" γ_s (ή ρ_s) και το δείκτη πόρων e . Τονίζεται, ότι για τις ελαστικές σταθερές E, ν τίθενται οι τιμές $E=6.75\text{MPa}, E=10.125\text{MPa}$ και $\nu=0.33$, οι οποίες αν αντικατασταθούν στον τύπο του μονοδιάστατου μέτρου συμπίεσης D (βλ. Κεφάλαιο 3) δίνουν $D=10\text{MPa}$ και $D=15\text{MPa}$ αντιστοίχως.

Στη συνέχεια, από τη σχέση υπολογισμού της πυκνότητας (ρ) του εδάφους:

$$\rho = \rho_s \frac{1+w}{1+e} \quad (4.1)$$

για ποσοστό υγρασίας (w) ίσο με μηδέν, εξάγεται ότι:

$$\rho_{dry} = \rho_s \frac{1}{1+e} \quad (4.2)$$

δηλαδή προκύπτει σχέση για τον υπολογισμό της πυκνότητας των στερεών κόκκων του εδάφους.

Επίσης, από τη σχέση:

$$\rho_s w = S_r e \rho_w \quad (4.3)$$

με ($\rho_w = 1.0 \text{ Mgr/m}^3$ η πυκνότητα του νερού) βαθμό κορεσμού εδάφους $S_r = 1$ λαμβάνεται:

$$w_{sat} = \frac{e \rho_w}{\rho_s} \quad (4.4)$$

Όμως, από τη σχέση 4.3 θέτοντας $w = w_{sat}$ και συνδυάζοντας την με τη σχέση 4.2, συνεπάγεται ότι:

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + e \rho_w}{1+e} \quad (4.5)$$

Αντικαθιστώντας την πυκνότητα των κόκκων του εδάφους ρ_s από την εξίσωση 4.2 και υποθέτοντας δείκτη πόρων $e=0.70$, λαμβάνεται η σχέση υπολογισμού της πυκνότητας κορεσμένου εδάφους όπου όλοι οι παράμετροι είναι γνωστοί.

$$\rho_{sat} = \rho_{dry} + \frac{e}{1+e} \rho_w \quad (4.6)$$

Στην συνέχεια, με βάση το ειδικό βάρος κορεσμένου εδάφους γ_{sat} υπολογίζονται οι κατακόρυφες ολικές γεωστατικές τάσεις καθώς και οι ενεργές κατακόρυφες τάσεις σ'_v . Για τον υπολογισμό των οριζόντιων ενεργών τάσεων σ'_h , τίθεται συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων K_o ίσος με 0.5 για την περίπτωση της ισότροπης ελαστικότητας. Όσον αφορά, την περίπτωση του ελαστοπλαστικού καταστατικού προσομοιώματος ο συντελεστής ωθήσεων λαμβάνει διαφορετικές τιμές (βλ. παρακάτω). Ακολουθως, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του καταστατικού

μοντέλου Cam-Clay, υπολογίζεται η μέση ενεργός τάση p' και η αποκλίνουσα τάση q στη βάση της κάθε στρώσης του υπεδάφους με βάση τις σχέσεις:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (4.7)$$

και

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (4.8)$$

Η σταθερά του εδάφους M^2 υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση, με βάση μια αντιπροσωπευτική γωνία τριβής για έκαστη εδαφική στρώση:

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (4.9)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παράμετρος κράτυνσης p'_m του μοντέλου Cam-Clay με βάση την συνάρτηση διαρροής:

$$p'_m = \frac{q^2 + M^2 (p')^2}{M^2 p'} \quad (4.10)$$

Αναφέρεται, ότι ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus λαμβάνει ως παράμετρο κράτυνσης το μέσο του μεγάλου άξονα της επιφάνειας διαρροής $a = \frac{p'_m}{2}$. Σημειώνεται επίσης, ότι κατά την αριθμητική προσομοίωση όλο το υπέδαφος θεωρείται υπερστερεοποιημένο με δείκτη προφόρτισης $OCR = 2$ και $OCR = 4$, ενώ η κλίση γραμμής της κρίσιμης κατάστασης είναι $M = 1.00$. Οι συντελεστές οριζόντιων ωθήσεων για τις άνωθεν τιμές συντελεστή προφόρτισης λαμβάνονται 0.707 και 1 αντιστοίχως. Οι σταθερές του εδάφους λ και κ υπολογίζονται από τους δείκτες C_c και C_r με βάση τις σχέσεις:

$$\lambda = \frac{C_c}{\ln 10} \quad (4.11)$$

$$\kappa = \frac{C_r}{\ln 10}$$

Ο δείκτης πόρων υπολογίζεται για κάθε στρώση με βάση τη σχέση:

$$e = e_0 - \lambda \frac{p'}{100} \quad (4.12)$$

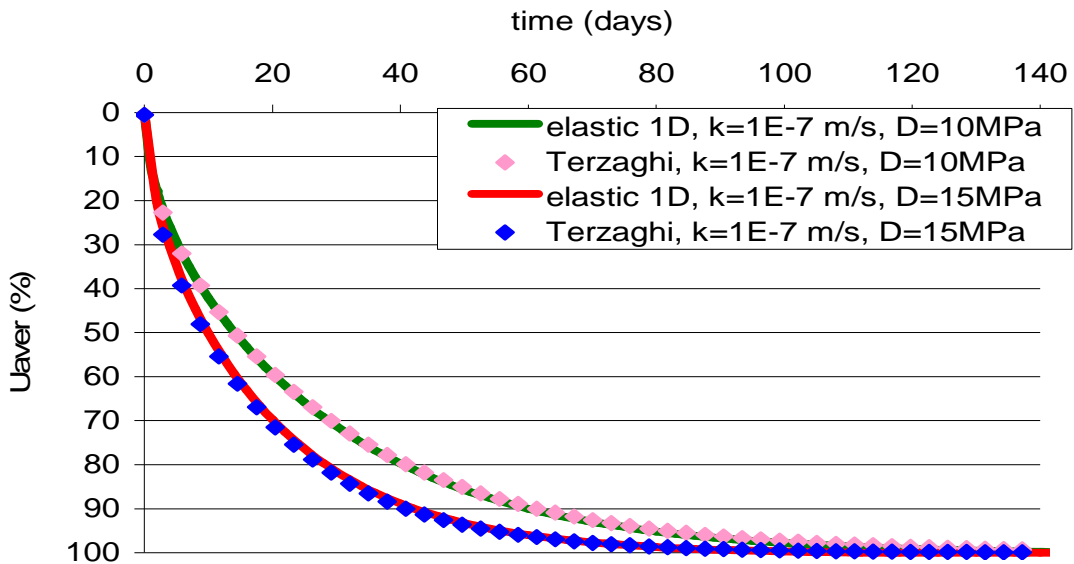
Ακολούθως, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με βάση την ισότροπη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά και στη συνέχεια, αναλύονται τα αποτελέσματα του ελαστοπλαστικού προσομοιώματος Cam-Clay.

² Στην περίπτωση του τριαξονικού εφελκυσμού η παράμετρος M υπολογίζεται διαφορετικά.

4.3 Αριθμητική διερεύνηση με χρήση της ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας

4.3.1 Μονοδιάστατη στερεοποίηση - θεωρητική σύγκριση (benchmarking)

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα οι λύσεις που προκύπτουν με βάση την αναλυτική επίλυση μονοδιάστατης στερεοποίησης (Terzaghi) και οι λύσεις που εξάγονται από τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση του καταστατικού προσομοιώματος της ισότροπης ελαστικότητας, στο οποίο στηρίζεται και η θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης του Terzaghi. Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται για $D=10\text{MPa}$ και $D=15\text{MPa}$ οι αναλύσεις για $k=10^{-7}\text{m/s}$ και στο Σχήμα 4.3 οι αναλύσεις για $k=10^{-8}\text{m/s}$, προκειμένου να διερευνηθεί επιπρόσθετα, κατά πόσον η μεταβολή της διαπερατότητας εξαρτάται από τη συμπιεστότητα του εδάφους.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα σύγκρισης αναλυτικής επίλυσης (Terzaghi) και αριθμητική ανάλυσης, για $D=10\text{MPa}$ και $D=15\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}\text{m/s}$.

Με βάση το άνωθεν διάγραμμα είναι προφανές ότι υπάρχει ιδιαίτερα καλή προσέγγιση μεταξύ αριθμητικής επίλυσης και αναλυτικής λύσης της μονοδιάστατης θεωρίας στερεοποίησης του Terzaghi.

Επιπρόσθετα, στον κάτωθι Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές των χρόνων που αντιστοιχούν στο 25%, 50% και 90% του χρόνου στερεοποίησης.

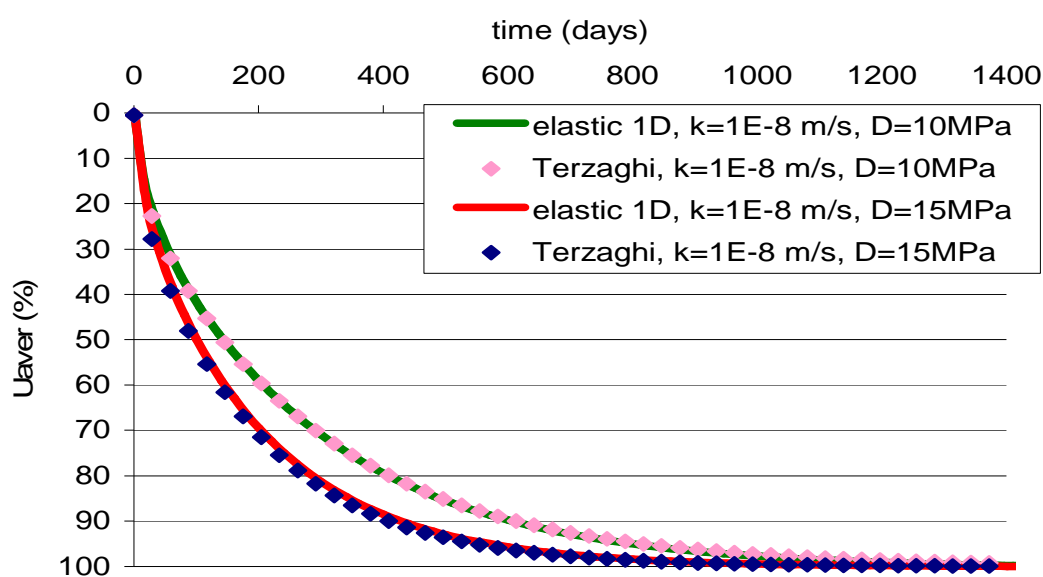
Πίνακας 4.1 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στερεοποίησης στο 25%, 50% και 90% της εξέλιξης της στερεοποίησης, για $D=10\text{MPa}$ και $D=15\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}\text{m/s}$.

$k=10^{-7}\text{m/s}$				
Συμπιεστότητα	Μέθοδος επίλυσης (1D)	$t_{25\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$D = 10\text{MPa}$	Αναλυτική (Terzaghi)	3.6	14	61
	elastic 1D	4	14	60
$D = 15\text{MPa}$	Αναλυτική (Terzaghi)	2.4	9.3	40.6
	elastic 1D	3	10	41

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.1, για μικρούς χρόνους στερεοποίησης ($t_{25\%}$), οι αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικής μεθόδου (Terzaghi) και αριθμητικής επίλυσης (elastic 1D) είναι αρκετά αυξημένες (10%), ενώ όσο εξελίσσεται το φαινόμενο της στερεοποίησης, δηλαδή για μεγαλύτερους χρόνους στερεοποίησης ($t_{50\%}, t_{90\%}$), η σύγκλιση γίνεται καλύτερη. Οι διαφορές οφείλονται κυρίως λόγω της αριθμητικής προσεγγίσεως μεταξύ των δύο μεθόδων επίλυσης. Σημειώνεται ότι η θεωρητική λύση του Terzaghi δεν συνυπολογίζει την όποια επιρροή του ίδιου βάρους της εδαφικής μάζας.

Όσον αφορά, τις χρονικές διαφορές της εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης για διαφορετικά μεγέθη του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης, είναι εμφανές ότι για μεγαλύτερη συμπιεστότητα η στερεοποίηση επιτυγχάνεται βραδύτερα. Μάλιστα, η μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης της στερεοποίησης είναι κατά προσέγγιση αντιστρόφως ανάλογη με την αύξηση που επιδέχεται το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης.

Στη συνέχεια, όπως αναφέρεται παραπάνω, ακολουθεί στο Σχήμα 4.3 η συσχέτιση μεταξύ της αναλυτικής επίλυσης (Terzaghi) και της αριθμητικής ανάλυσης για $k=10^{-8}$ m/s με αντίστοιχα μέτρα μονοδιάστατης συμπίεσης $D=10$ MPa και $D=15$ MPa .



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα σύγκρισης αναλυτικής επίλυσης (Terzaghi) και αριθμητική ανάλυσης, για $D=10$ MPa και $D=15$ MPa με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s.

Όπως και στην άνωθεν συσχέτιση για $k=10^{-7}$ m/s, είναι προφανές ότι υπάρχει ιδιαίτερα καλή προσέγγιση μεταξύ αριθμητικής επίλυσης και αναλυτικής λύσης και για $k=10^{-8}$ m/s . Έπειτα, ακολουθεί ενδεικτικός Πίνακας 4.2 στον οποίο παρουσιάζεται κατ' αναλογία με πριν η χρονική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μεθόδων.

Πίνακας 4.2 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στερεοποίησης στο 25%, 50% και 90% της εξέλιξης της στερεοποίησης, για $D=10\text{MPa}$ και $D=15\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$.

$k=10^{-8}\text{m/s}$				
Συμπίεστικότητα	Μέθοδος επίλυσης (1D)	$t_{25\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$D = 10\text{MPa}$	Αναλυτική (Terzaghi)	36	140	610
	FEA-Ισότροπη ελαστικότητα	43	143	606
$D = 15\text{MPa}$	Αναλυτική (Terzaghi)	24	93.3	406.6
	FEA-Ισότροπη ελαστικότητα	31	98	403

Με βάση τον Πίνακα 4.2, στην περίπτωση που $k=10^{-8}\text{m/s}$, οι χρονικές διαφοροποιήσεις μεταξύ αναλυτικής (Terzaghi) και αριθμητικής επίλυσης είναι όμοιες με την προηγούμενη συσχέτιση, καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Επίσης, συγκρίνοντας τις χρονικές διαφορές στην ανάλυση για $k=10^{-8}\text{m/s}$, ανάμεσα στις δύο διαφορετικές τιμές της συμπίεστικότητας, είναι εμφανές ότι ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα που αναφέρονται παραπάνω για $k=10^{-7}\text{m/s}$.

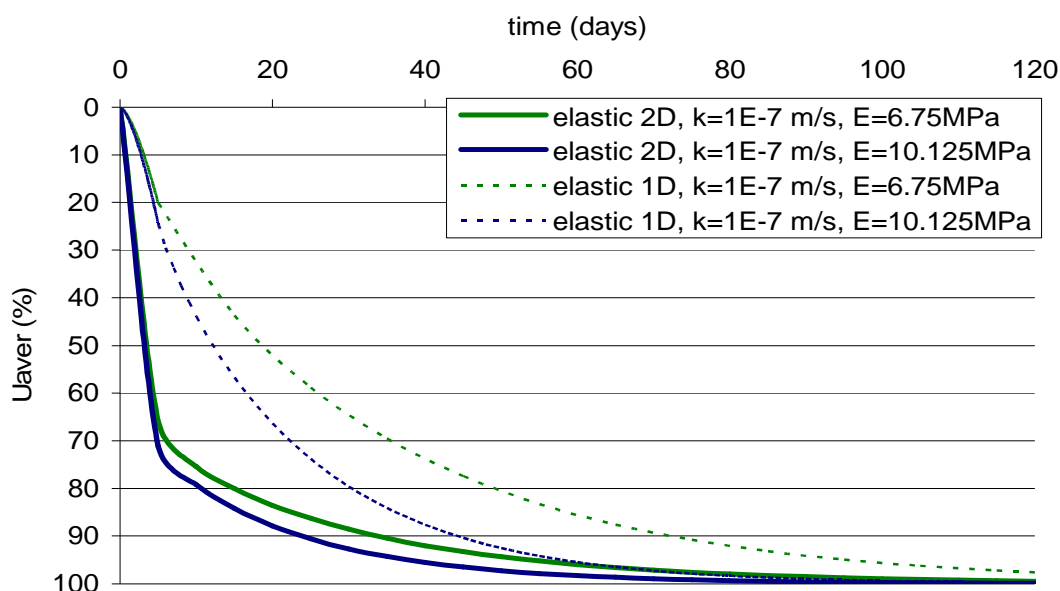
Πέραν των διαφορών που προκύπτουν λόγω των διαφορετικών μέτρων μονοδιάστατης συμπίεσης, είναι προφανές ότι η επιρροή της υδραυλικής διαπερατότητας επηρεάζει πολύ σημαντικά την χρονική εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση ή μείωση μίας τάξης μεγέθους στην υδραυλική διαπερατότητα συνεπάγεται μείωση ή αύξηση του χρόνου στερεοποίησης κατά 10 φορές. Στην αναλυτική επίλυση η αναλογία αυτή παραμένει σταθερή για όλους τους χρόνους στερεοποίησης, ενώ στην επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία ισχύει προσεγγιστικά.

Αξίζει να σημειωθεί, ερμηνεύοντας ποιοτικά αλλά και ποσοτικά τα σχήματα 4.2 και 4.3 ότι αρχικά το φαινόμενο της στερεοποίησης εξελίσσεται ταχύτατα στην αρχή, ιδιαίτερα για χρόνους μικρότερους του $t_{25\%}$, ενώ στη συνέχεια αναπτύσσεται με ολοένα και βραδύτερο ρυθμό μέχρι την ολοκλήρωσή του, πρακτικά αυτό συμβαίνει για χρόνους στερεοποίησης περίπου $t_{90\%}$. Ο κύριος λόγος για τον οποίο συμβαίνει το άνωθεν, είναι γιατί μετά την επιβολή της επιφόρτισης παρουσιάζονται πολύ μεγάλες υδραυλικές κλίσεις όπου υπάρχουν συνοριακές συνθήκες στράγγισης, αλλά μηδενικές κλίσεις όπου υπάρχει αδιαπέρατο όριο. Κατά συνέπεια, τα στραγγιζόμενα όρια του στρώματος μεταβάλλουν γρήγορα τον όγκο τους, ενώ μηδενική μεταβολή του όγκου χαρακτηρίζει τα εδαφικά στοιχεία πλησίον του αδιαπέρατου ορίου.

4.3.2 Διδιάστατη ανάλυση

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με ισότροπη και γραμμική συμπεριφορά, οι οποίες αντιστοιχούν στη μισή επιφάνεια φόρτισης που διερευνήθηκε στη μονοδιάστατη ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα στα σχήματα 4.4 και 4.5, συγκρίνονται σε κοινά διαγράμματα οι αναλύσεις για $k=10^{-7}\text{m/s}$ και $k=10^{-8}\text{m/s}$ με μέτρα ελαστικότητας $E=6.75\text{MPa}$ και $E=10.125\text{MPa}$, τα οποία αντιστοιχούν σε μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $D=10\text{MPa}$ και $D=15\text{MPa}$ αντιστοίχως όταν $\nu=0.33$. Τονίζεται, ότι η επιφόρτιση στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν ταχύτατη (5 και 10 ημέρες διάρκεια κατασκευής

αντίστοιχα για τις αναλύσεις με $k=10^{-7}$ m/s και $k=10^{-8}$ m/s) σε αντίθεση με άλλες περιπτώσεις αριθμητικής διερεύνησης που αναλύονται παρακάτω. Επομένως, είναι προφανές ότι τα κάτωθεν διαγράμματα προκύπτουν από το άθροισμα των άμεσων καθιζήσεων (ελαστική καθίζηση που προκαλείται πριν από οποιαδήποτε στράγγιση) και των καθιζήσεων εκ στερεοποίησης (2D) (ο ερπυσμός δεν λαμβάνεται υπόψη).



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα σύγκρισης μονοδιάστατης και διδιάστατης επίλυσης, για $E=6.75\text{MPa}$ και $E=10.125\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s . Διάρκεια κατασκευής 5 ημέρες για μονοδιάστατη και διδιάστατη αριθμητική ανάλυση.

Όπως προκύπτει από το άνωθεν Σχήμα 4.5, είναι εμφανές ότι λόγω της μεγαλύτερης συμπίεστικότητας το φαινόμενο της στερεοποίησης επιβραδύνεται και στη διδιάστατη ανάλυση, δηλαδή η στερεοποίηση διαρκεί περισσότερο για $t_{90\%}$ όταν $E=6.75\text{MPa}$ αντί της ανάλυσης με $E=10.125\text{MPa}$ κατά περίπου 40%. Στον κάτωθι Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χρονικές τιμές που αντιστοιχούν στο 50% και 90% του λόγου κατακόρυφων μετακινήσεων.

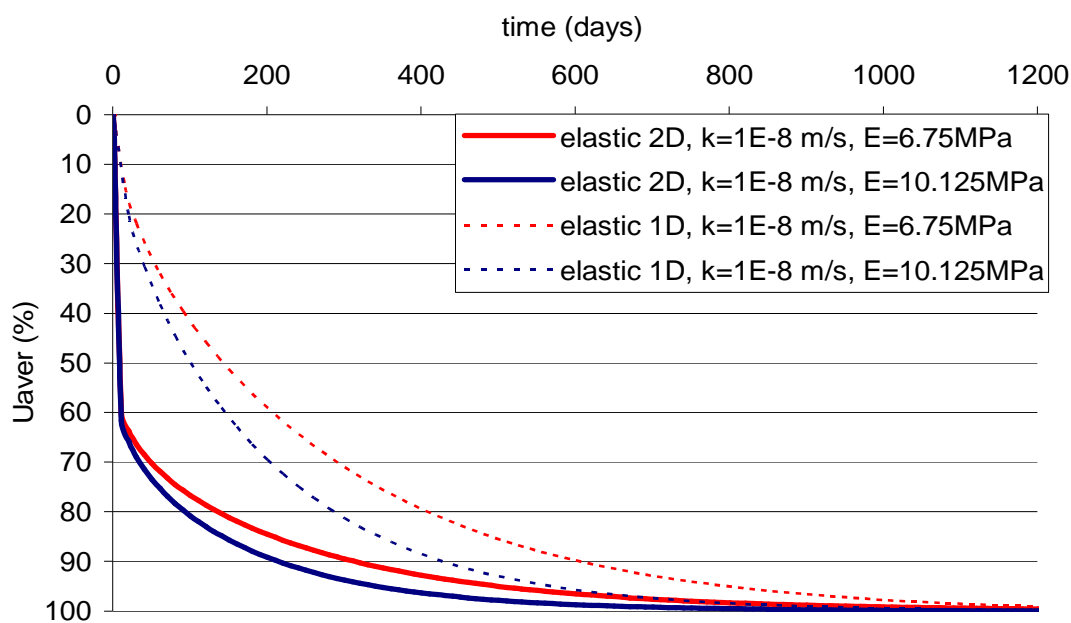
Πίνακας 4.3 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στο 50% και 90% του λόγου κατακόρυφων μετακινήσεων³, για $E=6.75\text{MPa}$ και $E=10.125\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s . Διάρκεια κατασκευής 5 ημέρες για μονοδιάστατη και διδιάστατη αριθμητική ανάλυση. (για Terzaghi η φόρτιση είναι σε χρόνο 0 days)

$k=10^{-7}$ m/s			
Ελαστικές σταθερές	Τύπος ανάλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$E=6.75\text{MPa}$, $\nu=0.33$	Αναλυτική (Terzaghi)	14	61
	elastic 1D, $D=10\text{MPa}$	19	73
	elastic 2D	3.8	35
$E=10.125\text{MPa}$, $\nu=0.33$	Αναλυτική (Terzaghi)	9.3	40.6
	elastic 1D, $D=15\text{MPa}$	12	44
	elastic 2D	3.3	25

³ Οι λόγοι των επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων αναφέρονται στον άξονα της επιφόρτισης για τις αριθμητικές αναλύσεις της διδιάστατης στερεοποίησης.

Συγκρίνοντας τις άνωθεν τιμές του Πίνακα 4.3 αλλά και παρατηρώντας το Σχήμα 4.4, όπως ήταν αναμενόμενο, το φαινόμενο της στερεοποίησης στη διδιάστατη (2D) ανάλυση επιταχύνεται λόγω της διδιάστατης ροής που συμβαίνει κατά την εξάιτση που επιβάλλεται λόγω του επιχώματος. Κατά συνέπεια αυτού, όταν αυξάνεται ο λόγος της μονοδιάστατης προς τη διδιάστατη επιφάνεια φόρτισης το φαινόμενο της στερεοποίησης εξελίσσεται ταχύτερα. Πιο συγκεκριμένα, το διδιάστατο φαινόμενο εμφανίζει μικρότερους χρόνους $t_{90\%}$ κατά 55% περίπου, δηλαδή όταν προσεγγίζεται πρακτικά ο λόγος κατακόρυφων μετακινήσεων $U_{aver}=90\%$.

Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι λόγω της ταχύτερης φόρτισης, που υφίσταται η συγκεκριμένη προσομοίωση στη διδιάστατη ανάλυση, παρατηρείται στο Σχήμα 4.4 μια σχεδόν έντονη “γραμμική” αύξηση της στερεοποίησης σε συνάρτηση με το χρόνο (ανάπτυξη άμεσων καθιζήσεων). Αυτή οφείλεται στην απότομη αλλαγή του όγκου των στοιχείων υπό πρακτικά “αστράγγιστες” συνθήκες, το οποίο συνεπάγεται άμεσες και πολύ υψηλές υδραυλικές κλίσεις στα στραγγισμένα σύνορα. Βέβαια, στην περίπτωση που $E=6.75\text{MPa}$, η “γραμμική” αύξηση συμβαίνει μέχρι τις 5 ημέρες (όσο διαρκεί η κατασκευή) μετά την εξάιτση που αντιστοιχεί σε $U_{aver}=66\%$, ενώ για $E=10.125\text{MPa}$ αντιστοιχεί σε $U_{aver}=72\%$. Στη συνέχεια, ακολουθεί η συσχέτιση των αριθμητικών αναλύσεων για $k=10^{-8}\text{m/s}$.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα σύγκρισης μονοδιάστατης και διδιάστατης επίλυσης, για $E=6.75\text{MPa}$ και $E=10.125\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 10 ημέρες για μονοδιάστατη και διδιάστατη αριθμητική ανάλυση.

Όμοια και στην περίπτωση για $k=10^{-8}\text{m/s}$, είναι προφανές ότι η μείωση συμπιεστότητας επιταχύνει το φαινόμενο της στερεοποίησης, ενώ παράλληλα λόγω της διδιάστατης ροής υπάρχει μείωση του χρόνου της στερεοποίησης σε σχέση με τη μονοδιάστατη κατάσταση. Αναλυτικότερα, παρατίθενται παρακάτω στον Πίνακα 4.4 οι χρόνοι που αντιστοιχούν στο $U_{aver}=50\%$ και $U_{aver}=90\%$.

Πίνακας 4.4 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στο 50% και 90% του λόγου κατακόρυφων μετακινήσεων, για $E=6.75\text{MPa}$ και $E=10.125\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 10 ημέρες για μονοδιάστατη και διδιάστατη αριθμητική ανάλυση. (για Terzaghi η φόρτιση είναι σε χρόνο 0 days)

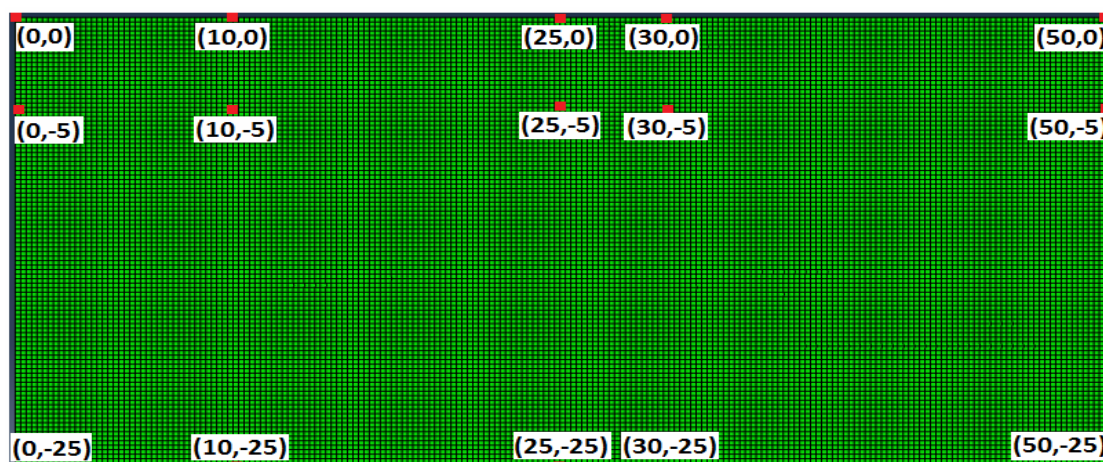
$k=10^{-8}\text{m/s}$			
Ελαστικές σταθερές	Τύπος ανάλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$E=6.75\text{MPa}$, $\nu=0.33$	Αναλυτική (Terzaghi)	140	610
	elastic 1D, $D=10\text{MPa}$	144	612
	elastic 2D	9.2	310
$E=10.125\text{MPa}$, $\nu=0.33$	Αναλυτική (Terzaghi)	93.3	406.6
	elastic 1D, $D=15\text{MPa}$	99.1	408.9
	elastic 2D	8.9	210

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.4, ο λόγος των τιμών για $t_{90\%}$ μεταξύ των δύο μέτρων ελαστικότητας είναι 1.48, δηλαδή η στερεοποίηση “τελειώνει” 48% αργότερα για $E=6.75\text{MPa}$ σε σχέση με $E=10.125\text{MPa}$. Συγκρίνοντας τη μονοδιάστατη και διδιάστατη κατάσταση εξάγεται ότι υπάρχει ταχύτερη ολοκλήρωση της στερεοποίησης κατά περίπου 50%. Όσον αφορά, τη συσχέτιση των δύο υδραυλικών διαπερατοτήτων $k=10^{-7}\text{m/s}$ και $k=10^{-8}\text{m/s}$, παρατηρείται καθυστέρηση του φαινομένου της στερεοποίησης περίπου κατά 8.5 φορές στο χρόνο $t_{90\%}$, σε αντίθεση με τη μονοδιάστατη που ήταν δεκαπλάσια.

Κατά αναλογία ισχύουν και τα υπόλοιπα συμπεράσματα που αναφέρονται παραπάνω για τη διδιάστατη ανάλυση με $k=10^{-7}\text{m/s}$.

4.3.3 Κατακόρυφες μετακινήσεις μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης

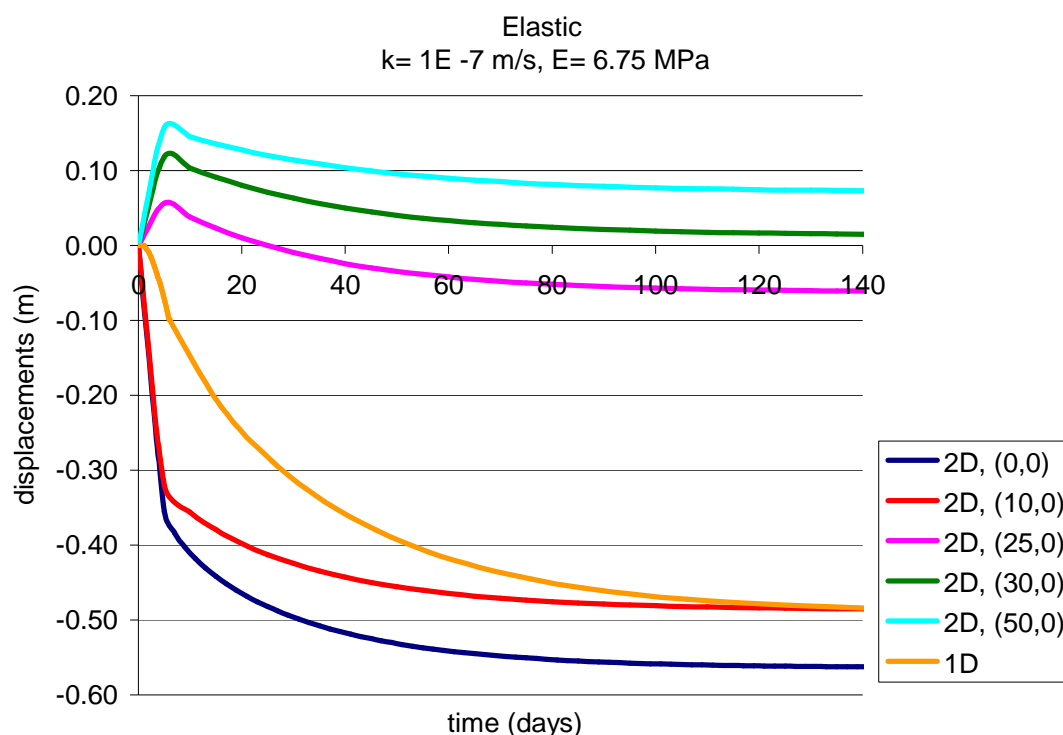
Ακολουθως, παρουσιάζονται οι μετακινήσεις⁴ που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες [(0,0);(10,0);(25,0);(30,0);(50,0)] των σημείων που φαίνονται στο Σχήμα 4.6. Αρχικά, παρουσιάζονται οι μετακινήσεις που αντιστοιχούν για $E=6.75\text{MPa}$ με υδραυλικές διαπερατότητες $k=10^{-7}\text{m/s}$ (Σχήμα 4.7) και $k=10^{-8}\text{m/s}$ (Σχήμα 4.7), ενώ στη συνέχεια παρατίθενται αντίστοιχες αναλύσεις για $E=10.125\text{MPa}$.



Σχήμα 4.6 Συντεταγμένες σημείων (κόκκινες κουκκίδες) που μελετώνται οι μετακινήσεις.

⁴ Ο έλεγχος των οριζόντιων μετακινήσεων δεν αναλύεται στο παρόν Κεφάλαιο 4.

Σημειώνεται, ότι στα ακόλουθα διάγραμμα οι διογκώσεις εμφανίζονται σχετικά αυξημένες για μεγάλες αποστάσεις από τον πόδα της επιφόρτισης. Αυτό, οφείλεται στο συμβιβαστό των παραμορφώσεων (σημειώνεται ότι η επιφόρτιση δεν έχει επιβληθεί με χαρακτηριστικά επιχώματος, δηλαδή δεν έχει ελαστικές σταθερές E, ν , όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ανάστροφων αναλύσεων που ακολουθούν σε επόμενο κεφάλαιο).

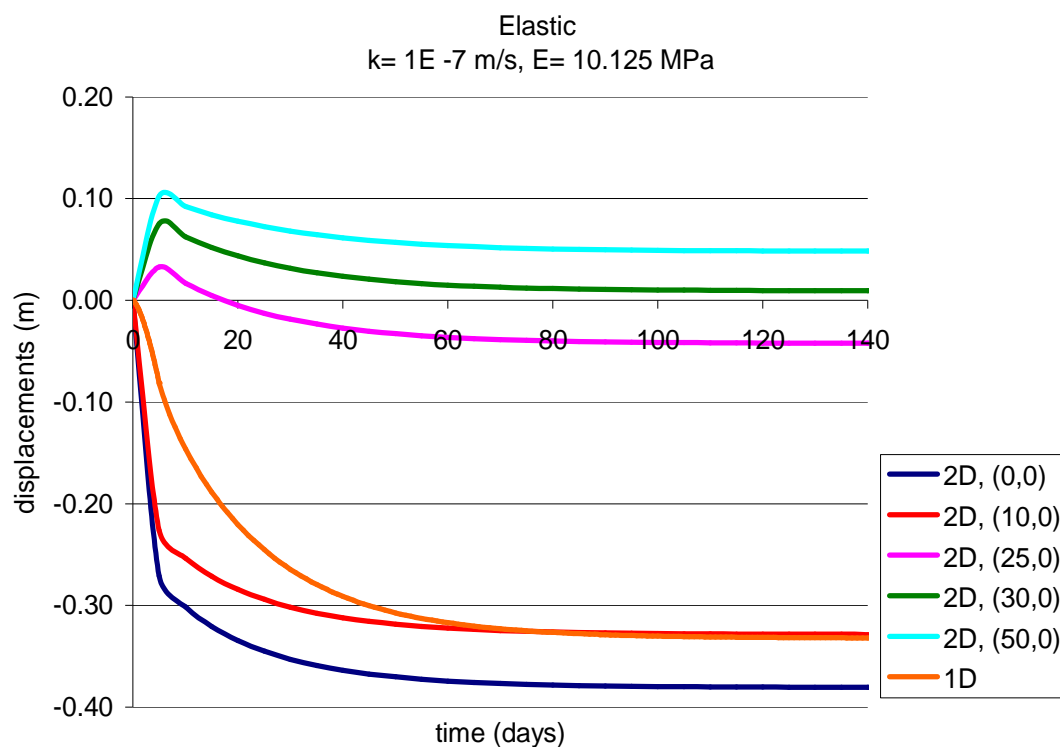


Σχήμα 4.7 Διάγραμμα μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης επίλυσης, για $E=6.75\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}\text{ m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 5 ημέρες για αριθμητική ανάλυση.

Με βάση το Σχήμα 4.7, οι καθιζήσεις της μονοδιάστατης συμπίεσης (-0.50m) είναι μικρότερες από της διδιάστατης (-0.56m) κατά 11% περίπου. Όσον αφορά τα υπόλοιπα σημεία, με την απομάκρυνση από τον άξονα της επιφόρτισης οι καθιζήσεις ελαχιστοποιούνται, έως ότου σε μικρή απόσταση από τον πόδα της επιφόρτισης να εμφανίζονται διογκώσεις. Μάλιστα, οι διογκώσεις έχουν αυξητικό χαρακτήρα όσο απομακρύνονται οι συντεταγμένες από το πέρασ της επιφόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το σημείο που είναι στο τέλος (25,0) της φόρτισης αρχικά αναπτύσσεται με διογκώσεις και έπειτα με καθιζήσεις. Οι αυξημένες διογκώσεις μακριά από τον πόδα, όπως αναφέρεται και άνωθεν, οφείλονται στις σχέσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων.

Τονίζεται, ότι αρχικά υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες μετακινήσεις για τα σημεία της διδιάστατης ανάλυσης, αυτό οφείλεται στην πολύ ταχεία φόρτιση (5 ημέρες κατασκευής) που δημιουργεί συνθήκες "αστράγγιστες" και παραμορφώσεις υπό μηδενική σχεδόν ογκομετρική παραμόρφωση, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πολύ υψηλές διογκώσεις-καθιζήσεις στην προσπάθεια των στοιχείων να έχουν

$d\varepsilon_{vol} = 0$. Έπειτα, λόγω της στερεοποίησης υπάρχει μείωση των διογκώσεων αφού αναπτύσσονται στραγγισμένες συνθήκες, με υψηλές υδραυλικές κλίσεις στα διαπερατά σύνορα. Παράλληλα, οι καθιζήσεις λόγω της στερεοποίησης μεταβάλλονται χρονικά εξαιτίας της εκτόνωσης των υπερπιέσεων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι καθιζήσεις εκ στερεοποίησης στη διδιάστατη ανάλυση είναι μικρότερες από τις μονοδιάστατες καθιζήσεις στερεοποίησης.

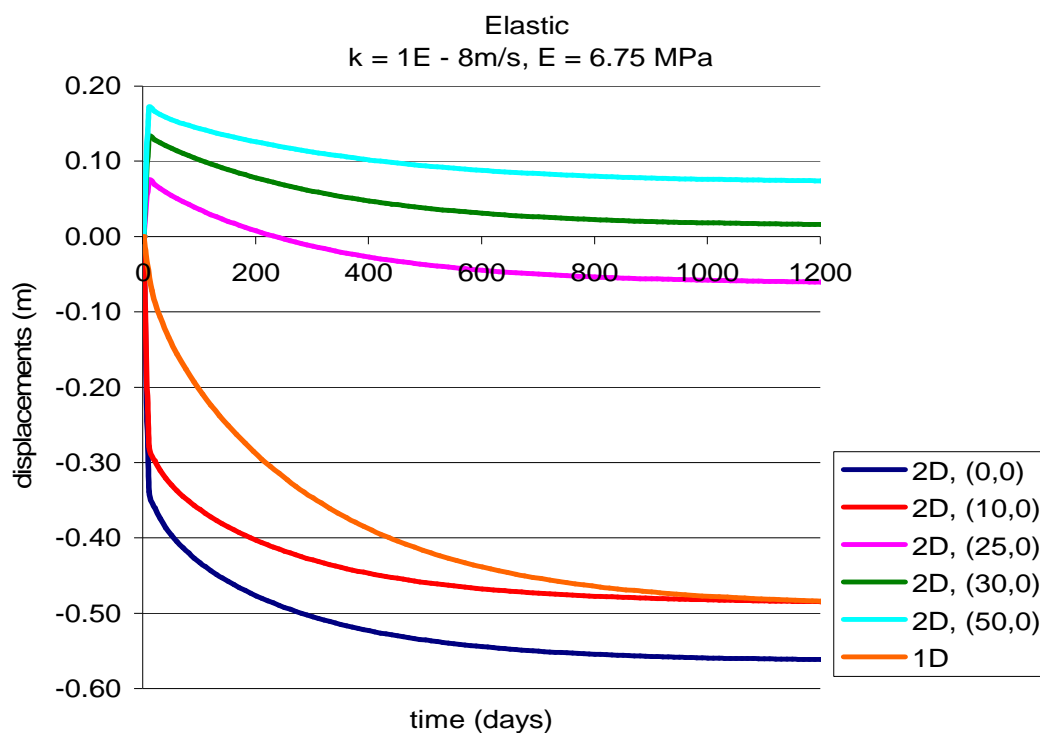


Σχήμα 4.8 Διάγραμμα μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης επίλυσης, για $E=10.125\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}\text{m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 5 ημέρες για αριθμητική ανάλυση.

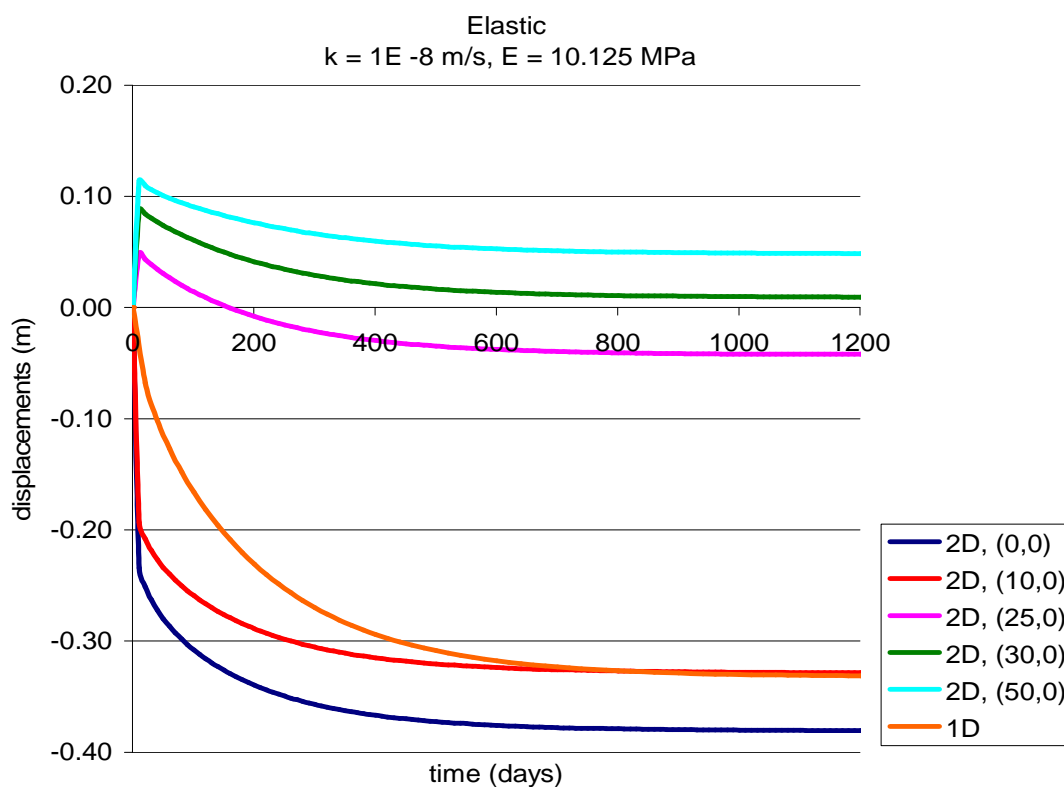
Παρατηρώντας το Σχήμα 4.8, καθίσταται εμφανές ότι η μονοδιάστατη ανάλυση προβλέπει μικρότερες καθιζήσεις (-0.33m) σε σχέση με τη διδιάστατη (-0.37m). Σε σύγκριση με την προηγούμενη ανάλυση, τόσο οι καθιζήσεις όσο και οι διογκώσεις είναι μικρότερες κατά απόλυτη τιμή, διαφορά που οφείλεται στη μικρότερη συμπίεστικότητα. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται να υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των λόγων των μέτρων ελαστικότητας σε σχέση αντίστροφης αναλογίας με τις καθιζήσεις και τις διογκώσεις. Αυτό συμβαίνει στο συγκεκριμένο παράδειγμα λόγω θεώρησης της ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας. (όμοια με την προηγούμενη ανάλυση ισχύουν και τα υπόλοιπα συμπεράσματα)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα σχήματα 4.9 και 4.10 που αφορούν τις άνωθεν επιλύσεις αλλά με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$. Αναλύοντας τις ακόλουθες περιπτώσεις, είναι αξιοσημείωτο ότι τα μεγέθη των καθιζήσεων και διογκώσεων δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της υδραυλικής διαπερατότητας, παρά μόνο υπάρχει χρονική μεταβολή της εξέλιξης της στερεοποίησης. Παρά ταύτα, όπως αναφέρεται και παραπάνω αυτό οφείλεται στην ισότροπη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά. Τονίζεται, ότι στις περιπτώσεις με ισότροπη γραμμικώς

ελαστική συμπεριφορά όταν υφίσταται χρονικά μεταβαλλόμενη επιβολή της επιφόρτισης, λόγω της γραμμικής συμπεριφοράς οι τελικές καθιζήσεις εξάγονται μέσω επαλληλίας.



