



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Ανασκόπηση των μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυση εδαφών με έμφαση στη
θεμελίωση έργων επί μαλακών αργίλων και χαλαρών άμμων»*

Φοιτήτρια: Χουρεμίδου Ευδοξία – Α.Μ. 3019056

Επιβλέπων: Δρ. Δημήτριος Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής

Λάρισα, Σεπτέμβριος 2023

Δήλωση Μη Λογοκλοπής

Η παρακάτω υπογράφουσα δηλώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και ότι στο πλαίσιο αυτό έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Ημερομηνία: 19 Αυγούστου 2023

Όνοματεπώνυμο: Χουρεμίδου Ευδοξία

Υπογραφή:

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

.....

.....

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Εργασία επιτεύχθηκε η συγκέντρωση και η παρουσίαση πληροφοριών σχετικά με την Ανασκόπηση των Μεθόδων Βελτίωσης και Ενίσχυσης Εδαφών με έμφαση στη θεμελίωση έργων επί μαλακών αργίλων και χαλαρών άμμων.

Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στο αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Στο 2^ο κεφάλαιο επιχειρήθηκε μία συγκεντρωτική κειμενική ανάπτυξη, η οποία σχετίζεται με το έδαφος και τους διάφορους τύπους αυτού.

Στο 3^ο κεφάλαιο έλαβε χώρα βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις μεθόδους βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών.

Στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε διεξοδικά καταγραφή μίας μελέτης περίπτωσης, η οποία αφορά στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων Δυτικής Μακεδονίας.

Στο 5^ο Κεφάλαιο καταγράφεται μελέτη περίπτωσης υπό το διακριτικό τίτλο: «Λιμενικά Έργα - Θεμελίωση σε Μαλακά Εδάφη».

Εν κατακλείδι, το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει μια τελική και ολοκληρωμένη άποψη του περιεχομένου του κειμένου και ένα συμπέρασμα που εδραιώνει τη συνολική εικόνα, με στόχο την παρουσίαση μιας προσωπικής, αντικειμενικής και ταυτόχρονα συμπερασματικής άποψης για τα αναπτυσσόμενα θέματα που προσεγγίστηκαν κατά την ανάπτυξη του κειμένου της παρούσας εργασίας.

Λέξεις – Κλειδιά: Βελτίωση Εδάφους, Ενίσχυση Εδάφους, Σύστημα Διαχείρισης Απορριμμάτων

ABSTRACT

In this Work it was achieved the gathering and presentation of information regarding the Review of Soil Improvement and Strengthening Methods with an emphasis on the foundation of works on soft clays and loose sands.

The 1st chapter is an introduction to the research object of this thesis.

In the 2nd chapter, a centralized textual development was attempted, which is related to the soil and its different types.

In the 3rd chapter, a bibliographic review took place regarding the methods of soil improvement and reinforcement.

In the 4th chapter, a case study was thoroughly recorded, which concerns the integrated waste management system of Western Macedonia.

In the 5th Chapter, a case study is recorded under the distinctive title: "Port Projects - Foundation on Soft Grounds".

In conclusion, Chapter 6 presents a final and comprehensive view of the content of the text and a conclusion that consolidates the overall picture, with the aim of presenting a personal, objective and at the same time conclusive view of the developing themes approached during the development of the text of this work.

In the Present Work, the largest and most accumulated gathering of information was achieved

Keywords: Soil Improvement, Soil Reinforcement, Waste Management System

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Δημήτριο Χριστοδούλου, Επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο οποίος συνέβαλε στη διαμόρφωση του θέματος και την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΛΑΦΟΣ.....	14
2.1 ΥΠΕΛΑΦΟΣ.....	14
2.1.1 ΒΡΑΧΟΣ.....	14
2.1.2 ΈΛΑΦΟΣ.....	14
2.2 ΤΥΠΟΙ ΕΛΑΦΩΝ	19
2.2.1 ΑΜΜΩΔΗ ΕΛΑΦΗ	19
2.2.2 ΑΡΓΙΛΩΔΗ ΕΛΑΦΗ	19
2.2.3 ΠΗΛΩΔΗ ΕΛΑΦΗ	20
2.2.4 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΛΑΦΗ.....	21
2.2.5 ΑΡΓΙΛΟΑΣΒΕΣΤΩΔΗ ΕΛΑΦΗ.....	21
2.2.6 ΑΣΒΕΣΤΩΔΗ ΕΛΑΦΗ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΩΣΗ – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	22
3.1 ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	36
3.1.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΈΝΑΝΤΙ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΦΈΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ.....	36
3.1.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΣΤΗ ΒΑΣΗ.....	37
3.1.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΈΝΑΝΤΙ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ (ΤΥΠΟΥ EQU)	38
3.1.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΛΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	39
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	40
3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ	41
3.3.1 ΒΕΛΤΙΩΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ» ΕΛΑΦΟΥΣ ΜΕ ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ	42
3.3.2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ» ΕΛΑΦΟΥΣ ΜΕ ΒΑΘΙΑ ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	44
3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ	46
3.4.1 ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ» ΕΛΑΦΟΥΣ	46

3.4.2 <i>ΕΝΙΣΧΥΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ» ΜΕ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ</i>	46
3.4.3 <i>ΕΝΙΣΧΥΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ» ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ</i>	47
3.4.4 <i>ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ «ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ»</i>	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ Ι - ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	50
4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΣΔΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	50
4.1.1 <i>ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΘΕΙΣΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ</i>	50
4.1.2 <i>ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ SPT</i>	50
4.1.3 <i>ΔΟΚΙΜΗ SPT</i>	52
4.1.4 <i>ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ</i>	54
4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ	56
4.2.1 <i>ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</i>	56
4.2.2 <i>ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ</i>	56
4.2.3 <i>ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</i>	57
4.2.4 <i>ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΕΣ ΤΑΚΤΙΚΕΣ ΕΛΑΦΟΥΣ</i>	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΙΙ – ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΈΡΓΑ - ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΣΕ ΜΑΛΑΚΑ ΕΛΑΦΗ	59
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	59
5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	61
5.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ	63
5.3.1 <i>ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΕΠΙΧΩΜΑ</i>	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κλάδοι Εδαφομηχανικής.	14
Εικόνα 2: Βραχώδης έξαρση - Έδαφος - Βραχώδεις σχηματισμοί. Πηγή: http://themelia.weebly.com/	15
Εικόνα 3: Συσσώρευση κόκκων. Πηγή: Collins et al.,1974.....	16
Εικόνα 4: Διατάξεις αργιλικών κόκκων. Πηγή: Collins and McGown, 1974.....	18
Εικόνα 5: Συμπεριφορικός Αντίκτυπος Εδάφους - Τεχνικά Έργα.....	19
Εικόνα 6: Αστοχία λόγω ρευστοποίησης εδάφους - Niigata, Ιαπωνία (1964).....	23
Εικόνα 7: Αστοχία θεμελίωσης φρεατίου λόγω ρευστοποίησης εδάφους - Hokkaido, Ιαπωνία (2003).....	23
Εικόνα 8: Πρανή σε μαλακά-χαλαρά εδάφη - Hokkaido, Ιαπωνία (2003).....	23
Εικόνα 9: Κατακόρυφες Γεωσύνθετες Αποχετεύσεις	24
Εικόνα 10: Περιοχές αποτελεσματικότητας των μεθόδων βελτίωσης	24
Εικόνα 11: Μέθοδοι - βελτίωση / ενίσχυση του εδαφικού χάρτη.....	26
Εικόνα 12: Προφόρτιση εδάφους.....	27
Εικόνα 13: Αστοχία σε λιμενικούς κρηπιδότοιχους - Kobe, Ιαπωνία (1995).....	27
Εικόνα 14: Κατακόρυφη τομή στο επίπεδο της μέγιστης κλίσης, όπως ήταν το 1993	28
Εικόνα 15: Θεμελίωση επί μαλακού εδάφους - Κεκλιμένος πύργος Πίζας, Ιταλία.....	28
Εικόνα 16: Έλεγχος του υπόγειου νερού με τη μέθοδο της ηλεκτρο-όσμωσης.....	29
Εικόνα 17: Τοίχος αντιστήριξης από Οπλισμένη Γη.....	30
Εικόνα 18: Top feed method	30
Εικόνα 19: Εφαρμογή της μεθόδου δυναμικής συμπύκνωσης.....	31
Εικόνα 20: Χαρακτηριστικά μεγέθη της μεθόδου δυναμικής συμπύκνωσης.....	31
Εικόνα 21: Βελτίωση του εδάφους με Βαθεία Εδαφική Ανάμιξη.....	32
Εικόνα 22: Διάταξη ψύξης του εδάφους για σταθεροποίηση.....	35
Εικόνα 23: Εφαρμογή μεθόδου ψύξης του εδάφους σε βαθιά εκσκαφή.....	35
Εικόνα 24: Θέσεις ερευνητικών εργασιών	51
Εικόνα 25: Κατάταξη εδάφους από δεδομένα CPT σύμφωνα με Robertson et al. (1986).....	55
Εικόνα 26: Κατάταξη εδάφους από δεδομένα CPT σύμφωνα με Meigh (1987)	55
Εικόνα 27: Διακύμανση παραμέτρων στρώματος.....	57
Εικόνα 28: Κατά περίπτωση - Μέθοδοι θεμελίωσης και/ή βελτίωσης του εδάφους:	58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Υπέρβαση κατακόρυφης φέρουσας ικανότητας. Πηγή: Vesic, 1973	36
Σχήμα 2: Υπέρβαση της αντίστασης σε ολίσθηση. Πηγή: Vesic, 1973	36
Σχήμα 3: Ανατροπή. Πηγή: Vesic, 1973	36
Σχήμα 4: Απώλεια Ολικής Ευστάθειας. Πηγή: Vesic, 1973	36
Σχήμα 5: Μέθοδοι Μείωσης Φορτίου/Αύξηση κλίσης πρανών. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	41
Σχήμα 6: Τοποθέτηση «σωληνών» εντός του επιχώματος. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	41
Σχήμα 7: Χρήση «ελαφρών» υλικών επίχωσης. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	41
Σχήμα 8: Αύξηση βάθους θεμελίωσης "επιπέδουσα" θεμελίωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	41
Σχήμα 9: Αύξηση βάθους θεμελίωσης "επιπέδουσα" θεμελίωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	41
Σχήμα 10: Βελτίωση «μαλακού» εδάφους με προφόρτιση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	44
Σχήμα 11: Βελτίωση «μαλακού» εδάφους με Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	45
Σχήμα 12: Βελτίωση «μαλακού» εδάφους με Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	45
Σχήμα 13: Μέθοδοι Βαθειάς Δονητικής Συμπύκνωσης. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	46
Σχήμα 14: Μέθοδοι Βαθειάς Δονητικής Συμπύκνωσης. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	46
Σχήμα 15: Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους – Αντικατάσταση «μαλακού εδάφους». Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	46
Σχήμα 16: Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους – Ενίσχυση «μαλακού εδάφους» με χαλικοπασσάλους. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	47
Σχήμα 17: Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους – Ενίσχυση με οπλισμό. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	48
Σχήμα 18: Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - Πυλώνας Γέφυρας. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	49
Σχήμα 19: Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - (Μικρό) Φράγμα. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009	49
Σχήμα 20: Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - Κρηπιδότοιχος. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	49
Σχήμα 21: Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - Οπλισμένη Γη – Μεταλλικός οπλισμός. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009.....	49
Σχήμα 22: Έργα με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και γεωφυσικές μεθόδους.....	59
Σχήμα 23: Έργα με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και γεωφυσικές μεθόδους.....	59
Σχήμα 24: Διάταξη νέου λιμένα Πάτρας.....	60
Σχήμα 25: Διάταξη νέου λιμένα Ηγουμενίτσας	61
Σχήμα 26: Κατανομή cu με το βάθος.....	61
Σχήμα 27: Αρχή λειτουργίας χαλικοπασσάλων	63
Σχήμα 28: Διαδοχικές φάσεις κατασκευής κρηπιδότοιχων.....	64

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συσσώρευση κόκκων χονδρόκοκκου εδάφους. Πηγή: Branes, 2000	15
Πίνακας 2: Μέθοδοι προς εδαφική βελτίωση	25
Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές αποτελεσματικότητας μεθόδων εδαφικής βελτίωσης.....	25
Πίνακας 4: Σταθεροποίηση Εδαφών	29
Πίνακας 5: Λεπτομέρειες περί σταθεροποίησης εδαφών με τσιμέντο, άσβεστο, άσφαλτο ή με απλή συμπύκνωση.....	32
Πίνακας 6: Περιπτώσεις στήριξης της εδαφικής υπόβασης.....	34
Πίνακας 7: Μέθοδοι Βελτίωσης του Εδάφους. Πηγή: https://www.ktirio.gr/	42
Πίνακας 8: Αποτελέσματα πρότυπων δοκιμών διείσδυσης SPT	52
Πίνακας 9: Αποτελέσματα δοκιμών στατικής πενетроμέτρησης CPT	53
Πίνακας 10: Αποτελέσματα δοκιμής δυναμικής πενетроμέτρησης DPSH.....	54
Πίνακας 11: Διακύμανση παραμέτρων στρώματος	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιδέα της βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών με ανάμειξη υλικών (τσιμέντο, ασβέστη, πολυμερή υλικά κ.λπ.) ή προσθήκη ξένων στοιχείων στο έδαφος (πασσάλους, μεμβράνες, γεωφάσματα, μόνωση κ.λπ.), βρήκαν εφαρμογή από ποικίλους λαούς στην αρχαιότητα όπως είναι οι Σουμέριοι, Ασσύριοι, Έλληνες, Κινέζοι, Αραβες και Ρωμαίοι. Οι Κινέζοι γνώριζαν πριν από περίπου 3000 χρόνια ότι χρησιμοποιούν ασβέστη για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους για τη βελτίωση των δρόμων (Israel, 1982).

Την ίδια περίοδο, οι Κινέζοι χρησιμοποίησαν επίσης ξύλο ή μπαμπού για να σταθεροποιήσουν το έδαφος, μια μέθοδο που χρησιμοποιούν ακόμα και σήμερα για την κατασκευή φραγμάτων για την προστασία του περιβάλλοντος από τις κατολισθήσεις λάσπης. Οι αρχαίοι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ηφαιστειακή τέφρα για να κατασκευάσουν διάφορες κατασκευές, όπως είναι τα έργα υποδομής (Israel, 1982).

Στη Μεσοποταμία, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν άσφαλτο αναμειγμένο με άμμο για την κατασκευή δρόμων από το 3200 π.Χ. (Ινστιτούτο Ασφάλτου, 1975). Η πρώτη μοντέρνα κατασκευή με ασφάλτινη επένδυση καταγράφηκε στη Γαλλία το 1802. Το τσιμέντο τύπου Portland εφαρμόστηκε για πρώτη φορά για σταθεροποίηση του εδάφους στην περιοχή του Σεντ Λούις (ΗΠΑ) το 1904. Ξεκινώντας το 1940, οι Γερμανοί, και αργότερα οι Βρετανοί και οι Αμερικανοί, χρησιμοποίησαν τεχνικές χώματος-τσιμέντου για να κατασκευάσουν διαδρόμους για πολλά στρατιωτικά αεροδρόμια. Την ίδια περίοδο, η σταθεροποίηση του εδάφους με χρήση διαφόρων πρόσθετων (τσιμέντο, ασβέστης, ιπτάμενη τέφρα κ.λπ.) επεκτάθηκε και σε άλλες χώρες ανά το κόσμο (Stavridakis, 1997).

Άλλες τεχνικές για τη σταθεροποίηση και την ενοποίηση μαλακών συνεκτικών εδαφών αποτελεί η βαθιά ανάμειξη με πρόσθετα προς καλύτερευση της μηχανικής δυναμικής ετούτων των εδαφών (Kamruzzaman et al., 2000). Αυτή η τεχνολογία εφαρμόστηκε σε κτίρια, θεμέλια γεφυρών κ.λπ. από στην Ιαπωνία και τη Σκανδιναβία από το 1970. Στόχος ετούτων των μεθόδων αποτελεί η βελτιωτική του εδάφους με τρόπο τέτοιο κατάλληλο και απόλυτα οικονομικά αποτελεσματικό, με απώτερο σκοπό ο μηχανικός χαρακτήρας να παρομοιάζεται με εκείνον των μαλακών πετρωμάτων.

Ο όρος «βελτίωση ή ενίσχυση φυσικών ή εύθραυστων υλικών» αναφέρεται στην επεξεργασία υλικών με στόχο τη βελτίωση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων τους. Ο Van Impe (1989) χώρισε τις μεθόδους βελτίωσης στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Χρονικά περιορισμένες τεχνικές προσωρινής βελτίωσης του εδάφους που εφαρμόζονται κατά την κατασκευή.
2. Τεχνικές μόνιμης βελτίωσης του εδάφους, που εφαρμόζονται δίχως την εφαρμογή ξένων στοιχείων στο έδαφος.
3. Τεχνικές μόνιμης (μόνιμης) εδαφοβελτιώσεως με εφαρμογή ξένων στοιχείων στο έδαφος.

Οι τεχνολογίες βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών χρησιμοποιούνται για έργα θεμελίωσης, για τον έλεγχο των καθιζήσεων, τη μείωση της διαπερατότητας και την βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Οι σήραγγες και οι τάφροι πρέπει να ενισχύονται πλευρικά για να μειωθεί η διαπερατότητα κατά τη διάρκεια των εργασιών εκσκαφής. Στην οδοποιία, απώτερος σκοπός αποτελεί η αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους της βάσης του δρόμου, η αποφυγή όξυνσης της διάβρωσης και η μείωση των ογκομετρικών μεταβολές.

Πολλές περιοχές με κακές εδαφικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται για κατασκευαστικά έργα, είτε λόγω έλλειψης χώρου (περιαστικές περιοχές) είτε λόγω των αυξανόμενων γεωμετρικών απαιτήσεων των μεγάλων έργων υποδομής. Η χρήση αυτών των εδαφών βασίζεται σε μεθόδους βελτίωσης και ενίσχυσης των γεωτεχνικών τους ιδιοτήτων. Στόχος της βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητάς τους και η μείωση του μεγέθους των αναμενόμενων καθιζήσεων.

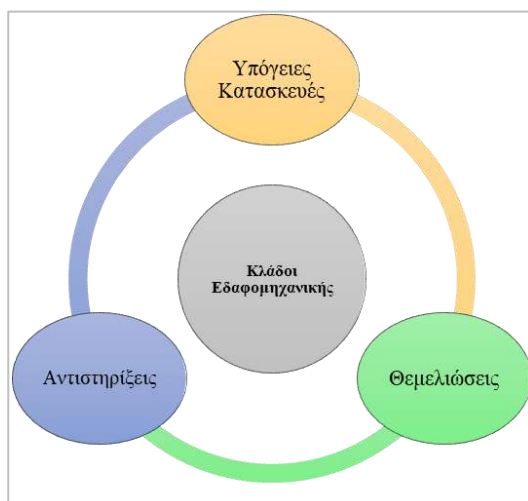
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΛΑΦΟΣ

2.1 ΥΠΕΛΑΦΟΣ

Οι κλάδοι της βασικής Εδαφομηχανικής και της γενικής Γεωτεχνικής Μηχανικής ασχολούνται με τεχνικές εργασίες σχετικές με το έδαφος και ειδικότερα¹ με τις (Εικόνα 1):

- **Υπόγειες κατασκευές.** Σχετίζονται με εργασίες, οι οποίες αναπτύσσονται υπεδάφια (λ.χ. σήραγγες, υπόγειοι σταθμοί κ.ά.).
- **Θεμελιώσεις.** Πρόκειται για το κομμάτι εκείνο των κατασκευών το οποίο σχεδιάζεται για να μπορεί να φέρει όλα εκείνα τα σημαντικά φορτία, χωρίς την εκδήλωση σημαντικών καθιζήσεων.
- **Αντιστηρίξεις.** Αποτελούν εκείνες τις κατασκευές, οι οποίες εξασφαλίζουν την ευστάθεια των πρανών ορυγμάτων.

Κοινό συστατικό όλων των παραπάνω στοιχείων είναι η παρουσία χώματος.



Εικόνα 1: Κλάδοι Εδαφομηχανικής.

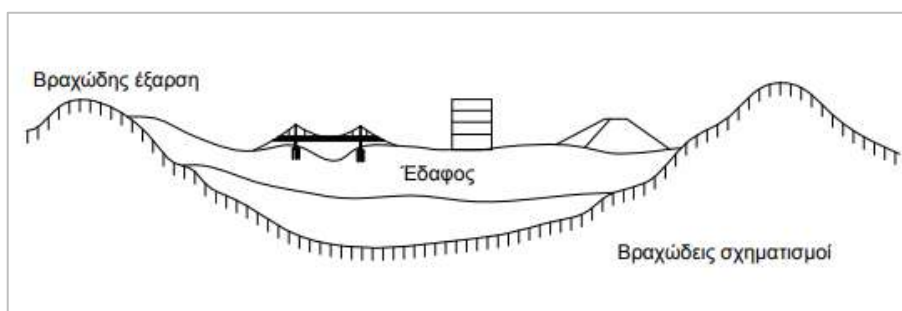
2.1.1 ΒΡΑΧΟΣ

Είναι το κάτω μέρος κάθε εναποθέματος εδάφους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εμφανίζεται και στην επιφάνεια (εκροές πετρωμάτων). Η μελέτη των πετρωμάτων αποτελεί αντικείμενο της μηχανικής των πετρωμάτων.

2.1.2 ΕΛΑΦΟΣ

Αποτελεί το κατώτερο τμήμα κάθε εδαφικής απόθεσης. Σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζεται και επιφανειακά (βραχώδης έξαρση). Η μελέτη βραχωδών σχηματισμών είναι αντικείμενο της Βραχομηχανικής.

¹ <http://users.ntua.gr/>



Εικόνα 2: Βραχώδης έξαρση - Έδαφος - Βραχώδεις σχηματισμοί. Πηγή: <http://themelia.weebly.com/>

2.1.2.1 ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ (ΚΟΚΚΩΔΗ) ΕΔΑΦΗ

Ο τρόπος με τον οποίο μεμονωμένοι κόκκοι είναι διατεταγμένοι στο έδαφος ονομάζεται «δομή του εδάφους». Αυτή η δομή μερικές φορές ονομάζεται σκελετός εδάφους.

