



**Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:  
ΓΟΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:  
ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΙΡΗΝΗ**

**ΠΑΤΡΑ 2010**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>- 6 -</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ</b>	<b>- 7 -</b>
1.1 Ιστορικά στοιχεία	- 7 -
1.2 Συμπύκνωση εδάφους	- 8 -
1.3 Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους	- 15 -
1.4 Ψύξη του εδάφους	- 19 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΣ</b>	<b>- 23 -</b>
2.1. Τεχνικές προδιαγραφές συμπυκνώσεως	- 24 -
2.1.1 Περιεχόμενο υγρασίας	- 24 -
2.1.2 Διεργασία συμπυκνώσεως	- 24 -
2.2 Μηχανικά μέσα συμπυκνώσεως	- 26 -
2.3 Στατικοί κύλινδροι με χαλύβδινους κυλίνδρους	- 26 -
2.4 Στατικοί κύλινδροι με ελαστικούς τροχούς	- 28 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο. ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (VIBRO COMPACTION)</b>	<b>- 30 -</b>
3.1 Γενικά	- 30 -
3.1.1 Περιπτώσεις που η μέθοδος δε χρησιμοποιείται καθόλου ή αποφεύγεται	- 30 -
3.2 Κατάλληλοι τύποι εδαφών	- 31 -
3.3 Εύρος βάθους	- 31 -
3.4 Πάσσαλοι Δόνησης (Vibroprobes)	- 31 -
3.5 Διαδικασίες εγκατάστασης	- 34 -
3.6 Δονητικοί συμπυκνωτές με κυλίνδρους	- 35 -
3.7 Χειροδηγούμενος δίδυμος δονητικός συμπυκνωτής	- 36 -

3.8 Αυτοκινούμενος δίδυμος δονητικός συμπυκνωτής με κατσιοποδόδα	- 37 -
3.9 Επίπεδοι δονητικοί συμπυκνωτές	- 38 -
3.9.1 Ανεξάρτητοι επίπεδοι δονητές με κινητήρα	- 38 -
3.9.2 Εξαρτημένοι επίπεδοι δονητές	- 39 -
3.10 Δονητικοί κοπανιστήρες	- 39 -
3.11 Επιπτώσεις στο έδαφος	- 41 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (DYNAMIC COMPACTION)</b>	<b>- 42 -</b>
4.1 Γενικά	- 42 -
4.2 Κατάλληλοι τύποι εδαφών	- 42 -
4.3 Εύρος βάθους εφαρμογής	- 43 -
4.4 Απαιτήσεις κατά την εφαρμογή της δυναμικής συμπίκνωσης	- 43 -
4.5 Γεωτεχνική διερεύνηση	- 45 -
4.6 Μέθοδος εφαρμογής	- 45 -
4.7 Εξοπλισμός	- 46 -
4.8 Μέθοδος κατασκευής	- 46 -
4.9 Απαιτήσεις ποιοτικών ελέγχων για την παραλαβή δοκιμαστικού πεδίου	- 49 -
4.10 Ποιοτικός έλεγχος δυναμικής συμπίκνωσης	- 49 -
4.11 Όροι και απαιτήσεις υγιεινής – ασφάλειας και προστασίας του	- 50 -
4.12 Τρόπος επιμέτρησης της εργασίας	- 53 -
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο. ΛΙΘΙΝΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ, ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΞΗΡΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (STONE COLUMNS, WET AND DRY)</b>	<b>- 54 -</b>
5.1 Γενικά	- 54 -
5.2 Κατάλληλοι τύποι εδαφών	- 54 -
5.3 Εύρος βάθους	- 54 -
5.4 Επιπτώσεις στο έδαφος	- 55 -

<b>5.5 Υγρή μέθοδος με τροφοδοσία από πάνω λίθινων πασσάλων (Wet Top Feed Stone Columns)</b>	<b>- 55 -</b>
<b>5.5.1 Τυπική εγκατάσταση εξέδρας (ομοίως με την αντίστοιχη εγκατάσταση στη δονητική συμπύκνωση)</b>	<b>- 55 -</b>
<b>5.5.2 Εγκατάσταση</b>	<b>- 55 -</b>
<b>5.5.3 Πότε χρησιμοποιείται η ξηρά μέθοδος και πότε η υγρή</b>	<b>- 56 -</b>
<b>5.6 Ξηρή μέθοδος με τροφοδοσία από κάτω λίθινων πασσάλων (Dry Bottom Feed Stone Columns)</b>	<b>- 57 -</b>
<b>5.6.1 Γεωτρύπανο με κάδο σκυροδέματος (Rig with skip bucket)</b>	<b>- 57 -</b>
<b>5.6.2 (Vibro Cats and other “predators”)</b>	<b>- 58 -</b>
<b>5.6.3 Εγκατάσταση</b>	<b>- 60 -</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο. ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ (PRELOADING)</b>	<b>- 61 -</b>
<b>6.1 Κατάλληλοι τύποι εδαφών</b>	<b>- 63 -</b>
<b>6.2 Εύρος βάθους</b>	<b>- 64 -</b>
<b>6.3 Επιπτώσεις στο έδαφος</b>	<b>- 64 -</b>
<b>6.4 Σε ποιες περιπτώσεις η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και αποτελεσματική</b>	<b>- 64 -</b>
<b>6.5 Σε ποιες περιπτώσεις η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί</b>	<b>- 65 -</b>
<b>6.6 Σε ποιες περιπτώσεις ενδείκνυται η περιορισμένη χρήση της μεθόδου</b>	<b>- 65 -</b>
<b>6.7 Παράγοντες σχεδιασμού προφόρτισης</b>	<b>- 65 -</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο. ΕΝΕΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (COMPACTION GROUTING)</b>	<b>- 67 -</b>
<b>7.1 Πλεονεκτήματα</b>	<b>- 67 -</b>
<b>7.2 Θεωρητική προσέγγιση</b>	<b>- 68 -</b>
<b>7.3 Υλικό ενεμάτων και τοποθέτησή τους στο έδαφος</b>	<b>- 68 -</b>
<b>7.4 Περιοχές Εφαρμογής</b>	<b>- 70 -</b>
<b>7.5 Εξοπλισμός</b>	<b>- 71 -</b>
<b>7.6 Δεδομένα που απαιτούνται κατά το σχεδιασμό</b>	<b>- 72 -</b>

<b>7.7 Παράμετροι ενέσεων</b>	<b>- 72 -</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>- 74 -</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>- 75 -</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο βελτίωση η ενίσχυση ενός υλικού, φυσικού η θραυστού, εννοούμε την επεξεργασία του υλικού αυτού που αποβλέπει στη βελτίωση των γεωτεχνικών του ιδιοτήτων (αντοχή, διάβρωση, διαπερατότητα, συμπιεστότητα, πορώδες, φυσικά χαρακτηριστικά, μηχανικές ιδιότητες κλπ.).

Ο Van Impe (1989) διαχωρίζει τις μεθόδους βελτίωσης στις παρακάτω γενικές ομάδες:

α) Προσωρινές τεχνικές βελτίωσης εδάφους με περιορισμένο χρόνο εφαρμογής, κατά την περίοδο της κατασκευής (ηλεκτρική όσμωση, ψύξη εδάφους κλπ.).

β) Μόνιμες (διαρκείς) τεχνικές βελτίωσης εδάφους, που εφαρμόζονται χωρίς την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (δυναμική συμπύκνωση, μέθοδοι μαζικής δόνησης κλπ.).

γ) Μόνιμες (διαρκείς) τεχνικές βελτίωσης εδάφους που εφαρμόζονται με την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (οπλισμένο έδαφος, τσιμεντενέσεις, γενικά ενέσεις με διάφορα ενέματα, βαθιές μίξεις με διάφορα μίγματα όπως τσιμέντου, ασβεστού, μπεντονίτη κλπ.)

Οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους εφαρμόζονται:

Στα θεμέλια κτιρίων για την μείωση των καθιζήσεων, τον έλεγχο της διαπερατότητας ή την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Σε εργασίες εκσαφής για καλύτερη πλευρική αύξηση της αντοχής σε σήραγγες ή τάφρους και μείωση της διαπερατότητας.

Στην οδοποιία, στις υποβάσεις δρόμων για αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, μείωση της διάβρωσης και μείωση του μεταβολών του όγκου. Σε σταθεροποίηση των πρηνών για να αυξηθεί η αντοχή του εδάφους σε διάβρωση, να μειωθεί η διαπερατότητα, να μειωθεί ο δείκτης κενών. Σε κατασκευές συγκράτησης (αποθήκευσης) ύδατος για την δημιουργία όσο το δυνατόν υδατοστεγών κατασκευών, όπως φράγματα, κανάλια, δεξαμενές, χωματερές (Χ.Υ.Τ.Α.).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

### 1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η ιδέα της βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους, με την ανάμιξη υλικών (τσιμέντου, ασβέστου, πολυμερών υλικών κλπ.) ή την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (πασσάλων, διαφραγμάτων, γεωφασμάτων, ηλώσεων κλπ.) άρχισε να εφαρμόζεται από αρχαιοτάτων χρόνων, από την περίοδο των Αιγυπτίων, Σουμερίων, Ασσυρίων, Ελλήνων, Κινέζων, Αράβων και Ρωμαίων.

Η χρήση της υδρασβέστου στη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους ήταν γνωστή στους Κινέζους, πριν 3000 έτη, για βελτίωση των δρόμων (Israel, 1982). Την ίδια χρονική περίοδο επίσης οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν ξύλο η bamboo για την ενίσχυση του εδάφους, μεθόδους που χρησιμοποιούν ακόμη και σήμερα για την δημιουργία φραγμάτων για προστασία του περιβάλλοντος από λασποροές.

Οι αρχαίοι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ηφαιστειακή τέφρα, (ποζολάνες – ο όρος Pozzolan προέρχεται από το χωριό Pozzuoli της Ιταλίας), για διάφορες κατασκευές όπως η Απία Οδός, το Κολοσσαίο, το Πάνθεον, Στη Μεσοποταμία οι κάτοικοι χρησιμοποιούσαν άσφαλο αναμεμιγμένη με αμμώδες έδαφος για κατασκευές δρόμων, από το 3200 πΧ.

Η πρώτη σύγχρονη κατασκευή με ασφαλτικό υλικό επικάλυψης σημειώθηκε το 1802 στη Γαλλία<sup>1</sup>. Το τσιμέντο Portland ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο Joseph Aspdin. Η ονομασία του συνδέθηκε με το χρώμα του που ήταν όμοιο με αυτό του ασβεστόλιθου της νήσου Portland κοντά στην Αγγλία<sup>2</sup>. Το 1904 στη περιοχή St Louis (USA) έγινε η πρώτη εφαρμογή σταθεροποίησης εδάφους με τσιμέντο τύπου Portland.

Από το 1940 και μετά οι Γερμανοί αργότερα οι Βρετανοί και οι Αμερικανοί κατασκεύασαν τους αεροδιαδρόμους πολλών πολεμικών αεροδρομίων με την τεχνική τσιμεντοκονιάματος. Την ίδια χρονική περίοδο η τεχνική της σταθεροποίησης εδάφους με διάφορα πρόσθετα (τσιμέντο, ασβέστος, ιπτάμενη τέφρα, χημικές ενώσεις κλπ) επεκτάθηκε στην Αυστραλία, Σκανδιναβία και Ιαπωνία.<sup>3</sup> Άλλες τεχνικές

<sup>1</sup> Israel, R. W. (1982). Soil stabilization and Cold Mix Recycling. Published by Bomac Co., USA.

<sup>2</sup> Asphalt Institute (1975). The Asphalt Handbook Manual Series N.4, pp371.

<sup>3</sup> Stavridakis, I. E. (1997). A study of slaking related to the unconfined compressive strength of cement

σταθεροποίησης και ενίσχυσης μαλακών και συνεκτικών εδαφών είναι η βαθιά μίξη με πρόσθετα (DSM, CDM, κλπ), για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών αυτών. <sup>4</sup>Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε από την Ιαπωνία το 1970, τις Σκανδιναβικές χώρες (Σουηδία, Φιλανδία) για εφαρμογές σε κτιριακά συγκροτήματα, θεμελιώσεις γεφυρών, κατασκευές αντιστήριξης, κλπ. Η βασική στρατηγική όλων αυτών των τεχνικών είναι να βρεθεί η πιο κατάλληλη, αποτελεσματική και οικονομική μέθοδος που να βελτιώνει το έδαφος, ώστε οι μηχανικές του ιδιότητες να γίνουν παρόμοιες με αυτές των μαλακών βράχων, αυξάνοντας την ασφάλεια των γεωτεχνικών έργων.

## 1.2 Συμπύκνωση εδάφους

Κατά την κατασκευή αναχωμάτων σε αυτοκινητόδρομους, φραγμάτων και πολλών άλλων μηχανικών κατασκευών, τα χαλαρά εδάφη πρέπει να συμπυκνωθούν ώστε να αυξηθεί το ειδικό βάρος τους. Η συμπύκνωση αυξάνει την αντοχή των εδαφών η οποία με την σειρά της αυξάνει την ικανότητα στήριξης των θεμελιώσεων. Η συμπύκνωση επίσης μειώνει την πιθανότητα των ανεπιθύμητων καθιζήσεων των κατασκευών και αυξάνει την σταθερότητα των πρανών στους αυτοκινητόδρομους. Οδοστρωτήρες λείου κυλίνδρου, οδοστρωτήρες με κασικοπόδαρο, λαστιχοφόροι οδοστρωτήρες, καθώς και λαστιχοφόροι δονητικοί οδοστρωτήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στο χώρο της συμπύκνωσης εδαφών. Οι δονητικοί οδοστρωτήρες συνήθως χρησιμοποιούνται για την πύκνωση κοκκώδων εδαφών. Επίσης οι δονητικοί οδοστρωτήρες χρησιμοποιούνται για την συμπύκνωση κοκκώδων αποθέσεων σε επιθυμητό βάθος. Η συμπύκνωση εδάφους σε αυτήν την περίπτωση καλείται δονητική συμπύκνωση εδάφους (vibroflotation).

