



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ
ΚΡΗΠΙΔΟΤΟΙΧΩΝ ΣΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΕΔΑΦΙΚΟ
ΠΥΘΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ ΒΛΑΣΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π**

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Επιβλέπων: Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επικ. Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/...../2017

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επικ. Καθηγητής

Νομικός Παύλος, Επικ. Καθηγητής

Μπενάρδος Ανδρέας, Επικ. Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν σε αυτό.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλο αυτό το χρόνο, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια του σε όλα τα στάδια της εργασίας μου με τις συμβουλές και τις υποδείξεις του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους φίλους μου που μου στάθηκαν σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής και με εμπύχωναν μέχρι και το τέλος της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου που με βοήθησαν και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
1. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ.....	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Προφόρτιση	4
1.3 Κατασκευή επιχώματος προφόρτισης.....	7
1.4 Τεχνικές αποστράγγισης.....	8
1.4.1 Κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια (PVD)	8
1.4.2 Αμμοπάσσαλοι – Αμμοστραγγιστήρια.....	13
1.4.2.1 Προκατασκευασμένα αμμοστραγγιστήρια.....	15
1.4.3 Χαλικοπάσσαλοι	16
1.4.3.1 Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση (Vibro Compaction)	17
1.4.3.2 Βαθιά Δονητική Αντικατάσταση (Vibro Replacement).....	19
1.4.3.2.1 Απαιτήσεις ενσωματούμενων υλικών	20
1.4.3.2.2 Χαλικοπάσσαλος με τροφοδοσία από την επιφάνεια (Top feed method)	21
1.4.3.2.3 Χαλικοπάσσαλος με τροφοδοσία στην αιχμή της δονητικής στήλης (Bottom feed method).....	23
1.4.3.2.4 Χαλικοπάσσαλος με έμπηξη κλειστού σωλήνα.....	24
1.4.3.2.5 Υποθαλάσσια κατασκευή χαλικοπασσάλων	25
1.4.3.2.5.1 Μέθοδος κλειστού σωλήνα	26
1.4.3.2.5.2 Μέθοδος "εν ξηρώ" με εσωτερική τροφοδοσία αδρανών από την αιχμή (Bottom feed dry method).....	26
1.4.3.2.5.3 "Υγρή" μέθοδος με εξωτερική τροφοδοσία αδρανών από την επιφάνεια - Μέθοδος "κουβέρτας" (Wet method with stone blanket)	26
1.4.3.2.5.4 Marine Double Lock Gravel Pump Method.....	27

1.4.3.3 Αλληλεπίδραση χαλικοπασσάλου - περιβάλλοντος εδάφους	30
1.4.3.3.1 Διάμετρος χαλικοπασσάλων.....	30
1.4.3.3.2 Αξονική απόσταση μεταξύ χαλικοπασσάλων	30
1.4.3.3.3 Γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού των χαλικοπασσάλων.....	31
2. ΚΡΗΠΙΔΟΤΟΙΧΟΙ	33
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Κλειστοί κρηπιδότοιχοι.....	35
2.2.1 Κρηπιδότοιχοι βαρέως τύπου	35
2.2.1.1 Κρηπιδότοιχοι με τεχνητούς ογκολίθους.....	35
2.2.1.2 Κρηπιδότοιχοι τύπου L (L-wall).....	37
2.2.1.3 Κρηπιδότοιχοι με κιβώτια (caisson)	37
2.2.1.4 Κρηπιδότοιχοι από μεταλλικές πασσαλοσανίδες	39
2.2.1.5 Έδραση κρηπιδότοιχου	41
2.2.1.6 Ανακουφιστικό πρίσμα.....	42
2.2.2 Κρηπιδότοιχοι ελαφρού τύπου.....	44
2.2.2.1 Κρηπιδότοιχοι από πασσαλοτοιχίες.....	44
2.3 Ανοιχτοί Κρηπιδότοιχοι	47
3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (PLAXIS 2D).....	50
3.1 Εισαγωγή.....	50
3.2 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	51
3.3 Υποπογράμματα του PLAXIS	53
3.3.1 PLAXIS INPUT	53
3.3.2 PLAXIS CALCULATION	56
3.3.3 PLAXIS OUTPUT	57
3.3.4 PLAXIS CURVES	59
4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	61

4.1 Εισαγωγή.....	61
4.2 Παράμετροι προσομοιώματος.....	63
4.3 Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα.....	67
4.3.1 1 ^η Σειρά Παραμετρικών αναλύσεων: Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II (25%, 50%, 75%, 100%).....	67
4.3.1.1 Καθιζήσεις	69
4.3.1.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης	72
4.3.1.3 Συντελεστής Ασφαλείας	74
4.3.2 2 ^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II (25%, 50%, 75%, 100%) με τη χρήση χαλικοπασσάλων σε τετραγωνικό κάναβο αξονικής απόστασης 2,5m	77
4.3.2.1 Καθιζήσεις	79
4.3.2.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης	82
4.3.2.3 Συντελεστής Ασφαλείας	84
4.3.3 Σύγκριση 1 ^{ης} με 2 ^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων	88
4.3.3.1 Καθιζήσεις	88
4.3.3.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης	90
4.3.3.3 Συντελεστής ασφαλείας	92
4.3.4 3 ^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή του τετραγωνικού καννάβου των πασσάλων 2,5 , 3 & 3,5m στην περίπτωση που το πάχος της αργίλου είναι στο 50%	94
4.3.4.1 Καθιζήσεις	96
4.3.4.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης	97
4.3.4.3 Συντελεστής ασφαλείας	99
4.3.5 4 ^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή στο είδος του κρηπιδότοιχου με χρήση κλειστού κρηπιδότοιχου (Τεχνητοί Ογκόλιθοι) αντί caisson στην περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50% και χρήσης χαλικοπασσάλων αξονικής απόστασης 2,5m	102
4.3.5.1 Καθιζήσεις	103

4.3.5.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης	104
4.3.5.3 Συντελεστής Ασφαλείας	104
4.3.6 5 ^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων και της εξυγιαντικής στρώσης (35°, 40°, 45°)	108
4.3.6.1 Καθιζήσεις	108
4.3.6.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης	110
4.3.6.3 Συντελεστής Ασφαλείας	111
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	114
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	119
1 ^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων	119
2 ^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων	127
3 ^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων	135
4 ^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων	139
5 ^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων	141

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1. Εναλλαγή των ενεργών και υδροστατικών τάσεων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης (www.geodomisi.com , 7/2017)	5
Εικόνα 1-2. Πρωτεύουσα & Δευτερεύουσα καθίζηση (Κουλού & Δάμου, 2009).....	6
Εικόνα 1-3. Διαδικασία στερεοποίησης χωρίς (πάνω) και με (κάτω) τη χρήση στραγγιστηρίων (Πλατής, 2016)	8
Εικόνα 1-4. Διάφοροι τύποι προκατασκευασμένων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων	9
Εικόνα 1-5. Παράδειγμα τεσσάρων στραγγιστηρίων που επεξεργάστηκαν εργαστηριακά για την παροχτευτική τους ικανότητα σε διάφορα επίπεδα συμπίεσης (Πλατής, 2007)	10
Εικόνα 1-6. Εγκατάσταση κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων (Πλατής, 2007).....	11
Εικόνα 1-7. Τύποι αγκύρωσης προκατασκευασμένων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων (Πλατής, 2007)	12
Εικόνα 1-8. Τεχνικές εγκατάστασης αμμοστραγγιστηρίων (Xanthakos P. et al., 1994)	14
Εικόνα 1-9. Τεχνικές εγκατάστασης χαλικοπασσάλων ανάλογα με την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους (kellerholding.com , 6/2017).....	16
Εικόνα 1-10. Μέθοδος βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης (Μπαρουλάκη, 2011)	18
Εικόνα 1-11. Τομή Δονητικής τορπίλης (www.geoengineer.org , 6/2017).....	18
Εικόνα 1-12. Wet Top feed method vs Dry bottom feed method (slideplayer.com , 7/2017)	19
Εικόνα 1-13. Χρήση νερού διαμέσου των ακροφυσίων για τη διεύθυνση στο έδαφος (nscme.com , 7/2017)	21
Εικόνα 1-14. Τεχνική κατασκευής χαλικοπασσάλου με τροφοδοσία από την επιφάνεια (www.earthtech.com , 7/2017)	22
Εικόνα 1-15. Συστήματα ανάρτησης της δονητικής στήλης στη μέθοδο τροφοδοσίας στην αιχμή (www.zetas.com.tr , 7/2017)	23
Εικόνα 1-16. Διαδικασία κατασκευής χαλικοπασσάλου με τροφοδοσία στην αιχμή (www.researchgate.net , 7/2017)	24
Εικόνα 1-17. Μέθοδος "κουβέρτας" (nangluongvietnam.vn , 7/2017)	27
Εικόνα 1-18. Τυπική εφαρμογή της μεθόδου Marine Double Lock Gravel Pump Method (www.degenengineering.com , 7/2017)	28

Εικόνα 1-19. Αναπαράσταση της μεθόδου στην περίπτωση του λιμένα της Πάτρας (www.degenengineering.com, 7/2017).....	29
Εικόνα 1-20. Διάφοροι καννάβοι χαλικοπασσάλων και η επιφάνεια επιρροής τους (Μπαρουλάκη, 2011).....	31
Εικόνα 2-1. Κατασκευή συμπαγούς κλειστού κρηπιδότοιχου για το λιμάνι του Κατάρ (zabezpieczeniahydrotechniczne.wordpress.com, 6/2017)	35
Εικόνα 2-2. Κρηπιδότοιχος με κυψελωτούς τεχνητούς ογκολίθους (Μέμος, 2008)....	36
Εικόνα 2-3. Caisson (slideshare.net, 6/2017)	38
Εικόνα 2-4. Τύποι κελιών σε κρηπιδότοιχο από μεταλλικές πασσαλοσανίδες: (α) Κυκλικά , (β) Κελιά που διαχωρίζονται με διάφραγμα.....	39
Εικόνα 2-5. Κρηπιδότοιχος από μεταλλικές πασσαλοσανίδες (www.jfbrennan.com, 7/2017)	40
Εικόνα 2-6. Έδραση κρηπιδότοιχου (www.antzoulis.gr, 7/2017)	42
Εικόνα 2-7. Απεικόνιση της θέσης του ανακουφιστικού πρίσματος σε τομή (Amoives.gr, 7/2017)	43
Εικόνα 2-8. Κρηπιδότοιχος από μεταλλικό πασσαλότοιχο (www.escpile.com, 7/2017)	44
Εικόνα 2-9. Κρηπιδότοιχος από μεταλλικές πασσαλοσανίδες και τοποθέτηση αδρανών υλικών πίσω από αυτόν (ArcelorMittal, 7/2017)	45
Εικόνα 2-10. Τομή ανοιχτού κρηπιδότοιχου (Seattle, Washington, USA) (ArcelorMittal, 7/2017).....	47
Εικόνα 2-11. Απεικόνιση πασσάλων που στηρίζουν την εξέδρα στο λιμάνι της Βιρτζίνιας (ArcelorMittal, 7/2017)	48
Εικόνα 3-1. Χαρακτηριστικές διατομές των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρικού (Brinkgreve R.B.J., 2002)	51
Εικόνα 3-2. Σχεδιάγραμμα προσομοιώματος.....	53
Εικόνα 3-3. Στρωματογραφία προσομοιώματος.....	54
Εικόνα 3-4. Εισαγωγή φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών στρώματος του εδάφους.....	54
Εικόνα 3-5. Απεικόνιση του γεωμετρικού πλέγματος.....	55
Εικόνα 3-6. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων	55
Εικόνα 3-7. Απεικόνιση των αρχικών ενεργών τάσεων	56
Εικόνα 3-8. Απεικόνιση των κατασκευαστικών φάσεων και των τύπων υπολογισμού	57
Εικόνα 3-9. Απεικόνιση των καθιζήσεων σε φάση κατασκευής του έργου.....	58

Εικόνα 3-10. Απεικόνιση πιθανής επιφάνειας αστοχίας	58
Εικόνα 3-11. Χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων	59
Εικόνα 3-12. Χρονική εξέλιξη των υπερπιέσεων των πόρων	60
Εικόνα 4-1. Καθιζήσεις σημείων του επιχώματος (περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50%)	68
Εικόνα 4-2. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50%)	69
Εικόνα 4-3. Παραμορφωμένο πλέγμα προσομοιώματος λόγω των καθιζήσεων (περίπτωση πάχους 50%)	70
Εικόνα 4-4. Παρουσίαση των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης σε ζώνες (περίπτωση πάχους 50%)	70
Εικόνα 4-5. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (περίπτωση πάχους στρώματος της μαλακής αργίλου II 50%)	75
Εικόνα 4-6. Πιέσεις πόρων των σημείων G, H & I σε σχέση με το χρόνο (περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50% και χρήσης πασσάλων 2,5m)	78
Εικόνα 4-7. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50% με πασσάλους)	79
Εικόνα 4-8. Παραμορφωμένο πλέγμα προσομοιώματος λόγω των καθιζήσεων (περίπτωση πάχους 50% με πασσάλους)	80
Εικόνα 4-9. Παρουσίαση των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης σε ζώνες (περίπτωση πάχους 50% με πασσάλους)	80
Εικόνα 4-10. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (περίπτωση πάχους στρώματος της μαλακής αργίλου II 50% με πασσάλους)	86
Εικόνα 4-11. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50% με πασσάλους των 3m)	95
Εικόνα 4-12. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50% με πασσάλους των 3,5m)	95
Εικόνα 4-13. Απεικόνιση του προσομοιώματος με τον κρηπιδότοιχο με τους τεχνητούς ογκολίθους (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50%)	103
Εικόνα 4-14. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (Με τεχνητούς ογκολίθους)	106
Εικόνα 7-1. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - χωρίς πασσάλους)	119

Εικόνα 7-2. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - χωρίς πασσάλους).....	119
Εικόνα 7-3. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 25% - χωρίς πασσάλους).....	120
Εικόνα 7-4. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - χωρίς πασσάλους).....	121
Εικόνα 7-5. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - χωρίς πασσάλους).....	121
Εικόνα 7-6. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - χωρίς πασσάλους).....	122
Εικόνα 7-7. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - χωρίς πασσάλους).....	123
Εικόνα 7-8. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - χωρίς πασσάλους).....	123
Εικόνα 7-9. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 75% - χωρίς πασσάλους).....	124
Εικόνα 7-10. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - χωρίς πασσάλους).....	125
Εικόνα 7-11. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - χωρίς πασσάλους).....	125
Εικόνα 7-12. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 100% - χωρίς πασσάλους).....	126
Εικόνα 7-13. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	127
Εικόνα 7-14. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	127
Εικόνα 7-15. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 25% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	128
Εικόνα 7-16. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	129
Εικόνα 7-17. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	129
Εικόνα 7-18. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	130
Εικόνα 7-19. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)	131

Εικόνα 7-20. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)	131
Εικόνα 7-21. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 75% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)	132
Εικόνα 7-22. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)	133
Εικόνα 7-23. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)	133
Εικόνα 7-24. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 100% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)	134
Εικόνα 7-25. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3m).....	135
Εικόνα 7-26. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3m).....	135
Εικόνα 7-27. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3m).....	136
Εικόνα 7-28. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3,5m)	137
Εικόνα 7-29. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3,5m)	137
Εικόνα 7-30. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3,5m)	138
Εικόνα 7-31. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Κρηπιδότοιχο με Τεχνητούς Ογκολίθους).....	139
Εικόνα 7-32. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Κρηπιδότοιχο με Τεχνητούς Ογκολίθους).....	139
Εικόνα 7-33. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Κρηπιδότοιχο με Τεχνητούς Ογκολίθους)	140
Εικόνα 7-34. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 40 μοίρες).....	141
Εικόνα 7-35. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 40 μοίρες).....	141
Εικόνα 7-36. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 40 μοίρες).....	142
Εικόνα 7-37. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με πασσάλους των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 45 μοίρες).....	143

Εικόνα 7-38. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με πασσάλους των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 45 μοίρες).....	143
Εικόνα 7-39. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με πασσάλους των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 45 μοίρες).....	144

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1. Παρουσίαση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών στρωμάτων του προσομοιώματος	65
Πίνακας 4-2. Παρουσίαση των μηχανικών χαρακτηριστικών των κρηπιδότοιχων που χρησιμοποιήθηκαν.....	66
Πίνακας 4-3. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II	71
Πίνακας 4-4. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης.....	73
Πίνακας 4-5. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II	75
Πίνακας 4-6. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων	81
Πίνακας 4-7. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης.....	83
Πίνακας 4-8. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με τη χρήση πασσάλων	85
Πίνακας 4-9. Τιμές των καθιζήσεων των τιμών των σημείων F & G χωρίς και με τη χρήση πασσάλων	89
Πίνακας 4-10. Σύγκριση του χρόνου που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων χωρίς και με τη χρήση πασσάλων	91
Πίνακας 4-11. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας που αφορούν στην τελική φάση του έργου χωρίς και με τη χρήση πασσάλων	92
Πίνακας 4-12. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου.....	96
Πίνακας 4-13. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου	98

Πίνακας 4-14. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου.....	100
Πίνακας 4-15. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου.....	103
Πίνακας 4-16. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης του έργου σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου.....	104
Πίνακας 4-17. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου.....	105
Πίνακας 4-18. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων.....	109
Πίνακας 4-19. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων.....	111
Πίνακας 4-20. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων.....	112

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4-1. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II.....	72
Σχήμα 4-2. Χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II.....	74
Σχήμα 4-3. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II.....	76
Σχήμα 4-4. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων.....	82
Σχήμα 4-5. Χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων.....	84
Σχήμα 4-6. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων.....	87
Σχήμα 4-7. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων των σημείων F & C μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης χωρίς και με τη χρήση πασσάλων.....	90
Σχήμα 4-8. Σύγκριση των ημερών που απαιτούνται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων χωρίς και με τη χρήση πασσάλων.....	92
Σχήμα 4-9. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την τελική φάση του έργου χωρίς και με τη χρήση πασσάλων.....	93
Σχήμα 4-10. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με τη μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου.....	97
Σχήμα 4-11. Χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου.....	99
Σχήμα 4-12. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου.....	101
Σχήμα 4-13. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου.....	107

Σχήμα 4-14. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων	110
Σχήμα 4-15. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων	113

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για θεμελίωση έργων σε εδάφη με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά δημιούργησε την ανάγκη για μεθόδους βελτίωσης του υπεδάφους.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των μεθόδων βελτίωσης των συνθηκών θεμελίωσης σε λιμένα, ώστε στο σημείο αυτό να γίνει η κατασκευή κρηπιδότοιχου. Προς τον σκοπό αυτό κατασκευάζεται επίχωμα προφόρτισης, ώστε να ολοκληρωθούν όλες οι καθιζήσεις του εδάφους πριν την εγκατάσταση του κρηπιδότοιχου. Για την επίλυση του συγκεκριμένου έργου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Plaxis 2D, με το οποίο έγινε η ανάλυση των καθιζήσεων και ο έλεγχος της ευστάθειας του κρηπιδότοιχου. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις που στόχο είχαν την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών για την κατασκευή του έργου.

Η διπλωματική αυτή περιέχει τα παρακάτω κεφάλαια:

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία αρχική αναφορά στα είδη των καθιζήσεων. Στη συνέχεια γίνεται μία εκτενής αναφορά στις τεχνικές αποστράγγισης που χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση της διαδικασίας της στερεοποίησης, όπως είναι η χρήση των προκατασκευασμένων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων, αμμοπασσάλων και χαλικοπασσάλων, καθώς και στις τεχνικές εγκατάστασής τους.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του πρόγραμματος Plaxis 2D και κάποιες από τις πιο βασικές δυνατότητες του
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Plaxis 2D
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο

ABSTRACT

The foundation of constructions in soils with poor load-bearing capacity led to the creation of techniques improving the properties of the subsoil.

The purpose of this thesis is the improvement of the properties of the subsoil in a marine environment in order to establish a quay wall. For the achievement of this construction, we used the software Plaxis 2D, which was utilized in the analysis of the settlements and the stability of the quay wall. Furthermore, parametric analyses were made in order to determine the best conditions for the construction of the project.

This thesis contains the following chapters:

- In the first chapter a brief reference is made on the different sorts of the settlements. The drainage techniques which were used to accelerate the consolidation process are then described in detail, like the use of prefabricated vertical drains, sand columns and stone columns, as well as their installation techniques.
- In the second chapter in detail the different types of quay walls is described.
- In the third chapter the function of the Plaxis 2D program and the use of its basic features is described.
- In the fourth chapter the results of the parametric analyses which was made by Plaxis 2D program are described.
- In the fifth chapter I present the conclusions of the parametric analyses, which was made in the previous chapter

1. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή η κατασκευαστική τεχνική εξελίσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Όλο και πιο συχνά κατασκευάζονται έργα σε ασθενείς εδαφικούς σχηματισμούς, που παρουσιάζουν ιδιαίτερες τεχνικές δυσκολίες. Για να πραγματοποιηθούν τέτοιου είδους γεωτεχνικά έργα χρειάζεται πολλές φορές να γίνει βελτίωση των εδαφικών σχηματισμών.

Τα εδάφη που χρήζουν συνήθως βελτίωσης είναι τα λεπτόκοκκα συμπιεστά εδάφη, όπως είναι τα ιλυώδη και τα αργιλικά. Το συνηθέστερο πρόβλημα των εδαφικών αυτών σχηματισμών είναι η δυσκολία που εμφανίζουν στην εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων τους.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές, όπως είναι η προφόρτιση και οι τεχνικές αποστράγγισης. Σημειώνεται ότι οι τεχνικές αποστράγγισης για να μπορέσουν να λειτουργήσουν, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την τεχνική της προφόρτισης, ενώ για την προφόρτιση δεν ισχύει κάτι τέτοιο.

Τόσο η προφόρτιση που γίνεται με τη δημιουργία στην επιθυμητή θέση ενός επιχώματος, όσο και οι τεχνικές αποστράγγισης που επιταχύνουν σε καθοριστικό βαθμό τη διαδικασία της στερεοποίησης αναλύονται παρακάτω.

1.2 Προφόρτιση

Η προφόρτιση είναι η τεχνική εκείνη που χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση του συνόλου των καθιζήσεων σε μια περιοχή μέσα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα.

Η προφόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε έδαφος, όμως είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην περίπτωση των κορεσμένων μαλακών αργίλων και των συμπιεστών ιλύων καθώς και στα οργανικά εδάφη. Στην περίπτωση των παραπάνω εδαφών το πρόβλημα είναι η μικρή τους διαπερατότητα. Για την απομάκρυνση του νερού και τη συμπύκνωση του έδαφους απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα, που για μεγάλα πάχη των παραπάνω σχηματισμών μπορεί να χρειαστούν χρόνια. Επειδή αυτό δεν είναι συμβατό με την κατασκευαστική διαδικασία, θα πρέπει να βρεθεί κάποιος τρόπος να μειωθεί σε σημαντικό βαθμό ο χρόνος ολοκλήρωσης των καθιζήσεων.

Οι καθιζήσεις μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες (Κωστόπουλος, 2008):

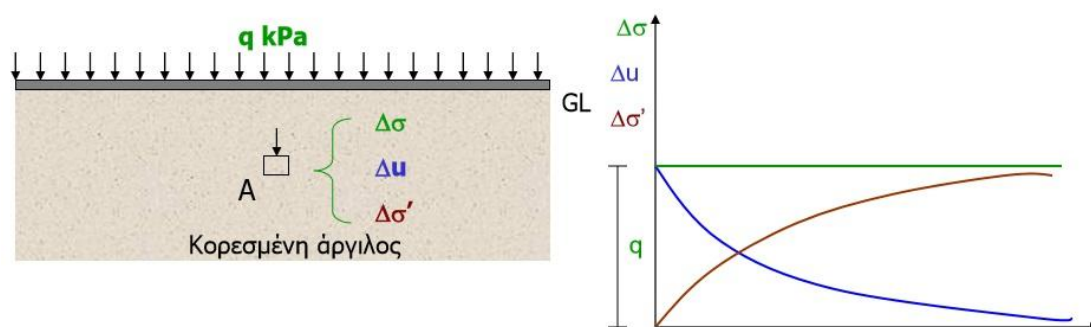
- Άμεσες (λόγω μεταβολής σχήματος υπό αστράγγιστες συνθήκες)
- Πρωτεύουσες που προκύπτουν από τη διαδικασία της στερεοποίησης (λόγω μεταβολής όγκου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες)
- Δευτερεύουσες (λόγω δευτερογενούς στραγγιζόμενης συμπίεσης από ερπυσμό)

Οι άμεσες καθιζήσεις είναι καθιζήσεις που αρχίζουν με την επιβολή της προφόρτισης ήδη από την κατασκευή του επιχώματος. Δεν συνδέονται με διαφυγή νερού από τους πόρους του εδαφικού σκελετού, αλλά από τις ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις των κόκκων του υλικού. Στα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη αποτελούν πολύ μικρό μέρος των συνολικών καθιζήσεων.

Οι πρωτεύουσες καθιζήσεις προκύπτουν από τη διαδικασία της στερεοποίησης. Στην περίπτωση αυτή οι καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα αντιστοιχούν σε ισόποση διαφυγή νερού από τους πόρους του εδάφους. Στα

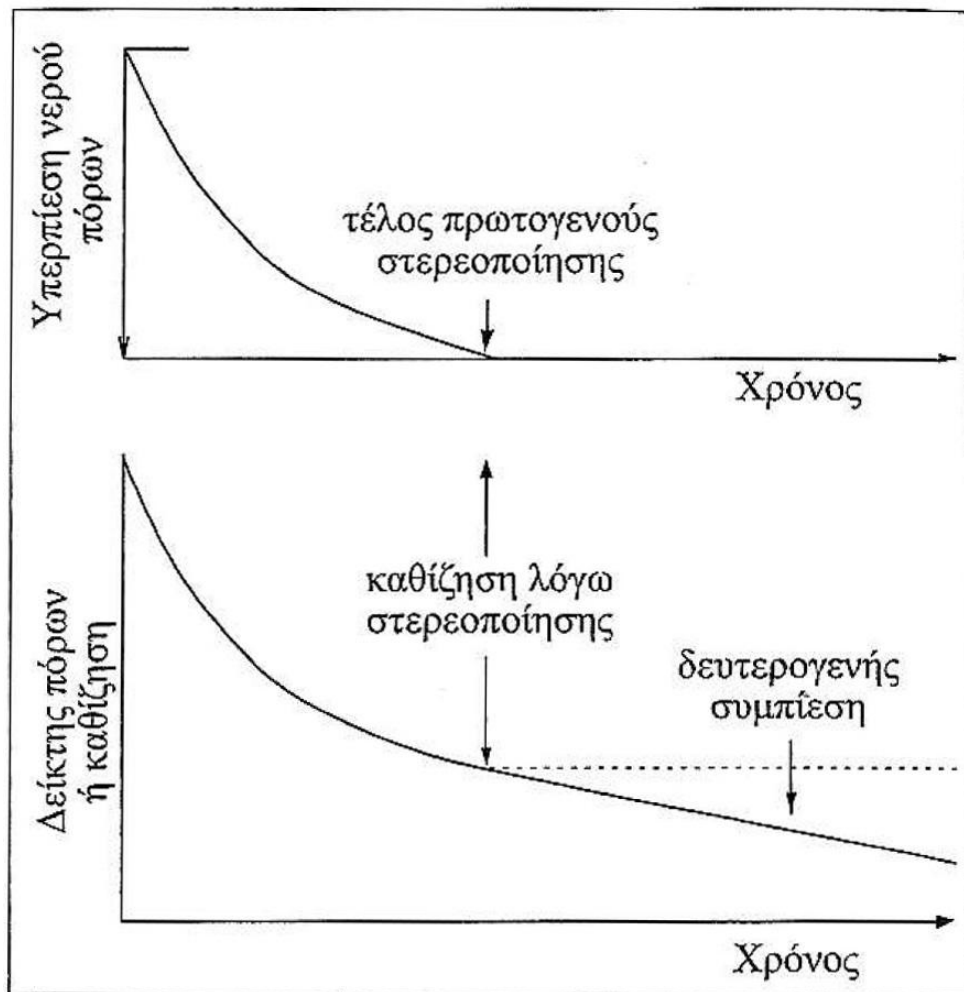
κορεσμένα συνεκτικά εδάφη αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών καθιζήσεων.

Επειδή τα εδάφη αυτά παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα, στην αρχή της προφόρτισης το συνολικό φορτίο αναλαμβάνεται από το νερό των πόρων με αποτέλεσμα να προκύπτουν υδατικές υπερπίεσεις με ταυτόχρονη μείωση των ενεργών τάσεων. Με την πάροδο του χρόνου το νερό των πόρων αποβάλλεται από το έδαφος και το φορτίο μεταβιβάζεται βαθμιαία στους κόκκους του εδάφους. Η διαδικασία της στερεοποίησης ολοκληρώνεται με την αποτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων, αφού έχει γίνει η αποβολή του νερού από αυτούς.



Εικόνα 1-1. Εναλλαγή των ενεργών και υδροστατικών τάσεων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης (www.geodomisi.com, 7/2017)

Οι δευτερεύουσες καθιζήσεις ακολουθούν χρονικά τις πρωτεύουσες καθιζήσεις, δηλαδή την πλήρη εκτόνωση της πίεσης των πόρων. Σχετίζονται με την πλαστική επαναδιάταξη της δομής του εδάφους. Σημειώνεται ότι στα μη – οργανικά λεπτομερή εδάφη επικρατούν οι καθιζήσεις από στερεοποίηση σε αντίθεση με τα οργανικά όπου καθοριστικό ρόλο παίζουν οι ερπυστικές παραμορφώσεις (Κωστόπουλος, 2008).



Εικόνα 1-2. Πρωτεύουσα & Δευτερεύουσα καθίζηση (Κουλού & Δάμου, 2009)

1.3 Κατασκευή επιχώματος προφόρτισης

Για την ολοκλήρωση των καθιζήσεων χρησιμοποιείται συνήθως επίχωμα, το οποίο αποτελείται από κοκκώδη γεωυλικά. Η κατασκευή του επιχώματος ακολουθεί μια διαδικασία, η οποία μπορεί να διαρκέσει ανάλογα με την έκταση του αρκετές μέρες.

Αρχικά πρέπει να γίνει ισοπέδωση της περιοχής που θα τοποθετηθεί το επίχωμα και να εξασφαλιστεί ο χώρος για την πρόσβαση των χωματουργικών μηχανημάτων. Απαιτείται αρκετός χώρος, δηλαδή περίπου 10m ή και περισσότερο γύρω από την περίμετρο της προγραμματιζόμενης ζώνης προφόρτισης.

Στη συνέχεια η περιοχή προφόρτισης θα πρέπει να εκσκαφθεί γύρω στα 60cm και να τοποθετηθούν στη θέση αυτή γεωυλικά υψηλής διαπερατότητας. Αυτό γίνεται για να έχουν τα μηχανήματα ένα σταθερό υπόβαθρο εργασίας αλλά κυρίως γιατί χρειάζεται η στρώση βάσης του επιχώματος να λειτουργεί και ως στρώμα αποστράγγισης (drainage blanket), το οποίο θα μεταβιβάζει το νερό που προέρχεται από τους πόρους του υποκείμενου συμπιεστού στρώματος στην επιφάνεια έξω από την ζώνη προφόρτισης.

Το υλικό του στρώματος αυτού θα πρέπει να είναι χαλικώδης άμμος έως αμμώδεις χάλικες με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα (<0,06mm) μικρότερη του 5%. Για να μη γίνει διείσδυση λεπτόκοκκων στο στρώμα αυτό θα πρέπει να γίνει χρήση γεωυφάσματος.

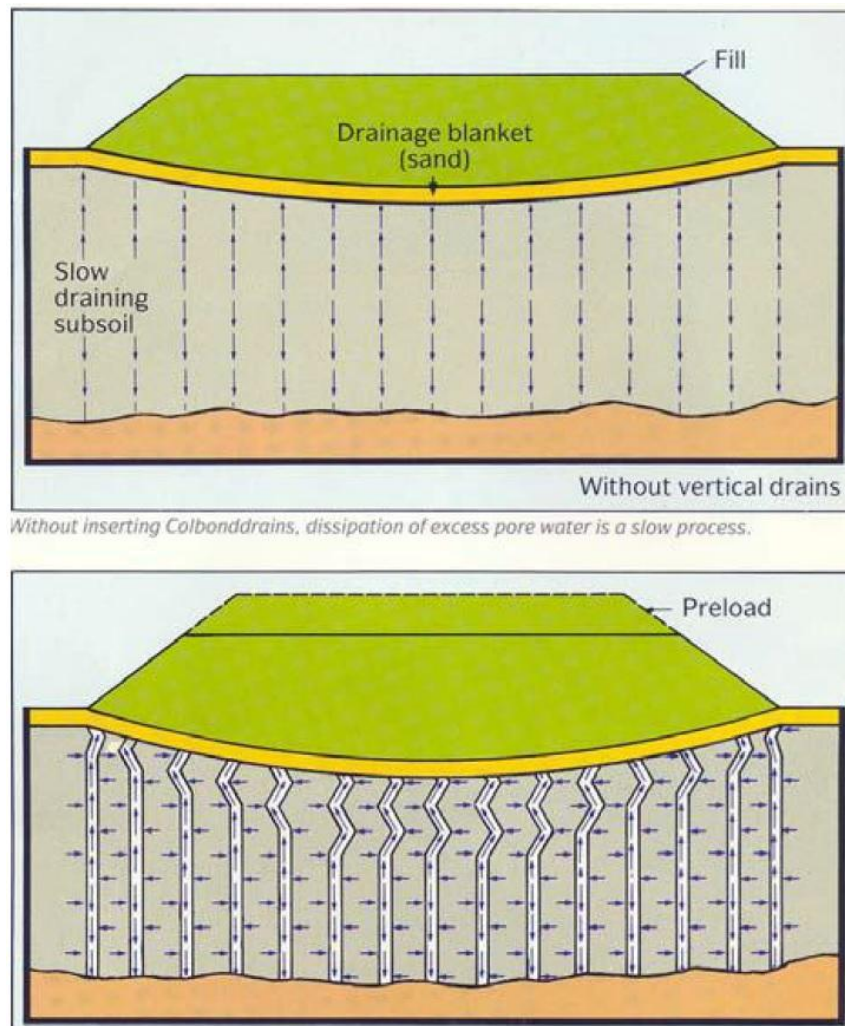
Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που γίνει χρήση κατακόρυφων στραγγιστηριών ή χαλικοπασσάλων θα πρέπει αυτά να εγκατασταθούν πριν τοποθετηθεί η στρώση βάσης του επιχώματος (Κωστόπουλος, 2008).

Τα γεωυλικά που χρησιμοποιούνται για το επίχωμα θα πρέπει να προέρχονται από κοντινό δανειοθάλαμο, ώστε να μειωθεί το κόστος μεταφοράς τους. Αυτά θα πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή και σταθερότητα. Το επίχωμα παραμένει στην περιοχή μέχρι να επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος βαθμός στερεοποίησης. Στη συνέχεια αποσύρεται για να τοποθετηθεί το μόνιμο δόμημα.

1.4 Τεχνικές αποστράγγισης

1.4.1 Κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια (PVD)

Τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται για την κατακόρυφη στράγγιση συμπιεστών λεπτομερών εδαφών (κυρίως αργιλικών) σε συνδυασμό πάντα με επίχωμα προφόρτισης. Η λειτουργία τους έγκειται στην εξαναγκασμένη ροή του νερού μέσα από τη μάζα τους, όταν τα στρώματα μέσα από τα οποία περνούν, συμπιέζονται από το επίχωμα που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Σημειώνεται ότι τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των στραγγιστηρίων αυτών έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τη χρήση των αμμοστραγγιστηρίων, των οποίων εκτενής αναφορά θα γίνει σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 1-3. Διαδικασία στερεοποίησης χωρίς (πάνω) και με (κάτω) τη χρήση στραγγιστηρίων (Πλατής, 2016)

Η χρήση των στραγγιστηρίων επιταχύνει σε σημαντικό βαθμό την διαδικασία της στερεοποίησης, καθώς μειώνει κατά πολύ τη διαδρομή που πρέπει να διανύσει το νερό των πόρων. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 1-3, με τη χρήση των στραγγιστηρίων το νερό δεν χρειάζεται πλέον να ακολουθήσει την κατακόρυφη ροή, αλλά ακτινικά να φθάσει σε ένα από τα πιο κοντινά στραγγιστήρια.

Τα κατακόρυφα στραγγιστήρια (PVD) έχουν μορφή λωρίδας πλάτους 100mm συνήθως και πάχους 3 – 4 mm. Αποτελούνται από ένα πολυμερή πυρήνα με ή χωρίς νευρώσεις, ορθογωνικής ή ρομβοειδούς διατομής, που περιβάλλεται από μανδύα φίλτρου και διαχωρισμού από υφαντό ή μη γεώφασμα (Κωστόπουλος, 2008).

Το πολυμέρες υλικό του πυρήνα μπορεί να είναι πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, PVC, πολυεστέρα ή πολυολεφίνη. Όσον αφορά τις διαστάσεις, έχουν αναφερθεί και πλάτη από 90 – 300mm, ενώ για τα πάχη από 2 – 10mm (Πλάτης, 2007).

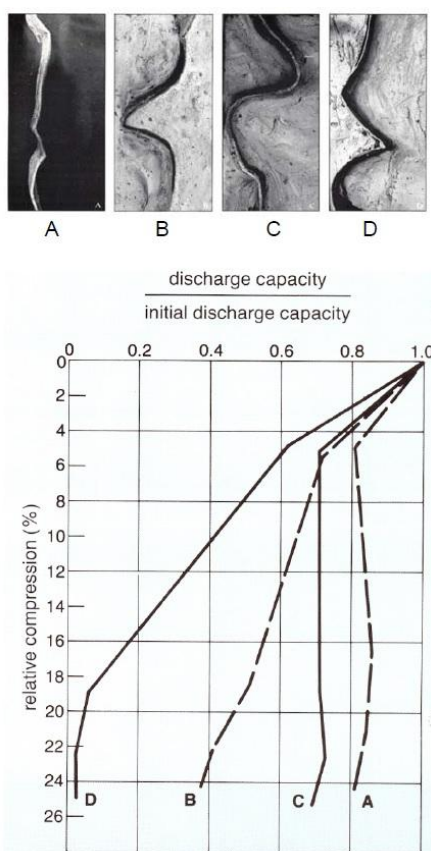


Εικόνα 1-4. Διάφοροι τύποι προκατασκευασμένων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων

Για τη λειτουργικότητα των κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων τόσο ο πυρήνας όσο και το φίλτρο, θα πρέπει να ικανοποιούν κάποιες προδιαγραφές (Πλάτης, 2007).

Όσον αφορά τον πυρήνα, αυτός θα πρέπει να έχει:

- Επαρκή αντοχή σε εφελκυσμό, έτσι ώστε να παραλαμβάνει χωρίς αστοχία τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την τοποθέτηση του
- Επαρκή ακαμψία κάθετα στο επίπεδο του , ώστε να μην μειώνεται το πάχος της διατομής από τη διείσδυση του φίλτρου στο εσωτερικό, όταν δέχεται μεγάλες πλευρικές πιέσεις. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να μειώσει την παροχευτική ικανότητα του στραγγιστηρίου σε μεγάλο βαθμό
- Επαρκή ευκαμψία υπό αξονικό θλιπτικό φορτίο, έτσι ώστε να μην αστοχεί σε λυγισμό σε μεγάλες καθιζήσεις του εδάφους και να διατηρεί κατά συνέπεια ένα μεγάλο μέρος της παροχευτικής του ικανότητας ακόμα και μετά από βράχυνση κατά 20 – 25%, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-5



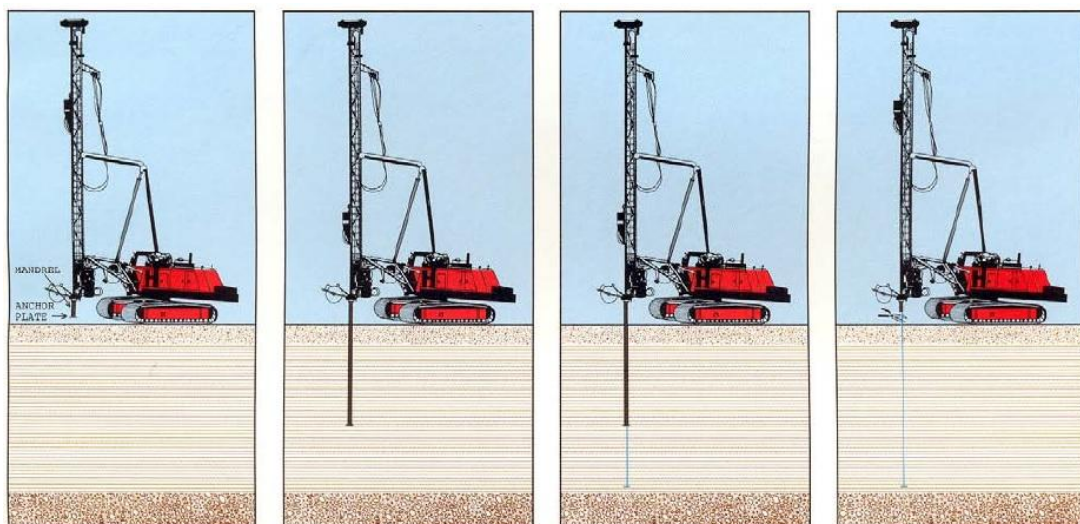
Εικόνα 1-5. Παράδειγμα τεσσάρων στραγγιστηρίων που επεξεργάστηκαν εργαστηριακά για την παροχευτική τους ικανότητα σε διάφορα επίπεδα συμπίεσης (Πλατής, 2007)

Όσον αφορά το φίλτρο, αυτό θα πρέπει να έχει:

- Ικανοποιητική αντοχή έναντι μηχανικών καταπονήσεων, δηλαδή αντοχή σε εφελκυσμό, σε σχίσιμο, σε διάτρηση και διάρρηξη
- Ικανοποιητική διαπερατότητα κάθετα στο επίπεδό του, έτσι ώστε να μην επιβραδύνεται η εισροή του αποστραγγιζόμενου νερού των πόρων προς το εσωτερικό του στραγγιστηρίου. Γενικά συνιστάται $k_{\text{γεωυφάσματος}} \geq 10 * k_{\text{εδάφους}}$
- Ικανοποιητική λειτουργία φίλτρου, έτσι ώστε αφενός να συγκρατούνται οι κόκκοι του εδάφους και αφετέρου να μην φράσσουν οι πόροι του γεωυφάσματος από λεπτόκοκκα υλικά

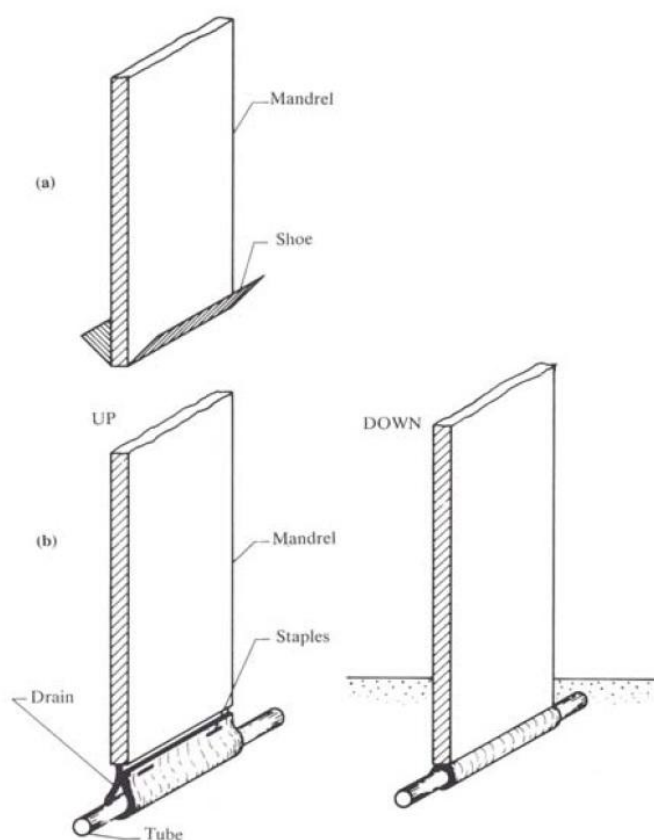
Η εγκατάσταση των κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων γίνεται με τη βοήθεια ειδικού γερανού με κατακόρυφο οδηγό. Ο σωλήνας διείσδυσης έχει ρομβοειδή, ορθογωνική ή τραπεζοειδή διατομή και μέσα σε αυτό εισάγεται το στραγγιστήριο. Η έμπηξη του σωλήνα γίνεται με στατική ή δυναμική δράση. Στην περίπτωση της δυναμικής δράσης χρησιμοποιείται δονητής ή σφύρα, ικανά να επιβάλλουν κατακόρυφο φορτίο τουλάχιστον 200kN. Το γεωσύνθετο στραγγιστήριο μαζί με το ειδικό χαλύβδινο περίβλημα (σωλήνας διείσδυσης) κατέρχονται με τη βοήθεια του κατακόρυφου οδηγού.

Σημειώνεται ότι η απόκλιση του συστήματος από την κατακόρυφο δεν πρέπει να υπερβαίνει κατά μέγιστον το 2% (Κωστόπουλος, 2008).



Εικόνα 1-6. Εγκατάσταση κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων (Πλατής, 2007)

Για να μην καταστραφεί το στραγγιστήριο κατά την ανάσυρση του ειδικού χαλύβδινου περιβλήματος, πριν την έμπηξη του στο έδαφος, αγκυρώνεται στο κάτω άκρο του ειδική πλάκα αγκύρωσης. Αυτή χρησιμεύει, εκτός από τη συγκράτηση του στο κατάλληλο βάθος και στην προστασία του στραγγιστηρίου από τη διείσδυση εδαφικού υλικού κατά την έμπηξη. Εκτός από χαλύβδινη πλάκα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αγκύρωση του στραγγιστηρίου, είτε ράβδος, είτε μεταλλική διατομή σχήματος V, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-7 (Πλατής, 2007).



Εικόνα 1-7. Τύποι αγκύρωσης προκατασκευασμένων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων (Πλατής, 2007)

Μετά το τέλος της έμπηξης γίνεται ανάσυρση του ειδικού χαλύβδινου περιβλήματος και το στραγγιστήριο αποκόπτεται σε ύψος τουλάχιστον 100mm και συνήθως μέχρι 250mm πάνω από το δάπεδο εργασίας. Στην περίπτωση θαλάσσιων έργων λόγω αδυναμίας αποκοπής του στραγγιστηρίου με την ανάσυρση του περιβλήματος, γίνεται η αποκοπή στην αρχή πριν την

έμπηξη και με κατάλληλο σύστημα τροχαλίας και σχοινοβίου ολοκληρώνεται η διαδικασία εγκατάστασης.

