



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΕΠΙ
ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνα Ναυσικά Σ. Δεμαρτίνου

Επιβλέπων: Δημήτριος Καλιαμπάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΕΠΙ
ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνα Ναυσικά Σ. Δεμαρτίνου

Επιβλέπων: Δημήτριος Καλιαμπάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 21/10/2011

Δημήτριος Καλιαμπάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π, (Υπογραφή)
Δημήτριος Ρόζος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π, (Υπογραφή)
Ανδρέας Μπενάρδος, Λέκτορας Ε.Μ.Π, (Υπογραφή)

ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
ABSTRACT.....	ix
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	6
2.1 Γαιώδη επιχώματα.....	6
2.1.1 Τρόπος κατασκευής επιχωμάτων.....	7
2.1.2 Υλικά πλήρωσης επιχωμάτων.....	7
2.1.3 Μελέτη ευστάθειας.....	9
2.1.4 Επιχώματα σε χαμηλής ποιότητας εδάφη.....	10
2.2 Οργανικά εδάφη.....	11
2.2.1 Συστήματα ταξινόμησης.....	12
2.2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά οργανικών εδαφών.....	13
2.2.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά οργανικών εδαφών.....	14
2.2.4 Επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες.....	15
2.3 Καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης.....	17
2.3.1 Φαινόμενο στερεοποίησης.....	18
2.3.2 Συμπεριφορά των οργανικών εδαφών σε τεχνικά έργα.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ.....	27
3.1 Δεδομένα πραγματικού προβλήματος.....	27
3.1.1 Χαρακτηριστικά επιχώματος.....	28
3.1.2 Οργανομετρικές και αναλυτικές μέθοδοι παρακολούθησης.....	29
3.1.3 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	34
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων.....	34
4.2 Γενικά χαρακτηριστικά προγράμματος PLAXIS 8.x.....	35

4.2.1 Ορισμός Κανάβου	37
4.2.2 Μοντέλα προσομοίωσης	38
4.2.3 Καταστατικοί Νόμοι.....	40
4.2.4 Στάδια ανάλυσης Plaxis	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΑΣ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	62
5.1 Εισαγωγή	62
5.2 Προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας	63
5.3 Εισαγωγή δεδομένων	66
5.4 Υπολογιστική Διαδικασία	72
5.5 Διεξαγωγή Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	86
6.1 Εισαγωγή	86
6.2 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας E οργανικών.....	87
6.2.1 Εισαγωγή δεδομένων	87
6.2.2 Υπολογιστική διαδικασία	92
6.2.3 Διεξαγωγή αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα.....	92
6.3 Μεταβολή πάχους στρώματος οργανικών	99
6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων	99
6.3.2 Διεξαγωγή αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα.....	102
6.4 Μεταβολή της απόστασης του οργανικού στρώματος από την εδαφική επιφάνεια.....	108
6.4.1 Εισαγωγή δεδομένων	108
6.4.2 Διεξαγωγή αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	116
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ	119

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σχηματισμών	28
Πίνακας 3.2: χρήσιμες παράμετροι για την παρακολούθηση	30
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά σχηματισμών	68
Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά σχηματισμών	89
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβολής $E[kPa]$	92
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά σχηματισμών	100
Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης μεταβολής πάχους	102
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά σχηματισμών	109
Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης μεταβολής απόστασης	110

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης	40
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα κύκλων αστοχίας Mohr-Coulomb	40
Διάγραμμα 5.1: Οριζόντιες μετακινήσεις	80
Διάγραμμα 5.2: Κατακόρυφων μετακινήσεων	84
Διάγραμμα 5.3: Κατακόρυφων μετακινήσεων (σε μήκος 43.2mm)	85
Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής μέτρου ελαστικότητας - καθιζήσεων	96
Διάγραμμα 6.2: Διάγραμμα μεταβολής πάχους οργανικών - καθιζήσεων	105
Διάγραμμα 6.3: Διάγραμμα υψομέτρου στρώματος οργανικών – καθιζήσεων	113

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 4.1: Διακριτοποίηση.....	38
Εικόνα 4.2: Μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης.....	39
Εικόνα 4.3: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο.....	39
Εικόνα 4.4: Γενικές ρυθμίσεις.....	44
Εικόνα 4.5: Επιλογές στο σχεδιασμό του μοντέλου	45
Εικόνα 4.6: Εισαγωγή δεδομένων εδαφών.....	48
Εικόνα 4.7: Εισαγωγή χαρακτηριστικών υλικών	49
Εικόνα 4.8: Ρυθμιστικές παράμετροι	50
Εικόνα 4.9: Προσδιορισμός υπολογιστικών παραμέτρων	55
Εικόνα 4.10: Παράμετροι υπολογισμών	57
Εικόνα 4.11: Προσδιορισμός συντελεστών	58
Εικόνα 4.12: Επιλογές καμπυλών.....	60
Εικόνα 5.1: Φέρουσα ικανότητα	64
Εικόνα 5.2: Μηχανισμός αστοχίας.....	65
Εικόνα 5.3: Κύκλοι αστοχίας	65
Εικόνα 5.4: Γεωμετρία του μοντέλου	67
Εικόνα 5.5: Καναβοποίηση.....	69
Εικόνα 5.6: Φρεάτιος οριζοντας.....	70
Εικόνα 5.7: Πιέσεις πόρων	71
Εικόνα 5.8: Γεωστατικές τάσεις.....	72
Εικόνα 5.9: Curve points	74
Εικόνα 5.10: Οριζόντιες μετακινήσεις.....	76
Εικόνα 5.11: Κατακόρυφες μετακινήσεις	81
Εικόνα 6.1: Γεωμετρία μοντέλου	88
Εικόνα 6.2: Καναβοποίηση.....	90

Εικόνα 6.3: Πιέσεις πόρων	91
Εικόνα 6.4: Γεωστατικές τάσεις	91
Εικόνα 6.5 : Κατακόρυφες μετακινήσεις, (α) $E=1000\text{kPa}$, (β) $E=1500\text{kPa}$, (γ) $E=2250\text{kPa}$, (δ) $E=3375\text{kPa}$	94
Εικόνα 6.6: Οριζόντιες μετακινήσεις, (α) $E=1000\text{kPa}$, (β) $E=1500\text{kPa}$, (γ) $E=2250\text{kPa}$, (δ) $E=3375\text{kPa}$	97
Εικόνα 6.7 : Γεωμετρία μοντέλου, (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m	99
Εικόνα 6.8 : Γεωστατικές τάσεις, (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m.....	101
Εικόνα 6.9: Κατακόρυφες μετακινήσεις U_x , (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m	104
Εικόνα 6.10: Οριζόντιες μετακινήσεις U_y , (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m	106
Εικόνα 6.11: Γεωμετρία μοντέλου, (α) 0-6m, (β) 6-12m, (γ) 12-18m.....	108
Εικόνα 6.12: Γεωστατικές τάσεις, (α) 0-6m, (β) 6-12m, (γ) 12-18m	110
Εικόνα 6.13: Κατακόρυφες μετακινήσεις, (α) 0-6m, (β)6-12m, (γ)12-18m.....	111
Εικόνα 6.14: Οριζόντιες μετακινήσεις (α) 0-6m, (β)6-12m, (γ)12-18m.....	114

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών σε περιπτώσεις κατασκευής επιχώματων οδοποιίας σε οργανικά εδάφη. Η προσέγγιση του θέματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και αναλύσεων. Έπειτα από την απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση βασικών εννοιών, η εργασία εξετάζει σε πρώτο στάδιο τη δυνατότητα προσομοίωσης της μακροχρόνιας συμπεριφοράς ενός πραγματικού επιχώματος οδοποιίας, μέσω της χρήσης συγκεκριμένου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων (Plaxis). Με την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας, τα αποτελέσματα των τιμών των παραμορφώσεων της αριθμητικής ανάλυσης, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του αντίστοιχου πραγματικού προβλήματος. Η σύμπτωση των αποτελεσμάτων αποδεικνύει την αξιόπιστη και επιτυχή απόδοση του προγράμματος και κατά συνέπεια, την καταλληλότητά του στην αριθμητική μοντελοποίηση παρόμοιων περιπτώσεων. Στη συνέχεια, η εργασία προχωρά στην υλοποίηση παραμετρικών αναλύσεων, με στόχο τη γενικότερη προσέγγιση του προβλήματος κατασκευής επιχώματων επί οργανικών εδαφών. Έπειτα από την πραγματοποίηση διερευνητικών προσομοιώσεων, επιλέγονται τελικά τρεις κρίσιμοι παράγοντες για την ανάδειξη της συμπεριφοράς των οργανικών στρωμάτων, οι οποίοι και θεωρούνται ως μεταβλητές στα πλαίσια των παραμετρικών αναλύσεων: το μέτρο ελαστικότητας E του οργανικού στρώματος, το πάχος του και η απόστασή του από τη στάθμη θεμελίωσης του επιχώματος. Ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα, προκύπτει αρχικά, η άμεση επίδραση της παρουσίας των οργανικών στις κατακόρυφες παραμορφώσεις (καθιζήσεις), ενώ η επίδρασή τους στις οριζόντιες παραμορφώσεις είναι μεν αξιοσημείωτη, αλλά σαφώς μικρή σε σχέση με τις κατακόρυφες. Ως προς τις παραμέτρους-μεταβλητές, αποδεικνύεται ποσοτικά η μείωση των καθιζήσεων με την ταυτόχρονη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των οργανικών εδαφών. Επίσης, η αύξηση του πάχους των (με ταυτόχρονη μείωση του πάχους των μη οργανικών εδαφών, έτσι ώστε τελικά να διατηρείται σταθερή η γεωμετρία του μοντέλου), προκαλεί σημαντική αύξηση των κατακόρυφων κινήσεων. Τέλος, κατά την απομάκρυνση της θέσης του στρώματος των οργανικών εδαφών από την επιφάνεια έδρασης του επιχώματος (διατηρώντας και πάλι σταθερή τη συνολική γεωμετρία του προβλήματος), συντελείται μείωση του μεγέθους των καθιζήσεων.

ABSTRACT

Demartinou, K.N., National Technical University of Athens, October 2011. Long-term deformations of embankments on organic soils: Analysis with finite elements. Supervisor: Professor Dimitrios Kaliampakos.

The diploma thesis deals with the mechanical behavior of soil formations, in cases of the construction of embankments on organic soils. The problem was studied through numerical simulation and analyses using a finite element program. More specifically, after the necessary literature review, the ability of a specific finite element program (Plaxis) to simulate the behavior of a real highway embankment is examined (validation). The results of the numerical analysis in terms of deformations were compared to those of the case study. The agreement of the results of the simulations with those of the actual problem proves the reliability of the program in these type of problems and consequently its suitability in modeling similar cases. Based on this, the objective of the second step of the research was to estimate the behavior of organic soils that lie under embankments, through parametric analyses. After the performance of a set of preliminary simulations, three critical factors were chosen as variables in order to approach the behavior of the organic layers: the Young's modulus E , the thickness and the distance of the organic layer from the embankment's foundation level. For each case, conclusions were drawn for the resulting soil deformations. The interpretation of the results showed that the presence of the organic layer affected directly the vertical displacements. The impact on the horizontal displacements was noteworthy, but clearly less than on the vertical. In regard to the variables, the reduction of the deformations is proven and calculated, at the simultaneous increase of the Young's modulus of the organic soils. Moreover, the increase of the thickness of the organic layers, while the overall geometric boundaries of the problem remain the same, causes remarkable increase of the settlements. Finally, the settlements were reduced during the removal of the organic layer from the burial surface of the embankment, again while the total thickness of the model's geometry and the layer's respectively, remains invariable.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία εκπονήθηκε υπό την αιγίδα του Εργαστηρίου Μεταλλευτικής Τεχνολογίας και Περιβαλλοντικής Μεταλλευτικής και συγκεκριμένα υπό την επίβλεψη του κ. Δημητρίου Καλιαμπάκου, Καθηγητή ΕΜΠ. Στο σημείο αυτό, οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς το πρόσωπό του, για την εμπιστοσύνη που έδειξε, καθώς και για την καθοριστική σημασία παρουσία του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Ζευγώλη, Μηχανικό Μεταλλείων ΕΜΠ – Δρ. Γεωτεχνικό Μηχανικό, για την επιστημονική του καθοδήγηση και τη διαρκή συμβολή και συνεργασία του, με στόχο την πραγμάτωση της παρούσας εργασίας.

Η διαρκής ανάπτυξη των τεχνικών έργων στις μέρες μας συνδέεται άμεσα με την ευρύτερη χρήση επιχωμάτων. Η μελέτη και κατασκευή τους ως μέρος ενός μεγάλου εύρους τεχνικών έργων (με χαρακτηριστικότερα αυτά της οδοποιίας), δημιούργησε την ανάγκη διεξοδικών μελετών με σκοπό την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς τους επί εδαφικών σχηματισμών διαφόρων χαρακτηριστικών. Συχνά, οι αβαθείς σχηματισμοί που λειτουργούν ως επιφάνειες έδρασης των επιχωμάτων αποτελούνται από χαμηλής ποιότητας εδάφη, όπως για παράδειγμα τα οργανικά. Σε αυτή την περίπτωση, δημιουργείται εξ ορισμού ένα αντικείμενο μελέτης με ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον, γεγονός που αποτέλεσε κίνητρο για την ενασχόλησή μου με το εν λόγω θέμα. Αντικείμενο λοιπόν της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη (μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία) της συμπεριφοράς ενός συστήματος επιχώματος και οργανικών εδαφών ως μέσο θεμελίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο, « Μακροχρόνιες παραμορφώσεις επιχωμάτων επί οργανικών εδαφών: Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία», έχει ως αντικείμενο μελέτης την κατασκευή επιχωμάτων εδραιωμένων πάνω σε υποκείμενα στρώματα οργανικών εδαφών. Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των εν λόγω σχηματισμών είναι ο λόγος που χαρακτηρίζουν μία τέτοια κατασκευή ως δυσχερή. Οι ιδιότητες της χαμηλής πυκνότητας, του υψηλού λόγου κενών, καθώς και η αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία, τα καθιστούν γνωστά ως «προβληματικά» εδάφη. Το πρόβλημα ουσιαστικά έγκειται στην υψηλή συμπιεστότητά τους και στην ευαισθησία τους στα φαινόμενα ερπυσμού, δεδομένα που σε συνδυασμό με τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που περιέχουν, οδηγούν σε αλλοίωση της διατμητικής αντοχής και συνεπώς σε επισφαλείς καταστάσεις ευστάθειας των επιχωμάτων. Η επιβολή φορτίου λόγω της κατασκευής του επιχώματος, αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υποκείμενου εδάφους, που ήδη περιγράφηκαν, αποτελούν τους δύο κύριους παράγοντες για την ανάπτυξη καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης. Η παρούσα εργασία επομένως, καλείται να μελετήσει, να παρακολουθήσει και να αναλύσει τη συμπεριφορά των παραμέτρων εκείνων που κρίνονται κρίσιμες, ως προς την ανάπτυξη παραμορφωτικών κινήσεων του εδάφους θεμελίωσης. Ο ρυθμός ανάπτυξης του φαινομένου των καθιζήσεων εξαρτάται κυρίως, από τη φύση του υλικού που συναντάται και συγκεκριμένα, μειώνεται υπό την παρουσία συνεκτικών εδαφών. Η απαίτηση της γνώσης των μεγεθών και του ρυθμού ανάπτυξης των κινήσεων αυτών στη γεωτεχνική μηχανική, ουσιαστικά διαμορφώνει και τον απώτερο σκοπό της έρευνας.

Στο πλαίσιο της μελέτης της εδαφικής συμπεριφοράς, υπό την επιβολή φορτίου λόγω του επιχώματος, ο τρόπος προσέγγισης που αποφασίστηκε, είναι μέσω πραγματικού προβλήματος κατασκευής επιχώματος οδοποιίας, στη χώρα της Ελβετίας. Πρόκειται για την κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος, ως μέρος συνολικού τεχνικού έργου αυτοκινητόδρομου. Η έννοια του δοκιμαστικού, πρακτικά ερμηνεύει τη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του επιχώματος, με τρόπο τέτοιο, ώστε να προσεγγίζονται οι πραγματικές γεωτεχνικές συνθήκες που λαμβάνουν μέρος στην κατασκευή. Η μέθοδος που εφαρμόζεται με σκοπό την επίλυση του προβλήματος, είναι η

αριθμητική ανάλυση μέσω μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, με χρήση του προγράμματος Plaxis. Το δοκιμαστικό επίχωμα το οποίο και προσομοιώνεται, αφορά γεωμετρία 4m ύψους, ενώ αποτελεί τμήμα της κατασκευής αυτοκινητόδρομου μήκους 7km. Πέραν των δυσχερειών που περιγράφηκαν παραπάνω, ως προς τη φύση των εδαφικών υλικών, παράγοντας που ενδεχομένως ευνοεί την ανάπτυξη των μετακινήσεων, είναι η συμπόρευση για ορισμένα χιλιόμετρα του εν λόγω τεχνικού έργου με ένα κανάλι βάθους 2.5m. Στόχος είναι, μέσω της μοντελοποίησης και μετέπειτα της αριθμητικής ανάλυσης, η διερεύνηση των μετακινήσεων που πιθανώς θα επέλθουν, κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά το πέρας της κατασκευής.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με το οποίο υλοποιείται η παρούσα μελέτη, αποτελεί βασικό εργαλείο για την διαμόρφωση των απαραίτητων συνθηκών, με την καλύτερη δυνατή προσέγγιση στις ρεαλιστικές. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που παρέχει τη δυνατότητα διακριτοποίησης του συνολικού χώρου, με αποτέλεσμα την μετατροπή του σε διακριτούς υποχώρους. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η ευχερέστερη αριθμητική ανάλυση των επιθυμητών μοντέλων, υπό δισδιάστατη μορφή, επιλύοντας έτσι το πρόβλημα της πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικότητας της συμπεριφοράς του εδάφους. Παρέχοντας στο χρήστη ποικίλες επιλογές για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας, των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών που συμμετέχουν, αλλά και των αρχικών υδροστατικών και γεωστατικών συνθηκών, προχωρά στην επίλυση του μοντελοποιημένου προβλήματος, απεικονίζοντας τα αποτελέσματα που επιθυμούνται.

Διατηρώντας ως κριτήριο αναφοράς και αξιοπιστίας την έκβαση του πραγματικού προβλήματος που περιγράφηκε, τέθηκε ως στόχος η εξακρίβωση και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, όσον αφορά στη μοντελοποίηση και ανάλυση απλών γεωτεχνικών προβλημάτων. Με την επίτευξη του ανωτέρου στόχου, αποφασίστηκε η διεύρυνση της προαναφερθείσας μελέτης, προς μία κατεύθυνση περισσότερο γενικευμένη και απλή. Με αφετηρία το δοκιμαστικό επίχωμα οδοποιίας, διαμορφώθηκε το μοντέλο ενός απλού και μη εξειδικευμένου γεωμετρικά, επίχωματος, το οποίο θεμελιώνεται σε έδαφος που απαρτίζεται από οργανικούς σχηματισμούς. Έπειτα από μία θεωρητική ανασκόπηση, διαπιστώθηκαν οι παράμετροι οι οποίες κρίθηκαν οι περισσότερο σημαντικές, στην ανάπτυξη των όποιων μορφών εδαφικών παραμορφώσεων, λόγω των δυσκολιών που επιφέρουν τα οργανικής φύσης υλικά. Τοιούτοτρόπως, υλοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις, με κρίσιμες μεταβλητές τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν από τη θεωρητική μελέτη και

συνοψίζονται στο μέτρο ελαστικότητας, το πάχος των οργανικών και την απόστασή τους από την επιφάνεια εδάφους, με σκοπό τη διεξαγωγή συμπερασμάτων, που αφορούν γενικότερες περιπτώσεις κατασκευής επιχωμάτων πάνω σε οργανικού τύπου υλικά.

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται συνολικά από 7 κεφάλαια , των οποίων η δομή και τα περιεχόμενα περιλαμβάνουν τα εξής:

- Το κεφάλαιο πρώτο διαμορφώνεται από την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, στην οποία ουσιαστικά εισάγεται ο αναγνώστης στο πρόβλημα και το θέμα που πραγματεύεται η εργασία που ακολουθεί, όσον αφορά την κατασκευή επιχωμάτων σε οργανικά εδάφη. Παραθέτοντας μία περιληπτική ανάλυση του ενασχολούμενου προβλήματος, του τρόπου με τον οποίο επιλέγεται η προσέγγισή του, καθώς και των επιθυμητών στόχων της εργασίας, επιτυγχάνεται η πρώτη επαφή του αναγνώστη με το αντικείμενο μελέτης.
- Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο, με τίτλο «Βιβλιογραφική ανασκόπηση», εισάγονται για πρώτη φορά και επεξηγούνται βασικές έννοιες με τις οποίες ασχολείται η εργασία. Ορίζεται η έννοια του επιχώματος και ιδιαίτερα του δοκιμαστικού, ο τρόπος κατασκευής του, καθώς και οι παράμετροι που συμμετέχουν για την ασφαλή κατασκευή και λειτουργία του. Έπειτα, γνωρίζονται τα οργανικά εδάφη, ως προς τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που τα διαμορφώνουν, ενώ παρουσιάζονται και οι λόγοι για τους οποίους κρίνονται δυσχερή σε κατασκευές επιχωμάτων. Τέλος, περιγράφεται το φαινόμενο των καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης, που είναι και το αποτέλεσμα της παρουσίας των οργανικών σε τέτοιου είδους κατασκευές. Για τη βέλτιστη κατανόηση, επιπροσθέτως, παραθέτονται και πραγματικά παραδείγματα αστοχιών υπό αντίστοιχες συνθήκες θεμελίωσης, με σκοπό τη σύνδεση των παραπάνω εννοιών σε πραγματικές διαστάσεις.
- Στο τρίτο κατά σειρά κεφάλαιο, με τίτλο «Δεδομένα προβλήματος Ελβετίας», γίνεται η παρουσίαση του προβλήματος, το οποίο στάθηκε ως αφετηρία για το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για ένα δοκιμαστικό επίχωμα, ως τμήμα ενός τεχνικού έργου κατασκευής αυτοκινητόδρομου στην Ελβετία, που σκοπό είχε την πρόβλεψη και μελέτη των επερχόμενων

καθιζήσεων, λόγω της επιβαλλόμενης φόρτισης από το έργο. Γνωστοποιούνται με αυτόν τον τρόπο, όλες οι πραγματικές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα, η γεωμετρία του, οι γεωλογικές συνθήκες του υπεδάφους, οι συνθήκες υδάτων, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις οργανομετρικές και αριθμητικές αναλύσεις που διεξήχθησαν. Τα αποτελέσματα αυτά, θα αποτελέσουν στη συνέχεια το σημείο σύγκρισης και αξιολόγησης, μεταξύ των διεξαχθέντων αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

- Το τέταρτο κεφάλαιο αφιερώνεται πλήρως στην περιγραφή του μέσου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη της συγκεκριμένης ανάλυσης. Πρόκειται για την παρουσίαση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis και συγκεκριμένα των ικανοτήτων και δυνατοτήτων που παρέχει στο χρήστη. Αναλύεται η δομή σύμφωνα με την οποία το πρόγραμμα επεξεργάζεται τα εκάστοτε στοιχεία, ορίζονται τα μοντέλα επίλυσης που παρέχονται, ως καταστατικοί νόμοι, καθώς και οι απαραίτητες λειτουργικές και ρυθμιστικές παράμετροι. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια επίλυσης του προβλήματος, σύμφωνα με τα οποία το πρόγραμμα υλοποιεί την υπολογιστική διαδικασία και περιγράφονται περιφραστικά όλα τα στοιχεία που συντελούν την εισαγωγή δεδομένων, την υπολογιστική διαδικασία και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων.
- Επόμενο κεφάλαιο, το πέμπτο, με τίτλο «Παρουσίαση πραγματικού προβλήματος με το πρόγραμμα Plaxis», είναι αυτό που ουσιαστικά ξεκινά η μοντελοποίηση του προβλήματος, εισάγονται οι απαραίτητες παράμετροι και διενεργείται η διαδικασία επίλυσής του. Στόχος του κεφαλαίου είναι, μέσω της μελέτης των εδαφικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται, λόγω της παρουσίας οργανικών εδαφών κατά την κατασκευή του επιχώματος, η αξιολόγηση της ικανότητας του προγράμματος στην επίλυση τέτοιου τύπου γεωτεχνικών προβλημάτων. Προσεγγίζοντας πια το πραγματικό πρόβλημα, υλοποιείται η διαμόρφωση του μοντέλου επίλυσης, εισάγοντας τις παραμέτρους που το αφορούν. Ταυτόχρονα, επιλέγεται ο τρόπος επίλυσης, σύμφωνα με τα καταστατικά μοντέλα, οι αρχικές υδροστατικές και γεωστατικές συνθήκες και ακολουθεί τοιούτο τρόπος, η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Κατά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, διεξάγονται τα

αποτελέσματα και διατηρώντας ως σημείο αναφοράς τα αποτελέσματα του πραγματικού προβλήματος, ως μέσο αξιοπιστίας, διαμορφώνονται και απεικονίζονται τα συμπεράσματα.

- Τελευταίο υπολογιστικό κεφάλαιο αποτελεί το έκτο, με τίτλο «Παραμετρικές αναλύσεις». Η υλοποίηση ή όχι, αυτού του κεφαλαίου καθορίστηκε από τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν στο προηγούμενο. Η απόδειξη της ικανότητας του προγράμματος να επιλύσει τέτοιου τύπου γεωτεχνικά προβλήματα, αποτέλεσε την αφετηρία για την πραγματοποίηση παραμετρικών αναλύσεων, σε αντίστοιχα γεωτεχνικά προβλήματα, απλούστερης μορφής. Σκοπός του κεφαλαίου είναι, η γενικότερη μελέτη προβλημάτων επιχωμάτων πάνω σε οργανικά εδάφη, μέσω τριών παραμετρικών αναλύσεων, που μεταβλητές τους αποτελούν οι παράγοντες του μέτρου ελαστικότητας, του πάχους του οργανικού στρώματος και της απόστασής του από την επιφάνεια έδρασης, ως οι καθοριστικότεροι για την εδαφική συμπεριφορά, σε τέτοιου είδους περιβάλλον.
- Συνοψίζοντας, τα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας συγκεντρώνονται στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, με τίτλο «Συμπεράσματα». Όπως φανερώνει και ο τίτλος του κεφαλαίου, πρόκειται για τη σύνοψη του συνόλου των συμπερασμάτων που διεξήχθησαν σε κάθε επιμέρους ενότητα. Σύμφωνα με τις αναλύσεις και τους υπολογισμούς που διεξήχθησαν στο κεντρικό μέρος της διπλωματικής, παραθέτονται απαντήσεις στη μορφή γενικών συμπερασμάτων, που αφορούν στην ειδική αλλά και γενική περίπτωση γεωτεχνικών προβλημάτων κατασκευής επιχωμάτων σε οργανικά εδάφη. Με γνώμονα και τα αριθμητικά αποτελέσματα, ερμηνεύεται η συμπεριφορά εν τέλει, των οργανικών υλικών, ως περιβάλλον κατασκευής, καθώς και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν, δυσχεραίνοντας μία τέτοια τεχνική κατασκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γαιώδη επιχώματα

Με τον όρο επίχωμα και ειδικότερα γαιώδες, καλείται μια υπερυψωμένη κατασκευή αποτελούμενη από στρώσεις κατάλληλων εδαφικών υλικών, που έχουν υποστεί συμπύκνωση. Το πάχος των στρωμάτων πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός βαθμός συμπύκνωσης μέσω του διαθέσιμου εξοπλισμού, (ΙΟΚ 2001). Η κατασκευή των επιχωμάτων πραγματοποιείται τμηματικά, σε διαστάσεις κατάλληλες για τη χρήση μηχανικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης. Τα τμήματα που διακρίνονται είναι τα εξής:

Θεμέλιο: ονομάζεται το τμήμα που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, αφού έχει προηγηθεί ο καθαρισμός, η εκρίζωση κι η απομάκρυνση των ακατάλληλων υλικών, (ΤΣΥ 2003).

Πυρήνας: πρόκειται για το στρώμα του επιχώματος μεταξύ θεμελίου και στέψης, (ΤΣΥ 2003).

Στέψη: είναι η επιφάνεια κάτω από τη στρώση έδρασης του οδοστρώματος, η οποία εκτείνεται σε καθορισμένο βάθος, (ΤΣΥ 2003).

Κάθε επίχωμα καθορίζεται από συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές με σκοπό την εξασφάλιση της βέλτιστης συμπεριφοράς και λειτουργικότητάς του. Γενικότερα, για τον ασφαλή έλεγχο των επικρατούσων συνθηκών, οι μελέτες επικεντρώνονται στον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας των επιμέρους στρώσεων του υπεδάφους, προχωρώντας έτσι σε μία συντηρητική εκτίμηση των αντίστοιχων παραμέτρων των υλικών του επιχώματος. Ισοδύναμα, ερευνώνται και οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων και καταγράφονται οι απαιτήσεις αποστράγγισης ή όποιων άλλων διεργασιών στη διεπιφάνεια θεμελίωσης.

2.1.1 Τρόπος κατασκευής επιχωμάτων

Η κατασκευή των επιχωμάτων πραγματοποιείται σε τμήματα. Προτού ξεκινήσει η διάστρωση, απομακρύνονται τα επιφανειακά ακατάλληλα υλικά ή η παρούσα φυτική γη και αντικαθίστανται από αποδεκτά υλικά, τα οποία στη συνέχεια συμπυκνώνονται. Ο βαθμός συμπύκνωσης στην επιφάνεια έδρασης ενδείκνυται να φτάνει το 90% της μέγιστης πυκνότητας της τροποποιημένης συμπύκνωσης. Εκτός από τον όγκο του επιχώματος, υφίσταται συμπύκνωση και το έδαφος που εκτείνεται έως και τουλάχιστον 2 μέτρα πέραν του πόδα του επιχώματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με κάθε νέο τμήμα επικάλυψης, το οποίο τοποθετείται με ισοδύναμο πάχος και παράλληλα με το υποκείμενό του. Για την αποφυγή συσσωρεύσεων υδάτων και συνεπώς απώλειας ευστάθειας, διαμορφώνεται μία ήπια εγκάρσια κλίση με σκοπό την αποτελεσματικότερη απορροή.

Ο τρόπος κατασκευής των πρώτων επιχωμάτων στηριζόταν στην απόθεση χαλαρών εδαφικών υλικών πάνω από ήδη συμπληρωμένα τμήματα, με συνήθεις κλίσεις της τάξης 1:1.5, 1:1.75, (κάθετα : οριζόντια), (ΚΜΕ 2003). Με την πάροδο των χρόνων, η κατασκευή τους πήρε τη μορφή που έχει ως σήμερα, η οποία στηρίζεται στην απόθεση των επιχωμάτων με τη χρήση προωθητών γαιών, σε στρώματα πάχους περίπου 0.3 μέτρων και τη μετέπειτα συμπίεσή τους, μέσω συμπυκνωτών, μέχρι τον επιθυμητό βαθμό. Οι σημερινές ασφαλείς τιμές κλίσεων παραμένουν στο 1:1.5 για κοκκώδη εδάφη, ενώ για συνεκτικά ποικίλουν μεταξύ 1:2 και 1:3, ανάλογα με το ύψος του επιχώματος. Εξασφαλίζεται με αυτή την επιλογή η αυξημένη ευστάθεια του πρανούς, η βέλτιστη ένταξή του στον περιβάλλοντα χώρο, καθώς διευκολύνονται κι οι απαραίτητες εργασίες φύτευσης.

2.1.2 Υλικά πλήρωσης επιχωμάτων

Η επίτευξη ή όχι του απαραίτητου και επιθυμητού βαθμού συμπύκνωσης των επιχωμάτων, εξαρτάται πλήρως από τη φύση του υλικού που απαρτίζει το σώμα του επιχώματος. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη της κατάλληλης επιλογής υλικού, κρίνοντας την ποιότητά του μέσω των ορίων Atterberg (Atterberg limit) και της μέγιστης τιμής ξηρής πυκνότητας. Τα υλικά που κυρίως, αποτελούν τα επιχώματα είναι κοκκώδη, αν και πολλές φορές ο οικονομικός παράγοντας είναι αυτός που υποδεικνύει την επιλογή των πλησιέστερων στην κατασκευή υλικών, με την προϋπόθεση ότι δεν πρόκειται για

υψηλής περιεκτικότητας σε οργανικά. Ο καθορισμός της ποιότητας των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και η ταξινόμησή τους, βάσει των κοκκομετρικών χαρακτηριστικών και των ορίων συνεκτικότητας, είναι επίσης μία σημαντική λειτουργική παράμετρος. Ακατάλληλα υλικά για την κατασκευή επιχωμάτων είναι εκείνα που αποτελούνται από οργανικά, λεπτόκοκκα διογκούμενα υγρά, θιξοτροπικά, διαλυτά και ρυπαντικά. Βασική παράμετρος για την επιλογή του καταλληλότερου καλώς-διαβαθμισμένου υλικού, είναι ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας του υλικού με την επιθυμητή βέλτιστη τιμή της. Γνωρίζοντας τα όρια υδαρότητας και πλαστιμότητας, εκτιμάται η πιθανότητα ή μη, του δανειζόμενου υλικού, απόκτησης του επιθυμητού ποσοστού υγρασίας υπό τις επικρατούσες συνθήκες, (Holts and Gibbs 1956a, Seed et al. 1962). Δυσχερής κατάσταση θεωρείται για ένα μηχανικό η διαχείριση ενός υλικού με υπερβολική περιεχόμενη υγρασία, υπό υγρό περιβάλλον, καθώς παρεμποδίζεται η φυσική στράγγισή του και επομένως, δύσκολα θα επιτευχθεί το 90-95% ποσοστό ξηρής πυκνότητας που συνήθως απαιτείται. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο μηχανικός καλείται να ερευνήσει τη συμπεριφορά της αντοχής του υλικού του επιχώματος, μετά την απόθεσή του, υπό τη φυσική του υγρασία και να το διαχειριστεί με τα κατάλληλα μέσα συμπύκνωσης, ώστε να πετύχει ένα μεγαλύτερο λόγο κενών.

Όσον αφορά τη χρήση αργιλικών υλικών μεγάλης δυσκαμψίας για την κατασκευή επιχωμάτων, ελλοχεύει ο κίνδυνος μεταγενέστερης επέκτασης, λόγω διόγκωσής τους κατά την επαφή με το νερό. Στην περίπτωση αυτή, η πιθανή δημιουργία ρωγμών οδηγεί στην αποσύνθεση των αργιλικών υλικών της κατασκευής, με αποτέλεσμα την πιθανή ολίσθηση των πρανών. Το μέγεθος της διόγκωσης σε ένα επίχωμα εξαρτάται από τη φυσική ικανότητα διόγκωσης του υλικού, καθώς και από άλλους παράγοντες, όπως η περιεχόμενη φυσική υγρασία τη στιγμή της απόθεσης, ο βαθμός και η μέθοδος συμπύκνωσης που υφίσταται και η ασκούμενη πίεση που δέχεται λόγω των υπερκειμένων. Στην περίπτωση που σημειωθεί αύξηση του όγκου άνω του 5%, υπό κατακόρυφη πίεση, το επίχωμα φαίνεται πιθανό να αστοχήσει. Γενικότερα, έχει αποδειχθεί ότι η φυσική ικανότητα διόγκωσης συνδέεται άμεσα με την πλαστικότητα του υλικού (Holts and Gibbs 1956a, Seed et al. 1962). Οι επιπτώσεις του φαινομένου της διόγκωσης μπορούν να περιοριστούν με την απόθεση των υλικών στη μέγιστη περιεχόμενη υγρασία που κατέχουν και έπειτα, την επικάλυψή τους με υλικά μη-διογκούμενα. Το βάρος ακόμα και ενός μέτρου μόνο μη-διογκούμενου υλικού,

σταδιακά προκαλεί τη μείωση του μεγέθους της επέκτασης καθώς και της αλλοίωσης της αντοχής του υλικού.

2.1.3 Μελέτη ευστάθειας

Ως προς την ευστάθεια του επιχώματος, απαραίτητη είναι η μελέτη των συνθηκών και συνδυασμών φορτίσεων που θα επιβληθούν, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και συνεπώς η εκτίμηση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας, (Karl Terzaghi, article 35). Σημαντικό ρόλο κατέχει κι η επιλογή του πάχους των στρωμάτων ώστε να εξασφαλιστεί η μη υπέρβαση του ορίου αντοχής του εδάφους, ιδιαίτερα για εδάφη με μικρή φέρουσα ικανότητα. Οι μελέτες ευστάθειας για την κατασκευή επιχώματος πάνω από χαλαρά εδάφη θα μπορούσε να διακριθούν σε δύο επιμέρους τμήματα. Αρχικά, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της συμπεριφοράς του εδαφικού σχηματισμού, σύμφωνα με την οποία αποκτάται η γνώση για το προφίλ του εδάφους και τις φυσικές του ιδιότητες. Έπειτα, ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας, συνυφασμένος με αστοχία βάσης. Ικανοποιητική τιμή του συντελεστή ασφαλείας για τέτοιου είδους συνθήκες θεωρείται αυτή της τάξης του 1.5, τουλάχιστον.

Αναφέρθηκε παραπάνω η αστοχία βάσης που πραγματοποιείται σε τέτοιες κατασκευές, ως μια μορφή αστοχίας. Όπως έχει ήδη γίνει γνωστό, ο σχεδιασμός του επιχώματος θα πρέπει να μελετάται, εκτός από την πλευρά της συμπεριφοράς του υλικού πλήρωσης και από τη μεριά των συνθηκών του υπεδάφους. Οι αστοχίες βάσεις μπορούν να αναπτυχθούν σε διάφορες μορφές. Αρχικά, το υλικό πλήρωσης δύναται να "βυθιστεί" μέσα στο σώμα του και η αστοχία αυτή ονομάζεται βύθιση μέσα στο έδαφος (failure by sinking into the ground). Μια άλλη μορφή αστοχίας εμφανίζεται με την εξάπλωση του υλικού του επιχώματος και του στρώματος στο οποίο κείται, πάνω στο υποκείμενο στρώμα αργίλου ή υλικού υψηλού σε υγρασία, γνωστή ως failure by spreading, (Karl Terzaghi, article 47). Τέτοιου είδους αστοχίες έχουν παρατηρηθεί κυρίως σε επιχώματα που αποθέτονται πάνω σε στρώματα μαλακών αργίλων, που παρ' όλα αυτά μπορεί να θεωρηθούν ασφαλή για αστοχίες λόγω ρωγμάτωσης. Η κύρια μορφή στην οποία εμφανίζεται πρόκειται για αργή υποχώρηση του λοφίου του επιχώματος, παίρνοντας ένα γενικό σχήμα $-S$ και ταυτόχρονη ανύψωση του εδάφους για μικρή απόσταση γύρω από το πόδι του πρανούς. Αντίθετα, άλλου τύπου αστοχίες αναπτύσσονται με πολύ γρήγορους

ρυθμούς, ενώ η ανύψωση του εδάφους παρατηρείται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από το πόδι του πρανούς του επιχώματος. Γνωστό περιστατικό τέτοιας μορφής αστοχίας είναι αυτό του φράγματος Lafayette. Πρόκειται για φράγμα ύψους 36 μέτρων, όπου το λοφίο του υποχώρησε κατά 5 μέτρα, σε μήκος περίπου 150 μέτρων, σε διάρκεια 3 ημερών. Ο πόδας του μετακινήθηκε περίπου 6 μέτρα, ενώ η ανύψωση του εδάφους παρατηρήθηκε για μικρό μήκος. Εν αντιθέσει, το ανάχωμα Hartford, ύψους 10 μέτρων, αστόχησε σε λιγότερο από ένα λεπτό της ώρας. Η υποχώρηση του λοφίου ήταν και πάλι στα 5 μέτρα, αλλά σε μήκος εκτεινόταν για περίπου 300 μέτρα. Στον πόδα του πρανούς υπήρξε μετακίνηση μιας διαμορφωμένης γραμμής, κατά 20 μέτρα και η ανυψωτική κίνηση του εδάφους επεκτάθηκε για 50 μέτρα από το πόδι του επιχώματος. Στην περίπτωση που το σώμα του επιχώματος περιέχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας είναι πιθανή η αστοχία λόγω άντλησης, ως απόρροια παρελθοντικής διάβρωσης, λόγω ανάδυσης πηγών στον πόδα του επιχώματος, η λεγόμενη fail by riping. Τέλος, υπάρχει η περίπτωση αστοχίας βάσης επιχωμάτων που βρίσκονται πάνω από στρώματα χαλαρών εδαφών, τα οποία κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών δονήσεων υγροποιούνται.

2.1.4 Επιχώματα σε χαμηλής ποιότητας εδάφη

Όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρκετές φορές υπάρχει η ανάγκη κατασκευής επιχωμάτων πάνω από χαλαρά και χαμηλής ποιότητας εδάφη, τα οποία δυσκολεύονται να παραλάβουν το φορτίο ενός επιχώματος, έστω και ενός μόνο μέτρου ύψους. Υπάρχουν πολλές περιοχές που αποτελούνται από μαλακό ελώδες έδαφος, το οποίο επικαλύπτεται από ένα στρώμα στεγνού σχηματισμού, ο οποίος λειτουργεί ως υπόβαθρο για την κατασκευή που πρόκειται να πραγματοποιηθεί. Παρ' όλα αυτά, το στρώμα αυτό είναι ικανό να παραλάβει το φορτίο, αλλά προσωρινά, καθώς το επίχωμα μπορεί να καθιζάνει σταδιακά, για χρόνια ή και δεκαετίες, με αποτέλεσμα την ξαφνική διάρρηξη και του στρώματος-υποβάθρου. Τέτοιες περιπτώσεις είναι που κρίνεται απαραίτητη η επέμβαση του μηχανικού με σκοπό την αντιμετώπισή τους. Τα μέτρα που μπορεί να ληφθούν σε τέτοιες συνθήκες σχετίζονται είτε με την απομάκρυνση του μαλακού υλικού, αν φυσικά το επιτρέπει το πάχος του εν λόγω στρώματος, είτε με την απόθεση του επιχώματος σε τέτοιο ρυθμό, ώστε το μαλακό έδαφος να αποκτά ικανοποιητική αντοχή μέσω της στερεοποίησης και να είναι έτοιμο να παραλάβει το φορτίο του επιχώματος.

Ουσιαστικά, πρόκειται για κατασκευή με ρυθμό αργότερο από το ρυθμό της στερεοποίησης, που σαφώς απαιτεί τη γνώση του ρυθμού στερεοποίησης των ενδιαφερόμενων υλικών. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή καθεαυτή δε θεωρείται πλήρως αξιόπιστη πέρα από το πρώτο στάδιο κατασκευής, καθώς υπάρχουν παράγοντες, όπως οι γεωλογικές συνθήκες, που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του εδάφους. Ολοκληρωμένη μελέτη και αξιόπιστη εκτίμηση των συνθηκών ασφάλειας μπορεί να επιτευχθεί με την παρατήρηση του φαινομένου της στερεοποίησης καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής, σε συνδυασμό με οργανομετρικά μέσα.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν πρωτίτερα, καταστροφικές αστοχίες ραγδαίου ρυθμού παρατηρούνται σε αργιλικούς εδαφικούς σχηματισμούς, που περιέχουν στρώματα ή φακούς χονδροκόκκων ιλύων ή άμμων. Η λεπτομερής μελέτη της στρωματογραφίας του σχηματισμού επομένως, φαίνεται βασική προϋπόθεση για τον προσδιορισμό της αστοχίας, αλλά και για τη γενικότερη ασφάλεια της κατασκευής.

Στην περίπτωση που το έδαφος απαρτίζεται από μαλακά εδάφη για μικρό βάθος (2m), είναι εφικτή η απομάκρυνσή του, ειδάλλως, θα πρέπει να επιλεγεί διαφορετικός τρόπος κατασκευής.

2.2 Οργανικά εδάφη

Πρόκειται για εδάφη που αποτελούνται κυρίως από φυτικά προϊόντα αποσύνθεσης και από ένα μικρότερο μέρος φυσικών αποθέσεων. Προσεγγιστικά, περίπου το 95% των περισσότερων αποθέσεων τύρφης συνίσταται από φυτική ύλη, που αποσυντέθηκε υπό αερόβιες συνθήκες. Ο ρυθμός αποσύνθεσης υπό αυτές τις συνθήκες επιταχύνεται κατά χιλιάδες φορές, συγκριτικά με τις αναερόβιες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ψυχρό κλίμα και πλεόνασμα υδάτων.

