



Τ.Ε.Ι. Δ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΤΑΜΗΛΟΤΗΤΑΣ



ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Βοσνιάκος Κωνσταντίνος, M.SC., Ph.D.
Γεωτεχνικός Μηχανικός

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών αποτελούν επεμβάσεις, με σκοπό την αλλαγή της δομής του προβληματικού εδάφους ώστε να βελτιωθούν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά και να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητά του.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Σε γενικές γραμμές, η ενίσχυση εφαρμόζεται σε μαλακά – χαλαρά εδάφη όπως:

- ⊙ χαλαρές άμμους, ιδιαίτερα όταν είναι κορεσμένες
- ⊙ χαλαρές και μέσης πυκνότητας κορεσμένες άμμους και αμμοχάλικα
- ⊙ απροφόρτιστες ή υπο-στερεοποιημένες αργίλους και ιλείς

Η μελέτη βελτίωσης εδαφών με σκοπό την μεταβολή της δομής και της μηχανικής συμπεριφοράς τους αποτελεί αντικείμενο ερευνών τα τελευταία 40 χρόνια.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Εφαρμογές:

- ⊙ θεμελίωση κτιρίων
- ⊙ οδοποιία
- ⊙ ευστάθειας πρανών
- ⊙ φράγματα
- ⊙ ΧΥΤΑ

Εξαρτάται από:

- ⊙ ποιότητα εδάφους
- ⊙ ιδιότητα που πρέπει να βελτιωθεί
- ⊙ είδος του γεωτεχνικού έργου
- ⊙ κόστος
- ⊙ συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Τεχνικές βελτίωσης

- ◎ **δόνηση** (δονητική συμπίκνωση, δυναμική συμπίκνωση, εκτόπιση με βοήθεια εκρηκτικών, κ.α.)
- ◎ **προσθήκη φορτίου: η βελτίωση οφείλεται στην αύξηση της τάσης** (επιφανειακή συμπίκνωση, χρήση κατακόρυφων στραγγιστηριών, πύκνωση με προσθήκη νερού σε χαλαρά εδάφη, κ.α.)
- ◎ **δομική ενίσχυση** (οπλισμένο έδαφος, μικροπάσσαλοι, ηλώσεις εδάφους, κ.α.)
- ◎ **αντικατάσταση εδάφους**
- ◎ **πρόσθετα** (ασβεστοπάσσαλοι, πάσσαλοι από ασβέστιο και τσιμέντο, τσιμεντοποίηση, κ.α.)

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Τεχνικές βελτίωσης

- ◎ **ενέσεις** (τσιμεντενέσεις, χημικά ενέματα, κ.α.) που έχουν σκοπό είτε τη μείωση της διαπερατότητας για την αντιμετώπιση υπόγειων ροών, είτε την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας του εδάφους.
- ◎ **θερμική δράση** (τεχνητή ψύξη ή θέρμανση του εδάφους)
- ◎ **βλάστηση**

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Τεχνικές μείωσης επιβαλλόμενου φορτίου

- ◎ Μείωση ύψους επιχώματος
- ◎ Αύξηση κλίσης των πρανών του επιχώματος
- ◎ Χρήση «ελαφριών» υλικών επιχωμάτωσης (ιπτάμενη τέφρα, ελαφρόπετρα αντί για άμμους και αμμοχάλικα)

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Αντικατάσταση εδάφους

Αντικατάσταση «μαλακού» εδάφους (αμμώδεις αποθέσεις, μαλακά αργιλικά εδάφη) με κατάλληλο υλικό (αμμοχάλικο, θραυστά λατομείου, κ.α.).

Μπορεί να πραγματοποιηθεί με

1. εκσκαφή και επιχωμάτωση,
2. εκτόπιση υπό το ίδιο βάρος της εξυγίανσης ή
3. με εκτόπιση με την βοήθεια εκρηκτικών.

Μέθοδος συμφέρουσα μόνο όταν το ακατάλληλο έδαφος χαρακτηρίζεται από μικρό βάθος στρώσης.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ

Εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα μαλακά εδάφη (αργιλικά) στοχεύοντας στην στερεοποίησή τους. Είναι ο πιο απλός και οικονομικός τρόπος βελτίωσης εδαφών. Μειονέκτημα είναι ο χρόνος που απαιτείται.