Η χρήση των κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με την τεχνική των αμμοστραγγιστηρίων:

- Χαμηλό κόστος αγοράς και μεταφοράς (περίπου το 25% εκείνου των αμμοστραγγιστηρίων)
- Μεγάλη ταχύτητα τοποθέτησης (0,3 – 0,6m/sec)
- Εξασφάλιση συνέχειας στραγγιστηρίου
- «Καθαρότερο» εργοτάξιο (δεν απαιτείται η χρήση νερού)
- Μικρότερη διατάραξη του εδάφους (δηλαδή μικρότερη ζώνη αναμόχλευσης)

1.4.2 Αμμοπάσσαλοι – Αμμοστραγγιστήρια

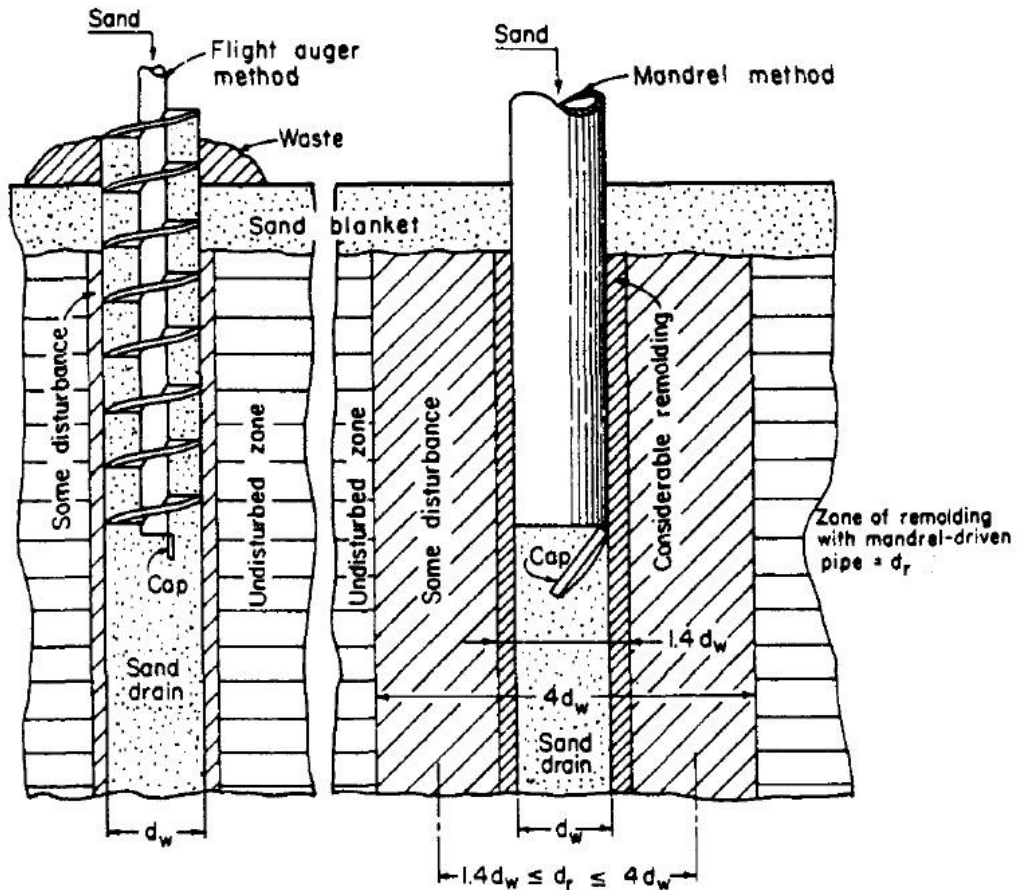
Τα κατακόρυφα αμμοστραγγιστήρια είναι κατακόρυφοι πάσσαλοι από άμμο. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτήν που έχει αναφερθεί παραπάνω στα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια. Εφαρμόζονται και αυτά σε κορεσμένα συμπιεστά εδάφη (κυρίως αργιλικά) για να συντομεύσουν τη διαδικασία της στερεοποίησης σε συνδυασμό με επίχωμα προφόρτισης.

Τα κατακόρυφα αμμοστραγγιστήρια έχουν διατομή κυλίνδρου και οι διάμετροι τους κυμαίνονται από 180 – 450mm.

Η εγκατάσταση των αμμοστραγγιστηρίων διαφέρει σε σχέση με αυτήν των προκατασκευασμένων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων. Η εγκατάστασής τους γίνεται (Κωστόπουλος, 2008):

- Με την τεχνική εκτόξευσης νερού (jetting)
- Με εκτόπιση του εδαφικού υλικού (με κρούσεις ή δονήσεις)
- Με διάτρηση με τη βοήθεια ή όχι κυκλοφορούντος νερού

Και στις τρεις ανωτέρω περιπτώσεις η οπή πληρώνεται με άμμο με την ανάσυρση του μεταλλικού σωλήνα.



Εικόνα 1-8. Τεχνικές εγκατάστασης αμμοστραγγιστηρίων (Xanthakos P. et al., 1994)

Κατά την εγκατάσταση των αμμοστραγγιστηρίων με τις παραπάνω τεχνικές γίνεται διατάραξη του εδάφους. Το τμήμα του εδάφους που διαταράσσεται γύρω από το αμμοστραγγιστήριο ονομάζεται αναμοχλευμένη ζώνη (smear zone). Το πάχος της ζώνης αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική εγκατάστασης και κυμαίνεται από 6 – 25mm. Η δημιουργία της αναμοχλευμένης ζώνης επηρεάζει αρνητικά τη διαδικασία της στερεοποίησης, καθώς οι οριζόντιες στρώσεις υψηλότερης διαπερατότητας αποδιοργανούνται με αποτέλεσμα την μείωση της αποστραγγιστικής ικανότητας και επομένως την καθυστέρηση της στερεοποίησης.

Όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με την τεχνική εγκατάστασης των αμμοστραγγιστηρίων υπάρχει και εντονότερη διατάραξη του εδάφους. Η εντονότερη διατάραξη γίνεται με την τεχνική έμπηξης – εκτόπισης του

εδαφικού υλικού, η οποία γίνεται με δονήσεις ή κρούσεις. Λιγότερη λαμβάνει χώρα με την τεχνική διάτρησης, στην οποία χρησιμοποιείται συνήθως ελικοφόρος δειγματολήπτης, ενώ ακόμα μικρότερη με την τεχνική εκτόξευσης νερού (jetting). (Κωστόπουλος, 2008)

Πάντως αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τον Eggestad (1983), στην τεχνική της έμπηξης υπάρχουν και ορισμένα θετικά στοιχεία:

- Ανοίγουν κατακόρυφες ρωγμές που πληρούνται με άμμο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διαπερατότητα
- Προκύπτει επαναστερεοποίηση που οδηγεί σταδιακά σε αύξηση της διατμητικής αντοχής

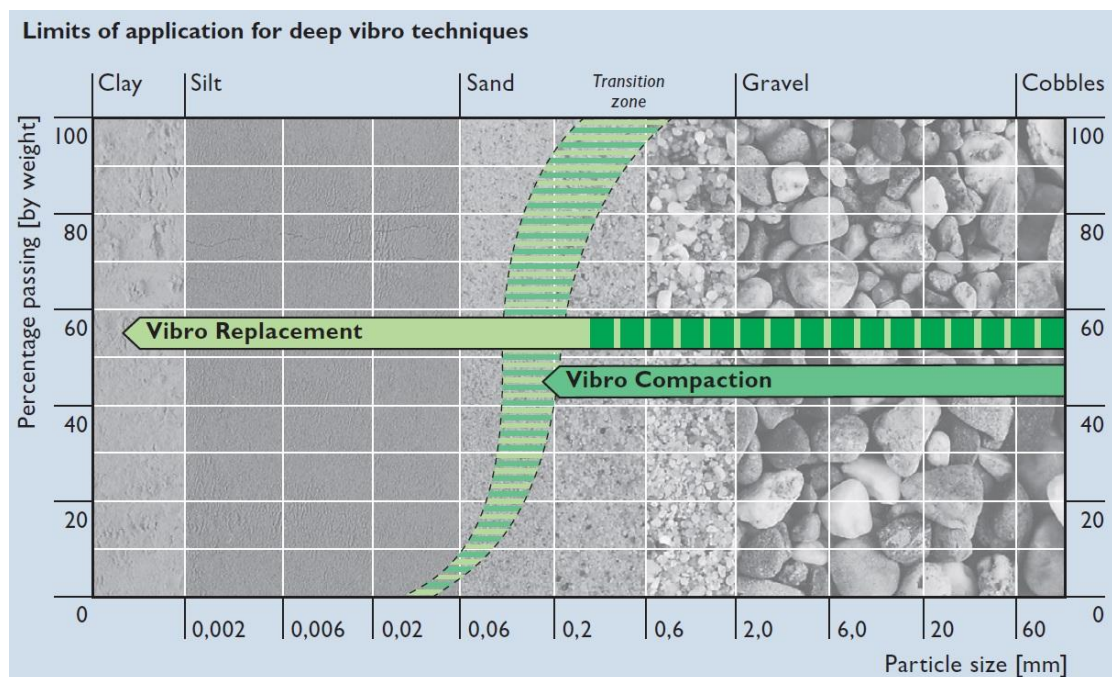
1.4.2.1 Προκατασκευασμένα αμμοστραγγιστήρια

Η κατηγορία αυτή των αμμοστραγγιστηρίων πλεονεκτεί σε σχέση με τα συμβατικά αμμοστραγγιστήρια, επειδή απαιτείται για τη λειτουργία τους μικρότερη ποσότητα άμμου. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 65 – 100mm. Στα προκατασκευασμένα αμμοστραγγιστήρια η άμμος περιβάλλεται από υφαντό γεωύφασμα πολυπροπυλενίου. Λόγω της δομής τους τα αμμοστραγγιστήρια αυτά έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν τις κατακόρυφες και τις οριζόντιες παραμορφώσεις του εδάφους, ώστε να μη μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η παροχετευτική ικανότητά τους και έτσι η αποτελεσματικότητά τους.

1.4.3 Χαλικοπάσσαλοι

Η τεχνική των χαλικοπασσάλων χρησιμοποιείται ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αντίθεση με τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια και τους αμμοπασσάλους που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι χαλικοπάσσαλοι έχουν επιπλέον χρήσεις. Χρησιμοποιούνται μεν για την επιτάχυνση της διαδικασίας της στερεοποίησης, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη αποστραγγιστική ικανότητα, αλλά και για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους και την μείωση των καθιζήσεων.

Οι χαλικοπάσσαλοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις κατηγορίες των εδαφών, όμως σε κάθε κατηγορία αλλάζει η μέθοδος εγκατάστασης τους. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-9, για χαλαρά, μη - συνεκτικά εδάφη χρησιμοποιείται η βαθιά δονητική συμπίκνωση, ενώ η βαθιά δονητική αντικατάσταση είναι καταλληλότερη μέθοδος για τα πιο συνεκτικά εδάφη, όπως είναι τα ιλυώδη και τα αργιλικά.



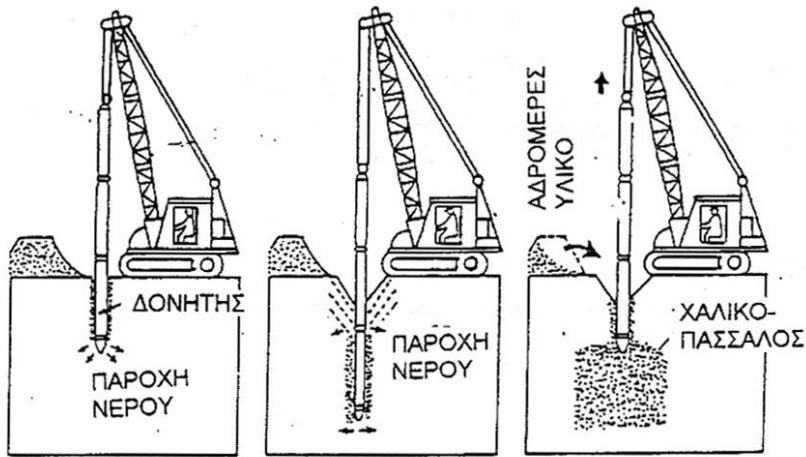
Εικόνα 1-9. Τεχνικές εγκατάστασης χαλικοπασσάλων ανάλογα με την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους (kellerholding.com, 6/2017)

1.4.3.1 Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση (Vibro Compaction)

Η βαθιά δονητική συμπύκνωση είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την συμπύκνωση χαλαρών κοκκωδών σχηματισμών.

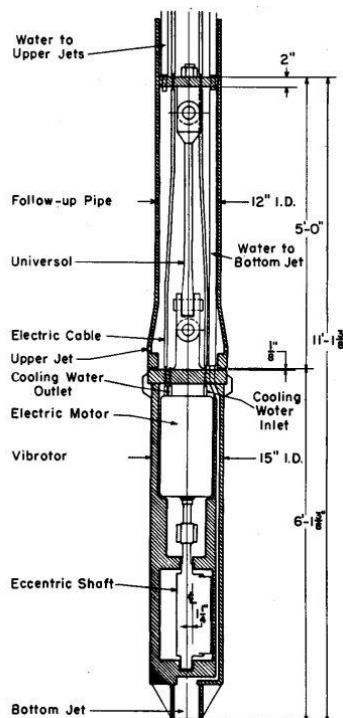
Στην περίπτωση επαναλαμβανόμενων φορτίσεων για κάποιο χρονικό διάστημα (όπως στην περίπτωση σεισμού) ένα τέτοιο έδαφος (κορεσμένο, χαλαρό κοκκώδες) μπορεί να χάσει την διατμητική του αντοχή και να ρευστοποιηθεί με αποτέλεσμα να συμβούν μεγάλες παραμορφώσεις και καταστροφή πιθανών κατασκευών που θεμελιώνονται σε αυτό. Για την αποτροπή της παραπάνω κατάστασης εφαρμόζεται εκ των προτέρων η μέθοδος της βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης.

Στην μέθοδο αυτή δονητική στήλη που αναρτάται από ανυψωτικό γερανό διεισδύει στο έδαφος με το ίδιο το βάρος της, με τη βοήθεια νερού που βγαίνει από ακροφύσια κοντά στην αιχμή του δονητή αλλά και με την δόνηση αυτού. Όταν φθάσει η δονητική στήλη στο επιθυμητό βάθος, αρχίζει η συμπύκνωση του, καθώς αυτή ανασύρεται σε βήματα των 30 - 60 cm με μειωμένη παροχή νερού. Η παραμονή της δονητικής τορπίλης σε κάθε βήμα εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται για την συμπύκνωση του εδάφους στο εκάστοτε βάθος. Μαζί με τη συμπύκνωση του εδάφους που επιτυγχάνεται με τη δόνηση της τορπίλης, καθώς αυτή ανασύρεται σε βήματα, διοχετεύεται με σταθερό ρυθμό κοκκώδες υλικό από την επιφάνεια για την πλήρωση των κενών. Με την μέθοδο αυτή μπορεί να δημιουργηθεί μια συμπυκνωμένη εδαφική στήλη που η διάμετρος της να κυμαίνεται από 2 έως 4 m. (ΕΛΟΤ, 2009)



Εικόνα 1-10. Μέθοδος βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης (Μπαρουλάκη, 2011)

Η δονητική τορπίλη που χρησιμοποιείται για τη διείσδυση στο έδαφος μπορεί να χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ή υδραυλικό κινητήρα. Συνήθως η συχνότητα δόνησης της τορπίλης κυμαίνεται από 30 - 50Hz, ενώ το μήκος της είναι από 2 - 4,5m και το βάρος της από 4 - 8tn. Επιπλέον η διάμετρος της κυμαίνεται από 30 - 45cm (Λουπασάκης, 2015).



Εικόνα 1-11. Τομή Δονητικής τορπίλης (www.geoengineer.org, 6/2017)

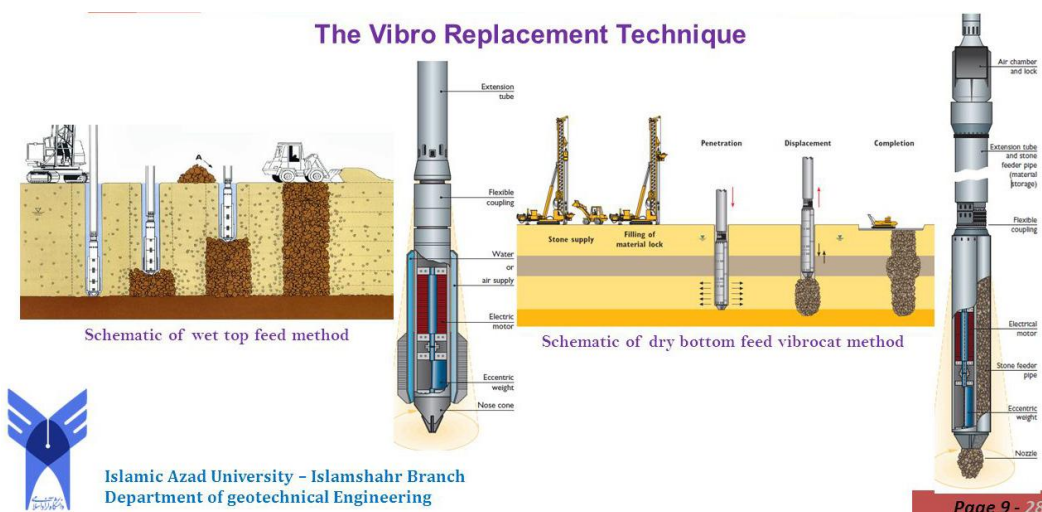
1.4.3.2 Βαθιά Δονητική Αντικατάσταση (Vibro Replacement)

Η βαθιά δονητική αντικατάσταση είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται αποτελεσματικότερα στην περίπτωση των λεπτόκοκκων, συνεκτικών εδαφών μεγάλης συμπίεστικότητας, όπως είναι τα ιλυώδη και τα αργιλικά.

Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στη βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών του εδάφους, αυξάνοντας τη φέρουσα ικανότητά του. Ταυτόχρονα λόγω της μεγάλης διαπερατότητας του υλικού των χαλικοπασσάλων, επιτρέπει την εκτόνωση των υπερπιέσεων του νερού των πόρων, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης.

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται δονητική τορπίλη, η οποία μαζί με άλλα χαλύβδινα στελέχη αποτελούν τη δονητική στήλη. Αυτή τοποθετείται κατακόρυφα πάνω από την κατάλληλη θέση με τη βοήθεια ανυψωτικού γερανού. Στη συνέχεια γίνεται η διείσδυση της δονητικής στήλης στο έδαφος με τη βοήθεια νερού ή πεπιεσμένου αέρα, σε συνδυασμό με το ίδιο το βάρος της αλλά και με τη δόνησή της.

Ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται νερό ή πεπιεσμένος αέρας λαμβάνει χώρα υγρή ή ξηρή προχώρηση αντίστοιχα. Σημειώνεται ωστόσο ότι στην περίπτωση της ξηρής προχώρησης πρέπει το έδαφος να έχει ικανοποιητική αστράγγιστη διατμητική αντοχή για να μην υπάρχει κατάπτωση των τοιχωμάτων.



Islamic Azad University - Islamshahr Branch
Department of geotechnical Engineering

Εικόνα 1-12. Wet Top feed method vs Dry bottom feed method (slideplayer.com, 7/2017)

Στην περίπτωση της μεθόδου της δονητικής αντικατάστασης υπάρχουν διάφορες τεχνικές εγκατάστασης των χαλικοπασσάλων. Αυτές είναι:

- Χαλικοπάσσαλος με τροφοδοσία των αδρανών από την επιφάνεια (Top feed method)
- Χαλικοπάσσαλος με τροφοδοσία των αδρανών στην αιχμή της δονητικής στήλης (Bottom feed method)
- Χαλικοπάσσαλος με έμπηξη κλειστού σωλήνα

1.4.3.2.1 Απαιτήσεις ενσωματούμενων υλικών

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στη δομή του χαλικοπασσάλου είναι το υλικό που χρησιμοποιείται. Σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του χαλικοπασσάλου διαφέρουν και οι διαστάσεις των αδρανών.

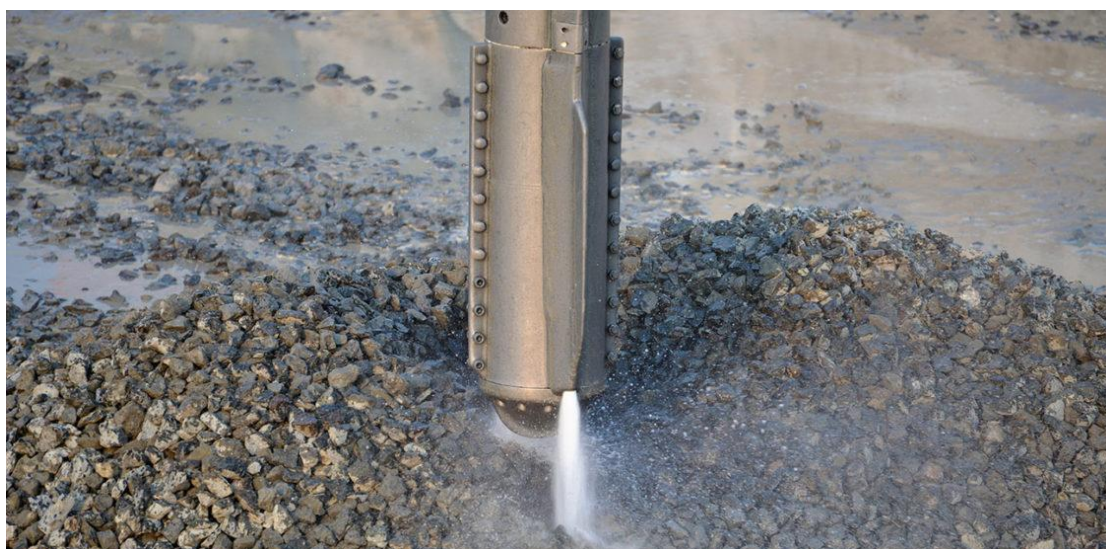
Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-11-03-03-00:2009, προβλέπεται:

- Στην μέθοδο δονητικής αντικατάστασης με τροφοδοσία από την επιφάνεια, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χαλίκια από σχετικά σκληρά και ανθεκτικά βραχώδη προϊόντα με διαστάσεις από 10 - 50mm.
- Στην μέθοδο της δονητικής αντικατάστασης με τροφοδοσία από την αιχμή, καθώς και στην μέθοδο του κλειστού σωλήνα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χαλίκια από σχετικά σκληρά και ανθεκτικά βραχώδη προϊόντα με διαστάσεις από 6 - 38mm, για τη διευκόλυνση της διέλευσης τους από τον ειδικό σωλήνα τροφοδοσία στην αιχμή.
- Τα υλικά αυτά θα πρέπει να είναι σκληρά και χημικώς αδρανή για να μην επηρεάζονται από δυσμενείς συνθήκες λόγω υπόγειου νερού.
- Τα υλικά αυτά θα πρέπει να είναι κατά προτίμηση από θραυστά γωνιώδη χαλίκια, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη γωνία εσωτερικής τριβής και επομένως να προσδίδουν στο έδαφος καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά.

1.4.3.2.2 Χαλικοπάσσαλος με τροφοδοσία από την επιφάνεια (Top feed method)

Η τεχνική εγκατάστασης αυτή γίνεται συνήθως με τη χρήση νερού και επομένως με τη μέθοδο της υγρής προχώρησης. Η διείσδυση της δονητικής στήλης γίνεται όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Πιο συγκεκριμένα η επιβολή της δόνησης από την τορπίλη, σε συνδυασμό με την εκτόξευση του νερού από τα ακροφύσια εκτοπίζει πλευρικά και σε κάποιο βαθμό απομακρύνει μέρος του αργιλικού εδάφους. Συγχρόνως τα τοιχώματα της οπής συγκρατούνται από το ανερχόμενο μίγμα νερού και εδαφικού υλικού γύρω από το στέλεχος σε όλη τη διάρκεια της εγκατάστασης του χαλικοπασσάλου.



Εικόνα 1-13. Χρήση νερού διαμέσου των ακροφυσίων για τη διείσδυση στο έδαφος (nsceme.com, 7/2017)

Μόλις η δονητική στήλη φθάσει στο επιθυμητό βάθος, ξεκινάει η κατασκευή του χαλικοπασσάλου. Η στήλη αρχίζει να ανέρχεται σε βήματα των 30 - 50cm, ενώ ταυτοχρόνως διοχετεύεται χαλίκι από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια ενός φορτωτή. Η τροφοδοσία γίνεται συνεχώς από την επιφάνεια μεταξύ των τοιχωμάτων της οπής και της δονητικής στήλης (ΕΛΟΤ, 2009).



Εικόνα 1-14. Τεχνική κατασκευής χαλικοπασσάλου με τροφοδοσία από την επιφάνεια (www.earthtech.com, 7/2017)

Σε κάθε βήμα ανόδου η δονητική τορπίλη ξαναβυθίζεται, έτσι ώστε να προκαλέσει με τη δόνηση της συμπύκνωση του χαλικιού και περαιτέρω εκτόπιση του εδάφους μεγαλώνοντας τη διάμετρο του χαλικοπασσάλου πέραν αυτήν της οπής. Η διάρκεια του κάθε βήματος και οι παράμετροι της δόνησης εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην εκάστοτε θέση και προσδιορίζονται από τα αποτελέσματα στο αρχικό δοκιμαστικό πεδίο.

Σημειώνεται ακόμα ότι η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και με ξηρή προχώρηση στην περίπτωση που ο χαλικοπάσσαλος δεν θα εκτείνεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα ή τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους είναι τέτοια που δεν θα επιτρέπουν καταπτώσεις των τοιχωμάτων της οπής.

1.4.3.2.3 Χαλικοπάσσαλος με τροφοδοσία στην αιχμή της δονητικής στήλης (Bottom feed method)

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται συνήθως με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα και επομένως με τη μέθοδο της ξηρής προχώρησης. Η διείδυση της δονητικής στήλης γίνεται όπως περιγράφηκε παραπάνω.

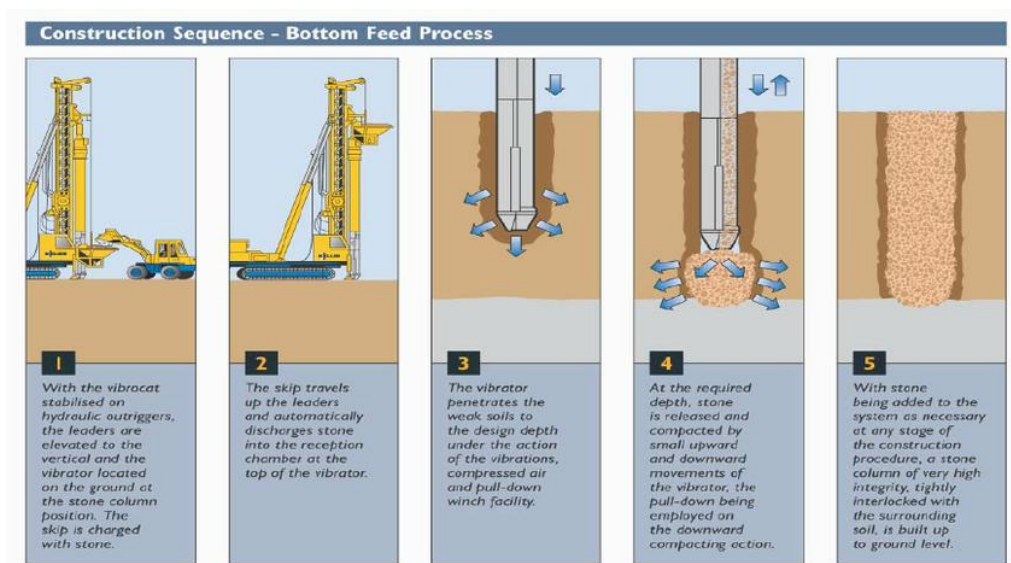
Ωστόσο διαφέρει το σύστημα ανάρτησης της δονητικής στήλης. Αυτή αναρτάται από ανυψωτικό γερανό με δύο τρόπους (ΕΛΟΤ, 2009):

- Η δονητική στήλη αναρτάται από γερανό με κατακόρυφο οδηγό επί του οποίου ολισθαίνουν ανεξάρτητα η δονητική στήλη και μία χοάνη για την τροφοδοσία του δονητικού στελέχους με σύρτη στο κάτω μέρος. Ο σωλήνας τροφοδοσίας χαλικιού φθάνει μέχρι την αιχμή του δονητή και τροφοδοτείται με αδρανή από τη χοάνη στο άνω άκρο του. Η χοάνη μπορεί να ανεβοκατεβαίνει με τη βοήθεια συρματόσκοινου, έτσι ώστε να μεταφέρει τα αδρανή από το δάπεδο εργασίας στο άνω μέρος του δονητικού στελέχους.
- Η δονητική στήλη αναρτάται με συρματόσχοινο από κεκλιμένη μπούμα γερανού και η τροφοδοσία στη χοάνη (που βρίσκεται στην κεφαλή της στήλης) γίνεται μέσω ελαστικού σωλήνα με μία κατάλληλη αντλία αδρανών.



Εικόνα 1-15. Συστήματα ανάρτησης της δονητικής στήλης στη μέθοδο τροφοδοσίας στην αιχμή (www.zetas.com.tr, 7/2017)

Η διαδικασία κατασκευής του χαλικοπασσάλου δε διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη τεχνική. Πιο συγκεκριμένα γίνεται έμπηξη της δονητικής στήλης μέχρι το επιθυμητό βάθος. Στη συνέχεια ανυψώνεται η στήλη γύρω στο 0,50m και μέσω των διατάξεων που αναφέρθηκαν παραπάνω τα αδρανή διοχετεύονται απευθείας από την αιχμή της δονητικής τορπίλης στο μέτωπο της οπής. Τότε πραγματοποιείται επανέμπηξη της στήλης, για τη συμπύκνωση των αδρανών. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι την πλήρωση της οπής.



Εικόνα 1-16. Διαδικασία κατασκευής χαλικοπασσάλου με τροφοδοσία στην αιχμή (www.researchgate.net, 7/2017)

1.4.3.2.4 Χαλικοπάσσαλος με έμπηξη κλειστού σωλήνα

Η μέθοδος έμπηξης κλειστού σωλήνα ή αλλιώς και ελληνική μέθοδος βασίζεται στην αρχή κατασκευής πασσάλων με έμπηξη.

Η έμπηξη γίνεται είτε δονητικά είτε κρουστικά με κατάλληλο δονητή ή σφυρί. Για την έμπηξη απαιτείται άκαμπτος χαλύβδινος σωλήνας με πώμα στο κάτω άκρο του και εξωτερική διάμετρο τουλάχιστον 60cm. Μόλις ολοκληρωθεί η έμπηξη του σωλήνα στο επιθυμητό βάθος, γίνεται η πλήρωση του με αδρανή με τη βοήθεια χοάνης που τοποθετείται στο άνω άκρο του.

Στη συνέχεια ο σωλήνας ανυψώνεται σε κάποιο βαθμό, έτσι ώστε να ανοίξει το πώμα και να διοχετευτεί ποσότητα αδρανών στην οπή. Ακολουθεί επανέμπληξη του σωλήνα, ώστε να κλείσει το πώμα και να συμπυκνωθεί το υλικό των αδρανών. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του χαλικοπασσάλου.

Σημειώνεται ότι το μήκος ανύψωσης του σωλήνα κάθε φορά δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα οποία πρέπει να είναι τέτοια που να μην επιτρέπουν την κατάπτωση των τοιχωμάτων της οπής. Ακόμα για τη μείωση των τριβών επαφής των αδρανών μεταξύ τους αλλά και με τα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα έμπληξης, θα πρέπει να διοχετεύεται νερό μέσα στο σωλήνα μαζί με τα αδρανή, τόσο όσο να γεμίζουν τα κενά. (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-11-03-03-00: 2009)

1.4.3.2.5 Υποθαλάσσια κατασκευή χαλικοπασσάλων

Τις τελευταίες δεκαετίες η έλλειψη χώρου έχει δημιουργήσει την ανάγκη για παράκτιες κατασκευές, οι οποίες πολλές φορές προεκτείνονται μέσα στη θάλασσα, αλλά και για μεγαλύτερης κλίμακας λιμάνια. Και στις δύο περιπτώσεις η ανάγκη κατάλληλης θεμελίωσης είναι σημαντική, καθώς τα έργα αυτά είναι αρκετά βαριά, με αποτέλεσμα να αναμένονται σημαντικές καθιζήσεις. Επειδή λοιπόν η γεωλογία των περιοχών αυτών αποτελείται συνήθως από συνεκτικά και συμπιεστά εδάφη, τα οποία αργούν να καθιζάνουν, προκύπτει η ανάγκη της επιτάχυνσης της διαδικασίας. Μια χαρακτηριστική μέθοδος αντιμετώπισης είναι η κατασκευή χαλικοπασσάλων, η οποία γίνεται με τη μέθοδο της δονητικής αντικατάστασης.

Όπως και στην περίπτωση των χαλικοπασσάλων που κατασκευάζονται στη στεριά, υπάρχουν διάφορες τεχνικές κατασκευής τους, έτσι και στους υποθαλάσσιους χαλικοπασσάλους υπάρχουν διάφορες μέθοδοι. Αυτές είναι (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-09-03-05-00: 2009):

- Μέθοδος κλειστού σωλήνα
- Μέθοδος "εν ξηρώ" με εσωτερική τροφοδοσία αδρανών από την αιχμή (Bottom feed dry method)

- "Υγρή" μέθοδος με εξωτερική τροφοδοσία αδρανών από την επιφάνεια - Μέθοδος "κουβέρτας" (Wet method with stone blanket)

1.4.3.2.5.1 Μέθοδος κλειστού σωλήνα

Η μέθοδος αυτή αναφέρθηκε και στην περίπτωση των χαλικοπασσάλων που κατασκευάζονται στην στεριά και η διαδικασία κατασκευής είναι σχεδόν παρόμοια. Η διαφορά έγκειται στην πρώτη ανάσυρση του χαλύβδινου σωλήνα, η οποία φθάνει περίπου το 1,5m, αλλά και στην επανέμπηξη του, που είναι περίπου 0,75m. Επιπλέον μία διαφορά είναι ότι ο σωλήνας θα πρέπει να στηρίζεται πλευρικά κατά τρόπο που να ελέγχεται η κατακορυφότητά του.

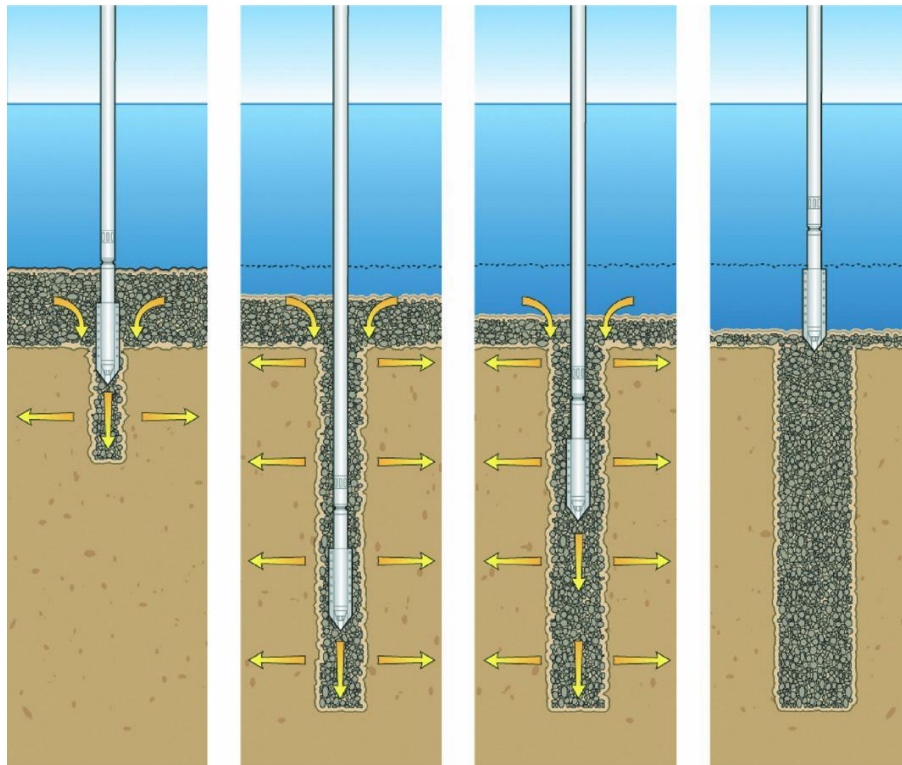
1.4.3.2.5.2 Μέθοδος "εν ξηρώ" με εσωτερική τροφοδοσία αδρανών από την αιχμή (Bottom feed dry method)

Η μέθοδος αυτή αναφέρθηκε και στην περίπτωση των χαλικοπασσάλων που κατασκευάζονται στην στεριά και η διαδικασία κατασκευής είναι παρόμοια. Η διείσδυση γίνεται με τη βοήθεια δονητή και πεπιεσμένου αέρα. Τα αδρανή διοχετεύονται στην αιχμή της δονητικής τορπίλης και με εναλλασσόμενες κινήσεις αυτής πάνω - κάτω, συμπυκνώνονται και έτσι κατασκευάζεται ο χαλικοπάσσαλος.

1.4.3.2.5.3 "Υγρή" μέθοδος με εξωτερική τροφοδοσία αδρανών από την επιφάνεια - Μέθοδος "κουβέρτας" (Wet method with stone blanket)

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει κάποιες διαφορές στην κατασκευή των χαλικοπασσάλων. Στην περίπτωση αυτή διαστρώνεται στην επιφάνεια του πυθμένα μία στρώση αδρανών κάποιου πάχους. Κατόπιν διεισδύει η δονητική τορπίλη στο έδαφος με τη βοήθεια νερού που εκτοξεύεται από ακροφύσια. Το νερό στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται εκτός από τη διείσδυση και για τη στήριξη των τοιχωμάτων της οπής. Κατά τη διαδικασία αυτή ανέρχονται στην επιφάνεια με τη ροή του νερού λεπτόκοκκα υλικά. Με τη διείσδυση της τορπίλης εισχωρούν στην οπή και τα αδρανή της "κουβέρτας". Με τις

εναλασσόμενες κινήσεις πάνω - κάτω της τορπίλης συμπυκνώνονται τα αδρανή και κατασκευάζεται έτσι ο χαλικοπάσσαλος.



Εικόνα 1-17. Μέθοδος "κουβέρτας" (nangluongvietnam.vn, 7/2017)

Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους, υπάρχει ανάγκη για τροφοδοσία αδρανών μεγαλύτερων διαστάσεων, της τάξης των 40 - 80mm. Αυτό γίνεται, επειδή χρειάζεται τα αδρανή να έχουν μεγαλύτερο βάρος για να καταφέρουν να υπερνικήσουν την ανοδική ροή του νερού και να φθάσουν στον πυθμένα της οπής.

1.4.3.2.5.4 Marine Double Lock Gravel Pump Method

Μία ακόμη μέθοδος που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορά σε κατασκευή υποθαλάσσιων χαλικοπασσάλων είναι η Marine Double Lock Gravel Pump Method. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα για κατασκευή χαλικοπασσάλων σε περιπτώσεις που το βάθος του νερού είναι μεγάλο,

όπως είναι σε κυματοθραύστες ή ενδεχομένως και σε κρηπιδότοιχους. Η κατασκευή του χαλικοπασσάλου γίνεται με διοχέτευση του υλικού και όλων των απαραίτητων στοιχείων από πλωτή εξέδρα.

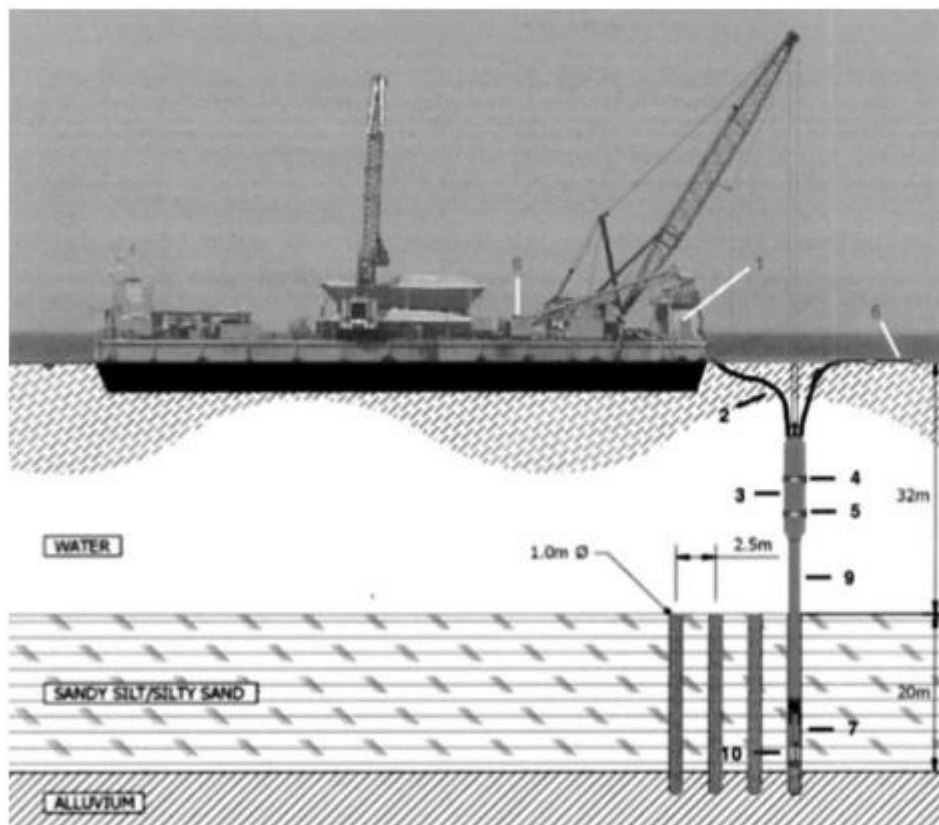


Figure 4. Gravel silo and conveyor belt (middle), crane with 24 m long Marine Gravel Pump unit (right)

Εικόνα 1-18. Τυπική εφαρμογή της μεθόδου Marine Double Lock Gravel Pump Method (www.degenengineering.com, 7/2017)

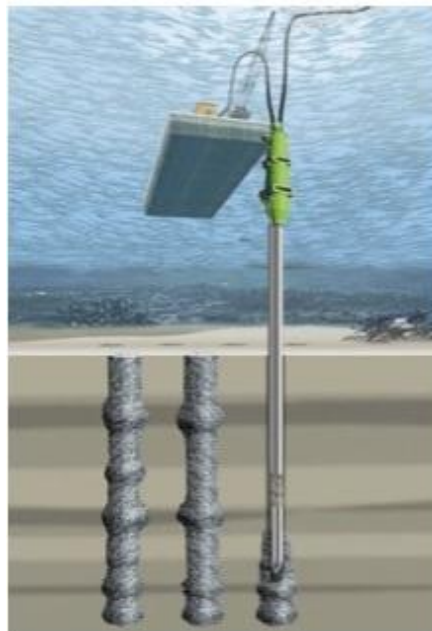
Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται αριθμημένα τα μέρη της στήλης αλλά και όλων των στοιχείων που συμβάλλουν στην κατασκευή του χαλικοπασσάλου.

Στην μέθοδο αυτή υπάρχει ένας σωλήνας ειδικού τύπου (6) (Schnorchel), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το δοχείο (3) (receiver tank). Τόσο ο σωλήνας αυτός όσο και οι ασφάλειες (4 & 5) λειτουργούν με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά τη διάρκεια της μεταφοράς των αδρανών μέσω του σωλήνα (2), υπάρχει ατμοσφαιρική πίεση στο δοχείο (3), ανεξαρτήτως του βάθους, το οποίο θεωρητικά μπορεί να φθάσει και τα 200m. Με αυτόν τον τρόπο ένας τυποποιημένος συμπιεστής των 7,5 bar μπορεί να κατορθώσει τη μεταφορά

των αδρανών από το δοχείο (1) (blow tank) με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα στο δοχείο (3). Ένας συμπιεστής υψηλής πίεσης (8) τροφοδοτεί απευθείας στο δοχείο (9) (pressure tank) πεπιεσμένο αέρα και από εκεί διαμέσου της αιχμής του δονητή στο χαλικοπάσσαλο, έτσι ώστε να υπερνικήσει τις πιέσεις του νερού αλλά και του εδάφους. (www.degenengineering.com, 7/2017)

Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα για κατασκευές χαλικοπασσάλων σε πολύ μεγάλα βάθη μέχρι και 200m. Αν και δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα σε τέτοια βάθη, οι σωλήνες που διακινούν τα αδρανή με πεπιεσμένο αέρα θα μπορούσαν θεωρητικά να αντέξουν.

Σημειώνεται ότι η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για την κατασκευή της θεμελίωσης του κυματοθραύστη και του κρηπιδότοιχου του λιμένα της Πάτρας, κατά τη περίοδο 2000 - 2002.



Εικόνα 1-19. Αναπαράσταση της μεθόδου στην περίπτωση του λιμένα της Πάτρας (www.degenengineering.com, 7/2017)

1.4.3.3 Αλληλεπίδραση χαλικοπασσάλου - περιβάλλοντος εδάφους

Βασικά χαρακτηριστικά του χαλικοπασσάλου που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση ενός έργου είναι:

- Η διάμετρος των χαλικοπασσάλων
- Η αξονική απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων
- Η γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού των χαλικοπασσάλων

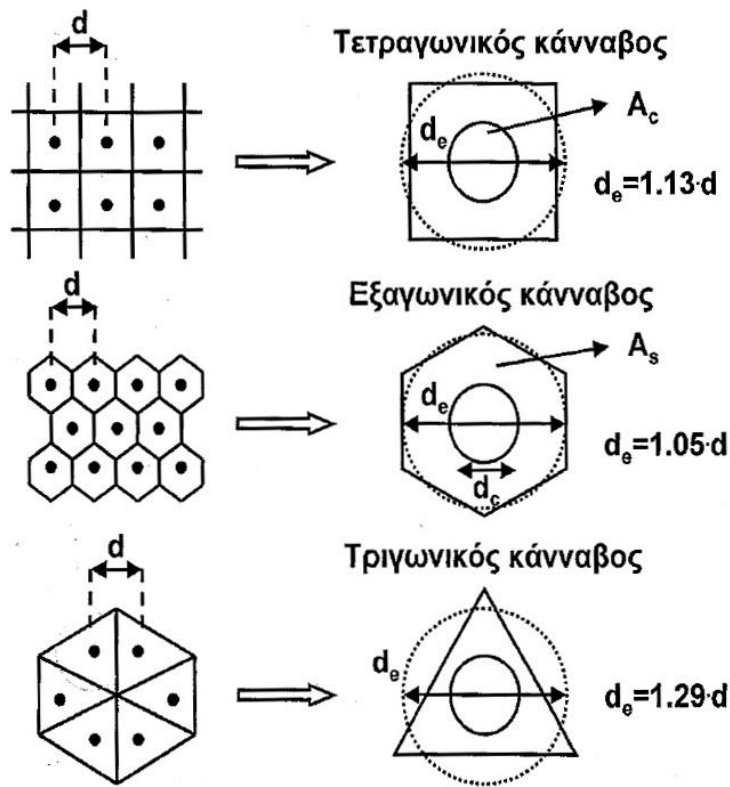
1.4.3.3.1 Διάμετρος χαλικοπασσάλων

Η διάμετρος του χαλικοπασσάλου καθορίζεται από τον επιθυμητό βαθμό βελτίωσης, τη μέθοδο εγκατάστασης, το μέγεθος των χαλικιών και την αντοχή του in situ υπεδάφους. Ειδικότερα, η διάμετρος είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερη είναι η συνεκτικότητα του εδάφους. Οι τιμές της διαμέτρου κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0,50 - 1,20m. Οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν σε χαλικοπασσάλους με μέγεθος κόκκου μέσης διαμέτρου 40mm, ενώ οι μεγαλύτερες αφορούν σε χάλικες διαμέτρου 100mm (Κωστόπουλος, 2008).

1.4.3.3.2 Αξονική απόσταση μεταξύ χαλικοπασσάλων

Οι χαλικοπάσσαλοι εγκαθίστανται συνήθως στις κορυφές τετραγωνικού, τριγωνικού ή εξαγωνικού καννάβου. Η αξονική απόσταση αυτών κυμαίνεται από 1,5 - 3,5m (Κωστόπουλος, 2008).

Η επιφάνεια επιρροής του κάθε χαλικοπασσάλου μπορεί να θεωρηθεί ως μία ισοδύναμη κυλινδρική επιφάνεια με διάμετρο d_e της πραγματικής περιοχής του περιβάλλοντος εδάφους που αντιστοιχεί σε κάθε χαλικοπάσσαλο. Η επιφάνεια επιρροής είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος του καννάβου (Μπαρουλάκη, 2011).