2.2.1 Συστήματα ταξινόμησης

Για την βέλτιστη προσέγγιση και κατ' επέκταση, μελέτη τέτοιου είδους εδαφών, αναπτύχθηκαν αρκετά μοντέλα ταξινόμησης, εκ των οποίων τα σημαντικότερα παραθέτονται εν συνεχεία, με συνοπτική αναφορά.

Από τα πιο διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης εδαφών είναι το Unified Soil Classification System (USCS), το οποίο καταλήγει σε διάκριση των οργανικών εδαφών, μέσω οπτικής ταυτοποίησης δειγμάτων πεδίου ή μικροσκοπικής ανασκόπησης και χρήσης ακτινών-χ αδιατάραχτων δειγμάτων. Οι δύο πρώτες κατηγοριοποιήσεις αφορούν στις οργανικές αργίλους και ιλύες, οι οποίες ικανοποιούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να λάβουν την ισχύουσα ονομασία, εκτός από τα όρια υδαρότητας, τα οποία είναι στο 75% υπό ξήρανση. Η τρίτη και τελευταία κατηγορία είναι οι τύρφεις, οι οποίες ορίζονται ως εδάφη που αρχικά αποτελούνται από φυτικούς ιστούς, σε διαφορετικά στάδια αποσύνθεσης, με οσμή οργανική, σκούρο καφέ-μαύρο χρώμα, σπογγώδη συνοχή και υφή από ινώδη έως άμορφη.

Επόμενο σύστημα ταξινόμησης, που κάνει χρήση μιας σειράς κωδικοποιημένων γραμμάτων εξαρτώμενων από το βαθμό αποσύνθεσης, την περιεχόμενη υγρασία, την αφθονία των ινωδών μορφών και το πλήθος των φυτικών υπολειμμάτων, είναι το Von Post System, (Landva and Pheaney, 1980). Ασχολείται κυρίως με την ταξινόμηση των τύρφων, σε ινώδεις και άμορφες. Κύριο εργαλείο αυτού του συστήματος αποτελεί η οπτική και χειρονακτική ταυτοποίηση με σκοπό τον προσδιορισμό του βαθμού αποσύνθεσης. Άμορφες τύρφεις χαρακτηρίζονται αυτές που ευρίσκονται σε προχωρημένα στάδια αποσύνθεσης και τελικά έχουν αποκτήσει κοκκώδη υφή. Αντίστοιχα, οι ινώδεις απαντούν σε προγενέστερα στάδια, όπου τα φυτικά συστατικά διαφαίνονται άθικτα.

Ως πιο εύχρηστο σύστημα, συστήνεται το αμερικάνικης προέλευσης σύστημα, ASTM, το οποίο παρέχει ένα πιο συγκεκριμένο πλαίσιο παραμέτρων, που το καθιστά πιο αξιόπιστο και ακριβές. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, η τύρφη διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα οργανικά λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς της, λιγότερο από 25%, σε τέφρα. Μεταξύ άλλων φυτογενών υλικών, όπως ο λιθάνθρακας, διαφοροποιείται λόγω χαμηλής θερμογόνας τιμής.

Τελευταίο σύστημα ταξινόμησης, το οποίο διαχωρίζει τις τύρφεις ανάλογα με τη δομή και τα υπερκείμενα υλικά του στρώματος, είναι το Radforth Classification

System (1969). Η πρώτη κατηγορία, που σχετίζεται με τη δομή της τύρφης (peat structure), διακρίνει 3 μορφές, την άμορφη-κοκκώδη (amorphous granular peats), την καλώς διαβαθμισμένη ινώδη (fine fibrous peats) και την χονδροειδή ινώδη (coarse fibrous), (MacFarlane and Williams, 1974). Η πρώτη κατηγορία κατέχει τις χαμηλότερες τιμές διατμητικής και εφελκυστικής αντοχής, ενώ η τελευταία κατηγορία χαρακτηρίζεται από το υψηλότερο λόγο κενών καθώς και την μέγιστη συμπιεστότητα, μεταξύ των τριών. Ως προς τα υπερκείμενα του εκάστοτε στρώματος (peat cover), το σύστημα περιγράφει τη βασική δομή των οργανικών αποθέσεων που αποτελούν τα υπερκείμενα. Παρ' όλα αυτά, είναι εμφανές ότι το σύστημα αυτό δε λαμβάνει υπόψη γεωτεχνικές παραμέτρους στις ταξινομήσεις και επομένως δεν προτείνεται μια μελέτη γεωτεχνικής φύσης αποκλειστικά με αυτό το σύστημα.

2.2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά οργανικών εδαφών

Τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν τα οργανικά υλικά, αναφέρονται στη χαμηλή πυκνότητά τους, την πορώδη υφή τους συνοδευόμενη από υψηλό λόγο κενών και συνεπώς, υψηλή διαπερατότητα. Βασικοί λόγοι που επενεργούν σε αυτό το αποτέλεσμα είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε φυσικά στοιχεία, το υψηλό ποσοστό ύδατος, λόγω εγγύτητας στον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς και το γεγονός ότι συναντώνται πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Συνυπολογίζοντας όλες τις παραπάνω παραμέτρους, κατανοείται η χαρακτηριστική συμπεριφορά τους ως προς τη στερεοποίηση και συμπεραίνεται η δυσκολία που επιφέρουν σε κατασκευές.

Πιο συγκεκριμένα, οι ινώδεις τύρφεις αποτελούνται από μικροδομή δύο επιπέδων, του μακροπόρους και τους μικροπόρους. Οι πρώτοι αναφέρονται στα κενά μεταξύ των στερεών κόκκων, ενώ οι μικροπόροι στα κενά μεταξύ των φυτικών ινών. Τη στιγμή που σταματά η διαφυγή του νερού από τους μακροπόρους, ολοκληρώνεται και η πρωτογενής συμπύκνωση. Η μείωση του μεγέθους των πόρων είναι αυτή που προκαλεί και τη μείωση της διαπερατότητας. Ακολούθως, αυξάνεται ο χρόνος μέχρι το πέρας της ανάπτυξης και αποτόνωσης της πίεσης των πόρων καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της πρωτογενούς συμπύκνωσης. Πρακτικά, οι αναλύσεις αυτές οδηγούν στην εκτίμηση της σημαντικότητας της δευτερογενούς συμπύκνωσης. Ενώ η πρωτογενής φαίνεται να ολοκληρώνεται μέχρι το τέλος της εκάστοτε κατασκευής, οι σημαντικότερες καθιζήσεις λαμβάνουν χώρα μετά το πέρας

της κατασκευής και κατά τη διάρκεια λειτουργίας της, γεγονός που αποδίδεται στην ανάπτυξη δευτερογενούς συμπύκνωσης, λόγω της φύσης του υλικού.

Ο βαθμός στον οποίο τα φυσικά χαρακτηριστικά τέτοιων εδαφών επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητές τους αποτελεί νέο αντικείμενο μελέτης. Η παρουσία οργανικών υλικών στα εδάφη είναι άμεσα συνυφασμένη με το χαμηλό ε.β., την υψηλή συμπίεστότητα, τις παραμέτρους ερπυσμού καθώς και τις μη ικανοποιητικές τιμές αντοχής, γεγονός που προκαλεί το χαρακτηρισμό τους ως "προβληματικά εδάφη".

Η υψηλή περιεχόμενη υγρασία αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς επηρεάζει τη διατμητική αντοχή του εδάφους και κατ' επέκταση τις παραμέτρους ευστάθειας. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό είναι απόρροια της ύπαρξης μεγάλων κενών που επιτρέπει η δομή τους και συνεπώς διευκολύνεται η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ οργανικών, αυξάνοντας την έλξη υδατικών μορίων. Γενικά, όσο πιο αποσυντετημένο είναι ένα οργανικό υλικό, τόσο λιγότερη περιεχόμενη υγρασία έχει. Επόμενος πολύ σημαντικός παράγοντας, σχετικά με το μέγεθος της πιθανής καθίζησης, είναι ο αέρας που περιέχεται στα κενά. Οι μακροπόροι απαρτίζονται από ελεύθερο αέρα, που μπορεί να απομακρυνθεί με την επιβολή φορτίου, ενώ στους μικροπόρους περιέχεται εγκλωβισμένος αέρας, (Dhowian and Edil 1981). Αυτό αποδεικνύει την επιρροή της διαπερατότητας, του ρυθμού στερεοποίησης και της ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων, αποκλειστικά και μόνο από τους μακροπόρους του εδαφικού σκελετού.

Τα όρια που σχετίζονται με την περιεχόμενη υγρασία, Atterberg limits, εξαρτώνται από δύο παραμέτρους. Την ικανότητα των οργανικών ως προς την προσρόφηση νερού και τη συσσωμάτωση των κόκκων. Η υψηλή ικανότητα προσρόφησης αυξάνει τα όρια, ενώ η τάση συσσωμάτωσης με κόκκους φυσικής σύστασης οδηγεί στη μείωσή τους. Γενικότερα όμως, τα όρια υδαρότητας και πλαστιμότητας αυξάνονται ανάλογα με το περιεχόμενο οργανικής ύλης στο έδαφος.

2.2.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά οργανικών εδαφών

Καταλήγοντας στα υψηλά ποσοστά υγρασίας που περιλαμβάνουν τα εξεταζόμενα εδάφη, διαφαίνεται η αδυναμία τους σε φυσικά επίπεδα. Είναι επίσης αποδεδειγμένο ότι με την αύξηση της περιεχόμενης οργανικής ύλης και συνεπώς υγρασίας, οι τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, καθώς και οι παράμετροι συνοχής και γωνίας τριβής μειώνονται. Προτιμώμενη δοκιμή για τον προσδιορισμό τιμών διατμητικής

αντοχής των τύρφεων και οργανικών εδαφών αποτελεί η αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή με στερεοποίηση (CU), ενώ οι δοκιμές στραγγιζόμενης συμπεριφοράς εφαρμόζονται συνηθέστερα σε μεγάλες μεταβολές σχήματος και μεγέθους, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και διάτμησης. Σύμφωνα με τους Edil and Wang (2000), παρουσιάζεται μια ανάλυση της συμπεριφοράς των οργανικών εδαφών ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες καθώς και προτεινόμενες τιμές για κάθε μια παράμετρο.

- Οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ'), υπό ενεργές τάσεις, κυμαίνεται από 41° για εδάφη με περιεχόμενο οργανικών υλικών περίπου 30%, έως 53° για παρουσία οργανικών σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30%, οι ονομαζόμενες τύρφεις, σύμφωνα με δοκιμή στερεοποίησης υπό αστράγγιστες συνθήκες. Δοκιμές διάτμησης δίνουν πιο ρεαλιστικές τιμές της γωνίας τριβής, μεταξύ 32° - 33° , συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες τιμές των καλώς-διαβαθμισμένων άμμων (38° - 46°), (Lambe and Whitman, 1969).
- Ως προς την παράμετρο της συνοχής c , προτείνεται το εύρος τιμών μεταξύ 0-6 kPa.
- Για το συντελεστή διαπερατότητας k_o , μη λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία οργανικών υλικών, δίνεται η τιμή 0.34m/d, αναφερόμενη στις ινώδεις τύρφεις και συγκρινόμενη με την αντίστοιχη 0.53m/d των άμορφων.
- Τέλος, ο λόγος αστράγγιστης διατμητικής αντοχής προς ορθή δρώσα τάση (s_u/σ'_v) για τα οργανικά εδάφη δεν είναι σταθερός, εν αντιθέσει με τα μη-οργανικά. Το εύρος τιμών που χαρακτηρίζει τις κανονικά στερεοποιημένες τύρφεις, έπειτα από δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης, είναι μεταξύ 0.5-0.7, με μέσο όρο 0.59m/d.

2.2.4 Επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες

Όλα τα παραπάνω φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών με περιεχόμενη οργανική ύλη, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους που αναλύθηκαν, συμβάλλουν στην αλλοίωση ή μη των μηχανικών χαρακτηριστικών των ίδιων εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω παρουσιάζεται η εν λόγω επήρεια των ανωτέρω παραμέτρων, στα χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν τη συμπεριφορά των εδαφών αυτών, σε περιβάλλον κατασκευών.

Η παρουσία οργανικής ύλης σε ένα εδαφικό σχηματισμό συντελεί στην αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, η οποία με τη σειρά της, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αντοχή του εδάφους. Αποτέλεσμα αυτού, η μείωση της αντοχής των οργανικών εδαφών με την αύξηση της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη καθώς και η απόκτηση της μέγιστης τιμής της, όταν πραγματοποιηθούν οι μέγιστες παραμορφώσεις. Επιπλέον, εκτός από τη μείωση της τιμής της αντοχής, λόγω των οργανικών, υπάρχει και ανομοιομορφία των τιμών της κατά τις ίδιες διευθύνσεις. Κατά τη διάρκεια απόθεσης των οργανικών υλικών παρουσιάζονται αντοχές με διαφορετικές τιμές κατά την κάθετη ή παράλληλη κατεύθυνση της απόθεσης.

Ο βαθμός αποσύνθεσης των οργανικών υλικών και συσσωμάτωσης των κόκκων τους, φαίνεται να καθορίζουν την ιδιότητα της διαπερατότητας των εδαφών και να την καθιστούν άμεσα εξαρτώμενη από το μέγεθος των κόκκων και από τη συνέχεια των πόρων στο χώρο. Διαφοροποιούνται επομένως οι τιμές της ανάλογα και με την κατεύθυνση, με μικρότερες, αυτές που αναφέρονται στην κάθετη διεύθυνση, συγκριτικά με την οριζόντια. Γενικότερα, η περιεχόμενη υγρασία παίζει και σε αυτή την παράμετρο σημαντικό ρόλο, διαμορφώνοντας τη διαπερατότητα των οργανικών υλικών να είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των ανόργανων. Ως προς το χρόνο, σύμφωνα με την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων σε βάθος χρόνου και την εκδήλωση του φαινομένου του ερπυσμού, συνεπάγεται απομάκρυνση των πόρων του εδάφους, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της διαπερατότητας.

Τελευταίο μηχανικό χαρακτηριστικό είναι η συμπιεστότητα, η οποία γενικότερα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε τύρφεις και οργανικά υλικά, σε σχέση με άλλα γεωτεχνικά υλικά, (Mesri et al, 1997). Ως προς τα οργανικά, λόγω του αυξημένου λόγου κενών και υγρασίας, κατέχουν τις υψηλότερες τιμές των συντελεστών συμπιεστότητας, ενώ η δευτερογενής συμπίεση εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Για τις άμορφες τύρφεις, η δευτερογενής συμπίεση προέρχεται από τη σταδιακή αναδόμηση των εδαφικών κόκκων προς μια πιο σταθερή δομή, ακολουθώντας την αλλοίωση του εδαφικού σκελετού, λόγω της πρωτογενούς συμπίεσης, (Berry and Poskitt, 1972). Με την παραπάνω παραδοχή αποδεικνύεται η παρόμοια συμπεριφορά των άμορφων τύρφεων με τα αργιλικά εδάφη, ενώ οι ινώδεις τύρφεις, φαίνονται υπεύθυνες για το φαινόμενο του ερπυσμού, καθώς η δευτερογενής τους συμπίεση οφείλεται στη στράγγιση του ύδατος των πόρων.

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν στη συγκεκριμένη ενότητα μπορούν να διεξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των εδαφών που περιέχουν οργανικά στοιχεία. Γενικότερα, η αύξηση των περιεχόμενων οργανικών υλών οδηγεί στην αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας και των ορίων υδαρότητας (Atterberg limits), ενώ μειώνει την πυκνότητα (ειδική και φαινόμενη) και την αποδοτικότητα της συμπίεσης. Η αντοχή των εδαφών, η διαπερατότητα και η συμπιεστότητα είναι χαρακτηριστικά που εξαρτώνται και επηρεάζονται από το βαθμό αποσύνθεσης των οργανικών υλικών και από τη φύση τους. Παρατηρείται αύξηση της συμπιεστότητας, αντοχής και διαπερατότητας με την παρουσία ινωδών δομών ενώ, μείωση της αντοχής με την αύξηση του ποσοστού οργανικών. Η παράμετρος της συμπιεστότητας θα μπορούσε να θεωρηθεί η πιο κρίσιμη για τις κατασκευαστικές δραστηριότητες σε τέτοιου είδους εδάφη. Πρόκειται για μέγεθος άμεσα συνδεδεμένο με το λόγο κενών του εκάστοτε σχηματισμού, ο οποίο ουσιαστικά ελέγχει τις περισσότερες από τις ιδιότητες των οργανικών υλών.

2.3 Καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης

Σημαντικός παράγοντας για τη μελέτη και κατασκευή επιχωμάτων είναι οι αναπτυσσόμενες καθιζήσεις στο έδαφος. Αποτελούν συνάρτηση τόσο της επιβαλλόμενης φόρτισης όσο και των χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης. Ιδιαίτερα στα εδάφη όπου αποτελούνται από φτωχής ποιότητας υλικά σε συνδυασμό με την παρουσία υδάτων, όπως στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα προκύπτουν λόγω στερεοποίησης. Τα συνεκτικά εδάφη χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή διαπερατότητα, με αποτέλεσμα η υπερπίεση του νερού των πόρων να καθυστερεί να εκτονωθεί.

Όταν τα εδαφικά υλικά βρίσκονται υπό φόρτιση αυτόματα υπάρχει εκδήλωση παραμορφώσεων, γεωμετρικών ή ογκομετρικών, των οποίων ο ρυθμός ανάπτυξής τους εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Γρήγορες παραμορφώσεις επέρχονται σε εδάφη με ελαστική συμπεριφορά, ενώ ο ρυθμός μειώνεται στα συνεκτικά εδάφη, όπως στις αργίλους. Η μη ελαστική συμπεριφορά των εδαφών εμποδίζει τον υπολογισμό των παραμορφώσεων με απλουστευμένες θεωρίες που τις συνδέουν με το χρόνο. Απαιτούνται πιο πολύπλοκες σχέσεις, που συμπεριλαμβάνουν περαιτέρω παραμέτρους, καθώς χαρακτηριστικό του εδαφικού σκελετού είναι η "μνήμη".

Πρακτικά, αυτό υποδηλώνει την ικανότητα των υλικών να συγκρατούν μέρος της παραμόρφωσης ακόμα και όταν έχει απομακρυνθεί το επιβαλλόμενο φορτίο που την προκάλεσε.

2.3.1 Φαινόμενο στερεοποίησης

Σύμφωνα με την παρούσα διπλωματική εργασία, όπως προαναφέρθηκε, οι καθιζήσεις που λαμβάνουν μέρος προκαλούνται λόγω στερεοποίησης. Κρίνεται χρήσιμη επομένως μία περιληπτική περιγραφή του φαινομένου της στερεοποίησης, η οποία και ακολουθεί.

Ο όρος στερεοποίηση χρησιμοποιείται για να αποδώσει τη διαδικασία εναλλαγής των ολικών τάσεων του εδάφους σε ενεργές, καθώς και την αύξηση των πιέσεων πόρων του ύδατος λόγω διαφυγής του. Αυτό πραγματοποιείται όταν επιβληθεί φορτίο σε στρώματα κορεσμένων εδαφών, (Coduto 1999). Ο εν λόγω μηχανισμός λειτουργεί αρχικά με την παραλαβή του φορτίου από τους πόρους του ύδατος, προκαλώντας την ανάπτυξη υπερπίεσής των. Πιο αναλυτικά, αν η φύση του εδάφους επιτρέπει τη στράγγιση του νερού, η υδραυλική κλίση που πια έχει δημιουργηθεί, οδηγεί στη ροή του νερού εκτός εδαφικής μάζας, με αποτέλεσμα την αρχή της συμπίεσής της. Μέρος του φορτίου μεταφέρεται μετέπειτα στον εδαφικό σκελετό, απομειώνοντας έτσι την υπερπίεση των πόρων του νερού, έως το μηδενισμό της.

Η “μνήμη” που διατηρεί το έδαφος, πρακτικά εμφανίζεται στη δομή του και επιστημονικά αποδεικνύεται με τη διάκριση των εδαφών σε προστερεοποιημένα, κανονικά στερεοποιημένα, υπερετεροποιημένα και υποστεροποιημένα. Η επιβολή μιας φόρτισης σε ένα εδαφικό στρώμα, που ισοδύναμή της δεν έχει εφαρμοσθεί ποτέ στο παρελθόν στο συγκεκριμένο στρώμα, προκαλεί κάποιου είδους αστοχία, λόγω της αδυναμίας του εδαφικού σκελετού να παραλάβει το σύνολο του φορτίου αυτού. Το γεγονός αυτό καθιστά το συγκεκριμένο έδαφος προστεροποιημένο και την τάση που εφαρμόσθηκε, τάση προστεροποίησης σ'_p . Αποτέλεσμα αυτού είναι, είτε η ανικανότητα αντοχής ακόμα και μικρότερων φορτίσεων σε μεταγενέστερο χρόνο, στα ευαίσθητα εδάφη, είτε η ανακατανομή των κόκκων προκειμένου να απορροφήσουν το φορτίο, σε λιγότερο ευαίσθητα εδάφη. Κανονικά στερεοποιημένα (NC) χαρακτηρίζονται τα εδάφη, στα οποία η επιβαλλόμενη τάση φόρτισης σ'_{v0} ισούται με την τάση προστεροποίησης, $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$. Στην περίπτωση που το φορτίο ξεπερνά την τάση προστεροποίησης και ισχύει $\sigma'_p < \sigma'_{v0}$, ή είναι μικρότερο από αυτή, δηλαδή, $\sigma'_p > \sigma'_{v0}$, ονομάζονται υπερετεροποιημένα (OC) και υποστεροποιημένα (UC),

αντίστοιχα. Κατά τη μελέτη υπερστερεοποιημένων εδαφών προέκυψε από δοκιμές, ο λόγος υπερστερεοποίησης OCR, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$OCR = \frac{\sigma_p'}{\sigma'_{vo}}$$

Και παίρνει τιμές:

- για κανονικά στερεοποιημένα OCR = 1
- για υπερστερεοποιημένα OCR > 1
- για υποστερεοποιημένα OCR < 1

Κάνοντας παραδοχές περί ομοιογένειας του εδαφικού στρώματος και πλήρως κορεσμού του, οδηγούμαστε στη θεωρία Terzaghi που περιγράφει το φαινόμενο της μονοδιάστατης στερεοποίησης (συμπίεσης). Επιπλέον, οι συντελεστές συμπιεστότητας a_v και διαπερατότητας k , παραμένουν σταθεροί καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση δευτερογενούς συμπίεσης, οι παράμετροι των λόγων των κενών και της ενεργούς τάσης διαφοροποιούνται.

Ανακαλώντας τη θεωρία του νόμου Darcy, υπενθυμίζεται ότι η ποσότητα του διαφυγόντος νερού εξαρτάται από την υδραυλική κλίση που δημιουργείται, καθώς και από τη διαπερατότητα. Αυτό ακριβώς αποτυπώνεται στη σχέση που συνδέει την υδραυλική κλίση με την πίεση των πόρων:

$$\frac{U}{p_w \times g}$$

Καθώς οι ολικές τάσεις παραμένουν σταθερές, ενώ οι πιέσεις των πόρων μειώνονται ανάλογα με το χρόνο, τότε προκαλείται αύξηση των ενεργών τάσεων, δηλαδή : $\Delta\sigma' = -\Delta u$.

Για την επίλυση της μονοδιάστατης συμπίεσης επιβάλλεται να εφαρμοσθούν αρχικές και συνοριακές συνθήκες, οι οποίες αναφέρονται στα εξής:

1. όταν $z=0$ και $z=2H \rightarrow u=0$
2. όταν $t=0 \rightarrow \Delta u = u_i = \Delta\sigma = (\sigma'_2 - \sigma'_1)$

όπου, $2H$: το πάχος του στρώματος και z : η εκάστοτε υψομετρική στάθμη

Η εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης μετά από κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, σε οποιοδήποτε βάθος του στρώματος, δύναται να συσχετισθεί με το λόγο των κενών e , για το συγκεκριμένο χρονικό σημείο αλλά και για το πέρας του φαινομένου. Πρόκειται για τη σχέση *ρυθμού στερεοποίησης* που δίνεται από τον τύπο:

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2}$$

όπου, e : ο λόγος των κενών των πόρων σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο.

Όταν ένα έδαφος βρίσκεται υπό φόρτιση, όπως προελέχθη, λόγω της παραμόρφωσης των κόκκων και της διαρροής του ύδατος και του αέρα, που βρίσκονται στα κενά του εδαφικού στρώματος, υφίσταται συμπίεση. Καθώς το νερό διαφεύγει από τα κενά, οι κόκκοι αναγκάζονται να αναταξινομούνται προς πυκνότερη και σταθερότερη διάταξη. Συνέπεια αυτής της εξέλιξης είναι η μείωση του όγκου και επομένως, το φαινόμενο της καθίζησης της επιφάνειας. Ο χρόνος στον οποίο πραγματοποιείται αυτή η διαδικασία εξαρτάται από τη συμπιεστότητα του υλικού, ενώ το μέγεθος της καθίζησης σχετίζεται με τη δυσκαμψία του εδαφικού σκελετού και κατ' επέκταση της δομής του. Σε εδάφη που χαρακτηρίζονται κοκκώδη, η διαφυγή του νερού διευκολύνεται λόγω των μεγαλύτερων κενών και το φαινόμενο της καθίζησης ολοκληρώνεται σε αρκετά μικρότερο χρόνο από ότι θα απαιτούνταν σε πιο συνεκτικά εδάφη. Γεωτεχνικές κατασκευές που πραγματοποιούνται σε τέτοιου είδους εδάφη επομένως, αναπτύσσουν καθιζήσεις που εκτονώνονται πλήρως μέχρι το πέρας της κατασκευής. Αντίθετα, σε πιο συνεκτικά εδάφη, όπως τα αργιλικά, λόγω της μικρής διαπερατότητας που εμφανίζουν, η συμπίεσή τους ελέγχεται από το ρυθμό διαφυγής του ύδατος. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η εκτόνωση του φαινομένου των καθιζήσεων σε μεγαλύτερο χρόνο, που μπορεί να σημαίνει για δεκαετίες.

Αυτή είναι η κύρια διαφορά μεταξύ συνεκτικών και μη εδαφών. Στα μεν η ανάπτυξη των καθιζήσεων εξαρτάται άμεσα από το χρόνο, ενώ στα δε, πραγματοποιείται στιγμιαία. Ένας χρήσιμος συντελεστής για τον υπολογισμό τους, ο οποίος συναντάται συχνά σε αναφορές για τη στερεοποίηση, είναι η παράμετρος συμπιεστότητας C_u . Προσδιορίζεται από τα διαθέσιμα δεδομένα χρόνου-παραμόρφωσης και είναι η μόνη παράμετρος που αναφέρεται και συμπεριλαμβάνει τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού.

Οι μετακινήσεις εμφανίζονται είτε με κινήσεις προς τα άνω, αποκαλούμενες, ανυψώσεις, είτε προς τα κάτω, λόγω αύξησης του επιβαλλόμενου φορτίου. Συνηθέστερες αιτίες για την πρόκληση του εν λόγω φαινομένου διακρίνονται οι προσωρινές κατασκευές, τύπου επιχώματος, καθώς και η αλλαγή της στάθμης του Υδροφόρου Ορίζοντα (υποβιβασμός). Η δεύτερη οδηγεί σε μείωση των τάσεων και επομένως ανύψωση του εδάφους, ενώ η πρώτη, προκαλεί αύξηση των ενεργών τάσεων και συνεπώς καθίζηση.

Στη γεωτεχνική μηχανική θεωρείται σημαντικότερη η γνώση του μεγέθους των καθιζήσεων, καθώς και ο ρυθμός ανάπτυξής των, προκειμένου να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα για μια ασφαλή κατασκευή. Έχει οριστεί ότι οι συνολικές καθιζήσεις που αναπτύσσονται είναι άθροισμα τριών επιμέρους καθιζήσεων, που αποτυπώνονται στον παρακάτω τύπο:

$$S_t = S_i + S_c + S_s$$

όπου, S_t : ολικές καθιζήσεις

S_i : άμεσες καθιζήσεις

S_c : καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης

S_s : δευτερογενείς καθιζήσεις

Άμεση καθίζηση (S_i), είναι αυτή η οποία αναλύεται με τη θεωρία της ελαστικότητας. Προσομοιώνεται με μια εδαφική στήλη που δέχεται αξονικό φορτίο, με παραμόρφωση $\frac{PL}{AE}$ και βασικές παραμέτρους των E , ν . Τέτοιου είδους καθιζήσεις συναντώνται συχνότερα σε αβαθείς θεμελιώσεις.

Καθίζηση λόγω στερεοποίησης (S_c) προκαλείται σε κορεσμένα-καλώς διαβαθμισμένα εδάφη, με χαμηλή διαπερατότητα. Εξαρτάται άμεσα από το χρόνο και ο ρυθμός εξέλιξής συνδέεται άρρηκτα με τη στράγγιση των πόρων. Η πρωτογενής καθίζηση, όπως εναλλακτικά ονομάζεται, συμβαίνει όταν σημειώνεται αύξηση της ενεργούς κύριας τάσης, η οποία οδηγεί στη μείωση του όγκου των κενών. Σημειωτέον, ο όγκος των στερεών κόκκων του εδάφους παραμένει σταθερός, καθώς η συμπίεση μεμονωμένων στοιχείων θεωρείται αμελητέα. Ένας τρόπος υπολογισμού της που έχει αναπτυχθεί, συσχετίζει τις ενεργές τάσεις και την παραμόρφωση με το συντελεστή πρωτογενούς συμπίεσης και διατυπώνεται παρακάτω:

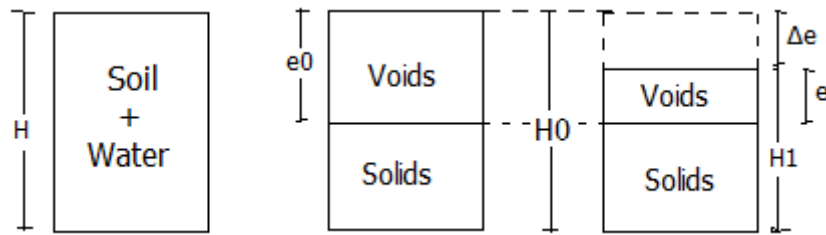
$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma}$$

Δευτερογενής καθίζηση (S_s) είναι ουσιαστικά η συνέχεια του φαινομένου της πρωτογενούς καθίζησης, σε αρκετά πιο αργούς ρυθμούς. Εν αντιθέσει με την πρωτογενή, δεν εξαρτάται καθόλου από τις αλλαγές των ενεργών τάσεων. Η εκδήλωσή της ξεκινά αφού οι πιέσεις των πόρων προσεγγίζουν τη μηδενική τιμή, χωρίς απαραίτητα να μηδενίζονται και σε μια σταθερή τιμή της ενεργούς τάσης. Κύριες αιτίες που την προκαλούν θεωρούνται η αναδιάταξη των κόκκων, το φαινόμενο του ερπυσμού, καθώς και η διάσπαση των οργανικών υλικών, χωρίς να απαιτείται μετακίνηση του ύδατος των πόρων. Επομένως, φαίνεται λογικό να εμφανίζεται ιδιαίτερα σε αργίλους με υψηλή πλαστικότητα, σε οργανικά εδάφη, καθώς και σε χώρους υγειονομικής ταφής. Πρόκειται για μορφή καθιζήσεων που δύσκολα διακρίνεται σε έρευνες πεδίου, καθώς μέρος του εδαφικού στρώματος κοντά στη επιφάνεια στράγγισης δύναται να είναι πλήρως στερεοποιημένο και να οδηγείται προς το εν λόγω φαινόμενο. Αντίθετα, τμήματα κοντά στο κέντρο του στρώματος είναι δυνατό να βρίσκονται στο στάδιο πρωτογενούς ακόμα καθίζησης. Λόγω της συγκεκριμένης δυσχέρειας, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι υπολογισμού δευτερογενούς καθίζησης, με μεγαλύτερη εφαρμογή του παρακάτω τύπου, των Raymond and Wahls (1976) και Mersi and Godlewski (1977), μέσω του συντελεστή δευτερογενούς καθίζησης C_a :

$$C_a = \frac{\Delta e}{\Delta \log t}$$

Ουσιαστικά, φαίνεται η αντιστοιχία του παραπάνω τύπου με αυτόν της πρωτογενούς καθίζησης, η οποία συνδέει τις ενεργές τάσεις και όχι τη μεταβλητή του χρόνου.

Το σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνει ένα εδαφικό στρώμα αποτελούμενο από εδαφικό υλικό και κενά. Κατά τη εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης τα στερεά παραμένουν σε σταθερό όγκο, ενώ υπάρχει παραμόρφωση Δe , $\frac{\Delta H}{H_0}$.



Η σχέση που υπολογίζει τις καθιζήσεις και συνδέει τα κενά των πόρων και τις ενεργές τάσεις δίνεται από τον τύπο:

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \times H_0$$

όπου H_0 : το πάχος του στρώματος.

2.3.2 Συμπεριφορά των οργανικών εδαφών σε τεχνικά έργα

Ο καθορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς μαλακών εδαφών χαμηλής ποιότητας, η αντίδραση των οργανικών υλικών υπό την επίδραση φορτίου, καθώς και η εκδήλωση και ο μηχανισμός δράσης του φαινομένου της στερεοποίησης και κατ' επέκταση των καθιζήσεων, έπειτα από την ανάλυση που προηγήθηκε, καθιστούν πλέον κατανοητή την έννοια της δυσχέρειας γεωτεχνικών κατασκευών υπό μαλακά εδάφη. Παρ' όλα αυτά, ανάγκες κοινωνικού προσανατολισμού δημιούργησαν την επιτακτική προσαρμογή της γνώσης σε τέτοιου είδους συνθήκες και σαφώς, την εφαρμογή της σε αντίστοιχου είδους έργα. Πολλά είναι τα έργα επομένως που έχουν υλοποιηθεί υπό δυσχερείς σχηματισμούς και αρκετά από αυτά έχουν αποτελέσει "πρώτη ύλη" για τη διευκόλυνση μετέπειτα κατασκευών. Παρακάτω περιγράφονται δύο περιπτώσεις κατασκευής δοκιμαστικών επιχωμάτων σε μαλακά εδάφη, υπό πραγματικές συνθήκες, όπου εκτελέστηκαν δοκιμές υπολογισμού καθιζήσεων και λήφθηκαν οι κατάλληλες ή όχι τιμές, για την έκβαση του τεχνικού έργου.

➤ Περίπτωση κατασκευής αεροδρομίου στην περιοχή Lilla Mellösa

Με την ίδρυση του Σουηδικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου, Swedish Geotechnical Institute (SGI), το 1944, ξεκίνησαν μελέτες για την εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας με σκοπό την κατασκευή νέου διεθνούς αεροδρομίου, λίγο μακρύτερα από τη

Στοκχόλμη. Η πρώτη περιοχή από την οποία άρχισε η διερεύνηση, ήταν αυτή της Lilla Mellösa, κοντά στο Urplands Väsby. Οι επικρατούσες εδαφικές συνθήκες χαρακτηρίζονταν από πολύ συμπιεστά εδάφη μεγάλου πάχους, γεγονός που τις καθιστούσε ακατάλληλες. Αποτέλεσμα αυτού, ήταν η απόφαση κατασκευής δοκιμαστικών επιχωμάτων, ώστε να προκληθεί στερεοποίηση των εδαφών, υπό την πρόσθετη αυτή φόρτιση και να μετατραπούν σε πιο βελτιωμένης αντοχής σχηματισμούς που θα μπορούν να παραλάβουν το φορτίο της πραγματικής κατασκευής. Η κατασκευή περιλάμβανε τη δημιουργία δύο δοκιμαστικών επιχωμάτων, το ένα εκ των οποίων θα συνοδεύονταν από στραγγιστικά μέσα. Με το τέλος των επιθυμητών δοκιμών, η περιοχή κρίθηκε τελικά ακατάλληλη, ενώ τα επιχώματα παρέμειναν στην περιοχή για ερευνητικούς σκοπούς.

Το γεωλογικό προφίλ της περιοχής συντίθεται αρχικά από 0.30m οργανικών υλικών, τα οποία απομακρύνθηκαν προτού ξεκινήσει η κατασκευή, καθώς το λεπτό τους πάχος επέτρεπε αυτήν την επέμβαση. Τα ανώτερα στρώματα αποτελούνταν από στρώμα ξηρού υπερστερεοποιημένου φλοιού, πάχους 0.50m, σημαντικό μέρος του οποίου καταλάμβαναν οργανικά υλικά. Ακολούθως, ως υποκείμενα του ανωτέρω τμήματος συναντώνται στρώματα μαλακών εδαφών, που κυρίως συνίστανται από οργανικής φύσεως εδάφη. Ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά του εν λόγω σχηματισμού, αναφέρονται οι τιμές της φυσικής περιεχόμενης υγρασίας, οι οποίες ταυτίζονται με τα όρια υδαρότητας και μειώνονται κατά ένα εύρος μεταξύ 130% για τα ξηρά στρώματα και 70% στον πυθμένα των οργανικών στρωμάτων. Αύξηση από 1.3 t/m^3 σε 1.8 t/m^3 στον πυθμένα, παρατηρείται στις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των υπό μελέτη εδαφικών υλικών, ενώ η πίεση των πόρων θεωρείται υδροστατική με στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στα 0.8m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Σύμφωνα με τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, για τη μελέτη των αναμενόμενων καθιζήσεων, τα αποτελέσματα έδειξαν τιμές κατακόρυφης μετακίνησης 0.7m, αναφερόμενες σε 200 ημέρες έπειτα από την κατασκευή. Στο ίδιο διάστημα, τα ανώτερα 0.8m του επιχώματος μετακινήθηκαν σύμφωνα με το προμελετημένο σχέδιο. Παρ' όλη τη μετακίνηση του επιχώματος, οι καθιζήσεις συνεχίστηκαν με μικρότερη ταχύτητα, ενώ το έτος 2002, το μέγεθος της καθίζησης ήταν περίπου στα 1.6m, με ταχύτητα 6mm/χρόνο. Γενικότερα, το μεγαλύτερο μέρος του φαινομένου, προτού πραγματοποιηθεί η μετακίνηση του δοκιμαστικού επιχώματος, παρατηρήθηκε στα ανώτερα 5m του εδαφικού σχηματισμού, όπου είχαν εγκατασταθεί κάθετα στραγγιστήρια. Παρ' όλα αυτά, οι

καθιζήσεις στα χαμηλότερα στρώματα του σχηματισμού συνεχίζονται ακόμα χωρίς να υπάρχει ένδειξη περάτωσής τους.

Τα μη αποδεκτά αποτελέσματα που λήφθηκαν από την περιοχή Lilla Mellösa διατήρησαν την ανάγκη για εύρεση χώρου με σκοπό την κατασκευή αεροδρομίου. Η επόμενη προς διερεύνηση, αποφασίστηκε να είναι μια νησιωτική περιοχή, αγροτικού εδάφους κυρίως, σε απόσταση 25km δυτικότερα της Στοκχόλμης, ονομαζόμενη Skå-Edeby. Τον Ιούλιο του 1957 ανατέθηκε στο SGI η διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών πεδίου και η διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής αεροδρομίου σε εκείνη την περιοχή.

Γενικά, επρόκειτο για μαλακά εδάφη, τα οποία εκτείνονται σε βάθος 12-15m, έως ότου συναντήσουν βραχώδη σχηματισμό. Πιο αναλυτικά, τα πρώτα 0.5m του εδάφους αποτελούνταν από υπερστερεοποιημένο ξηρό φλοιό, ενώ κάτω από αυτό το στρώμα συναντάται τμήμα οργανικής αργίλου υψηλής πλαστικότητας. Τα επόμενα μέτρα ακολουθούν εδαφικά στρώματα που συντίθεται από αργίλους με μικρή περιεκτικότητα οργανικών υλικών και υποκείμενα αυτού, βρίσκεται ακόμα ένα τμήμα στρωσιγενής οργανικής αργίλου. Ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών αναφέρεται η φυσική περιεχόμενη υγρασία, άνω των ορίων υδαρότητας, εκτός των ανωτέρω 2m του σχηματισμού, τα οποία υιοθετούν τα χαρακτηριστικά του ξηρού φλοιού, ενώ παρατηρείται μια διακύμανσή της σε ένα εύρος μεταξύ 100% στην κορυφή του εδάφους και 60% στα κατώτερα στρώματα. Τέλος, η φαινόμενη πυκνότητα παρατηρήθηκε να αυξάνει από 1.3 t/m^3 σε 1.8 t/m^3 , στο δάπεδο των στρωμάτων. Οι διεργασίες μελέτης της περιοχής ξεκίνησαν την ίδια χρονιά, αρχικά με την κατασκευή 4 κυκλικών δοκιμαστικών επιχωμάτων, με διαμέτρους από 35-75m και ύψους 1.5m, που το καθένα εδραιώνεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Το πρώτο επίχωμα, στην περιοχή 1, διαμέτρου 70m, εγκαταστάθηκε με κάθετα αμμώδη στραγγιστήρια, διαιρεμένα σε 3 τμήματα με αποστάσεις 2.2m, 1.5m και 0.9m αντίστοιχα. Στην περιοχή 2, υπήρχε το δεύτερο επίχωμα, ύψους ίδιου με του πρώτου αλλά διαμέτρου 35m και όμοια στραγγιστήρια, καννάβου 1.5m. Ακολούθως, η περιοχή 3, όμοια με το επίχωμα της περιοχής 2, με μόνη διαφορά το μεγαλύτερο ύψος κατά 0.7m. Ωστόσο, το έτος 1961, το επίχωμα αυτό απομακρύνθηκε με σκοπό το αποσπώμενο κομμάτι να χρησιμοποιηθεί σε ένα επιπρόσθετο επίχωμα. Τέλος, δημιουργήθηκε και το τελευταίο, στην περιοχή 4, διαμέτρου 45m ύψους 1.5m, με τη διαφοροποίηση της μη ύπαρξης στραγγιστηρίων. Κατά τη διάρκεια της χρονιάς του 1972 όμως, ένα ακόμη δοκιμαστικό επίχωμα

κατασκευάστηκε, σε αντίστοιχη περιοχή 5, με κατασκευασμένες ζώνες στραγγιστηρίων τύπου Geodrain. Αρχικά, εφαρμόστηκαν οι δοκιμές στα επιχώματα που περιλάμβαναν στραγγιστικά μέσα. Στην περιοχή 3 παρατηρήθηκε καθίζηση 1.55m μετά το πέρας 4 χρόνων, ενώ στην ίδια διάρκεια, το ανώτερο τμήμα του, πάχους περίπου 0.7m, μετακινήθηκε, προκαλώντας μετά από ένα χρόνο ανυψωτική κίνηση της επιφάνειας του εδάφους, με μέγιστη τιμή 8mm. Οι καθιζήσεις συνεχίστηκαν και μετά από αυτό, σε μία σχέση γραμμική με το χρόνο, ενώ το έτος 2002 το μέγεθος των καθιζήσεων που καταγράφηκε έφτανε τα 1.6m. Την ίδια χρονιά, για τις περιοχές 1,2 και 5 σημειώθηκαν καθιζήσεις 1.25m, 1.20m και 0.75m αντίστοιχα. Έπειτα, μελετήθηκαν τα επιχώματα που δε διέθεταν στραγγιστήρια. Κατά τη διάρκεια κατασκευής των δοκιμαστικών επιχωμάτων, οι αρχικές καθιζήσεις που σημειώθηκαν ήταν της τάξης των 0.06m. Αγνοώντας το φαινόμενο του ερπυσμού, το έτος 1972, οι καθιζήσεις έφθαναν τα 0.75m, ενώ ταυτόχρονα υπήρχε ακόμη υπερπίεση πόρων μεγέθους 20 kPa. Δέκα χρόνια μετά, το 1982, λαμβάνονται καθιζήσεις 0.95m, ενώ ακόμα παραμένουν πιέσεις πόρων, μειωμένες πια στα 12 kPa. Τέλος, το 2002, οι ολικές καθιζήσεις φθάνουν τα 1.10m και οι παραμένουσες πιέσεις πόρων τα 8 kPa.