Το έδαφος συμπυκνώνεται με την ελεύθερη πτώση σφύρας σε κυλινδρική μεταλλική μήτρα, όπου το δείγμα τοποθετείται σε στρώσεις. Ο βαθμός συμπύκνωσης ενός εδάφους εκφράζεται με την ξηρή πυκνότητα του εδάφους.

Επομένως μεταβολή της τιμής της ξηρής πυκνότητας μετά από συμπύκνωση, εκφράζει την μεταβολή όγκου για το ίδιο ξηρό βάρος, δηλαδή εκφράζει το βαθμό

---

stabilized clayey soils. PhD. Thesis Dept. of Civ. Engin. Aristotle Univ. of Thessaloniki, Greece, (in Greek).

<sup>4</sup> Kamruzzaman M. H. A., H. S. Chew and H. F. Lee (2000). Engineering Behaviour of Cement Treated Singapore Marine Clay. Proc. of an Intern. Conf. On Geotechnical and Geological Eng., 19-24 Nov., Melbourne, Australia



συμπύκνωσης του υλικού. Η μέγιστη συμπύκνωση, δηλαδή η μέγιστη ξηρή πυκνότητα του εδάφους επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας ύδατος που ευνοεί τη μείωση της συνοχής και των τριβών μεταξύ των εδαφικών κόκκων, καθώς και της διατμητικής αντοχής του εδάφους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη αναδιάταξη των κόκκων σε πυκνότερη δομή.

Επομένως, αν μεταβάλλουμε την περιεκτικότητα σε νερό του εδαφικού δείγματος, διατηρώντας σταθερή την ενέργεια συμπύκνωσης (βάρος σφύρας, ύψος πτώσης, αριθμό κτύπων ανά στρώση, διατομή στρώσεων) και κάνουμε το διάγραμμα μεταβολής του ξηρού φαινομένου βάρους  $\gamma_d$  σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε νερό  $w$  (%), τότε παίρνουμε μία καμπύλη που παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή του  $\gamma_d$  για μια ορισμένη περιεκτικότητα σε νερό  $w$ , που χαρακτηρίζεται σαν βέλτιστη υγρασία  $w_{opt}$  κατά Proctor (optimum).

Αν αυξήσουμε την ενέργεια συμπύκνωσης αυξάνεται και η μέγιστη τιμή του  $\gamma_d$  και μειώνεται η βέλτιστη τιμή της περιεκτικότητας σε νερό. Η μορφή της καμπύλης συμπύκνωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Η τιμή της βέλτιστης υγρασίας αυξάνει λογαριθμικά με την αύξηση των λεπτόκοκκων στο έδαφος, ενώ εμφανίζει γενικά γραμμική σχέση με την αύξηση του ποσοστού της λεπτής άμμου.

Σε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης χώρων απόθεσης στερεών αποβλήτων, συνήθως απαιτείται η συμπύκνωση των επιτόπου υλικών για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η απόθεση των στερεών αποβλήτων στους χώρους απόθεσης γίνεται ανεξέλεγκτα.

Επιπλέον, η χρησιμοποίηση συμπυκνωμένων αργιλικών στρώσεων για την υδραυλική απομόνωση χώρων απόθεσης αποβλήτων είναι συνήθης. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται τόσο ως μονωτικές στρώσεις στον πυθμένα (κάτω από τη στρώση συλλογής του στραγγίσματος) όσο και κατά την τελική κάλυψη των χώρων, με κύριο σκοπό τον περιορισμό της κατείσδυσης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, τα οποία τελικώς αυξάνουν τον όγκο του ρυπογόνου υγρού στραγγίσματος.

Στις ανωτέρω περιπτώσεις, μέσω της συμπύκνωσης, επιτυγχάνονται η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών και η μείωση της υδραυλικής τους αγωγιμότητας. Η επιτόπου συμπύκνωση των εδαφικών υλικών γίνεται με διάφορους τρόπους αναλόγως της φύσης αλλά και της προβλεπόμενης

χρήσης τους μετά τη συμπύκνωση<sup>5</sup>.

Η συμπύκνωση των στερεών αποβλήτων, όπως π.χ. των αστικών απορριμμάτων, στερεών αποβλήτων ορυχείων, αδρανών προϊόντων κατεδαφίσεων (μπαζών), συνήθως γίνεται με τη μέθοδο της δυναμικής συμπύκνωσης. Κατά τη μέθοδο αυτή, τα υλικά συμπυκνώνονται με την ενέργεια που προκαλείται από τις επαναλαμβανόμενες πτώσεις μεταλλικής πλάκας βάρους 1-2 τόνων από ύψος 20-30 μέτρων.

Η διαδικασία των διαδοχικών πτώσεων γίνεται με κατάλληλο γερανό ο οποίος ανυψώνει τη μεταλλική πλάκα και στη συνέχεια της επιτρέπει την ελεύθερη πτώση από το προβλεπόμενο ύψος.

Η μέθοδος της δυναμικής συμπύκνωσης είναι πολύ αποδοτική, έχει μικρό κόστος (σε σχέση με άλλες μεθόδους συμπύκνωσης) και μπορεί να γίνει σε μικρό χρονικό διάστημα. Το κυριότερο μειονέκτημά της είναι οι δονήσεις που προκαλούνται κατά την πτώση του βάρους. Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συμπύκνωση των κορεσμένων αργιλικών υλικών.

Η συμπύκνωση των αργιλικών υλικών για τη χρησιμοποίησή τους ως στεγανωτικών μεμβρανών (clay liners) γίνεται με τις συνήθεις μεθόδους συμπύκνωσης των αργίλων, δηλαδή με διαδοχικές διελεύσεις κατάλληλων οδοστρωτήρων σε στρώσεις μικρού πάχους (15-30 cm) και με την κατάλληλη υγρασία συμπυκνώσεως. Με τη συμπύκνωση:

1. Μειώνεται η συμπιεστότητα του εδάφους και συνεπώς οι υποχωρήσεις μετά την κατασκευή του έργου.
2. Αυξάνεται η διατμητική αντοχή και συνεπώς ο συντελεστής ασφαλείας των πρανών.
3. Βελτιώνεται η φέρουσα ικανότητα και συνεπώς αυξάνεται η επιτρεπόμενη τάση έδρασης των θεμελίων των έργων.
4. Ελέγχονται οι μεταβολές του όγκου που προέρχονται από τον παγετό και μεταβολές της υγρασίας.
5. Οι ιδιότητες του εδάφους γίνονται περισσότερο ομοιόμορφες, δηλαδή μειώνεται η

---

<sup>5</sup> NJDEP (1984) "Field Sampling Procedures Manual", New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Hazardous Site Mitigation.

τυχαία ανομοιομορφία των φυσικών εδαφικών σχηματισμών.

Η συμπύκνωση των εδαφών με την προσθήκη μηχανικής ενέργειας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα κοκκώδη εδάφη η προσφορότερη ίσως μέθοδος συμπύκνωσης είναι η δόνηση (π.χ. με δονητικούς οδοστρωτήρες ή με ελεύθερη πτώση βάρους). Τα συνεκτικά εδάφη στο εργαστήριο συμπυκνώνονται με πολλαπλές πτώσεις βάρους, ενώ στα χωματοουργικά έργα χρησιμοποιούνται μηχανικοί οδοστρωτήρες.

Οι βασικές μέθοδοι συμπύκνωσης των εδαφών μελετήθηκαν από τον R.R. Proctor στις ΗΠΑ περί το 1930, ο οποίος ανέπτυξε την κυριότερη εργαστηριακή δοκιμή Proctor). Κατά τις έρευνες του Proctor διαπιστώθηκε ότι, με την προσθήκη μηχανικής ενέργειας σε ένα εδαφικό δοκίμιο, η επιτυγχανόμενη συμπύκνωση (που εκφράζεται ποσοτικά με την πυκνότητα του ξηρού υλικού  $\rho_d$ ) εξαρτάται από:

- (i) το είδος του εδαφικού υλικού
- (ii) την ενέργεια συμπύκνωσης ανά μονάδα όγκου του δοκιμίου και
- (iii) την υγρασία του εδάφους κατά τη συμπύκνωση.

Κατά την εργαστηριακή δοκιμή Proctor, η συμπύκνωση του εδαφικού δείγματος γίνεται σε μεταλλικό δοχείο ορισμένου όγκου με πτώση σφύρας συγκεκριμένου βάρους από ορισμένο ύψος και η ενέργεια συμπύκνωσης μετράται με τον αριθμό των πτώσεων της σφύρας ή, ακριβέστερα, με τη συνολική ενέργεια πτώσης της σφύρας ανά μονάδα όγκου του εδαφικού δείγματος.

Η συμπύκνωση συμβάλλει στην προστασία περιβάλλοντος, αυξάνοντας την αντίσταση του εδάφους στην φυσική αποσάθρωση από αέρα ή νερό, περιορίζοντας την μόλυνση του εδάφους με μείωση της μεταφορικής ικανότητας των μολυσμένων ουσιών δημιουργώντας συσσωματώματα που μετατρέπονται σε πολυδυσκίνητες χημικές μορφές.

Οι καμπύλες συμπύκνωσης, προσδιορίζονται με τη συμπύκνωση αρκετών δειγμάτων που έχουν ποικίλα ποσοστά υγρασίας και τη μέτρηση της ξηρής πυκνότητας που επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση. Οι καμπύλες συμπύκνωσης παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην ξηρή πυκνότητα που επιτυγχάνεται όταν η συμπύκνωση γίνει στη λεγόμενη βέλτιστη υγρασία ( $w_{opt}$ ).

Πίνακας Μέθοδοι Βελτίωσης του εδάφους	
Στερεοποίηση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Προφόρτιση</li> <li>2. Ηλεκτρική όσμωση</li> </ol>
Οπλισμός του εδάφους (χρησιμοποίηση στοιχείων που μπορούν να παραλάβουν δυνάμεις ελκυσμού ή θλίψης)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Λιθοπάσσαλοι</li> <li>2. Οπλισμένο έδαφος</li> <li>3. Χρησιμοποίηση γεωφασμάτων.</li> <li>4. Ριζοπάσσαλοι</li> <li>5. Κάρφωμα εδάφους.</li> </ol>
Συμπύκνωση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Δυναμική συμπύκνωση</li> <li>2. Πάσσαλοι συμπύκνωσης.</li> <li>3. Μέθοδοι μαζικής δόνησης.</li> <li>4. Εκρήξεις.</li> </ol>
Σταθεροποίηση με ανάμιξη του εδάφους με άσβεστο ή τσιμέντο	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ασβεστοπάσσαλοι.</li> <li>2. Πάσσαλοι η διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου.</li> <li>3. Υποβάσεις δρόμων.</li> <li>4. Επικαλύψεις πρανών.</li> </ol>
Ενέσεις	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ενέσεις διαποτισμού.</li> <li>2. Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης</li> </ol>
Θερμική δράση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Θέρμανση του εδάφους</li> <li>2. Ψύξη του εδάφους</li> </ol>

Η κωδωνοειδής μορφή των καμπύλων συμπύκνωσης είναι αρκετά ενδιαφέρουσα. Κατά τη συμπύκνωση σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης, όσο αυξάνει το ποσοστό υγρασίας, τα αργιλικά πλακίδια αναπτύσσουν μεγαλύτερες διπλές στρώσεις οι οποίες κατά κάποιον τρόπο τα “λιπαίνουν” και καθιστούν ευκολότερη την αναδιάταξή τους σε πυκνότερη δομή.

Με την περαιτέρω αύξηση της υγρασίας (πάνω από το  $w_{opt}$ ), η ξηρή πυκνότητα αρχίζει να μειώνεται, επειδή η προσθήκη νερού αποκρίνει πλέον τους

στερεούς κόκκους (αντί απλώς να γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων) και η πυκνότητα του νερού είναι μικρότερη από την πυκνότητα των στερεών κόκκων που αντικαθιστά ( $\rho_w < \rho_s$ ). Η κωδωνοειδής μορφή των καμπύλων συμπίκνωσης κατά την εργαστηριακή δοκιμή Proctor εμφανίζεται και κατά την επιτόπου συμπίκνωση των εδαφών και μάλιστα η χρησιμότητα της εργαστηριακής δοκιμής συμπίκνωσης βασίζεται ακριβώς στην αναλογία αυτή.

Ειδικότερα, αν “βαθμονομηθούν” οι μέθοδοι επιτόπου συμπίκνωσης (δηλαδή αν προσδιορισθεί η ενέργεια συμπίκνωσης που αντιστοιχεί σε μια διέλευση συγκεκριμένου οδοστρωτήρα), μπορεί να προσδιορισθεί ο απαιτούμενος αριθμός διελεύσεων και η υγρασία συμπίκνωσης για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός συμπίκνωσης (ξηρή πυκνότητα) επιτόπου, με βάση τις εργαστηριακές καμπύλες συμπίκνωσης<sup>6</sup>.