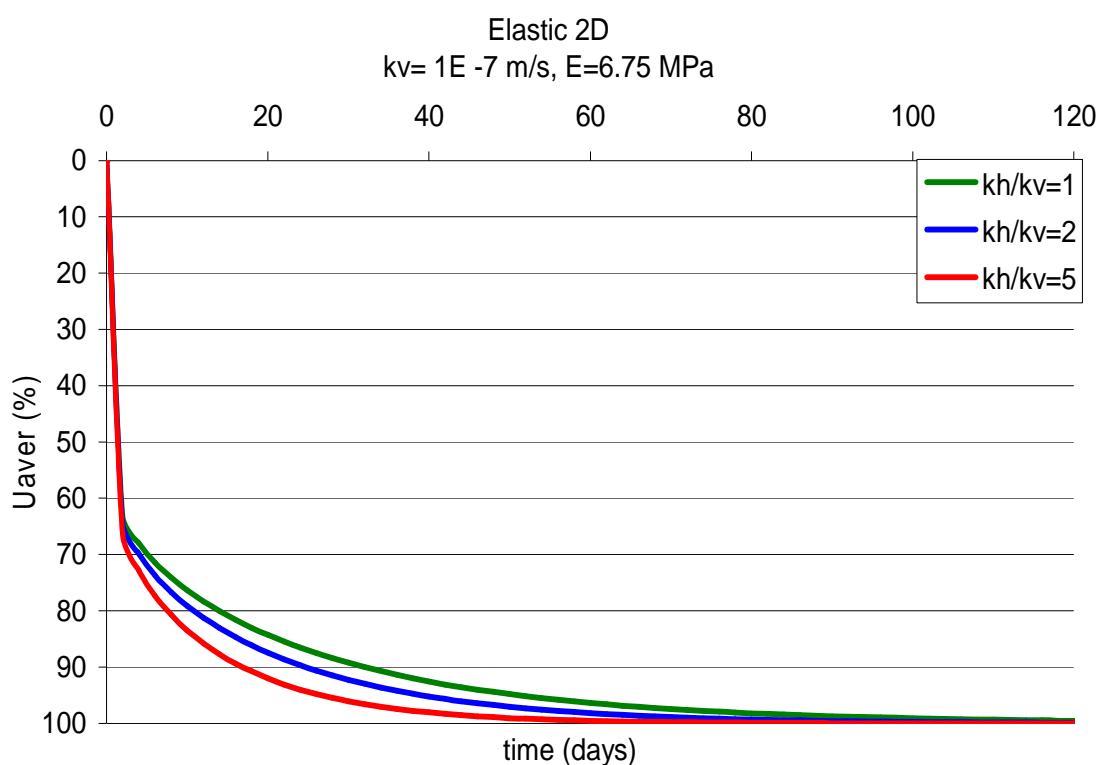
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης επίλυσης, για $E=6.75\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{ m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 10 ημέρες για διδιάστατη αριθμητική ανάλυση.



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης επίλυσης, για $E=10.125\text{MPa}$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{ m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 10 ημέρες για διδιάστατη αριθμητική ανάλυση.

4.3.4 Ανισότροπη υδραυλική διαπερατότητα στη διδιάστατη στερεοποίηση

Στις προηγούμενες ενότητες, διερευνήθηκαν οι μονοδιάστατες και διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις υπό ισότροπο ταυυστή υδραυλικών διαπερατοτήτων επομένως, κρίνεται σκόπιμο να επιτευχθεί αριθμητική διερεύνηση με τη μεταβολή του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης διαπερατότητας. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται σε κοινό διάγραμμα οι αναλύσεις για ισότροπη και ανισότροπη συμπεριφορά, με λόγους $k_h/k_v=2$ και $k_h/k_v=5$, για $k_v=10^{-7}$ m/s (Σχήμα 4.11) και $k_v=10^{-8}$ m/s (Σχήμα 4.12). Οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος τέθηκαν όμοιες με την ανάλυση για $E=6.75$ MPa .



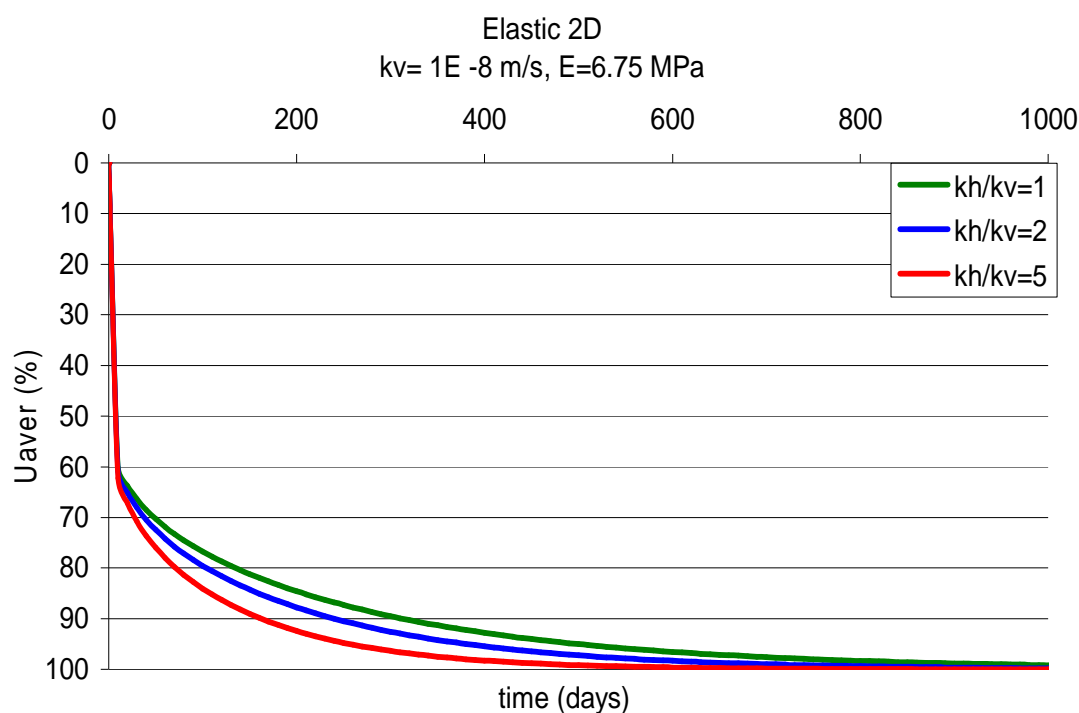
Σχήμα 4.11 Σύγκριση διδιάστατης ανάλυσης, για $E=6.75$ MPa με λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα 1,2 και 5, όταν η κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα είναι $k_v=10^{-7}$ m/s . Διάρκεια κατασκευής 2 ημέρες.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.11, όσο αυξάνεται ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα το φαινόμενο της στερεοποίησης εξελίσσεται ταχύτερα. Βέβαια, ο αρχικός κλάδος του άνωθεν διαγράμματος λόγω της πολύ γρήγορης (αλλά και χρονικά μεταβαλλόμενης) φόρτισης προκαλεί σχεδόν ομοιόμορφη μεταβολή για όλους τους λόγους διαπερατοτήτων. Ακολούθως, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5 οι χρόνοι των λόγων για τις κατακόρυφες μετακινήσεις της παραπάνω ανάλυσης.

Πίνακας 4.5 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στο 50% και 90% του λόγου κατακόρυφων μετακινήσεων, για $E=6.75\text{MPa}$ με λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα 1,2 και 5, όταν η κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα είναι $k_v=10^{-7}\text{m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 2 ημέρες.

$k_v=10^{-7}\text{m/s}$		
Ελαστικές σταθερές	elastic 2D	$t_{90\%}$ (days)
$E=6.75\text{MPa}$, $\nu=0.33$	$k_h/k_v=1$	33
	$k_h/k_v=2$	27.2
	$k_h/k_v=5$	20.5

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 4.5 εξάγεται, ότι σε σχέση με την ισότροπη συμπεριφορά υπάρχει μείωση του χρόνου $t_{90\%}$ κατά 15% όταν $k_h/k_v=2$, ενώ όταν $k_h/k_v=5$ η διαφορά κυμαίνεται στο 36%. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι αναλύσεις για $k_v=10^{-8}\text{m/s}$ στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12 Σύγκριση διδιάστατης ανάλυσης, για $E=6.75\text{MPa}$ με λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα 1,2 και 5, όταν η κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα είναι $k_v=10^{-8}\text{m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 10 ημέρες.

Όπως ήταν αναμενόμενο και στην ανάλυση για $k_v=10^{-8}\text{m/s}$ υπάρχει μείωση του χρόνου της στερεοποίησης. Στον παρακάτω Πίνακα 4.6 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 4.6 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στο 50% και 90% του λόγου κατακόρυφων μετακινήσεων D/D_{max} , για $E=6.75\text{MPa}$ με λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα 1,2 και 5, όταν η κατακόρυφη υδραυλική διαπερατότητα είναι $k_v=10^{-8}\text{m/s}$. Διάρκεια κατασκευής 10 ημέρες.

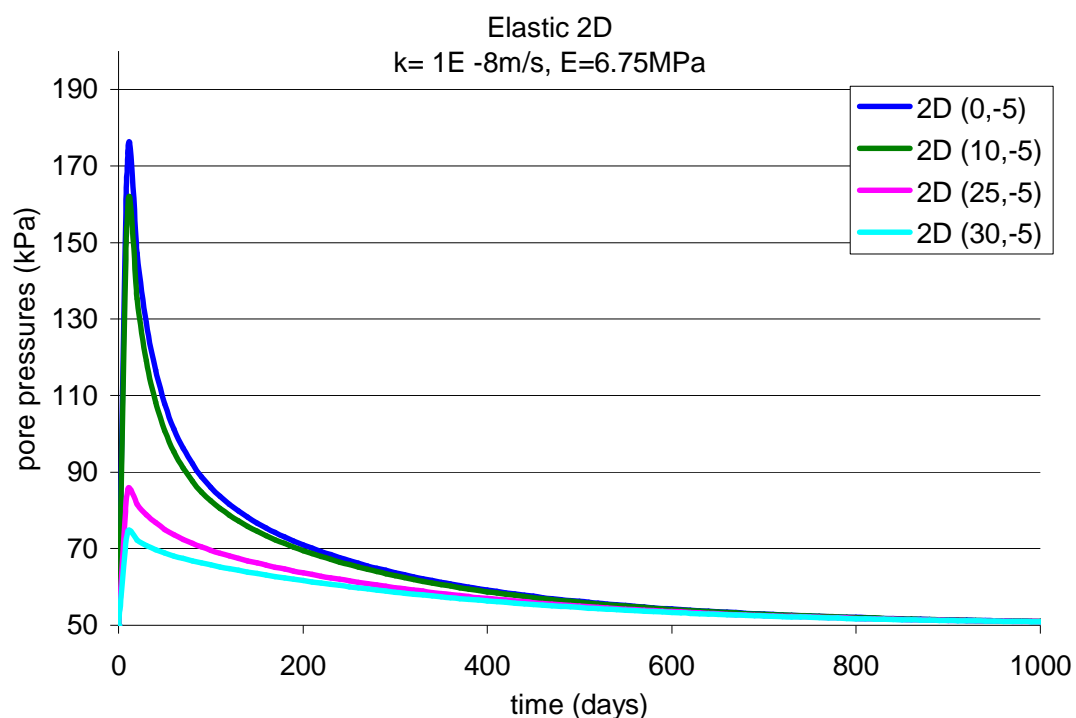
$k_v=10^{-8}\text{m/s}$		
Ελαστικές σταθερές	elastic 2D	$t_{90\%}$ (days)
$E=6.75\text{MPa}, \nu=0.33$	$k_h/k_v=1$	310
	$k_h/k_v=2$	270
	$k_h/k_v=5$	190

Η μείωση του χρόνου $t_{90\%}$ σε σύγκριση με την ισότροπη κατάσταση είναι προσεγγιστικά 13% και 35% για λόγους υδραυλικών διαπερατοτήτων 2 και 5 αντιστοίχως.

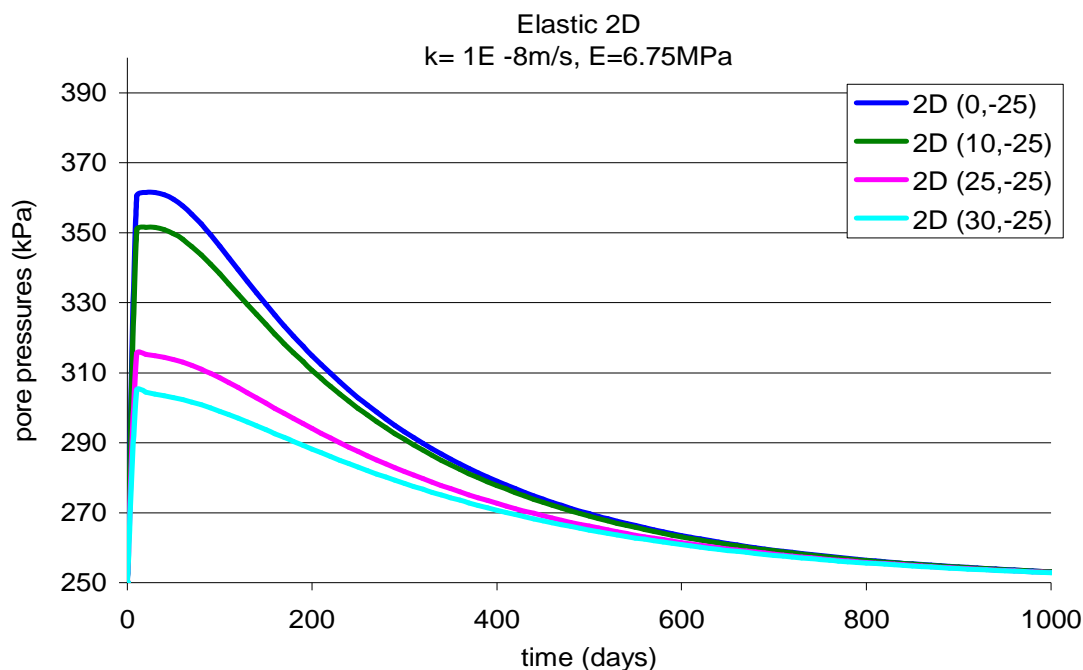
4.3.5 Πιέσεις πόρων στη μονοδιάστατη και διδιάστατη στερεοποίηση

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων της διδιάστατης ελαστικής ανάλυσης σε ενδεικτικές θέσεις (Σχήμα 4.6) καθ' ύψος του προσομοιώματος.

Στο Σχήμα 4.13 παρατίθενται οι πιέσεις πόρων για σημεία -5m κάτω από την επιφάνεια του μοντέλου με συντεταγμένες [(0,-5);(10,-5);(25,-5);(30,-5)], για την αριθμητική ανάλυση με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$, $E=6.75\text{MPa}$. Τονίζεται, ότι η διάρκεια της κατασκευής ήταν ταχύτατη (10 ημέρες).



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα σύγκρισης πίεσης πόρων στη διδιάστατη ανάλυση για $E=6.75\text{MPa}$ και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$, η διάρκεια κατασκευής είναι 10 ημέρες. Για σημεία 5 μέτρα κάτω από το έδαφος.



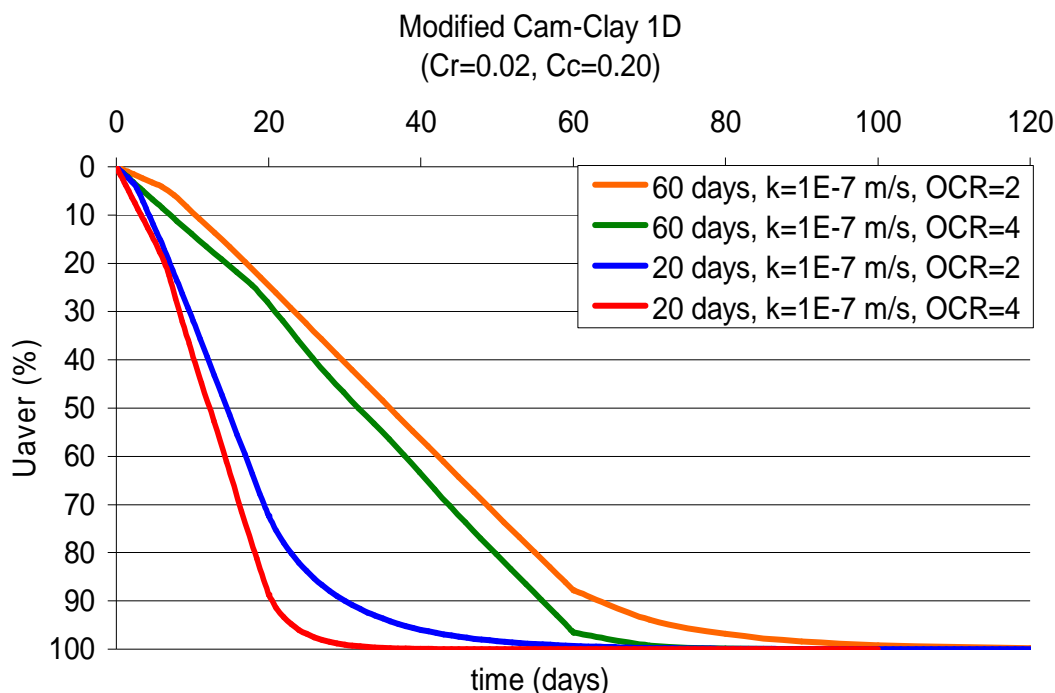
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα σύγκρισης πίεσης πόρων στη διδιάστατη ανάλυση για $E=6.75\text{MPa}$ και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}\text{m/s}$, η διάρκεια κατασκευής είναι 10 ημέρες. Για σημεία 25 μέτρα κάτω από το έδαφος.

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων για σημεία 25 μέτρα κάτω από το έδαφος. Εμφανές είναι με βάση τα διαγράμματα, ότι οι υπερπιέσεις πόρων μειώνονται όσο αυξάνεται η κάθετη απόσταση από τον άξονα της επιφόρτισης. Όσον αφορά τη σύγκριση των υπερπιέσεων πόρων σε σχέση με τη μονοδιάστατη στερεοποίηση, αναμενόμενο είναι να παρατηρούνται μικρότερες υπερπιέσεις στη διδιάστατη ανάλυση. Παράλληλα, με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, δηλαδή με τη μείωση της συμπιεστότητας του εδαφικού σχηματισμού, αναμένεται μείωση της υπερπίεσης πόρων. (περισσότερα βλ. Παράρτημα Γ)

4.4 Αριθμητική διερεύνηση με χρήση του τροποποιημένου Cam-Clay

4.4.1 Μονοδιάστατη στερεοποίηση

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μονοδιάστατες ελαστοπλαστικές αναλύσεις με το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay. Όπως αναφέρεται στην αρχική ενότητα του κεφαλαίου 4, παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για $\text{OCR}=2$ και $\text{OCR}=4$ με δείκτες $C_r=0.02$, $C_c=0.20$. Όσον αφορά, τις υδραυλικές διαπερατότητες λαμβάνουν τιμές για 10^{-7}m/s και 10^{-8}m/s . Επιπρόσθετα, τονίζεται ότι η επιφόρτιση στη συγκεκριμένη διερεύνηση υφίσταται γραμμική αύξηση σε 20 και 60 ημέρες έως την τελική της τιμή (200kPa). (περισσότερες αναλύσεις δίνονται στο Παράρτημα Γ)



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα σύγκρισης μονοδιάστατης ανάλυσης για $OCR=2$ και $OCR=4$, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 20 και 60 ημέρες.

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 4.15, εξάγονται στον κάτωθεν Πίνακα 4.7 οι τιμές που αντιστοιχούν στο 25%, 50% και 90% τη στερεοποίησης.

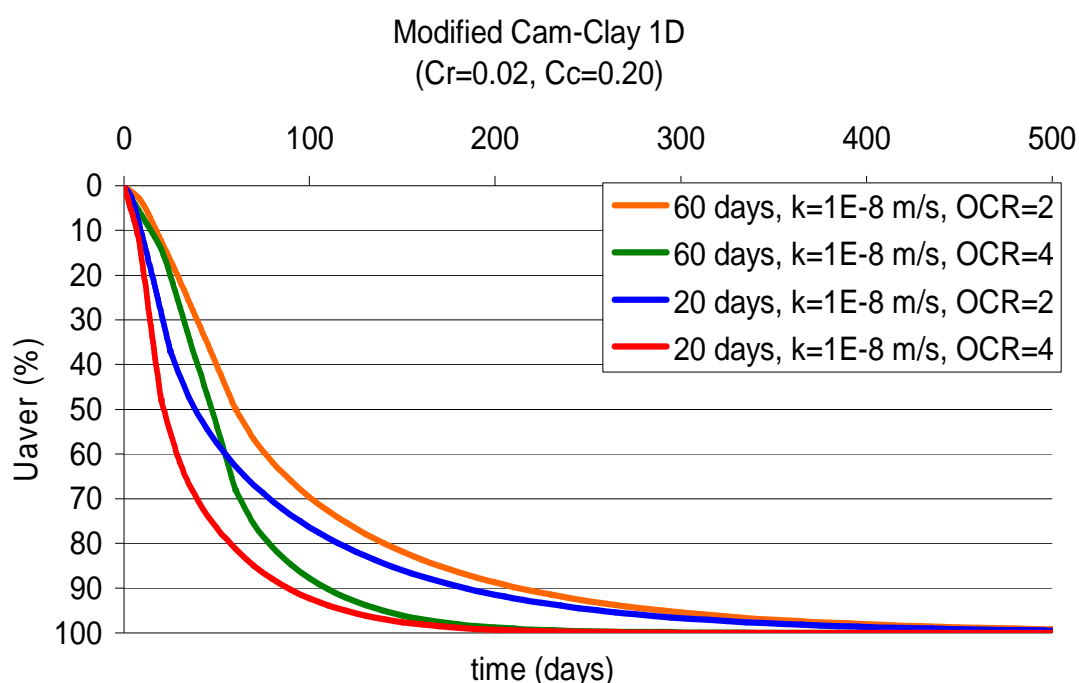
Πίνακας 4.7 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στερεοποίησης στο 25%, 50% και 90% της εξέλιξης της στερεοποίησης, για $OCR=2$ και $OCR=4$, με $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s, όταν η διάρκεια κατασκευής είναι 20 και 60 ημέρες.

$k_v=10^{-7}$ m/s, modified cam-clay 1D				
Συμπιεστότητα	Διάρκεια κατασκευής (days)	$t_{25\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
OCR=2	20	9.2	15.4	31.1
	60	21.5	36.2	64.4
OCR=4	20	8.4	13.5	21.5
	60	18.9	32.8	57.1

Αρχικά, είναι εμφανές ότι με την αύξηση της διάρκειας κατασκευής το φαινόμενο της στερεοποίησης επιβραδύνεται. Αναλυτικότερα, η αύξηση του χρόνου κατασκευής δεν αντιστοιχεί σε ανάλογη αύξηση του χρόνου στερεοποίησης. Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει μη γραμμική συσχέτιση λόγω της ποροελαστικότητας αλλά και εξαιτίας της πλαστικής διαρροής που υφίστανται τα στοιχεία λόγω ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων και της επιρροής του δείκτη OCR . Για παράδειγμα, όπως προκύπτει από την άνωθεν ανάλυση, η τριπλάσια διάρκεια κατασκευής συνεπάγεται βραδύτερη “ολοκλήρωση” ($t_{90\%}$) της στερεοποίησης κατά 52% και 62% για $OCR=2$ και $OCR=4$ αντιστοίχως. Παρά ταύτα, δεν είναι ικανή και αναγκαία συνθήκη στην ελαστοπλαστική κατάσταση ότι όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος κατασκευής θα διαρκεί και περισσότερο το φαινόμενο της

στερεοποίησης, καθώς το φαινόμενο εξαρτάται έντονα από το συντελεστή OCR (βλ. παρακάτω), που καθορίζει τις πλαστικές παραμορφώσεις των στοιχείων.

Επίσης, όσον αφορά τη σύγκριση ανάμεσα στον ίδιο χρόνο κατασκευής για διαφορετικούς συντελεστές OCR, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής προφόρτισης το φαινόμενο της στερεοποίησης επιταχύνεται, καθώς η διαρροή που υφίστανται τα στοιχεία είναι μικρότερη, δηλαδή αύξηση ή μείωση του OCR προκαλεί αντίστοιχα μείωση ή αύξηση της συμπίεσότητας. Συγκεκριμένα, στην άνωθεν ανάλυση υπάρχει μείωση του χρόνου $t_{90\%}$ κατά 31% και 11% περίπου για 20 και 60 ημέρες κατασκευής αντιστοίχως. Τονίζεται, ότι τα συγκεκριμένα - αναφερόμενα- ποσοστά συσχέτισης δεν θα είναι ίδια σε περίπτωση που υποστούν μεταβολή οι δείκτες $C_r=0.02$ και $C_c=0.20$, καθώς όπως αναφέρεται και παραπάνω το προσομοίωμα Cam-Clay βασίζεται στην ποροελαστικότητα, δηλαδή πρόκειται για μη γραμμική συσχέτιση τάσεων-παραμορφώσεων.



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα σύγκρισης μονοδιάστατης ανάλυσης για OCR=2 και OCR=4, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 20 και 60 ημέρες.

Σε συμφωνία με παραπάνω, παρουσιάζονται στο άνωθεν Σχήμα 4.16 οι αναλύσεις για $k_v=10^{-8}$ m/s. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ανάλυση για 20 ημέρες διάρκειας κατασκευής και OCR=2, συνεπάγεται βραδύτερη ολοκλήρωση της στερεοποίησης σε σχέση με την ανάλυση που υφίσταται υπό 60 ημέρες και OCR=4. Αυτό οφείλεται στην εντονότερη εμφάνιση πλαστικών παραμορφώσεων, όταν OCR=2, που καθυστερεί το φαινόμενο της στερεοποίησης. Ακολούθως δίνονται στον Πίνακα 4.8 τα στοιχεία για το 25%, 50% και 90% της στερεοποίησης.

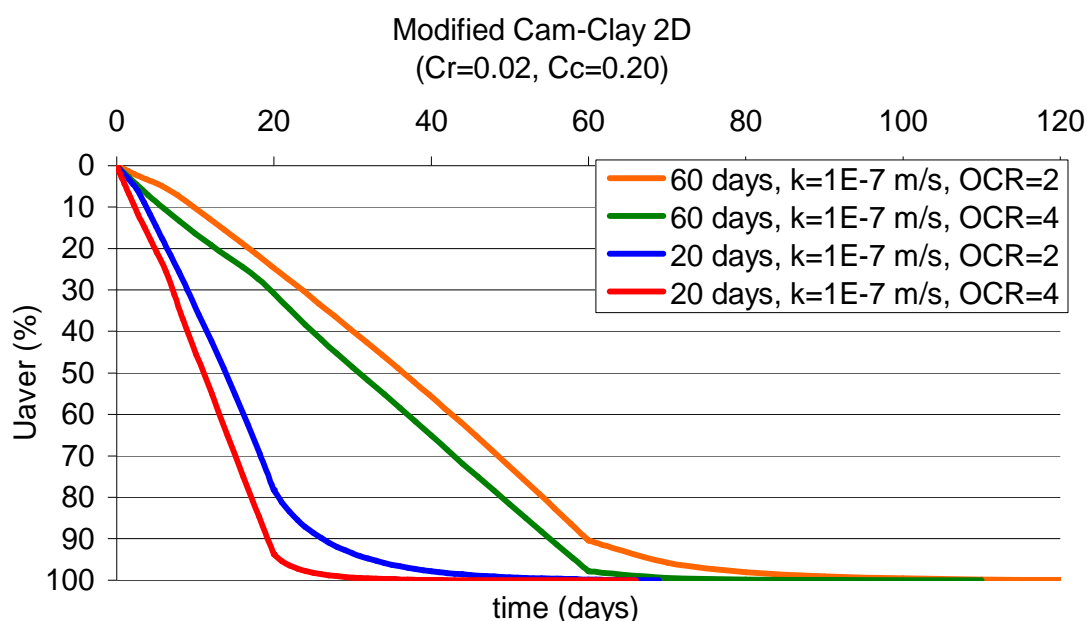
Πίνακας 4.8 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στερεοποίησης στο 25%, 50% και 90% της εξέλιξης της στερεοποίησης, με $OCR=2$ και $OCR=4$, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, όταν η διάρκεια κατασκευής είναι 20 και 60 ημέρες.

$k_v=10^{-8}$ m/s, modified cam-clay 1D				
Συμπίεστικότητα	Διάρκεια κατασκευής (days)	$t_{25\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
OCR=2	20	18.1	40.2	184.9
	60	35.2	60.1	213
OCR=4	20	12.5	24.4	89.8
	60	28.4	47.1	109.1

Με βάση τη σύγκριση ανάμεσα στις δύο υδραυλικές διαπερατότητες, εξάγεται ότι δεν υπάρχει η αναλογία 1/10 όπως συνέβη στη μονοδιάστατη κατάσταση με ισότροπη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι η απόκλιση του χρόνου $t_{90\%}$ κυμαίνεται για τις 20 ημέρες κατασκευής και $OCR=2$ σε 590%, ενώ για $OCR=4$ σε 410% περίπου.

4.4.2 Διδιάστατη ανάλυση

Στην παρούσα ενότητα, επαναλαμβάνονται οι αναλύσεις που διερευνήθηκαν στη μονοδιάστατη κατάσταση αλλά για διδιάστατες συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα σύγκρισης διδιάστατης ανάλυσης για $OCR=2$ και $OCR=4$, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 20 και 60 ημέρες.

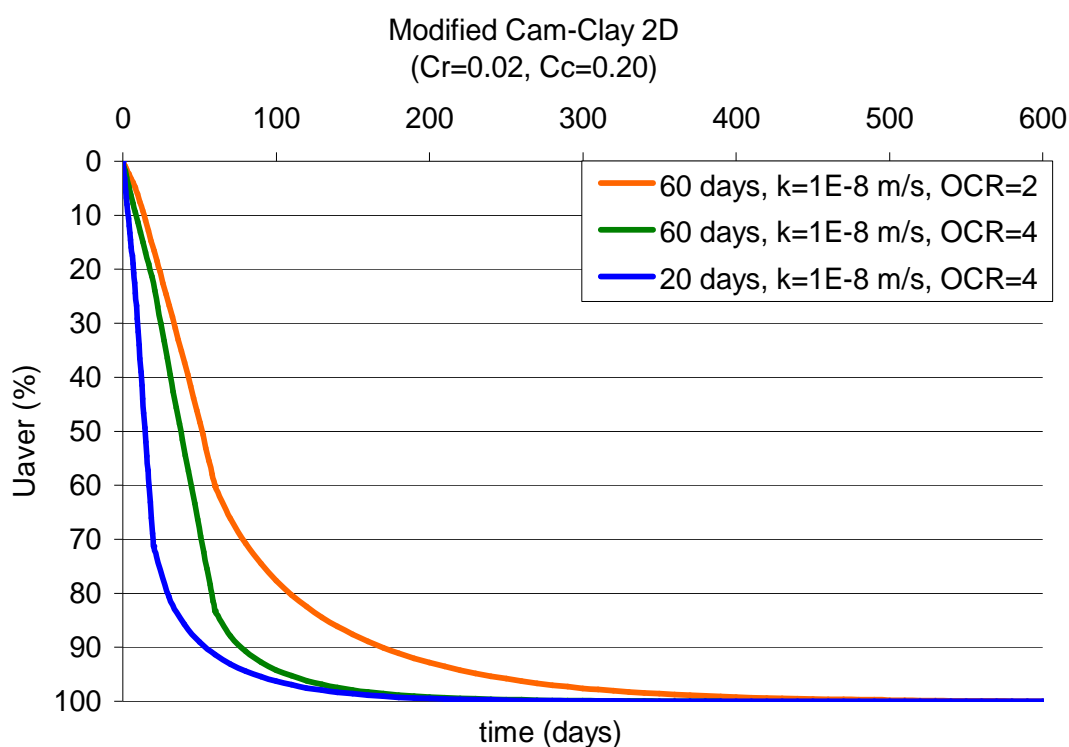
Όπως προκύπτει από το άνωθεν Σχήμα 4.17, η στερεοποίηση εξελίσσεται ταχύτερα για μικρότερους χρόνους κατασκευής, ενώ όσον αφορά την ίδια διάρκεια κατασκευής οι μεγαλύτερες τιμές OCR συνεπάγονται, επιτάχυνση της στερεοποίησης λόγω μικρότερης συμπίεστικότητας. Στη συνέχεια, ακολουθεί ενδεικτικός Πίνακας 4.9 με τιμές που αντιστοιχούν στο 25%, 50% και 90% της

στερεοποίησης. (Επισημαίνεται, ότι ο μέσος βαθμός στερεοποίησης ορίζεται για το σημείο (0,0))

Πίνακας 4.9 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στερεοποίησης στο 25%, 50% και 90% της εξέλιξης της στερεοποίησης, με OCR=2 και OCR=4, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s, όταν η διάρκεια κατασκευής είναι 20 και 60 ημέρες.

$k_v=10^{-7}$ m/s , modified cam-clay 2D				
Συμπίεστικότητα	Διάρκεια κατασκευής (days)	$t_{25\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
OCR=2	20	7.8	13.9	26.2
	60	20.2	34.2	59.8
OCR=4	20	5.9	11.1	19
	60	16.8	31.5	55.3

Συγκρίνοντας τους χρόνους του μέσου βαθμού στερεοποίησης ανάμεσα στη διδιάστατη και τη μονοδιάστατη κατάσταση, αναφέρεται ότι η απόκλιση έχει μεγάλο εύρος, σε αντίθεση με την ισότροπη και γραμμική ελαστική ανάλυση που ήταν της τάξεως του 70%. Έπειτα, παρουσιάζεται η διερεύνηση για $k_v=10^{-8}$ m/s στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα σύγκρισης διδιάστατης ανάλυσης για OCR=2 και OCR=4, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 20 και 60 ημέρες.

Τονίζεται, ότι η καμπύλη για OCR=2 και 20 μέρες διάρκειας κατασκευής δεν παρουσιάζεται καθώς υπήρχε αστοχία, εξαιτίας της ανάπτυξης υψηλών πλαστικών παραμορφώσεων πλησίον της επιφόρτισης. Ακολουθως, στον Πίνακα 4.10

παρατίθενται ενδεικτικοί χρόνοι στερεοποίησης που αντιστοιχούν στο $U_{aver}=25\%$, $U_{aver}=50\%$ και $U_{aver}=90\%$.

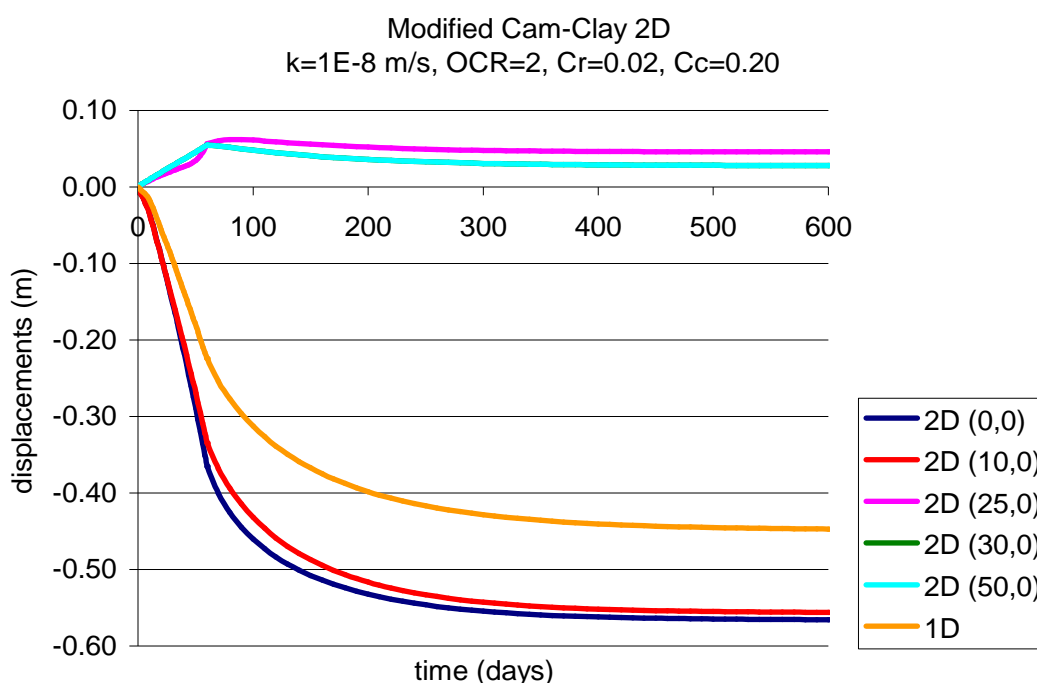
Πίνακας 4.10 Ενδεικτικές χρονικές τιμές στερεοποίησης στο 25%, 50% και 90% της εξέλιξης της στερεοποίησης, με $OCR=2$ και $OCR=4$, για $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}m/s$, όταν η διάρκεια κατασκευής είναι 20 και 60 ημέρες..

$k_v=10^{-8}m/s$, modified cam-clay 2D				
Συμπιεστότητα	Διάρκεια κατασκευής (days)	$t_{25\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
OCR=2	20	-	-	-
	60	28.4	51.7	170
OCR=4	20	8.7	14.6	54.2
	60	21.4	38	79

Η συσχέτιση με την αντίστοιχη μονοδιάστατη ανάλυση αντικατοπτρίζει την ταχύτερη ανάπτυξη της στερεοποίησης στη διδιάστατη κατάσταση. Ωστόσο, η απόκλιση δεν έχει σταθερή τιμή όπως στην αντίστοιχη σύγκριση για ισότροπη και γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά.

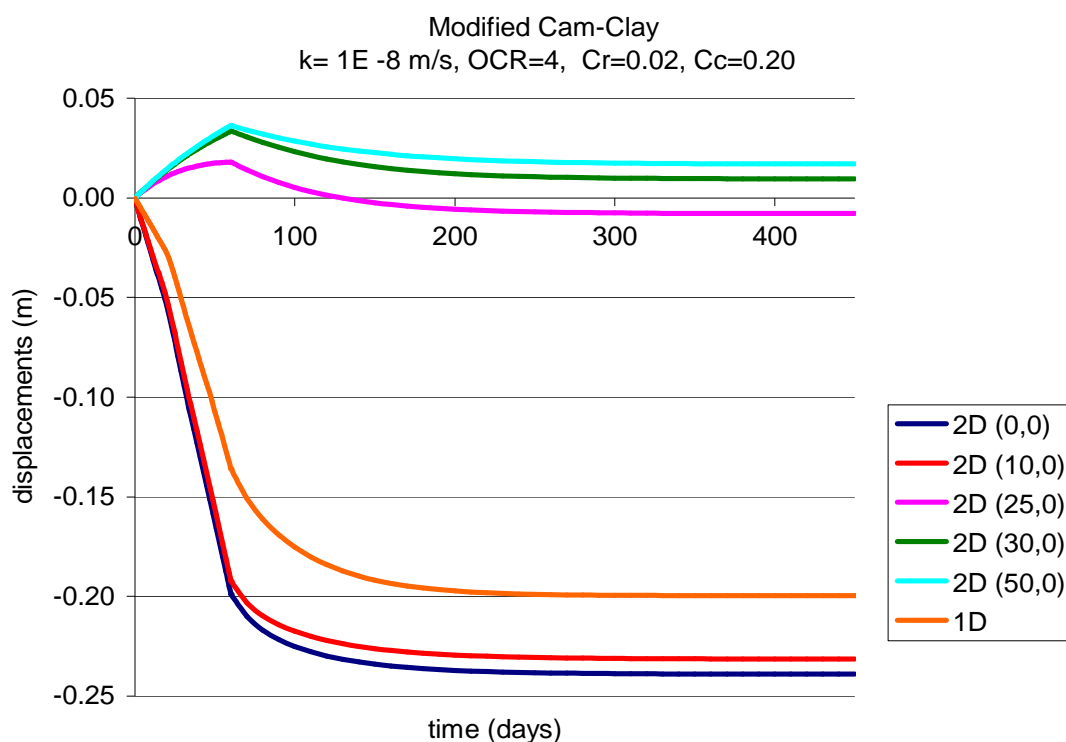
4.4.3 Κατακόρυφες μετακινήσεις μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης

Ακολουθώς, για τις αναλύσεις με υδραυλική διαπερατότητα $10^{-8}m/s$ και διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μετακινήσεις που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες [(0,0);(10,0);(25,0);(30,0);(50,0)] (βλ. Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα σύγκρισης μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για $OCR=2$ και $C_r=0.02$, με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}m/s$ και διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες.