Μετά το πέρας όλων των απαραίτητων δοκιμών, η κατασκευή του αεροδρομίου αναστάληκε, για οικονομικούς λόγους. Τα δοκιμαστικά επιχώματα παρ' όλα αυτά παρέμειναν στην περιοχή με σκοπό τη χρήση τους για περαιτέρω γεωτεχνικές μελέτες, προσθέτοντας μάλιστα 2 ακόμα επιχώματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη διερεύνηση εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διάρκεια κατασκευής δοκιμαστικού επιχώματος, ως μέρος ενός έργου οδοποιίας. Πρόκειται για ένα τεχνικό έργο κατασκευής αυτοκινητόδρομου στην Ελβετία, το 1976, μεταξύ Λοζάννης και Μπερν, που εκτείνεται για μήκος 7 χιλιομέτρων. Επίσης, ο αυτοκινητόδρομος προχωρά παράλληλα για ορισμένα χιλιόμετρα, με ένα κανάλι βάθους 2.5 μέτρων. Το γεγονός αυτό φαινόταν να δυσχεραίνει την ασφαλή κατασκευή και λειτουργία του έργου. Στόχος της εφαρμογής του επιχώματος είναι η προσομοίωσή του με τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης και συνεπώς η εκτίμηση των παραμορφώσεων και μετακινήσεων που θα προκύψουν κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά το πέρας της πραγματικής κατασκευής. Η έννοια επομένως του όρου «δοκιμαστικό επίχωμα» έγκειται στην επιτηδευμένη διαμόρφωση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, που ταυτίζονται με τα αντίστοιχα του έργου κατασκευής αυτοκινητόδρομου.

3.1 Δεδομένα πραγματικού προβλήματος

Έπειτα από γεωτεχνικές έρευνες που διεξήχθησαν πριν την εκκίνηση της κατασκευής, ταυτοποιήθηκε η στρωματογραφία του εδάφους και αποτυπώθηκε το γεωτεχνικό προφίλ της εξεταζόμενης περιοχής. Σε μια γενικότερη εικόνα, αποτελείται από φτωχής ποιότητας σχηματισμούς, κυρίως μαλακά εδάφη με παρουσία οργανικών και χαρακτηριστικά υψηλής συμπιεστότητας και υγρασίας. Συγκεκριμένα, συνίσταται από μία σειρά οριζόντιων στρωμάτων, περιλαμβάνοντας 7m πολύ συμπιεστών εδαφών, με υψηλά ποσοστά περιεχόμενα υγρασίας, καθώς και οργανικές ιλύες με τύρφη ή χωρίς. Υποκείμενα αυτών των τμημάτων, ακολουθούν πιο συμπαγή εδάφη, μη-οργανικά, που αποτελούνται κυρίως από άμμους, ιλυώδεις αργίλους και ιλυώδεις άμμους. Ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών, εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές στερεοποίησης υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε δοκίμια μη διαταραγμένα. Τέλος, αναφορικά με τη φρεατική επιφάνεια στην εξεταζόμενη

περιοχή, τα συνηθισμένα βάρη στα οποία εντοπιζόταν ήταν της τάξης των 0.5m υπό την επιφάνεια το εδάφους. Παρ' όλα αυτά, η ιδιαίτερα αυξημένη ξηρασία της περιόδου κατασκευής του επιχώματος οδήγησε στην πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας στα 2.5m κάτω από την εδαφική επιφάνεια. Ο πίνακας που παρατίθεται παρακάτω παρουσιάζει αναλυτικά τη στρωματογραφία της περιοχής, καθώς αποτυπώνει και τα βασικά μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά των σχετιζόμενων εδαφικών σχηματισμών.

Πίνακας 3.1: γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σχηματισμών

Βάθος (m)	Εδάφη	γ (kN/m³)	w (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (kPa)
0.00 -2.50	Οργανική ιλύς με τύρφη	14.6	95	6	27	1.000
-7.00	Οργανική ιλύς με ανθρακικά	16.7	67	15	20	1.200
-12.50	Ιλυώδης άμμος	20.3	19	0	32	11.500
-13.50	Αργιλική ιλύς	20.5	25	0	29	5.000
-50.00	Καλή Ιλυώδης άμμος	21.4	21	0	31	9.000

3.1.1 Χαρακτηριστικά επιχώματος

Το δοκιμαστικό επίχωμα κατασκευάστηκε στην περιοχή Orbe Plain, νότια του Neuchatel's Lake στην Ελβετία, το 1976, ως τμήμα του συνολικού έργου κατασκευής αυτοκινητόδρομου, όπως προαναφέρθηκε. Πρόκειται για επίχωμα ύψους 4m, τοποθετημένο σε εκείνο το τμήμα του αυτοκινητόδρομου το οποίο διασχίζει μια επίπεδη εδαφική επιφάνεια με ανώτερα στρώματα 7-8m πάχους, χαμηλής ποιότητας εδάφη. Χαρακτηριστικό στοιχείο της συγκεκριμένης κατασκευής αποτελεί η

συμπορεία του επιχώματος για ορισμένα χιλιόμετρα, με ένα κανάλι βάθους περίπου 2.5m. Η κατασκευή του πραγματοποιήθηκε σε στάδια, ώστε να παρέχεται ο απαιτούμενος χρόνος αποτόνωσης των πιέσεων πόρων και να εξασφαλιστεί η ικανότητα του εδάφους να παραλάβει το φορτίο ασφαλώς. Η συνολική διάρκεια κατασκευής του επιχώματος κράτησε 3 μήνες, ενώ η παρακολούθησή του συνεχίστηκε για περισσότερο από ένα χρόνο. Στόχος της δημιουργίας του ήταν η μετέπειτα διασφάλιση ευστάθειας του πραγματικού έργου, προσδιορίζοντας τα μεγέθη και το προφίλ των εδαφικών μετακινήσεων στο τέλος του φαινομένου της στερεοποίησης. Για την επίτευξη του ανωτέρου στόχου, επιβλήθηκε φορτίο τέτοιο ώστε να υπάρχει ακριβής προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών κατασκευής του αυτοκινητόδρομου. Μελετώντας τις προκύπτουσες από την παρακολούθησή του τιμές και πραγματοποιώντας υπολογισμούς με βάση τη μέθοδο Bishop, προέκυψαν αποτελέσματα που διασφάλιζαν την παράμετρο ευστάθειας.

3.1.2 Οργανομετρικές και αναλυτικές μέθοδοι παρακολούθησης

Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του επιχώματος αλλά και του εδαφικού σχηματισμού πάνω στον οποίο εδράστηκε, πραγματοποιήθηκε είτε με οργανομετρικές μεθόδους, είτε με αναλυτικές-υπολογιστικές. Σύμφωνα με τις οργανομετρικές, τα εργαλεία και τα μέσα που εφαρμόστηκαν αναφέρονταν στις κινήσεις καθιζήσεων και οριζόντιων μετακινήσεων, καθώς και στις παραμέτρους πιέσεων πόρων. Πιο αναλυτικά, εκτός του σώματος του επιχώματος, στην επιφάνεια του εδάφους, τοποθετήθηκαν τοπογραφικά σημεία, κάτω από το επίχωμα ανιχνευτές καθιζήσεων (γνωστοί ως «μάρτυρες»), καθώς και κελιά μέτρησης πιέσεων πόρων. Κοντά στον πόδα του επιχώματος, εγκαταστάθηκαν κλισίμετρα, «εμβαπτισμένα» σε ήδη ορυγμένες γεωτρήσεις, με στόχο τον εντοπισμό τυχών οριζόντιων μετακινήσεων. Συνδυαστικά με τα όργανα μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν βασικές θεωρίες στερεοποίησης, ώστε να διεξαχθούν αποτελέσματα μέσω υπολογισμών, ως προς τις τιμές των όποιων μετακινήσεων, οριζόντιων ή κατακόρυφων. Οι δύο βασικές θεωρίες επομένως που αποτέλεσαν τα βασικά εργαλεία για τον υπολογισμό της μονοδιάστατης καθιζήσης του επιχώματος, αναφερόμενα στον άξονα συμμετρίας του, ήταν η θεωρία πρωτογενούς καθιζήσης Terzaghi και η μέθοδος των Gibson and Lo, για εντοπισμό καθιζήσεων λόγω ερπυσμού στο ανώτερο στρώμα της τύρφης. Όλες οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν εκτέλεσαν τις προδιαγραφόμενες μετρήσεις καθ' όλη

τη διάρκεια της κατασκευής του επιχώματος, αλλά και μετά το πέρας της για διάρκεια 14 μηνών.

Πέραν των οργανομετρικών μεθόδων, εφαρμόσθηκε και αριθμητική μέθοδος ανάλυσης, μέσω προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα που προτιμήθηκε ήταν το ADINA R&D, το οποίο οδήγησε στην αριθμητική μοντελοποίηση των παραμορφώσεων και τάσεων. Εισάγοντας ρυθμιστικές παραμέτρους για επίπεδη παραμόρφωση, πιεζομετρικές στάθμες και βαθμούς ελευθερίας του τέλματος του βρόγχου, καθώς και λειτουργικές παραμέτρους, εκτελέστηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για πέντε διαφορετικές περιπτώσεις. Το σημείο διαφοροποίησης των εν λόγω περιπτώσεων εντοπιζόταν στη στάθμη της φρεατικής επιφάνειας, αλλά και στα τιθέμενα όρια τέλματος του βρόγχου. Ουσιαστικά, ο κάρναβος του προγράμματος παρουσίαζε μια σύνθετη σταυροειδή εικόνα του επιχώματος και του εδαφικού σκελετού. Ως προς το επίχωμα, προτιμήθηκε τύπος υπολογισμού για συνεχές ισότροπο ελαστικό μοντέλο, με μέτρο ελαστικότητας 30 kPa και λόγο Poisson 0.4. αναφορικά με τον εδαφικό σχηματισμό, χρησιμοποιήθηκε το ελαστο-πλαστικό μοντέλο ανάλυσης Druker and Prager, ενώ οι παράμετροι που χρειάσθηκαν για κάθε στρώμα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού που περιγράφεται, πραγματοποιήθηκε στο τελευταίο στάδιο του προσομοιωτικού έργου, με σκοπό την αξιολόγηση της πρόβλεψης των αριθμητικών μοντέλων, συγκριτικά με την ολική παραμόρφωση στο τέλος της στερεοποίησης.

Πίνακας 3.2: χρήσιμες παράμετροι για την παρακολούθηση

Περιπτώσεις	1	2	3	4	5
Βάθος φρεατικής	0	0	0	-2.50	-2.50
Λόγος Poisson ν	0.35	0.4	0.4	0.4	0.4
Μέτρο ελαστικότητας	30	30	0	30	30
Οριακές συνθήκες	roller	roller	roller	roller	hinge

3.1.3 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων και υπολογισμών και από τις δύο μεθόδους, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν έδειξαν συμφωνίες αλλά και διαφωνίες μεταξύ των μεθόδων. Παρ' όλα αυτά, το φορτίο που επιλέχθηκε να εφαρμοστεί αποδείχθηκε ικανοποιητικό για την περίπτωση, δεδομένου ότι καμία μέθοδος δεν ανέδειξε προβλήματα ευστάθειας. Όσον αφορά στα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων ως προς τις καθιζήσεις, στο μεγαλύτερο μέρος τους έδειξαν να συμβαδίζουν με αυτά των μετρήσεων πεδίου. Καμία αναμενόμενη ασυμμετρία δεν αναδείχθηκε στο προφίλ των καθιζήσεων, γεγονός που αντιτάθηκε στις προβλέψεις λόγω της παρουσίας του καναλιού. Αντίθετα, στις οριζόντιες μετακινήσεις, ενώ υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων αναφορικά με το σχήμα της καμπύλης και το σημείο μέγιστης παραμόρφωσης, οι μέθοδοι αποκλίνουν στις απόλυτες τιμές των μεγεθών, με μεγαλύτερες αυτές των αριθμητικών μοντέλων. Σημαντική διαφορά επίσης, παρατηρήθηκε στο κατώτερο όριο των μετρήσεων, όπου οι προκύπτουσες τιμές από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων δε μηδενίζονται. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τις μετρήσεις που πάρθηκαν 14 μήνες μετά την κατασκευή του επιχώματος, οι καθιζήσεις παρατηρήθηκαν στα 580mm, κάτω από τον άξονα συμμετρίας του επιχώματος, πλησιέστερα στα άκρα του το μέγεθος της καθίζησης μειώνεται στα 430mm, ενώ έξω από το σώμα του επιχώματος δεν παρατηρείται καμία κίνηση καθίζησης. Διαφορετική εικόνα εμφανίζεται ως προς τις οριζόντιες μετακινήσεις, καθώς τα τοποθετημένα στην όχθη του καναλιού κλισίμετρα, έδειξαν μέγιστη μετακίνηση 89mm, ενώ αυτά στην απέναντι από το επίχωμα όχθη, έδωσαν μέγεθος της τάξης των 57mm. Παρ' όλα αυτά, τα προφίλ των μετακινήσεων συμπίπτουν ως προς τις παραμέτρους του βάθους, με τις μέγιστες αποκλίσεις να λαμβάνουν μέρος κοντά στο δάπεδο των ανώτερων τυρφοδών ιλύων. Σύμφωνα με τις υπολογιστικές μεθόδους, οι θεωρίες Terzaghi και Gibson and Lo κατέληξαν σε μεγέθη τελικών καθιζήσεων 780mm και 830mm, αντίστοιχα. Επίσης, η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού αποτύπωσε τα ήδη γνωστά από τις μετρήσεις πεδίου συμπεράσματα, περί πλειοψηφίας κάθετων μετακινήσεων κάτω από το επίχωμα και οριζόντιων κοντά στα άκρα του, στα στρώματα οργανικών υλικών. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις 2 και 5, των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον παραπάνω πίνακα, υπάρχει συμφωνία αποτελεσμάτων αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων ως προς το προφίλ των καθιζήσεων. Ωστόσο, διακρίνεται μία υποτίμηση του μεγέθους των καθιζήσεων κάτω από το κέντρο του επιχώματος, στην περίπτωση 5, όπου η

φρεατική επιφάνεια βρίσκεται χαμηλότερα. Συγκρίνοντας τις τιμές που προέκυψαν από τα κλισίμετρα για τις οριζόντιες μετακινήσεις, στις περιπτώσεις 4 και 5, υπάρχει επίσης σύμπτωση αποτελεσμάτων ως προς το προφίλ εκδήλωσης, ενώ οι απόλυτες τιμές της υπολογιστικής μεθόδου είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες των κλισιμέτρων.

Έπειτα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση αυτών, προέκυψαν συμπεράσματα ως προς τους παράγοντες που επηρέασαν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, αλλά και τη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μεθόδων υπολογισμού. Αναφορικά με τις προκύπτουσες τιμές των τάσεων, μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, υπεύθυνα φαίνεται να είναι η παραδοχή για συνθήκες στραγγιζόμενης και μακροχρόνιας συμπεριφοράς, η οποία οδήγησε στη μη ακριβή απόδοση των οριακών τιμών τάσεων κατά την κατασκευή του επιχώματος. Επίσης, η υπόθεση ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού πλήρωσης του επιχώματος αποτέλεσε παράγοντα που ίσως οφείλεται για την υποτίμηση των ορθών τάσεων που παρατηρήθηκε, καθώς οδηγεί στην ακαμψία του υλικού, αφού όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν υπό μηδενική πλαστική παραμόρφωση. Ως προς τις καθιζήσεις, η λειτουργική δυσχέρεια των αναλυτικών μεθόδων (Terzaghi, Gibson and Lo), σε προβλήματα μονοδιάστατης συμπίεσης, είχε ως αποτέλεσμα την υπερτίμηση του φαινομένου κατά 30% περισσότερο, σε σχέση με τις παρατηρούμενες τιμές. Αντίθετα, οι τιμές που προέκυψαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων έδειχναν υποτίμηση ως προς τις παρατηρούμενες τιμές, σε εύρος 6-17%, ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση. Ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας που έχει αντίκτυπο στην απόκλιση των αποτελεσμάτων, είναι ο υποβιβασμός του προβλήματος από τρισδιάστατη σε δισδιάστατη ανάλυση. Τέλος, η επιλογή του σημείου πέρατος του βρόγχου, θα μπορούσε να αποτελεί στοιχείο στρέβλωσης των αποτελεσμάτων. Η επιβολή του κατώτατου σημείου του προγράμματος ενδεχομένως να ήταν άστοχη, με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της ολοκληρωμένης αποτόνωσης του φορτίου. Στις οριζόντιες μετακινήσεις, υπάρχει μεγάλη αντίθεση μεταξύ της σχεδόν τέλει αποτύπωσης του προφίλ των μετακινήσεων από τα κλισίμετρα και του μεγέθους αυτών. Παρατηρείται επίσης ότι σε βάθος που ανταποκρίνεται στο δάπεδο των κλισιμέτρων, οι τιμές από τους υπολογισμούς δε μηδενίζονται, πιθανώς λόγω τοποθέτησής τους σε μη επαρκές βάθος.

Γενικότερα, οι διαφορές μεταξύ υπολογισμένων και παρατηρούμενων τιμών οφείλονται κυρίως στον ασαφή χαρακτηρισμό των εδαφικών χαρακτηριστικών, ιδιαίτερα του υλικού πλήρωσης του επιχώματος και στην ποικιλία των εδαφικών στρωμάτων. Καλύτερα αποτελέσματα θα μπορούσαν να αποκτηθούν με τη χρήση μοντέλου δισδιάστατης ανάλυσης καθώς παρέχει περισσότερες δυνατότητες για την γεωμετρική απεικόνιση του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων

Στη γεωτεχνική μηχανική, λόγω της πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, απαιτούνται μέθοδοι αριθμητικής ανάλυσης, με περισσότερη εφαρμογή αυτών των πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών. Πρόκειται για μεθόδους που προσπαθούν να ικανοποιήσουν όλες τις απαραίτητες θεωρητικές συνθήκες, προσομοιώνοντάς τες σε ρεαλιστικές συμπεριφορές εδαφών.

Η αρχή της χρήσης των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) φαίνεται να ξεκίνησε κατά το 1966, με τον καθορισμό τάσεων και μετατοπίσεων σε αναχώματα, από τους Clough και Woodward, καθώς και από τους Reyes και Deer, που ασχολήθηκαν με την ανάλυση υπογείων εκσκαφών σε βράχους.

Οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων, ουσιαστικά, παρέχουν τη δυνατότητα κατασκευής δομικών μοντέλων, τα οποία αντικατοπτρίζουν απόλυτα τη συμπεριφορά του πραγματικού εδάφους, σύμφωνα με τις επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες. Θεωρητικά, μπορούν να επιλύσουν και πλήρως τρισδιάστατα προβλήματα, χωρίς καμία εξάρτηση από περιορισμούς που συνήθως ισχύουν για άλλες μεθόδους. Ο χρήστης, κατά τη δημιουργία του μοντέλου, σχεδιάζει τη γεωμετρία, εισάγει τα δεδομένα για τη διαδικασία κατασκευής, καθώς και παραμέτρους που σχετίζονται με τις συνοριακές συνθήκες αλλά και την εδαφική συμπεριφορά του εξεταζόμενου εδάφους. Επιπλέον, υπάρχει η ευχέρεια προσομοίωσης της διαδικασίας εξέλιξης των πιέσεων πόρων του νερού, σε σχέση με το χρόνο. Χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών, είναι η μη απαίτηση σχεδιασμού της πιθανής αστοχίας, καθώς προκύπτει από την ανάλυση του μοντέλου, γεγονός που ενθαρρύνει τη χρήση της σε προβλήματα γεωτεχνικής φύσης.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι η ικανότητα διακριτοποίησης του χώρου. Επιτυγχάνεται διαμερισμός του συνολικού χώρου σε μικρότερους, με αποτέλεσμα τη μετατροπή ενός ανομοιογενούς συνεχούς μέσου σε διακριτό. Οι προκύπτοντες

υποχώροι (στοιχεία), αποτελούνται από στοιχεία διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων, που όμως αλληλεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων. Η μελέτη και η ανάλυση αυτών των ιδιοτήτων πραγματοποιείται με τη χρήση μαθηματικών εργαλείων, βασισμένα σε διάφορες θεωρίες.

4.2 Γενικά χαρακτηριστικά προγράμματος PLAXIS 8.x

Η μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στη χρήση του προγράμματος Plaxis. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προσανατολισμένο στη δισδιάστατη ανάλυση παραμορφώσεων και συνθηκών ευστάθειας στη γεωτεχνική μηχανική. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε το 1987 στο πολυτεχνείο του Delft της Ολλανδίας, ενώ η πρώτη έκδοση, συμβατή σε κοινούς υπολογιστές, διατέθηκε στην αγορά το 1998. Στόχος και κίνητρο για τη δημιουργία του αποτέλεσε η ανάγκη για ένα εύχρηστο προγραμματιστικό κώδικα προσομοίωσης, που να μπορεί να διαχειρίζεται οποιοσδήποτε μη εξειδικευμένος χρήστης. Η πολυπλοκότητα στη συμπεριφορά των γεωτεχνικών εφαρμογών απαιτεί εξειδικευμένα μοντέλα προσομοίωσης. Το Plaxis είναι διαμορφωμένο να παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης μοντέλων ανισότροπης και μη-ελαστικής συμπεριφοράς, καθώς και εξαρτώμενων από το χρόνο. Επιπλέον, διαθέτει τις απαραίτητες δομές για την ανάλυση των υδροστατικών ή μη, πιέσεων πόρων του εδάφους, αλλά και της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και δομικών στοιχείων. Παρακάτω, ακολουθεί διεξοδικότερη παρουσίαση των σημαντικότερων χαρακτηριστικών που διαμορφώνουν το πρόγραμμα και το καθιστούν καταλληλότερο για προβλήματα ανάλυσης γεωτεχνικής φύσεως.

Σχεδιασμός μοντέλου: Η γεωμετρική αποτύπωση του επιθυμητού μοντέλου πραγματοποιείται μέσω σχεδιαστικού προγράμματος. Πλεονέκτημα αυτού, η εισαγωγή εδαφικών στρωμάτων, σταδίων κατασκευών, φορτίων και συνοριακών συνθηκών, που μπορεί να περιλαμβάνονται στο μοντέλο, υλοποιείται με απόλυτη ακρίβεια και διευκολύνεται η ανάπτυξη αντίστοιχου κανάβου.

Αυτόματη ανάπτυξη κανάβου: Το πρόγραμμα δύναται να δημιουργεί κανάβο προσαρμοσμένο στις δύο διαστάσεις, σύμφωνα με τη γεωμετρία που έχει εισαχθεί και επιτρέπει, μέσω τυποποιημένων επιλογών, τη διαχείρισή του σε γενικό ή/και σε τοπικό επίπεδο.

Υψηλής ανάλυσης στοιχεία: Για τη μελέτη των παραμορφώσεων και τάσεων του εδάφους χρησιμοποιούνται τετραεδρικά 6-κομβά (6-node) και τριγωνικά 15-κομβά (15-node) στοιχεία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε η χρήση των τριγωνικών 15-κομβών στοιχείων, ως η καταλληλότερη για το δεδομένο πρόβλημα.

Διεπιφάνειες: Παρουσιάζονται ως στοιχεία κομβικά που περιγράφουν την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Ο καθορισμός τους, όπου υφίστανται, είναι απαραίτητος, καθώς αρκετές παράμετροι διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση του στοιχείου. Παραδείγματος χάρη, οι τιμές της γωνίας τριβής και συνοχής (ϕ , c) συνήθως διαφέρουν στη διεπιφάνεια συγκριτικά με το περιβάλλον έδαφος.

Μοντέλο Mohr-Coulomb: Πρόκειται για μη-γραμμικό μοντέλο που στηρίζεται στις ευρέως γνωστές, στη γεωτεχνική μηχανική, εδαφικές παραμέτρους. Παρ' όλα αυτά, δε χρησιμοποιούνται όλες οι παρεχόμενες μη-γραμμικές παράμετροι κατά την ανάλυση με αυτό το θεωρητικό εργαλείο. Συνήθως εφαρμόζεται στον υπολογισμό είτε πιέσεων υποστήριξης σε μέτωπα σηράγγων, ή οριακών φορτίων σε θεμελιώσεις, καθώς και για τον καθορισμό του συντελεστή ασφαλείας, μέσω ανάλυσης των ϕ και c παραμέτρων. Ωστόσο, το πρόγραμμα παρέχει και τη δυνατότητα χρήσης πιο εξειδικευμένων μοντέλων για εδάφη, που συνυπολογίζουν στην ανάλυση παραμέτρους όπως ο χρόνος, η συμπιεστότητα, κ.α. Σε πιο ερευνητικό επίπεδο, ο χρήστης έχει ακόμα την ευχέρεια να διαμορφώσει το θεωρητικό μοντέλο που επιθυμεί για την ανάλυσή του, μέσω λειτουργικών ρυθμίσεων που παρέχονται από το πρόγραμμα.

Υπερπίεση πόρων: Το παρόν πρόγραμμα διακρίνει τις αναλύσεις σε περιπτώσεις στραγγιζόμενων και αστράγγιστων συνθηκών, ανάλογα με τα εδαφικά μοντέλα που αναλύονται. Στην περίπτωση επιβολής φορτίου σε αστράγγιστες συνθήκες υπάρχει ανάπτυξη πίεσης πόρων, η οποία υπολογίζεται κατά τη διάρκεια πλαστικής ανάλυσης, καθώς αυτή είναι περισσότερο υπεύθυνη για την ευστάθεια γεωτεχνικών κατασκευών.

Σταδιακή κατασκευή: Προκειμένου να προσομοιωθεί με τον πιο ρεαλιστικό τρόπο ένα μοντέλο κατασκευής ή εκσκαφής, το Plaxis παρέχει στο χρήστη την ευχέρεια ενεργοποίησης και απενεργοποίησης τοπικών στοιχείων, φορτίων, δομικών στοιχείων, κ.α. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ακριβέστερη εκτίμηση των τιμών των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Ανάλυση στερεοποίησης: Με αυτή την ανάλυση μπορεί να υπολογιστεί η πίεση πόρων του εδάφους σε σχέση με το χρόνο, εισάγοντας μόνο τις παραμέτρους συνεκτικότητας του εκάστοτε στρώματος εδάφους.

Παρουσίαση αποτελεσμάτων: Μετά το πέρας των αναλύσεων, είναι δυνατή η προβολή των αποτελεσμάτων, είτε με τη μορφή πινάκων ή με διαγράμματα. Υπάρχει η δυνατότητα παρουσίασης των τιμών τάσεων, παραμορφώσεων, μετακινήσεων και όποιων άλλων ενδιαφερόμενων χαρακτηριστικών, καθώς και η εξαγωγή τους σε όποιο άλλο πρόγραμμα.

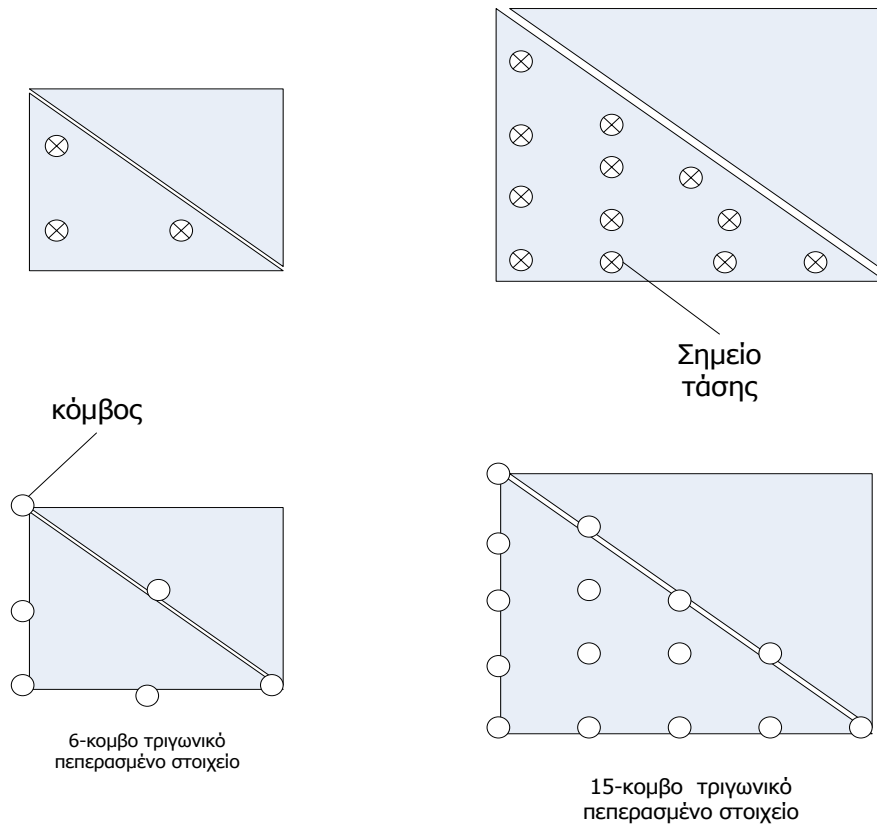
4.2.1 Ορισμός Κανάβου

Ο διαθέσιμος χώρος που προσφέρει το Plaxis, ιδεατά χωρίζεται με έναν κανάβο σε έναν αριθμό υποχωρών, τα λεγόμενα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία αντίστοιχα, συνδέονται μεταξύ τους με έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Στη συγκεκριμένη έκδοση του Plaxis πρόκειται για στοιχεία δισδιάστατα και αντίστοιχα για δισδιάστατη μετακίνηση των κόμβων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθώς το κάθε στοιχείο διαθέτει την ίδια ελαστική συμπεριφορά με το αρχικό σώμα, η μελέτη των μετακινήσεων των κόμβων οδηγεί στη εκτίμηση της συνολικής μετακίνησης των στοιχείων του μοντέλου, με τη βοήθεια παρεμβολικών τύπων.

Πρακτικά, όλα τα παραπάνω εφαρμόζονται κατά τη δημιουργία του κανάβου, όπου κλειστές ομάδες σημείων (clusters) διακρίνονται σε τριγωνικά στοιχεία, αποτελούμενα από 6 ή 15 κόμβους. Τα μεν εξάκομβα (6-node) κατανέμονται πάνω στη γραμμή που οριοθετεί το τριγωνικό σχήμα, ενώ τα δεκαπεντάκομβα διανέμονται πάνω και εντός της τριγωνικής επιφάνειας (15-node). Η επιλογή αυτή εξαρτάται από το είδος του προβλήματος που πρόκειται να μοντελοποιηθεί και είναι άμεσα συνδεδεμένη με το χρόνο εκτέλεσης και τη δυσκολία επίλυσης. Στα σημεία των κόμβων υπολογίζονται οι μετακινήσεις του εδάφους. Αντίθετα, οι τάσεις υπολογίζονται σε διαφορετικά σημεία, τα οποία βρίσκονται και εντός των τριγωνικών επιφανειών και το πλήθος τους εξαρτάται από το πλήθος των κόμβων. Στα στοιχεία 15 κόμβων περιέχονται 12 σημεία τάσεων (stress points), ομοίως, πάνω και εντός της επιφάνειας, ενώ σε αυτά των 6 κόμβων υπάρχουν 3 σημεία τάσεων πάνω στη γραμμή του τριγώνου. Συνήθως, αλλά και στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία 15 κόμβων,

για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων. Παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων, με μειονέκτημα όμως τον αυξημένο χρόνο επίλυσης λόγω της μεγαλύτερης υπολογιστικής ισχύος που απαιτούν. Τα στοιχεία 6 κόμβων προτιμούνται σε προβλήματα απλούστερης ανάλυσης, με την προϋπόθεση όμως να μην ελλοχεύουν κίνδυνοι αστοχίας, καθώς υπερεκτιμούνται τα αποτελέσματα.



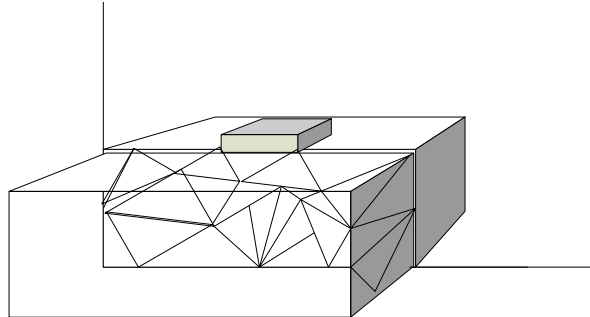
Εικόνα 4.1: Διακριτοποίηση

4.2.2 Μοντέλα προσομοίωσης

Η προσομοίωση πραγματικών προβλημάτων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα στο πρόγραμμα Plaxis, επιτυγχάνεται είτε με την παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain model), που αποτελεί προεπιλογή του προγράμματος, ή με δισδιάστατη αξονοσυμμετρική ανάλυση (axis symmetric model).

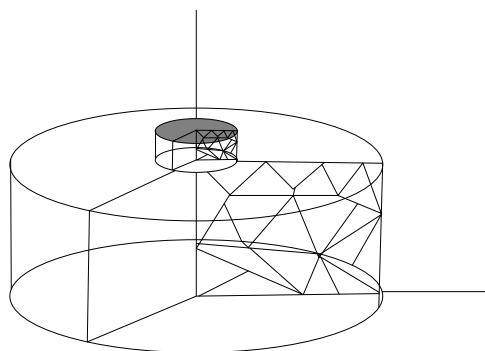
Το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιείται για γεωμετρίες ομοιόμορφης διατομής και ομοιόμορφης κατανομής τάσεων και φορτίσεων, κατά μήκος κάθετου του

επιπέδου z . Στο εν λόγω επίπεδο, οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις είναι μηδενικές, ενώ οι ορθές τάσεις λαμβάνονται κανονικά υπόψη.



Εικόνα 4.2: Μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης

Αντίστοιχα, το μοντέλο αξονοσυμμετρικής ανάλυσης προτιμάται για κυκλικές κατασκευές με ομοιόμορφη ακτινική διατομή και προφίλ φορτίου ομοιόμορφο γύρω από ένα κεντρικό άξονα. Οι τιμές των παραμορφώσεων και τάσεων ταυτίζονται για κάθε ακτινική διεύθυνση. Σε αυτού του είδους την ανάλυση, οι συντεταγμένες x και y αντιπροσωπεύουν την ακτινική και αξονική διεύθυνση, αντίστοιχα.

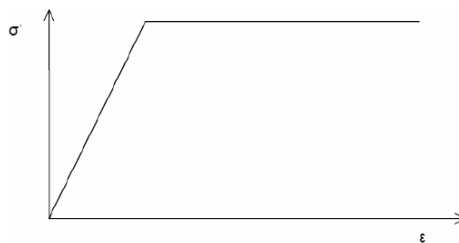


Εικόνα 4.3: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο

4.2.3 Καταστατικοί Νόμοι

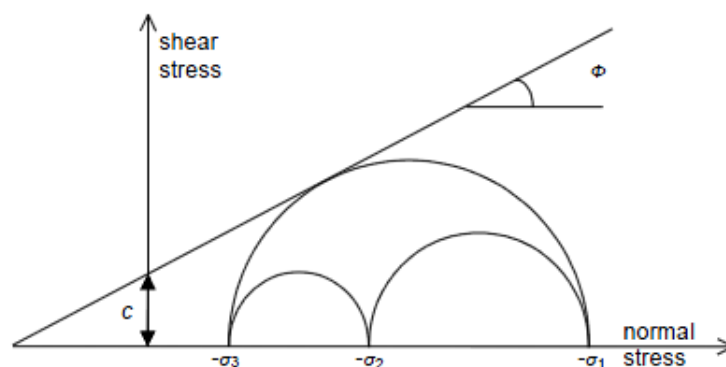
Οι καταστατικοί νόμοι που διέπουν το πρόγραμμα Plaxis και λειτουργούν ως εργαλεία για την ανάλυση των μοντέλων είναι οι εξής:

Mohr-Coulomb: Είναι ένα ελαστικά-τέλεια πλαστικό μοντέλο. Με την παραδοχή ότι η συμπεριφορά του εδάφους συμβαδίζει με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, βρίσκει εφαρμογή σε γενικευμένες προσεγγίσεις της εδαφικής συμπεριφοράς. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τη διαμόρφωση αυτού του θεωρητικού μοντέλου είναι το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος του Poisson ν για την ελαστικότητα, η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και η συνοχή c για την πλαστικότητα, καθώς και η γωνία διογκωσιμότητας ψ .



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Περιγράφεται από 6 συναρτήσεις, προσανατολισμένες σε όρους κυρίων τάσεων. Το κριτήριο αστοχίας των Mohr-Coulomb ουσιαστικά, διατυπώνει την εφαρμογή του νόμου τριβής του Coulomb σε κάθε επίπεδο μέσα σε ένα στοιχείο υλικού και είναι άμεσα εξαρτώμενο από τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και της συνοχής c .



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα κύκλων αστοχίας Mohr-Coulomb

Linear Elastic: Πρόκειται για ένα μοντέλο γραμμικά ελαστικό που εκφράζεται με το νόμο του Hook, μέσω των παραμέτρων του μέτρου ελαστικότητας E και το λόγο του Poisson ν . Θεωρείται μη ρεαλιστικό μοντέλο, καθώς η εδαφική συμπεριφορά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ελαστική.

Soft Soil model: Περιγράφει τη συμπεριφορά μαλακών εδαφών, δίνοντας ρεαλιστικότερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις κανονικά στερεοποιημένων εδαφών και πρωτογενών φορτίσεων. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου αυτού, είναι η εξάρτηση της τάσης από τη δυσκαμψία του εδάφους, η διάκριση μεταξύ πρωτογενούς φόρτισης και αποφόρτισης-επαναφόρτισης, η απομνημόνευση των τιμών των τάσεων προστεροποίησης και η εκδήλωση αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Soft Soil Creep model: Ομοίως, είναι ένα μοντέλο που παρουσιάζει τη συμπεριφορά μαλακών εδαφών, που όμως εξαρτώνται από το χρόνο, όπως οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι. Με τη θεώρηση του φαινομένου του ερπυσμού, τα βασικά χαρακτηριστικά του εν λόγω μοντέλου είναι ταυτόσημα με του Soft Soil, με επιπρόσθετο αυτό της δευτερογενούς συμπύκνωσης.

Hardening Soil model: Όπως προαναφέρθηκε, πρόκειται για μοντέλο με μεταβαλλόμενη επιφάνεια πλαστικότητας λόγω κράτυνσης. Μπορεί να διακριθεί σε δύο επιμέρους τύπους, διατμητικής κράτυνσης και κράτυνσης λόγω συμπίεσης. Ο πρώτος, χρησιμοποιείται για μοντέλα που υφίστανται μη-αναστρέψιμη παραμόρφωση λόγω πρωτογενούς αποφόρτισης, ενώ ο δεύτερος, για μη-αναστρέψιμες πλαστικές παραμορφώσεις, λόγω πρωτογενούς συμπίεσης μέσω συμπιεσομέτρου. Το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται και για μαλακά αλλά και για σκληρά εδάφη. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Εξαρτώμενη τάση από τη δυσκαμψία
- Πλαστική παραμόρφωση πρωτογενούς φόρτισης
- Πλαστική παραμόρφωση λόγω πρωτογενούς συμπίεσης
- Ελαστική φόρτιση/αποφόρτιση
- Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Jointed Rock model: Είναι ένα μοντέλο ανισοτροπικής ελαστικής-τέλεια πλαστικής συμπεριφοράς, ειδικά για στρωσιγενής και κερματισμένες βραχομάζες. Εφαρμόζεται όταν υπάρχουν οικογένειες ή ομάδες ασυνεχειών, οι οποίες διατάσσονται παράλληλα,

με μικρή επανάληψη (συνέχεια). Χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι η ανισοτροπική ελαστική συμπεριφορά βραχομάζας, η διατμητική αστοχία σύμφωνα με το νόμο Coulomb σε 3 διευθύνσεις και η περιορισμένη εφελκυστική αντοχή στις 3 διευθύνσεις αντίστοιχα.

4.2.4 Στάδια ανάλυσης Plaxis

Η διαδικασία επίλυσης του εκάστοτε μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιείται σταδιακά, σε 4 επιμέρους τμήματα:

- Αρχικά, εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος, στο επικαλούμενο πρόγραμμα εισαγωγής, Input Program. Γεωμετρικά δεδομένα της κατασκευής, εδαφικά υλικά και αρχικές συνθήκες του προβλήματος, είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά που προσδίδονται σε αυτό το στάδιο.
- Με την επιλογή του μοντέλου υπολογισμού και άλλων απαραίτητων παραμέτρων, ξεκινά το επόμενο στάδιο του υπολογισμού, Calculation Program.
- Έπειτα, ακολουθεί η εξαγωγή των αποτελεσμάτων, ως Output Program, όπου προβάλλονται οι επιθυμητές τιμές, μετά το πέρας της υπολογιστικής διαδικασίας.
- Τέλος, το Curves Program, δίνει τη δυνατότητα διαμόρφωσης των αποτελεσμάτων στη μορφή καμπυλών, προσανατολισμένων στα στοιχεία που ήδη υπολογίστηκαν.