Η σημασία της υγρασίας του εδάφους κατά τη συμπίκνωση δεν περιορίζεται στην επίτευξη της μέγιστης ξηρής πυκνότητας. Η δομή και συνεπώς οι μηχανικές ιδιότητες των συνεκτικών εδαφών εξαρτώνται επίσης από την υγρασία συμπίκνωσης. Η υγρασία συμπίκνωσης επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των συνεκτικών εδαφών ως εξής:

- (1) Η διαπερατότητα των συνεκτικών εδαφών μειώνεται με τη αύξηση της υγρασίας συμπίκνωσης μέχρι μια ελάχιστη τιμή περί τη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης. Με την περαιτέρω αύξηση της υγρασίας, η διαπερατότητα αυξάνει ελαφρά ή παραμένει σταθερή. Επίσης, για συγκεκριμένη υγρασία συμπίκνωσης, η διαπερατότητα μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας συμπίκνωσης.
- (2) Η συμπίεστικότητα των συμπυκνωμένων αργίλων εξαρτάται από την ένταση της φόρτισης (πίεσης). Σε χαμηλές πιέσεις, οι άργιλοι που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης είναι περισσότερο συμπίεστές. Σε υψηλές πιέσεις ισχύει ακριβώς το αντίθετο.
- (3) Η τάση για διόγκωση (κατά την έκθεση στο νερό) είναι μεγαλύτερη σε αργίλους που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης. Αντίθετα, η τάση για συρρίκνωση κατά την ξήρανση των συνεκτικών εδαφών

---

<sup>6</sup> NAVFAC DM 7.1 (1982) “Soil Mechanics Design Manual”, U.S. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, VA.

είναι μεγαλύτερη σε αργίλους που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης.

Η επιρροή της υγρασίας συμπύκνωσης στη διατμητική αντοχή των συνεκτικών εδαφών είναι σύνθετη, αλλά συνήθως εδαφικά δείγματα που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης έχουν μεγαλύτερη αντοχή από αντίστοιχα δείγματα που έχουν συμπυκνωθεί σε μεγαλύτερη υγρασία. Αν, όμως, τα δείγματα εκτεθούν στο νερό και διογκωθούν πριν από τη διάτμηση, η συμπεριφορά αντιστρέφεται, επειδή τα ξηρότερα δείγματα διογκώνονται περισσότερο.

Συνεπώς, η επιλογή της υγρασίας συμπύκνωσης των εδαφικών υλικών στα χωματουργικά έργα δεν είναι μονοσήμαντη αλλά εξαρτάται από το είδος του εδαφικού υλικού, το είδος του έργου και τα διαθέσιμα μηχανήματα.

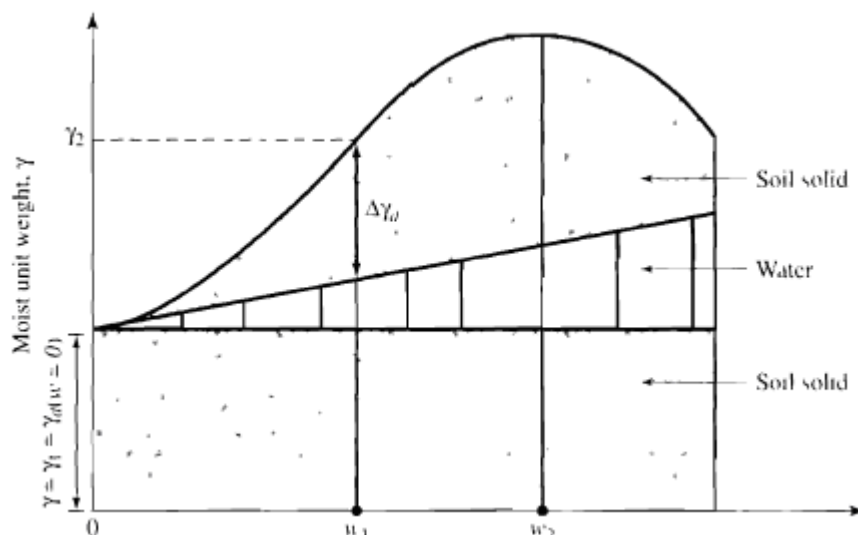
Στις συνήθεις περιπτώσεις επιχωμάτων οδοποιίας, άργιλοι χαμηλής και μέσης πλαστιμότητας συμπυκνώνονται με υγρασία περί τη βέλτιστη τιμή ( $w_{opt} \pm 2\%$ ), ενώ άργιλοι μεγάλης πλαστιμότητας συμπυκνώνονται με υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης. Στην περίπτωση συμπύκνωσης των αργίλων για την κατασκευή στεγανωτικών μεμβρανών (clay liners) η κρίσιμη ιδιότητα είναι η διαπερατότητα, και συνεπώς η συμπύκνωση των αργίλων γίνεται συνήθως με υγρασία ελαφρά μεγαλύτερη της μέγιστης τιμής<sup>7</sup>.

### **Συμπύκνωση – Γενικές αρχές**

Συμπύκνωση, γενικώς, είναι η διαδικασία πύκνωσης του εδάφους με την απομάκρυνση του αέρα η οποία απαιτεί μηχανική ενέργεια. Ο βαθμός της συμπύκνωσης του εδάφους μετριέται σε σχέση με την μονάδα ξηρού βάρους του. Με την προσθήκη νερού στο έδαφος κατά την διάρκεια της διαδικασίας συμπύκνωσης βελτιώνεται η μαλθακότητά του. Τα σωματίδια που το αποτελούν γλιστρούν μεταξύ τους και μετακινούνται σε θέσεις υψηλής πυκνότητας. Η μονάδα μέτρησης του ξηρού βάρους του εδάφους μετά την συμπύκνωση αυξάνει καθώς αυξάνει το ποσοστό της περιεκτικότητας υγρασίας του. Για το περιεχόμενο υγρασίας  $w=0$ , η μονάδα μέτρησης του ειδικού βάρους του ( $\gamma$ ) είναι ίση με τη μονάδα μέτρησης του ξηρού βάρους ( $\gamma_d$ ).

---

<sup>7</sup> ISSMFE (1979) "State of the Art on Current Soil Sampling", ISSMFE, Subcommittee on Soil Sampling.



Η υπέρβαση ενός ορίου  $w$  στην περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους προκαλεί την μείωση ανά μονάδα μέτρησης του ξηρού βάρους του. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι το νερό καταλαμβάνει χώρο που θα έπρεπε να έχουν καταλάβει τα στερεά σωματίδια του εδάφους. Το ποσοστό της περιεκτικότητας υγρασίας του εδάφους στο οποίο αντιστοιχεί η μεγαλύτερη τιμή του ξηρού βάρους του καλείται βέλτιστη υγρασία.

Εργαστηριακώς ο υπολογισμός της μονάδας μέτρησης του ξηρού βάρους του εδάφους καθώς και της βέλτιστης υγρασίας του γίνεται με τη δοκιμή Proctor.

### 1.3 Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους

Οι μέθοδοι βελτίωσης παρουσιάζονται συνοπτικά στον παραπάνω πίνακα<sup>8</sup> χωρισμένες στις εξής κατηγορίες:

- 1) μέθοδοι στερεοποίησης
- 2) μέθοδοι όπλισης του εδάφους
- 3) μέθοδοι συμπύκνωσης
- 4) μέθοδοι σταθεροποίησης (βελτίωσης) του εδάφους με ανάμιξη:
  - α) με άσβεστο
  - β) με τσιμέντο

<sup>8</sup> Τσότσος, Στ. (1987). Θέματα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, ΑΠΘ.

γ) με χημικά πρόσθετα

5) μέθοδοι με εκτέλεση ενέσεων

6) θερμικής δράσης

Περιληπτική περιγραφή των μεθόδων βελτίωσης του εδάφους κατά τους Attewell και Farmer (1976)<sup>9</sup>, Τσότσο (1987)<sup>10</sup>, Van Impe (1989), γίνεται παρακάτω:

### **1. Στερεοποίηση:**

α) Προφόρτιση.

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

Άλλοι τρόποι προφόρτισης είναι:

i) Η τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων συνήθως σε μικρού πλάτους γραμμικά έργα,

ii) Η κατάλληλη άντληση και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπογείου νερού,

iii) Η πλήρωση δεξαμενών ή άλλων υδατοστεγών χώρων με νερό,

iv) Η επιφανειακή διαβροχή στεγνών χαλαρών αποθέσεων,

β) Προφόρτιση με την χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων.

Η προφόρτιση μπορεί να ενισχυθεί και να βελτιωθεί με την κατασκευή κατακόρυφων αμμοστραγγιστηρίων που επιτρέπουν συμπληρωματική αποστράγγιση.

γ) Ήλεκτρο-όσμωση.

Η μέθοδος συνίσταται στην δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού που προκαλεί τη ροή υπογείου νερού προς την κάθοδο. Οι κάθοδοι συνήθως αποτελούνται από διάτρητους σιδερένιους σωλήνες που απομακρύνουν το νερό.

### **2. Οπλισμός εδάφους.**

α) Λίθινοι πάσσαλοι ή χαλικοπάσσαλοι.

Η μέθοδος συνίσταται στη διάνοιξη κυκλικών οπών στο προβληματικό έδαφος με

---

<sup>9</sup> Attewell, P. B. and I. W. Farmer (1976). Principles of Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York.

<sup>10</sup> Τσότσος, Στ. (1987). Θέματα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, ΑΠΘ.



μήκος σημαντικό και στην πλήρωσή τους με χάλικες ή με θραυστό υλικό λατομείου. Σ' αυτήν την περίπτωση κρίσιμη είναι η αντοχή του ιδίου του υλικού του πασσάλου και όχι η μεταφορά του φορτίου από τους πασσάλους στο έδαφος.

β) Οπλισμένο έδαφος.

Το έδαφος μπορεί να βελτιωθεί με την εισαγωγή τοπικά στοιχείων οπλισμού. Αυτό μπορεί να γίνει με την εισαγωγή μεταλλικών λωρίδων μέσα στο έδαφος (οπλισμένο έδαφος), με τα γεωϋφάσματα, την εισαγωγή ατσάλινων ράβδων ή με ηλώσεις (soilnailing) ή με την εισαγωγή ριζοπασσάλων.

### **3. Συμπύκνωση.**

α) Δυναμική συμπύκνωση.

Συνίσταται στην επιβολή πτώσης μεγάλων βαρών έως 10 τόνων από ύψος 10m έως 40m (VanImpe, 1989), όπως ακριβώς συμβαίνει στη δοκιμή συμπύκνωσης των εδαφών κατά Proctor. Χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε χαλαρά αμμώδη εδάφη.

β) Μέθοδοι μαζικής δόνησης.

Συνίσταται στην εισαγωγή δονητή σε χαλαρά, μη συνεκτικά εδάφη όπου προκαλεί ακτινωτή συμπύκνωση.

γ) Σε δίκτυο γεωτρήσεων τοποθετείται εκρηκτική ύλη που κατά την έκρηξη δημιουργεί διαμήκη και διατμητικά κύματα, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους, κάτω από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων.

### **4. Σταθεροποίηση του εδάφους με τη χρήση τσιμέντου, ασβέστου ή άλλων χημικών προσθέτων.**

α) Ασβεστοπάσσαλοι.

Με ειδικό αυτοκινούμενο μηχάνημα διανοίγεται οπή σε αργιλλοϊλυώδη εδάφη στη συνέχεια το στέλεχος ανασύρεται, ενώ διοχετεύεται στο έδαφος σκόνη ανύδρου ασβέστη (CaO). Ταυτόχρονα το όλο σύστημα “έδαφος – ασβέστος” αναμειγνύεται και σχηματίζεται μία κατακόρυφη στήλη.

β) Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμειξη εδάφους και τσιμέντου. Ο τρόπος κατασκευής των πασσάλων και των διαφραγμάτων με ανάμειξη εδάφους και τσιμέντου είναι ο ίδιος με τον τρόπο κατασκευής των ασβεστοπασσάλων.

## **5. Ενέσεις.**

Η ένεση είναι η διοχέτευση στα εδάφη , με πίεση, ειδικών ρευστών που σύντομα πήζουν και βελτιώνουν – ενισχύουν τη συμπεριφορά τους. Ανάλογα με την ιδιότητα που βασικά επηρεάζεται διακρίνουμε δύο κατηγορίες ενέσεων: 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.

Ανάλογα με τον τρόπο που ενεργεί το ένεμα διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

- α) Ενέσεις διαποτισμού.
- β) Ενέσεις εκτοπίσεως ή συμπύκνωσης.
- γ) Ενέσεις εγκλωβισμού.
- δ) Ενέσεις πλήρωσης κενών.

Οι συνήθεις τύποι ενεμάτων είναι τα αιωρήματα τσιμέντου (τσιμεντενέσεις) ή μείγματος εδάφους (πχ. μπεντονίτη, άμμου) και τσιμέντου ή και μόνο εδαφών σε νερό και τα χημικά διαλύματα συνήθως πυριτικών ή πολυμερών υλικών.

Η χρήση οργανικών σταθεροποιητών ή προσθέτων (ρυθμιστές χρόνου πήξης α) επιταχυντές β) επιβραδυντές) ή ακόμα και αργιλικών εδαφών –μπεντονίτη είναι αναγκαία σε περιπτώσεις που επιδιώκεται ρύθμιση των ιδιοτήτων των μειγμάτων εδάφους – τσιμέντου, (επιτάχυνση του χρόνου πήξης ή σκλήρυνσης του τσιμέντου, αύξηση των αρχικών αντοχών, μείωση διαπερατότητας), όπως πχ. στην περίπτωση των τσιμεντενέσεων, (δημιουργία σταθερών διαλυμάτων με τη χρήση αργιλικών εδαφών – μπεντονίτη κλπ.).