Εικόνα 1-20. Διάφοροι καννάβοι χαλικοπασσάλων και η επιφάνεια επιρροής τους (Μπαρουλάκη, 2011)

Ο λόγος που εκφράζει το ποσοστό αντικατάστασης του in situ εδάφους από το κοκκώδες υλικό ορίζεται ως συντελεστής αντικατάστασης εδάφους (Area Replacement Factor) και αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha_s = A_c / A = [(\pi \cdot d_c^2) / 4] / [(\pi \cdot d_e^2) / 4]$$

όπου, A_c : η επιφάνεια του χαλικοπασσάλου

A : η συνολική επιφάνεια (χαλικοπάσσαλος και περιβάλλον έδαφος)

1.4.3.3 Γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού των χαλικοπασσάλων

Η γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, την τεχνική εγκατάστασής τους και την ενδεχόμενη εισχώρηση λεπτόκοκκου γεωυλικού από το περιβάλλον έδαφος στο σώμα του

χαλικοπασσάλου. Οι συνήθεις τιμές κυμαίνονται από 35° - 45°. Για υψηλές όμως τιμές, όπως 40° - 45°, θα πρέπει η εγκατάσταση να υλοποιείται μέσω Vibroflot και η διαδικασία δόνησης και συμπύκνωσης του υλικού να είναι σταθερά ομοιόμορφη. Μέσω παραμετρικών αναλύσεων οι Greenwood & Kirsch (1984) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι διαφορές της τάξεως των 5° στην γωνία εσωτερικής τριβής προκαλεί σχετικώς μικρή διαφοροποίηση στην τελική φέρουσα ικανότητα και στην καθίζηση των χαλικοπασσάλων (Κωστόπουλος, 2008).

2. ΚΡΗΠΙΔΟΤΟΙΧΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Οι κρηπιδότοιχοι είναι εσωτερικά λιμενικά έργα που διαχωρίζουν τη ξηρά από τη θάλασσα.

Σκοπός τους είναι να δίνουν στα πλοία τη δυνατότητα να πλευρίσουν σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο, ώστε να προσδεθούν και να γίνει η φορτω – εκφόρτωση των εμπορευμάτων, των αυτοκινήτων αλλά και επιβίβαση – αποβίβαση των ανθρώπων. Ταυτόχρονα αντιστηρίζουν τόσο το φυσικό έδαφος όσο και τις τεχνητές επιχωματώσεις που βρίσκονται πίσω από το κρηπιδότοιχο και αποτελούν το κατάστρωμα, πάνω στο οποίο γίνεται η διακίνηση των εμπορευμάτων.

Οι κρηπιδότοιχοι διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Στους κλειστούς ή συμπαγείς
- Στους ανοιχτούς

Οι κλειστοί ή συμπαγείς κρηπιδότοιχοι διαθέτουν και τη μεγαλύτερη ποικιλία κρηπιδότοιχων. Διακρίνονται με τη σειρά τους σε:

- Συμπαγείς κρηπιδότοιχους βαρέως τύπου
- Συμπαγείς κρηπιδότοιχους ελαφρού τύπου

Οι συμπαγείς κρηπιδότοιχοι βαρέως τύπου είναι έργα βαρύτητας, δηλαδή ανθίστανται στις μετακινήσεις με το βάρος τους, αλλά και με την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ αυτών και του εδάφους. Σε αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται οι κρηπιδότοιχοι από σκυρόδεμα με τεχνητούς ογκολίθους (είτε συμπαγείς είτε κυψελωτοί), οι κρηπιδότοιχοι με σιδερένια ή από οπλισμένο σκυρόδεμα κιβώτια (caisson) και οι κρηπιδότοιχοι με σιδερένια κελιά που γεμίζονται με κοινά υλικά.

Αναφέρεται ακόμα ότι επειδή τα έργα αυτά είναι βαρύτητας, χρειάζονται κατάλληλο ανθεκτικό υπόβαθρο, το οποίο αν δεν υπάρχει θα πρέπει να αντικατασταθεί από τεχνητό.

Οι συμπαγείς κρηπιδότοιχοι ελαφρού τύπου αποτελούνται από λεπτά αλλά πολύ ανθεκτικά και εύκαμπτα διαφράγματα, τα οποία ανθίστανται στις μετακινήσεις με τις ελαστικές τους παραμορφώσεις. Σε αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται οι κρηπιδότοιχοι που αποτελούνται από πασσαλοσανίδες, οι οποίες μπορεί να είναι είτε μεταλλικές είτε ξύλινες είτε κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι ανοιχτοί κρηπιδότοιχοι αποτελούνται από μία εξέδρα, η οποία αποτελεί το κατάστρωμα πάνω στο οποίο γίνεται η μεταφορά των εμπορευμάτων. Η εξέδρα αυτή στηρίζεται πάνω σε πασσάλους, οι οποίοι μεταφέρουν τα φορτία της εξέδρας στον πυθμένα ή καλύτερα σε σταθερό υπόβαθρο, το οποίο μπορεί να φθάνει αρκετά μέτρα κάτω από τον πυθμένα. Στην περίπτωση των ανοιχτών κρηπιδότοιχων το νερό της θάλασσας δε διακόπτεται από την ύπαρξη τους, αλλά συνεχίζει να κυκλοφορεί ελεύθερα και κάτω από την εξέδρα.

2.2 Κλειστοί κρηπιδότοιχοι

2.2.1 Κρηπιδότοιχοι βαρέως τύπου

2.2.1.1 Κρηπιδότοιχοι με τεχνητούς ογκολίθους

Οι κρηπιδότοιχοι αυτού του τύπου είναι έργα βαρύτητας και αποτελούνται από συμπαγείς ή κυψελωτούς τεχνητούς ογκολίθους. Το σχήμα τους είναι πρισματικό και έχουν διατομή ορθογώνιου παραλληλογράμμου.

Οι συμπαγείς τεχνητοί ογκόλιθοι κατασκευάζονται συνήθως από άοπλο σκυρόδεμα. Το βάρος τους κυμαίνεται από 30 έως 100 τόννους, ενώ σπάνια και σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει μέχρι τους 200 τόννους. Ωστόσο αυτό εξαρτάται από την ικανότητα των ανυψωτικών μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται. Για τη σύνδεση των συμπαγών τεχνητών ογκολίθων χρησιμοποιούνται τóρμοι και εντορμίες για να υπάρχει κατάλληλη αλληλοεμπλοκή μεταξύ τους. Σε περίπτωση που η τοποθέτηση των τεχνητών ογκολίθων γίνεται σε ανεξάρτητες στήλες, τότε οι κατακόρυφοι αρμοί που δημιουργούνται μεταξύ των γειτονικών στηλών μπορούν να σφραγισθούν με έγχυτο σκυρόδεμα σε κατάλληλα διαμορφωμένη υποδοχή (Μέμος, 2008).

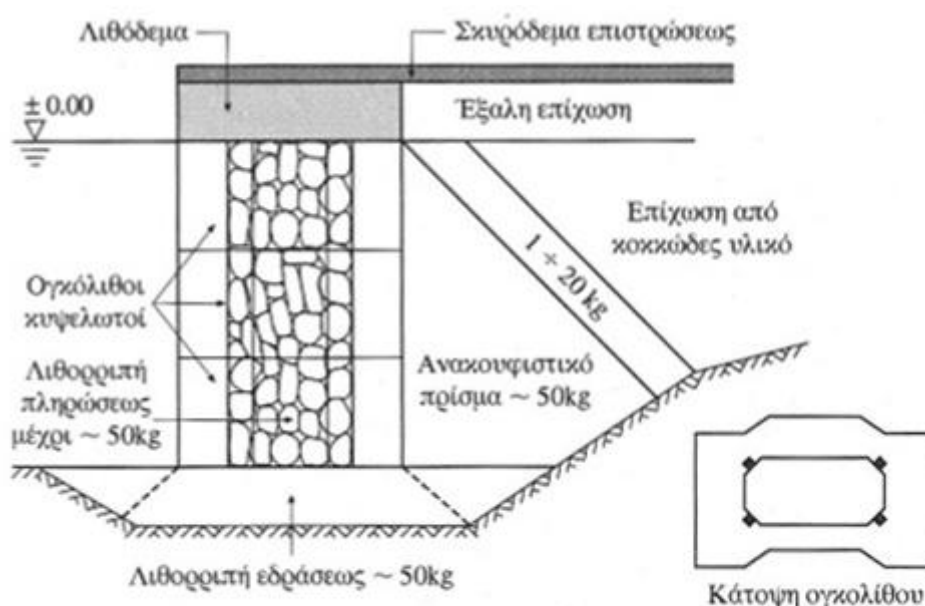


Εικόνα 2-1. Κατασκευή συμπαγούς κλειστού κρηπιδότοιχου για το λιμάνι του Κατάρ (zabezpieczeniahydrotechniczne.wordpress.com, 6/2017)

Οι κυψελωτοί τεχνητοί ογκόλιθοι διαφέρουν από τους συμπαγείς ως προς το γεγονός ότι στη μάζα τους έχουν μεγάλα κενά, τα οποία είτε πληρώνονται στη συνέχεια από ξηρό σκυρόδεμα μέσα στο νερό ή άλλα βραχώδη υλικά, είτε

παραμένουν ως έχουν. Το σχήμα τους είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, έχουν πλάτος από 2,5 έως 3,5 μέτρα, ενώ το ύψος τους κυμαίνεται από 1,3 έως 2,5 μέτρα (Δασκαλάκης, 2009).

Όταν χρησιμοποιείται για την πλήρωση των κενών έγχυτο σκυρόδεμα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση του, αφού η έγχυση γίνεται μέσα στο νερό. Σημειώνεται ότι και σε αυτόν τον τύπο ογκολίθων υπάρχουν τóρμοι και εντορμίες για την πλευρική σύνδεση των τεχνητών ογκολίθων.



Εικόνα 2-2. Κρηπιδότοιχος με κυψελωτούς τεχνητούς ογκολίθους (Μέμος, 2008)

Η χρήση των κυψελωτών τεχνητών ογκολίθων γίνεται κατά κύριο λόγο, όταν η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι μειωμένη, οπότε μπορεί να προκληθεί θραύση της θεμελίωσης ή όταν δεν υπάρχουν κατάλληλα ανυψωτικά μηχανήματα για μεγάλου βάρους τεχνητούς ογκολίθους.

Σημειώνεται ότι οι τεχνητοί ογκολίθοι συνήθως κατασκευάζονται σε ειδικά διαμορφωμένα εργοτάξια σε κοντινή απόσταση από τη μόνιμη θέση τους και στη συνέχεια μεταφέρονται στην τελική τους θέση.

2.2.1.2 Κρηπιδότοιχοι τύπου L (L-wall)

Οι κρηπιδότοιχοι αυτού του τύπου είναι έργα βαρύτητας και κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σχήμα των προκατασκευασμένων στοιχείων είναι μορφής L, δηλαδή αποτελούνται από ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο στοιχείο. Στην ένωση τους προβλέπονται ενισχυτικές εγκάρσιες νευρώσεις. Σε αυτόν τον τύπο κρηπιδότοιχων η αντίσταση στις ωθήσεις βασίζεται στο βάρος των γαιών που βρίσκονται πάνω από το οριζόντιο στοιχείο. Το βάρος των γαιών αυτών συμβάλλει στις παθητικές ωθήσεις.

Οι κρηπιδότοιχοι αυτοί χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που το υπέδαφος δεν είναι τόσο ανθεκτικό, ώστε να φέρει τα φορτία ενός συμπαγούς κρηπιδότοιχου ή όταν το κόστος των κατασκευαστικών υλικών είναι αυξημένο. (zabezpieczeniahydrotechniczne.wordpress.com, 6/2017)

2.2.1.3 Κρηπιδότοιχοι με κιβώτια (caisson)

Οι κρηπιδότοιχοι αυτού του τύπου είναι έργα βαρύτητας που μοιάζουν με κιβώτια, τα οποία κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συνήθως τα κιβώτια αυτά πληρώνονται με χαλικοαμμώδη ή βραχώδη υλικά, ενώ σπανιότερα με σκυρόδεμα. Υπάρχει και η περίπτωση κάποια κενά να μην πληρωθούν με κάποιο υλικό, ώστε να μειωθούν οι τάσεις έδρασης σε μειωμένης φέρουσας ικανότητας εδάφη.

Τα κιβώτια αυτά συνήθως κατασκευάζονται σε ειδικά διαμορφωμένα εργοτάξια σε κοντινή απόσταση από τη μόνιμη θέση τους. Αφού κατασκευαστεί ο σκελετός τους, μεταφέρονται με τη βοήθεια πλωτών μέσων και με την επίπλευσή τους στην τελική τους θέση.

Στην εικόνα 2-3 απεικονίζεται η μεταφορά ενός προκατασκευασμένου κιβωτίου.



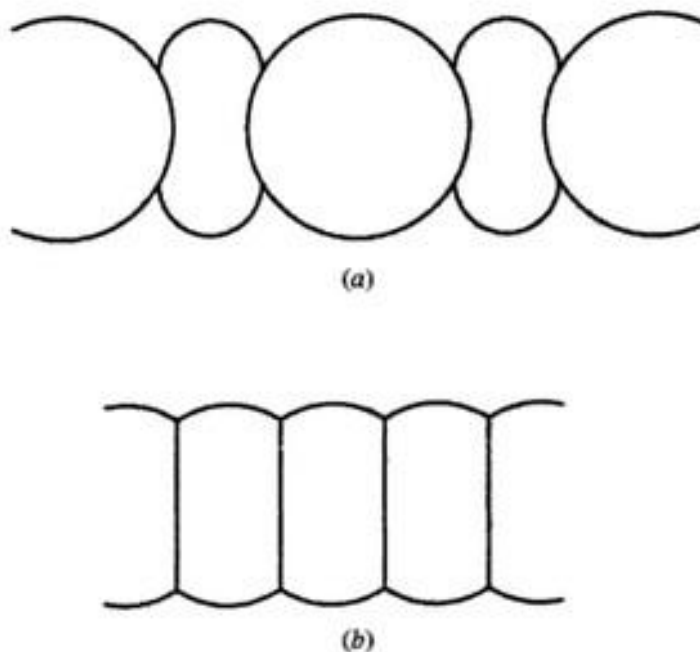
Εικόνα 2-3. Caisson (slideshare.net, 6/2017)

Το μήκος των κιβωτίων αυτών δεν ξεπερνά συνήθως τα 30 μέτρα (Μέμος, 2008). Το ύψος των κιβωτίων είναι τέτοιο, ώστε μετά την τελική τους τοποθέτηση να προεξέχουν λίγο από το επίπεδο της θάλασσας και έτσι να γίνει στη συνέχεια η διαμόρφωση της ανωδομής. Μετά την τοποθέτηση γειτονικών κιβωτίων δημιουργούνται μεταξύ τους κενά (αρμοί). Για την αποτροπή διαφυγής λεπτόκοκκου εδαφικού υλικού, το οποίο βρίσκεται πίσω από τον κρηπιδότοιχο και αποτελεί το υπόβαθρο για το κατάστρωμα του κρηπιδώματος πρέπει οι αρμοί αυτοί να κλείσουν. Για το κλείσιμο των αρμών χρησιμοποιούνται είτε προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα που στηρίζονται πάνω στα κιβώτια είτε γίνεται τοποθέτηση έγχυτου σκυροδέματος σε ειδικά διαμορφωμένες εκ των προτέρων θέσεις.

Οι κρηπιδότοιχοι αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το βάθος είναι πολύ μεγάλο.

2.2.1.4 Κρηπιδότοιχοι από μεταλλικές πασσαλοσανίδες

Οι κρηπιδότοιχοι αυτού του τύπου είναι έργα βαρύτητας και αποτελούνται από κατακόρυφες μεταλλικές πασσαλοσανίδες, οι οποίες σχηματίζουν κελιά. Αυτά μπορεί να είναι κυκλικά, που είναι και ο συνήθης τύπος, ή να χωρίζονται από εγκάρσιο διάφραγμα. Τα κυκλικά κελιά αποτελούν μεμονωμένα στοιχεία. Για τη σύνδεση τους και τη δημιουργία ενός ενιαίου κρηπιδότοιχου τοποθετούνται μεταξύ των κελιών αυτών, πασσαλοσανίδες με τη μορφή τόξου, ώστε να σφραγίσουν τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ τους. Για την αλληλοεμπλοκή των πασσαλοσανίδων υπάρχουν ειδικά διαμορφωμένες εγκοπές. Όσον αφορά την κατηγορία των εγκάρσιων διαφραγμάτων πρόκειται για κατακόρυφες μεταλλικές πασσαλοσανίδες, οι οποίες διαχωρίζουν τα κελιά μεταξύ τους και συνδέονται με άλλες πασσαλοσανίδες τύπου τόξου σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο ένα κελί.



Εικόνα 2-4. Τύποι κελιών σε κρηπιδότοιχο από μεταλλικές πασσαλοσανίδες:
(α) Κυκλικά , (β) Κελιά που διαχωρίζονται με διάφραγμα

Τα κελιά αυτά πληρώνονται με γαιώδη ή βραχώδη υλικά, τα οποία πρέπει να έχουν μεγάλο ειδικό βάρος και μεγάλη γωνιά τριβής, ώστε να αυξάνεται η αντίσταση στη βάση των κελιών.



Εικόνα 2-5. Κρηπιδότοιχος από μεταλλικές πασσαλοσανίδες
(www.jfbrennan.com, 7/2017)

Όσον αφορά τις μεταλλικές πασσαλοσανίδες γίνεται έμπηξη αυτών στο έδαφος, το βάθος της οποίας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1,50m σε σκληρή άργιλο και τα 3m σε πυκνή άμμο, λόγω της αδυναμίας των ευθειογενών πασσαλοσανίδων να αντέχουν σε υψηλές τιμές εμπήξεως (Μέμος, 2008).

Επειδή οι μεταλλικές πασσαλοσανίδες δεν μπορούν να παραλάβουν θλιπτικές φορτίσεις, η στήριξη του καταστρώματος του κρηπιδώματος γίνεται είτε σε πασσάλους που βρίσκονται μέσα στα κελιά είτε στο υλικό πληρώσεως, το οποίο προεξέχει των πασσαλοσανίδων.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται και στην πλήρωση γειτονικών κελιών με υλικό, ειδικά στην περίπτωση των κελιών που διαχωρίζονται από εγκάρσιο

διάφραγμα. Αυτό συμβαίνει, επειδή τα γειτονικά κελιά δεν μπορούν να αντέξουν στις πιέσεις, όταν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην στάθμη του υλικού εκατέρωθεν των πασσαλοσανίδων. Αναφέρεται ότι η διαφορά της στάθμης του υλικού πληρώσεως σε γειτονικά κελιά δεν μπορεί να ξεπερνάει το 1,5m. (Μέμος, 2008)

Σημειώνεται ότι αυτός ο τύπος κρηπιδότοιχου χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το νερό δεν ξεπερνάει τα 15 - 18m (Δασκαλάκης, 2009).

2.2.1.5 Έδραση κρηπιδότοιχου

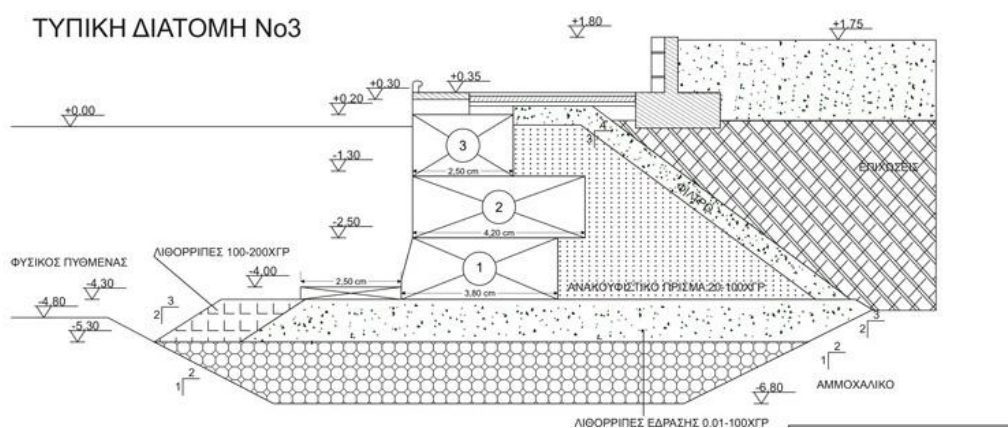
Στις περιπτώσεις των κρηπιδότοιχων βαρέως τύπου μεγάλη σημασία δίνεται στην έδραση τους. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι κρηπιδότοιχοι αυτού του τύπου είναι έργα βαρύτητας και επομένως μεταβιβάζουν στο δάπεδο τους, δηλαδή στον πυθμένα μεγάλα φορτία. Αν δεν υπάρχει στον πυθμένα κατάλληλο υπόστρωμα, τέτοιο που να μπορεί να φέρει τα μεγάλα φορτία του κρηπιδότοιχου, τότε μπορεί να γίνει θραύση της επιφάνειας θεμελίωσης και να αστοχήσει ο κρηπιδότοιχος. Στην περίπτωση που η επιφάνεια θεμελίωσης του κρηπιδότοιχου δεν είναι ικανή να αντέξει τα αυξημένα φορτία του, πρέπει να διαμορφώνεται τεχνικά ειδική επιφάνεια θεμελίωσης.

Ο κρηπιδότοιχος εδράζεται σε ειδικά διαμορφωμένη επιφάνεια, η οποία μπορεί να είναι είτε μια ολόκληρη εξυγιαντική στρώση πάνω από το φυσικό πυθμένα είτε μια πρισματική βάση εξυγιαντικού υλικού μέσα στο φυσικό πυθμένα, που έχει δημιουργηθεί με εκσκαφή και αντικατάσταση του υπάρχοντος υλικού μέχρι το κατάλληλο υπόβαθρο. Ως υλικό της εξυγιαντικής στρώσης χρησιμοποιούνται πέτρες και χάλικες βάρους 0,5 έως 50 ή και 200kg. Το πάχος της βάσης εξαρτάται από την ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης να φέρει τα φορτία του κρηπιδότοιχου.

Η επιφάνεια του κρηπιδότοιχου με το έδαφος θα πρέπει να είναι εντελώς οριζόντια.

Το πλάτος της πρισματικής βάσης που περιέχει το υλικό εξυγιάνσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη βάση του κρηπιδότοιχου και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ειδικότερα προς την πλευρά της θάλασσας θα πρέπει η

διαφορά αυτή να είναι τουλάχιστον 3m για μαλακούς και αμμώδεις πυθμένες και 1,5 με 2m για σχετικά σκληρούς (ημίβραχος). Αυτό συμβαίνει για να προστατευτεί η βάση θεμελίωσης του κρηπιδότοιχου από υποσκαφές που δημιουργούν οι προπέλες των πλοίων ή και διάβρωση από την πιθανή παρουσία υποθαλάσσιων ισχυρών ρευμάτων. Προς την πλευρά της ξηράς η διαφορά μεταξύ της πρισματικής βάσης και του εσωτερικού ποδιού του κρηπιδότοιχου θα πρέπει να είναι ίση τουλάχιστον με το 50% ή ακόμη και με το 25% του αντίστοιχου μήκους προς την πλευρά της θάλασσας. (Δασκαλάκης, 2009)



Εικόνα 2-6. Έδραση κρηπιδότοιχου (www.antzoulis.gr, 7/2017)

2.2.1.6 Ανακουφιστικό πρίσμα

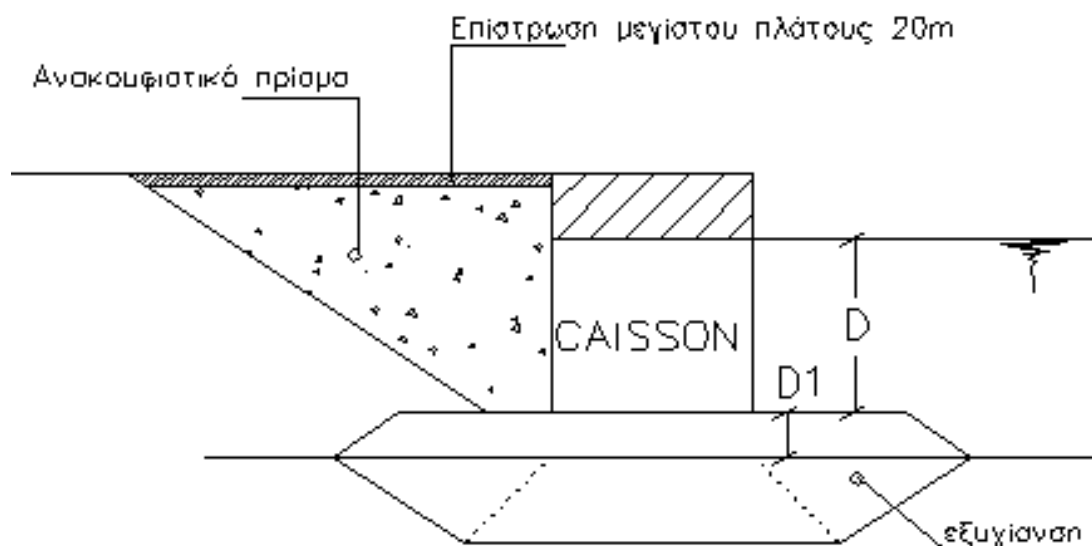
Πρόκειται για το τμήμα του εδάφους, το οποίο βρίσκεται ακριβώς πίσω από το κρηπιδότοιχο και σκοπό έχει να μειώσει τις ενεργές ωθήσεις σε αυτόν.

Η μείωση των ενεργών ωθήσεων επιτυγχάνεται, γιατί τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο ανακουφιστικό πρίσμα δεν είναι τα κοινά γαιώδη της περιοχής, αλλά υλικά τα οποία έχουν μεγαλύτερη γωνία εσωτερικής τριβής, συνήθως 45° . Πρόκειται συνήθως για γωνιώδεις, συμπαγείς, σκληρούς και ανθεκτικούς λίθους, που έχουν βάρος 20 - 100kg.

Στο ανακουφιστικό πρίσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί των παραπάνω με υψηλή γωνία εσωτερικής τριβής υλικών, κίσηρη. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται στο ανακουφιστικό πρίσμα λόγω του φαινομένου βάρους του, το οποίο δεν ξεπερνάει $9,5\text{kN/m}^3$.

Οπότε τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο ανακουφιστικό πρίσμα μειώνουν τις ενεργές ωθήσεις στον κρηπιδότοιχο με δύο τρόπους:

- είτε έχουν υψηλή γωνία εσωτερικής τριβής και επομένως καλή αλληλοεμπλοκή των αδρανών
- είτε πολύ μικρό φαινόμενο βάρος, σχεδόν το μισό από τα συνήθη



Εικόνα 2-7. Απεικόνιση της θέσης του ανακουφιστικού πρίσματος σε τομή (Amoives.gr, 7/2017)

Το ανακουφιστικό πρίσμα όμως έχει ακόμη μια λειτουργία. Συνεισφέρει στη στεγανότητα του κρηπιδότοιχου, ώστε να μη γίνονται διαβρώσεις των προσχώσεων που βρίσκονται πίσω από αυτόν, αλλά και στην ύπαρξη ενός σταθερού εδάφους θεμελίωσης των πεδιλοδοκών τοποθέτησεως των σιδηροτροχιών για την κίνηση των γερανών και των γερανογεφυρών κρηπιδώματος (Δασκαλάκης, 2009).

2.2.2 Κρηπιδότοιχοι ελαφρού τύπου

2.2.2.1 Κρηπιδότοιχοι από πασσαλοτοιχίες

Η κατηγορία αυτών των κρηπιδότοιχων δεν βασίζεται στη βαρύτητα για να αντισταθμίσει τις ενεργές ωθήσεις του εδάφους, αλλά στην αντοχή των κατακόρυφων στοιχείων (πασσαλότοιχος) σε κάμψη και στη δυνατότητά τους να παραλάβουν τις αναπτυσσόμενες ροπές. Ο πασσαλότοιχος αυτός αποτελείται είτε από μεταλλικές πασσαλοσανίδες είτε από ξύλινες είτε από σκυρόδεμα (οπλισμένο ή προεντεταμένο).



Εικόνα 2-8. Κρηπιδότοιχος από μεταλλικό πασσαλότοιχο (www.escpile.com, 7/2017)

Ο τρόπος λειτουργίας του πασσαλότοιχου διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες (Μέμος, 2008) :

- Με απλή πάκτωση
- Με ελκυστήρες
- Με ανακουφιστική πλατφόρμα

Στην περίπτωση της πάκτωσης κύριο στοιχείο είναι το μήκος έμπηξης της πασσαλοσανίδας στο έδαφος, καθώς αυτό καθορίζει και το εύρος των παθητικών ωθήσεων του εδάφους, που αντισταθμίζουν τις ενεργές.

Στην περίπτωση των ελκυστήρων δεν απαιτείται μεγάλο μήκος έμπηξης της πασσαλοσανίδας, επειδή μέρος των καμπτικών ροπών αναλαμβάνεται από τους ελκυστήρες. Για να λειτουργήσει η διάταξη αυτή θα πρέπει να γίνεται

αγκύρωση του πασσαλότοιχου σε ένα ή και περισσότερα επίπεδα μέσα στο έδαφος σε ειδικά διαμορφωμένη πλάκα από σκυρόδεμα.

Η αγκύρωση συχνά προτιμάται να γίνεται σε μεγαλύτερο βάθος, όταν το έδαφος στα ανώτερα στρώματα είναι μειωμένης αντοχής. Ωστόσο αυτή η πρακτική είναι στενά συνδεδεμένη και με την ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, το βάθος του οποίου καθορίζει και την εφαρμογή της (Richwien, 2008).

Στην περίπτωση της ανακουφιστικής πλατφόρμας, αυτή στηρίζεται συνήθως πάνω σε πασσάλους, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τις ενεργές ωθήσεις που δέχεται ο πασσαλότοιχος.

Ο πασσαλότοιχος αποτελείται είτε από μεμονωμένες πασσαλοσανίδες που συνδέονται μεταξύ τους είτε από έγχυτους πασσαλότοιχους είτε από διαφραγματικούς τοίχους.



Εικόνα 2-9. Κρηπιδότοιχος από μεταλλικές πασσαλοσανίδες και τοποθέτηση αδρανών υλικών πίσω από αυτόν (ArcelorMittal, 7/2017)

Οι μεμονωμένες πασσαλοσανίδες μπορεί να είναι ξύλινες, μεταλλικές και από σκυρόδεμα. Η κάθε κατηγορία είναι έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

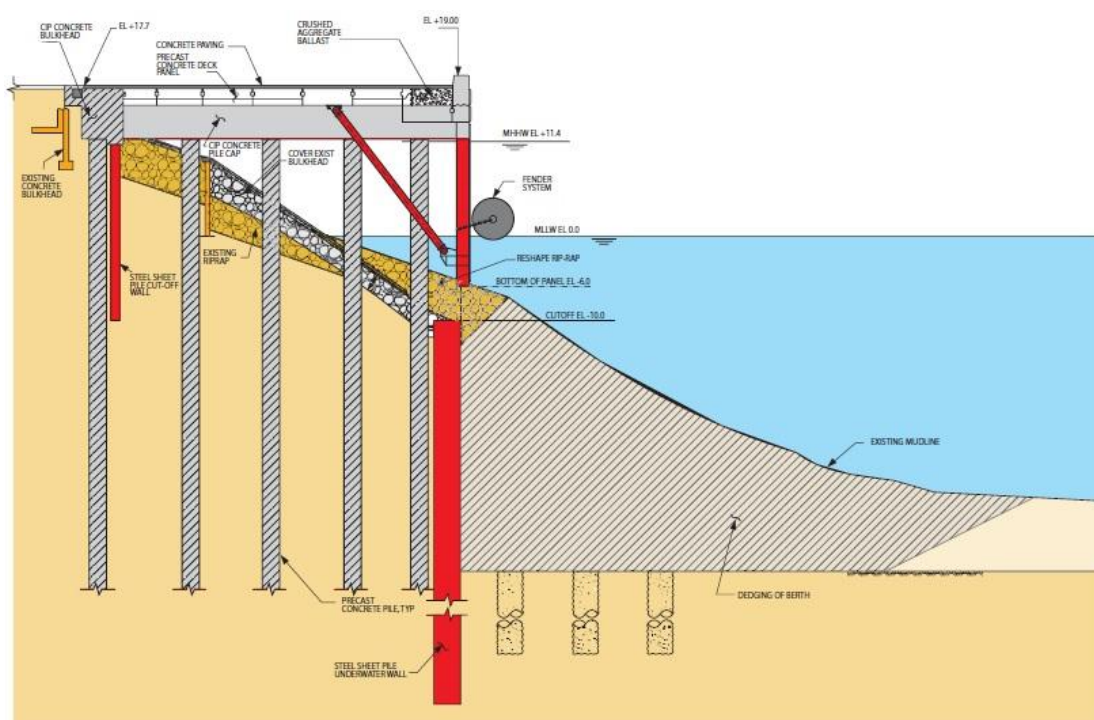
Οι ξύλινες πασσαλοσανίδες είναι πιο οικονομική λύση και εφαρμόζονται σε μικρής έκτασης έργα. Οι μεταλλικές έχουν μικρότερο βάρος από τις υπόλοιπες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλα μήκη. Ανάλογα με τη διατομή τους μπορούν να παρέχουν και μεγαλύτερη ακαμψία. Οι πασσαλοσανίδες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη αντοχή.

Οι έγχυτοι πασσαλότοιχοι σκυροδετούνται επιτόπου και μπορεί να είναι είτε επαπτόμενοι είτε αλληλοτεμνόμενοι. Οι διάμετροι των πασσάλων κυμαίνονται από 1 - 1,20m (Μέμος, 2008).

Οι διαφραγματικοί τοίχοι κατασκευάζονται με τη μέθοδο των panels χρησιμοποιώντας ως δομικό στοιχείο οπλισμένο σκυρόδεμα και διάλυμα μπετονίτη για τη στήριξη των panels κατά τη διάνοιξη. Η χρήση αυτής της διάταξης γίνεται όταν απαιτούνται μεγάλα ύψη και τα φορτία είναι αυξημένα.

2.3 Ανοιχτοί Κρηπιδότοιχοι

Η κατηγορία αυτή των κρηπιδότοιχων διαφέρει προς τις παραπάνω για το γεγονός ότι το μέτωπο του κρηπιδότοιχου δεν είναι κλειστό, δηλαδή δεν προσφέρει υδατοστεγανότητα. Οι ανοιχτοί κρηπιδότοιχοι αποτελούνται από μία εξέδρα που είναι το κατάστρωμα του κρηπιδώματος, η οποία στηρίζεται σε πάσσλους. Οι πάσσαλοι μπορεί να είναι ξύλινοι, μεταλλικοί ή από οπλισμένο σκυρόδεμα (κανονικό ή προεντεταμένο).



Εικόνα 2-10. Τομή ανοιχτού κρηπιδότοιχου (Seattle, Washington, USA)
(ArcelorMittal, 7/2017)

Η εξέδρα αποτελείται από μια πλάκα σκυροδέματος, η οποία μεταβιβάζει τα φορτία του καταστρώματος σε ένα σύστημα δοκών. Τα φορτία του καταστρώματος μεταβιβάζονται στις δευτερεύοντες δοκούς και αυτές με τη σειρά τους τα διαβιβάζουν στις κύριες δοκούς. Τέλος οι κύριες δοκοί στηρίζονται σε σειρές πάσσλων, οι οποίοι διαβιβάζουν τα φορτία στο έδαφος (Δασκαλάκης, 2009).

Οι ανοιχτοί κρηπιδότοιχοι παρουσιάζουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κλειστούς. Η κύρια χρήση τους είναι ότι μπορούν διαμέσου των πασσάλων να μεταβιβάζουν τα φορτία της ανωδομής σε σταθερό υπόβαθρο, όταν τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους είναι μειωμένης φέρουσας ικανότητας. Επιπλέον χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά και οικονομικά όταν το βάθος του νερού είναι σημαντικό. Σε περίπτωση ακόμα που απουσιάζει ο κυματοθραύστης, ώστε αυτός να μειώνει σε μεγάλο βαθμό ή και να μηδενίζει την ενέργεια των κυμάτων, η διάταξη αυτή επιτρέπει την πορεία του νερού μέχρι το πρανές κάτω από την εξέδρα, το οποίο θα απορροφήσει σε μεγάλο βαθμό την ενέργεια αυτή. Ακόμα σε σεισμογενείς περιοχές αποτελεί μια καλύτερη λύση, επειδή η κατασκευή αυτή είναι πιο ελαφριά και πιο ευέλικτη. (Tsinker, 2004)

Οι πάσσαλοι που στηρίζουν την εξέδρα είναι κατά κύριο λόγο κατακόρυφοι, ώστε να μπορούν να μεταβιβάζουν τα κατακόρυφα φορτία στο έδαφος. Τα οριζόντια φορτία μπορούν να αναληφθούν τόσο με την καμπτική αντοχή των κατακόρυφων πασσάλων όσο και με τη χρήση ενός συστήματος αγκύρωσης μεταξύ της εξέδρας και μιας πλάκας μέσα στο έδαφος προς τη πλευρά της στεριάς. Ωστόσο συχνή και αποτελεσματικότερη είναι η χρήση και κεκλιμένων πασσάλων, οι οποίοι αναλαμβάνουν τα οριζόντια φορτία (ωθήσεις και έλξεις πλοίων ή σεισμικές δυνάμεις).



Εικόνα 2-11. Απεικόνιση πασσάλων που στηρίζουν την εξέδρα στο λιμάνι της Βιρτζίνιας (ArcelorMittal, 7/2017)

Το πρανές που υπάρχει κάτω από την εξέδρα αποτελεί την μεταβατική φάση από τη θάλασσα στα γαιώδη υλικά της στεριάς. Σε ένα βαθμό αναλαμβάνει τις παθητικές ωθήσεις του εδάφους, ενώ παράλληλα λειτουργεί σε ένα μέρος του και σαν φίλτρο, ώστε να μην υπάρχει διαρροή λεπτόκοκκου υλικού προς τη θάλασσα. Αντίστοιχα από την πλευρά της θάλασσας αποτρέπει τη διάβρωση του από τα κύματα και τη δράση των προπελών των πλοίων. Ακόμα συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην ακαμψία των πασσάλων, καθώς αυτή είναι συνάρτηση του ακάλυπτου από το πρανές τμήμα των πασσάλων.

3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (PLAXIS 2D)

3.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή η ανάγκη για μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα κατασκευαστικά έργα τα οποία θεμελιώνονται πάνω στο έδαφος προϋποθέτει καλή γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών. Ιδίως στις πόλεις που κατασκευάζονται πλέον δύσκολα τεχνικά έργα σε περιοχές που είναι κατοικήσιμες, όπως είναι ψηλά κτήρια, το μετρό, υπόγειες αγωγοί κ.α., η ανάγκη για προσοχή στην κατασκευαστική διαδικασία είναι υψηλή. Στις περιπτώσεις που οι κατασκευές αυτές ενέχουν κίνδυνο για τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα των υπολοίπων, απαιτείται ακρίβεια και εκ των προτέρων γνώση - όσο είναι δυνατόν - για τις καταστάσεις που θα βρεθεί αντιμέτωπος ο μηχανικός.

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να λυθούν με τη χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων, όπως είναι το PLAXIS. Με τη χρήση του προγράμματος αυτού είναι δυνατή η προσομοίωση της κατασκευαστικής διαδικασίας βήμα-βήμα. Επομένως είναι δυνατόν να δοκιμαστούν εκ των προτέρων όλες οι πιθανές επιλογές που έχει στη διάθεση του ο μηχανικός και στο τέλος να επιλεγεί η ασφαλέστερη και οικονομικότερη από αυτές.

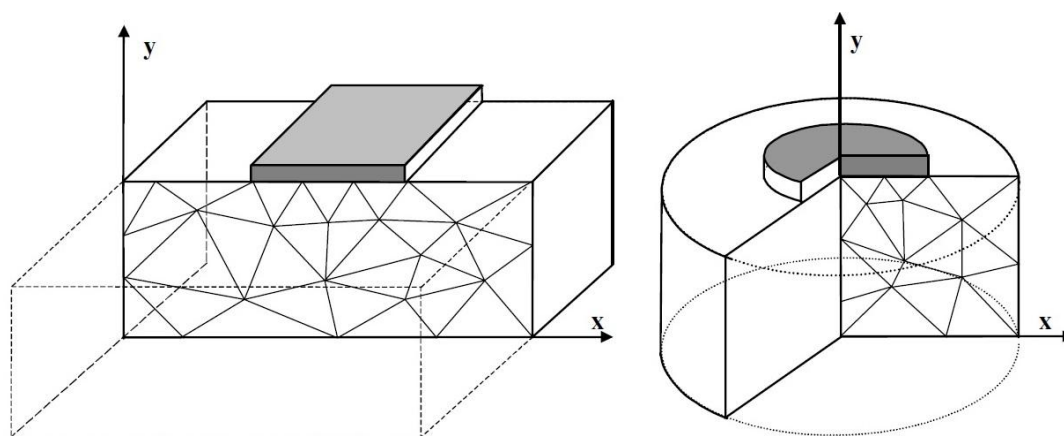
Το PLAXIS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αντιληφθεί την αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής. Με την πληθώρα των εργαλείων που έχει, μπορούν να προσομοιωθούν δομικά στοιχεία, όπως είναι οι πάσσαλοι, τα αγκύρια, γεωσύνθετα, και να διαπιστωθεί πως αυτά βελτιώνουν τις συνθήκες του έργου. Τέλος μέσα από τις προσομοιώσεις αυτές μπορούν να υπολογιστούν οι μετακινήσεις, η δομική ακεραιότητα των παραπάνω στοιχείων, ο συντελεστής ασφαλείας, αλλά και πιθανοί τρόποι αστοχίας.

3.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Το PLAXIS 2D είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται για την μελέτη των μετακινήσεων και της ευστάθειας των γεωτεχνικών κατασκευών. Το πραγματικό έργο μπορεί να προσομοιωθεί είτε ως δισδιάστατο επίπεδης παραμόρφωσης μοντέλο (plane strain model) είτε ως δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο (axisymmetric model).

Ένα επίπεδης παραμόρφωσης μοντέλο χρησιμοποιείται για κατασκευές με μία ομοιόμορφη διατομή και ένα ομοιόμορφο καθεστώς τάσεων και φορτίσεων για ένα συγκεκριμένο μήκος κάθετα στον άξονα z. Οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις στον άξονα αυτό θεωρούνται μηδενικές.

Ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο χρησιμοποιείται για κυκλικές κατασκευές με μία ομοιόμορφη ακτινική διατομή και ένα ομοιόμορφο καθεστώς φορτίσεων γύρω από τον κεντρικό άξονα, όπου το καθεστώς των τάσεων και των παραμορφώσεων θεωρείται πανομοιότυπο σε οποιαδήποτε ακτινική διεύθυνση (Brinkgreve R.B.J., 2002).



Εικόνα 3-1. Χαρακτηριστικές διατομές των μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρικού (Brinkgreve R.B.J., 2002)

Για την επίλυση του μοντέλου το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS διακριτοποιεί το προσομοίωμα σε μικρότερους υποχώρους - στοιχεία. Υπάρχει η δυνατότητα είτε για 6-κομβά ή για 15-κομβά τριγωνικά στοιχεία. Τα

διαφορετικά στοιχεία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των κοινών κόμβων. Η διακριτοποίηση σε 15-κομβά τριγωνικά στοιχεία παρέχει μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα όσον αφορά την εντατική κατάσταση των εδαφικών και κατασκευαστικών προσομοιωμάτων σε φυσικά προβλήματα με ιδιαίτερες δυσκολίες σε σχέση με τα 6-κομβά τριγωνικά στοιχεία.

Βασική παράμετρος στην επίλυση του κατασκευαστικού προβλήματος είναι το έδαφος. Το πρόγραμμα PLAXIS δίνει τη δυνατότητα για προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους με διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε εδάφους. Συνοπτικά αυτά είναι:

- Linear Elastic : Πρόκειται για ένα γραμμικά ελαστικό μοντέλο, το οποίο ακολουθεί το νόμο του Hooke.
- Mohr - Coulomb : Πρόκειται για ένα ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο, το οποίο ακολουθεί την παραδοχή ότι το έδαφος αστοχεί σύμφωνα με το κριτήριο Mohr - Coulomb.
- Jointed Rock : Πρόκειται για ένα ελαστικό - πλαστικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει μια διακλασμένη βραχομάζα.
- Hardening Soil : Πρόκειται για ένα μοντέλο με ενσωματωμένο νόμο κράτυνσης, διατμητικής και σφαιρικής συνιστώσας.
- Soft Soil : Πρόκειται για ένα μοντέλο που προσομοιώνει τη συμπεριφορά μαλακών εδαφών, όπως είναι οι κανονικά στερεοποιημένοι άργιλοι.
- Soft Soil Creep : Πρόκειται για ένα μοντέλο που προσομοιώνει τη συμπεριφορά μαλακών εδαφών με τη θεώρηση του φαινομένου του ερπυσμού. Μπορεί να περιγράψει μαλακά εδάφη των οποίων η συμπεριφορά εξαρτάται από το χρόνο, όπως οι κανονικά στερεοποιημένοι άργιλοι.

Το κάθε μοντέλο αντιμετωπίζει το έδαφος διαφορετικά με αποτέλεσμα να προσομοιώνει καλύτερα την κάθε κατάσταση, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της.

3.3 Υποπρογράμματα του PLAXIS

Το PLAXIS αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα, τα οποία στο σύνολο τους αφορούν στην επίλυση αλλά και στην καταγραφή των αποτελεσμάτων.