❖ Input Program

Μέσω των επιλογών του προγράμματος εισαγωγής, Input Program, δημιουργείται το δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και προσδιορίζονται οι εδαφικές ιδιότητες και οι αρχικές συνθήκες. Συνοπτικά, οι ενέργειες που πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι οι εξής:

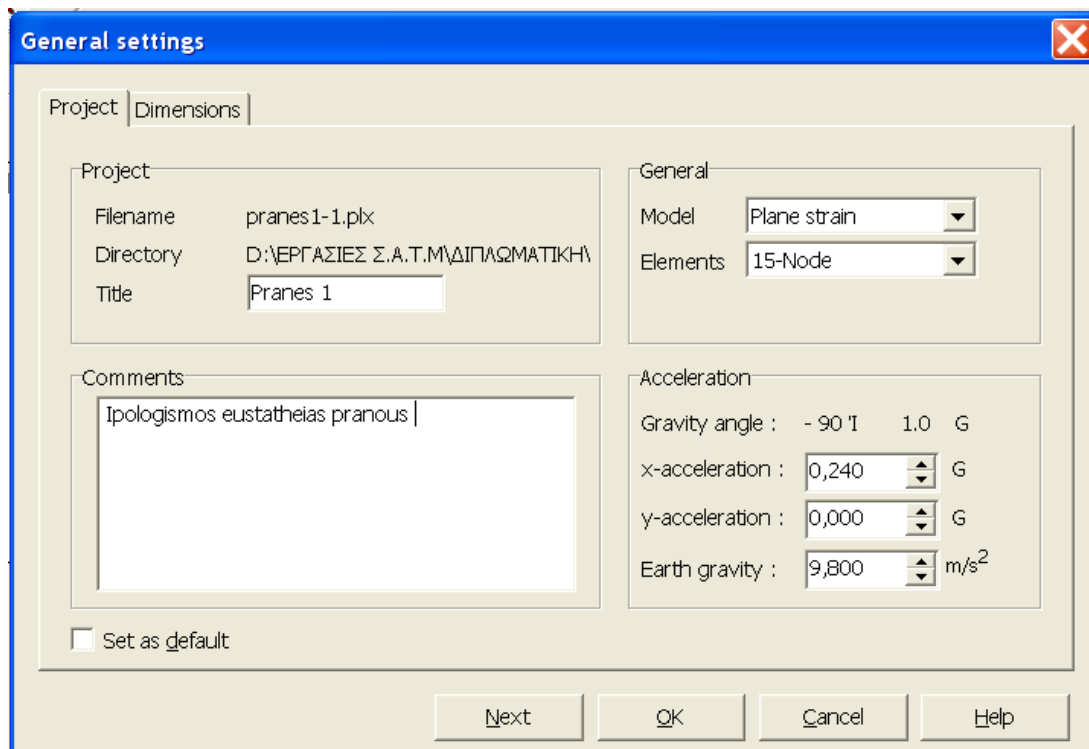
- General Settings (γενικά χαρακτηριστικά κανάβου)
- Geometry Input (γεωμετρικό μοντέλο)
- Material Data Set (εδαφικά υλικά)
- Mesh Analysis (διακριτοποίηση)

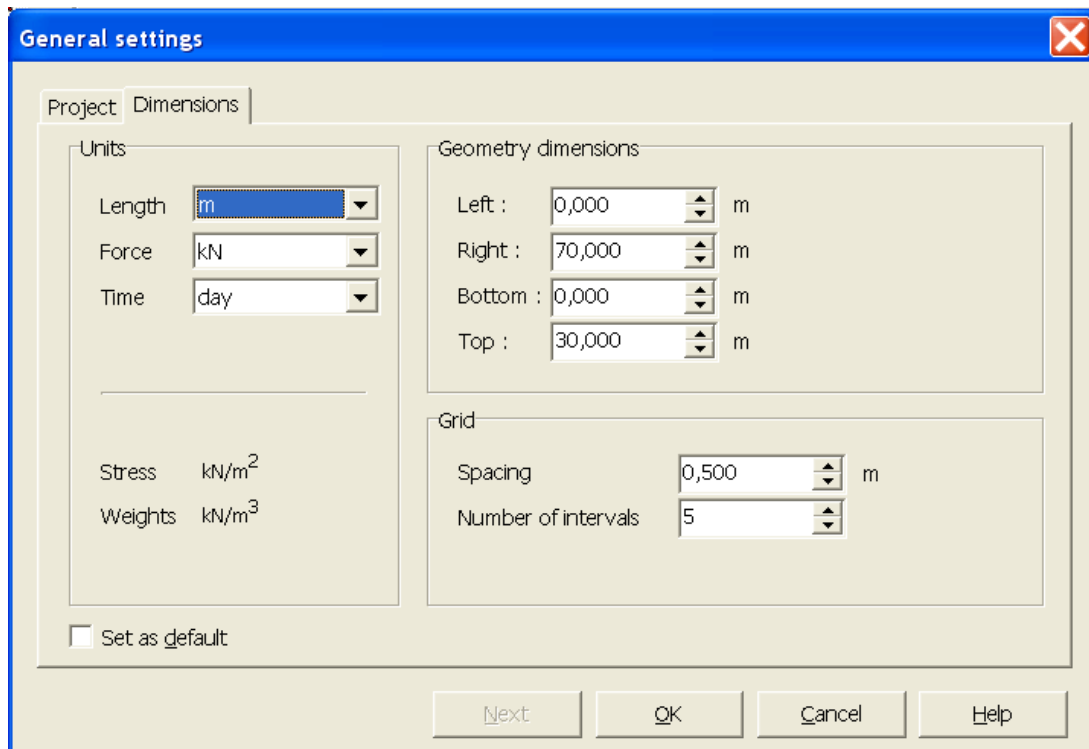
- Initial Conditions (αρχικές συνθήκες)

Παρακάτω ακολουθεί διεξοδικότερη ανάλυση των παραπάνω ενεργειών ξεχωριστά:

➤ General Settings

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος, εμφανίζεται το παράθυρο των γενικών ρυθμίσεων, το οποίο περιέχει δύο επιμέρους καρτέλες, "Project" και "Dimensions". Στην πρώτη, δίνεται η ονομασία του αρχείου και ο τύπος αποθήκευσής του. Επίσης, καθορίζεται το μοντέλο προσομοίωσης, μεταξύ των επιλογών που ήδη έχουν αναλυθεί και προσδιορίζεται το είδος των πεπερασμένων στοιχείων. Οι υπόλοιπες παράμετροι που αφορούν στις επιταχύνσεις κατά x, y και στην επιτάχυνση της βαρύτητας, συνήθως δεν αλλάζουν και αφήνονται ως έχουν από την προεπιλογή. Η δεύτερη καρτέλα, ασχολείται με τις μονάδες μέτρησης και τα γεωμετρικά όρια του κανάβου σχεδίασης. Επιλέγονται λοιπόν, οι επιθυμητές μονάδες μήκους, δύναμης και χρόνου και τίθενται τα κατακόρυφα και οριζόντια όρια της επιφάνειας σχεδίασης. Τελευταία επιλογή είναι ο ορισμός του κατάλληλου διαστήματος του κανάβου, που συνήθως για ευκολία αφήνεται στο 1.00 m.






Εικόνα 4.4: Γενικές ρυθμίσεις

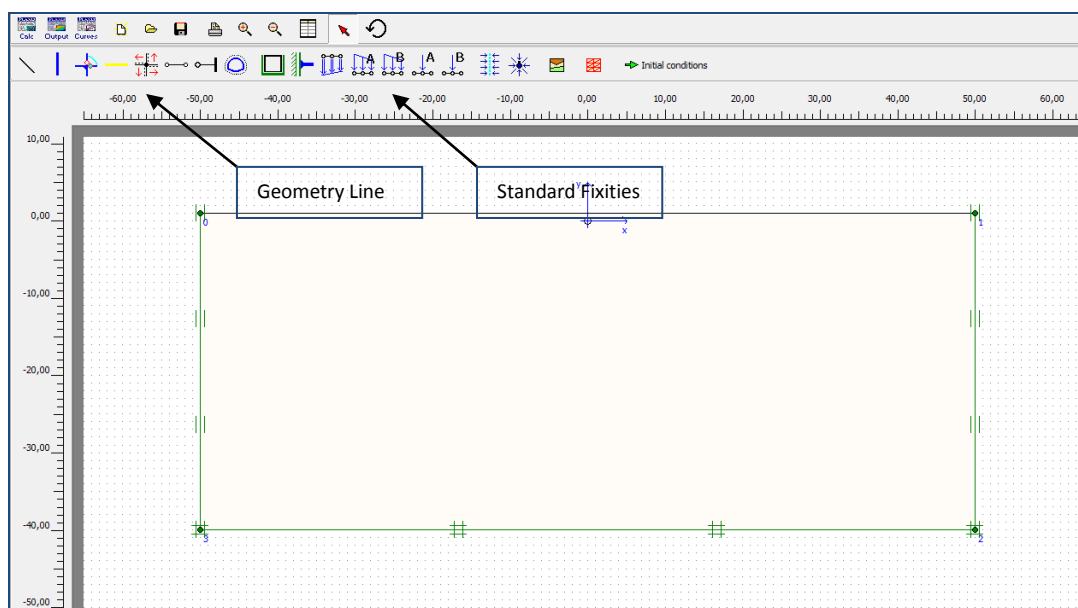
➤ Geometry Input

Αφού έχουν οριστεί τα γενικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την ανάλυση, ακολουθεί ο σχεδιασμός του γεωγραφικού μοντέλου, όπου ουσιαστικά σχεδιάζεται το προσομοίωμα του προβλήματος και ορίζονται όλα τα δομικά στοιχεία που τυχόν περιλαμβάνει.

Κάθε μοντέλο που δημιουργείται αποτελείται από σημεία (points), γραμμές (lines) και κλειστές ομάδες στοιχείων (clusters). Τα σημεία οριοθετούν την αρχή και το πέρας των γραμμών ή των διαφόρων εμπλεκόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, επίπεδα, κ.α.). Οι γραμμές καθορίζουν τα φυσικά όρια του μοντέλου που δημιουργείται και τέλος, οι κλειστές ομάδες, οι οποίες περικλείονται από γραμμές, επιδεικνύουν μια περιοχή που αποτελείται από στοιχεία όμοιας μηχανικής συμπεριφοράς.

Αναλυτικότερα, με την επιλογή *Geometry Line* εισάγονται οι απαραίτητες γραμμές που θα δημιουργήσουν το περίγραμμα και κατ' επέκταση όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Εναλλακτικά, η ίδια λειτουργία μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εισαγωγή συντεταγμένων στη *command line*, που βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης.

 Αφού σχεδιαστεί το γεωμετρικό μοντέλο, έπεται η δημιουργία των συνοριακών συνθηκών. Με την επιλογή Standard Fixities από το αντίστοιχο εικονίδιο ή από το μενού (Loads → Standard Fixities), το πρόγραμμα αυτόματα τοποθετεί συνοριακές συνθήκες. Οι προεπιλεγμένες αυτές συνθήκες αφορούν στην παρεμπόδιση μετακινήσεων κατά τους κατακόρυφους και οριζόντιους άξονες. Συγκεκριμένα, για τον κατακόρυφο άξονα αποκλείονται οι οποιοσδήποτε μετακινήσεις στα σύνορα του μοντέλου, δηλαδή, $U_y=0$. Αντίστοιχα, εμποδίζεται η κατακόρυφη κύλιση του κάτω οριζοντίου ορίου της γεωμετρίας, με την ένδειξη $U_x=0$. Στην περίπτωση που υπάρχουν δομικά στοιχεία που προεκτείνονται έως τα σύνορα του γεωμετρικού μοντέλου, υφίστανται περιορισμό στη στρεπτική κίνηση ($\phi_z=0$), στο συγκεκριμένο σημείο επαφής.



Εικόνα 4.5: Επιλογές στο σχεδιασμό του μοντέλου

➤ Material Data Set

Όπως είναι προφανές, από το μενού αυτό προσδιορίζονται τα υλικά που περιλαμβάνονται στο προς ανάλυση μοντέλο, καθώς και οι αντίστοιχες ιδιότητές τους. Η ενεργοποίηση της εντολής γίνεται από το αντίστοιχο εικονίδιο, είτε από το μενού Materials, όπου εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο εισάγεται το νέο υλικό και κατ' επέκταση το είδος του. Αφού επιλεγεί το επιθυμητό υλικό, μεταξύ εδαφικών (soil and interfaces), επιπέδων (plates), γεωπλεγμάτων (geogrids) ή αγκυρίων (anchors), ακολουθεί η εισαγωγή των ιδιοτήτων τους, μέσω περαιτέρω καρτελών.

Περίπτωση εδαφικών υλικών:

Με την επιλογή soil and interfaces, ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει όλα τα ζητούμενα χαρακτηριστικά που συνιστούν τη μηχανική συμπεριφορά του συγκεκριμένου υλικού.

Η πρώτη κατά σειρά καρτέλα, με τίτλο General, περιλαμβάνει τον τύπο μοντέλου προσομοίωσης και τον τύπο του υλικού, ως προς τις συνθήκες πιέσεων πόρων του εδάφους. Οι τύποι των μοντέλων που δύναται να επιλεγούν, διακρίνονται στους καταστατικούς νόμους των Mohr-Coulomb, της γραμμικής ελαστικότητας, μαλακών εδαφών και κρατυνόμενης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, τα οποία περιγράφηκαν προηγουμένως αναλυτικά.

Ως προς τις πιέσεις του ύδατος των πόρων του εδάφους, το πρόγραμμα παρέχει την επιλογή μεταξύ στραγγισμένων (drained) ή αστράγγιστων (undrained) συνθηκών και μη-πορώδους υλικού.

- **Drained Type:** Με την επιλογή αυτή, περί στραγγιζόμενων συνθηκών, προσομοιώνεται εδαφικό υλικό χωρίς ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων. Αυτό πρακτικά υφίσταται είτε σε ξηρά υλικά, είτε σε υλικά με μεγάλη διαπερατότητα (π.χ. άμμοι), όπου το νερό έχει στραγγιστεί πλήρως. Επίσης, με αυτή την επιλογή περιγράφονται και περιπτώσεις υλικών για μακροχρόνιες συνθήκες, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περίοδοι αστράγγιστων συνθηκών και στερεοποίησης.
- **Undrained Type:** Πρόκειται για υλικό το οποίο αναπτύσσει πλήρως πιέσεις πόρων του ύδατος, εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας (π.χ. άργιλοι). Σε αυτές τις συνθήκες, όλες οι ομάδες πεπερασμένων στοιχείων

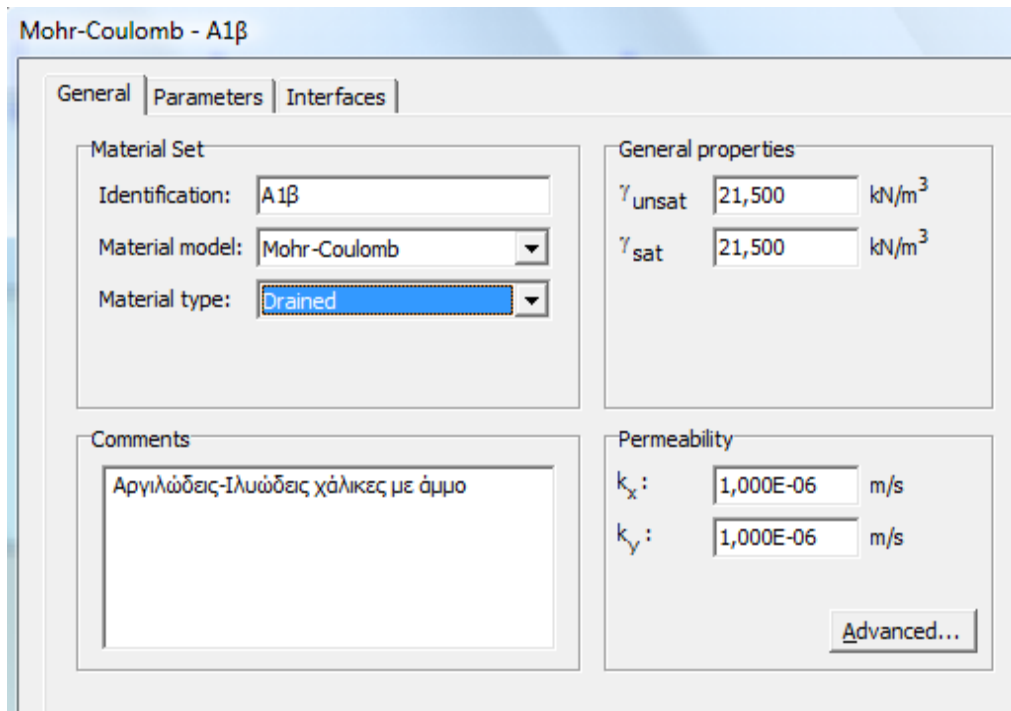
συμπεριφέρονται σύμφωνα με τις αστράγγιστες συνθήκες, ακόμα και αν κάποιες βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (Υ.Ο.). Οι παράμετροι που απαιτούνται για αυτήν την ανάλυση είναι οι “ενεργές” μεταβλητές, E' , v' , ϕ' , c' καθώς και παράμετροι που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ύδατος, όπως η φαινόμενη δυσκαμψία του, που διακρίνεται στις ολικές τάσεις, ενεργές και της πίεσης πόρων.

- Non-porous Type: Η επιλογή αυτή διαφοροποιείται από τις στραγγιζόμενες συνθήκες, καθώς δε λαμβάνονται υπόψη ούτε οι πιέσεις πόρων που υπήρχαν κατά τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Εφαρμογές τέτοιες συναντώνται στην εισαγωγή των χαρακτηριστικών των διεπιφανειών ή δομικών στοιχείων.

Επιπροσθέτως, στην παρούσα καρτέλα υπάρχουν κάποια κελιά που αναφέρονται στο κορεσμένο ειδικό βάρος (γ_{sat}) και το ακόρεστο (γ_{unsat}). Το πρώτο σχετίζεται με τα υλικά κάτω του Υ.Ο., ενώ το ακόρεστο σε αυτά που βρίσκονται άνω του φρεάτιου ορίζοντα.

Τέλος, ζητούνται οι τιμές της διαπερατότητας του υλικού, κατά την οριζόντια (k_x) και κατακόρυφη (k_y) κίνηση της ροής του νερού. Οι τιμές αυτές συνυπολογίζονται μόνο στις περιπτώσεις ανάλυσης υπό στερεοποίηση και υπόγειας ροής.

Ωστόσο, με την επιλογή *Advanced*, ο χρήστης οδηγείται σε νέο παράθυρο, όπου εισάγονται επιπρόσθετες ιδιότητες, όπως ο λόγος κενών e , οι παράμετροι απόσβεσης a, b , κ.α.



Εικόνα 4.6: Εισαγωγή δεδομένων εδαφών

Προχωρώντας στην επόμενη καρτέλα, με τίτλο Parameters, εισάγονται οι παράμετροι που σχετίζονται με την ακαμψία και τη σκληρότητα του υλικού. Με την επιλογή του καταστατικού νόμου Mohr-Coulomb, οι παράμετροι που ζητούνται να συμπληρωθούν είναι, ως προς την ακαμψία, το μέτρο ελαστικότητας E_{ref} και ο λόγος του Poisson ν . Συγκεκριμένα, ο δείκτης "ref" προσδιορίζει ότι πρόκειται για το μέτρο ελαστικότητας αναφοράς, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο βάθος, σύμφωνα με το μοντέλο Mohr-Coulomb. Με τη συμπλήρωση των παραμέτρων, αυτόματα αλλάζουν και οι εναλλακτικές (alternatives) τιμές ακριβώς από κάτω, του μέτρου διάτμησης G_{ref} και του συντελεστή E_{oed} και αντίστροφα. Οι δύο αυτοί συντελεστές συνδέονται με τους παραπάνω με τους εξής τύπους:

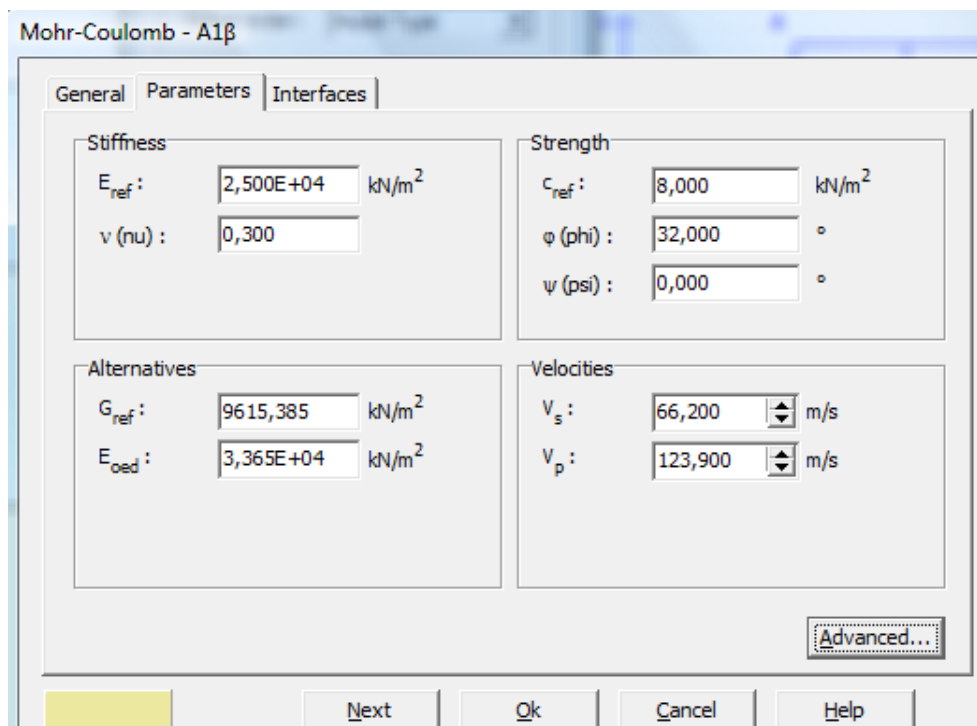
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

Ως προς την σκληρότητα του μοντέλου, ζητείται η τιμή της συνοχής c_{ref} , η οποία ακολουθεί παρόμοιο τρόπο με το μέτρο ελαστικότητας αναφοράς E_{ref} . Επίσης, η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , σε μοίρες, που καθορίζει τη διατμητική αντοχή του εδάφους, καθώς και η γωνία διογκωσιμότητας ψ , επίσης σε μοίρες. Πρόκειται για μέγεθος που εκφράζει την τάση του εδαφικού υλικού να διογκώνεται. Για τα

συνεκτικά εδάφη συνήθως μηδενίζεται. Τέλος, στο πεδίο των ταχυτήτων, Velocities, περιέχονται οι τιμές των διαμηκών (V_s) και εγκάρσιων (V_p) κυμάτων, οι οποίες λειτουργούν αυτόματα και αντίστροφα, παρόμοια με το πεδίο Alternatives. Οι τύποι που συνδέουν αυτές τις παραμέτρους δίνονται παρακάτω:

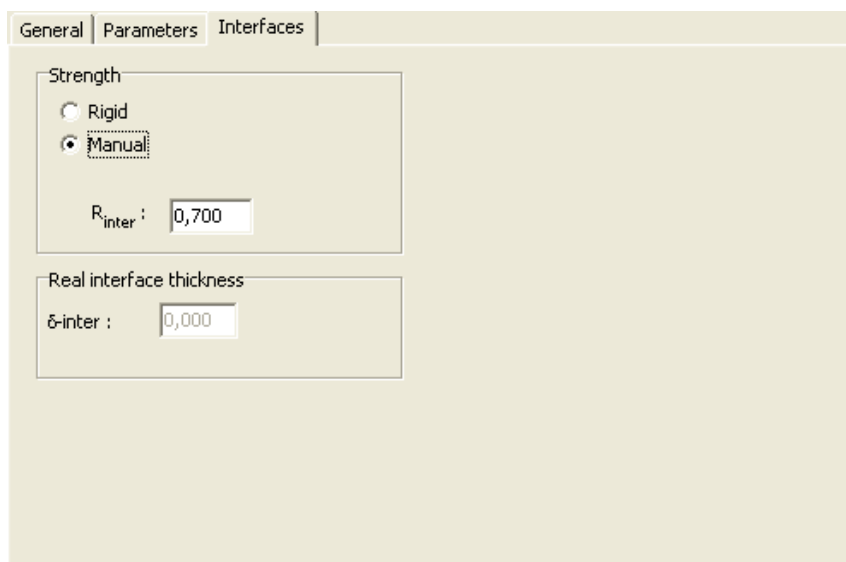
$$V_s = \sqrt{\frac{G_{ref}}{\rho}}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$$




Εικόνα 4.7: Εισαγωγή χαρακτηριστικών υλικών

Τελευταία καρτέλα του προβαλλόμενου παραθύρου αποτελεί η ονομαζόμενη Interfaces, όπου γίνεται η εισαγωγή των ιδιοτήτων των διεπιφανειών που τυχόν έχουν χρησιμοποιηθεί. Αν επιθυμείται να μην υπάρχει επιρροή της διεπιφάνειας στη δύναμη του περιβάλλοντος υλικού, επιλέγεται το Rigid, όπου ο συντελεστής R_{inter} ισούται με 1. Αντίστοιχα, όταν υφίσταται αλληλεπίδραση, επιλέγεται το Manual και η τιμή του συντελεστή R_{inter} γίνεται μικρότερη της μονάδας. Ο εν λόγω συντελεστής πολλαπλασιάζεται με τη συνοχή c και τη γωνία τριβής ϕ του γύρω εδάφους και αναλόγως προκαλεί τη μείωση ή όχι των αντίστοιχων τιμών, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους-κατασκευής.



Εικόνα 4.8: Ρυθμιστικές παράμετροι

➤ Mesh Generation

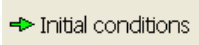
 Έπειτα από το σχεδιασμό του μοντέλου και τον ορισμό των ιδιοτήτων των υλικών που το απαρτίζουν, ακολουθεί η καναβοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων. Πρακτικά, όλες οι έγκλειστες από γραμμές περιοχές (clusters), αυτόματα υποδιαιρούνται σε τριγωνικά στοιχεία, των 15 ή 6 κόμβων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προσανατολισμένα άτακτα και τυχαία. Πατώντας στο μενού Mesh, προβάλλονται διάφορες επιλογές για τον καθορισμό του είδους καναβοποίησης που επιθυμείται:

- **Global Coarseness:** Επιλέγεται ο βαθμός πυκνώσης του κανάβου. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ 5 επιπέδων πυκνότητας, τα οποία ξεκινώντας από το αραιότερο, είναι τα εξής: Very coarse → coarse → medium → fine → very fine. Κάθε επιλογή αντιπροσωπεύει διαφορετικό μέγεθος στοιχείου και κατ' επέκταση πλήθος τριγώνων, ενώ το προεπιλεγμένο επίπεδο από το πρόγραμμα είναι το coarse.
- **Basic Element Type:** Ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον τύπο των στοιχείων που επιθυμεί, μεταξύ 15-κομβων, που είναι η προεπιλογή και 6-κομβων. Η επιλογή 15-κομβων δίνει πυκνότερη διακριτοποίηση και επομένως ακριβέστερα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα όμως, χρονοτριβεί στην υπολογιστική διαδικασία, συγκριτικά με μία ανάλυση 6-κομβων.

- **Local Coarseness:** Το Plaxis παρέχει τη δυνατότητα τοπικής διακριτοποίησης σε περιπτώσεις πιθανά εντονότερων παραμορφώσεων ή συγκέντρωσης τάσεων, όπου απαιτείται ακριβέστερη ανάλυση. Η εντολή αυτή υλοποιείται τροποποιώντας το μέγεθος του ενδιαφερόμενου στοιχείου (Local element size), διπλατώντας πάνω του και μειώνοντας ή αυξάνοντας την προεπιλεγμένη τιμή 1, σε ένα εύρος 0.05-5.0.
- **Local Refinement:** Εναλλακτικά, αντί για την τροποποίηση του μεγέθους των στοιχείων, μπορεί να επαναπροσδιοριστεί η διακριτοποίηση ομάδων στοιχείων, γραμμών και μεμονωμένων στοιχείων, με τις επιλογές Refine clusters, Refine lines, Refine around points, αντίστοιχα.

Αφού προσδιοριστούν όλα τα παραπάνω, με την εντολή Generate Mesh, αναπτύσσεται ο κানাβος και προβάλλεται μέσω του προγράμματος αποτελεσμάτων (output program). Η επιστροφή πραγματοποιείται με την επιλογή Update.

➤ Initial Conditions

 Επιλέγοντας την εντολή που απεικονίζεται, μεταβαίνουμε στον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών, οι οποίες διακρίνονται σε αρχικές υδροστατικές πιέσεις (water conditions) και αρχικές γεωστατικές τάσεις (geometry configuration mode).

Γενικά, η πίεση των πόρων του ύδατος P_{active} προκύπτει από δύο επιμέρους πιέσεις, αυτές των σταθερών πιέσεων P_{steady} και των υπερπιέσεων P_{excess} :

$$P_{active} = P_{steady} + P_{excess}$$

Η υπερπίεση των πόρων προκαλείται, είτε λόγω φόρτισης εδάφους σε αστράγγιστες συνθήκες, είτε λόγω στερεοποίησης, όπου εξαρτάται από παραμέτρους διαπερατότητας και όχι από τις συνθήκες εδάφους. Η σταθερή πίεση πόρων περιγράφει μία σταθερή κατάσταση πιέσεων, που δημιουργείται, είτε λόγω σταθερών συνθηκών (π.χ. ισορροπίας του φρεάτιου ορίζοντα) για μακροχρόνιες συνθήκες, ή λόγω φαινομένων ροής/διαρροής, πάλι σε σταθερό επίπεδο.

Όλα τα παραπάνω διαμορφώνονται στις υδροστατικές συνθήκες, είτε με δημιουργία πιέσεων στη βάση της φρεατικής επιφάνειας, ή με την έννοια υπόγειας ροής, εισάγοντας συνοριακές συνθήκες στην οροφή της υπόγειας ροής.



Στην περίπτωση όπου υπάρχει επίδραση του ύδατος, ο χρήστης καλείται να ενεργοποιήσει τη λειτουργία των υδροστατικών πιέσεων, με την επιλογή Initial Pore Pressures, όπως φαίνεται στο εικονίδιο. Αμέσως, εμφανίζεται το παράθυρο με την τιμή του ειδικού βάρους του νερού, την οποία αποδεχόμαστε, στα 9.8 kN/m^3 .



Επιλέγοντας το διπλανό εικονίδιο εισάγεται η στάθμη του Υ.Ο., με τρόπο όμοιο με αυτόν της εισαγωγής γεωμετρικών στοιχείων, ακολουθώντας τη γεωμετρία του μοντέλου. Η επιφάνεια αυτή αντιπροσωπεύει σημεία όπου η πίεση του νερού είναι μηδενική και αυξάνεται γραμμικά ανάλογα με το βάθος και το ειδικό βάρος του νερού. Εκτός από την επιλογή ενός γενικού φρεατικού επιπέδου, το Plaxis δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιήσει άλλου είδους συνθήκες, όπως, φρεατική επιφάνεια συγκεκριμένης ομάδας στοιχείων (cluster phreatic level), παρεμβολή πιέσεων πόρων από προσαρμοσμένα στοιχεία ή γραμμές (interpolation of pore pressure from adjacent clusters or lines), ξηρή/στεγνή ομάδα στοιχείων (cluster dry), καθώς και διαμορφωμένες από το χρήστη συνθήκες (user-defined pore pressure distribution).



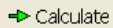
Πιέζοντας το εικονίδιο Generate water pressure, εμφανίζεται η επιλογή για τη δημιουργία των πιέσεων πόρων, είτε με γενικό φρεάτιο ορίζοντα (Phreatic level) ή με Groundwater calculation. Στην πρώτη περίπτωση, ο υπολογισμός των πιέσεων του ύδατος πραγματοποιείται από τη στάθμη που νωρίτερα είχε οριστεί, με τρόπο απλό και γρήγορο. Με τη δεύτερη περίπτωση, ο υπολογισμός γίνεται με βάση τον ορισμένο κάναβο, τη διαπερατότητα του υλικού και τις συνοριακές συνθήκες ροής, σαφώς με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και πιο χρονοβόρα. Σε αυτήν την επιλογή, απαιτούνται ρυθμιστικές παράμετροι για την επαναληπτική διαδικασία, όπως το ανεκτό σφάλμα (tolerated error), η υπερ-χαλάρωση (over-relaxation), ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maximum iteration) και η αποκοπή τάσης (tension cut-off).

Έπειτα, προχωρά στον υπολογισμό των γεωστατικών τάσεων, όπου αν το μοντέλο θεωρείται στραγγισμένο η προηγούμενη διαδικασία παραλείπεται.



Ομοίως με το αντίστοιχο εικονίδιο, ξεκινά ο προσδιορισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων, Initial stresses. Οι αρχικές τάσεις αναφέρονται μόνο στο εδαφικό σώμα και εξαρτώνται από το ειδικό βάρος του υλικού και το σχηματισμό. Επομένως, οποιαδήποτε επιπλέον στοιχεία, θα πρέπει να απενεργοποιούνται από το μοντέλο. Με την επιλογή αυτή, ουσιαστικά υπολογίζονται οι αρχικές κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις $\sigma_{v,0}$ και $\sigma_{h,0}$ αντίστοιχα, μέσω του συντελεστή πλευρικής πίεσης K_0 . Στο παράθυρο που εμφανίζεται, παρουσιάζεται ο συντελεστής ΣM_{weight} , όπου αντιπροσωπεύει την αναλογία της ασκούμενης βαρύτητας. Η προεπιλεγμένη τιμή 1.000 δείχνει πως είναι ενεργοποιημένη όλη η εδαφική μάζα του μοντέλου και επομένως την αποδεχόμαστε. Ο πίνακας που παρουσιάζεται λίγο πιο κάτω, δείχνει τις τιμές του συντελεστή για κάθε τμήμα ξεχωριστά.

❖ Calculation Program

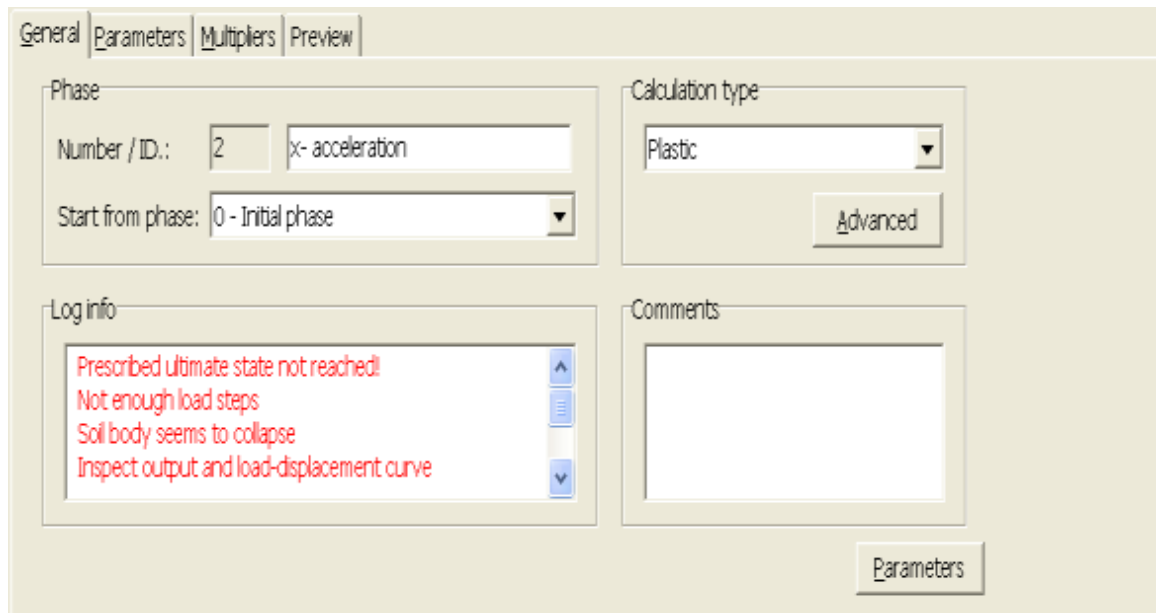


Μεταβαίνοντας στο πρόγραμμα υπολογισμού προσδιορίζονται όλες οι απαραίτητες παράμετροι που απαιτούνται για την εκκίνηση της υπολογιστικής διαδικασίας, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε στάδια. Ανοίγοντας το συγκεκριμένο παράθυρο συναντάται το πρώτο στάδιο, Initial phase, το οποίο αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση συνθηκών, που ορίστηκε στο πρόγραμμα εισαγωγής. Με την επιλογή next ή edit→next, δημιουργείται ένα νέο στάδιο υπολογισμού. Αντίστοιχα, με την επιλογή delete δύναται η διαγραφή κάποιας ήδη υπάρχουσας επιπρόσθετης φάσης. Οι τρεις καρτέλες που απαρτίζουν το παράθυρο υπολογισμού διακρίνονται στις General, Parameters και Multipliers.

➤ General

Στην παρούσα καρτέλα εισάγονται το όνομα του σταδίου προς προσαρμογή, το σημείο εκκίνησης της διαδικασίας και ο τύπος υπολογισμού που επιθυμείται. Οι διατιθέμενοι τύποι διαχωρίζονται σε Plastic Calculation, Phi-c reduction και Dynamic analysis. Παρακάτω περιγράφεται ο κάθε τύπος ξεχωριστά:

- Plastic calculation: Πρόκειται για ανάλυση ελαστικής συμπεριφοράς, που δε συνυπολογίζεται η αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων αναλογικά με το χρόνο. Στις περιορισμένες περιπτώσεις αστράγγιστης συμπεριφοράς εδαφών, η ανάλυση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες γρήγορης φόρτισης κορεσμένων αργίλων. Αντίστοιχα, σε στραγγιζόμενες συνθήκες εκτιμώνται οι μακροχρόνιες καθιζήσεις. Γενικότερα, αυτός ο τύπος εφαρμόζεται σε πιο πρακτικά γεωτεχνικά προβλήματα.
- Calculation analysis: Ο τύπος αυτός βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις που επιθυμείται να αναλυθεί η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων σε κορεσμένους τύπους αργιλικών εδαφών, σε σχέση με το χρόνο. Το Plaxis επιτρέπει την ανάλυση ελαστοπλαστικής στερεοποίησης. Επιπλέον, η ανάλυση στερεοποίησης χωρίς προσθήκη φορτίου πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση της αντίστοιχης αστράγγιστης πλαστικής στερεοποίησης, ενώ είναι εφικτή η επιβολή πρόσθετου φορτίου κατά τη διάρκεια της υπολογιστικής διαδικασίας.
- Phi-c reduction: Ένας ξεχωριστός τύπος ανάλυσης, όπου υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας, μέσω της μείωσης των παραμέτρων αντοχής, δηλαδή, γωνία τριβής ϕ και συνοχής c . Υλοποιείται έπειτα από κάθε στάδιο, επομένως δεν μπορεί να αποτελέσει ποτέ αρχική φάση κάποιου σταδίου, καθώς τερματίζεται όταν συναντήσει αστοχία.



Εικόνα 4.9: Προσδιορισμός υπολογιστικών παραμέτρων

➤ Parameters

Σε αυτήν την καρτέλα προσδιορίζονται οι παράμετροι που χρειάζονται για κάθε στάδιο επίλυσης. Τα πεδία που περιλαμβάνονται είναι τα εξής:

Additional steps: Ορίζεται ο μέγιστος αριθμός βημάτων που εκτελούνται σε συγκεκριμένη φάση. Η υπολογιστική διαδικασία ολοκληρώνεται στα βήματα που έχουν οριστεί, ειδάλλως, θα πρέπει να τροποποιηθεί η επιλογή των 250 βημάτων, μέσα σε ένα εύρος 1-1000.

Δίπλα από την επιλογή αυτή, το Plaxis δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μηδενίσει τις μετακινήσεις του προηγούμενου σταδίου, με την εντολή *Reset displacements to zero*. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η παραμόρφωση λόγω βαρύτητας, καθώς θεωρούνται ασήμαντες. Η επιλογή αυτή δεν επηρεάζει τις τάσεις που ασκούνται στο μοντέλο. Παρ' όλα αυτά, είναι απαραίτητη, για να μην προκύψουν ανακριβή αποτελέσματα, λόγω πρόσθεσης των βαρυτικών παραμορφώσεων στο τωρινό στάδιο.

Ακόμη, η εντολή *Ignore undrained behavior* αγνοεί τις αστράγγιστες συνθήκες, σε υλικά που κατά τον ορισμό τους θεωρηθήκαν αστράγγιστα. Αποτέλεσμα αυτού, η προσωρινή μετατροπή των εν λόγω υλικών σε στραγγισμένα και όποια τιμή πιέσεων πόρων είχε προκύψει νωρίτερα συγκρατείται, χωρίς όμως να προστίθενται αυτές που προκύπτουν, στο παρόν στάδιο. Αξιοσημείωτο είναι ότι στην ανάλυση στερεοποίησης

η επιλογή αυτή δεν υφίσταται, καθώς η ανάλυση αυτή δε διαχωρίζει τα υλικά σε αστράγγιστα και στραγγιζόμενα.

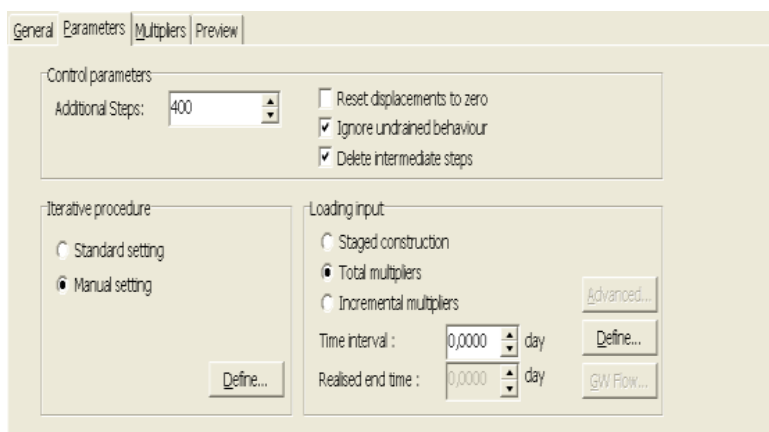
Αν ο χρήστης επιθυμεί να διατηρήσει όλες τις προκύπτουσες τιμές κάθε σταδίου, αρκεί να αποεπιλέξει την εντολή Delete intermediate steps. Παρέχεται ως προεπιλογή από το πρόγραμμα με σκοπό την εξασφάλιση περισσότερου ελεύθερου χώρου στο δίσκο, διαγράφοντας όλες τις ενδιάμεσες τιμές και αποθηκεύοντας μόνο αυτές της τελικής φάσης.

Στην εντολή Iterative Procedures εισάγονται παράμετροι που αφορούν στην επαναληπτική διαδικασία, όπως, μέγιστες επαναλήψεις, σφάλμα ή παράμετρος χαλάρωσης και δύναται η επιλογή καθορισμού τους από το χρήστη ή από το πρόγραμμα. Ανάλογα με το είδος του υπολογισμού προκύπτουν και οι ανάλογες απαιτήσεις των παραμέτρων.

Τέλος, στην περιοχή Loading Input επιλέγεται ο τρόπος φόρτισης. Ωστόσο, για κάθε τύπο υπολογισμού εμφανίζονται και οι αντίστοιχες επιλογές. Συνολικά όμως, είναι οι εξής:

- Staged construction: Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του μοντέλου, σε στάδια. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να διαμορφώνει εκ νέου το μοντέλο της κατασκευής στο τέλος κάθε φάσης, προσδιορίζοντας το φορτίο ή την κατανομή των υδροστατικών πιέσεων. Περνώντας στο Input Program, μέσω της επιλογής Define, παρόμοια με το αντίστοιχο παράθυρο των αρχικών συνθηκών (initial conditions), ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται φορτία, εδαφικά τμήματα και δομικά στοιχεία. Ως προς τις υδροστατικές πιέσεις, μπορούν να επαναπροσδιοριστούν εισάγοντας νέο φρεατικό επίπεδο.
- Total multipliers: Επιβάλλεται συνολικά το φορτίο μέσω παραμέτρων που περιγράφονται στην επόμενη καρτέλα.
- Incremental Multipliers: Ο χρήστης ορίζει την τιμή του φορτίου, εισάγοντας και πάλι τις κατάλληλες παραμέτρους, το οποίο εφαρμόζεται στα μεταγενέστερα στάδια.

Όλα τα παραπάνω εμφανίζονται για υπολογισμό πλαστικού τύπου (Plastic type). Για ανάλυση με στερεοποίηση επιβάλλεται η συμπλήρωση παραμέτρων σχετιζόμενων με το χρόνο ολοκλήρωσης του φαινομένου. Αντίστοιχα, είναι απαραίτητη η εισαγωγή του Time Incremental Parameter, αν έχει επιλεγεί το Incremental Multipliers, καθώς προσδιορίζει το εύρος του φορτίου σε σχέση με το χρόνο.



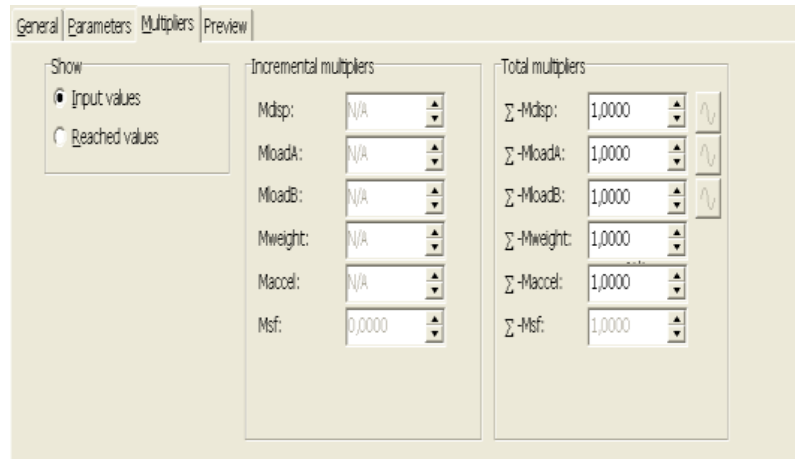
Εικόνα 4.10: Παράμετροι υπολογισμών

➤ Multipliers

Γενικά, τα φορτία υπολογίζονται από το γινόμενο της τιμής που έχει οριστεί από το χρήστη και τον πολλαπλασιαστή του. Τροποποίηση αυτών των τιμών μπορεί να επιτευχθεί από την καρτέλα Multipliers, μέσω της οποίας ορίζονται οι τιμές του κάθε πολλαπλασιαστή, διακρίνοντάς τους σε Total και Incremental, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη καρτέλα. Συμβολίζονται με ΣΜ και Μ αντίστοιχα. Συνοπτικά, οι εν λόγω συντελεστές συνοψίζονται στους M/Σ_{disp} , $M/\Sigma_{loadA/B}$, M/Σ_{weight} , M/Σ_{accel} , M/Σ_{sf} . Οι πολλαπλασιαστές αυτοί γενικότερα, εφαρμόζονται είτε σε εδαφικά, ή σε υδατικά βάρη. Στην περίπτωση μηδενισμού των, μηδενίζονται και τα αντίστοιχα βάρη. Αντίθετα, για τιμή 1 τα εδαφικά και υδατικά βάρη ενεργοποιούνται και εφαρμόζονται. Κατά την αρχή της ανάλυσης, η προεπιλογή του Plaxis είναι στη μονάδα, λόγω του πιθανού υπολογισμού των αρχικών συνθηκών με το συντελεστή K_0 . Οι παραπάνω πολλαπλασιαστές εμφανίζονται για την επιλογή "εισαχθείσες τιμές". Αν ο χρήστης επιθυμεί την επιλογή "Reached values", προβάλλονται νέες παράμετροι που σχετίζονται με το στάδιο κατασκευής, το συνολικό όγκο, τις δυνάμεις για μη μηδενικές μετατοπίσεις και τις απόλυτες πιέσεις πόρων για αστράγγιστες συνθήκες.