## **6. Θερμική δράση.**

- α) Θέρμανση του εδάφους.

Η μέθοδος αυτή είναι η λιγότερο οικονομική από τις προηγούμενες και εφαρμόζεται σε χαλαρά εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα και συνίσταται στη δημιουργία οπών με καρφίδες και την εισβολή πολύ θερμού μείγματος αέρος και καυσίμου μέσα στο έδαφος. Η πίεση είναι 1,5 φορά μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 300°C έως 100°C με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση λόγω απώλειας

του νερού και την αύξηση των ενεργών τάσεων. Σε θερμοκρασίες 550°C η ικανότητα διόγκωσης της αργίλου καταστρέφεται σε 1000°C οι κόκκοι άμμου τήκονται και δημιουργούν τεχνητή τσιμεντοποίηση.

ΜΕΘΟΔΟΣ	Βελτίωση-Ενίσχυση	Έδαφος
Προφόρτιση	B	C; S
Αντικατάσταση Εδάφους	B	C (S)
Χαλικοπάσσαλοι	E (B)	C, S
Επιφανειακή Συμπύκνωση	B	(C), S
Βαθιά Δονητική Συμπύκνωση	B	S
Βαθιά Εδαφική Ανάμιξη	Βελτίωση	S
Οπλισμένη γη, γεφυφάσματα κλπ	Ενίσχυση	C, S
(Τσιμεντ)ενέσεις	E	S
Ηλεκτρο-όσμωση	B	C
Κατάψυξη εδάφους	B	S

C: άργιλος  
S: άμμος

#### Μέθοδοι βελτίωσης – ενίσχυσης εδάφους

##### 1.4 Ψύξη του εδάφους

Η μέθοδος ψύξης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φραγμών από παγωμένο νερό έξω από την επιφάνεια των κατασκευών. Παραδείγματα των μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης παρουσιάζονται στο σχήμα. Στον πίνακα δίνονται τα όρια της κοκκομετρικής σύνθεσης των εδαφών στα οποία εφαρμόζεται αποτελεσματικά κάθε μία από τις μεθόδους βελτίωσης που αναφέρθηκαν<sup>1112</sup>. Ειδικότερα όσον αφορά τις μεθόδους βελτίωσης που περιλαμβάνονται στην κατηγορία της σταθεροποίησης του εδάφους διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

α) Σταθεροποίηση με συμπύκνωση.

β) Μηχανική σταθεροποίηση με ανάμιξη δύο ή περισσότερων υλικών.

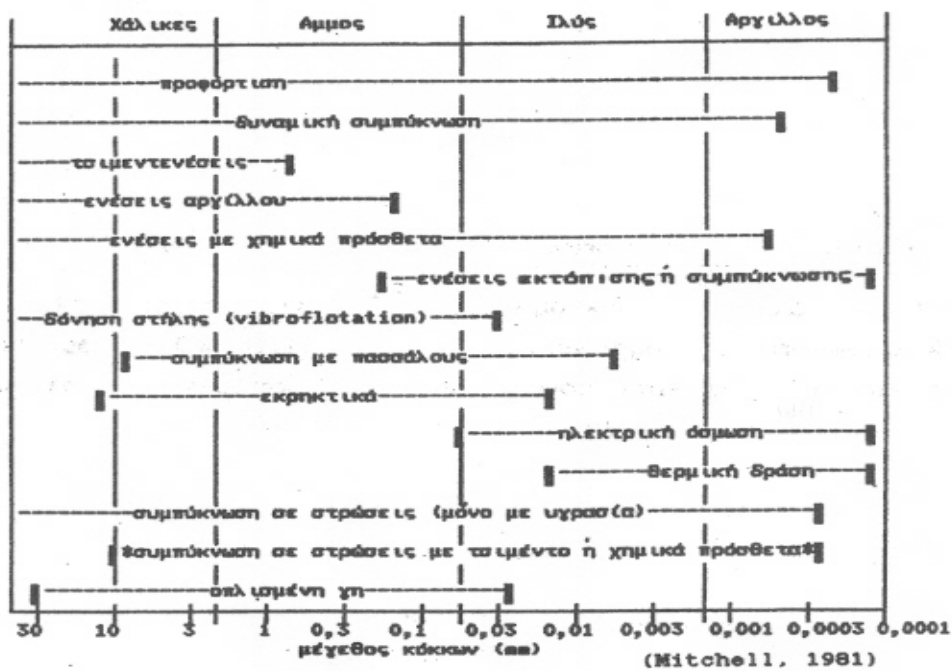
<sup>11</sup> Bell, F. G. (1975). Methods of Treatment of Unstable Ground, by A.A. Lilley.

<sup>12</sup> Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement – State of the Art Report. Proceedings of the Tenth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering

γ) Χημικές ή φυσικοχημικές σταθεροποιήσεις με πρόσθετα υλικά που ονομάζονται “σταθεροποιητές”.

Από τις παραπάνω μεθόδους βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών η σταθεροποίηση με τσιμέντο έχει ευρύ φάσμα εφαρμογής στα εδάφη, επίσης είναι οικονομική μέθοδος. Κατά τον Mitchell (1981)<sup>13</sup> η σταθεροποίηση του εδάφους με τσιμέντο σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους<sup>14</sup>

Πίνακας 2: Περιοχές αποτελεσματικότητας των μεθόδων βελτίωσης

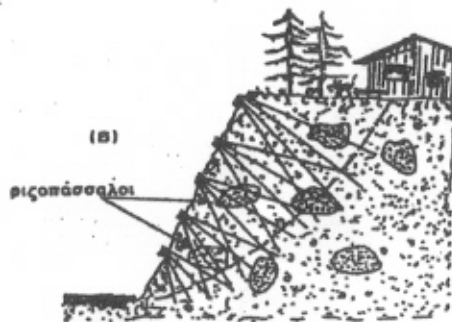


<sup>13</sup> Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement – State of the Art Report. Proceedings of the Tenth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering

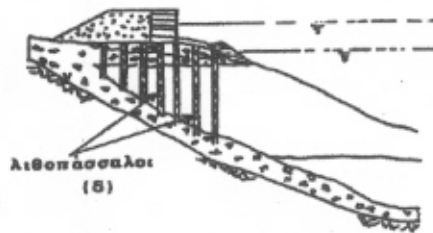
<sup>14</sup> ASCE (1976) “Subsurface investigation for Design of Foundation of Buildings”, ASCE Manual and Report of Engineering Practice, No 56.



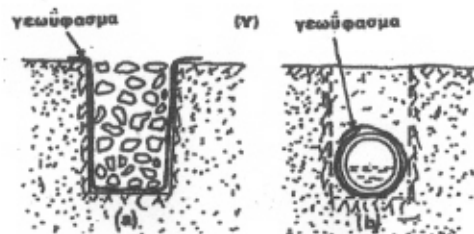
α) Επιστρώσεις - επικαλύψεις με μίγμα εδάφους - τσιμέντου.



β) Στερέωση εδάφους και αποφυγή κατολίσθησης με την χρήση ριζοπάσσάλων.



δ) Χρησιμοποίηση λιθοπάσσάλων και ενίσχυση του εδάφους για την κατασκευή επιχώματος και τοίχου αντιστήριξης.



γ) Χρησιμοποίηση γεωφασμάτων σε τάφρους ή σωλήνες υδρορροής α,β.



ε) Χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων.

Σχήμα 1 Σχηματική παράσταση μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών (Mitchel 1981 και Van Impe 1989).

αθεροποίηση εδαφών με τσιμέντο, άσβεστο, άσφαλτο ή με απλή συμπίκνωση (Κόλιας, 1979)

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 βαρείας 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.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΕΩΣ**

Συμπύκνωση είναι η εργασία της φυσικής συμπίεσεως του εδάφους για τη μείωση κενών χώρων μεταξύ των κόκκων του υλικού (αέρας ή νερό) και την αύξηση του ειδικού βάρους, η οποία έχει ως συνέπεια την αύξηση της φέρουσας αντοχής του εδάφους. Η ικανότητα του εδάφους στην παραλαβή φορτίων σε χωματοургικό έργο ή του ασφαλικού τάπητα σε έργο οδοποιίας εξαρτάται από την πυκνότητα, των υλικών που διαστρώνονται.

Η μέθοδος συμπυκνώσεως των υλικών και η ποιότητα συμπυκνώσεως επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή και διάρκεια ζωής του έργου. Ιδιαίτερα σε έργα οδοποιίας, στα οποία τα στατικά και δυναμικά φορτία έχουν υψηλές τιμές, η καλή συμπύκνωση όλων των στρωμάτων από τη βάση μέχρι τον τελικό ασφαλικό τάπητα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές και η χρησιμοποίηση των κατάλληλων μηχανημάτων, είναι σημαντικός παράγων, ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα και συμπεριφορά του έργου.<sup>15</sup>

Το αποτέλεσμα της συμπυκνώσεως εξαρτάται από το υλικό, από την εκλογή και από την εφαρμογή των κατάλληλων μηχανικών μέσων. Διακρίνονται οι εξής τύποι μηχανών συμπυκνώσεως:

### **Στατική συμπύκνωση**

1. Μεταλλικοί στατικοί κύλινδροι. Αυτοκινούμενοι, ελκόμενοι.
2. Λείοι ή κύλινδροι ή με κασικοπόδαρα. Βάρος 3-15 Mr
3. Ελαστικοί στατικοί κύλινδροι. Αυτοκινούμενοι, ελκόμενοι. Βάρος 10-50 Mr.

### **Δυναμική συμπύκνωση**

1. Δονητικοί κύλινδροι. Αυτοκινούμενοι, ελκόμενοι, με λεία τύμπανα. Βάρος 3-6 Mr και 10-15 Mr.
2. Δονητικές πλάκες. Ανεξάρτητες, εξαρτημένες. Βάρος 0,1-0,6 Mr.
3. Κοπανιστήρες. Φυσικής πτώσεως ή εσωτερικής καύσεως. Βάρος 0,05-0,5 Mr και 1,0-3,0 Mr.

Κάθε ένας από τους τύπους αυτούς έχει μία βέλτιστη περιοχή εφαρμογής με

---

<sup>15</sup> Hvorslev M.J. (1962) "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes, ASCE.

διαφορετικά αποτελέσματα συμπτύκνωσης ανάλογα με το υλικό. Η επιλογή των μηχανημάτων επηρεάζει τη συμπτύκνωση.

## **2.1 Τεχνικές προδιαγραφές συμπτύκνωσης**

Η διαβάθμιση επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της συμπτύκνωσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση θραυστού υλικού λατομείων ή αναλόγου φυσικής προελεύσεως. Η κοκκομετρική διαβάθμιση είναι ικανοποιητική, όταν η κατανομή των κόκκων είναι ομαλή. Όταν το έδαφος αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από κόκκους του ίδιου μεγέθους, τότε η διαβάθμιση χαρακτηρίζεται ως φτωχή και η συμπτύκνωση του υλικού είναι δύσκολη ή αδύνατη.

### **2.1.1 Περιεχόμενο υγρασίας**

Το περιεχόμενο υγρασίας ή η ποσότητα νερού μέσα στο υλικό, επηρεάζει σημαντικά την συμπτύκνωση, τόσο σε συνεκτικά υλικά, όσο και σε διαβαθμισμένα. Το νερό ενεργεί σαν λιπαντικό μεταξύ των κόκκων και έτσι τους βοηθά να κινηθούν μέσα στη μάζα του υλικού για να συμπληρώσουν τους κενούς χώρους. Το νερό επίσης προκαλεί σύνδεση των κόκκων της αργίλου μεταξύ τους, με συνέπεια την αύξηση της συνοχής.

Το νερό πρέπει να δίνεται από το υδροφόρο όχημα δοσιμετρικά για να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή του εργαστηρίου. Στην περίπτωση διαβαθμισμένου υλικού οδοστρωσίας με υψηλές απαιτήσεις ενδείκνυται η προετοιμασία του υλικού σε κεντρικά συγκροτήματα με αναμικτήρα βίαιης αναμείξεως, τα οποία εξασφαλίζουν ακρίβεια στην παροχή του νερού και στη συνέχεια μεταφορά στο χώρο διαστρώσεως και διάστρωση με finicher.

### **2.1.2 Διεργασία συμπτύκνωσης**

Η διεργασία συμπτύκνωσης αναφέρεται στη μέθοδο, με την οποία προσδίδεται στο έδαφος η ενέργεια, την οποία παράγει το μηχάνημα συμπτύκνωσης. Βασικό στοιχείο είναι η επιλογή μεταξύ στατικής ή δονητικής συμπτύκνωσης και των αντίστοιχων μηχανών συμπτύκνωσης.



## 1. Διάκριση εδαφών

Τα εδάφη, από άποψη συμπτκνώσεως, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- i. . Επιφανειακό έδαφος.
- ii. Υγρό έδαφος με οργανικές προσμίξεις με δυσκολία συμπτκνώσεως
- iii. Συνεκτικό έδαφος, όπως είναι η άργιλος και η λάσπη.
- iv. Μη συνεκτικά εδάφη, θραυστά ή φυσικής προελεύσεως, όπως είναι η άμμος και τα αδρανή υλικά.
- v. Βραχώδη εδάφη με χονδρούς κόκκους πέτρας.