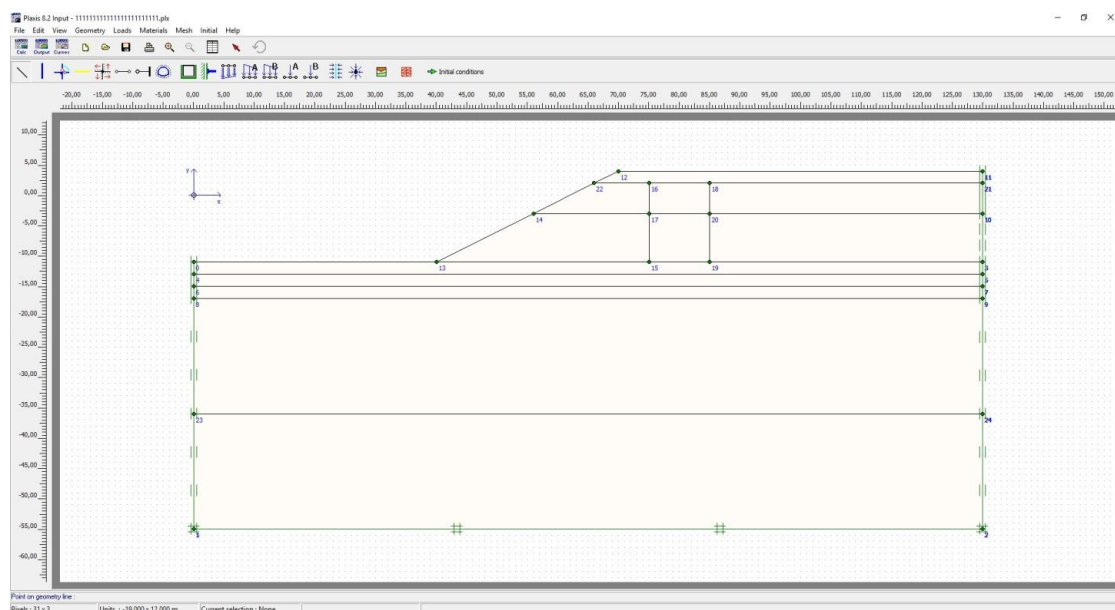
Πιο συγκεκριμένα αυτά είναι:

- Plaxis Input
- Plaxis Calculation
- Plaxis Output
- Plaxis Curves

3.3.1 PLAXIS INPUT

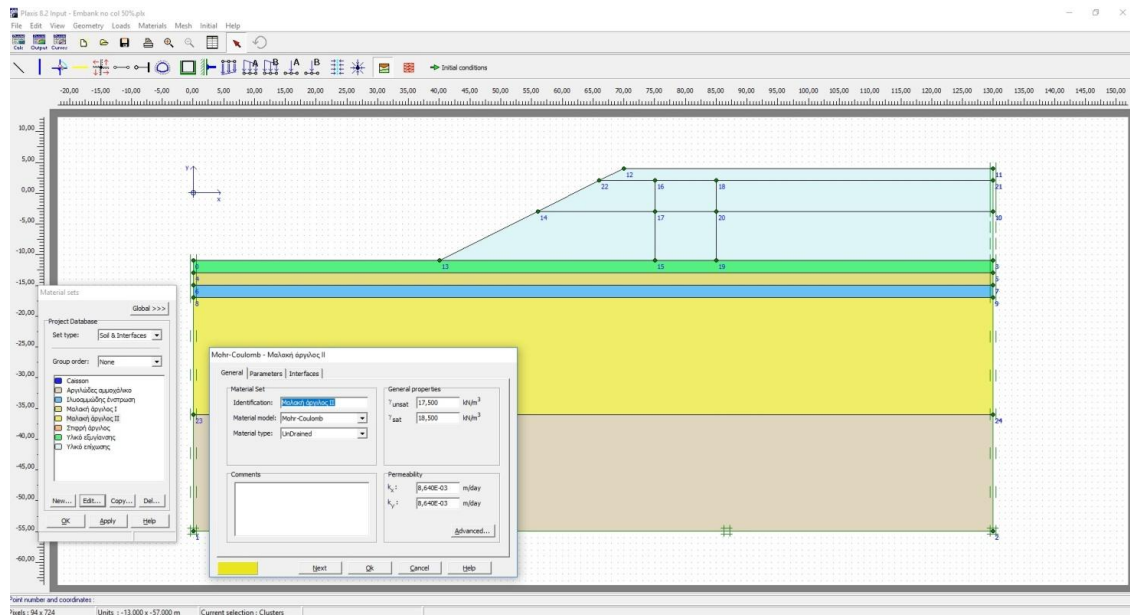
Στο μέρος αυτό του προγράμματος ο χρήστης μπορεί να εισάγει:

- Τις διαστάσεις του προσομοιώματος

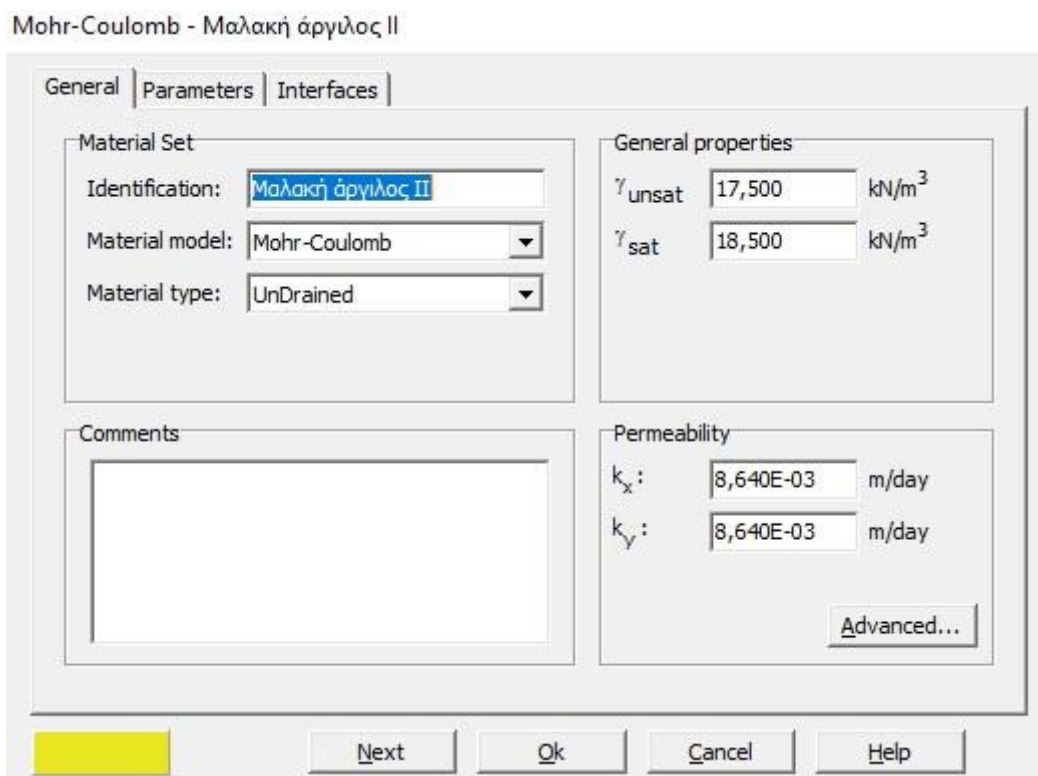


Εικόνα 3-2. Σχεδιάγραμμα προσομοιώματος

- Τη στρωματογραφία με τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά του κάθε στρώματος του εδάφους

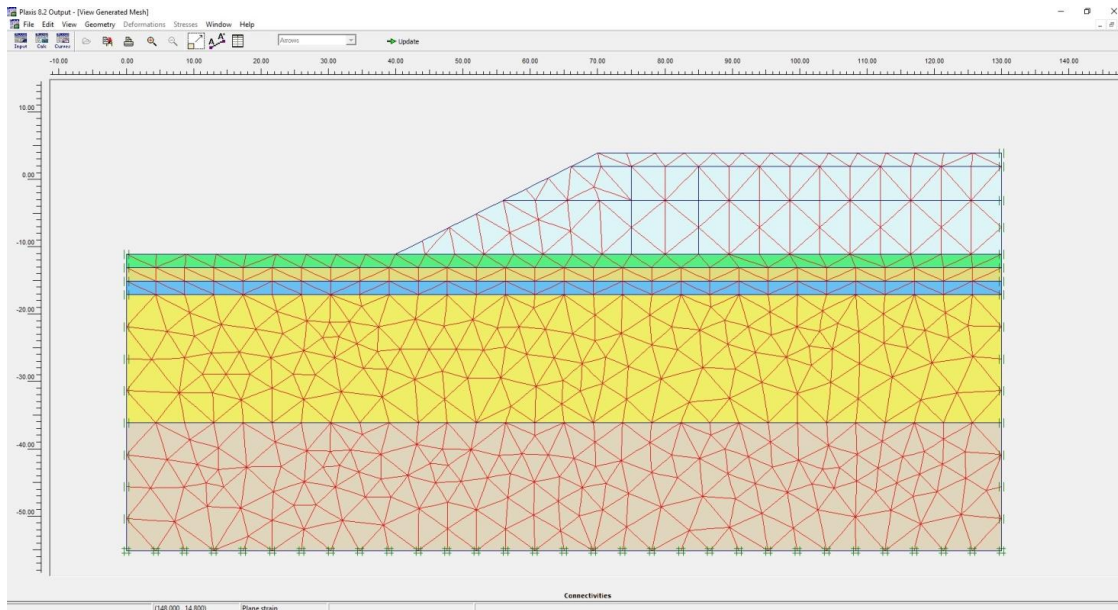


Εικόνα 3-3. Στρωματογραφία προσομοιώματος



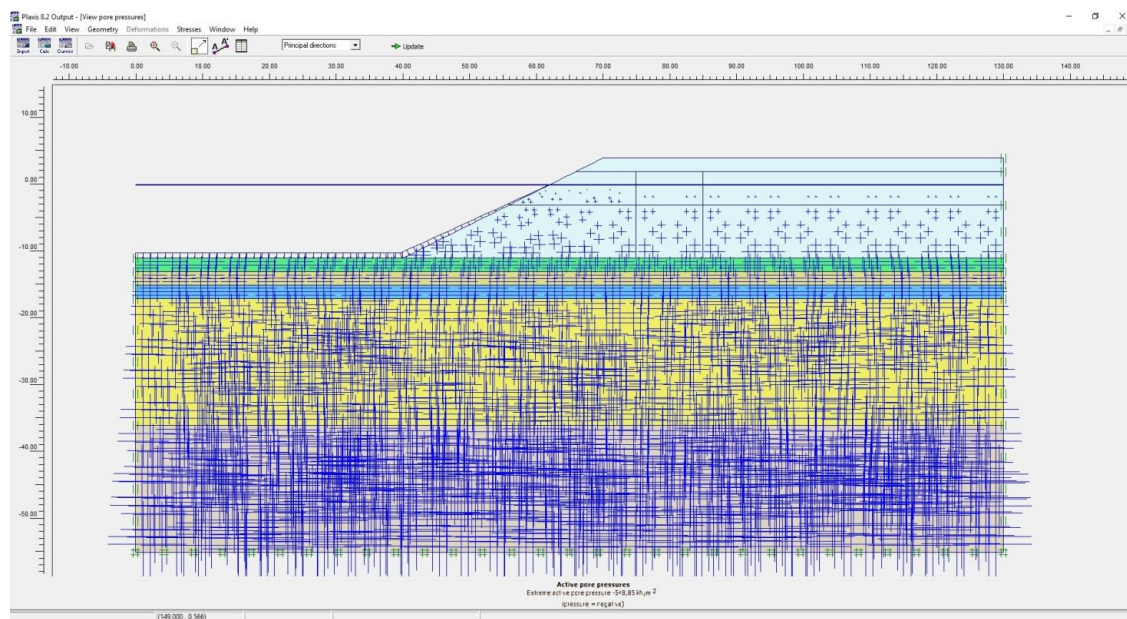
Εικόνα 3-4. Εισαγωγή φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών στρώματος του εδάφους

- Τον κάνναβο που διακριτοποιεί το προσομοίωμα σε μικρότερα στοιχεία με την εντολή Generate Mesh με διάφορα επίπεδα πύκνωσης του.

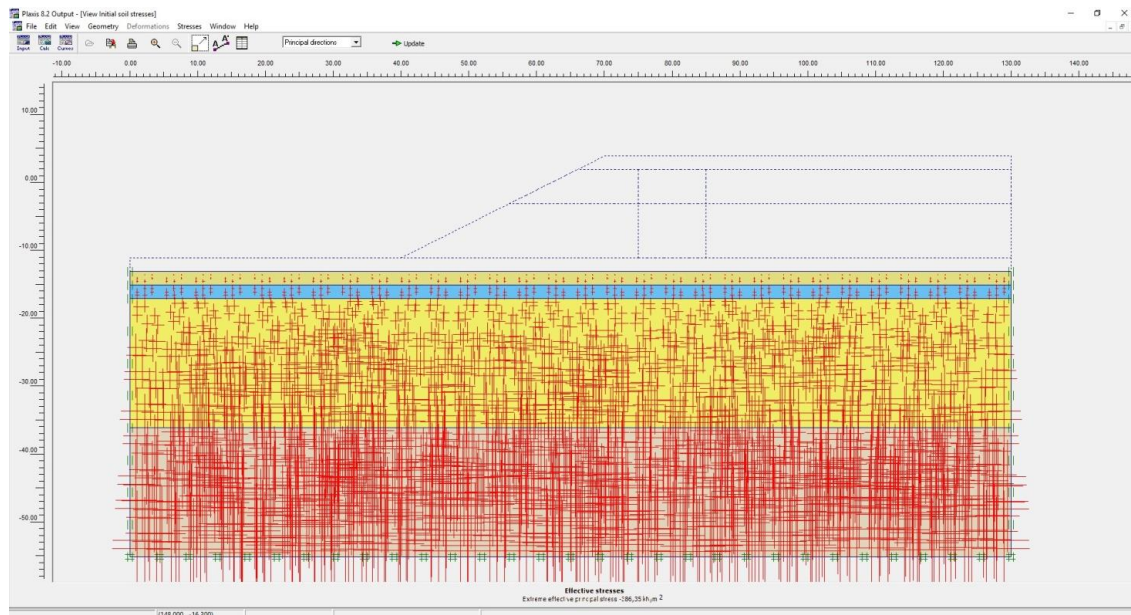


Εικόνα 3-5. Απεικόνιση του γεωμετρικού πλέγματος

- Τις αρχικές συνθήκες όπως είναι υδροστατικές τάσεις και οι αρχικές γεωστατικές τάσεις.



Εικόνα 3-6. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων

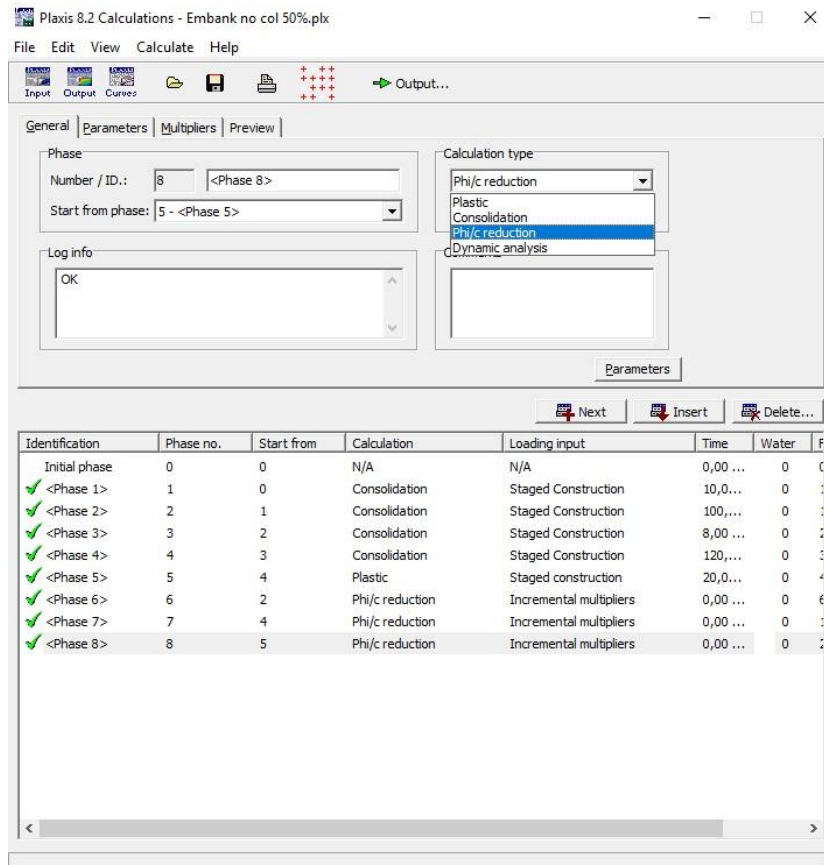


Εικόνα 3-7. Απεικόνιση των αρχικών ενεργών τάσεων

3.3.2 PLAXIS CALCULATION

Στο μέρος αυτό του προγράμματος γίνεται η εισαγωγή των φάσεων υπολογισμού του προσομοιώματος. Το PLAXIS δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθεί το φυσικό έργο σε στάδια, όπως ακριβώς θα γίνει και στην πραγματικότητα. Το κάθε στάδιο μπορεί να υπολογιστεί, θεωρώντας διαφορετικές συνθήκες κάθε φορά. Το υποπρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα για:

- **Plastic:** Πρόκειται για τύπο υπολογισμού που θεωρεί τις παραμορφώσεις για ένα ελαστικό - πλαστικό μοντέλο χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις υπερπιέσεις των πόρων σε σχέση με το χρόνο.
- **Consolidation:** Χρησιμοποιείται όταν πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρονική εξέλιξη των υπερπιέσεων των πόρων σε κορεσμένα συμπιεστά εδάφη, όπως είναι τα αργιλικά.
- **Phi/c reduction:** Χρησιμοποιείται όταν πρέπει να υπολογιστεί συντελεστής ασφαλείας για κάποια από τις φάσεις του έργου. Στην ουσία το πρόγραμμα αρχίζει να μειώνει τις παραμέτρους - γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή - μέχρι να οδηγηθεί σε αστοχία.

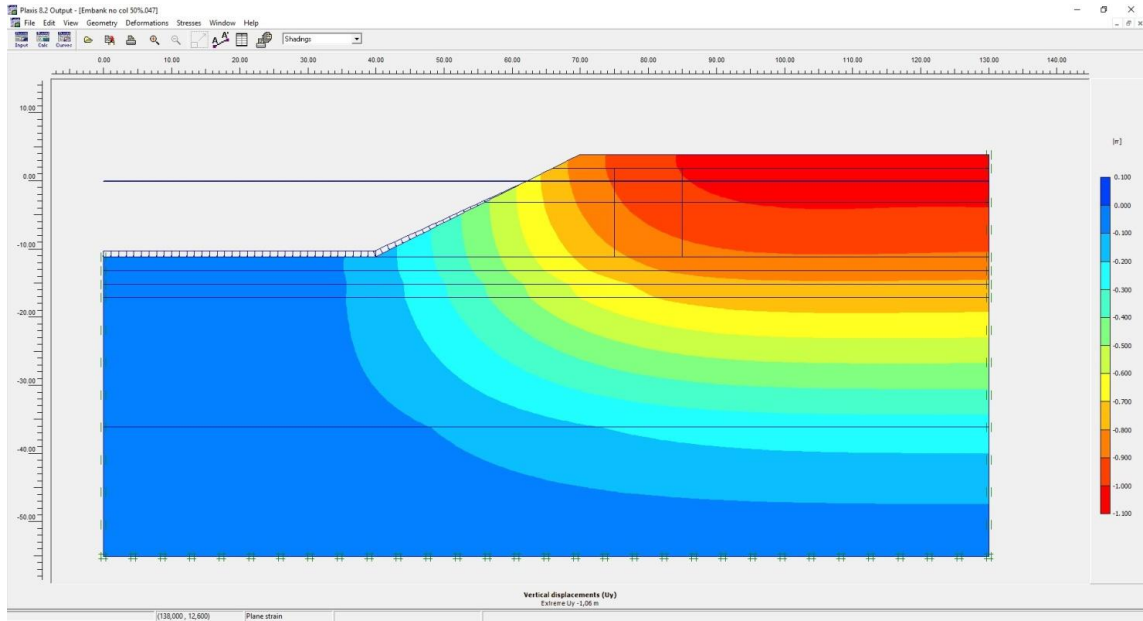


Εικόνα 3-8. Απεικόνιση των κατασκευαστικών φάσεων και των τύπων υπολογισμού

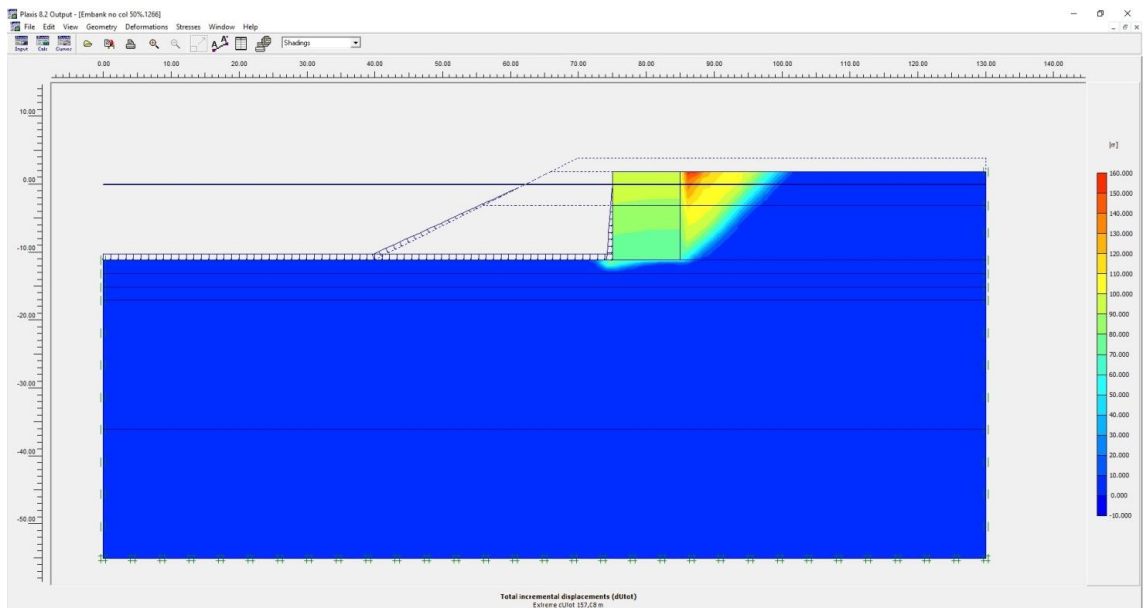
3.3.3 PLAXIS OUTPUT

Στο υποπρόγραμμα αυτό οι υπολογισμοί έχουν ολοκληρωθεί και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δει τα αποτελέσματα αυτών. Το PLAXIS παρέχει πληθώρα επιλογών, ανάμεσα στις οποίες:

- Οι μετακινήσεις (οριζόντιες, κατακόρυφες, συνολικές)
- Οι παραμορφώσεις
- Οι τάσεις (ενεργές, συνολικές)
- Οι πιέσεις των πόρων (active & excess)
- Ο συντελεστής ασφαλείας



Εικόνα 3-9. Απεικόνιση των καθιζήσεων σε φάση κατασκευής του έργου

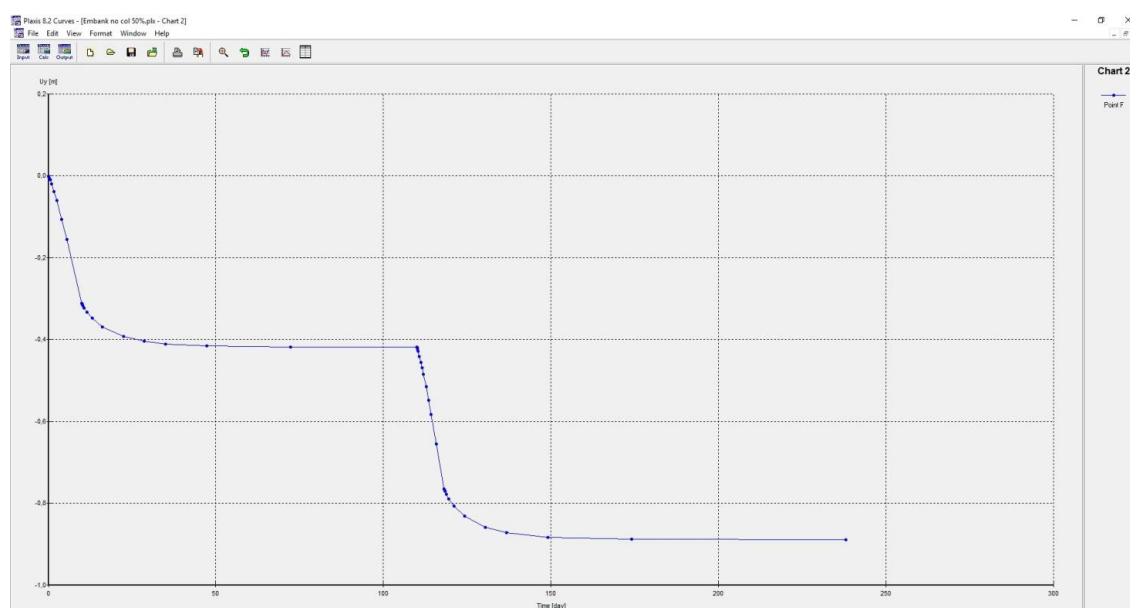


Εικόνα 3-10. Απεικόνιση πιθανής επιφάνειας αστοχίας

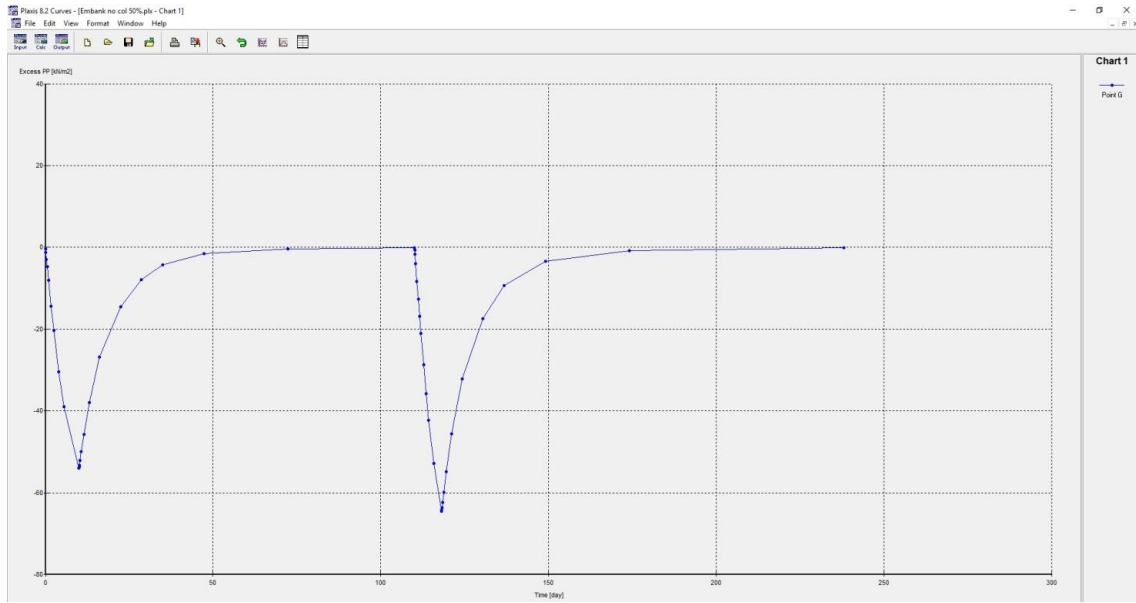
3.3.4 PLAXIS CURVES

Στο υποπρόγραμμα αυτό μπορεί ο χρήστης να δει τα αποτελέσματα των υπολογισμών για συγκεκριμένα σημεία πλέον μέσα στο προσομοίωμα. Πιο αναλυτικά υπάρχει η δυνατότητα να φανεί η χρονική εξέλιξη της πίεση των πόρων ή των μετακινήσεων για ένα συγκεκριμένο σημείο στη διάρκεια υπολογισμού όλων των σταδίων και κατ' επέκταση σε όλη την κατασκευή του έργου.

Επομένως σε αντίθεση με το προηγούμενο υποπρόγραμμα που ο χρήστης έχει μια γενική εποπτεία της κατασκευαστικής διαδικασίας, με αυτό είναι σε θέση να αντιληφθεί με ακρίβεια τις διάφορες παραμέτρους , όπως αυτές εξελίσσονται στα διάφορα στάδια.



Εικόνα 3-11. Χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων



Εικόνα 3-12. Χρονική εξέλιξη των υπερπιέσεων των πόρων

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 Εισαγωγή

Στη συγκεκριμένη εργασία προσομοιώθηκε η συμπεριφορά ενός κρηπιδότοιχου σε βελτιωμένο εδαφικό πυθμένα.

Ο κρηπιδότοιχος που χρησιμοποιήθηκε είναι κλειστός βαρέως τύπου και πιο συγκεκριμένα caisson. Το ύψος του είναι 13m και το πλάτος του είναι 10m.

Για την βελτίωση του εδαφικού πυθμένα χρησιμοποιήθηκε επίχωμα προφόρτισης, το οποίο κατασκευάστηκε σε δύο φάσεις. Στην Α' φάση προφόρτισης το ύψος του ήταν 8m και στην Β' φάση προφόρτισης 7m. Για την επιτάχυνση της διαδικασίας της στερεοποίησης και επομένως την ολοκλήρωση των καθιζήσεων κατασκευάστηκαν πριν από το επίχωμα προφόρτισης, χαλικοπάσσαλοι διαμέτρου 1m και μήκους 15m και με την ολοκλήρωσή τους εξυγιαντική στρώση μεγάλης περατότητας. Η στρώση αυτή είχε ως σκοπό την διοχέτευση του νερού των πόρων του εδαφικών στρωμάτων του πυθμένα, έξω από την περιοχή προφόρτισης και το πάχος της είναι 2m.

Όσον αφορά τα εδαφικά στρώματα του πυθμένα μαζί με την τοποθέτηση της εξυγιαντικής στρώσης, αυτά είναι κατά σειρά βάθους:

- Εξυγιαντική στρώση
- Μαλακή Άργιλος I
- Ιλυοαμμώδης ένστρωση
- Μαλακή άργιλος II
- Αργιλώδες αμμοχάλικο

Όσον αφορά τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφικών στρωμάτων, αλλά και του κρηπιδότοιχου, αυτά αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω στους πίνακες 4-1 και 4-2.

Οι παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν στη συγκεκριμένη εργασία επί των παραμέτρων κατασκευής κρηπιδότοιχου πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος PLAXIS 2D για το οποίο έγινε εκτενής αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν πέντε σειρές παραμετρικών αναλύσεων. Αυτές είναι:

1^η Σειρά: Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης (25%, 50%, 75%, 100%)

2^η Σειρά: Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης (25%, 50%, 75%, 100%) το οποίο έχει βελτιωθεί με τη χρήση χαλικοπασσάλων σε τετραγωνικό κάνναβο με αξονική απόσταση 2,5m

3^η Σειρά: Μεταβολή του τετραγωνικού καννάβου των πασσάλων σε 2,5 , 3 & 3,5m στην περίπτωση που το πάχος της αργίλου στη θεμελίωση είναι στο 50%

4^η Σειρά: Μεταβολή στο είδος του κρηπιδότοιχου με χρήση συμπαγούς κλειστού κρηπιδότοιχου (Τεχνητοί Ογκόλιθοι) αντί caisson στην περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50% και χρήσης χαλικοπασσάλων αξονικής απόστασης 2,5m

5^η Σειρά: Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων και της εξυγιαντικής στρώσης (35°, 40°, 45°) στην περίπτωση που το πάχος της αργίλου είναι στο 50% και χρήσης χαλικοπασσάλων αξονικής απόστασης 2,5m

4.2 Παράμετροι προσομοιώματος

Στη συγκεκριμένη εργασία προσομοιώνεται η εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης, αλλά και γενικότερα του συνόλου των καθιζήσεων που λαμβάνουν χώρα λόγω του επιχώματος προφόρτισης. Το επίχωμα αυτό χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση της εκτόνωσης των υπερπιέσεων των πόρων στα συμπιεστά εδάφη, όπως είναι η μαλακή άργιλος I και η μαλακή άργιλος II, και επομένως και για την ολοκλήρωση των καθιζήσεων. Η ολοκλήρωση του συνόλου των καθιζήσεων είναι σημαντική, επειδή στη συνέχεια θα εδρασθεί στην επιφάνεια αυτή τόσο ο κρηπιδότοιχος, όσο και η τελική στρώση του κρηπιδώματος, που αποτελεί το δάπεδο πάνω στο οποίο γίνεται το σύνολο των δραστηριοτήτων του λιμένα.

Όσον αφορά τη διαδικασία της προσομοίωσης αυτή ακολουθήσε τα εξής στάδια:

1° Στάδιο: Κατασκευή της Α' φάσης του επιχώματος προφόρτισης

2° Στάδιο: Αναμονή μέχρι την σταθεροποίηση των καθιζήσεων και την αποτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων λόγω της Α' φάσης του επιχώματος προφόρτισης

3° Στάδιο: Κατασκευή της Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης

4° Στάδιο: Αναμονή μέχρι την σταθεροποίηση των καθιζήσεων και την αποτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων λόγω της Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης

5° Στάδιο: Αφαίρεση μέρους του επιχώματος και τοποθέτηση του κρηπιδότοιχου

6° Στάδιο: Εύρεση του συντελεστή ασφαλείας για την Α' φάση προφόρτισης

7° Στάδιο: Εύρεση του συντελεστή ασφαλείας για την Β' φάση προφόρτισης

8° Στάδιο: Εύρεση του συντελεστή ασφαλείας για τη σταθερότητα του κρηπιδότοιχου

Το συγκεκριμένο προσομοίωμα επιλύθηκε ως δισδιάστατο επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain model). Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ήταν το πιο πυκνό (very fine mesh).

Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες και ειδικά τις υδροστατικές πιέσεις, στο δεξιό άκρο του προσομοιώματος τοποθετήθηκε ένα κλειστό όριο (closed consolidation boundaries), με το οποίο υποδηλώνεται η συμμετρία του επιχώματος.

Όσον αφορά τις υδροστατικές πιέσεις, αυτές υπολογίζονται με τον ορισμό της επιφάνειας του υδροφόρου που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η επιφάνεια της θάλασσας, δηλαδή $y = 0\text{m}$. Ακόμη, οι αρχικές ενεργές τάσεις υπολογίζονται με το βάθος, με αρχική επιφάνεια τον πυθμένα, δηλαδή $y = -13\text{m}$.

Καθοριστικοί παράμετροι του προσομοιώματος είναι τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των διαφόρων εδαφικών σχηματισμών. Στον πίνακα 4-1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αυτά.

Εκτός από τις παραμέτρους των χαρακτηριστικών του εδάφους, στο προσομοίωμα εισήχθησαν και παράμετροι αντοχής για τους κρηπιδοίχους. Στον πίνακα 4-2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αυτών.

Πίνακας 4-1. Παρουσίαση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών στρωμάτων του προσομοιώματος

Στρωματογραφία	Material Model	Material Type	Φαινόμενο Βάρος		Υδροπερατότητα		Μέτρο Ελαστικότητας	Λόγος Poisson	Συνοχή	Γωνία Εσωτερικής Τριβής	ψ°
			γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	K_x (m/day)	K_y (m/day)	E_{ref} (kN/m ²)	ν	C_{ref} (kN/m ²)	ϕ°	
Μαλακή Άργιλος I	M-C	Undrained	17,5	18,5	$8,64 \cdot 10^{-3}$	$8,64 \cdot 10^{-3}$	3552	0,35	30	18	0
Ιλαιοαμμώδης ένστρωση	M-C	Undrained	18,5	19,5	0,086	0,086	$1,41 \cdot 10^4$	0,3	10	28	0
Μαλακή Άργιλος II	M-C	Undrained	17,5	18,5	$8,64 \cdot 10^{-3}$	$8,64 \cdot 10^{-3}$	4673	0,35	37	18	0
Αργιλώδες Αμμοχάλικο	M-C	Undrained	19	20	8,64	8,64	$1,077 \cdot 10^4$	0,3	35	30	0
Υλικό Εξυγίανσης	M-C	Drained	19	20	2592	2592	7429	0,3	0,1	35	0
Υλικό Επίχωσης	M-C	Drained	18	19	604,8	604,8	7429	0,3	0,1	32,5	0

Πίνακας 4-2. Παρουσίαση των μηχανικών χαρακτηριστικών των κρηπιδότοιχων που χρησιμοποιήθηκαν

Είδη Κρηπιδότοιχου	Material Model	Material Type	Φαινόμενο Βάρος		Υδροπερατότητα		Μέτρο Ελαστικότητας	Λόγος Poisson	Συνοχή	Γωνία Εσωτερικής Τριβής	
			γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	K_x (m/day)	K_y (m/day)	E_{ref} (kN/m ²)	ν	c_{ref} (kN/m ²)	ϕ°	ψ°
Caisson	M-C	Non-porous	13,12	-	-	-	$5,867 \cdot 10^5$	0,1	200	70	0
Τεχνητοί Ογκόλιθοι	M-C	Non-porous	25	-	-	-	$5,867 \cdot 10^5$	0,1	200	70	0

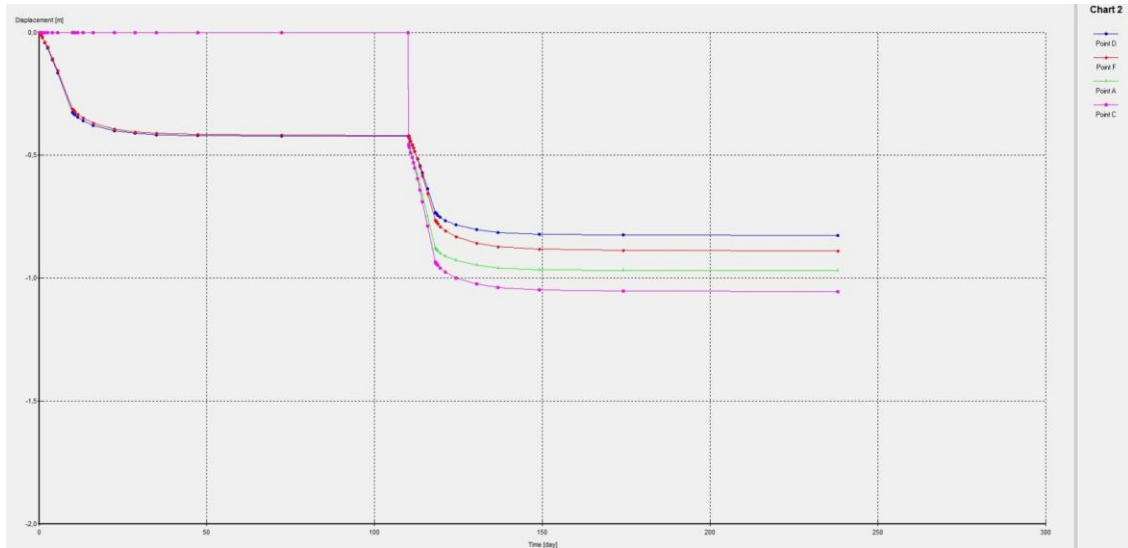
4.3 Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα

4.3.1 1^η Σειρά Παραμετρικών αναλύσεων: Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II (25%, 50%, 75%, 100%)

Στη σειρά αυτή των παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται, πως επηρεάζει η μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης, τις καθιζήσεις, το συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες φάσεις προφόρτισης, καθώς και τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης. Πιο συγκεκριμένα αυξάνεται το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II σε τέσσερα επίπεδα (25%, 50%, 75%, 100%).

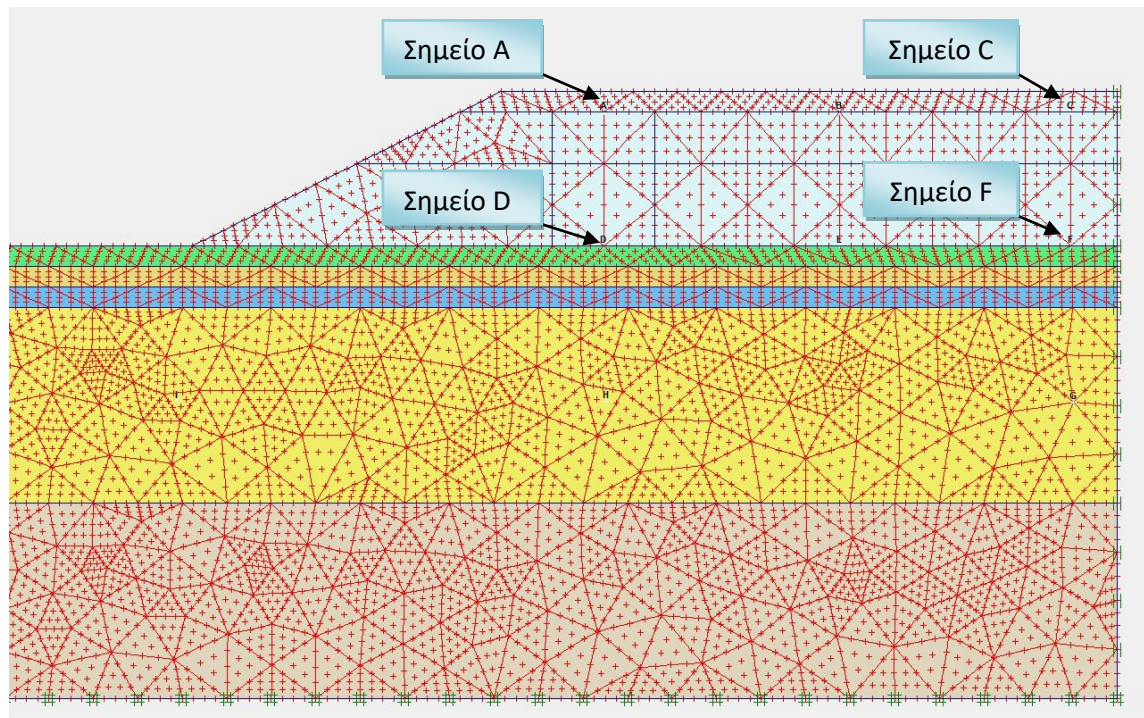
Στην εικόνα 4-2 αποτυπώνεται ενδεικτικά η περίπτωση που το πάχος της μαλακής αργίλου II (έντονο κίτρινο) είναι 50%. Το ποσοστό αυτό έχει να κάνει με το πάχος της αργίλου, δηλαδή τροποποιείται κάθε φορά η περιοχή από τη βάση του ακριβώς ανώτερου στρώματος μέχρι και τη βάση του προσομοιώματος. Στην περίπτωση που το ποσοστό είναι 100%, όλη αυτή η περιοχή που αναφέρθηκε καλύπτεται από το στρώμα της μαλακής αργίλου II.

Για την καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα συγκεκριμένα σημεία. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε το σημείο F, που βρίσκεται στη βάση του επιχώματος. Αυτό το σημείο θα είναι το πιο αντιπροσωπευτικό για τη βάση του επιχώματος, καθώς βρίσκεται στη μέση του πραγματικού επιχώματος, όπου και αναμένονται οι μεγαλύτερες καθιζήσεις. Οπότε με την ολοκλήρωση των καθιζήσεων στο σημείο αυτό, θα έχουν ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις και στα υπόλοιπα σημεία. Επίσης επιλέγεται το σημείο C, το οποίο βρίσκεται στην ίδια θέση με το F (συντεταγμένη χ), αλλά σε διαφορετικό ύψος και πιο συγκεκριμένα στο τελικό δάπεδο του λιμένα μετά την απομάκρυνση μέρους του επιχώματος. Η θέση αυτή επιλέγεται για τον ίδιο ακριβώς λόγο που επιλέχθηκε και το σημείο F, με μόνη διαφορά την εξέταση των καθιζήσεων λόγω του επιχώματος. Οι θέσεις των σημείων που αναφέρθηκαν φαίνονται καλύτερα στην εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-1. Καθιζήσεις σημείων του επιχώματος (περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50%)

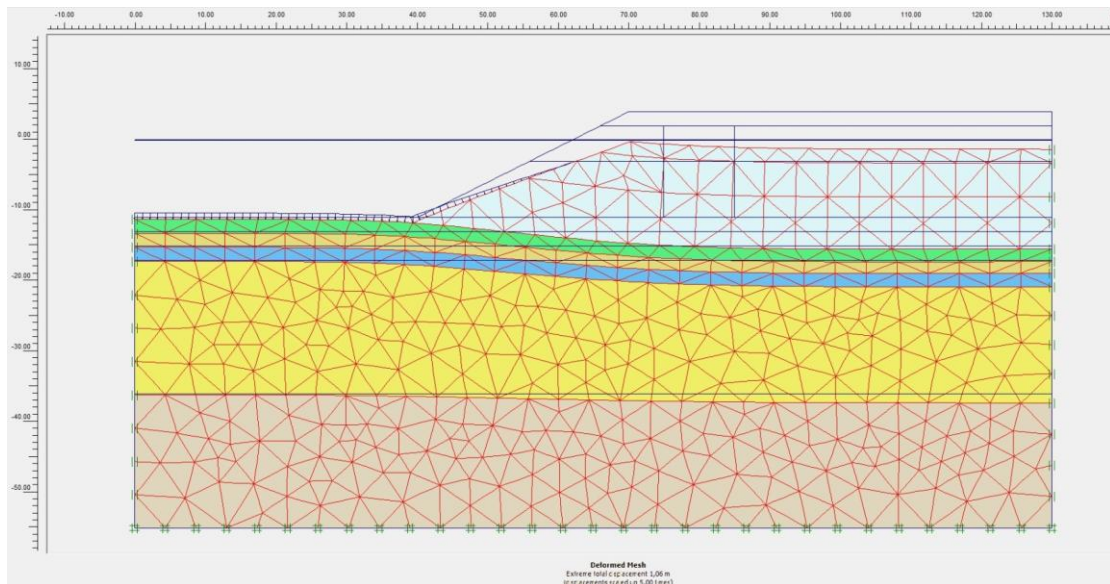
Στην εικόνα 4-1 φαίνονται οι τιμές των καθιζήσεων, όπως αυτές εξελίσσονται με το χρόνο για τα σημεία A, D, C, F. Από την παραπάνω εικόνα μπορεί να γίνει κατανοητό γιατί επιλέγονται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων τα σημεία F και C. Τα σημεία F και C παρουσιάζουν κάθε φορά τις μέγιστες καθιζήσεις στο προσομοίωμα λόγω της θέσης τους (κέντρο του επιχώματος). Οπότε αν ολοκληρωθούν οι καθιζήσεις σε αυτά τα σημεία, τότε ολοκληρώνονται και σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του επιχώματος, πέραν του γεγονότος ότι στα σημεία F και C είναι μέγιστες. Η θέση των σημείων A και D φαίνεται στην εικόνα 4-2.



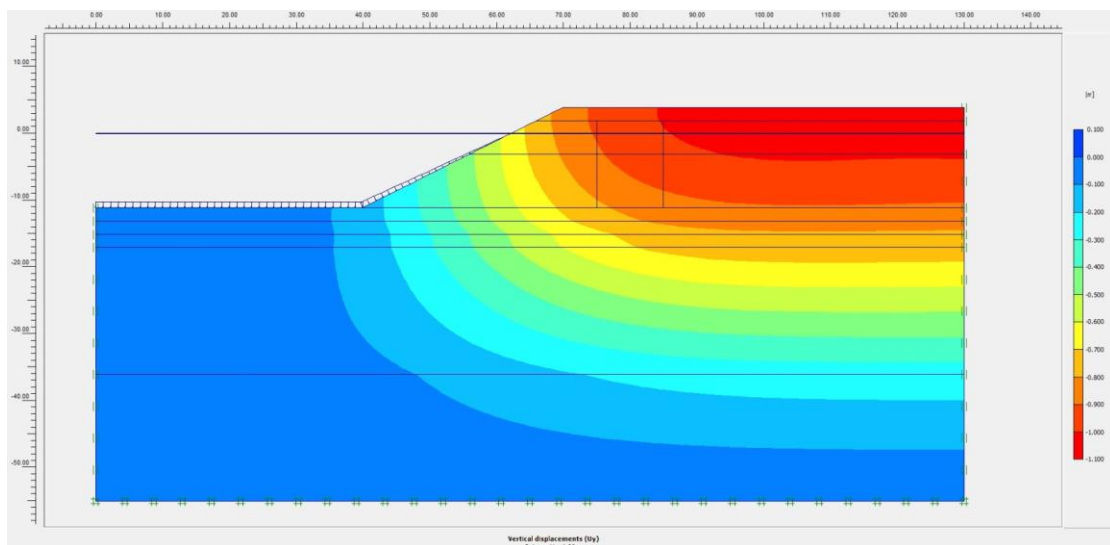
Εικόνα 4-2. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50%)

4.3.1.1 Καθιζήσεις

Όσον αφορά τις καθιζήσεις που προκύπτουν από την επίλυση του προγράμματος, αυτές παρουσιάζονται συνολικά στις εικόνες 4-3 και 4-4. Στην εικόνα 4-3 φαίνεται με ποιον τρόπο καθιζάνει το επίχωμα, ενώ στην εικόνα 4-4 διακρίνονται χρωματικά οι ζώνες που παρουσιάζουν κοινές καθιζήσεις σε όλη την έκταση του επιχώματος μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης.



Εικόνα 4-3. Παραμορφωμένο πλέγμα προσομοιώματος λόγω των καθιζήσεων (περίπτωση πάχους 50%)



Εικόνα 4-4. Παρουσίαση των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης σε ζώνες (περίπτωση πάχους 50%)

Αντιθέτως στον πίνακα 4-3 καταγράφονται οι τιμές των καθιζήσεων για δύο συγκεκριμένα σημεία στο επίχωμα. Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα αυτό καταγράφονται οι μέγιστες καθιζήσεις που μπορούν να εκδηλωθούν στη βάση θεμελίωσης του επιχώματος (σημείο F), αλλά και στην οροφή σχεδόν του

επιχώματος (σημείο C). Οι τιμές αυτές αφορούν τις καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα με το τέλος της Α' και της Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης. Σημειώνεται ότι οι καθιζήσεις της Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης που καταγράφονται στον πίνακα 4-3 αφορούν τις συνολικές μετά και την Β' φάση προφόρτισης. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4-3 δεν έχουν καταγραφεί καθιζήσεις για την Α' φάση προφόρτισης στο σημείο C, καθώς εκείνη τη χρονική στιγμή το σημείο αυτό του επιχώματος δεν υπήρχε, αλλά σχηματίστηκε όταν τοποθετήθηκε η Β' φάση του επιχώματος. Οι τιμές των καθιζήσεων δίνονται σε μέτρα.