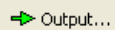


Τελευταίο βήμα πριν την εκκίνηση των υπολογισμών, είναι η επιλογή σημείων κατάλληλων για τη δημιουργία καμπυλών μετατόπισης ή τάσεων, μέσω του εικονιδίου Select points for curves. Ο μέγιστος αριθμός σημείων που μπορούν να επιλεγθούν είναι 10 και βέλτιστες θέσεις αυτές, που αναμένονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις της εδαφικής μάζας.



Εικόνα 4.11: Προσδιορισμός συντελεστών

❖ Output Program



Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται από το πρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων, μελετώντας μετατοπίσεις, τάσεις, αλλά και όποιο άλλο μέγεθος επιθυμείται. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ πολλαπλών ειδών και μορφών αποτελεσμάτων, από το μενού Deformation ή Stresses, αναλόγως. Παρακάτω περιγράφονται οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες εξ αυτών.

- Ολικές, οριζόντιες, κατακόρυφες μετακινήσεις (total, horizontal, vertical displacements): Πρόκειται για τις μετακινήσεις σε όλους τους κόμβους, έπειτα από κάθε υπολογιστικό στάδιο, κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, U_x , U_y αντίστοιχα. Η σύνθεση των δύο αυτών συνιστωσών δημιουργεί τις ολικές μετακινήσεις $|U|$, οι οποίες μπορούν να παρουσιαστούν με τη μορφή βελών, περιγράμματος ή σκίασης.

- Ολικές τροπές (total strains): Παρουσιάζουν τις τροπές στα σημεία τάσεων, στο τέλος κάθε βήματος. Διακρίνονται σε κύριες, οι οποίες προβάλλονται ως σταυροί, διατμητικές και ογκομετρικές. Οι τελευταίες δύο αποτυπώνονται με τη μορφή περιγράμματος ή σκίασης.
- Ολικές τάσεις (total stresses): Το άθροισμα των ενεργών τάσεων και της πίεσης πόρων, στο τέλος κάθε υπολογιστικού βήματος. Διακρίνονται σε κύριες, που απεικονίζονται επίσης ως σταυροί, μέσες και αποκλίνουσες, ως περιγράμματα ή σκίαση.
- Ενεργές τάσεις (Effective stresses): Ομοίως, χωρίζονται σε κύριες, μέσες και σχετικές διατμητικές (τ_{ref}). Η απεικόνισή τους γίνεται με τον ίδιο τρόπο με τα παραπάνω. Πρακτικά, η επιλογή σχετικής διατμητικής τάσης δίνει μια εκτίμηση της προσέγγισης της τάσης αστοχίας.

$$\tau_{ref} = \frac{\tau}{\tau_{max}}$$

όπου, τ_{max} : η τάση αστοχίας

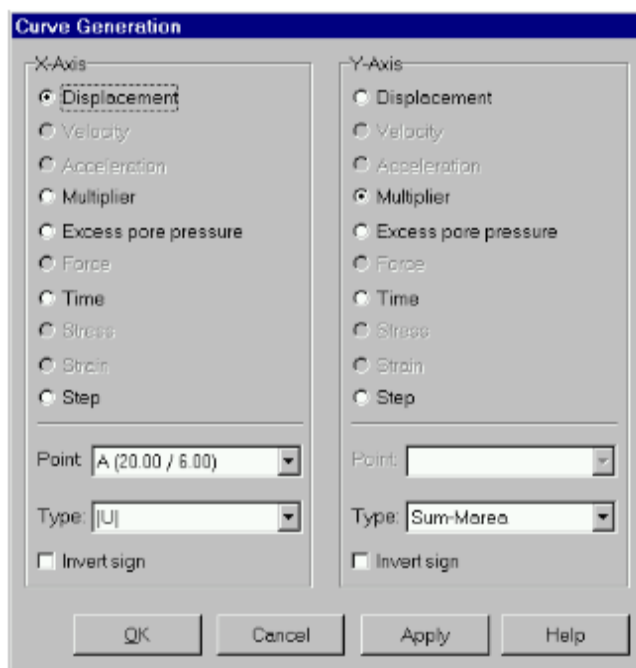
- Πιέσεις πόρων: Δείχνει τις πιέσεις του ύδατος κατά την επιβολή φορτίου και προβάλλονται όπως οι κύριες τάσεις, με τη μορφή δηλαδή σταυρών, χωρίς όμως κύρια κατεύθυνση. Η διεύθυνσή τους ταυτίζεται με τους άξονες x ή y και είναι πάντα αρνητικές.

Για όλα τα παραπάνω, αλλά και για αρκετά ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα προβολής και σε μορφή πινάκων, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ζητούμενου μεγέθους για κάθε στοιχείο. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να παρατηρήσει το προφίλ κάποιου μεγέθους κατά μήκος συγκεκριμένης οριζόντιας ή κατακόρυφης τομής, με την επιλογή Cross-section. Τέλος, μία σημαντική λειτουργία είναι αυτή της επιλογής View Material info, όπου παρουσιάζονται όλες οι ιδιότητες των υλικών, καθώς και οι παράμετροι που έχουν οριστεί για το μοντέλο που υπολογίστηκε.

❖ Curves Program

Το πρόγραμμα αυτό περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες για την ανάπτυξη καμπυλών φορτίου-μετατόπισης, τάσεων-τροπών, καθώς και συντελεστών ασφαλείας. Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων εμφανίζεται ένα παράθυρο, αναφερόμενο στους δύο άξονες x,y και στα διαθέσιμα μεγέθη προς σχεδίαση. Με την επιλογή του μεγέθους που επιθυμείται να αντιπροσωπεύει ο κάθε άξονας αναπτύσσεται το αντίστοιχο διάγραμμα.

- Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (Load-displacement curves): Η συγκεκριμένη καμπύλη απεικονίζει την εξέλιξη των μετακινήσεων ενός συγκεκριμένου σημείου, το οποίο ορίζεται στο ανάλογο κελί (Point), σε σχέση με το φορτίο που δρα σε κάθε στάδιο. Συνήθως, ο άξονας x αντιπροσωπεύει τις μετακινήσεις και ο άξονας y, το φορτίο. Για τις μετακινήσεις δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ ολικών, οριζόντιων και κατακόρυφων. Αντίστοιχα, όμοιες καμπύλες μπορούν να διαμορφωθούν, σχετίζοντας τις μετακινήσεις με το χρόνο, την πίεση των πόρων ή τα βήματα υπολογισμού.



Εικόνα 4.12: Επιλογές καμπυλών

- Διάγραμμα τάσεων-τροπών (stress-strain diagram): Στην πραγματικότητα, αυτού του είδους τα διαγράμματα απεικονίζουν την ιδανική συμπεριφορά του εδάφους, σύμφωνα με το μοντέλο που έχει επιλεγεί. Οι διαθέσιμες τάσεις για συμμετοχή στα διαγράμματα είναι αυτές των ενεργών οριζόντιων και κατακόρυφων, διατμητικών, μέγιστων-μέσων-ελαχίστων κυρίων τάσεων, ισοτροπικών, αποκλίνοσων και πιέσεων πόρων. Αντίστοιχα, ως προς τις τροπές, περιλαμβάνονται οι οριζόντιες και κάθετες τροπές, διατμητικές, μέγιστες-μέσες-ελάχιστες κύριες τροπές, ογκομετρικές και αποκλίνοσες.

Επιπλέον επιλογές που παρέχονται είναι η απεικόνιση περισσότερων της μιας, καμπυλών, με μέγιστο πλήθος τις 10, με σκοπό την άμεση σύγκριση των επιθυμητών μεγεθών, μεταξύ διαφορετικών σημείων της γεωμετρίας. Η εντολή αυτή πραγματοποιείται πατώντας Add curve. Χρήσιμη κρίνεται επίσης η δυνατότητα ανανέωσης των καμπυλών σε περιπτώσεις νέων υπολογισμών, με σκοπό την ενημέρωση του διαγράμματος και την προσαρμογή του στις νέες τιμές.

Μέσω του μενού Curve settings, μπορούν να καθοριστούν χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων, πιο εξειδικευμένα. Τέτοια χαρακτηριστικά αποτελούν η επιλογή του σταδίου, βάσει του οποίου θα διαμορφωθεί το διάγραμμα. Αντίστοιχα, από το μενού Frame settings μπορούν να προσδιοριστούν τα είδη των αξόνων, οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των, η εναλλαγή τους, καθώς και άλλες λεπτομερέστερες λειτουργίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

5.1 Εισαγωγή

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν πραγματοποιήθηκαν λεπτομερείς αναλύσεις τόσο για το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, όσο και για το πρόβλημα που καλείται η παρούσα διπλωματική εργασία να διαχειριστεί. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε περιληπτικά και μη, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο καλείται να επιλύσει το πρόβλημα κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων, εξαιτίας της παρουσίας του δοκιμαστικού επιχώματος. Περιγράφηκε αναλυτικά η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων, ο τρόπος υπολογισμού του εκάστοτε μοντέλου προσομοίωσης, η αποτύπωση των αποτελεσμάτων, καθώς και η δυνατότητα εξαγωγής καμπυλών αναφερόμενων στα προκύπτοντα αποτελέσματα. Το θεωρητικό συμπέρασμα το οποίο προέκυψε από τη γνωριμία με το πρόγραμμα συνοψίζεται στο γεγονός ότι, το πρόγραμμα Plaxis είναι ικανό και αξιόπιστο να προσομοιώσει, να μοντελοποιήσει, να υπολογίσει και εν τέλει να επιλύσει προβλήματα απλής γεωμετρίας σε δύο διαστάσεις, με την κατάλληλη διαμόρφωση της γεωμετρίας και την εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων. Στο κεφάλαιο που προηγείται της παρουσίασης του προγράμματος, έγινε σαφής απεικόνιση των δεδομένων του πραγματικού προβλήματος στην Ελβετία, το οποίο όπως αναφέρθηκε, επιλύθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά του δοκιμαστικού επιχώματος, τόσο τα γεωμετρικά, όσο και τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού πλήρωσής του. Επίσης, έγινε περιγραφή των γεωτεχνικών, γεωλογικών, φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους πάνω στο οποίο εδράζεται, καθώς και των υπεδαφικών σχηματισμών, κατά στρώματα. Πέραν της υπολογιστικής μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου, καθώς και εργαστηριακές, οι οποίες απέδωσαν με τη σειρά τους τις δικές τους τιμές αποτελεσμάτων. Κατά το μεγαλύτερο μέρος υπήρξε σύμπτωση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων επίλυσης, ενώ οι λόγοι απόκλισης αποδίδονται σε διάφορους λόγους που σχετίζονται, είτε με την έλλειψη δεδομένων, ή με την

αναγκαστική υιοθέτηση κάποιων παραδοχών, που φάνηκαν υπεύθυνες για υπερτίμηση ή υποτίμηση της κατάστασης. Παρ' όλα αυτά, το γενικότερο συμπέρασμα προσανατολίζεται στην αξιοπιστία του προγράμματος και στη δυνατότητά του, με την κατάλληλη μοντελοποίηση, να επιλύει προβλήματα τέτοιου τύπου, ακόμα κι αν αποτελεί μόνο ένα μέρος από τη γενική μελέτη του προβλήματος.

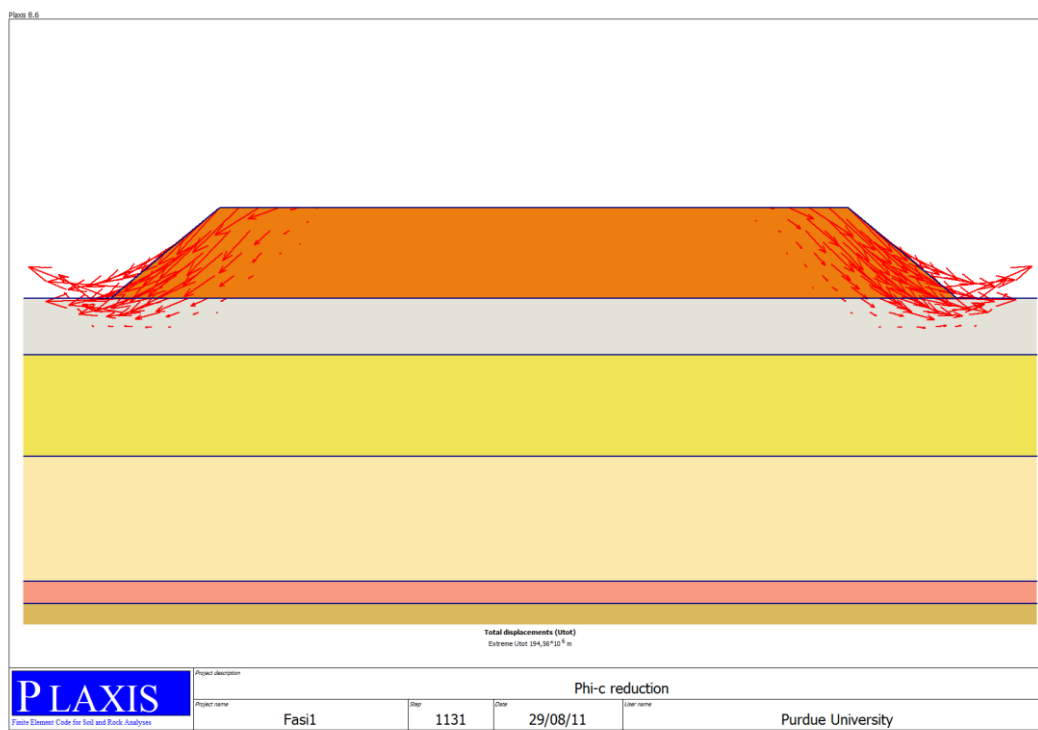
Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η πρακτική απόδειξη της ικανότητας του προγράμματος Plaxis να μοντελοποιήσει και να επιλύσει εν τέλει, το πρόβλημα του δοκιμαστικού επιχώματος. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία, ακολουθεί ουσιαστικά μία προσαρμογή των δεδομένων του προβλήματος που επίκειται, στο πρόγραμμα Plaxis. Η παρούσα διπλωματική εργασία, καλείται να μοντελοποιήσει το εν λόγω δοκιμαστικό επίχωμα, σε συγκεκριμένη γεωμετρία, καθορισμένες παραμέτρους φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών, κατάλληλων μοντέλων ανάλυσης και προσομοίωσης, καθώς και αρχικών και οριακών συνθηκών. Με την ολοκλήρωση αυτής της ανάλυσης, στοχεύει άμεσα στη συλλογή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων μετά το πέρας της υπολογιστικής διαδικασίας και έμμεσα, στην απόδειξη της αξιοπιστίας του προγράμματος, μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τα πραγματικά, τα οποία έχουν από καιρό κριθεί αποδεκτά. Παρακάτω επομένως, περιγράφονται ολοκληρωμένα, όλα τα ήδη γνωστά από θεωρητική πλευρά, βήματα επίλυσης με το πρόγραμμα Plaxis, προσανατολισμένα όμως στα πραγματικά δεδομένα. Ξεκινώντας από την εισαγωγή δεδομένων, το σχεδιασμό του μοντέλου και τον καθορισμό των τύπων υπολογισμού, ακολουθεί η περιγραφή της υπολογιστικής διαδικασίας και τέλος, παραθέτονται οι προκύπτουσες τιμές αποτελεσμάτων και τα τελικά συμπεράσματα.

5.2 Προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας

Στο πλαίσιο της απόλυτης δυνατής αξιοπιστίας του προγράμματος, αλλά και του συγκεκριμένου προβλήματος που τίθεται προς επίλυση, πραγματοποιείται ανάλυση, με τη χρήση του ίδιου προγράμματος, με σκοπό τη διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης. Σύμφωνα με τις μηχανικές παραμέτρους που δίνονται για το επίχωμα, σε συνδυασμό με τη φύση των εδαφών που βρίσκονται ως έδαφος θεμελίωσης, δηλαδή των οργανικών, η κατασκευή του δοκιμαστικού επιχώματος σε μικρό χρονικό διάστημα, υπό αστράγγιστες συνθήκες, θα οδηγούσε

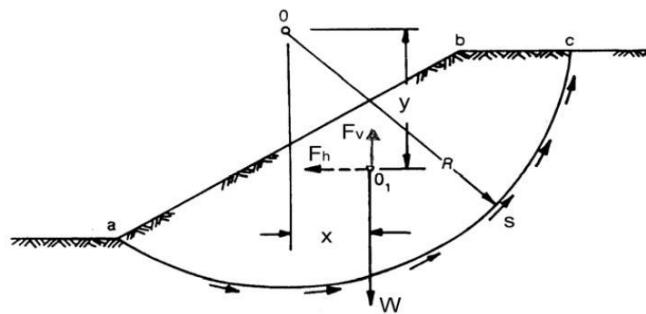
σαφώς, σε κατάρρευσή του. Για το λόγο αυτό, οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Plaxis, προσαρμόστηκαν σε στραγγιζόμενες (drained) συνθήκες. Πρακτικά, η επιλογή αυτή προσομοιάζει τις μακροχρόνιες συνθήκες, σύμφωνα με τις οποίες, η κατασκευή του επιχώματος έγινε με τέτοιο ρυθμό, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα στο έδαφος, να ολοκληρώσει την αποτόνωση των πιέσεων των πόρων, με σκοπό την ασφαλή παραλαβή του φορτίου του επιχώματος.

Έπειτα από την επιλογή του τύπου ανάλυσης phi-c reduction, προκύπτουν αποτελέσματα ως προς τη φέρουσα ικανότητα, της τάξης του 1.8. στην πραγματικότητα, η τιμή που υπολογίζεται δεν είναι απόλυτα ο συντελεστής ασφαλείας, καθώς χρειάζονται περαιτέρω υπολογισμοί, μέσω μαθηματικών τύπων, που συνδέουν τα μεγέθη της φέρουσας ικανότητας με το συντελεστή ασφαλείας. Παρ' όλα αυτά, η δυνατότητα αυτή του προγράμματος, δίνει τιμές οι οποίες μπορούν να συγκριθούν με τον πραγματικό συντελεστή ασφαλείας. Παρακάτω, επομένως, παρουσιάζεται η εικόνα που προέκυψε από τους εν λόγω υπολογισμούς.

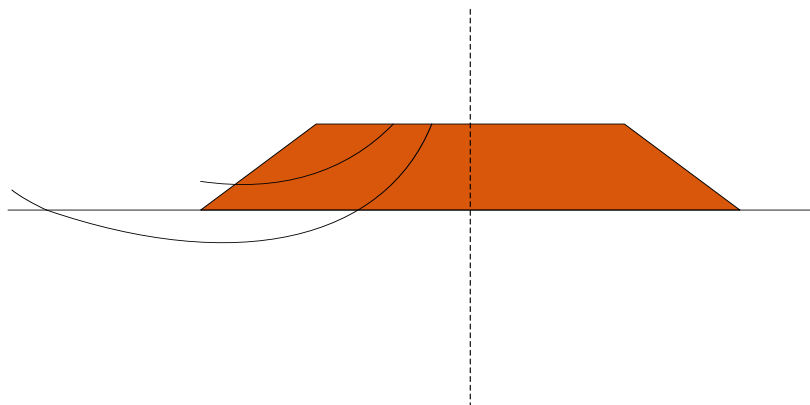


Εικόνα 5.1: Φέρουσα ικανότητα

Παρατηρώντας την εικόνα που αποτυπώνει το πρόγραμμα, διαφαίνονται διάφοροι τύποι αστοχιών, σύμφωνα με τους κύκλους αστοχίας που δίνονται. Η πιθανή αστοχία που εμφανίζεται μόνο στο σώμα του επιχώματος, είναι ένας τύπος που πρακτικά δεν επηρεάζει και δεν αφορά το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής, αλλά και γενικότερα. Πρόκειται για έναν τυπικό κύκλο αστοχίας, μόνο στα πρηνή του επιχώματος, όπου τέτοιου είδους αστοχίες αντιμετωπίζονται από τις προδιαγραφόμενες για κάθε επίχωμα παραμέτρους. Αντίθετα, οι κύκλοι, τύπου φέρουσας ικανότητας, που φαίνονται να εισέρχονται στο έδαφος θεμελίωσης, δηλαδή μεταξύ της διεπιφάνειας επιχώματος-εδάφους θεμελίωσης, είναι αυτοί που κρίνονται σημαντικοί και υπό μελέτη. Παρ' όλα αυτά, ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε από του υπολογισμούς, κρίνεται ικανοποιητικός. Οι κύκλοι, αλλά και ο μηχανισμός των δύο διαφορετικών τύπων αστοχίας που προαναφέρθηκαν φαίνεται πιο ευδιάκριτα στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 5.2: Μηχανισμός αστοχίας



Εικόνα 5.3: Κύκλοι αστοχίας

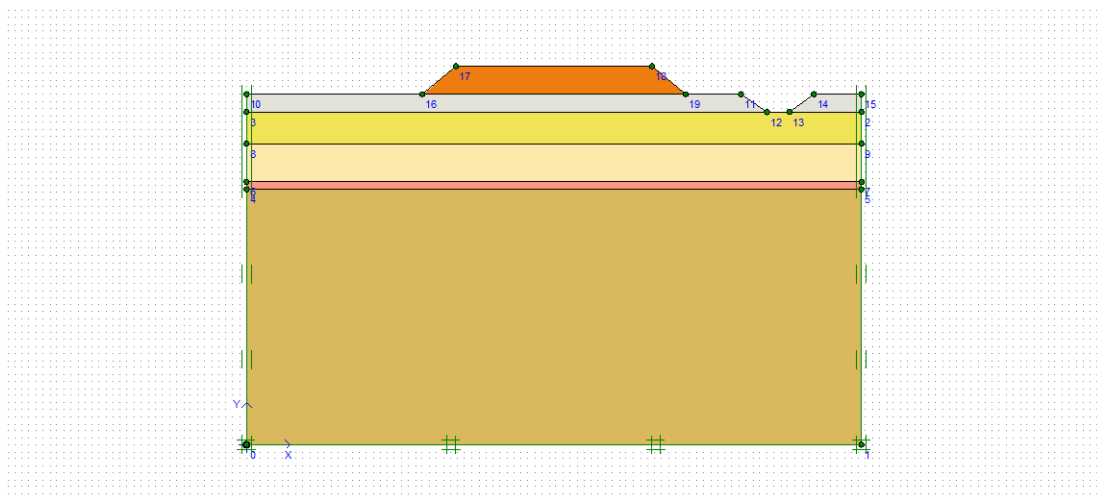
5.3 Εισαγωγή δεδομένων

Ξεκινώντας λοιπόν τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, συναντάται το πρώτο βήμα, το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η εισαγωγή δεδομένων. Στο πεδίο αυτό εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, τα εδαφικά υλικά που απαρτίζουν τις υφιστάμενες συνθήκες, καθώς και οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

Ο τύπος μοντέλου που επιλέγεται να επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι αυτός της επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Στην επιλογή αυτή οδήγησαν οι γεωμετρικές συνθήκες του επιχώματος, καθώς πρόκειται για ομοιόμορφη κατανομή τάσεων και φορτίσεων. Επίσης, λόγω της απλότητας του προβλήματος, δηλαδή, απλή γεωμετρία, μικρό μέγεθος και απλοί παράμετροι, επιλέχθηκε κάναβος 15 κόμβων. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ακριβέστερα αποτελέσματα, χωρίς όμως να επιβαρύνεται ιδιαίτερα το πρόγραμμα, τόσο σε βαθμό δυσκολίας, όσο και σε χρόνο εκτέλεσης.

Σχεδιασμός γεωμετρίας

Προχωρώντας, εισάγονται τα όρια της γεωμετρίας του επιχώματος, τα οποία συγκεκριμένα αναφέρονται σε 87.4m μήκος και 50m ύψος, χωρίς το επίχωμα. Με την προσθήκη του επιχώματος, που όπως αναφέρθηκε έχει ύψος 4m, το συνολικό ύψος φθάνει τα 54m. Η επιλογή του ύψους ήταν καθορισμένη από τα δεδομένα του προβλήματος. Ως προς το μήκος της γεωμετρίας, προηγήθηκε διερεύνηση διάφορων τιμών, με σκοπό να βρεθεί η κατάλληλη. Κατάλληλο όριο θεωρείται εκείνο το οποίο παρέχει τον απαραίτητο χρόνο, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι επαρκείς επαναλήψεις των υπολογισμών και να ολοκληρωθεί η αποτόνωση των επικρατουσών τάσεων, ώστε τα αποτελέσματα που θα παρθούν να είναι αξιόπιστα. Ο σχεδιασμός του επιχώματος πραγματοποιήθηκε με την εντολή Geometry Line, προχωρώντας από σημείο σε σημείο και διαχωρίζοντας τα εδαφικά στρώματα, ώστε να ολοκληρωθεί η μορφή που φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.4: Γεωμετρία του μοντέλου

Απαραίτητη ρύθμιση μετά το σχεδιασμό του επιχώματος, είναι η θέσπιση των συνοριακών συνθηκών. Με την επιλογή Standard Fixities που διαλέχθηκε, τίθεται ο περιορισμός οποιασδήποτε μετακίνησης, τόσο στα κατακόρυφα σύνορα του μοντέλου ($U_y=0$) όσο και στο κατώτερο οριζόντιο όριο ως προς την κατακόρυφη κύλιση ($U_x=0$). Προφανώς, σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του βρόγχου επιτρέπονται κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις, καθώς αυτό είναι και το θέμα της μελέτης.

Προσδιορισμός παραμέτρων

Επόμενη κίνηση που ακολουθεί, είναι ο προσδιορισμός όλων των απαραίτητων για την υπολογιστική διαδικασία παραμέτρων, φυσικών και μηχανικών, που αναφέρονται σε κάθε εδαφικό σχηματισμό που συμμετέχει στο σύνολο του μοντέλου. Ο εδαφικός σχηματισμός με τον οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία, απαρτίζεται κυρίως από αμμώδη και αργιλώδη υλικά. Συγκεκριμένα, τα πρώτα δύο στρώματα αποτελούνται από οργανική ιλύ με προσμίξεις τύρφης και οργανική ιλύ με προσμίξεις ανθρακικών, σε πάχος 2.5m και 4.5m, αντίστοιχα. Τα στρώματα αυτά διαδέχονται 4.5m ιλυώδους άμμου, ενώ ακολουθεί 1m αργιλώδους ιλύος. Τέλος, η στρωματογραφία τελειώνει με 36.5m καλώς διαβαθμισμένη ιλυώδη άμμο, μέχρι να βρει βραχώδη σχηματισμό. Στη μοντελοποίηση του επιχώματος αυτού δε συμμετέχουν καθόλου δομικά υλικά, παρά μόνο εδαφικά. Δεν υπάρχει δηλαδή παρουσία πλακών, γεωπλεγμάτων ή αγκυρίων. Στο σημείο αυτό επιλέγεται ο τύπος του μοντέλου προσομοίωσης καθώς και ο τύπος των υλικών, ως προς τις συνθήκες πιέσεων πόρων.

Για την αποφυγή παραδοχών, λόγω έλλειψης σημαντικών παραμέτρων, η επιλογή του τύπου προσομοίωσης είναι αυτή του μοντέλου Mohr-Coulomb. Τα δεδομένα που

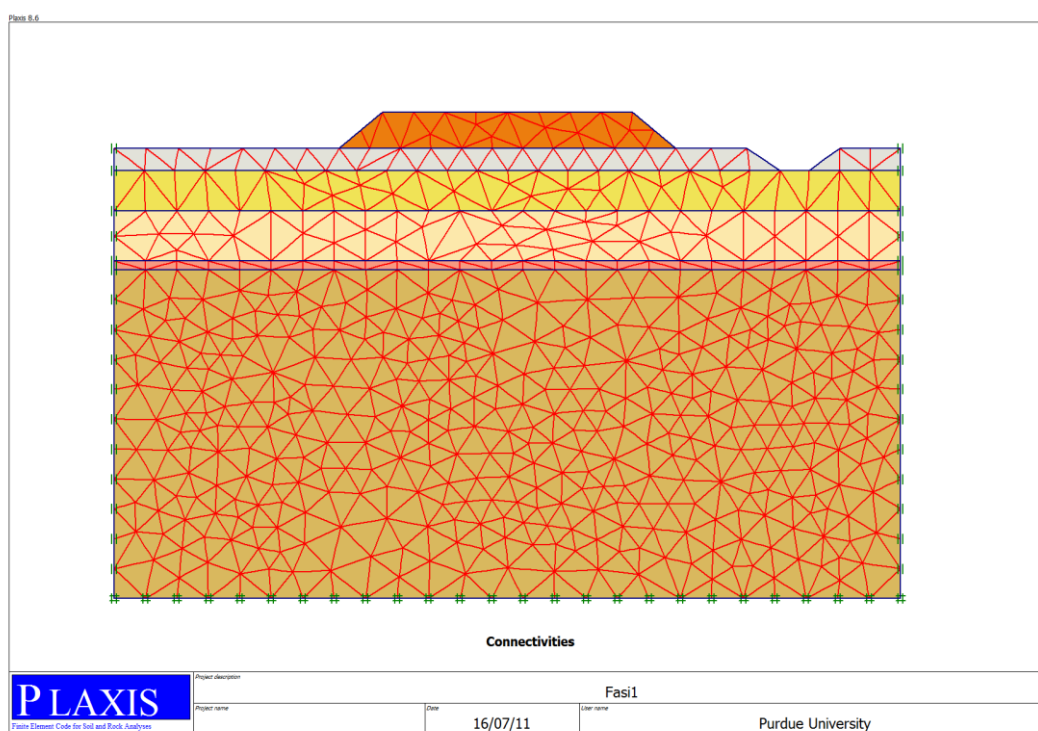
δίνονται περί γωνίας τριβής ϕ , συνοχής c , μέτρου ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν , οδηγούν στην εφαρμογή αυτού του τύπου μοντέλου, καθώς πρόκειται για γενικευμένη προσέγγιση εδαφικής συμπεριφοράς. Ως προς τις συνθήκες των πιέσεων πόρων του ύδατος, κατάλληλη επιλογή διαφαίνεται αυτή της στραγγιζόμενης συμπεριφοράς. Πρόκειται για ένα τύπο που εφαρμόζεται για υλικά με υψηλά χαρακτηριστικά διαπερατότητας και κυρίως σε ξηρά εδάφη, γεγονός που απέχει από τα χαρακτηριστικά των ενδιαφερόμενων σχηματισμών. Προτιμότερος τύπος θα μπορούσε να κριθεί αυτός της στερεοποίησης, καθώς τα εδαφικά υλικά αποτελούνται από μεγάλο μέρος αργιλικών. Παρ' όλα αυτά, η επιλογή στραγγιζόμενων συνθηκών παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού μετακινήσεων σε μακροχρόνια συμπεριφορά, δίνοντας αποτελέσματα μόνο για τις τελικές μετακινήσεις. Λόγω έλλειψης δεδομένων, αλλά και διάθεσης δεδομένων περί μετακινήσεων μόνο στο χρόνο 14 μηνών, δηλαδή σε βάθος χρόνου, ευνοεί τη συγκεκριμένη επιλογή και την καθιστά εξίσου αξιόπιστη. Οι περαιτέρω παράμετροι που καλούνται να συμπληρωθούν ως προς τα χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών, παραθέτονται παρακάτω σε ανάλογο πίνακα για κάθε στρώμα.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά σχηματισμών

Βάθος [m]	Εδάφη	γ [kN/m ³]	w [%]	c' [kPa]	ϕ' [°]	E [kPa]	ν	ψ [°]
0.00 2.50	Οργανική ιλύς με τύρφη	14.6	95	6	27	E_{oed} 1000	0.25	0
7.00	Οργανική ιλύς με ανθρακικά	16.7	67	15	20	E_{oed} 1200	0.25	0
12.50	Ιλυώδης άμμος	20.3	19	0	32	11500	0.30	2
13.50	Αργιλώδης ιλύς	20.5	25	0	29	5000	0.25	0
50.00	Καλώς διαβ/νη άμμος	21.4	21	0	31	9000	0.30	1
54.00	Επίχωμα	22		0	35	50000	0.35	5

Διαμόρφωση κανάβου

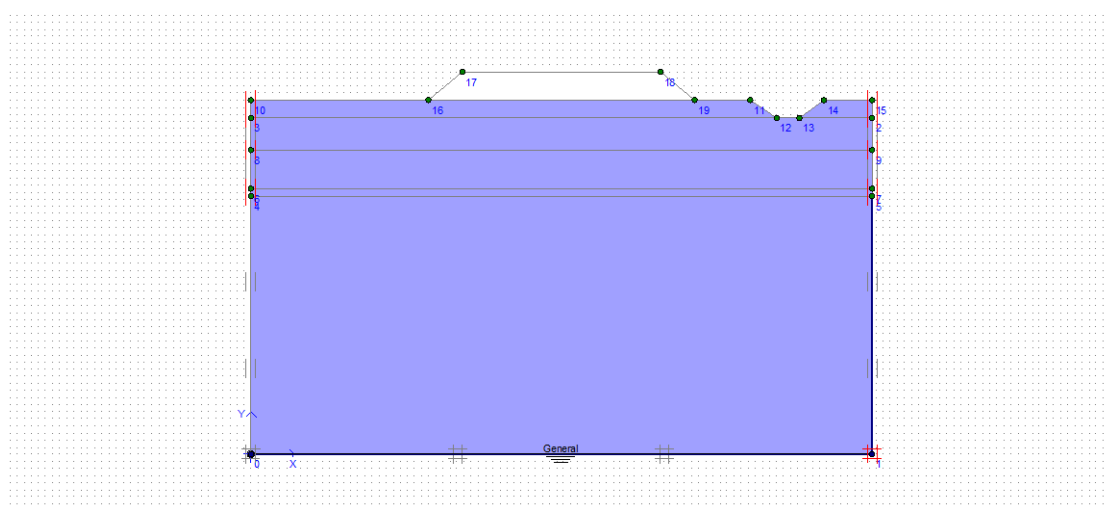
Μετά το πέρας εισαγωγής των ιδιοτήτων των υλικών, σειρά έχει ο ορισμός της καναβοποίησης που επιθυμείται να πραγματοποιηθεί. Σύμφωνα και με προηγούμενο κεφάλαιο, ανάλογα με το είδος του προβλήματος που αναλύεται, επιλέγεται και η κατάλληλη καναβοποίηση, σχετικά με το βαθμό πύκνωσης του βρόγχου. Σαφώς, το πόσο πυκνά θα διακριτοποιηθεί ο κánaβος επηρεάζει άμεσα το χρόνο εκτέλεσης υπολογισμών και γενικότερα το βαθμό δυσκολίας που τίθεται στο πρόγραμμα. Δεδομένου του απλού, γενικά, προβλήματος της εν λόγω εργασίας, της μη απαιτητικής γεωμετρίας και των σχετικά εύκολων τύπων προσομοίωσης και συμπεριφοράς εδαφών, αξιολογείται εφικτή η επιλογή της “καλής καναβοποίησης”, (fine coarseness). Με την επιλογή αυτή αναπτύσσεται ο κánaβος και εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 5.5: Καναβοποίηση

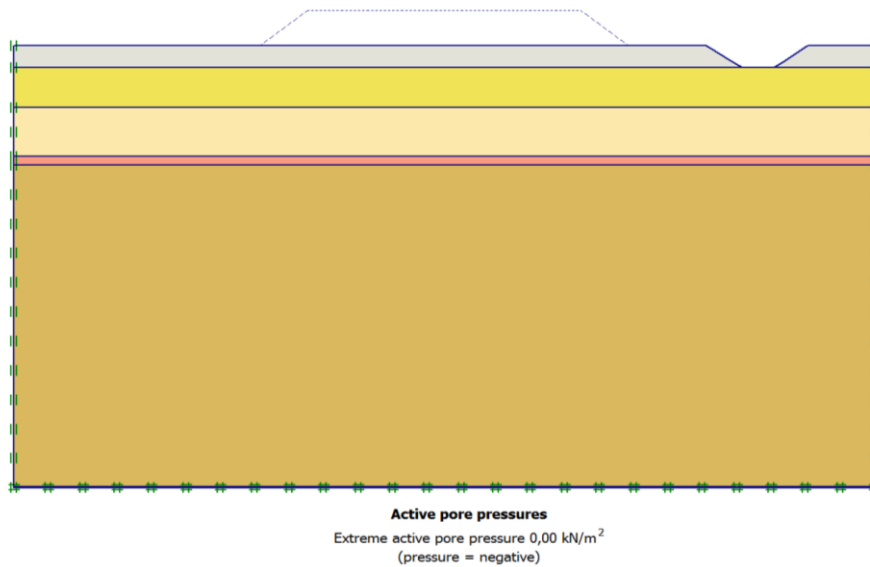
Καθορισμός αρχικών συνθηκών

Αφού έχουν οριστεί όλες οι παράμετροι των εδαφικών υλικών και έχει υλοποιηθεί η ανάπτυξη του κανάβου, ακολουθεί το στάδιο προσδιορισμού των αρχικών συνθηκών, όσον αφορά τις αρχικές υδροστατικές και γεωστατικές τάσεις. Ως προς το πρώτο βήμα, επιλέγεται γενικός φρεάτιος ορίζοντας, με αποδεχόμενη την προεπιλεγμένη τιμή ειδικού βάρους του νερού.



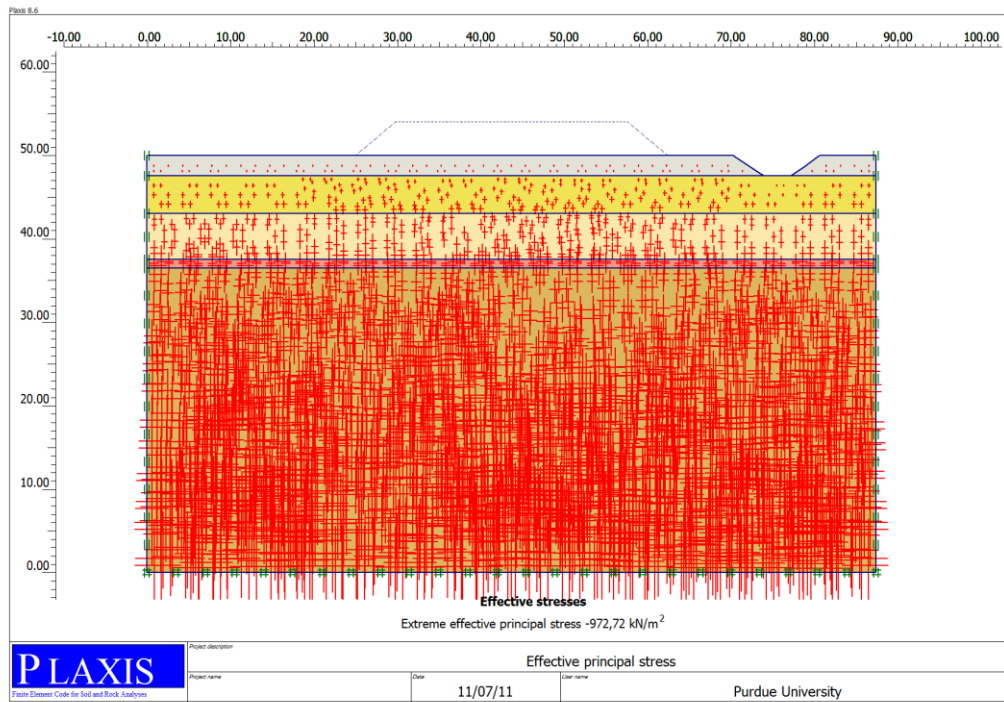
Εικόνα 5.6: Φρεάτιος ορίζοντας

Το γεγονός ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα μελετάται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, καθιστά εύλογη την μη ανάπτυξη πιέσεων πόρων του ύδατος. Πρόκειται για γενικό φρεάτιο ορίζοντα, με στάθμη στα 50.00m, δηλαδή κάτω από τα μελετώμενα στρώματα, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται καμία υπερπίεση πόρων από τη στράγγιση του νερού διαμέσου των εδαφικών υλικών. Η εικόνα αυτή πιστοποιείται με την επιλογή της εντολής ανάπτυξης των πιέσεων πόρων, η οποία φανερώνει αποτελέσματα μηδενικών πιέσεων πόρων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 5.7: Πιέσεις πόρων

Η προηγούμενη διαδικασία είναι δυνατόν να παραλειφθεί, δεδομένου των στραγγιζόμενων συνθηκών συμπεριφοράς και να συνεχιστεί ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών μόνο με την ανάπτυξη των γεωστατικών τάσεων. Οι αρχικές τάσεις αναφέρονται μόνο στο εδαφικό σκελετό και υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις εδαφικές παραμέτρους που έχουν οριστεί σε προγενέστερο στάδιο. Απαραίτητη επομένως είναι η απενεργοποίηση του τμήματος της γεωμετρίας που απεικονίζει το δοκιμαστικό επίχωμα. Με την αποδοχή και πάλι της προεπιλεγμένης τιμής για την βαρύτητα, υπολογίζονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, μέσω του συντελεστή πλευρικής πίεσης, που έχει επίσης οριστεί νωρίτερα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, δίνουν τιμές της τάξης των 972.72 kN/m^2 , οι οποίες είναι εμφανείς και στην εικόνα που παρουσιάζεται αμέσως:



Εικόνα 5.8: Γεωστατικές τάσεις

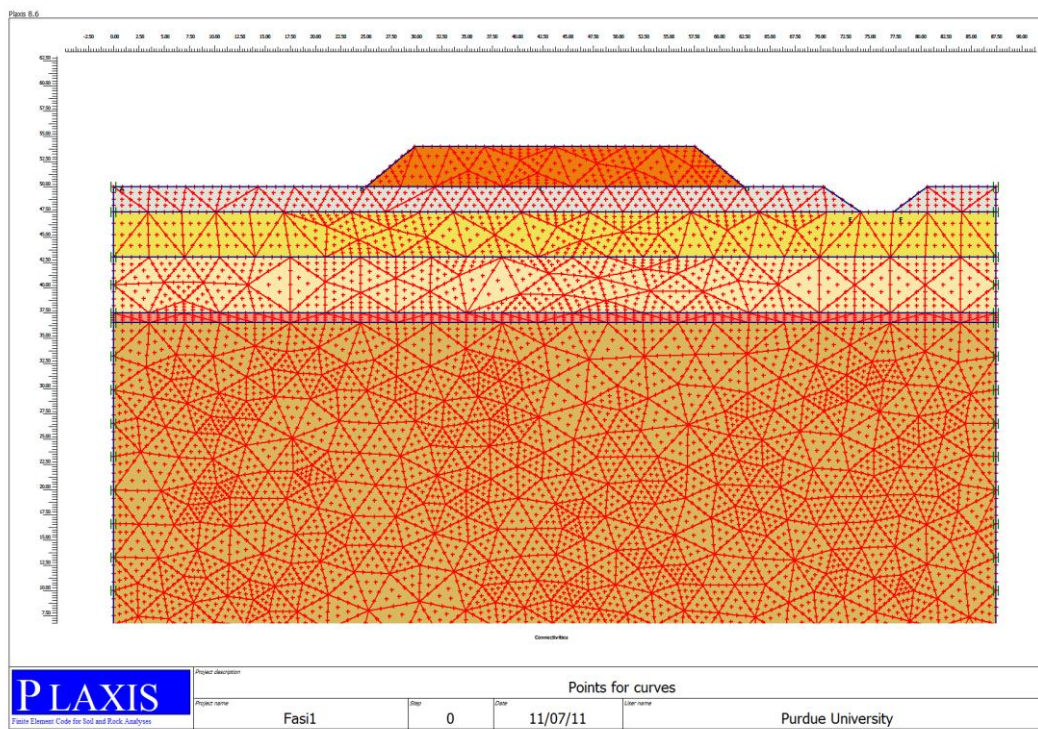
5.4 Υπολογιστική Διαδικασία

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων και αυτόματα ξεκινά η επόμενη, αυτή των υπολογισμών του μοντέλου, σαφώς, με την εισαγωγή και πάλι των απαραίτητων λειτουργικών παραμέτρων. Μεταβαίνοντας επομένως στο πρόγραμμα υπολογισμών, συμπληρώνονται τα απαραίτητα πεδία. Στο πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε, οι προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα επιλογές καλύπτουν τις προδιαγραφές που επιθυμούνται, για αυτό και παραμένουν. Ο τύπος υπολογισμού που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι αυτός του υπολογισμού σε στάδια, *staged construction*, με πρώτο κατά σειρά (*initial phase*) την αρχική κατάσταση του μοντέλου, δηλαδή χωρίς το επιχώμα και δεύτερο (*stage 1*), την τοποθέτηση του επιχώματος. Ο καθορισμός αυτός πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση του επιχώματος, κατά τον προσδιορισμό των παραμέτρων στο στάδιο που αναφέρεται στην εναπόθεση του.