Τα υγρά εδάφη με αυξημένο ποσοστό υγρασίας και οργανικές προσμίξεις δεν συμπτκνώνονται εύκολα και γι' αυτό είναι ακατάλληλα για χωματοουργικά έργα και οδοποιία. Τα υλικά, τα οποία δέχονται συμπύκνωση, είναι μείγματα συνεκτικών και μη συνεκτικών υλικών σε κατάλληλες αναλογίες. Όλοι οι κόκκοι του υλικού, οι οποίοι διέρχονται από κόσκινο με βρόχο 0,063 mm θεωρείται, ότι είναι αργιλικά υλικά ή λεπτό λιθάλευρο και συνιστούν συνεκτικό υλικό<sup>16</sup>.

Ο διαχωρισμός των συνεκτικών αυτών υλικών είναι δυνατός με υδρομετρικές μεθόδους. Υλικά με μέγεθος κόκκου 0,063 mm είναι μη συνεκτικά υλικά και διαχωρίζονται με μηχανικές μεθόδους. Αμιγή συνεκτικά υλικά, άμμος και χάλικες φυσικής προελεύσεως του ίδιου περίπου μεγέθους κόκκου συμπτκνώνονται δύσκολα. Αντίθετα υλικά με καλή διαβάθμιση και ανάμιξη συμπτκνώνονται ευκολότερα. Επομένως βασικός παράγοντας για καλή και οικονομική συμπύκνωση είναι η καλή διαβάθμιση σύμφωνα με την προδιαγραφή του εργαστηρίου.

## 2. Βέλτιστη υγρασία

Κάθε υλικό έχει δική του μέγιστη πυκνότητα, επομένως και μέγιστο αποτέλεσμα συμπτκνώσεως, η οποία εξαρτάται από το περιεχόμενο υγρασίας. Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας εφαρμόζεται η «δοκιμή κατά Proctor, απλή ή βελτιωμένη». Οι βέλτιστες τιμές υγρασίας δίνονται από το εργαστήριο και είναι κρίσιμες για το αποτέλεσμα της συμπτκνώσεως, επομένως για την αντοχή του

---

<sup>16</sup> British Standard for Development DD 175 (1988) "Code of Practice for the identification of potentially contaminated land and its Investigation", British Standard Institution.

έργου. Ενδεικτικά δίνονται οι εξής τιμές βέλτιστης υγρασίας:

<b>Βέλτιστες τιμές υγρασίας</b>	
Βαριά άργιλος	17%
Λασπώδης άργιλος	15%
Αμμώδης άργιλος	13%
Άμμος	10%
Αδρανή υλικά, άμμος, αργιλικά μίγματα	7%

Η απαιτούμενη κατά Proctor τιμή συμπακνώσεως δίνεται στις τεχνικές προδιαγραφές του έργου. Η μέθοδος λήψεως των δειγμάτων δίνεται στην τεχνική προδιαγραφή ή και από το εργαστήριο. Πρέπει να γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό.

## **2.2 Μηχανικά μέσα συμπακνώσεως**

Τα μηχανικά μέσα, που χρησιμοποιούνται για τη συμπύκνωση των εδαφών, διακρίνονται ανάλογα με τη μέθοδο, με την οποία διαβιβάζεται η μηχανική ενέργεια στο έδαφος. Διακρίνονται οι εξής μέθοδοι<sup>17</sup>:

1. Στατικό βάρος (ή πίεση): Στατική συμπύκνωση.
2. Δόνηση: Δονητική συμπύκνωση.
3. Κρούση: Κρουστική συμπύκνωση.
4. Ζύμωση: Ζυμωτική συμπύκνωση.

## **2.3 Στατικοί κύλινδροι με χαλύβδινους κυλίνδρους**

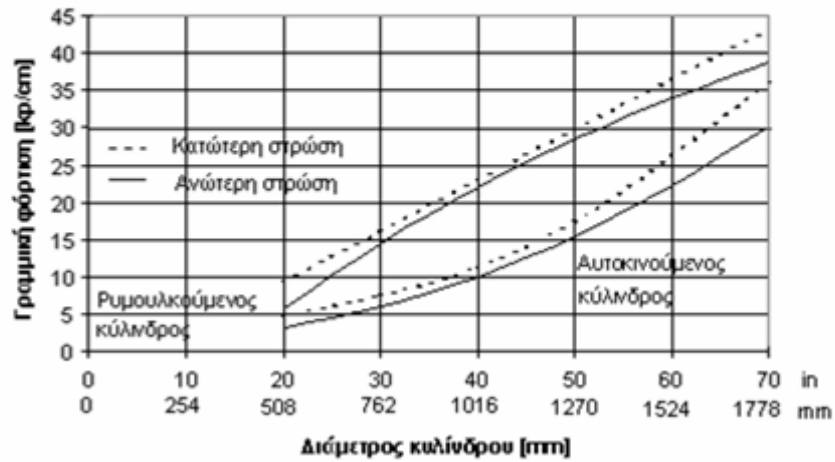
Η στατική συμπύκνωση γίνεται με χαλύβδινους κυλίνδρους κατά προτίμηση μεγάλης διαμέτρου >1450 mm και μεγάλου στατικού βάρους, οι οποίοι είναι

---

<sup>17</sup> ASCE (1976) "Subsurface investigation for Design of Foundation of Buildings", ASCE Manual and Report of Engineering Practice, No 56.



Εδαφος : Αμμοχάλικες  
 Υγρασία : 4-5 %  
 Ταχύτητα : 1 km/h  
 Πάχος στρώσεως: 300 mm



Επιτρεπόμενη φόρτιση κυλίνδρου σε συνάρτηση από τη διάμετρο του κυλίνδρου για ρυμουλκούμενους και αυτοκινούμενους κυλίνδρους (κατά Theiner, T.H. Aachen)

Το πάχος της στρώσεως, που συμπυκνώνεται (καθορίζεται από το εργαστήριο μετά από επιτόπια έρευνα), είναι 20-30 cm με επιφανειακές πιέσεις 3,5 kN/cm<sup>2</sup> για αμμώδες υλικό, 7-14 kN/cm<sup>2</sup> για άργιλο και 14-28 kN/cm<sup>2</sup> (και σε εξαιρετικές περιπτώσεις μέχρι 45 kN/cm<sup>2</sup>) στην περίπτωση πολύ συνεκτικών εδαφών με πέτρες<sup>20</sup>.

## 2.4 Στατικοί κύλινδροι με ελαστικούς τροχούς

Οι ελαστικοφόροι κύλινδροι συμπυκνώσεως χρησιμοποιούνται με επιτυχία τόσο στα χωματουργικά έργα, όσο και στη συμπύκνωση ασφαλικών ταπήτων. Η επιτυχία τους οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περισσότερο ομοιόμορφη συμπίεση, την οποία δίνουν στο έδαφος, σε σύγκριση με τους μεταλλικούς κυλίνδρους.

Οι τελευταίοι, εξ αιτίας της άκαμπτης κατασκευής του κυλίνδρου, αφήνουν πολλές φορές κενά μεταξύ γειτονικών κόκκων ή στιβάδων του υλικού, με αποτέλεσμα το υλικό που βρίσκεται κάτω από τη θέση αυτή να παραμένει χωρίς συμπίεση. Το

<sup>20</sup> Theiner, T.H. A.,(2006), Principles of Engineering Geology, John Wiley& Sons,Inc., New York

φαινόμενο αυτό ονομάζεται γεφύρωση, στην κοινή γλώσσα κοιλιές, και εμφανίζεται περισσότερο στα επιφανειακά στρώματα. Το μειονέκτημα αυτό δεν παρατηρείται στους ελαστικοφόρους συμπυκνωτές.

Τα αποτελέσματα της συμπυκνώσεως είναι ακόμη καλύτερα, όταν ο συμπυκνωτής έχει επτά ελαστικούς τροχούς με ταλαντευόμενη ανάρτηση. Με τη διάταξη αυτή η κατανομή του βάρους είναι ομοιόμορφη και σταθερή σε όλους τους τροχούς ακόμη και στην περίπτωση εργασίας πάνω σε ανώμαλο έδαφος.

Τα πλεονεκτήματα αυτά του ελαστικοφόρου συμπυκνωτή μειώνουν στο ελάχιστο τη μεταγενέστερη επισκευαστική συμπύκνωση στα έργα οδοποιίας, η οποία οφείλεται σε παραμορφώσεις κατά τη λειτουργία του έργου. Ενδείκνυται να υπάρχει η δυνατότητα κεντρικής αυξομειώσεως της πίεσεως των ελαστικών ανάλογα με τη φύση του εδάφους και τη σειρά των διελεύσεων<sup>21</sup>.

Οι πρώτες διελεύσεις, όταν το υλικό είναι χαλαρό, γίνονται με χαμηλή πίεση, η οποία στις επόμενες διελεύσεις αυξάνεται βαθμηδόν. Ο χαρακτηρισμός των ελαστικοφόρων συμπυκνωτών δεν γίνεται με τη γραμμική φόρτιση, όπως στους μεταλλικούς κυλίνδρους, γιατί η πίεση δεν εξασκείται κατά μήκος μιας γενέτειρας, αλλά πάνω σε μια επιφάνεια, η οποία σχηματίζεται από το ελλειψοειδές ίχνος του ελαστικού επισώτρου.

Το μέγεθος της επιφάνειας επαφής μεταβάλλεται ανάλογα με το στατικό φορτίο ή την εσωτερική πίεση του ελαστικού. Για το χαρακτηρισμό του ελαστικού συμπυκνωτή, δίνεται η πίεση επαφής  $P$  ως το πηλίκο του βάρους  $G$  δια της επιφάνειας επαφής  $F$ . Το βάρος  $G$  στους ελκυόμενους συμπυκνωτές μεταβάλλεται με πρόσθεση ή αφαίρεση έρματος, συνήθως νερού.

---

<sup>21</sup> NJDEP (1984) "Field Sampling Procedures Manual", New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Hazardous Site Mitigation

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο. ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (VIBRO COMPACTION)**

### **3.1 Γενικά**

Η δονητική συμπίκνωση είναι μια διαδικασία βελτίωσης εδάφους όπου μέσω της συμπίκνωσης χαλαρής άμμου δημιουργείται σταθερό έδαφος θεμελίωσης. Η αρχή πίσω από τη δονητική συμπίκνωση είναι απλή. Η συνδυασμένη δράση των κραδασμών και του κορεσμού ύδατος από υδροβολή αναδιατάσσει τους χαλαρούς κόκκους άμμου σε μια πιο συμπαγή κατάσταση. Η δονητική συμπίκνωση εκτελείται με ειδικά σχεδιασμένους πασσάλους δόνησης. Και οι δύο, οριζόντιοι και κάθετοι μέθοδοι δόνησης έχουν χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν.

Ο πάσσαλος εισάγεται για πρώτη φορά στο έδαφος και με την υδροβολή και με τις δονήσεις. Αφού ο πάσσαλος φτάσει το απαιτούμενο βάθος της συμπίκνωσης, κοκκώδη υλικά, συνήθως άμμος, προστίθενται από την επιφάνεια του εδάφους για να γεμίσει τον κενό χώρο που δημιουργήθηκε από το δονητή. Μια συμπτυκνωμένη ακτινωτή ζώνη από κοκκώδες υλικό δημιουργήθηκε.

Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και αποτελεσματική σε οποιαδήποτε χαλαρή και καθαρή άμμο ή στρώμα χαλικιού που δεν είναι σε επιμειξία με συνεκτικά εδάφη.

#### **3.1.1 Περιπτώσεις που η μέθοδος δε χρησιμοποιείται καθόλου ή αποφεύγεται**

Η δονητική συμπίκνωση δε χρησιμοποιείται σε ευαίσθητα εδάφη, κοντά σε υφιστάμενα κτίρια ή σε υπόγειες κατασκευές, εφόσον οι παραμορφώσεις από τη διαδικασία της συμπίκνωσης είναι πολύ μεγάλες. Ακόμη η μέθοδος δεν είναι εφικτή σε περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετός χώρος για το γερανό.

Η δονητική συμπίκνωση είναι δυνατή αλλά αποφεύγεται σε μικτά στρώματα εδάφους. Υπάρχει κίνδυνος, όταν ένα συμπτυκνωμένο στρώμα εδάφους βρίσκεται δίπλα σε ένα στρώμα μαλακού συνεκτικού εδάφους να αναμειχθούν και να μειωθεί η επιτυχία της συμπίκνωσης.

### 3.2 Κατάλληλοι τύποι εδαφών

Το έδαφος πρέπει να είναι διαπερατό ώστε να επιτραπεί η αποστράγγιση των πόρων του νερού κατά τη διαδικασία της συμπίεσης. Η διαπερατότητα είναι αρκετά υψηλή για όλα τα κοκκώδη εδάφη, δηλαδή άμμο και χαλίκια με λιγότερο από 12% ποσότητα του μικρότερου κλάσματος λεπτόκοκκων αδρανών (κόσκινο #200/ 0.074mm) και λιγότερο από 2% άργιλο.

