

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής

Επιρροή των
χαλικοπασσάλων
στην
στερεοποίηση
μαλακών
εδαφικών
σχηματισμών
κάτω από
επίχωμα

Επιβλέπων καθηγητής :
Καββαδάς Μιχ.

Σπουδαστής :
Κερεστέτζης Αντώνιος

Ιούλιος 2011



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου κ. Μιχαήλ Καββαδά τόσο για την καθοδήγηση του στα πλαίσια της εργασίας αυτής, όσο και για τη γενικότερη προσφορά του στις γνώσεις που αποκόμισα φοιτώντας στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Ακολουθως, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Σιταρένιο, χωρίς τη βοήθεια του οποίου θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Αλέξανδρο Καλό και Κωνσταντίνο Τζιβάκο για τη βοήθεια τους σε διάφορα σημεία της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Βέττα Παναγιώτη, Σχοινά Σταυρούλα και Σιταρένιο Παναγιώτη της Ο.Τ.Μ Α.Τ.Ε καθώς και τους κυρίους Σπανό Αθανάσιο, Βουτηρά Κώστα και Αλεξίου Γιάννη της Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ για την ευγενική παραχώρηση υλικού και δεδομένων από την μελέτη και την κατασκευή του έργου που παρουσιάζεται στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσα εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την επιρροή των χαλικοπασσάλων στη στερεοποίηση μαλακών εδαφικών σχηματισμών κάτω από επίχωμα μεγάλου πλάτους. Συγκεκριμένα, με αφορμή τη θεμελίωση επιχώματος σε ένα πολύ μαλακό αργιλικό σχηματισμό ενισχυμένο με χαλικοπασσάλους, διερευνάται η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων του εδάφους στην εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης.

Αρχικά, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά των μαλακών εδαφικών σχηματισμών, αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των καθιζήσεων υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης και παρουσιάζεται η θεωρία της στερεοποίησης του Terzaghi αλλά και οι λύσεις των Hansbo, Rendulic και Carillo που έχουν διατυπωθεί για τον υπολογισμό της στερεοποίησης στην περίπτωση προφορτιζόμενου εδάφους με χρήση κατακόρυφων στραγγιστήριων.

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές μεθοδολογίες των Hansbo, Rendulic και Carillo για την οριζόντια στράγγιση, διερευνάται η επιρροή στην εξέλιξη της στερεοποίησης παραγόντων του προβλήματος όπως η διαπερατότητα και η συμπιεστότητα του εδάφους, η σχέση της οριζόντιας προς την κατακόρυφη διαπερατότητα, καθώς και το μέγεθος και ο βαθμός διαταραχής της ζώνης αναμόχλευσης που δημιουργείται γύρω από τους χαλικοπασσάλους κατά την κατασκευή τους.

Ακολούθως, τα αποτελέσματα των παραπάνω λύσεων συγκρίνονται με αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Για τις αναλύσεις αυτές, μορφώνεται τρισδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο που προσομοιάζει το ένα τεταρτημόριο της διαμέτρου του χαλικοπασσάλου και το περιβάλλον του έδαφος. Για την ακριβέστερη διερεύνηση του προβλήματος, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά καταστατικά προσομοιώματα για την περιγραφή των υλικών του προβλήματος: η θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας και η θεωρία της ποροελαστικότητας. Με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, διερευνάται επιπλέον η επιρροή της συμπιεστότητας του χαλικοπασσάλου στην εξέλιξη του φαινομένου.

Τέλος, παρουσιάζεται ένα πραγματικό πρόβλημα ακτινικής στράγγισης του εδάφους, όμοιο με αυτό που διερευνάται μέσα από την εργασία. Στα πλαίσια του πραγματικού προβλήματος, πραγματοποιούνται ανάστροφες αναλύσεις για τον επαναπροσδιορισμό των χαρακτηριστικών του εδάφους που επηρεάζουν τη λύση. Στις αναλύσεις αυτές, προκειμένου να προσομοιωθεί καλύτερα το φυσικό έδαφος, χρησιμοποιείται το τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα cam-clay.

ABSTRACT

This thesis examines the impact of stone columns on the consolidation of soft soils under embankments. Considering the foundation of an embankment on a very soft clay formation improved by stone columns, the influence of various soil parameters on the consolidation process is investigated.

Firstly, the mechanical and physical properties of soft soils are described and the available methods for settlement calculations under embankments are analyzed. Furthermore, the Terzaghi's consolidation theory as well as the solutions proposed by Hansbo, Rendulic and Carillo for radial drainage are presented.

Subsequently, using the analytical methodology based on the solutions of Hansbo, Rendulic and Carillo for radial drainage, the influence of various factors on the consolidation process is investigated. The factors that were taken under consideration are the soil permeability and compressibility, the relation between horizontal and vertical permeability, the size and the disturbance of the smear zone which is created around the stone column as a result of its construction.

The results of the aforementioned analytical solutions are then compared to numerical analysis results. Abaqus code was used on that purpose. The problem is simulated by a three-dimensional axis-symmetrical model which represents a quarter of the stone column diameter and its surrounding soil. Two constitutive models were used for the description of material properties: linear elasticity and porous elasticity.

Finally, a real problem concerning radial drainage is presented. The real problem is similar to those previously analyzed. A back-analysis is carried out in order to redefine the soil properties which affect the solution. For the later, the modified cam-clay model is used in order to better simulate the soil behavior.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της Εργασίας	1
1.2 Δομή της Εργασίας	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προφόρτιση - Στερεοποίηση αργιλικών εδαφών υπό συνθήκες κατακόρυφης και ακτινικής στράγγισης	3
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Χαρακτηριστικά μαλακών εδαφών	4
2.3 Καθιζήσεις Αργιλικών Εδαφών	5
2.3.1 Υπολογισμός καθιζήσεων πρωτεύουσας στερεοποίησης	6
2.3.2 Υπολογισμός καθιζήσεων λόγω δευτερεύουσας στερεοποίησης	8
2.4 Προφόρτιση Αργιλικών Εδαφών	8
2.4.1 Βελτίωση λεπτόκοκκων εδαφών με προφόρτιση	8
2.4.2 Μονοδιάστατη Στερεοποίηση – Κατακόρυφη στράγγιση	9
2.4.3 Βελτίωση της στράγγισης λεπτόκοκκων εδαφών με κατακόρυφα στραγγιστήρια.....	11
2.4.4 Ακτινική στράγγιση.....	12
2.4.5 Παρακολούθηση στερεοποίησης – Μέθοδος Asaoka	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης με χρήση αναλυτικών μεθόδων	19
3.1 Εισαγωγή - Περιγραφή Προβλήματος.....	19
3.2 Αποτελέσματα Παραμετρικών Επιλύσεων με βάση Αναλυτικές Μεθοδολογίες	21
3.2.1 Διερεύνηση της Επιρροής της Διαπερατότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	21
3.2.2 Διερεύνηση της Επιρροής του Μέτρου Μονοδιάστατης Συμπύεσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	23
3.2.3 Διερεύνηση της Επιρροής του Λόγου Διαπερατοτήτων στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	24
3.2.4 Διερεύνηση της Επιρροής του μεγέθους της Ζώνης Αναμόχλευσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	28
3.2.5 Διερεύνηση της Επιρροής του Βαθμού Διαταραχής του Μεγέθους της Οριζόντιας Διαπερατότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	32
3.2.6 Σύγκριση Αναλυτικής Μεθοδολογίας και Απλοποιημένης Μεθόδου Υπολογισμού Οριζόντιας Στράγγισης	33
3.2.7 Διερεύνηση Επιρροής Διαπερατότητας Υποκείμενου Εδάφους	35
3.3 Σύνοψη-Συμπεράσματα	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αριθμητικές αναλύσεις διερεύνησης της στράγγισης και στερεοποίησης εδαφικών σχηματισμών	41
4.1 Χρησιμοποιούμενα Καταστατικά Προσομοιώματα.....	41
4.1.1 Γραμμική ισότροπη ελαστικότητα	41
4.1.2 Ποροελαστικότητα	43
4.1.3 Συσχέτιση καταστατικών προσομοιωμάτων.....	44
4.2 Περιγραφή του Μοντέλου.....	45
4.3 Αποτελέσματα Αναλύσεων	47
4.3.1 Διερεύνηση της Επιρροής της Διαπερατότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	47
4.3.2 Διερεύνηση της Επιρροής των χαρακτηριστικών Συμπιεστότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	50
4.3.3 Διερεύνηση της Επιρροής του Λόγου Οριζόντιας προς Κατακόρυφη Διαπερατότητα στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	52
4.3.4 Διερεύνηση της Επιρροής του Μεγέθους της Ζώνης Αναμόχλευσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	53
4.3.5 Διερεύνηση της Επιρροής του Βαθμού Διαταραχής της Οριζόντιας Διαπερατότητας εντός της Ζώνης Αναμόχλευσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης	56
4.3.6 Σύγκριση Αναλυτικής Μεθοδολογίας και Απλοποιημένης Μεθοδολογίας Υπολογισμού Οριζόντιας Στράγγισης.....	58
4.4 Αναλύσεις με Θεώρηση Διαφορετικού Μέτρου Ελαστικότητας για τον Χαλικοπάσσαλο	59
4.5 Σύνοψη-Συμπεράσματα	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάστροφες αναλύσεις με δεδομένα από ένα πραγματικό πρόβλημα.....	71
5.1 Στοιχεία για το Έργο	71
5.1.1 Ο Αυτοκινητόδρομος Μορέας.....	71
5.1.2 Περιοχή εφαρμογής μέτρων βελτίωσης	72
5.2 Ανάστροφες Αναλύσεις.....	78
5.2.1 Χαρακτηριστική διατομή.....	78
5.2.2 Διερεύνηση 1 ^{ου} σταδίου κατασκευής	83
5.2.3 Διερεύνηση 2 ^{ου} σταδίου κατασκευής	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του φαινομένου της οριζόντιας στράγγισης εδάφους το οποίο προφορτίζεται αφού έχει ενισχυθεί με χαλικοπασσάλους. Αφορμή για την εκπόνηση της εργασίας αποτέλεσε μελέτη που συντάχθηκε από την Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε. για την Κοινοπραξία ΜΟΡΕΑΣ. Η μελέτη αφορούσε στη θεμελίωση επιχώματος το οποίο είναι θεμελιωμένο επί εξαιρετικά μαλακού εδαφικού σχηματισμού. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων, η μελέτη, όπως θα επισημανθεί και λεπτομερώς στο 5^ο κεφάλαιο, έκρινε απαραίτητη την κατασκευή δικτύου χαλικοπασσάλων, τόσο για την ενίσχυση του εδάφους, όσο και για την επιτάχυνση της διαδικασίας στράγγισης του. Δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας των παραμέτρων του εδαφικού σχηματισμού, ως σκοπός της εργασίας ορίστηκε ο ακριβής επαναπροσδιορισμός τους μέσω ανάστροφων αναλύσεων. Στα πλαίσια αυτών, επιχειρείται μια γενικότερη παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος, η οποία εστιάζεται στα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη εδάφους. Επιπλέον, η διερεύνηση περιλαμβάνει τη σύγκριση αναλυτικών μεθοδολογιών υπολογισμού της οριζόντιας στράγγισης και διαφορετικών καταστατικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται μέσα από αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι, μέσα από τη θεώρηση της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, της ποροελαστικότητας και του τροποποιημένου προσομοιώματος cam-clay, επιδιώκεται η ακριβέστερη εξέταση της συμπεριφοράς του εδάφους.

1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου του εισαγωγικού αυτού κεφαλαίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιείται βιβλιογραφική αναφορά στα στοιχεία που συνθέτουν το θεωρούμενο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μαλακών εδαφών που χρήζουν μέτρων ενίσχυσης ή βελτίωσης. Ακολούθως, γίνεται συνοπτική αναφορά στη θεωρία της στερεοποίησης του Terzaghi και εν συνεχεία, στις αναλυτικές λύσεις που έχουν διατυπωθεί από τους Hansbo, Rendulic και Carillo για το

πρόβλημα της ακτινικής στράγγισης. Τέλος, περιγράφεται η μέθοδος Asaoka για την παρακολούθηση των καθιζήσεων και της εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης, η οποία και χρησιμοποιείται στο 5^ο κεφάλαιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνονται παραμετρικές αναλύσεις βασιζόμενες στις αναλυτικές μεθοδολογίες που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στις αναλύσεις αυτές, διερευνάται η επιρροή στην εξέλιξη της στερεοποίησης παραμέτρων όπως η διαπερατότητα του εδάφους, ο βαθμός ανισοτροπίας του εδάφους, το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης, ο βαθμός διαταραχής του εδάφους στη ζώνη αναμόχλευσης που προκαλείται από την κατασκευή των χαλικοπασσάλων καθώς και το μέγεθος της ζώνης αυτής. Τέλος, εξετάζεται η σημασία της μονής ή διπλής στράγγισης για ένα έδαφος που στραγγίζει ακτινικά και συγκρίνονται οι λύσεις που αναφέρθηκαν με άλλη απλούστερη λύση υπολογισμού της οριζόντιας στράγγισης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιηθήκαν με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα, η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα και η ποροελαστικότητα. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με αυτά των αναλυτικών λύσεων σε κοινά διαγράμματα. Πέραν τούτου, διερευνάται με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, κατά πόσον η μεγαλύτερη δυσκαμψία του χαλικοπασσάλου, που δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη από τις αναλυτικές μεθοδολογίες, επηρεάζει την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται εκτενώς ένα πραγματικό πρόβλημα οριζόντιας στράγγισης εδάφους που προφορτίζεται από επίχυμα. Το πρόβλημα αυτό κατεύθυνε και τις παραμετρικές αναλύσεις που προηγήθηκαν. Ειδικότερα, γίνεται παρουσίαση των στοιχείων της μελέτης εφαρμογής αλλά και των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την παρακολούθηση των καθιζήσεων επιτόπου. Με βάση αυτές, και δεδομένης της μεγάλης ασάφειας των αρχικών παραμέτρων υπολογισμού, διενεργούνται ανάστροφες αναλύσεις με σκοπό τον επαναπροσδιορισμό των εδαφικών χαρακτηριστικών του μαλακού εδάφους που παρουσιάστηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προφόρτιση - Στερεοποίηση αργιλικών εδαφών υπό συνθήκες κατακόρυφης και ακτινικής στράγγισης

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η κατασκευή επιχωμάτων σε μαλακά εδάφη έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων στο έδαφος θεμελίωσης και συνεπώς την πρόκληση καθιζήσεων. Υπάρχει λοιπόν κίνδυνος θραύσης του επιχώματος από διείδυση ή ολίσθηση των πρηνών. Για να προληφθεί ένα τέτοιο πιθανό πρόβλημα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης των μαλακών εδαφών.

Στις μεθόδους βελτίωσης των μαλακών εδαφών περιλαμβάνονται η προφόρτιση, η επιφανειακή συμπύκνωση και η βαθιά δονητική συμπύκνωση, η βαθιά εδαφική ανάμειξη, η ηλεκτρώσμωση και η κατάψυξη του εδάφους. Από αυτές, μόνο η προφόρτιση και η ηλεκτρώσμωση είναι αποτελεσματικές για αργιλώδη εδάφη. Αντίστοιχα, ως μέθοδοι ενίσχυσης του εδάφους νοείται η οπλισμένη γη με χρήση οπλισμού, γεωφασμάτων ή γεωπλεγμάτων και οι τσιμεντενέσεις. Η αντικατάσταση μέρους του μαλακού εδάφους με άλλο ανθεκτικότερο, όπως για παράδειγμα με αμμοχάλικο, μπορεί να ενταχθεί και στις δύο περιπτώσεις όπως επίσης και η χρήση χαλικοπασσάλων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει ένα συνδυαστικό πρόβλημα προφόρτισης εδάφους, το οποίο είναι ενισχυμένο με χαλικοπασσάλους. Το έδαφος είναι μαλακή, κορεσμένη άργιλος και οι χαλικοπάσσαλοι παίζουν διττό ρόλο: αφενός αυξάνουν την αντοχή του εδάφους εμποδίζοντας τη θραύση της θεμελίωσης και αφετέρου, λειτουργούν ως στραγγιστήρια επιταχύνοντας τη διαδικασία της στράγγισης και την εξέλιξη της στερεοποίησης.

Δεδομένου ότι η εργασία και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής, αναφέρονται σε πραγματικό πρόβλημα πολύ μαλακής αργίλου που θα παρουσιαστεί παρακάτω, σκόπιμη κρίνεται μια σύντομη αναφορά στα χαρακτηριστικά των μαλακών εδαφών. Επιπλέον, καθώς η προσοχή θα εστιαστεί στην εξέλιξη της στερεοποίησης του αργιλικού εδάφους, παρουσιάζονται συνοπτικά η θεωρία στερεοποίησης του Terzaghi και οι λύσεις που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των καθιζήσεων και του βαθμού στερεοποίησης υπό συνθήκες ακτινικής στράγγισης.

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΛΑΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Με τον όρο μαλακό ή συμπιεστό έδαφος νοείται κάθε έδαφος που έχει μικρή διατμητική αντοχή, και που για συνήθη φορτία υφίσταται σημαντικές καθιζήσεις. Με άλλα λόγια, κάθε έδαφος με προβλήματα ευστάθειας και καθιζήσεων. (Στ. Χριστούλας, 1998)

Πιο συγκεκριμένα, στα μαλακά εδάφη περιλαμβάνονται :

- απροφόρτιστες ή υποστερεοποιημένες άργιλοι και ιλύες με υγρασία περίπου ίση με το όριο υδαρότητας, αστράγγιστη διατμητική αντοχή μικρότερη από 40 kPa και αριθμό κρούσεων $N_{spt} \leq 10$.
- Χαλαρές άμμοι, με σχετική πυκνότητα $D_r \leq 40\%$ και αριθμό κρούσεων $N_{spt} \leq 10$, ιδίως όταν είναι κορεσμένες.
- Χαλαρές και μέσης πυκνότητας κορεσμένες άμμοι και αμμοχάλικα υπό σεισμική φόρτιση ($M_s > 5.0$) με $D_r \leq 70\%$ και αριθμό κρούσεων $N_{spt} \leq 30$.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των μαλακών αργίλων.

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών μαλακών αργίλων.

Φαινόμενο βάρος, γ	14 – 20	kN/m ³
Όριο πλαστικότητας, w_p	20 – 40	%
Όριο υδαρότητας, w_L	40 – 100	%
Δείκτης πλαστικότητας, I_p	20 – 60	%
Φυσική υγρασία, w	30 – 120	%
Λόγος κενών, e	0.90 – 2.00	
Συντελεστής συμπιεστότητας, C_c	0.5 – 4	
Συντελεστής στερεοποίησης, c_v	0.5 – 3	cm ² /sec
Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, q_u	20 – 100	kPa
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή, c_u	10 – 50	kPa

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύντομη αναφορά και στις ιδιότητες της τύρφης μιας και το έδαφος που θα μελετηθεί στο 5° κεφάλαιο έχει χαρακτηριστεί ως πολύ μαλακή αργιλοϊλύς με οργανικά (Τύρφη).

Ως τύρφη χαρακτηρίζονται οργανικές αποθέσεις που δημιουργούνται από μερικώς αποσυντεθημένα υπολείμματα της βλάστησης. Όταν απαντώνται κορεσμένες, αποτελούνται από νερό κατά 90-95% και 5-10% από έδαφος. Σχηματίζονται σε υγρές

περιοχές – όπως βάλτους – όπου η έλλειψη οξυγόνου αποτρέπει τους φυσικούς οργανισμούς να αποσυνθέσουν τη νεκρή φυτική ύλη. Η τύρφη είναι το χειρότερο έδαφος για τη θεμελίωση κατασκευών εξαιτίας των πολύ κακών ιδιοτήτων της. Η τύρφη ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα μαλακά εδάφη εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού υγρασίας της, της μεγάλης συμπιεστότητας της, της χαμηλής διατμητικής αντοχής της, της σημαντικής ανομοιομορφίας που παρουσιάζει και της πιθανότητας περαιτέρω αποσύνθεσης της ως αποτέλεσμα των συνθηκών του περιβάλλοντος της. Η στερεοποίηση της εξαρτάται κυρίως από την ετερογένεια της και την ύπαρξη ινών στο σώμα της.

Τα χαρακτηριστικά των οργανικών εδαφών ποικίλλουν αρκετά, όπως είναι αναμενόμενο εξαιτίας της ετερογένειας τους. Ενδεικτικά, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά τύρφης που μελετήθηκε πρόσφατα στην περιοχή Kayser της Τουρκίας από τους Ulusay, Tuncay, Hasancebi (2010). Το ποσοστό υγρασίας στα δείγματα που μελετήθηκαν ήταν μεταξύ 180% και 320%. Το φαινόμενο ειδικό βάρος υπολογίστηκε μεταξύ 10.5 και 14.0 kN/m³, σημαντικά μικρότερα από τις τυπικές τιμές του πίνακα 2.1. Επιπλέον, ο δείκτης πόρων λαμβάνει τιμές μεταξύ 2.1 και 4.7. Τέλος, για το μέτρο ελαστικότητας δόθηκαν τιμές μεταξύ 2 και 3 MPa ενώ ο συντελεστής συμπίεστοτητας C_c υπολογίστηκε μεταξύ 0.5 και 2.5.

2.3 ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η συνολική καθίζηση ενός φορτιζόμενου συμπίεστου στρώματος αργίλου είναι το άθροισμα :

1. Της άμεσης ή ελαστικής καθίζησης που παράγεται πριν από οποιαδήποτε αποστράγγιση,
2. Της καθίζησης λόγω πρωτεύουσας στερεοποίησης υπό συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης που παράγεται από τη διαφυγή του νερού κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης,
3. Της καθίζησης λόγω δευτερεύουσας στερεοποίησης υπό συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, η οποία πραγματοποιείται με πίεση πόρων σχεδόν μηδενική και αντιστοιχεί σε ερπυσμό του εδαφικού σκελετού.
4. Της πρόσθετης καθίζησης που προκαλείται από ενδεχόμενη πλευρική διαφυγή του εδάφους θεμελίωσης.

Η εργασία αυτή δεν ασχολείται καθόλου με καθιζήσεις που προκύπτουν λόγω ερπυσμού του φορτιζόμενου εδάφους, με όσες ακολουθούν ενδεχόμενη πλευρική διαφυγή του εδάφους αλλά και με τις άμεσες ελαστικές καθιζήσεις. Υπολογίζονται αποκλειστικά καθιζήσεις λόγω μονοδιάστατης στερεοποίησης. Εξάλλου, το μεγαλύτερο μέρος των ολικών καθιζήσεων είναι αποτέλεσμα της καθίζησης λόγω πρωτεύουσας στερεοποίησης. Ο υπολογισμός και η εξέλιξη τους σε συνάρτηση με το χρόνο γίνεται με τη θεωρία στερεοποίησης του Terzaghi, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα.

2.3.1 Υπολογισμός καθιζήσεων πρωτεύουσας στερεοποίησης

Η καθίζηση μιας στρώσης ομογενούς εδάφους πάχους H δίνεται από τον τύπο:

$$S = H \cdot \Delta \varepsilon_{\text{vol}} = H \cdot \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad , \quad (2.1)$$

όπου e_0 : ο αρχικός δείκτης πόρων και

$\Delta e = e_0 - e$: η μεταβολή του δείκτη πόρων από το φορτίο της κατασκευής.

Για τον ακριβή υπολογισμό της καθίζησης ενός στρώματος, γενικά συνιστάται ο διαχωρισμός του στρώματος σε επιμέρους στρώσεις. Σε αυτή την περίπτωση ο όρος H της εξίσωσης (2.1), παριστάνει το πάχος της κάθε στρώσης. Η συνολική καθίζηση του εξεταζόμενου στρώματος προκύπτει ως το άθροισμα των καθιζήσεων των επιμέρους στρώσεων.

Κατά την στερεοποίηση, κάτω από επίχωμα μεγάλου πλάτους ($B > 4H$) στο έδαφος επικρατούν συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης (αντίστοιχες με τη δοκιμή οιδημέτρου) καθώς παρεμποδίζεται η πλευρική παραμόρφωση του εδάφους. Επομένως, η μεταβολή του δείκτη πόρων εκφράζεται ως εξής:

$$\Delta e = C_c \cdot \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad , \quad (2.2)$$

όπου σ'_0 : η ενεργός τάση στο μέσο του στρώματος

e_0 : ο αρχικός λόγος κενών

$\Delta \sigma'$: η μεταβολή της ενεργού τάσης λόγω του φορτίου της κατασκευής

σ'_c : η μέση τάση προστερεοποίησης του στρώματος

και C_c : ο δείκτης συμπίεσότητας σε συνθήκες παρθενικής συμπίεσης

Συνεπώς, για κανονικά στερεοποιημένο έδαφος το οποίο φορτίζεται με τάση Δp και για το οποίο θεωρούμε ότι ο συντελεστής συμπίεσότητας είναι σταθερός με το βάθος, η συνολική καθίζηση του εδαφικού στρώματος είναι:

$$S = \frac{H}{1+e_0} \cdot C_c \cdot \log\left(\frac{p_0+\Delta p}{p_0}\right) \quad , \quad (2.3)$$

Στην περίπτωση που το έδαφος είναι ήδη υπερστερεοποιημένο, διακρίνονται δύο περιπτώσεις υπολογισμού της καθίζησης ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο ως προς την τάση προστερεοποίησης του εδάφους:

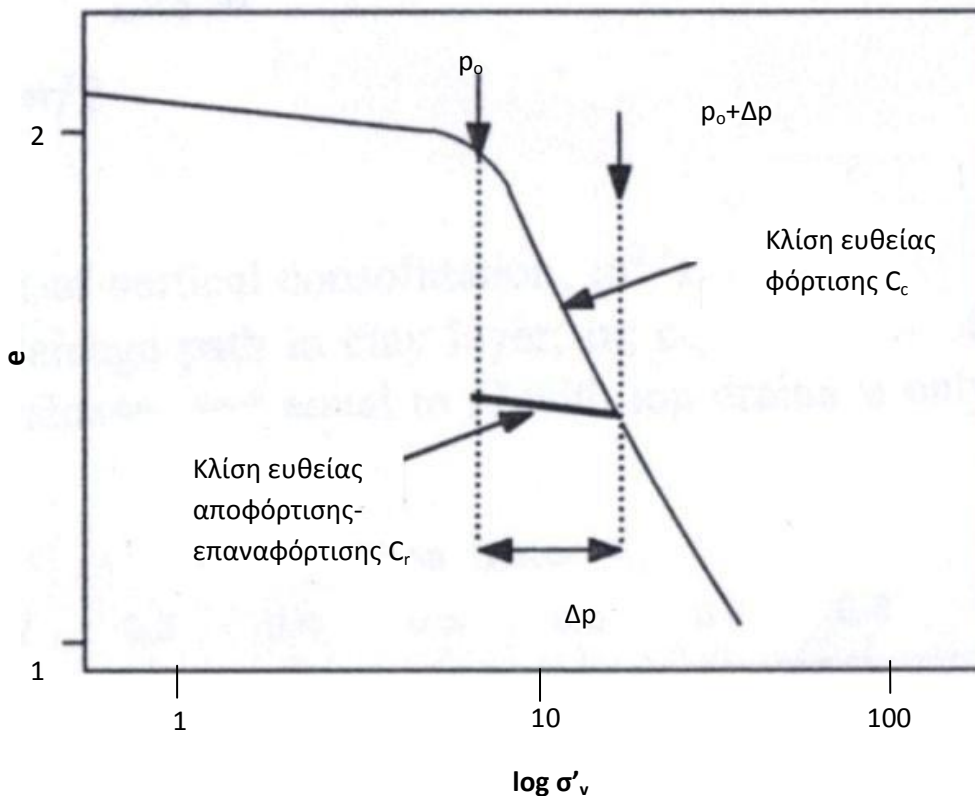
- Για υπερστερεοποιημένο έδαφος το οποίο φορτίζεται με Δq μικρότερη από την τάση προστερεοποίησης του, η καθίζηση είναι

$$S = \frac{H}{1+e_0} \cdot C_r \cdot \log\left(\frac{p_0+\Delta q}{p_0}\right) \quad , \quad (2.4)$$

- Τέλος, για υπερστερεοποιημένο έδαφος το οποίο φορτίζεται με τάση $\Delta q + \Delta p$ ενώ έχει προφορτιστεί με πίεση Δp , η τελική καθίζηση υπολογίζεται από τη σχέση

$$S = \frac{H}{1+e_0} \cdot C_r \cdot \log\left(\frac{p_0+\Delta p}{p_0}\right) + \frac{H}{1+e_0} \cdot C_c \cdot \log\left(\frac{p_0+\Delta p+\Delta q}{p_0+\Delta p}\right) \quad , \quad (2.5)$$

Στις σχέσεις 4 και 5, C_r είναι η κλίση της ευθείας αποφόρτισης-επαναφόρτισης στη δοκιμή συμπίεσομέτρου. Οι συντελεστές C_c και C_r φαίνονται και στο σχήμα 2.1 που αποτυπώνει τη μετρούμενη μεταβολή του δείκτη πόρων με την μεταβολή της κατακόρυφης ενεργού τάσης σε συνθήκες συμπίεσομέτρου.



Σχήμα 2.1: Μεταβολή του δείκτη πόρων συναρτήσει της μεταβολής της κατακόρυφης ενεργού τάσης.

2.3.2 Υπολογισμός καθίζησης λόγω δευτερεύουσας στερεοποίησης

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα μετά την εκτόνωση των υπερπιέσεων και μπορούν να αποδοθούν σε ερπυσμό του εδαφικού σκελετού. Τα κατακόρυφα στραγγιστήρια γενικά δεν επηρεάζουν τη δευτερεύουσα στερεοποίηση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο εδάφη τα οποία εμφανίζουν πολύ μεγάλα μεγέθη καθιζήσεων από δευτερεύουσα στερεοποίηση – όπως τύρφη, οργανικά εδάφη- ενδέχεται να μην ωφελούνται σημαντικά από κατακόρυφα στραγγιστήρια.

Η καθίζηση λόγω δευτερεύουσας στερεοποίησης, η οποία παράγεται από χρόνο t_0 μέχρι χρόνο t , υπολογίζεται ως εξής :

$$s_s = c_a H \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad , \quad (2.6)$$

Όπου H είναι το πάχος της στρώσης και c_a είναι ο συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης ο οποίος εκτιμάται συνήθως μέσω εμπειρικών συσχετίσεων με τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους (Bowles, 1997).

2.4 ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ - ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

2.4.1 Βελτίωση λεπτόκοκκων εδαφών με προφόρτιση

Η βελτίωση των λεπτόκοκκων εδαφών μέσω προφόρτισης συνίσταται στην εφαρμογή στο έδαφος μιας τάσης ίσης ή μεγαλύτερης της τελικής τάσης που προκαλείται από την κατασκευή και έχει δύο στόχους:

- a) Την επιτάχυνση του ρυθμού εκδήλωσης των καθιζήσεων. Το βελτιωμένο έδαφος γίνεται έτσι πιο γρήγορα ικανό για την παραλαβή των φορτίων της κατασκευής χωρίς κινδύνους για σημαντικές ομοιόμορφες ή διαφορικές καθιζήσεις
- b) Την αύξηση της διατμητικής αντοχής με επακόλουθο την αυξημένη φέρουσα ικανότητά τους.

Όλες οι μέθοδοι βελτίωσης λεπτόκοκκων εδαφών βασίζονται σε τεχνικές που επιτρέπουν τη μείωση του λόγου κενών και την ελάττωση του νερού των πόρων.

2.4.2 Μονοδιάστατη Στερεοποίηση – Κατακόρυφη στράγγιση

Η θεωρία για τη μονοδιάστατη στερεοποίηση ενός κορεσμένου εδαφικού στρώματος αναπτύχθηκε από τον Terzaghi τη δεκαετία του 1920 (Bowles,1997). Θεωρώντας ένα εδαφικό στρώμα πάχους $2H$, το οποίο είναι ομοιόμορφο, ισότροπο και γραμμικό, ο Terzaghi κατέληξε ότι, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η πίεση πόρων u μεταβάλλεται με τον χρόνο t και το βάθος z σύμφωνα με την διαφορική εξίσωση:

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad , \quad (2.7)$$

Όπου c_v ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης : $c_v \approx \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w}$, (2.8) και

k : η διαπερατότητα του εδάφους

γ_w : ειδικό βάρος νερού

E_s : το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης του εδάφους

Εφόσον θεωρηθεί ότι το υποκείμενο του εξεταζόμενου στρώματος έδαφος έχει μεγάλη διαπερατότητα ώστε η στράγγιση του στρώματος να γίνεται και στο ανώτερο και στο κατώτερο σύνορο του, τότε οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι οι ακόλουθες:

- Η υπερπίεση πόρων στο άνω σύνορο ($z=0$) είναι μηδενική οποιαδήποτε χρονική στιγμή t , δηλαδή $\Delta u(0,t)=0$.
- Η υπερπίεση πόρων στο κάτω σύνορο ($z=2H$) είναι μηδενική οποιαδήποτε χρονική στιγμή t , δηλαδή $\Delta u(2H,t)=0$.
- Η αρχική υπερπίεση πόρων ισούται με την επιβαλλόμενη κατακόρυφη ολική τάση, η οποία όμως είναι σταθερή σε όλο το πάχος του εδαφικού στρώματος. Άρα $\Delta u(z,0^+) = \Delta \sigma_v$.

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης με τις συγκεκριμένες συνθήκες οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση υπολογισμού της υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του βάθους z και του χρόνου t :

$$\Delta u(z, t) = \Delta \sigma_v \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2}{M} \cdot \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \cdot e^{-M^2 T_v} \right] \quad , \quad (2.9)$$

όπου $M = \frac{\pi \cdot (2m+1)}{2}$ και

T_v ο χρονικός παράγοντας που εκφράζει το χρόνο με αδιάστατη μορφή και καθορίζει τη χρονική κλίμακα εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης:

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad , \quad (2.10)$$

Από την χωρική και χρονική κατανομή των υπερπίεσεων πόρων υπολογίζεται η υποχώρηση της επιφάνειας του εδαφικού στρώματος από τη σχέση:

$$\delta(t) = \int_0^{2H} \frac{1}{D} \Delta \sigma'(z, t) dz = 2H \Delta \sigma_v - \frac{1}{D} \int_0^{2H} \Delta u(z, t) dz \quad , \quad (2.11)$$

Η τελική καθίζηση μετά την πλήρη εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων είναι $\delta(\infty) = 2H \cdot \frac{\Delta \sigma_v}{D}$.

Η χρονική εξέλιξη των υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους και κατ' επέκταση του φαινομένου της στερεοποίησης περιγράφεται με την αδιάστατη μορφή του βαθμού στερεοποίησης U , που ορίζεται ως εξής:

$$U(t) = \frac{\text{Μέση μείωση υπερπίεσης πόρων}}{\text{Αρχική υπερπίεση πόρων}} = \frac{\text{υποχώρηση εδαφικού στρώματος}}{\text{τελική υποχώρηση στρώματος}} = \frac{\delta(t)}{\delta(\infty)}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο βαθμός στερεοποίησης είναι συνάρτηση του χρονικού παράγοντα T_v και έχει την εξής μορφή:

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad , \quad (2.12)$$

Η επίλυση είναι ίδια και για την περίπτωση αδιαπέρατου υποκείμενου εδαφικού στρώματος, ήτοι μονής στράγγισης, αρκεί να θεωρηθεί αυτή τη φορά ότι το πάχος του εξεταζόμενου στρώματος είναι H . Ωστόσο, προκειμένου να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί της παραπάνω σχέσης, έχουν διατυπωθεί αρκετές προσεγγιστικές σχέσεις, επικρατέστερες εκ των οποίων είναι αυτές που προτάθηκαν από τον Fox (1948):

$$\bullet \quad U = 2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \quad \text{για} \quad 0 \leq T_v \leq 0.197 \quad , \quad (2.13)$$

$$\bullet \quad U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\pi^2 T_v / 4} \quad \text{για} \quad T_v > 0.197 \quad , \quad (2.14)$$

Όσον αφορά στη χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης των καθιζήσεων, η καθίζηση στη χρονική στιγμή t είναι ίση με $S_t = U(t) \cdot S$, όπου S είναι η τελική καθίζηση (λόγω πρωτεύουσας στερεοποίησης, όπως υπολογίζεται στην παράγραφο 2.3.1) και U ο βαθμός στερεοποίησης.

2.4.3 Βελτίωση της στράγγισης λεπτόκοκκων εδαφών με κατακόρυφα στραγγιστήρια

Η βελτίωση λεπτόκοκκων εδαφών με κατακόρυφα στραγγιστήρια συντίθεται στη δημιουργία στο έδαφος, κατακόρυφων στηλών αυξημένης διαπερατότητας σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος. Στόχος τους είναι η επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης, επιτρέποντας στο νερό εντός του συμπιεστού στρώματος να διαφύγει ακολουθώντας μια οριζόντια διαδρομή, ενώ ταυτόχρονα η στράγγιση διευκολύνεται ταυτόχρονα και από τη μεγαλύτερη τιμή της οριζόντιας διαπερατότητας σε σύγκριση με την κατακόρυφη. Η χρήση τους επιτρέπει, τη γρήγορη επίτευξη των καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης του εδάφους και τη βελτίωση της διατμητικής του αντοχής και επομένως της φέρουσας ικανότητας του. Το δίκτυο των στραγγιστηρίων είναι αναποτελεσματικό, χωρίς ταυτόχρονη φόρτιση του εδάφους.

Τα κατακόρυφα στραγγιστήρια μπορεί να είναι:

- a) *Προκατασκευασμένα στραγγιστήρια* : Αποτελούνται από ταινίες πλαστικές ή από χαρτόνι πλάτους συνήθως 10 cm, που τοποθετούνται επιτόπου με τη βοήθεια ειδικού μηχανήματος.
- b) *Χαλικοπάσσαλοι*: Αποτελούνται από οπές που κατασκευάζονται με διάφορες τεχνικές, παρόμοιες με αυτές των πασσάλων, που πληρώνονται στη συνέχεια με χαλίκι κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Και για τις δύο κατηγορίες, ο τρόπος διαστασιολόγησης ενός δικτύου στραγγιστηρίων είναι ο ίδιος. Για αυτό το λόγο έχουν διατυπωθεί διάφορες σχέσεις που προτείνουν ισοδύναμες διαμέτρους των πλαστικών στραγγιστηρίων ως προς τους χαλικοπασσάλους βάσει των χαρακτηριστικών των πρώτων.

2.4.4 Ακτινική στράγγιση

2.4.4.1 Επίλυση Rendulic (1935)

Ο Rendulic διατύπωσε πρώτος το 1935 τη λύση της ακτινικής ροής του νερού προς το κέντρο ενός κατακόρυφου στραγγιστηρίου καταλήγοντας στην παρακάτω διατύπωση για τον βαθμό στερεοποίησης σε ακτινική στράγγιση:

$$U_r = 1 - e^{-8T_r/a} \quad , \quad (2.15)$$

όπου T_r ο χρονικός παράγοντας για ακτινική στράγγιση : $T_r = \frac{c_h \cdot t}{D^2}$, (2.16)

c_h : ο συντελεστής στερεοποίησης για ακτινική στράγγιση $c_h \approx \frac{k_h \cdot E_s}{\gamma_w}$

D : η ισοδύναμη διάμετρος του στραγγιστηρίου η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του καννάβου (βλέπε σχήμα 2.2),

ενώ a και n παράγοντες εξαρτώμενοι από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος:

$$\alpha = n^2 \cdot \ln \left(\frac{n}{n^2 - 1} \right) - \frac{(3n^2 - 1)}{4n^2}$$

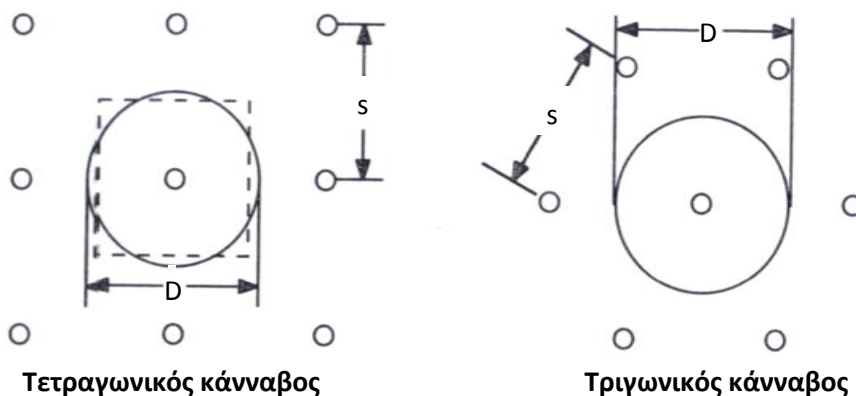
$$n = \frac{D}{d}$$

d : η διάμετρος του στραγγιστηρίου (για αμμοστραγγιστήριο ή ισοδύναμη διάμετρος για πλαστικό στραγγιστήριο).

Τα κατακόρυφα στραγγιστήρια ή οι χαλικοπάσσαλοι τοποθετούνται σε καννάβους τετραγωνικής ή τριγωνικής διάταξης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Για την εκτίμηση μιας ισοδύναμης διαμέτρου, δηλαδή της ζώνης στράγγισης του κάθε στραγγιστηρίου, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις (βλ. σχήμα 2.2) :

- Για τετραγωνικό καννάβο $D = 1.13 s$ (2.17a)

- Για τριγωνικό καννάβο $D = 1.06 s$ (2.17b)



Σχήμα 2.2: Στραγγιστήρια διατεταγμένα σε τετραγωνικό και τριγωνικό καννάβο.