Το γεωτεχνικό πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία χαρακτηρίζεται απλό και πρακτικό, όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Συνδυαστικά και με τις παραμέτρους που χρειάστηκαν να εισαχθούν, φυσικές και μηχανικές, ο

καταλληλότερος τύπος υπολογισμού του μοντέλου κρίθηκε αυτός την πλαστικής συμπεριφοράς (plastic calculation). Οι στραγγιζόμενες συνθήκες που το διέπουν, οδηγούν σε μία ανάλυση τέτοιου τύπου, όπου υπολογίζονται οι μακροχρόνιες καθιζήσεις, χωρίς να επιφυλάσσονται κίνδυνοι λόγω έλλειψης δεδομένων και παραδοχών. Τέλος, ένα βήμα πριν την εκκίνηση της υπολογιστικής διαδικασίας, είναι θεμιτή η επιλογή κάποιων σημείων με σκοπό την μετέπειτα αξιοποίησής τους σε διαγράμματα και καμπύλες. Τα σημεία που επιλέγονται, είναι αυτά για τα οποία υπάρχουν πιθανότητες αυξημένων μετακινήσεων ή και αστοχίας. Στην παρούσα περίπτωση, τα επίφοβα σημεία είναι αυτά κάτω από τους πόδες του πρανούς, αλλά και κάτω από το κέντρο του επιχώματος, στο αριστερό άνω κατακόρυφο όριο της γεωμετρίας μας, καθώς και στις δύο πλευρές του καναλιού.

Το σημείο στο όριο της γεωμετρίας επιλέγεται με σκοπό την αξιολόγηση της επιλογής των ορίων του βρόγχου. Ουσιαστικά, αναμένονται μηδενικές μετακινήσεις σε εκείνα τα σημεία, ή τουλάχιστον επιθυμείται. Η επιλογή των κατάλληλων διαστάσεων της γεωμετρίας είχε βασικό κριτήριο την χρονική και γεωμετρική δυνατότητα πλήρους αποτόνωσης των φορτίων. Επομένως, μία μη μηδενική, ή μηδαμινή τιμή μετακινήσεων σε εκείνα τα σημεία αποτελεί απόδειξη ότι η επιλογή ήταν ακατάλληλη, καθώς τα εδαφικά στοιχεία δεν πρόλαβαν να αποτονωθούν. Τα σημεία στους πόδες και στο κέντρο του επιχώματος επιλέχθηκαν σύμφωνα με το μηχανισμό ολισθησης. Η κίνηση που ακολουθεί η αστοχία σε τέτοιες περιπτώσεις καταδεικνύει 3 σημεία, ως περισσότερο κρίσιμα, το κεντρικό, στο οποίο αναμένονται οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις και τα πλευρικά, στα οποία σημειώνονται οι ανυψώσεις, λόγω της ολισθητικής κίνησης του σώματος του επιχώματος. Τέλος, το κατά πόσο επηρεάζει η παρουσία του υδάτινου καναλιού τη συμπεριφορά του επιχώματος, αλλά και των σχηματισμών πάνω στους οποίους εδράζεται, τα σημεία που επιλέχθηκαν στις πλευρές του καναλιού είναι τα καταλληλότερα για να το αποδείξουν.



Εικόνα 5.9: Curve points

5.5 Διεξαγωγή Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

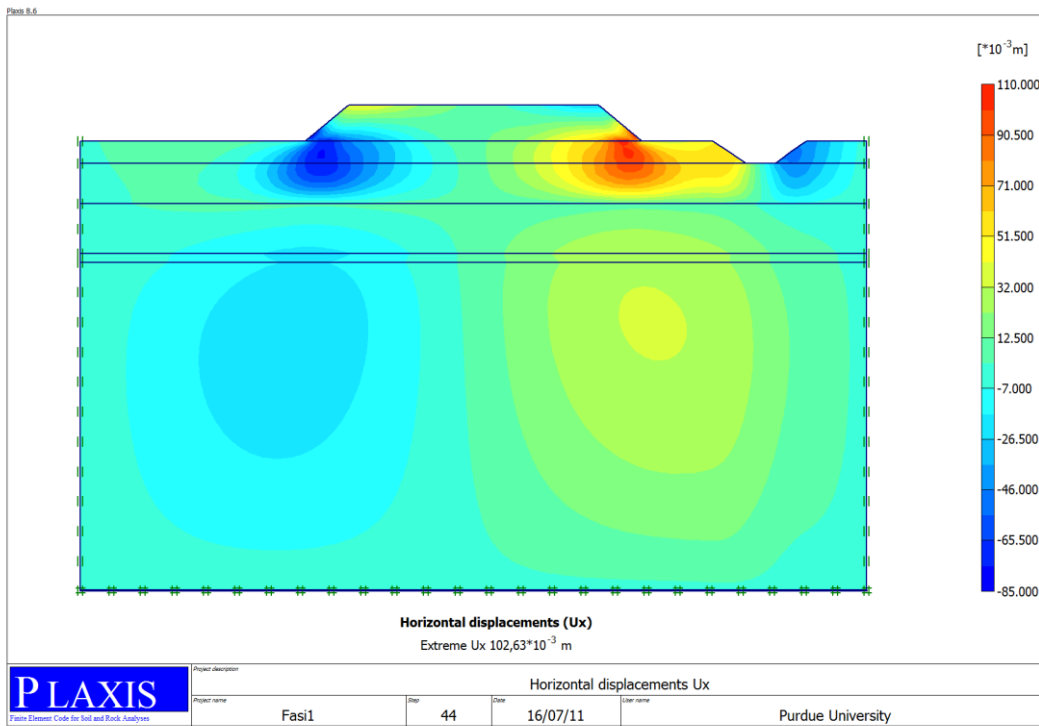
Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξάγει συμπεράσματα για μεγάλη ποικιλία μετακινήσεων και τάσεων. Με την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας, το πρόγραμμα μεταβαίνει στο παράθυρο επιλογής των κινήσεων που επιθυμούνται να προβληθούν, σε μορφή γραφημάτων ή πινάκων. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, οι κινήσεις που κρίνονται απαραίτητες και κρίσιμες να μελετηθούν, σύμφωνα με τη φύση του προβλήματος που αναλύεται, είναι αυτές των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων. Με τις κατάλληλες επιλογές του προγράμματος, που έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, εξάγονται τιμές αποτελεσμάτων για τις εν λόγω μετατοπίσεις, σε μορφή γραφημάτων υπό σκίαση, (shadings).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η απόδειξη της ικανότητας του προγράμματος να επιλύσει το συγκεκριμένο γεωτεχνικό πρόβλημα. Σημείο αναφοράς για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αποτελεί το πραγματικό πρόβλημα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυσή του. Η σύμπτωση επομένως, των υπολογισμένων μέσω Plaxis, αποτελεσμάτων, με τα

αντίστοιχα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στην Ελβετία, θα αποτελέσει τον κρίσιμο παράγοντα για το τελικό συμπέρασμα. Κατά την επίλυση του προβλήματος στις πραγματικές συνθήκες, οι μετρούμενες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν διεξήγαγαν αποτελέσματα, για οριζόντιες μετακινήσεις 89mm και για κατακόρυφες 580mm. Το διάστημα για το οποίο πραγματοποιήθηκε η υπολογιστική διαδικασία διήρκησε 14 μήνες και οι παραπάνω τιμές αναφέρονται ως τελικές, δηλαδή του 14^{ου} μήνα. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα και σε συνδυασμό με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαρτίζουν τη γεωμετρία, προκύπτει το συμπέρασμα περί “υποτίμησης” των αποτελεσμάτων. Με την έννοια “υποτίμηση”, εννοείται η μη αποδοχή των τιμών αυτών ως τελικές. Σύμφωνα με την ανάλυση της συμπεριφοράς των οργανικών εδαφών σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει αποδειχθεί η ερπυστική συμπεριφορά τους και η ανάπτυξη δευτερογενούς συμπίεσης. Επομένως, το διάστημα των 14 μηνών θεωρείται βραχυπρόθεσμο για τους εν λόγω σχηματισμούς. Εν κατακλείδι, οι προαναφερθείσες τιμές κρίνονται σαφώς αποδεκτές, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται σε βραχυπρόθεσμο διάστημα, ενώ καθίσταται απόλυτα αναμενόμενη η περαιτέρω ανάπτυξη μετακινήσεων, ιδιαίτερα ως προς τις καθιζήσεις, λόγω της δευτερογενούς καθίζησης, που εκ των πραγμάτων, θα αναπτυχθεί.

Οριζόντιες Μετακινήσεις (U_x):

Η εικόνα που παρουσιάζεται παρακάτω, απεικονίζει την κίνηση των οριζόντιων μετακινήσεων, διαγραμματισμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαχωρίζονται οι διαφορετικές τάξεις μεγεθών των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.10: Οριζόντιες μετακινήσεις

- Τα διαφορετικά πρόσημα που εμφανίζονται στο υπόμνημα της εικόνας, δείχνουν την κατεύθυνση της κίνησης των σχηματισμών, με θετικά ορισμένη αυτήν προς την πλευρά του καναλιού, δηλαδή δεξιά. Παρατηρώντας επομένως τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι από τη μέση του επιχώματος και κατευθυνόμενοι προς το κανάλι, οι εδαφικοί σχηματισμοί κινούνται προς το κανάλι, δηλαδή θετικά, ενώ από την απέναντι πλευρά του επιχώματος, απομακρύνονται από το κανάλι, δηλαδή αρνητικά.
- Γενικότερα, μελετώντας την πορεία των οριζόντιων μετακινήσεων κατά τη νοητή γραμμή του κατακόρυφου μέσου του επιχώματος, γίνεται εμφανές, ότι δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες μετακινήσεις. Οι τιμές που απεικονίζονται ουσιαστικά θεωρούνται μηδενικές, από το ανώτερο έως το κατώτερο άκρο της γεωμετρίας, καθ' όλο το βάθος δηλαδή των σχηματισμών.
- Η μέγιστη τιμή που υπολογίζεται, αναπτύσσεται στον δεξιό πόδα του επιχώματος και συγκεκριμένα στην επαφή του με το πρώτο στρώμα των οργανικών από την πλευρά που συμπορεύεται με το κανάλι. Πρόκειται για

μετακινήσεις μεγέθους 102.63mm, πράγμα που πιστοποιείται και από την εικόνα που προβάλλει το πρόγραμμα. Από την αντίθετη πλευρά του επιχώματος, στον αριστερό του πόδα και πάλι στην επαφή με το πρώτο στρώμα, οι μετακινήσεις μειώνονται περίπου κατά 20mm και φθάνουν μέγιστη τιμή τα 85mm.

- Γενικότερα, αν χωριστεί η γεωμετρία σε δύο κατακόρυφα τμήματα, με σημείο αναφοράς το κατακόρυφο μέσο του επιχώματος, παρατηρείται διαφοροποίηση στο δεξί τμήμα, με ελάχιστα αυξημένες τιμές, σε εύρος ελάχιστης και μέγιστης τιμής 9.5mm έως 102.63mm, αντίστοιχα.
- Παρατηρώντας κάθε εδαφικό στρώμα ξεχωριστά λαμβάνουμε τα εξής συμπεράσματα:

Στο παχύτερο και μη συνεκτικότερο στρώμα, της καλώς διαβαθμισμένης άμμου, βάθους 13.5m, παρατηρούνται από την πλευρά του αριστερού μισού του επιχώματος, τιμές μεταξύ 4.00mm έως 42.00mm, με αυξανόμενη κατεύθυνση πλησιάζοντας το ανώτερο στρώμα. Αντίστοιχα, στο δεξί τμήμα, που βρίσκεται κάτω από το κανάλι, παρατηρείται εύρος τιμών μεταξύ 9.5mm έως 43.5mm, σχεδόν παρόμοιες. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το κανάλι δεν επηρεάζει ιδιαίτερα στο συγκεκριμένο βάθος.

Στο αμέσως ανώτερο στρώμα, της αργιλώδους ιλύος, βάθους 12.5m, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές, συγκριτικά με το προηγούμενο στρώμα. Η απεικόνιση αυτή φαίνεται εύλογη, καθώς το πάχος του εν λόγω στρώματος (1m) δεν επαρκεί για να προκαλέσει ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις. Επίσης, πρόκειται για ένα σχηματισμό ο οποίος, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, αν και ορίζεται ως αργιλώδης ιλύς, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του το κατατάσσουν σε υλικό μη συνεκτικό. Επομένως, δε θεωρείται επιρρεπές σε τέτοιου είδους μετακινήσεις.

Αμέσως μετά, στο στρώμα της ιλυώδους άμμου, πάχους 5.5m και βάθους 7m, ουσιαστικά ολοκληρώνεται η προηγούμενη εικόνα. Παρατηρούνται ακριβώς τα ίδια εύρη τιμών και στα δύο μισά τμήματα που νοητά χωρίστηκαν. Εξήγηση

αυτού είναι ότι πρόκειται επίσης για σχηματισμό άμμου, που μπορεί να μην είναι καλώς διαβαθμισμένη, αλλά είναι πολύ μικρότερου πάχους.

Στα επόμενα στρώματα ξεκινούν διαφοροποιήσεις των τιμών, γεγονός που αναμενόταν, καθώς πρόκειται για τους πιο ευπαθείς σχηματισμούς. Στο στρώμα των οργανικών-ανθρακικών, παρατηρείται ένα εύρος, που περιλαμβάνει τις μηδενικές και σχεδόν τις μέγιστες μετακινήσεις, δηλαδή από 0.00mm έως 95mm. Όπως αναμενόταν, στην περιοχή του αριστερού τμήματος, φαίνονται οριζόντιες μετακινήσεις, 12.5mm έως 85mm, με τις μέγιστες να λαμβάνουν χώρα στην περιοχή κάτω από τον πόδα του επιχώματος. Στο τμήμα του δεξιού μισού, υπολογίζονται μετακινήσεις από 22.5mm έως 95mm, με τις μέγιστες αντίστοιχα να αποτυπώνονται κάτω από τον πόδα του επιχώματος. Αξιοσημείωτο είναι ότι στο συγκεκριμένο στρώμα, από την απομακρυσμένη από το επίχωμα πλευρά του καναλιού, οι μετακινήσεις λαμβάνουν τιμές της τάξης του αριστερού μισού τμήματος, ή και λίγο μικρότερες, δηλαδή 12.5mm έως 46mm.

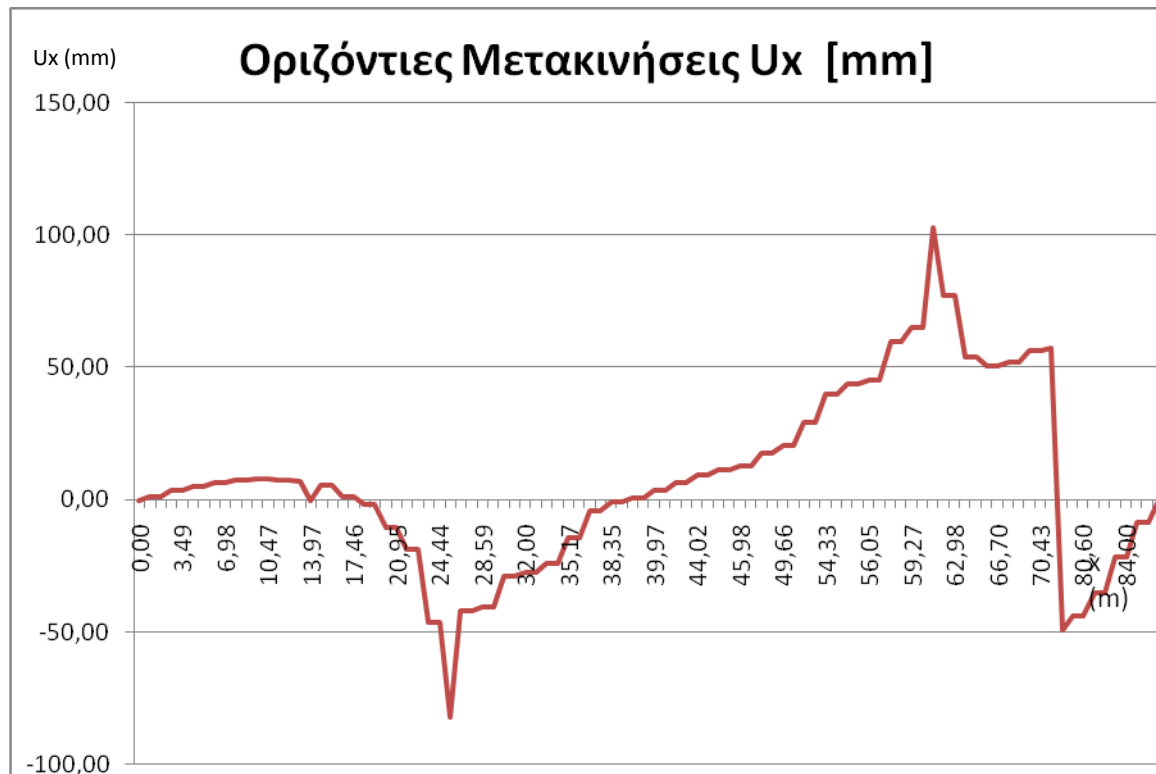
Τέλος, στο ανώτερο και πιο επισφαλές στρώμα, των οργανικών-τύρφεων, αναπτύσσονται οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων κινήσεων. Όπως έχει προαναφερθεί, λόγω της φύσης του σχηματισμού τα αποτελέσματα που λήφθηκαν είναι αναμενόμενα. Καθ' όλο το στρώμα, υπολογίζονται μετακινήσεις από σχεδόν μηδενικές, έως 102.00mm, που είναι και η μέγιστη μετακίνηση που πραγματοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, στο αριστερό τμήμα και πάλι, οι τιμές φθάνουν τα 85.00mm κάτω από τον πόδα, ενώ όπως προελέχθη, στο δεξί τμήμα που συμπορεύεται με το κανάλι, κάτω από τον δεξί πόδα του επιχώματος, οι τιμές μεγιστοποιούνται στα 102.63mm. Αντίστοιχα, στην απέναντι από το επίχωμα όχθη του ποταμού, οι τιμές μειώνονται και πάλι, με μέγιστη περίπου αυτή των 50.00mm.

Στο τμήμα του επιχώματος, δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες μετακινήσεις. Πιο αναλυτικά, στο μεγαλύτερο κεντρικό μέρος του σώματος του επιχώματος, υπολογίζονται μετακινήσεις σχεδόν μηδενικές. Μία αύξηση διαφαίνεται στα δύο ανώτερα άκρα του, της τάξης των 40.00mm και 16.00mm, αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Η εκκίνηση όμως των μέγιστων μετακινήσεων που

επέρχονται στο πρώτο εδαφικό στρώμα, αποδεικνύεται ότι ξεκινά από τους πόδες του επιχώματος, με μετακινήσεις των 55.00mm αριστερά και 70.00mm.

- Από όλα τα παραπάνω, διεξάγεται το συμπέρασμα, ότι η παρουσία του καναλιού δίπλα στο επίχωμα και κατ' επέκταση στον αυτοκινητόδρομο, επηρεάζει σε μεγαλύτερο συγκριτικά βαθμό, την περιοχή μεταξύ δεξιού πόδα επιχώματος και όχθης καναλιού. Παρ' όλα αυτά, το μέγεθος των τιμών δε διαφοροποιείται σε ανησυχητικό βαθμό.
- Ως προς τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, με τις πραγματικές τιμές που διεξήχθησαν στην Ελβετία, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την υπολογιστική διαδικασία της παρούσας εργασίας κρίνονται αποδεκτά, για τους λόγους που ήδη έχουν γνωστοποιηθεί. Η τιμή των 102.63mm αποτελεί ένα μέγεθος που εύλογα θα μπορούσε να αναπτυχθεί σε μακροχρόνιες συνθήκες.

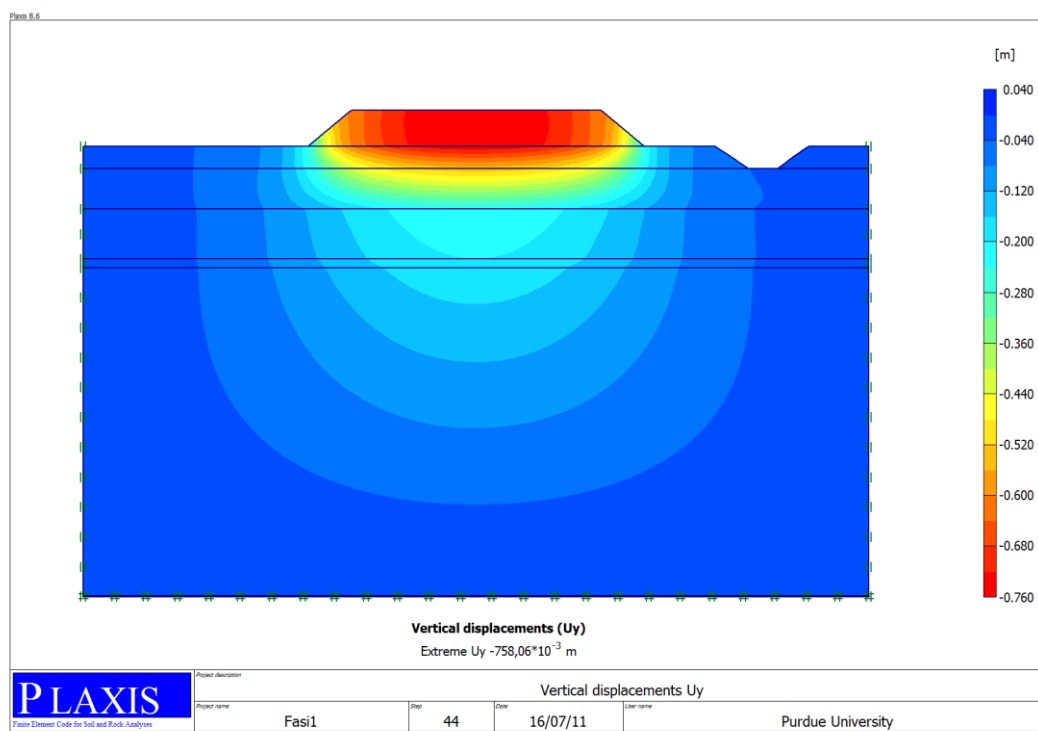
Μια εναλλακτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής διαδικασίας, ως προς τις οριζόντιες μετακινήσεις, αποτελεί και η κλασσική μορφή διαγραμμάτων, με άξονες που αντιστοιχούν στις μετακινήσεις και στο μήκος προχώρησης, αντίστοιχα. Με τη βοήθεια επιλογών που παρέχει το πρόγραμμα, επιλέγοντας μια τομή κατά μήκος της γεωμετρίας, σε βάθος οριακό για τις μετακινήσεις και συνοψίζοντας τις τιμές σε αντίστοιχο πίνακα, διαμορφώνεται το διάγραμμα που παρατίθεται παρακάτω. Πρόκειται για διάγραμμα οριζόντιων μετακινήσεων-μήκους, σε μονάδες χιλιοστών (mm) και μέτρων (m), αντίστοιχα, που αναφέρεται στο βάθος των 49.5m (στρώμα οργανικών-τύρφων) για τους εδαφικούς σχηματισμούς.



Διάγραμμα 5.1: Οριζόντιες μετακινήσεις

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το παραπάνω διάγραμμα, δε διαφέρουν ουσιαστικά από την προηγούμενη σκιαγραφημένη αποτύπωση των αποτελεσμάτων. Απεικονίζουν σε διαγραμματική μορφή την ανάπτυξη των μέγιστων μετακινήσεων των 102.63mm στην οριζόντια συντεταγμένη, περίπου 60.00m. Πρόκειται επομένως για την περιοχή του δεξιού πόδα του επιχώματος, ενώ αντίστοιχα, φαίνεται η περιοχή του αριστερού πόδα, η οποία αναπτύσσει μετακινήσεις της τάξης των 85.00mm. Η γενικότερη εικόνα που παρατηρείται από το διάγραμμα είναι η ανοδική τάση των μετακινήσεων από την αρχή της γεωμετρίας, με μικρού μεγέθους τιμές, έως την περιοχή λίγο πριν τον αριστερό πόδα του επιχώματος, όπου συνεχίζεται η αυξητική τάση των μετακινήσεων, αλλά με κατεύθυνση διαφορετική, αρνητική, δηλαδή προς τα αριστερά. Έπειτα, η κατεύθυνση αλλάζει και πάλι και συνεχίζει ομοιόμορφα για όλο το μήκος του επιχώματος, με τις μέγιστες τιμές που προαναφέρθηκαν. Κατά την απομάκρυνση από το επίχωμα και πλησιάζοντας το κανάλι, οι μετακινήσεις μειώνονται και αντιστρέφονται, μέχρι το σημείο που ξεπερνούν το κανάλι και επανέρχονται στη θετική φορά.

Κατακόρυφες Μετακινήσεις (U_y) :



Εικόνα 5.11: Κατακόρυφες μετακινήσεις

- Παρόμοια με τις οριζόντιες μετακινήσεις, το αρνητικό πρόσημο στις τιμές υποδηλώνει την κατεύθυνση της κατακόρυφης κίνησης και συγκεκριμένα απεικονίζει την προς τα κάτω κίνηση. Η μόνη περιοχή που φαίνεται οι σχηματισμοί να κινούνται προς την επιφάνεια, δηλαδή με θετική φορά, είναι αυτή που βρίσκεται δεξιά του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, η εικόνα αυτή εμφανίζεται στα τμήματα του δεύτερου και τρίτου στρώματος, βάθους 4m έως 12m.
- Η γενικότερη εικόνα που παρουσιάζεται ως προς τις κατακόρυφες μετακινήσεις χαρακτηρίζεται ουσιαστικά ομοιόμορφη. Παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση των καθιζήσεων πλησιάζοντας στην επιφάνεια και το νοητό κέντρο του επιχώματος, με αποκορύφωμα τα ανώτερα στρώματα, καθώς και το επίχωμα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ομοιομορφία των κινήσεων έγκειται και στις δύο πλευρές του επιχώματος, δηλαδή δεξιά και αριστερά του. Η "συμμετρική" αυτή εικόνα, πρακτικά αποδεικνύει ότι το κανάλι με το οποίο

συμπορεύεται ο αυτοκινητόδρομος δεν έχει καμία επίδραση, τόσο στις κατακόρυφες κινήσεις, όσο και στα μεγέθη αυτών.

- Παρατηρώντας την εικόνα, με μία ποιοτική ανάλυση, οι μέγιστες καθιζήσεις φαίνονται να ξεκινούν από το σώμα του επιχώματος, συγκεκριμένα από το κέντρο του, ενώ μειώνονται σταδιακά, καθώς προσεγγίζουν τα πρηνή.
- Μεταφράζοντας την παραπάνω ποιοτική προσέγγιση σε ποσοτική, οι τιμές των μέγιστων καθιζήσεων κυμαίνονται στα 758.06mm. Παρατηρούνται στην περιοχή κάτω από το κέντρο του επιχώματος και εκτείνονται κατά την κατακόρυφο, από το σώμα του μέχρι και το πρώτο εδαφικό στρώμα των οργανικών.
- Αναλύοντας τα αποτελέσματα για κάθε επιμέρους εδαφικό στρώμα, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Στο κατώτερο στρώμα της καλώς διαβαθμισμένης άμμου, οι κατακόρυφες κινήσεις ξεκινούν από ελάχιστες, σχεδόν μηδενικές τιμές, της τάξης των 40.00mm. Πλησιάζοντας το υπερκείμενο στρώμα, αλλά και προχωρώντας προς το κέντρο του σχηματισμού, διαφαίνεται αυξητική κίνηση των τιμών, με αποτελέσματα από 80.00mm έως 240.00mm. Οι μέγιστες τιμές του εν λόγω εύρους υπολογίζονται, ως προς την κατακόρυφο, λίγο πριν τη μετάβαση στο υπερκείμενο στρώμα, ενώ ως προς την οριζόντιο, ακριβώς κάτω από το κέντρο του επιχώματος.

Προχωρώντας στο επόμενο στρώμα της αργιλώδους ιλύος, η εικόνα παραμένει ακριβώς η ίδια, με τη διαφορά ότι οι μεγαλύτερες τιμές του προαναφερθέντος εύρους εκτείνονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Ενώ δηλαδή στο προηγούμενο στρώμα το μεγαλύτερο μέρος καταλάμβαναν καθιζήσεις των 40.00mm, στο συγκεκριμένο στρώμα το μεγαλύτερο τμήμα χαρακτηρίζεται από καθιζήσεις των 80.00mm έως 240.00mm. Το γεγονός ότι η εικόνα επαναλαμβάνεται, οφείλεται στους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στις οριζόντιες μετακινήσεις, δηλαδή στο μικρό πάχος του στρώματος και στα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδαφικού σχηματισμού.

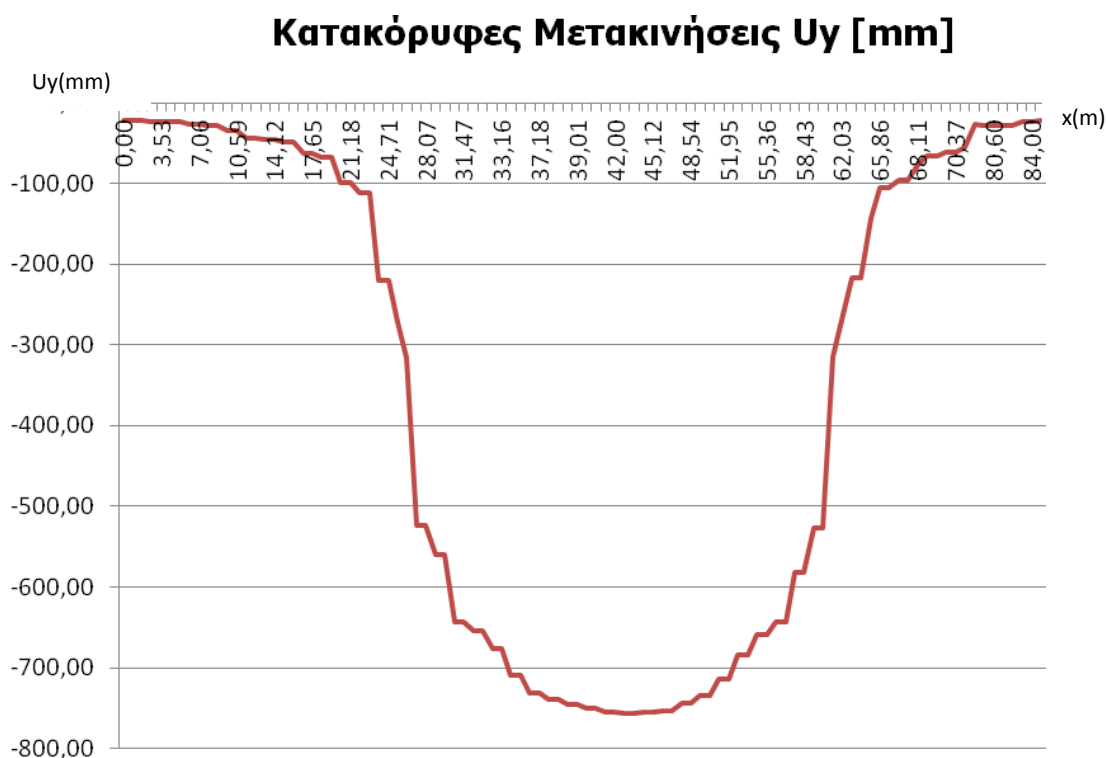
Ανεβαίνοντας στο επόμενο στρώμα, συναντάται και πάλι η ίδια εικόνα, καθώς πρόκειται για το στρώμα ιλυώδους άμμου. Γενικότερα, ως προς την επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών τόσο στις καθιζήσεις όσο και στις οριζόντιες μετακινήσεις, παρατηρείται ομοιότητα στον τρόπο κίνησης. Παρ' όλα αυτά, τα αριθμητικά μεγέθη των αποτελεσμάτων διαφέρουν. Αντίστοιχα, το μεγαλύτερο τμήμα του στρώματος, το οποίο βρίσκεται στα νοητά κατακόρυφα όρια του επιχώματος, εκτός των πρανών, αναπτύσσει καθιζήσεις 80.00mm έως 240.00mm, με κάθε τιμή να καταλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο μέρος.

Η εικόνα διαφοροποιείται εύλογα στο επόμενο στρώμα των οργανικών, όπου πια, η επίδραση του επιχώματος είναι εμφανής. Ποιοτικά, οι μεγαλύτερες καθιζήσεις λαμβάνουν χώρα σε τμήμα, που εκτείνεται καθ' όλο το μήκος του επιχώματος, συμπεριλαμβανομένων των πρανών. Ποσοτικά, το εύρος τιμών διευρύνεται μεταξύ 80.00mm και 520.00mm, με αυξητική τάση προφανώς, πλησιάζοντας στην επιφάνεια.

Τέλος, το πρώτο προς την επιφάνεια στρώμα των οργανικών με προσμίξεις τύρφων, παρουσιάζει ακόμα εντονότερες μετακινήσεις. Οι καθιζήσεις της τάξης των 40.00mm έως 240.00mm αναπτύσσονται ομοιόμορφα, αριστερά και δεξιά του επιχώματος, ενώ, κάτω από το σώμα του, οι κινήσεις ξεκινούν από 280.00mm και πλησιάζοντας το κέντρο αγγίζουν τα 750.00mm, που είναι σχεδόν και η μέγιστη τιμή.

- Αρχικά, σύμφωνα με τις μετρούμενες τιμές που έχουν οριστεί ως σημείο αναφοράς, οι τιμές των μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων φαίνονται να αποκλίνουν αισθητά, με μία τάξη μεγέθους που κρίνεται υπολογίσιμη. Παρ' όλα αυτά, το διάστημα για το οποίο υπολογίστηκαν οι μετρούμενες τιμές, θεωρείται μικρό, σε σχέση με τη φύση των εδαφών που συμμετέχουν στο πρόβλημα. Είναι εύλογο και αναμενόμενο, να υπάρχει περαιτέρω ανάπτυξη καθιζήσεων, σε άμεσο επόμενο διάστημα. Επομένως, οι τιμές που λήφθηκαν από τη συγκεκριμένη εργασία και το πρόγραμμα Plaxis κρίνονται εξίσου αποδεκτές αλλά και πιο ρεαλιστικές για το μοντέλο μακροχρόνιων συνθηκών που επιλέχθηκε.

Αντίστοιχα, με το ίδιο διαγραμματικό τρόπο μπορούν να αποτυπωθούν και οι κατακόρυφες μετακινήσεις, τόσο ως προς το μήκος προχώρησης της γεωμετρίας, όσο και ως προς το βάθος, σε μονάδες μέτρησης χιλιοστών (mm) και μέτρων (m). Με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε για τις οριζόντιες μετακινήσεις, σχεδιάστηκαν με κατάλληλο πρόγραμμα, τα διαγράμματα που φαίνονται στη συνέχεια. Πρόκειται για διαγράμματα που αναφέρονται σε βάθος 49.5m για μελέτη κατά μήκος προχώρησης, δηλαδή στο στρώμα των οργανικών εδαφών, όπου και παρουσιάζονται οι μέγιστες μετακινήσεις.

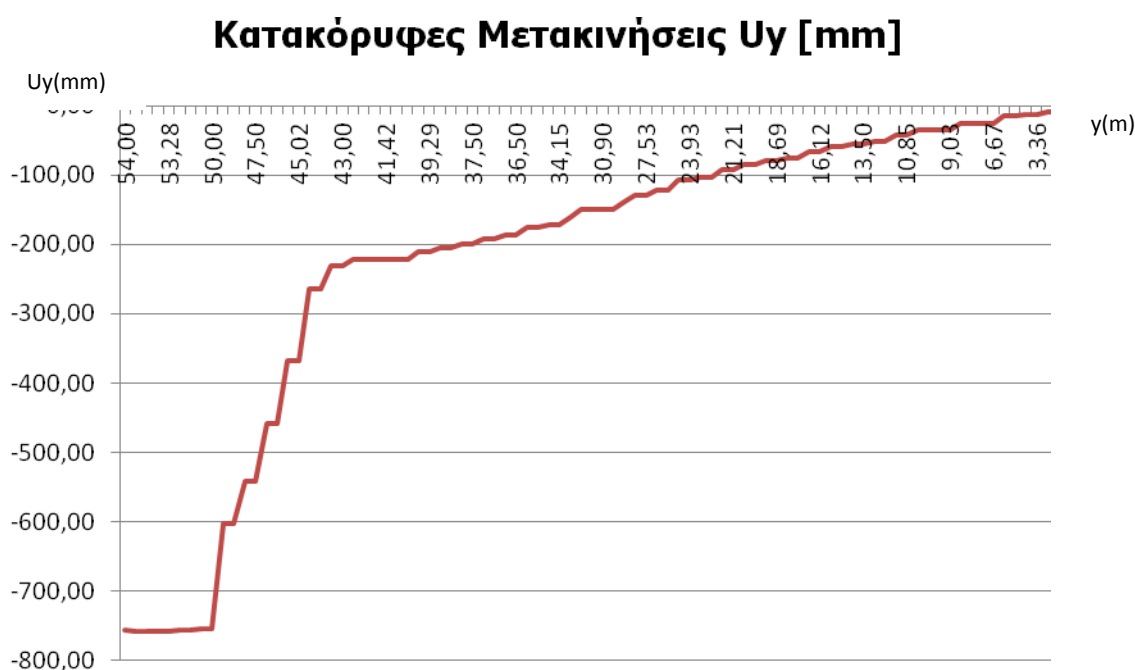


Διάγραμμα 5.2: Κατακόρυφων μετακινήσεων

Ομοίως, και σε αυτό το διάγραμμα, η τιμή των μέγιστων καθιζήσεων υπολογίζεται στα 758mm και συγκεκριμένα, λαμβάνει χώρα στην περιοχή του κέντρου του επιχώματος, όπως φάνηκε και στις προηγούμενες απεικονίσεις. Παρατηρείται επομένως μία σύμπτωση αποτελεσμάτων, μεταξύ των δύο μορφών απεικονίσεων, γεγονός που γίνεται εμφανές και από το προφίλ του διαγράμματος. Πρόκειται για σταδιακή αύξηση των τιμών προχωρώντας προς το επίχωμα, κορυφωσή τους πλησιάζοντας στο κέντρο του και σταδιακή αποτόνωσή τους, κατά την απομάκρυνση από το σώμα του επιχώματος, ενώ η κατεύθυνση της κίνησής τους είναι σε μόνιμο βαθμό προς τα κάτω. Η συμμετρική εικόνα που παρατηρήθηκε κατά την απεικόνιση με σκίαση, γίνεται ευδιάκριτη και στη διαγραμματική αυτή μορφή, καθώς

παρατηρείται να επαναλαμβάνεται η εικόνα του μισού μέρους του επιχώματος, γεγονός που αποδεικνύει την αμελητέα επίδραση του καναλιού, πλησίον του επιχώματος.

Το διάγραμμα που παρατίθεται αμέσως παρακάτω, απεικονίζει και πάλι τις κατακόρυφες μετακινήσεις, αλλά με αναφορά μία συγκεκριμένης τιμής μήκους, των 43.2m, η οποία αντιστοιχεί σχεδόν στο μέσο του επιχώματος. Απεικονίζονται ουσιαστικά οι τιμές των καθιζήσεων μίας περιοχής σημείων που συγκεντρώνονται κατά έναν κατακόρυφο άξονα, σχεδόν στο μέσο του επιχώματος.



Διάγραμμα 5.3: Κατακόρυφων μετακινήσεων (σε μήκος 43.2mm)

Ακόμα μία επαλήθευση για τις μέγιστες τιμές των καθιζήσεων αποτελεί το παραπάνω διάγραμμα, καθώς πιστοποιεί για ακόμη μία φορά την τιμή των 758mm. Οι καθιζήσεις ξεκινούν να αναπτύσσονται, με μικρής τάξης μεγέθους τιμές, από τα κατώτερα όρια της γεωμετρίας σχεδόν (0.00m) και εκδηλώνονται αυξητικά, όσο προσεγγίζουν τα ανώτερα στρώματα, με αποκορύφωμα την περιοχή του επιχώματος (50.00m-54.00m). Η κατεύθυνση των κινήσεων, εύλογα παρατηρείται και πάλι με αρνητικό πρόσημο, γεγονός που αποτυπώνει την προς τα κάτω κίνηση των σχηματισμών. Γενικότερα, η εικόνα που παρουσιάζεται κάθε άλλο παρά άγνωστη είναι, καθώς και οι δύο προηγούμενες απεικονίσεις, οδηγούσαν στη διεξαγωγή των ίδιων συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

6.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση του προηγούμενου κεφαλαίου, τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν απέδειξαν την ικανότητα της συγκεκριμένης αριθμητικής μεθόδου στην επίλυση τέτοιου είδους απλών γεωτεχνικών προβλημάτων. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis κρίνεται επαρκές και αξιόπιστο για τη μοντελοποίηση και επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων, που αφορούν σε επίχωμα οδοποιίας πάνω σε οργανικά εδάφη. Ως σημείο αναφοράς επομένως την ανωτέρω απόρροια, στόχος του παρόντος κεφαλαίου τίθεται η γενίκευση αντίστοιχων περιπτώσεων επιχωμάτων, τα οποία εδράζονται πάνω σε στρώματα οργανικών εδαφών. Η επίτευξη αυτού του στόχου οργανώνεται με τη μοντελοποίηση και επίλυση τριών διαφορετικών παραμετρικών αναλύσεων, με κριτήριο διαφοροποίησης τις παραμέτρους εκείνες, που αποδείχθηκαν περισσότερο κρίσιμες για τις αναμενόμενες εδαφικές μετακινήσεις και κυρίως, καθιζήσεις. Η απλούστευση του ήδη γνωστού προβλήματος στο παρόν κεφάλαιο, έγκειται στην απομάκρυνση του συμπορευόμενου μέχρι πρότινος, καναλιού. Πρόκειται, περιληπτικά, για μια νέα γεωμετρία μοντέλου, που ανάλογα την περίπτωση διαφοροποιούνται και τα σχετιζόμενα εδαφικά στρώματα και σχηματισμοί. Και στις τρεις περιπτώσεις, θα πρέπει να αναφερθεί ότι θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί επίλυση στο μισό κομμάτι της γεωμετρίας, καθώς πρόκειται για την ίδια εικόνα εκατέρωθεν. Παρ' όλα αυτά, η επίλυση εφαρμόστηκε στο σύνολο του μοντέλου, καθώς η απλή γεωμετρία του δε στάθηκε εμπόδιο.

Όπως προαναφέρθηκε, πρόκειται για τρεις διαφορετικές παραμετρικές αναλύσεις. Στην πρώτη περίπτωση, πραγματοποιείται ανάλυση και επίλυση του νέου μοντέλου, με παράμετρο μεταβολής το μέτρο ελαστικότητας E . Το μοντέλο συνίσταται μόνο από οργανικά εδάφη και την παρουσία του επιχώματος, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στην αντίστοιχη ενότητα. Πραγματοποιείται επομένως, ανάλυση του εν λόγω μοντέλου, με μόνη μεταβλητή παράμετρο το μέτρο ελαστικότητας των οργανικών εδαφών, το οποίο αυξάνεται σε κάθε στάδιο, κατά 50%, με ελάχιστη τιμή τα 1000 kPa και μέγιστη τα 3375 kPa.