Εφαρμόζεται κυρίως σε έργα οδοποιίας αλλά και θεμελιώσεις κτιρίων, με την προϋπόθεση ότι τα φορτία της κατασκευής δεν είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένα.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ

Συσσωρεύεται εδαφικό υλικό (επίχωμα προφόρτισης) και τοποθετείται με την 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 μόνο αν τα φορτία που θα τοποθετηθούν είναι μεγαλύτερα από εκείνα που μπορεί να εφαρμόστηκαν στο παρελθόν στο ίδιο έδαφος.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ



Προφόρτιση έργου οδοποιίας στο Hong Kong.
(τοποθέτηση αναχωμάτων ύψους 5-10 m για 2-5 μήνες)

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ

Σε ορισμένες περιπτώσεις η προφόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί με την κατασκευή δεξαμενής και την πλήρωσή της με νερό.

Επίσης η προφόρτιση μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων.

Επίσης η άντληση και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπογείου νερού καθώς και η επιφανειακή διαβροχή στεγνών χαλαρών αποθέσεων αποτελούν τρόπους προφόρτισης.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ

Η προφόρτιση είναι πιο αποτελεσματική όταν συνδυάζεται με την χρήση κατακόρυφων σταγγιστηρίων, η οποία συνίσταται στη δημιουργία κατακόρυφων στηλών αυξημένης διαπερατότητας στο έδαφος με σκοπό την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης. Το νερό των πόρων ρέει προς το πλησιέστερο σταγγιστήριο και από εκεί κατακόρυφα προς τα κάτω.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Οι μέθοδοι συμπύκνωσης επιφέρουν τη φυσική συμπίεση του εδάφους για τη μείωση των κενών χώρων μεταξύ των κόκκων του υλικού (αέρας-νερό) και την αύξηση του ειδικού βάρους και της φέρουσας αντοχής του εδάφους.

Ιδιαίτερα αποτελεσματική σε έργα οδοποιίας στα οποία τα στατικά και δυναμικά φορτία παρουσιάζουν υψηλές τιμές.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Τα εδάφη από άποψη συμπύκνωσης διακρίνονται σε:

- Επιφανειακά εδάφη
- Υγρά εδάφη
- Συνεκτικά εδάφη (άργιλος, ιλύς)
- Μη συνεκτικά εδάφη (άμμος, αδρανή. κ.α.)
- Βραχώδη εδάφη

Τα υγρά εδάφη (μεγάλο ποσοστό υγρασίας) δεν συμπυκνώνονται εύκολα και είναι ακατάλληλα για χωματουργικά έργα και οδοποιία.

Τα υλικά που επιδέχονται συμπύκνωση είναι μείγματα συνεκτικών και μη συνεκτικών υλικών. Αμιγή συνεκτικά υλικά, άμμος και χάλικες με ίδιο μέγεθος κόκκων συμπυκνώνονται δύσκολα.

Υλικά με καλή διαβάθμιση και ανάμειξη συμπυκνώνονται ευκολότερα.