Πρακτικά, η εξέλιξη της στερεοποίησης σε ένα έδαφος που στραγγίζει τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα εξαρτάται κατά βάση από την ακτινική στράγγιση για ένα σωστά διαστασιοποιημένο δίκτυο κατακόρυφων στραγγιστηρίων. Ωστόσο, η κατακόρυφη στράγγιση επηρεάζει και αυτή σε ένα βαθμό την χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων. Μάλιστα, ο Carillo απέδειξε το 1942 ότι η κατακόρυφη και η ακτινική στράγγιση συνδέονται μεταξύ τους με την σχέση :

$$(1 - U) = (1 - U_r) \cdot (1 - U_z) \quad , \quad (2.18)$$

όπου U_r και U_z όπως έχουν ορισθεί προηγουμένως.

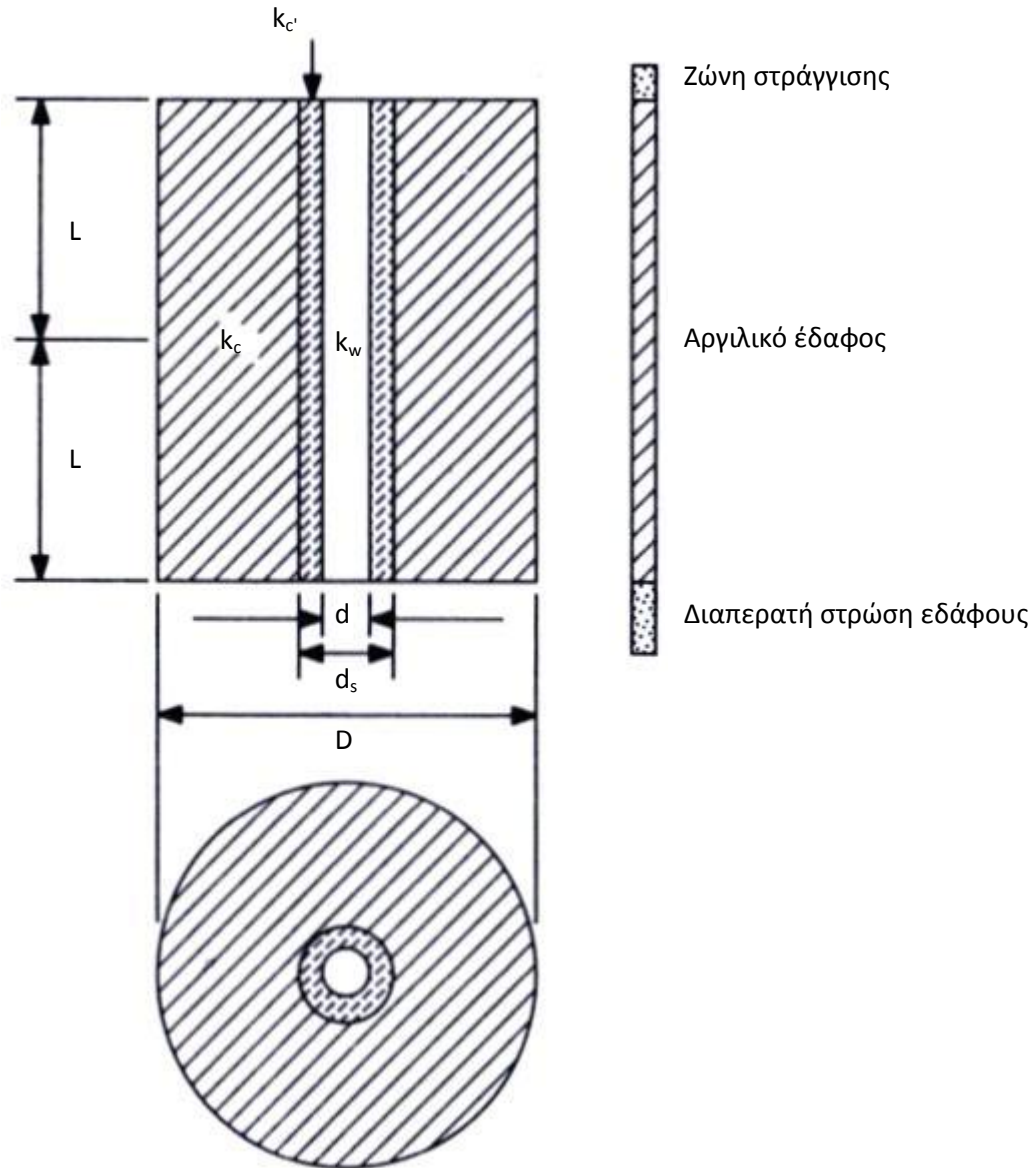
Εναλλακτικά, για τον απλούστερο υπολογισμό της εξέλιξης του φαινομένου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη διαδικασία που προτείνεται από τον Bowles. Σύμφωνα με αυτή, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις της κατακόρυφης στράγγισης $T_v = \frac{c_v t}{H^2}$ και $c_v = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w}$ και θεωρώντας ότι η στράγγιση μεταξύ δύο στραγγιστηρίων είναι αντίστοιχη με τη διπλή κατακόρυφη στράγγιση ενός εδάφους (με διαπερατό άνω και κάτω όριο), μπορεί να τεθεί το μέγεθος H ίσο με το μισό της μέγιστης απόστασης μεταξύ των κατακόρυφων στραγγιστηρίων. Επιπλέον, ο συντελεστής στερεοποίησης υπολογίζεται από την οριζόντια διαπερατότητα του εδάφους και τέλος, ο χρόνος στερεοποίησης $t_{90\%}$ υπολογίζεται από τη σχέση (2.10) θέτοντας $T_{90\%} = 0.848$, όπως υπολογίζεται από τη σχέση 2.14 του Fox.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα ελεγχθούν οι αποκλίσεις αυτής της απλοποιημένης μεθόδου από την αναλυτική λύση.

2.4.4.2 Επιρροή της ζώνης αναμόχλευσης και της υδραυλικής αγωγιμότητας του στραγγιστηρίου στην ακτινική στράγγιση.

Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος έμπτυξης κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή κατασκευής χαλικοπασσάλων περιλαμβάνει εκτόπιση του εδαφικού υλικού. Το υλικό που εκτοπίζεται κατά τη διάρκεια της έμπτυξης, διαταράσσει το περιβάλλον του στραγγιστηρίου έδαφος. Η διαταραχή αυτή είναι πιθανό να μειώσει τη διαπερατότητα του και να επιβραδύνει την διαδικασία της στερεοποίησης. Η επιρροή της ζώνης αναμόχλευσης γενικά αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου του στραγγιστηρίου και εξαρτάται και από τη μέθοδο τοποθέτησης του. Ενδεικτικά, η δονητική έμπτυξη του μεταλλικού στελέχους έμπτυξης προκαλεί σημαντικότερη διαταραχή από αυτή που προκαλείται για έμπτυξη χωρίς δόνηση. Επίσης, η διαταραχή εξαρτάται από το μέγεθος του μεταλλικού στελέχους έμπτυξης ή της πλάκας αγκύρωσης (για λωριδωτά στραγγιστήρια).

Επιπρόσθετα, τα στραγγιστήρια παρουσιάζουν αντίσταση ως προς το νερό που ρέει μέσω αυτών. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της στραγγιζόμενης ζώνης και άρα η απόσταση που πρέπει να διανύσει το νερό μέσα στο στραγγιστήριο, η διαδικασία της στερεοποίησης ενδέχεται να καθυστερήσει.



Σχήμα 2.3: Τομή και κάτοψη χαλικοπασσάλου εντός αργιλικού εδάφους.

Οι Hansbo et al. πρότειναν το 1981 μία παραλλαγή της εξίσωσης (2.15), έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή της ζώνης αναμόχλευσης. Η πρόταση αυτή περιλαμβάνει έναν τροποποιημένο συντελεστή α_s στη θέση του α :

$$U_{rz} = 1 - e^{-8T_r/\alpha_s} \quad , \quad (2.19)$$

Όπου U_{rz} : ο βαθμός στερεοποίησης για ακτινική στράγγιση σε βάθος z και

$$\alpha_s = \ln\left(\frac{n}{m}\right) + \frac{k_c}{k_{c'}} \cdot \ln(m) - \frac{3}{4} + \pi z \cdot (2L - z) \cdot \frac{k_c}{q_w} \quad , \quad (2.20)$$

$$n = \frac{D}{d} \quad , \quad \text{όπου}$$

D : η ισοδύναμη διάμετρος του στραγγιστηρίου ή όποια εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του καννάβου (βλέπε σχήμα 2.2)

d : η διάμετρος του στραγγιστηρίου (για χαλικοπάσσαλο ή ισοδύναμη διάμετρος για πλαστικό στραγγιστήριο)

$$m = \frac{d_s}{d}$$

d_s : η διάμετρος της ζώνης αναμόχλευσης

k_c : οριζόντια διαπερατότητα του αδιατάρακτου εδάφους

k_{c'} : οριζόντια διαπερατότητα του διαταραγμένου εδάφους

L : η μακρύτερη διαδρομή στράγγισης κατά μήκος του χαλικοπασσάλου

$$q_w = k_w A_w = k_w \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad : \text{παροχετευτικότητα στραγγιστηρίου}$$

k_w : αξονική διαπερατότητα στραγγιστηρίου

A_w : διάμετρος στραγγιστηρίου

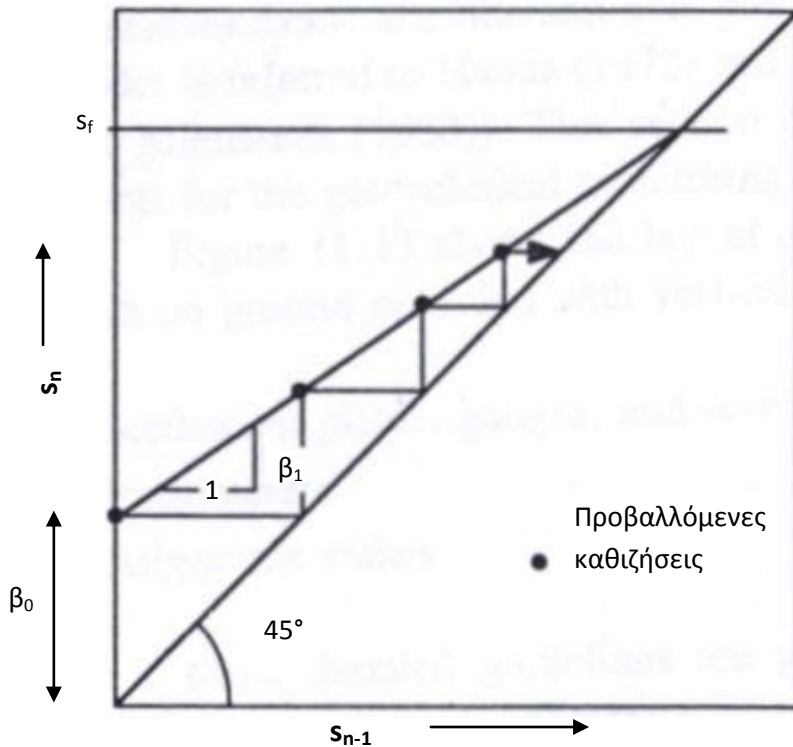
Τα παραπάνω μεγέθη, τα οποία υπεισέρχονται στον υπολογισμό της εξέλιξης της στερεοποίησης για ακτινική στράγγιση με θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης, απεικονίζονται στο σχήμα 2.3.

2.4.5 Παρακολούθηση στερεοποίησης – Μέθοδος Asaoka

Ένα έργο προφόρτισης απαιτεί λεπτομερή έλεγχο για οριστικοποίηση των παραμέτρων που υπεισήλθαν στους υπολογισμούς με σχετική αβεβαιότητα. Ο Asaoka ανέπτυξε το 1978 την ομώνυμη μέθοδο ελέγχου για τον προσδιορισμό του συντελεστή οριζόντιας στερεοποίησης c_h . Με τη μέθοδο αυτή, καθίσταται δυνατή και η πρόβλεψη της τελικής καθίζησης στερεοποίησης ακόμη και όταν οι αρχικές παράμετροι υπολογισμού τους έχουν εκτιμηθεί λανθασμένα.

Η διαδικασία απαιτεί την καταγραφή των καθιζήσεων ανά τακτά σταθερά χρονικά διαστήματα Δt (ή διαφορετικά την εκτίμηση τους μέσω παρεμβολής σε καμπύλη καθίζησης-χρόνου). Στο διάγραμμα που αναπτύχθηκε από τον Asaoka, η τιμή της καθίζησης s_n που καταγράφηκε τη χρονική στιγμή $n \cdot \Delta t$ προβάλλεται στον κατακόρυφο άξονα y , ενώ η καθίζηση s_{n-1} , που καταγράφηκε τη χρονική στιγμή $(n - 1) \cdot \Delta t$ σημειώνεται στον

οριζόντιο άξονα x , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Ακολουθώς, σχεδιάζεται μια γραμμή η οποία διέρχεται από τα σημεία και προεκτείνεται έως ότου τμήσει την ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και έχει κλίση 45° . Η τομή αυτή αναπαριστά την τελική καθίζηση s_f . Με βάση την τιμή αυτή, μπορεί να υπολογιστεί για μια καθίζηση s_t τη χρονική στιγμή t το μέγεθος της στερεοποίησης το οποίο έχει συντελεστεί.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Asaoka για υπολογισμό τελικής καθίζησης στερεοποίησης.

Στην πραγματικότητα, ενδέχεται τα πρώτα σημεία των καταγεγραμμένων καθιζήσεων να αποκλίνουν σημαντικά από την ευθεία που θα χαραχθεί από τις υπόλοιπες καταγραφές. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην επιρροή του χρόνου κατασκευής ενός επιχώματος (η στερεοποίηση ξεκινάει με την επιβολή των πρώτων φορτίων και όχι από το χρονικό σημείο το οποίο εμείς θεωρούμε σαν αρχικό), στις ανομοιογένειες του εδάφους κ.α. Για το λόγο αυτό πολλές φορές, οι πρώτες καταγεγραμμένες τιμές καθιζήσεων δεν λαμβάνονται υπόψη στη χάραξη της ευθείας.

Η μέθοδος του Asaoka βασίζεται στο γεγονός ότι οι καθιζήσεις από μονοδιάστατη στερεοποίηση τις χρονικές στιγμές $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t$, μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά από τη σχέση

$$s_n = \beta_0 + \sum_{i=0}^{i=w} \beta_n s_{n-1} \quad , \quad (2.20)$$

όπου β_0 είναι η τιμή της πρώτης ανάγνωσης της καθίζησης σε μέτρα και β_n είναι ένας αδιάστατος λόγος. Για $w=1$, παίρνουμε μια πρώτη προσέγγιση:

$$s_n = \beta_0 + \beta_1 s_{n-1} \quad , \quad (2.21)$$

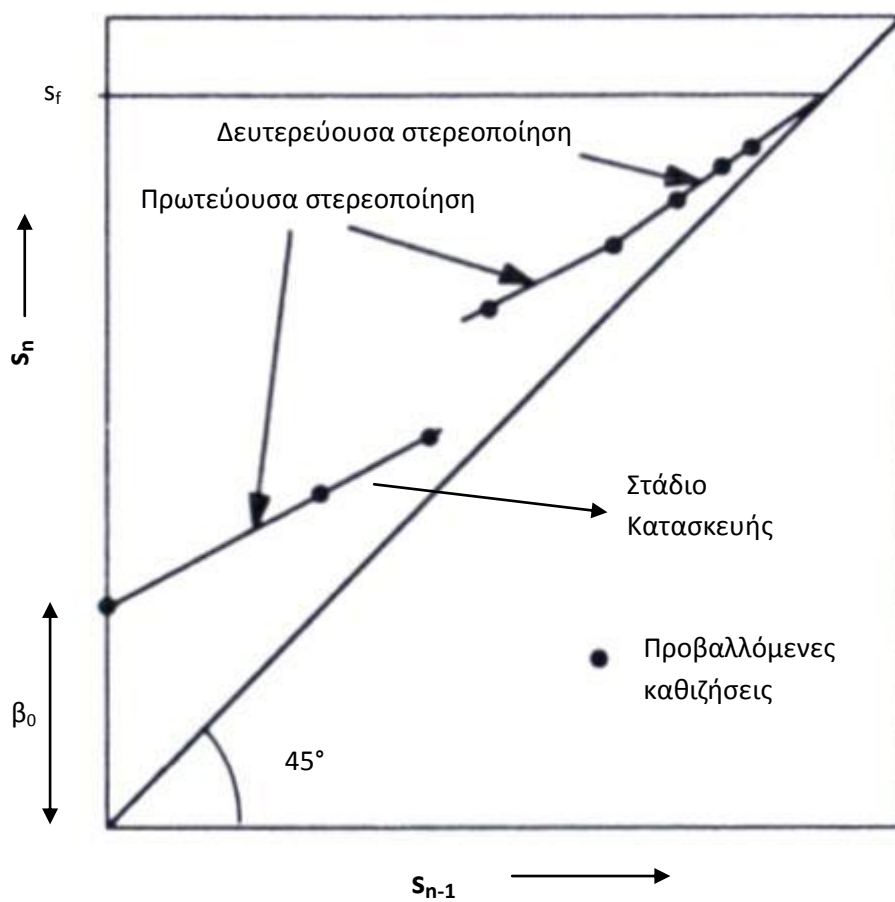
Είναι φανερό ότι η κλίση της ευθείας που σχεδιάζεται στο διάγραμμα του Asaoka είναι β_1 .

Η πραγματική τιμή του συντελεστή οριζόντιας στερεοποίησης c_h μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$-\frac{\ln(\beta_1)}{\Delta t} = \frac{8c_h}{D^2 a} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2} \quad , \quad (2.22)$$

όπου D , a , H όπως ορίζονται από την εξίσωση (2.18). Ο συντελεστής κατακόρυφης στερεοποίησης μπορεί να εκτιμηθεί με εργαστηριακή δοκιμή. Ωστόσο, ο όρος που περιλαμβάνει τον συντελεστή c_v είναι μικρός συγκριτικά με τον όρο που περιλαμβάνει τον χρόνο. Οπότε ακόμη και η μη ακριβής εκτίμηση του συντελεστή c_v , μικρή επιρροή έχει στην τελική εκτίμηση του συντελεστή c_h .

Τέλος, στο σχήμα 2.5, παρουσιάζονται ορισμένες ιδιαιτερότητες του διαγράμματος του Asaoka. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το στάδιο της κατασκευής έχει σαν αποτέλεσμα μία σειρά από σχεδόν παράλληλες ευθείες. Επιπλέον, όταν το φορτίο ενός επιχώματος είναι σταθερό, το τέλος της στερεοποίησης σηματοδοτείται από το σημείο στο οποίο οι ευθείες που ενώνουν τις καθιζήσεις παύουν να έχουν διαφορετικές κλίσεις. Η σταθερή κλίση ύστερα από αυτό το σημείο αναπαριστά τη δευτερεύουσα στερεοποίηση. Συνεπώς, η τομή των ευθειών με τη διχοτόμο του διαγράμματος θα περιλαμβάνει και τις καθιζήσεις από δευτερεύουσα στερεοποίηση. Η αλλαγή αυτή στις κλίσεις των ευθειών που ενώνουν τις επιμέρους αναγνώσεις των καθιζήσεων οφείλεται στη μείωση του συντελεστή οριζόντιας διαπερατότητας c_h με την αύξηση της ενεργού τάσης στο φορτιζόμενο έδαφος.



Σχήμα 2.5: Ενδεικτική μορφή διαγράμματος Asaoka.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης με χρήση αναλυτικών μεθόδων

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για τη μελέτη της συνδυασμένης οριζόντιας και κατακόρυφης στράγγισης, χρησιμοποιούνται στοιχεία από το πραγματικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στο 5^ο κεφάλαιο. Δεδομένου, λοιπόν, ότι η μαλακή στρώση εδάφους που μελετάται παρακάτω έχει μέγιστο βάθος 12 μέτρων, για τη διερεύνηση της στράγγισης, θεωρείται στρώση ομοιογενούς αργιλικού εδάφους σταθερού βάθους 12 μέτρων. Η στρώση αυτή εδράζεται σε ασυμπύεστο και αδιαπέρατο έδαφος και συνεπώς η στράγγιση γίνεται μόνο προς την επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον, σε όλους τους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη ότι το δίκτυο των στραγγιστηρίων αποτελείται από χαλικοπασσάλους διαμέτρου 80 εκατοστών, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε τετραγωνικό κάναβο με την μεταξύ τους αξονική απόσταση να είναι $s=2.75$ μέτρα, σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης του έργου. Με δεδομένη την απόσταση αυτή, η διάμετρος επιρροής των χαλικοπασσάλων υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 2.17a. $D = 1.13s = 1.13 \cdot 2.75 = 3.108$ μέτρα. Τέλος, θεωρείται σταθερή η διαπερατότητα του χαλικοπασσάλου και ίση με 1 cm/s . Η τιμή αυτή εκλέχθηκε αφού πρώτα διαπιστώθηκε ότι η μεταβολή της, ακόμη και κατά 2 τάξεις μεγέθους δεν μπορεί να επηρεάσει, στο εν λόγω πρόβλημα, την εξέλιξη της στερεοποίησης.

Συγκεκριμένα, διερευνάται η επιρροή στην εξέλιξη της στερεοποίησης των ακόλουθων χαρακτηριστικών του προβλήματος:

1. Της διαπερατότητας του εδάφους
2. Του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης του εδάφους
3. Του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη διαπερατότητα του εδάφους
4. Των χαρακτηριστικών της διαταραγμένης ζώνης περιμετρικά του χαλικοπασσάλου και συγκεκριμένα:
 - a) Του μεγέθους της ζώνης αναμόχλευσης
 - b) Του βαθμού διαταραχής της οριζόντιας διαπερατότητας στη ζώνη αναμόχλευσης

Επιπροσθέτως, ελέγχεται η ακρίβεια της απλοποιημένης μεθόδου υπολογισμού του χρόνου στερεοποίησης (Bowles, 1997) σε σχέση με την αναλυτική μεθοδολογία που βασίζεται

στους Hansbo, Rendulic και Carillo. Τέλος, αν και έχει γίνει η υπόθεση του αδιαπέρατου υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού, διερευνάται κατά πόσο η διπλή κατακόρυφη στράγγιση μπορεί να επηρεάζει το πρόβλημα ακτινικής στράγγισης. Η τελευταία αυτή διερεύνηση οφείλεται στην αβεβαιότητα που μπορεί να υπάρχει σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού.

Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρακάτω διερεύνηση καθορίστηκαν από τη βιβλιογραφία. Ειδικότερα

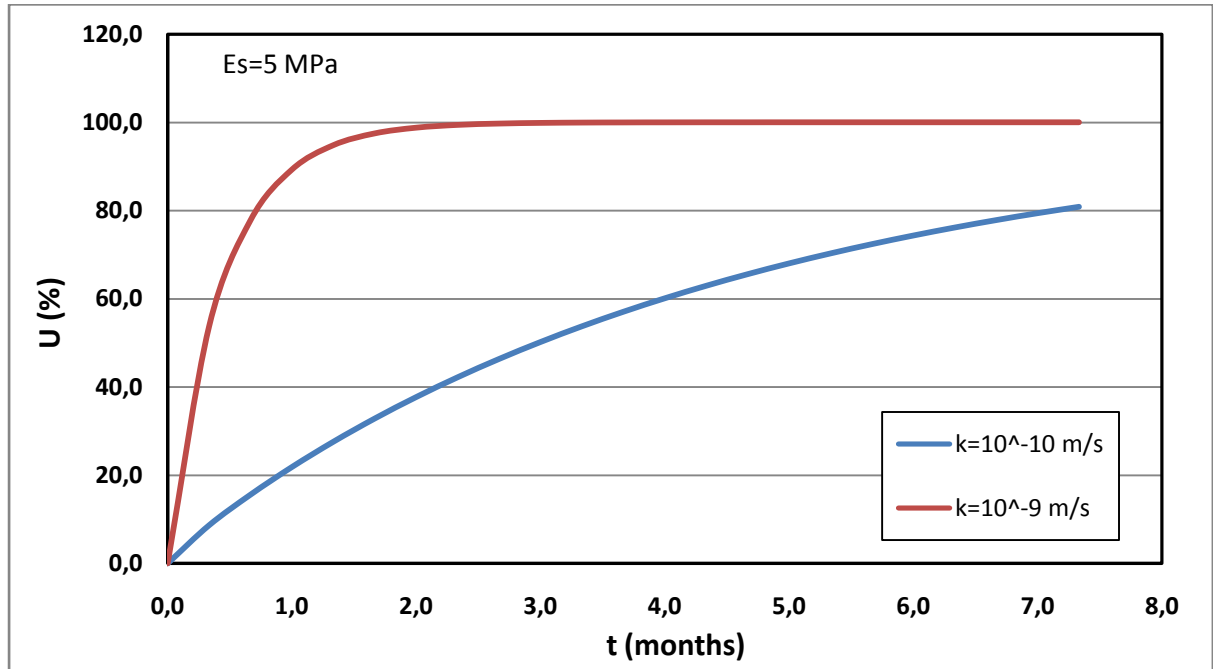
- η διαπερατότητα του εδάφους λήφθηκε μεταξύ 10^{-11} και 10^{-8} m/sec.
- το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης E_s λήφθηκε μεταξύ 1 MPa και 30 MPa. Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί σε μία εξαιρετικά μαλακή άργιλο ενώ η δεύτερη σε μια μέτρια προς μάλλον στιφρή άργιλο.
- ο λόγος οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα λαμβάνεται, εν γένει, $1.0 \div 1.5$ για ομοιογενείς αποθέσεις και $2.0 \div 4.0$ για προσχωσιγενείς αποθέσεις με διακοπτόμενες ενστρώσεις και φακούς μεγαλύτερης διαπερατότητας. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, εάν το στρώμα διακόπτεται από στρώσεις άλλου διαπερατού υλικού, ο λόγος μπορεί να φτάνει μέχρι και το 15.0. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν τιμές του λόγου μεταξύ 1.0 και 4.0.
- η διάμετρος της διαταραγμένης ζώνης προς τη διάμετρο του στραγγιστηρίου κυμαίνεται γενικά μεταξύ $1.5 \div 3.0$. Εξαιτίας όμως της μεγάλης διαμέτρου των χαλικοπασσάλων σε σύγκριση με την μεταξύ τους αξονική απόσταση, θεωρήθηκε ότι η τιμή του λόγου αυτού δεν μπορεί να ξεπερνάει το 2.0 και ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τιμές 1.5 και 2.0.
- ο λόγος της οριζόντιας διαπερατότητας προς την οριζόντια διαπερατότητα εντός της ζώνης αναμόχλευσης παρουσιάζει τις περισσότερες αβεβαιότητες. Γενικά, η οριζόντια διαπερατότητα στη διαταραγμένη ζώνη συνηθίζεται να λαμβάνεται ίση με την κατακόρυφη διαπερατότητα του αδιατάρακτου εδάφους. Ο λόγος αυτός ακολουθεί, δηλαδή, το λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα που περιγράφηκε παραπάνω. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν διαπιστωθεί τιμές του λόγου αυτού αρκετά μεγαλύτερες από 4. Ωστόσο, η εργασία αυτή θα εστιάσει στις συνηθέστερες, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τιμές του, δηλαδή μεταξύ 2.0 και 3.0.

3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ

3.2.1 Διερεύνηση της Επιρροής της Διαπερατότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Για τη διερεύνηση της επιρροής του μεγέθους της διαπερατότητας μορφώθηκαν δύο διαγράμματα, ένα για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5$ MPa και ένα για $E_s=20$ MPa, στα οποία παρουσιάζεται η εξέλιξη της στράγγισης για το ίδιο πρόβλημα με διαπερατότητες, οι οποίες εκφρασμένες σε m/s διαφέρουν κατά μία τάξη μεγέθους. Δεδομένου ότι η διαπερατότητα των αργίλων, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Καββαδάς, 2011), κυμαίνεται γενικά μεταξύ 10^{-11} και 10^{-8} m/s, επιλέχθηκαν δύο ενδιαμέσες τιμές της διαπερατότητας αυτής, ήτοι οι τιμές 10^{-10} και 10^{-9} m/s. Για τη μόρφωση των διαγραμμάτων, έγιναν οι εξής υποθέσεις για τις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος: $\frac{k_h}{k_v} = 2$,

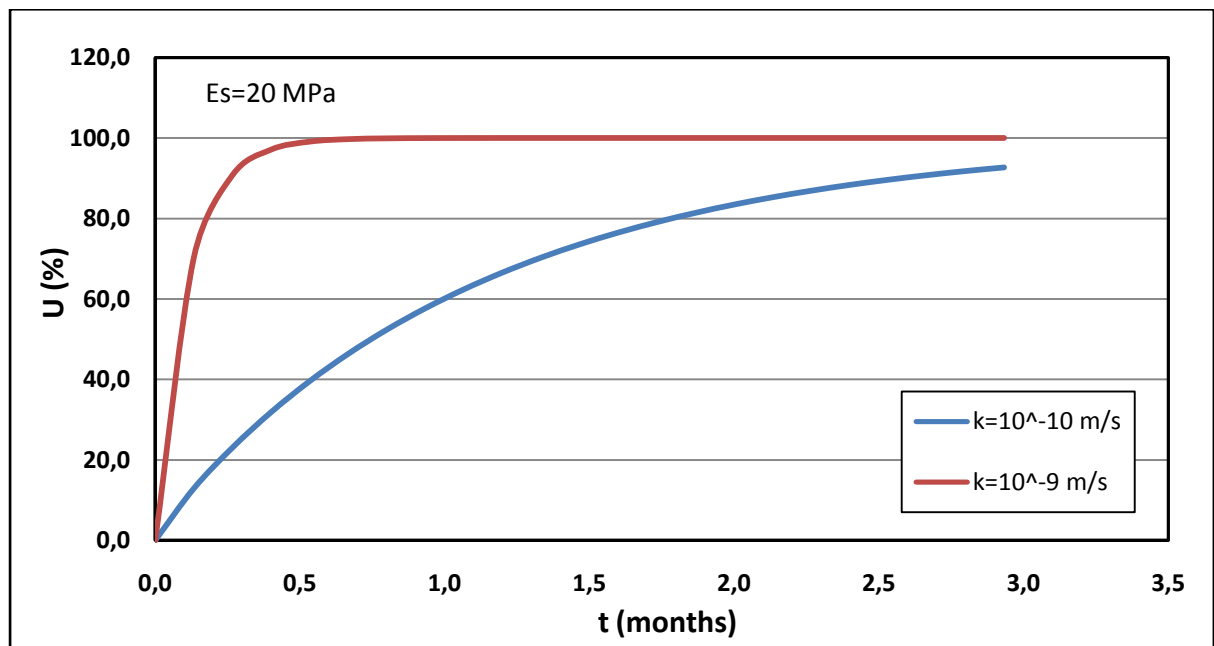
$$m=1.5, \frac{k_h}{k_{h-s}} = 2.$$



Διάγραμμα 3.1: Βαθμός στερεοποίησης προς χρόνο για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5$ MPa και για διαπερατότητες $k=10^{-10}$ m/sec και $k=10^{-9}$ m/sec.

Στο πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε ότι για $k=10^{-9}$ m/s, το 90% της στερεοποίησης επιτυγχάνεται σε χρόνο 31 ημερών, ενώ για $k=10^{-10}$ m/s, ο αντίστοιχος χρόνος είναι 310 ημέρες. Συνεπώς, η υιοθέτηση μιας εσφαλμένης -κατά μία τάξη μεγέθους- τιμής κατακόρυφης διαπερατότητας του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό του χρόνου στερεοποίησης ο οποίος αποκλίνει 900% από τον πραγματικό.

Με το επόμενο διάγραμμα, επιχειρείται να διαλευκανθεί κατά πόσο η απόκλιση λόγω των διαπερατοτήτων εξαρτάται και από το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης.



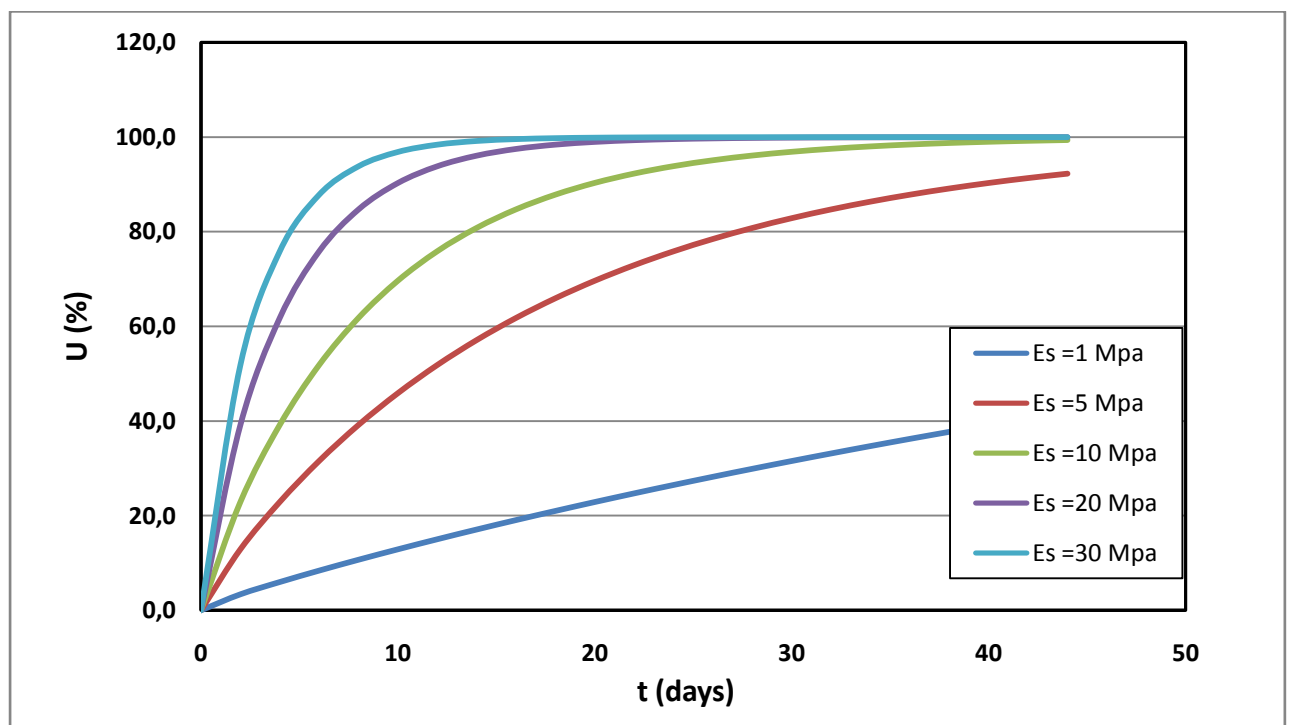
Διάγραμμα 3.2: Βαθμός στερεοποίησης προς χρόνο για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=20$ MPa και για διαπερατότητες $k=10^{-10}$ m/sec και $k=10^{-9}$ m/sec.

Εδώ, παρατηρούμε ότι για $k=10^{-9}$ m/s, το 90% της στερεοποίησης επιτυγχάνεται σε χρόνο 7,8 ημερών, ενώ για $k=10^{-10}$ m/s, ο αντίστοιχος χρόνος είναι 78 ημέρες. Η απόκλιση δηλαδή στον χρόνο επίτευξης της στερεοποίησης ($t_{90\%}$) είναι και πάλι 900%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα καθώς η διαπερατότητα του εδάφους, στις αναλυτικές λύσεις, λαμβάνεται υπόψη μόνο στον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας. Αυτό διαπιστώνεται και αν αδιαστατοποιηθεί η παράμετρος του χρόνου, δηλαδή αν μορφωθούν οι λύσεις σε διάγραμμα $U-T_v$ ή $U-T_r$. Σε αυτή την περίπτωση η επιρροή της διαπερατότητας «εξουδετερώνεται» και οι καμπύλες που λαμβάνονται για διαφορετικές τιμές της διαπερατότητας είναι ταυτόσημες.

3.2.2 Διερεύνηση της Επιρροής του Μέτρου Μονοδιάστατης Συμπίεσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στην ενότητα αυτή, διερευνάται η επιρροή του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης στην εξέλιξη της στερεοποίησης του εδάφους για το δεδομένο πρόβλημα. Οι τιμές του μέτρου E_s που χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ 1 και 30 MPa. Για τον υπολογισμό των καμπυλών που μορφώθηκαν, οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος θεωρήθηκαν σταθερές: $k_v=10^{-9}$ m/sec, $\frac{k_h}{k_v} = 2$, $m=2.0$, $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$.



Διάγραμμα 3.3: Βαθμός στερεοποίησης προς χρόνο για διαφορετικά μέτρα μονοδιάστατης συμπίεσης E_s .

Δεδομένου ότι ο συντελεστής στερεοποίησης c_v είναι ανάλογος με το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης E_s , είναι προφανές ότι η μείωση του μέτρου E_s συνεπάγεται αντίστοιχη μείωση του συντελεστή στερεοποίησης και συνακόλουθα αντίστοιχη καθυστέρηση στην επίτευξη του χρόνου στερεοποίησης. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα παρακάτω αποτελέσματα:

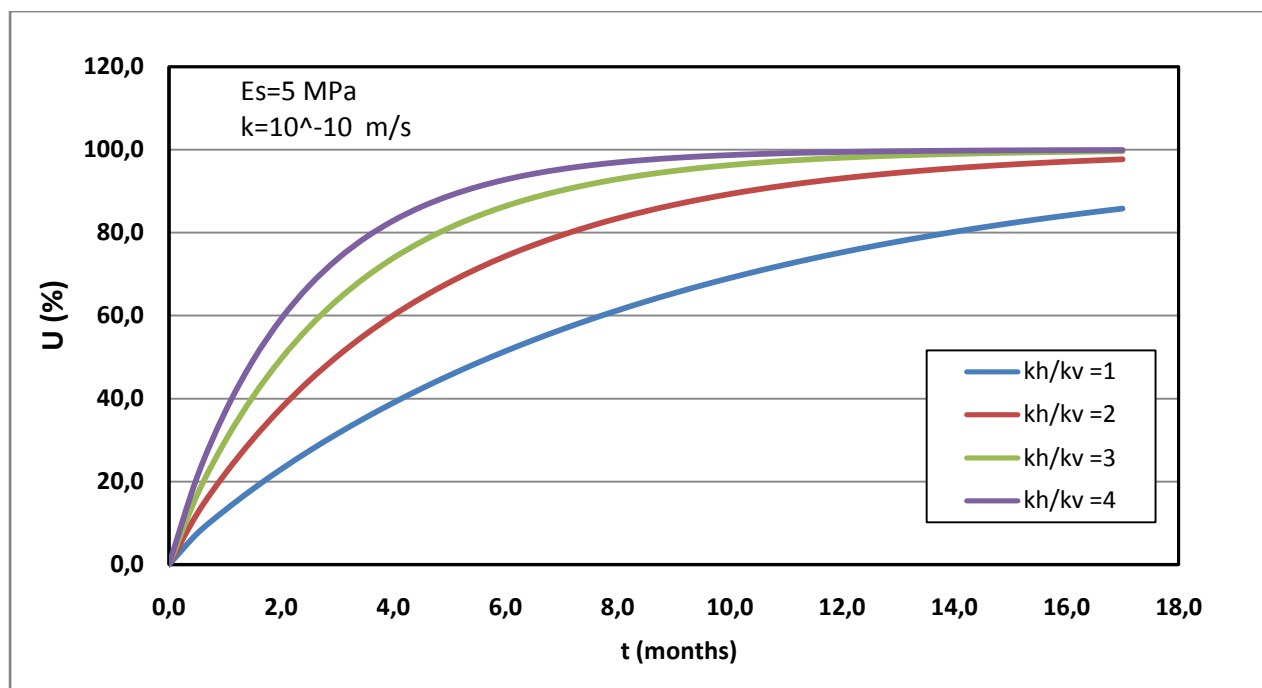
Πίνακας 3.1: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει μέτρου ελαστικότητας.

E_s (MPa)	Χρόνος $t_{90\%}$ (days)	$t_{90\%}$ μαλακού εδάφους
		$t_{90\%}$
1	197	1.0
5	39.5	5.0
10	19.7	10.0
20	9.8	20.1
30	6.6	29.8

Οι λόγοι των χρόνων στερεοποίησης ακολουθούν τους λόγους των μέτρων μονοδιάστατης συμπίεσης με τις αμελητέες αποκλίσεις να οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις κατά τους υπολογισμούς. Όπως και στην περίπτωση της διαπερατότητας, εάν μορφωθούν τα διαγράμματα $U-T_v$ ή $U-T_r$, οι καμπύλες που λαμβάνονται για διαφορετικές τιμές του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης είναι πάλι ταυτόσημες.

3.2.3 Διερεύνηση της Επιρροής του Λόγου Διαπερατοτήτων στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στα παρακάτω διαγράμματα, παρουσιάζεται η επιρροή του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης διαπερατότητας του εδάφους στην εξέλιξη της στερεοποίησης. Προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσον η επιρροή του λόγου αυτού επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους, μορφώνονται τρία διαγράμματα. Το πρώτο υπολογίζεται για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5$ MPa και διαπερατότητα $k_v=10^{-10}$ m/sec. Το δεύτερο υπολογίζεται για ίδια διαπερατότητα και μέτρο $E_s=20$ MPa ενώ το τρίτο για ίδιο μέτρο μονοδιάστατης παραμορφωσιμότητας με το πρώτο ($E_s=5$ MPa) αλλά για διαφορετική διαπερατότητα, ήτοι $k_v=10^{-8}$ m/sec. Σε κάθε διάγραμμα, μορφώνονται οι καμπύλες του βαθμού στερεοποίησης προς τον χρόνο για τους λόγους διαπερατοτήτων από 1 έως 4, οι οποίοι εξαρτώνται από την ομοιογένεια του εξεταζόμενου εδάφους. Για τη μόρφωση των διαγραμμάτων, θεωρήθηκαν σταθερές οι εξής τυπικές παράμετροι: $m=1.5$, $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$.