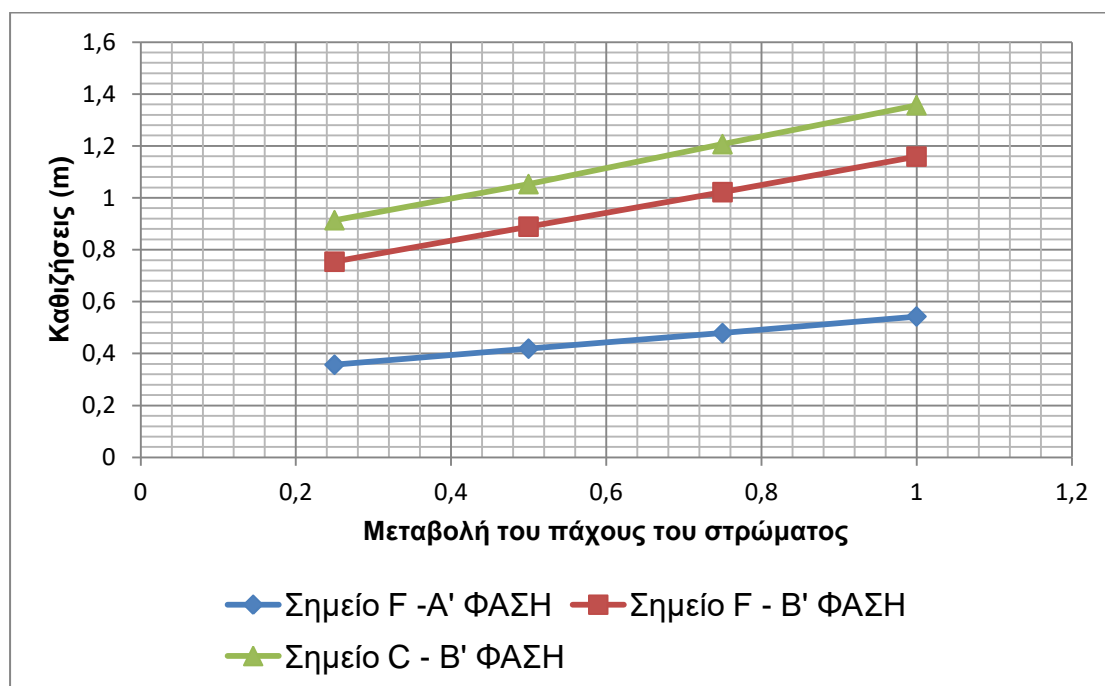
Πίνακας 4-3. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II

	Φάσεις έργου	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
		25%	50%	75%	100%
Σημείο F	Α' Φάση προφόρτισης	0,357	0,419	0,479	0,543
	Β' Φάση προφόρτισης	0,754	0,889	1,022	1,159
Σημείο C	Α' Φάση προφόρτισης	-	-	-	-
	Β' Φάση προφόρτισης	0,914	1,053	1,207	1,357

Στο σχήμα 4-1 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές των καθιζήσεων τόσο για την Α' φάση όσο και για την Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης για το σημείο F (μπλε και κόκκινη καμπύλη αντίστοιχα), αλλά και για την Β' φάση για το σημείο C (πράσινη καμπύλη).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-1, οι καθιζήσεις αυξάνονται με την αύξηση του ποσοστού μεταβολής του πάχους της αργίλου. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο αυξάνεται το πάχος της αργίλου τόσο αυξάνονται και οι πόροι του εδαφικού αυτού στρώματος, οπότε και αναμένονται μεγαλύτερες καθιζήσεις. Επιπλέον είναι εμφανές ότι οι καθιζήσεις και σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνονται γραμμικά, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο αφού η μεταβολή στο πάχος της αργίλου είναι σταθερή. Παρατηρείται ακόμη ότι υπάρχει μια

επιπλέον καθίζηση (διαφορά κόκκινης με πράσινης καμπύλης), το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει καθίζηση και στο ίδιο το επίχωμα. Η διαφορά αυτή είναι οι καθιζήσεις που παρουσιάζει το επίχωμα και κυμαίνονται από 16 - 20cm.



Σχήμα 4-1. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την A' και B' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II

4.3.1.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης

Όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερτιέσεων των πόρων και επομένως της διαδικασίας της στερεοποίησης με την ολοκλήρωση των καθιζήσεων που προκύπτουν από την επίλυση του προγράμματος, αυτός παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 4-4. Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιείται είναι οι μέρες.

Πίνακας 4-4. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης

Φάσεις έργου	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
	25%	50%	75%	100%
Α' Φάση προφόρτισης	22	72	140	260
Β' Φάση προφόρτισης	42	136	290	530

Στο σχήμα 4-2 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις ημέρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης και επομένως των καθιζήσεων με το τέλος της διαδικασίας προφόρτισης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-2, με την αύξηση του πάχους του στρώματος της αργίλου, αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ αργή και γι' αυτό δικαιολογείται και το γεγονός ότι στην περίπτωση που το πάχος της αργίλου είναι 100%, χρειάζονται για την ολοκλήρωση και των δύο φάσεων 530 μέρες, δηλαδή περίπου 1,5 χρόνος. Επιπλέον παρατηρείται ότι η καμπύλη του χρόνου δεν είναι γραμμική, ενώ η κλίση της σε κάθε περίπτωση αυξάνεται περισσότερο. Ακόμη στην περίπτωση που το πάχος είναι 50% παρατηρείται ότι με το διπλασιασμό του, δηλαδή στο 100%, ο χρόνος για την ολοκλήρωση της εκτόνωσης των υπερπίεσεων των πόρων περίπου τετραπλασιάζεται.

Αυτό δείχνει σε σχέση και με τα αποτελέσματα του σχήματος 4-1, ότι η σταθερή μεταβολή στο πάχος της αργίλου δε συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή στο χρόνο της διαδικασίας της στερεοποίησης.



Σχήμα 4-2. Χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II

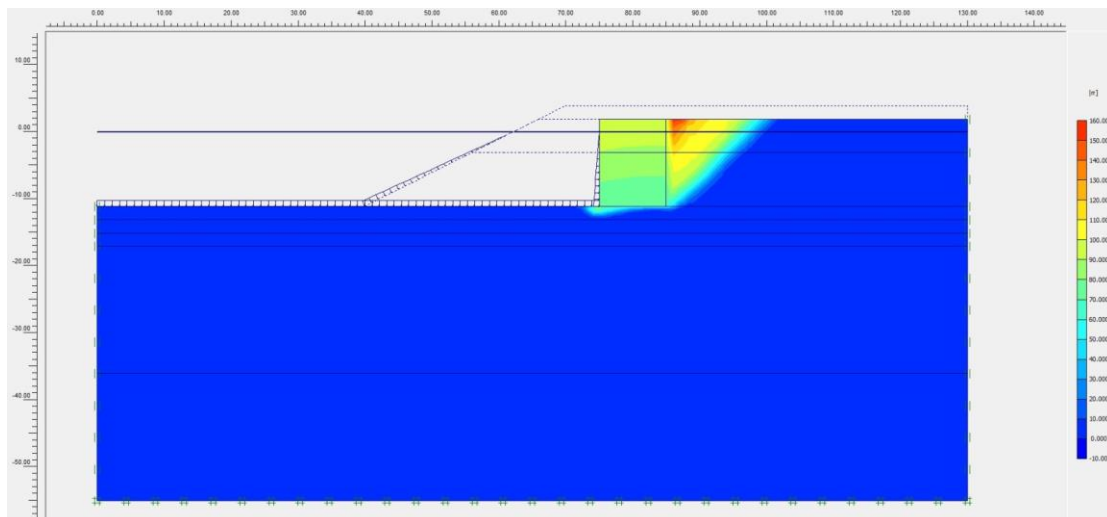
4.3.1.3 Συντελεστής Ασφαλείας

Όσον αφορά το συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την επίλυση του προγράμματος, οι τιμές του παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4-5. Οι τιμές αυτές αφορούν την Α', Β' και τελική φάση του έργου. Οι τιμές της Α' και Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης αναφέρονται στην ευστάθεια που παρουσιάζει το αντίστοιχο μέρος του επιχώματος. Όπως φαίνεται από τις παρακάτω τιμές δεν προκύπτει κατάρρευση σε καμία φάση του έργου, αφού οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας ξεπερνούν την τιμή 1. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται για την Β' φάση προφόρτισης, με τιμή περίπου 1,2. Όμως η τιμή αυτή δε δημιουργεί πρόβλημα στο έργο, καθώς η φάση αυτή είναι προσωρινή και διαρκεί μέχρι την ολοκλήρωση των καθιζήσεων. Η φάση που έχει ουσιαστική σημασία είναι η τελική φάση του έργου στην οποία τοποθετείται ο κρηπιδότοιχος που είναι μόνιμη κατασκευή. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι γύρω στο 1,35.

Πίνακας 4-5. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II

Φάσεις έργου	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
	25%	50%	75%	100%
Α' Φάση προφόρτισης	1,382	1,391	1,384	1,386
Β' Φάση προφόρτισης	1,234	1,239	1,241	1,246
Τελική Φάση	1,345	1,345	1,344	1,345

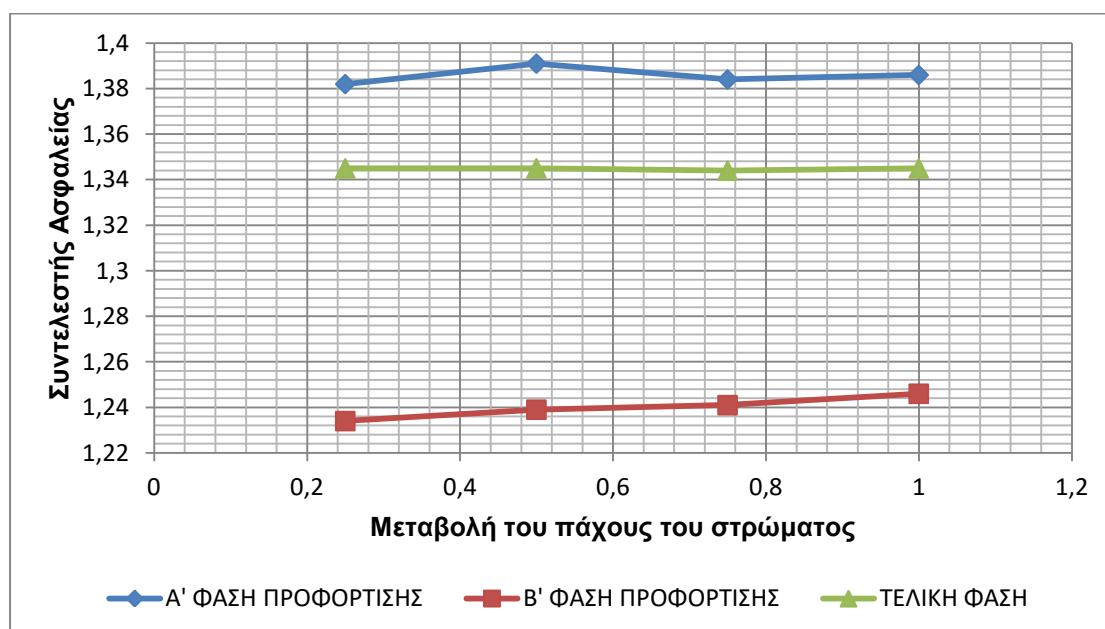
Στην εικόνα 4-5 φαίνονται ενδεικτικά οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου στην περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50%. Παρατηρείται ότι πίσω από τον κρηπιδότοιχο δημιουργείται μία σφήνα που θα μπορούσε δυνητικά να τον ανατρέψει. Σημαντικό είναι επίσης ότι η επιφάνεια αυτή κινείται και κάτω από τον κρηπιδότοιχο. Ωστόσο η επιφάνεια αυτή δε ξεπερνά την εξυγιαντική στρώση του εδάφους και είναι αρκετά ρηχή, ώστε να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.



Εικόνα 4-5. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (περίπτωση πάχους στρώματος της μαλακής αργίλου II 50%)

Στο σχήμα 4-3 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας τόσο για την Α' και την Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης όσο και για την τελική φάση του έργου, στην οποία δοκιμάζεται η ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-3, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για όλες τις φάσεις του έργου είναι παρόμοιες. Οι πάρα πολύ μικρές έως απειροελάχιστες διαφορές που παρουσιάζονται και αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο δεν έχουν πρακτική σημασία για την εξέλιξη του έργου. Οπότε η μεταβολή του πάχους της αργίλου δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας σε καμιά από τις φάσεις του έργου.



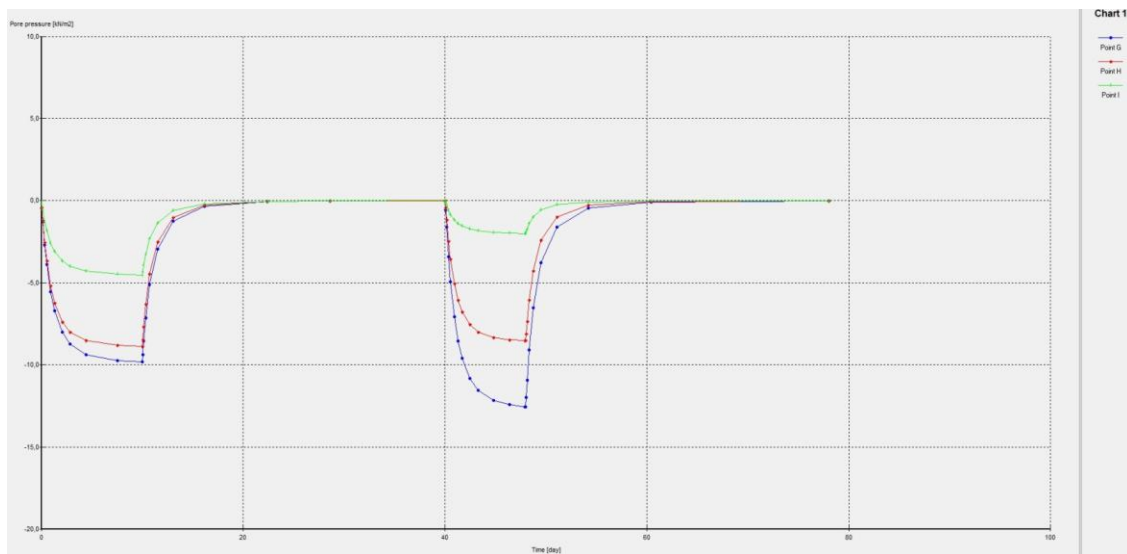
Σχήμα 4-3. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II

4.3.2 2^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II (25%, 50%, 75%, 100%) με τη χρήση χαλικοπασσάλων σε τετραγωνικό κάναβο αξονικής απόστασης 2,5m

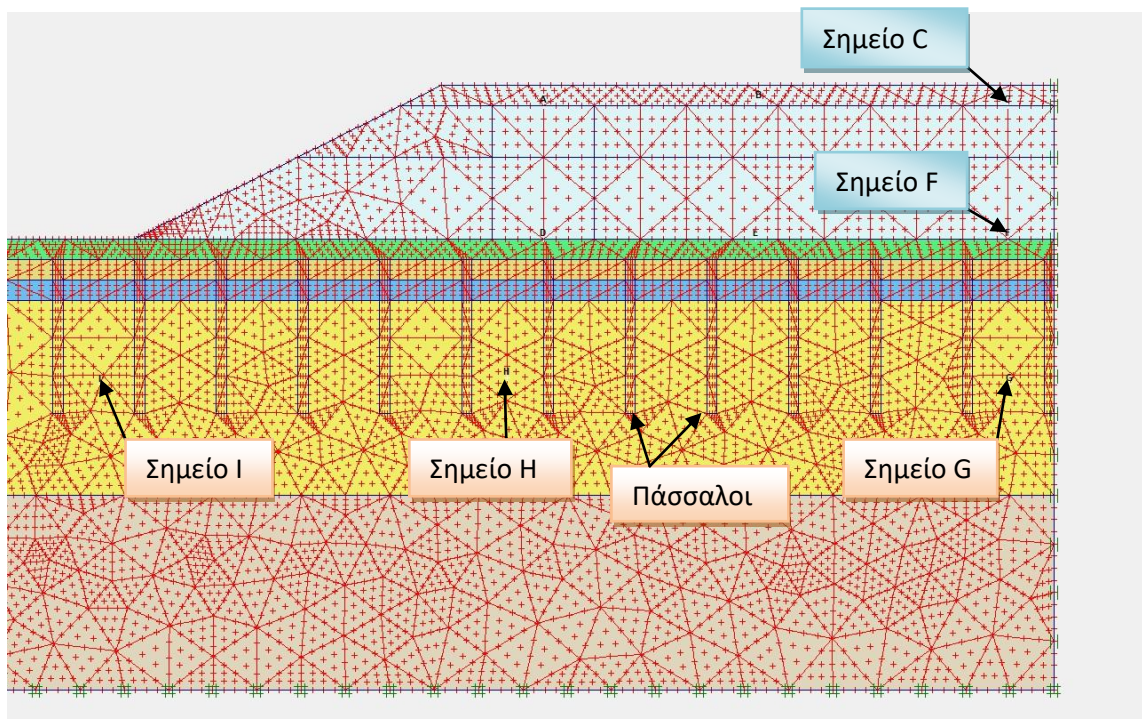
Στη σειρά αυτή των παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται, πως επηρεάζει η μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης, τις καθιζήσεις, το συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες φάσεις προφόρτισης, καθώς και τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης. Ωστόσο σε αυτήν τη σειρά παραμετρικών αναλύσεων έγινε χρήση χαλικοπασσάλων σε τετραγωνικό κάναβο αξονικής απόστασης 2,5m. Στην εικόνα 4-7 αποτυπώνεται ενδεικτικά η περίπτωση που το πάχος της μαλακής αργίλου II (έντονο κίτρινο) είναι 50%, καθώς επίσης και οι πάσσαλοι αξονικής απόστασης 2,5m. Οι χαλικοπάσσαλοι έχουν διάμετρο 1m.

Για την καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα συγκεκριμένα σημεία. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε το σημείο F, που βρίσκεται στη βάση του επιχώματος. Επίσης επιλέγεται το σημείο C, το οποίο βρίσκεται στην ίδια θέση με το F (συντεταγμένη χ), αλλά σε διαφορετικό ύψος και πιο συγκεκριμένα στο τελικό δάπεδο του λιμένα μετά την απομάκρυνση μέρους του επιχώματος. Η θέση αυτή επιλέγεται για τον ίδιο ακριβώς λόγο που επιλέχθηκε και το σημείο F, με μόνη διαφορά την εξέταση των καθιζήσεων λόγω του επιχώματος. Ακόμα το σημείο G βρίσκεται περίπου στο μέσο του στρώματος της μαλακής αργίλου II (υψομετρικά) και στη μέση μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Η θέση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς στο σημείο αυτό αναμένονται οι μεγαλύτερες πιέσεις πόρων καθώς αυτό βρίσκεται στη μέση του πραγματικού επιχώματος, αλλά και στη μέση μεταξύ δύο στρωμάτων με μεγαλύτερη περατότητα. Τέλος βρίσκεται στη μέση μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Οι θέσεις των σημείων που αναφέρθηκαν φαίνονται καλύτερα στην εικόνα 4-7.

Το σημείο G (μπλε καμπύλη) χρησιμοποιείται στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων. Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση του πλεονεκτεί σε σχέση με τα σημεία H (κόκκινη καμπύλη) και I (πράσινη καμπύλη), λόγω του ότι βρίσκεται στη μέση του επιχώματος με τις μεγαλύτερες πιέσεις πόρων. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 4-6, όπου οι πιέσεις πόρων στο σημείο G είναι μεγαλύτερες από οποιοδήποτε άλλο σημείο. Στην εικόνα 4-7 φαίνονται οι θέσεις όλων των σημείων στο προσομοίωμα.



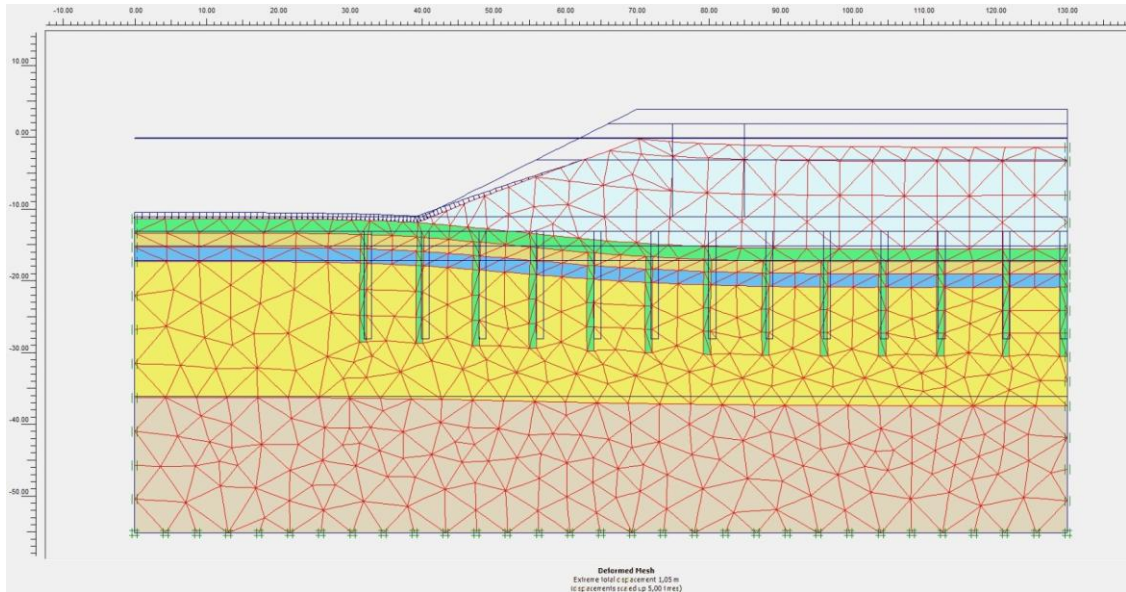
Εικόνα 4-6. Πιέσεις πόρων των σημείων G, H & I σε σχέση με το χρόνο (περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50% και χρήσης πασσάλων 2,5m)



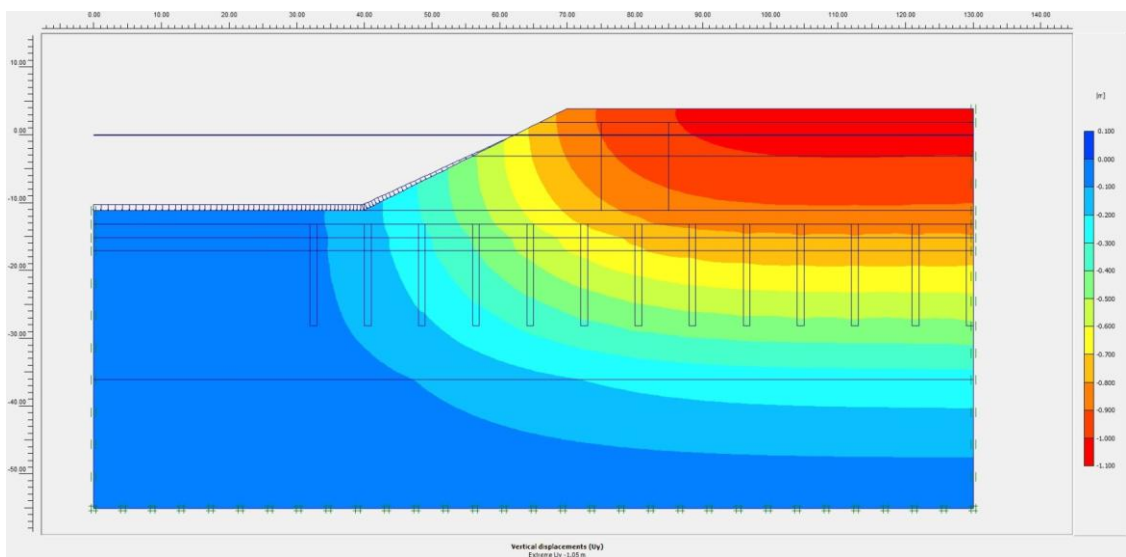
Εικόνα 4-7. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50% με πάσσλους)

4.3.2.1 Καθιζήσεις

Όσον αφορά τις καθιζήσεις που προκύπτουν από την επίλυση του προγράμματος, αυτές παρουσιάζονται συνολικά στις εικόνες 4-8 και 4-9. Στην εικόνα 4-8 φαίνεται με ποιον τρόπο καθιζάνει το επίχωμα και πως παραμορφώνονται οι πάσσαλοι κάτω από αυτό, ενώ στην εικόνα 4-9 διακρίνονται χρωματικά οι ζώνες που παρουσιάζουν κοινές καθιζήσεις σε όλη την έκταση του επιχώματος μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης.



Εικόνα 4-8. Παραμορφωμένο πλέγμα προσομοιώματος λόγω των καθιζήσεων (περίπτωση πάχους 50% με πασσάλους)



Εικόνα 4-9. Παρουσίαση των καθιζήσεων μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης σε ζώνες (περίπτωση πάχους 50% με πασσάλους)

Αντιθέτως στον πίνακα 4-6 καταγράφονται οι τιμές των καθιζήσεων για δύο συγκεκριμένα σημεία στο επίχωμα. Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα αυτό καταγράφονται οι μέγιστες καθιζήσεις που μπορούν να εκδηλωθούν στη βάση

θεμελίωσης του επιχώματος (σημείο F), αλλά και στην οροφή σχεδόν του επιχώματος (σημείο C). Οι τιμές αυτές αφορούν τις καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα με το τέλος της Α' και της Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης. Σημειώνεται ότι οι καθιζήσεις της Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης που καταγράφονται στον πίνακα 4-6 αφορούν τις συνολικές μετά και την Β' φάση προφόρτισης. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4-6 δεν έχουν καταγραφεί καθιζήσεις για την Α' φάση προφόρτισης στο σημείο C, καθώς εκείνη τη χρονική στιγμή το σημείο αυτό του επιχώματος δεν υπήρχε, αλλά σχηματίστηκε όταν τοποθετήθηκε η Β' φάση του επιχώματος. Οι τιμές των καθιζήσεων δίνονται σε μέτρα.

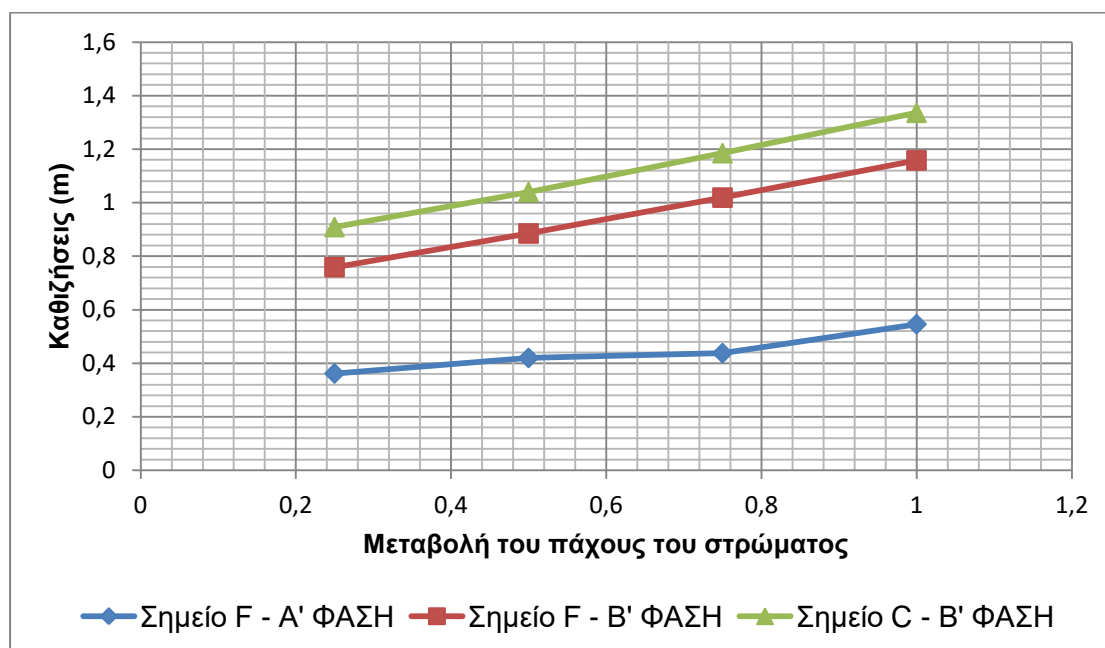
Πίνακας 4-6. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων

	Φάσεις έργου	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
		25%	50%	75%	100%
Σημείο F	Α' Φάση προφόρτισης	0,362	0,42	0,438	0,546
	Β' Φάση προφόρτισης	0,759	0,885	1,019	1,158
Σημείο C	Α' Φάση προφόρτισης	-	-	-	-
	Β' Φάση προφόρτισης	0,909	1,04	1,185	1,336

Στο σχήμα 4-4 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές των καθιζήσεων τόσο για την Α' φάση όσο και για την Β' φάση προφόρτισης για το σημείο F (μπλε και κόκκινη καμπύλη αντίστοιχα), αλλά και για την Β' φάση για το σημείο C (πράσινη καμπύλη).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-4, οι καθιζήσεις αυξάνονται με την αύξηση του ποσοστού μεταβολής του πάχους της αργίλου. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο αυξάνεται το πάχος της αργίλου τόσο αυξάνονται και οι πόροι του εδαφικού αυτού στρώματος, οπότε και αναμένονται μεγαλύτερες καθιζήσεις. Επιπλέον είναι εμφανές ότι οι καθιζήσεις σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνονται γραμμικά, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο αφού η μεταβολή στο πάχος της

αργίλου είναι σταθερή. Παρατηρείται ακόμη ότι υπάρχει μια επιπλέον καθίζηση (διαφορά κόκκινης με πράσινης καμπύλης), το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει καθίζηση και στο ίδιο το επίχωμα. Η διαφορά αυτή είναι οι καθιζήσεις που παρουσιάζει το επίχωμα και κυμαίνονται από 15 - 18cm.



Σχήμα 4-4. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' φάση προφόρτισης των σημείων F & C σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων

4.3.2.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης

Όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων και επομένως της διαδικασίας της στερεοποίησης με την ολοκλήρωση των καθιζήσεων που προκύπτουν από την επίλυση του προγράμματος, αυτός παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 4-7. Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιείται είναι οι μέρες.

Πίνακας 4-7. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης

Φάσεις έργου	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
	25%	50%	75%	100%
Α' Φάση προφόρτισης	13	22	62	115
Β' Φάση προφόρτισης	24	36	120	247

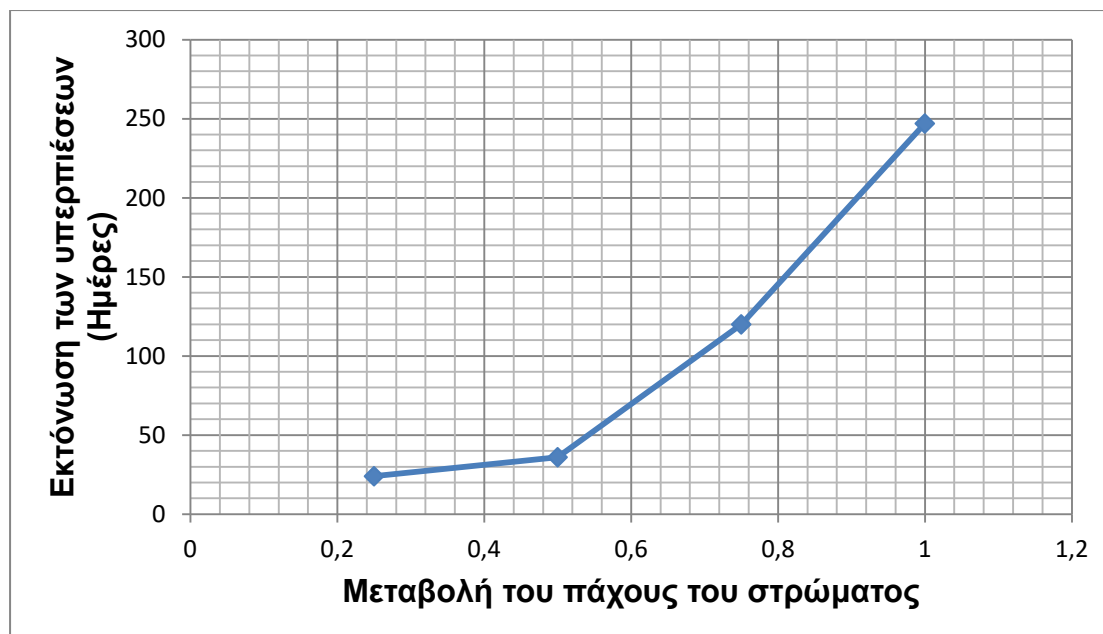
Στο σχήμα 4-5 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις ημέρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης και επομένως των καθιζήσεων με το τέλος της διαδικασίας προφόρτισης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-5, με την αύξηση του πάχους του στρώματος της αργίλου, αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ αργή και γι' αυτό δικαιολογείται και το γεγονός ότι στην περίπτωση που το πάχος της αργίλου είναι 100%, χρειάζονται για την ολοκλήρωση και των δύο φάσεων 247 μέρες, δηλαδή περίπου 8 μήνες.

Επιπλέον παρατηρείται ότι η καμπύλη του χρόνου δεν είναι γραμμική, ενώ η κλίση της σε κάθε περίπτωση αυξάνεται περισσότερο. Ακόμη φαίνεται σε σχέση και με τα αποτελέσματα του σχήματος 4-4, ότι η σταθερή μεταβολή στο πάχος της αργίλου δε συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή στο χρόνο της διαδικασίας της στερεοποίησης.

Μία ακόμη παρατήρηση είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση που το πάχος είναι 25% και 50% δεν παρατηρείται ιδιαίτερη αλλαγή στην αύξηση των ημερών για την εκτόνωση των υπερπίεσεων. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι στις δύο αυτές περιπτώσεις το σημείο G (δες εικόνα 4-7) βρίσκεται στο χώρο μεταξύ των δύο χαλικοπασσάλων, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη το νερό να φθάσει σε γειτονικό στρώμα (ανώτερο ή κατώτερο), αλλά να κινηθεί ακτινικά που η απόσταση είναι κατά πολύ μικρότερη. Σε αντίθεση με τις περιπτώσεις που το πάχος του στρώματος είναι 75% και 100% και το σημείο G δε βρίσκεται μεταξύ των χαλικοπασσάλων αλλά λίγο πιο κάτω κάθε φορά, οπότε το νερό πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση για να φθάσει κάποιον χαλικοπάσσαλο. Αυτό συμβαίνει, γιατί το σημείο G τοποθετήθηκε σε

κάθε ανάλυση στη μέση περίπτωση του στρώματος της μαλακής αργίλου II, ώστε να εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση.



Σχήμα 4-5. Χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με χρήση πασσάλων

4.3.2.3 Συντελεστής Ασφαλείας

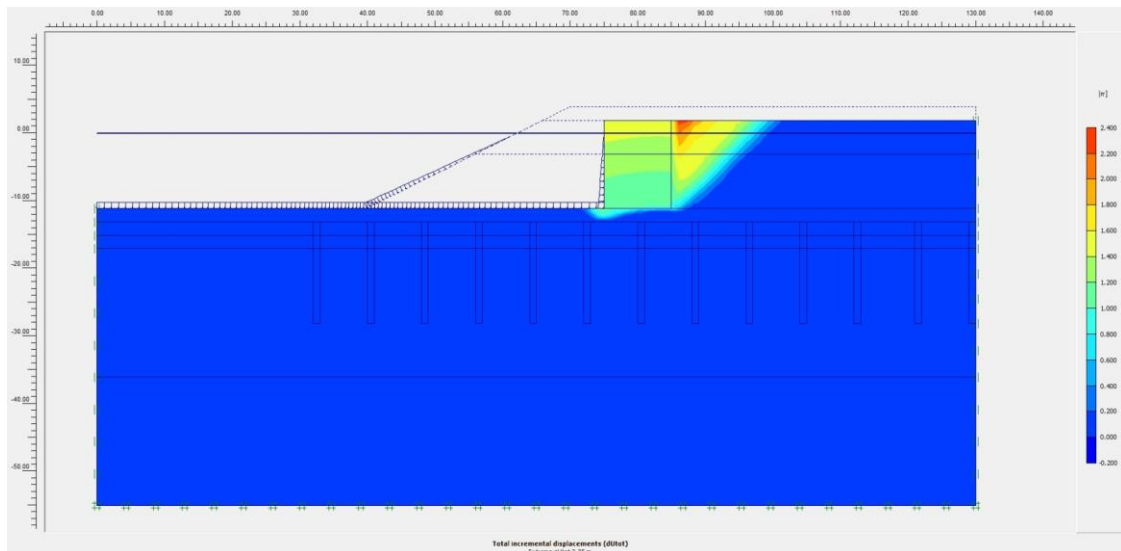
Όσον αφορά το συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την επίλυση του προγράμματος, οι τιμές του παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4-8. Οι τιμές αυτές αφορούν την A', B' και τελική φάση του έργου. Οι τιμές της A' και B' φάσης του επιχώματος προφόρτισης αναφέρονται στην ευστάθεια που παρουσιάζει το αντίστοιχο μέρος του επιχώματος. Όπως φαίνεται από τις παρακάτω τιμές δεν προκύπτει κατάρρευση σε καμία φάση του έργου, αφού οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας ξεπερνούν την τιμή 1. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται για την B' φάση προφόρτισης, με τιμή περίπου 1,25. Όμως η τιμή αυτή δε δημιουργεί πρόβλημα στο έργο, καθώς η φάση αυτή είναι προσωρινή και διαρκεί μέχρι την ολοκλήρωση των καθιζήσεων. Η φάση που έχει ουσιαστική σημασία είναι η τελική φάση του έργου στην οποία

τοποθετείται ο κρηπιδότοιχος που είναι μόνιμη κατασκευή. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι γύρω στο 1,32.

Πίνακας 4-8. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II με τη χρήση πασσάλων

Φάσεις έργου	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
	25%	50%	75%	100%
Α' Φάση προφόρτισης	1,364	1,365	1,365	1,362
Β' Φάση προφόρτισης	1,238	1,247	1,249	1,241
Τελική Φάση	1,32	1,32	1,319	1,321

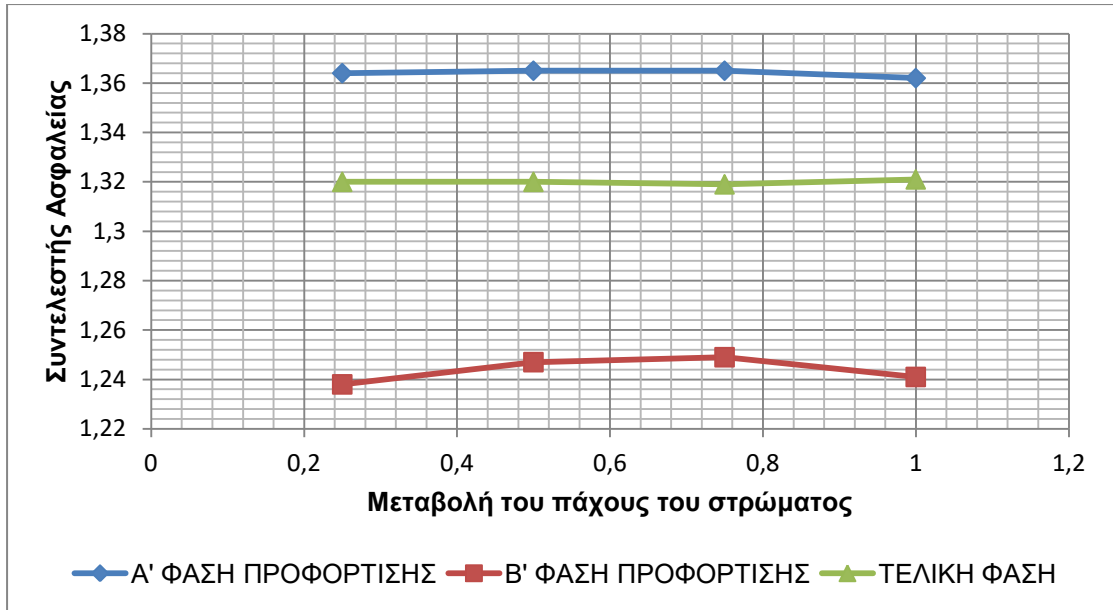
Στην εικόνα 4-10 φαίνονται ενδεικτικά οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου στην περίπτωση του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II (50%) με τη χρήση χαλικοπασσάλων. Παρατηρείται ότι πίσω από τον κρηπιδότοιχο δημιουργείται μία σφήνα που θα μπορούσε δυνητικά να τον ανατρέψει. Σημαντικό είναι επίσης ότι η επιφάνεια αυτή κινείται και κάτω από τον κρηπιδότοιχο. Ωστόσο η επιφάνεια αυτή δε ξεπερνά την εξυγιαντική στρώση του εδάφους ούτε συναντά κάποιον χαλικοπάσσαλο και είναι αρκετά ρηχή, ώστε να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.



Εικόνα 4-10. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (περίπτωση πάχους στρώματος της μαλακής αργίλου II 50% με πασσάλους)

Στο σχήμα 4-6 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας τόσο για την Α' και την Β' φάση προφόρτισης του επιχώματος όσο και για την τελική φάση του έργου, στην οποία δοκιμάζεται η ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-6, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για όλες τις φάσεις του έργου είναι παρόμοιες. Οι πάρα πολύ μικρές έως απειροελάχιστες διαφορές που παρουσιάζονται και αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο δεν έχουν πρακτική σημασία για την εξέλιξη του έργου. Οπότε η μεταβολή του πάχους της αργίλου με τη χρήση των χαλικοπασσάλων δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας σε καμιά από τις φάσεις του έργου.



Σχήμα 4-6. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου ΙΙ με χρήση πασσάλων

4.3.3 Σύγκριση 1^{ης} με 2^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων

Στο σημείο αυτό μετά την ολοκλήρωση των δύο προηγούμενων παραμετρικών αναλύσεων γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Ο λόγος είναι να φανεί καλύτερα, πως επιδρούν οι χαλικοπάσσαλοι στην μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II ως προς παραμέτρους του προσομοιώματος, όπως είναι οι καθιζήσεις, η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης και οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας στις διάφορες φάσεις του έργου.

Η σύγκριση αυτή γίνεται με τη βοήθεια σχημάτων, ενώ τα δεδομένα για τη δημιουργία τους λαμβάνονται από εικόνες και πίνακες που έχουν ήδη αναφερθεί στις δύο προηγούμενες σειρές παραμετρικών αναλύσεων. Για το λόγο αυτό γίνεται παραπομπή κάθε φορά που απαιτείται.

4.3.3.1 Καθιζήσεις

Τα σημεία που επιλέγονται για την ανάλυση των καθιζήσεων φαίνονται στις εικόνες 4-2 και 4-7. Τα σημεία αυτά είναι τα F, C και G.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν, επειδή η θέση τους αντιπροσωπεύει τη μέση του επιχώματος, όπου και αναμένονται οι μέγιστες καθιζήσεις και η διαδικασία της στερεοποίησης διαρκεί περισσότερο. Επομένως ο προσδιορισμός των παραμέτρων του προσομοιώματος στις θέσεις αυτές αντιστοιχεί στις δυσμενέστερες συνθήκες του έργου.

Λαμβάνοντας τις τιμές των καθιζήσεων για τα σημεία F και C από τους πίνακες 4-3 και 4-6 έγινε η σύνοψη τους στον πίνακα 4-9. Αναφέρεται ότι ο πίνακας 4-9 αναφέρεται στις καθιζήσεις των σημείων F και C χωρίς και με τη χρήση χαλικοπασσάλων μόνο για τις τιμές αυτών μετά το πέρας της Β' φάσης προφόρτισης σε αντίθεση με τους πίνακες 4-3 και 4-6 που γινόταν αναφορά και μετά την Α' φάση προφόρτισης. Οι τιμές των καθιζήσεων στον πίνακα 4-9 δίνονται σε μέτρα.

Πίνακας 4-9. Τιμές των καθιζήσεων των τιμών των σημείων F & G χωρίς και με τη χρήση πασσάλων

	Χρήση πασσάλων	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
		25%	50%	75%	100%
Σημείο F	Χωρίς	0,754	0,889	1,022	1,159
	Με	0,759	0,885	1,019	1,158
Σημείο C	Χωρίς	0,914	1,053	1,207	1,357
	Με	0,909	1,04	1,185	1,336

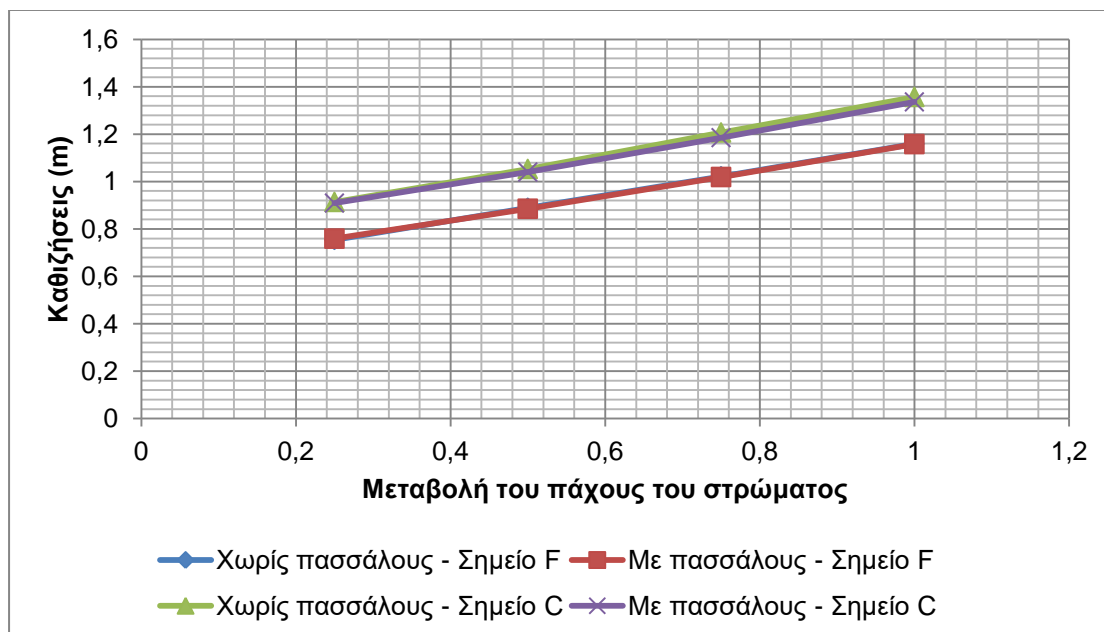
Στο σχήμα 4-7 γίνεται η σύγκριση των καθιζήσεων στα σημεία F και C του επιχώματος προφόρτισης μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ποια επίδραση έχουν οι χαλικοπάσσαλοι στη μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II.

Στο σχήμα 4-7 φαίνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η χρήση των χαλικοπασσάλων δεν επιδρά ουσιαστικά στη μείωση των καθιζήσεων.

Όσον αφορά το σημείο F που βρίσκεται στη βάση του επιχώματος (δες εικόνα 4-7), η εγκατάσταση χαλικοπασσάλων οδήγησε σε μείωση των καθιζήσεων που κυμαίνεται από 0,1 - 0,5cm. Η μείωση αυτή είναι ασήμαντη και γι' αυτό στο σχήμα 4-7 υπάρχει επικάλυψη της κόκκινης και μπλε καμπύλης.