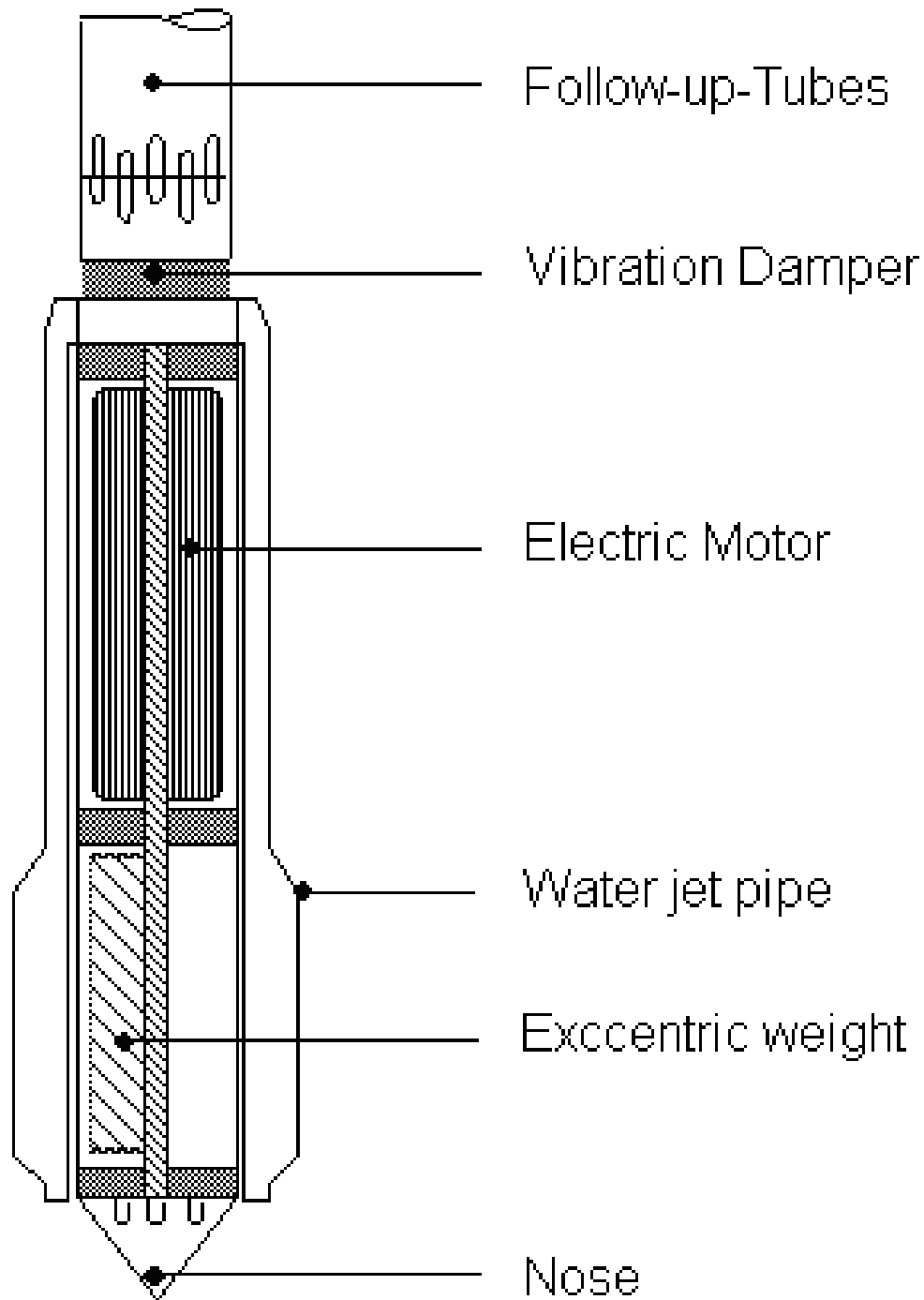
### 3.3 Εύρος βάθους

Το εύρος βάθους κυμαίνεται μεταξύ 3m έως και πάνω από 60m, με πιο χαρακτηριστικό στα έργα αυτό μεταξύ 5m και 30m.

### 3.4 Πάσσαλοι Δόνησης (Vibroprobes)

#### Τύποι πασσάλων δόνησης

Manufacturer	Bauer	Bauer	Keller	Keller	Keller	Keller	Vibro	Vibro
Machine name	TR13	TR85	M	S	A	L	V23	V32
Length [m]	3.13	4.20	3.30	3.00	4.35	3.10	3.57	3.57
Diameter [mm]	300	420	290	400	290	320	350	350
Weight [kg]	1000	2090	1600	2450	1900	1815	2200	2200
Motor [kW]	105	210	50	120	50	100	130	130
Speed [min <sup>-1</sup> ]	3250	1800	3000	1800	2000	3600	1800	1800
Ampl. [mm]	6	22	7.2	18	13.8	5.3	23	32
Dyn.Force [kN]	150	330	150	280	160	201	300	450



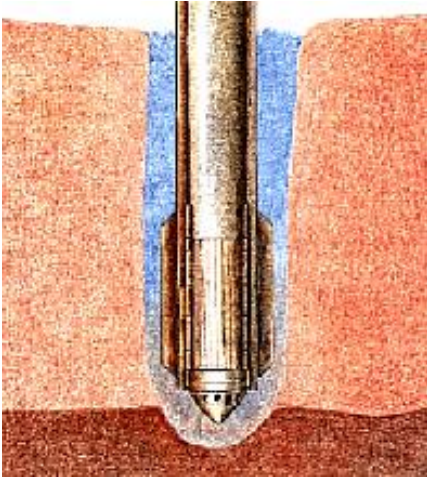
Διατομή ενός πασσάλου δόνησης





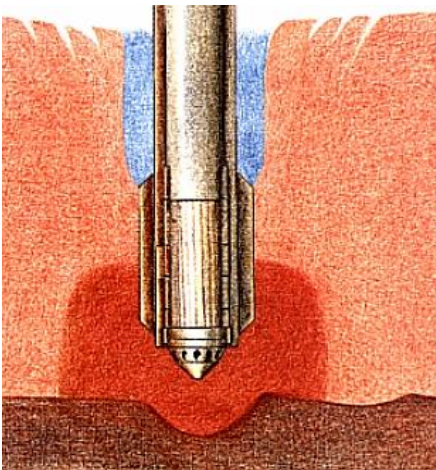
V23 at West Kowloon Reclamation

### 3.5 Διαδικασίες εγκατάστασης



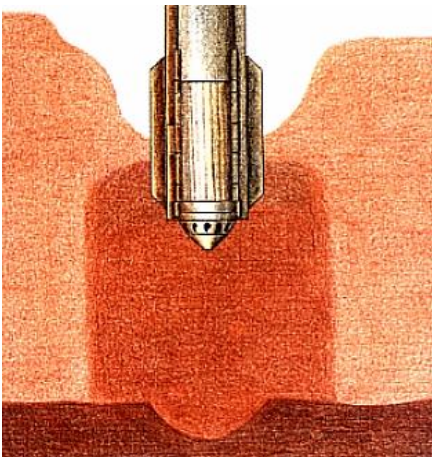
#### Διείδυση

Ο πάσσαλος δόνησης διεισδύει στο απαιτούμενο βάθος μέσω της δόνησης και της εκτόξευσης νερού ή / και αέρα.



#### Συμπύκνωση

Ο πάσσαλος δόνησης ανασύρεται από το μέγιστο βάθος σε διαστήματα των 0.5m. Η επί τόπου άμμος ή το χαλίκι ρέει προς την κατεύθυνση του πασσάλου δόνησης.

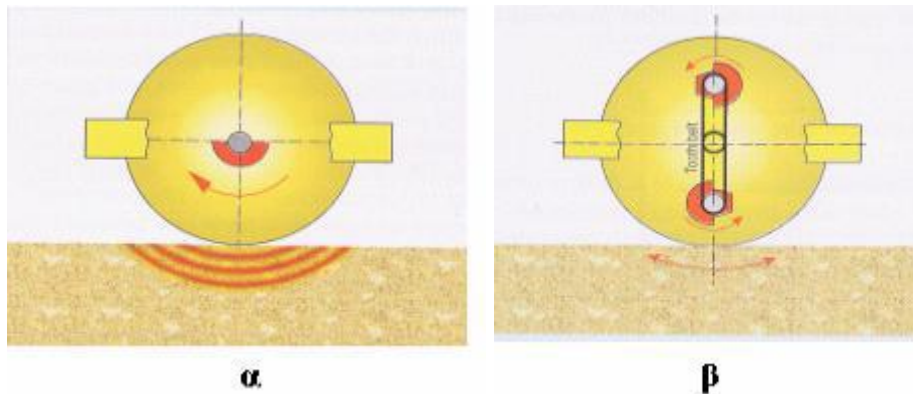


#### Επίχωση

Η συμπύκνωση επιτυγχάνεται είτε με επίχωση από την κορυφή ή με επί τόπου έδαφος μόνο.

### 3.6 Δονητικοί συμπυκνωτές με κυλίνδρους

Διακρίνονται σε αυτοκινούμενους και ρυμουλκούμενους. Οι δύο αυτές μορφές χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά είδη εδαφών. Η δύναμη διεγέρσεως είναι κυκλική (α) ή κατευθυνόμενη (β), όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα.



Η κυκλική διέγερση προκαλείται από μία έκκεντρη μάζα, η οποία περιστρέφεται περί το γεωμετρικό άξονα του τυμπάνου. Η κατευθυνόμενη δύναμη διεγέρσεως, εκτός από την κατακόρυφη συνιστώσα, δίνει μία μικρή οριζόντια συνιστώσα, η οποία διαταράσσει το υλικό και μειώνει τη συμπύκνωση των επιφανειακών στρωμάτων<sup>22</sup>.

Οι προσπάθειες βελτιώσεως των δονητών συγκεντρώνονται στη μείωση της οριζόντιας συνιστώσας σε όσο το δυνατό μικρότερες τιμές, ώστε να προσεγγίζουν την κατευθυνόμενη διέγερση.

Αυτό είναι δυνατό με διάφορες διατάξεις, που διαφέρουν ανάλογα με την κατασκευαστική διαμόρφωση. Η κατευθυνόμενη δύναμη διεγέρσεως με τη σταθερή κατακόρυφη διεύθυνση δίνει καλύτερα αποτελέσματα συμπυκνώσεως σε ολόκληρο το πάχος του στρώματος χωρίς εγκλωβισμό αέρος και ανεξέλεγκτες κρούσεις και γι' αυτό πρέπει να προτιμάται.

Ο αυτοκινούμενος δονητικός συμπυκνωτής κατασκευάζεται σε μορφή τάντεμ με δύο κυλίνδρους, προσαρμοσμένους σε κοινό πλαίσιο, ή σε ημιρυμουλκούμενη μορφή, στην οποία το κινητήριο τμήμα συνδέεται αρθρωτά με το δονούμενο τμήμα. Ο

<sup>22</sup> ASCE (1976) "Subsurface investigation for Design of Foundation of Buildings", ASCE Manual and Report of Engineering Practice, No 56

συμπυκνωτής αποτελείται από δύο μεταλλικούς κυλίνδρους, από τους οποίους ο εμπρόσθιος είναι για τη διεύθυνση, και ο οπίσθιος, ο οποίος φέρει το σύστημα διεγέρσεως, για τη συμπύκνωση. Στον ημιρυμουλκούμενο τύπο στη θέση του μεταλλικού κυλίνδρου τοποθετούνται δύο ελαστικοί τροχοί. Το εμπρόσθιο τμήμα συνδέεται με το οπίσθιο τμήμα του μεταλλικού κυλίνδρου συμπυκνώσεως με ένα κεντρικό πύρο, έτσι ώστε να σχηματίζεται αρθρωτό σύστημα. Το σύστημα αυτό δίνει στο μηχάνημα καλύτερες ικανότητες συμπυκνώσεως, ταχύτητα, ευελιξία και άνεση εργασίας.

Το στατικό βάρος του αυτοκινούμενου συμπυκνωτή κυμαίνεται μεταξύ 1,8 και 7 τόνων και είναι λίγο μεγαλύτερο από τη μέγιστη τιμή της δυνάμεως διεγέρσεως. Συχνότητα διεγέρσεως 0 - 33,33 Hz για συμπύκνωση σε βάθος (μεγαλύτερο εύρος ταλαντώσεως) και 0 - 50 Hz για την επιφανειακή συμπύκνωση (μικρότερο εύρος ταλαντώσεως).

Η χωρίς βαθμίδες μεταβολή της συχνότητας διεγέρσεως πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση υδραυλικού συμπλέκτη και ειδικού κιβωτίου ταχυτήτων. Οι δίτροχοι αυτοκινούμενοι κύλινδροι με κατευθυνόμενη δύναμη διεγέρσεως είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για τη συμπύκνωση διαβαθμισμένων υλικών. Το στατικό βάρος των ημιρυμουλκούμενων δονητών φτάνει τους 16 τόνους και η ισχύς κινήσεως τους 160 PS. Η συχνότητα διεγέρσεως κυμαίνεται μεταξύ 40 και 25 Hz για τα μικρά και μεγάλα μεγέθη αντιστοίχως. Ο ρυμουλκούμενος δονητικός κύλινδρος είναι μεταλλικό λείο τύμπανο ή με προεξοχές, το οποίο έλκεται από ερπυστριοφόρο ελκυστήρα. Έχει δικό του πετρελαιοκινητήρα για το σύστημα διεγέρσεως. Το βάρος του φτάνει τους 13,5 τόνους και η ισχύς του διεγέρτη τους 115 PS. Η συχνότητα διεγέρσεως είναι 23,33 Hz, η διάμετρος του κυλίνδρου 1800 mm, το πλάτος του κυλίνδρου 2040 mm και το πάχος του ελάσματος 40 mm. Η ταχύτητα συμπυκνώσεως κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40 m/min (1,2 - 2,4 km/h). Η επιτρεπόμενη μέγιστη κλίση λειτουργίας είναι περίπου 17° .