Στις επόμενες δύο περιπτώσεις τα δεδομένα μοιάζουν πιο συναφή. Στο δεύτερο παραμετρικό μοντέλο, η γεωμετρία του χαρακτηρίζεται και πάλι από την απουσία του καναλιού, ενώ οι σχηματισμοί που λαμβάνουν μέρος συνίστανται από οργανικά υλικά και αμμώδη. Σαφώς, καμία αλλαγή δεν έχει επέλθει στη γεωμετρία και στα χαρακτηριστικά του επιχώματος. Η παράμετρος που λειτουργεί ως κρίσιμος παράγοντας για τη μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος είναι το πάχος του στρώματος που αποτελείται από τα οργανικά εδάφη. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιείται ανάλυση σε 4 στάδια, κατά τα οποία μεταβάλλεται το πάχος των οργανικών. Η μεταβολή η οποία αποφασίστηκε να εφαρμοστεί, χαρακτηρίζεται από το διπλασιασμό του πάχους του οργανικού στρώματος ανά στάδιο, με σταθερό όμως το σημείο έναρξής του, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η επιφάνεια του εδάφους, καθώς και το συνολικό πάχος της γεωμετρίας.

Τέλος, κρίθηκε απαραίτητη, για την ολοκληρωμένη διεξαγωγή συμπερασμάτων, η τρίτη παραμετρική ανάλυση, η οποία έχει ως επίδικο και πάλι, τα οργανικά εδάφη. Πρόκειται για ένα γεωμετρικό μοντέλο, ακριβώς ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς και τους ίδιους συμμετέχοντες σχηματισμούς, με μόνη διαφορά τον μεταβαλλόμενο παράγοντα. Η επίλυση αυτή πραγματοποιείται σε 3 στάδια, ενώ η μεταβλητή της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι η απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους του στρώματος που απαρτίζεται από τα οργανικά εδάφη. Με σταθερό το συνολικό πάχος των σχηματισμών, το σταθερό σε πάχος στρώμα των οργανικών, απομακρύνεται από την επιφάνεια σε κάθε στάδιο, κατά 6m.

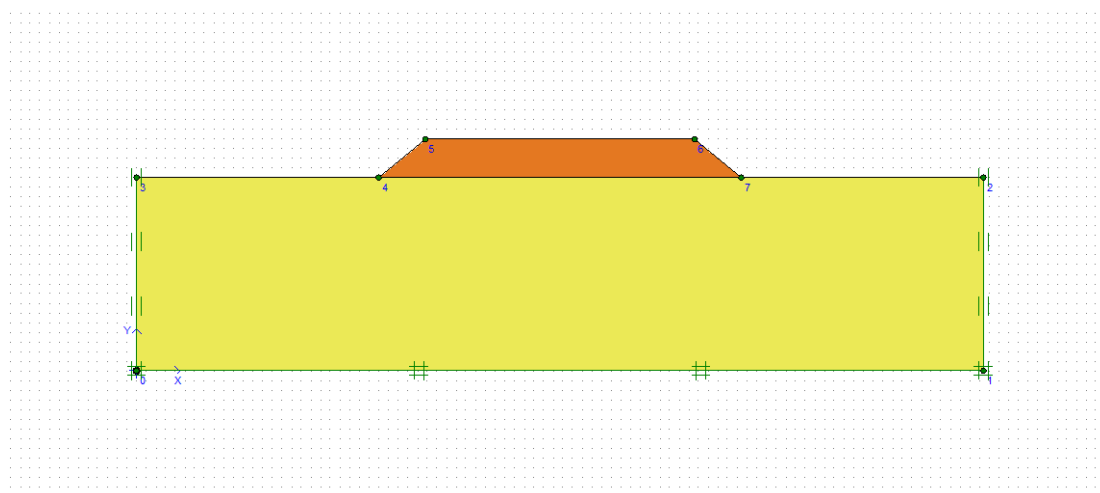
6.2 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας E οργανικών

6.2.1 Εισαγωγή δεδομένων

Σύμφωνα με τη γνωστή πλέον διαδικασία, επιλέγονται ο τύπος μοντέλου επίπεδης παραμόρφωσης, καθώς και ο κλίμακας των 15 κόμβων, για τους ίδιους με το προηγούμενο κεφάλαιο, λόγους, της ομοιόμορφης κατανομής φορτίου και της απλότητας του προβλήματος, αντίστοιχα. Για την αποφυγή επανάληψης, σημειώνεται, ότι οι επιλογές που μόλις αναφέρθηκαν, ισχύουν για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιούνται στο εν λόγω κεφάλαιο.

Σχεδιασμός γεωμετρίας

Η γεωμετρία του μοντέλου των παραμετρικών αναλύσεων, όπως προαναφέρθηκε, έχει μεταβληθεί, συγκριτικά με το μοντέλο που συναντήθηκε μέχρι τώρα. Πρόκειται για διαστάσεις 87.4m μήκους, αλλά 20.0m ύψους. Επίσης, διαφορά έγκειται και στην απουσία του συμπορευόμενου καναλιού, για λόγους απλοποίησης και γενίκευσης. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του επιχώματος παρέμειναν αμετάβλητα. Οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν τέθηκαν εκ νέου σε έλεγχο, ως προς την καταλληλότητά τους για την πλήρη αποτόνωση των τάσεων και συνεπώς, για αξιόπιστα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, η επιλογή Standard Fixities αποτέλεσε και πάλι τον περιορισμό για οποιαδήποτε μετακίνηση των κατακόρυφων και οριζόντιων συνόρων.



Εικόνα 6.1: Γεωμετρία μοντέλου

Προσδιορισμός παραμέτρων

Στο μοντέλο που μελετάται, οι σχηματισμοί που συμμετέχουν περιορίζονται στο υλικό πλήρωσης του επιχώματος και στα οργανικά εδάφη. Το σύνολο του υπεδαφικού στρώματος που υπόκεινται του επιχώματος αποτελείται μόνο από οργανικά εδάφη, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά σχηματισμών

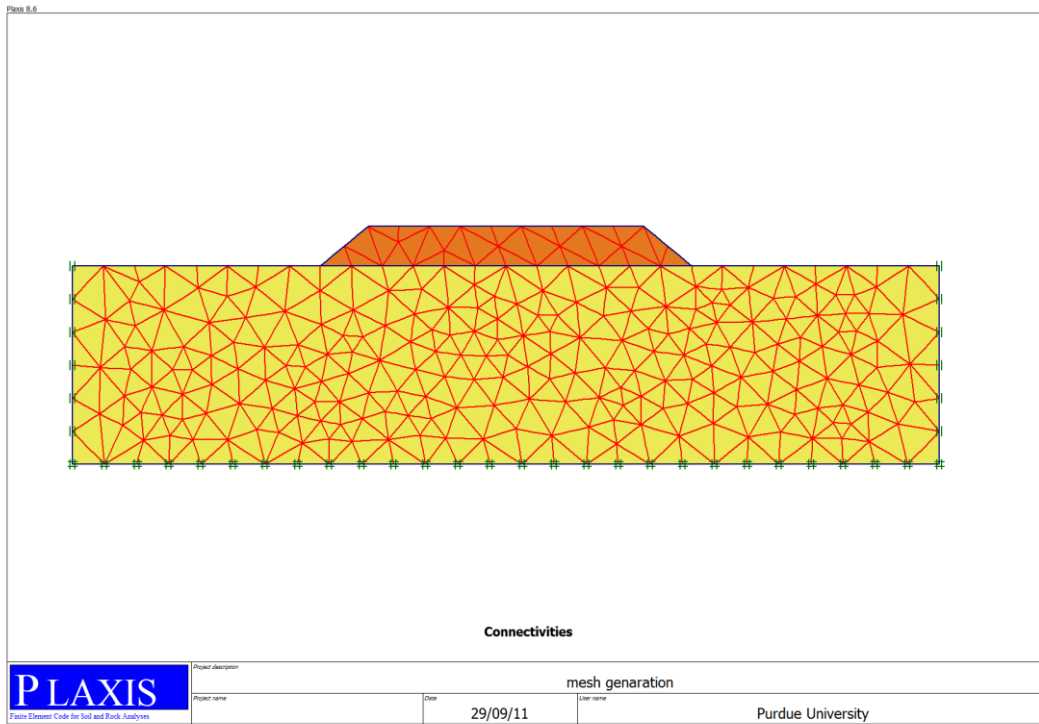
Βάθος [m]	Έδαφος	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]	ψ [°]	ν	E [kPa]
0-20	Οργανικά	14.6	6	27	0	0.25	~
20-24	Επίχωμα	22	0.1	35	5	0.35	50000

Το χαρακτηριστικό της εν λόγω περίπτωσης, είναι η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας των οργανικών εδαφών. Πρόκειται για μία αύξηση κατά 50%, σε κάθε στάδιο ανάλυσης. Ξεκινώντας από το πρώτο στάδιο με τιμή 1000kPa, ακολουθεί αυτή των 1500kPa, έπειτα των 2250kPa και τέλος, στο τέταρτο στάδιο, η τιμή των 3375kPa.

Αντίστοιχα, ο τύπος προσομοίωσης που επιλέχθηκε είναι βάσει του μοντέλου Mohr-Coulomb, καθώς εκεί οδήγησαν τα δεδομένα, ενώ οι συνθήκες πιέσεων πόρων κρίθηκαν και πάλι στραγγιζόμενης συμπεριφοράς, λόγω μελέτης για μακροχρόνιες συνθήκες.

Διαμόρφωση κανάβου

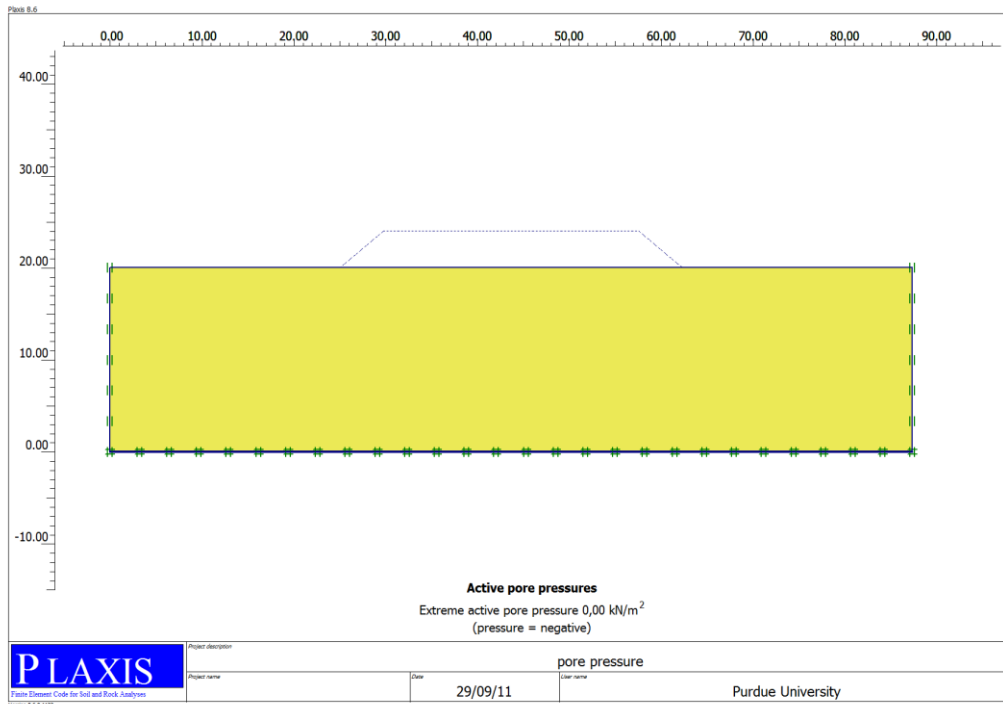
Λόγω της ακόμα απλούστερης δομής του προβλήματος, δεν κρίθηκε καθόλου επισφαλής η επιλογή της «καλής καναβοποίησης» (fine coarseness), η οποία μεταφράζεται σε πυκνή διακριτοποίηση και αποτυπώνεται στην επόμενη εικόνα. Σημειώνεται, ότι το βήμα της διαμόρφωσης κανάβου είναι εξίσου ίδιο και στις επόμενες περιπτώσεις και για το λόγο αυτό θα παραλειφθεί σε επόμενες αναφορές.



Εικόνα 6.2: Καναβοποίηση

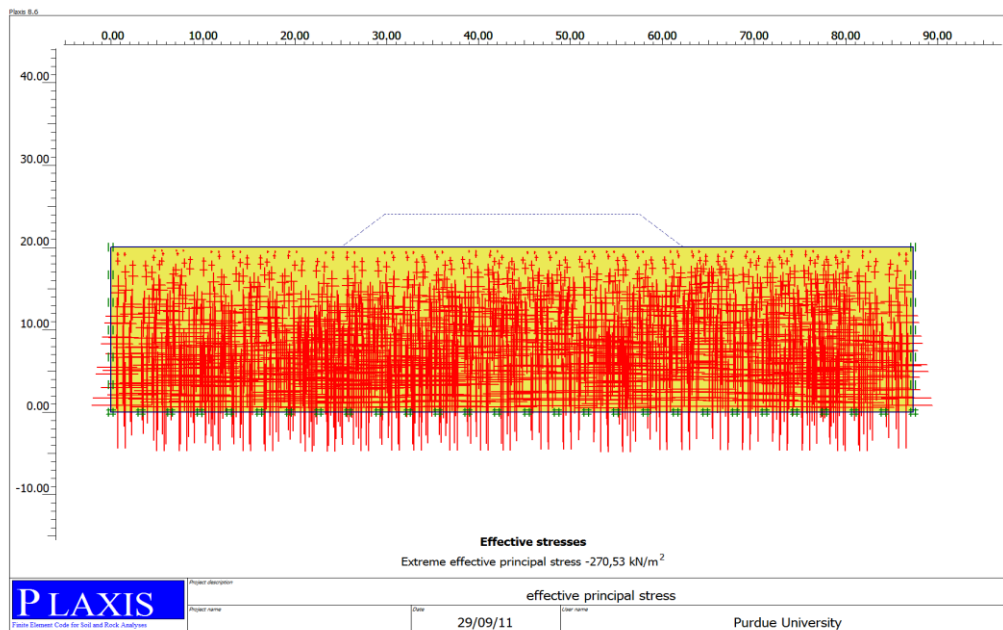
Καθορισμός αρχικών συνθηκών

Ως προς τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών του μοντέλου των υδροστατικών τάσεων επιλέγεται γενικός φρεάτιος οριζοντας. Σύμφωνα με τις στραγγιζόμενες επικρατούσες συνθήκες, δεν υπάρχει καμία ανάπτυξη πιέσεων πόρων.



Εικόνα 6.3: Πιέσεις πόρων

Αντίστοιχα, ως προς τον καθορισμό των αρχικών γεωστατικών τάσεων, απενεργοποιώντας το τμήμα του επιχώματος, αναπτύσσονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις.



Εικόνα 6.4: Γεωστατικές τάσεις

6.2.2 Υπολογιστική διαδικασία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επίλυση θα πραγματοποιηθεί σε στάδια, με αρχικό αυτό των αρχικών συνθηκών και επόμενο, την επιβολή του επιχώματος. Ο τύπος υπολογισμού του μοντέλου είναι της πλαστικής συμπεριφοράς (Plastic calculation), ενώ κατά τις υπόλοιπες λειτουργικές παραμέτρους δεν πραγματοποιήθηκε καμία αλλαγή. Για την αποφυγή παρομοίως, περιπτώσεων επαναλήψεων, αναφέρεται ότι ο τύπος υπολογισμού του μοντέλου, αλλά και τα στάδια επίλυσης παραμένουν ταυτόσημα και στις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις.

6.2.3 Διεξαγωγή αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η αποτίμηση των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων, μεταλλάσσοντας κάποιες κρίσιμες για την έκβασή τους, παραμέτρους. Στη συγκεκριμένη παραμετρική ανάλυση, που παράγοντα διαφοροποίησης αποτελεί το μέτρο ελαστικότητας των οργανικών υλικών, διεξάγονται και παραθέτονται οι τιμές των ολικών, οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων, όπως άλλωστε θα ακολουθήσει και στις επόμενες αναλύσεις. Η ποσοτική αυτή εκτίμηση γίνεται αντιληπτή από τον παρακάτω πίνακα.

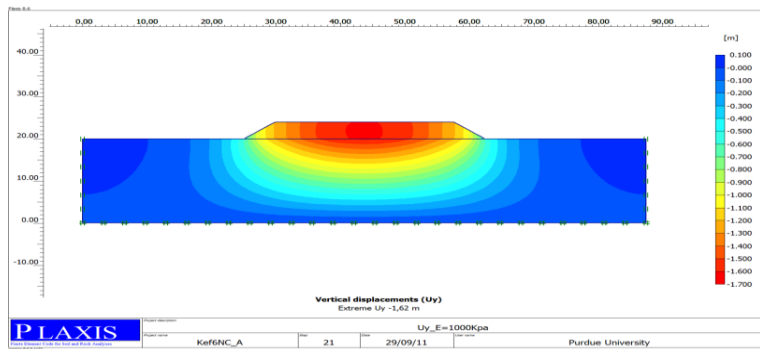
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβολής E [kPa]

E [kPa]	Ολικές μετακ. U_{tot} [m]	Κατακόρυφες μετακ. U_y [m]	Οριζόντιες μετακ. U_x [m]
1000	1.62	1.62	0.24
1500	1.08	1.08	0.16
2250	0.72	0.72	0.1
3375	0.48	0.48	0.07

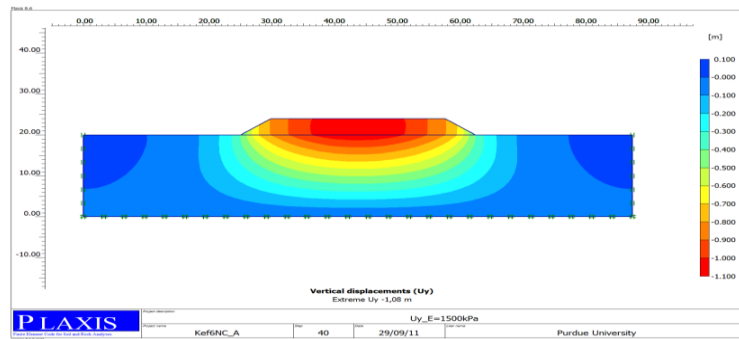
Σύμφωνα με τον ορισμό του εξεταζόμενου μεγέθους, του μέτρου ελαστικότητας, είναι γνωστό ότι η αύξηση της τιμής του μεταφράζεται σε ολοένα και πιο ασυμπίεστους σχηματισμούς. Πριν τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων επομένως, αναμένονταν τιμές, που να ακολουθούν μία πτωτική τάση με την ταυτόχρονη ανοδική πορεία του μέτρου ελαστικότητας. Με το πέρας της υπολογιστικής

διαδικασίας, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμφώνησαν με την αρχική θεωρητική υπόθεση. Όπως φαίνεται και στον πίνακα των αποτελεσμάτων, γίνεται αντιληπτό, ότι με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των οργανικών υλικών, οι κατακόρυφες, αλλά και οι οριζόντιες κινήσεις, μειώνονται. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται παρακάτω οι εικόνες που προκύπτουν από την ολοκλήρωση της επίλυσης μέσω της αριθμητικής μεθόδου. Αρχικά, παρατίθενται οι εικόνες που αποτυπώνουν τις κατακόρυφες μετακινήσεις για κάθε τιμή μέτρου ελαστικότητας και έπειτα, αυτές των οριζοντίων.

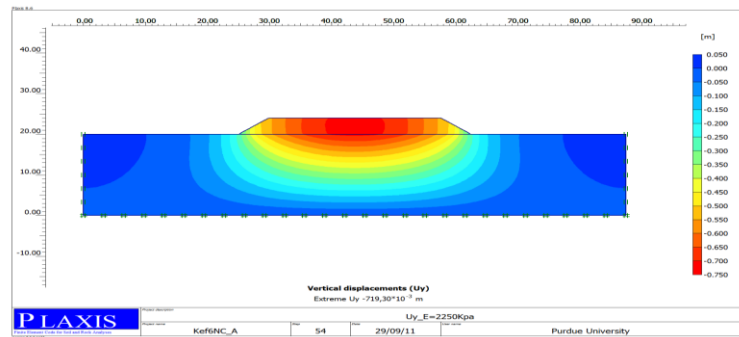
Κατακόρυφες μετακινήσεις Uy



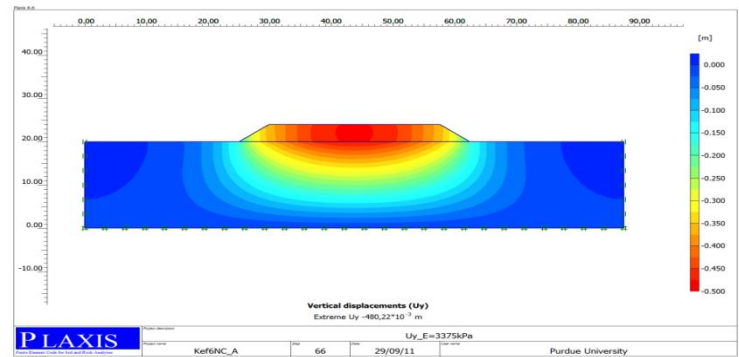
(α)



(β)



(γ)

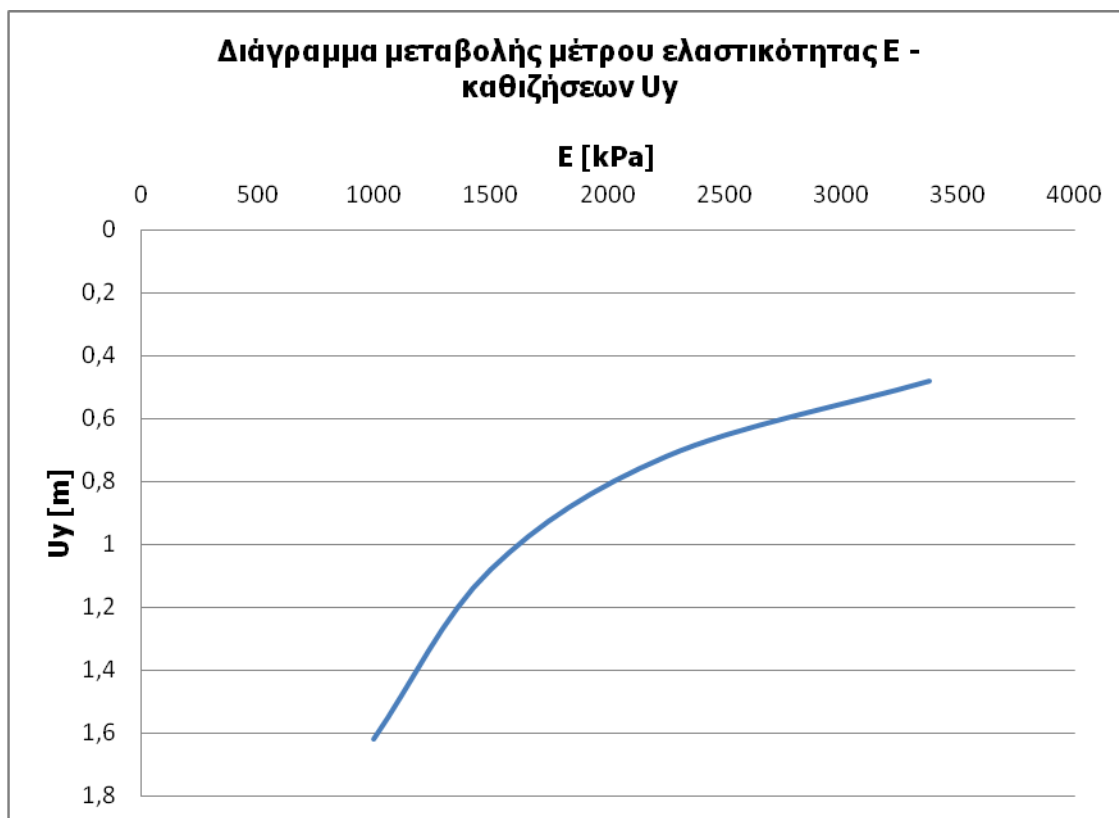


(δ)

Εικόνα 6.5 : Κατακόρυφες μετακινήσεις, (α) $E=1000\text{kPa}$, (β) $E=1500\text{kPa}$, (γ) $E=2250\text{kPa}$, (δ) $E=3375\text{kPa}$

- Τα σημεία στα οποία παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των καθιζήσεων και στις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις, παρουσιάζονται στο κέντρο της βάσης του επιχώματος και ιδιαίτερα στη διεπιφάνεια που σχηματίζει το επίχωμα με το υποκείμενο στρώμα.
- Κατά την απομάκρυνση από το επίχωμα και το ευρύ του περιβάλλον, είτε προς τα δεξιά, είτε προς τα αριστερά, οι τάσεις απομειώνονται έως το σημείο μηδενισμού τους, το οποίο εντοπίζεται τόσο στα άκρα της γεωμετρίας, όσο και προς το δάπεδο των σχηματισμών. Η ένδειξη αυτή αποτελεί απόδειξη της αναμενόμενης μηχανικής συμπεριφοράς του μηχανισμού αστοχίας, αλλά και της αξιόπιστης επιλογής των κατάλληλων διαστάσεων του μοντέλου, καθώς οι τάσεις φαίνονται να διέθεταν τον απαραίτητο χρόνο να αποτονωθούν πλήρως.
- Γενικότερα, η εικόνα αποδεικνύει την επ' ακριβή ακολουθία του μηχανισμού αστοχίας κατά τις επιφάνειες ολίσθησης, σύμφωνα με το μοντέλο Mohr-Coulomb.
- Παρατηρώντας τις τιμές που λαμβάνουν οι καθιζήσεις, φαίνεται ότι τείνουν να ακολουθήσουν μία ανάλογη, σταθερή μείωση, παρόμοια με το σταθερό ρυθμό (διπλασιασμό) του μέτρου ελαστικότητας. Παρ' όλα αυτά, η μείωση που ακολουθούν, σε συνδυασμό με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, χαρακτηρίζεται σταδιακή και σχεδόν σταθερή, χωρίς να επηρεάζεται από παράγοντες που θα οδηγούσαν σε μη αναμενόμενη συμπεριφορά.
- Πράγματι, αποδεικνύεται η ομοιόμορφη κατανομή τάσεων, καθώς η εικόνα επαναλαμβάνεται εκατέρωθεν του επιχώματος. Γενικά, παρατηρείται μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων, απλή ποιοτική μεταβολή και συγκεκριμένα, μείωση των τιμών. Ως προς το μηχανισμό αστοχίας και τη μηχανική συμπεριφορά δε σημειώνεται κάτι παράταιρο.

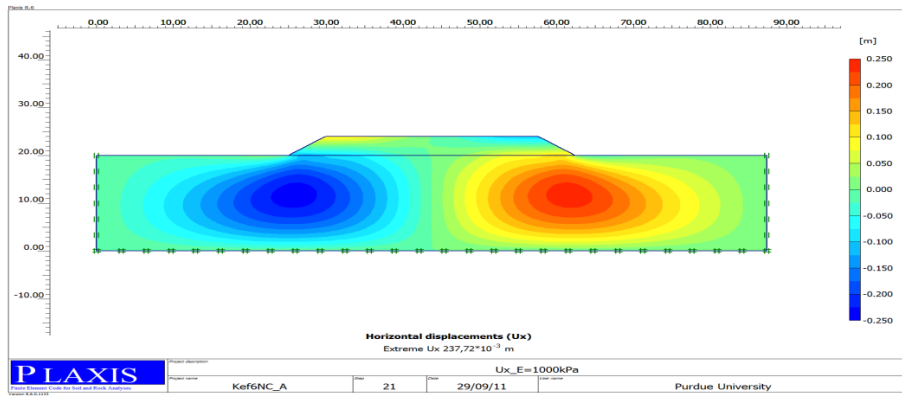
Συμπληρωματικά, διαμορφώνονται αμέσως παρακάτω, τα προκύπτοντα αποτελέσματα με τη μορφή διαγραμματικής απεικόνισης, όσον αφορά στις κατακόρυφες μετακινήσεις.



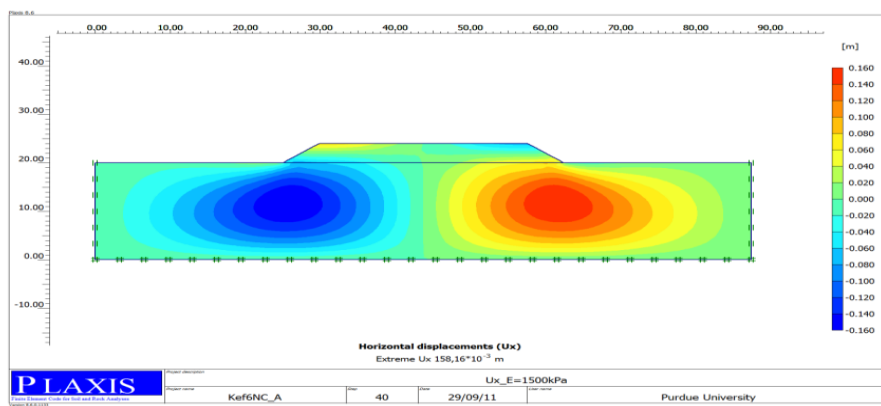
Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής μέτρου ελαστικότητας - καθιζήσεων

Ουσιαστικά, κάθε παρατήρηση που διαμορφώθηκε από την απεικόνιση του προγράμματος, αποτυπώνεται και στο διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας-καθιζήσεων. Σημειώνεται ευδιακρίτως, η μείωση των καθιζήσεων παράλληλα με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και συνεπώς την μείωση της συμπιεστότητας των εδαφών.

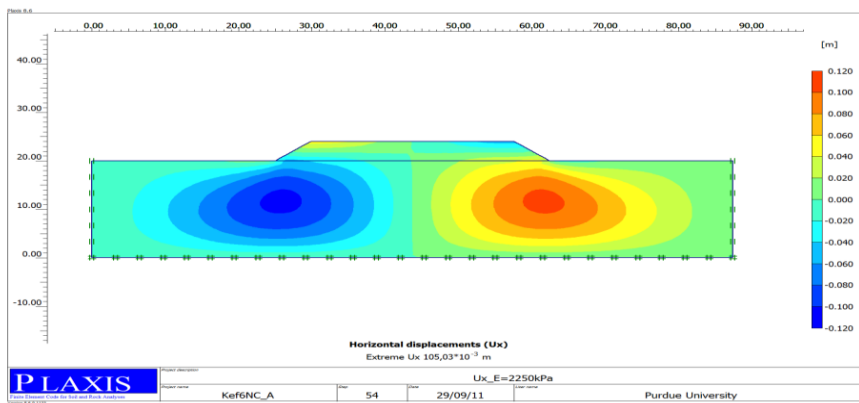
Οριζόντιες μετακινήσεις U_x



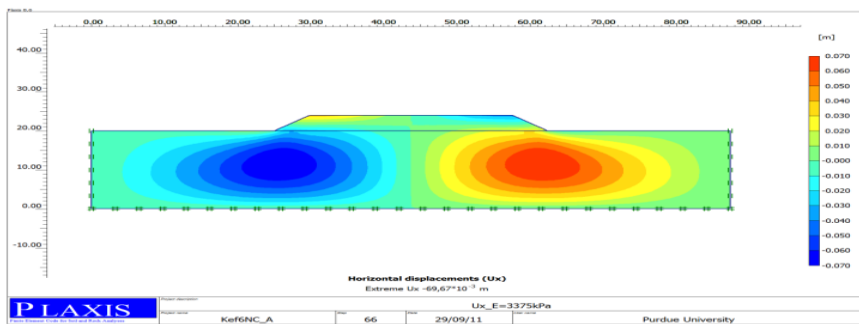
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 6.6: Οριζόντιες μετακινήσεις, (α) $E=1000\text{kPa}$, (β) $E=1500\text{kPa}$, (γ) $E=2250\text{kPa}$, (δ) $E=3375\text{kPa}$

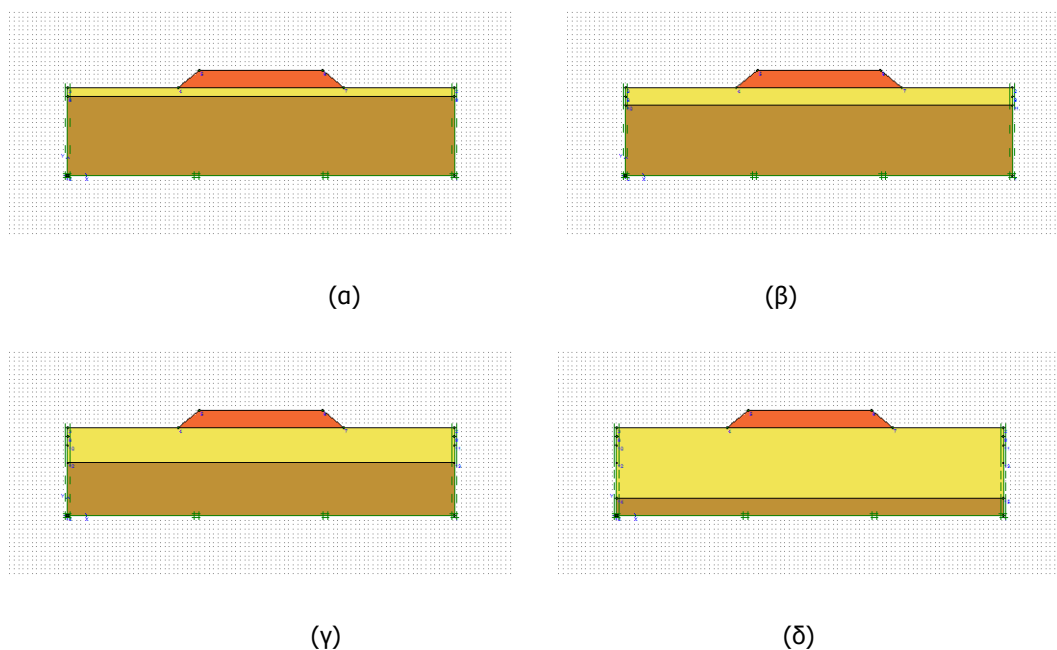
- Όπως αποδείχθηκε και από την ποσοτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων στον παραπάνω πίνακα, οι κύριες μετακινήσεις που λαμβάνουν μέρος και διαμορφώνουν στο μέγιστο ποσοστό τις συνολικές είναι οι κατακόρυφες. Παρ' όλα αυτά, παρουσιάζονται και οριζόντιες μετακινήσεις, οι οποίες σε όλες τις περιπτώσεις, μεγιστοποιούνται κάτω από τους πόδες του επιχώματος, σχεδόν στο μέσο του οργανικού στρώματος.
- Μηδενικές οριζόντιες μετακινήσεις σημειώνονται στα όρια της γεωμετρίας του μοντέλου, δηλαδή στα «τοιχώματα», καθώς και στο οριζόντιο μέσο του σχηματισμού, κάτω από το σώμα του επιχώματος. Ουσιαστικά, μηδενίζονται κατά τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του επιχώματος.
- Γενικά, αποτυπώνεται η αναμενόμενη ομοιόμορφη κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων και στα δύο μισά της γεωμετρίας, γεγονός που αποδεικνύει και πάλι την ομοιόμορφη κατανομή και την κατάλληλη επιλογή των ορίων.
- Ο ρυθμός μείωσης των οριζόντιων μετακινήσεων φαίνεται σχετικά σταθερός, όχι ανάλογος της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας, χωρίς όμως απρόσμενες και ραγδαίες αλλαγές. Διαφορά βέβαια αποτελεί στη μέγιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, ότι η αντίστοιχη μέγιστη τιμή οριζόντιων μετακινήσεων διαμορφώνεται με φορά προς τα αριστερά, ενώ στις άλλες περιπτώσεις κινούνται προς τη θετική φορά, δηλαδή προς τα δεξιά. Ωστόσο, η μετακίνηση που αναπτύσσεται στο δεξιό πόδα της εν λόγω περίπτωσης, ποσοτικά δε διαφέρει σημαντικά.

6.3 Μεταβολή πάχους στρώματος οργανικών

6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων

Σχεδιασμός γεωμετρίας

Στη δεύτερη αυτή παραμετρική ανάλυση, η γεωμετρία του μοντέλου που τίθεται προς ανάλυση ταυτίζεται με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται και πάλι για μήκος 87.4m και ύψος 20.0m, με τις διαστάσεις του επιχώματος अपαράλλαχτες και την απουσία του καναλιού. Η διαφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση, έγκειται στη μεταβλητή που λαμβάνει χώρα, καθώς δεν είναι το μέτρο ελαστικότητας, αλλά το πάχος του στρώματος των οργανικών. Με σταθερό το συνολικό πάχος των στρωμάτων, το στρώμα των οργανικών διπλασιάζεται σε κάθε στάδιο. Ξεκινώντας από το πάχος των 2m, συνεχίζοντας στα 4m, έπειτα στα 8m και τέλος στα 16m, με σταθερή πάντα την οροφή του, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και συνεπώς, αποτελεί την επιφάνεια έδρασης του επιχώματος. Τα τέσσερα διαφορετικά στάδια στα οποία αποτυπώνεται η γεωμετρία, γίνονται αντιληπτά με την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.7 : Γεωμετρία μοντέλου, (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m

Οι ρυθμίσεις των Standard Fixities, καθώς και της επιλογής του μοντέλου Mohr-Coulomb, παραμένουν ως έχουν σε όλες τις περιπτώσεις.

Προσδιορισμός παραμέτρων

Στον παρακάτω πίνακα διαφαίνονται όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που εισάγονται για τη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των σχηματισμών που συμμετέχουν. Διαφοροποίηση επίσης υπάρχει, με την προηγούμενη περίπτωση και ως προς τους σχηματισμούς που παίρνουν μέρος στο μοντέλο, δεδομένο το οποίο επαναλαμβάνεται και στην επόμενη περίπτωση. Στο μοντέλο που μελετάται, τα υπεδαφικά στρώματα συνίστανται από οργανικά υλικά, όπως προαναφέρθηκε, καθώς και από αμμόδη, τα οποία «συμπληρώνουν» τη γεωμετρία, στην κάθε αλλαγή του πάχους των οργανικών, ώστε το συνολικό πάχος να αθροίζεται στα 20.0m, πλην του επιχώματος.

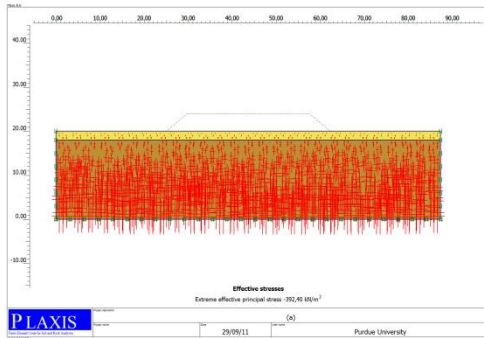
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά σχηματισμών

Έδαφος	γ_{sat} [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	ψ [°]	ν	E [kPa]
Οργανικά	14.6	6	27	0	0.25	2000
Άμμος	21.4	0.1	34	2	0.35	40000
Επίχωμα	22	0.1	35	5	0.35	50000

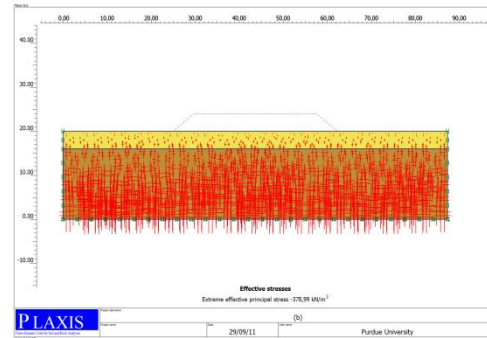
Καθορισμός αρχικών συνθηκών

Σύμφωνα με τις αρχικές υδροστατικές τάσεις, η εικόνα επαναλαμβάνεται, καθώς δεν υπήρξε καμία αλλαγή ως προς τον φρεάτιο ορίζοντα ή στην επιλογή των στραγγιζόμενων συνθηκών. Για το λόγο αυτό, η εικόνα που θα μπορούσε να παρουσιαστεί παραλείπεται, καθώς δε διαφέρει με την ήδη προβαλλόμενη ανωτέρω.

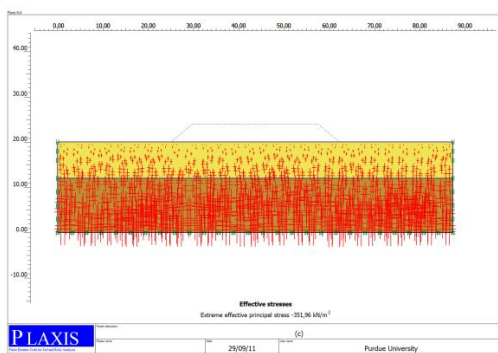
Αντίθετα, με την εισχώρηση πλέον νέων σχηματισμών και κατά συνέπεια νέων φυσικών χαρακτηριστικών, αλλαγή υπάρχει ως προς τις αρχικές γεωστατικές τάσεις, η οποία υπολογίστηκε με το γνωστό τρόπο και τα αποτελέσματά της φαίνονται παρακάτω.



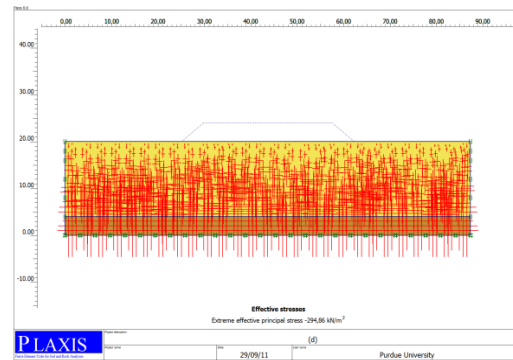
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 6.8 : Γεωστατικές τάσεις, (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m

Όπως προαναφέρθηκε, τα στάδια επίλυσης είναι επίσης τα ίδια, δηλαδή, αρχικό είναι αυτό των αρχικών συνθηκών και έπεται η επιβολή του επιχώματος, γεγονός που ισχύει και για την επόμενη περίπτωση, όπως επίσης και ο τύπος επίλυσης μέσω πλαστικής ανάλυσης, γι' αυτό και παραλείπονται.

6.3.2 Διεξαγωγή αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

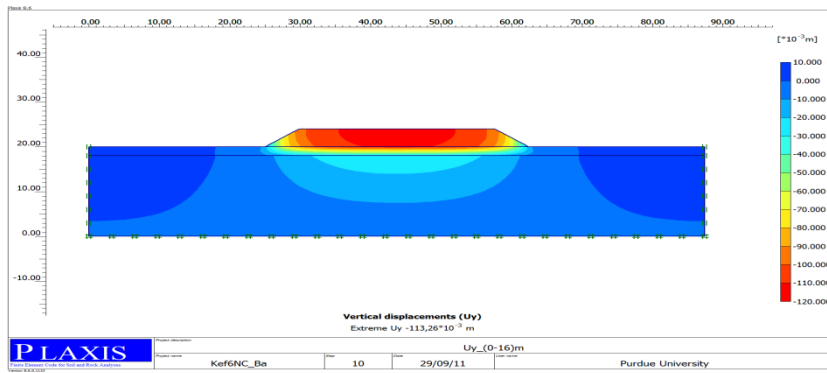
Σύμφωνα με τη μεταβλητή που εξετάζεται στην παραμετρική αυτή ανάλυση του πάχους του οργανικού στρώματος, αναμένεται η εικόνα κατά την οποία, ο διπλασιασμός του πάχους του στρώματος των οργανικών θα οδηγεί σε αύξηση των μετακινήσεων και ιδιαίτερα των καθιζήσεων. Πράγματι, η εικόνα αυτή παρουσιάζεται με την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της επίλυσης, που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης μεταβολής πάχους

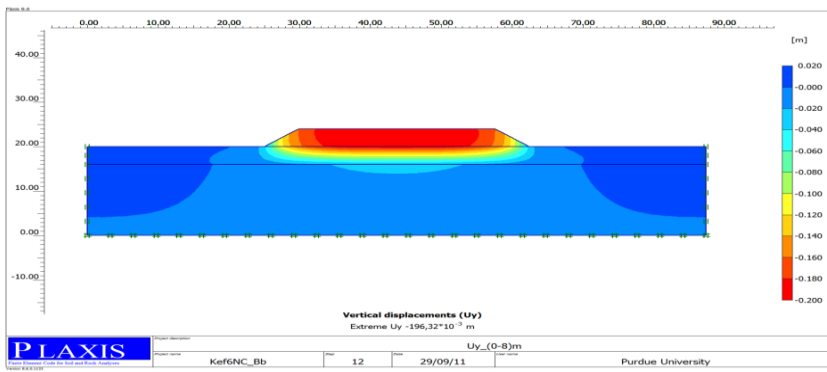
Πάχος οργανικών [m]	Ολικές μετακ. U_{tot} [m]	Κατακόρυφες μετακ. U_y [m]	Οριζόντιες μετακ. U_x [m]
0-2	0.11	0.11	0.03
0-4	0.20	0.20	0.04
0-8	0.36	0.36	0.06
0-16	0.67	0.67	0.11

Πιο αναλυτικά και περισσότερο παραστατικά, αναλύονται τα ανωτέρω αποτελέσματα με τη βοήθεια των απεικονίσεων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Ταυτόχρονα, για τις κατακόρυφες και τις οριζόντιες μετακινήσεις ακολουθεί και ο σχολιασμός των, καθώς και τα ανάλογα συμπεράσματα.