Τα κοκκώδη εδάφη περιλαμβάνουν *χονδρόκοκκες ιλύες, άμμους, χαλίκια και άλλα χονδρότερα υλικά*. Η εδαφική του δομή εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Barnes, 2000):





- Μέγεθος, σχήμα και τραχύτητα επιφάνειας μεμονωμένων κόκκων
- Εύρος μεγέθους σωματιδίων (λεπτή ή ομοιόμορφη ταξινόμηση)
- Μέθοδος Εναπόθεσης (ιζηματογενής ή παγετώδης)
- Τάσεις που υφίστανται το έδαφος
- Βαθμός τσιμεντοποίησης κόκκων, παρουσία λεπτών κόκκων και οργανικών υλικών, κατάσταση διάβρωσης.

Η κατάσταση συμπίεσης των κοκκωδών εδαφών, μπορεί να παρατηρηθεί με διάφορους τρόπους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Συσσώρευση κόκκων χονδρόκοκκου εδάφους. Πηγή: Barnes, 2000

<i>Επίδραση της συσσώρευσης</i>	<i>Χαλαρή</i>	<i>Πυκνή</i>
	<i>απόσταση μεταξύ των κόκκων</i>	τελείως διαχωρισμένοι
<i>όγκος κενών</i>	μέγιστος (μέγιστο e και n)	ελάχιστος (ελάχιστο e και n)
<i>πυκνότητα</i>	ελάχιστη	Μέγιστη
<i>επαφές κόκκων</i>	ελάχιστες	Μέγιστες
<i>ελευθερία κίνησης κόκκων</i>	μέγιστη	Ελάχιστη

Τα όρια της συσσώρευσης μπορούν να δειχθούν αν εξετάσουμε τα κενά διαστήματα μέσα σε ένα ιδεατό έδαφος που αποτελείται από ισομεγέθεις σφαιρικούς κόκκους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.

Όνομα	Κάτοψη	Όψη	Σημεία επαφής ανά κόκκο	Πορώδες %	Δείκτης πόρων
Κυβική			6	47.6	0.91
Ρομβοειδής			12	26	0.35

Εικόνα 3: Συσσώρευση κόκκων. Πηγή: Collins et al.,1974

Στην πράξη, το πορώδες εμφανίζεται στο 35-50% περίπου, όπου το χαμηλότερο πορώδες και η μεγαλύτερη πυκνότητα προέρχονται από:

- μεγαλύτερα μεγέθη κόκκων
- μεγαλύτερο εύρος μεγεθών κόκκων
- περισσότεροι ισομεγέθεις κόκκοι
- πιο λείοι κόκκοι

Η διαφορά στο πορώδες μεταξύ της πυκνότερης και της αραιότερης κατάστασης ενός κοκκώδους εδάφους είναι τυπικά περίπου 9-10%.

2.1.2.2 ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΛΑΦΗ

Τα σωματίδια των **αργιλικών ορυκτών** είναι πολύ μικρά για να γίνουν αντιληπτά με γυμνό μάτι - είναι διατεταγμένα με τρόπο μικροδομής ή μικροπλέγματος, κατόπιν ερευνών που έχουν υλοποιηθεί ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (Εικόνα 2.4).

Τα σωματίδια αργιλικών ορυκτών έχουν φορτισμένες επιφάνειες που διέπουν οποιαδήποτε διάταξη των σωματιδίων. Η μικροδομή των αργιλικών εδαφών είναι εξαιρετικά περίπλοκη, αλλά φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως από (Collins and McGown, 1974):

- την ποσότητα των ορυκτών αργίλου
- τον τύπο των ορυκτών αργίλου,
- την αναλογία ιλύος και άμμου,
- το περιβάλλον εναπόθεσης και
- τη χημεία του νερού των πόρων

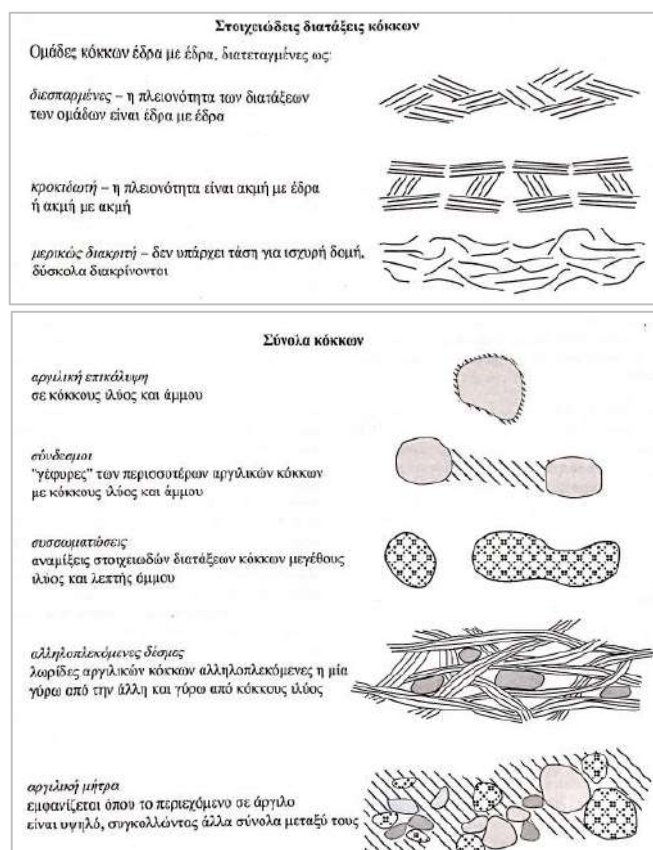
Η μηχανική συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών προσδιορίζεται καλύτερα εάν ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες της μικροδομής του εδάφους.

Η μακροδομή ενός αργιλικού εδάφους αποτελεί τη δομή η οποία φαίνεται με γυμνό μάτι και γενικά αποτελείται από χαρακτηριστικά που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της απόθεσης, όπως εγκλείσματα, διαχωρισμοί, λεπιοειδείς δομές, διαστρωματώσεις, και χαρακτηριστικά που δημιουργήθηκαν μετά την απόθεση, όπως ρηγματώσεις, διακλάσεις, ρωγμές συρρίκνωσης, και οπές από ρίζες.

Το ποσοστό υγρασίας είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη παράμετρος για την αντιπροσώπευση της δομικής φύσης ενός αργιλικού εδάφους, αφού σχετίζεται με το ανοιχτό της μικροδομής, με την προϋπόθεση ότι το έδαφος είναι μερικώς κορεσμένο, χρησιμοποιούνται επίσης το δείκτης πόρων, το πορώδες, ή ο ειδικός όγκος.

Συμπερασματικά, υπάρχει μια ευρεία ποικιλία εδαφικών κόκκων και δομικών διατάξεων που δημιουργούνται από γεωλογικές διεργασίες στη φύση. Κάθε περιβάλλον απόθεσης έχει τις δικές του ιδιότητες και οι διεργασίες μετά την απόθεση μπορούν να μεταβάλουν δραματικά το έδαφος. Όταν τα εδάφη επηρεάζονται από τεχνικά έργα ή υφίστανται επεξεργασία κατά την κατασκευή, οι κόκκοι και η δομή τους μπορεί να μεταβληθούν με τρόπο μη αναστρέψιμο.

Εκτιμώντας τη σημασία της αδιατάρακτης φύσης των εδαφών και των συνεπειών της ανάπλασης, αποκτούμε μια καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων των εδαφών, όπως η διατμητική αντοχή, η συμπιεστότητα, η διαπερατότητα, η συρρίκνωση, η διόγκωση, η κατάρρευση και η ευαισθησία (Εικόνα 4).



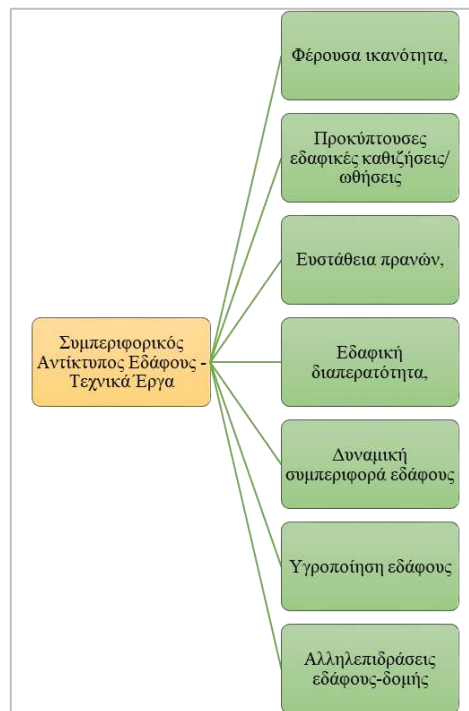
Εικόνα 4: Διατάξεις αργιλικών κόκκων. Πηγή: Collins and McGown, 1974

2.1.2.3 ΜΙΓΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΤΥΠΩΝ

Συχνά μπορούμε να συναντήσουμε και μίγματα εδαφών όπως είναι οι **αργιλώδεις άμμοι** και **αμμώδεις άργιλοι**. Το είδος του εδάφους αλλά και οι γενικότερες συνθήκες (υπόγειος ορίζοντας, μορφή φόρτισης) καθορίζουν τη συμπεριφορά του αναφορικά με την αντοχή του και τις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις.

Ο αντίκτυπος της συμπεριφοράς του εδάφους σε διάφορα τεχνολογικά έργα αντιμετωπίζει τα ακόλουθα ζητήματα (Εικόνα 5):

- Φέρουσα ικανότητα, προκύπτουσες εδαφικές καθιζήσεις/ ωθήσεις
- Ευστάθεια πρανών, εδαφική διαπερατότητα, δυναμική συμπεριφορά εδάφους
- Υγροποίηση εδάφους
- Αλληλεπιδράσεις εδάφους-δομής



Εικόνα 5: Συμπεριφορικός Αντίκτυπος Εδάφους - Τεχνικά Έργα.

2.2 ΤΥΠΟΙ ΕΛΛΑΦΩΝ

2.2.1 ΑΜΜΩΔΗ ΕΛΑΦΗ

Είναι γνωστά και ως ελαφρά εδάφη. Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει εδάφη με ποσοστό άμμου μεγαλύτερο από 70% και ποσοστό αργίλου μικρότερο από 15%. Γενικά, στα εδάφη αυτά κυριαρχούν αμμώδεις ιδιότητες. Τούτου λεχθέντος, έχουν μικρή ικανότητα να συγκρατούν νερό και θρεπτικά συστατικά και οι πρακτικές καλλιέργειας είναι εύκολο να ακολουθηθούν. Η κίνηση του αέρα, του νερού και της ανάπτυξης των ριζών στο έδαφος είναι ανεμπόδιστη.

Για αμμώδες έδαφος, είναι απαραίτητο να ποτίζετε εύλογα, να λιπάνετε εύλογα, να εφαρμόζετε συχνά και να εφαρμόζετε μικρή ποσότητα λιπάσματος. Τα πολύ φτωχά αμμώδη εδάφη χρησιμοποιούνται μόνο για δάση (πευκοδάση), ενώ πιο γόνιμα αμμώδη εδάφη (με υψηλότερη αναλογία αργίλου) χρησιμοποιούνται για τη σίκαλη και τις πατάτες. Βρέθηκαν επίσης εδάφη στα οποία το ποσοστό της άμμου δεν ήταν πολύ μεγαλύτερο από αυτό της αργίλου, γι' αυτό και ονομάστηκαν αμμοαργιλό.

2.2.2 ΑΡΓΙΛΩΔΗ ΕΛΑΦΗ

Ονομάζονται και βαριά εδάφη. Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει εδάφη με ποσοστό αργίλου τουλάχιστον 35%, αν και σε πολλές περιπτώσεις το ποσοστό αυτό ξεπερνά το 45%. Είναι εδάφη που συγκρατούν καλά το νερό και τα θρεπτικά συστατικά και είναι δύσκολο να

οργωθούν. Συχνά παρουσιάζουν προβλήματα αποστράγγισης και αερισμού και παρεμποδίζεται η ανάπτυξη των ριζών στο έδαφος. Δυσκολεύονται να δουλέψουν όταν υπάρχει πολλή υγρασία γιατί είναι πολύ διαπερατά και λασπώνουν πολύ γρήγορα. Αυτό καθιστά την επιφάνειά τους αδιαπέραστη, μειώνοντας την ποιότητα του εδάφους και καθυστερώντας την ανάπτυξη των φυτών.

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε άμμο ή ασβέστιο μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες του εδάφους. Τα αργιλώδη εδάφη πρέπει να οργώνονται (οργώνονται) όταν το έδαφος έχει αρκετή υγρασία για να βελτιώσει τον αερισμό και την αποστράγγιση. Ένας άλλος τρόπος για να βελτιώσετε τον άργιλο και τον άργιλο είναι να προσθέσετε άμμο ποταμού ή περλίτη στο φυτικό έδαφος. Σε αργιλώδη εδάφη όπως σιτάρι, βρώμη, φασόλια και ελαιοκράμβη. Ανάλογα με το ποσοστό άμμου, αργίλου και λάσπης χωρίζονται σε:

- Αργιλοπηλώδη: Σε αυτά τα εδάφη το ποσοστό αργίλου είναι ελαφρώς πιο πάνω από το ποσοστό άμμου και λάσπης
- Ιλυοαργιλώδη: Το έδαφος εδώ έχει ένα απολύτως ανώτερο ποσοστό λάσπης και αργίλου σε σύγκριση με την άμμο.
- Αργιλοαμμώδη: Σε αυτά τα εδάφη κυριαρχεί η αναλογία αργίλου προς άμμο σε σύγκριση με τη λάσπη.

2.2.3 ΠΗΛΩΔΗ ΕΛΑΦΗ

Λέγονται και εδάφη μέσης σύστασης. Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει εδάφη όπου οι αναλογίες σε άμμο, άργιλο και ιλύ είναι περίπου ίσες. Τα εδάφη της ομάδας αυτής εκδηλώνουν μόνο τις επιθυμητές ιδιότητες της άμμου και της αργίλου. Αποτέλεσμα είναι μια μέση μηχανική σύσταση να θεωρείται κατάλληλη για την ανάπτυξη των φυτών χωρίς προβλήματα. Ανάλογα με το ποσοστό της άμμου, αργίλου και ιλύος διακρίνονται σε:

- Πηλοαμμώδη: Όπου το ποσοστό της άμμου στο έδαφος είναι μεγαλύτερο έναντι της ιλύος και αργίλου.
- Αμμοαργιλοπηλώδη: Εδώ υπερτερούν τα ποσοστά της άμμου και αργίλου έναντι της ιλύος.
- Ιλυοπηλώδη: Εδώ το ποσοστό της ιλύος είναι μεγαλύτερο από εκείνα της άμμου και αργίλου.
- Ιλυοαργιλοπηλώδη: Στα εδάφη αυτά, το ποσοστό της άμμου υστερεί σημαντικά έναντι της ιλύος και αργίλου.

- **Πλυώδη:** Στα εδάφη αυτά το ποσοστό της ύλης υπερέρχει συντριπτικά έναντι της άμμου και αργίλου.

Είναι γνωστά και ως εδάφη μέσης σύστασης. Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει εδάφη με περίπου ίσες αναλογίες άμμου, αργίλου και λάσπης. Αυτή η ομάδα εδαφών εμφανίζει μόνο τις επιθυμητές ιδιότητες άμμου και αργίλου. Επομένως, η μέση μηχανική σύνθεση κρίθηκε κατάλληλη για ανάπτυξη φυτών χωρίς προβλήματα. Ανάλογα με το ποσοστό άμμου, αργίλου και λάσπης χωρίζονται σε:

- **Πηλοαμμώδη:** Έδαφος με μεγαλύτερο ποσοστό άμμου από λάσπη και άργιλο.
- **Αμμοαργιλοπηλώδη:** Εδώ η αναλογία άμμου προς άργιλο είναι μεγαλύτερη από τη λάσπη.
- **Πλυοπηλώδη:** Εδώ το ποσοστό λάσπης είναι μεγαλύτερο από αυτό της άμμου και του πηλού.
- **Πλυοαργιλοπηλώδη:** Σε αυτά τα εδάφη, το ποσοστό της άμμου υστερεί σημαντικά σε σύγκριση με το λάσπη και τον άργιλο.
- **Πλυώδη:** Σε αυτά τα εδάφη, το ποσοστό λάσπης είναι σίγουρα καλύτερο από την άμμο και τον άργιλο.

2.2.4 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Αν και τα οργανικά ιζήματα είναι πιο περιορισμένα από άλλους τύπους μητρικού υλικού του εδάφους, εξακολουθούν να καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της επιφάνειας της γης και είναι σημαντικά από περιβαλλοντική και γεωργική άποψη. Συνήθως οργανικά κοιτάσματα σχηματίζονται σε παράκτιους βάλτους και εσωτερικές βαλτώδεις περιοχές. Όταν τα νερά είναι ρηχά, εντοπίζονται τυπικοί τύποι χλωρίδας.

2.2.5 ΑΡΓΙΛΟΑΣΒΕΣΤΩΔΗ ΕΔΑΦΗ

Το αργιλοασβεστόχωμα είναι το πιο γόνιμο από όλα τα εδάφη. Οι πόροι τους περιέχουν πολύ νερό. Σχηματίζονται από τη συσσώρευση πολύτιμου, πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά υλικού στο τέλος της τελευταίας εποχής των παγετώνων. Σε τέτοια εδάφη ευδοκιμούν τα πιο απαιτητικά φυτά.

2.2.6 ΑΣΒΕΣΤΩΔΗ ΕΔΑΦΗ

Το ασβεστώδες έδαφος έχει περιεκτικότητα σε ασβέστη μεγαλύτερη από 40%, είναι καλά αεριζόμενο και πλούσιο σε χούμο και θρεπτικά συστατικά. Είναι πολύ γόνιμα αλλά δεν μπορούν να κρατήσουν πολύ νερό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΩΣΗ – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Πολλές περιοχές υποβαθμισμένες ως προς τον εδαφικό χαρακτήρα χρησιμοποιούνται για κατασκευαστικά έργα λόγω έλλειψης χώρου (περιαστικές περιοχές) ή λόγω αυξημένων απαιτήσεων γεωμετρικού χαρακτήρα για μεγάλα έργα υποδομής. Για να χρησιμοποιηθούν αυτά τα εδάφη χρειάζονται μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης των γεωτεχνικών ιδιοτήτων τους. Γενικά, ο οπλισμός είναι κατάλληλος για μαλακά εδάφη, όπως (Neufert, 1992):

- Χαλαρή άμμος, ειδικά όταν είναι κορεσμένη,
- Χαλαρό και μεσαίας πυκνότητας κορεσμένο χαλίκι υπό σεισμικά φορτία,
- Χαλαρή ή μη στερεωμένη άργιλος και λάσπη.

Η ευρεία γκάμα πεδίων εφαρμογής της τεχνολογίας ενίσχυσης του εδάφους περιλαμβάνει θεμέλια κτιρίων, εκσκαφές, οδοποιία, ενίσχυση πρανών, κατασκευές συγκράτησης ή αποθήκευσης νερού (φράγματα, κανάλια, ταμιευτήρες, χωματερές κ.λπ.), καθώς και προστασία του περιβάλλοντος και έλεγχο της ρύπανσης (Βαλάλας et al., 1979).

Εκτός από τη σταθεροποίηση του εδάφους, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν τεχνικές μείωσης των εφαρμοζόμενων φορτίων. Αυτά περιλαμβάνουν (Ma et al., 2002):

- Μείωση το ύψος των επιχώσεων.
- Αύξηση της κλίσης του επιχώματος.
- Χρήση «ελαφριών» υλικών επίχωσης (ιπτάμενη τέφρα, ηφαιστειακή τέφρα και ελαφρόπετρα αντί για αμμώδη άργιλο, χαλίκι κ.λπ.)
- Αύξηση βάθους θεμελίωσης («πλωτές» θεμελιώσεις).

Η διαδικασία και οι μέθοδοι βελτίωσης και ενοποίησης του εδάφους εξαρτώνται από τις ειδικές οικονομικές και τεχνικές συνθήκες κάθε έργου, οι οποίες εξαρτώνται από την ποιότητα του εδάφους, τις φυσικές ή χημικές ιδιότητες που πρέπει να βελτιωθούν, τον τύπο και το μέγεθος του εδάφους. Γεωτεχνική μηχανική, κόστος κατασκευής κ.λπ. (Ma et al., 2002).



Εικόνα 6: Αστοχία λόγω ρευστοποίησης εδάφους - Niigata, Ιαπωνία (1964)



Εικόνα 7: Αστοχία θεμελίωσης φρεατίου λόγω ρευστοποίησης εδάφους - Hokkaido, Ιαπωνία (2003)



Εικόνα 8: Πρανή σε μαλακά-χαλαρά εδάφη - Hokkaido, Ιαπωνία (2003)

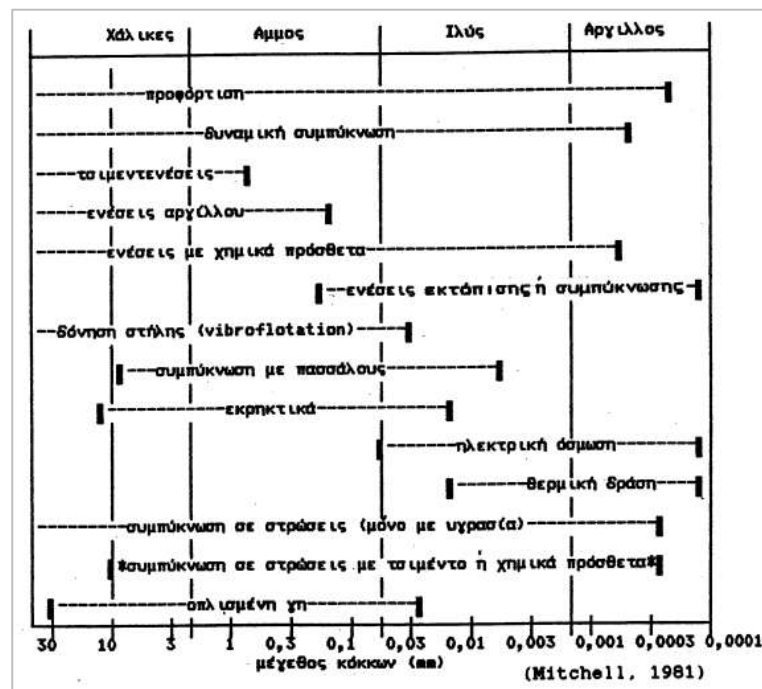
Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται οι κατακόρυφες γεωσύνθετες αποχετεύσεις, οι οποίες με τη σειρά τους εφαρμόζονται στο έδαφος σε μικρές αποστάσεις 2 - 4 m με τη βοήθεια ειδικών γερανών με κάθετες ράγες οδήγησης (Αναγνωστόπουλος et al., 2005).