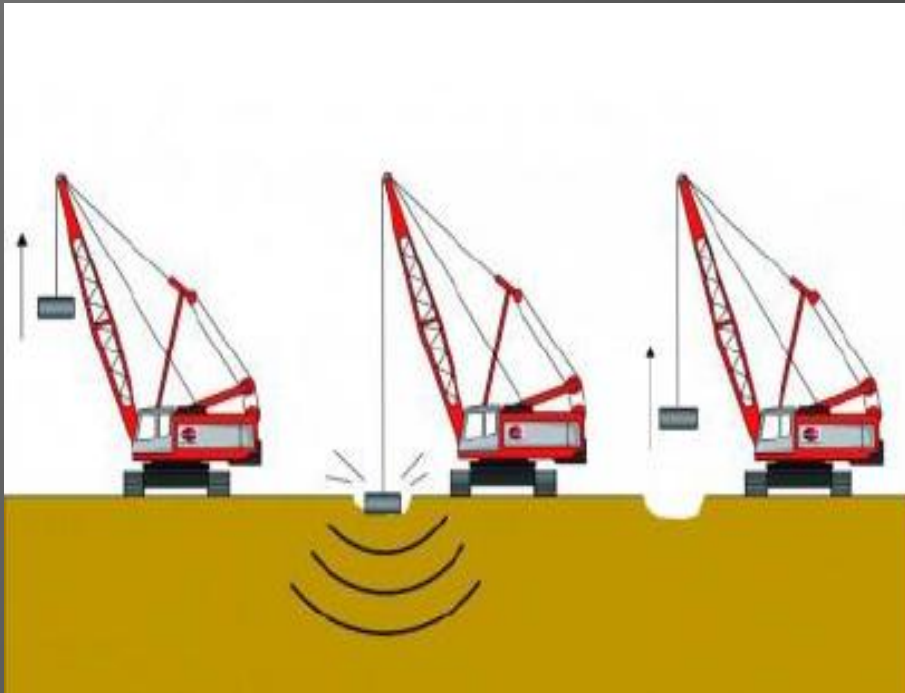
ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Η μέθοδος συνίσταται στη ρίψη όγκων με βάρος δεκάδων τόνων στο έδαφος, προκαλώντας τη συμπύκνωσή του υπό την επίδραση κρουστικών δυνάμεων. Οι ρίψεις πραγματοποιούνται από ύψος 10-40 m και δημιουργούν βάθος επιρροής 3-12 m. Η δυναμική συμπύκνωση πραγματοποιείται σε μεγάλα εργοτάξια με βαρύ ειδικό εξοπλισμό. Η μέθοδος αυτή αποφεύγεται όταν υπάρχουν υφιστάμενες κατασκευές σε απόσταση μικρότερη των 30 m, καθώς οι δονήσεις του εδάφους μπορεί να προκαλέσουν ρηγματώσεις.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Ενδείκνυται ιδιαίτερα για **κοκκώδη (αμμώδη) εδάφη**. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί και σε **μεικτά εδάφη** από κοκκώδη και συνεκτικά υλικά.

Σε αργιλώδη εδάφη χρειάζεται να κατασκευαστούν ορύγματα μικρού πλάτους, ώστε να συγκεντρώνεται το εξερχόμενο νερό και να αφαιρείται με άντληση.

Πριν από την επιβολή φορτίσεων πρέπει να ελέγχεται η ύπαρξη υπόγειων δικτύων εγκατάστασης.

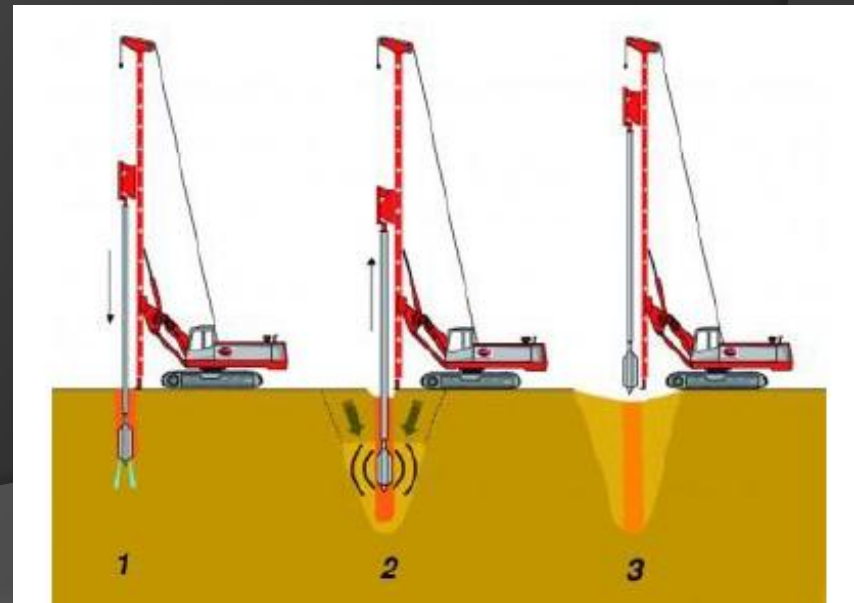
ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Συνίσταται στην εισαγωγή δονητή σε χαλαρά, μη συνεκτικά εδάφη, στα οποία προκαλεί ακτινωτή συμπύκνωση. Η μέθοδος εφαρμόζεται με επιβολή κατακόρυφης ή οριζόντιας ταλάντωσης στο έδαφος.