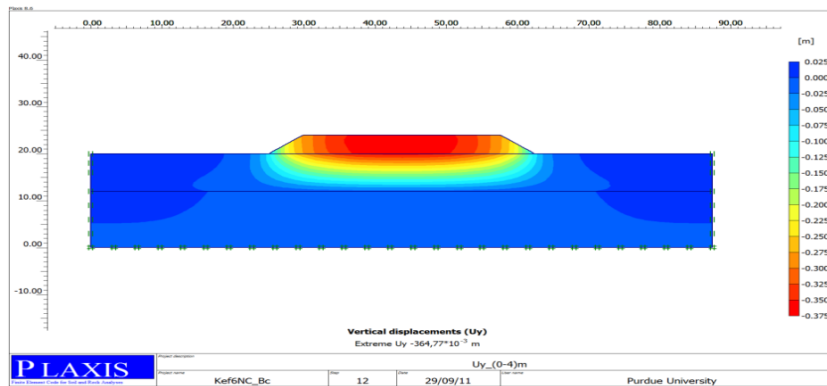
Κατακόρυφες μετακινήσεις U_y



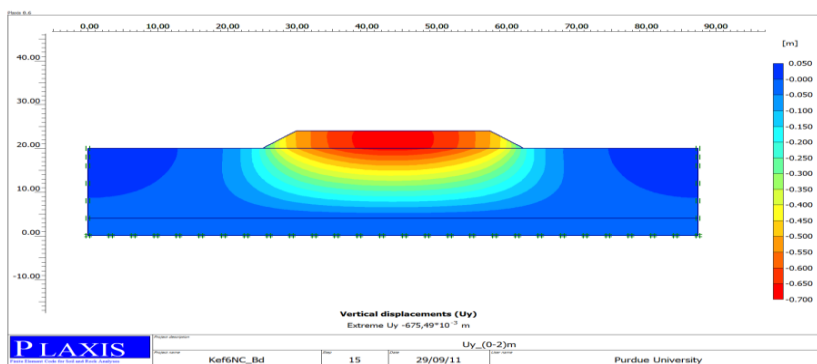
(α)



(β)



(γ)

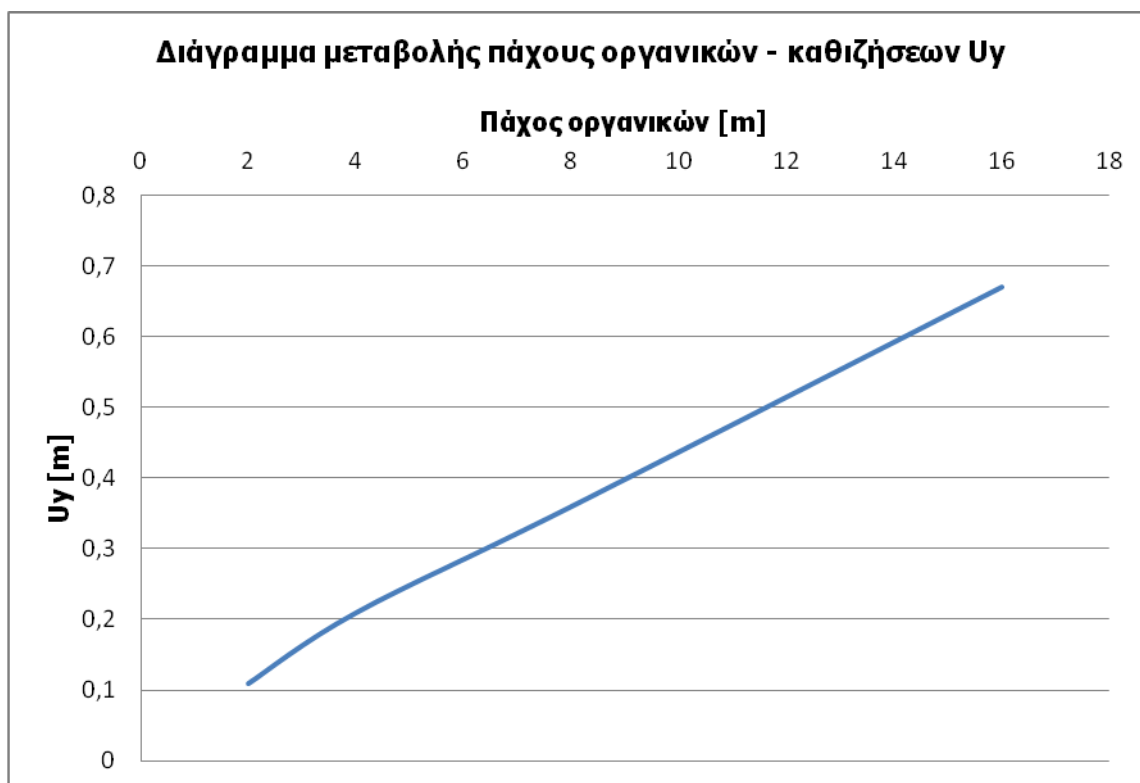


(δ)

Εικόνα 6.9: Κατακόρυφες μετακινήσεις U_x , (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m

- Όπως αναμένονταν, αλλά και όπως έχει ήδη παρατηρηθεί, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις αναπτύσσονται κάτω από το κέντρο του επιχώματος. Το ποσοστό «εισχώρησης» των μετακινήσεων στον υποκείμενο εδαφικό σχηματισμό εξαρτάται, όπως αποδεικνύεται, από το πάχος που καταλαμβάνει το οργανικό στρώμα. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου το οργανικό στρώμα καλύπτει τα πρώτα 2m του συνολικού πάχους και κάτω από αυτά ακολουθούν τα αμμώδη υλικά, οι κατακόρυφες μετακινήσεις δεν επηρεάζονται σε μέγιστο βαθμό, ενώ οι μέγιστες τιμές τους αγγίζουν οριακά τη διεπιφάνεια επιχώματος – οργανικών. Προχωρώντας στις επόμενες περιπτώσεις, παρατηρείται μία προοδευτική καθοδική κίνηση των καθιζήσεων, ως προς την ανάπτυξή τους στον υποκείμενο σχηματισμό, με μέγιστη εισχώρηση στην περίπτωση που τα οργανικά καταλαμβάνουν το πάχος των 16m.
- Ως προς τις ελάχιστες τιμές των καθιζήσεων, παρατηρούνται στα πλευρικά όρια της γεωμετρίας, καθώς και όσο πλησιάζουν το έδαφος των σχηματισμών. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν διαφοροποιήσεις ως προς τα σημεία αποτόνωσης των καθιζήσεων, ανάλογα με το πάχος του οργανικού στρώματος.
- Αναφορικά στη γενικότερη εικόνα που προβάλλεται, τα συμπεράσματα που προκύπτουν διαφαίνονται εύλογα, σύμφωνα και με το θεωρητικό υπόβαθρο που καλύπτει την ανάλυση αυτή. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος των οργανικών, τόσο μεγαλύτερα και εντονότερα προβλήματα καθιζήσεων προκύπτουν, δεδομένου ότι και το συνολικό πάχος παραμένει σταθερό. Σαφώς, στην περίπτωση των 2m, τα 18m άμμου που ακολουθούν είναι ικανά να παραλάβουν και να απορροφήσουν τις καθιζήσεις, σε μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με την τελευταία περίπτωση, όπου απομένουν 4m άμμου, λόγω των 16m οργανικών.

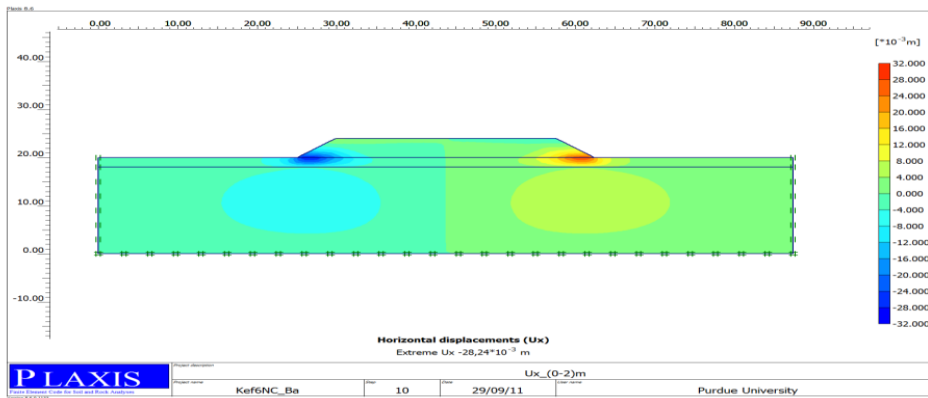
Παρόμοια με την προηγούμενη παραμετρική ανάλυση, ακολουθεί διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ως προς τις κατακόρυφες μετακινήσεις.



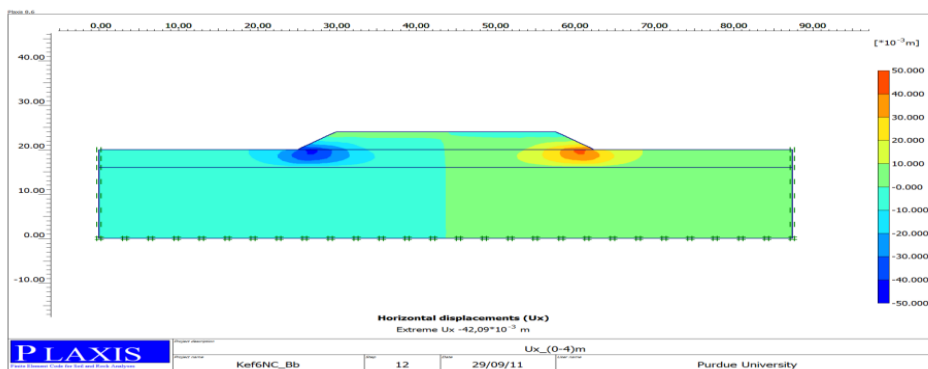
Διάγραμμα 6.2: Διάγραμμα μεταβολής πάχους οργανικών - καθιζήσεων

Σύμφωνα και με τη διαγραμματική απεικόνιση, επιβεβαιώνονται τα ανωτέρω συμπεράσματα παρατηρώντας την αύξηση των καθιζήσεων με την ταυτόχρονη αύξηση του πάχους των οργανικών.

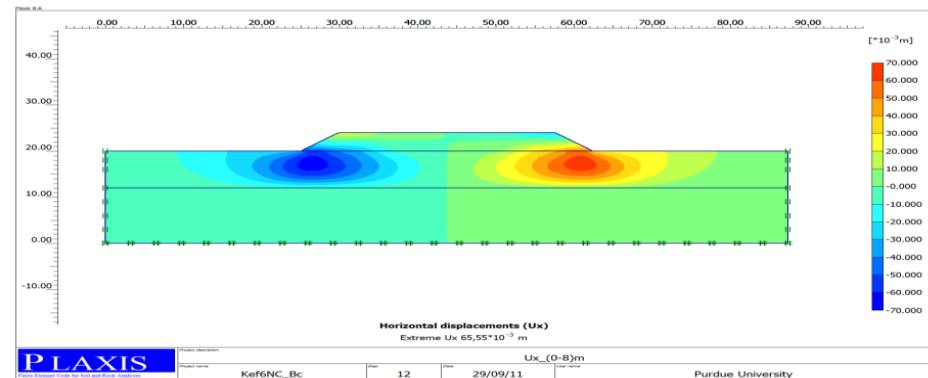
Οριζόντιες μετακινήσεις U_x



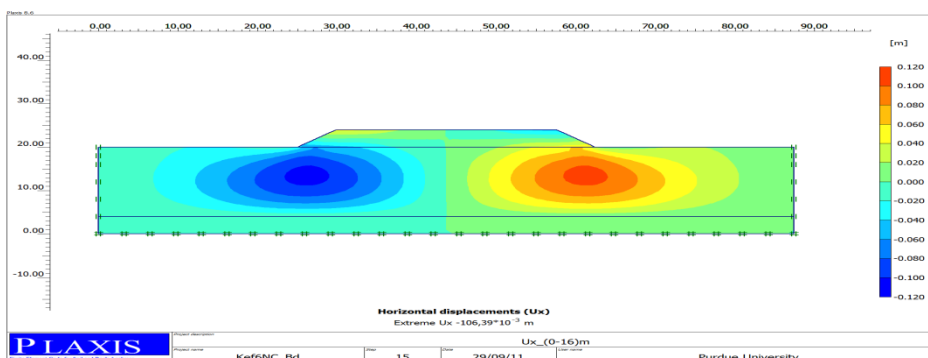
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 6.10: Οριζόντιες μετακινήσεις U_x , (α) 0-2m, (β) 0-4m, (γ) 0-8m, (δ) 0-16m

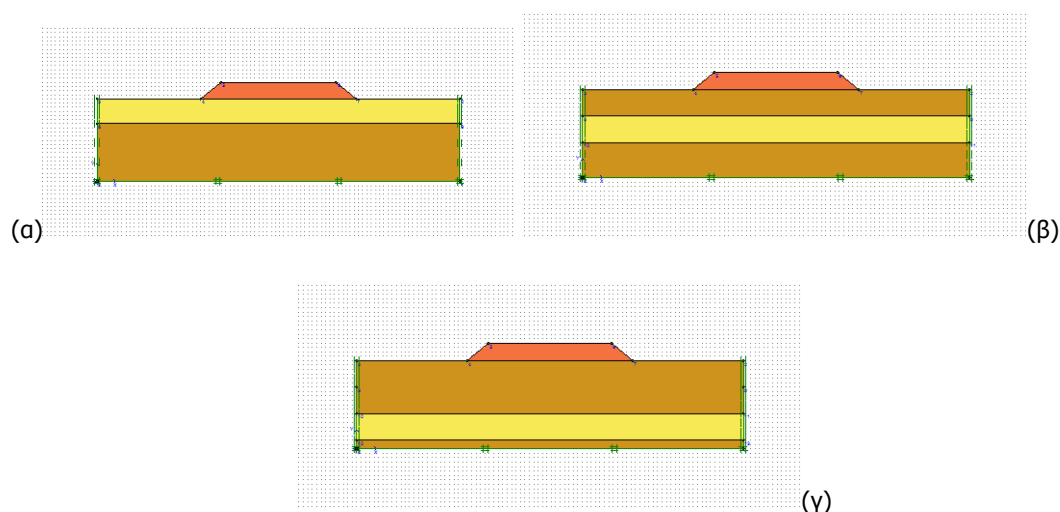
- Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται όπως ήταν αναμενόμενο, στους πόδες του επιχώματος και σαφώς, αυξάνονται όσο αυξάνεται το πάχος των οργανικών. Με την αύξηση του πάχους των οργανικών, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις μετατοπίζονται προς το κατακόρυφο κέντρο του εκάστοτε στρώματος.
- Όπως και στην πρώτη παραμετρική ανάλυση, οι ελάχιστες ή μηδενικές τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων σημειώνονται κυρίως, κατά τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του επιχώματος, ενώ αποτόνωσή τους πραγματοποιείται όσο προσεγγίζονται τα πλευρικά όρια και το στρώμα των αμμωδών υλικών.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέγιστη κίνηση των παραμορφώσεων κατευθύνεται κατά την αρνητική φορά, δηλαδή προς τα αριστερά, εκτός από την περίπτωση, όπου τα οργανικά καταλαμβάνουν 8m πάχος, στην οποία εκδοχή, οι μέγιστες τιμές κινούνται προς τη θετική φορά.
- Γενικά, παρατηρείται μία γνωστή εικόνα, ομοιόμορφης κατανομής και ομαλής αύξησης των τιμών των μετακινήσεων, σε σχέση με την αύξηση του πάχους των οργανικών. Παρ' όλα αυτά, συμπεραίνεται ότι η ύπαρξη οργανικών υλικών και ιδιαίτερα σε μεγάλο πάχος, επηρεάζει καθοριστικότερα τις κατακόρυφες μετακινήσεις και σε αρκετά μικρότερο βαθμό, τις οριζόντιες.

6.4 Μεταβολή της απόστασης του οργανικού στρώματος από την εδαφική επιφάνεια

6.4.1 Εισαγωγή δεδομένων

Σχεδιασμός γεωμετρίας

Παρόμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, η γεωμετρία του μοντέλου της τρίτης παραμετρικής ανάλυσης παραμένει ίδια, ως προς το μήκος και το πάχος, καθώς και ως προς τις ρυθμίσεις παρεμποδιζομένων μετακινήσεων των συνόρων. Η μεταβλητή η οποία καθορίζει τις αναλύσεις στην περίπτωση αυτή, είναι η απόσταση του στρώματος των οργανικών υλικών. Διατηρώντας σταθερό το συνολικό πάχος, αλλά και το πάχος των 6m του οργανικού στρώματος, πραγματοποιούνται σταδιακές αναλύσεις με την απομάκρυνση από την επιφάνεια του εδάφους του σχηματισμού των οργανικών. Ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους, όπου τα οργανικά καταλαμβάνουν τα πρώτα 6m του συνολικού σχηματισμού και ως εκ τούτου αποτελούν την επιφάνεια έδρασης του επιχώματος, ακολουθεί το επόμενο στάδιο, όπου τα οργανικά βρίσκονται μεταξύ των 6m -12m. Αντίστοιχα, στο τελευταίο βήμα επίλυσης, καταλαμβάνουν το υψόμετρο των 12m -18m, ενώ κάθε φορά, η υπόλοιπη στρωματογραφία καλύπτεται από σχηματισμό αμμωδών υλικών.



Εικόνα 6.11: Γεωμετρία μοντέλου, (α) 0-6m, (β) 6-12m, (γ) 12-18m

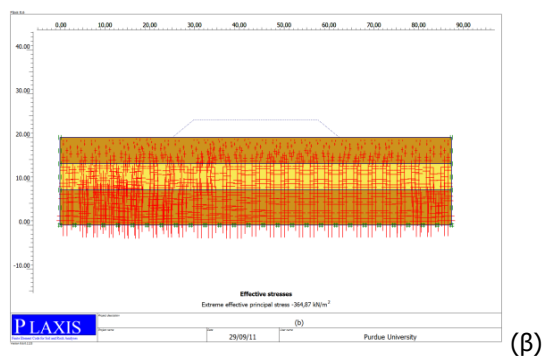
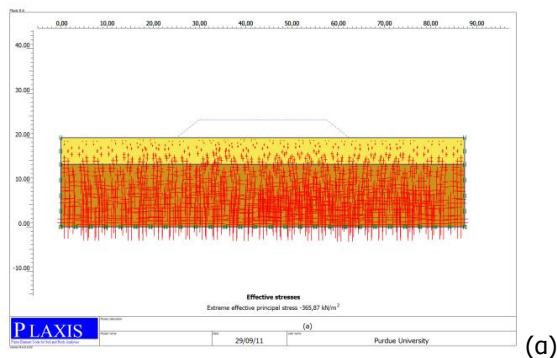
Προσδιορισμός παραμέτρων

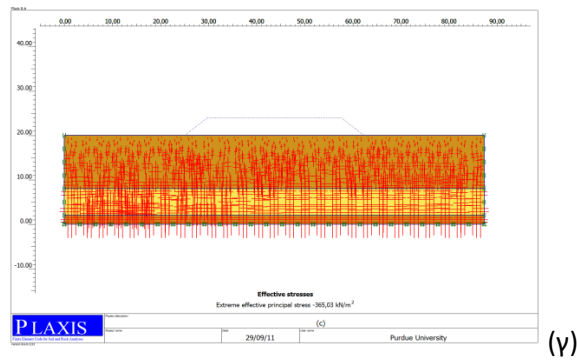
Κατά τον ίδιο τρόπο, παραθέτονται παρακάτω τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών που συμμετέχουν στην ανάλυση, τα οποία όπως γίνεται αντιληπτό δεν παρουσιάζουν καμία διαφορά.

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά σχηματισμών

Έδαφος	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]	ψ [°]	ν	E [kPa]
Οργανικά	14.6	6	27	0	0.25	2000
Άμμος	21.4	0.1	34	2	0.35	40000
Επίχωμα	22	0.1	35	5	0.35	50000

Παρατηρώντας τη συμμετοχή των ίδιων σχηματισμών στη συγκεκριμένη ανάλυση, μπορεί να κατανοηθεί η παράλειψη του βήματος του καθορισμού των αρχικών συνθηκών ως προς τις αρχικές υδροστατικές συνθήκες, καθώς ο φρεάτιος ορίζοντας παραμένει ίδιος. Ωστόσο, οι αρχικές γεωστατικές τάσεις έχουν μεταβληθεί, γεγονός που φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν, αν και οι διαφορές είναι αρκετά μικρές.





Εικόνα 6.12: Γεωστατικές τάσεις, (α) 0-6m, (β) 6-12m, (γ) 12-18m

6.4.2 Διεξαγωγή αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

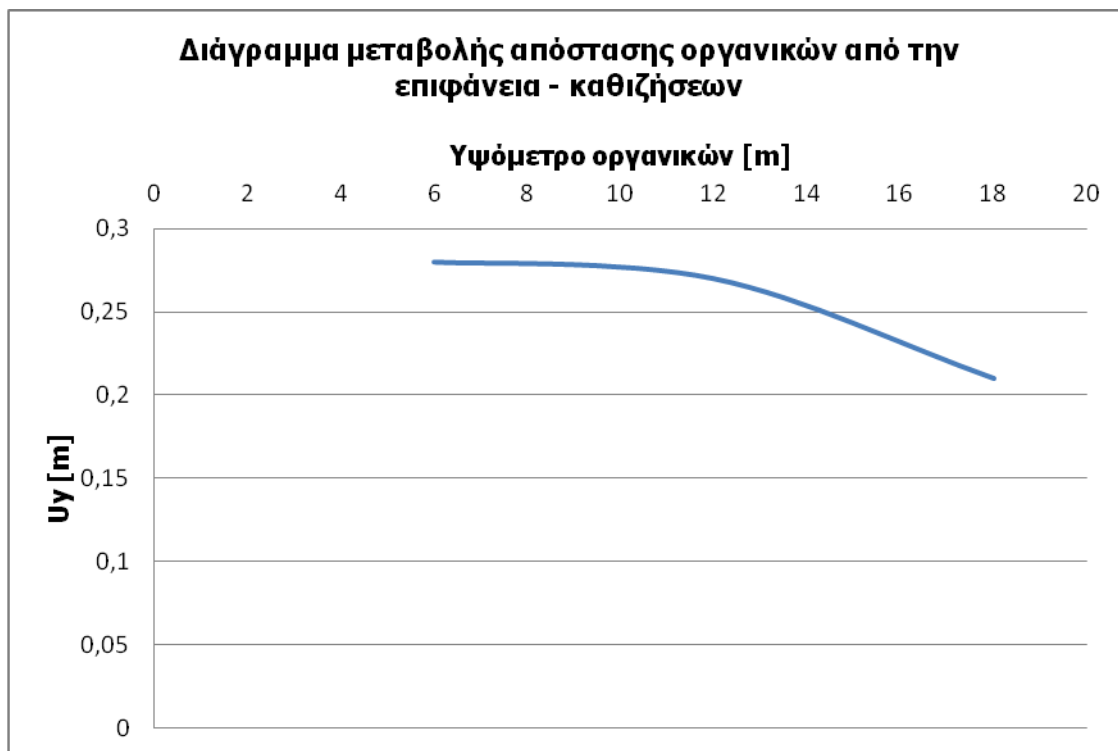
Λαμβάνοντας υπόψη την απομάκρυνση του στρώματος των οργανικών από την επιφάνεια έδρασης, αναμένεται μείωση των μετακινήσεων και ιδιαίτερα των καθιζήσεων. Αντίστοιχη εικόνα αποτυπώνεται και στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης μεταβολής απόστασης

Υψόμετρο οργανικών [m]	Ολικές μετακ. U_{tot} [m]	Κατακόρυφες μετακ. U_y [m]	Οριζόντιες μετακ. U_x [m]
0-6	0.28	0.28	0.05
6-12	0.27	0.27	0.05
12-18	0.21	0.21	0.04

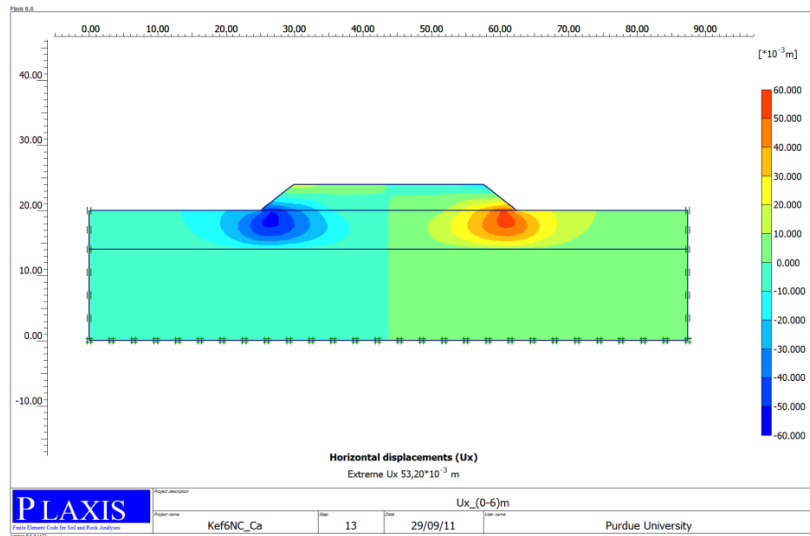
- Αντίστοιχα, οι μέγιστες τιμές καθιζήσεων αναπτύσσονται μέσα στο σώμα του επιχώματος και επεκτείνονται προς το υποκείμενο στρώμα. Στην πρώτη περίπτωση, το στρώμα αυτό απομακρύνεται από την επιφάνεια και οδεύει προς το δάπεδο του σχηματισμού. Στην περίπτωση που αποτελούν το πρώτο στρώμα από την επιφάνεια, οι μέγιστες τιμές καθιζήσεων αγγίζουν ελαφρώς τη διεπιφάνεια επιχώματος-οργανικών, ενώ η αποτόνωσή τους σχεδόν ολοκληρώνεται με τη συνάντηση του αμμώδους σχηματισμού.
- Στην επόμενη περίπτωση, όπου το στρώμα των οργανικών παρεμβάλλεται μεταξύ των αμμωδών σχηματισμών, οι τιμές των καθιζήσεων είναι μειωμένες. Ωστόσο, οι μέγιστες τιμές υπεισέρχονται εντονότερα στο πρώτο υποκείμενο του επιχώματος στρώμα, της άμμου. Η εικόνα βέβαια επιδεικνύει και τη μείωση του εύρους ανάπτυξης των μέγιστων καθιζήσεων εντός του σώματος του επιχώματος, καθώς φαίνεται να συσπειρώνονται προς το κέντρο της γεωμετρίας του, σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση, όπου διευρύνονταν σχεδόν σε όλο το σώμα. Η αποτόνωση των κατακόρυφων κινήσεων, σχεδόν ολοκληρώνεται λίγο μετά την προσπέλαση και του οργανικού στρώματος.
- Τέλος, στην τελευταία περίπτωση, όπου τα οργανικά απέχουν κατά 8m από την επιφάνεια του εδάφους, οι μέγιστες τιμές, ακολουθούν μεν το γνωστό προφίλ του μηχανισμού αστοχίας, εισέρχονται όμως σε μεγάλο βαθμό στα υποκείμενα αμμώδη στρώματα. Επίσης, ως προς το σώμα του επιχώματος, παρουσιάζονται ακόμα πιο συγκεντρωμένες γύρω από το μέσο του επιχώματος. Η αποτόνωση των εν λόγω καθιζήσεων, πραγματοποιείται με την προσέγγιση του οργανικού στρώματος και ολοκληρώνονται, εξέρχοντας από αυτό.
- Ως προς τη γενικότερη εικόνα, ο ρυθμός μείωσης των καθιζήσεων κρίνεται και πάλι ομαλός, συγκριτικά με τη μεταβλητή της απόστασης και η εικόνα που προκύπτει δεν παρουσιάζει απρόσμενη μορφή. Συνοψίζοντας, σημειώνεται ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στις καθιζήσεις προξένησε η παρουσία των οργανικών πλησιέστερα στο έδαφος, έπειτα από μελέτη των προκυπτουσών τιμών.

Αντίστοιχα, τα ανωτέρω αποτελέσματα αποτυπώνονται αμέσως με διαγραμματική μορφή. Πράγματι, η μορφή και η κατεύθυνση της γραμμής του διαγράμματος αποδεικνύει τα όσα ελέχθησαν, καθώς δίνει και μία πρόβλεψη για την περαιτέρω πορεία της εν λόγω παραμετρικής ανάλυσης.

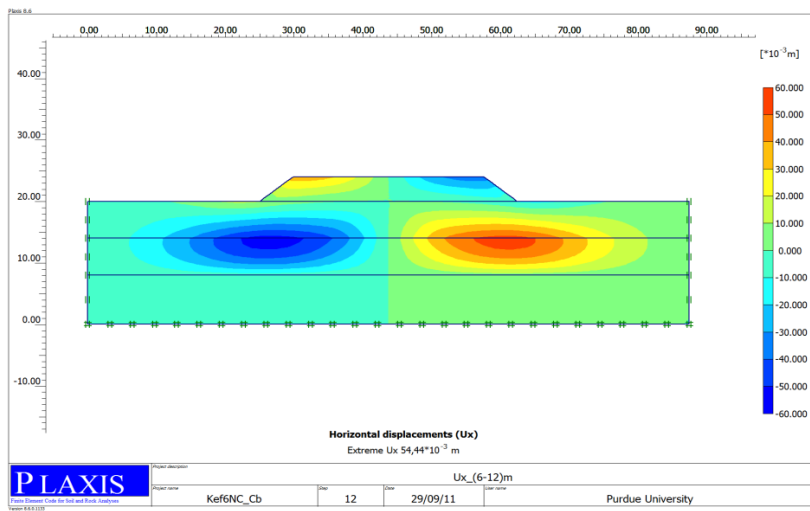


Διάγραμμα 6.3: Διάγραμμα υψομέτρου στρώματος οργανικών – καθιζήσεων

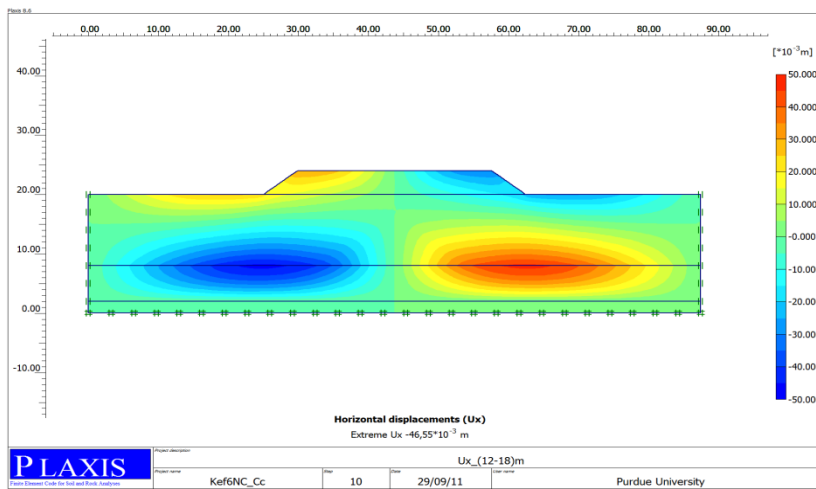
Οριζόντιες μετακινήσεις U_x



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 6.14: Οριζόντιες μετακινήσεις (α) 0-6m, (β) 6-12m, (γ) 12-18m

- Ως προς τις οριζόντιες μετακινήσεις, φαίνονται οι μέγιστες τιμές να αναπτύσσονται στους άξονες που διέρχονται από τους πόδες του επιχώματος, είτε συμπίπτουν με αυτούς, είτε όχι, ανάλογα του υψομέτρου των οργανικών.
- Στην πρώτη περίπτωση, με τα οργανικά ως πρώτο υποκείμενο στρώμα, οι μέγιστες τιμές, όπως αναμενόταν, βρίσκονται στους πόδες του επιχώματος, με τιμές που συνιστούν το 17% των συνολικών παραμορφώσεων. Η αποτόνωσή τους παρατηρείται στα πλευρικά όρια του μοντέλου, καθώς και στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του επιχώματος.
- Τα οργανικά ως παρεμβαλλόμενο στρώμα, οδήγησαν στην ανάπτυξη οριζόντιων κινήσεων ποσοτικά μικρότερων και με μέγιστη ανάπτυξη στη διεπιφάνεια μεταξύ του πρώτου υποκείμενου αμμώδους στρώματος με τα οργανικά, κατά τον κατακόρυφο άξονα των ποδών του επιχώματος. Οι τιμές που αναπτύχθηκαν αποτελούν το 18.5% περίπου των συνολικών μετακινήσεων, ενώ η αποτόνωσή τους παρουσιάζει παρόμοιο προφίλ.
- Τέλος, αντίστοιχη εικόνα, ποιοτικά, παρουσιάζεται και στην τρίτη περίπτωση, σαφώς μετατοπισμένη προς το έδαφος των σχηματισμών. Μέγιστες τιμές μειωμένες συγκριτικά, με ανάπτυξή τους στη διεπιφάνεια άμμου-οργανικών, με μειωμένο όμως εύρος αποτόνωσης. Παρ' όλα αυτά, οι ελάχιστες ή μηδενικές τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων εντοπίζονται στα ίδια σημεία. Οι τιμές των μέγιστων, σε αυτήν την περίπτωση, συμμετέχουν στο 24% των συνολικών, μέγεθος που διαφοροποιεί ελαφρώς την επίδραση του υψομέτρου των οργανικών στις οριζόντιες μετακινήσεις.
- Συμπεραίνοντας, απόρροια των παραπάνω είναι η εντονότερη επίδραση στις μεταβολές των μετακινήσεων της περίπτωσης κατά την οποία, τα οργανικά απέχουν κατά 8m από την επιφάνεια του εδάφους και μόλις 2m από το δάπεδο των σχηματισμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη και κατασκευή επιχωμάτων αποτελεί σύνθετο αντικείμενο της γεωτεχνικής μηχανικής. Στις κλασσικές περιπτώσεις, ο σχεδιασμός ενός επιχώματος περιλαμβάνει τόσο αναλύσεις ευστάθειας πρανών, όσο και εκτιμήσεις των παραμορφώσεων (καθιζήσεων). Επιπλέον, στις περιπτώσεις που το έδαφος θεμελίωσης χαρακτηρίζεται από φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα στα συμπιεστά αργιλικά εδάφη, η ανάλυση ως προς τη φέρουσα ικανότητα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της μελέτης.

Συχνά, ο σχεδιασμός ενός τεχνικού έργου δημιουργεί την ανάγκη κατασκευής επιχωμάτων επί οργανικών εδαφών. Τα οργανικά εδάφη αποτελούν μία πολύ ιδιαίτερη περίπτωση εδαφών θεμελίωσης, με κύριο χαρακτηριστικό τους την πολύ μεγάλη συμπιεστότητα και τα πολύ υψηλά ποσοστά φυσικής υγρασίας. Ως προς τη συμπεριφορά τους υπό συνθήκες φόρτισης, τα οργανικά εδάφη χαρακτηρίζονται από το φαινόμενο της δευτερογενούς συμπίεσης (ερπυσμός), δηλαδή από το φαινόμενο των παραμορφώσεων υπό σταθερή φόρτιση. Η δευτερογενής συμπίεση ή στερεοποίηση όχι μόνο προκαλεί εκτεταμένες καθιζήσεις στη διεπιφάνεια εδάφους θεμελίωσης – κατασκευής, αλλά οι καθιζήσεις αυτές εξελίσσονται και ολοκληρώνονται σε πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια, η μελέτη και εν συνεχεία η κατασκευή επιχωμάτων (αλλά και οποιονδήποτε τεχνικών έργων) επί οργανικών εδαφών αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα και ταυτόχρονα πρόκληση στα πλαίσια μιας γεωτεχνικής μελέτης. Ως επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος και όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, επιλέγεται η απομάκρυνση από τη θέση θεμελίωσης των εν λόγω οργανικών εδαφών και η αντικατάστασή τους με εδάφη υψηλότερων μηχανικών χαρακτηριστικών. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, μία τέτοια πρακτική δεν είναι τεχνικοοικονομικά εφικτή, για παράδειγμα λόγω του μεγάλου πάχους των οργανικών στρωμάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις επιλέγονται άλλου τύπου λύσεις, όπως η χρήση τεχνολογιών βελτίωσης εδαφών ή η κατασκευή των επιχωμάτων με πολύ αργούς ρυθμούς (τμηματικά) έτσι ώστε να δίνεται ο χρόνος εκδήλωσης της δευτερογενούς συμπίεσης.

Σε κάθε περίπτωση, η χρήση αριθμητικών μεθόδων αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην προσπάθεια επίλυσης των παραπάνω προβλημάτων. Σε αυτό το πλαίσιο, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μακροχρόνια συμπεριφορά επιχώματων επί οργανικών εδαφών υπό το πρίσμα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Πρωταρχικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η απόδειξη της ικανότητας (validation) του γεωτεχνικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis στη μοντελοποίηση και επίλυση τέτοιου είδους γεωτεχνικών προβλημάτων. Σε αυτή την κατεύθυνση, χρησιμοποιήθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία τα δεδομένα μίας μελέτης περίπτωσης (case study) ενός πραγματικού επιχώματος οδοποιίας, το οποίο κατασκευάστηκε στην Ελβετία. Για το συγκεκριμένο επίχωμα, οι τελικές παραμορφώσεις ήταν γνωστές από οργανομετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί μετά την κατασκευή του επιχώματος. Μέσω της διαδικασίας της αριθμητικής προσομοίωσης του συγκεκριμένου προβλήματος, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Σε μακροχρόνιες (στραγγιζόμενες) συνθήκες, τα οργανικά υλικά αναπτύσσουν σημαντικές εδαφικές παραμορφώσεις. Ποσοτική απόδειξη του εν λόγω συμπεράσματος αποτελούν τα 740mm κατακόρυφων παραμορφώσεων (καθιζήσεων) που προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία, αλλά και τα 106mm οριζόντιων παραμορφώσεων.
- Η παρουσία του συμπορευόμενου καναλιού με το επίχωμα απεδείχθη σχετικά μικρής σημασίας, καθώς οι αριθμητικές διαφορές μεταξύ των δύο ποδών του επιχώματος, της τάξης των 20mm, κρίνονται ελάχιστες.
- Ο απώτερος στόχος, περί αξιόπιστης προσομοίωσης του προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis, επετεύχθη, σύμφωνα με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης και του πραγματικού προβλήματος. Επομένως, η εγγύτητα των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας μέσω Plaxis, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προβλήματος της Ελβετίας, κατοχύρωσε της ορθότητα της υπολογιστικής διαδικασίας και κατ' επέκταση, την αξιοπιστία του προγράμματος στην προσομοίωση του προβλήματος.

Σε συνέχεια των παραπάνω, τέθηκε ο επόμενος στόχος, περί μελέτης αντίστοιχων γενικότερων περιπτώσεων επιχωμάτων σε οργανικά εδάφη, με παραμετρικές αναλύσεις, προσανατολισμένες στους παράγοντες του μέτρου ελαστικότητας E , του πάχους του στρώματος των οργανικών, αλλά και της θέσης του, στο σύνολο των σχηματισμών.

- Τα αποτελέσματα που προέκυψαν οδήγησαν σε συμπεράσματα που θεωρητικά ήδη αποδεικνύονταν. Ως προς το μέτρο ελαστικότητας E , το οποίο και εξ ορισμού αποτελεί μία παράμετρο που συνδέεται με τη συμπιεστότητα των εδαφών, αποδείχθηκε πως με την αύξησή του στα οργανικά υλικά, οι καθιζήσεις που αναπτύσσονται μειώνονται. Χωρίς την παρουσία του καναλιού και με μόνο περιβάλλοντα σχηματισμό αυτό των οργανικών, προέκυψε και ποσοτικά, η μείωση της συνεκτικότητας των υλικών, λόγω της αύξησης της τιμής του μέτρου ελαστικότητας και συνεπώς, ο περιορισμός των καθιζήσεων.
- Υπό τις ίδιες συνθήκες και με την προσθήκη στρώματος μη συνεκτικού υλικού (άμμου), οι αναλύσεις που υλοποιήθηκαν με μεταβλητή το πάχος του στρώματος των οργανικών, συνέπιπταν με τα αναμενόμενα από θεωρητική πλευρά, αποτελέσματα. Με σταθερό το συνολικό πάχος των σχηματισμών, αλλά και το μέτρο ελαστικότητας, απεδείχθη η αύξηση των καθιζήσεων καθώς αυξάνεται το πάχος του στρώματος. Το γεγονός αυτό αποτελεί ακόμα μία ένδειξη της κρίσιμης παρουσίας των οργανικών σε τεχνικά έργα.
- Τέλος, διατηρώντας σταθερό το συνολικό πάχος και πάλι, καθώς και τις υπόλοιπες χαρακτηριστικές παραμέτρους, υπό τη μεταβολή της θέσης του οργανικού στρώματος, εξήχθη το συμπέρασμα περί μείωσης των καθιζήσεων κατά την απομάκρυνση του κρίσιμου στρώματος. Ουσιαστικά, το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από την ικανότητα των υπερκείμενων αμμωδών και συνεπώς μη συνεκτικών εδαφών, να παραλαμβάνουν την επικείμενη φόρτιση, λόγω του επιχώματος και να την αποτονώνουν εντός του διαθέσιμου χρόνου, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα αστοχίας λόγω των οργανικών υλικών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ξένη Βιβλιογραφία

Brinkgreve, R.B.J., Khourg, A., Bakker, K.J., Bonnier, P.G., Brand, P.J.W., Broere, W., Burd, H.J., Soltys, G. and Vermeer, P.A., 2002. Plaxis Manual 2-D, Version 8. Netherlands: Delft University of Technology & Plaxis b.v.

Coduto, Man-Chu, Yeung, R. and Kitch, W., 1999. Geotechnical engineering: principles and practices.

Edil, T.B. and Dhowiam, A.W., 1981. At-Rest Lateral Earth Pressure of Peat Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107 (2), 201-217.

Gündüz, B., 2008. Analysis of settlements of test embankments during 50 years.

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. An introduction to geotechnical engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Huat, B., Kazemian, S., Prasad, A. and Barghchi, M., 2010. A study of the compressibility behavior of peat stabilized by DMM: Lab Model and Finite Element analysis. *Scientific Research and Essays*, 6 (1), 196-204, January 2011.

Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1969. *Soil Mechanics: Series in Soil Engineering*.

Landva and Pheeneey, 1980. The Shear Strength Behavior of Two Peaty Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 23 (6), 679-695.

Mesri, G., Ajlouni, M.A., Feng, T.W. and Lo, D.O.K., 1997. Surcharging of Soft Ground to Reduce Secondary Settlement.

Rowe, R.K. and Mylleville B.L.J., 1996. A geogrid reinforced embankment on peat over organic silt: a case history.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γουρνιαζάκη, Ε., 2004. Διερεύνηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των οργανικών εδαφών των Τεναγών Φιλιππων. Πτυχιακή εργασία. ΤΕΙ Κρήτης.

Κίρτας, Ε., 2010. Εδαφομηχανική. Κεφάλαιο 6: Καθιζήσεις επιφανειακών θεμελιώσεων. Σ.Τ.Ε.Φ ΤΕΙ Σερρών.

Κουλού, Μ. και Δάμου, Ε., 2009. Καθιζήσεις εδάφους. Πτυχιακή εργασία. ΤΕΙ Θεσσαλονίκης.

Πανταζής, Ε., 2011. Στατική και δυναμική επίλυση πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παπαδόπουλος, Στ.Μ., Καλλιόγλου, Π.Α., και Τίκα, Θ.Μ., 2006. Συμπιεστότητα τεχνητών οργανικών εδαφών. ΤΕΕ, 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, 31/5-2/6 2006, Ξάνθη.