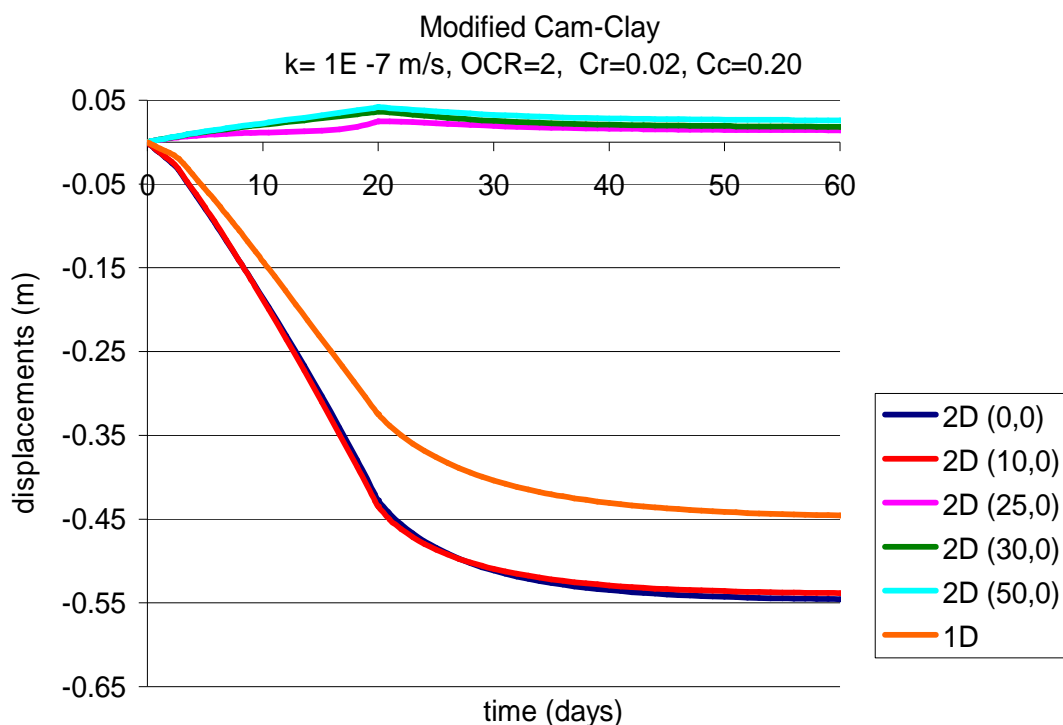
Αναλύοντας το Σχήμα 4.19, φαίνεται ότι οι καθιζήσεις της μονοδιάστατης συμπίεσης (-0.45m) είναι μικρότερες από της διδιάστατης (-0.57m) κατά 21% περίπου. Όσον αφορά τα υπόλοιπα σημεία, με την απομάκρυνση από τον άξονα της επιφόρτισης οι καθιζήσεις ελαχιστοποιούνται από το σημείο (10,0), έως ότου σε μικρή απόσταση από τον πόδα της επιφόρτισης να εμφανίζονται διογκώσεις. Επιπρόσθετα, οι διογκώσεις έχουν αυξητικό χαρακτήρα όσο απομακρύνονται οι συντεταγμένες από το πέρας της επιφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα για το σημείο (30,0) οι μετακινήσεις είναι σχεδόν μηδενικές, ενώ για το (50,0) είναι 0.03m. Σημειώνεται, ότι το σημείο που είναι στο πέρας (25,0) της φόρτισης αναπτύσσει μόνο διογκώσεις (0.04m), σε αντίθεση με την ελαστική ανάλυση που είχε και κλάδο καθιζήσεων. Αυτό, οφείλεται στην έντονη ανάπτυξη των πλαστικών παραμορφώσεων που υφίστανται τα στοιχεία πλησίον του πόδα. Μάλιστα, η διογκωση τούτη είναι οιωνός επερχόμενης αστοχίας σε περίπτωση που οι συνθήκες του προβλήματος το επέτρεπαν.



Σχήμα 4.20 Διάγραμμα σύγκρισης μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για $OCR=4$ και $C_r=0.02$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.20, οι καθιζήσεις της μονοδιάστατης συμπίεσης (-0.20m) είναι μικρότερες από της διδιάστατης (-0.24m) κατά 17% περίπου. Όσον αφορά τα υπόλοιπα σημεία, με την απομάκρυνση από τον άξονα της επιφόρτισης οι καθιζήσεις μειώνονται, ώσπου πλησίον του πόδα της επιφόρτισης να εμφανίζονται διογκώσεις. Οι διογκώσεις έχουν αυξητικό χαρακτήρα όσο απομακρύνονται οι συντεταγμένες από το πέρας της επιφόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το σημείο που είναι στο τέλος (25,0) της φόρτισης αναπτύσσει αρχικά διογκώσεις και στη συνέχεια καθιζήσεις (-0.01m), σε αντίθεση με την προηγούμενη ανάλυση που είχε μόνο κλάδο διογκώσεων. Κατά συνέπεια, προκύπτει ότι τα στοιχεία υφίστανται

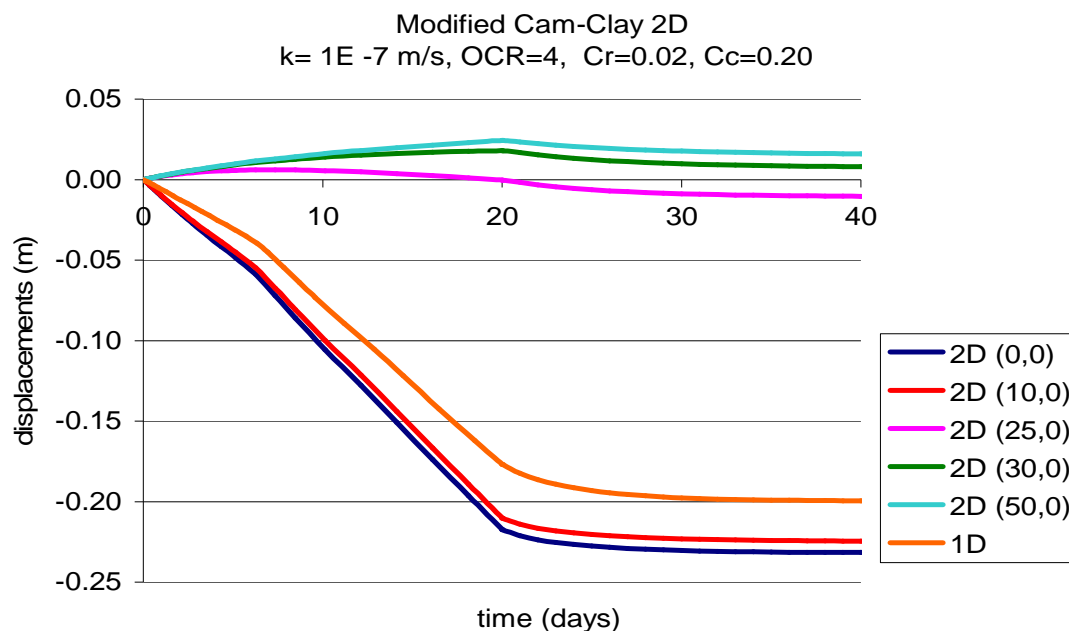
μικρότερες πλαστικές παραμορφώσεις πλησίον του πόδα σε σχέση με την ανάλυση για OCR=2 . Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σχήματα 4.21 και 4.22 που αντιστοιχούν στις μετακινήσεις των σημείων για υδραυλική διαπερατότητα 10^{-7} m/s με διάρκεια κατασκευής 20 ημέρες.



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα σύγκρισης μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για OCR=2 και $C_r=0.02$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 20 ημέρες.

Με βάση το Σχήμα 4.21, προκύπτει ότι οι καθιζήσεις στη μονοδιάστατη κατάσταση είναι (-0.45m) είναι μικρότερες από της διδιάστατης (-0.55m) κατά 18% περίπου. Επιπρόσθετα, για τα σημεία (30,0) και (50,0) οι μετακινήσεις είναι σχεδόν 0.03m, ενώ για το (25,0) είναι 0.02m. Ακολούθως, στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η αντίστοιχη συσχέτιση για OCR=4.

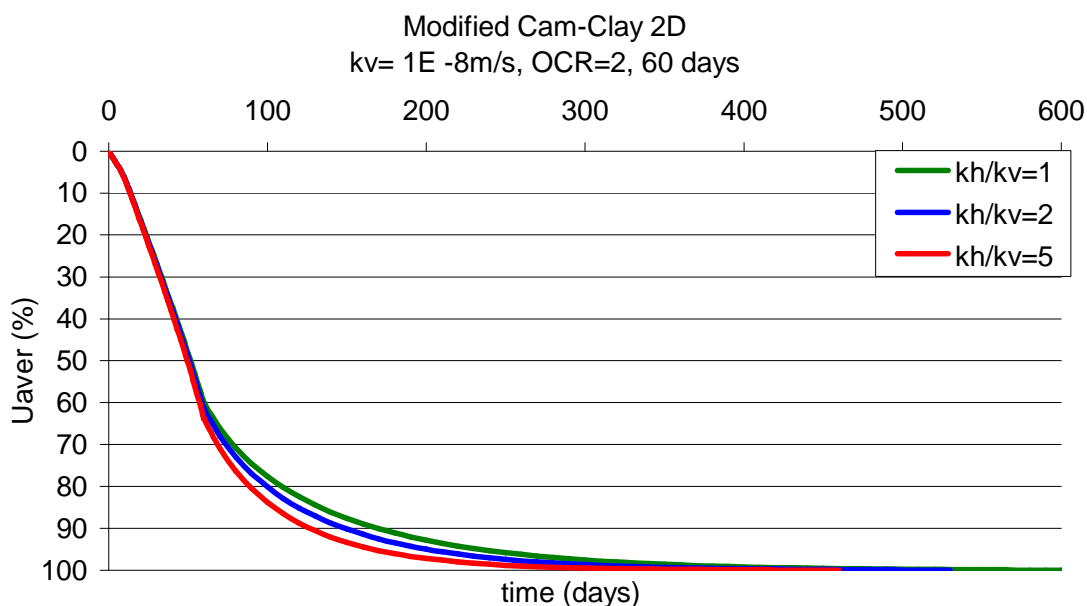
Από το Σχήμα 4.22, προκύπτει ότι οι καθιζήσεις στη μονοδιάστατη κατάσταση είναι (-0.20m) είναι μικρότερες από της διδιάστατης (-0.23m) κατά 13% περίπου. Όσον αφορά για τα σημεία (30,0) και (50,0), οι μετακινήσεις είναι σχεδόν 0.01m και 0.02m αντιστοίχως, ενώ το (25,0) έχει τελικώς καθιζήσεις -0.02m.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα σύγκρισης μετακινήσεων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για $OCR=4$ και $C_r=0.02$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7} \text{ m/s}$, και διάρκεια κατασκευής 20 ημέρες.

4.4.4 Ανισότροπη υδραυλική διαπερατότητα στη διδιάστατη ανάλυση

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα οι αναλύσεις για $k_h/k_v=1$, $k_h/k_v=2$ και $k_h/k_v=5$, όταν ο συντελεστή προφόρτισης είναι ίσος με 2. Στο Σχήμα 4.23 διαφαίνεται η διερεύνηση για $k_v=10^{-8} \text{ m/s}$ και 60 ημέρες κατασκευής, ενώ στο Σχήμα 4.24 δίνεται η ανάλυση για $k_v=10^{-7} \text{ m/s}$ και 20 ημέρες κατασκευής.



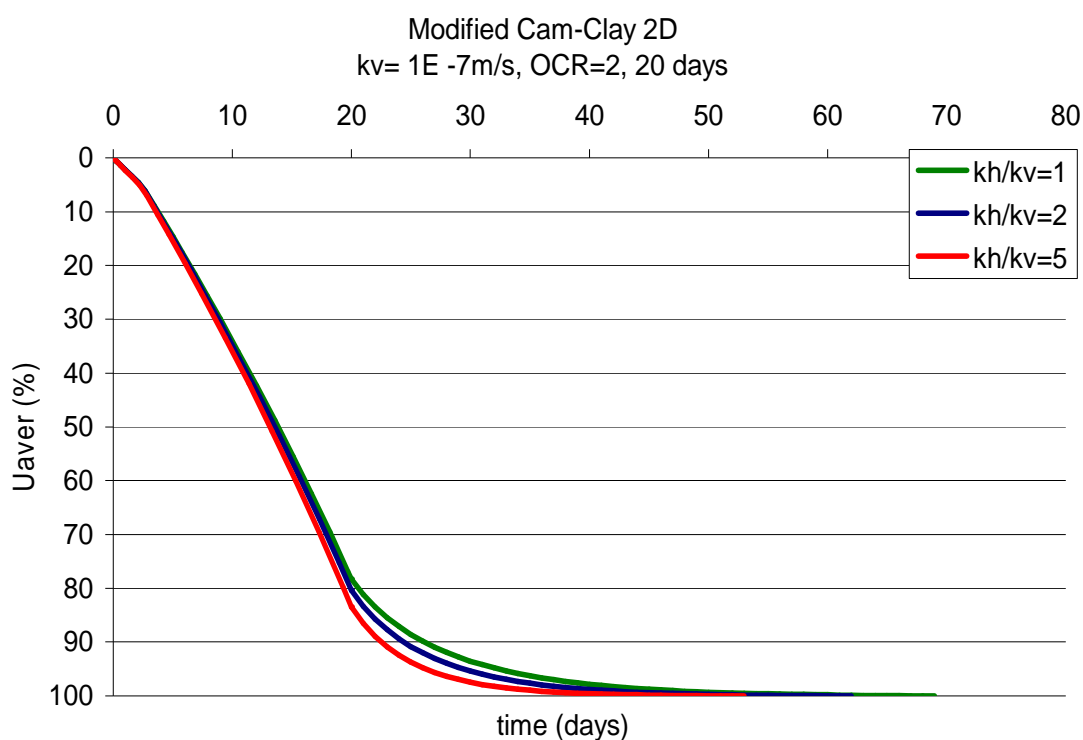
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα σύγκρισης στερεοποίησης για λόγους διαπερατοτήτων 1,2 και 5, όταν $OCR=2$, $C_r=0.02$ και $C_c=0.20$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8} \text{ m/s}$, και διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες.

Εμφανές είναι με βάση το Σχήμα 4.23, ότι η επιτάχυνση της στερεοποίησης είναι αρκετά μικρή. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 4.11 παρατίθενται οι χρόνοι στερεοποίησης για το 50% και 90% του μέσου βαθμού στερεοποίησης.

Πίνακας 4.11 Ενδεικτικοί χρόνοι στερεοποίησης για λόγους διαπερατοτήτων 1,2 και 5, όταν $OCR=2$ και $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}m/s$, και διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες.

$k_v=10^{-8}m/s$			
Συμπίεστικότητα	elastic 2D	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
OCR=2	$k_h/k_v=1$	51.7	170
	$k_h/k_v=2$	50.9	150
	$k_h/k_v=5$	50.1	129.8

Όπως προκύπτει και από τον άνωθεν πίνακα, η ολοκλήρωση της στερεοποίησης είναι ταχύτερη μόνο κατά 23% όταν ο λόγος των υδραυλικών διαπερατοτήτων είναι ίσος με 5, ενώ για λόγο ίσο με 2 η επιτάχυνση είναι μόνο 12%.



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα σύγκρισης στερεοποίησης για λόγους διαπερατοτήτων 1,2 και 5, όταν $OCR=2$, $C_r=0.02$ και $C_c=0.20$ με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}m/s$, και διάρκεια κατασκευής 20 ημέρες.

Η δεύτερη περίπτωση ανάλυσης δίνει επίσης μικρές διαφορές στην επιτάχυνση της στερεοποίησης. Στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται συγκριτικά οι χρόνοι για το 50% και 90% του μέσου βαθμού στερεοποίησης.

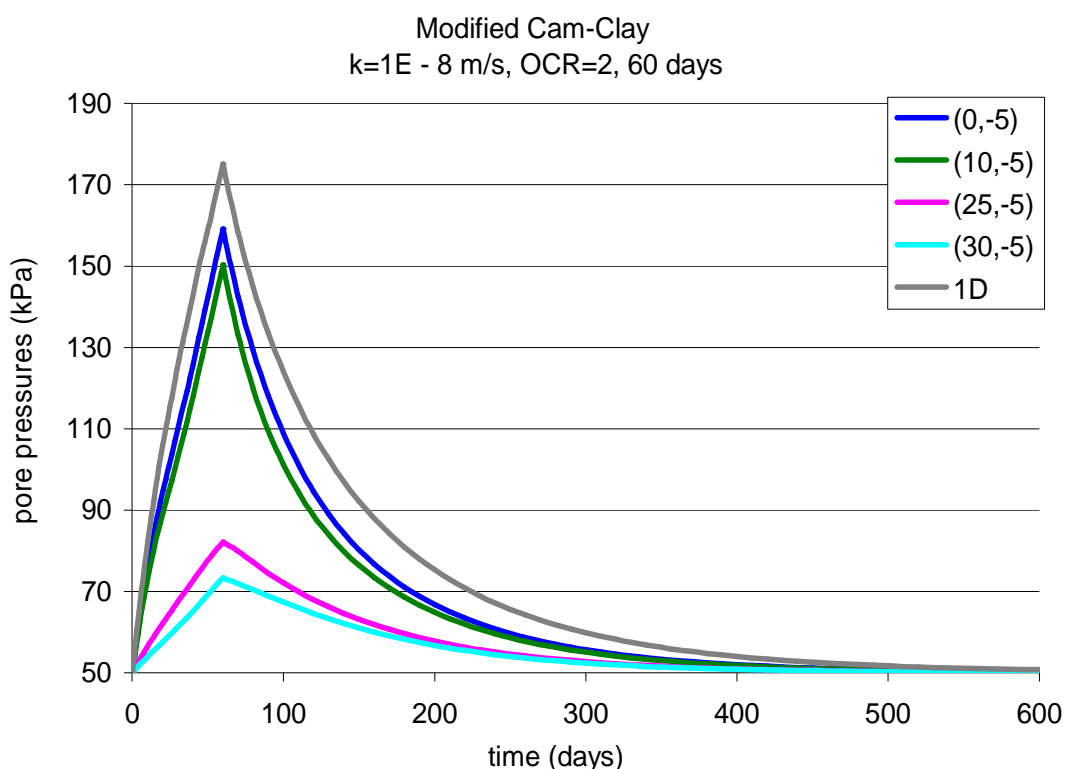
Πίνακας 4.12 Ενδεικτικοί χρόνοι στερεοποίησης για λόγους διαπερατοτήτων 1,2 και 5, όταν OCR=2 και $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-7}$ m/s, και διάρκεια κατασκευής 20 ημέρες.

$k_v=10^{-7}$ m/s			
Συμπίεστικότητα	elastic 2D	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
OCR=2	$k_h/k_v=1$	13.9	26.2
	$k_h/k_v=2$	13.6	24.5
	$k_h/k_v=5$	13.4	23.1

4.4.5 Πιέσεις πόρων στη μονοδιάστατη και διδιάστατη ανάλυση

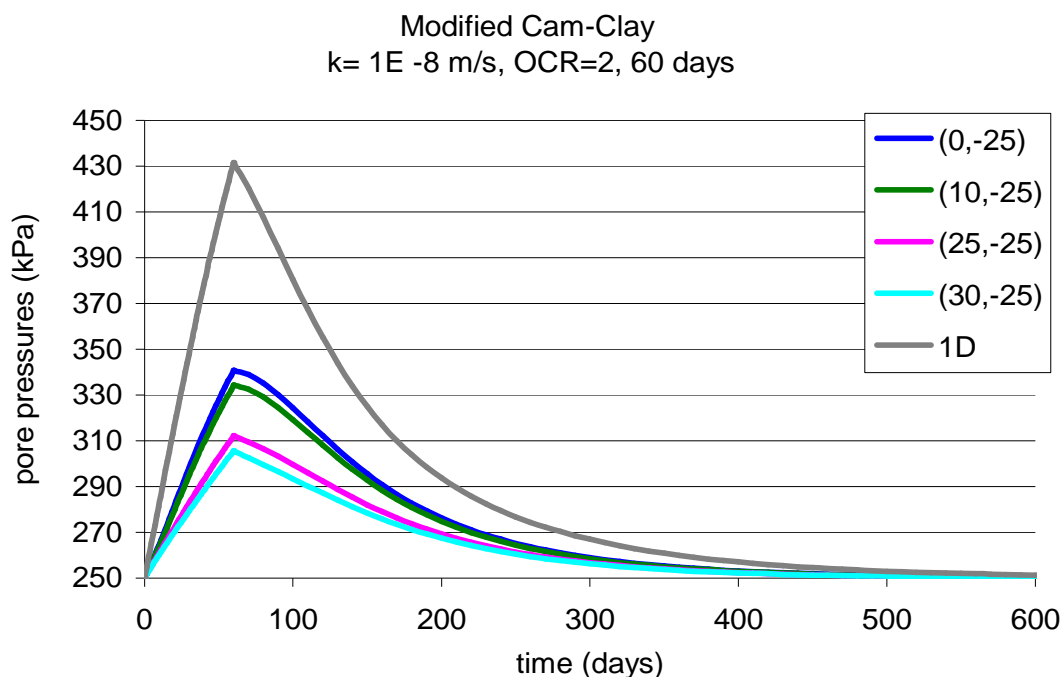
Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων της διδιάστατης ελαστοπλαστικής ανάλυσης σε ενδεικτικές θέσεις (Σχήμα 4.6) καθ' ύψος του προσομοιώματος, και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πιέσεις πόρων της μονοδιάστατης ελαστοπλαστικής ανάλυσης. (περισσότερα βλ. Παράρτημα Γ)

Στο Σχήμα 4.25 παρατίθενται οι πιέσεις πόρων για σημεία -5m κάτω από την επιφάνεια του μοντέλου με συντεταγμένες [(0,-5);(10,-5);(25,-5);(30,-5)], για την αριθμητική ανάλυση με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, OCR=2, $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και διάρκεια κατασκευής 60 ημερών.



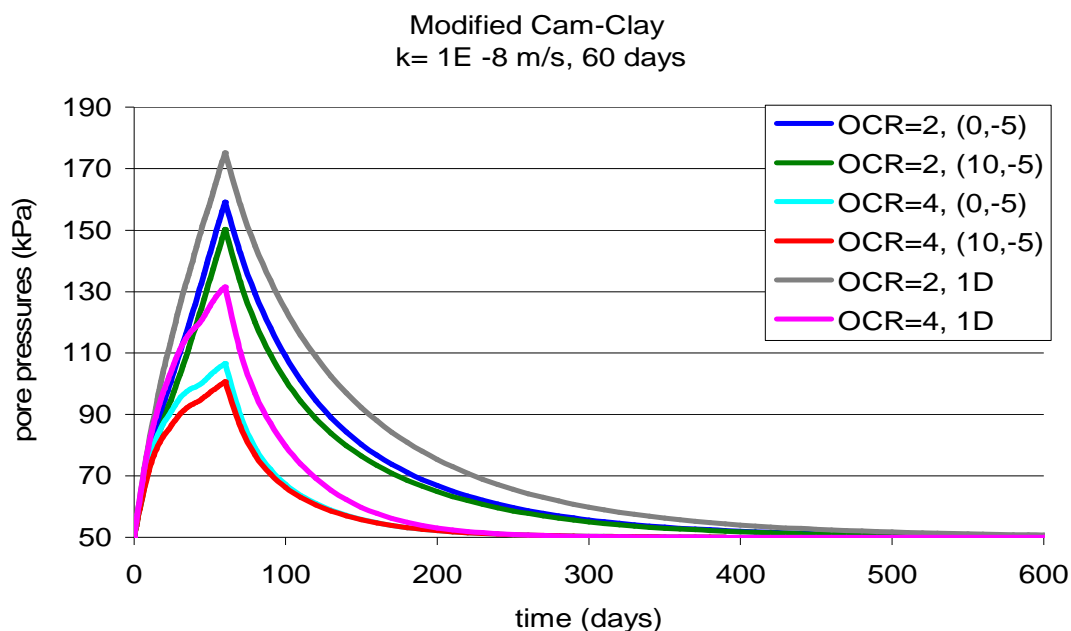
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα σύγκρισης υπερπίεσης πόρων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για OCR=2 και $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, ενώ η διάρκεια κατασκευής είναι 60 ημέρες. Για σημεία 5 μέτρα κάτω από το έδαφος.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.25, προκύπτει ότι οι πιέσεις πόρων αυξάνονται για όσο διαρκεί (60 ημέρες) η κατασκευή. Στη συνέχεια, οι υπερπίεσεις υφίστανται αποτόνωση μέχρι την τελική υδροστατική κατάσταση. Ενδεικτικό είναι, ότι το ποσοστό υπερπίεσης διαφέρει όσο απομακρύνονται οι συντεταγμένες από τον άξονα της επιφόρτισης. Για παράδειγμα, το σημείο με συντεταγμένες (0,-5) έχει 320% υπερπίεση, το σημείο (10,-5) 300%, ενώ το σημείο (25,-5) έχει 164%. Όσον αφορά, τη σύγκριση ανάμεσα στη μονοδιάστατη και διδιάστατη κατάσταση εξάγεται, όπως αναμένεται, μεγαλύτερη υπερπίεση στην μονοδιάστατη κατάσταση κατά 30% στο σημείο (0,-5). Παρακάτω, στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η σύγκριση της άνωθεν ανάλυσης για σημεία που είναι 25 μέτρα κάτω από το έδαφος.



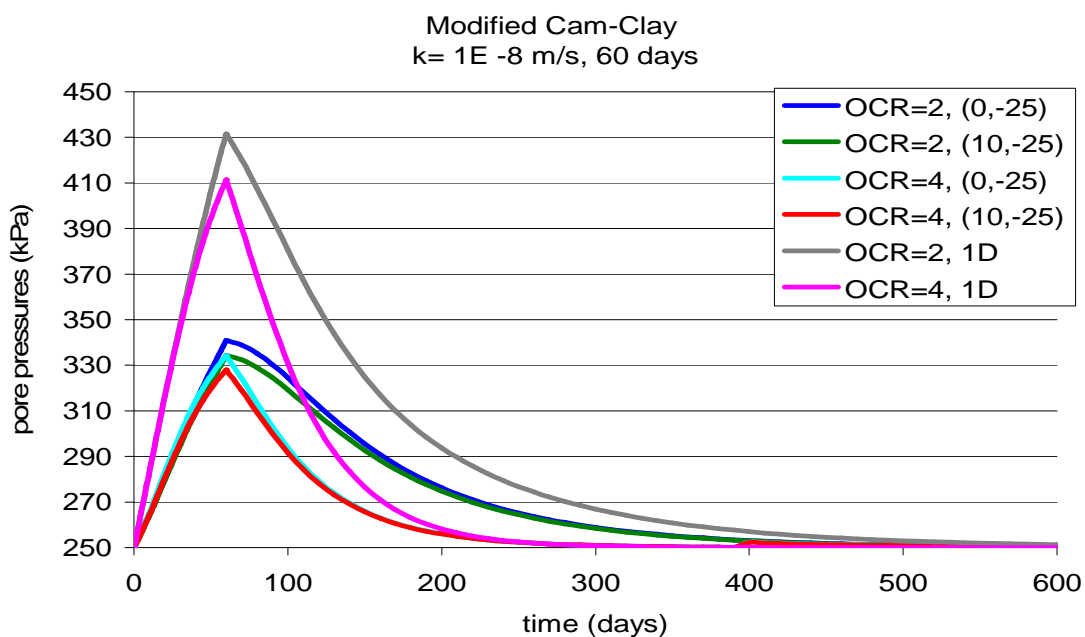
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα σύγκρισης υπερπίεσης πόρων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για $OCR=2$ και $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) με υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8} \text{ m/s}$, ενώ η διάρκεια κατασκευής είναι 60 ημέρες. Για σημεία 25 μέτρα κάτω από το έδαφος.

Με βάση το Σχήμα 4.26, είναι προφανές ότι το ποσοστό υπερπίεσης μειώνεται σε σύγκριση με τα σημεία που είναι 5 μέτρα κάτω από έδαφος. Επιπρόσθετα, η διαφορά υπερπίεσης ανάμεσα στη μονοδιάστατη και διδιάστατη στερεοποίηση, για το σημείο (0,-25), είναι 40%. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των υπερπίεσεων πόρων ανάμεσα σε $OCR=2$ και $OCR=4$.



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα σύγκρισης υπερπίεσης πόρων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για OCR=2 και OCR=4, με $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, ενώ η διάρκεια κατασκευής είναι 60 ημέρες. Για σημεία 5 μέτρα κάτω από το έδαφος.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.27, λόγω της μικρότερης συμπιεστότητας ο σχηματισμός με OCR=4, αναπτύσσει μειωμένες υπερπίεσεις σε σχέση με όταν OCR=2. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι για τη μονοδιάστατη κατάσταση η διαφορά είναι περίπου 88%, ενώ για το σημείο με συντεταγμένες (0,-5) 100%. Στη συνέχεια, παρατίθεται η συσχέτιση για σημεία που είναι 25 μέτρα κάτω από το έδαφος.



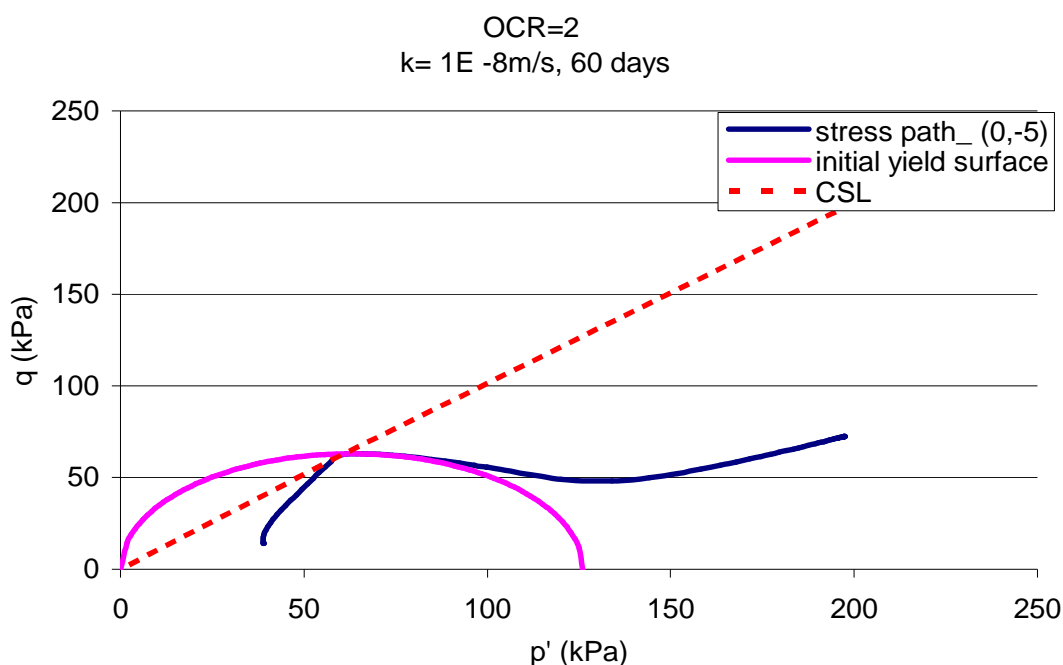
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα σύγκρισης υπερπίεσης πόρων μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης για OCR=2 και OCR=4, με $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και υδραυλική διαπερατότητα $k=10^{-8}$ m/s, ενώ η διάρκεια κατασκευής είναι 60 ημέρες. Για σημεία 25 μέτρα κάτω από το έδαφος.

(Για περισσότερα προφίλ υπερπιέσεων βλ. Παράρτημα Γ)

4.4.6 Διαδρομές τάσεων

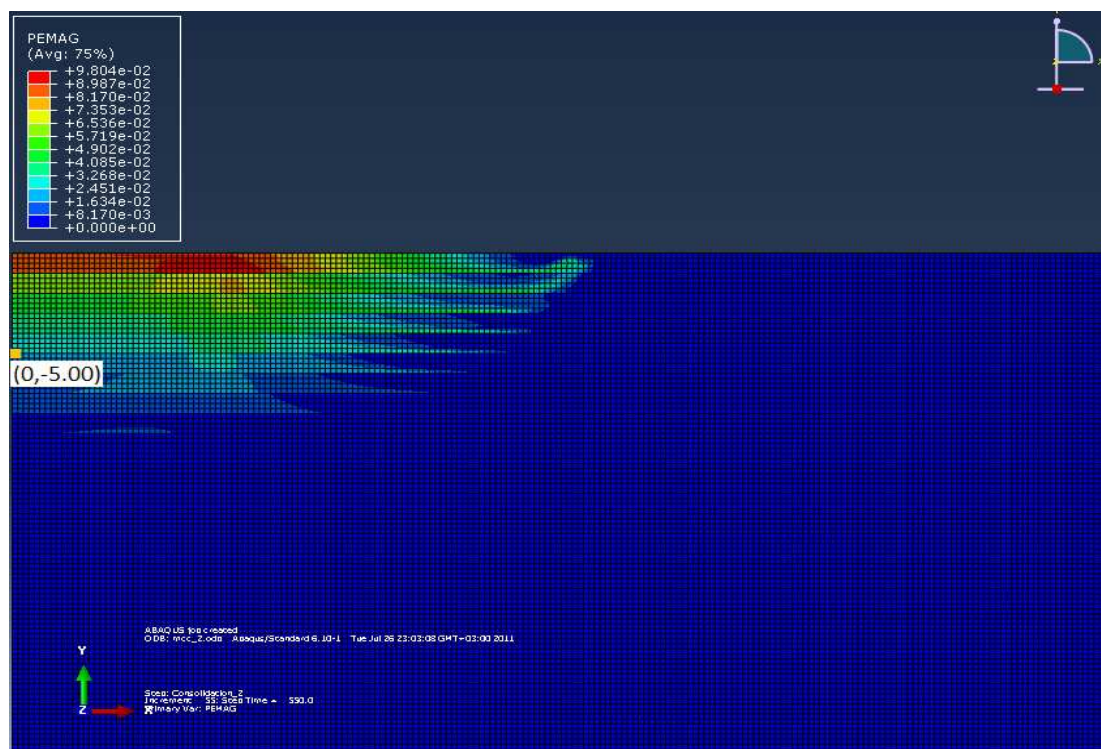
Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται ενδεικτικές (για περισσότερες βλ. Παράρτημα Γ) διαδρομές των τάσεων για το σημείο (0,-5), όταν OCR=2 και OCR=4. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι για $k=10^{-8}$ m/s, $C_r=0.02$ ($C_c=0.20$) και διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες. Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η διαδρομή για OCR=2 και στο Σχήμα 4.30 για OCR=4.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι διαδρομές των τάσεων που εξάγονται κατά τη διδιάστατη ανάλυση στερεοποίησης διαφέρουν από τις διαδρομές των τριαξονικών δοκιμών. Επίσης, υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση ως προς την υπόθεση αστραγγιστής ή στραγγισμένης εντατικής κατάστασης.

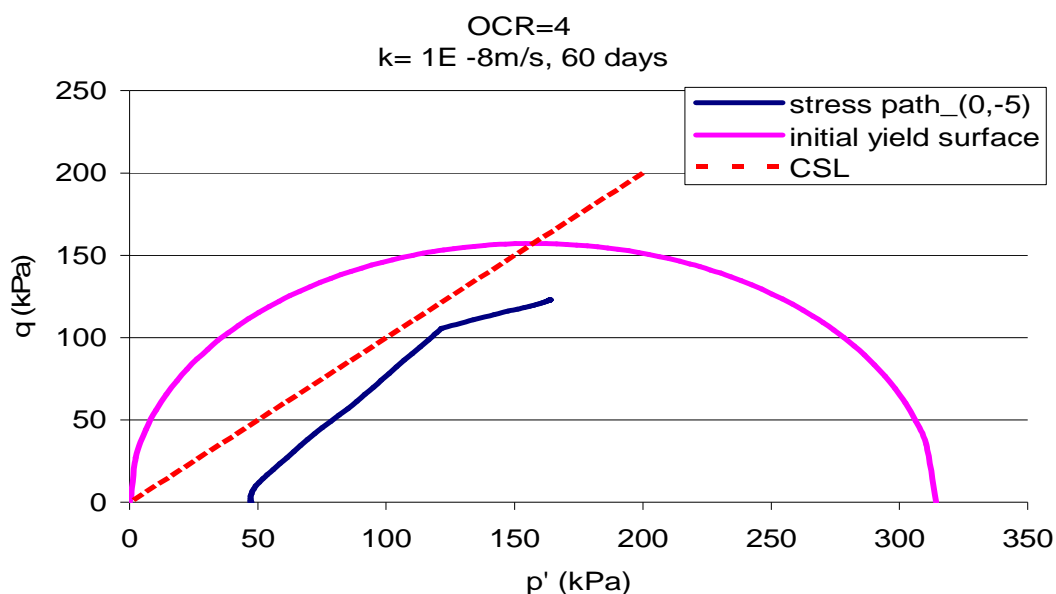


Σχήμα 4.29 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (0,-5), όταν OCR=2.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.29, η διαδρομή των τάσεων για το σημείο (0,-5) τέμνει την επιφάνεια διαρροής του ελαστοπλαστικού Cam-Clay στην κορυφή της έλλειψης, δηλαδή όταν το ελαστοπλαστικό μέτρο κράτυνσης $K_p = 0$. Επιπλέον, μετά την τομή της διαδρομής το εδαφικό στοιχείο συμπιέζεται και υφίσταται κράτυνση υπό την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων. Η ζώνη των πλαστικών παραμορφώσεων για OCR=2 φαίνεται στο Σχήμα 4.30.

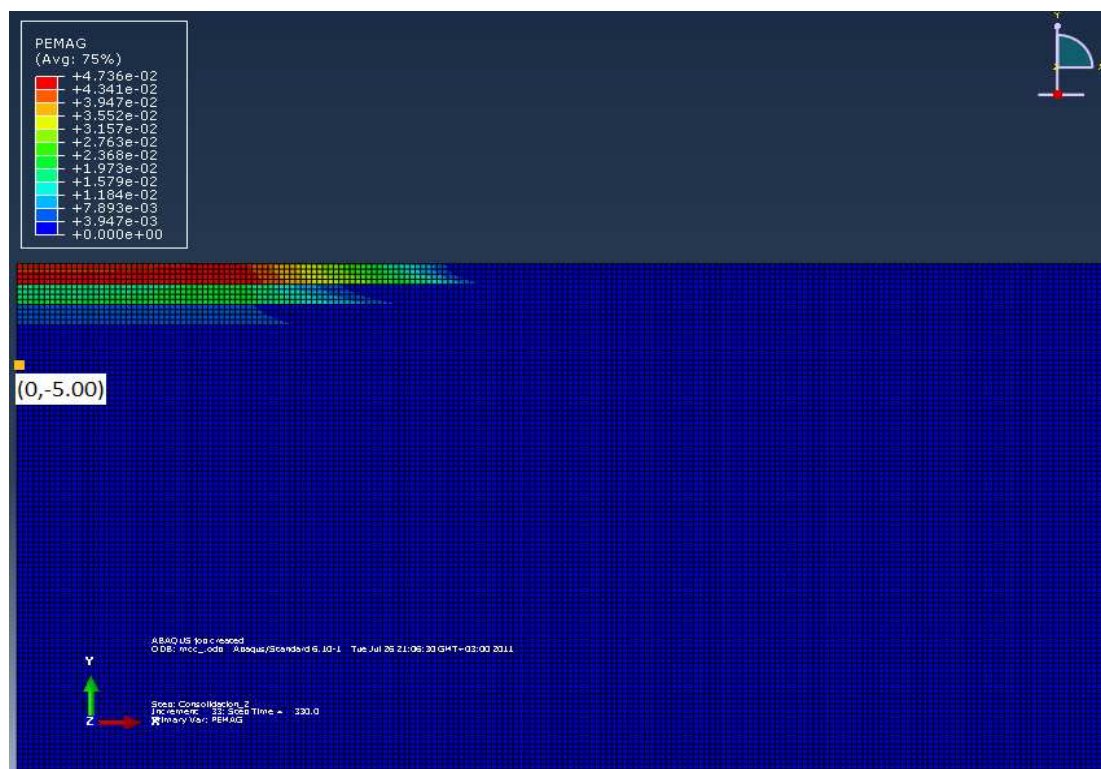


Σχήμα 4.30 Πλαστικές παραμορφώσεις για $OCR=2$ και συντεταγμένες σημείου (0,-5.00).



Σχήμα 4.31 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (0,-5), όταν $OCR=4$.

Με βάση το Σχήμα 4.31, φαίνεται ότι σε όλη τη διάρκεια της μεταβολής της εντατικής κατάστασης το εδαφικό στοιχείο (0,-5) δεν αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις, αφού η διαδρομή δεν τέμνει την αρχική επιφάνεια διαρροής. Αυτό, συνεπάγεται και την έντονη διαφοροποίηση της ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων μεταξύ των δύο αναλύσεων για $OCR=2$ και $OCR=4$, ώστε τελικώς να εμφανίζεται η αιτία της διαφορετικής χρονικής διάρκειας για το πέρας της στερεοποίησης. Η ζώνη των πλαστικών παραμορφώσεων για $OCR=4$ φαίνεται στο Σχήμα 4.32.



Σχήμα 4.32 Πλαστικές παραμορφώσεις για OCR=4 και συντεταγμένες σημείου (0,-5.00).

4.5 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, διερευνήθηκε η περίπτωση της μονοδιάστατης και της διδιάστατης στερεοποίησης, με τα καταστατικά προσομοιώματα της ισότροπης γραμμικής ελαστικότητας και του ελαστοπλαστικού Cam-Clay. Από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων που υλοποιήθηκαν με βάση τη θεωρία της ισότροπης γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς, έχουν ιδιαίτερα καλή προσέγγιση με την αναλυτική επίλυση της μονοδιάστατης στερεοποίησης (Terzaghi). Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται είναι της τάξεως του 10% για μικρούς χρόνους στερεοποίησης, ενώ μειώνονται σε 2% για μεγαλύτερους χρόνους στερεοποίησης.
- Στην αναλυτική επίλυση (Terzaghi) η αύξηση του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης προκαλεί αντιστρόφως ανάλογη μείωση των χρόνων στερεοποίησης. Στην αριθμητική επίλυση υπάρχει απόκλιση κατά μέσο όρο περίπου 5% από το άνωθεν.
- Η αύξηση της υδραυλικής διαπερατότητας συνεπάγεται, μείωση του χρόνου της στερεοποίησης κατά 10 φορές στη μονοδιάστατη στερεοποίηση με ισότροπη και γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά.
- Στην αρχική φάση του φαινομένου της μονοδιάστατης στερεοποίησης υπάρχουν πολύ μεγάλες κλίσεις των διαγραμμάτων μέσου βαθμού στερεοποίησης. Ο κύριος λόγος για τον οποίο συμβαίνει το άνωθεν, είναι γιατί μετά την επιβολή της επιφόρτισης παρουσιάζονται πολύ υψηλές υδραυλικές κλίσεις όπου υπάρχουν συντομικές συνθήκες στράγγισης, αλλά

μηδενικές κλίσεις όπου υπάρχει αδιαπέρατο όριο. Κατά συνέπεια, τα στραγγιζόμενα όρια του στρώματος μεταβάλλουν γρήγορα τον όγκο τους και αναπτύσσουν έντονες κατακόρυφες παραμορφώσεις, ενώ μηδενική μεταβολή του όγκου χαρακτηρίζει τα εδαφικά στοιχεία πλησίον του αδιαπέρατου ορίου.

- Στη διδιάστατη ανάλυση η στερεοποίηση είναι ταχύτερη καθώς συμβαίνει υπό διδιάστατες συνθήκες, λόγω του διδιάστατου «πεδίου» ροής που αναπτύσσεται κάτω από την επιφόρτιση που συνεπάγεται, ταχύτερη στράγγιση και αποτόνωση της υπερπίεσης πόρων. Επίσης, όσο αυξάνεται ο λόγος της μονοδιάστατης προς τη διδιάστατη επιφάνεια φόρτισης το φαινόμενο επιταχύνεται περισσότερο.
- Στην περίπτωση της ταχείας φόρτισης στη διδιάστατη ανάλυση, το άθροισμα των καθιζήσεων προκύπτει από τις άμεσες καθιζήσεις (πριν τη στράγγιση) και τις καθιζήσεις εκ στερεοποίησης (ο ερπυσμός δε λαμβάνεται υπόψη). Εμφανές είναι, ότι οι καθιζήσεις της μονοδιάστατης στερεοποίησης (δηλαδή κατά την αποτόνωση) είναι μεγαλύτερες από τις καθιζήσεις εκ διδιάστατης στερεοποίησης.
- Η οριζόντια υδραυλική διαπερατότητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο ως προς την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης. Αυτό, επιβεβαιώνεται και από τη διερεύνηση, καθώς η επιρροή της ανισότροπης υδραυλικής διαπερατότητας στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά συνεπάγεται μείωση του χρόνου της στερεοποίησης κατά 15-20% περίπου, ανάλογα με το πόσο έντονη είναι η ανισοτροπία.
- Οι τελικές καθιζήσεις της μονοδιάστατης ανάλυσης είναι μικρότερες από της διδιάστατης κατάστασης τόσο στην ισότροπη και γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά όσο και στο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Cam-Clay. Επιπρόσθετα, οι διογκώσεις στην ισότροπη και γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά αυξάνονται με την απόσταση από τον άξονα του επιχώματος, ενώ στην ελαστοπλαστική κατάσταση τούτο δεν συμβαίνει πάντοτε, καθώς εξαρτάται από την επιρροή των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσει η εδαφική μάζα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στη διδιάστατη κατάσταση με ισότροπη και γραμμική συμπεριφορά υπάρχει σχέση αντιστρόφως ανάλογη μεταξύ καθιζήσεων-διογκώσεων με το μέτρο ελαστικότητας.
- Για την ταχεία φόρτιση στη διδιάστατη περίπτωση της ισότροπης ελαστικότητας τονίζεται, ότι αρχικά υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες μετακινήσεις για τα σημεία που διογκώνονται-καθιζάνουν (άμεσες καθιζήσεις) και στη συνέχεια υφίστανται μεταβολές μέχρι την τελική τους τιμή. Αυτό, οφείλεται στις “αστράγγιστες” συνθήκες και παραμορφώσεις υπό μηδενική σχεδόν ογκομετρική παραμόρφωση. Έπειτα, καθώς εξελίσσεται η στερεοποίηση, υπάρχει μείωση των διογκώσεων και χρονική μεταβολή των καθιζήσεων αφού αναπτύσσονται στραγγισμένες συνθήκες (αποτόνωση υπερπίεσεων), με υψηλές υδραυλικές κλίσεις στα διαπερατά σύνορα.
- Όσον αφορά τη συμπεριφορά των δύο καταστατικών προσομοιωμάτων, είναι προφανές ότι η εξέλιξη της στερεοποίησης επιταχύνεται με τη συμπεριφορά της ποροελαστικότητας. Αυτό οφείλεται στη μεταβλητή

συμπιεστότητα, καθώς όσο στραγγίζει και συμπιέζεται το έδαφος υφίστανται μεταβολή του δείκτη πόρων του. Επομένως, η συμπιεστότητα του μειώνεται σε κάθε βήμα που εξελίσσεται η στερεοποίηση, το οποίο συνεπάγεται και συνεχή αύξηση του συντελεστή στερεοποίησης.