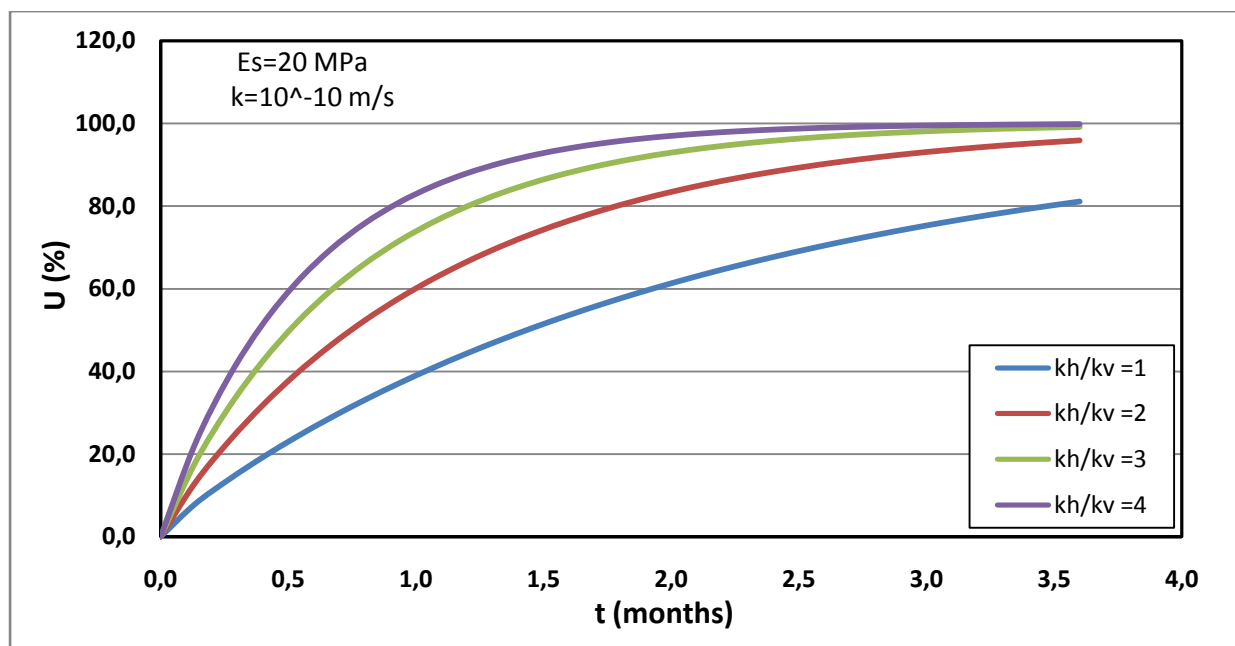
Διάγραμμα 3.4: Βαθμός στερεοποίησης προς χρόνο για $E_s=5$ MPa, $k=10^{-10}$ m/sec και λόγους $k_h/k_v=1$, $k_h/k_v=2$, $k_h/k_v=3$, $k_h/k_v=4$.

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2.2: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα για $E_s=5$ MPa, $k=10^{-10}$ m/sec.

$\frac{k_h}{k_v}$	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από έδαφος με $\frac{k_h}{k_v} = 1$
1	605	-
2	310	-48.8%
3	208	-65.6%
4	157	-74.0%

Με το παρακάτω διάγραμμα επιχειρείται να διαλευκανθεί κατά πόσο η επιρροή από το λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα εξαρτάται από το μέγεθος του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης του εδάφους.



Διάγραμμα 3.5: Βαθμός στερεοποίησης προς χρόνο για $E_s=20$ MPa, $k=10^{-10}$ m/sec και λόγους $k_h/k_v=1$, $k_h/k_v=2$, $k_h/k_v=3$, $k_h/k_v=4$.

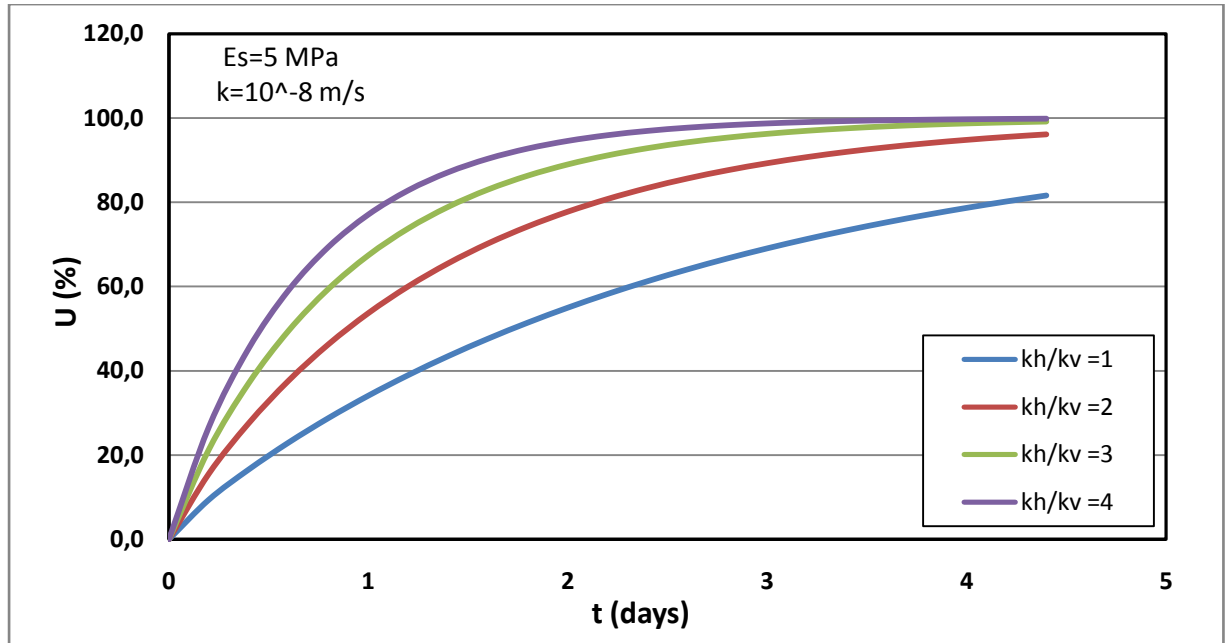
Από το διάγραμμα λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 2.3: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα.

$\frac{k_h}{k_v}$	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από ομοιογενές έδαφος
1	151	-
2	77.5	-48.7%
3	52	-65.6%
4	39.5	-73.8%

Οι αμελητέες αποκλίσεις οφείλονται πιθανόν μόνο σε στρογγυλοποιήσεις και συνεπώς είναι φανερό ότι η επιρροή του λόγου διαπερατοτήτων είναι ανεξάρτητη του μέτρου μονοδιάστατης παραμορφωσιμότητας.

Με το παρακάτω διάγραμμα επιχειρείται να διαλευκανθεί κατά πόσο η επιρροή από το λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα εξαρτάται και από το μέγεθος της διαπερατότητας του εδάφους.



Διάγραμμα 3.6: Βαθμός στερεοποίησης προς χρόνο για $E_s=5 \text{ MPa}$, $k=10^{-8} \text{ m/sec}$ και λόγους $k_h/k_v=1$, $k_h/k_v=2$, $k_h/k_v=3$, $k_h/k_v=4$.

Από το διάγραμμα λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 2.4: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα.

$\frac{k_h}{k_v}$	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από ομοιογενές έδαφος
1	6	-
2	3.1	-48.3%
3	2.1	-65.0%
4	1.6	-73.3%

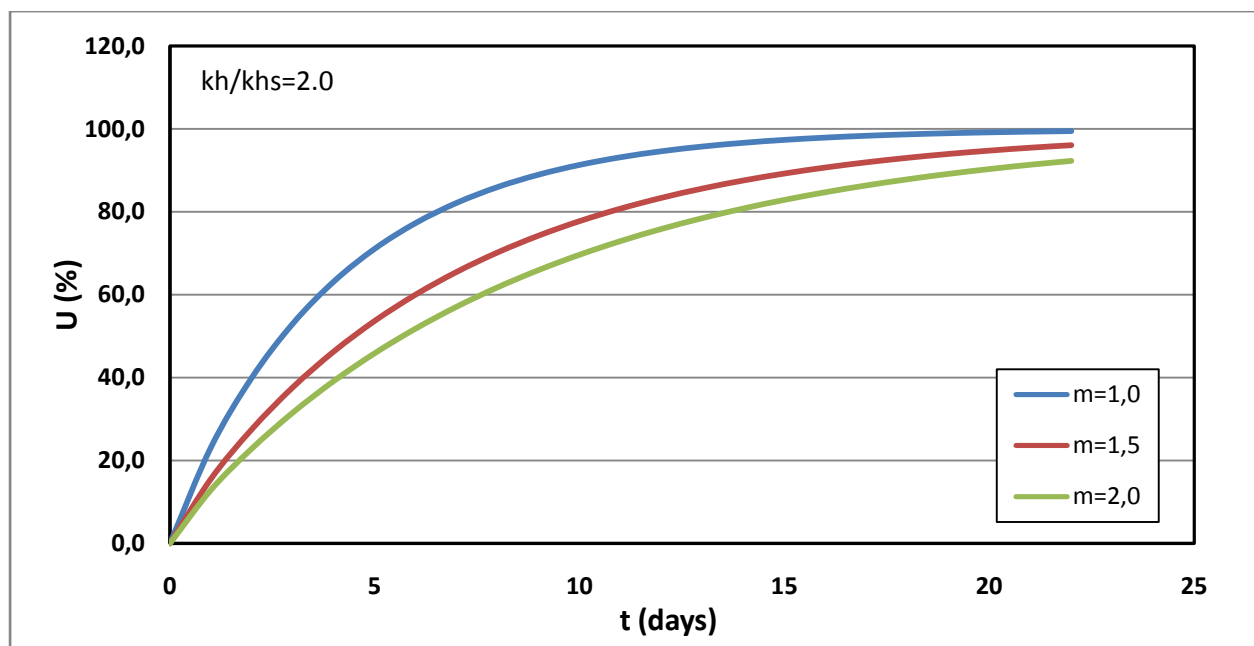
Από τη σύγκριση των αποκλίσεων και πάλι με το πρώτο διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι αυτές είναι και πάλι αμελητέες και οφείλονται στο ότι για μικρό μέτρο E_s και μεγάλη διαπερατότητα, η στερεοποίηση επιταχύνεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να στερούμαστε κάποια ακρίβεια στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Εναλλακτικά, το γεγονός ότι η επιρροή του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης και την απόλυτη κατακόρυφη διαπερατότητα του εδάφους θα μπορούσε να αποδειχθεί με την αδιαστατοποίηση του χρόνου, δηλαδή με τη μόρφωση διαγραμμάτων $U-T_v$ ή $U-T_r$. Σε αυτή την περίπτωση, οι αποκλίσεις που διαπιστώθηκαν θα παρέμεναν σταθερές, ενώ για διαφορετικά μέτρα E_s και διαφορετικές διαπερατότητες k , οι υπολογιζόμενες καμπύλες θα ταυτίζονταν.

Συνολικά, από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει και το εξής συμπέρασμα: για το δεδομένο πρόβλημα που έχουμε θεωρήσει, με τον πυκνό κάρναβο χαλικοπασσάλων στον οποίο η στράγγιση γίνεται σχεδόν αποκλειστικά ακτινικά, ο χρόνος στερεοποίησης $t_{90\%}$ ακολουθεί τον λόγο των διαπερατοτήτων. Δηλαδή, για $\frac{k_h}{k_v} = 2$, ο χρόνος στερεοποίησης είναι σχεδόν υποδιπλάσιος σε σχέση με το απόλυτα ισότροπο έδαφος. Αντίστοιχα, για λόγο $\frac{k_h}{k_v} = 3$, ο χρόνος στερεοποίησης είναι σχεδόν υποτριπλάσιος σε σχέση με το απόλυτα ισότροπο έδαφος, και ούτω κάθε εξής. Αυτό αποδεικνύει και το ότι η ακτινική στράγγιση είναι εξαιρετικά καθοριστική για την εξέλιξη του φαινομένου.

3.2.4 Διερεύνηση της Επιρροής του μεγέθους της Ζώνης Αναμόχλευσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται η επιρροή του συντελεστή μεγέθους m , δηλαδή του λόγου της διαμέτρου της θεωρούμενης ως ζώνης αναμόχλευσης (**smear zone**) προς τη διάμετρο του χαλικοπασσάλου, στην εξέλιξη της στερεοποίησης. Μορφώνονται οι καμπύλες τόσο για μη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης, όσο και για συντελεστές $m=1.5$ και $m=2.0$, όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.1. Παρατίθενται τρία διαγράμματα, για διαφορετικές τιμές του λόγου οριζόντιας διαπερατότητας προς οριζόντια διαπερατότητα εντός της ζώνης αναμόχλευσης, προκειμένου να εξεταστεί πως ο λόγος αυτός επηρεάζει τις αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών τιμών του συντελεστή m στην εξέλιξη της στερεοποίησης. Τα διαγράμματα είναι μορφωμένα για τιμές του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}}=2, 2.5, 3$. Κατά τη διερεύνηση αυτή διατηρούνται σταθερές οι παράμετροι $k_v=10^{-9}$ m/sec, $\frac{k_h}{k_v} = 2$, $E_s = 10$ MPa, που είναι τυπικές του εξεταζόμενου εδάφους σύμφωνα με την παράγραφο 3.1.



Διάγραμμα 3.7: Χρόνος στερεοποίησης προς χρόνο για μέγεθος ζώνης αναμόχλευσης $m=1.0$, $m=1.5$, $m=2.0$ και για βαθμό διαταραχής της διαπερατότητας $k_h/k_{hs}=2.0$.

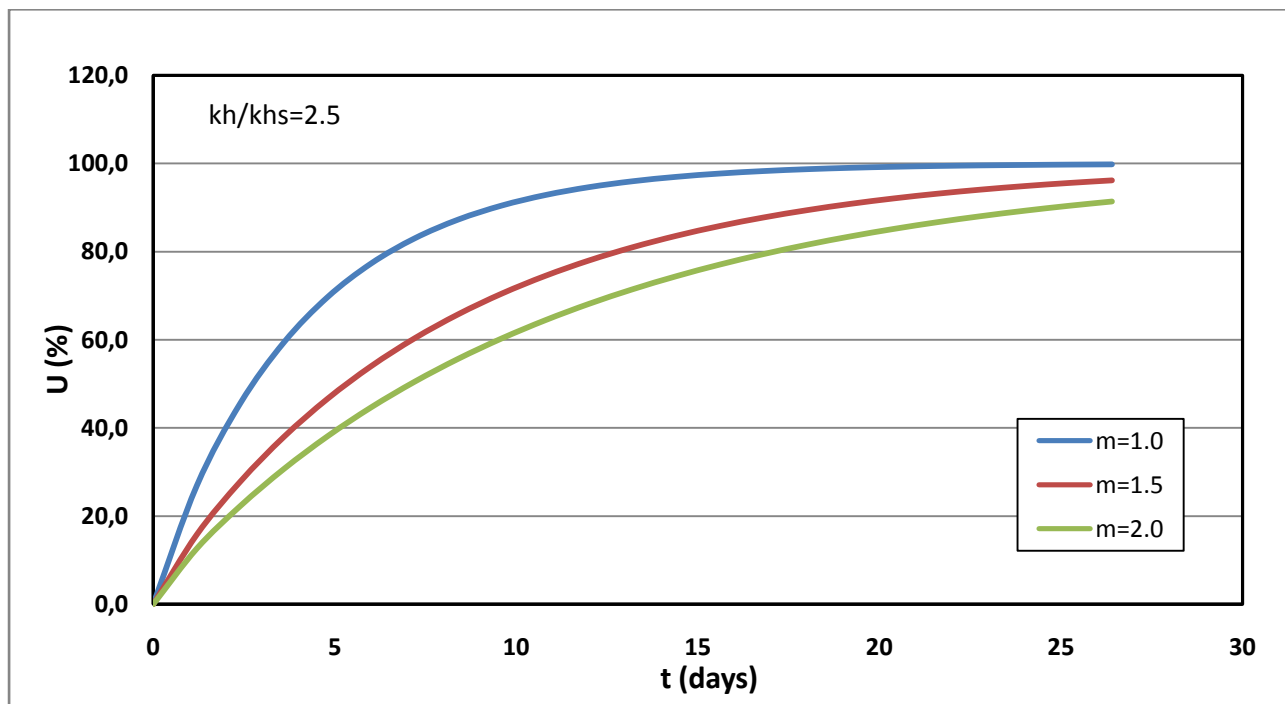
Από το διάγραμμα λαμβάνονται τα εξής:

Πίνακας 2.5: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει μεγέθους ζώνης αναμόχλευσης για λόγο $k_h/k_{hs}=2.0$.

Συντελεστής μεγέθους m	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από έδαφος χωρίς ζώνη αναμόχλευσης
1.0	9.4	-
1.5	15.5	+65 %
2.0	19.7	+110 %

Η επιρροή της ζώνης αναμόχλευσης είναι προφανώς σημαντική αφού η μη θεώρηση της μπορεί να υποεκτιμήσει τον χρόνο στερεοποίησης ακόμη και στο μισό για το δεδομένο πρόβλημα. Με τα επόμενα διαγράμματα γίνεται φανερό πως οι αποκλίσεις αυτές διαφοροποιούνται για διαφορετικό λόγο $\frac{k_h}{k_{h-s}}$.

Για λόγο $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2.5$, μορφώνεται το παρακάτω διάγραμμα:



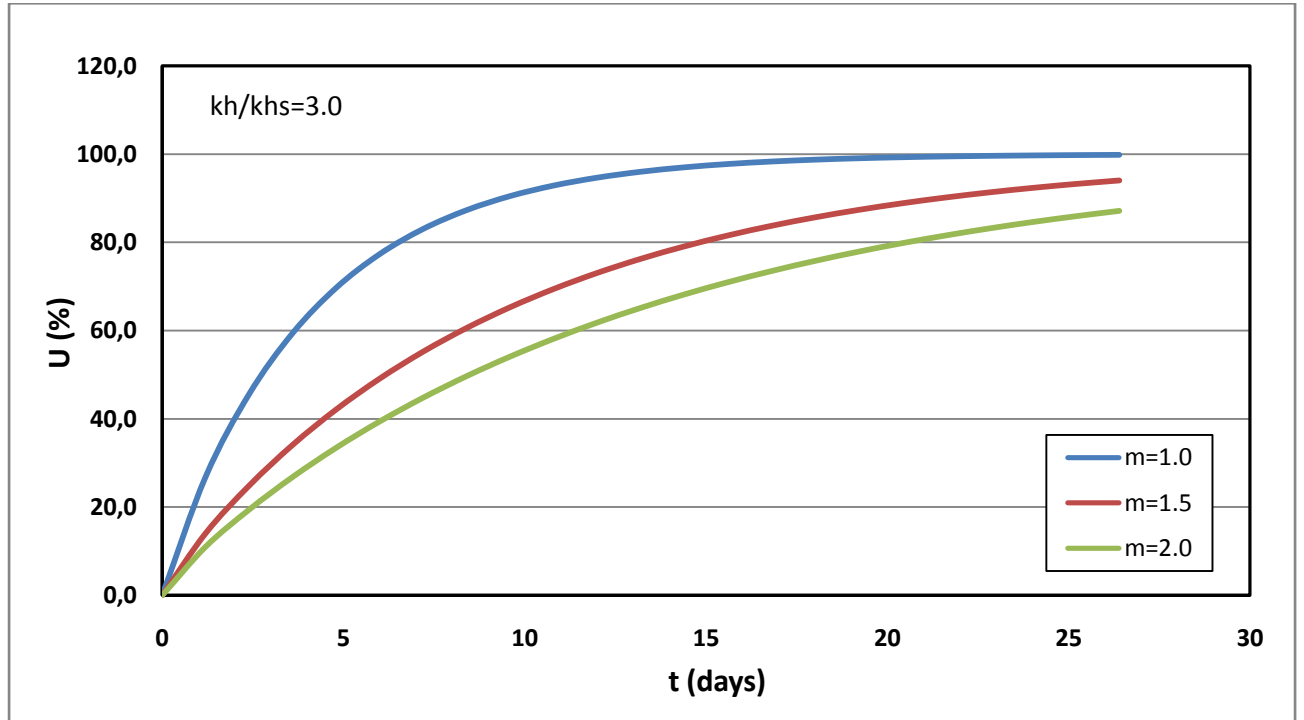
Διάγραμμα 3.8: Χρόνος στερεοποίησης προς χρόνο για μέγεθος ζώνης αναμόχλευσης $m=1.0$, $m=1.5$, $m=2.0$ και για βαθμό διαταραχής της διαπερατότητας $k_h/k_{hs}=2.5$.

Από το διάγραμμα λαμβάνονται τα εξής:

Πίνακας 2.6: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει μεγέθους ζώνης αναμόχλευσης για λόγο $k_h/k_{hs}=2.5$.

Συντελεστής μεγέθους m	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από έδαφος χωρίς ζώνη αναμόχλευσης
1.0	9.4	-
1.5	18.5	+97 %
2.0	24.8	+164 %

Για λόγο $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 3.0$, μορφώνεται το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 3.9: Χρόνος στερεοποίησης προς χρόνο για μέγεθος ζώνης αναμόχλευσης $m=1.0$, $m=1.5$, $m=2.0$ και για βαθμό διαταραχής της διαπερατότητας $k_h/k_{hs}=3.0$.

Από το διάγραμμα λαμβάνονται τα εξής:

Πίνακας 2.7: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει μεγέθους ζώνης αναμόχλευσης για λόγο $k_h/k_{hs}=3.0$.

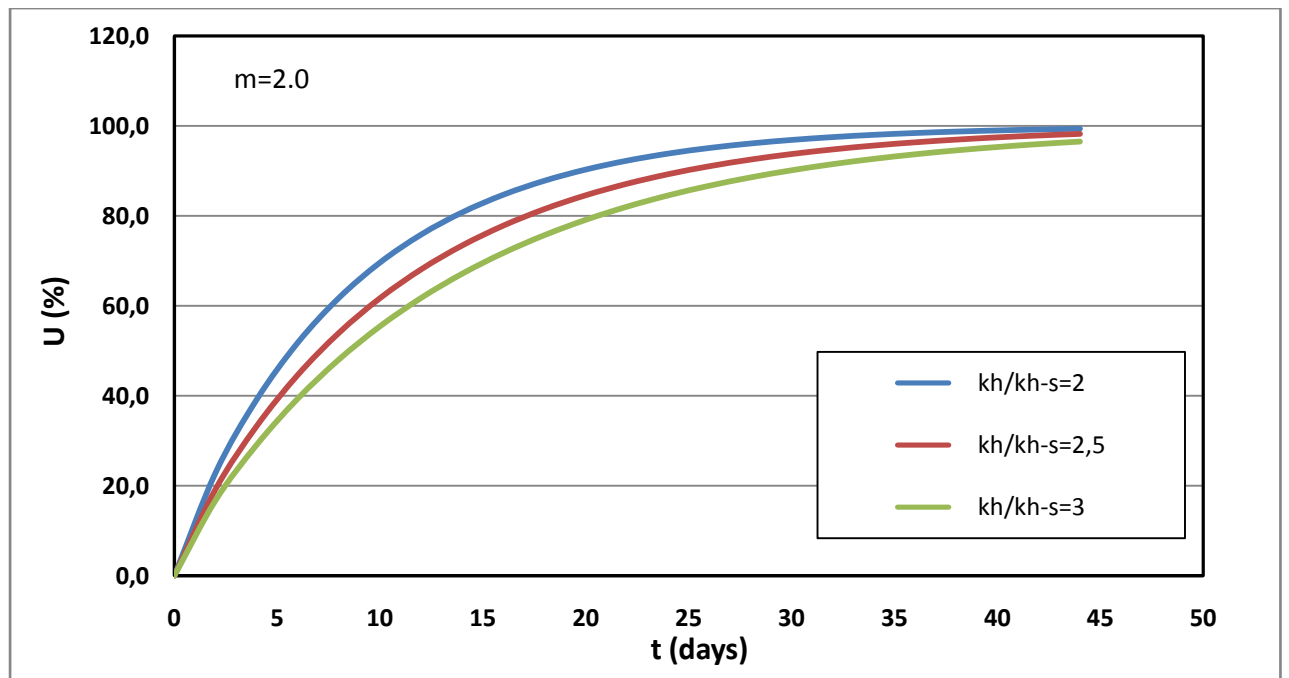
Συντελεστής μεγέθους m	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από έδαφος χωρίς ζώνη αναμόχλευσης
1.0	9.4	-
1.5	21.5	+129 %
2.0	29.8	+217 %

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πέρα από τη σημαντική επιρροή του μεγέθους της ζώνης αναμόχλευσης στην εξέλιξη της στερεοποίησης, αξιοσημείωτες φαίνονται και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφορετικών τιμών του λόγου οριζόντιας προς οριζόντιας εντός της ζώνης αναμόχλευσης διαπερατότητας. Ειδικότερα, συμπεραίνεται ότι όσο μικρότερος θεωρείται ο λόγος $\frac{k_h}{k_{h-s}}$, δηλαδή όσο μικρότερη θεωρείται και η διαταραχή που προκαλείται στο έδαφος κατά την κατασκευή των χαλικοπασσάλων, τότε το μέγεθος της ζώνης αναμόχλευσης δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο όσο η ίδια η θεώρηση της. Με την αύξηση όμως του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}}$ οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ διαφορετικών τιμών του συντελεστή m γίνονται όλο και μεγαλύτερες. Αυτό είναι λογικό καθώς, όσο

σημαντικότερη είναι η μεταβολή της διαπερατότητας του εδάφους περιμετρικά του χαλικοπασσάλου εξαιτίας της διαταραχής αυτού, τόσο πιο πολύ επηρεάζεται η εξέλιξη της στερεοποίησης από το μέγεθος της ζώνης που έχει διαταραχθεί.

3.2.5 Διερεύνηση της Επιρροής του Βαθμού Διαταραχής του Μεγέθους της Οριζόντιας Διαπερατότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι αποκλίσεις που διαπιστώθηκαν στα προηγούμενα διαγράμματα εξαιτίας της επιρροής του λόγου οριζόντιας προς οριζόντια εντός της ζώνης αναμόχλευσης διαπερατότητας. Συγκεκριμένα, σχεδιάζονται σε ένα διάγραμμα τρεις καμπύλες, μία για κάθε τιμή του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2, 2.5, 3$. Οι καμπύλες υπολογίζονται θεωρώντας διάμετρο ζώνης αναμόχλευσης διπλάσια της διαμέτρου του χαλικοπασσάλου, ή διαφορετικά $m=2.0$. Ο συντελεστής μεγέθους $m=2.0$ είναι ο μέγιστος που έχει ορισθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα και επιλέγεται για το διάγραμμα αυτό ώστε να μεγιστοποιηθεί και η επιρροή του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}}$. Τα υπόλοιπα μεγέθη που υπεισήλθαν στους υπολογισμούς είναι: $E_s = 10 \text{ MPa}$, $k_v = 10^{-9} \text{ m/sec}$, $\frac{k_h}{k_v} = 2$.



Διάγραμμα 3.10: Χρόνος στερεοποίησης προς χρόνο βαθμό διαταραχής εντός της ζώνης αναμόχλευσης $k_h/k_{h-s}=2.0$, $k_h/k_{h-s}=2.5$, $k_h/k_{h-s}=3.0$ και για συντελεστή μεγέθους $m=2.0$.

Η επιρροή του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}}$ συνοψίζεται ως εξής:

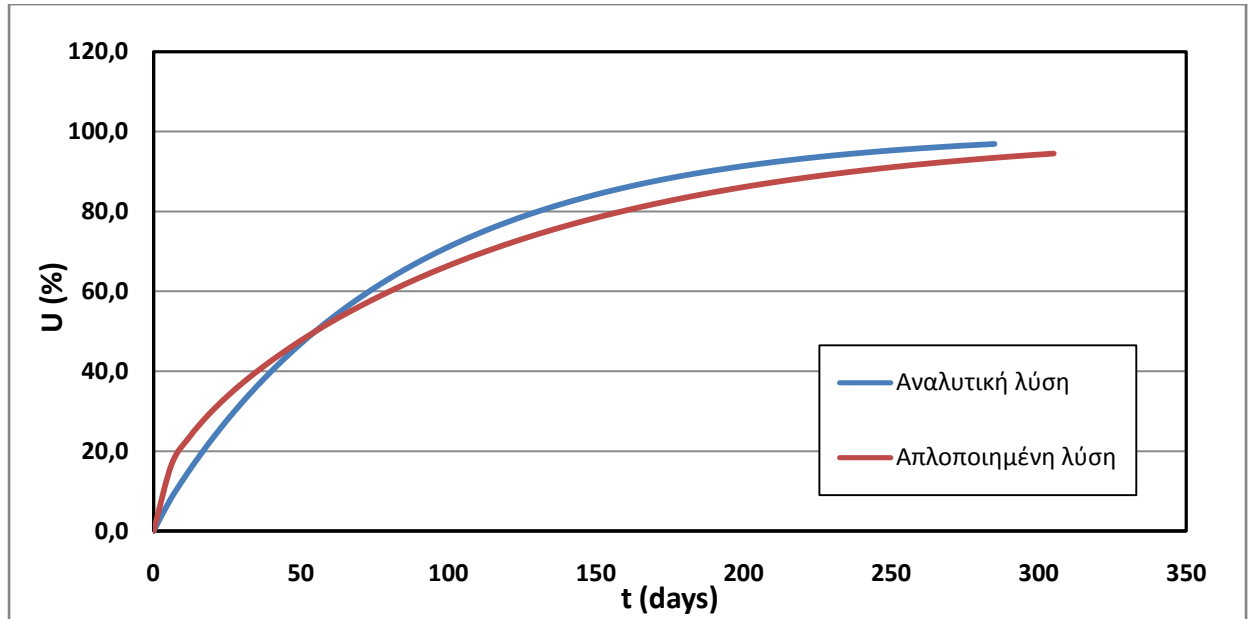
Πίνακας 2.8: Χρόνος στερεοποίησης συναρτήσει του λόγου οριζόντιας προς οριζόντια εντός της ζώνης αναμόχλευσης διαπερατότητας.

$\frac{k_h}{k_{h-s}}$	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Απόκλιση από $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$
2.0	19.7	-
2.5	24.8	+26 %
3.0	29.8	+51 %

Από τον πίνακα αυτό προκύπτει ότι ακόμη και για μεγάλο, σχετικά με το πρόβλημα, μέγεθος ζώνης αναμόχλευσης, η επιρροή του λόγου που αναπαριστά το βαθμό διαταραχής της ζώνης αυτής είναι μεν σημαντική, αλλά σε μικρότερο βαθμό από κάθε άλλο μέγεθος που έχει εξεταστεί.

3.2.6 Σύγκριση Αναλυτικής Μεθοδολογίας και Απλοποιημένης Μεθόδου Υπολογισμού Οριζόντιας Στράγγισης

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνεται, ως λύση της οριζόντιας στράγγισης, η αντιστοίχιση των παραμέτρων της κατακόρυφης στράγγισης με αυτές της οριζόντιας και η λύση του προβλήματος σαν να επρόκειτο για κατακόρυφη στράγγιση. Για το λόγο αυτό σχεδιάζονται σε ένα διάγραμμα οι καμπύλες βαθμού στερεοποίησης προς χρόνο που προκύπτουν για το κοινό πρόβλημα οριζόντιας στράγγισης που εξετάζεται. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι λύση του προβλήματος για τα εξής δεδομένα: $E_s = 5 \text{ MPa}$, $k_v = 10^{-10} \text{ m/sec}$, $m=1.0$.



Διάγραμμα 3.11: Σύγκριση αναλυτικής μεθοδολογίας και απλοποιημένης μεθόδου ως προς την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης.

Οι διαφορές στον απαιτούμενο χρόνο στερεοποίησης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

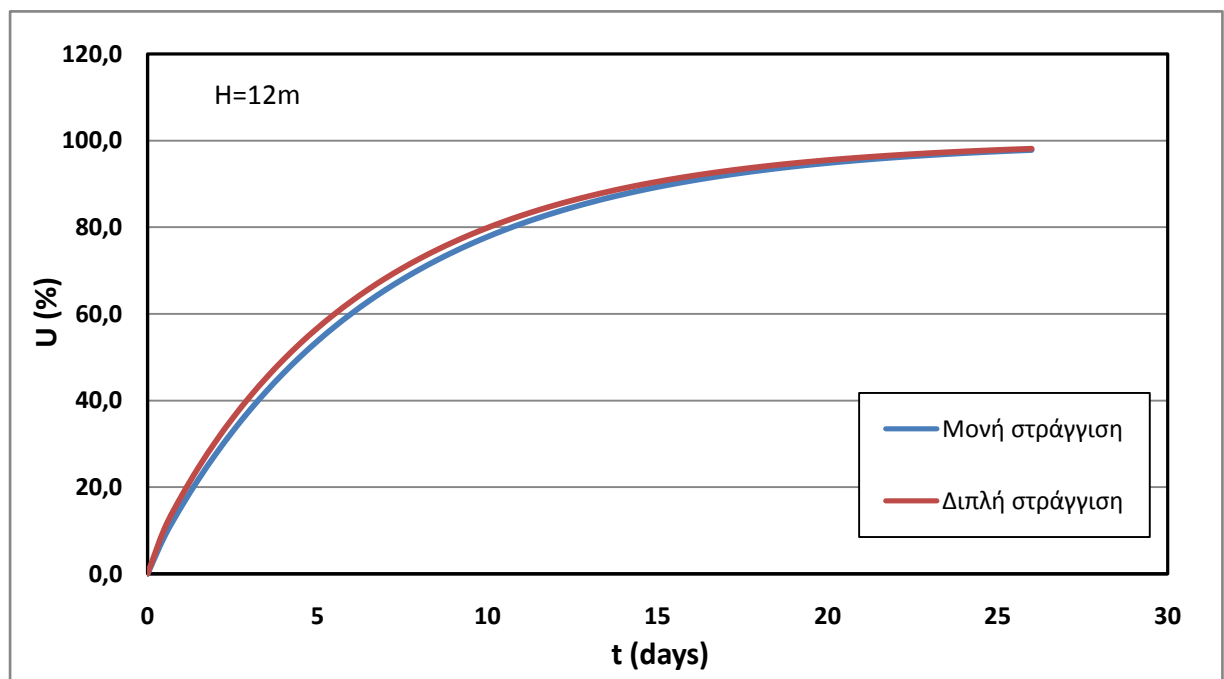
Πίνακας 2.9: Χρόνοι στερεοποίησης για αναλυτική και απλοποιημένη λύση.

	Χρόνος $t_{50\%}$ (ημέρες)	Χρόνος $t_{90\%}$ (ημέρες)	Σχετική απόκλιση χρόνου $t_{90\%}$
Αναλυτική λύση	55	188	-
Απλοποιημένη λύση	55	237	+26 %

Παρατηρώντας το διάγραμμα που προκύπτει από τη μέθοδο του Bowles για την οριζόντια στράγγιση συμπεραίνουμε ότι η λύση του υπερεκτιμά τον απαιτούμενο χρόνο στράγγισης, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη της καθόλου την κατακόρυφη στράγγιση. Εξάλλου, η λύση αυτή δεν μπορεί να συνεκτιμήσει τα χαρακτηριστικά της ζώνης αναμόχλευσης. Σε περίπτωση που θεωρείται αναγκαία η θεώρηση της, είναι αναγκαία η υιοθέτηση μειωμένης τιμής διαπερατότητας. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, και χωρίς τη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης, η απόκλιση μεταξύ των δύο χρόνων είναι της τάξης του 25%. Αυτό σημαίνει ότι λόγω της ευκολίας υπολογισμού της λύσης αυτής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αρχική συντηρητική εκτίμηση χρόνων στράγγισης. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η απλοποιημένη λύση, αν και συντηρητικότερη, εκτυλίσσεται ταχύτερα στην αρχή της στερεοποίησης. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, οι δύο καμπύλες τέμνονται για βαθμό στερεοποίησης $U=50\%$ και έκτοτε η λύση της αναλυτικής μεθοδολογίας εκτυλίσσεται με ταχύτερο ρυθμό.

3.2.7 Διερεύνηση Επιρροής Διαπερατότητας Υποκείμενου Εδάφους

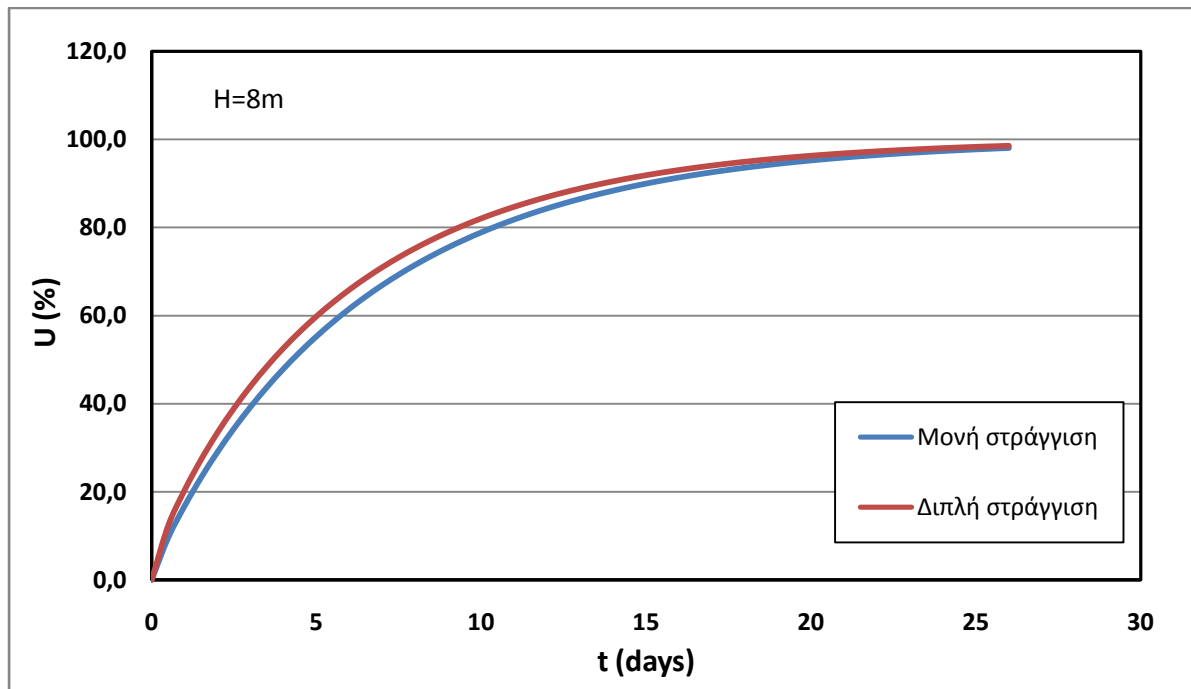
Για συνθήκες αποκλειστικά κατακόρυφης στράγγισης, όπως προκύπτει από τη σχέση 2.10 $T_v = \frac{c_v t}{H^2} = \frac{k \cdot E_s}{\gamma_w H^2} t$, ο ρυθμός εξέλιξης της στερεοποίησης είναι αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου του πάχους της συμπιεστής στρώσης. Αυτό σημαίνει ότι για διπλή στράγγιση στην οποία το μήκος της ζώνης στράγγισης είναι μισό, ο χρόνος στερεοποίησης είναι τέσσερις φορές μικρότερος. Στο δεδομένο πρόβλημα, είναι προφανές ότι για αξονική απόσταση στραγγιστηρίων χαλικοπασσάλων 2.75 μέτρα, η ακτινική στράγγιση εκμηδενίζει την επιρροή της κατακόρυφης είτε αυτή γίνεται μόνο από το άνω διαπερατό όριο είτε πρόκειται για διπλή στράγγιση. Προκειμένου να διερευνηθεί πόσο μικρή είναι η απόκλιση μεταξύ μονής και διπλής στράγγισης, μορφώνονται δύο διαγράμματα, ένα για πάχος εδαφικής στρώσης 12 μέτρων και ένα για πάχος 8 μέτρων, καθώς όπως είναι αναμενόμενο, η επιρροή της διπλής στράγγισης αυξάνεται για μικρότερο πάχος H. Στη διερεύνηση αυτή θεωρούμε τα εξής δεδομένα: $k_v = 10^{-9}$ m/sec, $E_s = 10$ MPa, $m = 1.5$, $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$.



Διάγραμμα 3.12: Σύγκριση μονής και διπλής στράγγισης ως προς την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης, για πάχος στρώματος $H=12\text{m}$ και τετραγωνικό κάνναβο χαλικοπασσάλων $s=2.75\text{m}$.

Στο διάγραμμα είναι φανερό ότι στο πρόβλημα που έχουμε θεωρήσει, η διαπερατότητα του υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού δεν παίζει παρά ελάχιστο ρόλο. Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων επισημαίνεται ότι ο χρόνος στερεοποίησης για τη λύση της μονής

στράγγισης $t_{90\%}$ είναι 15.5 ημέρες ενώ για τη διπλή στράγγιση ο αντίστοιχος χρόνος είναι περίπου 14.5 ημέρες. Δηλαδή, η διπλή στράγγιση συντελείται περίπου 7% γρηγορότερα.



Διάγραμμα 3.13: Σύγκριση μονής και διπλής στράγγισης ως προς την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης, για πάχος στρώματος $H=8m$ και τετραγωνικό κάναβο χαλικοπασσάλων $s=2.75m$.