Εικόνα 9: Κατακόρυφες Γεωσύνθετες Αποχετεύσεις

Η εδαφική βελτίωση με την ευρεία έννοια αναφέρεται στην τροποποίηση της εδαφικής ιδιότητας προς βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Αυτή μπορεί να είναι μια διαδικασία διαρκείας προς ανέγερση ή βελτίωση της υπάρχουσας κατάστασης μίας κατασκευής.

Στην παρακάτω σχηματική αναπαράσταση είναι εμφανείς όλες εκείνες οι περιοχές αποτελεσματικότητας των μεθόδων βελτίωσης (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Περιοχές αποτελεσματικότητας των μεθόδων βελτίωσης

Έτσι στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται όλες εκείνες οι μέθοδοι οι οποίες στοχεύουν στην εδαφική βελτίωση (Ma et al., 2002).

Πίνακας 2: Μέθοδοι προς εδαφική βελτίωση

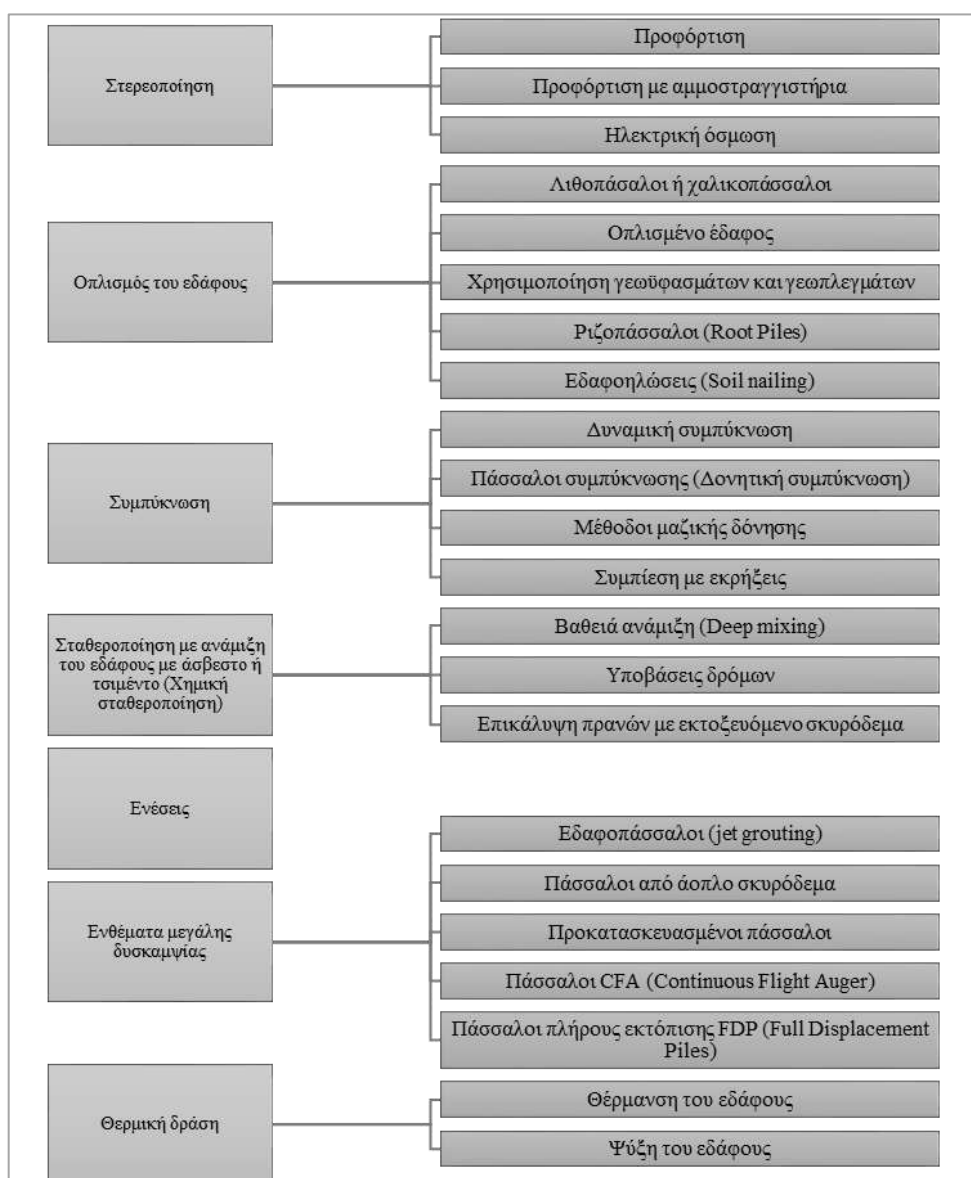
ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	
Μηχανισμός βελτίωσης	Μέθοδος
Στερεοποίηση	- Προφόρτιση - Προφόρτιση με στραγγιστήρια - Ηλεκτρική όσμωση
Οπλισμός του εδάφους (χρήση στοιχείων που μπορούν να παραλάβουν δυνάμεις ελκυσμού ή θλίψης)	- Λιθοπάσσαλοι - Οπλισμένο έδαφος - Γεωφράγματα - Ριζοπάσσαλοι - Κάφιωμα εδάφους
Συμπύκνωση	- Δυναμική συμπύκνωση - Πέσσασοι συμπύκνωσης - Μέθοδοι μαζικής δόνησης - Εκρήξεις
Βαθιά εδαφική ανάμειξη (χημική σταθεροποίηση)	- Ασβεστοπάσσαλοι - Πέσσασοι ή διαφράγματα με ανάμειξη εδάφους & τσιμέντου - Υπερβάσεις δρόμων - Επικαλύψεις πρανών
Ενέσεις	- Ενέσεις διαποτισμού - Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης
Θερμική δράση	- Θέρμανση του εδάφους - Ψύξη του εδάφους

Βέβαια οι μέθοδοι εδαφικής βελτίωσης για να επιβεβαιώσουν την επιτυχημένη τους πλήρωση, θα πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ κάποιων ενδεικτικών τιμών αποτελεσματικότητας. Αυτές οι τιμές αποτελεσματικότητας είναι εμφανείς στον παρακάτω πίνακα (Αναγνωστόπουλος et al., 2005).

Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές αποτελεσματικότητας μεθόδων εδαφικής βελτίωσης

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ				
Έδαφος / μέγεθος κόκκων	Χάλικες 30 - 2,5 (mm)	Άμμος 2,5 - 0,07 (mm)	Ιλύς 0,07 - 0,0017 (mm)	Άργιλος 0,0017 - 0,0001 (mm)
Προφόρτιση	✓	✓	✓	✓ (> 0,0002 mm)
Δυναμική συμπύκνωση	✓	✓	✓	✓ (> 0,0005 mm)
Τσιμεντενέσεις	✓	✓ (> 0,7 mm)	✗	✗
Ενέσεις αργίλου	✓	✓ (> 0,17 mm)	✗	✗
Ενέσεις με χημικά πρόσθετα	✓	✓	✓	✓ (> 0,0006 mm)
Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης	✗	✓ (> 0,2 mm)	✓	✓ (> 0,00014 mm)
Δόνηση στήλης	✓	✓	✓ (> 0,03 mm)	✗
Συμπύκνωση με πασσάλους	✓ (< 9 mm)	✓	✓ (> 0,07 mm)	✗
Εκρηκτικά	✓ (< 14 mm)	✓	✓ (> 0,016 mm)	✗
Ηλεκτρική όσμωση	✗	✗	✓	✓ (> 0,00014 mm)
Θερμική δράση	✗	✗	✓ (< 0,016 mm)	✓ (> 0,00014 mm)
Συμπύκνωση σε στρώσεις (μόνο με υγρασία)	✓	✓	✓	✓
Συμπύκνωση σε στρώσεις με τσιμέντο ή χημικά πρόσθετα	✓ (< 11 mm)	✓	✓	✓ (> 0,00026 mm)
Οπλισμένη γη	✓ (< 30 mm)	✓	✓ (> 0,028 mm)	✗

Γενικολογώντας θα μπορούσαν να ειπωθούν όλες εκείνες οι μέθοδοι οι οποίες συμβάλλουν στην βελτίωση και την ενίσχυση του εδαφικού χάρτη (βλέπε παρακάτω εικόνα).



Εικόνα 11: Μέθοδοι - βελτίωση / ενίσχυση του εδαφικού χάρτη

Η λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου βελτίωσης του εδάφους σύμφωνα με τους Attewell and Farmer (1976), Tsocho (1987), Van Impe (1989) είναι η εξής:

α. Στερεοποίηση

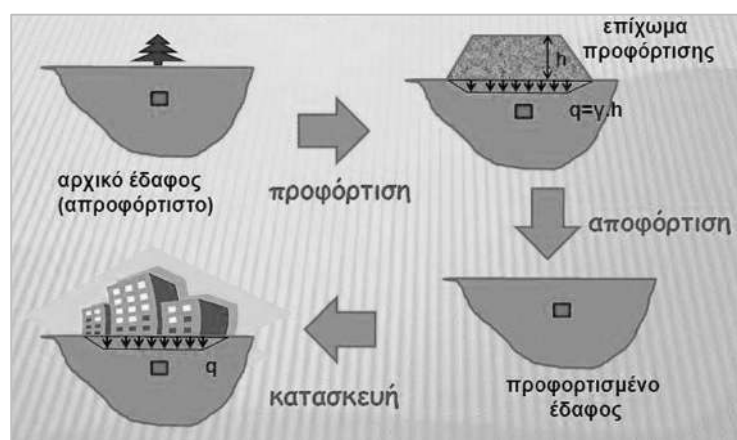
- Προφόρτιση.

Η μέθοδος της προφόρτισης συνιστάται στη συσσώρευση εδαφικού υλικού και την τοποθέτησή του με μορφή σωρών πάνω στην προς βελτίωση έκταση.

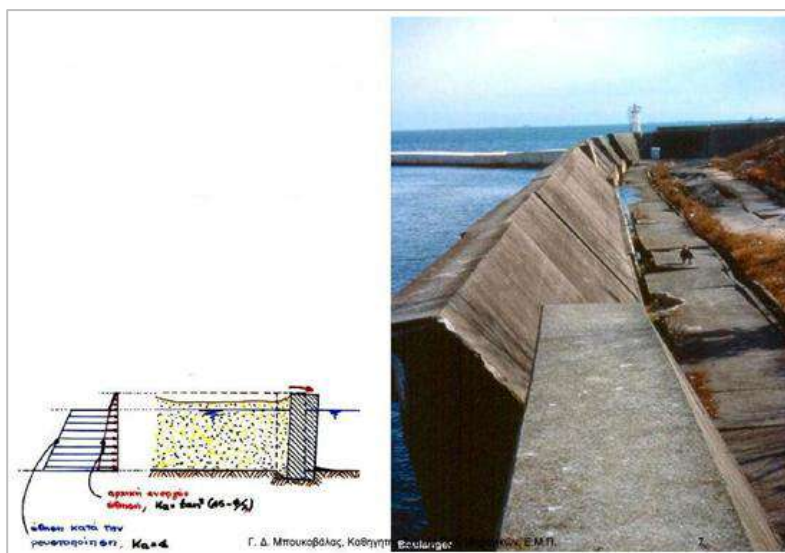
Κάποιοι άλλοι τρόποι προφόρτισης είναι:

- Η εγκατάσταση προκατασκευασμένων κατασκευών σε μικρής έκτασης έργα
 - Η κατάλληλα προσαρμοσμένη λήψη και η κατάπτωση των υπόγειων υδάτων,
 - Το γέμισμα δεξαμενών,
 - Η ύγρανση της επιφάνειας των ξηρών χαλαρών αποθέσεων,
- Προφόρτιση μετά χρήση φίλτρων άμμου.

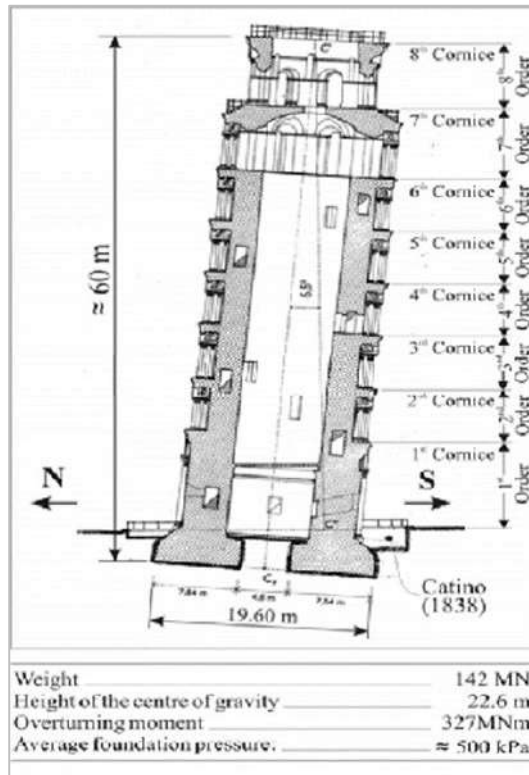
Η προφόρτιση μπορεί να βελτιωθεί και να βελτιωθεί με την κατασκευή κάθετων καναλιών άμμου που επιτρέπουν επιπλέον αποστράγγιση.



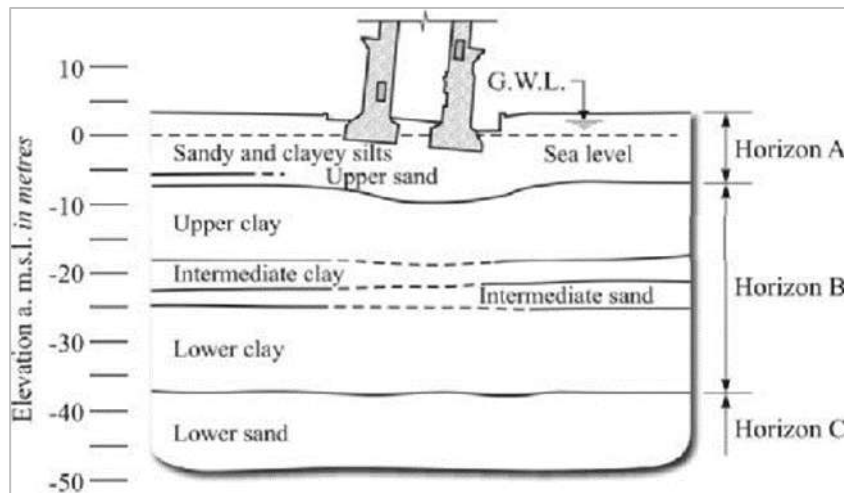
Εικόνα 12: Προφόρτιση εδάφους



Εικόνα 13: Αστοχία σε λιμενικούς κρηπιδότοιχους - Kobe, Ιαπωνία (1995)



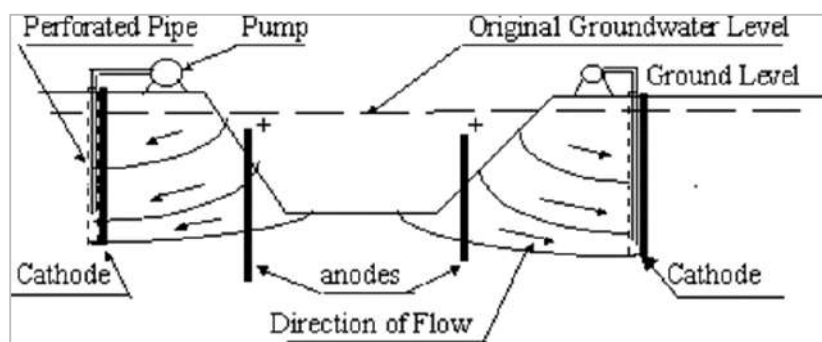
Εικόνα 14: Κατακόρυφη τομή στο επίπεδο της μέγιστης κλίσης, όπως ήταν το 1993



Εικόνα 15: Θεμελίωση επί μαλακού εδάφους - Κεκλιμένος πύργος Πίζας, Ιταλία

- Ηλεκτρο-όσμωση.

Αυτή η μέθοδος προτείνεται για τη κατασκευή ενός δυναμικού ηλεκτρικής φύσεως υπεύθynu για την κατιούσα υδάτινη ροή. Η κάθοδος αποτελείται από ένα διάτρητο σιδερένιο σωλήνα που μεταφέρει νερό (Neufert, 1992).



Εικόνα 16: Έλεγχος του υπόγειου νερού με τη μέθοδο της ηλεκτρο-όσμωσης

Πίνακας 4: Σταθεροποίηση Εδαφών

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ, ΑΣΒΕΣΤΟ, ΑΣΦΑΛΤΟ Ή ΑΠΛΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (ΚΟΛΙΑΣ 1979)			
Είδος σταθεροποίησης	Επηρεαζόμενες εδαφικές ιδιότητες	Αποτελέσματα σταθεροποίησης	Θέση σταθεροποιημένης στρώσης στο οδόστρωμα
Μηχανική σταθεροποίηση	<ul style="list-style-type: none"> - Κοκκομετρική διαβάθμιση - Πλαστικότητα - Περιεχόμενη υγρασία 	Βελτίωση της ικανότητας για συμπίκνωση και άλλων ιδιοτήτων του μείγματος που εξαρτώνται από τις αρχικές ιδιότητες των υλικών.	Βάση - Υπόβαση (ανεπαρκής για βάση δρόμων βαριάς κυκλοφορίας).
Σταθεροποίηση με άσβεστο	<ul style="list-style-type: none"> - Περιεχόμενη υγρασία - Όρια Atterberg - Δομή του εδάφους 	Δυνατότητα συμπίκνωσης με αυξημένη υγρασία. Μόνιμη ελάττωση της ευπάθειας στις επιδράσεις του νερού και του παγετού. Αύξηση αντοχής.	Υπέδαφος - Υπόβαση. Σπανιότερα για βάση δρόμων ελαφράς κυκλοφορίας.
Σταθεροποίηση με άσφαλτο	<ul style="list-style-type: none"> - Αντοχή 	Δημιουργία εύκαμπτης στρώσης, με αυξημένη φέρουσα ικανότητα, ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Κυρίως για βάση, σπανιότερα για υπόβαση.
Σταθεροποίηση με τσιμέντο	<ul style="list-style-type: none"> - Αντοχή - Δομή του εδάφους 	Δημιουργία στρώσης με αυξημένη φέρουσα ικανότητα, ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Βάση, υπόβαση, υπέδαφος. Αυτοδύναμα οδοστρώματα ελαφράς κυκλοφορίας που φέρουν λεπτή ασφαλτική επίστρωση.

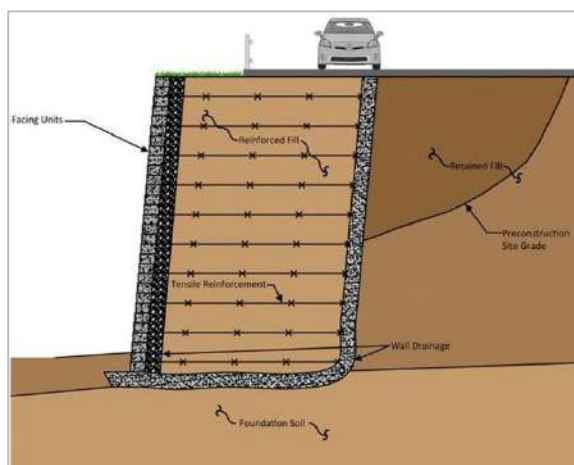
β. Εδαφική Όπλιση

- Λιθοπάσσαλοι ή χαλικοπάσσαλοι.

Αυτή η μέθοδος συνιστά τη διάνοιξη μεγάλων κυκλικών οπών στην προβληματική εδαφική βάση και την πλήρωσή τους με χαλίκι ή σπασμένο υλικό λατομείου. Σε ετούτη την εκδοχή, η αντοχή των πασσάλων είναι κρίσιμη. Όμως δεν είναι κρίσιμη η μεταφορική ιδιότητα του φορτίου προς το έδαφος.

- Ενισχυμένο έδαφος.

Η εδαφική υπόβαση μπορεί να βελτιωθεί με την τοπική εισαγωγή ενισχυτικών στοιχείων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή μεταλλικών λωρίδων στο έδαφος, μέσω γεωφάσματος, με την εισαγωγή χαλύβδινων ράβδων ή πασσάλων.



Εικόνα 17: Τοίχος αντιστήριξης από Οπλισμένη Γη



Εικόνα 18: Top feed method

γ. Συμπύκνωση.

- Δυναμική συμπύκνωση.

Συνιστάται η πτώση βάρους έως και 10 τόνων από ύψος 10 έως 40 μέτρων, όπως στη δοκιμή συμπύκνωσης του εδάφους Proctor. Λαμβάνει χρήση σε αμμώδη εδάφη χαλαρού χαρακτήρα.

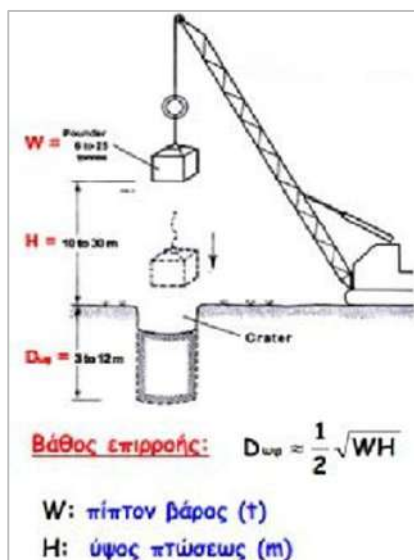
- Μέθοδοι μαζικής δόνησης.