Το αποτέλεσμα της δονητικής συμπύκνωσης εξαρτάται από το βάρος της μηχανής, την συχνότητα διέγερσης, τη μορφή και την ιδιοσυχνότητα του εδάφους.

Είναι αποτελεσματική η μέθοδος για άμμους με ποσοστό ιλύος $< 10\%-15\%$ και ποσοστό αργίλου $< 5\%$. Όσο αυξάνονται τα ποσοστά ιλύος και αργίλου μειώνεται η αποτελεσματικότητά της.

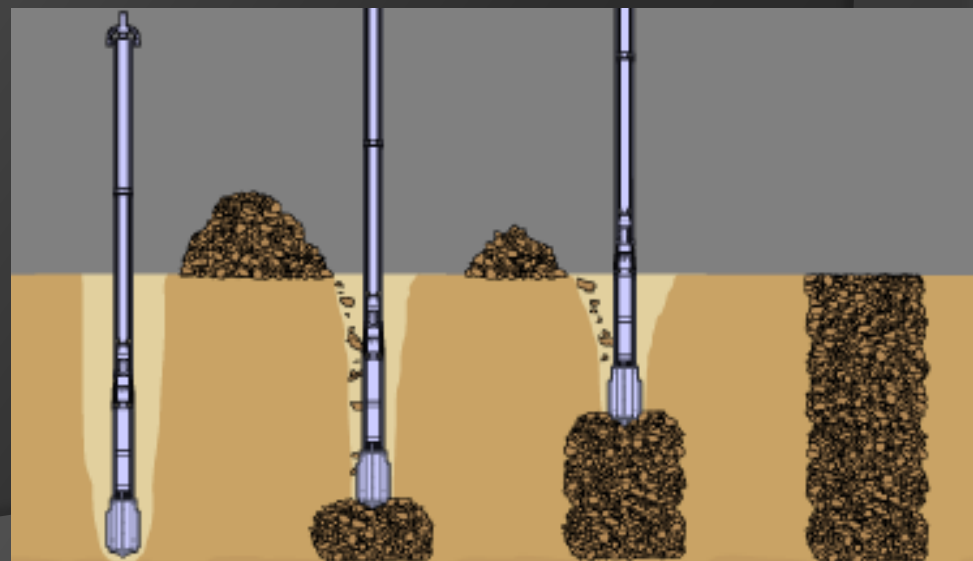


ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΑΛΟΙ)

Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε τύπους εδαφών στα οποία η δονητική συμπύκνωση δεν έχει αξιόλογα αποτελέσματα (ιλυώδη και αργιλώδη εδάφη).

Η μέθοδος εφαρμόζεται με την **διάνοιξη κυκλικών οπών** σημαντικού μήκους στο προβληματικό έδαφος και την **πλήρωσή τους με χάλικες** (χαλικοπάσσαλοι).



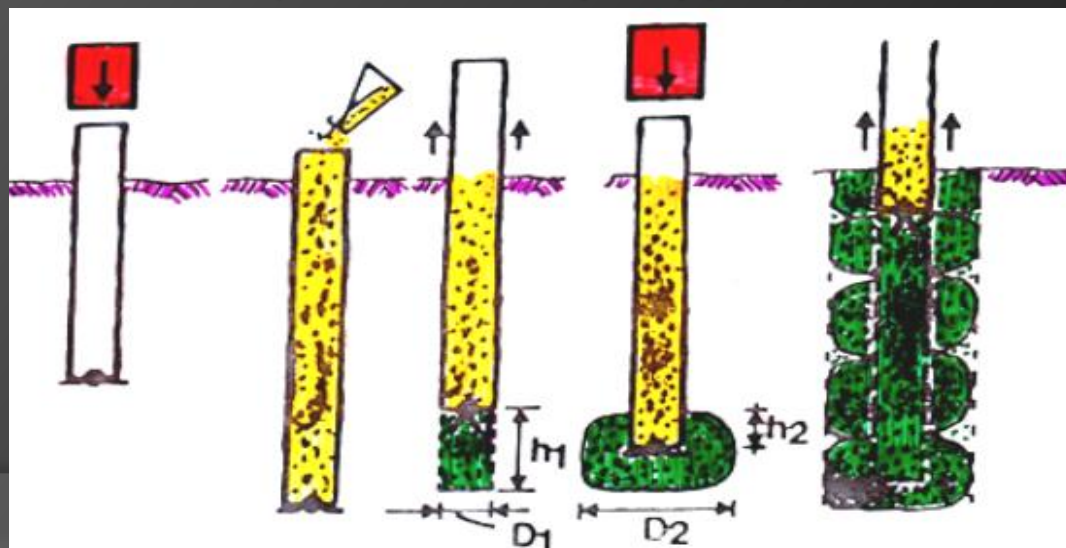
Principle of wet top feed vibro replacement