Είναι προφανές ότι όσο μικραίνει το βάθος του εδαφικού στρώματος τότε η επιρροή της κατακόρυφης στράγγισης γίνεται σημαντικότερη. Στο διάγραμμα για βάθος 8 μέτρων, ο χρόνος στερεοποίησης για της λύση της μονής στράγγισης είναι περίπου 15 ημέρες, ενώ ο αντίστοιχος για τη διπλή στράγγιση είναι περίπου 13.75 ημέρες. Δηλαδή, η διπλή στράγγιση εκτυλίσσεται πλέον 9% νωρίτερα από ότι η μονή. Σε κάθε περίπτωση, οι διαφορές αυτές είναι αρκετά μικρές ώστε να μην παίζουν σημαντικό ρόλο στο πρόβλημα.

3.3 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

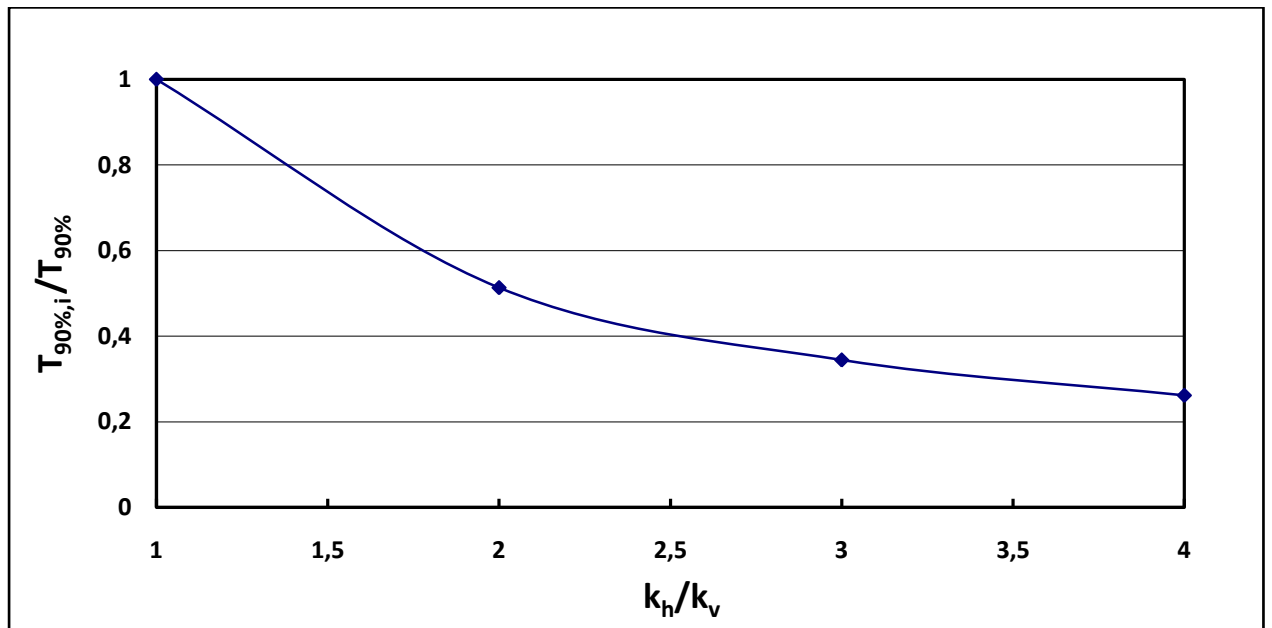
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εξέλιξη της στερεοποίησης ενός εδάφους εξαρτάται κυρίως από τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του συντελεστή στερεοποίησης, δηλαδή από το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης και από την κατακόρυφη διαπερατότητα του εδάφους. Η αδυναμία ασφαλούς εκτίμησης ενός από τους δύο αυτούς

παράγοντες μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα που απέχουν πολύ μεταξύ τους και σε λανθασμένες εκτιμήσεις απαιτούμενων χρόνων προφόρτισης.

Σημαντικό ωστόσο είναι να μπορεί να εκτιμηθεί η ομοιογένεια του εξεταζόμενου εδάφους από την οποία εξαρτάται ο λόγος οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα. Εφόσον τον κυρίαρχο ρόλο στην εξέλιξη της στερεοποίησης παίζει η οριζόντια στράγγιση, είναι λογικό το πρόβλημα να επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη σωστή εκτίμηση της οριζόντιας διαπερατότητας. Η επιρροή του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη διαπερατότητα μπορεί να αποτυπωθεί και από το διάγραμμα 3.14. Σε αυτό, θεωρώντας σταθερή την τιμή της κατακόρυφης διαπερατότητας του εδάφους και συνεπακόλουθα την τιμή του συντελεστή κατακόρυφης διαπερατότητας, μπορεί να οριστεί ένας αδιάστατος χρονικός παράγοντας T ίσος με

$$T = \frac{c_v \cdot t}{D^2}, \quad \text{όπου } t \text{ ο απόλυτος χρόνος και } D \text{ η διάμετρος επιρροής του χαλικοπασσάλου.}$$

Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί για το δεδομένο κάρναβο χαλικοπασσάλων, ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη του 90% της στερεοποίησης σε ένα ανομοιογενές έδαφος, εφόσον είναι γνωστός ο αντίστοιχος χρόνος στερεοποίησης για λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα ίσο με τη μονάδα.



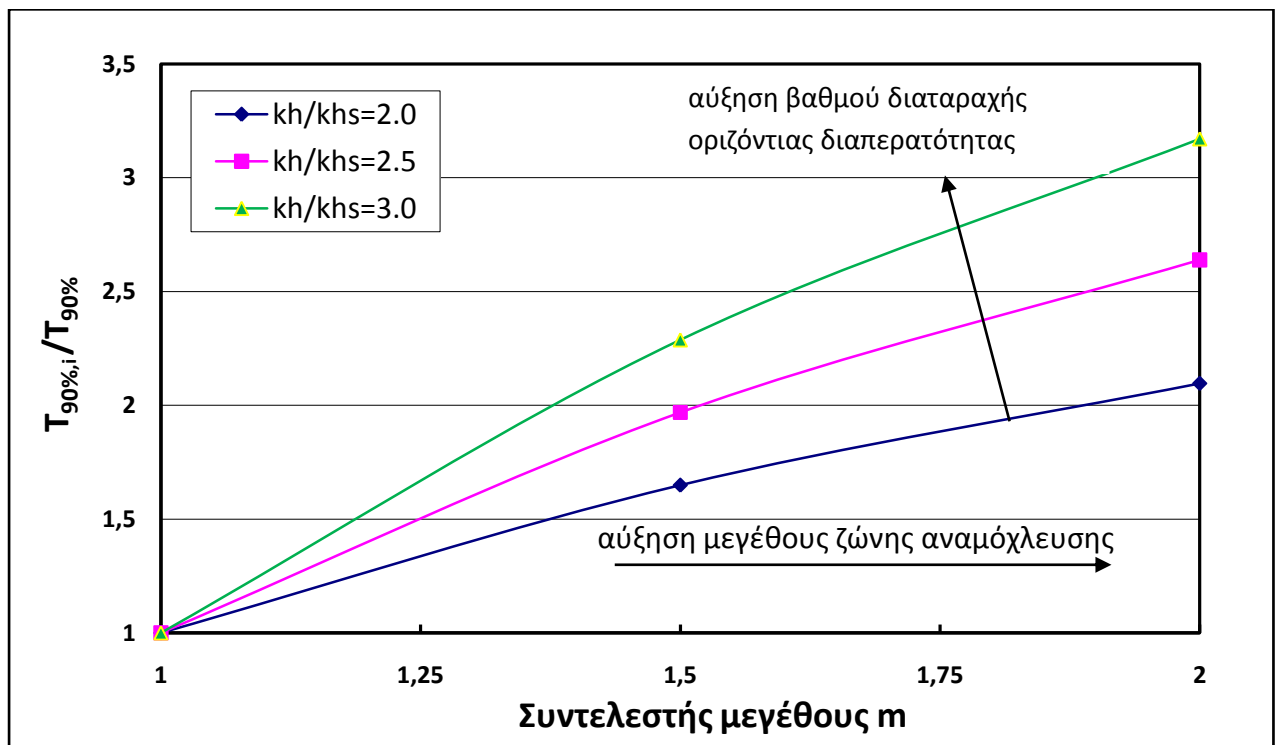
Διάγραμμα 3.14: Επιρροή του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα στην εξέλιξη της στερεοποίησης ανομοιογενούς εδάφους σε σχέση με το αντίστοιχο ομοιογενές.

Στο παραπάνω διάγραμμα, $T_{90\%}$ είναι ο αδιαστατοποιημένος χρονικός παράγοντας που αντιστοιχεί στο 90% της στερεοποίησης εδάφους που έχει λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα $\frac{k_h}{k_v} = 1$, ενώ $T_{90\%,i}$ είναι ο αντίστοιχος χρονικός παράγοντας για έδαφος με λόγο $\frac{k_h}{k_v} = i$. Η μείωση του λόγου των χρονικών παραγόντων T με την

αύξηση του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη διαπερατότητα αναπαριστά τη μείωση του χρόνου στερεοποίησης με την αύξηση του λόγου των διαπερατοτήτων.

Επιπλέον, παρόλο που το πρόβλημα, το οποίο θα εξεταστεί στο 5^ο κεφάλαιο, αποτελείται από πυκνό δίκτυο χαλικοπασσάλων διατεταγμένων σε αξονική απόσταση 2.75 μέτρων, τα χαρακτηριστικά της ζώνης αναμόχλευσης επηρεάζουν επίσης την εξέλιξη της στερεοποίησης. Αν και, λόγω της μεγάλης διαμέτρου των χαλικοπασσάλων σε σχέση με την αξονική τους απόσταση, ο συντελεστής μεγέθους m θεωρήθηκε ότι δεν μπορεί να ξεπερνάει το 2.0, ο απαιτούμενος χρόνος στερεοποίησης είναι πιθανό ακόμη και να διπλασιάζεται. Αυτό βέβαια εξαρτάται και από τον λόγο $\frac{k_h}{k_{h-s}}$, δηλαδή από το πόσο έχει διαταραχθεί η ζώνη αναμόχλευσης κατά την κατασκευή των χαλικοπασσάλων. Γενικά, στην εργασία αυτή, εξετάστηκε η επιρροή του βαθμού διαταραχής όταν η διαπερατότητα μειώνεται μεταξύ του 1/2 και 1/3 σε σχέση με την οριζόντια διαπερατότητα στο αρχικό αδιατάρακτο έδαφος, αν και έχει διαπιστωθεί ότι πολλές φορές η διαταραχή μπορεί να είναι αρκετά εντονότερη. Σε κάθε περίπτωση όμως, τουλάχιστον για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος οριζόντιας στράγγισης, το χαρακτηριστικό της διαταραγμένης ζώνης που επηρεάζει κύρια τη στερεοποίηση είναι το μέγεθος της, δηλαδή η θεώρηση της διαμέτρου της ως συνάρτηση του χαλικοπασσάλου.

Η επιρροή των παραπάνω δύο μεγεθών μπορεί επίσης να αποτυπωθεί από το διάγραμμα 3.15.



Διάγραμμα 3.15: Επιρροή της ζώνης αναμόχλευσης στην εξέλιξη της στερεοποίησης ανομοιογενούς εδάφους σε σχέση με το αντίστοιχο ομοιογενές.

Για τη μόνωση του διαγράμματος, έχει θεωρηθεί σταθερή η οριζόντια διαπερατότητα και συνεπακόλουθα ο συντελεστής οριζόντιας διαπερατότητας c_h . Συνεπώς, ο αδιάστατος χρονικός παράγοντας T που παρουσιάζεται στο διάγραμμα είναι αυτός που έχει οριστεί και από την εξίσωση 2.16. Από το διάγραμμα 3.15, προκύπτει ότι με την αύξηση του μεγέθους της ζώνης αναμόχλευσης ή του βαθμού διαταραχής της διαπερατότητας εντός της ζώνης αυτής, αυξάνει και ο χρόνος στερεοποίησης του εδάφους. Επιπλέον, με τα διαγράμματα 3.14 και 3.15 είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου στερεοποίησης ενός εδάφους με τυχαία χαρακτηριστικά ζώνης αναμόχλευσης και λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα, αρκεί να έχει υπολογιστεί εκ των προτέρων ο απαιτούμενος χρόνος στερεοποίησης του αντίστοιχου ισότροπου και αδιατάρακτου εδάφους (ίδια κατακόρυφη διαπερατότητα, ίδιο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης, λόγος $\frac{k_h}{k_v} = 1$ και καμία διαταραχή του εδάφους γύρω από τον χαλικοπάσσαλο).

Τέλος, αμελητέα, σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους, πρέπει να θεωρείται η επιρροή της διαπερατότητας του υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού. Για το ελάχιστο βάθος των 8 μέτρων αργιλικού εδάφους που έχει απαντηθεί στο πραγματικό πρόβλημα που θα διερευνηθεί στο 5^ο κεφάλαιο, η επιρροή αυτή δεν ξεπερνάει το 9%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αριθμητικές αναλύσεις διερεύνησης της στράγγισης και στερεοποίησης εδαφικών σχηματισμών

4.1 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Γενικά, οι τάσεις που αναπτύσσονται στο έδαφος συνδέονται με τις προκαλούμενες παραμορφώσεις με καταστατικές σχέσεις της μορφής:

$$\sigma = \mathbf{C} : \varepsilon \quad (4.1)$$

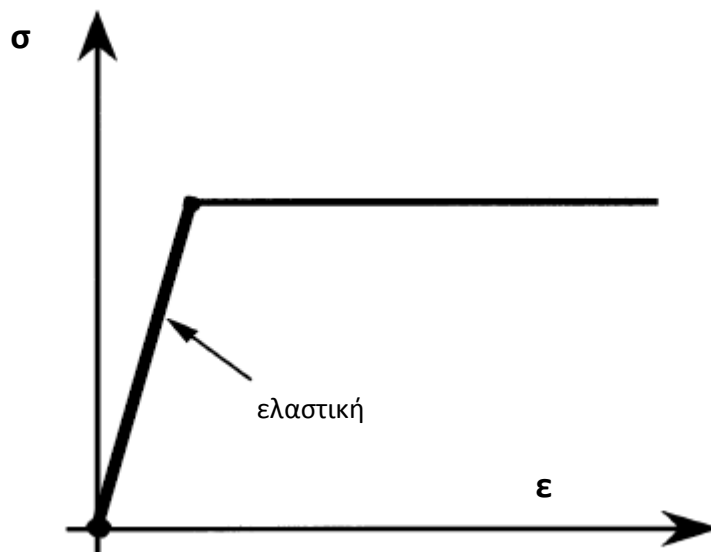
Το μητρώο ακαμψίας \mathbf{C} , είναι η παράμετρος που πρέπει να προσδιοριστεί ούτως ώστε να μπορεί να περιγραφεί η συμπεριφορά του εδάφους. Για τον προσδιορισμό των καταστατικών εξισώσεων και τον ορισμό ενός καταστατικού μοντέλου συμπεριφοράς των εδαφών, απαιτείται η γνώση των εξής:

- της συμπεριφοράς του υλικού εντός της ελαστικής περιοχής
- της επιφάνειας διαρροής
- της διεύθυνσης και του μεγέθους της πλαστικής παραμόρφωσης
- των νόμων κράτυνσης

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιούνται αναλύσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά καταστατικά προσομοιώματα, αυτό της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας και αυτό της ισότροπης ποροελαστικότητας.

4.1.1 Γραμμική ισότροπη ελαστικότητα

Η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα αποτελεί τον απλούστερο και, λόγω της απλότητας του, πιο ευρέως διαδεδομένο καταστατικό νόμο συμπεριφοράς των εδαφών και ειδικότερα, συσχετισμού τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε αυτό. Σύμφωνα με τη γραμμική ισότροπη ελαστικότητα, η συμπεριφορά ενός υλικού στην ελαστική του περιοχή, δηλαδή για τασικές καταστάσεις εντός της επιφάνειας διαρροής, περιγράφεται από έναν γραμμικό κλάδο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Καταστατικό προσομοίωμα Γραμμικής Ισότροπης Ελαστικότητας.

Το μητρώο ακαμψίας \mathbf{C} της εξίσωσης 4.1 στην περίπτωση της θεωρίας της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας εξαρτώνται από δύο θεμελιώδεις παραμέτρους (ιδιότητες του υλικού), το μέτρο Ελαστικότητας του Young E και το λόγο του Poisson ν . Συγκεκριμένα, το μητρώο ακαμψίας παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{C} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix}$$

Εκτός των E και ν , μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες παράγωγες εκφράσεις των ελαστικών σταθερών:

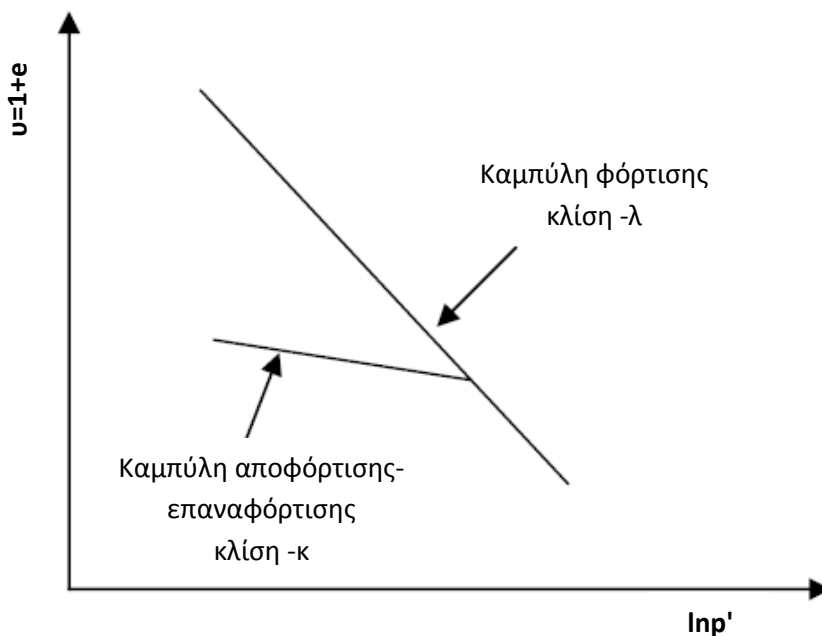
- Μέτρο διάτμησης : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$
- Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης : $D = E_s = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
- Μέτρο ισότροπης συμπίεσης : $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$

4.1.2 Ποροελαστικότητα

Στην ισότροπη ποροελαστικότητα, απαιτούνται πάλι δύο παράμετροι για τον προσδιορισμό της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων. Η διαφορά έγκειται στο ότι οι παράμετροι αυτοί έχουν μεταβλητή τιμή. Συγκεκριμένα, το μέτρο διόγκωσης K μεταβάλλεται ανάλογα με την ισότροπη συνιστώσα της μέσης ενεργού τάσης p' και δίδεται από τη σχέση:

$$K = \frac{\nu}{\kappa} p'$$

όπου $\nu = 1 + e$ (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 $\ln p' - u$ (βλέπε σχήμα 4.2) και $p' = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$.



Σχήμα 4.2: Καταστατικό προσομοίωμα Ισότροπης Ποροελαστικότητας

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 τάση p' και δίδεται από τη σχέση:

$$G = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{2G}{K}\right) K$$

όπου ο όρος $\frac{2G}{K}$ θεωρείται σταθερά του υλικού και ίσος με $\frac{2G}{K} = f(\nu)$.

Λόγω της μεταβλητότητας του μέτρου διόγκωσης K και του μέτρου διατμήσεως G , το μητρώο δυσκαμψίας C παύει να έχει σταθερή τιμή και συνεπώς, δεν υπάρχει πλέον γραμμική συσχέτιση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης άλλα μια συσχέτιση δευτέρου βαθμού. Δηλαδή πρόκειται για μία μη γραμμική ελαστικότητα η οποία όμως επιτυγχάνει να περιγράψει την μείωση της συμπιεστότητας των εδαφών με την αύξηση του πεδίου των τάσεων.

4.1.3 Συσχέτιση καταστατικών προσομοιωμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχουν προκύψει από λύσεις που βασίζονται στη θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν αναλύσεις οι οποίες θα βασίζονται στην ποροελαστικότητα και θα είναι άμεσα συγκρίσιμες με αυτές της ελαστικότητας, απαιτήθηκε και τα δύο είδη αναλύσεων να καταλήγουν σε κοινή τελική καθίζηση του εδάφους. Ειδικότερα, συσχέτιστηκε η κλίση κ του διαγράμματος 4.2, που υπεισέρχεται στον υπολογισμό των παραμορφώσεων με τη θεωρία της ποροελαστικότητας, με ένα μέτρο ελαστικότητας E έτσι ώστε η καθίζηση που προκύπτει να είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Γενικά, για συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης, η καθίζηση ενός στρώματος πάχους H υπολογίζεται από τη σχέσεις:

$$s = H \cdot \Delta \varepsilon_{vol} \quad 4.2$$

$$\Delta \varepsilon_{vol} = -\frac{\Delta e}{(1 + e_0)} \quad 4.3$$

Σύμφωνα με τη γραμμική ισότροπη ελαστικότητα, η μεταβολή του δείκτη πόρων μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\Delta e = -\Delta \varepsilon_{vol} \cdot (1 + e_0) = -\frac{\Delta \sigma'}{D} (1 + e_0) \quad 4.4$$

όπου D το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.1.1.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με την ποροελαστικότητα, η μεταβολή του δείκτη πόρων υπολογίζεται:

$$\Delta e = -\kappa \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad 4.5$$

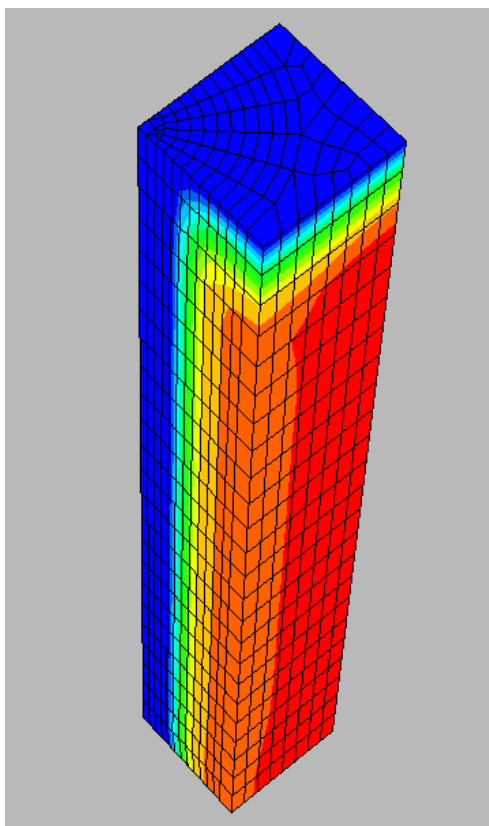
Προκειμένου, λοιπόν, να ληφθούν κοινές κατακόρυφες μετακινήσεις για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις αρκεί να εξισωθούν οι δύο παραπάνω εξισώσεις και να εκφραστεί η κλίση κ συναρτήσει του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης D ή του μέτρου ελαστικότητας E .

$$\kappa = \frac{\Delta\sigma \cdot (1 + e_0)}{D \cdot \ln\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right)} \quad 4.6$$

Προφανώς, όπως προκύπτει και από τη σχέση 4.6, η τιμή της κλίσης κ εξαρτάται από το αρχικό τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο αλλά και από την μεταβολή των τάσεων.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

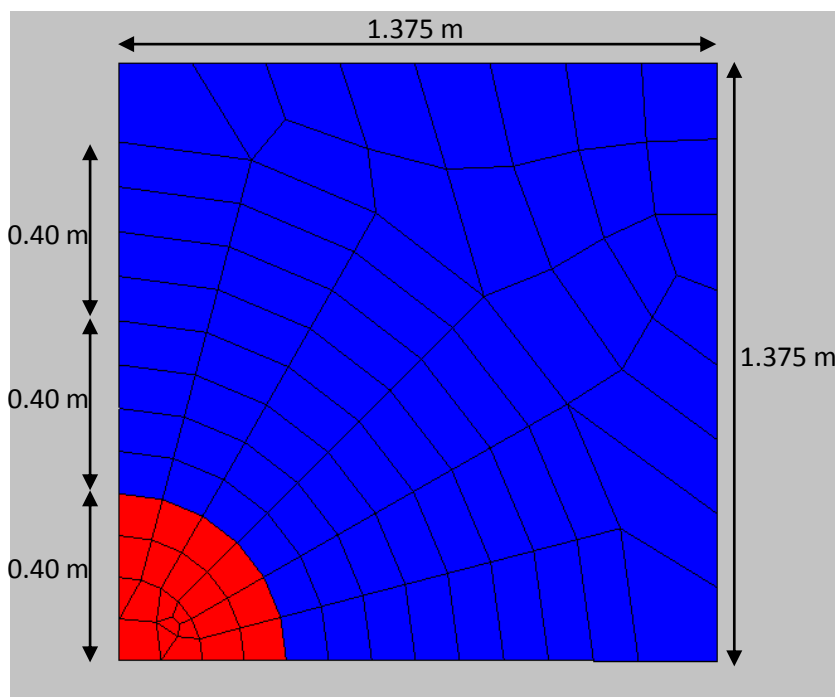
Το εξεταζόμενο πρόβλημα αφορά σε τετραγωνικό κάνναβο χαλικοπασσάλων με αποτέλεσμα το πρόβλημα να μπορεί να θεωρηθεί αξονοσυμμετρικό. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο που αποτελείται από ένα τεταρτημόριο του



πραγματικού προβλήματος (βλ. εικόνες 4.1 και 4.2). Το μοντέλο, που μορφώθηκε με χρήση του προ-επεξεργαστή Ansys, έχει σχήμα παραλληλεπίπεδο, τετραγωνική κάτοψη πλευράς μήκους 1.375 m, η οποία αντιστοιχεί στο μισό της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων, ενώ το βάθος είναι 12 m. Αποτελείται από 2825 κόμβους και 2208 πεπερασμένα στοιχεία. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι οχτακομβικά μορφής C3D8P ώστε να υπολογίζουν τρισδιάστατες μετακινήσεις και πίεση πόρων. Στον κατακόρυφο άξονα z που δηλώνει το ύψος του μοντέλου, τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν σταθερή κατακόρυφη διάσταση 0.5 μέτρων. Στο οριζόντιο επίπεδο, πέραν από τα ομόκεντρα τεταρτημόρια κύκλων που σχεδιάστηκαν ούτως ώστε να οριοθετούν τις επιφάνειες των πεπερασμένα στοιχεία του χαλικοπασσάλου και των πιθανών ζωνών

Εικόνα 4.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση μοντέλου στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

αναμόχλευσης, η μορφή των υπολοίπων μορφώθηκε αυτόματα από το Ansys.



Εικόνα 4.2: Κάτοψη μοντέλου στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Εν συνεχεία, επιλέχθηκαν οι κόμβοι που βρίσκονται περιμετρικά του μοντέλου και δεσμεύθηκαν οι αντίστοιχες μετακινήσεις τους. Επιπλέον, δεσμεύθηκε κάθε δυνατή μετακίνηση και στροφή των κόμβων που αποτελούν τη βάση του μοντέλου σε βάθος -12 μέτρων, ενώ οι κόμβοι στην κορυφή του μοντέλου σε βάθος $z=0$ ομαδοποιήθηκαν προκειμένου να ορίσουν την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα όπου η πίεση είναι μηδενική.

Ακολούθως, ορίστηκαν τα υλικά για κάθε ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Ορίστηκαν συνολικά τέσσερα υλικά, ένα για τον χαλικοπάσσαλο, ένα για το φυσικό έδαφος και δύο για τη ζώνη αναμόχλευσης έτσι ώστε να δοθεί η δυνατότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών για τις δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεγέθους m . Στα πλαίσια της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, στα υλικά δόθηκαν μόνο τιμές μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson, καθώς και τιμές διαπερατότητας. Ο λόγος του Poisson έχει ληφθεί σταθερά 0.3. Όσον αφορά στις αναλύσεις που έγιναν με θεώρηση ποροελαστικότητας, στα υλικά δόθηκε η κλίση κ – η οποία συσχετίστηκε με το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με την παράγραφο 4.1.2 – και ο λόγος Poisson ο οποίος παρέμεινε σταθερός. Για τον χαλικοπάσσαλο θεωρώντας ότι αποτελείται από ισότροπο υλικό δίνουμε

μία τιμή διαπερατότητας, ενώ για τα υπόλοιπα υλικά η διαπερατότητα ορίζεται διαφορετική σε κάθε διεύθυνση.

Όσον αφορά στις αρχικές συνθήκες που δόθηκαν στο πρόγραμμα κατά τη διενέργεια των αναλύσεων, ο δείκτης πόρων λήφθηκε ίσος με τη μονάδα και σταθερός με το βάθος, ενώ ο βαθμός κορεσμού ίσος με 100%.

Στις αναλύσεις που έγιναν σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας, δεν λήφθηκε καθόλου υπόψη το γεωστατικό πεδίο. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Abaqus σε αυτό το στάδιο αποτελούνται από δύο βήματα. Το πρώτο είναι η επιβολή φορτίου 100 kPa στην επιφάνεια του μοντέλου, η οποία πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το δεύτερο βήμα συνιστά η μονοδιάστατη στερεοποίηση που πραγματοποιείται καθώς το νερό στραγγίζει μέσω του τεταρτημορίου του χαλικοπασσάλου προς την επιφάνεια του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα.

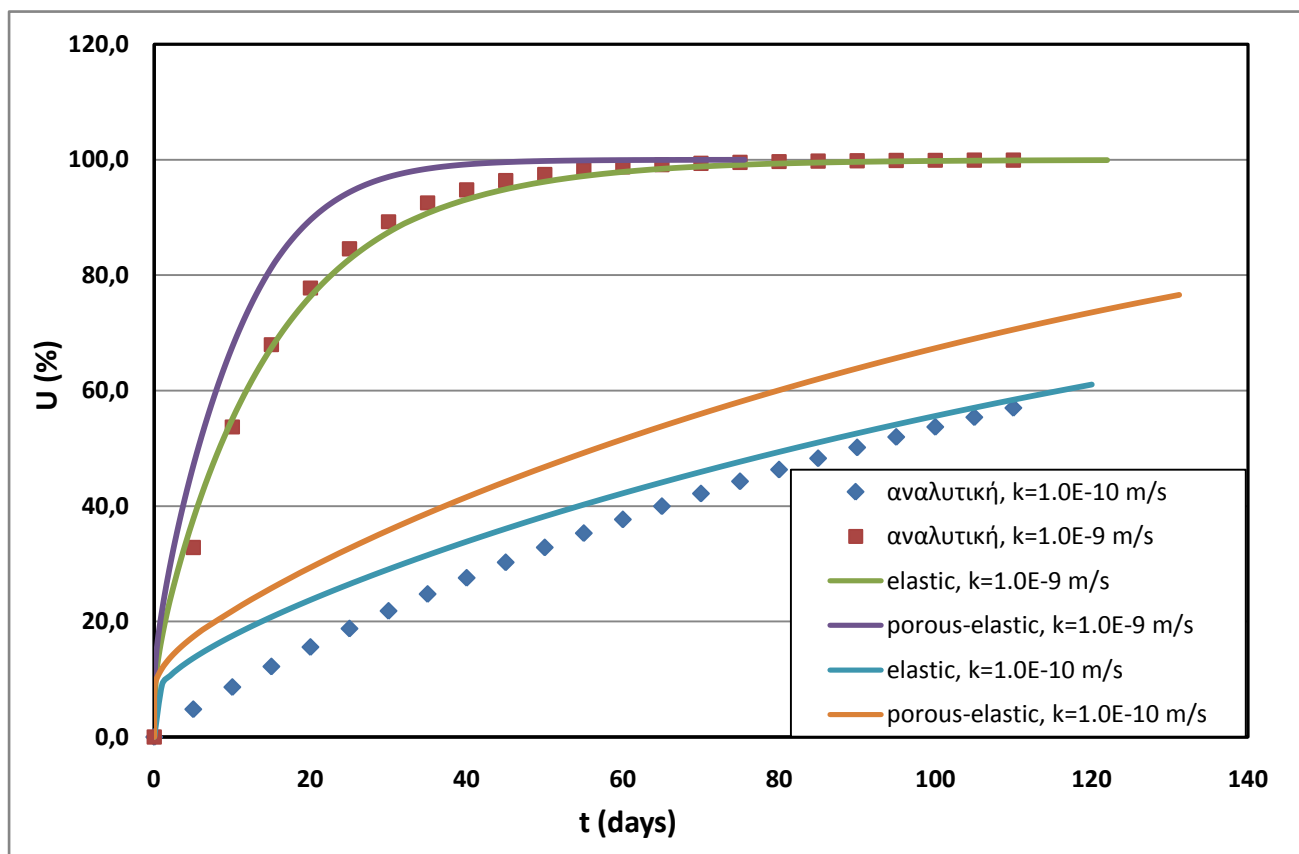
Στις αναλύσεις που έγιναν με βάση τη θεωρία της ποροελαστικότητας, αγνοήθηκε επίσης το αρχικό γεωστατικό πεδίο. Ωστόσο, καθώς, όπως αναφέρθηκε και στην §4.1.3, η «δυσκαμψία» του εδάφους εξαρτάται από το τασικό πεδίο, δεν θα ήταν δυνατό το αρχικό τασικό πεδίο να είναι μηδενικό. Για το λόγο αυτό, ορίστηκε ως αρχική συνθήκη μία σταθερή με το βάθος τάση ίση με -10 kPa ενώ σαν πρώτο βήμα ορίστηκε η επιβολή ενός ισοδύναμου φορτίου ίσου με 10 kPa, προκειμένου να μην προκληθούν μετακινήσεις. Τα υπόλοιπα βήματα ήταν ίδια με αυτά που έγιναν στα πλαίσια της ελαστικής θεώρησης των υλικών. Στο παράρτημα Α δίνονται ενδεικτικά οι κώδικες του Abaqus για κάποια από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

4.3.1 Διερεύνηση της Επιρροής της Διαπερατότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, διερευνήθηκε η επιρροή της διαπερατότητας του εδάφους στην εξέλιξη της στερεοποίησης, χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των Hansbo, Rendulic και Carillo. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα, πέρα από τις λύσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, οι λύσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, στις οποίες υποβλήθηκε το μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Μορφώνονται δύο διαγράμματα, για δύο διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας $E_s=5$ MPa και $E_s=20$ MPa, προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσον η μεταβολή της διαπερατότητας εξαρτάται από τη συμπιεστότητα του εδάφους. Στην περίπτωση της ποροελαστικότητας, τη θέση του μέτρου συμπιεστότητας

λαμβάνει η κλίση κ του διαγράμματος $e\text{-ln}t'$, υπολογισμένη σύμφωνα με την παράγραφο 4.1.3. Στην προκειμένη περίπτωση οι αντίστοιχες κλίσεις υπολογίστηκαν $\kappa = 0.01668$ και $\kappa = 0.00417$. Για τη μόρφωση των διαγραμμάτων, έγιναν οι εξής υποθέσεις για τις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος: $\frac{\kappa_h}{\kappa_v} = 2$, $m=1.5$, $\frac{\kappa_h}{\kappa_{h-s}} = 2$.



Διάγραμμα 4.1: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για $E_s=5 \text{ MPa}$ - $\kappa=0.01668$ και διαπερατότητες $k=10^{-10} \text{ m/sec}$, $k=10^{-9} \text{ m/sec}$.

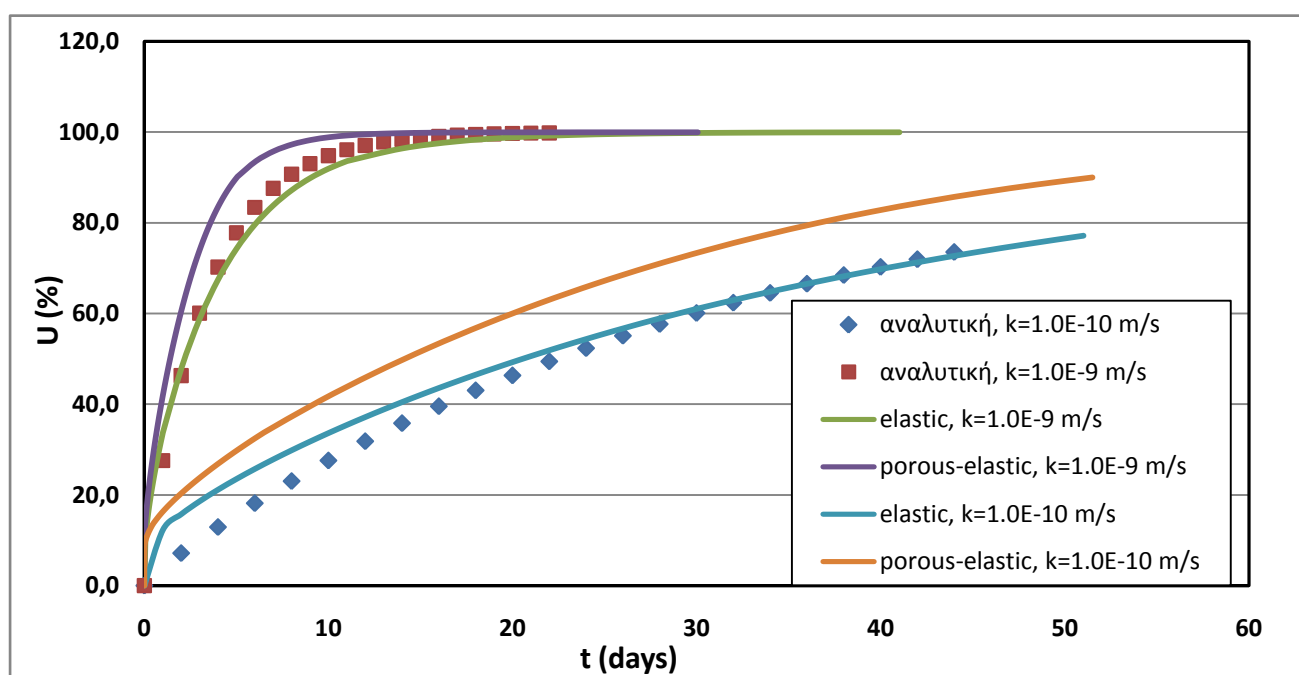
Από το παραπάνω διάγραμμα, συγκεντρώνονται στον πίνακα οι τιμές των χρόνων που αντιστοιχούν στο 50% και στο 90% της στερεοποίησης.

Πίνακας 4.1: Χρόνοι στερεοποίησης για διαπερατότητες $k=10^{-10} \text{ m/sec}$ και $k=10^{-9} \text{ m/sec}$ και για $E_s=5 \text{ MPa}$ - $\kappa=0.01668$.

Διαπερατότητα	Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$k=10^{-9} \text{ m/s}$	Αναλυτική	9	31
	FEM-Ελαστικότητα	8.3	33.7
	FEM-Ποροελαστικότητα	5.6	20.3
$k=10^{-10} \text{ m/s}$	Αναλυτική	90	310
	FEM-Ελαστικότητα	81.8	330
	FEM-Ποροελαστικότητα	56.6	203

Είναι φανερό, ότι οι αναλύσεις που έγιναν με τη θεωρία της ελαστικότητας, συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων που έχουν δοθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως προκύπτει και από τον παραπάνω πίνακα, οι αποκλίσεις στις τιμές των χρόνων $t_{50\%}$ και $t_{90\%}$ είναι μικρότερες του 10%. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η καμπύλη που παίρνουμε από τα πεπερασμένα στοιχεία, στην αρχή κινείται αριστερά της καμπύλης της αναλυτικής λύσης, με αποτέλεσμα ο χρόνος που αντιστοιχεί σε $U=50\%$ να προσεγγίζεται γρηγορότερα από την καμπύλη των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια όμως, οι καμπύλες τέμνονται και τελικά στερεοποίηση επιτυγχάνεται πιο αργά στη λύση που παίρνουμε από την ελαστικότητα στο Abaqus. Πέραν αυτού, η λύση της ποροελαστικότητας, οδηγεί σε σαφώς ταχύτερους χρόνους στερεοποίησης, οι οποίοι αποκλίνουν μέχρι και 35% από τις αναλυτικές λύσεις.

Όσον αφορά στις διαφορές που προκύπτουν στους χρόνους στερεοποίησης για κάθε καταστατικό προσομοίωμα, εξαιτίας της διαφοράς της διαπερατότητας, όπως διευκρινίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο χρόνος $t_{90\%}$ είναι 10 φορές μεγαλύτερος για διαπερατότητα μιας τάξης μεγέθους μικρότερη, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής στερεοποίησης είναι 10 φορές μικρότερος. Η σχέση αυτή των χρόνων $t_{90\%}$ διατηρείται και για τις λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, παρόλο που στη λύση που έχει προκύψει από θεώρηση ελαστικότητας, υπάρχει μια μικρή απόκλιση.



Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για $E_s=20 \text{ MPa}$ - $\kappa=0.00417$ και διαπερατότητες $k=10^{-10} \text{ m/sec}$, $k=10^{-9} \text{ m/sec}$.

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος 4.2 συνοψίζονται στον πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Χρόνοι στερεοποίησης για διαπερατότητες $k=10^{-10}$ m/sec και $k=10^{-9}$ m/sec και για $E_s=20$ MPa - $\kappa=0.00417$.