Συνιστάται η εισαγωγή του δονητή σε χαλαρό, μη συνεκτικό έδαφος, προκαλώντας έτσι ακτινική συμπύκνωση.

Το εκρηκτικό υλικό τοποθετείται σε ένα δίκτυο γεωτρήσεων που δημιουργούν διαμήκη και διατμητικά κύματα κατά τη διάρκεια της έκρηξης, τα οποία προκαλούν την όξυνση της εδαφικής πυκνότητας υπό το βάρος του υπερκείμενου στρώματος.



Εικόνα 19: Εφαρμογή της μεθόδου δυναμικής συμπίκνωσης



Εικόνα 20: Χαρακτηριστικά μεγέθη της μεθόδου δυναμικής συμπίκνωσης

δ. Σταθεροποίηση του εδάφους με τη χρήση τσιμέντου, ασβέστου ή και άλλων χημικών προσθέτων.

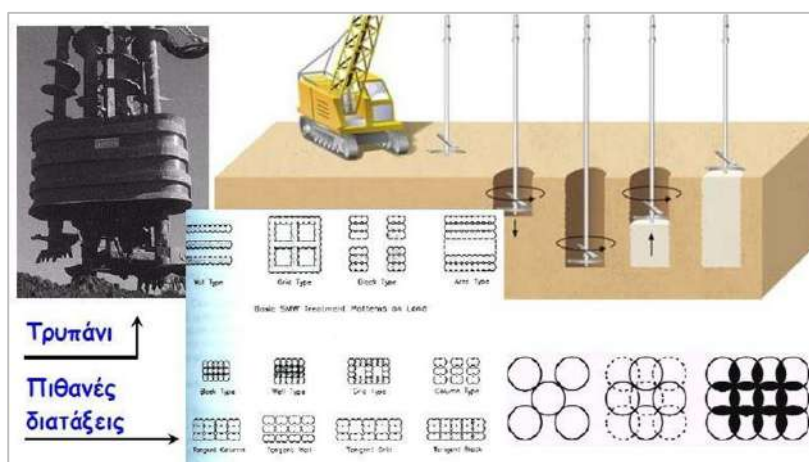
- Ασβεστοπάσσαλοι.

Χρησιμοποιώντας ένα ειδικό αυτοπροωθούμενο μηχάνημα, ανοίγεται μια τρύπα στον αργιλώδη αργιλώδη και τα στελέχη εξάγονται, ενώ άνυδρη σκόνη ασβέστη αντλείται στο

έδαφος. Ταυτόχρονα, ολόκληρο το σύστημα «χώμα-άσβεστος» αναμειγνύεται για να σχηματιστεί μια κάθετη στήλη.

- Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου.

Η μέθοδος κατασκευής της ανάμιξης πασσάλου και διαχωρισμού τσιμέντου-εδάφους είναι η ίδια με αυτή των ασβεστοπασσάλων.



Εικόνα 21: Βελτίωση του εδάφους με Βαθεία Εδαφική Ανάμιξη

Σύμφωνα με τον Κόλια, 1979, στον παρακάτω πίνακα είναι εμφανείς όλες οι λεπτομέρειες περί σταθεροποίησης εδαφών με τσιμέντο, άσβεστο, άσφαλτο ή με απλή συμπίκνωση.

Πίνακας 5: Λεπτομέρειες περί σταθεροποίησης εδαφών με τσιμέντο, άσβεστο, άσφαλτο ή με απλή συμπίκνωση

Είδος σταθεροποίησης	Επηρεαζόμενες εδαφικές ιδιότητες	Αποτελέσματα της σταθεροποίησης	Θέση σταθεροποιημένης στρώσης στο οδόστρωμα
Μηχανική σταθεροποίηση	1. Κοκκομετρική διαβάθμιση 2. Πλαστικότητα 3. Περιεχόμενη υγρασία	Βελτίωση της ικανότητας για συμπίκνωση και άλλων ιδιοτήτων του μίγματος, που εξαρτώνται από τις αρχικές ιδιότητες των υλικών.	Βάση-Υπόβαση (Ανεπαρκής για βάση δρόμων βαρέας κυκλοφορίας)
Σταθεροποίηση με άσβεστο	1. Περιεχόμενη υγρασία 2. Όρια Atterberg 3. Δομή του εδάφους	Δυνατότητα συμπίκνωσης με αυξημένη υγρασία. Μόνιμη ελάττωση της ευπάθειας στις επιδράσεις του νερού και του παγετού. Αύξηση αντοχής.	Υπέδαφος-Υπόβαση Σπανιότερα για βάση δρόμων ελαφράς κυκλοφορίας.
Σταθεροποίηση με άσφαλτο	Αντοχή	Δημιουργία στρώσης εύκαμπτης, με αυξημένη φέρουσα ικανότητα ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Κυρίως για βάση Σπανιότερα για υπόβαση
Σταθεροποίηση με τσιμέντο	1. Αντοχή 2. Δομή του εδάφους	Δημιουργία στρώσης με αυξημένη φέρουσα ικανότητα, ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Βάση, υπόβαση, υπέδαφος. Αυτοδύναμα οδοστρώματα ελαφράς κυκλοφορίας που φέρουν λεπτή ασφαλτική επίστρωση.

ε. Ενέσεις.

Η έγχυση είναι η παροχή ειδικών υγρών υπό πίεση στο έδαφος, τα οποία στερεοποιούνται γρήγορα και καλυτερεύουν και ένταση τη συμπεριφορά του.

- τις ενέσεις στεγανοποίησης που προκαλούν κυρίως μείωση διαπερατότητας και χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση υπογείων ροών και τις ενέσεις σταθεροποίησης που έχουν ως στόχο την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας.

Σύμφωνα με τις βασικές επηρεαζόμενες ιδιότητες, χωρίζουμε την έγχυση σε δύο κατηγορίες:

- Οι εγχύσεις στεγανοποίησης που έχουν κυρίως ως αποτέλεσμα μειωμένη διαπερατότητα και λαμβάνουν χρήση προς επίλυση των υπόγειων ροών και των εγχύσεων σταθεροποίησης που στοχεύουν στην όξυνση της αντοχής και στη μείωση της ιδιότητας συμπίεσης.

Ανάλογα με τη μέθοδο της ένεσης, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- εγχύσεις διαποτισμού,
- εγχύσεις εγκλωβισμού,
- εγχύσεις εκτοπίσεως ή συμπύκνωσης
- εγχύσεις πλήρωσης κενού.

Οι επικρατέστεροι τύποι ενέματος είναι εναιωρήματα τσιμέντου, όπως τσιμεντοειδές, ή μείγμα χόματος και τσιμέντου, ή απλώς χόμα σε νερό, και χημικές διαλύσεις, συνήθως κατασκευασμένα από πυριτικά ή πολυμερή υλικά.

Σε περιπτώσεις που επιδιώκεται η προσαρμογή των ιδιοτήτων του μίγματος εδάφους-τσιμέντου, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν οργανικοί σταθεροποιητές ή πρόσθετα ή ακόμα και άργιλος μπεντονίτη), για παράδειγμα στην περίπτωση τσιμεντοποίησης φρεατίων.

στ. Θερμική δράση

- Εδαφική θέρμανση

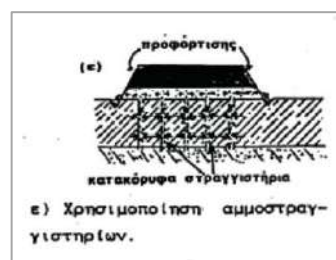
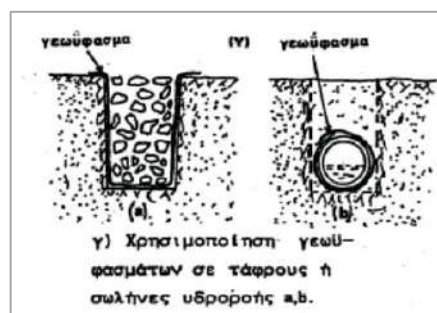
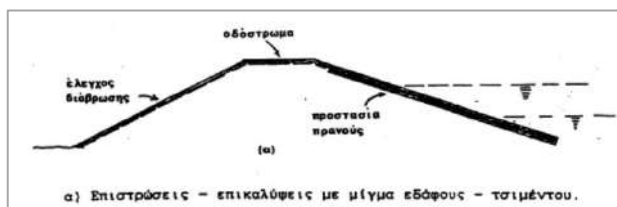
Αυτή η μέθοδος είναι η οικονομικότερη από τις προηγούμενες μεθόδους και είναι κατάλληλη για εδάφη χαλαρού χαρακτήρα με υψηλή διαπερατότητα και συνιστάται για διάτρηση με βελόνες και για εισβολή πολύ ζεστού αέρα και μιγμάτων καυσίμων στο έδαφος.

Η πίεση είναι 1,5 μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Συμπύκνωση λόγω απώλειας νερού και αυξημένη αντιδραστική τάση σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 300°C έως 1000°C.

Σε θερμοκρασία 550°C, η ικανότητα διαστολής του πηλού καταστρέφεται στους 1000°C και οι κόκκοι της άμμου λιώνουν και σχηματίζουν ένα τεχνητό τσιμέντο.

Στον παρακάτω πίνακα εικόνων είναι εμφανείς όλες εκείνες οι περιπτώσεις στήριξης της εδαφικής υπόβασης, σχετιζόμενοι με όλες τις προαναφερόμενες μεθόδους.

Πίνακας 6: Περιπτώσεις στήριξης της εδαφικής υπόβασης



ζ. Εδαφική ψύξη.

Οι μέθοδοι ψύξης έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός παγωμένου υδάτινου φράγματος εκτός της επιφάνειας κατασκευής. Ειδικότερα, σχετικά με τις τακτικές προς εδαφική βελτίωση – εδαφική σταθεροποίηση υφίστανται οι εξής επιμέρους κατηγορίες:

- Συμπυκνούμενη Σταθεροποίηση.
- Σταθεροποίηση με χαρακτήρα μηχανικό και ανάμιξη πολλαπλών υλικών
- Σταθεροποιήσεις χημικού ή φυσικοχημικού χαρακτήρα μέσω χρήσης «σταθεροποιητών»

Μεταξύ των παραπάνω μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους, η σταθεροποίηση τσιμέντου έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στο έδαφος και είναι επίσης μια οικονομική μέθοδος. Σύμφωνα με τον Mitchell (1981), η εδαφική σταθεροποίηση με τσιμέντο χαρακτηρίζεται από ένα μέσης τάξεως σχετικό κόστος συγκρινόμενο με λοιπές εδαφικά βελτιωτικές μεθόδους.



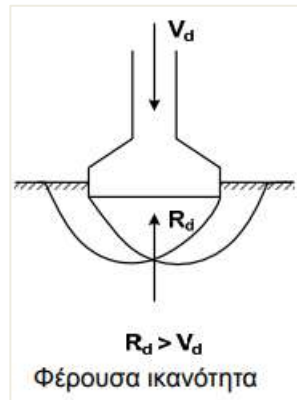
Εικόνα 22: Διάταξη ψύξης του εδάφους για σταθεροποίηση



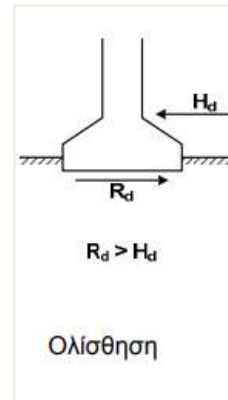
Εικόνα 23: Εφαρμογή μεθόδου ψύξης του εδάφους σε βαθιά εκσκαφή

Η Βελτίωση του Εδάφους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας (Vesic, 1973). Δηλαδή:

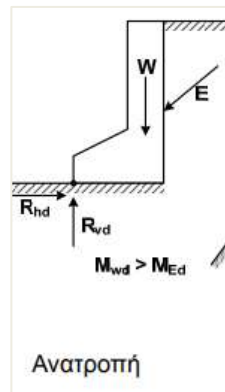
- Υπέρβαση κατακόρυφης φέρουσας ικανότητας (τύπου GEO)
- Υπέρβαση της αντίστασης σε ολίσθηση (τύπου GEO)
- Ανατροπή (τύπου EQU)
- Απώλεια Ολικής Ευστάθειας (τύπου GEO)



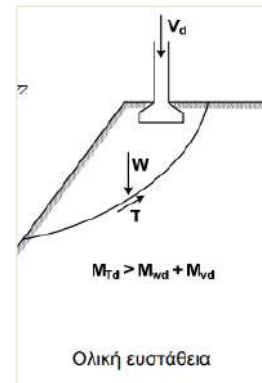
Σχήμα 1: Υπέρβαση κατακόρυφης φέρουσας ικανότητας. Πηγή: Vesic, 1973



Σχήμα 2: Υπέρβαση της αντίστασης σε ολίσθηση. Πηγή: Vesic, 1973



Σχήμα 3: Ανατροπή. Πηγή: Vesic, 1973



Σχήμα 4: Απώλεια Ολικής Ευστάθειας. Πηγή: Vesic, 1973

3.1 ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

3.1.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΈΝΑΝΤΙ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

$$V_d \leq R_{vd}$$

- V_d = τιμή σχεδιασμού της δράσης επί του θεμελίου. Περιλαμβάνει το βάρος της θεμελίωσης θεμελίωσης, το βάρος τυχόν υλικού επανεπίχωσης και όλες τις πιέσεις πιέσεις γαιών, είτε ευμενείς είτε δυσμενείς. Οι υδατικές πιέσεις οι οποίες δεν προκαλούνται από το φορτίο της θεμελίωσης πρέπει να περιλαμβάνονται ως δράσεις.
- R_{vd} = τιμή σχεδιασμού της αντίστασης του εδάφους (φέρουσα ικανότητα).

$$R_{vd} = (1/\gamma_R) R (F_k, X_k)$$

Για τον υπολογισμό του $R (F_k, X_k)$ πρέπει να χρησιμοποιείται μια αναγνωρισμένη αναλυτική μέθοδος. Μπορεί να εφαρμόζεται η μέθοδος αναλυτικού υπολογισμού για τη φέρουσα ικανότητα που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Δ του EN 1997-1.

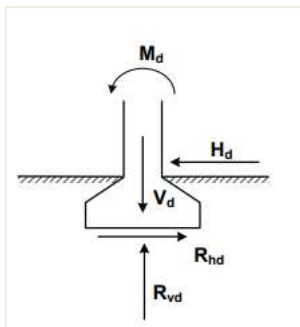
Κατά το Εθνικό Προσάρτημα του EN 1997-1, ο έλεγχος γίνεται με τον Τρόπο Ανάλυσης 2* (DA-2*), δηλαδή με τη σχέση:

$$\gamma_E V (F_k, X_k) \leq (1/\gamma_R) R (F_k, X_k) \text{ ή}$$

$$V (\gamma_F F_k, X_k) \leq (1/\gamma_R) R (F_k, X_k)$$

Επιμέρους συντελεστές ομάδας A1 + R2:

$$A1: \gamma_F = \gamma_E = 1.35 \text{ ή } 1.50 \text{ και } R2: \gamma_R = 1.40$$



Πίνακας Α.3 – Επιμέρους συντελεστές στις δράσεις (γ_E) ή στα αποτελέσματα των δράσεων (γ_E)

Δράση		Σύμβολο	Ομάδα	
			A1	A2
Μόνιμη	Δυσμενής	γ_E	1,35	1,0
	Ευνοϊκή		1,0	1,0
Μεταβλητή	Δυσμενής	γ_E	1,5	1,3
	Ευνοϊκή		0	0

Πίνακας Α.5 - Επιμέρους συντελεστές αντίστασης (γ_R) για επιφανειακές θεμελιώσεις

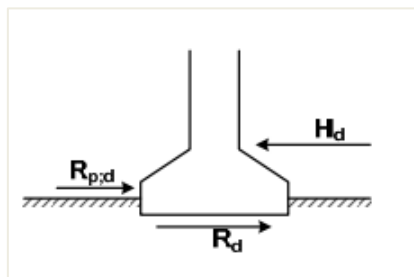
Αντίσταση	Σύμβολο	Ομάδα		
		R1	R2	R3
Φέρουσα	γ_{Rv}	1,0	1,4	1,0
Ολισθητική	γ_{Rh}	1,0	1,1	1,0

Ισοδύναμος ενιαίος συντελεστής ασφαλείας: $FS = \gamma_F \gamma_R \approx 1.40 \times 1.40 = 1.96$

3.1.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΣΤΗ ΒΑΣΗ

Πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη ανισότητα:

$$H_d \leq R_d + R_{p;d}$$



- H_d = τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας (συνήθως οριζόντιας) δράσης που ασκείται στο

θεμέλιο. Περιλαμβάνει τις τιμές σχεδιασμού των ενεργών ωθήσεων γαιών οι οποίες ασκούνται στη θεμελίωση.

- R_d = τιμή σχεδιασμού της αντίστασης του θεμελίου σε ολίσθηση.
- $R_{p;d}$ = τιμή σχεδιασμού της αντίστασης στην παρειά του πεδύλου, π.χ. παθητική αντίσταση ή κάποιο ποσοστό αυτής (εφόσον βεβαίως μπορεί να αναπτυχθεί για την οριακή μετακίνηση μετακίνηση του πεδύλου πεδύλου κατά την ολίσθηση ολίσθηση).

Κατά το Εθνικό Προσάρτημα, η ανάλυση γίνεται με τον Τρόπο Ανάλυσης 2* (DA-2*).

Τιμή σχεδιασμού της δράσης:

$$H_d = \gamma_E H (F_k, X_k) \text{ ή } H_d = H (\gamma_F F_k, X_k)$$

Επιμέρους συντελεστές ομάδας A1 (Πίνακας A.3):

$$\gamma_F = \gamma_E = 1.35 \text{ ή } 1.50$$

Τιμή σχεδιασμού της αντίστασης $R_{p;d} = R_p / \gamma_R$

Τιμή σχεδιασμού της αντίστασης R_d :

$$\text{όπου } \gamma_R = 1.40 \text{ (Πίνακας A.5)}$$

Για στραγγισμένες συνθήκες : $R_d = (V'_k \tan \delta_k) / \gamma_{R;h}$

Για αστράγγιστες συνθήκες : $R_d = (A_c C_{u;k}) / \gamma_{R;h}$

V'_k = χαρακτηριστική τιμή της κατακόρυφης δράσης στο πέδιλο

δ_k = γωνία τριβής της διεπιφάνειας πεδύλου – εδάφους. Ίση με την χαρακτηριστική χαρακτηριστική τιμή της ενεργού ενεργού γωνίας διατμητικής διατμητικής αντίστασης αντίστασης στην οριακή κατάσταση,

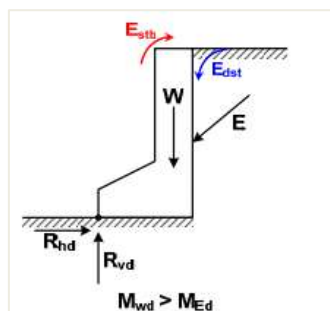
A_c = επιφάνεια επαφής του θεμελίου με το έδαφος

$C_{u;k}$ = χαρακτηριστική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής

$\gamma_{R;h}$ = επιμέρους συντελεστής ολίσθησης (Πίνακας A.5, Παράρτημα A).

3.1.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΈΝΑΝΤΙ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ (ΤΥΠΟΥ EQU)

$$E_{dst,d} < E_{stb,d} \Rightarrow \gamma_{dst} E_{dst,k} < \gamma_{stb} E_{stb,k}$$



$E_{dst,d}$ = Τιμή σχεδιασμού της συνιστάμενης ροπής ανατροπής Τιμή σχεδιασμού της συνιστάμενης ροπής ανατροπής ως προς τον άξονα ανατροπής

$E_{stb,d}$ = τιμή σχεδιασμού της συνιστάμενης σταθεροποιητικής ροπής ως προς τον άξονα ανατροπής ανατροπής

Η ανάλυση γίνεται με τον Τρόπο 2* (DA-2*). Εφαρμόζονται οι επιμέρους συντελεστές του Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α του EN 1997-1:

Πίνακας Α.1 Επιμέρους συντελεστές σε δράσεις (γ_F)

Δράση	Σύμβολο	Τιμή
Μόνιμη Δυσμενής ^α	$\gamma_{G,dst}$	1,1
Ευνοϊκή ^β	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Μεταβλητή Δυσμενής ^α	$\gamma_{Q,dst}$	1,5
Ευνοϊκή ^β	$\gamma_{Q,stb}$	0

^α Αποσταθεροποιητική ^β Σταθεροποιητική

Ισοδύναμος ενιαίος συντελεστής ασφαλείας: $FS = \gamma_{dst} / \gamma_{stb} = 1.10 / 0.9 = 1.22$

3.1.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΟΛΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Η ολική ευστάθεια της θεμελίωσης πρέπει να ελέγχεται στις εξής καταστάσεις:

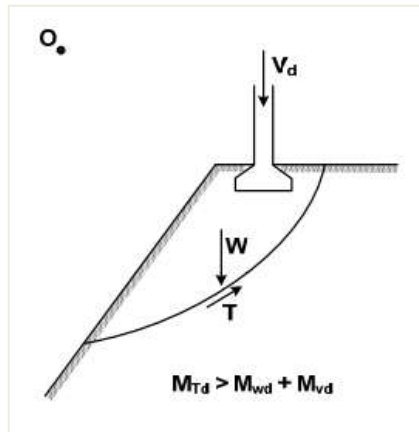
- κοντά ή πάνω σε κεκλιμένο έδαφος, φυσικό πρανές ή επίχωμα
- κοντά σε εκσκαφή ή τοίχο αντιστήριξης
- κοντά σε ποτάμι, διώρυγα, λίμνη, ταμιευτήρα ή θαλάσσια ακτή
- κοντά σε ορυχεία ή υπόγειες κατασκευές.