- Συγκρίνοντας τις αναλύσεις που έγιναν με το καταστατικό προσομοίωμα του ελαστοπλαστικού Cam-Clay, παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή OCR συνεπάγεται, μείωση του χρόνου της στερεοποίησης. Αυτό χαρακτηρίζεται φυσιολογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι αύξηση του συντελεστή προφόρτισης, οδηγεί σε μικρότερη ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων και επομένως, σε μικρότερη συμπιεστότητα του εδάφους. Κατά συνέπεια, η αύξηση του OCR προκαλεί μικρότερες καθιζήσεις και διογκώσεις, υποθέτοντας βέβαια ότι οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Επίσης, για τις ίδιες τιμές του συντελεστή OCR αύξηση ή μείωση των δεικτών C_c, C_r συνεπάγονται, αντίστοιχα επιβράδυνση και επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης.
- Όσον αφορά τις υπερπίεσεις πόρων, συνήθως αυξάνονται καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής (με την προϋπόθεση να είναι συνεχής) και στη συνέχεια, μειώνονται μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Ως ποσοστό η υπερπίεση τείνει να αυξάνεται στις περιπτώσεις που ο εδαφικός σχηματισμός είναι περισσότερο συμπιεστός. Κατά συνέπεια τούτου στα πιο μαλακά εδάφη επιβραδύνεται η στερεοποίηση, ενώ παράλληλα αυξάνονται οι πιθανότητες αστοχίας αφού μειώνεται η αντοχή τους. Τέλος, όπως αναμένεται, αυξάνοντας την οριζόντια απόσταση από τον άξονα της φόρτισης οι υπερπίεσεις πόρων μειώνονται, ενώ αντίθετα με την καθ' ύψος μετακίνηση δεν συνεπάγεται το ίδιο.
- Αξίζει να σημειωθεί, ότι κατά την αριθμητική διερεύνηση, η μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι (κατά φθίνουσα σειρά) περισσότερο ευαίσθητη στη διακύμανση του συντελεστή προφόρτισης OCR έπειτα, στην παράμετρο λ , ενώ η παράμετρος κ επηρεάζει το λιγότερο. Τονίζεται, ότι η άνω υπόθεση ισχύει με την ίδια αντιστοιχία και στις υπερπίεσεις πόρων. (περισσότερα βλ. στο Κεφάλαιο 6 και Παράρτημα Γ)

Τέλος, παρουσιάζονται στους συγκεντρωτικούς πίνακες 4.13 και 4.14 οι χρόνοι στερεοποίησης $t_{50\%}$ και $t_{90\%}$ των αριθμητικών αναλύσεων με το καταστατικό προσομοίωμα του Cam-Clay, για να αποσαφηνιστεί η επιρροή των μηχανικών παραμέτρων στο φαινόμενο της στερεοποίησης. Επισημαίνεται, ότι όσες αναλύσεις δεν παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

Πίνακας 4.13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για $t_{50\%}$ και $t_{90\%}$, με διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες, $C_c=0.20$, $C_r=0.02$ και $k=10^{-8}$ m/s.

1D	2D	1D	2D	OCR	$C_c=0.20$, $C_r=0.02$, $k=10^{-8}$ m/s, 60 days
$t_{90\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)		
971	-	201	-	1	
213	170	60	52	2	
131	100	51	41	3	
109	79	47	38	4	

Κεφάλαιο 4^ο : Αριθμητική Διερεύνηση Στερεοποίησης Αργλικών Στρώσεων

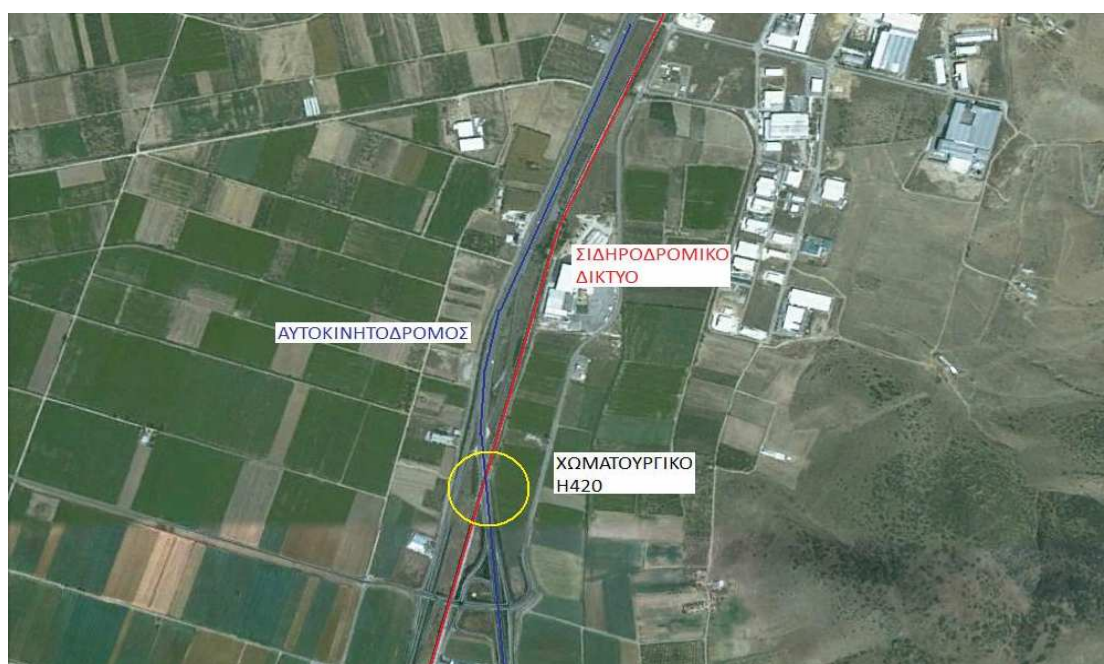
Πίνακας 4.14 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για $t_{50\%}$ και $t_{90\%}$, με διάρκεια κατασκευής 60 ημέρες και $k=10^{-8}$ m/s.

1D	2D	1D	2D	$C_c = 10C_r$	
$t_{90\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)	$t_{50\%}$ (days)		
114	82	48	40	0.4	OCR=4, $k= 1E-8$ m/s , 60 days
300	190	50	46	0.8	
321	300	76	60	0.4	OCR=2, $k= 1E-8$ m/s , 60 days
710	-	130	-	0.8	

Κεφάλαιο 5^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις

5.1 Εισαγωγή

Εφαλτήριο για το πρόβλημα που διερευνήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκιμαστικού επιχώματος στην περιοχή του χωματουργικού έργου H420 (CH. 0+900) του τμήματος ΠΑΘΕ Μαλιακός – Κλειδί (συνταχθείσα μελέτη από την «ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ¹» Α.Τ.Ε, για λογαριασμό της «ΑΚΤΩΡ» Α.Τ.Ε - βλ. Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Αεροφωτογραφία του τμήματος ΠΑΘΕ Μαλιακός – Κλειδί, περιοχή χωματουργικού έργου H420.

5.2 Στοιχεία για το χωματουργικό έργο H420

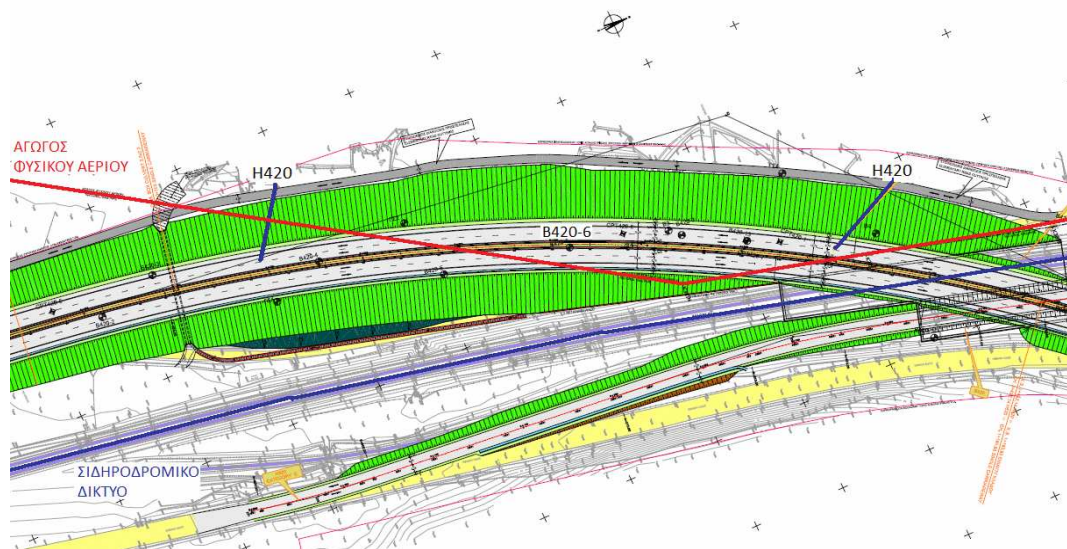
Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός του χωματουργικού έργου H420 (βλ. Σχήμα 5.2) έγινε λαμβάνοντας υπόψη δύο βασικές παραμέτρους:

- Την παρουσία του σιδηροδρομικού δικτύου υψηλών ταχυτήτων, που είναι παράλληλο και εφαπτόμενο με την ανατολική πλευρά του κύριου αυτοκινητόδρομου.
- Την παρουσία αγωγού φυσικού αερίου υψηλών πιέσεων, που βρίσκεται κάτω από το υπό μελέτη χωματουργικό έργο H420 (CH. 0+700 έως CH. 1+150 κατά προσέγγιση).

Με βάση τις άνωθεν παραμέτρους, τέθηκαν οι περιορισμοί της ελαχιστοποίησης οποιονδήποτε οχλήσεων και αποφυγής αστοχιών στα παραπάνω έργα υποδομής, που θα ήταν πιθανό να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της

¹ Η προμήθεια των γεωτεχνικών οργάνων και των παρελκόμενων στοιχείων όπως και οι μετρήσεις αυτών έγιναν από την «ΕΥΡΩΤΕΧΝΙΚΑ» Ε.Π.Ε και αξιολογήθηκαν κατάλληλα κατά την μελέτη και το σχεδιασμό του χωματουργικού έργου H420 Μελετητή του Έργου «ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ» Α.Τ.Ε.

κατασκευής του χωματουργικού έργου H420. Αναλυτικότερα, οι περιορισμοί αφορούν την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων και μετατοπίσεων στον αγωγό του φυσικού αερίου και του σιδηροδρομικού δικτύου, ενώ τίθεται πρόσθετος περιορισμός ώστε να είναι δυνατή η μελλοντική αλλαγή της χάραξης του σιδηροδρομικού δικτύου, χωρίς να παρεμποδίζεται από το χωματουργικό έργο H420.



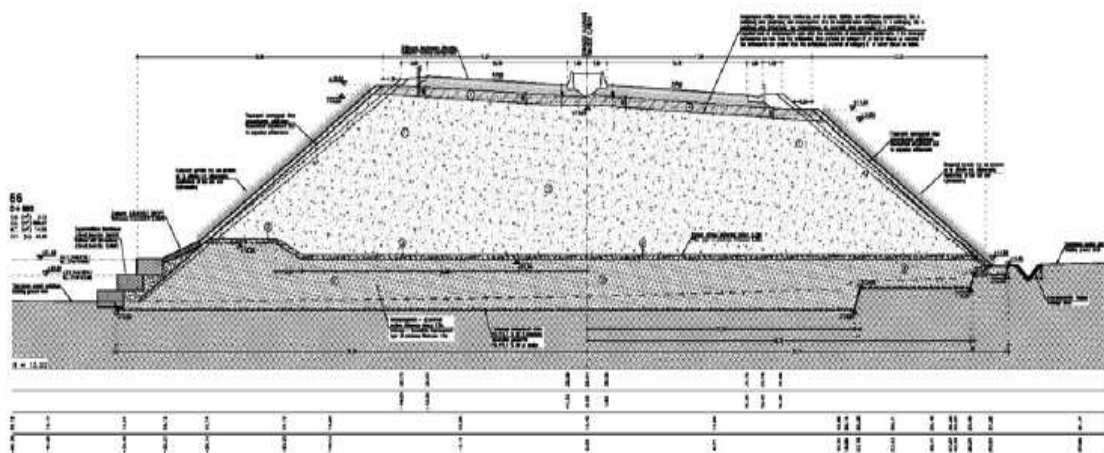
Σχήμα 5.2 Οριζοντιογραφία του τμήματος ΠΑΘΕ Μαλιακός – Κλειδί, περιοχή χωματουργικού έργου H420. (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΡΡΑ Consulting)

Ο αρχικός σχεδιασμός του χωματουργικού έργου H420, λόγω των παραπάνω περιορισμών, έγινε με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

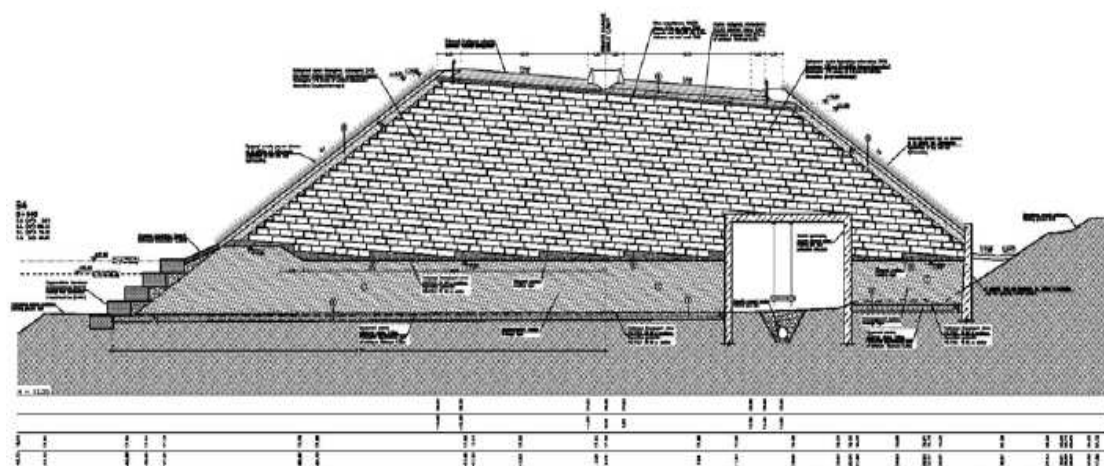
Πίνακας 5.1 Κύρια χαρακτηριστικά χωματουργικού έργου H420.

Πλευρά Αυτοκινητόδρομου	Χ.Θ (C.H)	Σύνθεση	Μέγιστο ύψος (m)
Δεξιά	0+615 - 0+830	Συμβατικό υλικό (κλίση 2:3)	13.00
	0+830 - 0+860	50% Συμβατικό υλικό και 50% EPS (κλίση 2:3)	13.50
	0+860 - 1+150	EPS (κλίση 2:3)	13.50
Αριστερή	0+615 - 0+830	Συμβατικό υλικό (κλίση 2:3)	16.00
	0+830 - 0+860	50% Συμβατικό υλικό και 50% EPS (κλίση 2:3)	18.00
	0+860 - 1+150	EPS (κλίση 2:3)	19.00

Σύμφωνα με τον άνωθεν Πίνακα 5.1, ο αρχικός γεωτεχνικός σχεδιασμός του χωματουργικού H420 θα είχε τραπεζοειδή διατομή με κλίση πρανών 2:3 σε όλες τις χλιομετρικές θέσεις. Επίσης, ανάλογα με το διάστημα της χλιομετρικής θέσης η σύνθεση του επιχώματος θα αποτελείτο είτε από συμβατικά υλικά είτε από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)². Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικές τομές του χωματουργικού H420, που αντιστοιχούν στα χλιομετρικά διαστήματα 0+615 – 0+830 (Σχήμα 5.3) και 0+860 – 1+150 (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.3 Ενδεικτική τομή χωματουργικού έργου H420 στο διάστημα CH. 0+615 – 0+830. (OMIKRON KAPPA Consulting)



Σχήμα 5.4 Ενδεικτική τομή χωματουργικού έργου H420 στο διάστημα CH. 0+860 – 1+150. (OMIKRON KAPPA Consulting)

5.3 Εναλλακτικός σχεδιασμός χωματουργικού έργου H420

Στη συνέχεια, λόγω του μεγάλου κόστους χρήσης και τοποθέτησης της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), προτάθηκε εναλλακτικός γεωτεχνικός σχεδιασμός, ώστε να αντικατασταθεί μερικώς ή πλήρως η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) με συμβατικά υλικά επιχώματος (μικρότερου κόστους), που βρίσκονται πλησίον της περιοχής του χωματουργικού έργου H420.

² Επισημαίνεται, ότι η τοποθέτηση διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) είναι ακριβότερη, αλλά ελαφρύτερη από τα συμβατικά υλικά.

Για το σκοπό αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος εγγύς του χωματουργικού έργου H420, προς διερεύνηση του εναλλακτικού γεωτεχνικού σχεδιασμού αντικατάστασης του υλικού EPS με συμβατικά υλικά. Επιπρόσθετα εκτεταμένο γεωτεχνικό σύστημα παρακολούθησης τοποθετήθηκε για τον προσδιορισμό της εξέλιξης των μετατοπίσεων και των συνυφασμένων με αυτές πιέσεων στον αγωγό του φυσικού αερίου και του σιδηροδρομικού δικτύου.

5.3.1 Γενικά στοιχεία για το δοκιμαστικό επίχωμα

Όπως αναφέρεται παραπάνω, δοκιμαστικό επίχωμα κατασκευάστηκε πλησίον του χωματουργικού έργου H420, ώστε να εξεταστεί η πιθανότητα μερικής ή πλήρους αντικατάστασης του ελαφριού υλικού EPS που πρόκειται να τοποθετηθεί από CH. 0+830 έως CH. 1+150.

Το δοκιμαστικό επίχωμα, που αναμένετο να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του γεωτεχνικού σχεδιασμού H420, κατασκευάστηκε με τραπεζοειδή διατομή (κλίση πρανών 2:3).

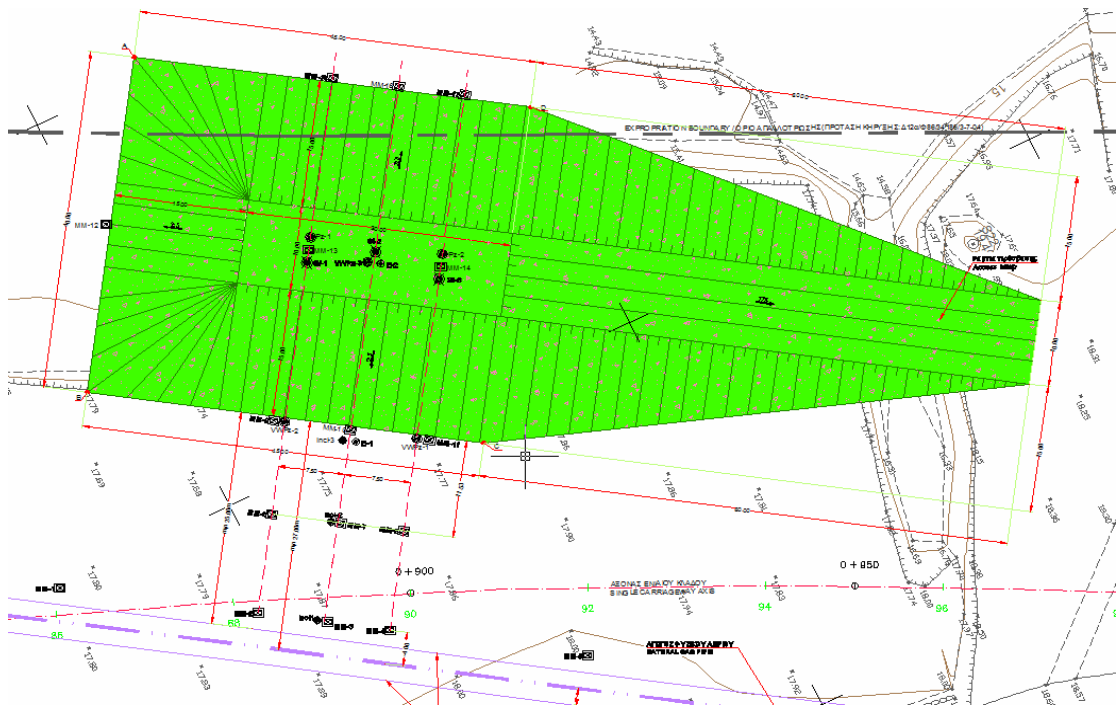
Επίσης, οι διαστάσεις του δοκιμαστικού επιχώματος (μήκος, πλάτος και ύψος) εξαρτήθηκαν από την τοποθεσία και το διαθέσιμο χώρο, ώστε να πληρούνται οι κάτωθι προϋποθέσεις:

- Η τοποθεσία της κατασκευής να γίνει εγγύς του αγωγού φυσικού αερίου και σιδηροδρομικού δικτύου, ώστε να υπάρχουν παρόμοιες εδαφικές συνθήκες.
- Η απαίτηση το δοκιμαστικό επίχωμα να είναι όσο πιο ψηλό γίνεται.
- Η απαίτηση το δοκιμαστικό επίχωμα να καλύπτει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια θεμελίωσης.
- Η ανάγκη να υπάρχουν πρακτικά μηδενικές μετατοπίσεις στον αγωγό φυσικού αερίου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα άνωθεν, αλλά και την πολυπλοκότητα³ του γεωλογικού υποβάθρου, κρίθηκε απαραίτητο το δοκιμαστικό επίχωμα να έχει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια με μήκος 60.00m και πλάτος 40.00m, ώστε να εκφυλιστεί το φαινόμενο τρισδιάστατης επιφόρτισης σε πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη το ύψος (18.00m) του επιχώματος (H420) οδοποιίας, που πρόκειται να κατασκευαστεί στην περιοχή, το δοκιμαστικό επίχωμα κρίθηκε αναγκαίο να έχει ένα σημαντικό σχετικό ύψος, ώστε να προσομοιωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η ανάλογη απόκριση του χωματουργικού έργου (H420). Με βάση αυτό, το ύψος του δοκιμαστικού επιχώματος επιλέχθηκε και κατασκευάστηκε 10.00m. Ο συνολικός όγκος του επιχώματος ήταν 18.000m³ κατά προσέγγιση. Επίσης, όσον αφορά τον πόδα του δοκιμαστικού επιχώματος βρίσκεται 27.00m από τον άξονα του αγωγού του φυσικού αερίου, απόσταση που θεωρήθηκε ασφαλής για να μην υπάρξουν μετατοπίσεις στον αγωγό. Το επίχωμα

³ Τονίζεται, ότι η επιλεγείσα τοποθεσία κατασκευής του δοκιμαστικού επιχώματος είναι από τις πιο ανεπιθύμητες, λόγω των πολύπλοκων γεωτεχνικών συνθηκών, καθώς υπάρχει συνδυασμός στρώσεων που συμπεριφέρονται με έντονα διαφορετικές ιδιότητες, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

τοποθετήθηκε από το CH. 0+865 έως CH. 0+923 κατά προσέγγιση. Σημειώνεται, ότι εκτός από τα βασικά στοιχεία του επιχώματος, κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι κατασκευάστηκε και ράμπα με κλίση 17%. (βλ. Σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.5 Κάτοψη δοκιμαστικού επιχώματος. (OMIKRON KAPPA Consulting)

5.3.2 Γεωτεχνική παρακολούθηση δοκιμαστικού επιχώματος

Σκοπός του προγράμματος ήταν η εκτέλεση ερευνητικών εργασιών στην περιοχή του δοκιμαστικού επιχώματος του χωματουργικού έργου Η420 και περιελάμβανε την εκτέλεση δεκαπέντε (15) γεωτρήσεων με εγκατάσταση γεωτεχνικών οργάνων σε αυτές και μίας (1) επιβεβαιωτικής δειγματοληπτικής γεώτρησης με εγκατάσταση γεωτεχνικού οργάνου χωρίς εργαστηριακές δοκιμές.

Πιο αναλυτικά, τα γεωτεχνικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στη διερεύνηση της συμπεριφοράς του δοκιμαστικού επιχώματος είναι:

- **Αποκλισιόμετρα** για την εξέταση των οριζόντιων μετακινήσεων στην περιοχή του δοκιμαστικού επιχώματος. Τα αποκλισιόμετρα είναι όργανα που εγκαθίστανται σε οπές των γεωτρήσεων και χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των μετακινήσεων. Όπως προβλέπεται από τις Τεχνικές Προδιαγραφές η ελάχιστη διάμετρος της γεώτρησης στην οποία πρόκειται να τοποθετηθεί αποκλισιόμετρο είναι 101 χιλιοστά, ενώ οι σωληνώσεις είναι από συνθετικά υλικά (ABS). Η εγκατάσταση της αποκλισιομετρικής σωλήνωσης έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες της προμηθεύτριας εταιρείας. Το διάστημα μεταξύ του τοιχώματος της γεώτρησης και της σωλήνωσης πληρώθηκε με ένεμα μίγματος τσιμέντου - μπετονίτη με κατάλληλη σύνθεση που εισπιέζεται μέσω σωλήνα από τον πυθμένα της γεώτρησης.
- **Μηκυνσιόμετρα** για την εξέταση των κατακόρυφων μετακινήσεων στην περιοχή του δοκιμαστικού επιχώματος. Τα μηκυνσιόμετρα είναι όργανα που

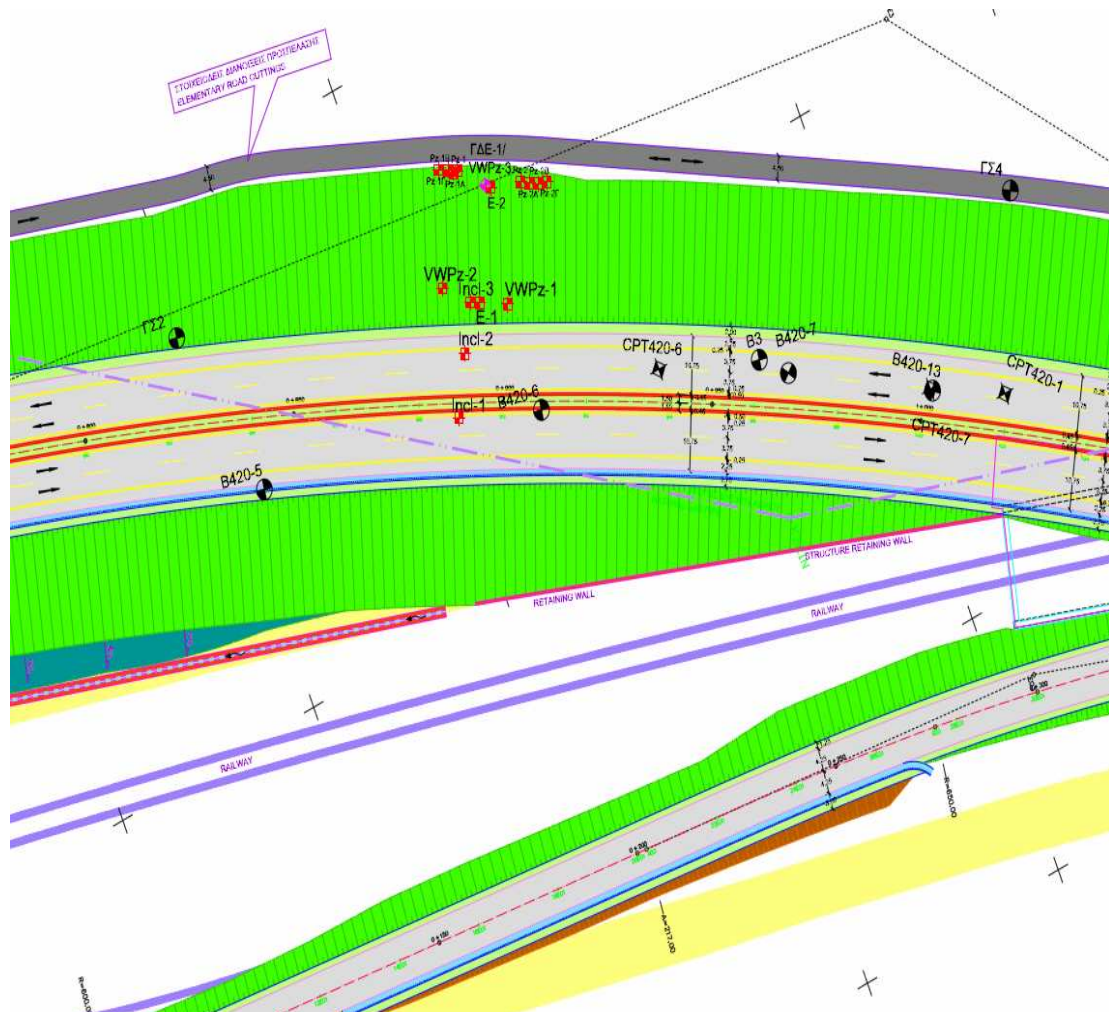
εγκαθίστανται σε οπές των γεωτρήσεων και χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των καθιζήσεων. Ο οδηγός των μαγνητικών δακτυλίων μέτρησης των καθιζήσεων αποτελείται από σωλήνα υλικού PVC εσωτερικά και σπειροειδούς μορφής σωλήνα εξωτερικά. Όπως και παραπάνω το διάστημα μεταξύ του τοιχώματος της γεώτρησης, του οδηγού και των μαγνητικών δακτυλίων πληρώθηκε με ένεμα μίγματος τσιμέντου-μπετονίτη.

- **Μάρτυρες καθιζήσεων** για τη μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων στην περιοχή του δοκιμαστικού επιχώματος. Οι δείκτες καθιζήσεων αποτελούνται από μεταλλικό σωλήνα, που θεμελιώνεται σε βάση σκυροδέματος πάχους 50 εκατοστών, γύρω από τον οποίο υπάρχει σωλήνας PVC, για να μειωθεί το φαινόμενο αρνητικής τριβής. Οι μεταλλικοί σωλήνες πρέπει να ενσωματωθούν στο σκυρόδεμα όχι λιγότερο από 30 εκατοστά, ενώ θα πρέπει να εξασφαλιστεί η άνω επέκταση του σωλήνα κατά την άνοδο του επιχώματος προσθέτοντας κομμάτια σωλήνα 1.50 μέτρου ανά 1.00 μέτρο ανόδου (με ζευκτά). Οι σωλήνες PVC θα επεκταθούν αναλόγως.
- **Επιφανειακοί μάρτυρες** για την εξέταση των μετατοπίσεων. Οι επιφανειακοί μάρτυρες αποτελούνται από συμπαγείς βάσεις σκυροδέματος.
- **Πιεζόμετρα Casagrande και ηλεκτρικά πιεζόμετρα παλλόμενης χορδής** για την εξέταση της μεταβολής της πίεσης πόρων. Τα πιεζόμετρα ή οι σωλήνες παρακολούθησης είναι όργανα που εγκαθίστανται σε οπές των γεωτρήσεων και χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της πίεσης των πόρων ή της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα. Υπάρχουν οι εξής τύποι πιεζομέτρων:
 1. Οι σωλήνες παρακολούθησης υπόγειας στάθμης, που αποτελούνται από μεταλλικούς ή πλαστικούς σωλήνες, στους οποίους η οπή γεμίζει με κατάλληλο υλικό φίλτρου (standpipe).
 2. Τα πιεζόμετρα πορώδους άκρου (τύπου Casagrande), που αποτελούνται από μεταλλικούς ή πλαστικούς σωλήνες που διαθέτουν ένα βραχύ διαπερατό τμήμα, ενώ το υπόλοιπο μήκος τους είναι συμπαγές. Το διαπερατό τμήμα βρίσκεται σε απομονωμένο θύλακα γεμάτο με κατάλληλο υλικό φίλτρου.
 3. Τα ηλεκτρικά πιεζόμετρα, που είναι παρόμοια με τα πιεζόμετρα Casagrande με τη διαφορά ότι ο σωλήνας αντικαθίσταται με ηλεκτρικό αισθητήρα μέτρησης της πίεσης των πόρων.

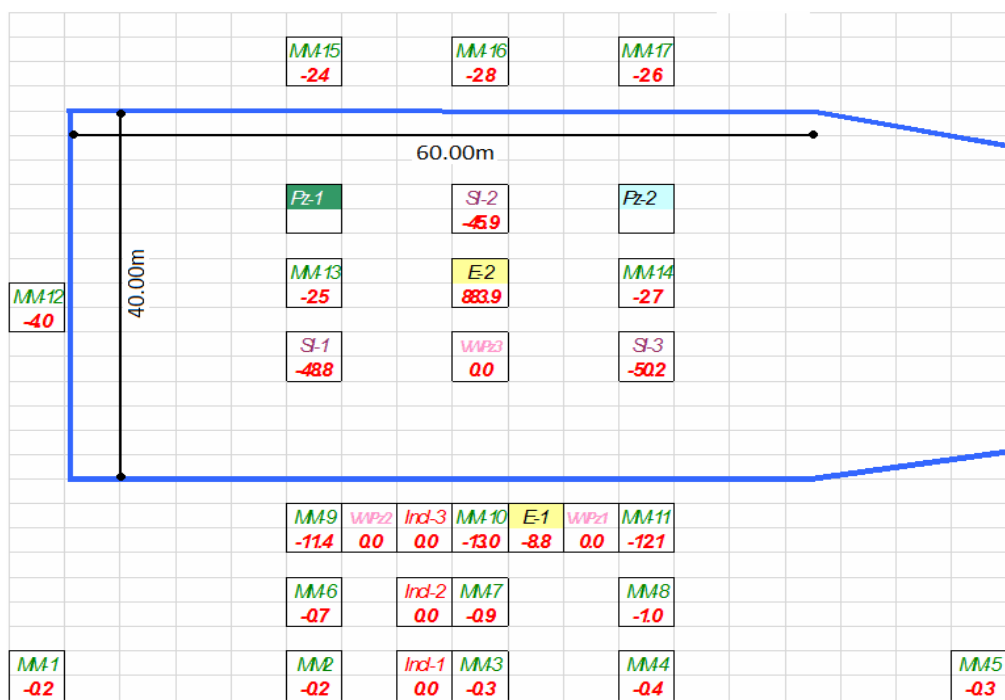
Στο συγκεκριμένο έργο, επιτεύχθηκε συνεχής δειγματοληψία με χρήση απλής / διπλής ή διαιρούμενης καρτοαρίας ανάλογα με τη φύση των σχηματισμών μέχρι το μέγιστο βάθος διάτρησης στην δειγματοληπτική γεώτρηση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ενδεικτικά η οριζοντιογραφία ώστε να διευκρινιστεί η θέση των οργάνων ως προς το έργο H420 (βλ. Σχήμα 5.6). Κατόπιν, ακολουθεί η κάτοψη-σκαρίφημα του δοκιμαστικού επιχώματος (βλ. Σχήμα 5.7) και ενδεικτική τομή (βλ. Σχήμα 5.8). Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται το αναλυτικό εκτελεσθέν πρόγραμμα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τομές -σκαρίφηματα- των γεωτεχνικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση του δοκιμαστικού επιχώματος.

Κεφάλαιο 5^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις

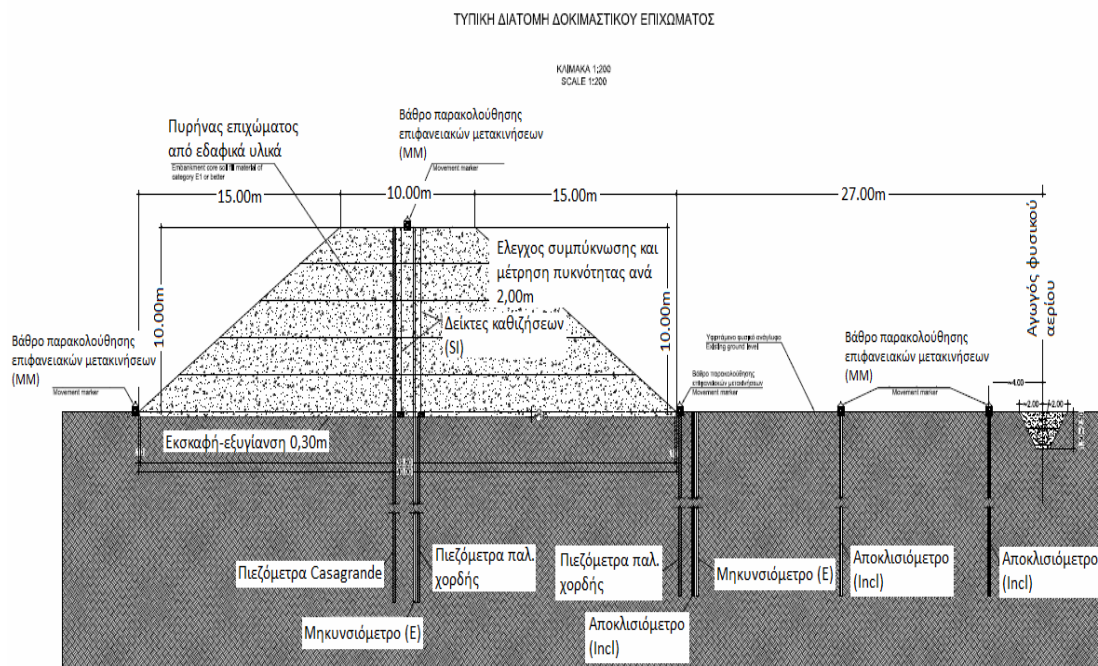


Σχήμα 5.6 Οριζοντιογραφία για τη διευκρίνιση της θέσης των γεωτεχνικών οργάνων ως προς το χωματουργικό έργο H420. (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΡΡΑ Consulting)



Σχήμα 5.7 Σκαρίφημα θέσης γεωτεχνικών οργάνων.

Κεφάλαιο 5^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις



Σχήμα 5.8 Ενδεικτική τομή του δοκιμαστικού επιχώματος. (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΡΡΑ Consulting)

Πίνακας 5.2 Εκτελεσθέν πρόγραμμα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

A/A	Περιγραφή	Γεωτρήσεις	Βάθος (m)	Όργανο
1	Περιοχή Δοκιμαστικού Επιχώματος (Χωματοουργικό έργο H420 Τμήμα ΠΑΘΕ Μαλιακός-Κλειδί)	VWPz-1	40.00	Παλ. Χορδής
2		VWPz-2	33.00	Παλ. Χορδής
3		VWPz-3	40.00	Παλ. Χορδής + δειγματοληπτική
4		Pz-1	37.50	Τύπου Casagrande
5		Pz-1A	24.00	Τύπου Casagrande
6		Pz-1B	16.10	Τύπου Casagrande
7		Pz-1Γ	8.10	Τύπου Casagrande
8		Pz-2	39.50	Τύπου Casagrande
9		Pz-2A	24.50	Τύπου Casagrande
10		Pz-2B	15.50	Τύπου Casagrande
11		Pz-2Γ	8.00	Τύπου Casagrande
12		Incl-1	32.00	αποκλισιόμετρο
13		Incl-2	40.00	αποκλισιόμετρο
14		Incl-3	40.50	αποκλισιόμετρο
15		E-1	39.90	μηκυνσιόμετρο
16		E-2	40.00	μηκυνσιόμετρο

5.3.2.1 Γεωτεχνική διερεύνηση κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα

Επισημαίνεται, ότι κατά την εκτέλεση της δειγματοληπτικής γεώτρησης τελέστηκαν επιτόπου δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης κατά Terzaghi (SPT). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3 Δοκιμές Πρότυπης διείσδυσης SPT σε ΓΔΕ-1. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Γεώτρηση	Βάθος (m)	Κρούσεις	SPT	Περιγραφή
ΓΔΕ-1	2.10-2.55	1-1-2	3	Καστανή αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με διάσπαρτους μικρούς χάλικες
ΓΔΕ-1	4.80-5.25	2-2-4	6	Καστανή αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με διάσπαρτους μικρούς χάλικες
ΓΔΕ-1	7.10-7.55	3-4-6	10	Καστανότεφρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με λίγα ασβεστίτικα συγκρίματα και οξειδία
ΓΔΕ-1	10.10-10.55	3-3-4	7	Καστανότεφρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με λίγους διάσπαρτους χάλικες και οξειδία
ΓΔΕ-1	12.80-13.25	4-4-4	8	Καστανότεφρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με λίγους διάσπαρτους χάλικες και οξειδία
ΓΔΕ-1	15.60-16.05	4-6-6	12	Καστανή έως καστανοπράσινη ιλυώδης ΑΜΜΟΣ
ΓΔΕ-1	18.70-19.15	4-6-11	17	Καστανοπράσινη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με οξειδία
ΓΔΕ-1	21.50-21.95	4-6-12	18	Καστανότεφρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με λίγους διάσπαρτους χάλικες και οξειδία
ΓΔΕ-1	24.00-24.45	5-7-13	20	Καστανότεφρη έως τεφροπράσινη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με διάσπαρτους αποσαθρωμένους και συμπαγείς χάλικες σχιστόλιθου
ΓΔΕ-1	27.00-27.45	5-8-12	20	Καστανότεφρη έως τεφροπράσινη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με διάσπαρτους αποσαθρωμένους και συμπαγείς χάλικες σχιστόλιθου
ΓΔΕ-1	29.40-29.85	8-17-16	33	Καστανότεφρη έως τεφροπράσινη αργιλο-ιλυώδης ΑΜΜΟΣ έως, μετά τα 31.50m, χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με μεγάλο ποσοστό χαλικών και σχιστολιθικών τεμαχίων
ΓΔΕ-1	31.90-32.10	14-50/5 cm	Άρνηση	Καστανότεφρη έως τεφροπράσινη αργιλο-ιλυώδης ΑΜΜΟΣ έως, μετά τα 31.50m, χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με μεγάλο ποσοστό χολικών και σχιστολιθικών τεμαχίων
ΓΔΕ-1	34.20-34.65	10-17-18	35	Καστανέρυθρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με τεμάχια και χάλικες κυρίως σχιστολιθικής και ασβεστολιθικής προέλευσης
ΓΔΕ-1	36.80-37.25	10-17-17	34	Καστανέρυθρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με τεμάχια και χάλικες κυρίως σχιστολιθικής και ασβεστολιθικής προέλευσης

Από τις παραπάνω μετρήσεις πρότυπης διείσδυσης (SPT), κρίθηκε αναγκαίο να υπάρξει συσχέτιση μεταξύ των άνωθεν μετρήσεων και του γεωλογικού υποβάθρου, που βρίσκεται κάτω από το χωματουργικό έργο Η420. Πιο συγκεκριμένα, η συσχέτιση έγινε με τη γεώτρηση Β420-6 (CH. 0+910), που είναι η πλησιέστερη (52.50m) στο δοκιμαστικό επίχωμα και στη δειγματοληπτική γεώτρηση ΓΔΕ-1.

Κεφάλαιο 5^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη γεώτρηση B420-6 εκτός από επιτόπου μετρήσεις SPT (Πίνακας 5.4) διεξήχθησαν και εργαστηριακές δοκιμές (Πίνακας 5.5), στοιχεία της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω ανάλυση του υπεδάφους κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.