Διαπερατότητα	Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$k=10^{-9}$ m/s	Αναλυτική	2.2	7.8
	FEM-Ελαστικότητα	2.2	9.1
	FEM-Ποροελαστικότητα	1.4	5
$k=10^{-10}$ m/s	Αναλυτική	22	78
	FEM-Ελαστικότητα	20.5	83.8
	FEM-Ποροελαστικότητα	14.2	51.5

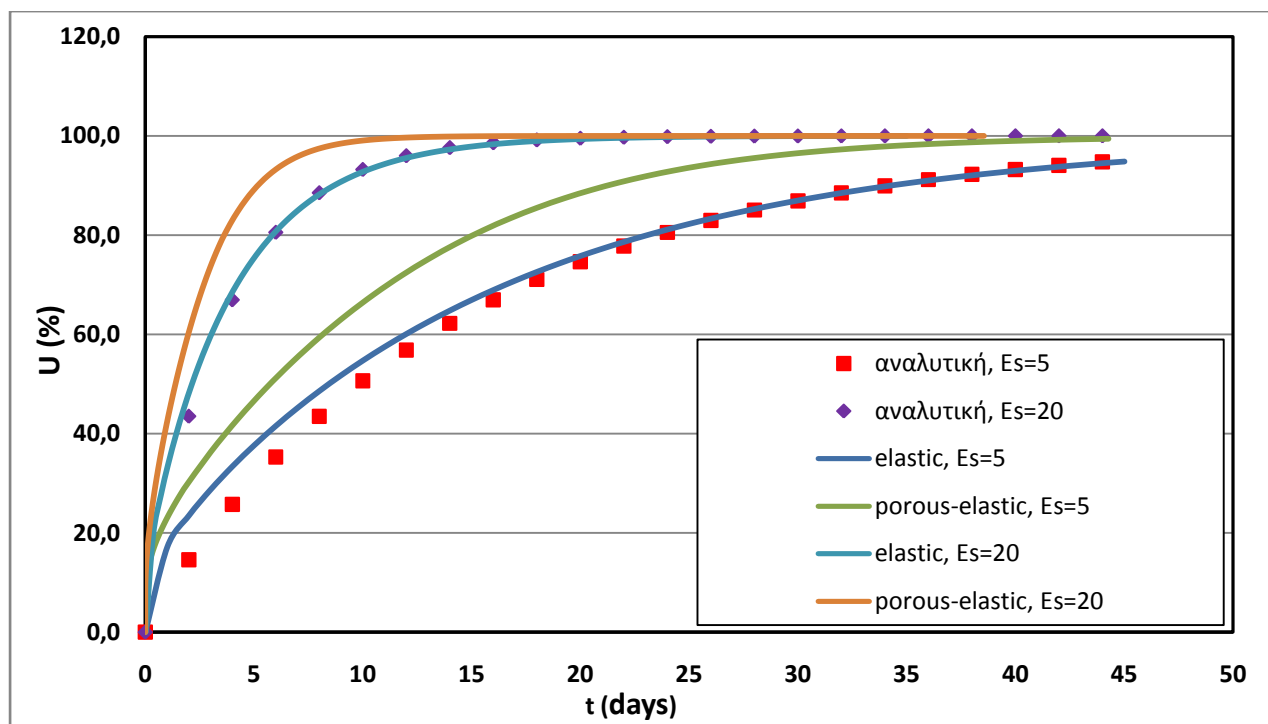
Συγκρίνοντας τις διαφορές ανάμεσα στα καταστατικά προσομοιώματα, ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα που διατυπώθηκαν και παραπάνω. Βέβαια, όσο ταχύτερα εξελίσσεται η στερεοποίηση, τόσο δυσκολότερο γίνεται να εντοπιστούν οι διαφορές μεταξύ της αναλυτικής λύσης και της λύσης των πεπερασμένων στοιχείων μέχρι και το 60% περίπου της στερεοποίησης. Ωστόσο, αναφορικά με τον χρόνο $t_{90\%}$ παρατηρείται απόκλιση μεγαλύτερη του 15% για διαπερατότητα $k=10^{-9}$ m/s. Επειδή όμως, η απόκλιση αυτή δεν διατηρείται για τη διαπερατότητα $k=10^{-10}$ m/s, ενδεχομένως να οφείλεται στην πολύ γρήγορη εξέλιξη του φαινομένου και στις στρογγυλοποιήσεις που γίνονται εξαιτίας της ταχύτητας αυτής.

Τέλος, από τα παραπάνω διαγράμματα, προκύπτει ότι ο λόγος $t_{90\%}/t_{50\%}$ τόσο για την περίπτωση των αναλυτικών λύσεων όσο και για την περίπτωση της ποροελαστικότητας, κυμαίνεται σταθερά γύρω στο 3.5. Στην περίπτωση ωστόσο των ελαστικών λύσεων, ο λόγος αυτός κυμαίνεται σταθερά στο 4. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι στην περίπτωση της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, ο χρόνος μεταξύ του τέλους της στερεοποίησης $t_{90\%}$ και του χρόνου που αντιστοιχεί στο μέσο αυτής $t_{50\%}$ είναι μεγαλύτερος.

4.3.2 Διερεύνηση της Επιρροής των χαρακτηριστικών Συμπιεστότητας στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στην παράγραφο αυτή, μορφώνονται σε κοινό διάγραμμα οι λύσεις που έγιναν για μέτρα μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5$ MPa και $E_s=20$ MPa. Στην περίπτωση της ποροελαστικότητας, οι κλίσεις κ που συσχετίστηκαν με τα μέτρα συμπιεστότητας ώστε να δίνουν τις ίδιες καθιζήσεις, είναι αντίστοιχα $\kappa=0.01668$ και $\kappa=0.00417$. Όσον αφορά στις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος που ελήφθησαν σταθερές, αυτές είναι οι εξής:

$$k_v=10^{-4} \text{ m/day} = 1.157 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}, \quad \frac{k_h}{k_v} = 2, \quad m=2.0, \quad \frac{k_h}{k_{h-s}} = 2.$$



Διάγραμμα 4.3: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για διαπερατότητα $k_v=10^{-4}$ m/day και χαρακτηριστικά συμπιεστότητας $E_s=5$ MPa - $\kappa=0.01668$ και $E_s=20$ MPa - $\kappa=0.00417$.

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: Χρόνοι στερεοποίησης για διαφορετικά χαρακτηριστικά συμπιεστότητας .

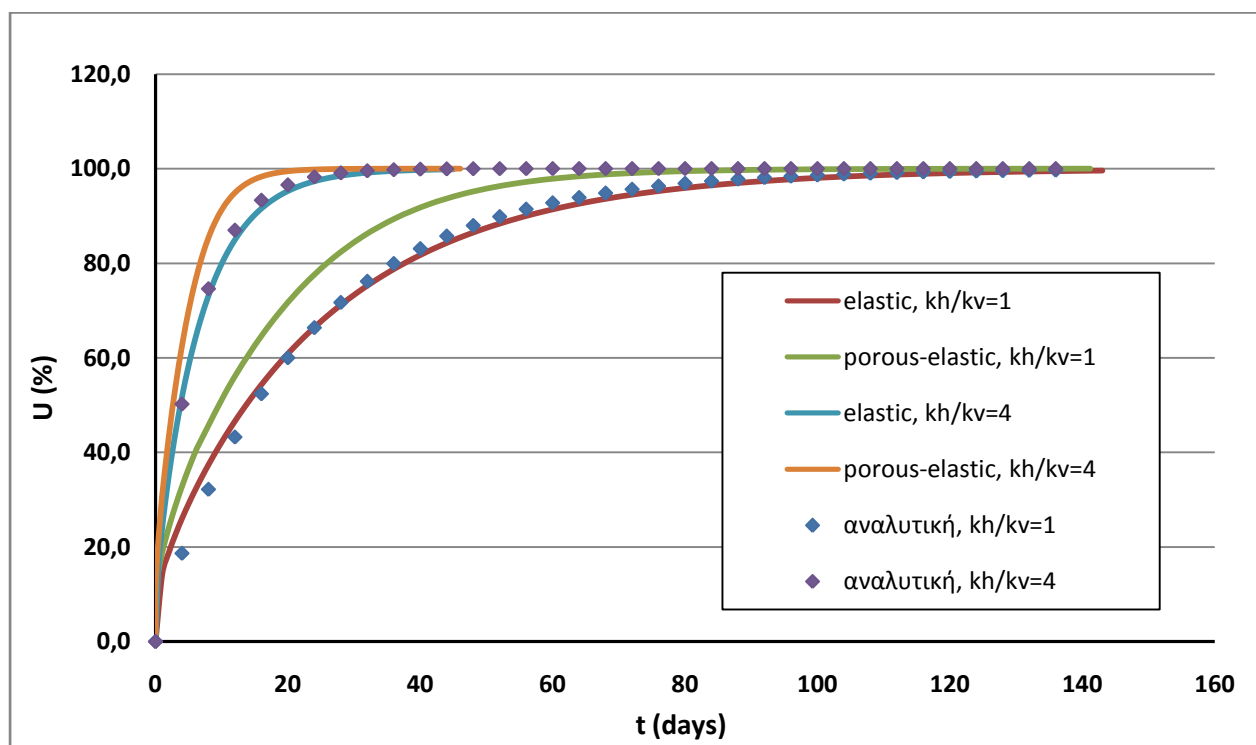
Μέτρο μονοδιάστατης συμπιεστότητας E_s (MPa)	Κλίση κ διαγράμματος $e^{-\ln p'}$	Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
5	0.01668	Αναλυτική	9.8	34
		FEM-Ελαστικότητα	8.4	34.3
		FEM-Ποροελαστικότητα	5.7	21.3
20	0.00417	Αναλυτική	2.5	8.5
		FEM-Ελαστικότητα	2.1	8.7
		FEM-Ποροελαστικότητα	1.4	5.2

Από τον πίνακα προκύπτει σχεδόν ταύτιση της αναλυτικής λύσης και της ελαστικής λύσης των πεπερασμένων στοιχείων. Η ταύτιση αυτή, η οποία με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας δεν ήταν αναμενόμενη, ενδεχομένως να οφείλεται στην αύξηση του συντελεστή μεγέθους της ζώνης αναμόχλευσης m . Η λύση της ποροελαστικότητας δίνει ταχύτερους χρόνους στερεοποίησης που για $U=50\%$ αποκλίνουν σχεδόν 45% από την ελαστικότητα, ενώ για $U=90\%$, η απόκλιση είναι περί το 37%.

Επιπροσθέτως, όπως διευκρινίστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένας λόγος μέτρων ελαστικότητας ίσος με 4, οδηγεί σε χρόνους στερεοποίησης με ίσο λόγο. Το δεδομένο αυτό, όπως προκύπτει από τον πίνακα, διατηρείται και στις λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων.

4.3.3 Διερεύνηση της Επιρροής του Λόγου Οριζόντιας προς Κατακόρυφη Διαπερατότητα στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, διερευνήθηκε η επιρροή του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα με χρήση των αναλυτικών λύσεων της οριζόντιας στράγγισης και εξήχθη το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του λόγου αυτού είναι ανεξάρτητη τόσο του των χαρακτηριστικών συμπίεσότητας του εδάφους (E, ν) όσο και της απόλυτης (κατακόρυφης) διαπερατότητας του εδάφους. Στην παρούσα ενότητα, ελέγχεται η επιρροή του λόγου διαπερατοτήτων συγκρίνοντας τις αναλυτικές λύσεις με αυτές των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, μορφώνονται δύο ειδών καμπύλες, μία για απόλυτα ισότροπο έδαφος (λόγος διαπερατοτήτων ίσος με τη μονάδα) και μία για έδαφος με έντονη ανισοτροπία όσον αφορά στις διαπερατότητες (λόγος $\frac{k_h}{k_v} = 4$). Οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος που ελήφθησαν σταθερές είναι : $E_s = 5 \text{ MPa}$ [ή $\kappa = 0.01668$] , $m = 1.5$, $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$.



Διάγραμμα 4.4: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για λόγους $k_h/k_v=1, k_h/k_v=4$.

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.4: Χρόνοι στερεοποίησης για λόγους οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα $k_h/k_v=1$ και $k_h/k_v=4$.

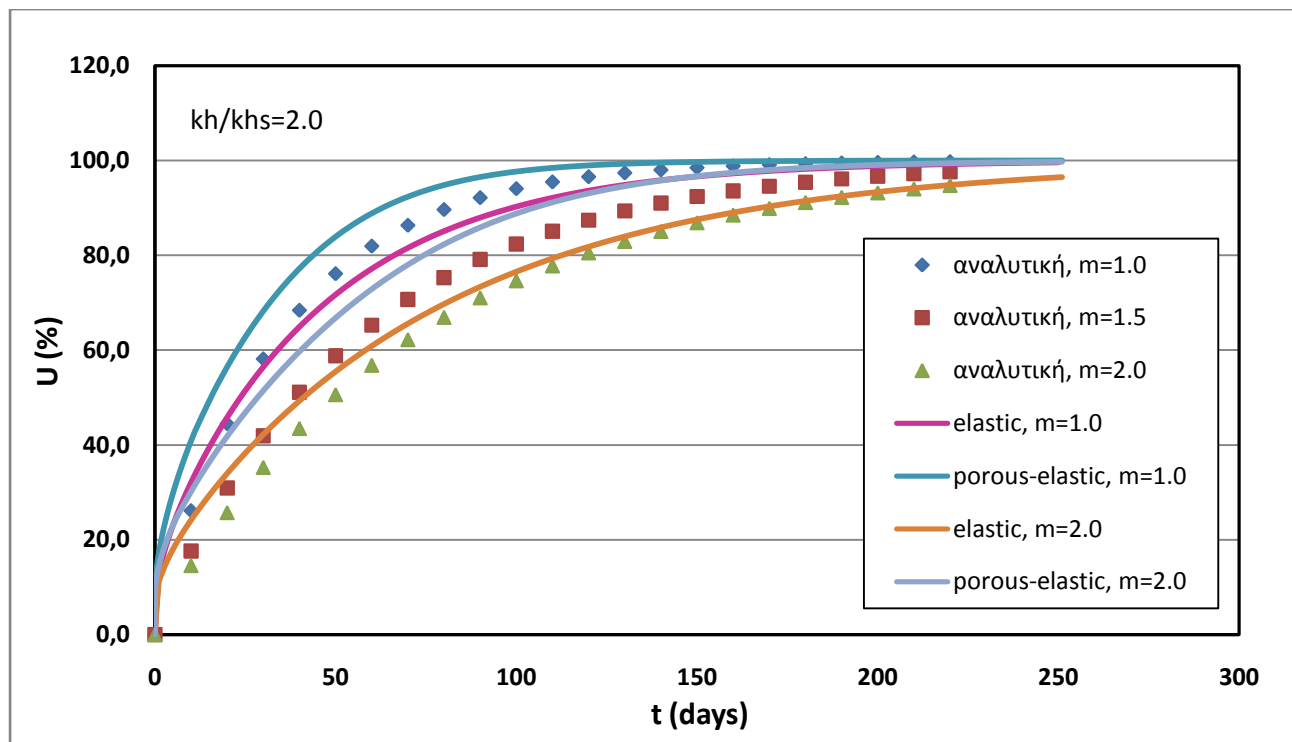
Λόγος οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα	Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
$\frac{k_h}{k_v} = 1$	Αναλυτική	14.9	52.3
	FEM-Ελαστικότητα	13.7	56
	FEM-Ποροελαστικότητα	9.6	37.1
$\frac{k_h}{k_v} = 4$	Αναλυτική	4	13.6
	FEM-Ελαστικότητα	3.8	14.8
	FEM-Ποροελαστικότητα	2.6	9.5

Οι διαφορές μεταξύ των τριών λύσεων είναι ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3.1 : Και για τις δύο περιπτώσεις καμπυλών, οι αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικής και ελαστικής λύσης του Abaqus, είναι μικρότερες του 10%. Αντίστοιχα, οι αποκλίσεις της λύσης με θεώρηση ποροελαστικότητας κυμαίνονται μεταξύ 30% και 35%.

Αναφορικά με την επιρροή του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη διαπερατότητα, όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο, ο λόγος $\frac{k_h}{k_v} = 4$ οδηγεί σε χρόνο στερεοποίησης $t_{90\%}$ περίπου 4 φορές μικρότερο (απόκλιση 74%) από το απόλυτα ισότροπο, όσον αφορά στη διαπερατότητα, έδαφος. Το συμπέρασμα αυτό, διατηρείται και στις δύο λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων.

4.3.4 Διερεύνηση της Επιρροής του Μεγέθους της Ζώνης Αναμόχλευσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι λύσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων χωρίς τη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης αλλά και για θεώρηση ζώνης μεγέθους $m=2.0$. Μορφώνονται δύο διαγράμματα, για διαφορετικούς βαθμούς διαταραχής της ζώνης αναμόχλευσης. Οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος που θεωρούνται σταθερές είναι οι εξής: $k_v=10^{-5}$ m/day = $1.157 \cdot 10^{-10}$ m/sec , $E_s = 10$ MPa [ή $\kappa = 0.00834$], $\frac{k_h}{k_v} = 2$.



Διάγραμμα 4.5: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για λόγους για μεγέθη ζώνης αναμόχλευσης $m=1.0$, $m=2.0$, και βαθμό διαταραχής $k_h/k_{hs}=2.0$.

Τα κύρια σημεία του διαγράμματος συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.5: Χρόνοι στερεοποίησης για μη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης και για μέγεθος ζώνης $m=2.0$.

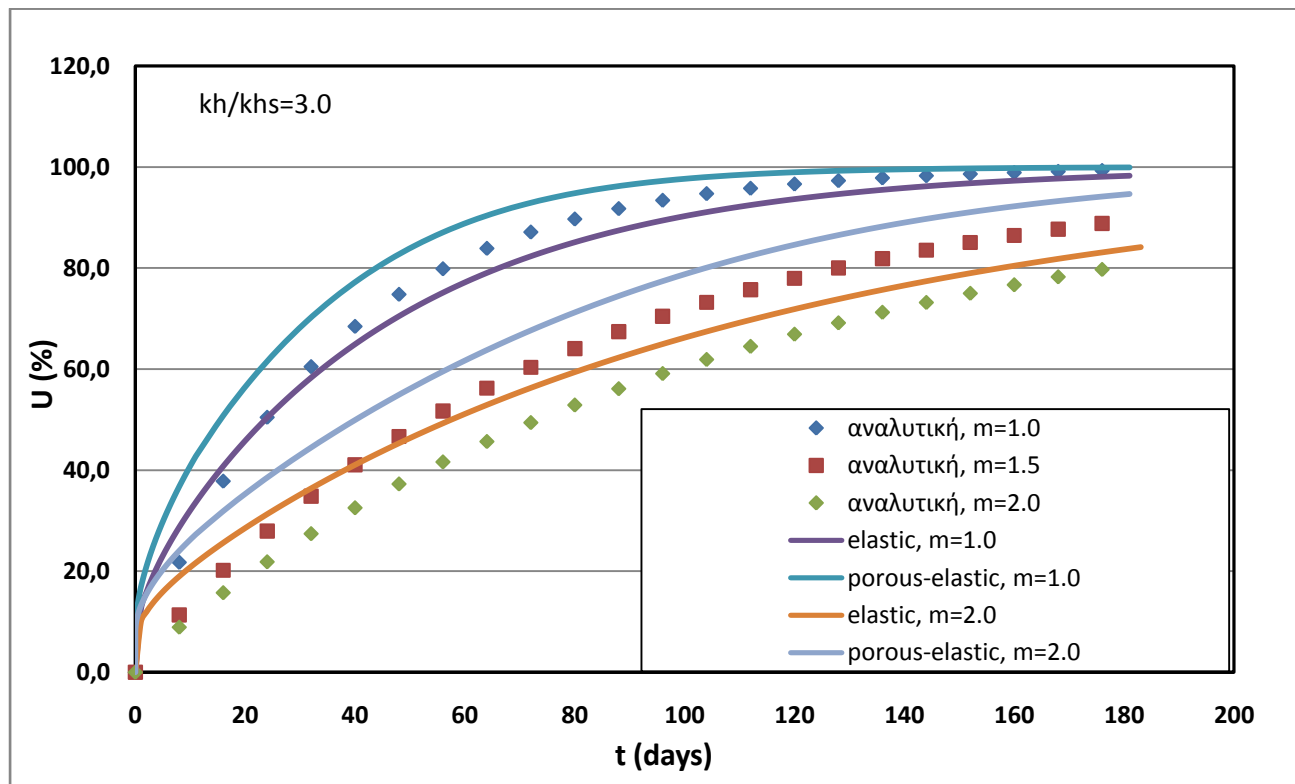
Συντελεστής μεγέθους m	Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
1.0	Αναλυτική	24	81
	FEM-Ελαστικότητα	23.7	98.8
	FEM-Ποροελαστικότητα	15.5	63
2.0	Αναλυτική	49.7	171
	FEM-Ελαστικότητα	41	167
	FEM-Ποροελαστικότητα	28.4	105

Όπως φαίνεται τόσο από το διάγραμμα όσο και από τον πίνακα, παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Ειδικότερα, στην περίπτωση του συντελεστή μεγέθους $m=2.0$, οι διαφορές είναι αυτές που τονίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Δηλαδή, η λύση που παίρνουμε από την ελαστική ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, εξελίσσεται αρχικά γρηγορότερα και σε κάποιο σημείο τέμνει την καμπύλη της αναλυτικής λύσης, με αποτέλεσμα ο τελικός χρόνος στερεοποίησης $t_{90\%}$ να είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από ότι στην αναλυτική. Στην περίπτωση όμως μη θεώρησης ζώνης αναμόχλευσης, αν και πάλι υπάρχει αντίστοιχη τομή στις καμπύλες των δύο λύσεων, ο τελικός χρόνος στερεοποίησης προκύπτει μεγαλύτερος κατά 22% περίπου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του πίνακα είναι ότι ο λόγος $t_{90\%}/t_{50\%}$, στην περίπτωση του συντελεστή

$m=1.0$ με θεώρηση ποροελαστικότητας, ξεπερνάει το 4, παρόλο που στις υπόλοιπες αναλύσεις κυμαίνεται σταθερά περί το 3.5.

Πέραν αυτών, χαρακτηριστικό του διαγράμματος είναι ότι η καμπύλη που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία με θεώρηση ποροελαστικότητας είναι γρηγορότερη από την καμπύλη της αναλυτικής λύσης που έχουμε λάβει για συντελεστή μεγέθους $m=1.5$. Αυτό, βέβαια, μπορεί να θεωρηθεί και αναμενόμενο, καθώς οι αποκλίσεις που διαπιστώθηκαν ήδη από το προηγούμενο κεφάλαιο μεταξύ των διαφορετικών συντελεστών m (απόκλιση 27%), είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις μεταξύ θεωρήσεων ελαστικότητας και ποροελαστικότητας.

Συγκρίνοντας, τέλος τις αποκλίσεις μεταξύ των δύο περιπτώσεων, δηλαδή για $m=1$ και $m=2$ για κάθε λύση, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Ενώ, όπως επισημάνθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για $m=2$ ο χρόνος στερεοποίησης $t_{90\%}$ είναι παραπάνω από διπλάσιος σε σχέση με το έδαφος χωρίς ζώνη διαταραχής, και οι δύο λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων δίνουν χρόνους με απόκλιση περίπου 68%. Η απόκλιση αυτή είναι σχεδόν ισοδύναμη με την απόκλιση που δίνει η αναλυτική λύση για $m=1$ και $m=1.5$. Δηλαδή, φαίνεται να υπάρχει υπερεκτίμηση της επιρροής του μεγέθους της ζώνης αναμόχλευσης στις αναλυτικές λύσεις.



Διάγραμμα 4.6: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για λόγους για μεγέθη ζώνης αναμόχλευσης $m=1.0$, $m=2.0$, και βαθμό διαταραχής $k_r/k_{rs}=3.0$.

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος που παίρνουμε για λόγο $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 3$ συνοψίζονται ως εξής:

Πίνακας4.6: Χρόνοι στερεοποίησης για μη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης και για μέγεθος ζώνης **m=2.0**.

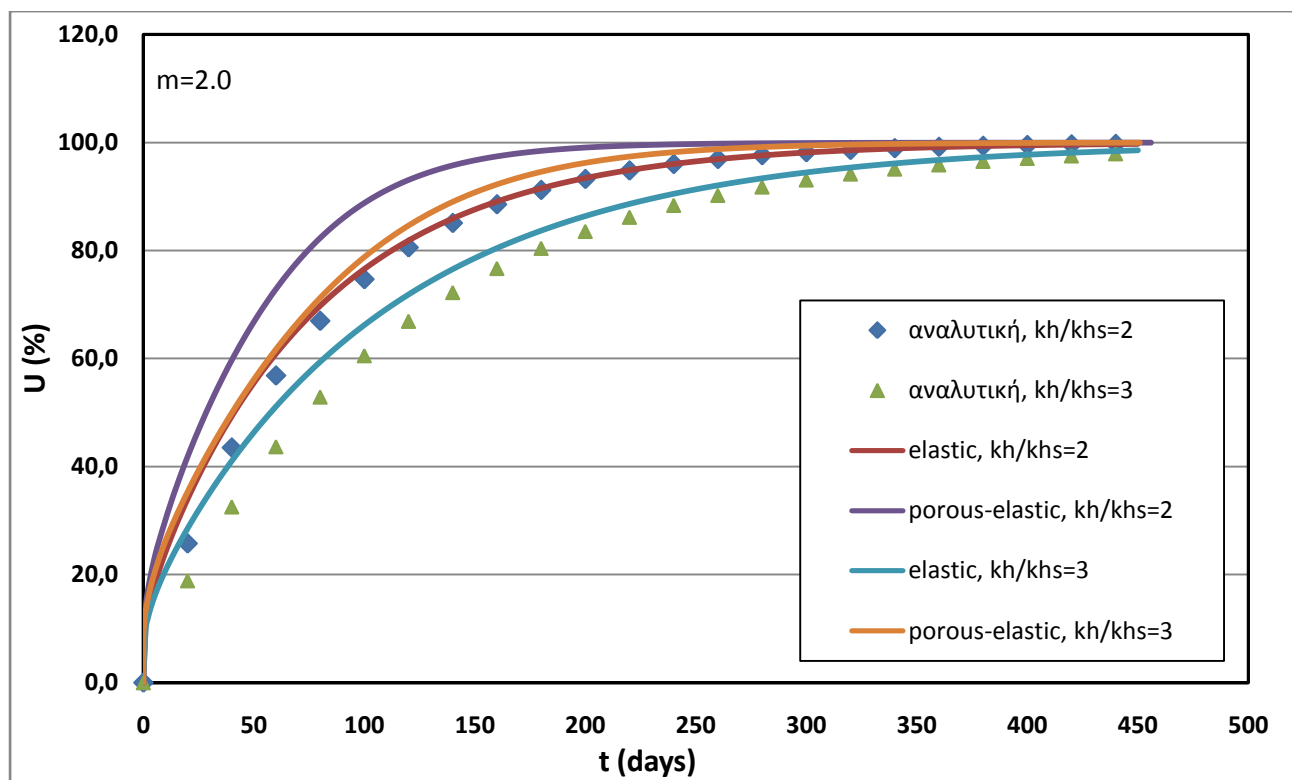
Συντελεστής μεγέθους m	Τρόπος Επίλυσης	t _{50%} (days)	t _{90%} (days)
1.0	Αναλυτική	24	81
	FEM-Ελαστικότητα	23.7	98.8
	FEM-Ποροελαστικότητα	15.5	63
2.0	Αναλυτική	73.6	258
	FEM-Ελαστικότητα	57.5	234
	FEM-Ποροελαστικότητα	40.1	146

Το διάγραμμα αυτό αποδεικνύει ότι με την αύξηση του λόγου οριζόντιας διαπερατότητας προς οριζόντια διαπερατότητα εντός της ζώνης αναμόχλευσης, οι αποκλίσεις στους χρόνους t_{50%} και t_{90%} μεταξύ των διαφορετικών λύσεων γίνονται εντονότερες. Είναι φανερό πως για m=2, ο χρόνος t_{90%} που υπολογίζεται από τα πεπερασμένα στοιχεία αποκλίνει περισσότερο και για την περίπτωση της ελαστικότητας και για την περίπτωση της ποροελαστικότητας και για αυτό θα εξετασθεί και στην επόμενη παράγραφο.

Διατηρείται, επίσης, η απόκλιση μεταξύ των περιπτώσεων m=1 και m=2. Ενώ για την αναλυτική λύση η απόκλιση είναι 217%, και για τις δύο λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων, η απόκλιση αυτή είναι περίπου 135%,

4.3.5 Διερεύνηση της Επιρροής του Βαθμού Διαταραχής της Οριζόντιας Διαπερατότητας εντός της Ζώνης Αναμόχλευσης στην Εξέλιξη της Στερεοποίησης

Στην ενότητα αυτή, εξετάζονται λεπτομερέστερα οι διαφορές που έχουν παρατηρηθεί για διαφορετικούς βαθμούς διαταραχής της ζώνης αναμόχλευσης, ή ομοίως, για διαφορετικούς λόγους οριζόντιας προς οριζόντια διαπερατότητα εντός της ζώνης αυτής. Όπως και στο 3^ο κεφάλαιο, μορφώνεται το διάγραμμα για m=2.0, δηλαδή για τη μέγιστη διάμετρο της ζώνης διαταραχής, όπως έχουμε δεχθεί για το δεδομένο πρόβλημα. Τα υπόλοιπα μεγέθη που υπεισήλθαν στους υπολογισμούς είναι : E_s = 10 MPa [ή κ= 0.00834], k_v=10⁻⁵ m/day = 1.157·10⁻¹⁰ m/sec , $\frac{k_h}{k_v} = 2$.



Διάγραμμα 4.7: Καμπύλες στερεοποίησης αναλυτικών λύσεων και πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα και ποροελαστικότητα για μέγεθος ζώνης αναμόχλευσης $m=2.0$, και βαθμούς διαταραχής $k_h/k_{hs}=2.0$, $k_h/k_{hs}=3.0$.

Με βάση τα στοιχεία του διαγράμματος, συμπληρώνεται και ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 4.7: Χρόνοι στερεοποίησης για μέγεθος ζώνης αναμόχλευσης $m=2.0$, και βαθμούς διαταραχής $k_h/k_{hs}=2.0$, $k_h/k_{hs}=3.0$.

Λόγος $\frac{k_h}{k_{h-s}}$	Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
2.0	Αναλυτική	49.7	171
	FEM-Ελαστικότητα	41	167
	FEM-Ποροελαστικότητα	28.4	105
3.0	Αναλυτική	73.6	258
	FEM-Ελαστικότητα	57.5	234
	FEM-Ποροελαστικότητα	40.1	146

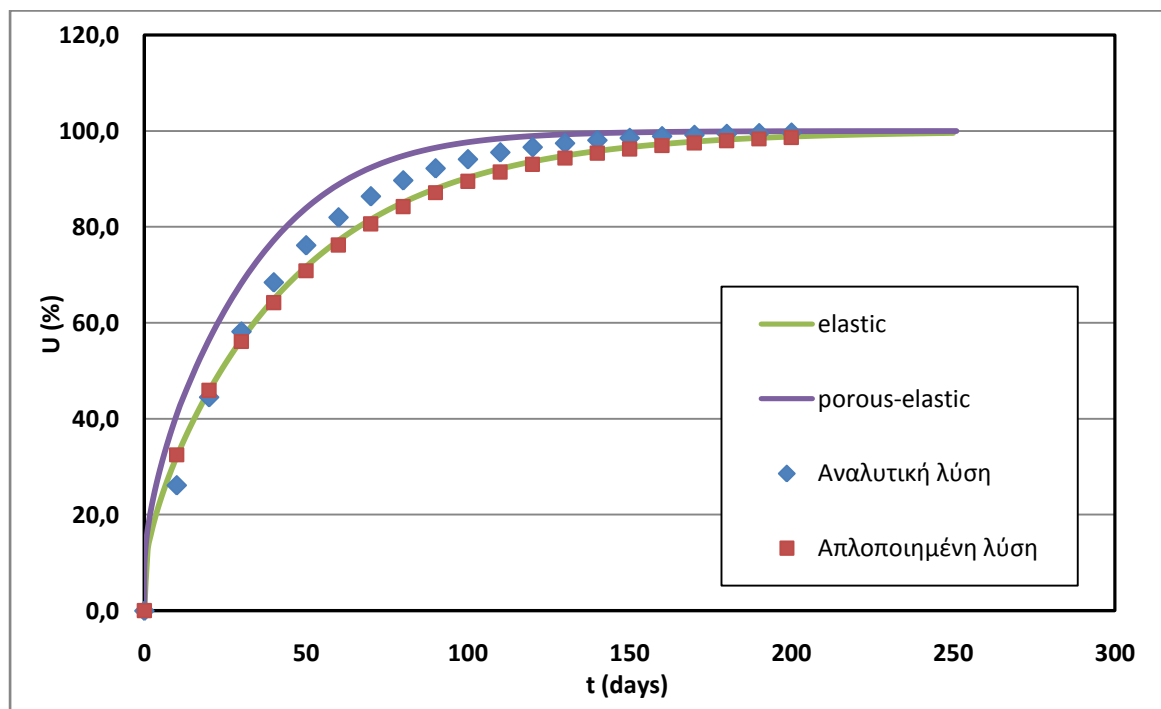
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι και για τους δύο λόγους $\frac{k_h}{k_{h-s}}$, η λύση των πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικότητα, εξελίσσεται γρηγορότερα από ότι η αναλυτική λύση. Δεν παρατηρείται τομή στις δύο καμπύλες με αποτέλεσμα, οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο λύσεων να είναι έντονες ειδικά στην αρχή όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των χρόνων $t_{50\%}$. Σε σχέση με προηγούμενα διαγράμματα, οι αποκλίσεις στους χρόνους της ποροελαστικότητας είναι, συνακόλουθα, ακόμη πιο αυξημένες και συγκεκριμένα, μεγαλύτερες από 40% σε σχέση με τους χρόνους των αναλυτικών λύσεων. Χαρακτηριστικό

είναι ότι με την αύξηση του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}}$, αυξάνουν και οι αποκλίσεις μεταξύ των χρόνων $t_{50\%}$ και $t_{90\%}$.

Τέλος, παρατηρείται ότι ενώ ο χρόνος στερεοποίησης $t_{90\%}$ που δίνει ο λόγος $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 3$, αποκλίνει από τη λύση του λόγου $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$ κατά 50% σύμφωνα με την αναλυτική λύση, στα πεπερασμένα στοιχεία η αντίστοιχη απόκλιση είναι 40% τόσο για θεώρηση γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας όσο και για θεώρηση ποροελαστικότητας.

4.3.6 Σύγκριση Αναλυτικής Μεθοδολογίας και Απλοποιημένης Μεθοδολογίας Υπολογισμού Οριζόντιας Στράγγισης

Στην παράγραφο αυτή, αναζητούνται διαφορές μεταξύ των λύσεων χωρίς θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης. Μορφώνεται εκ νέου η απλοποιημένη λύση υπολογισμού της εξέλιξης της στερεοποίησης (Bowles, 1997) προκειμένου να εντοπιστούν οι διαφορές της με τις λύσεις που δίνουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Το διάγραμμα έχει μορφωθεί για τα εξής δεδομένα: $E_s = 10 \text{ MPa}$ [ή $\kappa = 0.00834$], $k_v = 10^{-4} \text{ m/day} = 1.157 \cdot 10^{-9} \text{ m/sec}$, $\frac{k_h}{k_v} = 2$.



Διάγραμμα 4.8: Σύγκριση αναλυτικής μεθοδολογίας, απλοποιημένης λύσης και προσομοιωμάτων ελαστικότητας και ποροελαστικότητας χωρίς θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης.

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος συγκεντρώνονται στον πίνακα:

Πίνακας 4.8: Σύγκριση χρόνων στερεοποίησης από αναλυτική μεθοδολογία, απλοποιημένη λύση και προσομοιωμάτα ελαστικότητας και ποροελαστικότητας χωρίς θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης.

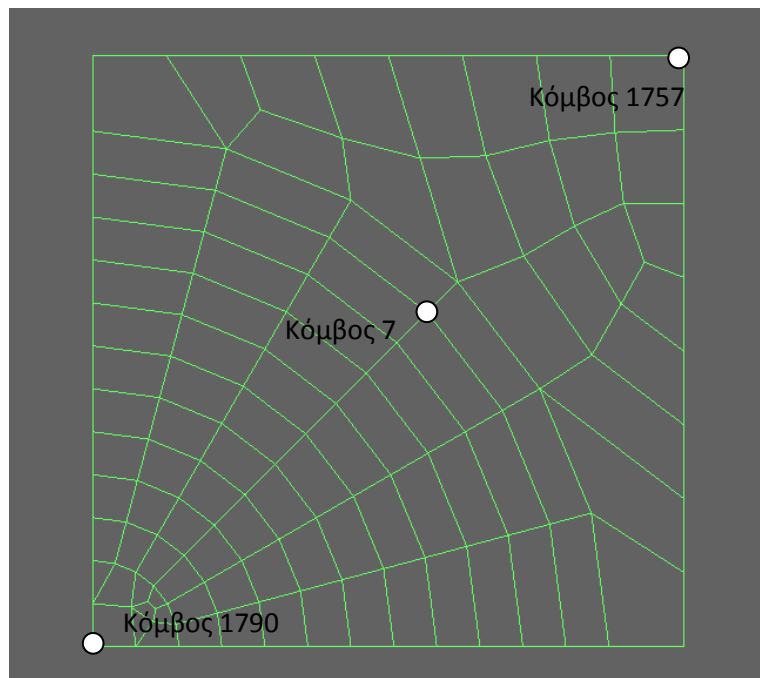
Τρόπος Επίλυσης	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
Αναλυτική	23.7	81
Απλοποιημένη	23.7	103
FEM-Ελαστικότητα	23.7	99
FEM-Ποροελαστικότητα	15.5	63

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 4.3.4, χωρίς τη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης, παρατηρούνται έντονες αποκλίσεις μεταξύ της αναλυτικής λύσης και της ελαστικής λύσης των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η λύση του Abaqus για ελαστικά χαρακτηριστικά του εδάφους, οδηγεί σε χρόνο κατά 20% μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτόν της αναλυτικής λύσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η λύση που δίνουν τα πεπερασμένα στοιχεία, τουλάχιστον για το δεδομένο πρόβλημα, να είναι πολύ πιο κοντά στην απλοποιημένη μέθοδο υπολογισμού της ακτινικής στράγγισης. Από τον πίνακα προκύπτει ότι το αποτέλεσμα που δίνει η απλοποιημένη μέθοδος για τον τελικό χρόνο στερεοποίησης είναι το πιο συντηρητικό, ενώ όπως έχει διαπιστωθεί και από όλες τις προηγούμενες αναλύσεις, η λύση για ποροελαστικά χαρακτηριστικά του εδάφους, εξελίσσεται ταχύτερα.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟ

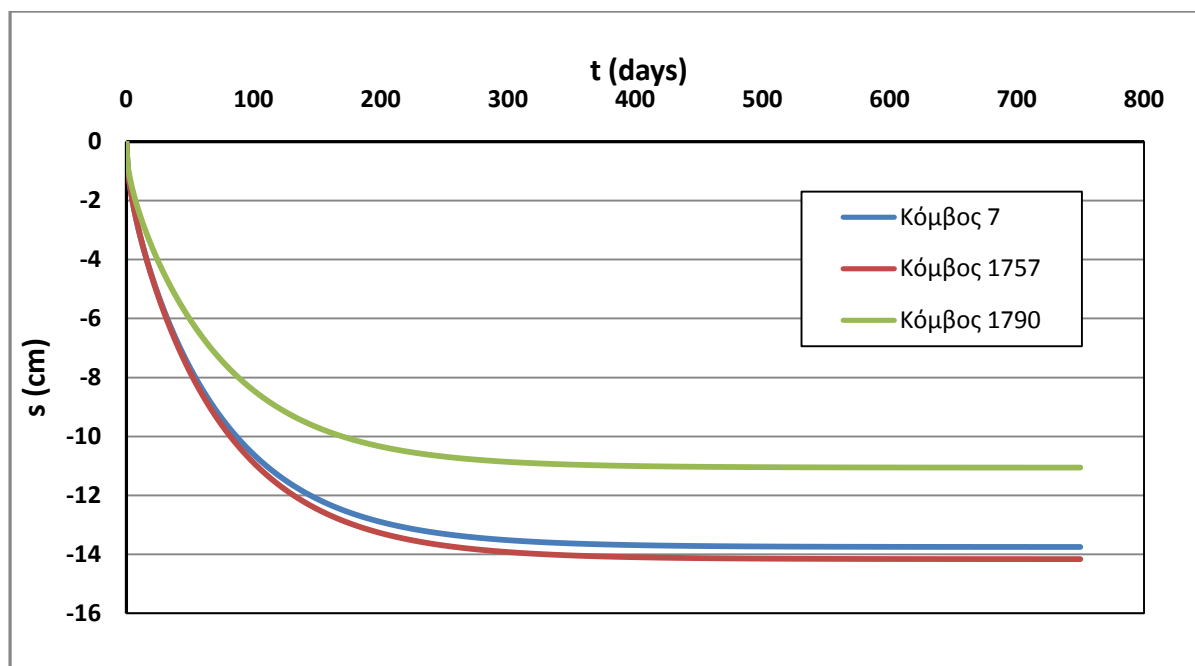
Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, έχουν προκύψει από αναλύσεις στις οποίες τα χαρακτηριστικά συμπεριστασίας του εδάφους ελήφθησαν σταθερά για τον χαλικοπάσσαλο και το περιβάλλον έδαφος. Πέραν αυτών όμως, διεξήχθησαν αναλύσεις στις οποίες δόθηκαν στον χαλικοπάσσαλο διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν, αφορούν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που έγιναν μόνο με βάση τη θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις οποίες μεταβλήθηκε το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου, ενώ ο λόγος Poisson λήφθηκε σταθερός και ίσος με 0.3. Αναφορικά με τη μεταβολή του μέτρου μονοδιάστατης συμπεριστασίας του χαλικοπασσάλου, πρέπει να επισημανθεί πως το αυτό συνήθως εκφράζεται ως συνάρτηση του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης του περιβάλλοντος εδάφους, αφού υπάρχει

αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Γενικά, ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου προς το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους – ή αντίστοιχα ο λόγος των μέτρων μονοδιάστατης συμπίεσης στην περίπτωση που ο λόγος Poisson μπορεί να ληφθεί σταθερός για τα δύο υλικά – κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25.