Σε τέτοιες καταστάσεις, πρέπει να αποδεικνύεται, με βάση τις αρχές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 11 του EN 1997-1, ότι η πιθανότητα να συμβεί απώλεια ευστάθειας της εδαφικής μάζας που περιέχει τη θεμελίωση είναι επαρκώς μικρή.

Κατά το Εθνικό Προσάρτημα, η ανάλυση γίνεται με τον Τρόπο Ανάλυσης 3 (DA-3).

$$R_d > E_d$$

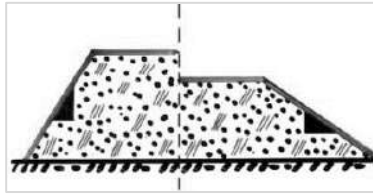
$$R (\gamma_F F_k, X_k / \gamma_M) > E (\gamma_F F_k, X_k / \gamma_M)$$



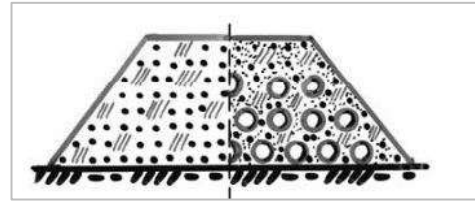
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Προς επίτευξη μείωσης του φορτίου προβλέπεται (Comodromos, 2004):

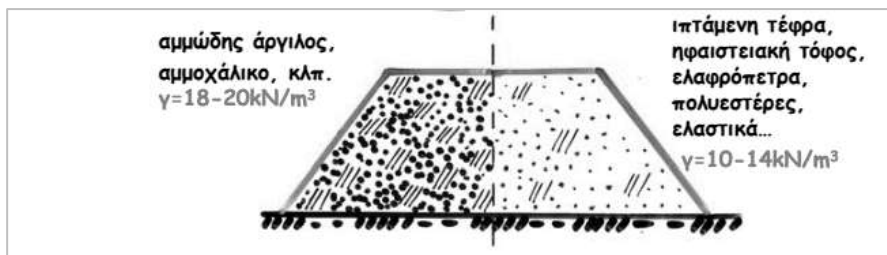
- Η μείωση ύψους του επιχώματος (Σχήμα 5).
- Η αύξηση κλίσης των πρανών (Σχήμα 5).
- Η χρήση «ελαφρών» υλικών επίχωσης (αμμώδης άργιλος, αμμοχάλικο/ιπτάμενη τέφρα, ηφαιστειακή τόφος, ελαφρόπετρα, πολυεστέρες, ελαστικά) (Σχήμα 7).
- Η τοποθέτηση «σωλήνων» εντός του επιχώματος (Σχήμα 6).
- Η αύξηση του βάθους θεμελίωσης (προς επίτευξη «επιπλέουσας» θεμελίωσης) (Σχήμα 8-9).



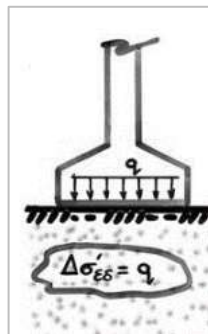
Σχήμα 5: Μέθοδοι Μείωσης Φορτίου/Αύξηση κλίσης πρανών. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



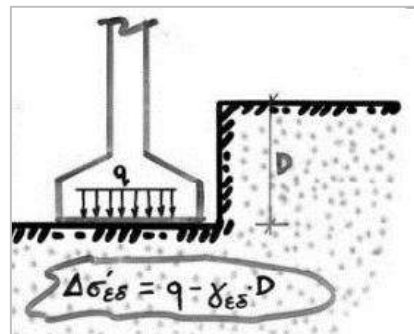
Σχήμα 6: Τοποθέτηση «σωληνών» εντός του επιχώματος. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



Σχήμα 7: Χρήση «ελαφρών» υλικών επίχωσης. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



Σχήμα 8: Αύξηση βάθους θεμελίωσης "επιπλέονσα" θεμελίωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



Σχήμα 9: Αύξηση βάθους θεμελίωσης "επιπλέονσα" θεμελίωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ

Πολλές υποβαθμισμένες, από πλευράς εδαφικών χαρακτηριστικών, περιοχές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έργων είτε λόγω έλλειψης χώρων (περιαστικές περιοχές) είτε λόγω αύξησης των απαιτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μεγάλων έργων υποδομής.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι Μέθοδοι Βελτίωσης του Εδάφους.

Πίνακας 7: Μέθοδοι Βελτίωσης του Εδάφους. Πηγή: <https://www.ktirio.gr/>

ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	
Μηχανισμός βελτίωσης	Μέθοδος
Στερεοποίηση	- Προφόρτιση - Προφόρτιση με στραγγιστήρια - Ηλεκτρική όσμωση
Οπίλισμός του εδάφους (χρήση στοιχείων που μπορούν να παραλάβουν δυνάμεις ελκυσμού ή θλίψης)	- Λιθοπάσσαλοι - Οπίλισμένο έδαφος - Γεωκράσματα - Ριζοπάσσαλοι - Κάρφωμα εδάφους
Συμπύκνωση	- Δυναμική συμπύκνωση - Πάσσαλοι συμπύκνωσης - Μέθοδοι μαζικής δόνησης - Εκρήξεις
Βαθιά εδαφική ανάμειξη (χημική σταθεροποίηση)	- Ασβεστοπάσσαλοι - Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμειξη εδάφους & ταιμέντου - Υποβάσεις δρόμων - Επικαλύψεις πριανών
Ενέσεις	- Ενέσεις διαποτισμού - Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης
Θερμική δράση	- Θέρμανση του εδάφους - Ψύξη του εδάφους

3.3.1 ΒΕΛΤΙΩΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ» ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ

Η μέθοδος της προφόρτισης εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα μαλακά εδάφη (κυρίως αργιλικά),

στοχεύοντας στη στερεοποίησή τους. Αποτελεί τον πιο απλό και οικονομικό τρόπο βελτίωσης εδαφών, ενώ ως μειονέκτημα διακρίνεται η απαίτηση χρόνου (Ατματζίδης et al., 2006).

Η προφόρτιση εφαρμόζεται κυρίως σε έργα οδοποιίας αλλά και σε θεμελιώσεις κτιρίων, υπό την προϋπόθεση ότι τα φορτία της κατασκευής δεν θα είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένα. Η μέθοδος συνίσταται στη συσσώρευση εδαφικού υλικού (επίχωμα προφόρτισης) και την τοποθέτησή του με μορφή σωρών επί της έκτασης που πρόκειται να βελτιωθεί, για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται, ώστε το έδαφος να αποκτήσει την κατάλληλη αντοχή. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική, εφόσον η τάση της προφόρτισης είναι μεγαλύτερη από την τάση προστερεοποίησης του εδάφους. Με άλλα λόγια, τα προσωρινά φορτία που θα τοποθετηθούν πρέπει να είναι μεγαλύτερα από εκείνα που εφαρμόστηκαν προγενέστερα στο έδαφος (Ατματζίδης et al., 2006).

Σε περιορισμένες εκτάσεις η προφόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί με την κατασκευή δεξαμενής και την πλήρωσή της με νερό. Σε γραμμικά έργα μικρού πλάτους η προφόρτιση μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων (Ma et al., 2002).

Επίσης εναλλακτικούς τρόπους προφόρτισης αποτελούν η κατάλληλη άντληση και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου νερού, καθώς και η επιφανειακή διαβροχή στεγνών χαλαρών αποθέσεων (Ma et al., 2002).

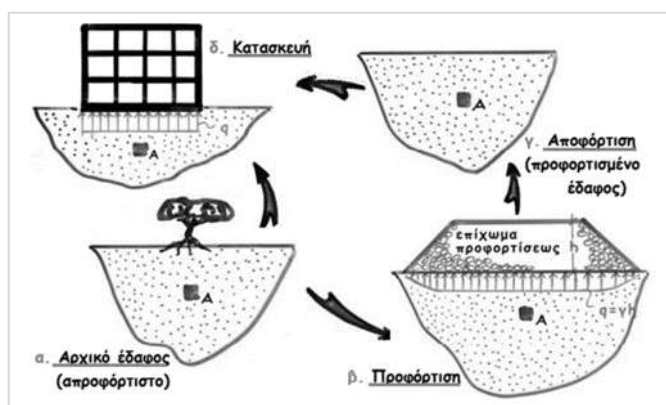
Η προφόρτιση είναι πιο αποτελεσματική όταν συνδυάζεται με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων, η οποία συνίσταται στη δημιουργία κατακόρυφων στηλών αυξημένης διαπερατότητας στο έδαφος, με σκοπό την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης. Τα στραγγιστήρια επικοινωνούν με ένα οριζόντιο στρώμα μεγάλης διαπερατότητας (π.χ. ένα κοκκώδες στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους, κάτω από το επίχωμα προφόρτισης) (Ατματζίδης et al., 2006).

Μ' αυτόν τον τρόπο το νερό των πόρων ρέει οριζόντια προς το πλησιέστερο στραγγιστήριο και από εκεί κατακόρυφα προς τη στρώση αποστράγγισης. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη, στα οποία η καθίζηση από δευτερεύουσα στερεοποίηση δεν είναι σημαντική (Ατματζίδης et al., 2006).

Τα στραγγιστήρια μπορεί να αποτελούνται είτε από αμμοπασσάλους ή χαλικοπασσάλους με συνήθη διάμετρο 0,50 - 1,0 m είτε από γεωσύνθετα στραγγιστήρια μορφής λωρίδας με σύνηθες πλάτος 100 mm (Ma et al., 2002).

Τα τελευταία προτιμώνται λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων (Ατματζίδης et al., 2006):

- Καθαρότερο εργοτάξιο.
- Μικρότερη διατάραξη του εδάφους (ιδιαίτερα σημαντικό σε ευαίσθητες αργίλους).
- Χαμηλό κόστος.
- Υψηλή ταχύτητα τοποθέτησης.
- Εξασφάλιση συνέχειας στραγγιστηρίου,
- Μικρότερη διακίνηση αδρανών υλικών.



Σχήμα 10: Βελτίωση «μαλακού» εδάφους με προφόρτιση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

3.3.2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ» ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΒΑΘΙΑ ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

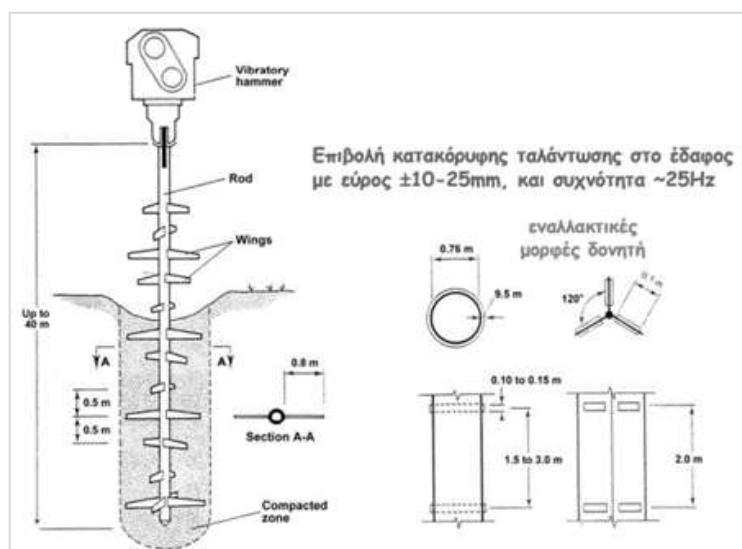
Οι μέθοδοι συμπίκνωσης επιφέρουν τη φυσική συμπίεση του εδάφους για τη μείωση των κενών χώρων μεταξύ των κόκκων του υλικού (αέρα ή νερού) και την αύξηση του ειδικού βάρους και της και μη συνεκτικών υλικών σε κατάλληλες αναλογίες. Αμιγή συνεκτικά υλικά, άμμος και χάλικες φυσικής προέλευσης του ίδιου περίπου μεγέθους κόκκου συμπυκνώνονται δύσκολα (Ατματζίδης et al., 2006).

Αντίθετα, υλικά με καλή διαβάθμιση και ανάμειξη συμπυκνώνονται ευκολότερα. Η δονητική συμπίκνωση συνίσταται στην εισαγωγή δονητή σε χαλαρά, μη συνεκτικά εδάφη, στα οποία προκαλεί ακτινωτή συμπίκνωση. Η μέθοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί με επιβολή κατακόρυφης ή οριζόντιας ταλάντωσης στο έδαφος (Ma et al., 2002).

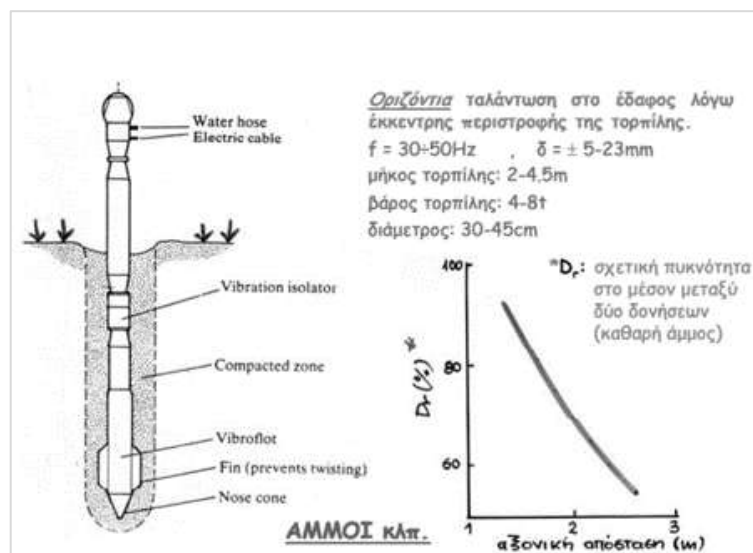
Η δονητική συμπίκνωση είναι δυναμικό φαινόμενο και επομένως το αποτέλεσμα δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της φυγόκεντρου δύναμης και από το στατικό βάρος της μηχανής αλλά και από τη συχνότητα διέγερσης, τη μορφή και την ίδια συχνότητα του εδάφους (Ατματζίδης et al., 2006).

Κατά συνέπεια, τα στοιχεία λειτουργίας (συχνότητα διέγερσης, αντίβαρο, φυγόκεντρη δύναμη και στατικό βάρος συμπυκνωτή) πρέπει να προσδιορίζονται με δοκιμές επάνω στο υπό συμπίκνωση υλικό. Οι μέθοδοι βαθιάς δονητικής συμπίκνωσης είναι αποτελεσματικές για (καθαρές) άμμους με ποσοστό ιλύος $\leq 10\%$ - 15% και ποσοστό αργίλου $\leq 5\%$ (Ma et al., 2002).

Η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος και ιδιαίτερα το ποσοστό αργίλου. Σε έργα θεμελίωσης η μέθοδος μπορεί να συνδυαστεί με μερική αντικατάσταση του εδάφους από υλικό, το οποίο κατόπιν μπορεί να αποτελέσει τη βάση της θεμελίωσης (Ατματζίδης et al., 2006).

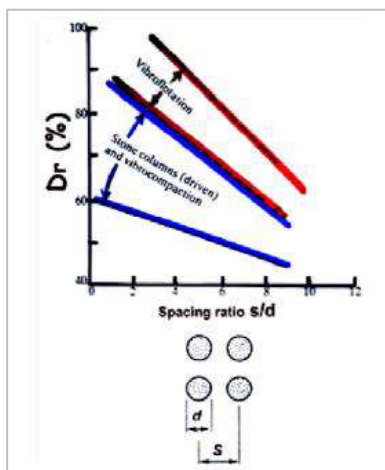


Σχήμα 11: Βελτίωση «μαλακού» εδάφους με Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

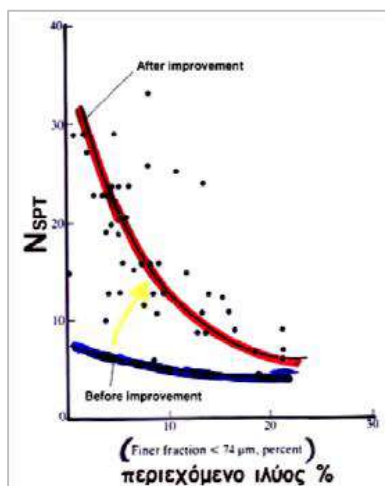


Σχήμα 12: Βελτίωση «μαλακού» εδάφους με Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

Οι μέθοδοι βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης είναι αποτελεσματικές για καθαρές άμμους με ποσοστό ιλύος $\leq 10-15\%$. Η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλύος και αργίλου. Το συμπέρασμα ετούτο είναι εμφανές και στα παρακάτω δύο διαγράμματα (Μπουκοβάλας, 2009).



Σχήμα 13: Μέθοδοι Βαθείας Δονητικής Συμπύκνωσης. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

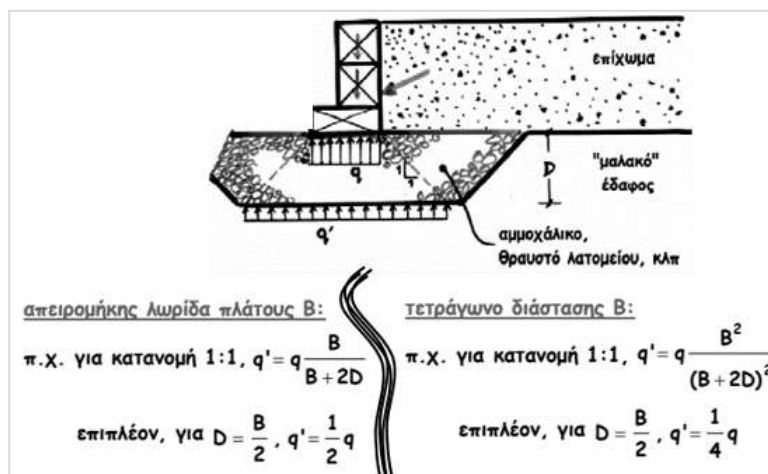


Σχήμα 14: Μέθοδοι Βαθείας Δονητικής Συμπύκνωσης. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ

3.4.1 ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ» ΕΛΑΦΟΥΣ

Η αντικατάσταση του "μαλακού" εδάφους με κατάλληλο υλικό (αμμοχάλικο, θραυστό λατομείου κτλ.) μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους όπως εκσκαφή και επιχωμάτωση, εκτόπιση υπό το ίδιο βάρος της εξυγίανσης ή εκτόπιση με τη βοήθεια εκρηκτικών. Η μέθοδος της αντικατάστασης είναι συμφέρουσα μόνο όταν το ακατάλληλο έδαφος χαρακτηρίζεται από περιορισμένο βάθος στρώσης (Σταυριδάκης, 2003).



Σχήμα 15: Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους – Αντικατάσταση «μαλακού εδάφους». Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

3.4.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ» ΜΕ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

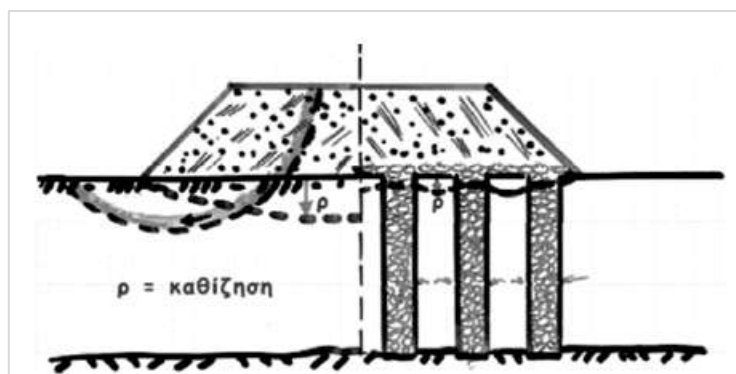
Η κατασκευή χαλικοπασσάλων συνίσταται στη διάνοιξη κυκλικών οπών σημαντικού μήκους στο προβληματικό έδαφος και την πλήρωσή τους με χάλικες ή με θραυστό υλικό λατομείου. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως στους τύπους των εδαφών (όπως στα ιλυώδη και αργιλικά εδάφη), στα οποία η δονητική συμπύκνωση δεν έχει αξιόλογα αποτελέσματα (Σταυριδάκης, 2003).

Χαρακτηρίζεται από σύνθετη δράση καθώς επιτυγχάνει (Impe, 1989):

- ανάληψη φορτίου,
- αύξηση της ισοδύναμης διατμητικής αντοχής,
- επιτάχυνση των καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη λόγω στερεοποίησης,
- συμπύκνωση αμμωδών εδαφών.

Στη διεθνή πρακτική διακρίνονται διάφορες μέθοδοι κατασκευής χαλικοπασσάλων, μεταξύ των οποίων η επιβολή κατακόρυφης ή οριζόντιας ταλάντωσης στο έδαφος. Η ελληνική μέθοδος κατασκευής χαλικοπασσάλων περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Impe, 1989):

- Έμπηξη μεταλλικού σωλήνα εντός του εδάφους. Το κάτω άκρο του σωλήνα είναι σφραγισμένο με ειδικό πάμα.
- Πλήρωση του σωλήνα με κοκκώδες υλικό.
- Τμηματική εξόλκευση του σωλήνα σε προκαθορισμένο τμήμα.
- Επανεμπήξη του σωλήνα σε προκαθορισμένο τμήμα, κλείσιμο του ειδικού πάματος και συμπύκνωση του κοκκώδους υλικού. Ακολουθεί η διεύρυνση της αρχικής διαμέτρου.
- Συνεχείς, πολλαπλές εξολκεύσεις και επανεμπήξεις.



Σχήμα 16: Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους – Ενίσχυση «μαλακού εδάφους» με χαλικοπασσάλους. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

3.4.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ «ΜΑΛΑΚΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ» ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ

Πρόκειται για τη βελτίωση του εδάφους με την εισαγωγή γεωφασμάτων, γεωπλεγμάτων, χαλύβδινων ράβδων και ηλώσεων ή με την εισαγωγή ριζοπασσάλων. Εφαρμόζεται σε μεγάλα τεχνικά έργα (οδοποιίας, κατασκευής Χ.Υ.Τ.Α. κ.ά.), καθώς και σε έργα κατασκευής κτιρίων (Σταυριδάκης, 2003).