Πίνακας 5.4 Δοκιμές Πρότυπης διείσδυσης SPT σε B420-6. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Γεώτρηση	Βάθος [m]		Κρούσεις (SPT)
	Από	Έως	
B420-6	2.40	2.85	20
	4.90	5.35	4
	9.00	9.45	7
	11.70	12.15	Άρνηση
	14.10	14.55	19
	16.20	16.65	60
	18.70	19.15	50
	22.00	22.45	29
	25.20	25.65	12

Πίνακας 5.5 Προτεινόμενες τιμές εργαστηριακών μετρήσεων στα δείγματα γεώτρησης B420-6. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Παράμετροι σχεδιασμού	Τύπος στρώσης			
	I	II	III	IV
Ειδικό βάρος, γ [kN/m ³]	21.5	21.0	21.0	21.0
Συνοχή, c' [kPa]	10	20	5	5
Γωνία Τριβής, ϕ' [°]	35	23	30	24
Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή, S_u [kPa]	-	75	-	50
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπίεσης, E_s [MPa]	30	15	9	8
Μέτρο Ελαστικότητας, E [MPa]	20	10	6	6
Υδραυλική Διαπερατότητα, k [cm/sec]	10^{-3}	5×10^{-5}	10^{-3}	5×10^{-5}
Δείκτης Συμπίεσης [C_c]	-	0.140	-	0.170
Δείκτης Διόγκωσης [C_s]	-	0.014	-	0.017
Σταθερά Στερεοποίησης, c_v [m ² /year]	-	15	-	15
Συντελεστής Poisson, ν	0.30	0.40	0.35	0.46
Γεωτεχνική Περιγραφή	SC-SM, GC, GM	CL, CL-ML	SC, SM, SC-SM	CL, ML
Συντελεστής Προφόρτισης [OCR]	-	1.0-2.5	-	1.0-2.5

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.6 διαφαίνεται η γεωτεχνική στρωματογραφία της γεώτρησης B420-6 (H420), και στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζεται η γεωτεχνική αξιολόγηση των στρώσεων της ΓΔΕ-1 (δοκιμαστικό επίχωμα), με βάση τα λεπτομερέστερα στοιχεία των στρώσεων της γεώτρησης B420-6 (Πίνακας 5.5).

Πίνακας 5.6 Γεωτεχνική κατανομή στρώσεων στη γεώτρηση B420-6 (H420). (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Γεώτρηση	Βάθος [m]		Πάχος [m]	Γεωτεχνική ομάδα
	From	To		
B420-6	0.00	0.50	0.50	Φυτικές γαίες
	0.50	10.10	9.60	IV
	10.10	14.70	4.60	II
	14.70	20.50	5.80	I
	20.50	27.20	6.70	II
	27.20	30.20	3.00	Βραχώδης σχιστόλιθος

Πίνακας 5.7 Γεωτεχνική κατανομή στρώσεων στη θέση του δοκιμαστικού επιχώματος. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Γεώτρηση	Βάθος [m]		Πάχος [m]	Γεωτεχνική ομάδα
	From	To		
ΓΔΕ-1	0.00	0.30	0.30	Φυτικές γαίες
	0.30	14.00	13.70	IV
	14.00	18.00	4.00	III
	18.00	22.50	4.50	IV
	22.50	29.00	7.50	II
	29.00	32.60	6.50	I
	32.60	39.30	3.60	II
	39.30	40.00	0.70	Βραχώδης σχιστόλιθος

5.3.3 Μετρήσεις γεωτεχνικών οργάνων: Εισαγωγή

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του δοκιμαστικού επιχώματος τοποθετήθηκε εκτεταμένο σύστημα παρακολούθησης. Κρίνεται σκόπιμο να γίνει πιο διεξοδική αναφορά, ώστε να παρουσιαστούν στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα κάτωθι γεωτεχνικά όργανα. Λεπτομερέστερα το σύστημα παρακολούθησης περιλαμβάνει:

1. Κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα (κατ. 1):

- Ένα κατακόρυφο μαγνητικό μηκυσιόμετρο (E-2) με δακτύλιους καθίζησης σε βάθος 1m,4m,8m,12m,16m,24m,32m,39m .
- Τρεις δείκτες καθιζήσεων (SI-1, SI-2, SI-3), οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της καθίζησης της βάσεως του επιχώματος.
- Δύο επιφανειακοί μάρτυρες (MM-13, MM-14), που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των καθιζήσεων της ανώτατης επιφάνειας του επιχώματος.
- Δύο πιεζόμετρα Casagrande (stand pipe) (Pz-1, Pz-2), καθένα από τα οποία λάμβανε μέτρηση της πίεσης πόρων σε βάθος 8m,16m,24m,36m .
- Ένα ηλεκτρικό πιεζόμετρο παλλόμενης χορδής (VWPz-3), που λάμβανε μέτρηση πίεσης πόρων στα 8m,15m,24m,32m .

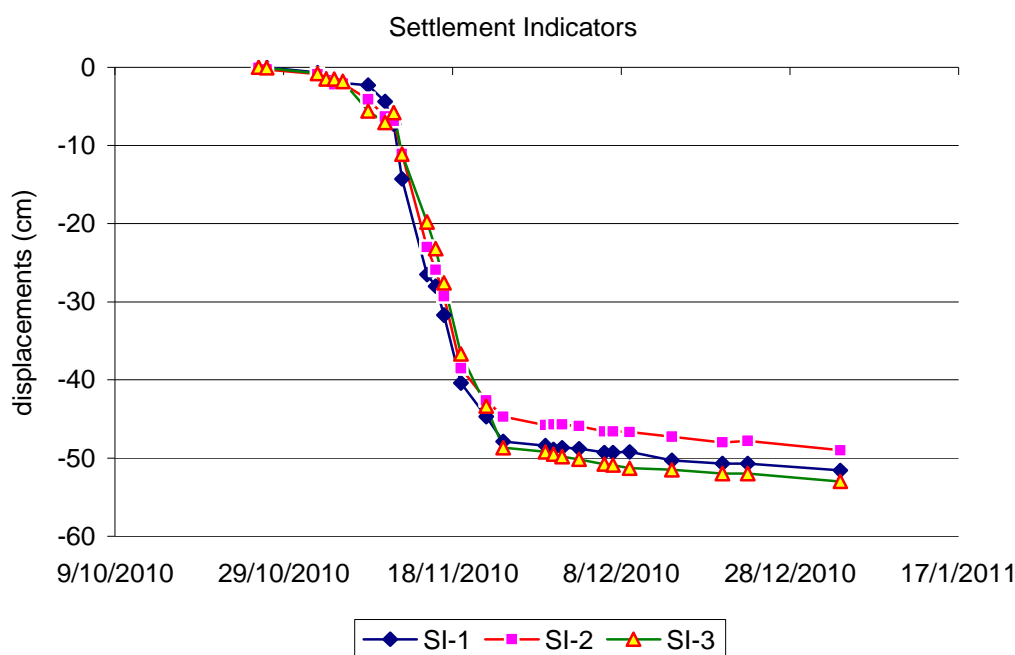
2. Περιφερειακά από το δοκιμαστικό επίχωμα (κατ. 2):

- Ένα κατακόρυφο μαγνητικό μηκυσιόμετρο (E-1) με δακτυλίους καθίζησης σε βάθος 2m,4m,8m,12m,16m,24m,32m,39m .
- 15 επιφανειακοί μάρτυρες (MM-1 έως MM-12, MM-15 και MM-17), που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους γύρω από το επίχωμα.
- Δύο ηλεκτρικά πιεζόμετρα παλλόμενης χορδής (VWPz-1 και VWPz-2), που λάμβαναν μέτρηση πίεσης πόρων σε βάθος 8m,15m,24m,32m .
- Τρία αποκλισιόμετρα (INCL-1, INCL-2, INCL-3), που βρίσκονται 5m,15m και 25m μακριά από τον πόδα του επιχώματος αντιστοίχως.

Σκαρίφημα των θέσεων όλων των αναφερόμενων οργάνων φαίνεται παραπάνω (Σχήμα 5.7 και Σχήμα 5.8).

5.3.3.1 Μετρήσεις γεωτεχνικών οργάνων: Καθιζήσεις (κατ. 1)

Το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 5.9) παρουσιάζει τις μετρήσεις των δεικτών καθίζησης (SI-1, SI-2, SI-3) για την περίοδο από 25/10/2010 έως 3/1/2011. Σημειώνεται, ότι η έναρξη της κατασκευής του δοκιμαστικού επιχώματος ήταν στις 30/10/2010 και το πέρας στις 19/11/2010 (βλ. τον παρακάτω Πίνακα 5.8).



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα μεταβολών-Δείκτες καθίζησης. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

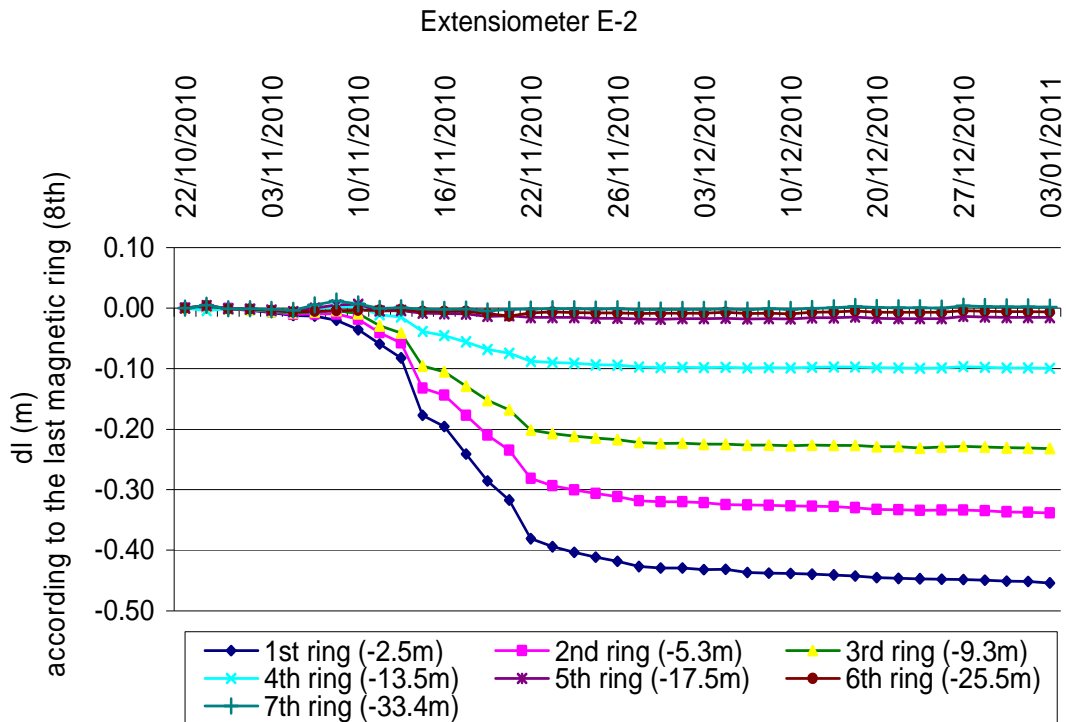
Αρχικά, οι μετρούμενες καθιζήσεις είναι πολύ μικρές μέχρι και τις 10/11/2010 (τη στιγμή που το ύψος του επιχώματος είναι περίπου 5m , δηλαδή όταν υφίσταται το υπέδαφος επιφόρτιση της τάξεως των 100kPa). Στη συνέχεια, μέχρι και το πέρας (19/11/2010) της κατασκευής του επιχώματος οι καθιζήσεις αυξάνονται έως και 30-41cm (τη στιγμή που το ύψος του επιχώματος είναι 10m , δηλαδή επιφόρτιση 200kPa). Επιπρόσθετα, μέχρι τις 3/1/2011 οι καθιζήσεις αυξάνονται κατά προσέγγιση 10cm μέχρι τα 50cm , με βραδύτερο ρυθμό.

Κεφάλαιο 5^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις

Πίνακας 5.8 Ημερολόγιο κατασκευής δοκιμαστικού επιχώματος. (ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ)

Ημερομηνία	Ημέρα	Εκακαφή θεμελίου	Στρώση στράγγισης-θεμελίωσης (60~70εκ)	Γαιώδες επίχωμα	Μέσο πάχος στρώσης 35~40εκ	Στρώσεις ανά ημέρα	Ύψος επιχώματος από επιφάνεια	Παρατηρήσεις
25-Οκτ	Δευτέρα	30εκ						
26-Οκτ	Τρίτη	-						βροχή
27-Οκτ	Τετάρτη	-						βροχή
28-Οκτ	Πέμπτη	-						αργία
29-Οκτ	Παρασκευή	-						καθαρισμός σκάφης από λάσπη
30-Οκτ	Σάββατο		1η		0.68	1.00	0.38	
31-Οκτ	Κυριακή		-				0.38	
1-Νοε	Δευτέρα		-	1η	0.38	2.00	1.14	
2-Νοε	Τρίτη			1η			1.14	
3-Νοε	Τετάρτη			2η & 3η	0.38	2.00	1.90	
4-Νοε	Πέμπτη			3η & 4η	0.38	1.00	2.28	
5-Νοε	Παρασκευή			4η & 5η	0.38	1.00	2.66	
6-Νοε	Σάββατο			-			2.66	
7-Νοε	Κυριακή			-			2.66	
8-Νοε	Δευτέρα			6η	0.38	1.00	3.04	
9-Νοε	Τρίτη			7η & 8η	0.38	2.00	3.80	
10-Νοε	Τετάρτη			9η & 10η	0.38	2.00	4.56	
11-Νοε	Πέμπτη			11η & 12η	0.38	2.00	5.32	
12-Νοε	Παρασκευή			13η & 14η	0.38	2.00	6.08	
13-Νοε	Σάββατο			15η & 16η	0.38	2.00	6.84	
14-Νοε	Κυριακή			-			6.84	
15-Νοε	Δευτέρα			17η & 18η	0.38	2.00	7.60	
16-Νοε	Τρίτη			19η & 20η	0.38	2.00	8.36	
17-Νοε	Τετάρτη			20η & 21η	0.38	2.00	9.12	
18-Νοε	Πέμπτη			22η & 23η	0.38	2.00	9.88	
19-Νοε	Παρασκευή			24η	0.38	1.00	10.26	
20-Νοε	Σάββατο			-				
21-Νοε	Κυριακή			-				
22-Νοε	Δευτέρα					27.00		διεύρυνση-επέκταση ράμπας
23-Νοε	Τρίτη							μεταφορά θραυστής άμμου στο κέντρο
24-Νοε	Τετάρτη							τελική επέκταση οργάνων (πιεζόμετρα-καθιζήματα)
25-Νοε	Πέμπτη							τοποθέτηση επιφανειακών μαρτύρων MM-13 & MM-14
26-Νοε	Παρασκευή							διάστρωση-συμπύκνωση θραυστής άμμου στο κέντρο (μεταξύ των οργάνων)

Οι καθιζήσεις των πλακών του μαγνητικού μηκυσιομέτρου E-2, που βρίσκονται κάτω από το κέντρο του δοκιμαστικού επιχώματος, είναι σε απόλυτη συμφωνία με τις άνωθεν μετρήσεις και παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα μεταβολών-Μαγνητικού μηκυσιομέτρου E-2. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Με βάση το Σχήμα 5.10, καθίσταται εμφανές ότι η ανώτερη πλάκα σε βάθος 2m, έχει καθίζηση της τάξεως των 43cm, ενώ κάτω από τα 17.50m οι πλάκες εμφανίζουν ελάχιστες καθιζήσεις.

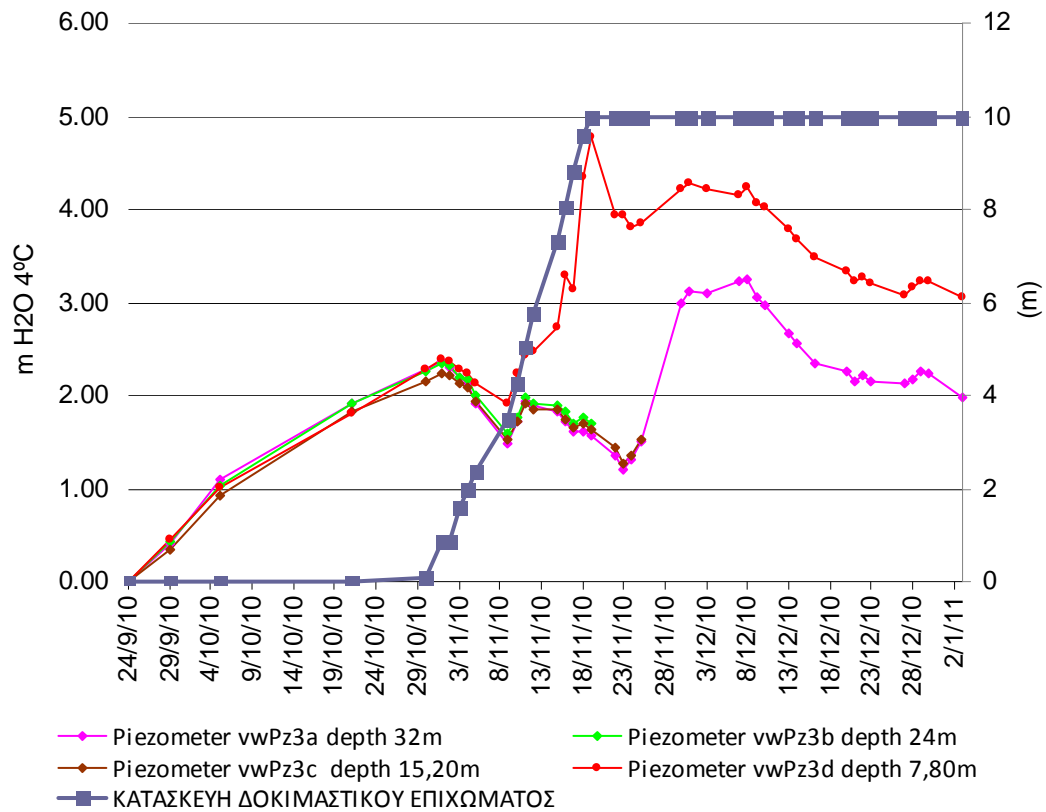
Επομένως, υποθέτοντας ότι το υπέδαφος θα έχει καθίζηση περίπου 50cm (για περισσότερα βλ. στο κεφάλαιο "Ανάστροφες αναλύσεις και σύγκριση με μετρήσεις") και ότι το συμπιεστό στρώμα είναι μέχρι το βάθος των 18m, εξάγεται ότι το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης E_s είναι 7.2MPa. Ακριβέστερα, το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης υπολογίζεται 5MPa μέχρι τα 7.5m και 10MPa από τα 7.5m έως 18m. Κάτω από τα 18m, δύναται να θεωρηθεί "ασυμπιεστό" με βάση τις μετρήσεις.

5.3.3.2 Μετρήσεις γεωτεχνικών οργάνων: Πιέσεις πόρων

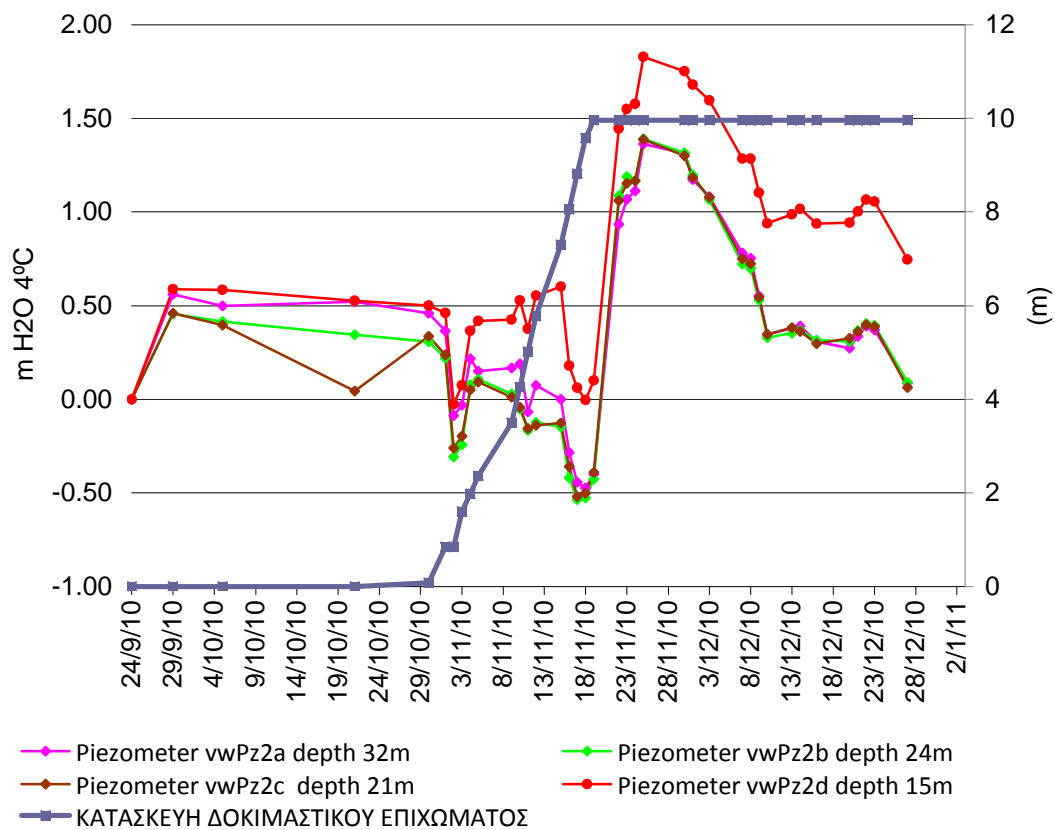
Οι μετρήσεις υπερπίεσης πόρων με βάση το πιεζόμετρα παλλόμενης χορδής VWPz-3 και VWPz-2 διαφαίνονται στο ακόλουθα διαγράμματα (Σχήμα 5.11 και 5.12 αντιστοίχως).

Τα πιεζόμετρα παλλόμενης χορδής VWPz-3, όπως φαίνεται παρακάτω, καταγράφουν μικρές υπερπιέσεις πόρων κατά τη διάρκεια κατασκευής του επιχώματος. Πιο συγκεκριμένα σε σχέση με την έναρξη (30/10/2010) κατασκευής του επιχώματος, η υπερπίεση στα 7.8m είναι της τάξεως των 25-30kPa, ενώ στα υπόλοιπα βάθη παρουσιάζεται ότι δεν έχουν υπερπίεση αλλά αποτόνωση (περισσότερα βλ. στο κεφάλαιο "Ανάστροφες αναλύσεις και σύγκριση με μετρήσεις"). Όμοια και στα πιεζόμετρα παλλόμενης χορδής VWPz-2 οι υπερπιέσεις είναι μικρές, ενώ παρατηρείται έντονη αύξηση προς το πέρας της κατασκευής.

Κεφάλαιο 5^ο : Περιγραφή Δοκιμαστικού Επιχώματος και Μετρήσεις

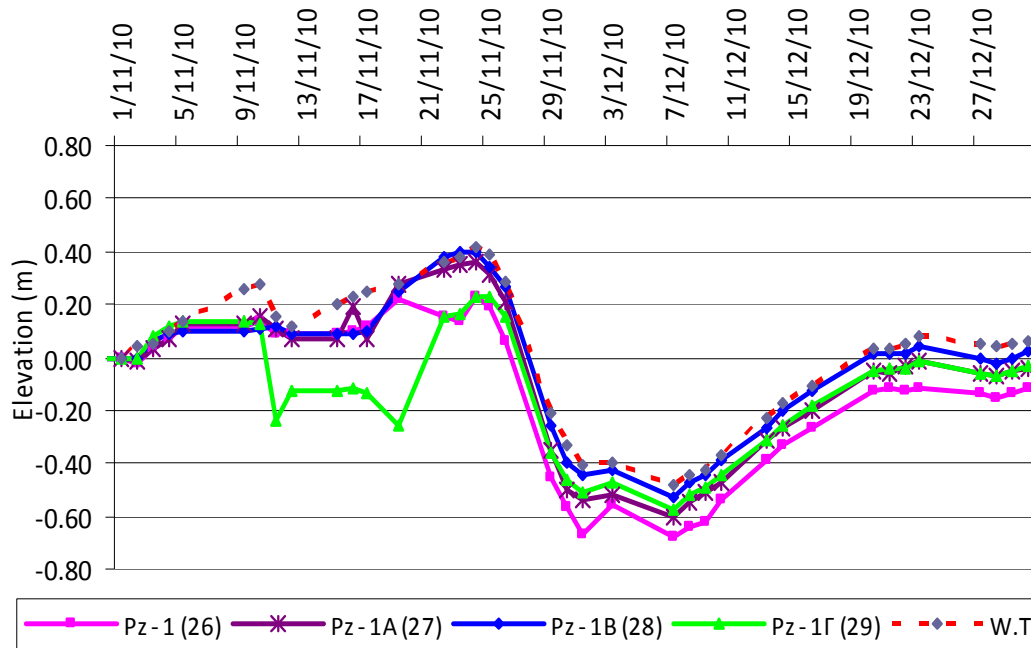


Σχήμα 5.11 Ύψος υπερπίεσης ως προς αρχική τιμή μέτρησης 24/9/2010 και κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

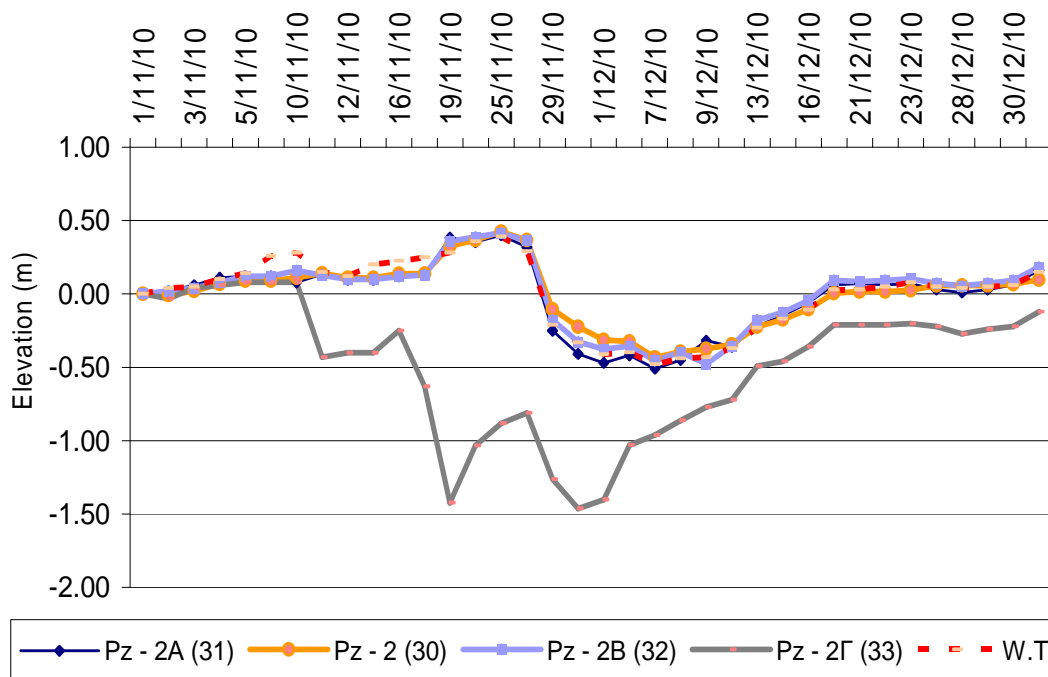


Σχήμα 5.12 Ύψος υπερπίεσης ως προς αρχική τιμή μέτρησης 24/9/2010 και κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Ακολουθως, παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τα πιεζόμετρα Casagrande Pz-1 και Pz-2 (Σχήμα 5.12 και 5.13 αντίστοιχα). Με βάση αυτά, εξάγεται η μεταβολή της πίεσης πόρων. Παράλληλα, στα διαγράμματα παρατίθεται και η μεταβολή του βάθους της επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από το επίχωμα και συνεπάγεται ότι, η μεταβολή της είναι μικρή κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου, της τάξεως $\pm 0.50\text{m}$. Επομένως, είναι δυνατό να θεωρείται σταθερό το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, κατά προσέγγιση 5.00m κάτω από το έδαφος.



Σχήμα 5.12 Ύψος πίεσης ως προς αρχική τιμή μέτρησης 1/11/2010 για Pz-1. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)



Σχήμα 5.13 Ύψος πίεσης ως προς αρχική τιμή μέτρησης 1/11/2010 για Pz-2. (ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΤΕ)

Εν κατακλείδι, υποθέτοντας ότι σε αστράγγιστες συνθήκες η υπερπίεση πόρων θα ήταν της τάξεως των 200kPa, στην πράξη κατά τη διάρκεια κατασκευής του επιχώματος παρατηρείται ότι πρόκειται για έντονα στραγγισμένη κατάσταση. Επομένως, με βάση το άνωθεν, αναμένεται η όποια αποτόνωση των υπερπίεσεων να συμβεί σε μεγάλο βαθμό κατά την κατασκευή του δοκιμαστικού επιχώματος.

5.3.3.3 Μετρήσεις γεωτεχνικών οργάνων: Μετακινήσεις (κατ. 2)

Στη συνέχεια, γίνεται σύντομη αναφορά στις μετρήσεις⁴ των γεωτεχνικών οργάνων που βρίσκονται γύρω από το δοκιμαστικό επίχωμα (κατ. 2).

Με βάση τα τρία αποκλισιόμετρα, που βρίσκονται 5m, 15m και 25m μακριά από τον πόδα του επιχώματος, και σε συνδυασμό με τους επιφανειακούς μάρτυρες και το μηκυσιόμετρο (E-1) εξάγεται ότι:

1. Οι εδαφικές μετακινήσεις 10m από τον πόδα του επιχώματος πρακτικά λαμβάνουν μηδενικές τιμές.
2. Σε αποστάσεις μικρότερες των 10m, οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μόλις μερικά εκατοστά (4-5cm στα πρώτα 5m από τον πόδα).
3. Η κατακόρυφη ανύψωση είναι της τάξεως των 10-15cm μέχρι και σε απόσταση 5m από τον πόδα του επιχώματος.

5.4 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Με βάση την άνωθεν γεωτεχνική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του δοκιμαστικού επιχώματος, εξάγεται ότι:

- Οι καθιζήσεις του δοκιμαστικού επιχώματος είναι της τάξεως των 50cm, που αντιστοιχούν σε μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5\text{MPa}$ μέχρι το βάθος των 7.5m και $E_s=10\text{MPa}$ από το βάθος των 7.5-18m. Από το βάθος των 18m και κάτω, το έδαφος είναι δυνατόν να θεωρείται "ασυμπίεστο".
- Οι υπερπίεσεις πόρων είναι πολύ μικρές, τόσο κατά την κατασκευή και μετά το πέρας αυτής. Αυτό συνεπάγεται, ότι η κατασκευή του δοκιμαστικού επιχώματος πραγματοποιείται υπό πρακτικά έντονα στραγγισμένες⁵ συνθήκες, που σημαίνει ότι αποτόνωση λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια κατασκευής. Ουσιαστικά η στερεοποίηση συντελείται σε μικρό χρονικό διάστημα και συνεπώς, οι καθιζήσεις που αναμένονται μετά την κατασκευή του επιχώματος θα είναι μικρές.
- Οι εδαφικές μετακινήσεις σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10m από τον πόδα του επιχώματος είναι πρακτικά μηδενικές. Σε αποστάσεις μικρότερες των 10m, οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μόλις μερικά εκατοστά (4-5cm στα πρώτα 5m από τον πόδα). Όσον αφορά την κατακόρυφη ανύψωση

⁴ Ο μετρήσεις των οριζόντιων μετακινήσεων δεν παρέχονταν. Επιπρόσθετα, οι μετρήσεις γύρω από το δοκιμαστικό επίχωμα δε μελετήθηκαν στις ανάστροφες αναλύσεις, με εξαίρεση τις μετρήσεις του πιεζόμετρου παλλόμενης χορδής VWPz-2.

⁵ Επίσης, η επιτάχυνση της στερεοποίησης οφείλεται στις διδιάστατες συνθήκες ροής, στις υψηλές υδραυλικές διαπερατότητες και στη μειωμένη συμπιεστότητα των σχηματισμών.

είναι της τάξεως των 10-15cm μέχρι την απόσταση των 5m από τον πόδα του επιχώματος.

Έπειτα, κρίνεται απαραίτητο να υλοποιηθεί ανάστροφη ανάλυση για να επανεκτιμηθούν οι γεωτεχνικές ιδιότητες του υπεδάφους, ώστε να υπολογιστούν βασικές εδαφικές παράμετροι, όπως ο δείκτης συμπιεστότητας E_s , ο συντελεστής στερεοποίησης c_v , ο συντελεστής προφόρτισης OCR κ.α.

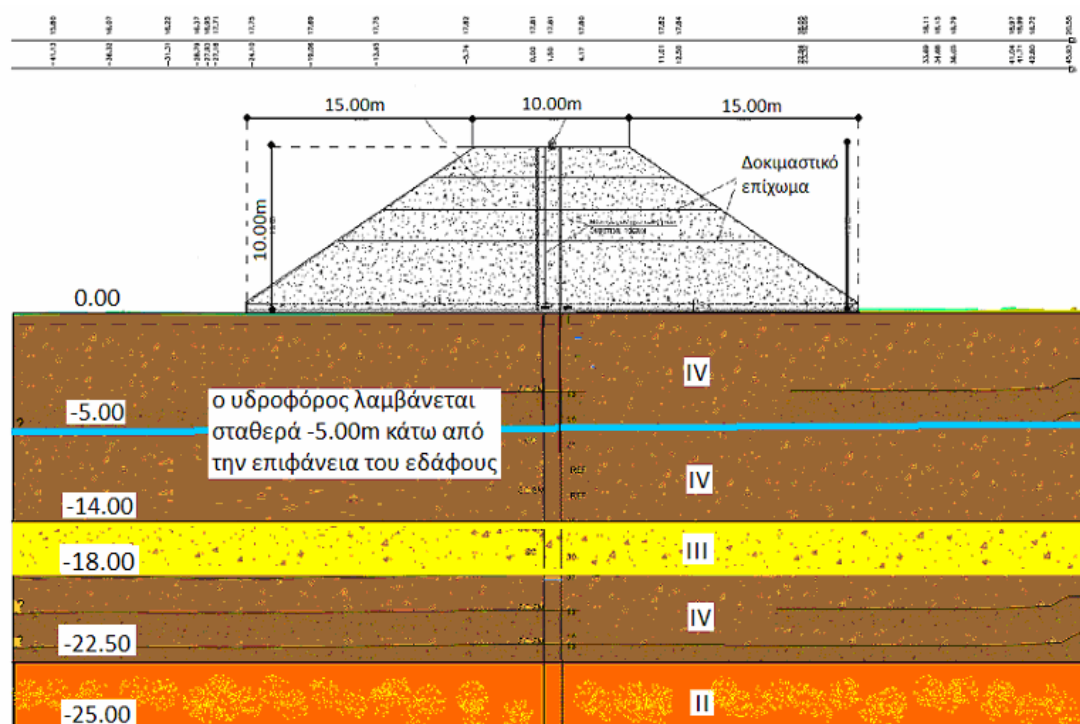
Κεφάλαιο 6^ο : Ανάστροφες Αναλύσεις και Σύγκριση με Μετρήσεις

6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα, με τη βοήθεια ανάστροφων αναλύσεων γίνεται διερεύνηση του προβλήματος που παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να επαναξιολογηθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι πλησίον του δοκιμαστικού επιχώματος. Οι ανάστροφες αναλύσεις της στερεοποίησης των αργιλικών στρώσεων κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα (λόγω της χωρικής κατακόρυφης ανισοτροπίας) βασίζονται στο συνδυασμό του ελαστοπλαστικού Cam-Clay (MCC) και του καταστατικού προσομοιώματος Mohr Coulomb. (περισσότερα βλ. Παράρτημα Γ)

6.2 Χαρακτηριστική διατομή και παραδοχές για ανάστροφες αναλύσεις

Προκειμένου να διερευνηθεί το πρόβλημα με τις ανάστροφες αναλύσεις επαναπροσδιορισμού των γεωτεχνικών παραμέτρων, επιλέχθηκε μια αντιπροσωπευτική διατομή του δοκιμαστικού επιχώματος, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



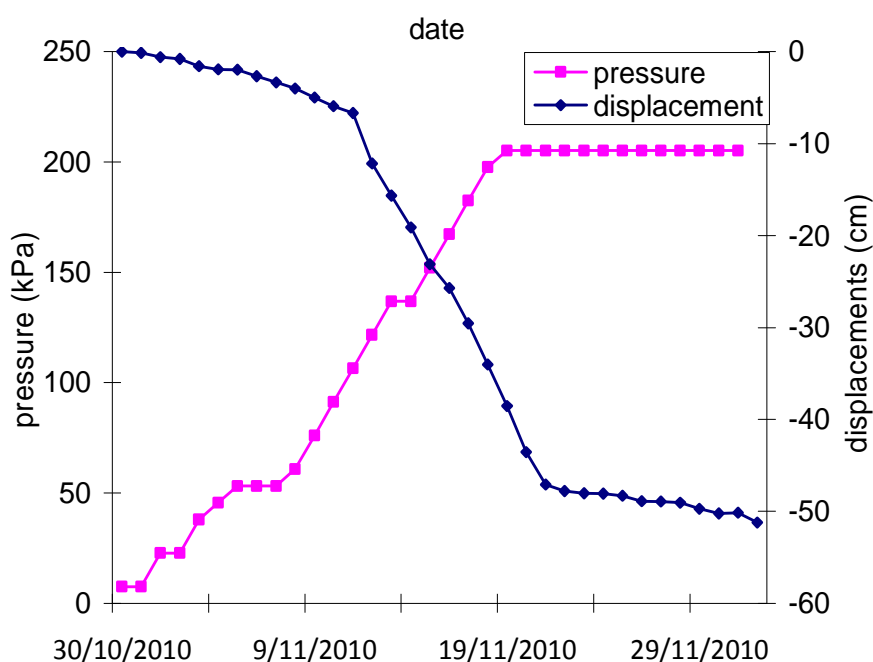
Σχήμα 6.1 Χαρακτηριστική διατομή δοκιμαστικού επιχώματος μέχρι τα -25.00m . Οι αναγραφόμενες κατηγορίες στρώσεων συνδέονται με τις γεωτεχνικές ιδιότητες του Πίνακα 5.5.

Η άνωθεν διατομή βρίσκεται κάθετα στον άξονα του επιχώματος και διαπερνά το κέντρο αυτού. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5, το υπέδαφος πλησίον του δοκιμαστικού επιχώματος συσχετίστηκε με τα εργαστηριακά και επιτόπου (SPT) αποτελέσματα της γεώτρησης B420-6 (χωματοουργικό έργο H420 -52.50m μακριά από το δοκιμαστικό επίχωμα-), αφού η δειγματοληπτική γεώτρηση ΓΔΕ-1 που

επιτεύχθηκε στο κέντρο της θεμελίωσης του δοκιμαστικού επιχώματος είχε μόνο επιτόπου (SPT) μετρήσεις. Η συσχέτιση σύμφωνα με τη μελέτη του έργου έγινε με κριτήριο τον αριθμό κρούσεων SPT και την ποιοτική περιγραφή των εδαφών.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι εδαφικές στρώσεις στην περιοχή του δοκιμαστικού επιχώματος αν και φτάνουν μέχρι το βάθος των 38.00m περίπου, (για περισσότερα βλ. Κεφάλαιο 5) με βάση τις μετρήσεις του μηκυσιόμετρου E-2 (βλ. Σχήμα 5.10) καθιζήσεις εμφανίζονται μέχρι τα άνω -17.50m . Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν να εξαχθεί ότι κάτω από τα -17.50m ο εδαφικός σχηματισμός είναι επαρκώς "ασυμπύεστος". Επομένως, χρησιμοποιώντας την άνωθεν παραδοχή είναι εύλογο να μην οριστεί στην ανάλυση όλο το βάθος του εδαφικού σχηματισμού αλλά μικρότερο.

Στη συνέχεια, με βάση το ημερολόγιο του έργου, η έναρξη της κατασκευής έγινε στις 30/10/2010 και είχε διάρκεια 21 ημέρες. Παρακάτω, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα (Σχήμα 6.2) το φορτίο της κατασκευής και οι καθιζήσεις στο κέντρο του δοκιμαστικού επιχώματος, οι οποίες προκύπτουν από τη μέση τιμή των μεταβολών των δεικτών καθιζήσης SI-1, SI-2 και SI-3 όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 5.9.



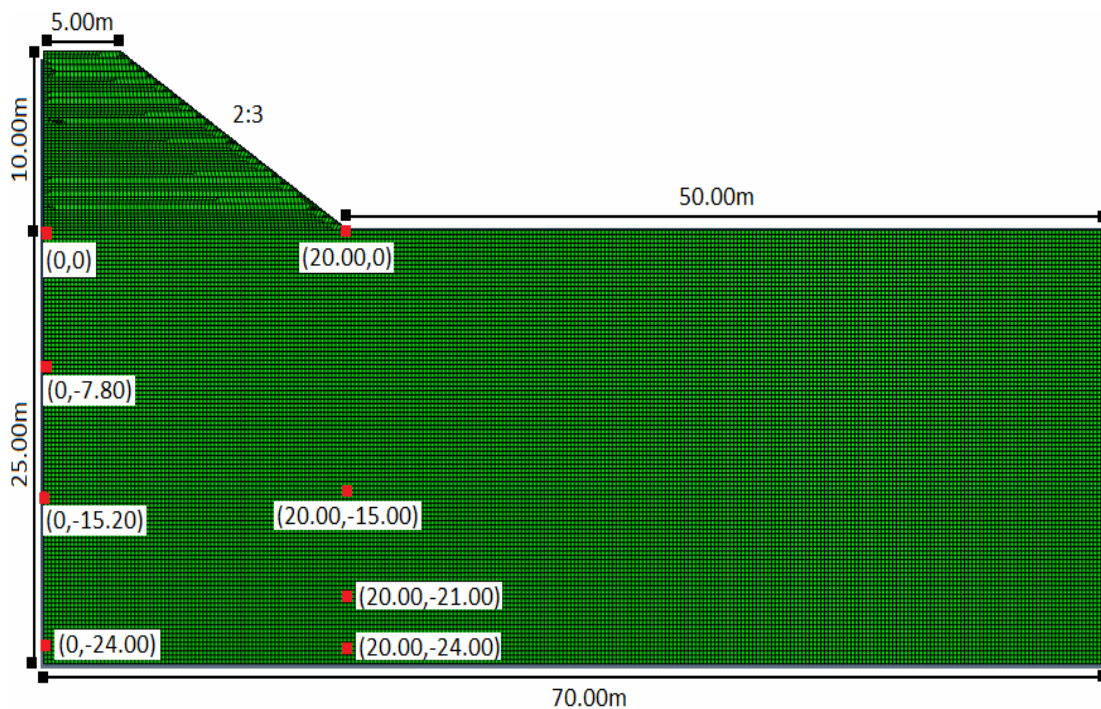
Σχήμα 6.2 Μεταβολή καθιζήσεων στο κέντρο του επιχώματος και διακύμανση φορτίου κατασκευής.

Είναι εμφανές με βάση το άνωθεν διάγραμμα, ότι στο πέρας (19/11/2010) της κατασκευής οι καθιζήσεις είναι της τάξεως των -38.50cm που αντιστοιχεί σε $U_{aver} = 70\%$ ¹ περίπου, δηλαδή όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο

¹ Στην πραγματικότητα δεν είναι γνωστές οι τελικές μετρούμενες καθιζήσεις καθώς δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις πέραν της 03/01/2011. Παρά ταύτα, θεωρείται ως μέγιστη καθίζηση η τελική μετρούμενη με βάση τα στοιχεία των οργάνων, εξαιτίας του μικρού ρυθμού αύξησης καθιζήσεων προς το τέλος των μετρήσεων. Επομένως, είναι κατανοητό ότι ο δείκτης μέσου βαθμού στερεοποίησης στην πραγματικότητα είναι μικρότερος από τον αναγραφόμενο.