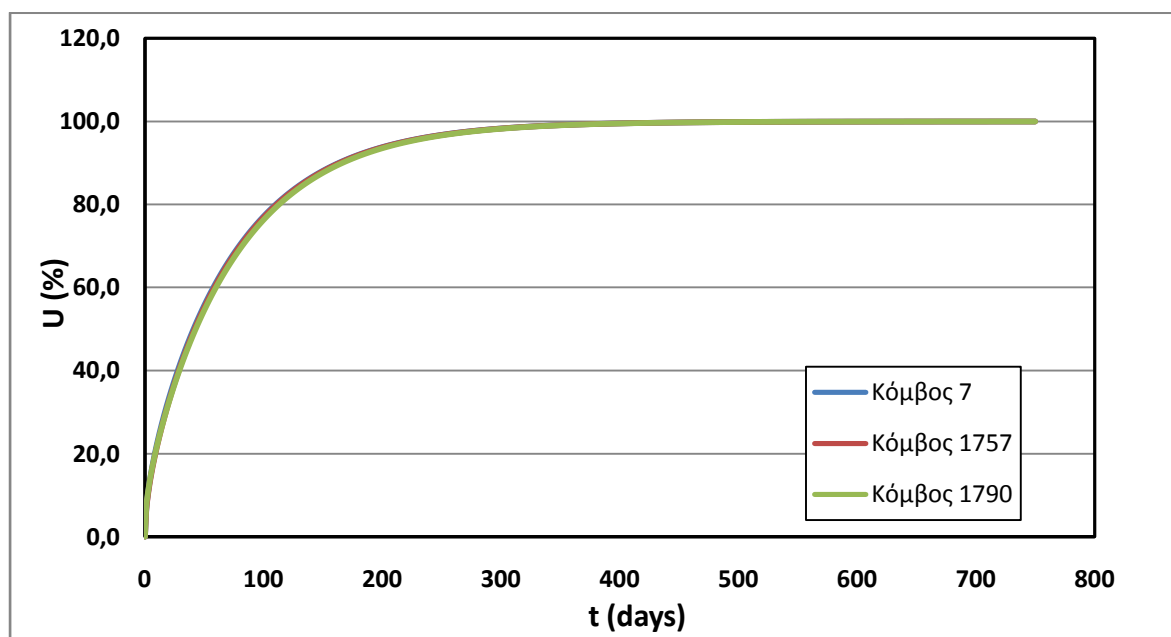
Εικόνα 4.3: Κόμβοι 7, 1790 και 1757 στην επιφάνεια του προσομοιώματος.

Στο παρακάτω διάγραμμα, θεωρούμε τον λόγο των μέτρων ελαστικότητας ίσο με 20. Έχοντας λοιπόν, ένα έδαφος μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5$ MPa, θεωρούμε πως ο χαλικοπασσάλος έχει $E_s=100$ MPa, μέγεθος το οποίο είναι και τυπικό για έδαφος αποτελούμενο από χαλίκια. Πραγματοποιούμε μία ανάλυση με τα εξής δεδομένα: $\frac{k_h}{k_v} = 2$, $m=1.5$, $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$. Στο διάγραμμα, παρουσιάζονται οι καθιζήσεις τριών κόμβων συναρτήσει του χρόνου. Όπως φαίνεται και στην κάτοψη της εικόνας, ο κόμβος 1790 με την μικρότερη καθίζηση βρίσκεται στην κορυφή του χαλικοπασσάλου, ο κόμβος 7 περίπου στο μέσο της κάτοψης του μοντέλου και ο κόμβος 1757 βρίσκεται στη μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο χαλικοπασσάλων.



Διάγραμμα 4.9: Εξέλιξη καθιζήσεων των κόμβων 7, 1757, 1790 για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης εδάφους $E_s=5 \text{ MPa}$ και μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης χαλικοπασσάλου $E_s=100 \text{ MPa}$.

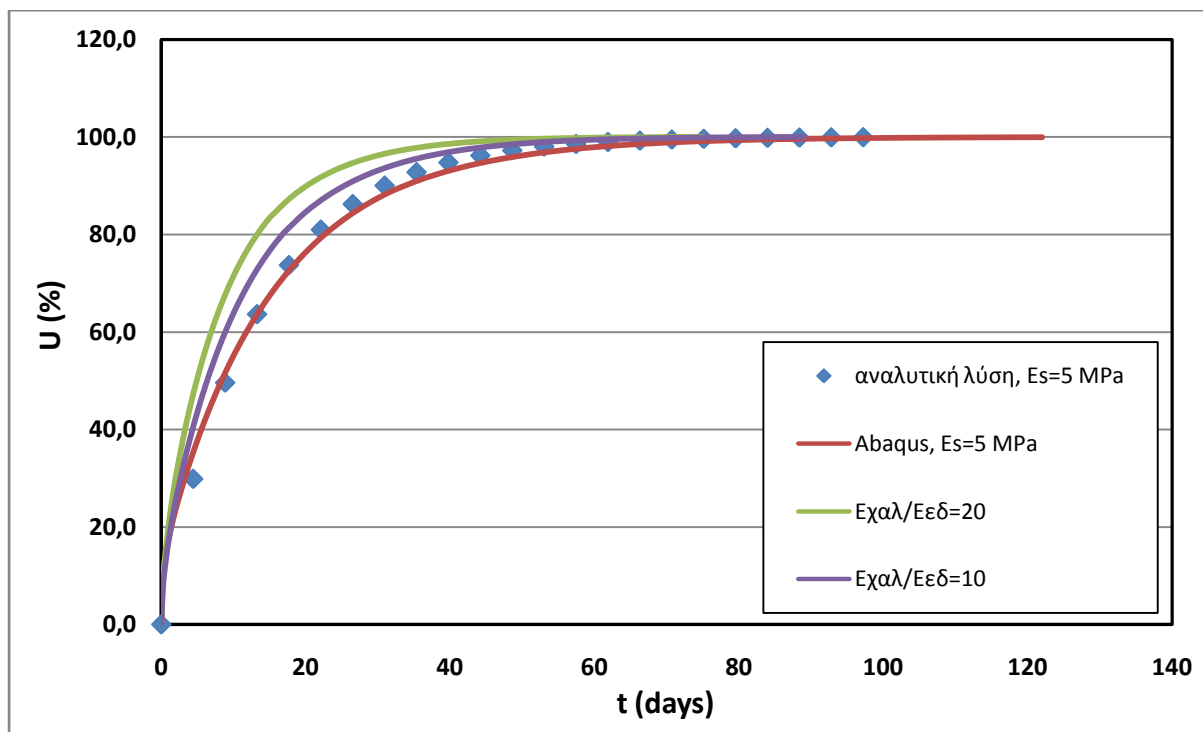
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι διαφορές στις τελικές καθιζήσεις είναι σχετικά σημαντικές. Υπό το φορτίο των 100 kPa, ο κόμβος που αντιστοιχεί στην κορυφή του χαλικοπασσάλου, μετακινείται κατακόρυφα κατά 11cm, ενώ η καθίζηση του κόμβου 1757 είναι 14.2 cm. Εντούτοις, όπως φαίνεται από το προηγούμενο διάγραμμα και πιστοποιείται από το επόμενο, η εξέλιξη του φαινομένου είναι απόλυτα κοινή και για τους τρεις κόμβους και συνακόλουθα για όλη την επιφάνεια του προσομοιώματος.



Διάγραμμα 4.10: Εξέλιξη στερεοποίησης των κόμβων 7, 1757, 1790 για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης εδάφους $E_s=5 \text{ MPa}$ και μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης χαλικοπασσάλου $E_s=100 \text{ MPa}$.

Οι διαφορετικές τελικές μετακινήσεις, που παρατηρήθηκαν στο παραπάνω διάγραμμα, δείχνουν ότι αν το μέγεθος τους μεταβάλλεται με τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου, τότε ενδεχομένως να επηρεάζεται και η εξέλιξη της στράγγισης από τη θεώρηση του λόγου $E_{χαλ}/E_{εδ}$.

Στο παρακάτω διάγραμμα, μορφώνονται οι λύσεις που έχουν προκύψει αναλυτικά και από πεπερασμένα στοιχεία για μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=5$ MPa, ενιαίο για το έδαφος και τον χαλικοπάσσαλο, αλλά και οι λύσεις που προκύπτουν όταν ο λόγος $E_{χαλ}/E_{εδ}$ θεωρηθεί ίσος με 10 και 20, διατηρώντας σταθερό το μέτρο E_s του εδάφους στα 5 MPa.



Διάγραμμα 4.11: Σύγκριση της εξέλιξης της στερεοποίησης για ενιαίο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης εδάφους και χαλικοπασσάλου και για λόγους $E_{χαλ}/E_{εδ}=10$ και $E_{χαλ}/E_{εδ}=20$.

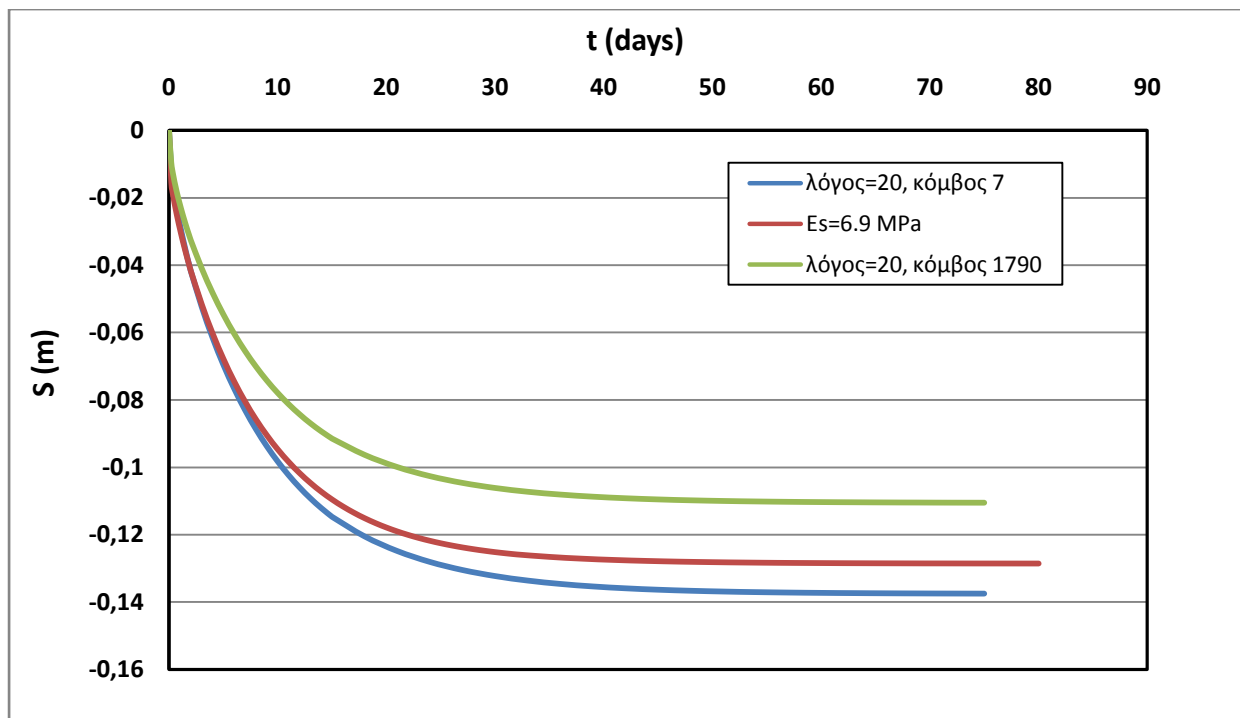
Με βάση το διάγραμμα αυτό συμπληρώνεται ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 4.9: Χρόνοι στερεοποίησης για ενιαίο μέτρο ελαστικότητας εδάφους-χαλικοπασσάλου και για λόγους $E_{χαλ}/E_{εδ}=10$ και $E_{χαλ}/E_{εδ}=20$.

	$t_{50\%}$ (days)	$t_{90\%}$ (days)
Αναλυτική λύση, $E_s=5$ MPa	8.9	30.9
$E_{χαλ}/E_{εδ}=1$	8.3	33.7
$E_{χαλ}/E_{εδ}=10$	6.4	25.4
$E_{χαλ}/E_{εδ}=20$	4.9	20.2

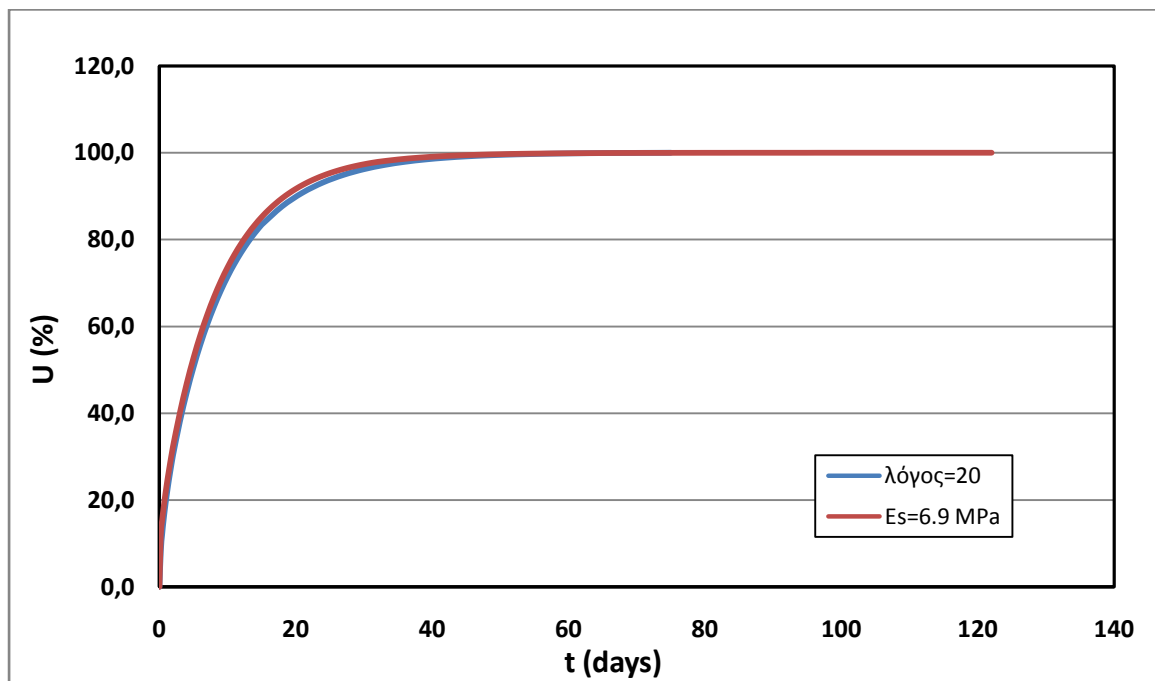
Οι διαφορές μεταξύ αναλυτικής λύσης και πεπερασμένων στοιχείων έχουν διαπιστωθεί ήδη στην προηγούμενη ενότητα. Από το διάγραμμα αυτό όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου, τόσο ταχύτερα εξελίσσεται η στράγγιση. Συγκεκριμένα, ο χρόνος που αντιστοιχεί τόσο στο 50% όσο και στο 90% της στερεοποίησης, προκύπτει κατά 40% περίπου μικρότερος σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο που προκύπτει από την ανάλυση με ενιαίο μέτρο ελαστικότητας.

Τέλος, διερευνάται κατά πόσον αυτή η επιρροή του διαφορετικού μέτρου παραμορφωσιμότητας μπορεί να αντισταθμιστεί από τη θεώρηση ενός σταθμισμένου μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης. Από την ανάλυση που έγινε παραπάνω με λόγο μέτρων ελαστικότητας $E_{\text{χαλ}}/E_{\text{εδ}} = 20$, υπολογίζεται η μέση καθίζηση της επιφάνειας του προσομοιώματος, βρίσκοντας τον μέσο όρο των τελικών καθιζήσεων των 113 κόμβων της επιφάνειας του μοντέλου. Η ανάλυση αυτή έχει πραγματοποιηθεί για έδαφος $E_s=5$ MPa και χαλικοπάσσαλο $E_s=100$ MPa. Η μέση καθίζηση της επιφάνειας είναι 12.9 cm. Αναζητείται, λοιπόν, κοινό μέτρο παραμορφωσιμότητας εδάφους και χαλικοπασσάλου που να δίνει καθίζηση ίση με τη μέση καθίζηση της προηγούμενης ανάλυσης. Η ισοδυναμία των τελικών καθιζήσεων δίνει ένα μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s=9.33$ MPa. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η εξέλιξη των καθιζήσεων συναρτήσει του χρόνου για το σταθμισμένο μέτρο συμπίεστικότητας. Η καμπύλη περιβάλλεται από τις αντίστοιχες καμπύλες δύο κόμβων, του κόμβου 1790 στην επιφάνεια του εδάφους και του κόμβου 7 στο κέντρο της κάτοψης του μοντέλου, οι οποίες έχουν προκύψει από την ανάλυση για λόγο μέτρων ελαστικότητας ίσο με 20.



Διάγραμμα 4.12: Σύγκριση της εξέλιξης της καθίζησης για ενιαίο, σταθμισμένο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης εδάφους και χαλικοπασσάλου και της καθίζησης των κόμβων 7 και 1790 για λόγο $E_{χαλ}/E_{εδ}=20$.

Τέλος, μορφώνονται σε ένα διάγραμμα οι καμπύλες εξέλιξης της στερεοποίησης για τις δύο περιπτώσεις αναλύσεων, αυτής για το σταθμισμένο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης και αυτής με $E_{χαλ}/E_{εδ} = 20$ προκειμένου να εντοπιστούν ενδεχόμενες διαφορές στην εξέλιξη του φαινομένου.



Διάγραμμα 4.13: Σύγκριση της εξέλιξης της στερεοποίησης για ενιαίο, σταθμισμένο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης εδάφους και χαλικοπασσάλου και λόγο $E_{χαλ}/E_{εδ}=20$.

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα από το διάγραμμα, εκτός από την τελική καθίζηση, και η εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης είναι ίδια και για τις δύο περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, η επιρροή της δυσκαμψίας του χαλικοπασσάλου στην εξέλιξη της στράγγισης, μπορεί να ληφθεί υπόψη και με την υιοθέτηση ενός ενιαίου μέτρου ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους.

4.5 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος της οριζόντιας στράγγισης που έχει οριστεί, με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστατικά προσομοιώματα συμπεριφοράς του εδάφους, η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα και η ποροελαστικότητα. Από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν με τα πεπερασμένα στοιχεία, μπορούν συγκεντρωτικά να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων που έγιναν έχοντας θεωρήσει ότι τα εδαφικά υλικά συμπεριφέρονται με βάση τη θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, προσεγγίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις λύσεις που βασίστηκαν στις αναλυτικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί από τους Hansbo, Rendulic και Carillo. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των καμπύλων αυτών είναι κατά κανόνα μικρές, συνήθως μικρότερες του 10%. Οι αποκλίσεις αυτές γενικά οφείλονται στο γεγονός ότι οι στρώσεις του εδάφους που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, εκεί δηλαδή που το νερό μπορεί να διαφύγει ευκολότερα προς την επιφάνεια παρά προς τον χαλικοπάσσαλο, στραγγίζουν ταχύτερα και συνεπώς, η εξέλιξη του φαινομένου είναι γρηγορότερη. Στα πεπερασμένα στοιχεία, η συμπεριφορά αυτή του εδάφους επιβεβαιώνεται. Οι αναλυτικές λύσεις, αντίθετα, λαμβάνουν υπόψη τους την κατακόρυφη στράγγιση μόνο μέσω της σχέσης του Carillo (εξίσωση 2.17).
- Στην ταχεία στράγγιση των επιφανειακών στρωμάτων αποδίδεται και η πολύ μεγάλη κλίση των καμπυλών εξέλιξης της στερεοποίησης – στην αρχή του φαινομένου – που λαμβάνουμε από τα πεπερασμένα στοιχεία. Η λειτουργία της κατακόρυφης στράγγισης για τα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα, επιταχύνει την εξέλιξη των κατακόρυφων παραμορφώσεων στις περιοχές αυτές, με αποτέλεσμα σημαντικό μέρος του βαθμού στερεοποίησης να συντελείται πάρα πολύ γρήγορα.
- Το γεγονός ότι η κατακόρυφη στράγγιση παίζει πιο σημαντικό ρόλο στα πεπερασμένα στοιχεία, φαίνεται και από το εξής: Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με χαρακτηριστικά ζώνης αναμόχλευσης που θεωρούν μικρή

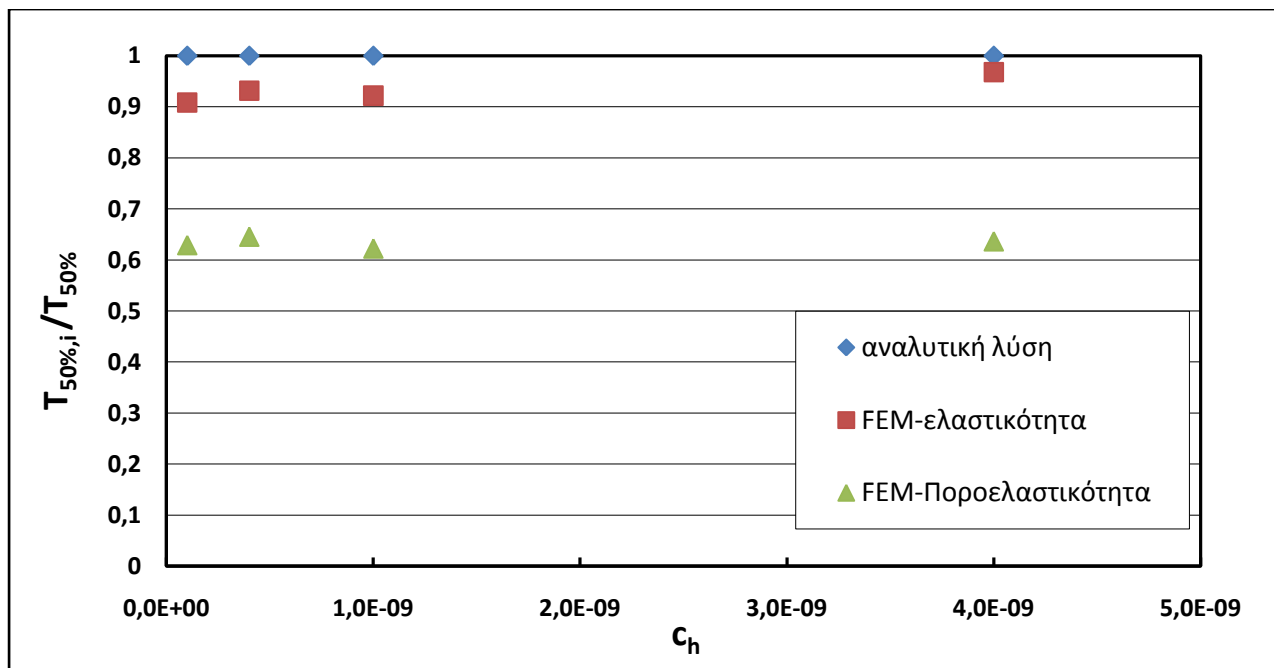
διαταραχή του εδάφους, τα πεπερασμένα στοιχεία εκτιμούν τελικό χρόνο στερεοποίησης πολύ κοντά στον χρόνο που προκύπτει από τις αναλυτικές λύσεις. Για αυτό το λόγο, και εξαιτίας της πολύ απότομης αρχικής κλίσης της καμπύλης, παρατηρείται τομή των καμπυλών των δύο λύσεων σε κάποιο σημείο. Όταν όμως δοθούν στη ζώνη αναμόχλευσης, παράμετροι που αντιστοιχούν σε έντονη διαταραχή του εδάφους (π.χ. μεγάλος συντελεστής m , μεγάλος λόγος οριζόντιων διαπερατοτήτων), τότε η καμπύλη εξέλιξης της στερεοποίησης που λαμβάνεται από τα πεπερασμένα στοιχεία κινείται σταθερά στα αριστερά της καμπύλης της αναλυτικής λύσης, χωρίς να την τέμνει και δίνοντας μεγάλες αποκλίσεις για μεγάλους βαθμούς διαταραχής. Αυτό δείχνει ότι, εάν η οριζόντια διαπερατότητα μειωθεί περεταιίρω εντός της διαταραγμένης ζώνης, η «συνιστώσα» της κατακόρυφης στράγγισης γίνεται σημαντικότερη, γεγονός που αποδίδεται περισσότερο από τα πεπερασμένα στοιχεία.

- Αναφορικά με τις αναλύσεις που έγιναν στα πλαίσια των καταστατικών σχέσεων της ποροελαστικότητας, όλες καταλήγουν σε σημαντικά ταχύτερη εξέλιξη του φαινομένου. Αυτό κρίνεται φυσιολογικό αν αναλογιστεί κανείς τη φύση του καταστατικού προσομοιώματος. Στην ποροελαστικότητα, σε αντίθεση με την γραμμική ισότροπη ελαστικότητα, δεν θεωρούμε σταθερό μέτρο ελαστικότητας του εδάφους. Όταν το έδαφος φορτίζεται, τότε στραγγίζει και συμπιέζεται, μειώνοντας το δείκτη πόρων του. Ως εκ τούτου, η συμπιεστότητα του αυξάνεται σε κάθε βήμα στερεοποίησης που εκτυλίσσεται στην ανάλυση του Abaqus, με αποτέλεσμα να αυξάνει διαρκώς και ο συντελεστής στερεοποίησης του εδάφους. Για το λόγο αυτό, οι αποκλίσεις που παρατηρούμε στους χρόνους στερεοποίησης σε σύγκριση τόσο με τις αναλυτικές λύσεις όσο και με τις ελαστικές λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων κυμαίνονται μεταξύ 35% και 45%.
- Συγκρίνοντας, τις καμπύλες των αναλυτικών, ελαστικών και ποροελαστικών λύσεων, μπορούμε ακόμη να παρατηρήσουμε ότι οι καμπύλες που προκύπτουν από τις λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων με θεώρηση ελαστικότητας, εκτός της αρχικής απότομης κλίσης τους, γενικά χαρακτηρίζονται από ομαλότερες κλίσεις. Αντίθετα, η μορφή των καμπυλών που λαμβάνονται από τις αναλυτικές λύσεις αλλά και από τις αναλύσεις της ποροελαστικότητας, έχουν εντονότερες κλίσεις μετά το 50% της στερεοποίησης. Αυτό φαίνεται και αν παρατηρηθεί ο λόγος των χρόνων $t_{90\%}/t_{50\%}$, ο οποίος είναι εν γένει μεγαλύτερος στις λύσεις που προκύπτουν από την ελαστικότητα.

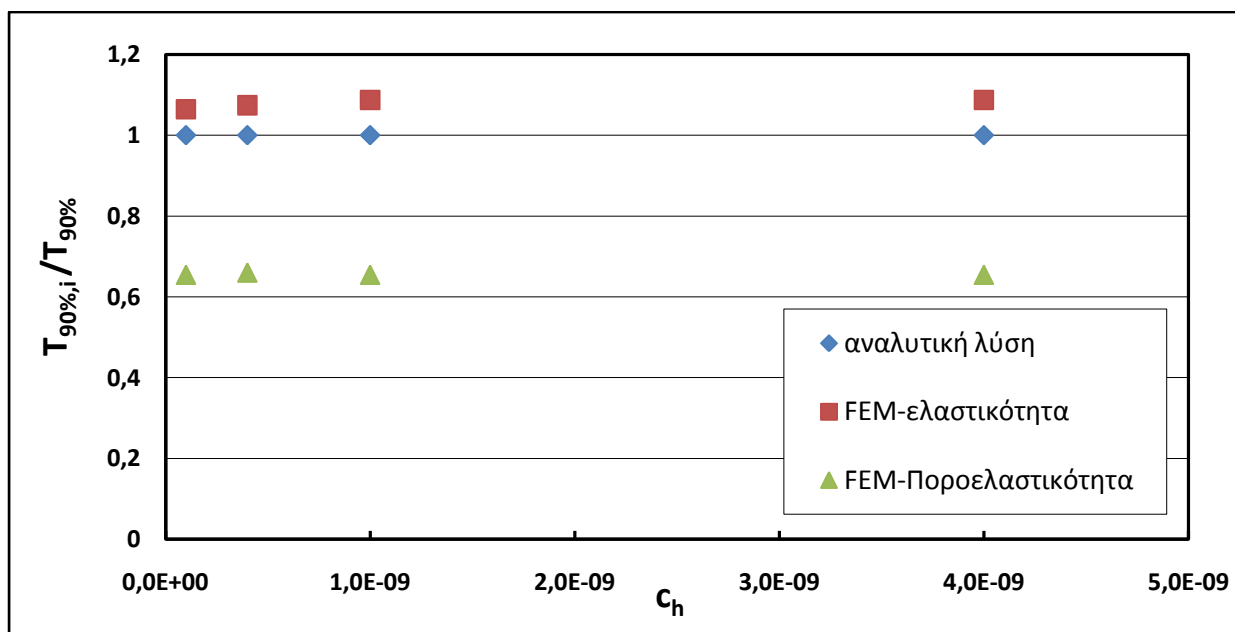
Όσον αφορά στη διερεύνηση που έγινε στο κεφάλαιο αυτό, και σε αντιπαραβολή με τη διερεύνηση του 3^{ου} κεφαλαίου, συνοψίζονται τα παρακάτω:

- Ενώ σύμφωνα με τις αναλυτικές λύσεις, η μεταβολή της διαπερατότητας και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης προκαλούσε ανάλογη μεταβολή και στον εκτιμώμενο χρόνο στερεοποίησης, από τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται ότι η αναλογία αυτή δεν είναι απόλυτη. Αν και η προσέγγιση στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πολύ καλή, το γεγονός ότι ακόμη και για την περίπτωση της ελαστικότητας παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφοροποίηση σε ορισμένες αναλύσεις, δεν επιβεβαιώνει τον παραπάνω ισχυρισμό.
- Οι αποκλίσεις που λαμβάνουμε από τις αναλυτικές λύσεις μεταξύ διαφορετικών λόγων οριζόντιας προς κατακόρυφης διαπερατότητας του εδάφους, διατηρούνται και στις λύσεις των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό συνδέεται και με το γεγονός ότι με τον κάρναβο των χαλικοπασσάλων που έχει προ-επιλεχθεί, η ακτινική στράγγιση είναι τόσο σημαντική, ώστε για παράδειγμα ο διπλασιασμός της οριζόντιας διαπερατότητας να υποδιπλασιάζει σχεδόν τον απαιτούμενο χρόνο στερεοποίησης σε κάθε λύση που παρουσιάστηκε.
- Τα πεπερασμένα στοιχεία δείχνουν σημαντικά μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή των χαρακτηριστικών της ζώνης αναμόχλευσης. Η μείωση των αποκλίσεων μεταξύ των διαφορετικών βαθμών διαταραχής της ζώνης (λόγων οριζόντιων διαπερατοτήτων) δεν είναι τόσο σημαντική όσο είναι η μείωση στις αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ λύσεων που λαμβάνουν διαφορετικά μεγέθη διαταραγμένης ζώνης. Ειδικότερα, στη διερεύνηση της επιρροής του συντελεστή μεγέθους m στην εξέλιξη της στερεοποίησης, οι αναλύσεις του Abaqus υπολογίζουν αποκλίσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε μικρότερα μεγέθη ζώνης αναμόχλευσης σύμφωνα με τις αναλυτικές σχέσεις.
- Αποδεικνύεται ότι, χωρίς τη θεώρηση ζώνης αναμόχλευσης, η συντηρητική απλοποιημένη μέθοδος που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, δίνει αποτελέσματα πιο κοντά σε αυτά των πεπερασμένων στοιχείων από ότι οι αναλυτικές λύσεις. Εάν το γεγονός αυτό δεν είναι χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου προβλήματος και του προσομοιώματος που έχει μορφωθεί στα πλαίσια αυτού, τότε με την εκλογή μιας σταθμισμένης τιμής της οριζόντιας διαπερατότητας - ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της ζώνης αναμόχλευσης - καθίσταται ευχερέστερος ο υπολογισμός των απαιτούμενων χρόνων στερεοποίησης.

Οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ των αναλυτικών επιλύσεων και των αναλύσεων με το Abaqus (ελαστικότητα και ποροελαστικότητα) μπορούν να αποτυπωθούν και στα διαγράμματα 4.14 και 4.15. Σε αυτά, λαμβάνοντας τα αποτελέσματα αναλύσεων με διαφορετικές τιμές διαπερατοτήτων και μέτρων μονοδιάστατης συμπίεσης, παρουσιάζεται η απόκλιση των διαφόρων λύσεων από τις αναλυτικές που παρουσιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο.



Διάγραμμα 4.14: Σύγκριση των χρόνων στερεοποίησης 50% στερεοποίησης μεταξύ πεπερασμένων στοιχείων και αναλυτικής λύσης συναρτήσει του συντελεστή οριζόντιας στερεοποίησης c_h .



Διάγραμμα 4.14: Σύγκριση των χρόνων στερεοποίησης 90% στερεοποίησης μεταξύ πεπερασμένων στοιχείων και αναλυτικής λύσης συναρτήσει του συντελεστή οριζόντιας στερεοποίησης c_h .

Και στα δύο παραπάνω διαγράμματα, με $T_{50\%}$ και $T_{90\%}$ συμβολίζεται ο αντίστοιχος αδιαστατοποιημένος χρόνος στερεοποίησης που έχει υπολογιστεί από την αναλυτική λύση και αντιστοιχεί στον χρονικό παράγοντα που έχει οριστεί από την εξίσωση 2.16. Αντίστοιχα, $T_{50\%,i}$ και $T_{90\%,i}$ είναι οι παράγοντες που αντιστοιχούν στην εκάστοτε λύση πεπερασμένων στοιχείων. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα αυτά, οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφόρων λύσεων μπορούν, απλοποιητικά, να θεωρηθούν ανεξάρτητες των χαρακτηριστικών των εκάστοτε προβλημάτων. Αναλυτικότερα, είναι φανερό ότι οι χρόνοι

στερεοποίησης $t_{90\%}$ και $t_{50\%}$, όπως υπολογίζονται με θεώρηση ποροελαστικότητας, κυμαίνονται σταθερά μεταξύ 60% και 65% των αντίστοιχων χρόνων που προκύπτουν από την αναλυτική λύση, ανεξάρτητα από τα αρχικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Το ίδιο παρατηρείται και για τη λύση της ελαστικότητας. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τα πεπερασμένα στοιχεία δίνουν σταθερά μεγαλύτερους χρόνους στερεοποίησης $t_{90\%}$ από τις αναλυτικές λύσεις, παρόλο που το 50% της στερεοποίησης συντελείται ταχύτερα σύμφωνα με τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν με τον κώδικα Abaqus.

Τέλος, αναφορικά με τις αναλύσεις που διεξήχθησαν με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η διαφορετική συμπίεστικότητα του χαλικοπασσάλου, η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη από τις αναλυτικές λύσεις των Hansbo, Rendulic και Carillo, επηρεάζει και την εξέλιξη της στερεοποίησης.
- Εάν η επιρροή αυτή αγνοηθεί, τότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι συντηρητικά. Ωστόσο, για ακριβέστερους και υπολογισμούς με χρήση των αναλυτικών μεθοδολογιών, είναι δυνατή η υιοθέτηση ενός σταθμισμένου μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης (και κατ' επέκταση μέτρου ελαστικότητας).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάστροφες αναλύσεις με δεδομένα από ένα πραγματικό πρόβλημα.

5.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΈΡΓΟ

Αφορμή για το πρόβλημα, που διερευνήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, και το οποίο θα παρουσιαστεί σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί μελέτη που συντάχθηκε από την «Ο.Τ.Μ.» Α.Τ.Ε, για λογαριασμό της Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ, και αφορά στην βελτίωση των συνθηκών θεμελίωσης - έδρασης επιχωμάτων σε τμήμα του νέου αυτοκινητοδρόμου Τρίπολης - Καλαμάτας εντός του Μεσσηνιακού κάμπου. Η εν λόγω μελέτη καθώς και η κατασκευή του έργου γίνεται στα πλαίσια της σύμβασης «Μελέτη - Κατασκευή - Χρηματοδότηση - Λειτουργία - Συντήρηση & Εκμετάλλευση του Αυτοκινητοδρόμου Κόρινθος - Τρίπολη - Καλαμάτα και κλάδος Λεύκτρο - Σπάρτη».

5.1.1 Ο Αυτοκινητόδρομος Μορέας

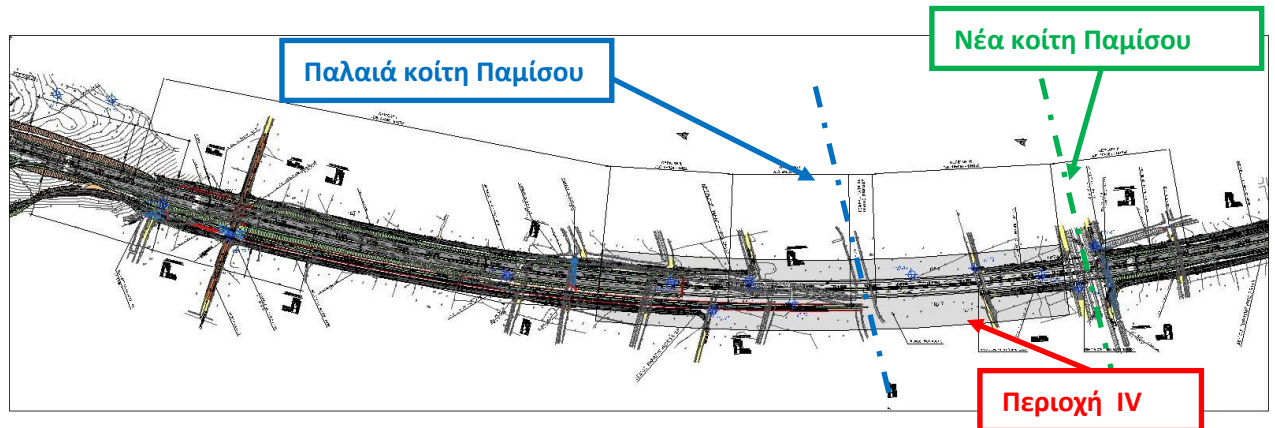
Η σύμβαση παραχώρησης «Μελέτη - Κατασκευή - Χρηματοδότηση - Λειτουργία - Συντήρηση & Εκμετάλλευση του Αυτοκινητοδρόμου Κόρινθος - Τρίπολη - Καλαμάτα και κλάδος Λεύκτρο - Σπάρτη» έχει υπογραφεί μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της παραχωρησιούχου εταιρείας ΜΟΡΕΑΣ Α.Ε. (ΑΚΤΩΡ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΕΙΣ Α.Ε - INTRACOM HOLDINGS - J&P ΑΒΑΞ Α.Ε). Το κόστος του έργου καλύπτεται κυρίως από δανεισμό αλλά και από ίδια κεφάλαια της εταιρείας. Η αποζημίωση της Αναδόχου εταιρείας για την εκτέλεση του έργου συνιστάται στο δικαίωμα εκμετάλλευσης του έργου (κυρίως είσπραξη διοδίων) για όσο διαρκεί η σύμβαση. Μέρος του κόστους κατασκευής του έργου καλύπτεται από το Δημόσιο κυρίως μέσω αξιοποίησης κοινοτικών κονδυλίων. Η διάρκεια της συγκεκριμένης σύμβασης είναι 30 χρόνια.

Η ΜΟΡΕΑΣ Α.Ε. έχει αναθέσει με δεύτερη σύμβαση την μελέτη και κατασκευή του έργου στην Κοινοπραξία Μορέας, η οποία αποτελείται από τις κατασκευαστικές εταιρίες ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε, ΙΝΤΡΑΚΑΤ, και J&P ΑΒΑΞ Α.Ε. Την οριστική μελέτη του έργου για λογαριασμό της Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ έχουν αναλάβει οι εταιρίες ΣΥΣΤΑΣ Ε.Μ.Ε (μελέτη οδοποιίας και υδραυλικές μελέτες), η Ο.Τ.Μ Α.Τ.Ε και Ο.Τ.Μ Τ.Ε.Π.Ε (αρχιτεκτονικές, στατικές, γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες) καθώς και η "ΚΙΩΝ μελετητική" (ηλεκτρομηχανολογικές μελέτες). Η σύμβαση αυτή έχει ως αντικείμενο τη βελτίωση και αναβάθμιση του υφιστάμενου αυτοκινητοδρόμου από την Κόρινθο έως την Τρίπολη μήκους περίπου 85 χιλιομέτρων και την κατασκευή εξ ολοκλήρου νέου αυτοκινητοδρόμου σε μήκος 120 χιλιομέτρων. Ο

αυτοκινητόδρομος, συνολικού μήκους 205 χιλιομέτρων, θα περιλαμβάνει στο τέλος της κατασκευής του δύο λωρίδες κυκλοφορίας και μία λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) ανά κατεύθυνση και θα ενώνει την Κόρινθο με την Καλαμάτα και την Σπάρτη. Σε ότι αφορά την μελέτη του έργου η Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ έχει χωρίσει το έργο σε Γεωγραφικές Ενότητες για την καλύτερη εποπτεία της τόσο της μελέτης όσο και της κατασκευής.