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΑΛΟΙ)

Η μέθοδος περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Έμπηξη μεταλλικού κενού σωλήνα στο έδαφος
2. Πλήρωση του σωλήνα με κοκκώδες υλικό.
3. Τμηματική εξόλκευση του σωλήνα.
4. Επανέμπηξη του σωλήνα και συμπύκνωση του υλικού.
5. Συνεχείς εξολκεύσεις και επανεμπήξεις.

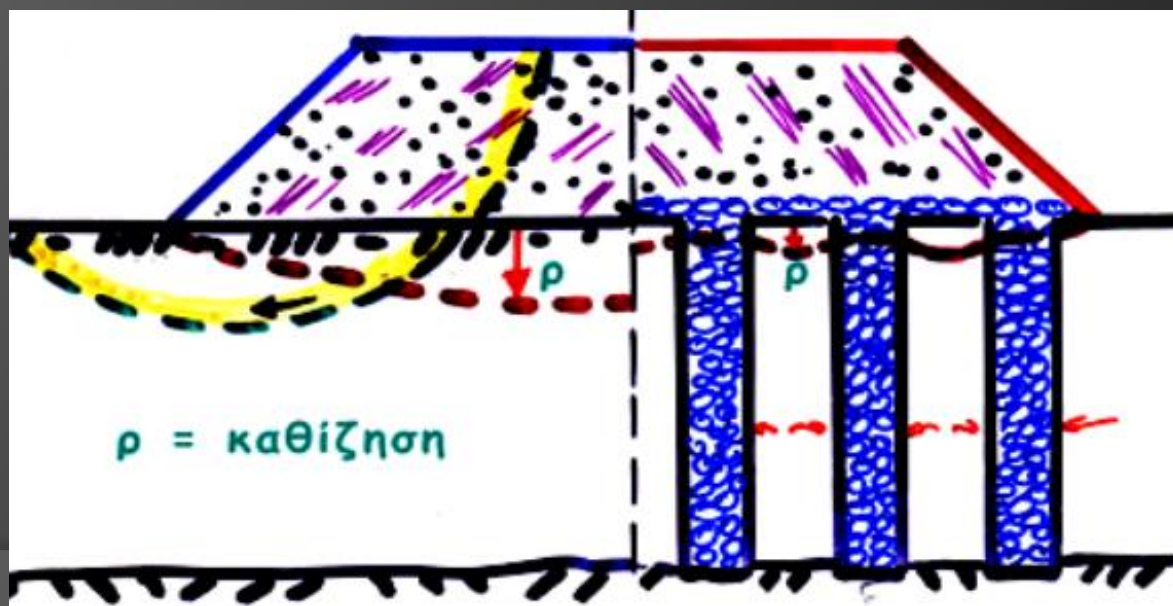


ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΙ)

Πλεονεκτήματα χαλικοπασσάλων:

1. Ανάληψη φορτίου
2. Αύξηση διατμητικής αντοχής.
3. Επιτάχυνση καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης (αργίλους).
4. Συμπύκνωση εδάφους (άμμοι).



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ

Βελτίωση εδάφους με εισαγωγή γεωυφασμάτων, γεωπλεγμάτων, χαλύβδινων ράβδων και ηλώσεων ή με την εισαγωγή μικροπασσάλων.

Εφαρμόζονται σε μεγάλα τεχνικά έργα (οδοποιίας, ΧΥΤΑ, κ.α.)