πρόκειται για έντονα στραγγισμένες συνθήκες. Αυτό, εν μέρει οφείλεται στις σχετικά υψηλές τιμές υδραυλικής διαπερατότητας των αργιλικών στρώσεων αλλά και στην παρουσία αμμοχάλικου από τα -14.00m έως -18.00m . Επίσης, η ταχύτερη ολοκλήρωση της στερεοποίησης οφείλεται στη μειωμένη συμπίεστικότητα των εδαφικών στρώσεων και στις διδιάστατες συνθήκες στράγγισης. Όσον αφορά την κλίση των καθιζήσεων, για φορτία έως 100kPa είναι ιδιαίτερα μικρή, ενώ αυξάνεται σημαντικά μέχρι το τέλος της κατασκευής.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται το γεωμετρικό σκαρίφημα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάστροφες αναλύσεις. Το έδαφος προσομοιώθηκε από τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης CPE8P με απόσταση κόμβων περί τα 0.25m . Επισημαίνεται, ότι λόγω συμμετρίας προσομοιώθηκε το μισό επίχωμα. Στα σύνορα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων τοποθετήθηκαν συνοριακές συνθήκες τύπου κύλισης, τόσο κατά τον οριζόντιο όσο και κατά τον κατακόρυφο άξονα. Για τις συνοριακές συνθήκες στράγγισης, τίθεται αδιαπέρατο όριο στον πυθμένα και στην αριστερή παρειά του μοντέλου. Στην επιφάνεια τίθεται ελεύθερη στράγγιση και στη δεξιά παρειά η συνοριακή συνθήκη στράγγισης βασίζεται στην υδροστατική κατανομή.



Σχήμα 6.3 Γεωμετρία προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε στις ανάστροφες αναλύσεις και ενδεικτικές συντεταγμένες σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για να υπάρξει συσχέτιση με τις μετρήσεις.

Το υπέδαφος του προσομοιώματος διαχωρίστηκε σε 25 στρώσεις, οι γεωτεχνικές ιδιότητες των οποίων υπολογίστηκαν με βάση τους τύπους που δίνονται στο Κεφάλαιο 4. Ο δείκτης πόρων e , θεωρείται ότι μειώνεται γραμμικά με το βάθος από την τιμή 0.900 έως 0.600 (εύρος το οποίο επιβεβαιώνεται από τις εργαστηριακές μετρήσεις που έγιναν σε δείγματα της γεώτρησης B420-6). Ο υδροφόρος ορίζοντας λαμβάνεται σταθερά -5m από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ στην πραγματικότητα υπήρχε ελαφριά μεταβολή της τάξεως των $\pm 0.50m$. Το έδαφος κάτω από τα -5m ορίζεται με συντελεστή κορεσμού $S_r=1.00$. Το έδαφος

πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα ορίστηκε με μηδενικό συντελεστή κορεσμού λόγω έλλειψης εργαστηριακών μετρήσεων. Βέβαια, σημειώνεται ότι στην πράξη θα υπάρχει μικρή έκταση ακόρεστης $0 < S_r < 1.00$ ζώνης. Σημειώνεται, ότι οι υπόλοιπες εδαφικές παράμετροι υπολογίστηκαν για πυκνότητα των στερεών κόκκων ίση με $\rho_s = 2.75 \text{ Mg/m}^3$.

Οι ανάστροφες αναλύσεις με το ελαστοπλαστικό Cam-Clay πραγματοποιήθηκαν αρχικά για γεωτεχνικές ιδιότητες που αναγράφονται στον Πίνακα 5.5. Όμως εξαιτίας της μεγάλης απόκλισης μεταξύ των υπολογισμών και μετρούμενων τιμών των καθιζήσεων, μεταβλήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι με (πρωτεύον) σκοπό να προκύπτουν ίσες τιμές μέγιστων καθιζήσεων. Διενεργώντας σειρές αναστροφών αναλύσεων, υπολογίστηκαν για την άνω στρώση (0-14.00 m) IV οι δείκτες κ και λ να είναι ίσοι με ~ 0.00868 και ~ 0.0868 αντιστοίχως (αναλογία 1 προς 10). Οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίστηκαν ίσες με $M=1.00$ και $\text{OCR} \approx 1.50$. Τονίζεται, ότι λόγω αλλαγής των παραμέτρων κ και λ σε σχέση με τις αρχικές τιμές, οι δείκτες πόρων επαναυπολογίζονταν με σκοπό αυτές να συμβαδίζουν με τις καμπύλες της αποφόρτισης – επαναφόρτισης (swelling lines) και τη γραμμή της παρθενικής συμπίεσης, όπως αυτή ορίζεται με την κλίση λ .

Οι στρώσεις από τα -14m έως -18m λόγω της παρουσίας του αμμοχάλικου δεν ενδείκνυται να οριστούν με το Cam-Clay, γι αυτό θεωρήθηκαν ότι συμπεριφέρονται με βάση το προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Από την επαναληπτική διαδικασία που επιτεύχθηκε ορίστηκαν με μέτρο ελαστικότητας $E=6.75 \text{ MPa}$, $\nu=0.33$, $c=5 \text{ kPa}$ και $\phi=30^\circ$. Οι κατώτερες στρώσεις, όπως αναφέρεται και άνωθεν, επειδή συμπεριφέρονται σαν “ασυμπίεστες”, ορίζονται με βάση το καταστατικό προσομοίωμα Mohr Coulomb, με μέτρο ελαστικότητας $E=33.33 \text{ MPa}$, $\nu=0.33$, $c=15 \text{ kPa}$, $\phi=23^\circ$ ενώ λαμβάνεται η επιπλέον παραδοχή ότι είναι κανονικώς στερεοποιημένες.

Ο αρχικός συντελεστής ωθήσεων K_0 τέθηκε ίσος με 0.660 για τη στρώση από 0-14.00m, για τη στρώση από 14.00-18.00m λαμβάνεται 0.500 και για τις στρώσεις από 18.00-25.00m τέθηκε 0.610. Σημειώνεται, ότι ο συντελεστής ωθήσεων ορίζεται με βάση το συντελεστή προφόρτισης και τη γωνία τριβής (βλ. Κεφάλαιο 4).

Παράλληλα, επιτεύχθηκε προσπάθεια η κλίση των καθιζήσεων να είναι ίδια με την πραγματική. Επομένως, μεταβλήθηκαν οι τιμές των υδραυλικών διαπερατοτήτων, ώστε να έχουν ίδια κλίση οι μετρούμενες και υπολογισμένες καθιζήσεις. Οι υδραυλικές διαπερατότητες δεν είναι σταθερές με το βάθος, ενώ τονίζεται ότι μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της αριθμητικής ανάλυσης και εξαρτώνται από τη μεταβολή του δείκτη πόρων.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του δοκιμαστικού επιχώματος, θεωρείται ότι είναι ισότροπη και γραμμικώς ελαστική. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του, τέθηκαν για το επίχωμα $E=33.33 \text{ MPa}$ και $\nu=0.33$. Στη συνέχεια επισημαίνεται, ότι στην ανάστροφη ανάλυση το χρονοδιάγραμμα κατασκευής του δοκιμαστικού επιχώματος δεν είχε καμιά

διαφορά ως προς τις πραγματικές συνθήκες. Επομένως, το συνολικό φορτίο του επιχώματος τέθηκε με τέτοιον τρόπο ώστε να ακολουθεί-συμμορφώνεται το ημερολόγιο του δοκιμαστικού επιχώματος (βλ. Σχήμα 6.3).

Με βάση τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι το μοντέλο που μορφώθηκε στην ανάστροφη ανάλυση διαφέρει από το προσομοίωμα της αριθμητικής διερεύνησης. Οι διαφορές εστιάζονται τόσο στη διαφορετική μορφή εξαίτισης, όσο και στο ότι ο εδαφικός σχηματισμός δεν είναι πλέον ομοιόμορφος, ως προς τις γεωτεχνικές παραμέτρους αντοχής και την κατανομή της υδραυλικής διαπερατότητας καθ' ύψος του εδάφους. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι τελικές γεωτεχνικές παράμετροι που βρέθηκαν από τις ανάστροφες αναλύσεις.

Πίνακας 6.1 Γεωτεχνικές παράμετροι που βρέθηκαν από τις ανάστροφες αναλύσεις. Σημειώνεται, ότι η συνοχή, η γωνία τριβής και το μέτρο ελαστικότητας, για τη στρώση έως τα 14.00 μέτρα, ορίστηκαν στις ανάστροφες αναλύσεις με Mohr-Coulomb. (βλ. Παράρτημα Γ)

Παράμετροι σχεδιασμού	Βάθος από-έως [m]		
	18.00-25.00	14.00-18.00	0-14.00
Συνοχή, c' [kPa]	10	5	10
Γωνία Τριβής, φ' [°]	23	30	25
Μέτρο Ελαστικότητας, E [MPa]	33.3	6.75	3.8 (≤ 10 m), 5.75 (> 10 m)
Μέση Τιμή Υδραυλικής Διαπερατότητας, k [cm/sec]	3.0×10^{-6}	10^{-3}	10^{-6}
Δείκτης Συμπίεσης [λ]	-	-	~ 0.0868
Δείκτης Διόγκωσης [κ]	-	-	~ 0.00868
Συντελεστής Poisson, ν	0.33	0.33	0.33
Συντελεστής Προφόρτισης [OCR]	-	-	~1.50
M	-	-	1.00
K_0	0.500	0.500	~0.610

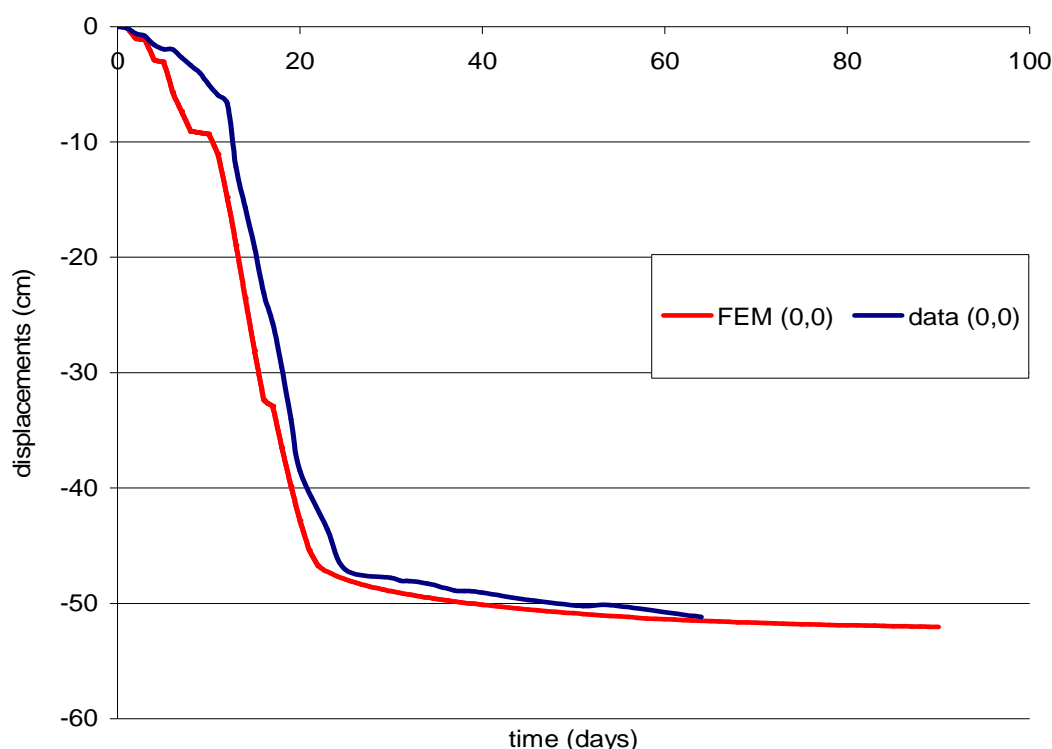
6.3 Ανάστροφες αναλύσεις και σύγκριση με μετρήσεις

6.3.1 Σύγκριση καθιζήσεων στο κέντρο του δοκιμαστικού επιχώματος

Όπως αναφέρεται παραπάνω, χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα στο Σχήμα 6.3 αλλά και ορίζοντας εύλογες παραδοχές λόγω έλλειψης στοιχείων, διεξήχθησαν σειρές αριθμητικών αναλύσεων με σκοπό τη βέλτιστη προσέγγιση της καμπύλης των καθιζήσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα καθιζήσεων² ανάμεσα στις μετρήσεις και αυτές που υπολογίστηκαν από τις ανάστροφες αναλύσεις (στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των

² Οι οριζόντιες μετακινήσεις για τις ανάστροφες αναλύσεις αναλύονται στο Παράρτημα Γ.

αναλύσεων όταν τα άνω 14.00 μέτρα ορίζονται με Cam-Clay). Τονίζεται, ότι στα παρακάτω διαγράμματα λαμβάνεται ως χρόνος αναφοράς η έναρξη της κατασκευής του επιχώματος, ήτοι 30/10/2010.



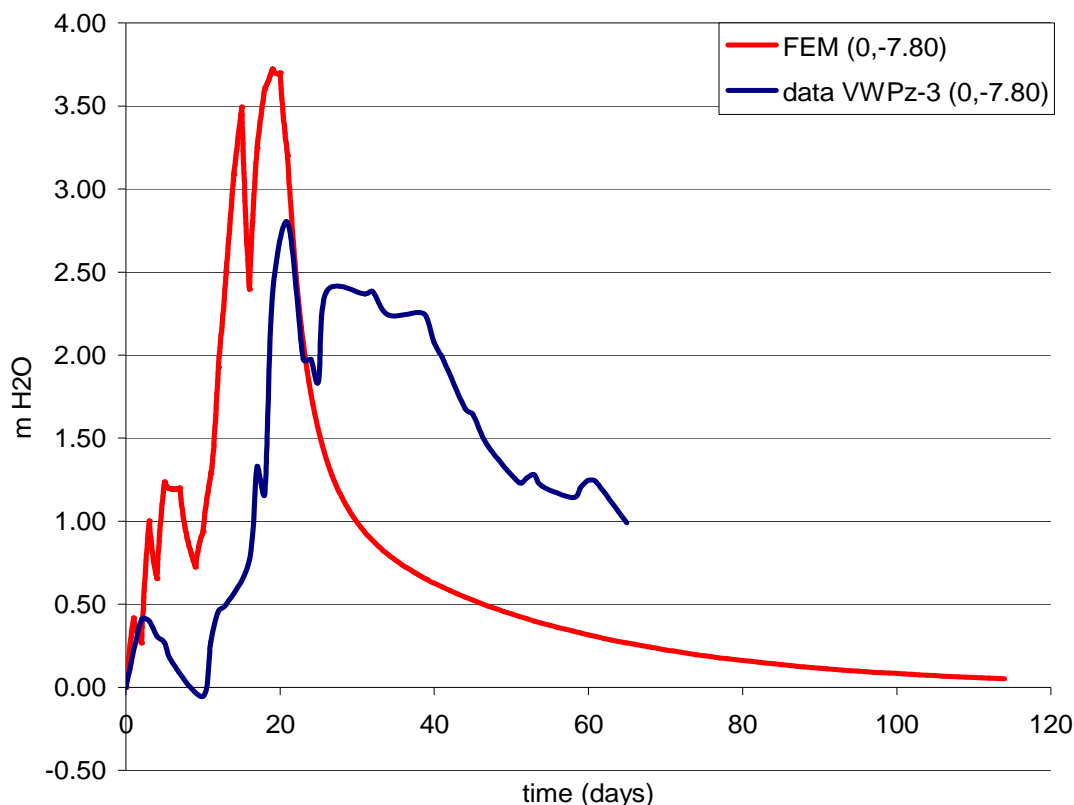
Σχήμα 6.4 Σύγκριση καθιζήσεων σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (0,0). Τα άνω 14.00m θεωρούνται με βάση το Cam-Clay.

Το άνωθεν Σχήμα 6.4 προέκυψε για $OCR \approx 1.50$, $\kappa \approx 0.00868$ και $\lambda \approx 0.0868$. Είναι εμφανές, ότι οι καθιζήσεις με βάση την ανάστροφη ανάλυση είναι παράλληλα μετατοπισμένες (προς τα αριστερά) σε σχέση με τις μετρήσεις των καθιζήσεων κατά περίπου 2 ημέρες. Παρά ταύτα, μετά τις 25 ημέρες, διαφαίνεται σχετικά καλή σύγκλιση μεταξύ των δύο καμπύλων. Επισημαίνεται, ότι οι ίδιες κλίσεις των καμπύλων συνεπάγονται κατά προσέγγιση όμοιο ρυθμό στράγγισης. Επιπρόσθετα, προκύπτει από την καμπύλη που υπολογίστηκε από την ανάστροφη ανάλυση, ότι οι καθιζήσεις (-52.0cm) μεγιστοποιούνται στις 90 ημέρες. Βέβαια, είναι προφανές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της στερεοποίησης συντελείται σχεδόν κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, στο πέρας της κατασκευής έχει ολοκληρωθεί το 75% περίπου του μέσου βαθμού στερεοποίησης. Αυτό, οφείλεται στις μεγάλες τιμές της υδραυλικής διαπερατότητας, στην ύπαρξη στρώσης αμμοχάλικου, στις διδιάστατες συνθήκες ροής αλλά και στη μειωμένη συμπιεστότητα του εδαφικού σχηματισμού. (για την περίπτωση που ο σχηματισμός των άνω 14.00m θεωρείται με Mohr Coulomb βλ. Παράρτημα Γ)

6.3.2 Σύγκριση υπερπίεσης πόρων

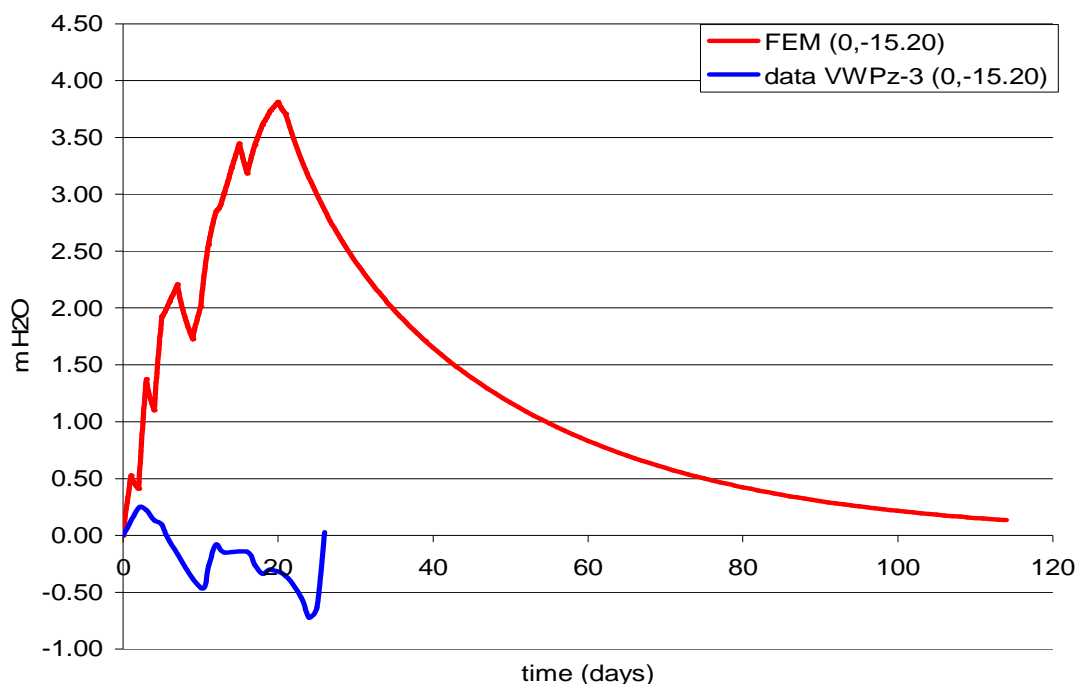
Ακολουθώντας, παρατίθενται τα συγκριτικά σχήματα 6.5, 6.6 και 6.7 για τις υπερπίεσεις πόρων στα αντίστοιχα σημεία με συντεταγμένες [(0,-7.80);(0,-15.20);(0,-24.00)]. Σημειώνεται, ότι η υπερπίεση πόρων εκφράζεται ως η διαφορά

του πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την αρχική τιμή στις 30/10/2010, δηλαδή την έναρξη της κατασκευής.



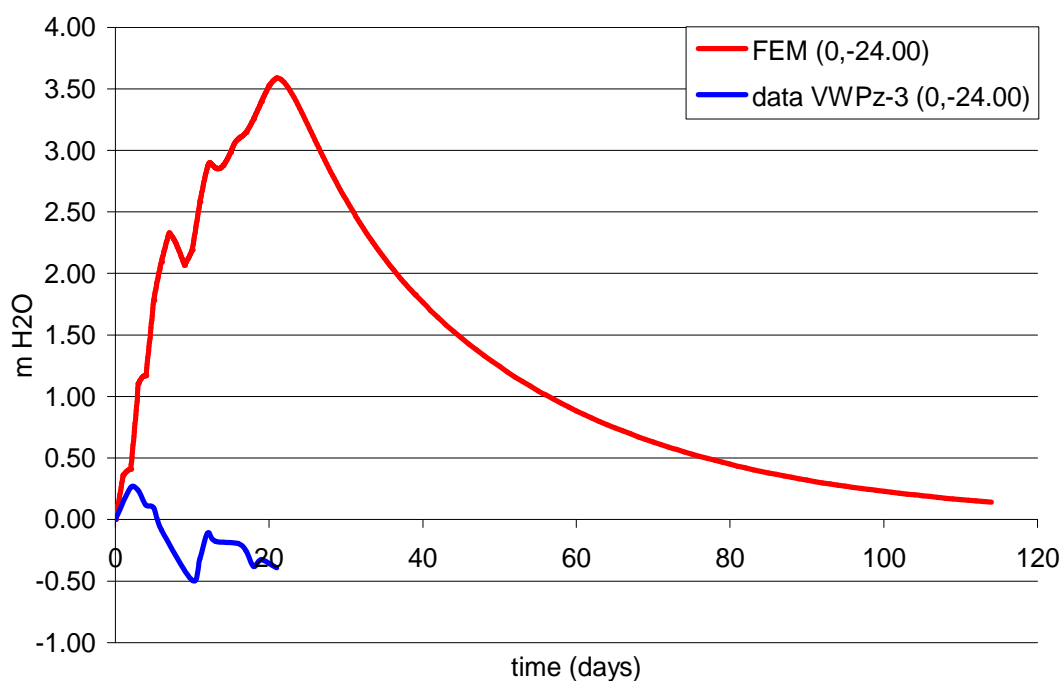
Σχήμα 6.5 Σύγκριση πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (0,-7.80). Τα άνω 14.00m θεωρούνται με βάση το Cam-Clay.

Με βάση το Σχήμα 6.5, μέχρι τις 23 ημέρες μετά την έναρξη (30/10/2010) της κατασκευής, η ανάστροφη ανάλυση παρουσιάζει υπερεκτίμηση των υπερπιέσεων κατά περίπου 30%. Στη συνέχεια, μετά τις 23 ημέρες η αποτόνωση των υπερπιέσεων παρουσιάζεται να είναι βραδύτερη στο πιεζόμετρο παλλόμενης χορδής (VWPz-3). Αυτό, πιθανόν οφείλεται στην επιρροή του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς κατά την ανάστροφη ανάλυση το βάθος λαμβάνεται σταθερό και ίσο με -5m, ενώ στην πραγματικότητα υπήρχε ελαφριά μεταβολή της τάξεως των $\pm 0.50m$. Όσον αφορά, το μέγεθος της υπερπίεσης 37kPa (στο πέρας της φόρτισης) συγκριτικά με το κατασκευαστικό φορτίο 200kPa που τέθηκε στο έδαφος είναι αρκετά μικρό. Αναλυτικότερα, είναι της τάξεως του 18% του μέγιστου εξωτερικού φορτίου. Οι απότομες πτώσεις στην υπολογισμένη καμπύλη των υπερπιέσεων, οφείλονται στην προσωρινή διακοπή της κατασκευής λόγω αργίας και στις έντονα στραγγισμένες συνθήκες. Όπως αναφέρεται και στις παραδοχές, οι ανάστροφες αναλύσεις βασίζονται στο συνδυασμό διαφορετικών καταστατικών νόμων συμπεριφοράς. Τα άνω 14.00m εδάφους ορίζονται με βάση το ελαστοπλαστικό Cam-Clay, ενώ οι κάτωθεν στρώσεις λαμβάνονται με διαφορετικό νόμο συμπεριφοράς.



Σχήμα 6.6 Σύγκριση πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (0,-15.20).

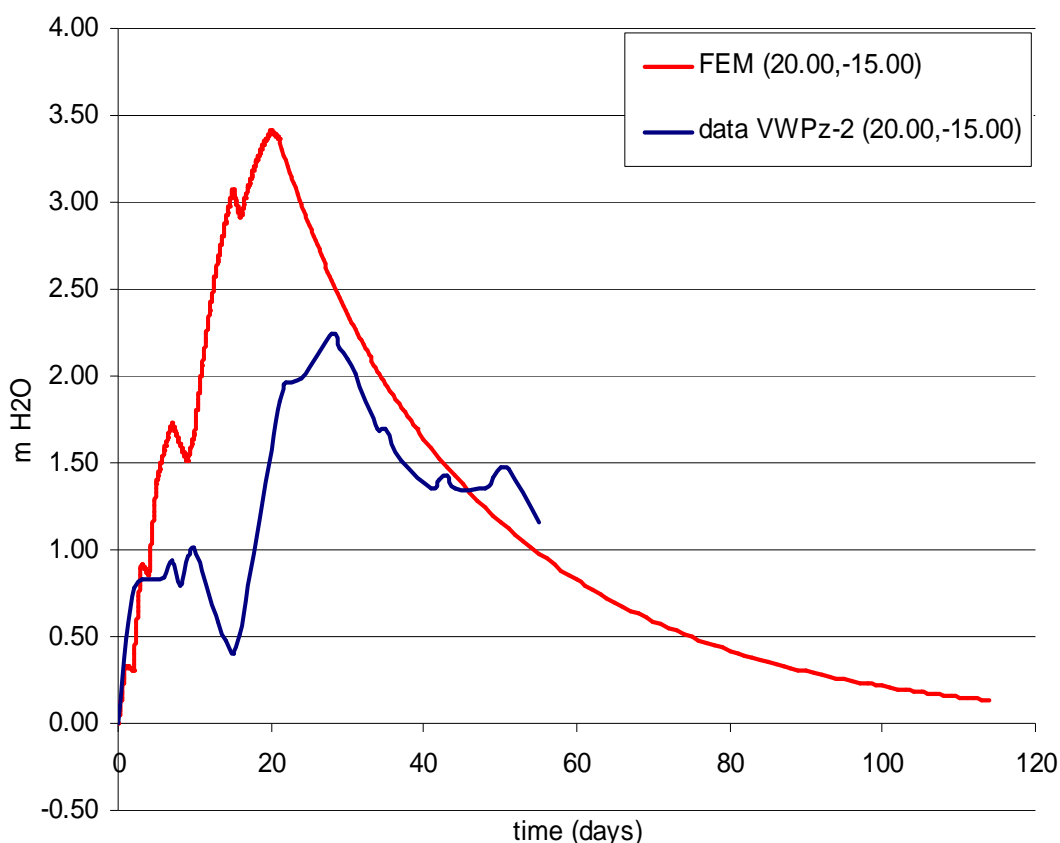
Συγκρίνοντας τις υπερπίεσεις πόρων στο Σχήμα 6.6, φαίνεται ότι οι καταγραφές δεν εμφανίζουν υπερπίεση πόρων αλλά υποπίεση. Αντίθετα, οι υπερπίεσεις πόρων που υπολογίζονται με την ανάστροφη ανάλυση είναι 38.5kPa στο πέρας της φόρτισης, είναι δηλαδή μεγαλύτερες σε σχέση με του σημείου (0,-7.80). Επίσης, γίνεται εμφανές ότι σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη στο Σχήμα 6.5 δεν επηρεάζεται τόσο πολύ η υπερπίεση πόρων από την προσωρινή διακοπή της φόρτισης.



Σχήμα 6.7 Σύγκριση πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (0,-24.00).

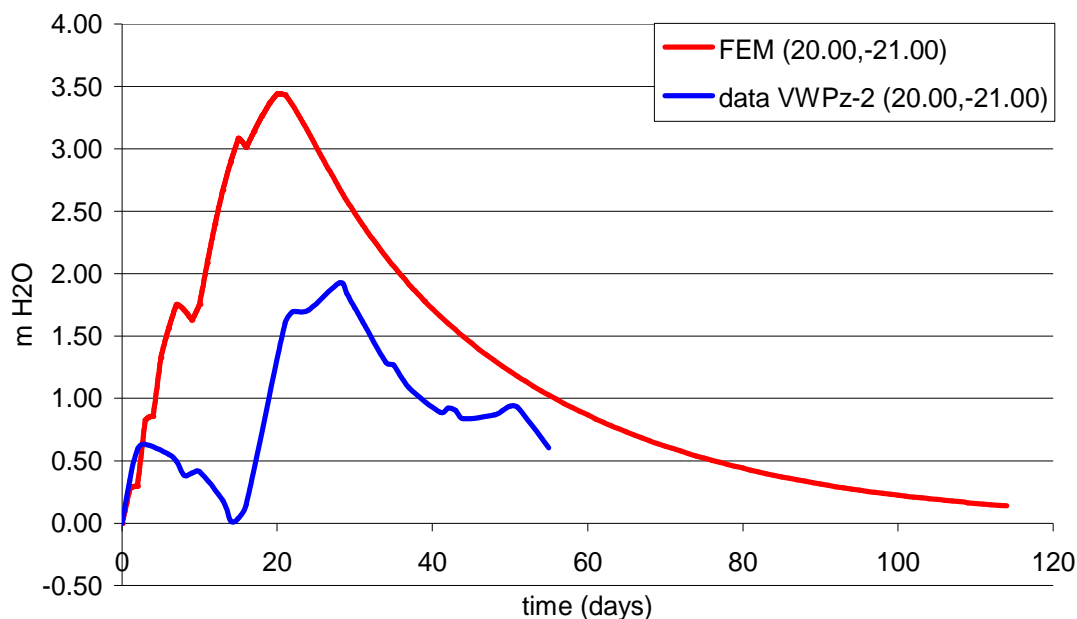
Αναλύοντας το Σχήμα 6.7, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά των προηγούμενων διαγραμμάτων.

Ακολουθώς, παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των υπερπιέσεων πόρων για σημεία που βρίσκονται κάτω από τον πόδα του δοκιμαστικού επιχώματος. Το Σχήμα 6.8 είναι για συντεταγμένες (20.00,-15.00), το Σχήμα 6.9 το σημείο (20.00,-21.00) και το Σχήμα 6.10 για το (20.00,-24.00).



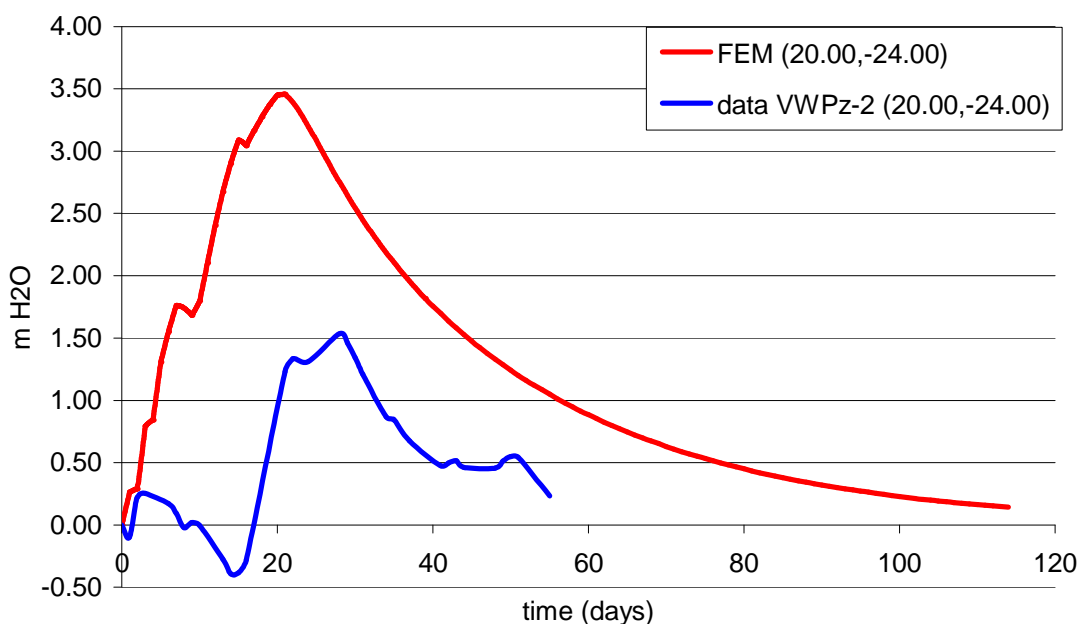
Σχήμα 6.8 Σύγκριση πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (20.00,-15.00).

Όπως και στις προηγούμενες συγκρίσεις υπερπιέσεων, στο Σχήμα 6.8 παρατηρείται εντονότερη υπερπίεση με βάση την ανάστροφη ανάλυση. Αξιοσημείωτο είναι, ότι οι υπερπιέσεις είναι μικρότερες κατά 10% σε σύγκριση με το αντίστοιχο σημείο με συντεταγμένες (0,-15.20).



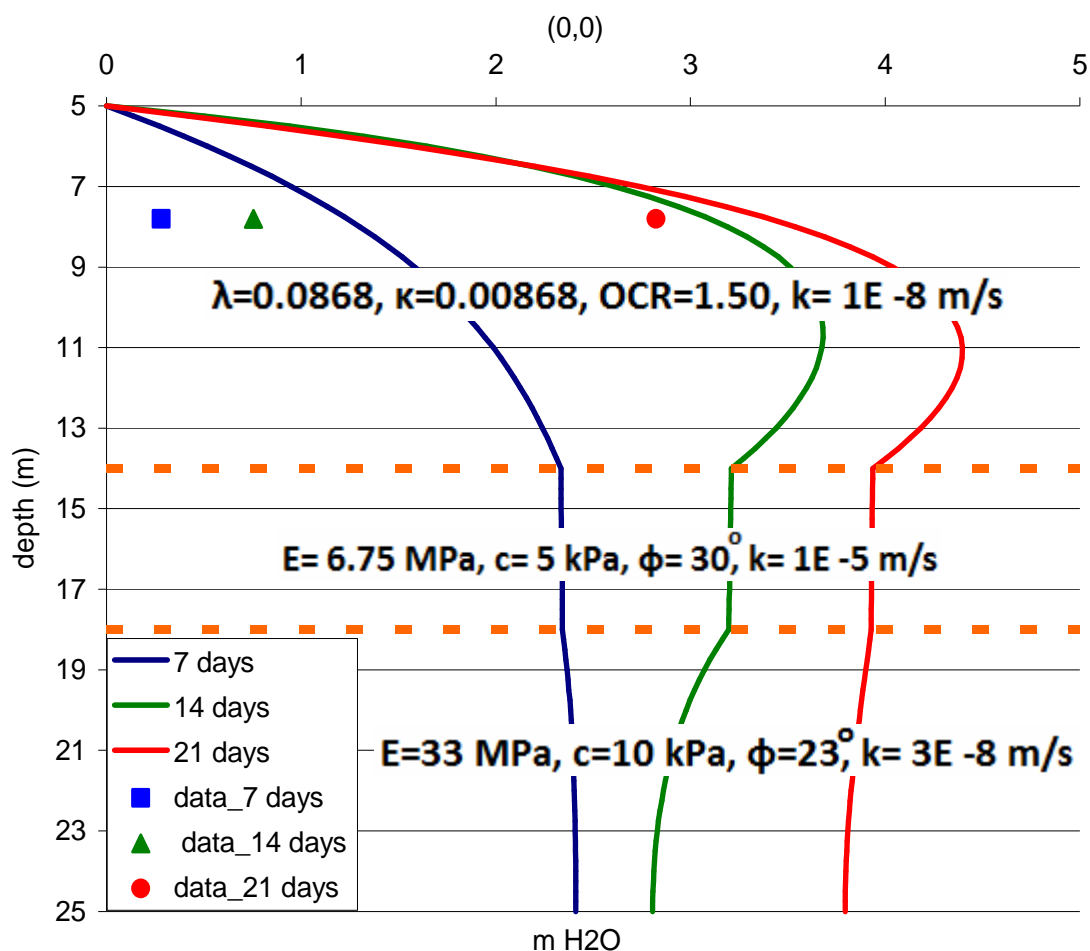
Σχήμα 6.9 Σύγκριση πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (20.00,-21.00).

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.9 προκύπτει ότι, η υπερπίεση πόρων με βάση την ανάστροφη ανάλυση δεν έχει σημαντική μεταβολή σε σύγκριση με το προηγούμενο σημείο (20.00,-15.00). Αντίθετα, οι μετρούμενες πιέσεις παρουσιάζουν μικρή πτώση της τάξεως του 18%. Στη συνέχεια, παρατίθεται στο Σχήμα 6.10 η σύγκριση των υπερπίεσεων για το σημείο (20.00, -24.00). Όμοια με άνωθεν, δεν υπάρχει εντυπωσιακή μεταβολή της υπολογισμένης υπερπίεσης πόρων, ενώ όσον αφορά τη μετρούμενη υπερπίεση υπάρχει απομείωση της κατά 16%. Συνοψίζοντας, είναι δυνατόν να εξαχθεί ότι οι ανάστροφες αναλύσεις παρουσιάζουν μια συστηματική υπερεκτίμηση της πίεσης πόρων.



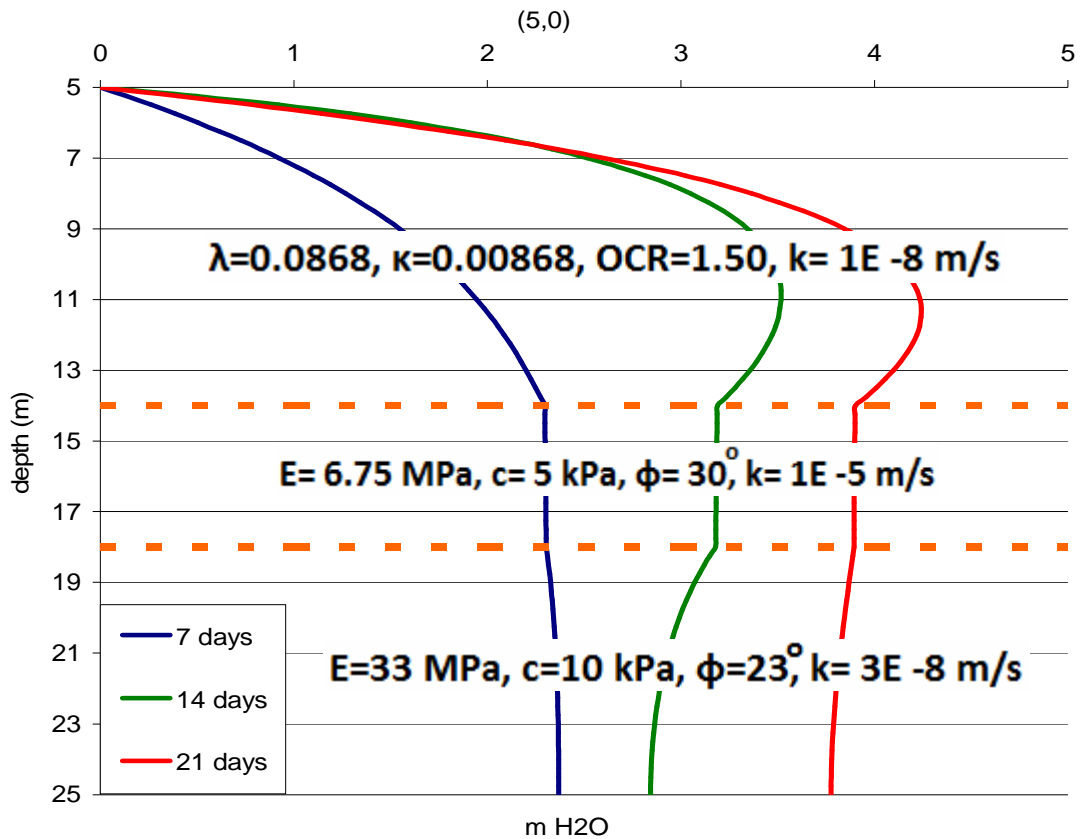
Σχήμα 6.10 Σύγκριση πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη της κατασκευής 30/10/2010, για το σημείο (20.00,-24.00).

Ακολουθώς, παρουσιάζονται οι πιέσεις πόρων καθ' ύψος των σημείων [(0,0);(5,0);(20,0)] για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Σημειώνεται ότι η έναρξη της κατασκευής ήταν στις 30/10/2010 και το πέρας στις 19/11/2010 (21 ημέρες μετά).

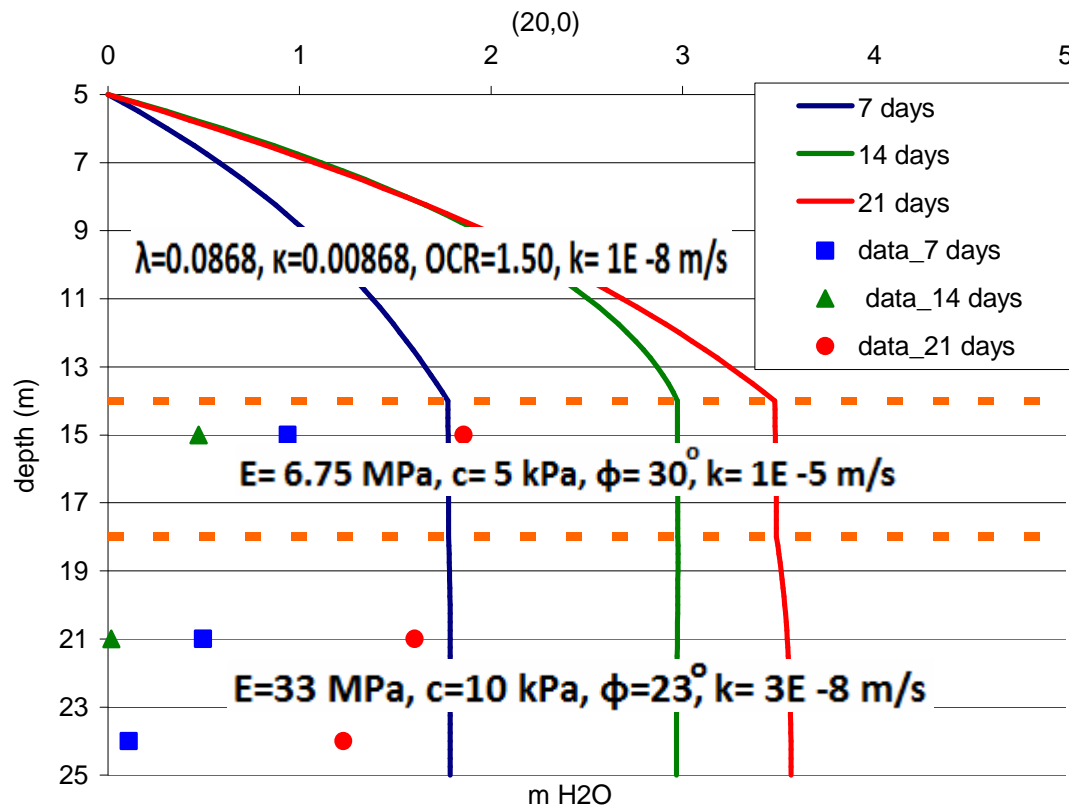


Σχήμα 6.11 Κατανομή με το βάθος του πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη (30/10/2010) της κατασκευής, για το σημείο (0,0).

Με βάση το Σχήμα 6.11, η καθ' ύψος κατανομή της υπερπίεσης πόρων διαφαίνεται να μεταβάλλεται έντονα με την χωρική ανισοτροπία των εδαφικών στρώσεων. Πιο αναλυτικά, η αργιλική στρώση από τα -5.00 έως -14.00 μέτρα, λόγω της παρουσίας του αμμοχάλικου, στραγγίζει από πάνω (ελεύθερη επιφάνεια υδροφόρου) και κάτω (αμμοχάλικο). Η κατανομή της υπερπίεσης στο αμμοχάλικο προκύπτει ότι είναι σταθερή σε όλη τη στρώση για κάθε χρονική στιγμή. Από την άλλη ο αργιλικός σχηματισμός κάτω από το αμμοχάλικο, δηλαδή κάτω από τα -18.00 μέτρα, εξαιτίας της μικρής συμπιεστότητας, εμφανίζει μικρότερες υπερπίεσεις σε σχέση με τους άνωθεν σχηματισμούς. Παρακάτω, στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η κατανομή της υπερπίεσης πόρων καθ' ύψος του σημείου (5,0) και στο Σχήμα 6.13 δίνεται η κατανομή στο πόδα (20,0) του επιχώματος. Τονίζεται, ότι ο υδροφόρος ορίζοντας λαμβάνεται -5.00m κάτω από το έδαφος.