### **3.7 Χειροδηγούμενος δίδυμος δονητικός συμπυκνωτής**

Ιδιαίτερη μορφή δονητικού συμπυκνωτή είναι ο χειροδηγούμενος δίδυμος δονητής, ο οποίος ονομαζόταν Bomag, από την ονομασία του εργοστασίου, το οποίο

αρχικά τον κατασκεύασε (1962).

Ο δίδυμος συμπυκνωτής φέρει δύο μεταλλικούς κυλίνδρους. Κάθε κύλινδρος έχει δική του διέγερση με διαφορά φάσεως των δυνάμεων διεγέρσεως  $180^\circ$ , έτσι ώστε όταν ο ένας κύλινδρος αναπηδά από το έδαφος, ο άλλος να είναι σε επαφή με το έδαφος στη φάση συμπίεσεως. Το κύριο πλεονέκτημα της μορφής αυτής δονητικού συμπυκνωτή είναι η δόνηση του εδάφους από δύο κυλίνδρους στη διάρκεια μιας διελεύσεως.

Άλλη θετική ιδιότητα είναι ο «εγκλωβισμός» των τάσεων, που προκαλεί ο ένας κύλινδρος κατά την επαφή του, από τον άλλο κύλινδρο, όταν ο πρώτος, μετά την απόδοση της κρουστικής ενέργειάς του, αναπηδά από το έδαφος<sup>23</sup>.

Ο χειροδηγούμενος δίδυμος δονητικός συμπυκνωτής κατασκευάζεται σε μικρά και μεγάλα μεγέθη. Τα μικρότερα μεγέθη είναι κατάλληλα για εργασίες μέσα σε περιορισμένους χώρους, όπως π.χ. για τη συμπύκνωση πυθμένων τάφρων, επιχωμάτωση μικρών τεχνικών έργων κ.λ.π Τα μεγαλύτερα μεγέθη είναι κατάλληλα για έργα οδοποιίας, για τη δονητική συμπύκνωση της βάσεως (διαβαθμισμένο υλικό) και για ασφαλικούς τάπητες

### **3.8 Αυτοκινούμενος δίδυμος δονητικός συμπυκνωτής με κασικοπόδαρα**

Η νέα τεχνολογία των συμπυκνωτών συγκεντρώνει σε ένα μηχάνημα τις ιδιότητες του στατικού κυλίνδρου με κασικοπόδαρα και του δίδυμου δονητικού συμπυκνωτή με αρθρωτή σύνδεση των πλαισίων των δύο κυλίνδρων.

Το κατασκευαστικό βάρος μπορεί να φτάσει τους 47 τόνους και η ισχύς τους 450 HP, Η ταχύτητα εργασίας κατά τη συμπύκνωση κυμαίνεται μεταξύ 6 - 7 km/h, ταχύτητα επιστροφής μέχρι 18 km/h<sup>24</sup>.

Οι δίδυμοι συμπυκνωτές με κασιποπόδαρα χρησιμοποιούνται με επιτυχία στα μεγάλα χωματουργικά έργα και ιδιαίτερα στην κατασκευή του αργιλικού πυρήνα των χωματοφραγμάτων. Δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα συμπυκνώσεως. Η μορφή και

---

<sup>23</sup> Τσότσος, Στ. (1987). Θέματα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, ΑΠΘ

<sup>24</sup> Kamruzzaman M. H. A., H. S. Chew and H. F. Lee (2000). Engineering Behaviour of Cement Treated Singapore Marine Clay. Proc. of an Intern. Conf. On Geotechnical and Geological Eng., 19-24 Nov., Melbourne, Australia

οι διαστάσεις των προεξοχών των τυμπάνων (κατσικοπόδαρα) εξαρτώνται από το έδαφος και το επιθυμητό αποτέλεσμα συμπακνώσεως. Καθορίζονται στη σύμβαση, ή από το εργαστήριο μετά από επιτόπια έρευνα.

### **3.9 Επίπεδοι δονητικοί συμπακνωτές**

Ονομάζονται και δονητικές πλάκες. Το χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή δύναμη διεγέρσεως, η οποία είναι 2 έως 10 φορές μεγαλύτερη από το βάρος του δονητού. Για την ανάπτυξη της υψηλής δύναμης διεγέρσεως απαιτείται αντίστοιχα υψηλή συχνότητα.

Τα δύο αυτά στοιχεία είναι κρίσιμα για τη λειτουργία του συμπακνωτή, ως προς το αποτέλεσμα της συμπακνώσεως. Αυτό σημαίνει, ότι για να είναι τα αποτελέσματα της συμπακνώσεως ικανοποιητικά, πρέπει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του δονητή να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (μηχανική συχνότητα δονητή, εύρος ταλαντώσεως, βάρος δονητή, φυσική συχνότητα εδάφους).

Η αντιστοιχία των στοιχείων αυτών δεν είναι ακριβώς καθορισμένη. Προσδιορίζεται με βάση την εμπειρία και εργαστηριακές μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα συμπακνώσεως σε διαβαθμισμένα υλικά.

#### **3.9.1 Ανεξάρτητοι επίπεδοι δονητές με κινητήρα**

Ο κινητήρας, βενζινοκινητήρας στα μικρά μεγέθη, πετρελαιοκινητήρας στα μεγαλύτερα, είναι τοποθετημένος πάνω στην πλάκα του δονητή με την παρεμβολή τεσσάρων ελατηρίων. Η διέγερση κυμαίνεται μεταξύ 55 και 90 Hz (3300 έως 4500 στρ/λεπτό). Η αναπτυσσόμενη φυγόκεντρη δύναμη κυμαίνεται μεταξύ 25 και 86 KN (2500 έως 8600 kg). Η δονητική πλάκα είναι αυτοκινούμενη με πρόσω και οπίσω κίνηση. Με διπλό σύστημα διεγέρσεως έχει τη δυνατότητα της επιτόπιας περιστροφής περί κατακόρυφο άξονα. Κατασκευάζονται σε μεγέθη από 77 κρ μέχρι

2800 kρ, ισχύς 2,6 έως 40 PS<sup>25</sup>.

### **3.9.2 Εξαρτημένοι επίπεδοι δονητές**

Η πλάκα του δονητή φέρει μόνο το σύστημα διεγέρσεως, το οποίο παίρνει κίνηση από τον κινητήρα του φορέα (π.χ. φορτηγό Unimog) με τραπεζοειδείς ιμάντες κινήσεως, ή στα τελευταίου τύπου μηχανήματα, με υδραυλική ενέργεια. Όταν το πλάτος της λωρίδας που θα συμπυκνωθεί είναι μεγάλο, τότε τοποθετούνται παράλληλα περισσότερες δονητικές πλάκες, συνήθως 3.

Έτσι το πλάτος εργασίας μπορεί να φτάσει τα 3 μέτρα. Με την τοποθέτηση μιας σειράς πλακών και στο οπίσθιο τμήμα του οχήματος βελτιώνεται σημαντικά το αποτέλεσμα και η ταχύτητα συμπυκνώσεως. Η λειτουργία του εξαρτημένου επίπεδου δονητή είναι καλύτερη σε σύγκριση με τον ανεξάρτητο, γιατί η δόνηση δεν επηρεάζεται από τη μάζα του κινητήρα και των παρελκομένων του.

### **3.10 Δονητικοί κοπανιστήρες**

Η συμπύκνωση είναι το αποτέλεσμα της κρούσεως της πλάκας του μηχανήματος με το έδαφος. Τα τυπικά βάρη των κοπανιστήρων κυμαίνονται μεταξύ 50 και 100 kg. Η συχνότητα μεταξύ 9 και 11 Hz (540 έως 660 κρούσεις ανά λεπτό). Βέλτιστη συμπύκνωση στην περιοχή των 10 Hz (600 κρούσεις ανά λεπτό). Το μέγεθος της πλάκας προσαρμόζεται με αντικατάσταση στις συνθήκες του έργου.

Οι δονητικοί κύλινδροι και οι επίπεδοι δονητές υψηλής συχνότητας διεγέρσεως (2100 έως 3000 στρ/λ) δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μη συνεκτικά διαβαθμισμένα θραυστά υλικά ή φυσικής προελεύσεως.

Οι υψηλές συχνότητες δίνουν μικρό πλάτος ταλαντώσεως, έτσι ώστε ο κύλινδρος ή η πλάκα να βρίσκεται σχεδόν σε συνεχή επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Η υψηλή συχνότητα με μικρή ταχύτητα διελεύσεως δίνει μεγαλύτερο αριθμό δονήσεων πάνω σε μία επιφάνεια με αποτέλεσμα την ταλάντωση των κόκκων για μακρότερο χρονικό διάστημα, επομένως καλύτερη διάταξη των κόκκων μέσα στη

---

<sup>25</sup> Kamruzzaman M. H. A., H. S. Chew and H. F. Lee (2000). Engineering Behaviour of Cement Treated Singapore Marine Clay. Proc. of an Intern. Conf. On Geotechnical and Geological Eng., 19-24 Nov., Melbourne, Australia

μάζα του υλικού. Οι ιδιότητες αυτές ισχύουν για μικρά μεγέθη κόκκων, το πολύ μέχρι 60 mm. Όσο το μέγεθος των κόκκων αυξάνει, τόσο πρέπει να ελαττώνεται η συχνότητα και να αυξάνει το στατικό βάρος του δονητή και αντίστοιχα η δύναμη διεγέρσεως<sup>26</sup>.

Οι βαρύτεροι δονητικοί κύλινδροι, συνήθως ρυμουλκούμενοι, χαμηλής συχνότητας (1500 έως 2100 στρ/λ), είναι κατάλληλοι για τη συμπύκνωση μικτών υλικών, δηλαδή για αμμοχάλικες με αργιλικά υλικά ή ακόμη και για δύσκολα συνεκτικά υλικά, στα οποία η στατική συμπύκνωση αστοχεί.

Η συχνότητα διεγέρσεως στα συνεκτικά εδάφη είναι μικρότερη και το εύρος ταλαντώσεως μεγαλύτερο. Με την επίδραση και του στατικού βάρους αυξάνει η «ενέργεια κρούσεως», η οποία μεταφέρεται στο έδαφος. Η μεγάλη ενέργεια κρούσεως είναι απαραίτητη για τη συμπύκνωση των συνεκτικών εδαφών. Εργαστηριακές έρευνες πάνω σε συνεκτικά εδάφη και σε υλικά με αμμοχάλικες απέδειξαν, ότι η συμπύκνωση, εκφρασμένη σε ξηρά πυκνότητα του υλικού, εξαρτάται από τη σχέση του στατικού βάρους του δονητή προς τη δύναμη διεγέρσεως<sup>27</sup>.

Η σχέση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 1:3. Μικρότερες τιμές, δηλαδή μικρό στατικό βάρος και μεγαλύτερη φυγόκεντρη δύναμη, έχουν σαν αποτέλεσμα τη διατάραξη της αρμονικής κινήσεως του συμπυκνωτή και την ανώμαλη κίνησή του, έτσι ώστε ο δονητής να εκτελεί πολλαπλά άλματα χωρίς κρούσεις στο έδαφος.

Η ταχύτητα διελεύσεως πάνω στο διαστρωμένο υλικό επηρεάζει επίσης τη συμπύκνωση. Η βέλτιστη ταχύτητα για τους δονητικούς κυλίνδρους (αυτοκινουμένους ή ρυμουλκούμενους) κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2 km/h. Η ταχύτητα και ο αριθμός διελεύσεων, όπως στην περίπτωση των στατικών κυλίνδρων, εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους. Για την οικονομική συμπύκνωση ενός έργου πρέπει να γίνονται δοκιμές πάνω στο υλικό, για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος αριθμός διελεύσεων. Μεγάλος αριθμός διελεύσεων (πάνω από 6 έως 8) σημαίνει υλικό με κακή διαβάθμιση ακατάλληλο για συμπύκνωση.

Οι δονητικοί συμπυκνωτές με κυλίνδρους χρησιμοποιούνται με επιτυχία στη συμπύκνωση ασφαλικών ταπήτων. Στα ανώτερα στρώματα δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, από εκείνα των στατικών κυλίνδρων.

---

<sup>26</sup> Israel, R. W. (1982). Soil stabilization and Cold Mix Recycling. Published by Bomac Co., USA

<sup>27</sup> Asphalt Institute (1975). The Asphalt Handbook Manual Series N.4, pp371



Στην περίπτωση αυτή πρέπει να δίνεται προσοχή στη γραμμική φόρτιση, η οποία δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 25 kρ/cm πλάτους κυλίνδρου, με εύρος ταλαντώσεως 0,5 mm και συχνότητα διεγέρσεως 3000 στρ/λ. Αύξηση των στοιχείων αυτών δεν βελτιώνει το αποτέλεσμα της συμπυκνώσεως.