5.1.2 Περιοχή εφαρμογής μέτρων βελτίωσης

Το υπό διερεύνηση πρόβλημα αφορά στη θεμελίωση επιχωμάτων σε τμήμα της Γ.Ε 27N, στην περιοχή όπου ο νέος αυτοκινητόδρομος διέρχεται πλησίον του οικισμού Αγ.Φλώρος. Η Γ.Ε27N αποτελεί τμήμα του Αυτοκινητοδρόμου στον κλάδο προς Καλαμάτα και οριοθετείται μεταξύ του Α/Κ Τσακώνας και του Α/Κ Αρφαρών. Η χάραξη στο δεύτερο μισό της Γ.Ε 27N χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο ως πεδινή καθώς διέρχεται μέσα από τον Μεσσηνιακό κάμπο με μικρού και μέσου ύψους επιχώματα. Πιο συγκεκριμένα αντικείμενο της παρούσας διερεύνησης είναι η θεμελίωση των επιχωμάτων που απαιτούνται για την διέλευση του αυτοκινητοδρόμου μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 8+860 και 10+360 (μερική χιλιομέτρηση εντός της Γ.Ε.27N), , πλησίον των πηγών του Παμίσου ποταμού. Στο σχήμα 5.1 δίνεται σκαρίφημα της Οριζοντιογραφίας στην εν λόγω περιοχή.



Σχήμα 5.1: Απόσπασμα Οριζοντιογραφίας στην υπό μελέτη περιοχή εφαρμογής των μέτρων βελτίωσης (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Η περιοχή στο παραπάνω τμήμα της χάραξης παρουσιάζει ιδιαίτερα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Η κύρια ιδιαιτερότητα έγκειται στην παρουσία μίας επιφανειακής στρώσης από πολύ μαλακά αργιλικά εδάφη με αυξημένη παρουσία οργανικών, τα οποία χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλή αντοχή και αυξημένη συμπίεστικότητα. Αναφορικά με τις υδρογεωλογικές συνθήκες, πρωτεύουσας σημασίας είναι η παρουσία σε μικρή απόσταση από τη χάραξη, των πηγών του ποταμού Παμίσου οι οποίες

εμφανίζουν συστηματική υδροφορία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση σημαντικού δικτύου υπόγειας ροής με την ελεύθερη επιφάνεια της ροής να βρίσκεται συστηματικά πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (σταθερά πάνω από το 1m βάθους). Χαρακτηριστικό είναι ότι η περιοχή στα κατάντη των πηγών του Αγίου Φλώρου, εντός της οποίας διέρχεται και το υπό μελέτη τμήμα του Αυτοκινητοδρόμου, αποτελούσε μέχρι το 1963 βάλτο ο οποίος αποξηράνθηκε με την κατασκευή αποστραγγιστικού καναλιού μέσω της εκβάθυνσης της κοίτης του ποταμού.

Σύμφωνα, με τη μελέτη οδοποιίας η χάραξη στην περιοχή του βάλτου υλοποιείται μέσω επιχωμάτων μέσου ύψους 5m ενώ κατασκευάζονται και δύο γέφυρες για την διέλευση του Αυτοκινητοδρόμου πάνω από την παλαιά και την νέα κοίτη το Πάμισου ποταμού.

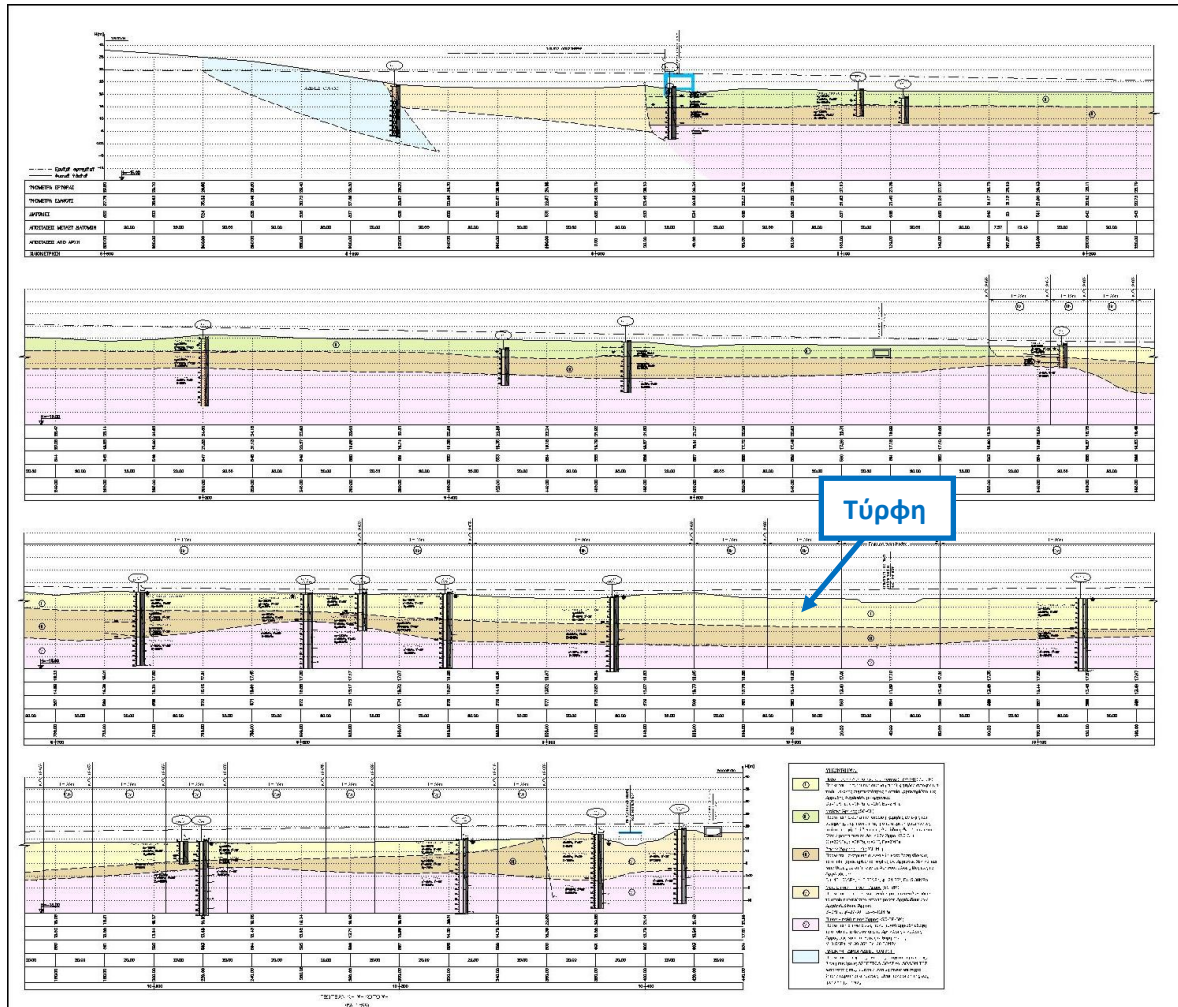
Οι απαντώμενοι στην στενή περιοχή του έργου εδαφικοί σχηματισμοί, διακριτοποιήθηκαν σε πέντε γεωτεχνικές ενότητες, με βάση τόσο τα γεωλογικά όσο και τα γεωτεχνικά στοιχεία των σχηματισμών. Οι ενότητες αυτές είναι:

- Πολύ μαλακές Αργιλοϊλύες με οργανικά (Τύρφη)
- Μαλακές Άργιλοι
- Στιφρές Άργιλοι – Ιλύες
- Μέτρια πυκνές – πυκνές Άμμοι
- Πυκνές – πολύ πυκνές Άμμοι

Ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα 5.1, παρατίθενται ορισμένα από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις μηχανικές παραμέτρους των παραπάνω σχηματισμών, ενώ στο σχήμα 5.2 δίνεται ενδεικτικό σκαρίφημα της γεωτεχνικής τομής της περιοχής.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά απαντώμενων εδαφικών σχηματισμών (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Έδαφος	Λόγος κενών e	Διαπερατότητα k (m/sec)	N _{SPT}	Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης (MPa)
Πολύ μαλακές Αργιλοϊλύες με οργανικά	2.50 - 4.00	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁷	0 - 5	2
Μαλακές Άργιλοι	0.40 - 0.53	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁷	5 - 13	5
Στιφρές Άργιλοι – Ιλύες	0.39 - 0.46	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵	6 - 21	5 - 30
Μέτρια πυκνές – πυκνές Άμμοι	0.45	10 ⁻⁵ – 10 ⁻³	5 - 38	5 - 12
Πυκνές – πολύ πυκνές Άμμοι	0.36	10 ⁻⁵ – 10 ⁻³	30 - 50	25 - 50



Σχήμα 5.2: Σκαρίφημα γεωτεχνικής μηκοτομής στην υπό μελέτη περιοχή εφαρμογής των μέτρων βελτίωσης (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Με βάση το παραπάνω μοντέλο εδαφικού προφίλ αλλά και το ύψος των επιχωμάτων, το υπό μελέτη τμήμα του αυτοκινητοδρόμου χωρίστηκε σε πέντε επιμέρους περιοχές:

- Περιοχή I (Χ.Θ. 8+860 έως Χ.Θ. 9+620)
- Περιοχή II (Χ.Θ. 9+620 έως Χ.Θ. 9+825)
- Περιοχή III (Χ.Θ. 9+825 έως Χ.Θ. 10+020)
- Περιοχή IV (Χ.Θ. 10+020 έως Χ.Θ. 10+360)
- Περιοχή V (Χ.Θ. 10+360 έως Χ.Θ. 10+560)

Αν και ήδη από τα στοιχεία του πίνακα 5.1 καθίσταται σαφές ότι οι πολύ μαλακές Αργιλοΐλυες με οργανικά (Τύρφη) καθώς και οι Μαλακές Άργιλοι συνιστούν εδάφη ιδιαίτερα προβληματικά για τη θεμελίωση επιχωμάτων λόγω μειωμένης αντοχής και αυξημένης συμπιεστότητας, διενεργήθηκε από τους μελετητές ένας πρώτος έλεγχος της ευστάθειας των επιχωμάτων με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί το υπό διερεύνηση πρόβλημα θεμελίωσης. Η ευστάθεια των επιχωμάτων ελέγχθηκε έναντι περιστροφικής αστοχίας, τύπου κύκλων ολίσθησης. Ως μη ευσταθείς ορίζονται όλοι εκείνοι οι συνδυασμοί

παραμέτρων και δράσεων οι οποίοι οδηγούν σε μικρότερους συντελεστές ασφαλείας από αυτούς που προβλέπονται κατά Ο.Μ.Ο.Ε. Από τους ανωτέρω ελέγχους ως ιδιαιτέρως προβληματικές κρίθηκαν οι περιοχές II, III, IV στις οποίες οι μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί εμφανίζονται επιφανειακά και σε σημαντικό βάθος ενώ ταυτόχρονα το ύψος των επιχωμάτων καθίσταται σημαντικό (>5m).

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος και την βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας εξετάστηκαν διάφορες λύσεις οι οποίες κινήθηκαν σε τρεις κύριες κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορούσε τη μείωση του φορτίου των επιχωμάτων (πχ. χρήση διογκωμένης πολυστερίνης), η δεύτερη τη βελτίωση της αντοχής του εδάφους θεμελίωσης (εδαφικά αντικατάσταση) και η τρίτη τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας χωρίς όμως απαραίτητα βελτίωση των παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους (π.χ. πλευρικά πετάσματα με Jet grouting).

Πέρα από το πρόβλημα της ευστάθειας, η παρουσία ιδιαίτερα συμπιεστών αργλικών σχηματισμών εγείρει και θέμα καθιζήσεων. Το ζήτημα των καθιζήσεων έχει διπλό χαρακτήρα. Από τη μία το μέγεθος των προκαλούμενων καθιζήσεων είναι αυξημένο λόγω της πολύ υψηλής συμπιεστότητας του εδάφους, και από την άλλη η πολύ μικρή διαπερατότητα του σε συνδυασμό με τον πολύ υψηλό υδροφόρο (σχεδόν στην επιφάνεια του εδάφους) καθιστά την εξέλιξη τους αργή, λόγω του φαινομένου της στερεοποίησης.

Το μέγεθος των καθιζήσεων δεν αποτελεί πρόβλημα για τα επιχώματα, καθώς είναι εύκαμπτες κατασκευές οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αναλαμβάνουν σημαντικές καθιζήσεις, ακόμα και διαφορικές, χωρίς να απειλείται η δομική τους ακεραιότητα. Από την άλλη βέβαια, η κατασκευή του οδοστρώματος θα πρέπει να γίνεται μετά την ολοκλήρωση του συνόλου των καθιζήσεων έτσι ώστε η τελική επιφάνεια κυκλοφορίας των οχημάτων να μην επηρεαστεί από τις καθιζήσεις. Η ανωτέρω απαίτηση καθιστά τον ρυθμό εξέλιξης των καθιζήσεων πολύ σημαντικό παράγοντα για την τήρηση των χρονοδιαγραμμάτων κατασκευής του έργου και για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της μελέτης, δόθηκε έμφαση στην εξεύρεση τρόπων επιτάχυνσης των καθιζήσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω στοιχεία, η τελικώς επιλεγείσα λύση που προτάθηκε από τους μελετητές για την κατασκευή των επιχωμάτων στην Βαλτώδη περιοχή του Αγ. Φλώρου, περιλαμβάνει μικρού πάχους εξυγίανση, κατασκευή χαλικοπασσάλων, και εν συνεχεία σταδιακή κατασκευή των επιχωμάτων σε συνδυασμό με υπερφόρτιση καθώς και την κατασκευή δύο πασσαλοδιαφράγμάτων από πασσάλους άοπλου σκυροδέματος δίπλα στον πόδα, εκατέρωθεν του επιχώματος.

Πιο αναλυτικά, στις περιοχές I και V, όπου δεν ανέκυψαν σοβαρά προβλήματα ευστάθειας ή καθιζήσεων, έγινε απλά εξυγίανση του εδάφους σε βάθος 1.0 m με χρήση κατάλληλα διαβαθμισμένου θραυστού υλικού και κατάλληλη τοποθέτηση γεωυφασμάτων. Στις υπόλοιπες περιοχές, έγινε εξυγίανση του εδάφους σε βάθος 1.00m, κατασκευάστηκαν 2

πλευρικές πασσαλοστοιχίες εκατέρωθεν της βάσης του επιχώματος και στην συνέχεια κατασκευάστηκαν χαλικοπάσσαλοι διαμέτρου Φ80 και σε τετραγωνικό κάρναβο πλευράς $s=2.75m$. Ακολούθησε η κατασκευή της στραγγιστικής στρώσης του επιχώματος, η τοποθέτηση γεφυφάσματος διαχωρισμού και η κατασκευή του κυρίως σώματος του επιχώματος. Ανάλογα με την περιοχή, το επίχωμα κατασκευάστηκε σε ένα ή/και περισσότερα (έως τέσσερα) στάδια. Μετά την κατασκευή του κάθε σταδίου ακολουθούσε ένα διάστημα αναμονής (2 έως 3 μήνες) κατά το οποίο παρακολουθούνταν οι καθιζήσεις. Για να ξεκινήσει ένα επόμενο στάδιο κατασκευής θα έπρεπε να έχει επιτευχθεί βαθμός στερεοποίησης 90%. Σκοπός της σταδιακής κατασκευής είναι αφενός η προοδευτική βελτίωση της αντοχής του εδάφους θεμελίωσης που οφείλεται στην αύξηση των ενεργών τάσεων, αλλά και η σταδιακή εκδήλωση των καθιζήσεων ώστε να μην προκληθούν προβλήματα στο σώμα του επιχώματος. Τα επιχώματα προσωρινά κατασκευάστηκαν σε μεγαλύτερο ύψος από το απαιτούμενο (έως και 1.5m πάνω από την ερυθρά) με σκοπό αφενός την υπερστερεοποίηση του εδάφους θεμελίωσης για τα φορτία της κυκλοφορίας και αφετέρου για να περιοριστεί το μέγεθος των δευτερογενών καθιζήσεων οι οποίες σε τέτοια εδαφικά υλικά είναι συνήθως σημαντικές. Με την σταθεροποίηση των καθιζήσεων που οφείλονται και στα φορτία της υπερφόρτισης, αφαιρούνται τα πλεονάζοντα υλικά με σκοπό τη διαμόρφωση κατάλληλου επιπέδου εργασίας για την κατασκευή των τελικών στρώσεων οδοστρωσίας. Η κατασκευαστική διαδικασία τελειώνει με την προσθήκη φυτικών γαιών στα πρανή του επιχώματος.

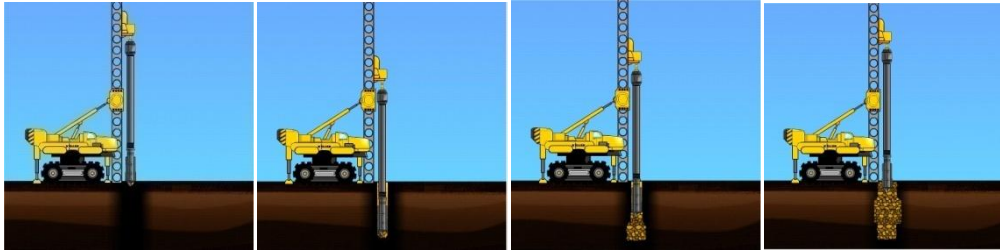


Εικόνα 5.1: Το μηχάνημα κατασκευής των χαλικοπασσάλων. Διακρίνονται το στέλεχος έμπηξης, ο τροφοδότης των αδρανών, τα αδρανή σε στοιβές καθώς και ο κουβάς του εκσκαφέα που τροφοδοτεί το μηχάνημα με τα αδρανή.

Στην συνέχεια περιγράφεται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια η διαδικασία κατασκευής των χαλικοπασσάλων καθώς αποτελούν και το κύριο αντικείμενο απασχόλησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για την κατασκευή των χαλικοπασσάλων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Δονητικής Αντικατάστασης με τροφοδοσία από τον πυθμένα (bottom feed). Η κατασκευή τους έγινε από την εταιρία KELLER για λογαριασμό της Κ/Ξ Μορέας. Χρησιμοποιήθηκε η ξηρή μέθοδος, τα κατασκευαστικά βήματα της οποίας συνοψίζονται στα εξής (βλέπε και σχήμα 5.3):

- a. **Προετοιμασία:** το μηχάνημα κατασκευής (vibrocat) τοποθετεί το στέλεχος κατασκευής (δονητή) πάνω από το κέντρο του προς κατασκευή χαλικοπασσάλου. Ένας φορτωτής γεμίζει τον τροφοδότη του στελέχους έμπηξης με αδρανή. Τα αδρανή των χαλικοπασσάλων, προέρχονται από προϊόντα ανατίναξης λατομείου, τα οποία μέσω σπαστήρα και κατάλληλης σειράς κοσκίνων αποκτούν την απαιτούμενη κοκκομετρική διαβάθμιση με μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κόκκου 8 έως 2 mm, αντίστοιχα.
- b. **Φόρτιση:** ο τροφοδότης ανυψώνεται και αδειάζει το περιεχόμενο του μέσα στον αεροθάλαμο του στελέχους και το υλικό ρέει προς την άκρη του δονητή βοηθούμενο από πεπιεσμένο αέρα.
- c. **Διείσδυση:** Το στέλεχος αρχίζει να διεισδύει στο έδαφος (πίεση και δόνηση) εκτοπίζοντας το εδαφικό υλικό με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα.

- d. **Συμπύκνωση:** μετά την επίτευξη του μέγιστου βάθους, το στέλεχος ανασύρεται ελαφρώς προς τα πάνω (περίπου 1.0 – 1.5 m), και επιτρέπει στα αδρανή να γεμίσουν την κοιλότητα που δημιουργήθηκε. Στην συνέχεια μέσω επαναδιείσδυσης (0.7 – 1.2 m) και συνεχών παλινδρομικών κινήσεων, επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος βαθμός συμπύκνωσης των αδρανών. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 5.3: Σκαρίφημα με τα βήματα κατασκευής των χαλικοπασσάλων (πηγή: KELLER).

5.2 ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

5.2.1 Χαρακτηριστική διατομή

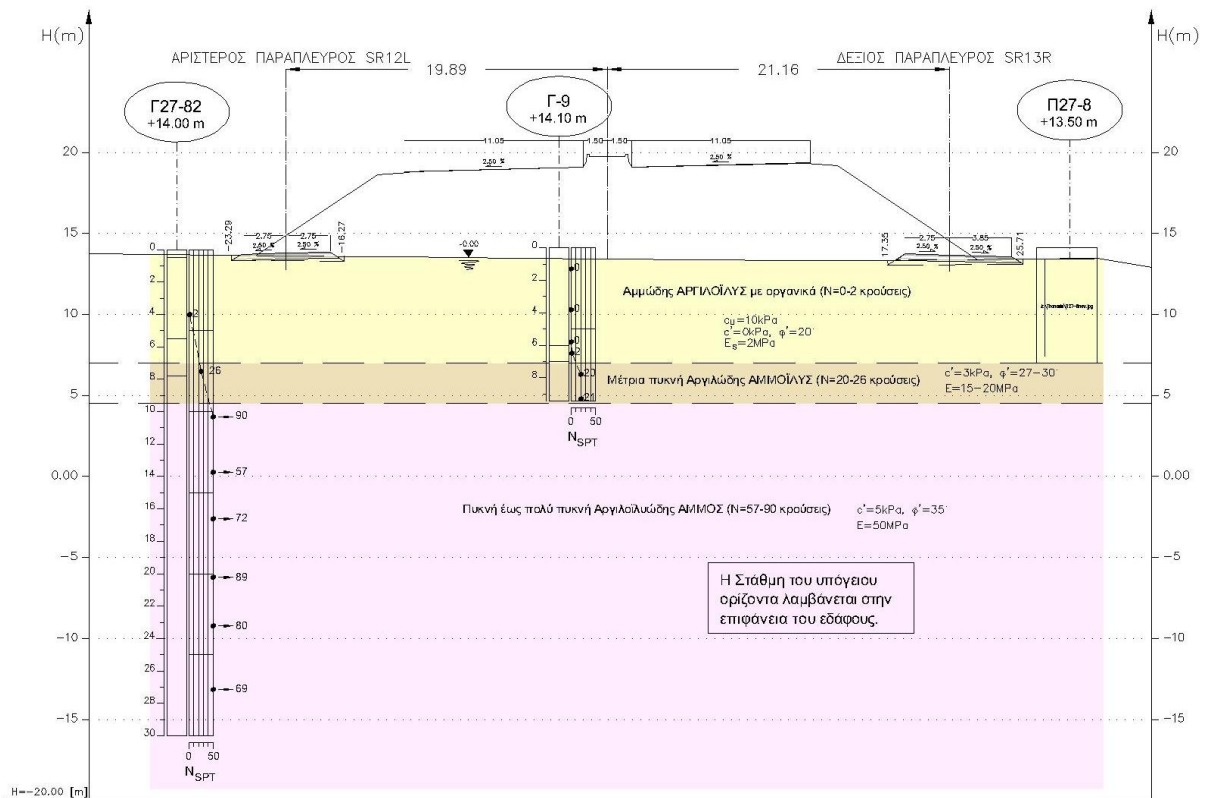
Προκειμένου να διερευνηθεί το πρόβλημα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα και με σκοπό την πραγματοποίηση ανάστροφων αναλύσεων επαναπροσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, επιλέχθηκε μία διατομή επιχώματος κατά μήκος της περιοχής βελτιώσεων εντός της πλέον κρίσιμης περιοχής IV.

Η διατομή αυτή (Δ594) βρίσκεται στη Χ.Θ. 10+240 και αντιστοιχεί στον δυσμενέστερο συνδυασμό μέγιστου ύψους επιχώματος και βάθους Τύρφης. Το ύψος του τελικού επιχώματος στη συγκεκριμένη διατομή είναι 5.60 μέτρα (+1.50 υπερφόρτιση), το πλάτος στη στέψη του 28 μέτρα και στη βάση του 45 μέτρα. Ο δρόμος βρίσκεται σε ελαφρά αριστερή στροφή και το οδόστρωμα έχει επίκλιση 2.50% προς τα αριστερά. Το επίχωμα θεμελιώνεται επί του επιφανειακού στρώματος της Τύρφης το βάθος της οποίας σύμφωνα με τις προβλέψεις του γεωτεχνικού μοντέλου της μελέτης είναι 7.0 μέτρα. Στον πίνακα 5.2 δίνονται κάποιες συνοπτικές πληροφορίες για το γεωτεχνικό προφίλ το οποίο φαίνεται και στην γεωτεχνική τομή του σχήματος 5.4.

Πίνακας 5.2: Γεωτεχνικό προφίλ διατομής 594 (πηγή: Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Βάθος (m)	Σύντομη περιγραφή	Συνοχή c' (kPa)	Γωνία τριβής φ' (°)	Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή c _u (kPa)	Μέτρο Μονοδιάστατης Συμπιέσεως E _s (MPa)	Συντελεστής Διαπερατότητας κ (m/sec)
0 - 7 m	Τύρφη	0	20	10	2	0.5·10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻⁹
7 - 11 m	Ιλυοαργιλώδης Άμμος	3	30	-	20	-
11 - 30 m	Ιλώδης Άμμος	5	35	-	50	-

Επειδή, κατά την κατασκευή των χαλικοपाσσάλων διαπιστώθηκε ότι το πάχος της τύρφης ήταν ελαφρώς μεγαλύτερο των 7 μέτρα προσεγγίζοντας πιο πολύ τα 8 μέτρα, για τις ανάστροφες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το νέο αναθεωρημένο βάθος.



Σχήμα 5.4: Σκαρίφημα γεωτεχνικής τομής στην Διατομή 594 (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Η διαπερατότητα της τύρφης με βάση τις εκτιμήσεις της μελέτης κυμαίνεται μεταξύ 10⁻⁹ και 10⁻⁷ m/sec. Δεδομένης της πολύ μεγάλης αβεβαιότητας στον προσδιορισμό της, κατά τον σχεδιασμό των μέτρων βελτίωσης, υιοθετήθηκε από τους μελετητές μία συντηρητική

εκτίμηση των ορίων διακύμανσης της διαπερατότητας μεταξύ $0.5 \cdot 10^{-10}$ και 10^{-9} m/sec. Η αβεβαιότητα αυτή είναι μεγαλύτερη της μιας τάξης μεγέθους σε μονάδες m/sec και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ελαστικών λύσεων που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο, η διακύμανση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε χρόνους στερεοποίησης διαφορετικούς κατά 20 περίπου φορές.

Με σκοπό να γίνει καλύτερα αντιληπτή η πολύ κακή ποιότητα του εδάφους θεμελίωσης στην συγκεκριμένη περιοχή, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3 οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν από την ανάλυση της ευστάθειας του επιχώματος στη διατομή 594, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη κανένα μέτρο βελτίωσης.

Πίνακας 5.3: Αρχικές συνθήκες ευστάθειας διατομής 594 (πηγή: Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Συνθήκες	Προκύπτων συντελεστής ασφαλείας		Απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας
Βραχυπρόθεσμες στατικές	0.44		1.2
Μακροπρόθεσμες με σεισμό	+ Υ	0.27	1.0
	- Υ	0.36	
Μακροπρόθεσμες με ανώτατη στάθμη υδροφόρου	1.21		1.3

Επιπλέον, στον πίνακα 5.4 δίνεται η προβλεπόμενη εξέλιξη της στερεοποίησης που αφορά την επιφανειακή αργιλική στρώση της τύρφης χωρίς τη λήψη μέτρων βελτίωσης.

Πίνακας 5.4: Μέγεθος και χρονική εξέλιξη καθιζήσεων διατομής 594 για αποκλειστικά κατακόρυφη στράγγιση (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

Άμεση καθίζηση (cm)	Καθίζηση στερεοποίησης (cm)	Απαιτούμενος χρόνος για U=90%	Συνολική καθίζηση (cm)
6	39	1.5 - 3.0 έτη	45

Αποδεικνύεται ότι η λήψη μέτρων ήταν απαραίτητη τόσο για τη βελτίωση της ευστάθειας του επιχώματος όσο και για την επιτάχυνση του ρυθμού εξέλιξης των καθιζήσεων, καθώς, χωρίς οριζόντια στράγγιση, οι απαιτούμενοι χρόνοι στερεοποίησης είναι απαγορευτικοί για το χρονοδιάγραμμα του έργου.

Τα μέτρα που προτάθηκαν για την περιοχή στην οποία λαμβάνεται ως χαρακτηριστική η διατομή 594 είναι τα εξής:

- Κατασκευή κατακόρυφων στραγγιστηριών με χαλικοπασσάλους διαμέτρου $D=0.80\text{m}$ σε τετραγωνικό κάναβο $2.75\text{m}\times 2.75\text{m}$ για την επιτάχυνση της στερεοποίησης και τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας.
- Κατασκευή πασσαλοστοιχίας στον πόδα του επιχώματος, από πασσάλους διαμέτρου $D_p=0.80\text{m}$, σε αξονικές αποστάσεις 1.50m με χρήση αόπλου σκυροδέματος κατηγορίας C20/25.
- Σταδιακή κατασκευή του επιχώματος (προφόρτιση), σε τρία στάδια (+3.00m, +5.00m, +7.10) με σκοπό τη βελτίωση των παραμέτρων αντοχής του εδάφους θεμελίωσης.
- Υπερφόρτιση (+1.5m) πάνω από την ερυθρά για την υπερστερεοποίηση του υποκείμενου αργιλικού σχηματισμού. Προστίθεται κατά το τρίτο στάδιο κατασκευής.

Με βάση τα παραπάνω μέτρα βελτίωσης και χωρίς να ληφθεί υπόψη, για λόγους δυσμείνειας, η συνεισφορά των πασσάλων σκυροδέματος, η μελέτη κατέληξε στα αποτελέσματα που συνοψίζονται στον πίνακα 5.5, και αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης και τους νέους συντελεστές ασφαλείας.

Πίνακας 5.5: Δεδομένα και αποτελέσματα αναλύσεων ανά στάδιο κατασκευής (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

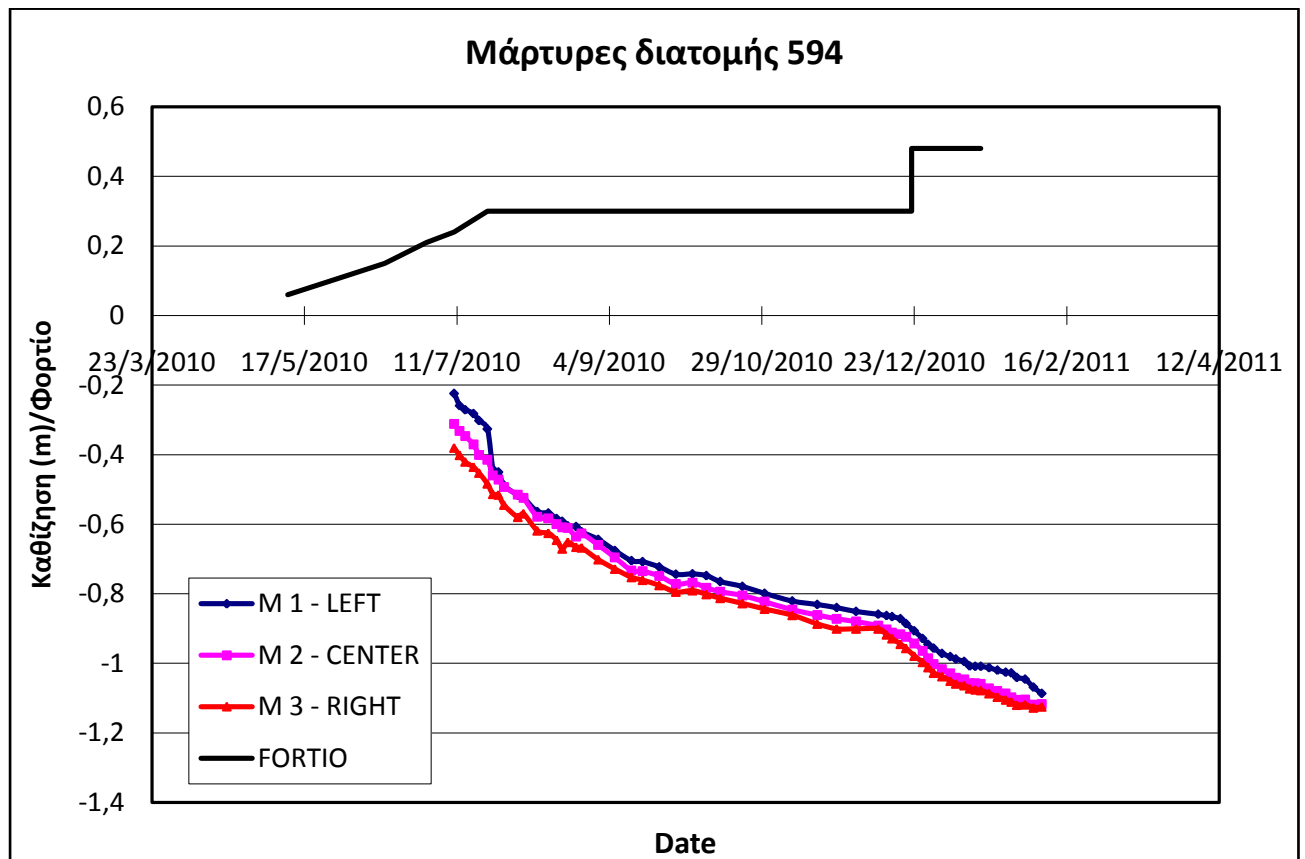
Στάδιο κατασκευής	Ύψος επίχωσης (m)	Αρχική διατμητική αντοχή c_{ua} (kPa)	Βελτίωση διατμητικής αντοχής Δc_u (kPa)	Βελτιωμένη διατμητική αντοχή c_{ui} (kPa)	Αρχική σταθμισμένη αντοχή εδάφους-χαλικοπασσάλων c_{upa} (kPa)	Βελτιωμένη σταθμισμένη αντοχή εδάφους-χαλικοπασσάλων c_{upi} (kPa)	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας	Συντελεστής ασφαλείας μετά τη βελτίωση
Στάδιο 1	3.0	10	11.9	21.9	29.4	38.6	1.007	1.39
Στάδιο 2	5.0	21.9	7.92	29.8	47.7	53.8	1.05	1.24
Στάδιο 3	7.1	29.8	8.32	38.1	63.4	69.8	1.05	1.21
Στάδιο 4	5.6	-	-	38.1	-	63.0	-	1.30

Επιπρόσθετα στον πίνακα 5.6 δίνονται το μέγεθος και η εξέλιξη των καθιζήσεων όπως αυτές εκτιμήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης.

Πίνακας 5.6: Μέγεθος και χρονική εξέλιξη καθιζήσεων ανά στάδιο κατασκευής (πηγή Ο.Τ.Μ. Α.Τ.Ε).

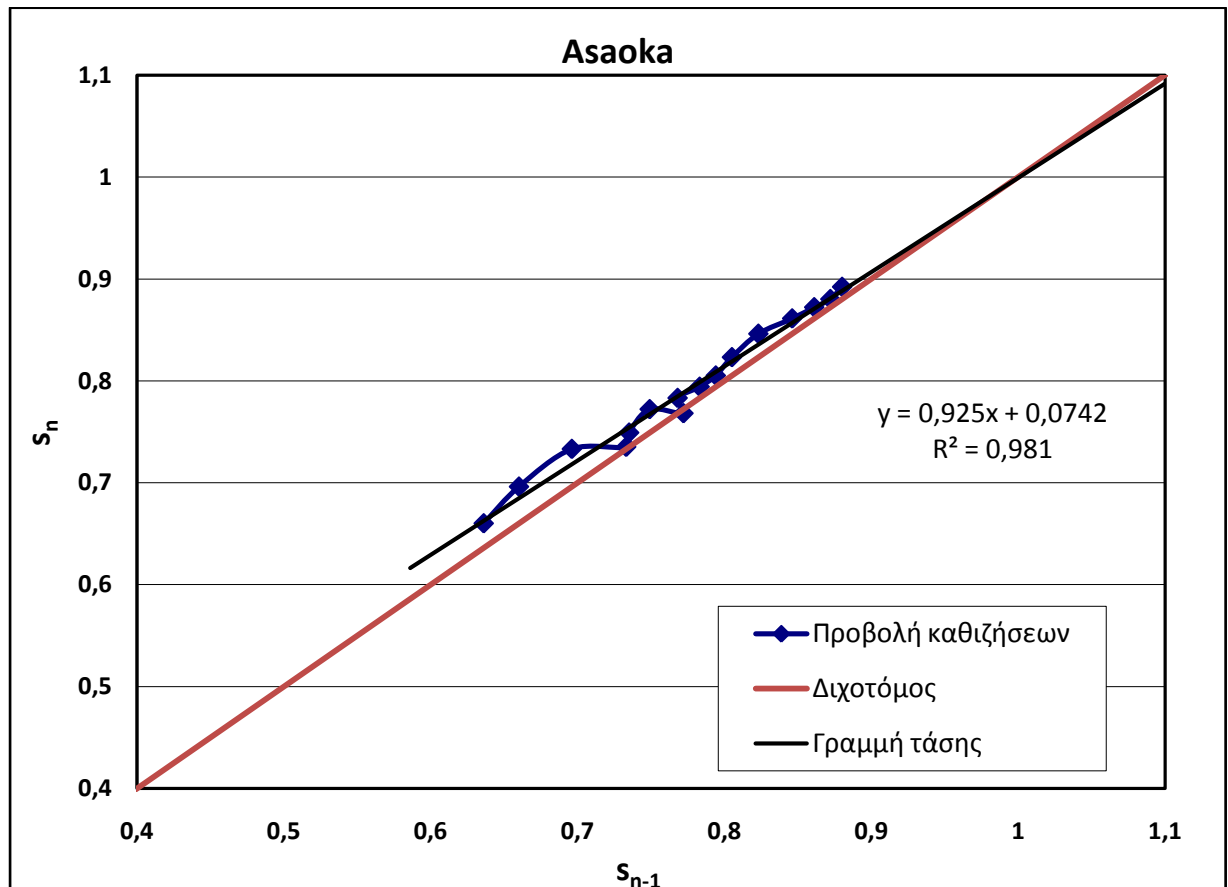
Στάδιο κατασκευής	Άμεση καθίζηση (cm)	Καθίζηση στερεοποίησης (cm)	Χρόνος που απαιτείται για U=90%	Συνολική καθίζηση βάσης (cm)
Στάδιο 1	3.4	20.9	3 - 6 μήνες	24.3
Στάδιο 2	+2.1	+13.9		40.3
Στάδιο 3	+2.1	+14.5		56.9

Από την καταγραφή των καθιζήσεων για το πρώτο στάδιο της κατασκευής προκύπτει ότι οι εκδηλωθείσες καθιζήσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις προβλεφθείσες. Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα του σχήματος 5.5, φαίνεται ότι οι καθιζήσεις και στους τρεις μάρτυρες οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί στην διατομή του επιχώματος είναι της τάξης των 90cm, δηλαδή μεγαλύτερες ακόμα και από τις συνολικές καθιζήσεις που είχαν προβλεφθεί. Η συμπεριφορά αυτή ενεργοποίησε τα μέτρα έκτακτης συμπεριφοράς που προβλέπονταν στην μελέτη και οδήγησε σε μερική αναθεώρηση κυρίως των βημάτων επιβολής των φορτίων με σκοπό την ακόμα πιο τμηματική κατασκευή του επιχώματος.

**Διάγραμμα 5.5:** Καθιζήσεις μαρτύρων διατομής 594 και επιβολή του φορτίου του επιχώματος συναρτήσει του χρόνου (πηγή Ο.Τ.Μ Α.Τ.Ε).

5.2.2 Διερεύνηση 1^{ου} σταδίου κατασκευής

Για την ανάστροφη ανάλυση που διεξάγεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αφορά στο πρώτο στάδιο της κατασκευής, επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικός ο μάρτυρας M2, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της διατομής 594. Η κατασκευή του επιχώματος μέχρι ύψους 3.0m ξεκίνησε στις 11/5/2010 και διήρκησε μέχρι τις 22/7/2010, δηλαδή συνολικά περί τις 70 ημέρες. Οι καταγραφές των καθιζήσεων ξεκίνησαν πριν την ολοκλήρωση και συγκεκριμένα στις 10/7/2010, δηλαδή 60 μέρες μετά την έναρξη των εργασιών. Από τις μετρηθείσες τιμές των καθιζήσεων, υπολογίστηκε η αναμενόμενη τελική καθίζηση που αντιστοιχεί σε βαθμό στερεοποίησης $U=100\%$ με χρήση της μεθόδου του Asaoka.



Διάγραμμα 5.6: Μέθοδος Asaoka για τον υπολογισμό της τελικής καθίζησης λόγω του φορτίου του πρώτου σταδίου κατασκευής.

Αμελώντας τις πρώτες καταγραφές, σύμφωνα με τις οδηγίες της μεθόδου, υπολογίστηκε η εξίσωση της ευθείας η οποία παρεμβάλλεται καλύτερα στα δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων και προέκυψε η ευθεία, που φαίνεται στο διάγραμμα 5.6, με εξίσωση $y = 0.925x + 0.074$. Από το σημείο τομής της ευθείας αυτής με την διχοτόμο

του διαγράμματος (εξίσωση $\gamma=x$) προέκυψε η εκτίμηση για την τελική καθίζηση στερεοποίησης του πρώτου σταδίου που είναι 0.987m.