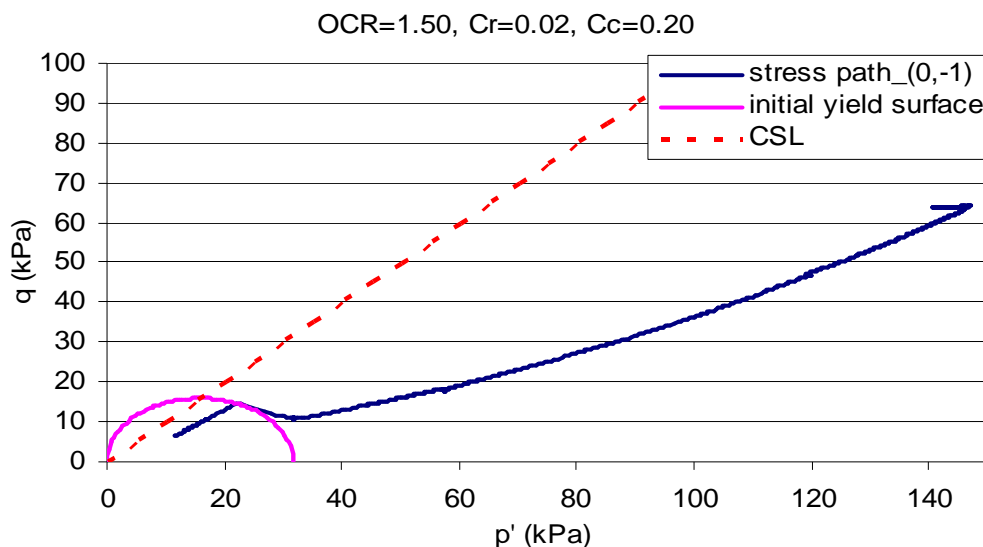
Σχήμα 6.12 Κατανομή με το βάθος του πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη (30/10/2010) της κατασκευής, για το σημείο (5,0).



Σχήμα 6.13 Κατανομή με το βάθος του πιεζομετρικού ύψους σε σχέση με την έναρξη (30/10/2010) της κατασκευής, για το σημείο (20,0).

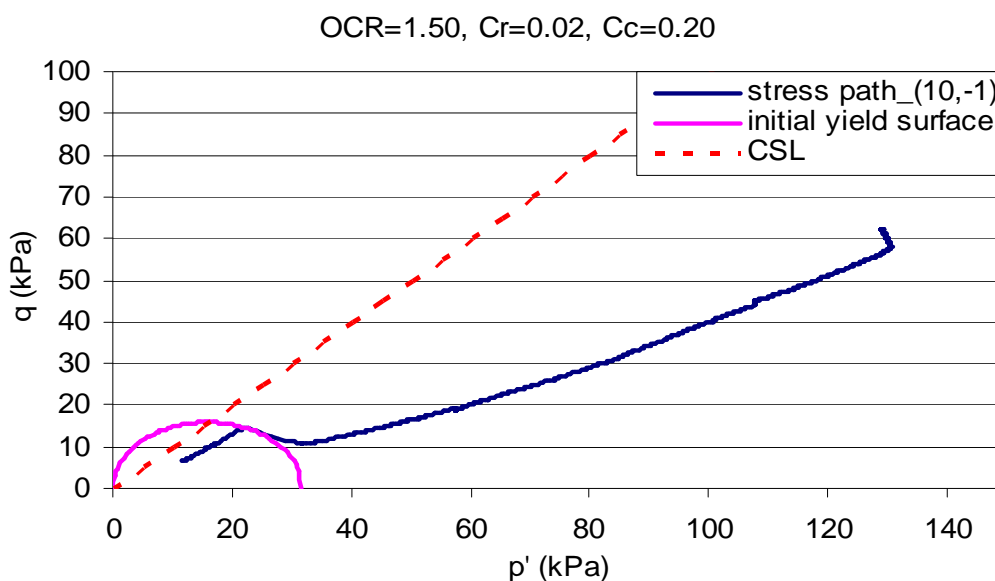
6.4 Διαδρομές τάσεων σε ανάστροφες αναλύσεις

Στη συνέχεια, ακολουθούν οι διαδρομές των τάσεων που προκύπτουν με βάση την ανάστροφη ανάλυση. Οι διαδρομές υπολογίστηκαν για σημεία με συντεταγμένες [(0,-1);(10,-1);(20,-1);(0,-8);(10,-8);(20,-8)]. Επιπρόσθετα, προς το τέλος του συγκεκριμένου εδαφίου παρουσιάζεται η ζώνη των πλαστικών παραμορφώσεων.



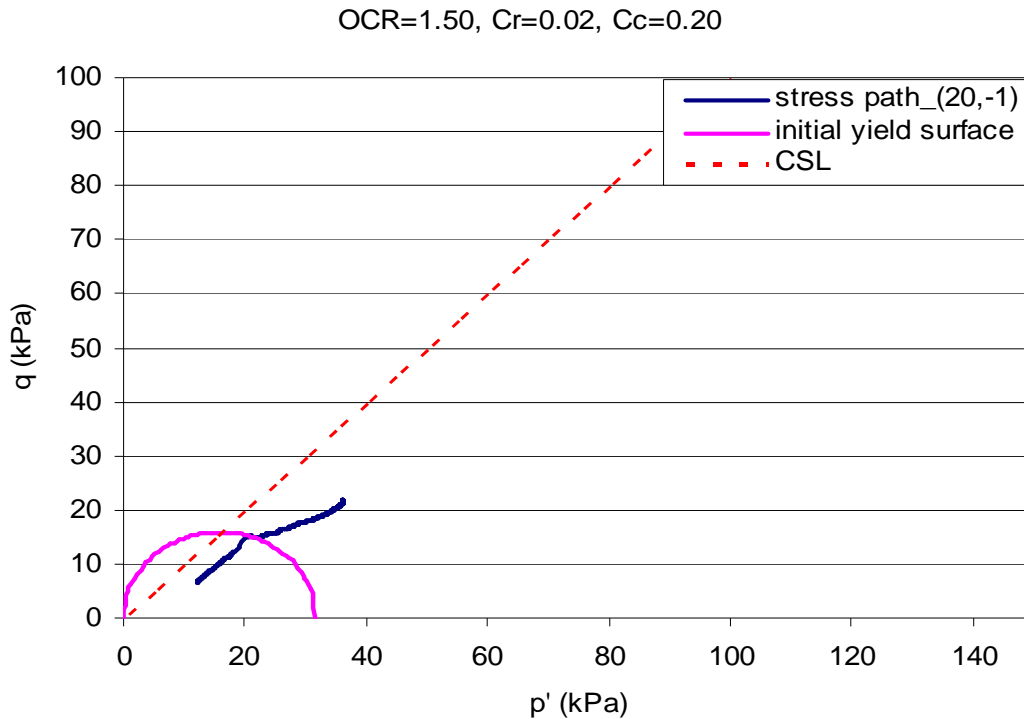
Σχήμα 6.14 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (0,-1), όταν $OCR \approx 1.50$.

Στο άνωθεν Σχήμα 6.14, φαίνεται η διαδρομή των τάσεων για $OCR \approx 1.50$. Αρχικά, διαφαίνεται ότι το εδαφικό στοιχείο συμπεριφέρεται ποροελαστικά και στη συνέχεια, με την τομή της διαδρομής με την επιφάνεια διαρροής αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, στο παραπάνω σχήμα αμέσως μετά την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων παρατηρείται μικρή πτώση της αποκλίνουσας τάσης, ενώ παράλληλα η ισότροπη συμπίεση αυξάνεται.

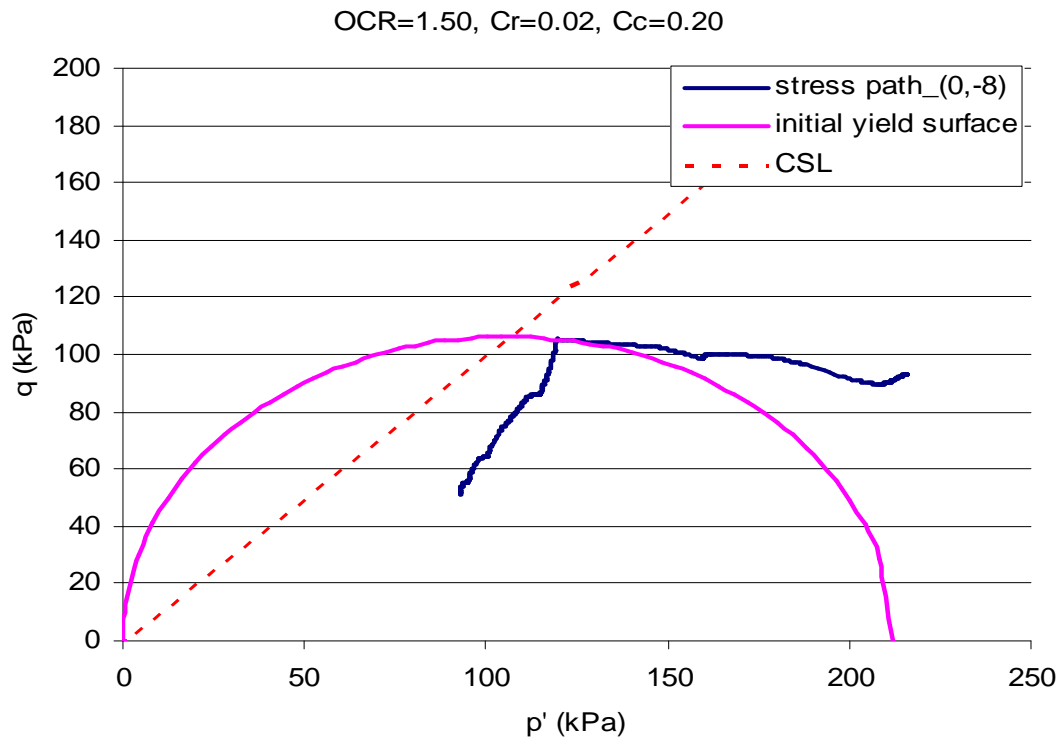


Σχήμα 6.15 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (10,-1), όταν $OCR \approx 1.50$.

Στο Σχήμα 6.15, διαφαίνεται η διαδρομή τάσεων για το σημείο με συντεταγμένες (10,-1). Στην περίπτωση αυτή, ισχύουν αντίστοιχα συμπεράσματα με την προηγούμενη διαδρομή. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διαδρομές για τα σημεία [(20,-1);(0,-8);(10,-8);(20,-8)] στα σχήματα 6.16, 6.17, 6.18 και 6.19 αντίστοιχως.

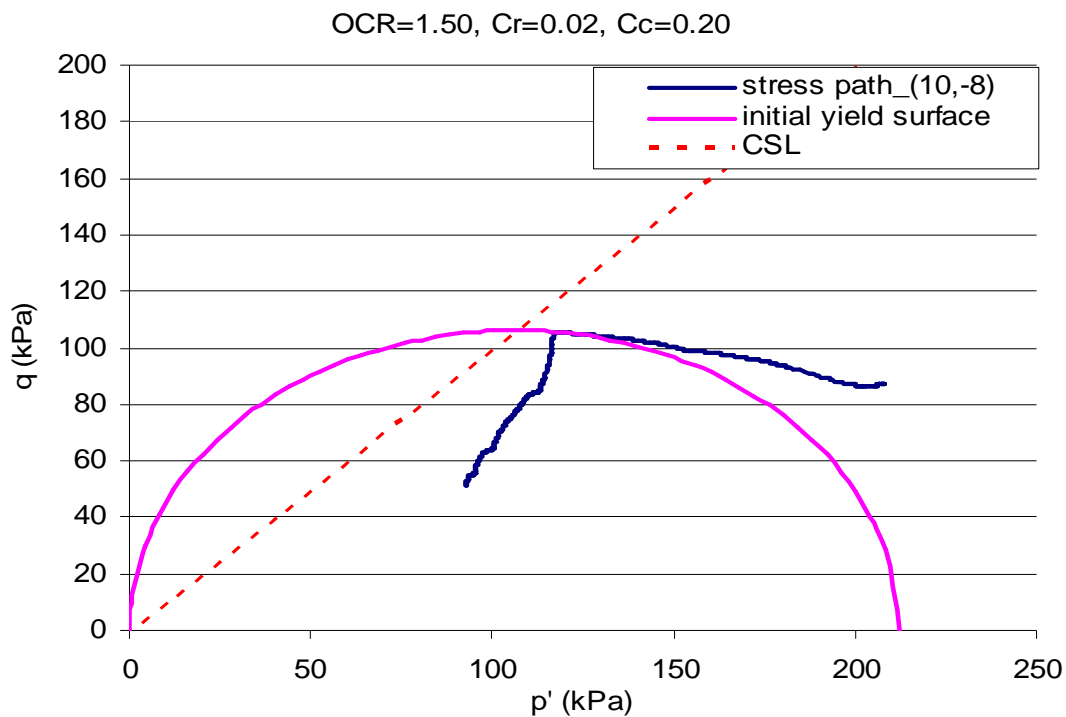


Σχήμα 6.16 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (20,-1), όταν $OCR \approx 1.50$.

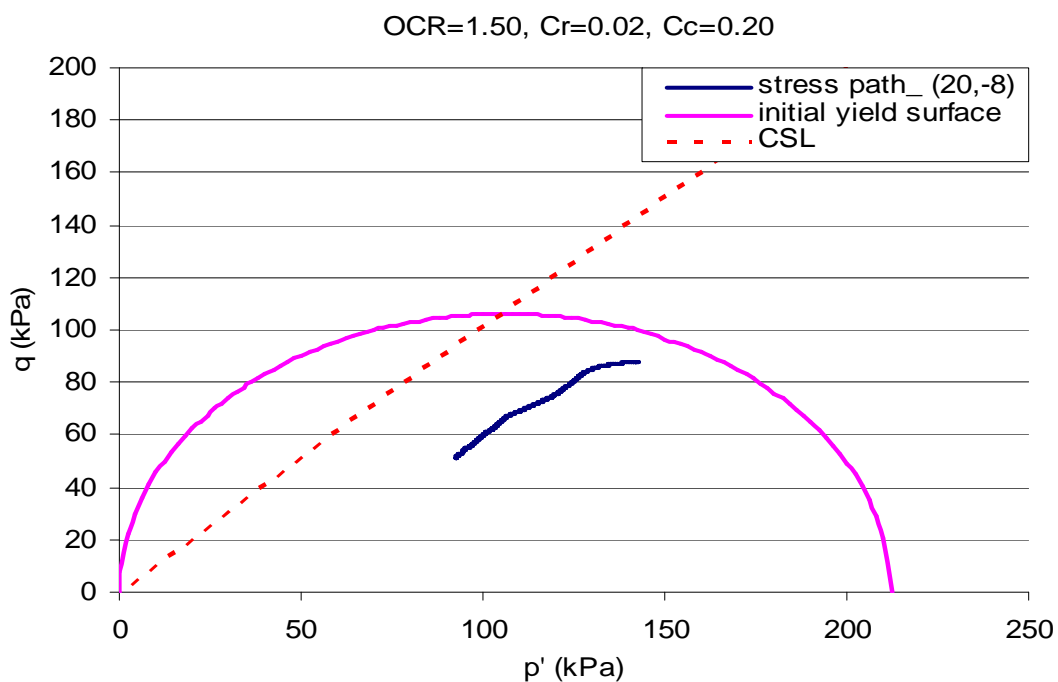


Σχήμα 6.17 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (0,-8), όταν $OCR \approx 1.50$.

Αξίζει να σημειωθεί, για τα σημεία που βρίσκονται -8m κάτω από το έδαφος, ότι οι αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις είναι μικρότερες σε σχέση με σημεία που βρίσκονται πλησίον της επιφάνειας. Επομένως, είναι δυνατόν να εξαχθεί ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις μειώνονται με το βάθος και την αύξηση της κάθετης απόστασης από τον άξονα του επιχώματος.



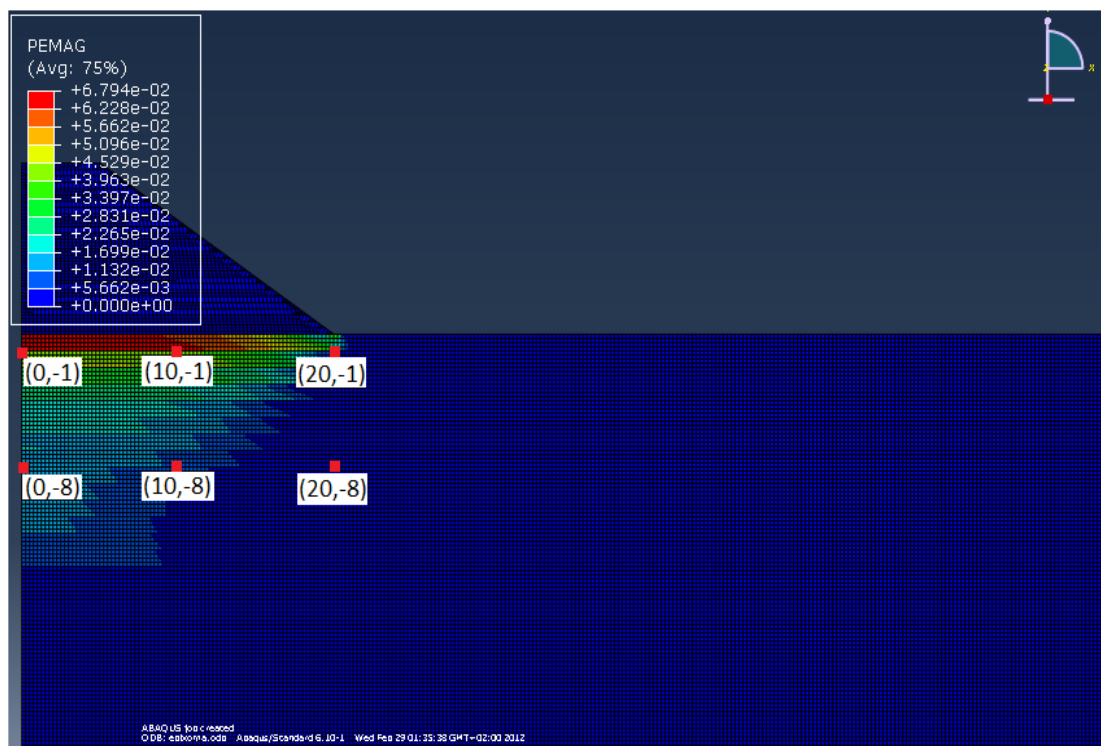
Σχήμα 6.18 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (10,-8), όταν $OCR \approx 1.50$.



Σχήμα 6.19 Διαδρομή τάσεων για σημείο με συντεταγμένες (20,-8), όταν $OCR \approx 1.50$.

Με βάση το Σχήμα 6.19, φαίνεται ότι το σημείο (20,-8) δεν αναπτύσσει καθόλου πλαστικές παραμορφώσεις και συμπεριφέρεται σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου της στερεοποίησης ποροελαστικά.

Στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η έκταση και το μέγεθος της ζώνης πλαστικών παραμορφώσεων, για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά της εντατικής κατάστασης για όλες τις άνωθεν συντεταγμένες των σημείων. (αξιοσημείωτο είναι ότι οι σχηματισμοί κάτω από τα -14.00m δεν πλαστικοποιήθηκαν)



Σχήμα 6.20 Ζώνη ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων για $OCR \approx 1.50$.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι διαδρομές των τάσεων που εξάγονται κατά τη διδιάστατη ανάλυση στερεοποίησης διαφέρουν από τις διαδρομές των τριαξονικών δοκιμών. Επίσης, υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση ως προς την υπόθεση αστράγγιστης ή στραγγισμένης εντατικής κατάστασης.

6.5 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν οι ανάστροφες αναλύσεις στερεοποίησης εδαφικών στρώσεων κάτω από δοκιμαστικό επίχωμα. Στην ανάστροφη ανάλυση έγινε συνδυασμός των καταστατικών νόμων συμπεριφοράς του ελαστοπλαστικού Cam-Clay και του Mohr Coulomb. Με βάση τις μετρήσεις των μαγνητικών δακτυλίων του μηκυσιόμετρου E-2 αλλά και χρησιμοποιώντας εύλογα τη γεωτεχνική διερεύνηση που έγινε στην περιοχή, επιλέχθηκε η γεωμετρία του προσομοιώματος αλλά και οι αρχικές γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών στρώσεων. Όμως, λόγω της μεγάλης απόκλισης των υπολογισμών από τις μετρήσεις των καθιζήσεων, διενεργήθηκε σειρά αναλύσεων, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή σύγκλιση μεταξύ των καθιζήσεων. Τα κριτήρια με τα οποία έγινε η σύγκλιση ήταν αρχικώς, η

επίτευξη των τελικών μέγιστων καθιζήσεων και δευτερευόντως, οι κλίσεις των καθιζήσεων να είναι όσο γίνεται ίδιες. Τελικώς, από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν υπολογίστηκε ότι ο συντελεστής προφόρτισης OCR είναι ίσος με 1.50 ενώ οι παράμετροι κ και λ είναι αντιστοίχως ίσοι με ~ 0.00868 και ~ 0.0868 αντιστοίχως (αναλογία 1 προς 10). Οι αναφερόμενες γεωτεχνικές παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν στα άνω 14 μέτρα του υπεδάφους που χρησιμοποιήθηκε το Cam-Clay. Στις υπόλοιπες στρώσεις, ορίστηκε το Mohr-Coulomb από τα -14.00m έως -25.00m.

Η συσχέτιση των καθιζήσεων, καταδεικνύει ότι οι καμπύλες είναι κατά 2 ημέρες παράλληλες. Όπως διαφαίνεται και στο Σχήμα 6.4, μετά τις 25 ημέρες από την 30/10/2010 η σύγκλιση είναι ιδιαίτερα καλή. Η μεγάλη απόκλιση πριν τις 25 ημέρες πιθανόν οφείλεται, στην ασυνήθιστα χαμηλή ανάπτυξη καθιζήσεων στις πρώτες ημέρες της κατασκευής. Αναλυτικότερα, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.2, η κλίση των καταγεγραμμένων καθιζήσεων είναι πολύ μικρή για φορτίο μέχρι 100kPa, ενώ ξαφνικά αυξάνεται μέχρι το πέρας της φόρτισης 200kPa.

Η παραπάνω αναντιστοιχία ως προς τις καθιζήσεις, πιθανόν χρεώνεται στην ύπαρξη έντονης ανομοιογένειας στους εδαφικούς σχηματισμούς (για περισσότερα βλ. Κεφάλαιο 5). Επομένως, για παράδειγμα το υπέδαφος είναι δυνατόν να μην έχει ενιαία τιμή του συντελεστή προφόρτισης και των παραμέτρων κ, λ αλλά είναι δυνατόν να διαφέρουν με το βάθος. Παρά ταύτα, επειδή δεν υπήρχαν εργαστηριακές δοκιμές από τη ΓΔΕ-1 (δειγματοληπτική γεώτρηση που έγινε στο κέντρο του δοκιμαστικού επιχώματος) αλλά μόνο επιτόπου μετρήσεις SPT, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εξαχθούν περαιτέρω συμπεράσματα. Επίσης, στην απόκλιση πιθανόν να συνέβαλλε και η παραδοχή του μέτρου ελαστικότητας του επιχώματος όπως και η θεώρηση της συμπεριφοράς του ως ισότροπης γραμμικώς ελαστικής. Επιπρόσθετα, ακόμη και η θεώρηση του Mohr Coulomb για τους σχηματισμούς κάτω από τα -14.00m επηρεάζει το υπολογισμό των καθιζήσεων.

Πέρα από τη συσχέτιση των καθιζήσεων, το φαινόμενο της στερεοποίησης φαίνεται να ολοκληρώνεται ταχύτατα. Η μέση τιμή του βαθμού στερεοποίησης $U_{aver}=90\%$ επιτυγχάνεται 26 ημέρες μετά την έναρξη της κατασκευής. Κατά συνέπεια, το μεγαλύτερο ποσοστό των καθιζήσεων γίνεται κατά την κατασκευή. Επίσης, οι πρόσθετες καθιζήσεις μετά το πέρας της κατασκευής είναι -13.4cm.

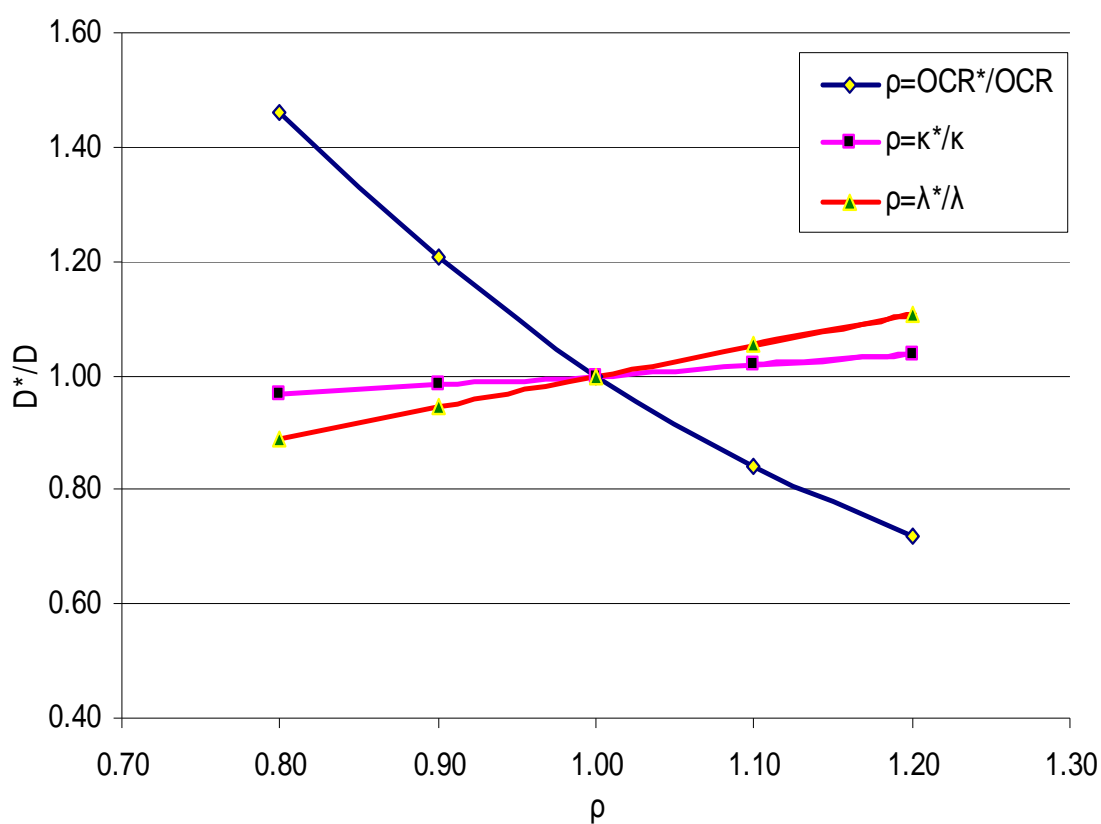
Όσον αφορά τη συσχέτιση των πιέσεων πόρων, είναι εμφανές ότι γενικώς δεν υπολογίζονται υψηλές υπερπιέσεις πόρων σε σύγκριση με το φορτίο εξαίτισης 200kPa. Επίσης, παρουσιάζεται υπερεκτίμηση των πιέσεων πόρων με βάση το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay.

Συνοψίζοντας, οι κύριες παράμετροι που συνεπάγονται την ταχεία ολοκλήρωση της στερεοποίησης κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα τόσο στην ανάστροφη ανάλυση όσο και στην πραγματικότητα είναι οι κάτωθι:

- Η ύπαρξη επαρκώς "ασυμπιέστου" και ελαφρώς στερεοποιημένου εδαφικού σχηματισμού.
- Η παρουσία οριζόντιας στρώσης στράγγισης από αμμοχάλικο.

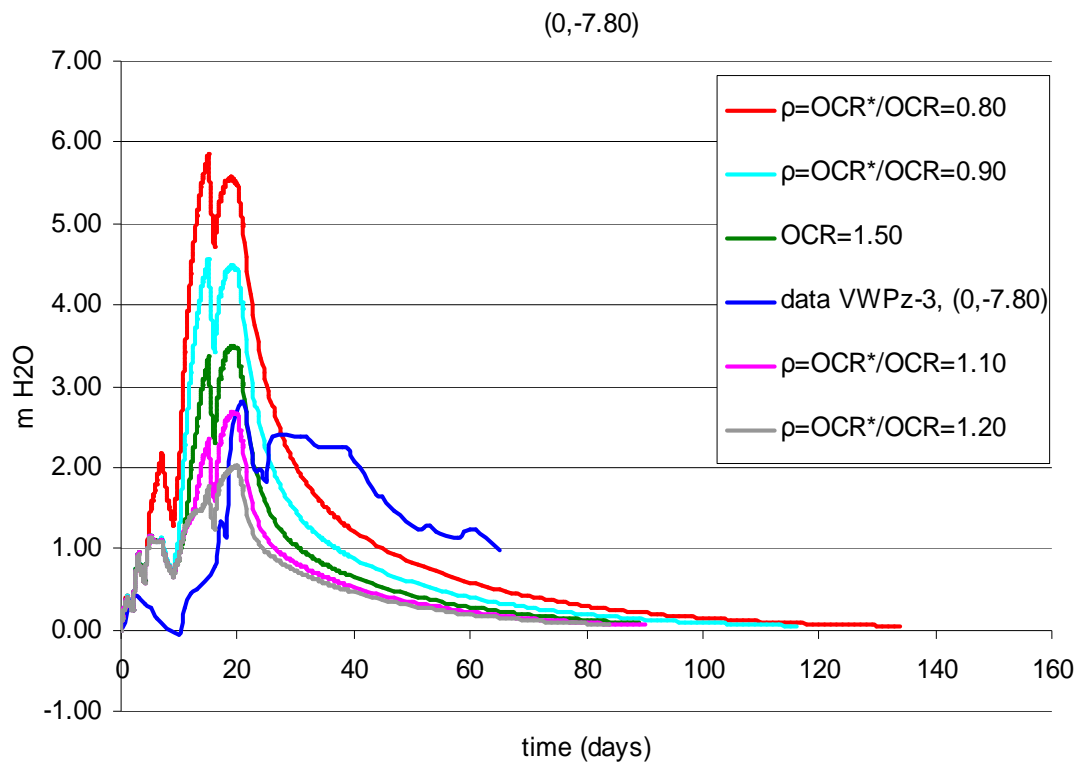
- Οι σχετικά υψηλές τιμές υδραυλικής διαπερατότητας των αργιλικών στρώσεων.
- Οι διδιάστατες συνθήκες ροής κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.

Για λόγους πληρότητας, τονίζεται ότι στις ανάστροφες αναλύσεις, η μεταβολή των καθιζήσεων του δοκιμαστικού επιχώματος είναι (κατά φθίνουσα σειρά) περισσότερο ευαίσθητη στη διακύμανση του συντελεστή προφόρτισης OCR έπειτα, στην παράμετρο λ , ενώ η παράμετρος κ επηρεάζει το λιγότερο. Σημειώνεται, ότι η άνω υπόθεση ισχύει με την ίδια αντιστοιχία και στις υπερπιέσεις πόρων. Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζεται ενδεικτικά η ευαισθησία της μεταβολής της μέγιστης καθίζησης του κέντρου του επιχώματος σε συνάρτηση με τη διακύμανση των συντελεστών OCR , κ και λ .

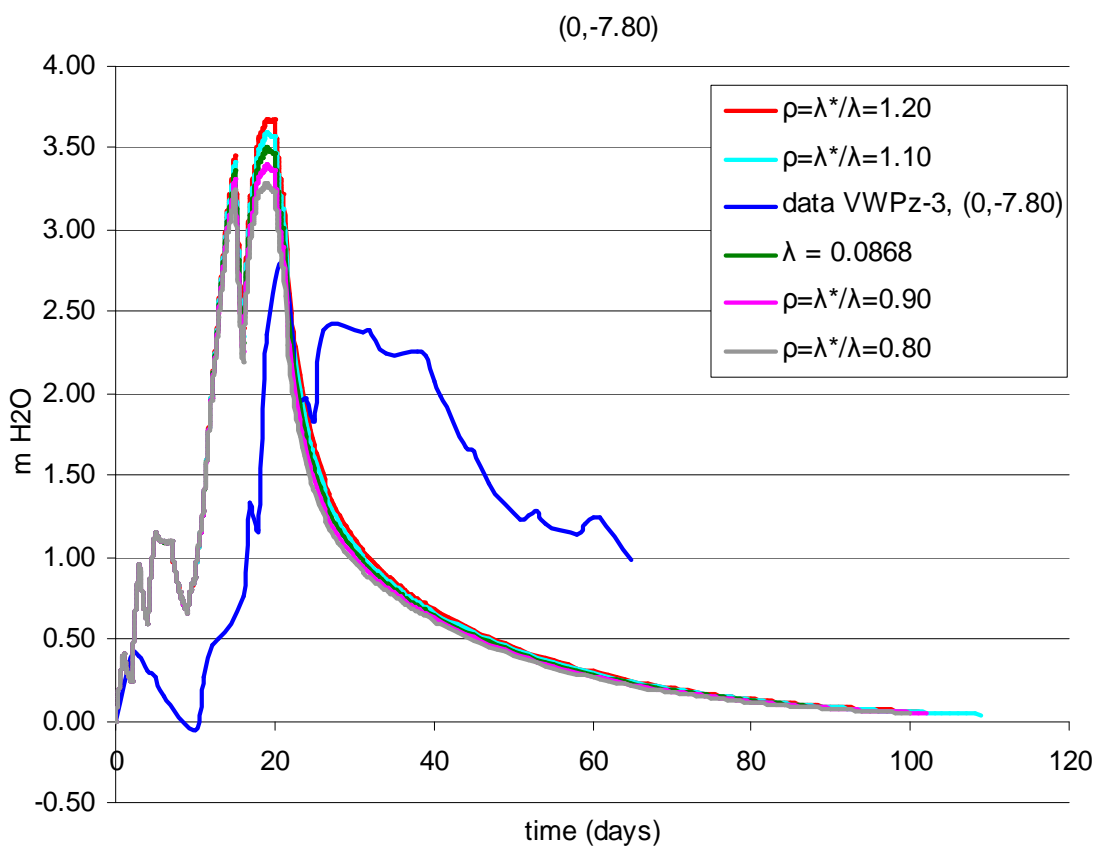


Σχήμα 6.21 Μεταβολή μέγιστης κατακόρυφης μετακίνησης D^* στο κέντρο του επιχώματος σε συνάρτηση με τη διακύμανση των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής OCR^* , κ^* και λ^* στα άνω 14.00m του εδάφους.

Τέλος, στα σχήματα 6.22 και 6.23 διαφαίνεται η μεταβολή του πιεζομετρικού ύψους (σε σχέση με τις 30/10/2010) για το σημείο (0,-7.80) σε συνάρτηση με τη διακύμανση των γεωτεχνικών παραμέτρων OCR και λ (για το κ είναι αμελητέα).



Σχήμα 6.22 Μεταβολή του πιεζομετρικού ύψους για το σημείο (0,-7.80) σε συνάρτηση με τη διακύμανση του συντελεστή OCR^* στα άνω 14.00m του εδάφους.



Σχήμα 6.23 Μεταβολή του πιεζομετρικού ύψους για το σημείο (0,-7.80) σε συνάρτηση με τη διακύμανση του συντελεστή λ^* στα άνω 14.00m του εδάφους.

Κεφάλαιο 7^ο : Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρήθηκε η αριθμητική και ποιοτική διερεύνηση της στερεοποίησης αργιλικών σχηματισμών υπό συγκεκριμένη μορφή εξαιτίας. Ιδιαίτερη έμφαση, δόθηκε στη συμπεριφορά των στερεοποιημένων αργιλικών στρώσεων που αναπτύσσουν ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις, κυρίως όταν οι τελευταίες εκφράζονται με βάση το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay. Τα άνωθεν, επιτεύχθηκαν με σκοπό τις ανάστροφες αναλύσεις στερεοποίησης εδαφικών στρώσεων κάτω από δοκιμαστικό επίχωμα.

Τονίζεται, ότι οι εδαφικοί σχηματισμοί εξετάστηκαν παραμετρικά τόσο στη μονοδιάστατη όσο και στη διδιάστατη στερεοποίηση. Η μεταβολή των παραμέτρων αφορά τη διακύμανση της διάρκειας της κατασκευής, τη συμπίεστικότητα του εδαφικού σχηματισμού αλλά και την υδραυλική διαπερατότητα (ισότροπη και ανισότροπη).

Από τις αναλύσεις που έγιναν στα προηγούμενα κεφάλαια είναι δυνατόν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα, όσον αφορά τη συμπεριφορά του αργιλικού σχηματισμού κατά το φαινόμενο της στερεοποίησης, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά, όπως ήταν αναμενόμενο, υπάρχει ιδιαίτερα καλή σύγκλιση ανάμεσα στην αναλυτική θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης (Terzaghi) και στην αριθμητική επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία.
- Στην αρχική φάση του φαινομένου της στερεοποίησης υπάρχουν πολύ μεγάλες κλίσεις των διαγραμμάτων μέσου βαθμού στερεοποίησης. Αυτό, οφείλεται στις πολύ υψηλές υδραυλικές κλίσεις όπου υπάρχουν συνοριακές συνθήκες στράγγισης, ενώ παράλληλα εμφανίζονται μηδενικές κλίσεις όπου υπάρχει αδιαπέρατο όριο. Κατά συνέπεια, τα στραγγιζόμενα όρια του στρώματος μεταβάλλουν γρήγορα τον όγκο τους και αναπτύσσουν έντονες κατακόρυφες παραμορφώσεις, ενώ μηδενική μεταβολή του όγκου χαρακτηρίζει τα εδαφικά στοιχεία πλησίον του αδιαπέρατου ορίου.
- Το φαινόμενο της στερεοποίησης είναι ταχύτερο όταν συμβαίνει υπό διδιάστατες συνθήκες, λόγω του διδιάστατου «πεδίου» ροής που συνεπάγεται, ταχύτερη στράγγιση και αποτόνωση της υπερπίεσης πόρων.
- Η ανισοτροπία στην υδραυλική διαπερατότητα έχει ουσιαστικό ρόλο ως προς την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης, καθώς αυξάνει το ρυθμό αποτόνωσης της υπερπίεσης πόρων.
- Στην περίπτωση της ταχείας φόρτισης στη διδιάστατη ανάλυση, το άθροισμα των καθιζήσεων προκύπτει από τις άμεσες καθιζήσεις (πριν τη στράγγιση) και τις καθιζήσεις εκ στερεοποίησης (ο ερπυσμός δε λαμβάνεται υπόψη). Εμφανές είναι, ότι οι καθιζήσεις της μονοδιάστατης στερεοποίησης (δηλαδή αυτές που εμφανίζονται με την αποτόνωση της υπερπίεσης πόρων) είναι μεγαλύτερες από τις καθιζήσεις εκ διδιάστατης στερεοποίησης. Παρά ταύτα, οι συνολικές καθιζήσεις της μονοδιάστατης ανάλυσης είναι μικρότερες από της διδιάστατης κατάστασης.

- Οι διογκώσεις στην ισότροπη και γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά αυξάνονται με την απόσταση από τον άξονα του επιχώματος, ενώ στην ελαστοπλαστική κατάσταση οι προβλεπόμενες ανυψώσεις εξαρτώνται από την επιρροή των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσει η εδαφική μάζα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση της ισότροπης γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς υπάρχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ επιφανειακών μετακινήσεων (καθιζήσεων-διογκώσεων) με το μέτρο ελαστικότητας.
- Όσον αφορά τη συγκριτική συμπεριφορά ανάμεσα στην ισότροπη γραμμική ελαστικότητα και την ποροελαστικότητα, είναι προφανές ότι η εξέλιξη της στερεοποίησης επιταχύνεται με τη συμπεριφορά της ποροελαστικότητας. Αυτό οφείλεται στη μεταβλητή τιμή του μέτρου συμπιεστότητας. Όσο ο εδαφικός ιστός στραγγίζει και το έδαφος συμπιέζεται, ο δείκτης πόρων μεταβάλλεται. Επομένως, η συμπιεστότητα του μειώνεται σε κάθε βήμα που εξελίσσεται η στερεοποίηση, το οποίο συνεπάγεται και συνεχή αύξηση του συντελεστή στερεοποίησης.
- Συγκρίνοντας τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay, παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή *OCR* συνεπάγεται, μείωση του χρόνου της στερεοποίησης. Αυτό χαρακτηρίζεται φυσιολογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι αύξηση του συντελεστή προφόρτισης οδηγεί σε μικρότερη συμπιεστότητα του εδάφους. Κατά συνέπεια, προβλέπονται και μικρότερες κατακόρυφες μετακινήσεις. Επίσης, για τις ίδιες τιμές του συντελεστή *OCR* αύξηση ή μείωση των δεικτών C_c, C_r συνεπάγεται, αντίστοιχα επιβράδυνση και επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης.
- Αξίζει να σημειωθεί, ότι κατά την αριθμητική διερεύνηση, η μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι (κατά φθίνουσα σειρά) περισσότερο ευαίσθητη στη διακύμανση του συντελεστή προφόρτισης *OCR* έπειτα, στην παράμετρο λ , ενώ η παράμετρος κ έχει αμελητέα επιρροή. Τονίζεται, ότι η άνωθεν παρατήρηση ισχύει με την ίδια αντιστοιχία και για τις υπερπίεσεις πόρων.
- Όσον αφορά τις υπερπίεσεις πόρων, συνήθως αυξάνονται καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής (με την προϋπόθεση να είναι συνεχής) και στη συνέχεια, μειώνονται μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Ως ποσοστό η υπερπίεση έχει την τάση να αυξάνεται στις περιπτώσεις που ο εδαφικός σχηματισμός είναι περισσότερο συμπιεστός.
- Επιπρόσθετα, με βάση τις ανάστροφες αναλύσεις προέκυψε ότι οι καθιζήσεις είναι παράλληλες με διαφορά περίπου 2 ημερών. Η παραπάνω απόκλιση πιθανόν να χρεώνεται στην ύπαρξη έντονης ανομοιογένειας στους εδαφικούς σχηματισμούς, ειδικότερα για τα άνω 14 μέτρα. Στην αναντιστοιχία πιθανόν να συνέβαλλε και η παραδοχή του μέτρου ελαστικότητας του επιχώματος όπως και η θεώρηση της συμπεριφοράς του ως ισότροπης γραμμικώς ελαστικής. Επιπρόσθετα, ακόμη και η θεώρηση του προσομοιώματος Mohr-Coulomb για τους σχηματισμούς κάτω από τα -14.00m επηρεάζει το υπολογισμό των καθιζήσεων.
- Πέρα από τη συσχέτιση των καθιζήσεων, το φαινόμενο της στερεοποίησης φαίνεται να ολοκληρώνεται ταχύτατα στις στρώσεις κάτω από το

δοκιμαστικό επίχωμα. Οι λόγοι για του οποίους μπορεί να συμβαίνει αυτό, παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η ύπαρξη επαρκώς “ασυμπίεστου” και ελαφρώς στερεοποιημένου εδαφικού σχηματισμού.
 2. Η παρουσία οριζόντιας στρώσης στράγγισης από αμμοχάλικο.
 3. Οι σχετικά υψηλές τιμές υδραυλικής διαπερατότητας των αργιλικών στρώσεων.
 4. Οι διδιάστατες συνθήκες ροής κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.
- Όσον αφορά τη συσχέτιση των πιέσεων πόρων, είναι εμφανές ότι γενικώς δεν υπολογίζονται υψηλές υπερπιέσεις πόρων σε σύγκριση με το φορτίο εξαίτισης 200kPa. Επίσης, παρουσιάζεται μια γενική υπερεκτίμηση των πιέσεων πόρων με βάση το καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay.

Ακολούθως, παρουσιάζονται ενδεικτικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος της συμπεριφοράς του δοκιμαστικού επιχώματος.