Τα γεωφάσματα και τα γεωπλέγματα λειτουργούν ως οπλισμός μέσω του μηχανισμού διάτμησης και του μηχανισμού αγκύρωσής τους στο περιβάλλον έδαφος. Τα γεωφάσματα κατασκευάζονται από θερμοπλαστικά υλικά όπως πολυαμίδες, πολυαιθυλένιο, πολυεστέρες, πολυπροπυλένιο, χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC) και χλωριούχο πολυαιθυλένιο. Τα γεωπλέγματα κατασκευάζονται από πολυπροπυλένιο ή υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (Σταυριδάκης, 2003).

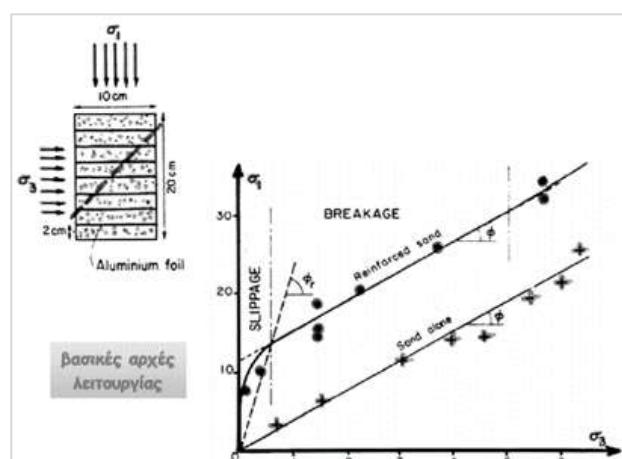
Τα γεωφάσματα χρησιμοποιούνται συνήθως (Βαλάλας, 1979):

- σε έργα δικτύων μεταφορών (δρόμους, αεροδρόμια, σιδηροδρομικές γραμμές κ.ά.), στα οποία λειτουργούν ως διαχωριστικά ή/και φίλτρα σε περιοχές που αντιμετωπίζουν κινδύνους από υπόγεια νερά.
- ως βασικά υλικά στη σχεδίαση και στην κατασκευή μιας ποικιλίας θαλάσσιων και υδραυλικών μηχανικών κατασκευών όπως σε επικαλύψεις, ύφαλους και έξαλους κυματοθραύστες σωληνοειδείς κατασκευές και κατασκευές απόθεσης οργανικά και χημικά βεβαρυμένης λάσπης.
- ως υλικά στην ενίσχυση κατασκευών, όπως σε τοίχους αντιστήριξης, πρανή και αναχώματα, στις οποίες παρέχουν ελαστική αντίσταση στο έδαφος, ενισχύοντας τα χαρακτηριστικά του.

Η σταθεροποίηση εδαφών με τη χρήση δύσκαμπτων διαζονικών γεωπλεγμάτων αποτελεί μια σύγχρονη, γρήγορη και οικονομική μέθοδο, η οποία λαμβάνει χώρα ολοκληρωτικά στην επιφάνεια του ασθενούς εδάφους, χωρίς να απαιτείται η εκσκαφή ή οποιαδήποτε άλλη αναταραχή του υφιστάμενου, "ασθενούς", εδαφικού υλικού. Στρώσεις διαζονικών γεωπλεγμάτων τοποθετούνται απευθείας στην επιφάνεια του ασθενούς εδάφους και έπειτα καλύπτονται με στρώσεις συμπυκνωμένου κοκκώδους υλικού, κατάλληλου μεγέθους και καλής διαβάθμισης (Impe, 1989).

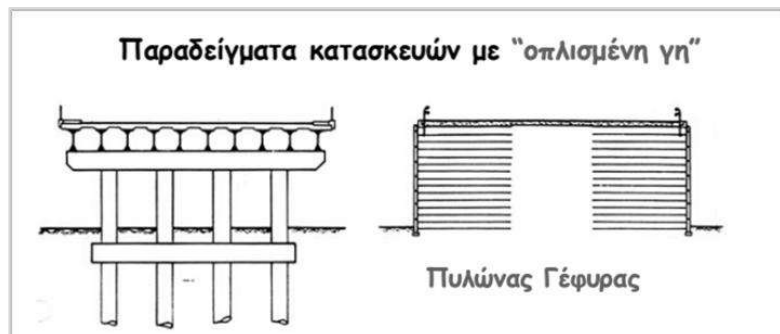
Οι ριζοπάσσαλοι εφαρμόζονται σε συνεκτικά εδάφη, συνήθως κατακερματισμένα, και χαρακτηρίζονται από υψηλή ταχύτητα κατασκευής. Για τη διασωλήνωση της οπής δεν γίνεται χρήση σωλήνα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στο σώμα του πασσάλου ανωμαλίες και ριζώματα, στα οποία οφείλεται ο χαρακτηρισμός του (Βαλάλας, 1979).

Η διάμετρος των πασσάλων κυμαίνεται μεταξύ 75 και 250 mm και ο οπλισμός αποτελείται από μια μόνο κεντρική ράβδο, όταν η διάμετρος είναι μικρότερη των 140 mm, ενώ αποτελείται από κλωβό, όταν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη (Σταυριδάκης, 2003).

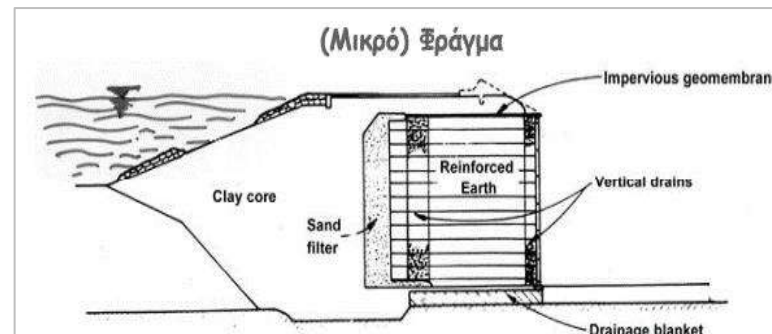


Σχήμα 17: Μέθοδοι Ενίσχυσης του Εδάφους – Ενίσχυση με οπλισμό. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

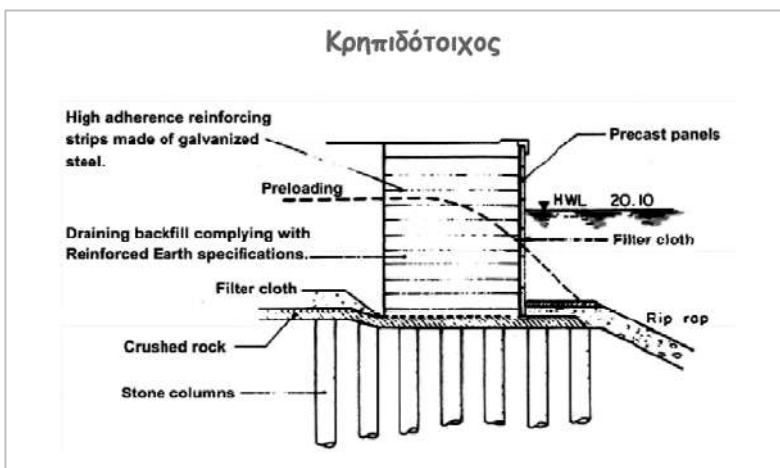
3.4.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ «ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ»



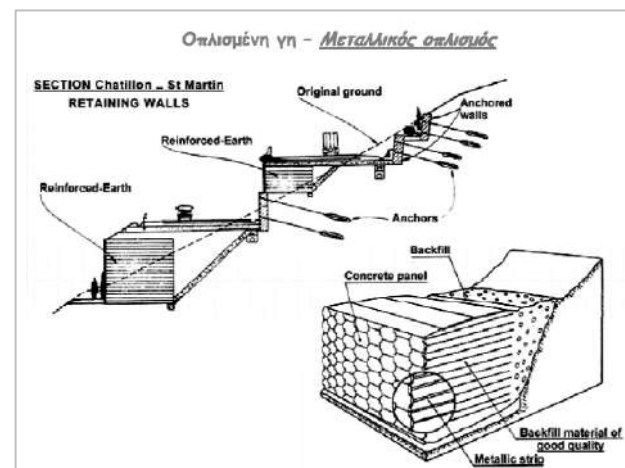
Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - Πυλώνες Γέφυρας.
Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - (Μικρό) Φράγμα.
Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - Κρηπιδότοιχος.
Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009



Παραδείγματα κατασκευών με «οπλισμένη γη» - Οπλισμένη Γη - Μεταλλικός οπλισμός. Πηγή: Μπουκοβάλας, 2009

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ Ι - ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΣΔΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να προσδιοριστεί η αντοχή και η συμπίεσιμότητα του υπάρχοντος κοιτάσματος προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη μέθοδος θεμελίωσης για την εγκατάσταση ή/και τη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες ερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές.

Στο χώρο του έργου πραγματοποιήθηκαν δύο (2) προγράμματα γεωτεχνικής έρευνας. Το πρώτο έργο πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2012 κατά τη φάση υποβολής προσφορών του έργου, ενώ το δεύτερο έργο πραγματοποιήθηκε κατά την τελική φάση μελέτης του έργου μεταξύ Απριλίου 2014 και Μαΐου 2014.

4.1.1 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Οι δύο γεωτεχνικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του έργου περιελάμβαναν τα ακόλουθα:

- (4) οπές δειγματοληψίας.
- (5) φρεάτια μελέτης.
- (14) δοκιμές στατικής διείδυσης CPT.
- (1) δοκιμή δυναμικής διείδυσης DPSH.
- (1) Τυπική δοκιμή διείδυσης SPT.

Ελήφθησαν κατάλληλα δείγματα από πυρήνα δειγμάτων και εξερευνητικά φρεάτια και αυτά τα δείγματα υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές όπως αυτές για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων, την ανεμπόδιση συμπίεση, την άμεση διάτμηση και τη στερεοποίηση.

Οι θέσεις των οπών διάνοιξης, οι μετρήσεις διαπερατότητας και τα φρεάτια μελέτης φαίνονται στον τοπογραφικό χάρτη στην Εικόνα 24.

4.1.2 ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ SPT

Από γεωτρήσεις συλλέχθηκαν δείγματα ημιδιαταραγμένου και διαταραγμένου εδάφους. Λόγω της φύσης του εδάφους (μέτριας σύστασης, όπως σκληρός πηλός), δεν είναι δυνατή η λήψη αδιατάρακτου δείγματος (ΥΠΕΧΩΔΕ – ΦΕΚ 363B/24-6-83). Τα διαταραγμένα δείγματα συλλέχθηκαν σε μαλακό και κολλώδες έδαφος).

Κατά τη διάνοιξη τεσσάρων (4) φρεατίων δειγμάτων, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο SPT (Standard Penetration Test) της Terzaghi, σύμφωνα με το Υπουργείο Γεωργίας και Δασών (ΥΠΕΧΩΔΕ - ΦΕΚ 955 Β' /31-12-86). Διεξήχθησαν συνολικά (43) τυπικές δοκιμές διείσδυσης SPT. Τα αποτελέσματα της δοκιμής συνοψίζονται στον Πίνακα 8 παρακάτω.



Εικόνα 24: Θέσεις ερευνητικών εργασιών

Πίνακας 8: Αποτελέσματα πρότυπων δοκιμών διείδυσης SPT

Γεώτρηση	Βάθος[m]	Κρούσεις	N _{SPT}
Γ1	2,00 - 2,45	1 ₁₅ -2 ₁₅ -3 ₁₅	5
	4,10 - 4,55	1 ₁₅ -2 ₁₅ -3 ₁₅	5
	6,60 - 7,05	2 ₁₅ -3 ₁₅ -5 ₁₅	8
	8,70 - 9,15	8 ₁₅ -8 ₁₅ -11 ₁₅	19
	10,60 - 11,05	4 ₁₅ -6 ₁₅ -8 ₁₅	14
	12,70 - 13,15	3 ₁₅ -4 ₁₅ -7 ₁₅	11
	14,80 - 15,25	12 ₁₅ -7 ₁₅ -14 ₁₅	21
Γ2	16,90 - 17,35	7 ₁₅ -9 ₁₅ -12 ₁₅	21
	19,00 - 19,45	6 ₁₅ -9 ₁₅ -12 ₁₅	21
	21,40 - 21,85	4 ₁₅ -6 ₁₅ -9 ₁₅	15
	23,60 - 24,05	8 ₁₅ -10 ₁₅ -12 ₁₅	22
	25,60 - 26,05	16 ₁₅ -14 ₁₅ -21 ₁₅	35
	27,80 - 28,25	12 ₁₅ -18 ₁₅ -20 ₁₅	38
	29,70 - 30,15	9 ₁₅ -13 ₁₅ -20 ₁₅	33
	2,00 - 2,45	1 ₁₅ -2 ₁₅ -2 ₁₅	4
	4,20 - 4,65	8 ₁₅ -7 ₁₅ -7 ₁₅	14
	6,40 - 6,53	60 ₁₃	Άρνηση
	8,40 - 8,85	3 ₁₅ -6 ₁₅ -7 ₁₅	13
	10,30 - 10,75	3 ₁₅ -6 ₁₅ -8 ₁₅	14
	12,40 - 12,85	8 ₁₅ -9 ₁₅ -12 ₁₅	21
14,80 - 15,25	6 ₁₅ -7 ₁₅ -8 ₁₅	15	
17,10 - 17,55	8 ₁₅ -8 ₁₅ -10 ₁₅	18	
19,00 - 19,45	10 ₁₅ -12 ₁₅ -19 ₁₅	31	
Γ3	2,00 - 2,45	8 ₁₅ -12 ₁₅ -10 ₁₅	22
	4,10 - 4,55	7 ₁₅ -5 ₁₅ -3 ₁₅	8
	5,90 - 6,35	2 ₁₅ -2 ₁₅ -6 ₁₅	8
	7,90 - 8,35	2 ₁₅ -3 ₁₅ -4 ₁₅	7
	10,00 - 10,45	5 ₁₅ -6 ₁₅ -8 ₁₅	14

Γεώτρηση	Βάθος[m]	Κρούσεις	N _{SPT}
	11,80 - 12,25	5 ₁₅ -6 ₁₅ -9 ₁₅	15
	13,70 - 14,15	5 ₁₅ -7 ₁₅ -9 ₁₅	16
	16,10 - 16,55	8 ₁₅ -10 ₁₅ -12 ₁₅	22
	18,30 - 18,75	8 ₁₅ -10 ₁₅ -12 ₁₅	22
	20,20 - 20,65	7 ₁₅ -9 ₁₅ -10 ₁₅	19
Γ4	2,00 - 2,45	3 ₁₅ -4 ₁₅ -6 ₁₅	10
	4,10 - 4,55	2 ₁₅ -3 ₁₅ -3 ₁₅	6
	6,00 - 6,45	4 ₁₅ -5 ₁₅ -7 ₁₅	12
	7,70 - 8,15	11 ₁₅ -18 ₁₅ -18 ₁₅	36
	9,80 - 10,25	7 ₁₅ -10 ₁₅ -14 ₁₅	24
	12,10 - 12,55	8 ₁₅ -11 ₁₅ -13 ₁₅	24
	14,10 - 14,55	7 ₁₅ -9 ₁₅ -13 ₁₅	22
	16,30 - 16,75	11 ₁₅ -15 ₁₅ -19 ₁₅	34
	18,50 - 18,95	6 ₁₅ -10 ₁₅ -15 ₁₅	25
	20,10 - 20,55	8 ₁₅ -12 ₁₅ -16 ₁₅	28

4.1.3 ΔΟΚΙΜΗ CPT

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δεκατέσσερις (14) δοκιμές στατικής διείδυσης CPT (Cone Penetration Test) και μία (1) δυναμική δοκιμή διείδυσης DPSH (Dynamic Super Heavy Duty Penetration Test) στο χώρο του έργου κατά τη διάρκεια της γεωτεχνικής έρευνας. Οι μετρήσεις στατικής διήθησης εκτελούνται χρησιμοποιώντας έναν κώνο

τύπου Begemann, ο οποίος μετρά την μέγιστη αντίσταση q_c και την τοπική πλευρική τριβή f_s του εδάφους που πρόκειται να διεισδύσει.

Οι δυναμικές μετρήσεις διεισδυτικότητας πραγματοποιούνται με έναν απλό κώνο με διευρυμένη διατομή 20 cm^2 για μείωση της πλευρικής τριβής. Η δοκιμή δυναμικής διείσδυσης μετρά τον αριθμό των κρουσμάτων που απαιτούνται για τη διείσδυση ενός κώνου 20 cm . Η διείσδυση λαμβάνεται με την πτώση ενός τυπικού βάρους $63,5 \text{ kg}$ από ύψος 75 cm .

Τα αποτελέσματα των πεντρομετρήσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στους παρακάτω Πίνακες 9 και 10.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα δοκιμών στατικής πεντρομέτρησης CPT

CPT	Υψόμετρο Εδάφους [m]	Βάθος[m]	Αντίσταση Κώνου q_c [MPa] (μέση τιμή)	Τοπική Πλευρική Τριβή f_s [kPa] (μέση τιμή)	Λόγος Τριβής, R_F [%] (μέση τιμή)
Π1	+751,00	0,00 - 11,00	2,38	0,24	11,83
		11,00 - 24,00	4,70	0,42	11,08
		24,00 - 25,60	6,23	0,40	7,58
Π2	+744,20	0,00 - 14,00	2,82	0,24	9,23
		14,00 - 21,00	5,46	0,45	7,26
		21,00 - 25,60	8,22	0,47	6,66
Π3	+750,00	0,00 - 11,00	2,73	0,23	9,65
		11,00 - 21,00	3,32	0,29	9,17
		21,00 - 25,60	6,23	0,43	7,91
Π4	+744,90	0,00 - 11,00	2,36	0,20	9,05
		11,00 - 21,00	4,49	0,39	9,22
		21,00 - 28,10	12,78	0,63	5,96
Π5	+743,70	0,00 - 9,00	2,36	0,24	11,24
		9,00 - 21,00	3,82	0,43	11,93
		21,00 - 25,60	7,77	0,66	8,72

CPT	Υψόμετρο Εδάφους [m]	Βάθος[m]	Αντίσταση Κώνου q_c [MPa] (μέση τιμή)	Τοπική Πλευρική Τριβή f_s [kPa] (μέση τιμή)	Λόγος Τριβής, R_f [%] (μέση τιμή)
Π6	+747,10	0,00 - 5,00	2,93	0,23	8,08
		5,00 - 25,60	5,59	0,41	7,82
Π7	+745,50	0,00 - 8,50	2,87	0,18	6,65
		8,50 - 13,50	4,80	0,33	7,86
		13,50 - 15,20	18,74	0,42	4,07
Π8	+745,50	0,00 - 6,00	2,30	0,16	7,47
		6,00 - 19,00	4,77	0,41	9,64
		19,00 - 23,60	7,41	0,52	8,67
Π9	+746,50	0,00 - 6,00	2,17	0,17	8,15
		6,00 - 16,00	3,75	0,33	9,29
		16,00 - 30,60	6,44	0,37	5,95
Π10	+746,50	0,00 - 5,00	2,59	0,19	7,95
		5,00 - 9,00	11,98	0,65	5,63
Π11	+742,00	0,00 - 2,50	2,09	0,15	7,07
		2,50 - 16,00	3,49	0,27	8,08
		16,00 - 24,60	8,89	0,36	5,62
Π12	+748,00	0,00 - 9,00	2,00	0,15	7,79
		9,00 - 22,00	3,31	0,21	7,04
		22,00 - 30,60	9,11	0,44	5,73
Π13	+748,00	0,00 - 7,00	2,12	0,15	7,51
		7,00 - 18,00	2,95	0,19	7,22
		18,00 - 30,60	6,09	0,41	7,32
Π14	+746,50	0,00 - 6,00	2,45	0,17	7,37
		6,00 - 19,00	4,21	0,27	7,32
		19,00 - 22,00	19,31	0,49	3,56

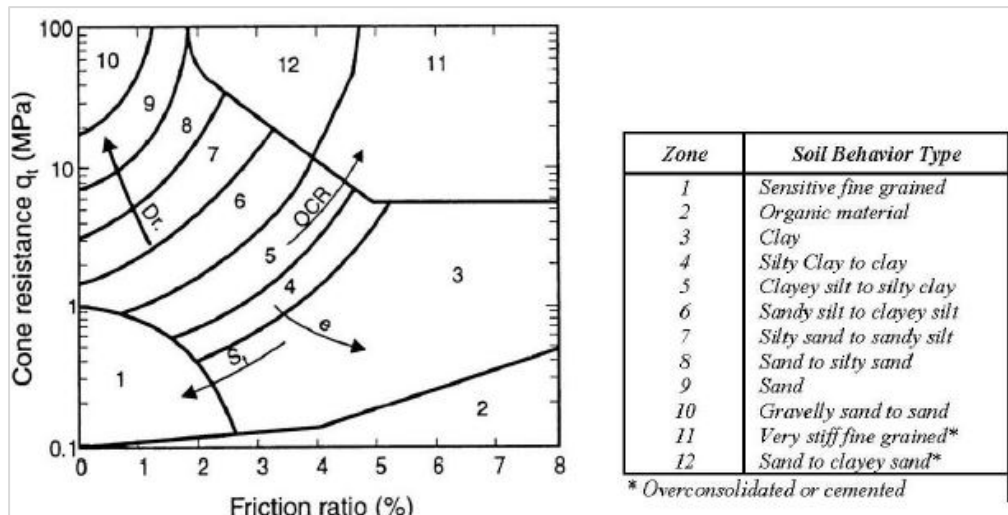
Πίνακας 10: Αποτελέσματα δοκιμής δυναμικής πεντρομετρικής DPSH

DPSH	Βάθος[m]	N_{20} (μέση τιμή)
Π10*	0,00 - 5,00	0,1
	5,00 - 8,00	2,5
	8,00 - 19,00	8,8

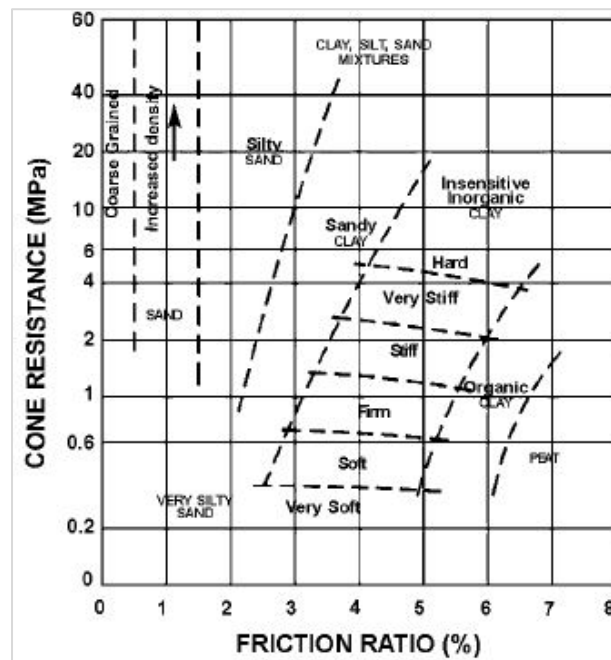
Στη συνέχεια, με βάση τα παραπάνω δεδομένα από μετρήσεις στατικής διήθησης CPT, τα εδάφη ταξινομήθηκαν σύμφωνα με το διάγραμμα των Robertson et al. (1986) (Εικόνα 25), και Meigh (1987) (Εικόνα 26). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτά τα διαγράμματα δεν προβλέπουν με ακρίβεια τον τύπο του εδάφους από τις μετρήσεις μεγέθους σωματιδίων, αλλά μάλλον παρέχουν έναν οδηγό για τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους ή τους τύπους συμπεριφοράς του εδάφους (SBT).