Τα γεωυφάσματα και τα γεωπλέγματα λειτουργούν ως οπλισμός αγκύρωσης με αντίσταση στην διάτμηση του εδαφικού υλικού.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ

Τα **γεωυφάσματα** κατασκευάζονται από θερμοπλαστικά υλικά (πολυαμίδες (νάυλον), πολυαιθυλένιο, πολυεστέρες, PVC, κ.α.).



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ

Τα **γεωυφάσματα** χρησιμοποιούνται:

- ❑ Έργα δικτύων μεταφοράς (δρόμοι, αεροδρόμια, κ.α.) όπου λειτουργούν ως διαχωριστικά σε περιοχές με κινδύνους από υπόγεια νερά.
- ❑ Ως βασικά υλικά σε θαλάσσια και υδραυλικά έργα (κυματοθραύστες, οχετούς, τάφροι, δεξαμενές, κ.α.)
- ❑ ΧΥΤΑ (στεγανοποίηση)
- ❑ Ως υλικά ενίσχυσης κατασκευών (τοίχοι αντιστήριξης, πρανή) όπου παρέχουν ελαστική αντίσταση στο έδαφος.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ

Τα **γεωπλέγματα** κατασκευάζονται από πολυπροπυλένιο ή πολυαιθυλένιο.

Χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση και ενίσχυση των εδαφών.

Είναι μια οικονομική μέθοδος η οποία γίνεται επιφανειακά χωρίς να απαιτείται εκσκαφή ή οποιαδήποτε αναταραχή του υφιστάμενου «ασθενούς» εδαφικού υλικού.

Τοποθετούνται απευθείας στην επιφάνεια του ασθενούς εδάφους και έπειτα καλύπτονται με στρώσεις συμπυκνωμένου κοκκώδους υλικού καλής διαβάθμισης.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ



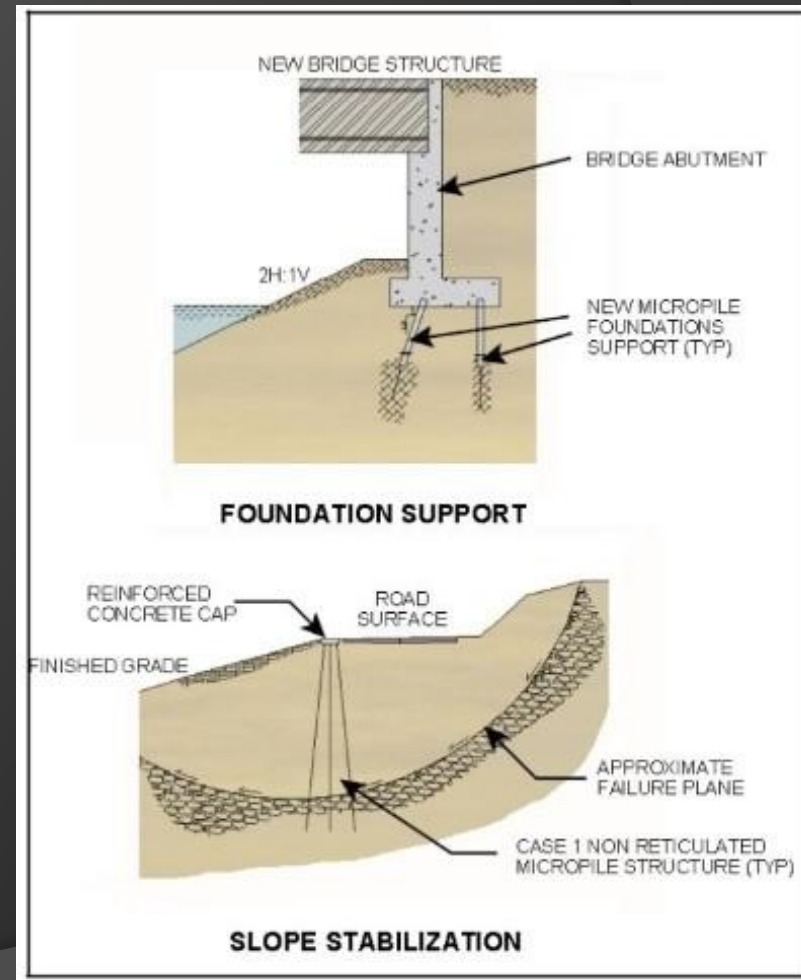
ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ

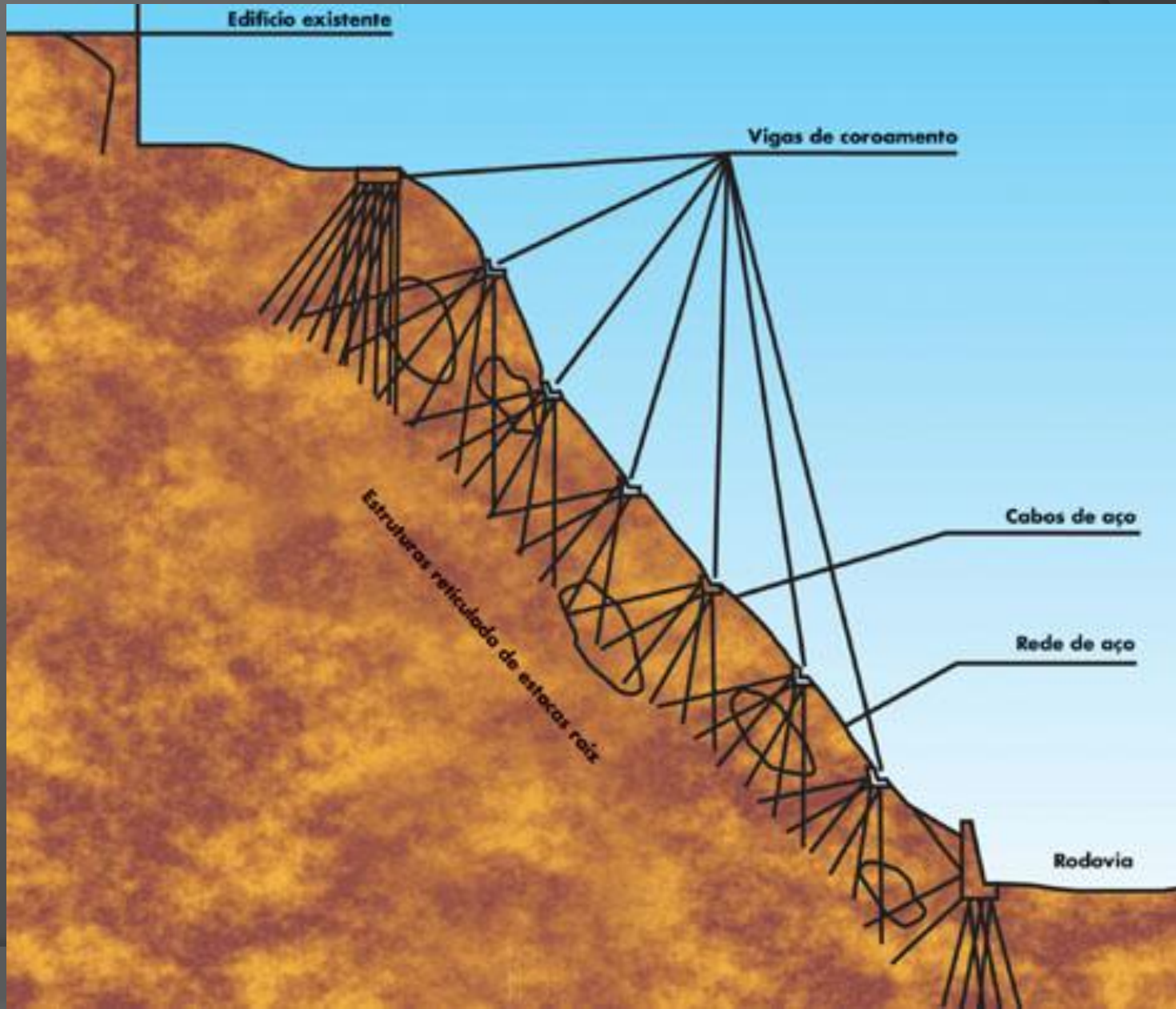
Οι **μικροπάσσαλοι** εφαρμόζονται σε συνεκτικά εδάφη (συνήθως κατακερματισμένα).