7.2 Προτάσεις - Σχολιασμός

Η παρούσα διπλωματική εργασία, όπως αναφέρεται παραπάνω, είχε σκοπό τις ανάστροφες αναλύσεις προσδιορισμού των γεωτεχνικών παραμέτρων κάτω από δοκιμαστικό επίχωμα. Προκειμένου να επιτευχθεί το άνωθεν τέθηκαν συγκεκριμένες παραδοχές – προσεγγίσεις οι οποίες είναι δυνατόν να επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εδάφους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, η μη θεώρηση ακόρεστης ζώνης και οριζόντιας ανισοτροπίας αποτελούν μερικές από τις παραδοχές που είναι πιθανόν να μεταβάλλουν τη γεωτεχνική συμπεριφορά του εδάφους ως προς τις καθιζήσεις και τις υπερπιέσεις πόρων κάτω από το επίχωμα.

Επίσης, η διερεύνηση των οριζόντιων μετακινήσεων κατά τη στερεοποίηση κάτω από το επίχωμα αποτελεί άλλο ένα αντικείμενο που είναι επιτακτικό να αναλυθεί. Βέβαια, στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα για τις κατανομές των οριζόντιων μετακινήσεων στον πόδα του δοκιμαστικού επιχώματος. Παράλληλα, πρέπει να διερευνηθεί η επιρροή της χωρικής ανισοτροπίας.

Επιπρόσθετα, προτείνεται η διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης με τη χρήση διαφορετικών καταστατικών προσομοιωμάτων από την ισότροπη γραμμική ελαστικότητα, το ελαστοπλαστικό Cam-Clay και Mohr-Coulomb.

Κατόπιν της ολοκλήρωσης των παραπάνω συμπερασμάτων διατίθεται μια σχετικά πληρέστερη εικόνα του φαινομένου της στερεοποίησης, ιδιαίτερα για την ελαστοπλαστική συμπεριφορά με το τροποποιημένο Cam-Clay.

Βιβλιογραφία

ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ Α.Τ.Ε. (2010), Γεωτεχνικές εργασίες διάτρησης και εγκατάστασης γεωτεχνικών οργάνων παρακολούθησης του δοκιμαστικού επιχώματος στην περιοχή του χωματουργικού έργου Η420.

Γκαζέτας Γ., Μπουκοβάλας Γ., Καββαδάς Μ., Γερόλυμος Ν. (2009), Υπολογιστική Γεωτεχνική, ΕΜΠ, Αθήνα.

Καββαδάς Μ. (2006), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, ΕΜΠ, Αθήνα.

Περικλέους Γ. (2008), Καταστατικά Προσομοιώματα Εδαφικών Υλικών με Βάση τη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ.

M. A. Biot (1941), General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Journal of Applied Physics, Vol. 12, pp. 155–164.

M. A. Biot (1955), Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, Vol. 26, pp. 182-185.

M. A. Biot (1957), The elastic coefficients of the theory of consolidation, Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp. 594-601.

Braja M. Das (2008), Advanced Soil Mechanics -3rd Edition-, California State University, Sacramento.

M. Britto, R. H. G. Parry, M. S. S. Almeida (1986), Numerical modelling of a centrifuged embankment on soft clay, Canadian Geotechnical Journal, 23: (2) pp. 103-114.

J. P. Carter, J. Small (2007), Computational Geomechanics Including Consolidation (Chapter 16), Solids and Structures, Vol. 2, John Wiley & Sons, Inc.

F. Christie (1964), A Re-Appraisal of Merchant's Contribution to the Theory of Consolidation, Geotechnique, Vol. 14, 4: pp. 309-320.

R. F. Craig (2005), Craig's Soil Mechanics -7th Edition-, University of Dundee, UK.

E. H. Davis, G. P. Raymond (1965), A Non-Linear Theory of Consolidation, Geotechnique, Vol. 15, 2: pp. 161-173.

S. Desai, H. J. Siriwardane (1981), Two Numerical Schemes for Nonlinear Consolidation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 17, pp. 405-426.

R. E. Gibson, G. L. England, M. J. Hussey (1967), The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays, 1. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers, *Geotechnique*, 17: pp. 261-273.

Hai-Sui Yu (2006), Plasticity and Geotechnics, *Advances in Mechanics and Mathematics*, Vol. 13.

Sam Helwany (2007), *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*, John Wiley & Sons, Inc.

OMIKRON KAPPA Consulting (2010), *Construction & Geotechnical Instrumentation of a Trial Embankment at Earthwork's H420 Area, Maliakos Kleidi Construction JV*.

D. M. Potts, L. Zdravkovic (2001), *Finite element analysis in geotechnical engineering (Application)*, ICL, London, Thomas Telford.

R. L. Schiffman (1982), The consolidation of soft marine sediments, *University of Colorado, Geo-Marine letters*, Vol. 2, Numbers 3-4, pp. 199-203.

R. L. Schiffman, D. Znidarcic (1982), On Terzaghi's concept of consolidation, *Geotechnique*, Vol. 32, No. 4, pp. 387-389.

Wenxiong Huang, Stephen Fityus, Daniel Bishop, David Smith, Daichao Sheng (2006), *Finite-Element Parametric Study of the Consolidation Behavior of a Trial Embankment on Soft Clay*, DOI: 10.10601/ (ASCE) 1532-3641, 6: 5 (328).

K. H. Xie, C. J. Leo (2004), Analytical Solutions of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays, *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 301-314.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ABAQUS

Παρακάτω, παρατίθενται βασικά τμήματα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην αριθμητική διερεύνηση όσο και στις ανάστροφες αναλύσεις.

1^η ΣΤΡΩΣΗ (ΑΠΟ ΤΙΣ 25)

ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΡΙΣΜΟ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (E=6.750 MPa)

```
*SOLID          SECTION,orientation=Ori-2,          ELSET=SOIL_STRO_1,
MATERIAL=M_SOIL_1
              1.,

*MATERIAL, NAME=M_SOIL_1
**
*DENSITY
              1.588235294,
**
***ELASTIC, TYPE=ISO
** elastic modulus poisson ratio
**      6750.,          0.333
*Elastic
              6750.,          0.333
**
** Pore fluid specific weight and soil permeability
** k=8.64*10^-4 m/day or 10^-8 m/sec
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10.0
4.32E-3, 8.64E-4
```

ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ CAM-CLAY (OCR=2)

```
*SOLID          SECTION,orientation=Ori-2,          ELSET=SOIL_STRO_1,
MATERIAL=M_SOIL_1
              1.,

*MATERIAL, NAME=M_SOIL_1
**
*DENSITY
              1.452143954,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
              0.0086858896, 0.333333, 0
**
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
              0.086858896, 1.0, 12.04483302, 1, 1
**
** Pore fluid specific weight and soil permeability
** k=8.64*10^-4 m/day or 10^-8 m/sec
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10.0
4.32E-3, 8.64E-4
```

ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ CAM-CLAY (OCR=4)

```
*SOLID          SECTION,orientation=Ori-2,          ELSET=SOIL_STRO_1,
MATERIAL=M_SOIL_1
```

1.,

```
*MATERIAL, NAME=M_SOIL_1
**
*DENSITY
    1.452143954,
**
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
    0.0086858896, 0.333333, 0
**
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
    0.086858896, 1.0, 30.03297722, 1, 1
**
** Pore fluid specific weight and soil permeability
** k=8.64*10^-4 m/day or 10^-8 m/sec
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10.0
4.32E-3, 8.64E-4
```

ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (INITIAL CONDITIONS)

ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΟ CAM-CLAY (OCR=2)

```
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS,GEOSTATIC
**group topstr level bstress level
    SOIL_STRO_1,0,0,-9.24091606833698,-1,0.707106781
    SOIL_STRO_2,-9.24091606833698,-1,-18.7657292485337,-2,0.707106781
    SOIL_STRO_3,-18.7657292485337,-2,-28.4936098562249,-3,0.707106781
    SOIL_STRO_4,-28.4936098562249,-3,-38.3680826929886,-4,0.707106781
    SOIL_STRO_5,-38.3680826929886,-4,-48.3585474718174,-5,0.707106781
    SOIL_STRO_6,-48.3585474718174,-5,-58.4455116945839,-6,0.707106781
    SOIL_STRO_7,-58.4455116945839,-6,-68.6153823774611,-7,0.707106781
    SOIL_STRO_8,-68.6153823774611,-7,-78.8581015309074,-8,0.707106781
    SOIL_STRO_9,-78.8581015309074,-8,-89.1659061427911,-9,0.707106781
    SOIL_STRO_10,-89.1659061427911,-9,-99.5326117444097,-10,0.707106781
    SOIL_STRO_11,-99.5326117444097,-10,-109.953168264284,-11,0.707106781
    SOIL_STRO_12,-109.953168264284,-11,-120.423369437417,-12,0.707106781
    SOIL_STRO_13,-120.423369437417,-12,-130.939654387457,-13,0.707106781
    SOIL_STRO_14,-130.939654387457,-13,-141.498967357451,-14,0.707106781
    SOIL_STRO_15,-141.498967357451,-14,-152.098655646837,-15,0.707106781
    SOIL_STRO_16,-152.098655646837,-15,-162.736393517742,-16,0.707106781
    SOIL_STRO_17,-162.736393517742,-16,-173.410124267899,-17,0.707106781
    SOIL_STRO_18,-173.410124267899,-17,-184.118015329764,-18,0.707106781
    SOIL_STRO_19,-184.118015329764,-18,-194.858422912602,-19,0.707106781
    SOIL_STRO_20,-194.858422912602,-19,-205.629863768637,-20,0.707106781
    SOIL_STRO_21,-205.629863768637,-20,-216.43099236684,-21,0.707106781
    SOIL_STRO_22,-216.43099236684,-21,-227.260582232885,-22,0.707106781
    SOIL_STRO_23,-227.260582232885,-22,-238.11751054181,-23,0.707106781
    SOIL_STRO_24,-238.11751054181,-23,-249.000745280942,-24,0.707106781
    SOIL_STRO_25,-249.000745280942,-24,-259.909334466028,-25,0.707106781
**
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=PORE PRESSURE
    N_SATURATION, 0., 0, 250, -25
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=RATIO
    NERO , 0.893751644
    N_SOIL_STRO_1 , 0.893751644
    N_SOIL_STRO_2 , 0.83222156
```

Παράρτημα Α

```
N_SOIL_STRO_3 , 0.795945155
N_SOIL_STRO_4 , 0.77010063
N_SOIL_STRO_5 , 0.75
N_SOIL_STRO_6 , 0.733544416
N_SOIL_STRO_7 , 0.719610352
N_SOIL_STRO_8 , 0.707525386
N_SOIL_STRO_9 , 0.696854884
N_SOIL_STRO_10 , 0.687301569
N_SOIL_STRO_11 , 0.6786531
N_SOIL_STRO_12 , 0.670752495
N_SOIL_STRO_13 , 0.663480411
N_SOIL_STRO_14 , 0.656743995
N_SOIL_STRO_15 , 0.650469574
N_SOIL_STRO_16 , 0.644597712
N_SOIL_STRO_17 , 0.63907976
N_SOIL_STRO_18 , 0.633875393
N_SOIL_STRO_19 , 0.628950813
N_SOIL_STRO_20 , 0.624277412
N_SOIL_STRO_21 , 0.619830759
N_SOIL_STRO_22 , 0.615589827
N_SOIL_STRO_23 , 0.611536383
N_SOIL_STRO_24 , 0.60765452
N_SOIL_STRO_25 , 0.603930274
****
```

```
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=SATURATION
NERO, 1.
```

```
N_SOIL_STRO_1, 1.
N_SOIL_STRO_2, 1.
N_SOIL_STRO_3, 1.
N_SOIL_STRO_4, 1.
N_SOIL_STRO_5, 1.
N_SOIL_STRO_6, 1.
N_SOIL_STRO_7, 1.
N_SOIL_STRO_8, 1.
N_SOIL_STRO_9, 1.
N_SOIL_STRO_10, 1.
N_SOIL_STRO_11, 1.
N_SOIL_STRO_12, 1.
N_SOIL_STRO_13, 1.
N_SOIL_STRO_14, 1.
N_SOIL_STRO_15, 1.
N_SOIL_STRO_16, 1.
N_SOIL_STRO_17, 1.
N_SOIL_STRO_18, 1.
N_SOIL_STRO_19, 1.
N_SOIL_STRO_20, 1.
N_SOIL_STRO_21, 1.
N_SOIL_STRO_22, 1.
N_SOIL_STRO_23, 1.
N_SOIL_STRO_24, 1.
N_SOIL_STRO_25, 1.
```

```
**
```

```
**
```

```
**
```

```
*BOUNDARY, OP=NEW
```

```
BOUND_X, 1,1, 0.
BOUND_BOT, 2,2, 0.
```

NERO, 8,8, 0.

**

ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ ΓΙΑ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΣΤΟ ΔΕΞΙ ΟΡΙΟ ΜΕ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

*BOUNDARY

9	,	8	,	8	,	1.25
8	,	8	,	8	,	2.50
7	,	8	,	8	,	3.75
6	,	8	,	8	,	5.00
5	,	8	,	8	,	6.25
4	,	8	,	8	,	7.50
3	,	8	,	8	,	8.75
1	,	8	,	8	,	10.00
2817	,	8	,	8	,	11.25
2816	,	8	,	8	,	12.50
2815	,	8	,	8	,	13.75
2814	,	8	,	8	,	15.00
2813	,	8	,	8	,	16.25
2812	,	8	,	8	,	17.50
2811	,	8	,	8	,	18.75
2810	,	8	,	8	,	20.00
5225	,	8	,	8	,	21.25
5224	,	8	,	8	,	22.50
5223	,	8	,	8	,	23.75
5222	,	8	,	8	,	25.00
5221	,	8	,	8	,	26.25
5220	,	8	,	8	,	27.50
5219	,	8	,	8	,	28.75
5218	,	8	,	8	,	30.00
7633	,	8	,	8	,	31.25
7632	,	8	,	8	,	32.50
7631	,	8	,	8	,	33.75
7630	,	8	,	8	,	35.00
7629	,	8	,	8	,	36.25
7628	,	8	,	8	,	37.50
7627	,	8	,	8	,	38.75
7626	,	8	,	8	,	40.00
10041	,	8	,	8	,	41.25
10040	,	8	,	8	,	42.50
10039	,	8	,	8	,	43.75
10038	,	8	,	8	,	45.00
10037	,	8	,	8	,	46.25
10036	,	8	,	8	,	47.50
10035	,	8	,	8	,	48.75
10034	,	8	,	8	,	50.00
.....						
46154	,	8	,	8	,	200.00
48569	,	8	,	8	,	201.25
48568	,	8	,	8	,	202.50
48567	,	8	,	8	,	203.75
48566	,	8	,	8	,	205.00
48565	,	8	,	8	,	206.25
48564	,	8	,	8	,	207.50
48563	,	8	,	8	,	208.75
48562	,	8	,	8	,	210.00
50977	,	8	,	8	,	211.25

Παράρτημα Α

50976	,	8	,	8	,	212.50
50975	,	8	,	8	,	213.75
50974	,	8	,	8	,	215.00
50973	,	8	,	8	,	216.25
50972	,	8	,	8	,	217.50
50971	,	8	,	8	,	218.75
50970	,	8	,	8	,	220.00
53385	,	8	,	8	,	221.25
53384	,	8	,	8	,	222.50
53383	,	8	,	8	,	223.75
53382	,	8	,	8	,	225.00
53381	,	8	,	8	,	226.25
53380	,	8	,	8	,	227.50
53379	,	8	,	8	,	228.75
53378	,	8	,	8	,	230.00
55793	,	8	,	8	,	231.25
55792	,	8	,	8	,	232.50
55791	,	8	,	8	,	233.75
55790	,	8	,	8	,	235.00
55789	,	8	,	8	,	236.25
55788	,	8	,	8	,	237.50
55787	,	8	,	8	,	238.75
55786	,	8	,	8	,	240.00
58601	,	8	,	8	,	241.25
58600	,	8	,	8	,	242.50
58599	,	8	,	8	,	243.75
58598	,	8	,	8	,	245.00
58597	,	8	,	8	,	246.25
58596	,	8	,	8	,	247.50
58595	,	8	,	8	,	248.75
58195	,	8	,	8	,	250.00

**

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ (ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ 60 ΗΜΕΡΕΣ)

```
**--- STAGE 1 - PROSTHIKI ISODINAMIS FORTISIS EPIXOMATOS ---  
**  
*Step, AMPLITUDE=RAMP, name=Consolidation_1, inc=100000  
*Soils, consolidation, utol=5.  
1.,60.,0.000001,1.  
**  
**  
*DLOAD  
  OMOIOMORFH_PIESH, P2, 200  
640 ,P2, 198.3333333  
636 ,P2, 195  
632 ,P2, 191.6666667  
628 ,P2, 188.3333333  
624 ,P2, 185  
620 ,P2, 181.6666667  
616 ,P2, 178.3333333  
612 ,P2, 175  
608 ,P2, 171.6666667  
604 ,P2, 168.3333333  
600 ,P2, 165  
596 ,P2, 161.6666667  
592 ,P2, 158.3333333
```

Παράρτημα Α

```
588 ,P2, 155
584 ,P2, 151.6666667
580 ,P2, 148.3333333
576 ,P2, 145
572 ,P2, 141.6666667
568 ,P2, 138.3333333
564 ,P2, 135
560 ,P2, 131.6666667
556 ,P2, 128.3333333
552 ,P2, 125
548 ,P2, 121.6666667
544 ,P2, 118.3333333
540 ,P2, 115
536 ,P2, 111.6666667
532 ,P2, 108.3333333
528 ,P2, 105
524 ,P2, 101.6666667
520 ,P2, 98.33333333
516 ,P2, 95
512 ,P2, 91.66666667
508 ,P2, 88.33333333
504 ,P2, 85
500 ,P2, 81.66666667
496 ,P2, 78.33333333
492 ,P2, 75
488 ,P2, 71.66666667
484 ,P2, 68.33333333
480 ,P2, 65
476 ,P2, 61.66666667
472 ,P2, 58.33333333
468 ,P2, 55
464 ,P2, 51.66666667
460 ,P2, 48.33333333
456 ,P2, 45
452 ,P2, 41.66666667
448 ,P2, 38.33333333
444 ,P2, 35
440 ,P2, 31.66666667
436 ,P2, 28.33333333
432 ,P2, 25
428 ,P2, 21.66666667
424 ,P2, 18.33333333
420 ,P2, 15
416 ,P2, 11.66666667
412 ,P2, 8.333333333
408 ,P2, 5
404 ,P2, 1.666666667
**
**
*****
**--- STAGE 2 - CONSOLIDATION -----
**
*Step, name=Consolidation_2, inc=100000
*Soils, consolidation, END=PERIOD, CREEP=NONE
1.,750.,0.000001,1.
**
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
```

```
*NODE OUTPUT
POR,U
*Output, history, frequency=1
**
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
S,E,PE,PEMAG, FLVEL, SAT, VOIDR, POR
**
*END STEP
```

ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΕΠΙΧΩΜΑ

1^η ΣΤΡΩΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ (ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΗΤΑΝ 16 ΣΤΡΩΣΕΙΣ)

```
*MATERIAL, NAME=M_EMB_1
**
*DENSITY
      2.0,
**
*ELASTIC, TYPE=ISO
** elastic modulus poisson ratio
      33333.3333333333,      0.33333333333333
```

14^η ΣΤΡΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ (1-14 CAM-CLAY)

```
*MATERIAL, NAME=M_SOIL_14
**
*DENSITY
      1.623814633,
**
**
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
      0.0086858896, 0.333333, 0
**
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
      0.086858896, 1.0, 156.9073189, 1, 1
**
**
** Pore fluid specific weight and soil permeability
**  $k=2.541176 \cdot 10^{-2}$  m/day or  $2.941176 \cdot 10^{-7}$  m/sec
*PERMEABILITY,TYPE=ISO,SPECIFIC=10.0
2.54E-03
```

15^η ΣΤΡΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ (15-18 ΑΜΜΟΧΑΛ. –MOHR COULOMB-)

```
*MATERIAL, NAME=M_SOIL_15
**
*DENSITY
      1.62828617,
**
**
*ELASTIC, TYPE=ISO
** elastic modulus poisson ratio
      6750.,      0.33333333333333333333333333333333
*Mohr Coulomb
30.,0.
*Mohr Coulomb Hardening
```

5.,0.
**
** Pore fluid specific weight and soil permeability
** $k=5.082353 \cdot 10^{-2}$ m/day or 10^{-7} m/sec
*PERMEABILITY,TYPE=ISO,SPECIFIC=10.0
1.46E-01

ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (INITIAL CONDITIONS)

*INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS,GEOSTATIC
group topstr level bstress level ALL_CPE4, 0., 0., -100.,
-5., 0.5
SOIL_STRO_1,0,0,-19.251246354436,-1,0.6595818764390649
SOIL_STRO_2,-19.251246354436,-1,-38.7575875190478,
-2,0.6595818764390649
SOIL_STRO_3,-38.7575875190478,-2,-58.4741398465488,
-3, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_4,-58.4741398465488,-3,-78.3391488462935,
-4, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_5,-78.3391488462935,-4,-98.3204608650117,
-5, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_6,-98.3204608650117,-5,-108.360853982264,
-6, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_7,-108.360853982264,-6,-118.446666097738,
-7, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_8,-118.446666097738,-7,-128.574661839676,
-8, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_9,-128.574661839676,-8,-138.742060791323,
-9, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_10,-138.742060791323,-9,-148.946446343175,
-10, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_11,-148.946446343175,-10,-159.185697552565,
-11, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_12,-159.185697552565,-11,-169.457937149027,
-12, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_13,-169.457937149027,-12,-179.761491148937,
-13, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_14,-179.761491148937,-13,-190.094856995865,
-14, 0.6595818764390649
SOIL_STRO_15,-190.094856995865,-14,-200.456678079344,
-15,0.5000000000000000
SOIL_STRO_16,-200.456678079344,-15,-210.845723104608,
-16, 0.5000000000000000
SOIL_STRO_17,-210.845723104608,-16,-221.260869206092,
-17, 0.5000000000000000
SOIL_STRO_18,-221.260869206092,-17,-231.70108798841,
-18, 0.5000000000000000
SOIL_STRO_19,-231.70108798841,-18,-242.16543388383,
-19,0.6100000000000000
SOIL_STRO_20,-242.16543388383,-19,-252.653034362653,
-20, 0.6100000000000000
SOIL_STRO_21,-252.653034362653,-20,-263.163081640246,
-21, 0.6100000000000000
SOIL_STRO_22,-263.163081640246,-21,-273.694825603921,
-22, 0.6100000000000000
SOIL_STRO_23,-273.694825603921,-22,-284.247567742268,
-23, 0.6100000000000000
SOIL_STRO_24,-284.247567742268,-23,-294.820655904578,
-24, 0.6100000000000000
SOIL_STRO_25,-294.820655904578,-24,-305.413479752503,

Παράρτημα Α

```
-25, 0.610000000000000000
**
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=PORE PRESSURE
  N_SATURATION, 0., -5, 200, -25
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=RATIO
NODES_EPIFANEIAS, 0.891637011
N_SOIL_STRO_1, 0.891637011
N_SOIL_STRO_2, 0.830857434
N_SOIL_STRO_3, 0.795136013
N_SOIL_STRO_4, 0.769733011
N_SOIL_STRO_5, 0.75
NERO, 0.75
N_SOIL_STRO_6, 0.741554297
N_SOIL_STRO_7, 0.733824213
N_SOIL_STRO_8, 0.726697703
N_SOIL_STRO_9, 0.720087153
N_SOIL_STRO_10, 0.713922752
N_SOIL_STRO_11, 0.708147972
N_SOIL_STRO_12, 0.702716398
N_SOIL_STRO_13, 0.697589449
N_SOIL_STRO_14, 0.692734708
N_SOIL_STRO_15, 0.688124675
N_SOIL_STRO_16, 0.683735822
N_SOIL_STRO_17, 0.679547858
N_SOIL_STRO_18, 0.675543166
N_SOIL_STRO_19, 0.671706351
N_SOIL_STRO_20, 0.668023877
N_SOIL_STRO_21, 0.664483788
N_SOIL_STRO_22, 0.661075464
N_SOIL_STRO_23, 0.65778943
N_SOIL_STRO_24, 0.6546172
N_SOIL_STRO_25, 0.651551141
```

ΣΥΝΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ ΓΙΑ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΣΤΟ ΔΕΞΙ ΟΡΙΟ

Ορίστηκε για τους δεξιά κόμβους με τον ίδιο τρόπο που έγινε και στην αριθμητική διερεύνηση.

ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ (1 ΑΠΟ ΤΙΣ 16)

```
**--- STAGE 1 - ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΡΟΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ -----
*STEP, AMPLITUDE=RAMP, INC=10000
**
*Soils, consolidation, utol=0.6
0.05, 1.0, 0.000001, 0.05
**
***STATIC
**0.1,1,0.000001,0.1
**
**
*MODEL CHANGE, ADD
  EMB_STRO_1
**
*DLOAD
  EMB_STRO_1, GRAV, 10, 0, -1, 0
```

```
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
  POR,U
*Output, history, frequency=1
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
  S,E,PE,PEMAG, FLVEL, SAT, VOIDR, POR
**
*END STEP
```

ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΔΙΑΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

```
**--- STAGE 1 - SK -----
*STEP, INC=10000
**
*Soils, consolidation, utol=0.6
0.05, 1.0, 0.000001, 0.05
**
***STATIC
**0.1,1,0.000001,0.1
**
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
  POR,U
*Output, history, frequency=1
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
  S,E,PE,PEMAG, FLVEL, SAT, VOIDR, POR
**
*END STEP
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

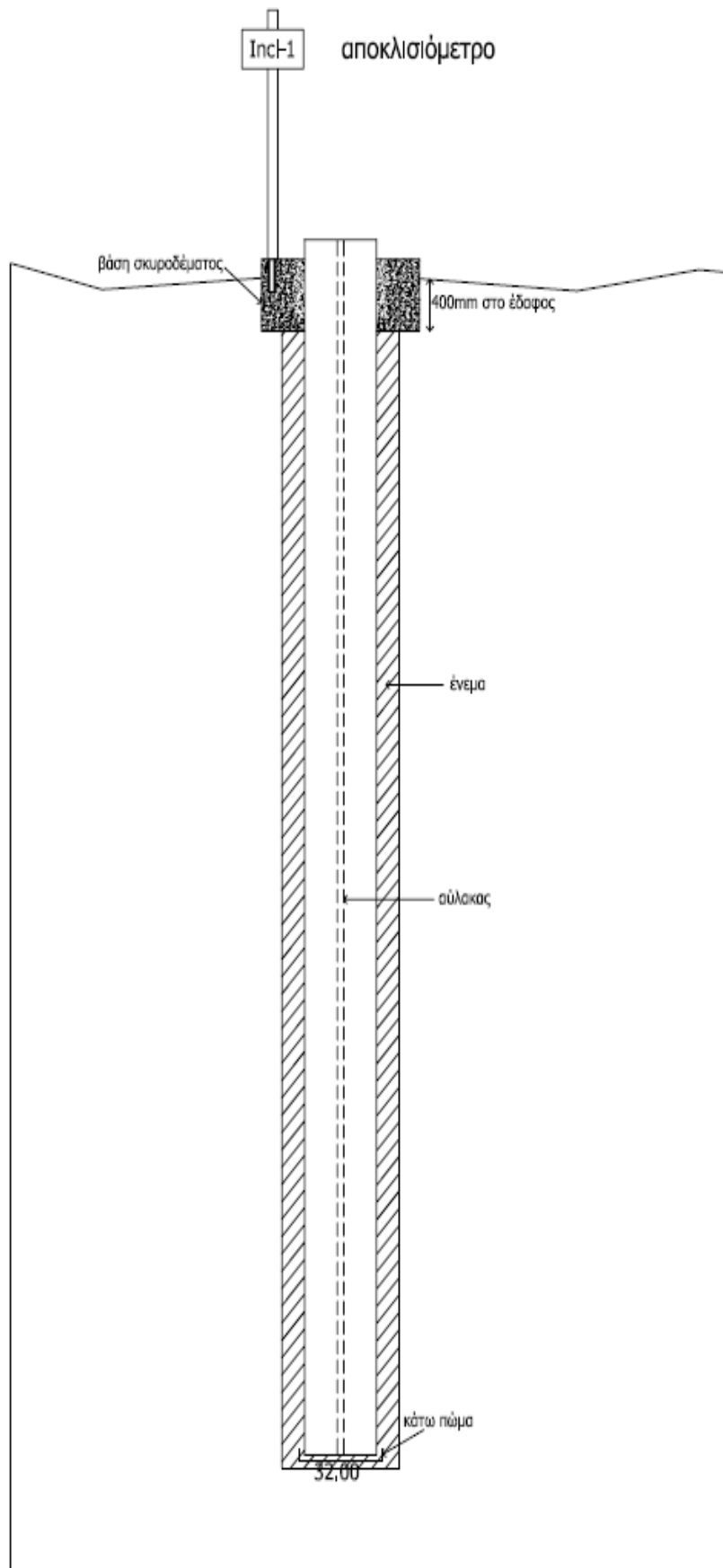
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ
ΤΟΜΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ



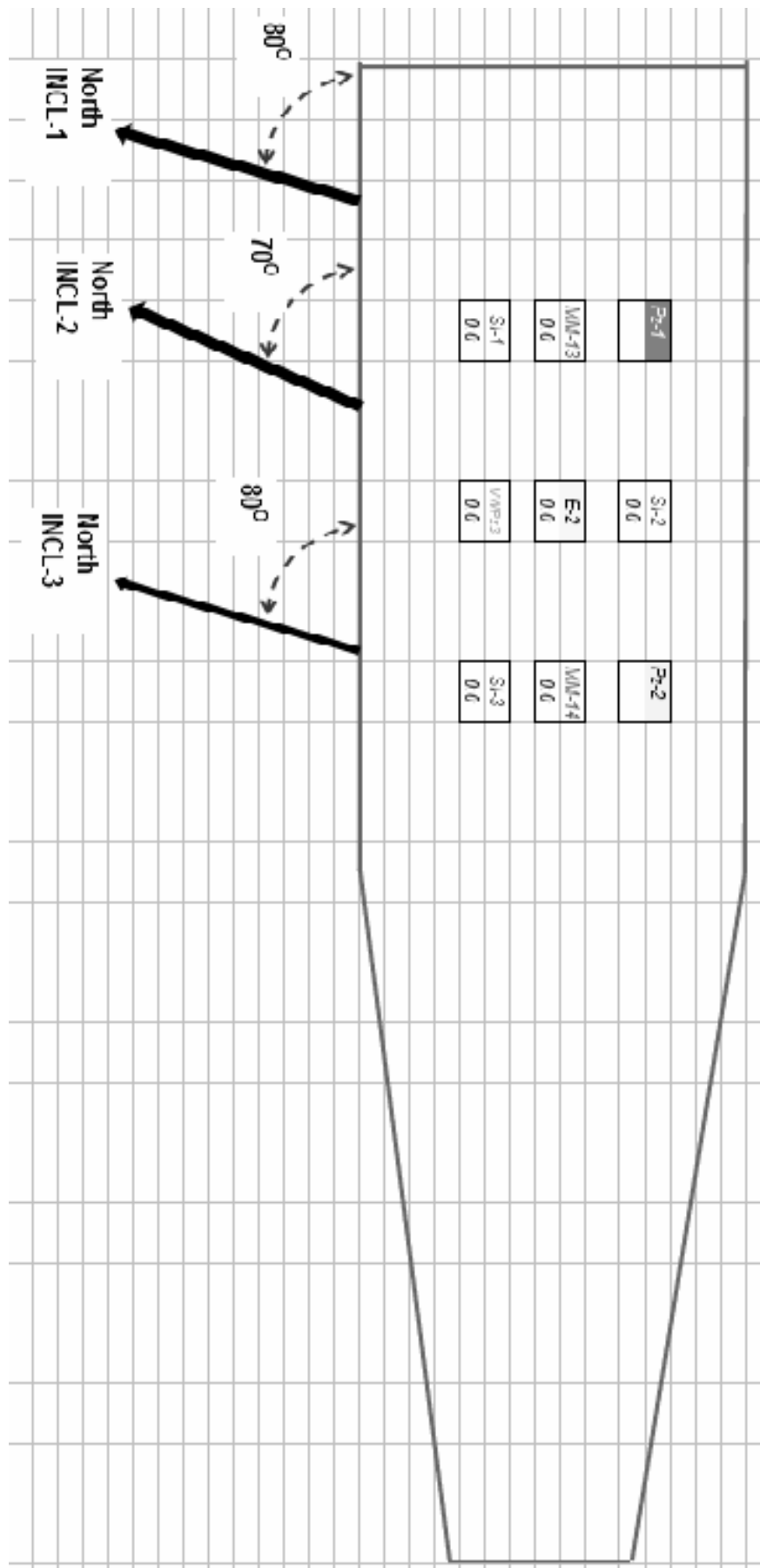
Σχήμα Β.1 Περιοχή τοποθέτησης για αποκλισιόμετρο Incl-1.



Σχήμα Β.2 Περιοχή τοποθέτησης για αποκλισιόμετρο Incl-2.



Σχήμα Β.3 Σκαρίφημα οργάνων για Incl-1.



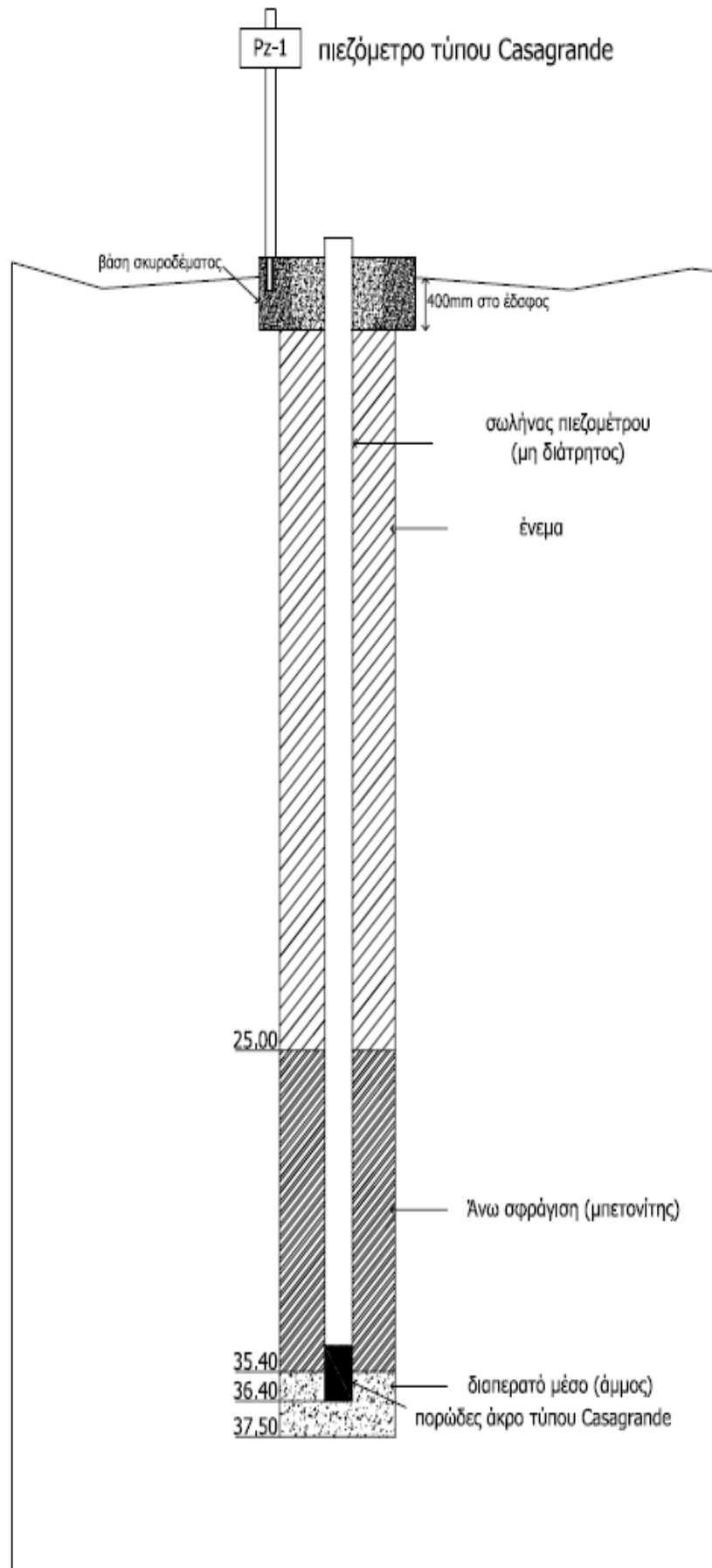
Σχήμα Β.4 Σκαρίφημα προσανατολισμού αποκλισιόμετρων.



Σχήμα Β.5 Περιοχή τοποθέτησης για πιεζόμετρο Casagrande Pz-1.



Σχήμα Β.6 Περιοχή τοποθέτησης για πιεζόμετρο Casagrande Pz-2.



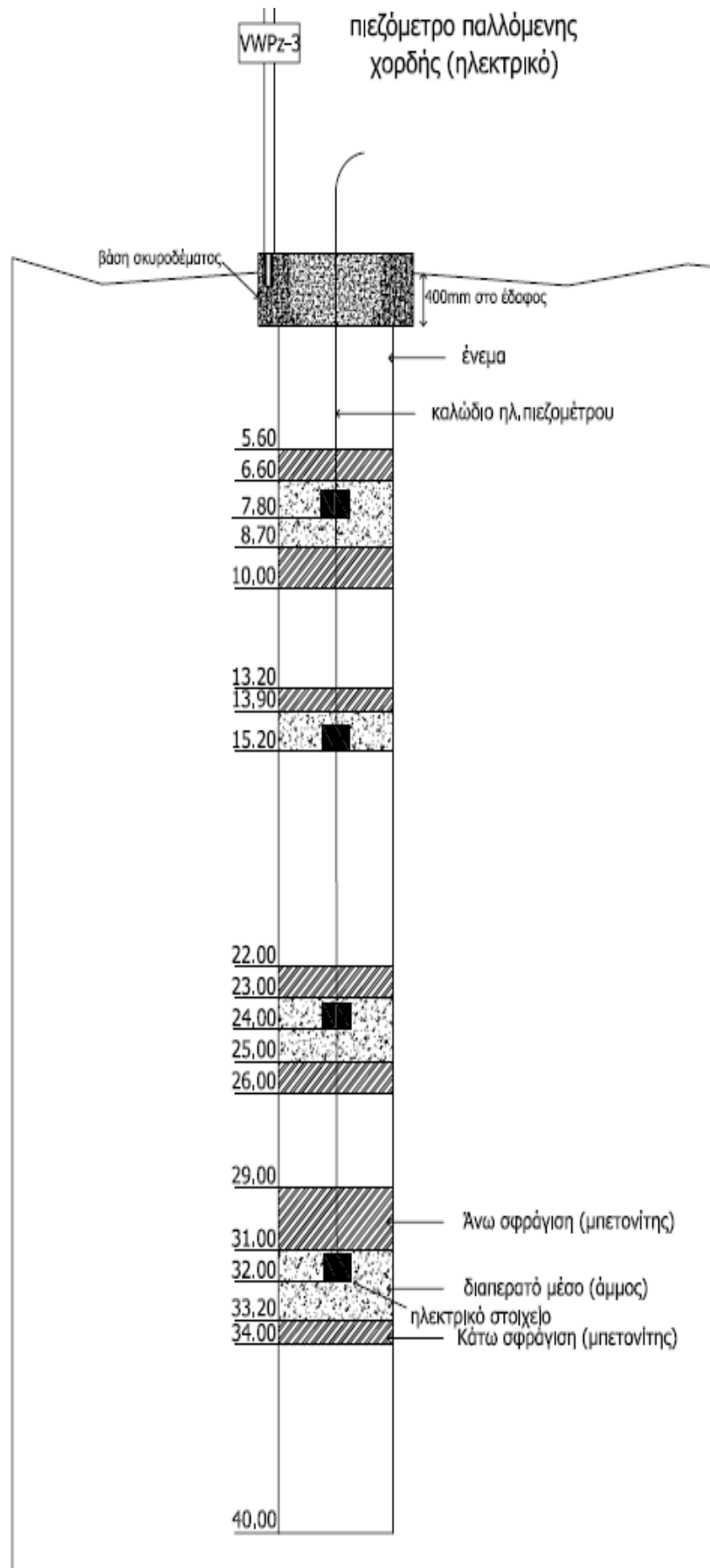
Σχήμα Β.7 Σκαρίφωμα για πιεζόμετρο Casagrande Pz-1.



Σχήμα Β.8 Περιοχή γεώτρησης για ηλεκτρικό πιεζόμετρο παλλόμενης χορδής VWPz-2.



Σχήμα Β.9 Περιοχή ΓΔΕ-1 και θέση για ηλεκτρικό πιεζόμετρο παλλόμενης χορδής VWPz-3.



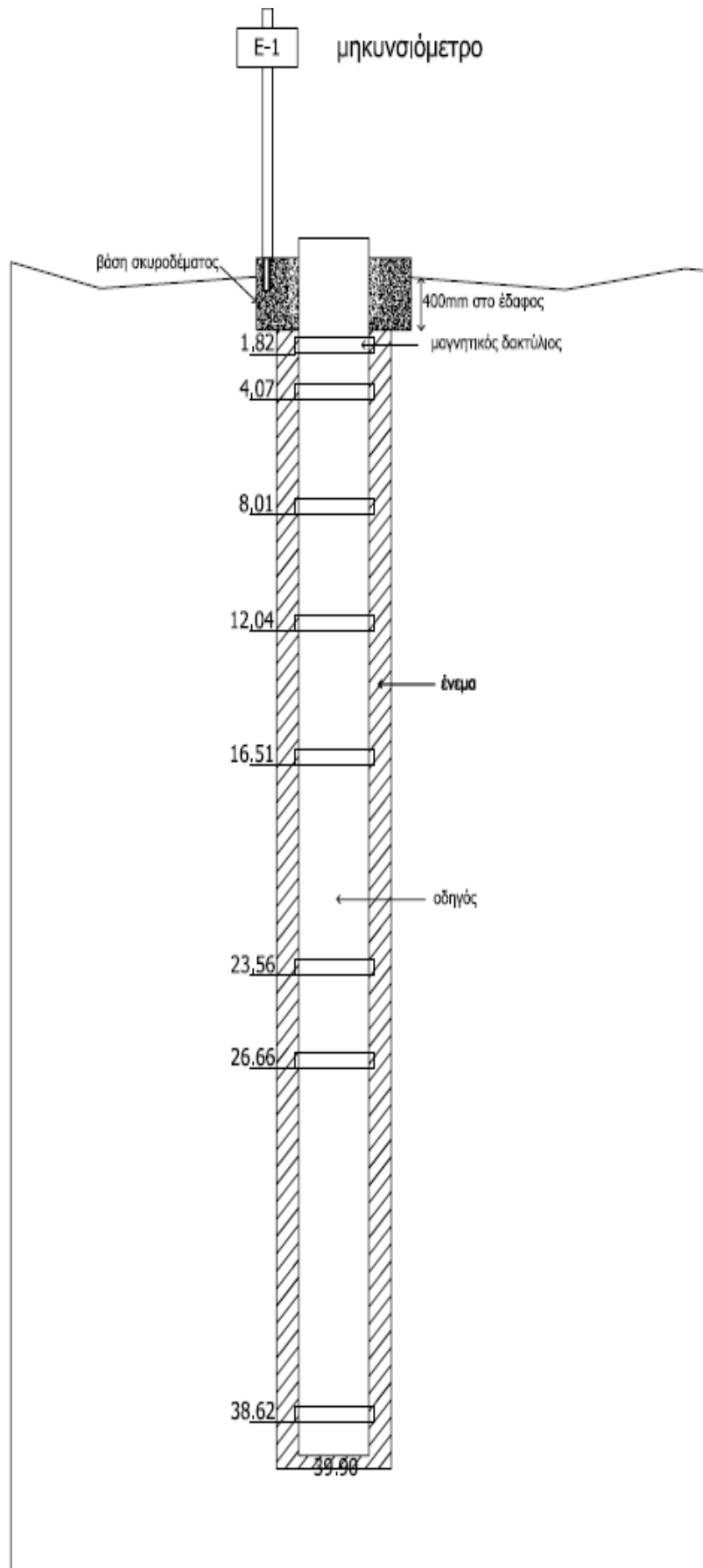
Σχήμα Β.10 Σκαρίφημα για ηλεκτρικό πιεζόμετρο παλλόμενης χορδής VWPz-3.



Σχήμα Β.11 Περιοχή τοποθέτησης για μηκυσιόμετρο Ε-1.



Σχήμα Β.12 Περιοχή τοποθέτησης για μηκυσιόμετρο Ε-2.



Σχήμα Β.13 Σκαρίφημα για μηκυσιόμετρο E-1.