4.1.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Το πρόγραμμα εργαστηριακής έρευνας περιλαμβάνει εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιούνται σε κατάλληλα και αντιπροσωπευτικά δείγματα που επιλέγονται από φρεάτια δειγμάτων και ερευνητικά φρεάτια.



Εικόνα 25: Κατάταξη εδάφους από δεδομένα CPT σύμφωνα με Robertson et al. (1986).



Εικόνα 26: Κατάταξη εδάφους από δεδομένα CPT σύμφωνα με Meigh (1987)

Προκειμένου να ταξινομηθούν και να προσδιοριστούν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού εδάφους, οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένα δείγματα από τη δειγματοληψία ήταν οι εξής:

- ! Δοκιμές ταξινόμησης για τον προσδιορισμό της κλασμάτωσης μεγέθους σωματιδίων με χρήση κόσκινων και αραιωτικών και προσδιορισμός του ορίου Attberg.
 - Προσδιορισμός φαινομενικού βάρους.
 - Προσδιορισμός ειδικού βάρους.

- Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας.
- Ανεμπόδιστη δοκιμή συμπίεσης.
- Δοκιμή άμεσης διάτμησης (CD).
- Δοκιμή συμπιεστότητας

! Για την ταξινόμηση και τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του σχηματισμού του εδάφους, οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένα δείγματα από τα πηγάδια της μελέτης ήταν οι εξής:

- Δοκιμές ταξινόμησης με χρήση κόσκινων για τον προσδιορισμό της ταξινόμησης μεγέθους σωματιδίων και για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg.

! Προσδιορισμός ορίων υγρασίας.

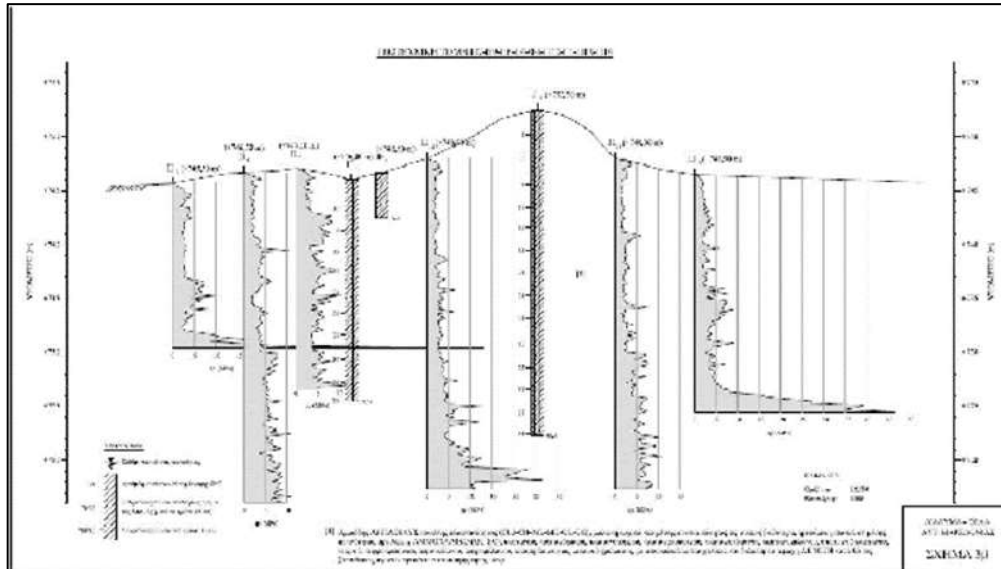
4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ

4.2.1 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην περιοχή του έργου, από την επιφάνεια έως το μέγιστο βάθος έρευνας (30,60 m) το τεχνητό ανάχωμα είναι ένα κοίτασμα άγονων προϊόντων εκσκαφής που προέρχονται από λιγνιτωρυχεία, που αποτελούνται κυρίως από αμμώδεις άργιλους ποικίλης πλαστικότητας, αρχικά μαλακούς και μέτριας συνοχής. Η μέγιστη αντίσταση του κώνου αυτού του στρώματος γενικά αλλάζει μεταξύ $q_c = 2,00-7,00$ MPa, αυξανόμενη με το βάθος, ενώ στη ζώνη άμμου, η αντίσταση κορυφής του κώνου αυτού του στρώματος αυξάνεται, γενικά μεταβαλλόμενη μεταξύ $q_c = 5,00-40,00$ MPa. Οι αλλαγές των παραμέτρων του στρώματος φαίνονται στον Πίνακα 11.

4.2.2 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Κατά την περίοδο εκτέλεσης (Απρίλιος 2014) μέχρι το μέγιστο βάθος της έρευνας (30,60 m), δεν βρέθηκαν υπόγεια ύδατα σε γεωτρήσεις, διεισδυτικά και ερευνητικά φρεάτια.



Εικόνα 27: Διακόμηση παραμέτρων στρώματος

Πίνακας 11: Διακόμηση παραμέτρων στρώματος

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	min	max	M.O.	Σύνολο τιμών
Όρια Atterberg:				
• Όριο υδαρότητας (LL)	31,8%	82,5%	52,6%	37
• Όριο πλαστικότητας (PL)	16,0%	70,0%	30,9%	37
• Δείκτης πλαστικότητας (PI)	6,2%	39,7%	21,7%	37
Φυσική υγρασία (w)	14,4%	86,9%	41,9%	37
Χαλίκια (συγκρατούμενο #4) Άμμος	0%	25%	2%	37
(διερχόμενο #4-#200) Λεπτόκοκκα	2%	43%	17%	37
(διερχόμενο #200) Ποσοστό αργίλου	54%	98%	81%	37
Ειδικό βάρος στερεών (Gs)	5%	52%	24%	21
Υγρό φαινόμενο βάρος (γ_w - kN/m^3)	2,38	2,68	2,55	21
Ανεμπόδιστη θλίψη (q_u - kN/m^2) Δείκτης συμπίεσης (Cc)	15,59	19,43	17,54	15
Λόγος συμπίεσης (Cec)	98,2	180,6	125,6	6
Τάση διόγκωσης (σ_s - kPa)	0,117	0,337	0,215	9
Μέτρο συμπίεσης (E_s - MN/m^2) (*)	0,063	0,172	0,108	9
Συντελ. στερεοποίησης ($C_v \times 10^{-8}$ - m^2/s) (**)	25	50	29	6
Ενεργές τάσεις:	5,15	20,83	10,31	10
Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ') (**)	1,4	44,8	13,7	10
Συνοχή (c' - kN/m^2) (**)	18°	30°	26°	4
	21	72	35	4

(*) Οι τιμές αυτές αφορούν περιοχή τάσεων p'_0 έως $p'_0 + \Delta p$, όπου p'_0 είναι η ενεργός πίεση υπερκευμένων γαιών και Δp είναι η αύξηση των ενεργών τάσεων στο εξεταζόμενο βάθος λόγω των πρόσθετων φορτίων της ανοδομής

(**) Από δοκιμές άμεσης διάτμησης CD

4.2.3 ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

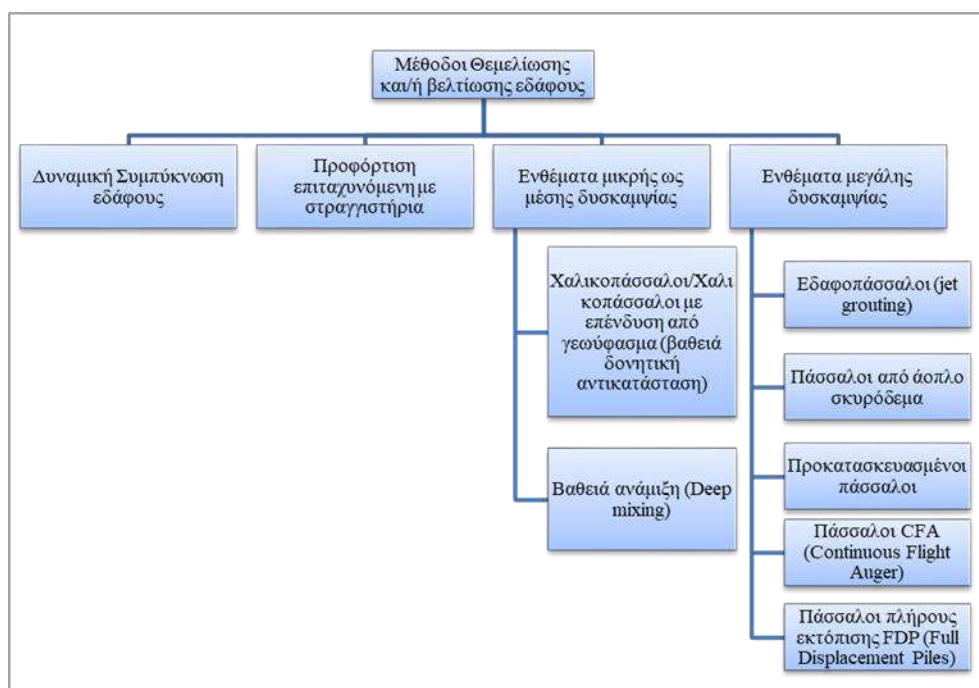
Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ-2000), η περιοχή του έργου ανήκει στη Ζώνη Σεισμικού Κινδύνου Ι. Το έδαφος χαρακτηρίζεται ως σεισμικού κινδύνου [X], εκτός

εάν ληφθούν μέτρα για τη βελτίωσή του (π.χ. αντικατάσταση συμπαγούς υλικού για ελαφριές κατασκευές σε ορισμένο βάθος και βαθύτερες και εκτενέστερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους, επομένως μπορεί να ταξινομηθεί ως έδαφος [C]. Για τη σεισμική ανάλυση της κατασκευής, η εδαφική επιτάχυνση σεισμού του εδάφους κατατάσσεται στη ζώνη I.

4.2.4 ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΕΣ ΤΑΚΤΙΚΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.

Προκειμένου να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες των υπαρχόντων ιζημάτων και να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα του δομικού φέροντος στρώματος, προτείνονται μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες μεθόδους βελτίωσης των ιζημάτων. Η βελτίωση των υφιστάμενων κοιτασμάτων εξαρτάται από την ανάγκη ασφαλούς τοποθέτησης κατασκευών για τη μείωση της τακτοποίησης και τον περιορισμό της διαφορικής καθίζησης που μπορεί να προκύψει λόγω της εξαιρετικά μεταβλητής φύσης και πυκνότητας αυτών των κοιτασμάτων σε επιφάνεια και ύψος.

Με βάση την παραπάνω εργασία, οι ερευνητές πρότειναν τις ακόλουθες μεθόδους θεμελίωσης και/ή βελτίωσης του εδάφους:



Εικόνα 28: Κατά περίπτωση - Μέθοδοι θεμελίωσης και/ή βελτίωσης του εδάφους:

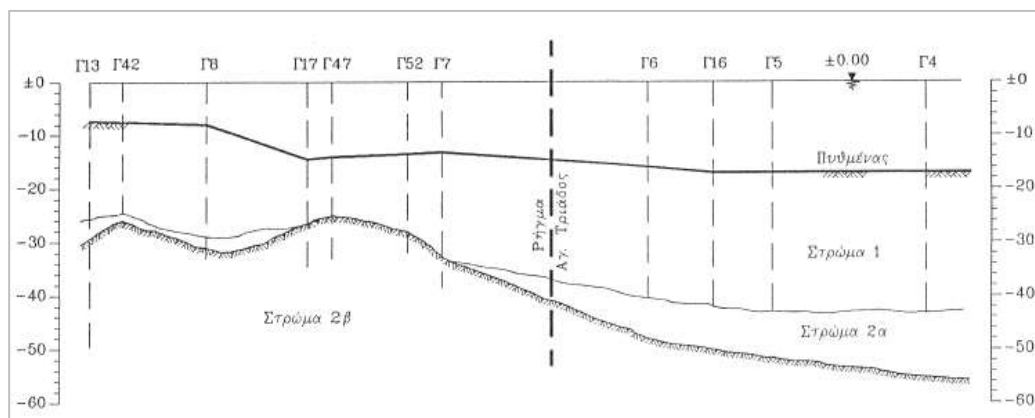
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΙΙ – ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΈΡΓΑ - ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΣΕ ΜΑΛΑΚΑ ΕΔΑΦΗ

Στηριζόμενοι στη μελέτη των Δρέττα Γ.Χ., Πιλάτη Α.Δ., Σιώρη Ι.Α. και Τσάμης Β.Δ., περί Θεμελιώσεων σε Λιμενικά Έργα υπό Μαλακά Εδάφη Βελτιωμένα με Προφόρτιση και Ενίσχυση με Χαλικοπασσάλους, προκύπτουν δεδομένα χρήσιμα προς ανάλυση.

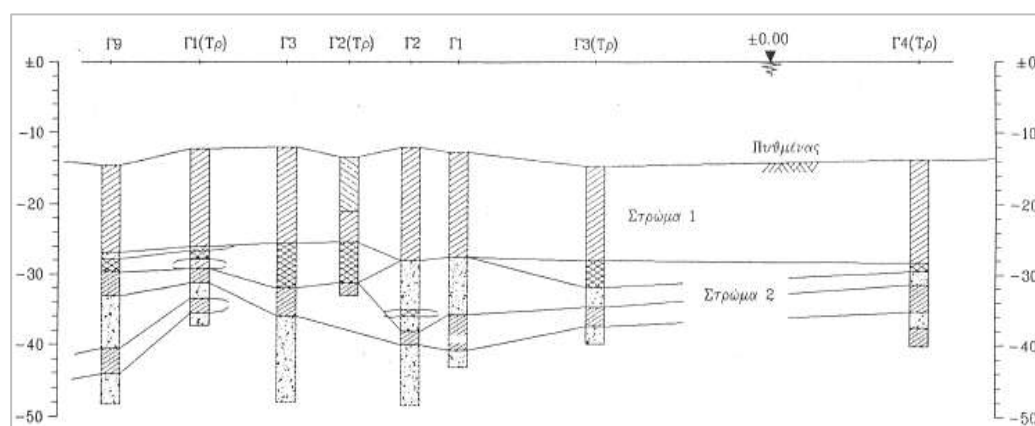
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα ανώτερα εδαφικά στρώματα στην περιοχή και των δύο έργων αποτελούνται από μαλακές αργιλοϊλίες σημαντικού πάχους, μεγάλης συμπίεστότητας και πολύ χαμηλής διατμητικής αντοχής. Επιπλέον, η σεισμικότητα και των δύο περιοχών είναι μεγάλη, ειδικότερα δε ο νέος λιμένας Πάτρας διασχίζεται εγκάρσια από το ενεργό ρήγμα Αγ. Τριάδος, το οποίο παρουσιάζει συνεχείς ερπυστικές μετακινήσεις καθ' όλο το μήκος του.

Οι εδαφικές συνθήκες κατά μήκος των κρηπιδοτοιχών, όπως αυτές προσδιορίστηκαν για κάθε ένα από τα δύο έργα με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και γεωφυσικές μεθόδους, φαίνονται στις γεωτεχνικές τομές των **Σχημάτων 22 και 23**.



Σχήμα 22: Έργα με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και γεωφυσικές μεθόδους

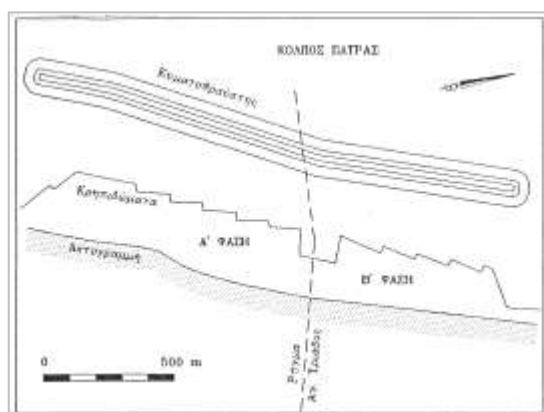


Σχήμα 23: Έργα με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και γεωφυσικές μεθόδους

Πιο αναλυτικά το υπέδαφος κατά μήκος των κρηπιδοτοίχων αποτελείται από τις εξής επί μέρους στρώσεις:

α) Λιμένας Πάτρας

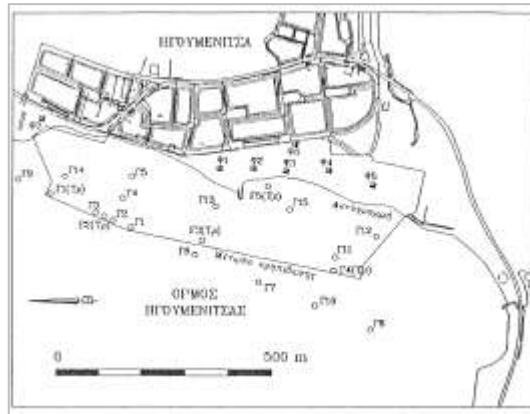
- Στρώμα 1: Τεφρή, μαλακή αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL) πάχους 10-25 m κατά μήκος των κρηπιδοτοίχων και γενικά μεγίστου πάχους 35 m.
- Στρώμα 2α: Στιφρή ως σκληρή αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με χαλίκια (CL-SC ή GC), πάχους 0-15 m.
- Στρώμα 2β: Αργιλώδες ως ιλυώδες ΑΜΜΟ- ΧΑΛΙΚΟ (GM-GC).



Σχήμα 24: Διάταξη νέου λιμένα Πάτρας

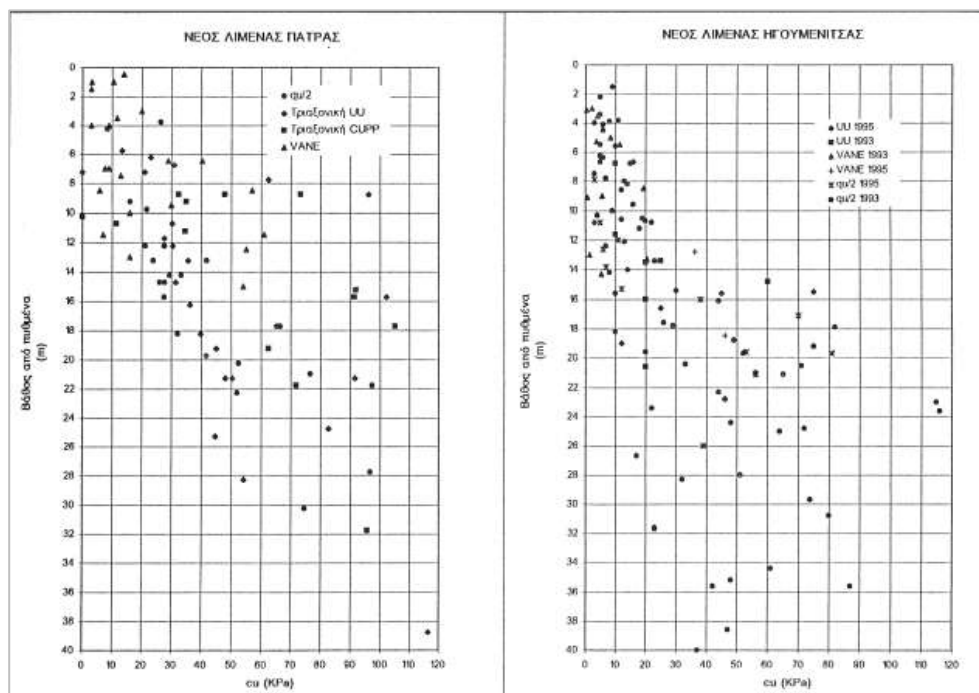
β) Λιμένας Ηγουμενίτσας

- Στρώμα 1: Τεφρή, πολύ μαλακή ως μαλακή ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης ως υψηλής πλαστικότητας (CL2b-CH), πάχους 14-18 m.
- Στρώμα 2α: Άμμος με χαλίκια σε ποικίλοντα ποσοστά, με μικρό ποσοστό αργιλοϊλύος, πάχους 0-7 m, με σημαντική υδροφορία υπό αρτεσιανή πίεση.
- Στρώμα 2β: Τεφρή ως καστανότερη στιφρή αμμώδης άργιλος ως αργιλώδης άμμος (CL-SC) με χαλίκια κατά θέσεις, πάχους 7-22 κρηπιδοτοίχων. m κατά μήκος των
- Στρώμα 2γ: Εναλλαγές αμμοχάλικων με άργιλο σε ποικίλλοντα ποσοστά (GP-GC-GM-SC-SM) και στιφρής ως σκληρής αμμώδους αργίλου μέσης ως υψηλής πλαστικότητας (CL-CH).
- Στρώμα 3: Υπόλευκος μαργαϊκός ασβεστόλιθος, που απαντήθηκε στο ΝΑ τμήμα του έργου και εμφανίζεται επιφανειακά νοτίως του όρμου της Ηγουμενίτσας.