Αντιθέτως, η χρήση χαλικοπασσάλων είχε ως αποτέλεσμα μία λίγο μεγαλύτερη μείωση των καθιζήσεων στο σημείο C, το οποίο βρίσκεται 2m πιο κάτω από τη στέψη του επιχώματος, η οποία κυμαίνεται από 0,5 - 2,2cm (πράσινη και μωβ καμπύλη). Όπως προαναφέρθηκε οι επιπλέον καθιζήσεις που παρουσιάζονται στο σημείο C οφείλονται στην καθίζηση του ίδιου του επιχώματος. Οπότε διαπιστώνεται ότι η χρήση των χαλικοπασσάλων μπορεί να εξυπηρετήσει σε μικρό βαθμό στη μείωση των καθιζήσεων του επιχώματος, ωστόσο οι τιμές αυτές είναι πολύ μικρές και δεν έχουν σημαντικό ενδιαφέρον.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι στη συγκεκριμένη επίλυση η χρήση των χαλικοπασσάλων δεν παρουσιάζει κάποια ουσιαστική μείωση των καθιζήσεων που να συμβαίνει με τη μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II.



Σχήμα 4-7. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων των σημείων F & C μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης χωρίς και με τη χρήση πασσάλων

4.3.3.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης

Στον πίνακα 4-10 παρουσιάζονται οι μέρες που απαιτούνται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων χωρίς και με τη χρήση χαλικοπασσάλων. Αναφέρεται ότι οι μέρες αυτές προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης.

Οι τιμές του πίνακα 4-10 αντιστοιχούν στην εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων του σημείου G. Το σημείο G (δες εικόνα 4-7) είναι η δυσμενέστερη περίπτωση, καθώς βρίσκεται και στο μέσο (υψομετρικά) του στρώματος της μαλακής αργίλου II, αλλά και στο μέσο του πραγματικού επιχώματος, που στο μοντέλο προσομοιώνεται με όριο συμμετρίας. Επομένως η εκτόνωση των πόρων στο σημείο G αντιστοιχεί στην ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης σε οποιοδήποτε σημείο του συμπιεστού εδάφους, που βρίσκεται κάτω από το επίχωμα προφόρτισης.

Πίνακας 4-10. Σύγκριση του χρόνου που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων χωρίς και με τη χρήση πασσάλων

Χρήση πασσάλων	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
	25%	50%	75%	100%
Χωρίς	42	136	290	530
Με	24	36	120	247

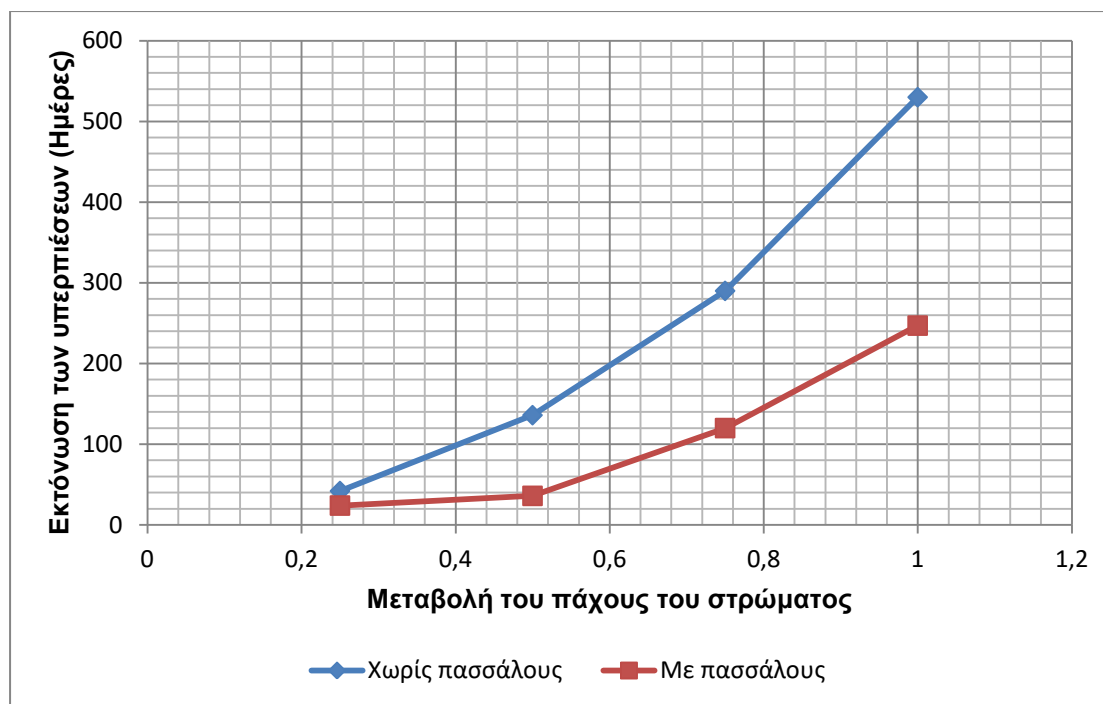
Με βάση τις τιμές του πίνακα 4-10 δημιουργήθηκε το σχήμα 4-8. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται οι μέρες που χρειάζονται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης, η οποία συμβαίνει με την πλήρη εκτόνωση των πόρων.

Στο σχήμα 4-8 φαίνεται ότι η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την διαδικασία της στερεοποίησης.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται ότι με τη χρήση των χαλικοπασσάλων υπάρχει στις περισσότερες περιπτώσεις υποδιπλασιασμός του χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας της στερεοποίησης.

Επιπλέον παρατηρείται μία έντονη διαφορά στην περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50%, όταν υπάρχουν στο προσομοίωμα χαλικοπάσσαλοι. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη θέση του σημείου G σε κάθε περίπτωση (χωρίς και με χαλικοπασσάλους), όπως αυτό φαίνεται στις εικόνες 4-2 και 4-7. Όπως φαίνεται στις εικόνες αυτές το σημείο G βρίσκεται υψομετρικά στο μέσο του στρώματος της μαλακής αργίλου II, όμως ταυτόχρονα βρίσκεται και μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Επομένως το νερό των πόρων αντί να κινηθεί κατακόρυφα για να βρει πιο περατό σχηματισμό, κινείται ακτινικά και συναντάει κάποιον από τους χαλικοπασσάλους, διανύοντας πολύ μικρότερη απόσταση. Γι' αυτόν το λόγο η κόκκινη καμπύλη (με χαλικοπασσάλους) παρουσιάζει αυτήν την ιδιομορφία σε σχέση με την μπλε καμπύλη (χωρίς χαλικοπασσάλους).

Οπότε στην περίπτωση της χρονικής εξέλιξης της διαδικασίας της στερεοποίησης η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στη μείωση της κατασκευαστικής διαδικασίας.



Σχήμα 4-8. Σύγκριση των ημερών που απαιτούνται για την εκτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων χωρίς και με τη χρήση πασσάλων

4.3.3.3 Συντελεστής ασφαλείας

Όσον αφορά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας, αυτές φαίνονται στους πίνακες 4-5 και 4-8. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας ξεπερνάει τη μονάδα και επομένως υπάρχει ευστάθεια.

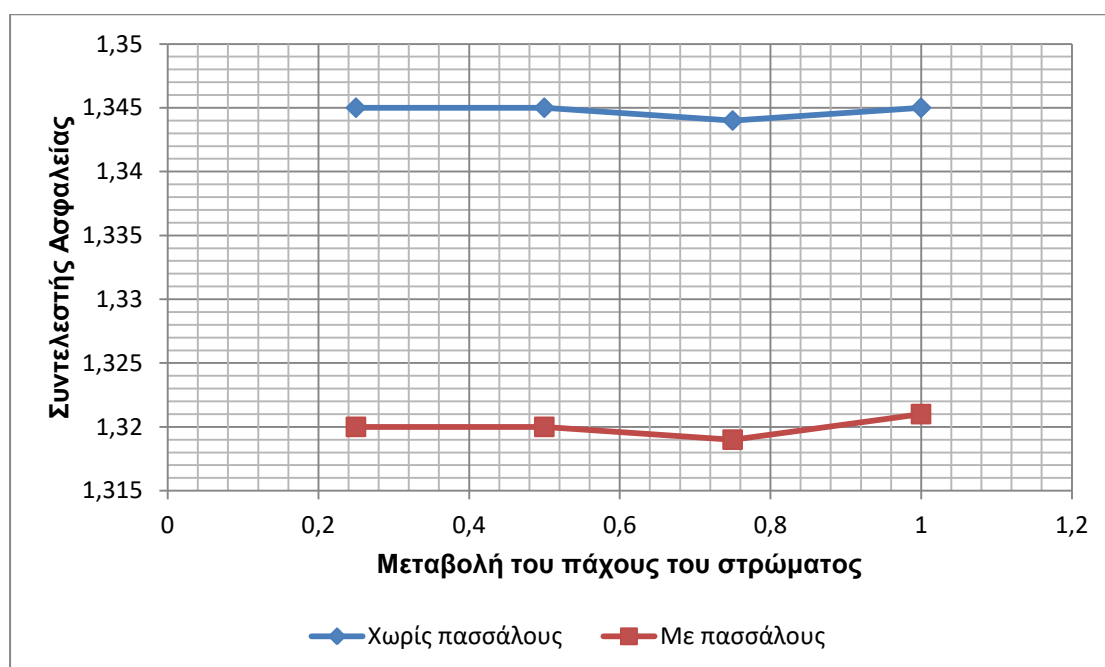
Επειδή οι δύο πρώτες φάσεις είναι προσωρινές και δεν επηρεάζουν το έργο στον ίδιο βαθμό σε σχέση με την τελική που αφορά την ευστάθεια του κρηπιδότοιχου και είναι μόνιμο έργο, παρακάτω παρουσιάζονται ο πίνακας και το σχήμα με τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας μόνο για την τελική φάση του έργου.

Πίνακας 4-11. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας που αφορούν στην τελική φάση του έργου χωρίς και με τη χρήση πασσάλων

Χρήση πασσάλων	Μεταβολή του πάχους του στρώματος της μαλακής αργίλου II			
	25%	50%	75%	100%
Χωρίς	1,345	1,345	1,344	1,345
Με	1,32	1,32	1,319	1,321

Στο σχήμα 4-9 φαίνεται ότι σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις (πάχος 25%, 50%, 75% και 100), οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας παραμένουν σταθερές. Αλλά ακόμα και με την εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων δεν παρατηρείται ουσιαστική αλλαγή του συντελεστή ασφαλείας, καθώς η τιμή του μεταβάλλεται στο δεύτερο δεκαδικό.

Οπότε η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων δεν ενεργεί στην μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας. Σημειώνεται ότι αυτό μπορεί να συμβαίνει επειδή η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων είναι 35° , τιμή που δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή.



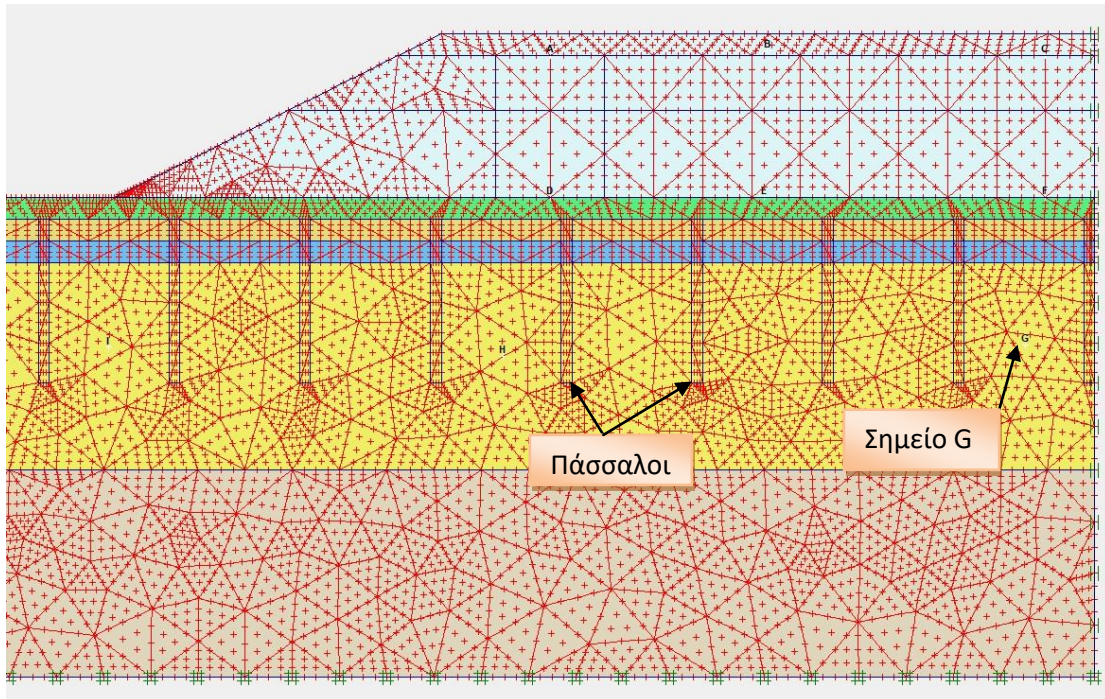
Σχήμα 4-9. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την τελική φάση του έργου χωρίς και με τη χρήση πασσάλων

4.3.4 3^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή του τετραγωνικού καννάβου των πασσάλων 2,5 , 3 & 3,5m στην περίπτωση που το πάχος της αργίλου είναι στο 50%

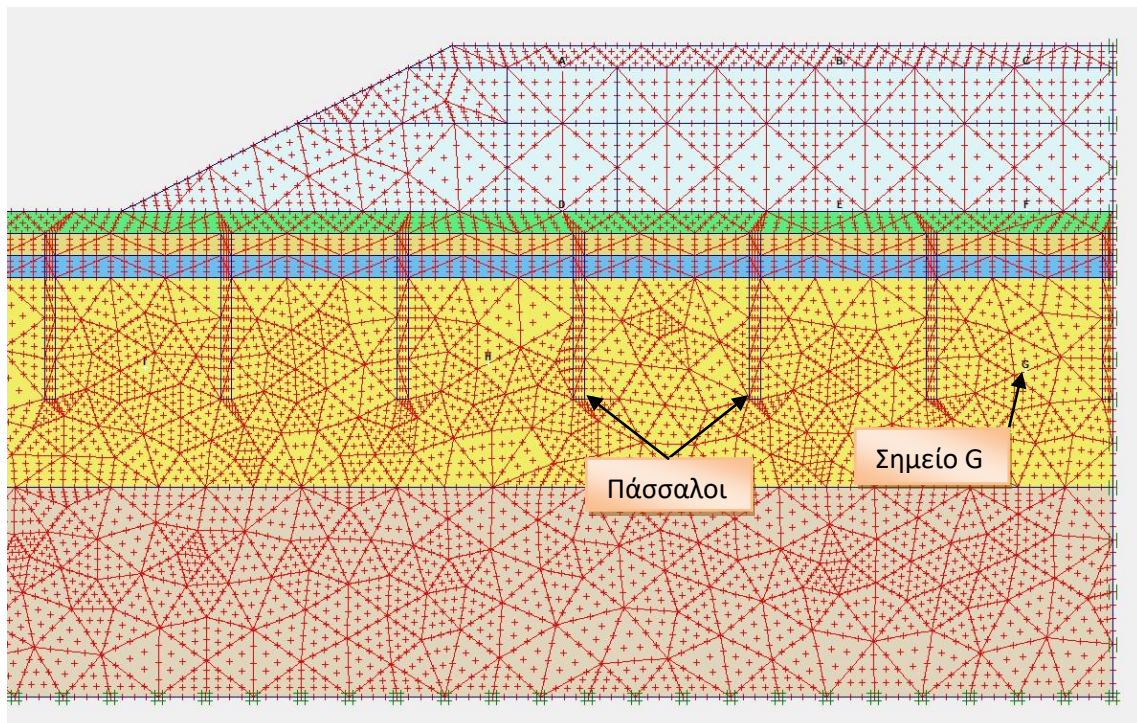
Στη σειρά αυτή των παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται, πως επηρεάζει η μεταβολή του τετραγωνικού καννάβου των πασσάλων - με στρωματογραφία την περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης είναι 50% - τις καθιζήσεις, το συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες φάσεις προφόρτισης, καθώς και τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης. Οι κάνναβοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση ήταν τετραγωνικοί των 2,5, 3 και 3,5m. Σε όλες τους τύπους των καννάβων χρησιμοποιήθηκαν χαλικοπάσσαλοι με διάμετρο 1m.

Στην εικόνα 4-7 αποτυπώνεται η στρωματογραφία της συγκεκριμένης σειράς παραμετρικών αναλύσεων με τον κάνναβο αξονικής απόστασης 2,5m.

Για την καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα συγκεκριμένα σημεία. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε το σημείο F, που βρίσκεται στη βάση του επιχώματος. Επίσης επιλέγεται το σημείο C, το οποίο βρίσκεται στην ίδια θέση με το F (συντεταγμένη χ), αλλά σε διαφορετικό ύψος και πιο συγκεκριμένα στο τελικό δάπεδο του λιμένα μετά την απομάκρυνση μέρους του επιχώματος. Ακόμα το σημείο G βρίσκεται περίπου στο μέσο του στρώματος της μαλακής αργίλου II (υψομετρικά) και στη μέση μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Η θέση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς στο σημείο αυτό αναμένονται οι μεγαλύτερες πιέσεις πόρων καθώς αυτό βρίσκεται στη μέση του πραγματικού επιχώματος, αλλά και στη μέση μεταξύ δύο στρωμάτων με μεγαλύτερη περατότητα. Τέλος βρίσκεται στη μέση μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Οι θέσεις των σημείων που αναφέρθηκαν φαίνονται καλύτερα στην εικόνα 4-7, 4-11 και 4-12. Στις εικόνες 4-11 και 4-12 επισημαίνεται ιδιαίτερα το σημείο G, αλλά και η απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Αυτό γίνεται, γιατί σε αυτήν τη σειρά παραμετρικών αναλύσεων η απόσταση αυτή επηρεάζει ιδιαίτερα τη διαδικασία της στερεοποίησης.



Εικόνα 4-11. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50% με πασσάλους των 3m)



Εικόνα 4-12. Απεικόνιση του προσομοιώματος με διάφορα σημεία (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50% με πασσάλους των 3,5m)

4.3.4.1 Καθιζήσεις

Όσον αφορά τις καθιζήσεις που προκύπτουν από την επίλυση του προγράμματος, αυτές παρουσιάζονται συνολικά στις εικόνες 4-8 και 4-9 (τετραγωνικός κάνναβος αξονικής απόστασης 2,5m). Στην εικόνα 4-6 φαίνεται με ποιον τρόπο καθιζάνει το επίχωμα και πως παραμορφώνονται οι χαλικοπάσσαλοι κάτω από αυτό, ενώ στην εικόνα 4-9 διακρίνονται χρωματικά οι ζώνες που παρουσιάζουν κοινές καθιζήσεις σε όλη την έκταση του επιχώματος μετά την ολοκλήρωση της Β' φάσης προφόρτισης.

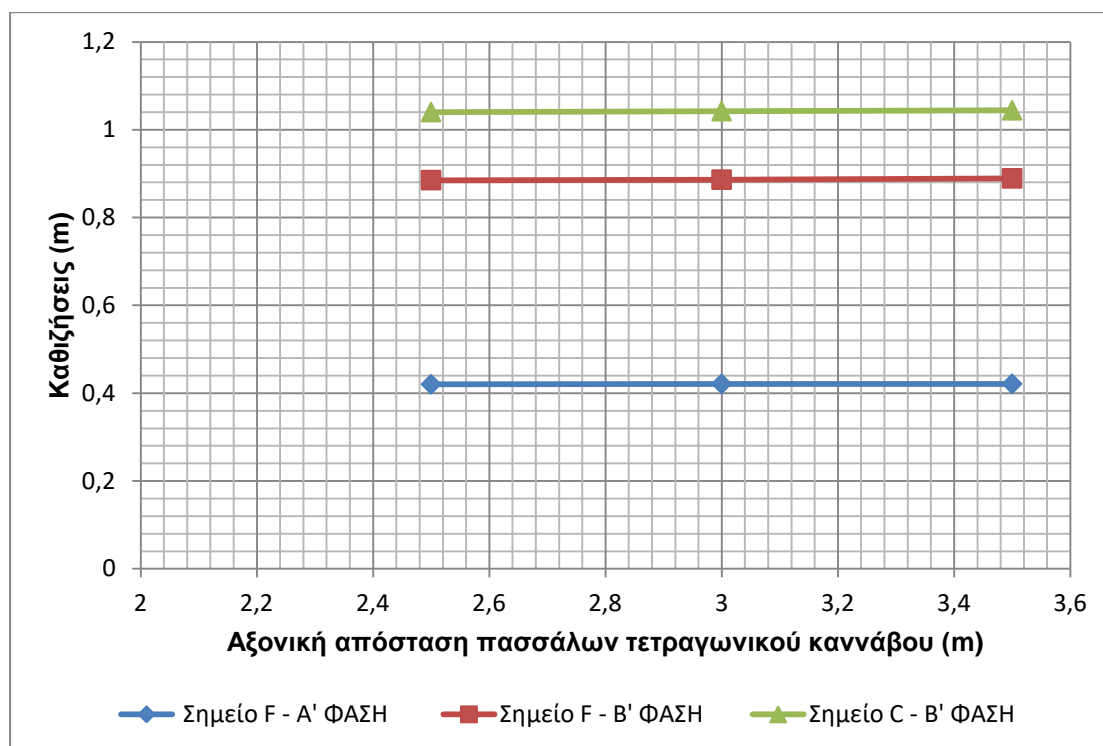
Στον πίνακα 4-12 καταγράφονται οι τιμές των καθιζήσεων σε μέτρα της Α' και Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης στα σημεία F και C. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Α' φάση του επιχώματος προφόρτισης δεν υπάρχουν καθιζήσεις για το σημείο C, καθώς αυτό λόγω της θέσης του στο επίχωμα, εμφανίζεται μετά την Α' φάση.

Πίνακας 4-12. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου

	Φάσεις έργου	Αξονική απόσταση πασσάλων τετραγωνικού καννάβου (m)		
		2,5	3	3,5
Σημείο F	Α' Φάση προφόρτισης	0,42	0,421	0,421
	Β' Φάση προφόρτισης	0,885	0,886	0,889
Σημείο C	Α' Φάση προφόρτισης	-	-	-
	Β' Φάση προφόρτισης	1,04	1,042	1,044

Στο σχήμα 4-10 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές των καθιζήσεων τόσο για την Α' φάση όσο και για την Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης για το σημείο F (μπλε και κόκκινη καμπύλη αντίστοιχα), αλλά και για την Β' φάση για το σημείο C (πράσινη καμπύλη).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-10, οι καθιζήσεις παραμένουν σταθερές ακόμα και όταν αυξάνεται η αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων. Υπάρχει βέβαια μία απειροελάχιστη διαφορά στις καθιζήσεις, η οποία δεν ξεπερνάει το 0,5cm. Η τιμή αυτή δε λαμβάνεται υπόψη λόγω του μικρού μεγέθους της και επομένως συμπεραίνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η μεταβολή της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις καθιζήσεις.



Σχήμα 4-10. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με τη μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου

4.3.4.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης

Όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων και επομένως της διαδικασίας της στερεοποίησης με την ολοκλήρωση των καθιζήσεων που προκύπτουν από την επίλυση του προγράμματος, αυτός παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 4-13. Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιείται είναι οι μέρες.

Πίνακας 4-13. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου

Φάσεις έργου	Αξονική απόσταση πασσάλων τετραγωνικού καννάβου (m)		
	2,5	3	3,5
Α' Φάση προφόρτισης	22	28	35
Β' Φάση προφόρτισης	36	48	68

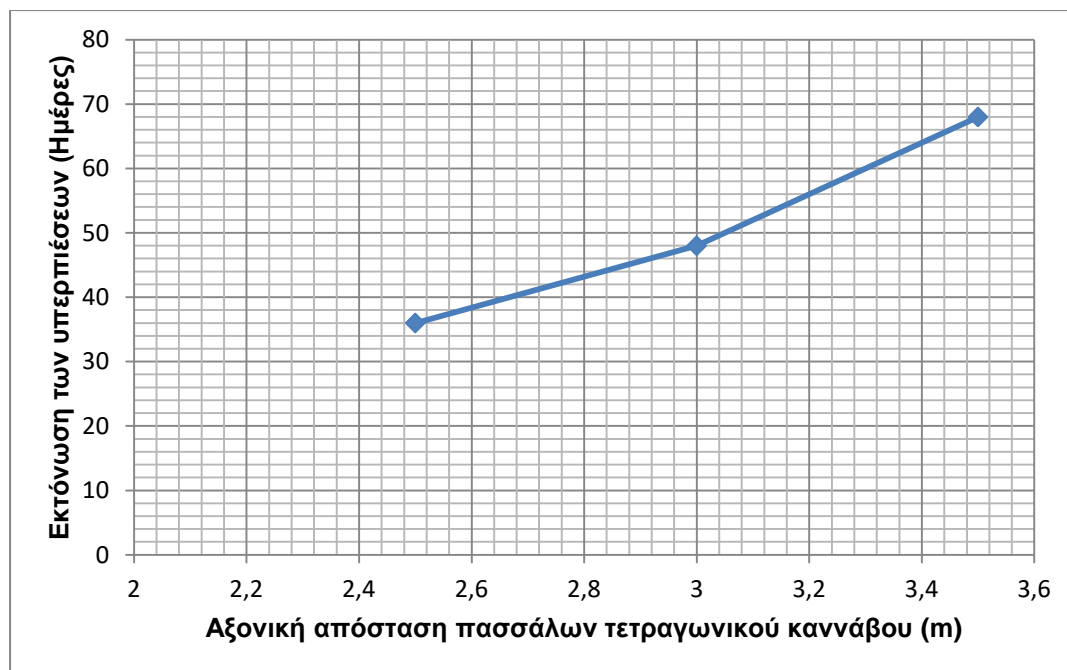
Στο σχήμα 4-11 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις ημέρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης και επομένως των καθιζήσεων με το τέλος της διαδικασίας προφόρτισης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-11, καθώς αυξάνεται η αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων, απαιτούνται περισσότερες μέρες για την πλήρη εκτόνωση των υπερπιέσεων και την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης. Πιο συγκεκριμένα από την απόσταση των 2,5 στα 3,5m απαιτούνται διπλάσιες μέρες για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης.

Σημειώνεται ότι για τον προσδιορισμό των ημερών για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης χρησιμοποιήθηκε το σημείο G (δες εικόνα 4-7). Το σημείο αυτό βρίσκεται στο μέσο υψομετρικά του στρώματος της μαλακής αργίλου II και στο μέσο μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Σε αυτήν τη σειρά των παραμετρικών αναλύσεων μεταβάλλεται η αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων. Επομένως σε κάθε περίπτωση το σημείο G βρίσκεται στο μέσο μεταξύ των χαλικοπασσάλων. Αλλά όσο αυξάνεται η αξονική τους απόσταση, τόσο μεγαλώνει και η απόσταση που πρέπει να διανύσει το νερό των πόρων.

Συμπεραίνεται ότι η αύξηση της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων επιμηκύνει τη διαδικασία της στερεοποίησης που στη συγκεκριμένη

περίπτωση φτάνει και το διπλασιασμό του χρόνου για την πλήρη εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων.



Σχήμα 4-11. Χρόνος που απαιτείται για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου

4.3.4.3 Συντελεστής ασφαλείας

Όσον αφορά το συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την επίλυση του προγράμματος, οι τιμές του παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4-14. Οι τιμές αυτές αφορούν την Α', Β' και τελική φάση του έργου. Οι τιμές της Α' και Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης αναφέρονται στην ευστάθεια που παρουσιάζει το αντίστοιχο μέρος του επιχώματος. Όπως φαίνεται από τις παρακάτω τιμές δεν προκύπτει κατάρρευση σε καμία φάση του έργου, αφού οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας ξεπερνούν την τιμή 1. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται για την Β' φάση προφόρτισης, με τιμή περίπου 1,24. Όμως η τιμή αυτή δε δημιουργεί πρόβλημα στο έργο, καθώς η φάση αυτή είναι προσωρινή και διαρκεί μέχρι την ολοκλήρωση των καθιζήσεων. Η φάση που έχει ουσιαστική σημασία είναι η τελική φάση του έργου στην οποία τοποθετείται ο κρηπιδότοιχος που είναι μόνιμη κατασκευή. Στην περίπτωση

αυτή φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας κυμαίνονται από 1,30 - 1,34.

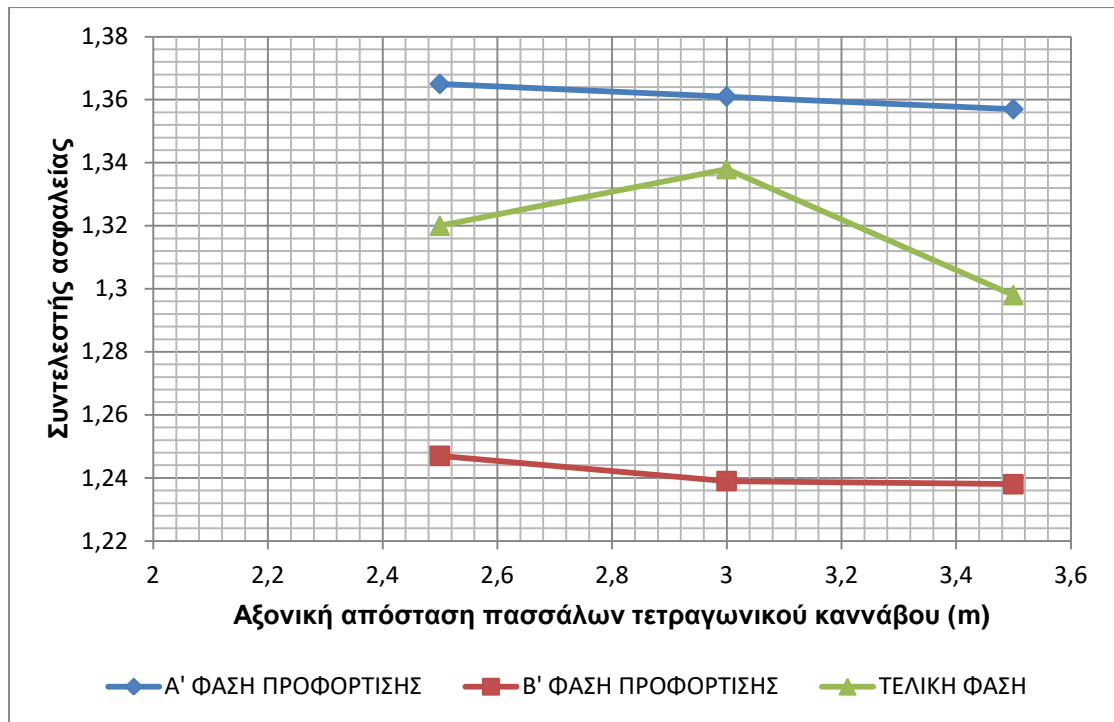
Πίνακας 4-14. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου

Φάσεις έργου	Αξονική απόσταση πασσάλων τετραγωνικού καννάβου (m)		
	2,5	3	3,5
Α' Φάση προφόρτισης	1,365	1,361	1,357
Β' Φάση προφόρτισης	1,247	1,239	1,238
Τελική Φάση	1,32	1,338	1,298

Στο σχήμα 4-12 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές του συντελεστή ασφάλειας τόσο για την Α' και την Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης όσο και για την τελική φάση, στην οποία δοκιμάζεται η ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-12, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για όλες τις φάσεις του έργου είναι παρόμοιες. Οι πάρα πολύ μικρές έως απειροελάχιστες διαφορές που παρουσιάζονται και αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο δεν έχουν πρακτική σημασία για την εξέλιξη του έργου.

Οπότε συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν επηρεάζει τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας και επομένως την ευστάθεια του έργου.



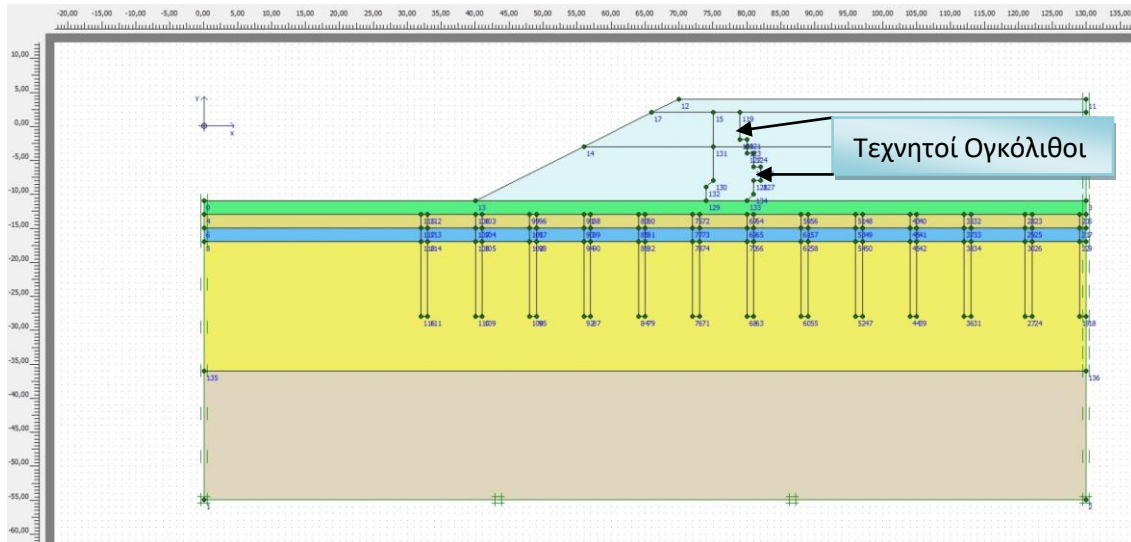
Σχήμα 4-12. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και τελική φάση του έργου σε σχέση με την μεταβολή της αξονικής απόστασης πασσάλων τετραγωνικού καννάβου

4.3.5 4^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή στο είδος του κρηπιδότοιχου με χρήση κλειστού κρηπιδότοιχου (Τεχνητοί Ογκόλιθοι) αντί caisson στην περίπτωση πάχους στρώματος μαλακής αργίλου II 50% και χρήσης χαλικοπασσάλων αξονικής απόστασης 2,5m

Στη σειρά αυτή των παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται, πως επηρεάζει η μεταβολή του είδους του κρηπιδότοιχου - με στρωματογραφία την περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης είναι 50% και τετραγωνικού καννάβου 2,5m - τις καθιζήσεις, το συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες φάσεις προφόρτισης, καθώς και τη διάρκεια της διαδικασίας της στερεοποίησης.

Στην εικόνα 4-7 αποτυπώνεται η στρωματογραφία της συγκεκριμένης σειράς παραμετρικών αναλύσεων με τον τετραγωνικό κάνναβο των 2,5m για την περίπτωση του caisson. Στην εικόνα 4-13 φαίνεται το διαφορετικό είδος κρηπιδότοιχου, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύγκριση. Στην εικόνα αυτή ο κρηπιδότοιχος φαίνεται ως ενιαίος και όχι ως μεμονωμένοι τεχνητοί ογκόλιθοι, κάτι το οποίο έγινε συνειδητά στην επίλυση του προσομοιώματος για να προσομοιωθεί με αυτόν τον τρόπο η σύνδεση των ογκολίθων μεταξύ τους.

Για την καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα συγκεκριμένα σημεία. Και στην περίπτωση του κρηπιδότοιχου με τους τεχνητούς ογκολίθους τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι ίδια και στις ίδιες θέσεις, όπως στην περίπτωση του caisson. Τα σημεία αυτά είναι τα F, C και G και η θέση τους στο προσομοίωμα φαίνεται στην εικόνα 4-7.



Εικόνα 4-13. Απεικόνιση του προσομοιώματος με τον κρηπιδότοιχο με τους τεχνητούς ογκόλιθους (περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II είναι 50%)

4.3.5.1 Καθιζήσεις

Όσον αφορά τις καθιζήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την επίλυση του προγράμματος και για τις δύο περιπτώσεις κρηπιδότοιχων, αυτές φαίνονται στον πίνακα 4-15.

Στον πίνακα 4-15 φαίνεται ότι οι καθιζήσεις στα σημεία F και C είναι ίδιες. Αυτό συμβαίνει, καθώς το διαφορετικό είδος κρηπιδότοιχου τοποθετείται στην τελική του θέση, αφού έχουν γίνει οι δύο φάσεις προφόρτισης του επίχωματος. Επομένως οι καθιζήσεις έχουν ολοκληρωθεί χρονικά νωρίτερα από την τοποθέτηση του κρηπιδότοιχου.

Πίνακας 4-15. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου

	Φάσεις έργου	Είδος κρηπιδότοιχου	
		Caisson	Τεχνητοί Ογκόλιθοι
Σημείο F	Α' Φάση	0,42 (m)	0,42 (m)
	Β' Φάση	0,885 (m)	0,885 (m)
Σημείο C	Α' Φάση	-	-
	Β' Φάση	1,04 (m)	1,039 (m)

4.3.5.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης

Η διαδικασία της στερεοποίησης δεν παρουσιάζει όπως και στην περίπτωση των καθιζήσεων καμιά μεταβολή στη διάρκειά της. Ο λόγος είναι ο ίδιος με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή το γεγονός ότι η εκτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων έχει ολοκληρωθεί ήδη από την Α' και Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης και οι τιμές τους έχουν μηδενιστεί. Επομένως η αλλαγή στο είδος του κρηπιδότοιχου δεν επηρεάζει τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης. Αυτό φαίνεται και από τον πίνακα 4-16, που γίνεται η σύγκριση της διάρκειας της διαδικασίας της στερεοποίησης στα διαφορετικά είδη κρηπιδότοιχου. Η μονάδα μέτρησης χρόνου που χρησιμοποιείται στον πίνακα 4-16 είναι ημέρες.

Πίνακας 4-16. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης του έργου σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου

Φάσεις έργου	Είδος κρηπιδότοιχου	
	Caisson	Τεχνητοί Ογκόλιθοι
Α' Φάση προφόρτισης	22	22
Β' Φάση προφόρτισης	36	36

4.3.5.3 Συντελεστής Ασφαλείας

Όσον αφορά το συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την επίλυση του προγράμματος, οι τιμές του παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4-17. Οι τιμές αυτές αφορούν την Α', Β' και τελική φάση του έργου. Οι τιμές της Α' και Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης αναφέρονται στην ευστάθεια που παρουσιάζει το αντίστοιχο μέρος του επιχώματος. Όπως φαίνεται από τις παρακάτω τιμές δεν προκύπτει κατάρρευση σε καμία φάση του έργου, αφού οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας ξεπερνούν την τιμή 1. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται για την Β' φάση προφόρτισης, με τιμή περίπου 1,25. Όμως η τιμή αυτή δε δημιουργεί πρόβλημα στο έργο, καθώς η φάση αυτή είναι προσωρινή και διαρκεί μέχρι την ολοκλήρωση των καθιζήσεων. Η φάση που έχει ουσιαστική σημασία είναι η τελική φάση του έργου στην οποία

τοποθετείται ο κρηπιδότοιχος που είναι μόνιμη κατασκευή. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι 1,165.

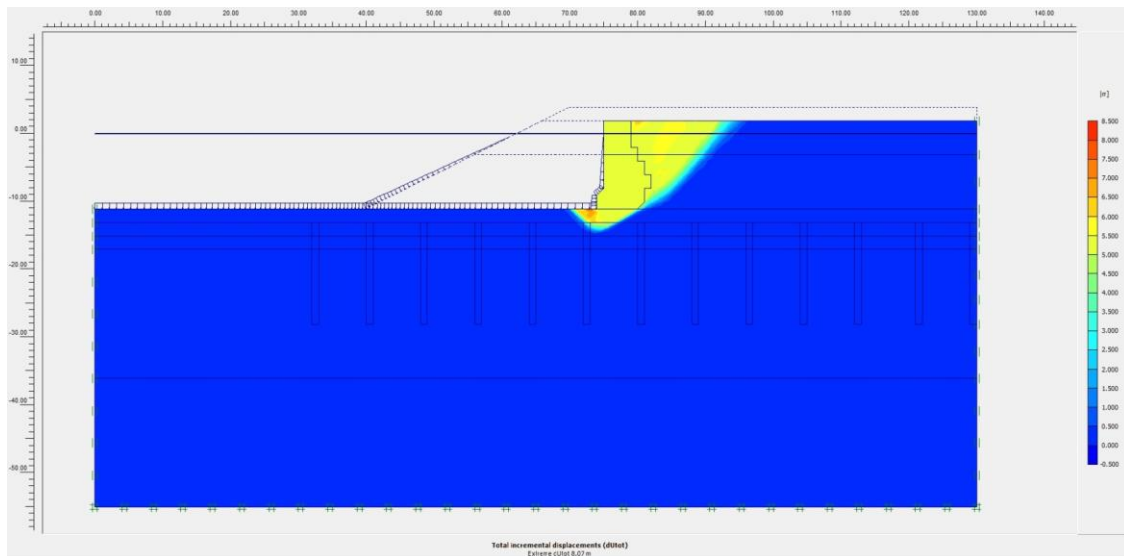
Πίνακας 4-17. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου

Φάσεις έργου	Είδος κρηπιδότοιχου	
	Caisson	Τεχνητοί Ογκόλιθοι
Α' Φάση προφόρτισης	1,365	1,368
Β' Φάση προφόρτισης	1,247	1,253
Τελική φάση	1,32	1,165

Στην εικόνα 4-10 φαίνονται ενδεικτικά οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (caisson), ενώ στην εικόνα 4-14 οι αντίστοιχες δυνητικές επιφάνειες αστοχίας στην περίπτωση των τεχνητών ογκολίθων. Παρατηρείται ότι πίσω από τον κρηπιδότοιχο δημιουργείται μία σφήνα που θα μπορούσε δυνητικά να τον ανατρέψει. Σημαντικό είναι επίσης ότι η επιφάνεια αυτή κινείται και κάτω από τον κρηπιδότοιχο.

Στην περίπτωση του caisson η επιφάνεια αυτή δε ξεπερνά την εξυγιαντική στρώση του εδάφους ούτε συναντά κάποιον χαλικοπάσσαλο και είναι αρκετά ρηχή, ώστε να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.

Αντιθέτως, στην περίπτωση των τεχνητών ογκολίθων η επιφάνεια αστοχίας φθάνει βαθύτερα, σχεδόν μέχρι και τη βάση του υποκείμενου στρώματος από αυτό της εξυγιαντικής στρώσης, δηλαδή περίπου 4m κάτω από τη βάση θεμελίωσης του κρηπιδότοιχου.



Εικόνα 4-14. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας του κρηπιδότοιχου (Με τεχνητούς ογκολίθους)

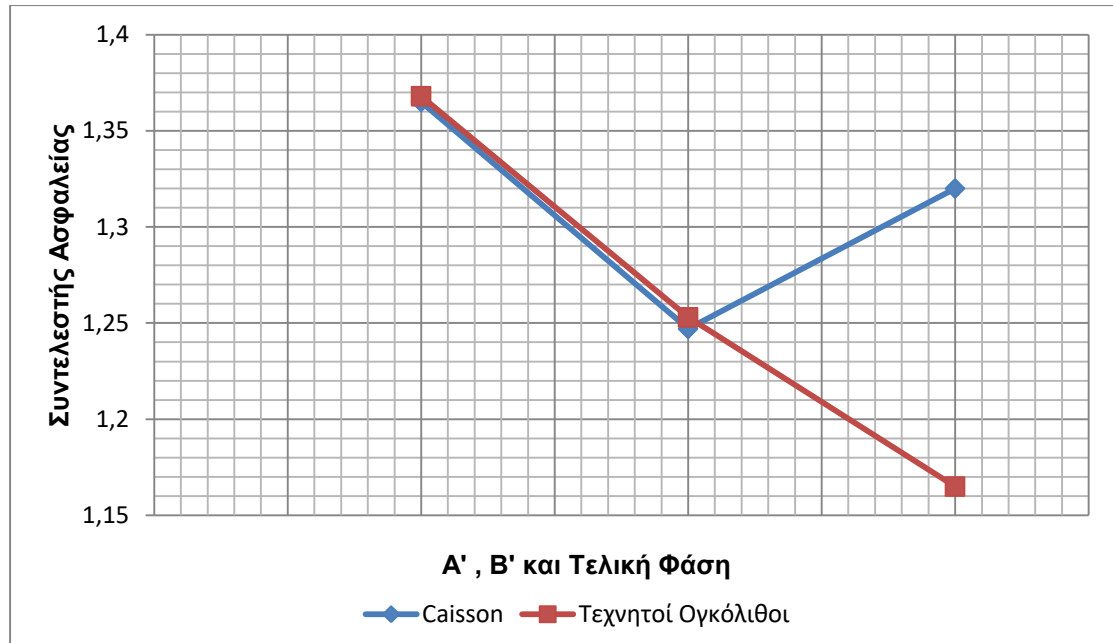
Στο σχήμα 4-13 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις τιμές του συντελεστή ασφάλειας τόσο για την Α' και την Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης όσο και για την τελική φάση του έργου, στην οποία δοκιμάζεται η ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-13, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α' και την Β' φάση προφόρτισης είναι παρόμοιες. Οι πάρα πολύ μικρές έως απειροελάχιστες διαφορές που παρουσιάζονται και αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο δεν έχουν πρακτική σημασία για την εξέλιξη του έργου.

Αντιθέτως υπάρχει μία μεγάλη διαφορά στην τελική φάση του έργου που εξετάζεται η ευστάθεια του κρηπιδότοιχου. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά δεν είναι αμελητέα και δεν αντιστοιχεί στο δεύτερο, αλλά στο πρώτο δεκαδικό ψηφίο. Επιπλέον η τιμή 1,165 δεν είναι αποδεκτή για την περίπτωση ενός μόνιμου έργου.

Οπότε συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι με τις δεδομένες συνθήκες της στρωματογραφίας και χαρακτηριστικών του εδάφους, η περίπτωση του κρηπιδότοιχου με τους τεχνητούς ογκολίθους - με τα δεδομένα μηχανικά

χαρακτηριστικά αυτού - δεν μπορεί να εφαρμοστεί λόγω της πολύ χαμηλής τιμής του συντελεστή ασφαλείας και προτείνεται η χρήση του caisson.



Σχήμα 4-13. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την A', B' και τελική φάση του έργου σε σχέση με το είδος του κρηπιδότοιχου

4.3.6 5^η Σειρά Παραμετρικών Αναλύσεων: Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων και της εξυγιαντικής στρώσης (35°, 40°, 45°)

Στη σειρά αυτή των παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται, πως επηρεάζει η μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων και της εξυγιαντικής στρώσης - με στρωματογραφία την περίπτωση που το πάχος του στρώματος της μαλακής αργίλου II της θεμελίωσης είναι 50% και τετραγωνικού καννάβου 2,5m - τις καθιζήσεις, το συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες φάσεις προφόρτισης, καθώς και τη διάρκεια της διαδικασίας της στερεοποίησης.

Στην εικόνα 4-7 αποτυπώνεται η στρωματογραφία της συγκεκριμένης σειράς παραμετρικών αναλύσεων με τον τετραγωνικό κάνναβο αξονικής απόστασης 2,5m.

Για την καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα συγκεκριμένα σημεία. Τα σημεία αυτά είναι τα F, C και G και η θέση τους στο προσομοίωμα φαίνεται στην εικόνα 4-7. Αναφέρεται ότι το σημείο F εξετάζει τις παραμέτρους του προσομοιώματος στην βάση του επιχώματος, το σημείο C στο κατάστρωμα του κρηπιδώματος και το σημείο G στη μέση υψομετρικά της απόστασης από τους πιο περατούς σχηματισμούς σε σχέση με την άργιλο. Το σημείο G χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας της στερεοποίησης, καθώς αυτό βρίσκεται στη δυσμενέστερη θέση για την εκτόνωση των υπερπλίσεων των πόρων.