Ανοίγεται οπή και εισχωρεί ο μικροπάσσαλος.

Έχουν διάμετρο 70-250 mm και ο οπλισμός τους για $d < 140$ mm είναι μια μόνο κεντρική ράβδος για, ενώ για $d > 140$ mm είναι κλωβός.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΕΝΕΣΕΙΣ

Είναι η υπό πίεση διοχέτευση ειδικών ρευστών, η πήξη των οποίων οδηγεί στην ενίσχυση εδαφών.

Με ειδικό αυτοκινούμενο μηχάνημα διανοίγεται οπή, κατόπιν το στέλεχος ανασύρεται και διοχετεύεται στο έδαφος το υλικό σταθεροποίησης.



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΕΝΕΣΕΙΣ

Ανάλογα με τον τρόπο που ενεργεί το ένεμα διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- **Ενέσεις διαποτισμού** με τις οποίες το ένεμα εισχωρεί στο έδαφος και γεμίζει τους πόρους του
- **Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης**
- **Ενέσεις εγκλωβισμού** όπου το ένεμα συγγκολλά ρηγματωμένη βραχώμαζα



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΕΝΕΣΕΙΣ

Οι συνήθεις τύποι ενεμάτων είναι τα **αιωρήματα τσιμέντου** (τσιμεντενέσεις) ή **μείγματος εδάφους** (μπετονίτη, άμμου) και **τσιμέντου ή χημικά διαλύματα** (ρητίνες).

Εφαρμόζονται σε όλα σχεδόν τα εδάφη (συνεκτικά και μη) και σε μαλακούς βράχους, υπό τον όρο ότι ο βράχος είναι ρηγματωμένος με τις ρωγμές να επικοινωνούν.

Δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε εδάφη με πολύ μικρή διαπερατότητα (πυκνές άργιλοι)

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΕΝΕΣΕΙΣ

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ταχύτητα εφαρμογής
- Χαμηλό σχετικά κόστος
- Απουσία θορύβου και δονήσεων κατά την εφαρμογή.

Στην περίπτωση διαπερατών αμμωδών εδαφών χρησιμοποιούνται αιωρήματα τσιμέντου με υψηλές τιμές του λόγου «τσιμέντο/νερό», εφόσον επιδιώκεται υψηλή αντοχή, ενώ προτιμώνται χημικά διαλύματα όταν η διαπερατότητα είναι μικρή (αργιλικά εδάφη)



ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΕΝΕΣΕΙΣ

Εφαρμογές:

- Μέθοδοι επέμβασης σε θεμέλια που διαπιστώνονται βλάβες
- Σε εκσκαφές που βρίσκονται σε επαφή με υφιστάμενα κτίρια
- Όταν κρίνεται αναγκαία η βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης
- Ευστάθεια πρανών
- Συμπύκνωση εδαφών

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΘΕΡΜΑΝΣΗ-ΨΥΞΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Θέρμανση:

Είναι δαπανηρή μέθοδος η οποία εφαρμόζεται σε χαλαρά εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα.

Ανοίγονται μικρές οπές και εισχωρούν καρφίδες μεταβιβάζοντας στο έδαφος πολύ θερμό αέρα (300-1000°C).

Έχει ως αποτέλεσμα την συμπύκνωση του εδάφους, λόγω εξάτμισης νερού και την αύξηση των ενεργών τάσεων.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

ΘΕΡΜΑΝΣΗ-ΨΥΞΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ψύξη:

Δίνει άμεσα βραχυπρόθεσμες λύσεις σε διάφορα μεγάλα τεχνικά έργα (αντιστηρίξεις, θεμελιώσεις, σήραγγες, κ.α.).

Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας, το παγοποιημένο έδαφος παρουσιάζει αυξημένη αντοχή, ανάλογη με την περιεκτικότητά του σε νερό.

Εφαρμόζεται όταν υπάρχει ισχυρή παρουσία υπόγειων υδάτων και μεγάλη διαπερατότητα του εδάφους.

Μειονεκτεί ως προς το υψηλό κόστος και την απουσία πρακτικής εμπειρίας στην Ελλάδα.