Σχήμα 25: Διάταξη νέου λιμένα Ηγουμενίτσας

Η κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος, όπως αυτή προσδιορίστηκε με επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές, φαίνεται στο σχήμα 26. Παρατηρείται γενικά μία ομαλή αύξηση της αντοχής με το βάθος, αρχίζοντας από σχεδόν μηδενικές τιμές κοντά στον πυθμένα, χαρακτηριστικό των κανονικά στερεοποιημένων αργίλων.



Σχήμα 26: Κατανομή cu με το βάθος

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Οι δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες και των δύο έργων δημιουργούν δύο ειδών προβλήματα.

- Το πρώτο πρόβλημα αφορά τις μεγάλες καθιζήσεις που αναμένονται λόγω των φορτίων αφ' ενός των επιχώσεων δημιουργίας χερσαίων χώρων και αφ' ετέρου του ίδιου του κρηπιδοτοίχου.

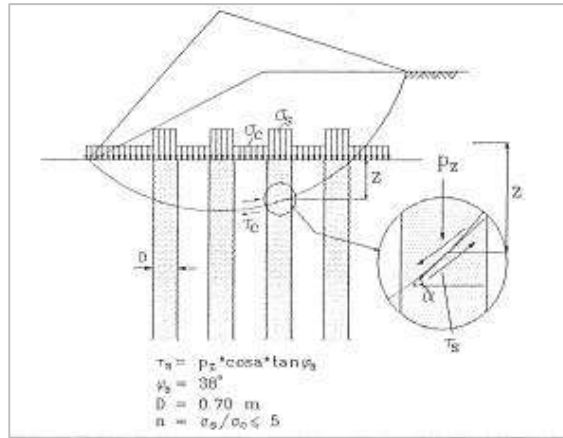
- Το δεύτερο πρόβλημα αφορά τη γενική ευστάθεια κρηπιδοτοιχών - αντιστηριζομένων επιχώσεων και υποκειμένου αργιλικού εδάφους.

Μετά από εξέταση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων κρηπιδοτοιχών και θεμελιώσεων αυτών, όπως:

- α) τοίχοι βαρύτητας ή προκατασκευασμένα κυψελωτά κιβώτια (caissons) θεμελιωμένοι πάνω σε βαθειά εξυγιαντική στρώση ή σε πασσάλους διαφόρων διαφόρων τύπων (έγχυτοι, μεταλλικοί, προκατασκευασμένοι),
- β) πασσαλοστοιχίες ή πασσαλοσανίδες για τη δημιουργία του μετώπου κρηπίδωσης και ανωδομή κρηπιδότοιχου από οπλισμένο σκυρόδεμα στηριζόμενη επί πασσάλων διαφόρων τύπων και τέλος
- γ) εξέδρα από προκατασκευασμένες πρόπλακες και έγχυτο σκυρόδεμα, στηριζόμενη επί κατακορύφων και κεκλιμένων πασσάλων διαφόρων τύπων, επελέγη τελικά η λύση των προκατασκευασμένων κυψελωτών κιβωτίων (caissons) με ανακουφιστικό πρίσμα από κίσσηρη, με παράλληλη βελτίωση του επιφανειακού μαλακού αργιλοϊλυώδους στρώματος (στρώμα 1 των σχημάτων 22 & 23) στην περιοχή των κρηπιδοτοιχών.

Η βελτίωση του στρώματος αυτού προβλέπεται να γίνει με προφόρτιση, επιταχυνόμενη με κατακόρυφα συνθετικά στραγγιστήρια εκτεινόμενα σε όλο σχεδόν το πάχος του, ήτοι 20 m στην Πάτρα και 16 m στην Ηγουμενίτσα, τοποθετούμενα σε κάρναβο 1.5x1.5 m ως 2x2 m (η αποτελεσματικότητα των διαφόρων καννάβων παρουσιάζεται αργότερα).

Η προφόρτιση γίνεται με επίχωμα εκτεινόμενο από τον πυθμένα μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας, ήτοι ύψους της τάξης των 10-16 m στην περιοχή των κρηπιδοτοιχών. Επίσης προβλέπεται η περαιτέρω ενίσχυση του επιφανειακού μαλακού στρώματος έναντι γενικής διατμητικής αστοχίας με τη βοήθεια χαλκοπασσάλων ονομαστικής διαμέτρου 0.60 m και μήκους 10 m (ήτοι μεγίστου βάθους 28 m από το δάπεδο εργασίας, που αποτελεί το μέγιστο τεχνικά εφικτό βάθος από την υπάρχουσα μέχρι το χρόνο σύνταξης της μελέτης κατασκευαστική εμπειρία), τοποθετούμενων σε κάρναβο 2x2 m (βλ. ενδεικτική διάταξη στο σχήμα 27) και κατασκευαζομένων με τη μέθοδο της δονητικής αντικατάστασης (vibroreplacement).



Σχήμα 27: Αρχή λειτουργίας χαλικοπασσάλων

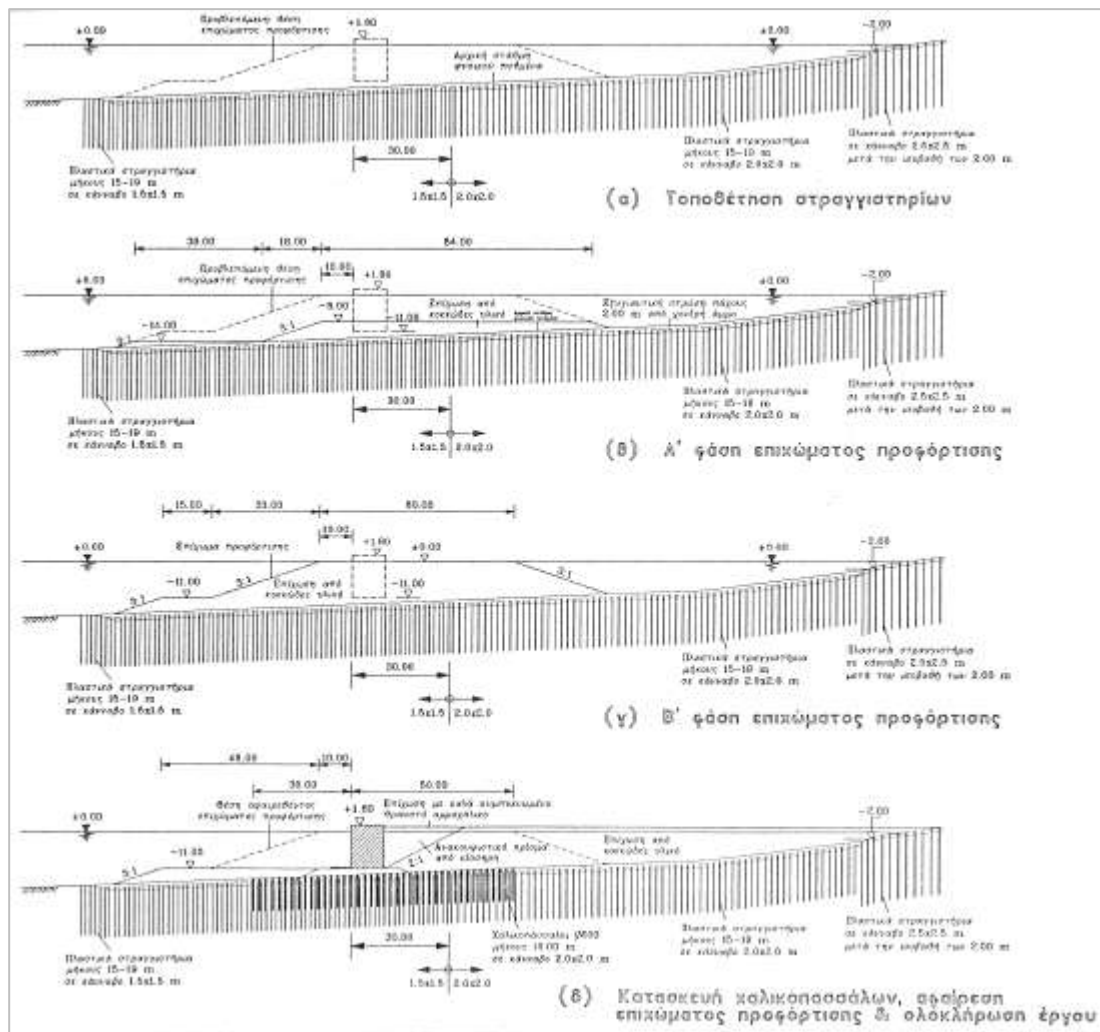
Σκοπός των χαλικοπασσάλων στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι η μεταφορά φορτίων της ανωδομής σε κάποιο σταθερό υπόβαθρο, αλλά η προσθήκη στο έδαφος κατακόρυφων στοιχείων υψηλής διατμητικής αντοχής τα οποία, διατεμνόμενα από μία πιθανή επιφάνεια ολίσθησης, παρέχουν πρόσθετη διατμητική αντίσταση. Η υψηλή διατμητική αντίσταση των χαλικοπασσάλων προέρχεται τόσο από το μεγαλύτερο αξονικό φορτίο το οποίο "έλκουν" εν σχέσει προς το περιβάλλον έδαφος, λόγω μεγαλύτερης κατακόρυφης ακαμψίας, όσο και από τα καλύτερα διατμητικά χαρακτηριστικά τους (γωνιώδη χαλίκια δονητικά συμπυκνωμένα). Στο σχήμα 6 φαίνεται η αρχή λειτουργίας των χαλικοπασσάλων και οι επιλεγείσες παράμετροι σχεδιασμού των.

Επί πλέον, και προκειμένου να επιταχυνθεί η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων στην περιοχή των επιχώσεων δημιουργίας χερσαίων χώρων, προβλέφθηκε η τοποθέτηση κατακόρυφων συνθετικών στραγγιστηρίων μήκους 16 m (Ηγουμενίτσα) ως 20 m (Πάτρα), σε κάρναβο 1.5x1.5 m ως 2x2 m μέχρι την ισοβαθή των -2.00 m και σε κάρναβο 2.5x2.5 m στα μικρότερα βάθη.

Τέλος προκειμένου να ελεγχθούν οι παράμετροι σχεδιασμού και η κατασκευασιμότητα στραγγιστηρίων/χαλικοπασσάλων προβλέφθηκε η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος που σχολιάζεται στη συνέχεια.

5.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ

Προκειμένου να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα βελτίωσης του εδάφους και κατασκευής των κρηπιδοτοίχων στο συντομότερο δυνατό χρόνο, οι εργασίες κατασκευής γίνονται σε διαδοχικές φάσεις, όπως περιγράφεται παρακάτω και παρουσιάζεται στο σχήμα 28. Παράλληλα γίνεται συνεχής παρακολούθηση της συμπεριφοράς του εδάφους με τη βοήθεια πλακών καθίζησης, πιεζομέτρων και αποκλισιομέτρων.



Σχήμα 28: Διαδοχικές φάσεις κατασκευής κρηπιδότοιχων

- α) Εκσκαφή του πυθμένα σε βάθος 2.00 m, διάστρωση καθαρής χονδρόκοκκης άμμου ή/και λεπτών χαλίκων χωρίς λεπτόκοκκα, σε πάχος 1.00 m, τοποθέτηση συνθετικών στραγγιστηρίων σε όλη την έκταση του έργου από πλωτή ή αυτοανυψούμενη (jack-up) εξέδρα και τέλος διάστρωση 1.00 m χονδρόκοκκου υλικού ως άνω.
- β) Κατασκευή επιχώματος προφόρτισης, από κοκκώδες υλικό, στην περιοχή των κρηπιδωμάτων, μέχρι τη στάθμη -8.00 m, η στέψη του οποίου εκτείνεται 10 m εκτός μετώπου κρηπίδωσης και έχει πλάτος 84 m. Επίσης για λόγους ευστάθειας κατασκευάζεται κατόπιν αντισταθμιστικό επίχωμα μέχρι τη στάθμη -14.00 m, πλάτους 39 m.
- γ) Μετά παρέλευση 8-10 μηνών περίπου (ο ακριβής χρόνος θα προσδιοριστεί από την εξέλιξη της στερεοποίησης), κατασκευάζεται το υπόλοιπο του επιχώματος προφόρτισης μέχρι τη στάθμη της θάλασσας (± 0.00 m), η στέψη του οποίου εκτείνεται 10 m εκτός μετώπου

κρηπίδωσης και έχει πλάτος 60 m. Επίσης επεκτείνεται το αντισταθμιστικό επίχωμα μέχρι τη στάθμη -11.00m.

5.3.1 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΕΠΙΧΩΜΑ

Προκειμένου να ελεγχθεί:

- η αποτελεσματικότητα της μεθόδου κατασκευής στραγγιστηρίων και χαλικοπασσάλων, που θα ακολουθήσει ο Ανάδοχος του έργου,
- η παρουσιαζόμενη απόκλιση στη θέση των στραγγιστηρίων και χαλικοπασσάλων με την προτεινόμενη από τον Ανάδοχο μέθοδο χάραξης των θέσεων και υλοποίησης των και τέλος
- η ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης στο στρώμα της αργίλου με ή χωρίς στραγγιστήρια, με σκοπό να προγραμματιστούν έγκαιρα οι διαδοχικές φάσεις κατασκευής του έργου,

προβλέπεται η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος διαστάσεων στέψης 30x60 m κατασκευαζόμενο σε κεντροβαρική θέση των δύο έργων, σε μέσο βάθος θάλασσας 5-7 m, κοντά σε υπάρχουσες θέσεις γεωτρήσεων.

Το δοκιμαστικό επίχωμα προβλέπεται να προηγηθεί οποιωνδήποτε εργασιών, η δε κατασκευή του θα ακολουθήσει τη σειρά εργασιών του επιχώματος προφόρτισης. Στο δοκιμαστικό επίχωμα προβλέπεται τοποθέτηση οργάνων μέτρησης όπως:

- Πιεζόμετρα που εκτείνονται σε διάφορα βάθη μέσα στην άργιλο, για τη μέτρηση της πίεσης πόρων.
- Μεταλλικές πλάκες καθίζησης με κατακόρυφους μεταλλικούς δείκτες, τοποθετούμενες στη στάθμη έδρασης του επιχώματος, για τη μέτρηση των καθιζήσεων κάτω από το δοκιμαστικό επίχωμα.
- Αποκλισιόμετρα στην περιοχή των πρανών για την παρακολούθηση των οριζοντίων μετακινήσεων υπεδάφους και επι-χώματος, τόσο λόγω πλευρικής εξώθησης όσο και λόγω πιθανής αστοχίας.

Επίσης προβλέπεται, μετά την ολοκλήρωση του μεγαλύτερου μέρους της στερεοποίησης, η κατασκευή ορισμένου αριθμού χαλικοπασσάλων σε κάρναβο 2x2 m σε τμήμα του δοκιμαστικού επιχώματος, ορισμένοι από τους οποίους προβλέπεται να αποκαλυφθούν ή/και να υποβληθούν σε δοκιμαστική φόρτιση προκειμένου να ελεγχθούν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Τέλος προβλέπεται η εκτέλεση πενетроμετρήσεων στη θέση του δοκιμαστικού επι χώματος πριν από την κατασκευή του, οι οποίες θα επαναληφθούν μετά το τέλος της δοκιμαστικής φόρτισης, προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός βελτίωσης της μαλακής αργίλου.

Η θεμελίωση λιμενικών έργων που απαιτούν μεγάλης έκτασης επιχώσεις για τη δημιουργία χερσαίων χώρων, σε μαλακά αργιλοϊλυώδη εδάφη, δημιουργεί σοβαρά προβλήματα αφ' ενός μεγάλων μακροχρόνιων καθιζήσεων και αφ' ετέρου γενικής ευστάθειας στην περιοχή των κρηπιδοτοίχων.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά προτείνεται:

- a) Η χρήση κατακόρυφων συνθετικών στραγγιστηρίων για την επιτάχυνση των καθιζήσεων και την ολοκλήρωσή τους κατά τη διάρκεια κατασκευής.
- β) Η βελτίωση των διατμητικών χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης στην περιοχή των κρηπιδοτοίχων με προφόρτιση επιταχυνόμενη και πάλι με κατακόρυφα συνθετικά στραγγιστήρια.
- γ) Η ενίσχυση της διατμητικής αντοχής του εδάφους στην περιοχή των κρηπιδοτοίχων με χαλικοπασσάλους σε κατά το δυνατόν πυκνή διάταξη και σε βάθος που να μειώνει τον κίνδυνο γενικής αστοχίας.
- δ) Η χρήση "ελαφρού" κρηπιδότοιχου και ανακουφιστικού πρίσματος, προκειμένου να μειωθούν τα φορτία στην κρίσιμη περιοχή των κρηπιδοτοίχων.
- ε) Η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος πριν από την κατασκευή του έργου προκειμένου να ληφθούν εγκαίρως ενόργανες μετρήσεις της συμπεριφοράς του εδάφους και να προγραμματισθούν σωστά οι διάφορες φάσεις κατασκευής του έργου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Εργασία έλαβε χώρα μία εκτενής ανασκόπηση σχετιζόμενη με τις Μεθόδους Βελτίωσης και Ενίσχυσης Εδαφών με έμφαση στη θεμελίωση έργων επί μαλακών αργίλων και χαλαρών άμμων.

Υπάρχουν πολλές τροποποιημένες τεχνικές διαθέσιμες για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας, την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής και τη μείωση της καθίζησης σε κορεσμένα υλικά αργίλου, όπως αντικατάσταση εδάφους, κατακόρυφη προφόρτιση αποστράγγισης, πέτρινες κολώνες, σταθεροποίηση πρόσθετων και θερμικές μέθοδοι.

Δυστυχώς, λείπουν μελέτες για την εξέταση όλων των ρυθμιστικών παραγόντων όπως η φέρουσα ικανότητα και η καθίζηση του εδάφους, το κόστος εργασιών θεμελίωσης και η απλή εφαρμογή. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα εργασία είναι ότι είναι απαραίτητο να μελετηθούν τεχνικές αφαίρεσης και αντικατάστασης για να ληφθούν υπόψη οι γεωτεχνικές απαιτήσεις συμπεριφοράς του εδάφους και οι βελτιώσεις κόστους για να επιτευχθεί βέλτιστο πάχος του στρώματος αντικατάστασης και η βάση του καταλληλότερου υλικού που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο σύνολο κόστος.

Οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους είναι παρεμβάσεις που στοχεύουν στην αλλαγή της δομής των προβληματικών εδαφών με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και την αύξηση της φέρουσας ικανότητας τους.

Συζητείται η χρήση υλικών ενίσχυσης και η αποτελεσματικότητά τους στην αύξηση της αντοχής του εδάφους. Συζητούνται, επίσης, οι διάφορες τεχνολογίες υλικών που χρησιμοποιούνται και οι τομείς εφαρμογής. Επιπλέον, συζητούνται οι οικονομικές πτυχές των ενισχυμένων και μη ενισχυμένων εδαφών και των συμβατικών κατασκευών και διαπιστώνεται ότι οι ενισχυμένες εδαφικές κατασκευές είναι πιο οικονομικές.

Διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη ινών αυξάνει την αντοχή του εδάφους, αλλά μόνο μέχρι ενός ορισμένου ορίου. Εάν το ποσοστό των ινών αυξηθεί περαιτέρω, η αντοχή μειώνεται.

Οι διαδικασίες βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους και οι μέθοδοι εφαρμογής εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα του εδάφους (αμμώδες, συνεκτικό ή διογκωμένο), τις ιδιότητες που πρέπει να βελτιωθούν (φυσικές ή μηχανικές), τον τύπο και το μέγεθος του έργου γεωτεχνικής μηχανικής και τη σχετική κατασκευή.

Με τη σειρά του, ο συνδυασμός των παραπάνω, δηλαδή η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου κατασκευής, είναι επίσης συνάρτηση του συνολικού κόστους του κατασκευαστικού έργου σε σχέση με το κόστος της μεθόδου βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση

Αναγνωστόπουλος Κ. Α. - Γραμματικόπουλος Ι. Ν., Α.Π.Θ., Βελτίωση μηχανικής αντοχής μειγμάτων αργίλου - άμμου με τη μέθοδο της ψύξης, 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005

Ατματζίδης Δ. - Αθανασόπουλος Γ., Βελτιώσεις - ενισχύσεις εδαφών, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.

Βαλαλάς Δ. Θ., Αντιστηρίξεις και θεμελιώσεις, εκδόσεις Γαρταγάνης, Θεσσαλονίκη, 1979.

ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (Αθήνα, Μάιος 2014), Μελέτη, Κατασκευή, Συντήρηση και Λειτουργία Υποδομών Ολοκληρωμένου Συστήματος Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΟΣΔΑ) στο Νότιο Πεδίο του Αγρινιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας - Γεωτεχνική Έρευνα

ΜΕΡΟΣ Β Βελτίωση Ενίσχυση εδαφών Γ. Δ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής Σχολής Πολ. Μηχανικών, Ε.Μ.Π. 1, 2009

Σταυριδάκης Ε. Ι., Μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 2003.

Ξενόγλωσση

Asphalt Institute (1975). *The Asphalt Handbook Manual Series N.4*, pp371.

Attewel, P. B. and I. W. Farmer (1976). *Principles of Engineering Geology*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

GE Barnes (ΔΕΥΤΕΡΗ ΑΓΓΛΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ) «ΕΛΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ – Αρχές και Εφαρμογές», Απόδοση στα ελληνικά: Φ. Καραντώνη, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ. 2000.

Collins, K., & McGown, A.T. (1974). *The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. Geotechnique*, 24, 223-254.

Comodromos, E., M. (2004). *Response prediction of horizontally loaded fixed-head pile groups using 3D nonlinear analysis, Soils and Foundations* 44, Ap. 2, 31-39.

Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing (March 2007), Ref. No. EN 1997-2:2007: E (<https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1997.2.2007.pdf>)

[CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%91%CE%A3%CE%A1%CE%A4%CE%97%CE%9C%CE%91_%CE%A4%CE%9F_CYS_EN_1997-1_NEW.pdf](#) Πρόσβαση στις

28.06.2023