4.3.6.1 Καθιζήσεις

Όσον αφορά τις τιμές των καθιζήσεων και αν αυτές επηρεάζονται από την αλλαγή στην γωνία εσωτερικής τριβής στο υλικό των χαλικοπασσάλων, αυτό φαίνεται στον πίνακα 4-18.

Στον πίνακα 4-18 καταγράφονται οι τιμές των καθιζήσεων για δύο συγκεκριμένα σημεία στο επίχωμα. Οι τιμές αυτές αφορούν για την Α' και την Β' φάση του επιχώματος προφόρτισης. Όπως φαίνεται στον πίνακα 4-18 δεν

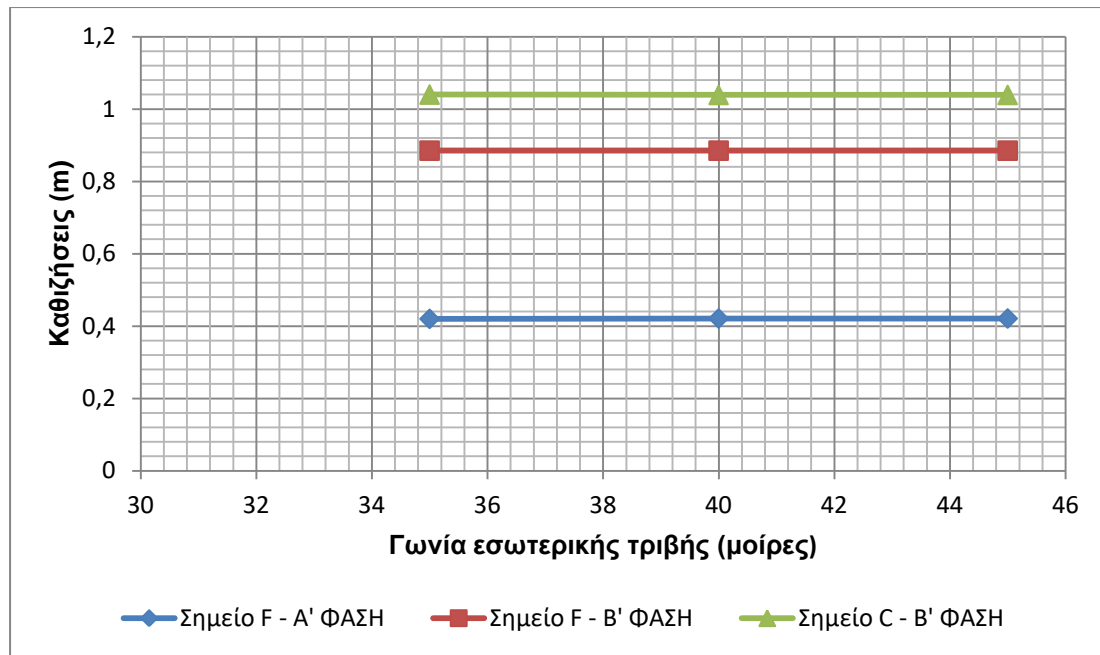
έχουν καταγραφεί καθιζήσεις για την Α' φάση προφόρτισης στο σημείο C, καθώς εκείνη τη χρονική στιγμή το σημείο αυτό του επιχώματος δεν υπήρχε, αλλά σχηματίστηκε όταν τοποθετήθηκε η Β' φάση του επιχώματος. Οι τιμές των καθιζήσεων στον πίνακα 4-18 δίνονται σε μέτρα.

Πίνακας 4-18. Τιμές των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων

	Φάσεις έργου	Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής		
		35°	40°	45°
Σημείο F	Α' Φάση προφόρτισης	0,42	0,421	0,421
	Β' Φάση προφόρτισης	0,885	0,885	0,885
Σημείο C	Α' Φάση προφόρτισης	-	-	-
	Β' Φάση προφόρτισης	1,04	1,039	1,039

Στο σχήμα 4-14 γίνεται σύγκριση των καθιζήσεων μεταβάλλοντας τη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του προγράμματος, η αλλαγή στην γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων δεν επηρεάζει τις τιμές καθιζήσεων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4-14 δεν παρατηρείται αλλαγή για κανένα από τα δύο σημεία, δηλαδή ούτε στη βάση ούτε στη στέψη σχεδόν του επιχώματος, αλλά ούτε και στην διαδοχή των δύο φάσεων.

Συμπεραίνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής δε συνεισφέρει στη μείωση των καθιζήσεων.



Σχήμα 4-14. Σύγκριση των τιμών των καθιζήσεων για την Α' και Β' Φάση προφόρτισης των σημείων F και C σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων

4.3.6.2 Χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης

Η διαδικασία της στερεοποίησης δεν παρουσιάζει όπως και στην περίπτωση των καθιζήσεων καμιά μεταβολή στη διάρκειά της. Ο λόγος για το γεγονός αυτό είναι ότι η αλλαγή στη γωνία εσωτερικής τριβής μπορεί να βελτιώσει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Επομένως η διαδικασία της στερεοποίησης που δεν επηρεάζεται από το γεγονός αυτό δεν μπορεί να αλλάξει. Αυτό φαίνεται και από τον πίνακα 4-19, που γίνεται η σύγκριση της διάρκειας της διαδικασίας της στερεοποίησης στις διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής. Οι μέρες που απαιτούνται για την εκτόνωση των υπερπίεσεων των πόρων είναι οι ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 4-19. Τιμές του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της στερεοποίησης για την Α' και Β' φάση προφόρτισης του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων

Φάσεις έργου	Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής		
	35°	40°	45°
Α' Φάση προφόρτισης	22	22	22
Β' Φάση προφόρτισης	36	36	36

4.3.6.3 Συντελεστής Ασφαλείας

Όσον αφορά το συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την επίλυση του προγράμματος, οι τιμές του παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4-19. Οι τιμές αυτές αφορούν την Α', Β' και τελική φάση του έργου. Οι τιμές της Α' και Β' φάσης του επιχώματος προφόρτισης αναφέρονται στην ευστάθεια που παρουσιάζει το αντίστοιχο μέρος του επιχώματος. Όπως φαίνεται από τις παρακάτω τιμές δεν προκύπτει κατάρρευση σε καμία φάση του έργου, αφού οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας ξεπερνούν την τιμή 1. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται για την Β' φάση προφόρτισης, με τιμή περίπου 1,25. Όμως η τιμή αυτή δε δημιουργεί πρόβλημα στο έργο, καθώς η φάση αυτή είναι προσωρινή και διαρκεί μέχρι την ολοκλήρωση των καθιζήσεων. Η φάση που έχει ουσιαστική σημασία είναι η τελική φάση του έργου στην οποία τοποθετείται ο κρηπιδότοιχος που είναι μόνιμη κατασκευή.

Στον πίνακα 4-19 καταγράφονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για όλες τις φάσεις του έργου. Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α' και την Β' φάση προφόρτισης είναι παρόμοιες. Οι πάρα πολύ μικρές έως απειροελάχιστες διαφορές που παρουσιάζονται και αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο δεν έχουν πρακτική σημασία για την εξέλιξη του έργου.

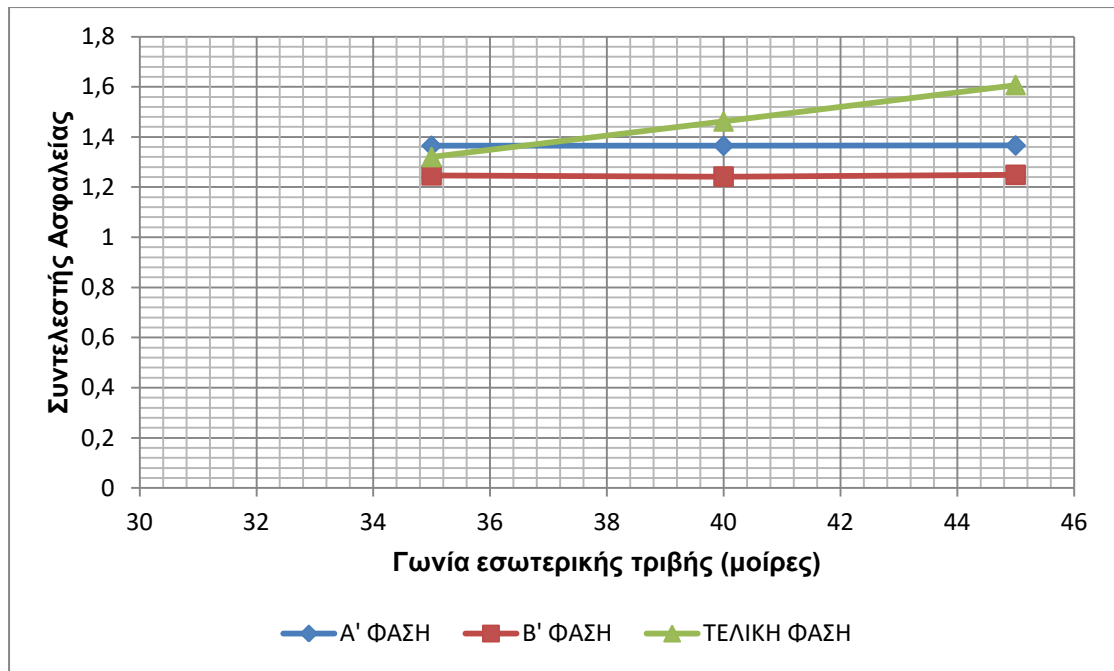
Πίνακας 4-20. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων

Φάσεις έργου	Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής		
	35°	40°	45°
Α' Φάση προφόρτισης	1,365	1,365	1,366
Β' Φάση προφόρτισης	1,247	1,242	1,249
Τελική Φάση	1,32	1,462	1,607

Στο σχήμα 4-15 γίνεται η σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για όλες τις φάσεις του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων. Από τις καμπύλες του σχήματος φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική μεταβολή στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας παρά μόνο στην τελική φάση του έργου που είναι και η πιο σημαντική, καθώς αυτή αφορά στην ευστάθεια του κρηπιδότοιχου που είναι μόνιμη κατασκευή.

Στην τελική φάση (πράσινη καμπύλη) παρατηρείται ότι η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων αυξάνει με τη σειρά της το συντελεστή ασφαλείας από 1,32 σε 1,607, μια αλλαγή που είναι ουσιαστική.

Συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων λειτουργεί θετικά στην ευστάθεια του κρηπιδότοιχου.



Σχήμα 4-15. Σύγκριση των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για την Α', Β' και Τελική Φάση του έργου σε σχέση με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο 4 καταγράφηκαν τα αποτελέσματα 5 σειρών παραμετρικών αναλύσεων. Εξετάστηκε πως επηρεάζονται οι καθιζήσεις, η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης και ο συντελεστής ασφαλείας σε κάθε σειρά παραμετρικών αναλύσεων. Η ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση πινάκων και εικόνων. Από τις παραπάνω παραμετρικές αναλύσεις συμπεραίνεται ότι:

- Η μεταβολή του πάχους της αργίλου αυξάνει ανάλογα και τις καθιζήσεις, καθώς θεωρώντας το στρώμα της αργίλου ως ένα ομοιογενές υλικό, με σταθερή μεταβολή του πάχους υπάρχει γραμμική αύξηση των καθιζήσεων.
- Η σταθερή μεταβολή του πάχους της αργίλου δεν επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης, δηλαδή αυξάνοντας σταθερά το πάχος της αργίλου δεν αυξάνεται γραμμικά ο χρόνος για την εκτόνωση των υπερπιέσεων των πόρων. Μάλιστα παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση μεταβολής του πάχους της αργίλου από 50 σε 100%, δηλαδή σε διπλασιασμό του πάχους της, υπήρξε σχεδόν τετραπλασιασμός του χρόνου ολοκλήρωσης των καθιζήσεων.
- Η χρήση των χαλικοπασσάλων δεν επηρέασε σε σημαντικό βαθμό τις καθιζήσεις, αλλά έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επιτάχυνση της διαδικασίας της στερεοποίησης, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις οδήγησε σε υποδιπλασιασμό του χρόνου ολοκλήρωσης της, καθώς μειώθηκε σημαντικά η διαδρομή που ακολούθησε το νερό των πόρων.
- Η μεταβολή στην πυκνότητα του τετραγωνικού καννάβου επηρέασε ελάχιστα έως καθόλου τις καθιζήσεις. Ωστόσο σημαντική ήταν η επίδραση της στο χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας της στερεοποίησης. Η αύξηση της αξονικής απόστασης μεταξύ των χαλικοπασσάλων, αύξησε το χρόνο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, γεγονός αναμενόμενο, αφού αυξήθηκε η ακτινική απόσταση που έπρεπε να διανύσει το νερό των πόρων.
- Η αλλαγή στο είδος του κρηπιδότοιχου (Caisson ή Τεχνητοί ογκόλιθοι) δεν επηρέασε τις καθιζήσεις ή το χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας

της στερεοποίησης, αφού η τοποθέτηση του πραγματοποιείται μετά το πέρας της διαδικασίας της στερεοποίησης. Όμως σημαντική ήταν η επίδραση στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας στην τελική φάση του έργου, που στην περίπτωση των τεχνητών ογκολίθων η τιμή αυτή ήταν τόσο χαμηλή, που για ένα μόνιμο έργο δεν είναι αποδεκτή και επομένως η χρήση του κρηπιδότοιχου με συμπαγείς τεχνητούς ογκολίθους απορρίφθηκε.

- Η μεταβολή στη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων και της εξυγιαντικής στρώσης επηρέασε καθοριστικά την τιμή του συντελεστή ασφαλείας για την τελική φάση του έργου. Συγκεκριμένα η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας σε μεγάλο βαθμό από 1,3 σε 1,6.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δασκαλάκης Μ., 2009, *ΛΙΜΑΝΙΑ, ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ, ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ*, Εκδόσεις: Τεκδοτική

Μέμος Κ., 2008, *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ*, Εκδόσεις: ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ

Tsinker G., 2004, *Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security*, Εκδόσεις: WILEY

Κωστόπουλος Σ., 2008, *ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ II - Ανάλυση των Αρχών Σχεδιασμού & Κατασκευής*, Εκδόσεις: ΙΩΝ

Xanthakos P., Abramson L., Bruce D., 1994, *GROUND CONTROL AND IMPROVEMENT*, Εκδόσεις: WILEY

Πλατής Α., 2007, *Κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια*, στην Ημερίδα Γεωτεχνικές εφαρμογές γεωσυνθετικών υλικών, Αθήνα, 11-1-2007

Πλατής Γ., 2016, *Γεωτεχνική έρευνα και βελτίωση εδαφών αποθεσιοθαλάμων. Η περίπτωση του Ολοκληρωμένου Συστήματος Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΟΣΔΑ) Δυτικής Μακεδονίας*, ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, ΠΑΤΡΑ

Κούλου Μ. & Δάμου Ε, 2009, *ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ*, ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Μπαρουλάκη Μ., 2011, *ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ*, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΑΘΗΝΑ

Λουπασάκης Κ., 2015, *ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ*, Σημειώσεις Διαλέξεων, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΑΘΗΝΑ

Richwien W, 2008, *DESIGN CONCEPTS FOR QUAY WALLS FOR LARGE VESSELS*, Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Darmstadt, 24-30/8/2008

Brinkgreve R.B.J., 2002, *Plaxis Reference Manual Version 8*, Εκδόσεις: A.A. Balkema Publishers

ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ, << Υποθαλάσσια κατασκευή χαλικοπασσάλων>>, Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ)

(<http://sate.gr/html/pdfDocuments/09-03-05-00.pdf>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ, << Δονητική αντικατάσταση εδαφών>>, Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ)

(<http://sate.gr/html/pdfDocuments/11-03-03-00.pdf>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ, << Δονητική συμπίκνωση εδαφών>>, Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ)

(<http://sate.gr/html/pdfDocuments/11-03-02-00.pdf>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ, << Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος λιμενικών έργων>>, Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ)

(<http://sate.gr/html/pdfDocuments/09-05-03-00.pdf>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

ArcelorMittal: Foundation solutions for projects, Harbour construction (http://sheetpiling.arcelormittal.com/uploads/files/AMCRPS_Harbour_Construction_2009_HQ.pdf, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(http://www.geodomisi.com/files/Publications/Lectures/Sachpazis_7%20Consolidation%20Greek%20powerpoint%20presentation.pdf, τελευταία πρόσβαση: 7/2017)

(<https://zabezpieczeniahydrotechniczne.wordpress.com/2015/05/25/description-of-block-and-l-walls-lukas-kukla/>, τελευταία πρόσβαση: 6/2017)

(<https://www.slideshare.net/Tarique048/caisson-foundationppt>, τελευταία πρόσβαση : 6/2017)

(<http://kellerholding.com/download-keller-publications.html>, τελευταία πρόσβαση : 6/2017)

(<http://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/select-topics-in-ground-improvement/vibroflotation?start=4>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<http://www.earthtech.com/commercial/services/vibro-replacement-stone-columns/>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<https://nscme.com/solutions/ground-improvement/>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(https://www.researchgate.net/figure/237529862_fig2_Figure-2-Bottom-Feed-method-of-stone-column-construction, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<http://slideplayer.com/slide/10655921/>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<http://www.zetas.com.tr/index.php?id=222000&dil=EN>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<http://www.degenengineering.com/DegenEngineering/Marine%20Stone%20Columns.html>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<http://www.degenengineering.com/DegenEngineering/Patras.html>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<https://www.jfbrennan.com/marine-construction/deep-foundations>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

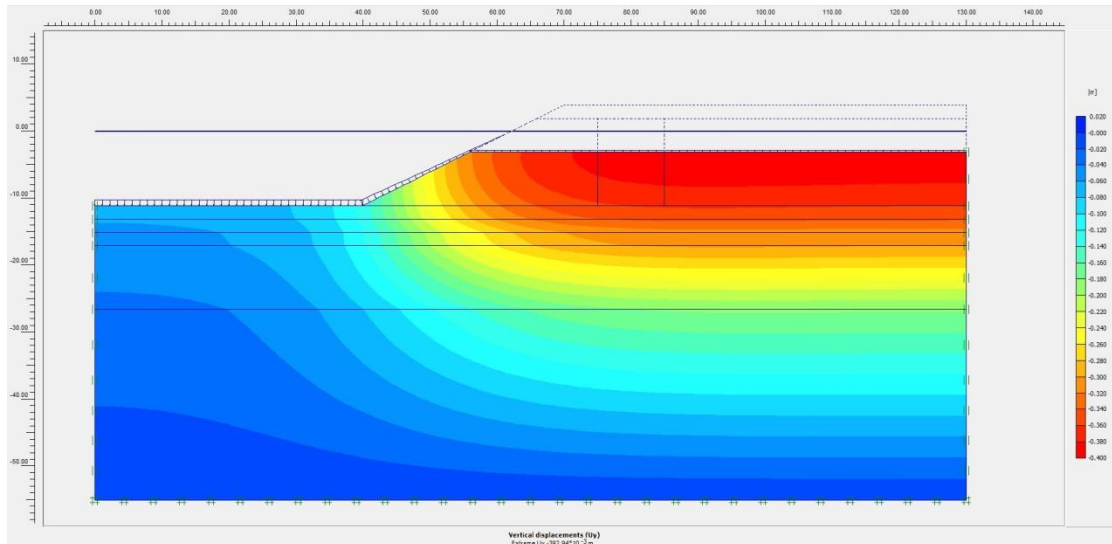
(<https://www.escpile.com/sheet-piles>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

(<http://www.amoives.gr/%CE%BA%CE%B5%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF-%CE%B4-%CE%BC%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CF%84%CE%B5%CF%82-%CE%BB%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CE%AD%CF%81%CE%B3%CF%89%CE%BD-%CE%BD-3316-05-dt16.html>, τελευταία πρόσβαση : 7/2017)

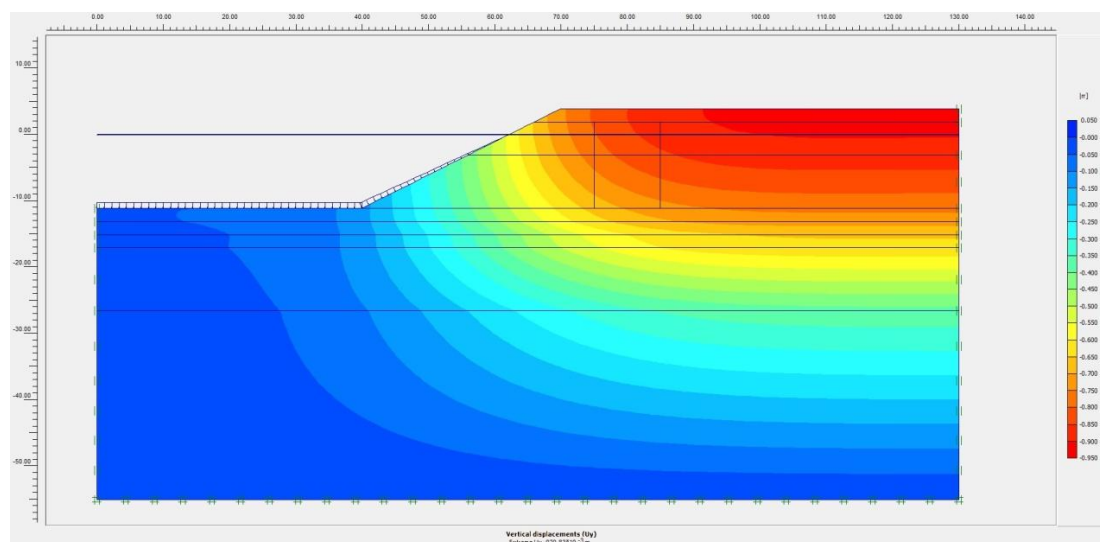
(<http://www.antzoulis.gr/index.php/el-gr/blog-news-dw/664-autopsia-kripidomatwn>, τελευταία πρόσβαση 7/2017)

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

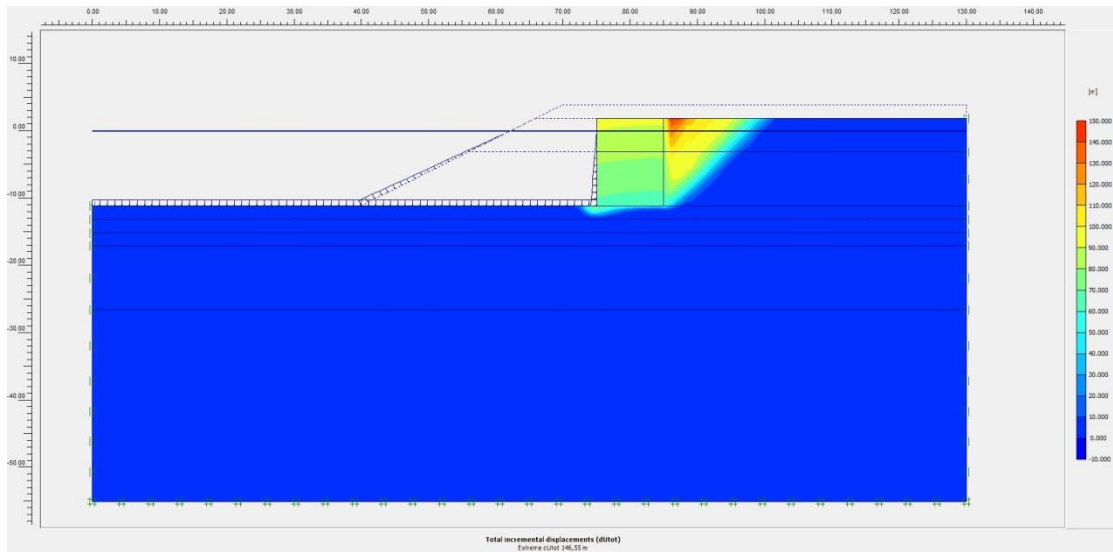
1^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων



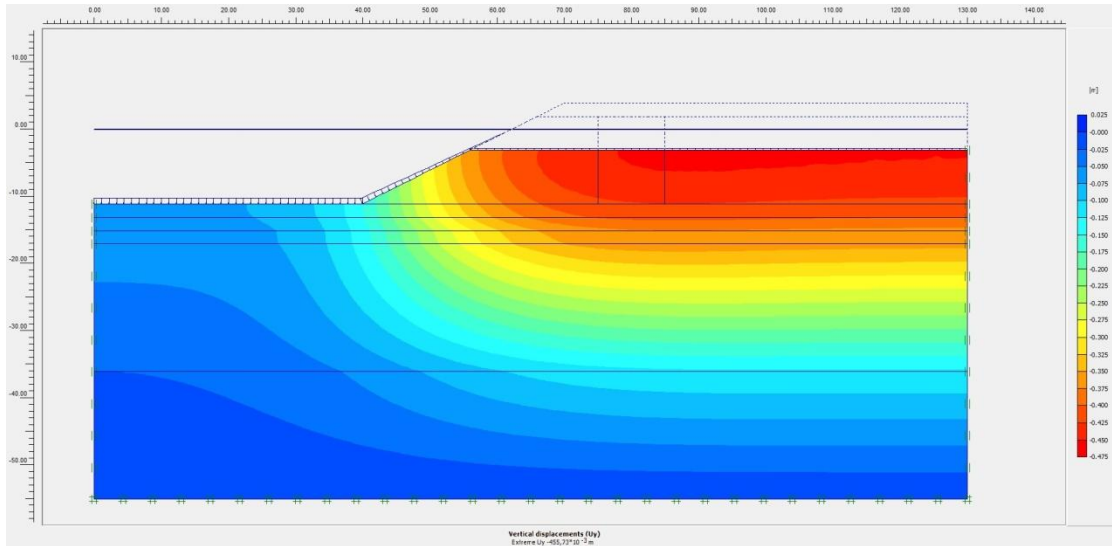
Εικόνα 7-1. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - χωρίς πασσάλους)



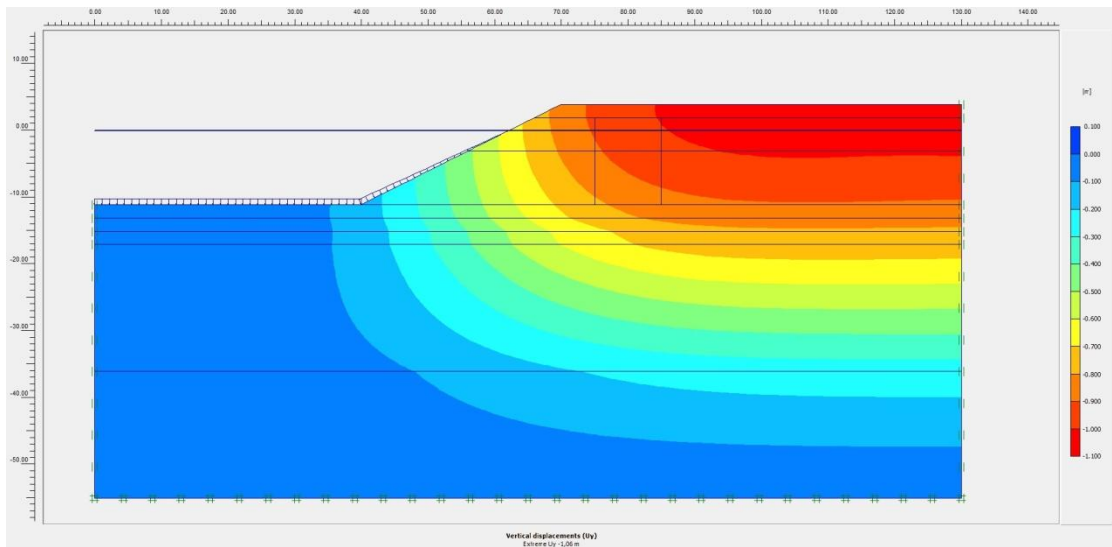
Εικόνα 7-2. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - χωρίς πασσάλους)



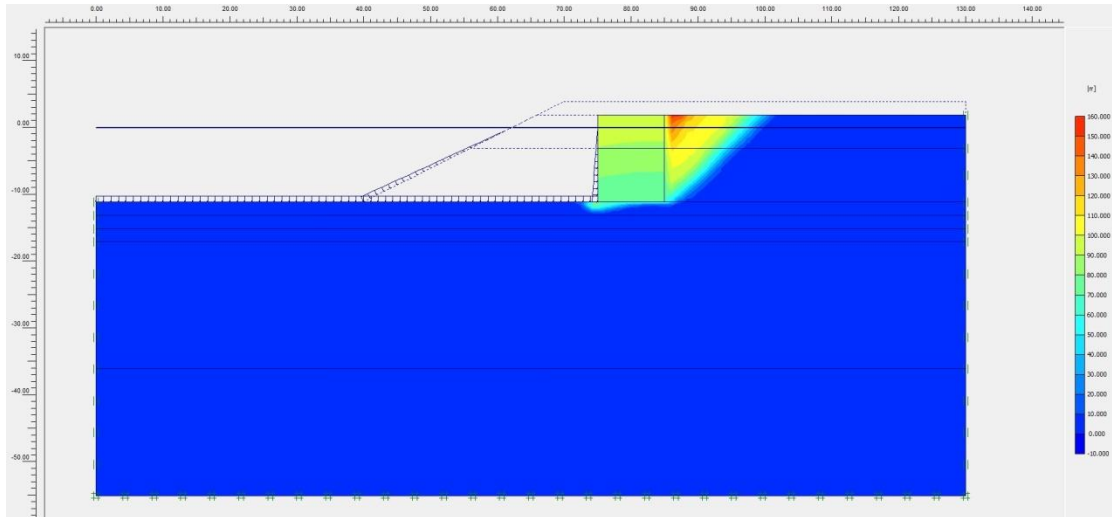
Εικόνα 7-3. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 25% - χωρίς πασσάλους)



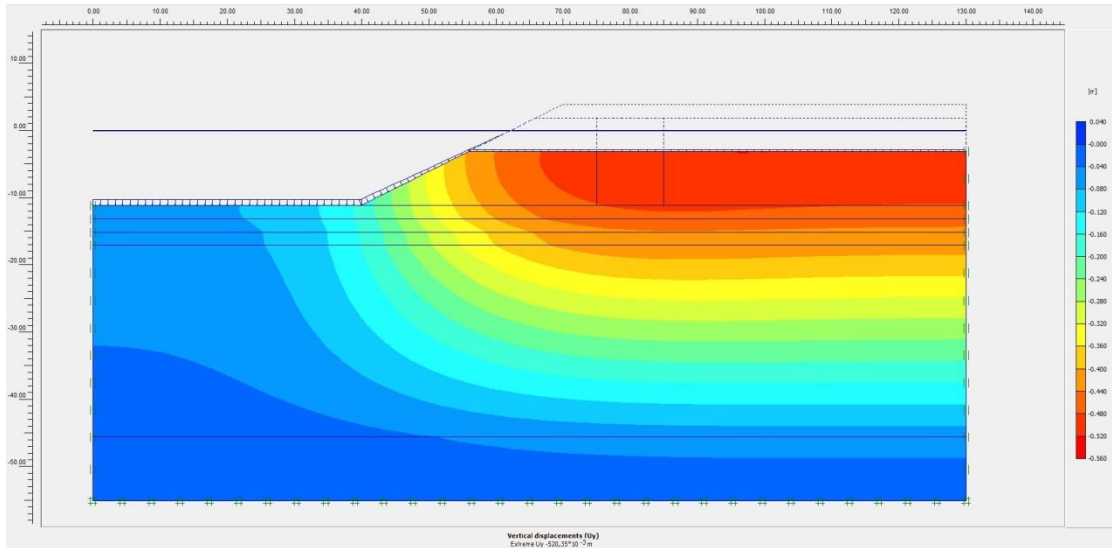
Εικόνα 7-4. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - χωρίς πασσάλους)



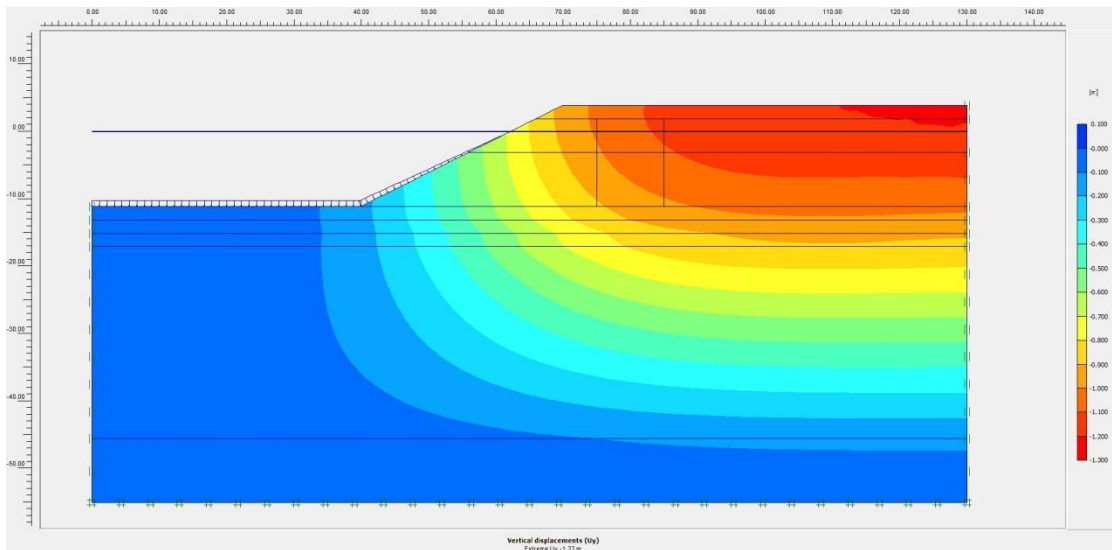
Εικόνα 7-5. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - χωρίς πασσάλους)



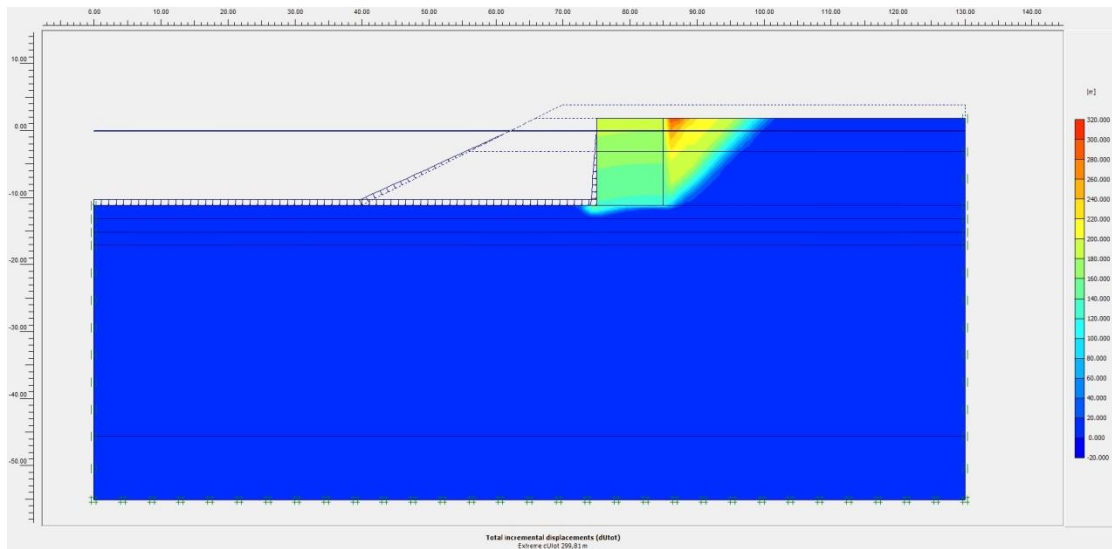
Εικόνα 7-6. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - χωρίς πασσάλους)



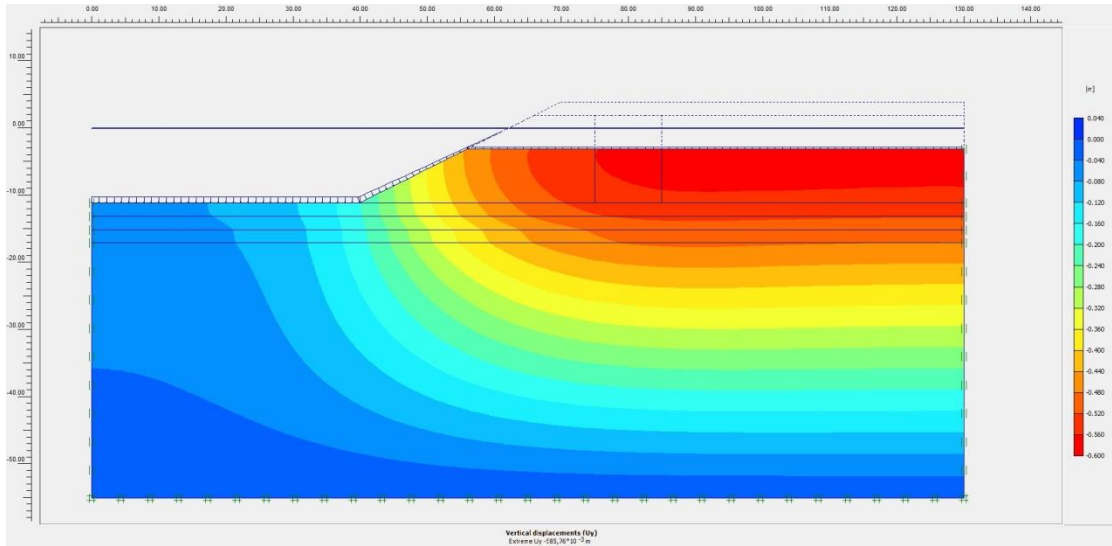
Εικόνα 7-7. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - χωρίς πασσάλους)



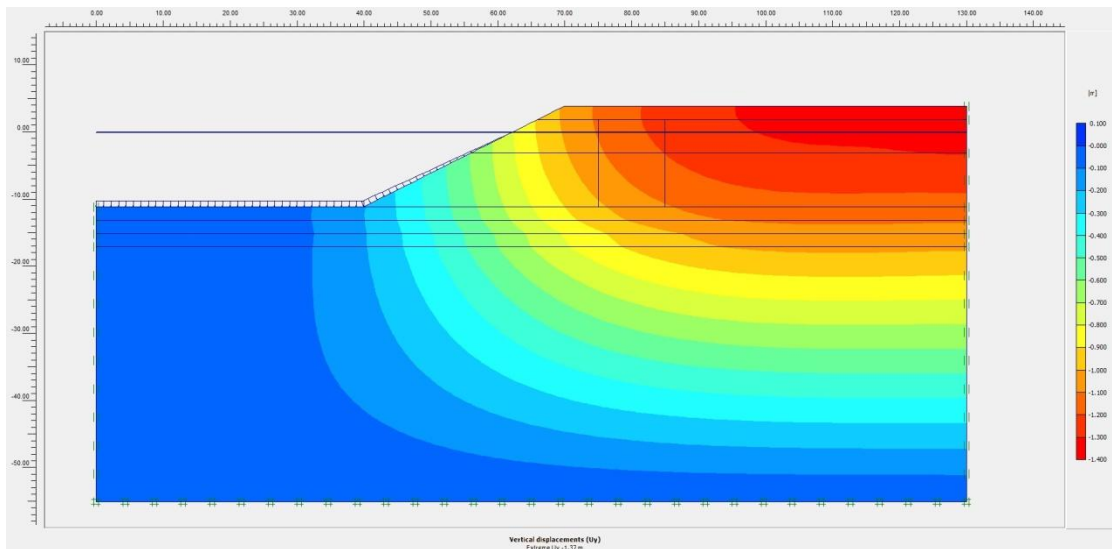
Εικόνα 7-8. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - χωρίς πασσάλους)



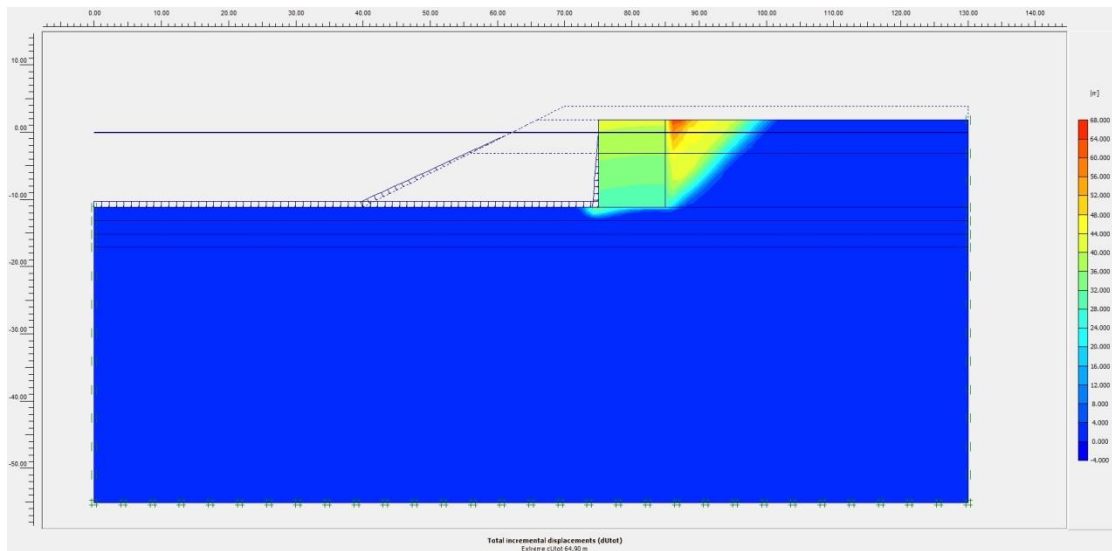
Εικόνα 7-9. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 75% - χωρίς πασσάλους)



Εικόνα 7-10. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - χωρίς πασσάλους)

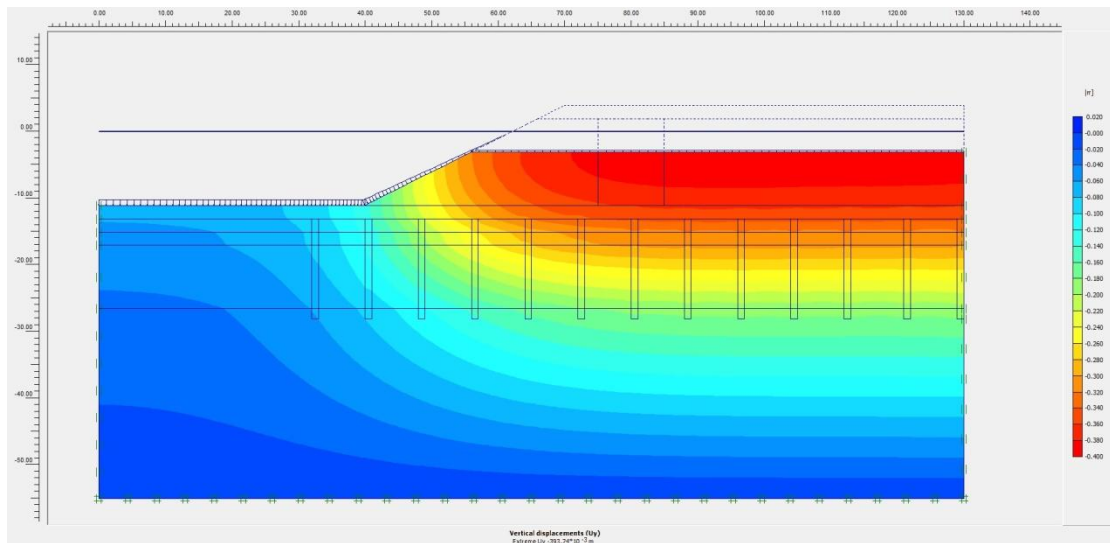


Εικόνα 7-11. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - χωρίς πασσάλους)

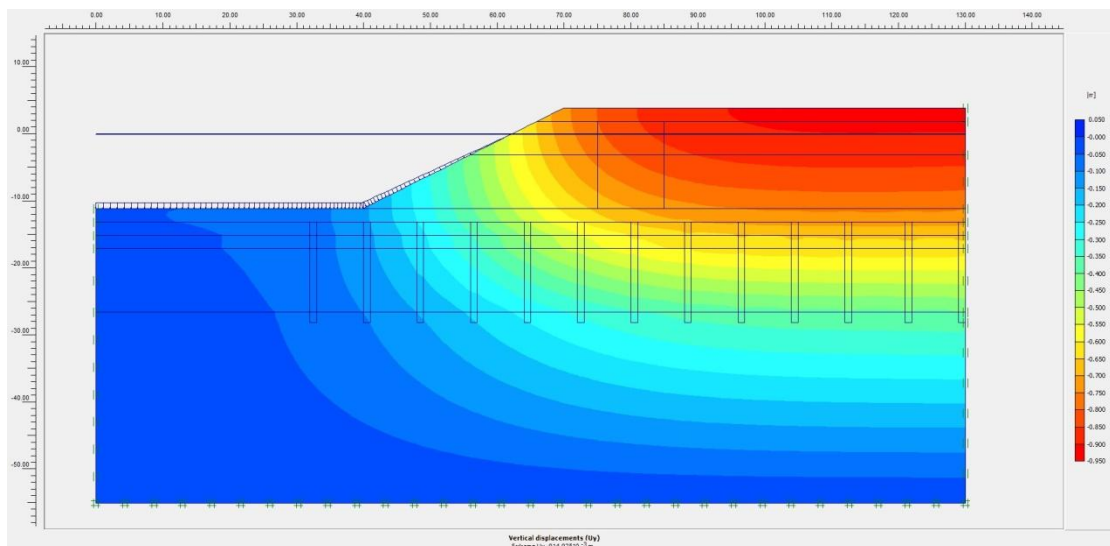


Εικόνα 7-12. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 100% - χωρίς πασσάλους)

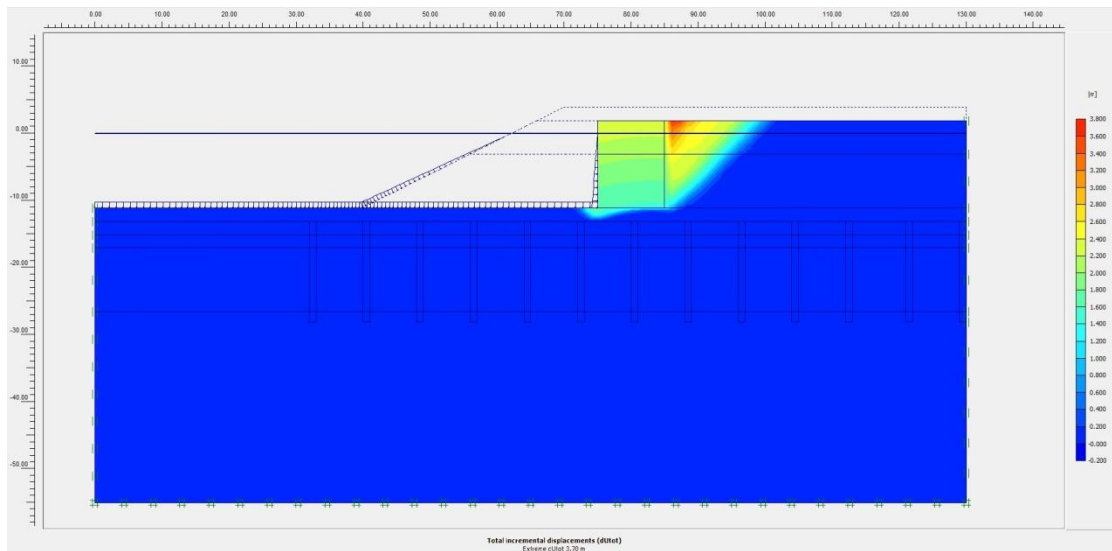
2^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων



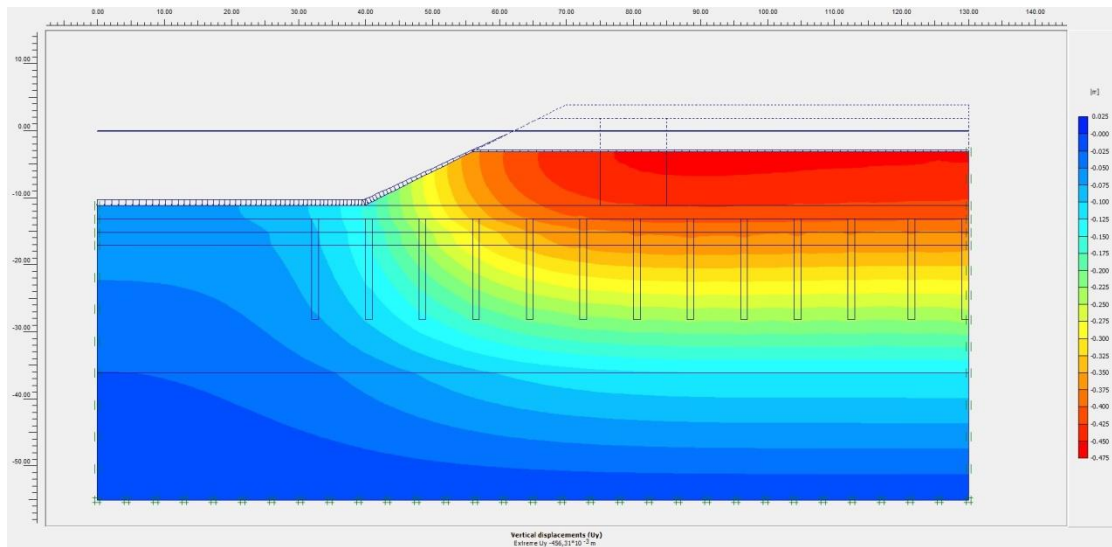
Εικόνα 7-13. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)



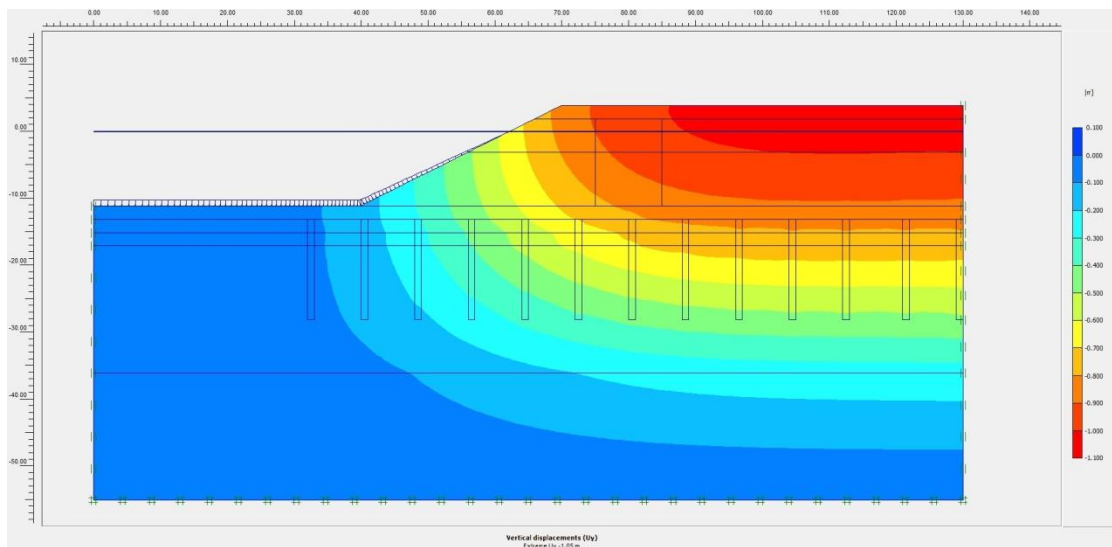
Εικόνα 7-14. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 25% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m)



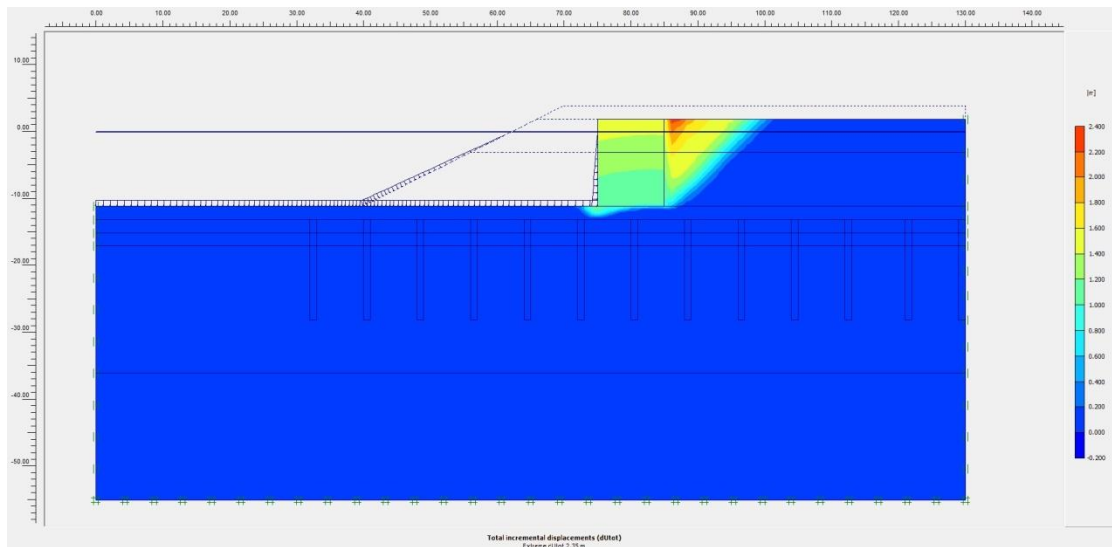
Εικόνα 7-15. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 25% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)



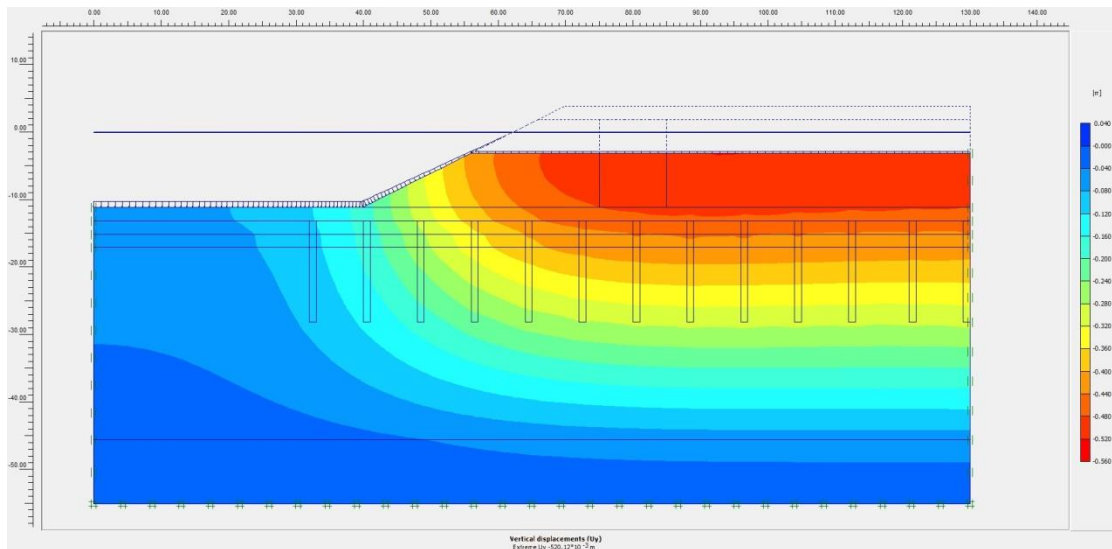
Εικόνα 7-16. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m)



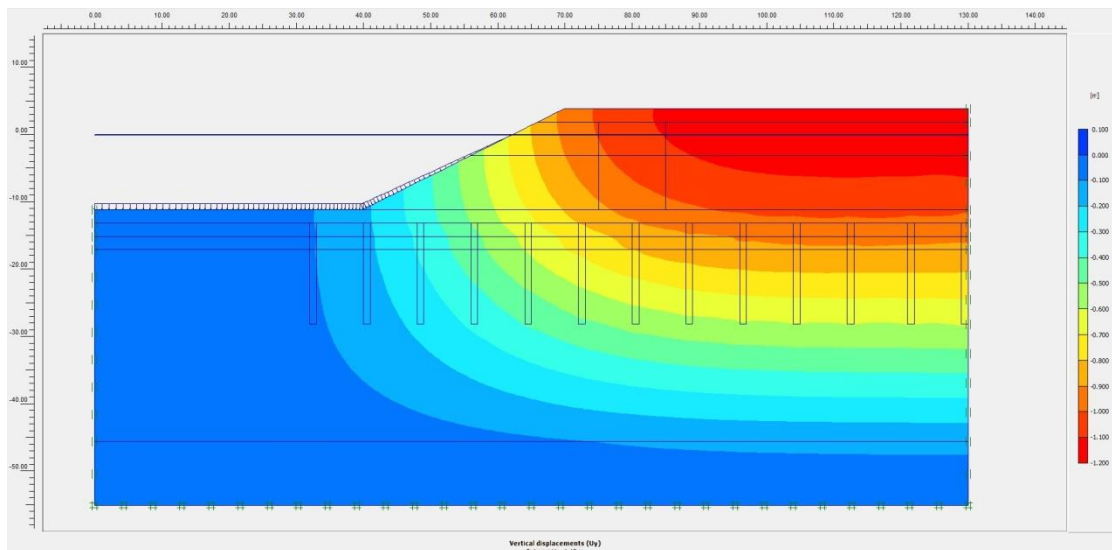
Εικόνα 7-17. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m)



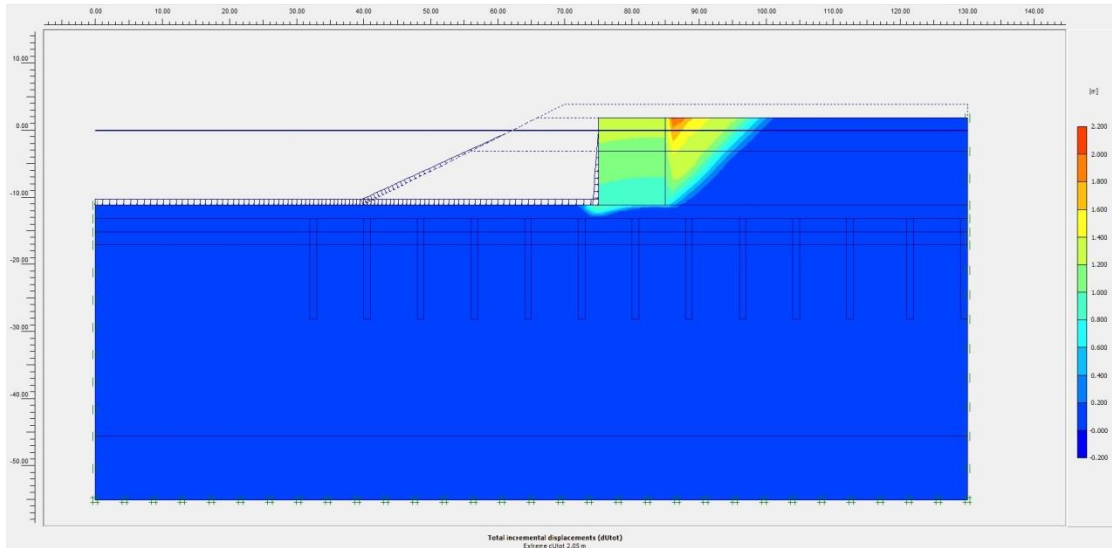
Εικόνα 7-18. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m)



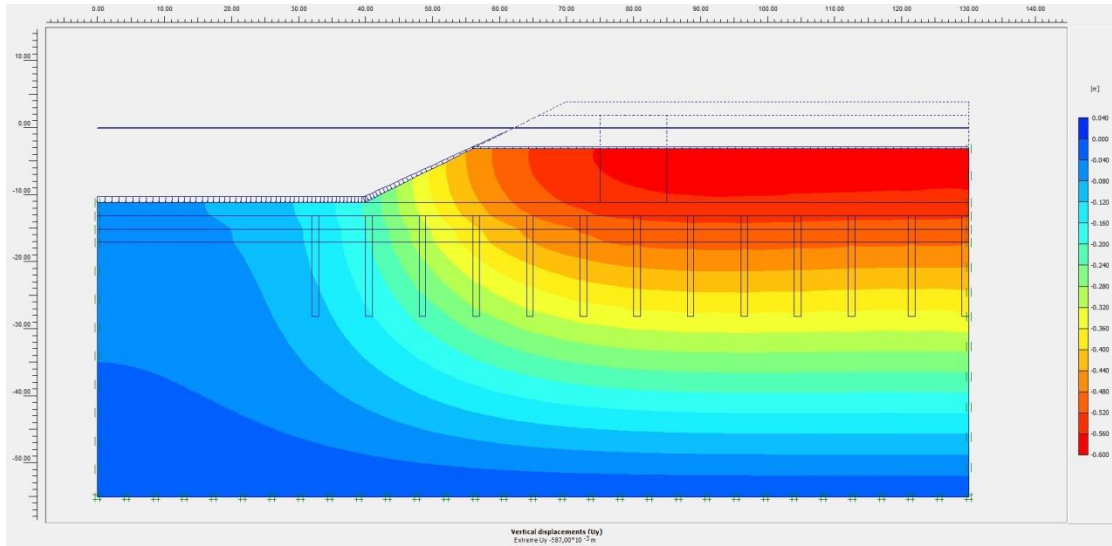
Εικόνα 7-19. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m)



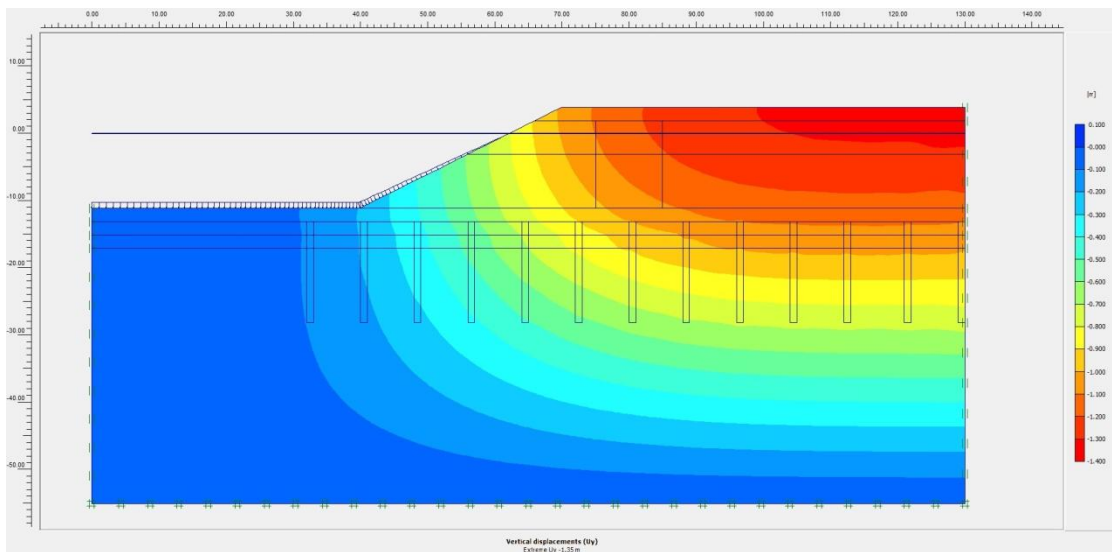
Εικόνα 7-20. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 75% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m)



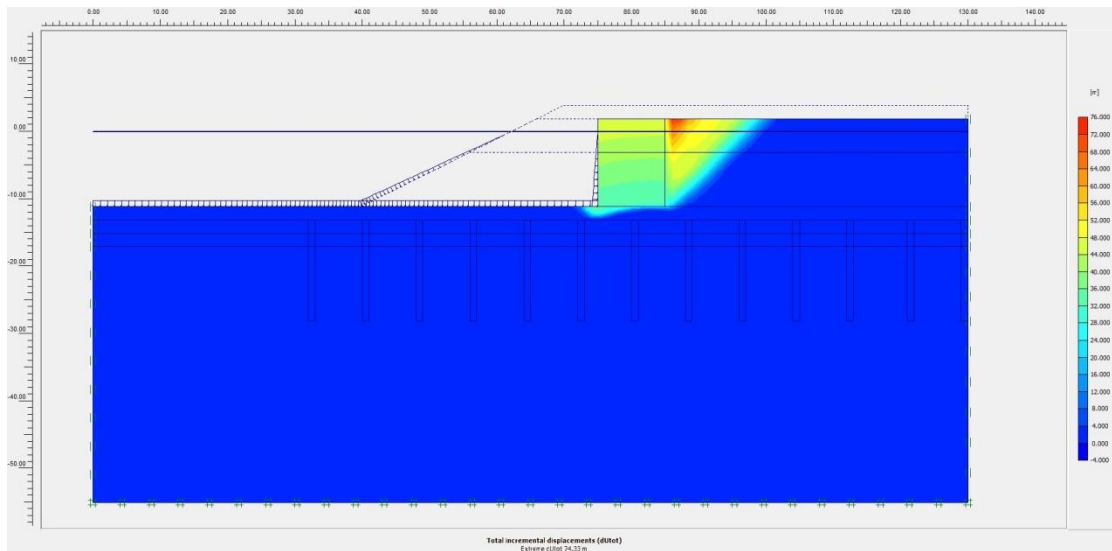
Εικόνα 7-21. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 75% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)



Εικόνα 7-22. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)

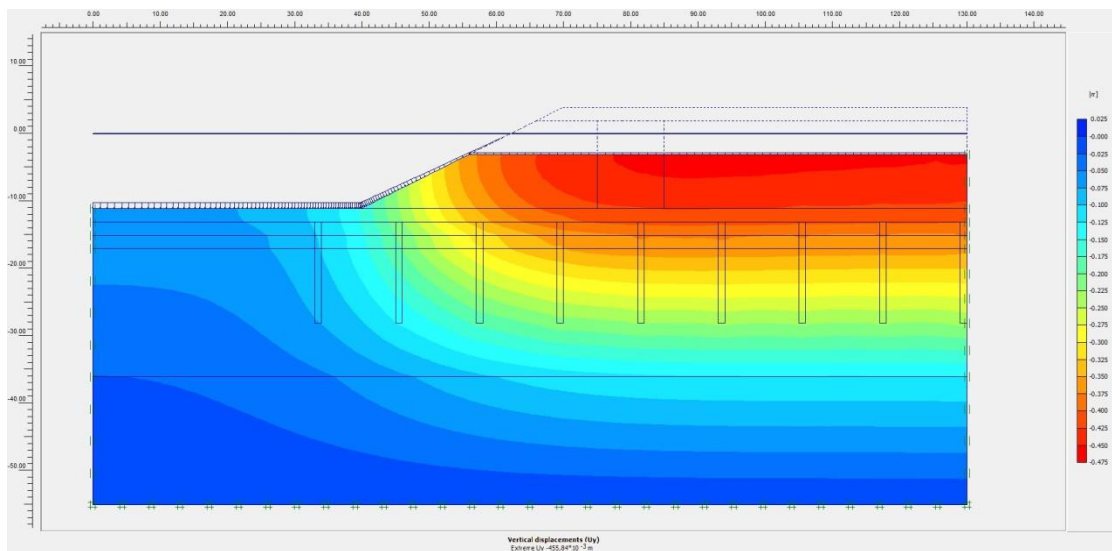


Εικόνα 7-23. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 100% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)

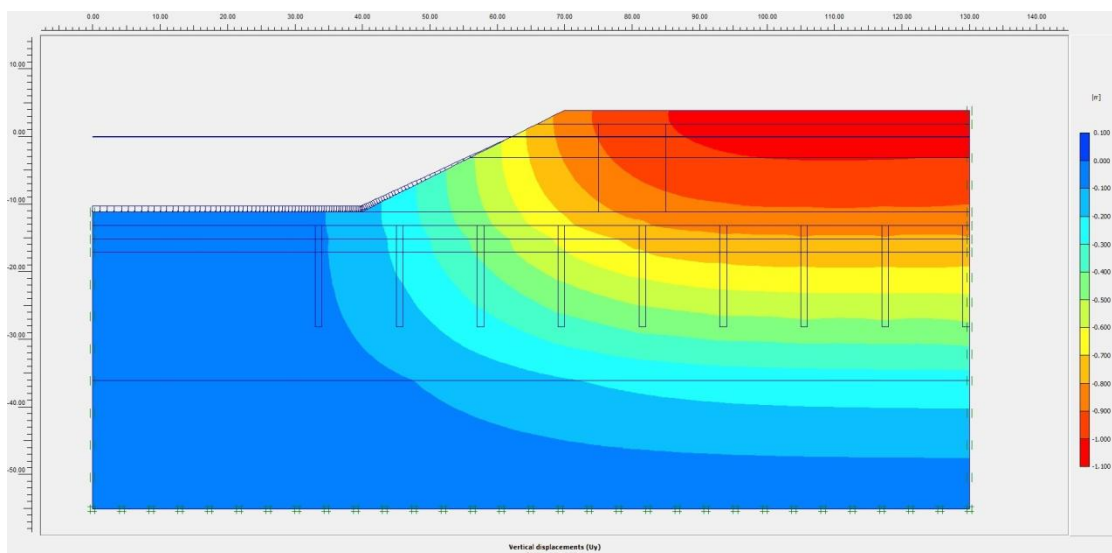


Εικόνα 7-24. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 100% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m)

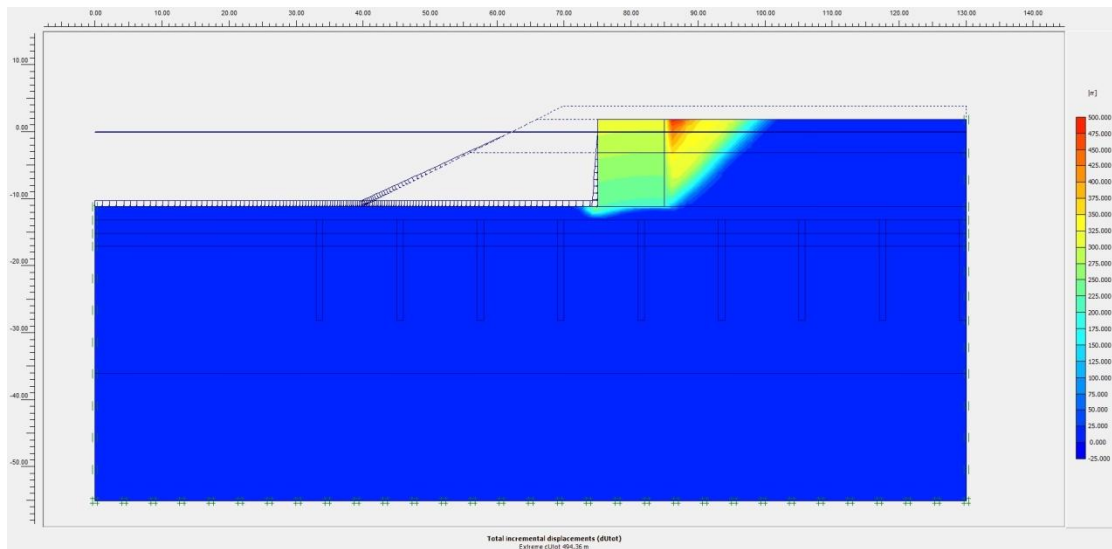
3^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων



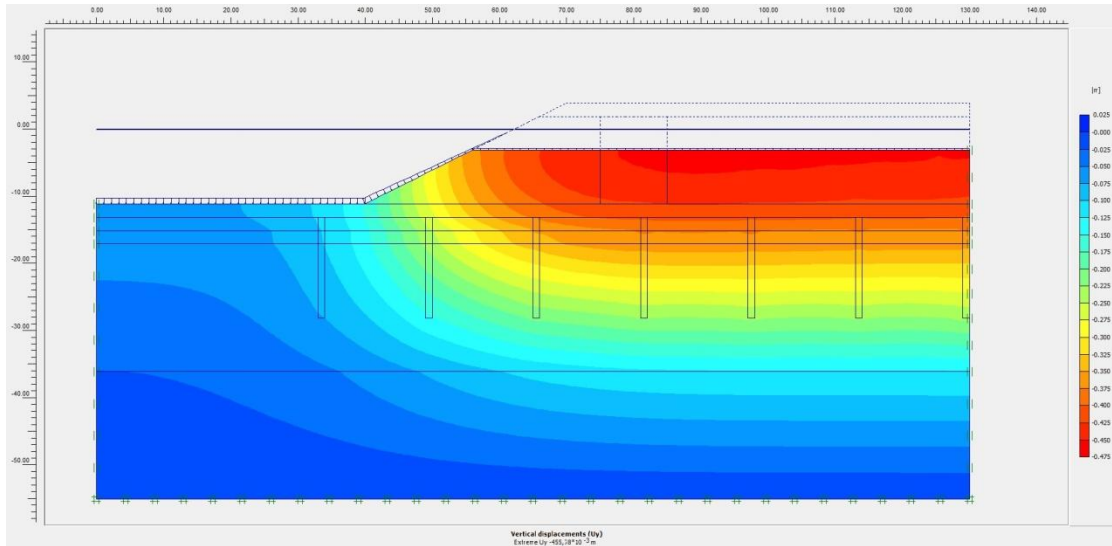
Εικόνα 7-25. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 3m)



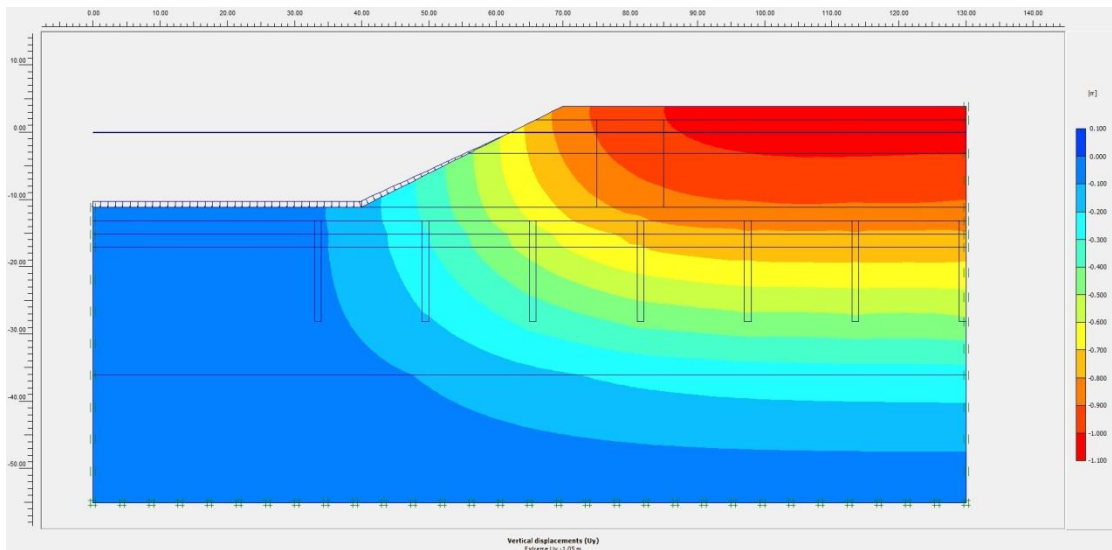
Εικόνα 7-26. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 3m)



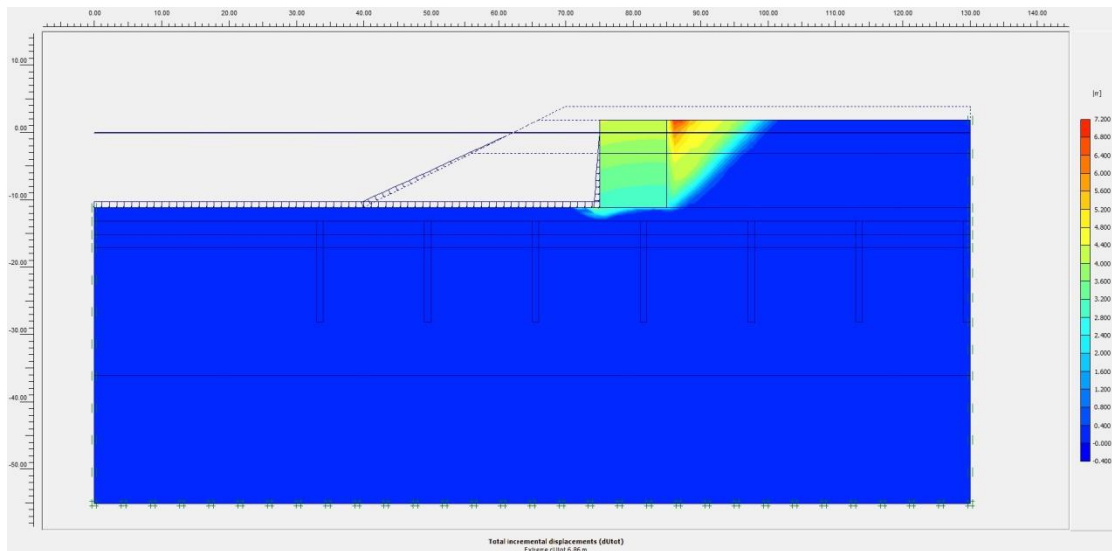
Εικόνα 7-27. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάρναβο πασσάλων των 3m)



Εικόνα 7-28. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 3,5m)

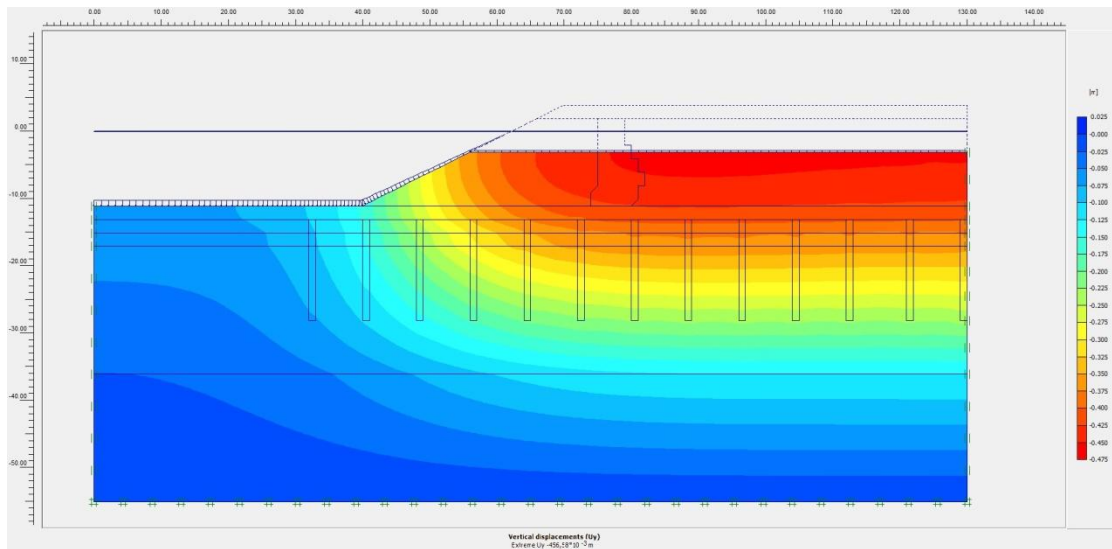


Εικόνα 7-29. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 3,5m)

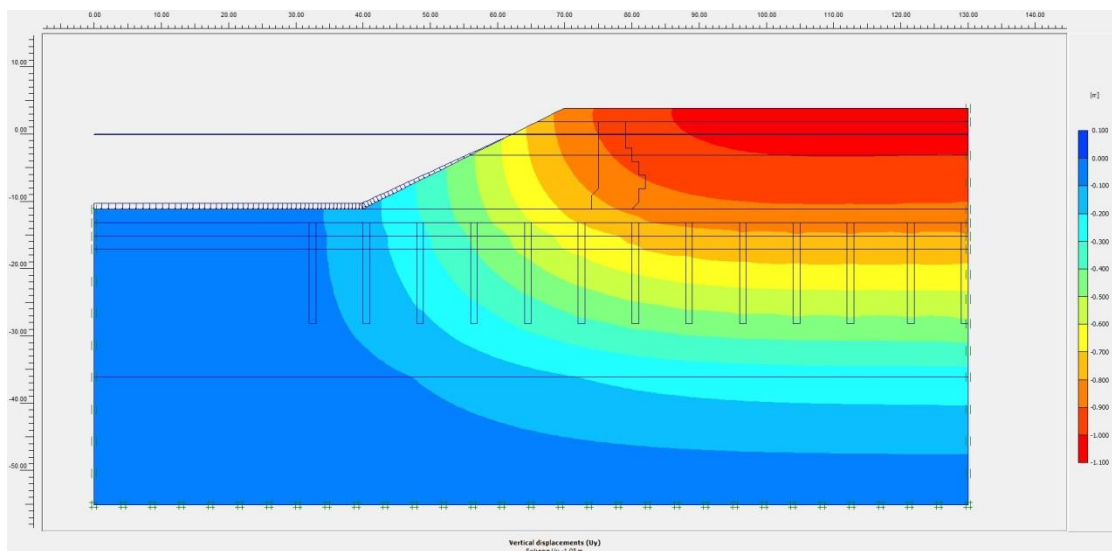


Εικόνα 7-30. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 3,5m)

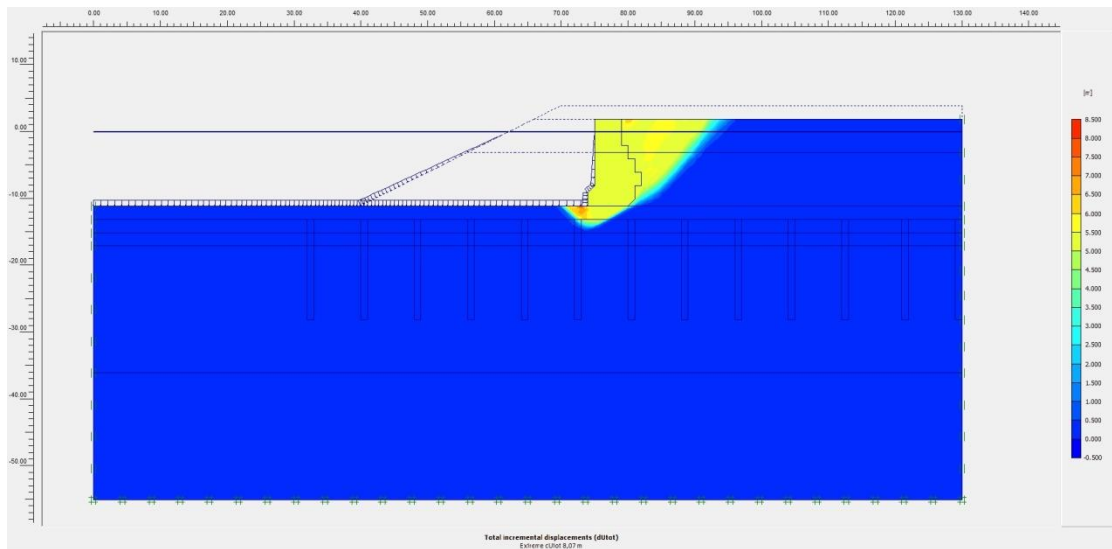
4^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων



Εικόνα 7-31. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m - Κρηπιδότοιχο με Τεχνητούς Ογκολίθους)

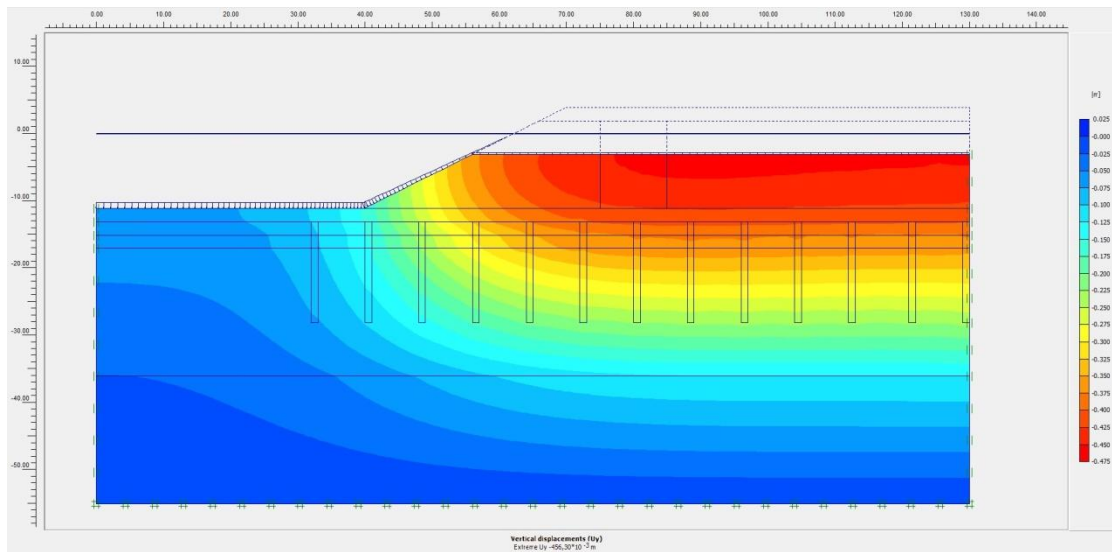


Εικόνα 7-32. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m - Κρηπιδότοιχο με Τεχνητούς Ογκολίθους)

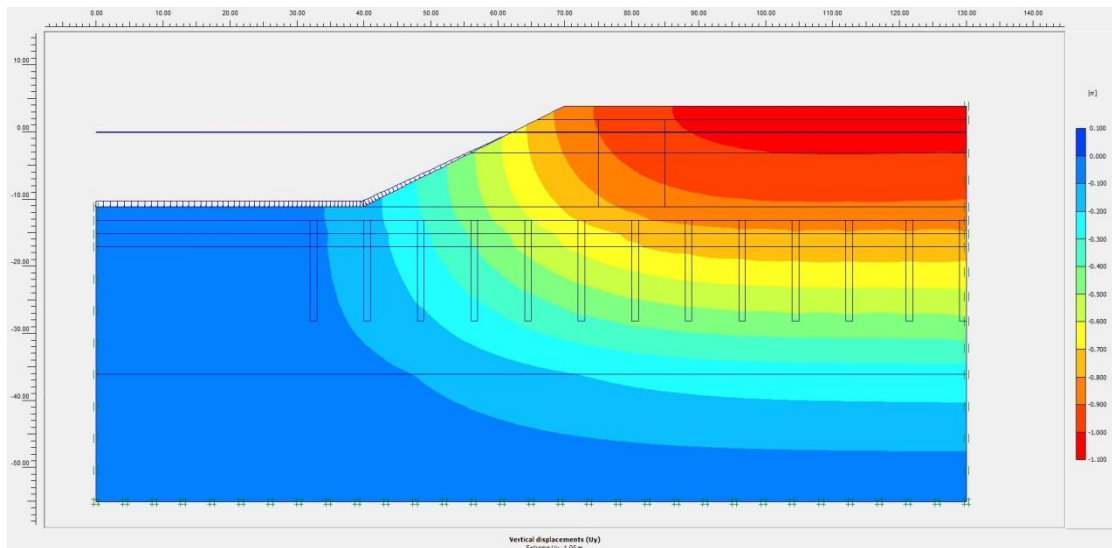


Εικόνα 7-33. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας (πάχος αργίλου 50% - με κάρναβο πασσάλων των 2,5m - Κρηπιδότοιχο με Τεχνητούς Ογκολίθους)

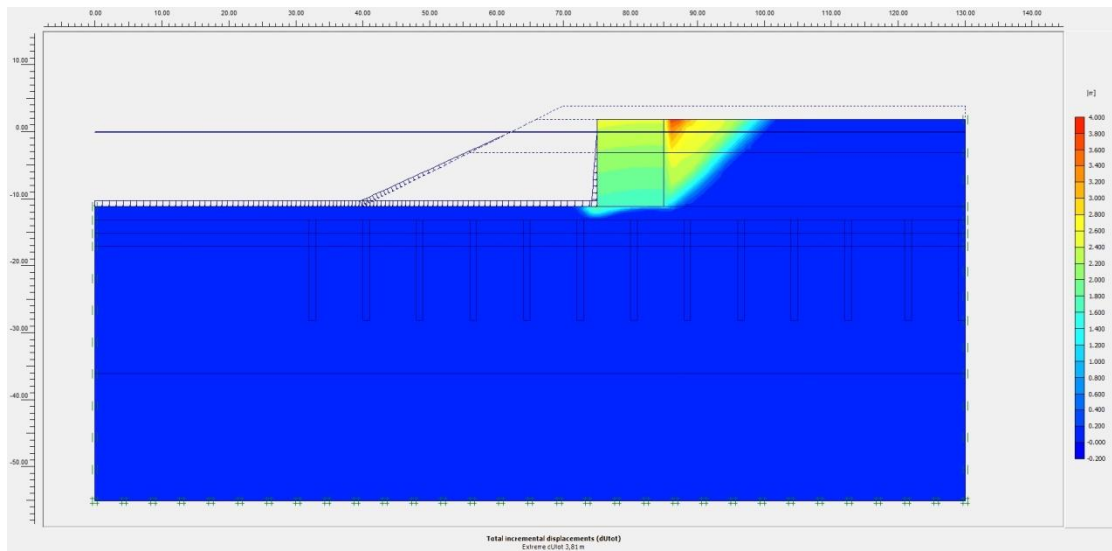
5^η Σειρά παραμετρικών αναλύσεων



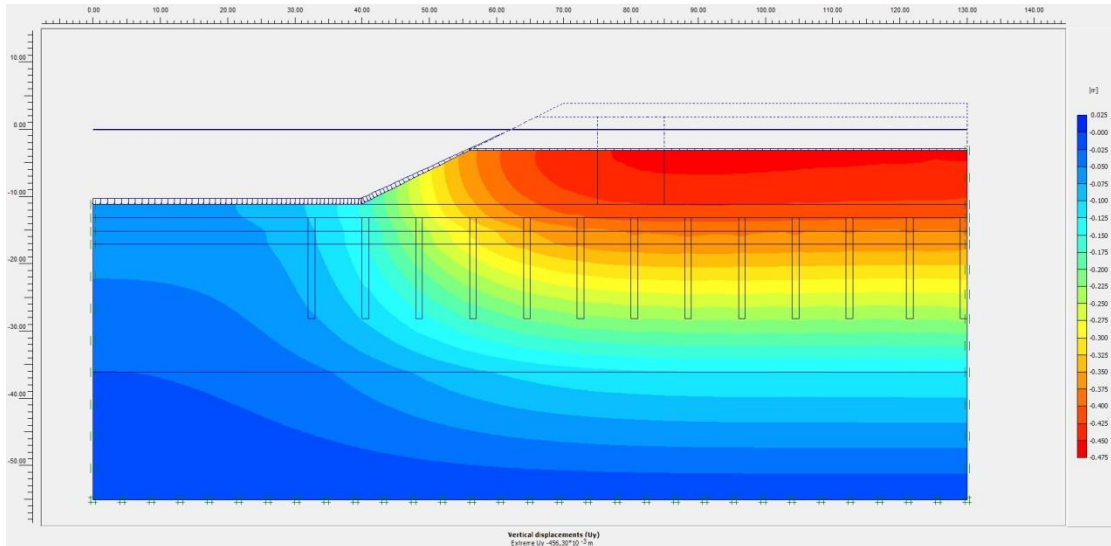
Εικόνα 7-34. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 40 μοίρες)



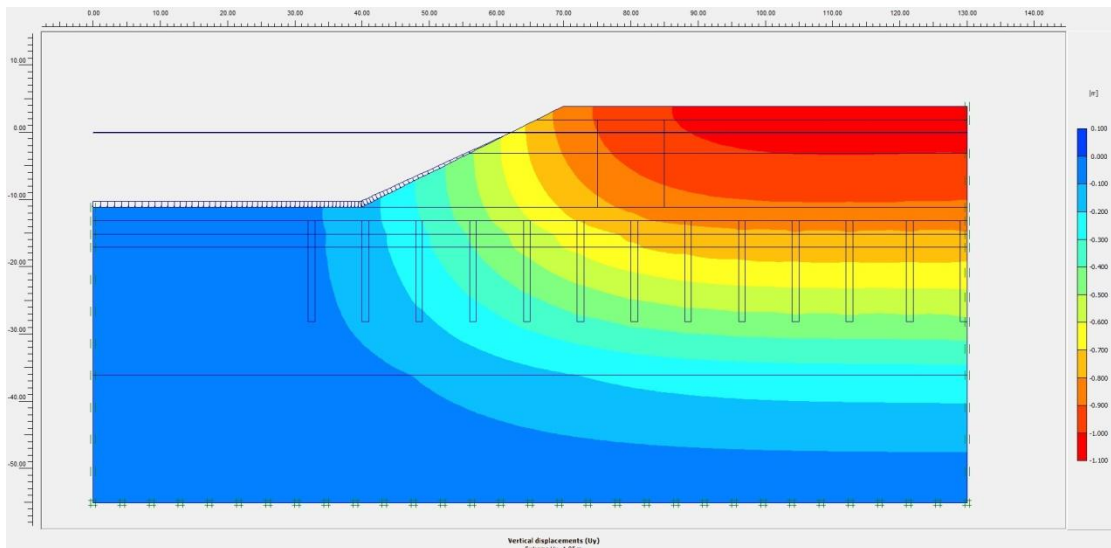
Εικόνα 7-35. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με κάναβο πασσάλων των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 40 μοίρες)



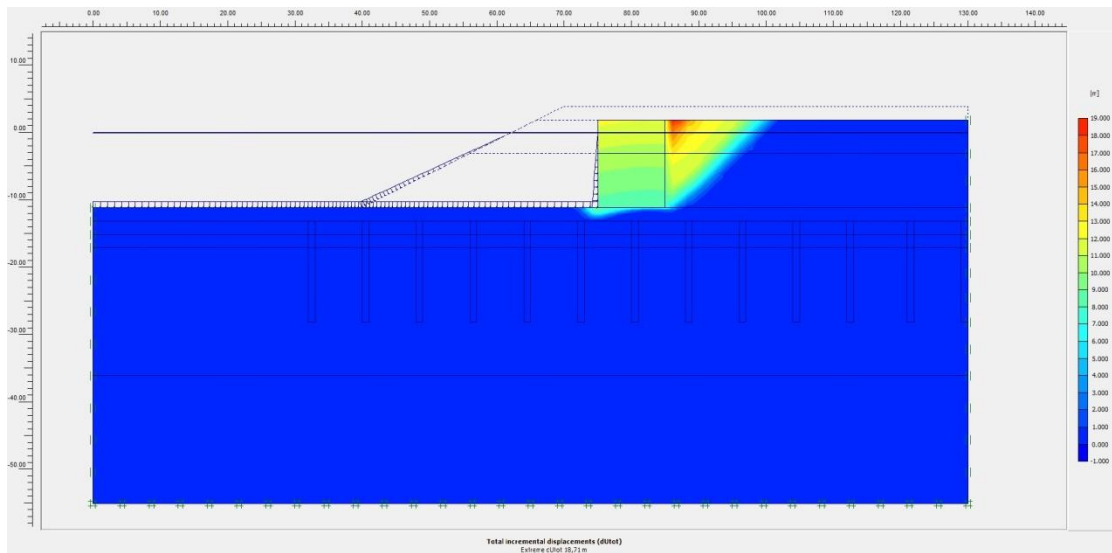
Εικόνα 7-36. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με κάνναβο πασσάλων των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 40 μοίρες)



Εικόνα 7-37. Καθιζήσεις στην Α' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με πασσάλους των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 45 μοίρες)



Εικόνα 7-38. Καθιζήσεις στην Β' φάση προφόρτισης (πάχος αργίλου 50% - με πασσάλους των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 45 μοίρες)



Εικόνα 7-39. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας κρηπιδότοιχου (πάχος αργίλου 50% - με πασσάλους των 2,5m - Γωνία εσωτερικής τριβής 45 μοίρες)