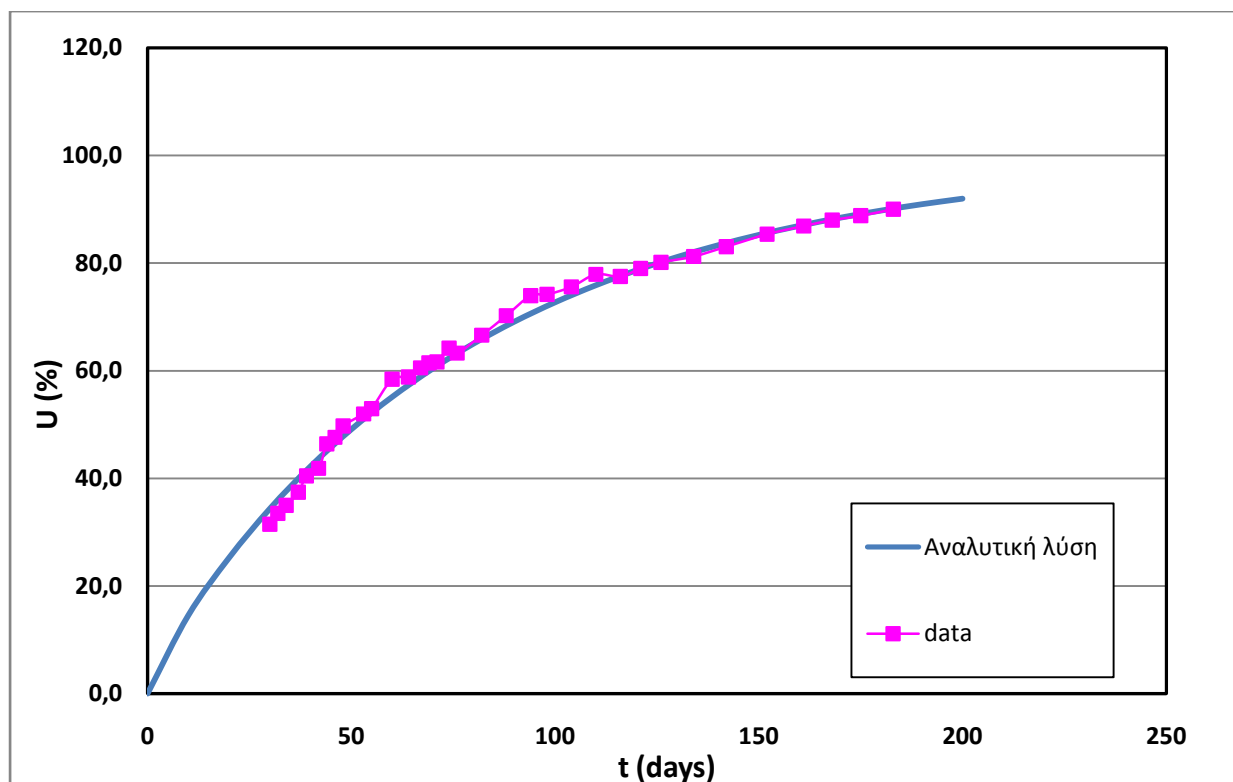
Προκειμένου να γίνει μια πρώτη ανάστροφη ανάλυση με χρήση αναλυτικών σχέσεων χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω εκτιμηθείσα τελική καθίζηση για τον προσδιορισμό του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης. Παραδεχόμενοι για λόγους απλοποίησης του προβλήματος ότι αφενός όλες οι καθιζήσεις οφείλονται στην συμπίεση των 8m της Τύρφης (λόγω της πολύ μεγάλης διαφοράς στην συμπιεστότητα Τύρφης με υποκείμενους σχηματισμούς) καθώς και ότι αφετέρου εντός του σχηματισμού αυτού επικρατούν συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, υπολογίστηκε το μέτρο E_s ως:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{vol}} = \frac{\Delta\sigma}{\left(\frac{s}{H}\right)} = \frac{\Delta\sigma \cdot H}{s}$$

Για επίχωμα ύψους 3.0m, από το οποίο αφαιρούνται τα 60cm της στραγγιστικής στρώσης πάνω στην οποία έχουν τοποθετηθεί οι μάρτυρες, και της οποίας η κατασκευή είχε προηγηθεί αρκετό καιρό πριν καθώς αποτελούσε τμήμα του δαπέδου εργασίας, προκύπτει ότι μεταβολή της κατακόρυφης τάσης $\Delta\sigma$ είναι ίση με 48 kPa ($\gamma=20\text{kN/m}^3$). Το βάθος του σχηματισμού καθώς και του χαλικοπασσάλου λαμβάνεται 8m επομένως προκύπτει μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s = \frac{48 \cdot 8}{0.987} \cong 390$ kPa.

Με βάση την τιμή αυτή, επιχειρείται μια πρώτη εκτίμηση των παραμέτρων που ελέγχουν το πρόβλημα της χρονικής εξέλιξης της στερεοποίησης. Επειδή όμως, το φορτίο του επιχώματος δεν έχει επιβληθεί ακαριαία, αλλά σε χρονικό διάστημα δύο μηνών, θα πρέπει να γίνει μια παραδοχή ως προς το χρόνο που θεωρούμε ως αρχικό χρόνο ($t=0$). Για το λόγο αυτό, και δεδομένου ότι η φόρτιση έγινε, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, σχεδόν γραμμικά, αποφασίστηκε να θεωρηθεί ως αρχικός χρόνος επιβολής του φορτίου η 30^η μέρα από την έναρξη της φόρτισης, που βρίσκεται στο μέσο της κατασκευαστικής διαδικασίας. Με βάση την παραδοχή αυτή, υπολογίζεται μέσω δοκιμών η καμπύλη στερεοποίησης η οποία αποτελεί την καλύτερη προσέγγιση της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς και η οποία δίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.7. Η εν λόγω καμπύλη αντιστοιχεί στις ακόλουθες τιμές των παραμέτρων ελέγχου της στράγγισης:

- Διαπερατότητα $k=2.05 \cdot 10^{-4}$ m/day= $2.7 \cdot 10^{-9}$ m/sec
- Λόγος $\frac{k_h}{k_v} = 2$
- Μέγεθος smear zone $m=1.7$
- Λόγος $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$



Διάγραμμα 5.7: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής με βάση τις αναλυτικές μεθοδολογίες.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα υπό επεξεργασία δεδομένα θα μπορούν να προσεγγιστούν καλά και άλλους συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες τιμές αποτελούν τις πλέον ρεαλιστικές εκτιμήσεις με βάση και τις αναφερόμενες ως συνήθεις τιμές των μεγεθών αυτών στη βιβλιογραφία και αποτελούν μια καλή πρώτη προσέγγιση για ανάστροφες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία.

Ανάστροφη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Στην προσπάθεια καλύτερης προσέγγισης της πραγματικής μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, διενεργήθηκαν αναστροφές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία και χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam-Clay (MCC). Το προσομοίωμα Cam-clay περιγράφεται στον κώδικα Abaqus από τις εξής παραμέτρους:

- την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης M
- την παράμετρο κράτυνσης p'_m η οποία αντιστοιχεί στην τάση προστερεοποίησης πάνω στον ισότροπο άξονα
- καθώς και τις κλίσεις λ και κ για την γραμμή παρθενικής συμπίεσης και τη γραμμή αποφόρτιση - επαναφόρτισης σε όρους ειδικού όγκου v και λογαρίθμου της μέσης τάσης $\ln p$.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων M και λ του MCC ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Η σταθερά M συσχετίστηκε με την γωνία ϕ του εδάφους, μέσω του τύπου $M = \frac{6 \cdot \sin \phi}{3 - \sin \phi}$,

ενώ η κλίση λ με το συντελεστή συμπιεστότητας C_c , μέσω της σχέσης $\lambda = \frac{C_c}{\ln 10}$. Για τις τιμές της γωνίας ϕ και του συντελεστή C_c ελήφθησαν οι προτεινόμενες στα πλαίσια της γεωτεχνικής μελέτης. Τέλος, για την κλίση κ της γραμμής αποφόρτισης-επαναφόρτισης γίνεται η παραδοχή ότι ισούται με το 1/10 της κλίσης της γραμμής παρθενικής συμπίεσης (λ).

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό της παραμέτρου p'_m και με σκοπό να οριστούν αρχικές συνθήκες οι οποίες να προσομοιάζουν ένα έδαφος κανονικά στερεοποιημένο υπολογίστηκε η μεταβολή της τάσης προστερεοποίησης με το βάθος ως αυτή που αντιστοιχεί στις ενεργές τάσεις. Με σκοπό να εισαχθεί στο Abaqus η μεταβολή αυτού του μεγέθους με το βάθος το μοντέλο χωρίστηκε σε στρώσεις του ενός μέτρου. Έτσι, δεδομένου ότι το νέο μοντέλο έχει βάθος 8 μέτρων, όσο είναι το πάχος του αργιλικού στρώματος, τα υλικά χωρίστηκαν σε 8 επιμέρους στρώσεις. Ακολουθώντας, όσον αφορά στο αργιλικό έδαφος, ελήφθη πυκνότητα στερεών κόκκων ίση με $\rho_s = 2.3 \text{ kg/m}^3$. Επιπλέον, με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις, έγινε η παραδοχή ότι ο δείκτης πόρων e μειώνεται γραμμικά με το βάθος, από την τιμή 4 στην επιφάνεια στο 2.5 σε βάθος 8m, οι οποίες και αποτελούν τα όρια διακύμανσης του μεγέθους όπως αυτά υπολογίστηκαν κατά την αξιολόγηση των γεωτεχνικών ερευνών. Με βάση τα ανωτέρω και θεωρώντας πλήρως κορεσμένο έδαφος ($S_r = 1$) μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, υπολογίστηκε η τιμή της πυκνότητας του κορεσμένου εδάφους, ως

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + e \cdot \rho_w}{1 + e}. \text{ Εν συνεχεία υπολογίζονται οι τιμές των ολικών και ενεργών τάσεων,}$$

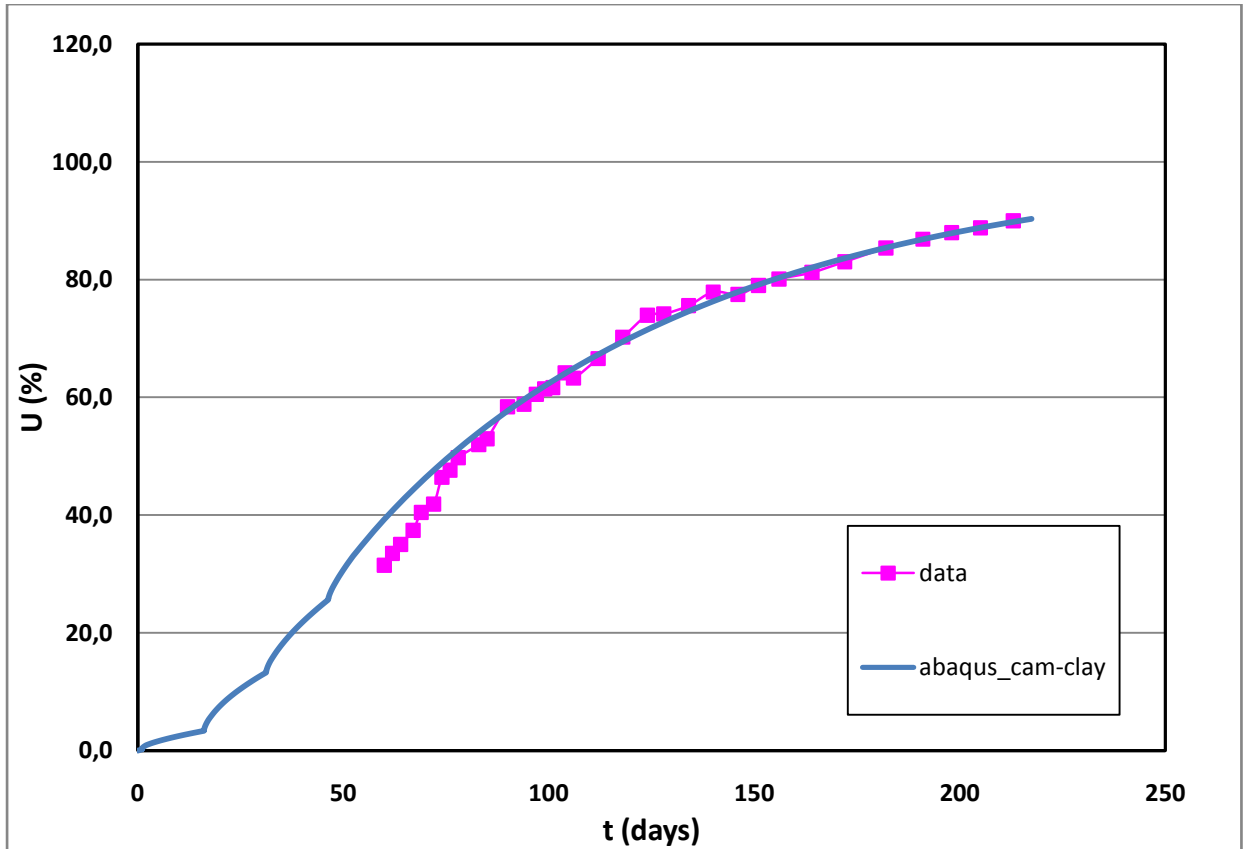
και $\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v$ οι τιμές που αντιστοιχούν στις αναλλοίωτες των τάσεων p' και q και από αυτές μέσω της εξίσωσης της επιφάνεια διαρροής του MCC η τιμή p'_m , ως

$$p_m = \frac{q^2 + M^2 \cdot p'^2}{M^2 \cdot p'}. \text{ Στην συνέχεια επαναυπολογίζεται ο δείκτης πόρων σε κάθε στρώση}$$

με σκοπό να συμβαδίζει με την γραμμή παρθενικής συμπίεσης όπως αυτή ορίζεται από την κλίση λ που λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Πρόκειται επί της ουσίας για μία επαναληπτική διαδικασία η οποία τερματίζεται όταν υπάρξει σύγκλιση στις τιμές του δείκτη πόρων. Οι τελικώς υπολογισθείσες αρχικές παράμετροι εισήχθησαν ως αρχικές συνθήκες στο Abaqus.

Με βάση τα παραπάνω, το μοντέλο που μορφώθηκε στα πεπερασμένα στοιχεία διαφέρει σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμετρικές αναλύσεις, στο ότι προστέθηκε ένα αρχικό γεωστατικό βήμα με σκοπό την προσομοίωση των πραγματικών αρχικών συνθηκών του υπό διερεύνηση προβλήματος. Τέλος και για την καλύτερη προσομοίωση του μεγάλου χρονικού διαστήματος που απαιτήθηκε για την κατασκευή του πρώτου σταδίου φόρτισης του επιχώματος η επιβολή του φορτίου έγινε στο πρόγραμμα σε τέσσερα βήματα. Έτσι, το συνολικό φορτίο των 48 kPa του επιχώματος, τοποθετήθηκε σε τέσσερα βήματα των 12 kPa σε κάθε ένα από το οποίο στην συνέχεια επιτρεπόταν η στράγγιση για 20 μέρες πριν την επιβολή του επόμενου βήματος φόρτισης με σκοπό να προσομοιωθούν οι περίπου 60 ημέρες που απαιτήθηκαν για την κατασκευή του πρώτου σταδίου.

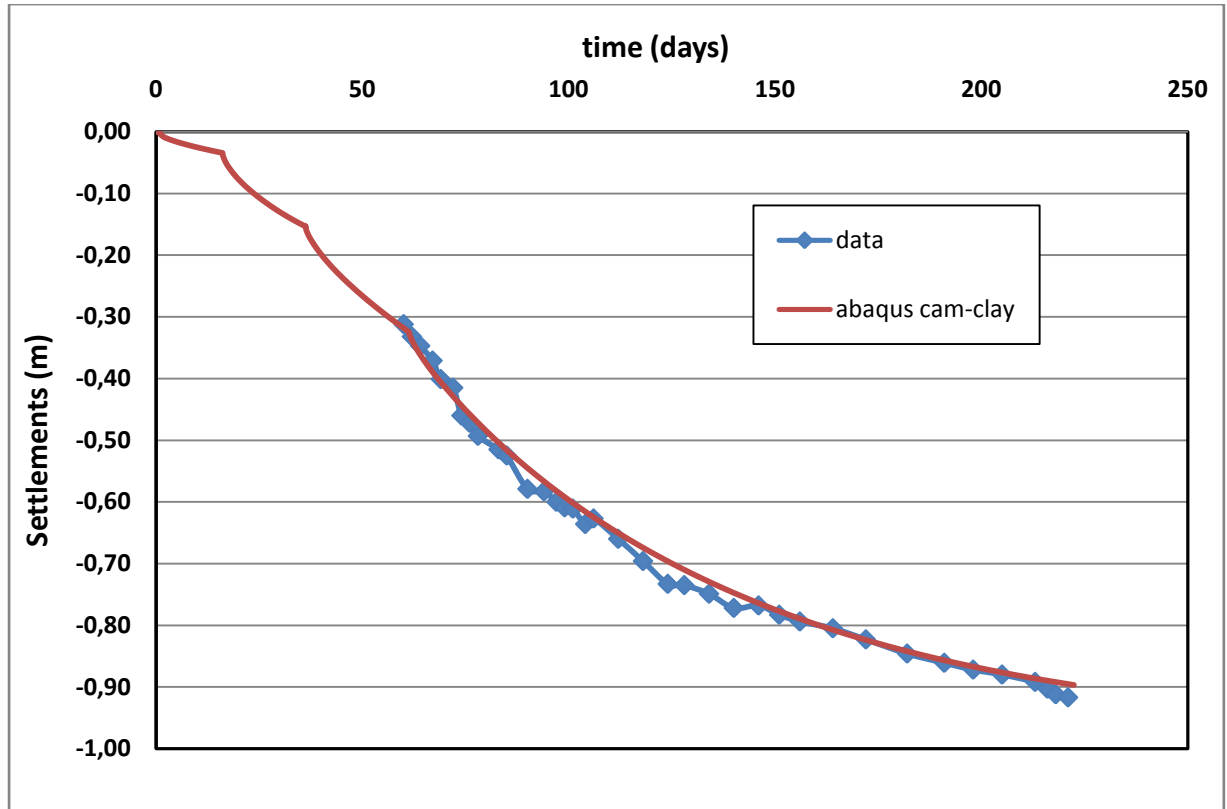
Με το μοντέλο αυτό διεξήχθη μία σειρά αναλύσεων με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με τα πραγματικά δεδομένα. Σε πρώτη φάση, χρησιμοποιώντας μεγάλες τιμές της διαπερατότητας, με σκοπό την γρήγορη εκτόνωση των υπερπιάσεων και συνεπώς την πιο γρήγορη εκτέλεση της ανάλυσης, αναζητήθηκε η κλίση λ η οποία οδηγεί σε τελική καθίζηση ίση με αυτή που έχει υπολογιστεί με την μέθοδο του Asaoka και αντιστοιχεί στο 100% της στερεοποίησης. Εν συνεχεία, υποθέτοντας και διατηρώντας σταθερούς τους λόγους $\frac{k_h}{k_v} = 2$ και $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$, όπως αυτές υπολογίστηκαν από την ανάστροφη ανάλυση με τις αναλυτικές σχέσεις, και θεωρώντας ταυτόχρονα συντελεστή $m=1.5$ πλησίον της τιμής 1.7 που υπολογίστηκε επίσης από την προηγούμενη ανάλυση, αναζητήθηκε η διαπερατότητα k έτσι ώστε η καθίζηση που αντιστοιχεί στο 90% της στερεοποίησης να επιτυγχάνεται στις 213 μέρες, δηλαδή στο χρονικό σημείο που επήλθε το 90% της στερεοποίησης και σύμφωνα με την εκτίμηση κατά Asaoka, από τις μετρηθείσες τιμές των καθιζήσεων.



Διάγραμμα 5.8: Ανάστροφη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Η καμπύλη που φαίνεται στο διάγραμμα 5.8 αποτελεί την καλύτερη προσέγγιση των δεδομένων των μετρήσεων και υπολογίστηκε για κλίση $\lambda=0.532$ και διαπερατότητα $k=2.4 \cdot 10^{-4}$ m/day, με βάση το μοντέλο το οποίο περιγράφηκε προηγουμένως.

Όπως όμως φαίνεται και στο σχήμα 5.8, η προσέγγιση είναι ικανοποιητική μόνο στο δεύτερο μισό της καμπύλης, δηλαδή για βαθμούς στερεοποίησης $U > 50\%$ και για αυτό έγινε προσπάθεια να προσομοιωθούν καλύτερα τα βήματα επιβολής του φορτίου με το σκεπτικό ότι αυτά επηρεάζουν σημαντικά το πρώτο τμήμα της καμπύλης. Από περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος, προέκυψε η καμπύλη του επόμενου διαγράμματος.

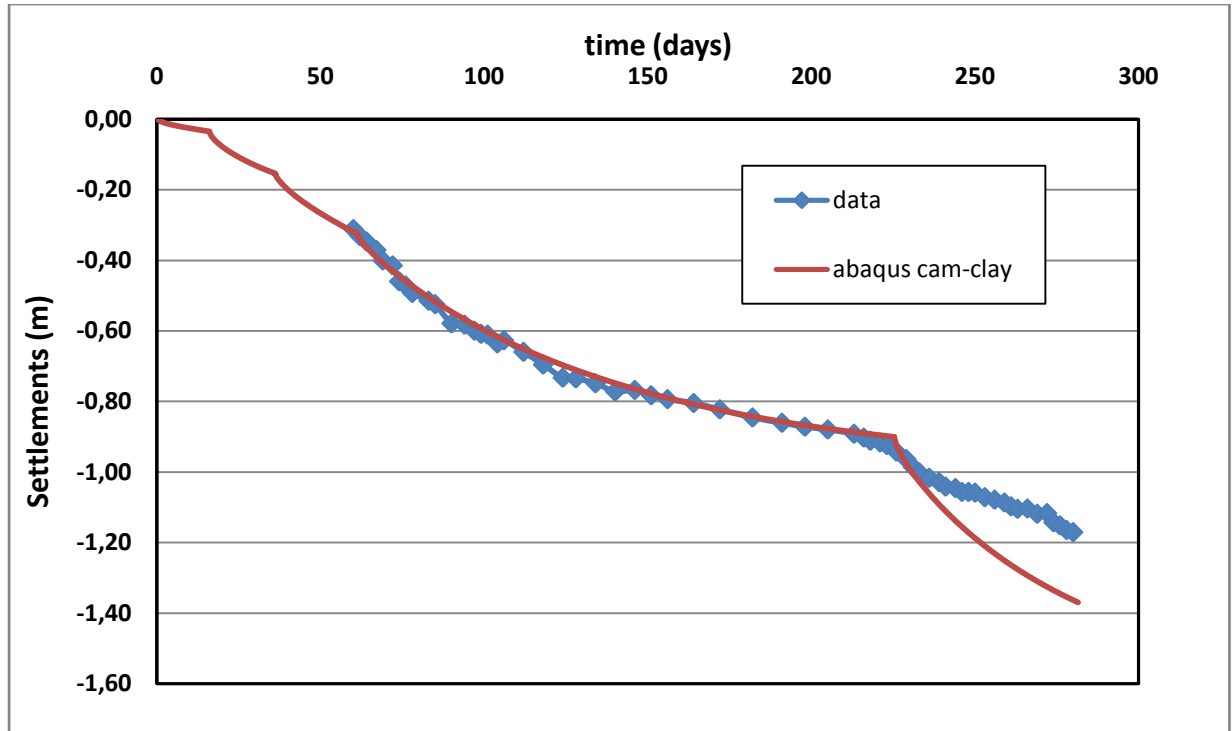


Διάγραμμα 5.9: Ανάστροφη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Η καμπύλη του διαγράμματος 5.9 προέκυψε διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους $\frac{k_h}{k_v} = 2$, $\frac{k_h}{k_{h-s}} = 2$ και $m=1.5$ και αντιστοιχεί σε $\lambda=0.532$ και διαπερατότητα $k=2.57 \cdot 10^{-4}$ m/day.

5.2.3 Διερεύνηση 2^{ου} σταδίου κατασκευής

Με βάση τα αποτελέσματα από την ανάστροφη ανάλυση του πρώτου σταδίου κατασκευής, έγινε προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφορά του εδάφους κατά το 2^ο στάδιο κατασκευής του επιχώματος. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.5, το σύνολο του φορτίου για το 2^ο στάδιο προφόρτισης, τοποθετήθηκε εξ ολοκλήρου στις 22/5/2010, δηλαδή την 225^η μέρα από την έναρξη των διαδικασιών. Το επιπλέον φορτίο είναι ύψους 1.8m και αντιστοιχεί σε πρόσθετη τάση 36 kPa. Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αναμένουμε η καμπύλη που θα προκύψει να προβλέπει ικανοποιητικά την πραγματική συμπεριφορά του έργου. Η καμπύλη που υπολογίστηκε φαίνεται στο διάγραμμα 5.10.



Διάγραμμα 5.10: Ανάλυση για την πρόβλεψη των καθιζήσεων κατά το 2^ο στάδιο κατασκευής.

Από το διάγραμμα 5.10 γίνεται εμφανές ότι η πρόβλεψη είναι κάθε άλλο παρά ικανοποιητική. Η λύση των πεπερασμένων στοιχείων με τις παραμέτρους του εδάφους που υπολογίστηκαν από την αναστροφή ανάλυση του 1^{ου} σταδίου, οδηγεί σε δύο σημαντικές διαφορές:

1. Τα πεπερασμένα στοιχεία υπολογίζουν πολύ μεγαλύτερες καθιζήσεις από τις καθιζήσεις που εμφάνισε το συγκεκριμένο έδαφος.
2. Οι κλίσεις των δύο καμπυλών αποδεικνύουν ότι οι υπάρχει αναντιστοιχία και στην πρόβλεψη του ρυθμού εξέλιξης των καθιζήσεων, καθώς η λύση των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται να "αργεί" πολύ σε σχέση με την πραγματικά παρατηρηθείσα.

Η παραπάνω αναντιστοιχία των αποτελεσμάτων μπορεί να εξηγηθεί με δύο τρόπους: Αφενός, το γεγονός ότι η Τύρφη είναι ένα ιδιαίτερο οργανικό υλικό με σημαντική ετερογένεια στη δομή του, καθιστά αμφίβολο το κατά πόσον ένα καταστατικό προσομοίωμα σαν το MCC μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του. Αφετέρου, υπάρχει σημαντική υποψία ότι το έδαφος το οποίο μελετήθηκε ενδέχεται να είναι υποστερεοποιημένο, εξαιτίας και των ιδιαίτερων γεωλογικών συνθηκών που παρουσιάζει η περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση, οι μετρηθείσες καθιζήσεις κατά το πρώτο στάδιο κατασκευής δεν οφείλονται μόνο στην αύξηση των ενεργών τάσεων από το επίπεδο

των γεωστατικών τάσεων και πάνω, όπως συμβαίνει σε ένα κανονικά στερεοποιημένο έδαφος, αλλά πιθανότητα και σε μία αρχική φάση συμπίεσης του εδάφους μέχρι του επιπέδου των πραγματικών του ενεργών τάσεων. Πιο συγκεκριμένα το γεγονός ότι η περιοχή του έργου στο παρελθόν ήταν βάλτος, δηλαδή σχηματιζόταν στάθμη υδροφόρου πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, σημαίνει ότι κατά την αποξήρανση του βάλτου ενδέχεται μέσα στους πόρους του εδάφους να έχουν εγκλωβιστεί πιέσεις μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν σε μία υδροστατική κατανομή της πίεσης του νερού, με αποτέλεσμα οι αρχικές ενεργές γεωστατικές τάσεις στο έδαφος να είναι ακόμα μικρότερες από αυτές που έχουν ληφθεί υπόψη στην ανάλυση.

Η διερεύνηση της πραγματικής συμπεριφοράς ενός υποστερεοποιημένου εδάφους και η πραγματοποίηση κατάλληλων αναστροφών αναλύσεων θεωρείται ότι ξεφεύγει από το σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γκαζέτας Γ., “Σημειώσεις Εδαφομηχανικής”, Τομέας Γεωτεχνικής, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006
- Καββαδάς Μ., “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006
- Μπουκοβάλας Γ., “Σημειώσεις σε Ειδικά Θέματα Θεμελιώσεων”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004
- Γκαζέτας Γ., Μπουκοβάλας Γ., Καββαδάς Μ., Γερόλυμος Ν., “Υπολογιστική Γεωτεχνική”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009
- Χριστούλας Στ., “Επιλογές Εφαρμοσμένης Γεωτεχνικής Μηχανικής”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1998
- Γιώργος Περικλέους, Καταστατικά Προσομοιώματα Εδαφικών Υλικών με βάση τη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 2008
- Ο.Τ.Μ Α.Τ.Ε , “Οριστική Μελέτη (Γεωτεχνική και Τεχνική) Θεμελίωσης επιχωμάτων από Χ.Θ. 8+860 έως Χ.Θ. 10+560, Γ.Ε.27Ν, Αυτοκινητόδρομος ΜΟΡΕΑΣ”, 2010
- Bowles J.E., “*Foundation Analysis and Design*”, The McGraw-Hill Companies Inc., Singapore, 1997
- Manfred R. Hausmann, “*Engineering Principles of Ground Modification*”, McGraw – Hill, International Editions, 1990
- Carillo, N., “*Simple Two and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils,*” J. Math. Phys., vol.21, no. 1, 1942, pp. 1-5
- Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok,L., “*Consolidation by Vertical Drains*”, Thomas Telford Ltd., London, 1982, pp. 45-66
- Rendulic, L., “*Der hydrodynamische Spannungsausgleich in zentral entwässerten Tonzylindern,*” In Wasserwirtschaft und Technik, Vienna, vol. 3, 1935
- Asaoka, A. “*Observational Procedure of Settlement Prediction*”, Soil and Foundations, vol. 18, no. 4, December 1978, pp. 87-101
- Bipul C. Hawlader, Goro Imai, Balasingam Muhunthan, “*Numerical study of the factors affecting the consolidation of clay with vertical drains*”, Geotextiles and Geomembranes, vol.20, 2002, pp.213-239
- Jun-Chun Chai and Norihiko Miura, “*Investigation of factors affecting vertical drain behavior*”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.125, No. 3, March 1999, pp. 216-226
- Sam Helwany, “*Applied Soil Mechanics with Abaqus Applications*”, John Wiley & Sons, Inc., 2007
- Bergado D.T., Mukherjee K., Alfaro M.C. & Balasubramaniam A.S., “*Prediction of Vertical-Band-Drain Performance by the Finite-Element Method*”, vol. 12, 1993, pp. 567-586

- Bergado D.T., Hiroshi Asakami, Alfaro M.C. & Balasubramaniam A.S., *“Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay”*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 17, No. 10, October 1991, pp. 1509-1530
- Ulusay R., Tuncay E. & Hasancebi N. , *“Geo-engineering properties and settlement of peaty soils at an industrial site (Turkey)”*, Bull Eng Geol Environ, vol. 69, 2010, pp 397-410
- www.moreas.com.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΒΑQUS

ΚΩΔΙΚΑΣ ΑΒΑQUS ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

```

**
**          BOUNDARY CONDITIONS
**
*BOUNDARY, OP=NEW
SIDESX, 1,1,    0.
SIDESY, 2,2,    0.
Bottom, 1,1,    0.
Bottom, 2,2,    0.
Bottom, 3,3,    0.
**
** MATERIALS
**
*Orientation, name=Ori-2
    1.,    0.,    0.,    0.,    1.,    0.
1, 0.
**
***** stone col*****
**
*SOLID SECTION, ELSET=stone_col, MATERIAL=stone
    1.,
*Material, name=stone
*PERMEABILITY,TYPE=ISO,SPECIFIC=10
864,
*Elastic
3714.3, 0.3
***** EDAFOS*****
**
*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=soil, MATERIAL=soil
    1.,
*Material, name=SOIL
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
2.0E-5, 2.0E-5, 1.0E-5,
*Elastic

```

3714.3, 0.3

*****SMEAR_1*****

**

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SMEAR_1, MATERIAL=SMEAR_1

1.,

*Material, name=SMEAR_1

*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10

1.0E-5, 1.0E-5, 1.0E-5,

*Elastic

3714.3, 0.3

*****SMEAR_2*****

**

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SMEAR_2, MATERIAL=SMEAR_2

1.,

*Material, name=SMEAR_2

*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10

2.0E-5, 2.0E-5, 1.0E-5,

*Elastic

3714.3, 0.3

**

** **INITIAL CONDITIONS**

**

*INITIAL CONDITIONS,TYPE=RATIO

allnodes, 1.0

*INITIAL CONDITIONS, TYPE=SATURATION

allnodes, 1.

**

** **STEPS**

**

*Step, name="pressure application", amplitude=RAMP, inc=1

*Soils, consolidation, end=PERIOD, creep=none

0.01, 0.01, , ,

*DLOAD,OP=NEW

Epif_P1,P1,100

Epif_P2,P2,100

Epif_P4,P4,100

```
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
  U,
*ELEMENT OUTPUT
  S,E,PEMAG,VOIDR,POR,FLVEL
*END STEP
***
*Step, name=ONED-Consolidation, inc=8000
*Soils, consolidation, end=PERIOD, creep=none
  1.0, 750., ,1.0 ,
*Boundary
  WATER_TABLE, 8, 8
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
  U,
*ELEMENT OUTPUT
  S,E,PEMAG,VOIDR,POR,FLVEL
*END STEP
```

ΚΩΔΙΚΑΣ ABAQUS ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΠΟΡΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Τα BOUNDARY CONDITIONS παραμένουν σταθερά σε κάθε πρόβλημα και για το λόγο αυτό δεν επαναλαμβάνονται. Επιπλέον, με θεώρηση ποροελαστικότητας, απαιτείται εξαιρετικά μικρό χρονικό βήμα για την εξέλιξη της στερεοποίησης. Για το λόγο αυτό το STEP ONED-Consolidation χωρίζεται σε επιμέρους βήματα που σταδιακά θεωρούν μεγαλύτερο χρονικό βήμα υπολογισμού. Εδώ, απλουστευτικά, παρουσιάζεται μόνο ένα STEP εξέλιξης της στερεοποίησης.

**

** MATERIALS

**

*Orientation, name=Ori-2

1., 0., 0., 0., 1., 0.

1, 0.

**

***** stone_col*****

**

*SOLID SECTION, ELSET=stone_col, MATERIAL=stone

1.,

*Material, name=stone

*PERMEABILITY,TYPE=ISO,SPECIFIC=10

864,

*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON

0.016681, 0.30, 0

**

***** EDAFOS*****

**

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=soil, MATERIAL=soil

1.,

*Material, name=SOIL

*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10

17.0E-4, 17.0E-4, 8.5E-4,

*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON

0.016681, 0.30, 0

**

***** SMEAR_1*****

**

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SMEAR_1, MATERIAL=SMEAR_1
1.,

*Material, name=SMEAR_1

*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
8.5E-4, 8.5E-4, 8.5E-4,

*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.016681, 0.30, 0

**

*****SMEAR_2*****

**

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SMEAR_2, MATERIAL=SMEAR_2
1.,

*Material, name=SMEAR_2

*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
17.0E-4, 17.0E-4, 8.5E-4,

*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.016681, 0.30, 0

**

** **INITIAL CONDITIONS**

**

*INITIAL CONDITIONS,TYPE=RATIO

allnodes, 1.0

*INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS,GEOSTATIC

ALL,-10,0,-10,-12,0.42857, 0.42857

*INITIAL CONDITIONS, TYPE=SATURATION

allnodes, 1.

**

** **STEPS**

**

*Step, name="Geostatic Step"

*STATIC

*DLOAD,OP=NEW

Epif_P1,P1,10

Epif_P2,P2,10

Epif_P4,P4,10

```
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,
*ELEMENT OUTPUT
S,E,PEMAG,VOIDR,POR,FLVEL
*END STEP
****
*Step, name="pressure application", amplitude=RAMP, inc=1
*Soils, consolidation, end=PERIOD, creep=none
0.01, 0.01, , ,
*DLOAD,OP=new
Epif_P1,P1,110
Epif_P2,P2,110
Epif_P4,P4,110
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,
*ELEMENT OUTPUT
S,E,PEMAG,VOIDR,POR
*END STEP
****
*Step, name=ONED-Consolidation, inc=8000
*Soils, consolidation, end=PERIOD, creep=none
0.01, 150, ,0.01 ,
*Boundary
WATER_TABLE, 8, 8
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,
*ELEMENT OUTPUT
S,E,PEMAG,VOIDR,POR,FLVEL
*END STEP
**
```

ΚΩΔΙΚΑΣ ΑΒΑQUS ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο πρόβλημα αυτό, τα εδαφικά γκρουπ του μοντέλου EDAFOS, stone column και SMEAR χωρίζονται σε εδαφικές στρώσεις πάχους ενός μέτρου προκειμένου να τους δοθούν τα χαρακτηριστικά του τροποποιημένου προσομοιώματος cam-clay. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται ο ορισμός μόνο των στρώσεων του φυσικού εδάφους.

**

** MATERIALS

**

*Orientation, name=Ori-2

1., 0., 0., 0., 1., 0.

1, 0.

*****EDAFOS*****

**

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_1, MATERIAL=soil_1

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_2, MATERIAL=soil_2

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_3, MATERIAL=soil_3

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_4, MATERIAL=soil_4

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_5, MATERIAL=soil_5

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_6, MATERIAL=soil_6

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_7, MATERIAL=soil_7

1.,

*SOLID SECTION,orientation=Ori-2 , ELSET=SOIL_E_8, MATERIAL=soil_8

1.,

*Material, name=SOIL_1

*Density

0.4811,

```
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,2.2898, 1, 1
*****
*Material, name=SOIL_2
*Density
0.5095,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,4.6793 , 1, 1
*****
*Material, name=SOIL_3
*Density
0.5276,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607, 7.1682 , 1, 1
*****
*Material, name=SOIL_4
*Density
0.5412,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,9.7276, 1, 1
```



```

*****
*Material, name=SOIL_5
*Density
0.5522,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,12.3427, 1, 1
*****
*Material, name=SOIL_6
*Density
0.5615,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,15.0042, 1, 1
*****
*Material, name=SOIL_7
*Density
0.5696,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,
*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,17.7059, 1, 1
*****
*Material, name=SOIL_8
*Density
0.5769,
*PERMEABILITY,TYPE=ORTHOTROPIC,SPECIFIC=10
4.2E-4, 4.2E-4, 2.1E-4,

```

```

*POROUS ELASTIC, SHEAR=POISSON
0.0532, 0.3, 0
*CLAY PLASTICITY, HARDENING=EXPONENTIAL
0.532, 0.607,20.4430, 1, 1
**
**          INITIAL CONDITIONS
**
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS,GEOSTATIC
SMEAR_E_1,0.0,0,-2.72,-1,0.5, 0.5
SMEAR_E_2,-2.72,-1,-5.56,-2,0.5, 0.5
SMEAR_E_3,-5.56,-2,-8.51,-3,0.5, 0.5
SMEAR_E_4,-8.51,-3,-11.55,-4,0.5, 0.5
SMEAR_E_5,-11.55,-4,-14.66,-5,0.5, 0.5
SMEAR_E_6,-14.66,-5,-17.82,-6,0.5, 0.5
SMEAR_E_7,-17.82,-6,-21.02,-7,0.5, 0.5
SMEAR_E_8,-21.02,-7,-24.28,-8,0.5, 0.5
SOIL_E_1,0.0,0,-2.72,-1,0.5, 0.5
SOIL_E_2,-2.72,-1,-5.56,-2,0.5, 0.5
SOIL_E_3,-5.56,-2,-8.51,-3,0.5, 0.5
SOIL_E_4,-8.51,-3,-11.55,-4,0.5, 0.5
SOIL_E_5,-11.55,-4,-14.66,-5,0.5, 0.5
SOIL_E_6,-14.66,-5,-17.82,-6,0.5, 0.5
SOIL_E_7,-17.82,-6,-21.02,-7,0.5, 0.5
SOIL_E_8,-21.02,-7,-24.28,-8,0.5, 0.5
ST_COL_S1,0.0,0,-7.32,-1,0.5, 0.5
ST_COL_S2,-7.32,-1,-14.96,-2,0.5, 0.5
ST_COL_S3,-14.96,-2,-22.92,-3,0.5, 0.5
ST_COL_S4,-22.92,-3,-31.10,-4,0.5, 0.5
ST_COL_S5,-31.10,-4,-39.46,-5,0.5, 0.5
ST_COL_S6,-39.46,-5,-47.97,-6,0.5, 0.5
ST_COL_S7,-47.97,-6,-56.61,-7,0.5, 0.5
ST_COL_S8,-56.61,-7,-65.36,-8,0.5, 0.5
**
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=PORE PRESSURE
allnodes,0.0,0,80.0,-8
**

```

*INITIAL CONDITIONS, TYPE=SATURATION

allnodes, 1.

Τα STEPS του παρόντος προβλήματος δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν εκ νέου, καθώς είναι όμοια με των παραπάνω προβλημάτων και περιλαμβάνουν εναλλασσόμενες φορτίσεις και περιόδους ελεύθερης εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΈΡΓΟ



Εικόνα Β-1, Β-2: Μάρτυρες για την καταγραφή των καθιζήσεων του επιχώματος.



Εικόνα Β-3: Οι πάσσαλοι άοπλου σκυροδέματος στον πόδα του επιχώματος διακρίνονται λόγω της καθίζησης του επιχώματος.



Εικόνα Β-4: Τοποθέτηση γεωφάσματος.



Εικόνα Β-5,Β-6: Τοποθέτηση γεωυφάσματος διαχωρισμού μεταξύ επιχώματος και ζώνης στράγγισης.



Εικόνα Β-7,Β-8: Κατασκευή χαλικοπασσάλων.



Εικόνα Β-9: Τροφοδοσία του μηχανήματος Δονητικής Συμπύκνωσης με αδρανή.





Εικόνα Β-10,Β-11, Β-12: Διείσδυση του δονητή μέχρι το βάθος σχεδιασμού.



Εικόνα Β-13: Κάνναβος δικτύου χαλικοπασσάλων.



Εικόνα Β-14: Κατασκευή πασσάλων άοπλου σκυροδέματος στον πόδα του επιχώματος.