Η ταχύτητα διελεύσεως κυμαίνεται μεταξύ 2,4 και 3,0 km/h. Η συμπύκνωση του ασφαλτικού τάπητα γίνεται με την ακόλουθη σειρά εργασιών. Στην αρχή συμπυκνώνεται το ασφαλτικό μείγμα με μία ή δύο διελεύσεις χωρίς δόνηση. Στη συνέχεια ακολουθούν διελεύσεις με δόνηση στον απαραίτητο αριθμό. Είναι σημαντικό η λειτουργία του δονητή να διακόπτεται στις στάσεις, όταν αναστρέφεται η φορά κινήσεως. Αν δεν τηρηθεί η αρχή αυτή, τότε στη θέση της αναστροφής η επιφάνεια του ασφαλτικού τάπητα θα παρουσιάζει κοιλότητες. Η θερμοκρασία του ασφαλτομείγματος στη φάση συμπυκνώσεως πρέπει να είναι μεταξύ 70°C και 100°C. Στη συμπύκνωση με στατικό κύλινδρο η θερμοκρασία μπορεί να είναι χαμηλότερη

### **3.11 Επιπτώσεις στο έδαφος**

1. Η άμμος και τα χαλίκια αναδιατάσσονται σε μια πυκνότερη κατάσταση
2. Η αναλογία από οριζόντια σε κάθετη αποτελεσματική πίεση αυξάνεται σημαντικά.
3. Η διαπερατότητα του εδάφους μειώνεται 2 έως 50 φορές, ανάλογα με πολλούς παράγοντες.
4. Η γωνία τριβής αυξάνει μέχρι 10 μοίρες.
5. το ποσοστό της συμπυκνωμένης μάζας εδάφους είναι της τάξης του 2% έως 15%, τυπικά 5%.
6. Το μέτρο ελαστικότητας της ακαμψίας μπορεί να αυξηθεί από 2 έως 5 φορές.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ (DYNAMIC COMPACTION)**

### **4.1 Γενικά**

Η δυναμική συμπίκνωση είναι μία από τις πιο ευέλικτες και λιγότερο δαπανηρές από τις διαθέσιμες τεχνικές της βελτίωσης του εδάφους. Περιλαμβάνει διαδοχικές κρούσεις χαλύβδινης μάζας μεγάλου βάρους από γερανό. Οι χαλύβδινες αυτές μάζες κυμαίνονται από 6 έως 20 τόνους και η πτώση τους γίνεται από ύψος 40 έως 80 πόδια. Η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της υψηλής ενεργειακής φόρτισης λόγω των κρούσεων προκαλεί τη συμπίκνωση του εδάφους. Η συμπίκνωση πραγματοποιείται με αναδιάταξη των σωματιδίων του εδάφους (χαλαρή άμμο, ιλύς κλπ.) ή με κατάρρευση των κενών στο εσωτερικό της μάζας του εδάφους (παλαιών χώρων υγειονομικής ταφής, καταβόθρες κλπ.).

Η επιτυχής εφαρμογή ενός δυναμικού προγράμματος συμπίκνωσης απαιτεί μια προσεκτικά ελεγχόμενη εφαρμογή των επιπτώσεων της συμπίκνωσης του εδάφους, χρησιμοποιώντας ένα προκαθορισμένο σχέδιο πλέγματος.

### **4.2 Κατάλληλοι τύποι εδαφών**

Στους περισσότερους τύπους εδαφών μπορεί να επέλθει βελτίωση μέσω της δυναμικής συμπίκνωσης, συμπεριλαμβανομένου κάποιων ειδών ιλύος και αργίλου. Η καλύτερη βελτίωση παρατηρείται σε χαλαρά αμμώδη εδάφη. Αυτό διότι το έδαφος πρέπει να είναι αρκετά διαπερατό ώστε να επιτραπεί η αποστράγγιση του νερού των πόρων κατά τη διαδικασία της συμπίεσης.

Η διαπερατότητα είναι αρκετά υψηλή για όλα τα κοκκώδη εδάφη, δηλαδή άμμο και χαλίκια με λιγότερο από 20% ποσότητα του μικρότερου κλάσματος λεπτόκοκκων αδρανών (κόσκινο #200/ 0.074mm) και λιγότερο από 2% άργιλο.

Η μέθοδος της δυναμικής συμπίκνωσης μπορεί να προσαρμοσθεί σε

εδάφη υψηλότερης περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα αδρανή σε σχέση με τη μέθοδο δονητικής συμπύκνωσης. Αυτό εξηγείται από την επαναλαμβανόμενη δράση των κρούσεων μάζας μεγάλου βάρους, που προκαλεί για μεγάλο χρονικό διάστημα έντονες πιέσεις στους πόρους του εδάφους, έτσι ώστε το νερό να έχει περισσότερο χρόνο για να ρέει μακριά.

#### 4.3 Εύρος βάθους εφαρμογής

Το βάθος της βελτίωσης εδαφών εξαρτάται από την ενέργεια που παράγει κάθε κρούση και μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο:

$$D = n\sqrt{W * H}$$

Όπου D= βάθος βελτίωσης σε μέτρα.

n = ένας εμπειρικός συντελεστής που κυμαίνεται από περίπου 0.3 έως 1.0 και εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του εδάφους

W= βάρος συμπυκνωτή σε τόνους

H= ύψος πτώσης σε μέτρα

Με γιγαντιαίες χτισμένες εξέδρες μπορεί να επιτευχθεί βάθος συμπύκνωσης πάνω από 30m (αεροδρόμιο Nizza, Γαλλία). Με γερανό 150 τόνων το βάρος της μάζας κρούσεως κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25 τόνων, εκτελώντας πτώση από ύψος μέχρι 25m. Για μια τέτοια ρύθμιση το μέγιστο βάθος για βελτίωση είναι 10m.

#### 4.4 Απαιτήσεις κατά την εφαρμογή της δυναμικής συμπύκνωσης

Οι ειδικές απαιτήσεις πριν την εφαρμογή της Δυναμικής Συμπύκνωσης περιλαμβάνουν επαρκή στοιχεία εκ της γεωτεχνικής διερεύνησης των απαντώμενων σχηματισμών στην περιοχή εφαρμογής της δυναμικής συμπύκνωσης

Επισημαίνεται ότι η απαιτούμενη γεωτεχνική έρευνα θα πρέπει να

περιλαμβάνει αναλυτική περιγραφή των γεωτεχνικών στρώσεων συμπεριλαμβανομένου και των τιμών των απαραίτητων γεωτεχνικών παραμέτρων σε όλη την έκταση της ζώνης εφαρμογής της μεθόδου. Είναι απαραίτητο να γίνεται σαφής αναφορά στα δομικά χαρακτηριστικά των γειτονικών κτιρίων και άλλων έργων (π.χ. δίκτυα κοινής ωφέλειας) προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανότητα δυσμενούς επηρεασμού τους από την εφαρμογή της μεθόδου.

Οι προβλεπόμενες μελλοντικές κατασκευές στην περιοχή όπου πρόκειται να εφαρμοσθεί Δυναμική Συμπύκνωση καθορίζουν τον τρόπο και την ένταση της επιβολής της μεθόδου (ανάλογα με την επιφάνειά τους, τα φορτία τους και την ευαισθησία τους σε διαφορικές καθιζήσεις)

<b>A/A</b>	<b>Δραστηριότητα</b>
1.	Διάθεση των στοιχείων γεωτεχνικής διερεύνησης.
2.	Απόφαση επί της μεθόδου κατασκευής και αρχικές δοκιμαστικές εφαρμογές της μεθόδου.
3.	Απόκτηση όλων των αναγκαίων νομικών εξουσιοδοτήσεων από τις Αρχές.
4.	Σχεδιασμός και μελέτη μεθόδου.
5.	Προσδιορισμός όλων των σχετικών φάσεων κατασκευής.
6.	Εκτέλεση των αρχικών δοκιμαστικών πεδίων.
7.	Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αρχικών δοκιμαστικών εφαρμογών.
8.	Επιλογή του καταλληλότερου καννάβου εφαρμογής της μεθόδου και άλλων παραμέτρων.
9.	Οδηγίες για τη μεθοδολογία κατασκευής.
10.	Προδιαγραφές εκτέλεσης των αναγκαίων μετρήσεων.
11.	Επίβλεψη των έργων.
12.	Καταγραφή των επιδράσεων των εργασιών
13.	Ποιοτικός έλεγχος του αποτελέσματος.

#### 4.5 Γεωτεχνική διερεύνηση

Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους με τη μέθοδο της δυναμικής συμπύκνωσης θα πρέπει να βασίζεται στα διερευνηθέντα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου. Οι αναγκαίες γεωτεχνικές έρευνες θα πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις συστάσεις του EN 1997-1:2004" Eurocode 7, Geotechnical design - Part.

- General rules: Ευρωκώδικας 7: Γεωτεχνικός σχεδιασμός - Μέρος 1: Γενικοί κανόνες". Οι γεωτεχνικές αυτές έρευνες μπορεί να είναι:
- Δοκιμές πενετρομέτρου με στατικό ή δυναμικό κώνο.
- Δοκιμές πρότυπων δοκιμών διεύθυνσης.
- Δοκιμές πρεσσιομέτρου.
- Δοκιμαστικές φορτίσεις πλάκας κλπ.
- Γεωφυσικές δοκιμές.
- Διερευνητικές διατρήσεις πιθανού εντοπισμού αερίων στις χωματερές όπου πολλές φορές εφαρμόζεται η μέθοδος.

#### 4.6 Μέθοδος εφαρμογής

Η μέθοδος της δυναμικής συμπύκνωσης απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία δεδομένου ότι απαιτείται ιδιαίτερα βαρύς ανυψωτικός γερανός ενώ η σύνοψη και η ελεύθερη ίωση του βάρους απαιτεί ιδιαίτερα έμπειρους χειρισμούς. Οι φάσεις της εφαρμογής της μεθόδου περιλαμβάνουν:

1. Αξιολόγηση της υπάρχουσας γεωτεχνικής έρευνας
2. Επιλογή των φάσεων και των παραμέτρων των πτώσεων (ύψος πτώσεως, βάρος σφύρας, αριθμός κρούσεων, αριθμός φάσεων, χρόνος αναμονής μεταξύ των φάσεων και κάρναβος των σημείων εφαρμογής).
3. Συνήθως εκτελείται δυναμική συμπύκνωση σε δοκιμαστικό πεδίο (εντός της περιοχής ενδιαφέροντος) προκειμένου να οριστικοποιηθούν

τα χαρακτηριστικά της μεθόδου.

4. Εφαρμογή της μεθόδου κατά φάσεις.
5. Έλεγχος του αποτελέσματος στην τελική κατάσταση (και συχνά στις ενδιάμεσες φάσεις).

#### **4.7 Εξοπλισμός**

Για την εκτέλεση της δυναμικής συμπύκνωσης είναι απαραίτητος ο παρακάτω εξοπλισμός:

1. Χωματοουργικά μηχανήματα για την εκτέλεση των πάσης φύσεως χωματοουργικών εργασιών πριν, κατά, και μετά την Δυναμική Συμπύκνωση. Τα μηχανήματα αυτά είναι εκσκαφείς, φορτωτές, φορτηγά αυτοκίνητα, προωθητές, διαμορφωτές κλπ.
2. Ερπυστριοφόροι ανυψωτικοί γερανοί με ανυψωτική ικανότητα άνω των 50 τόνων και με επαρκές μήκος μπούμας ώστε να είναι δυνατή η ανύψωση της σφύρας μέχρι το ανώτατο ύψος πτώσεως που απαιτείται για την ορθή εκτέλεση της εργασίας. Η ανυψωτική ικανότητα του γερανού πρέπει να είναι μεγάλη για τον πρόσθετο λόγο ότι πρέπει να' ναι σε θέση να αναλάβει τους ισχυρούς κραδασμούς που προκαλούνται από την ταχεία ανύψωση και στην συνέχεια ελεύθερη πτώση της σφύρας.
3. Χαλύβδινες σφύρες βάρους 10 έως 20 τόνων ικανών διαστάσεων (π.χ. 2x3 m), τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής.
- 4, Εξοπλισμό για την εκτέλεση των γεωτεχνικών εργασιών ελέγχου μετά την εφαρμογή της μεθόδου, (π.χ. διατηρητικά μηχανήματα, πενετρόμετρα, πρεσσιόμετρα κλπ.).

#### **4.8 Μέθοδος κατασκευής**

Πριν από την έναρξη της Δυναμικής Συμπύκνωσης, προετοιμάζεται ο χώρος εργασίας με την εκτέλεση χωματοουργικών εργασιών διαμόρφωσης (εκσκαφές, επιχωματώσεις, μεταφορές χωμάτων, κλπ.).

Σκοπός αυτών των εργασιών είναι η διαμόρφωση ομαλού, επιπέδου και κατά το δυνατό οριζοντίου δαπέδου εργασίας για τη διευκόλυνση των κινήσεων των μηχανημάτων.

Όταν οι προς συμπύκνωση αποθέσεις είναι πολύ χαλαρές ή όταν η Στάθμη Υδροφόρου Ορίζοντα ευρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, είναι δυνατόν να απαιτηθεί η διάστρωση μίας στρώσης κοκκώδους υλικού πάχους περίπου 1m («κουβέρτα») προκειμένου να αποτραπούν τυχόν βυθίσεις του βαρέος μηχανικού εξοπλισμού.

Στις προκαταρκτικές εργασίες περιλαμβάνεται και η εγκατάσταση τοπογραφικού δικτύου χωροσταθμίσεως του εδάφους πριν και κατά τη διάρκεια εκτελέσεως της δυναμικής συμπύκνωσης ώστε να παρακολουθείται η επιτυγχανόμενη συμπύκνωση. Πρέπει επίσης να εγκατασταθεί κάρναβος αξόνων με κατάλληλες εξασφαλίσεις, ώστε να είναι ευχερής η επαναχάραξη επί του εδάφους των σημείων στα οποία υπεβλήθη η κρουστική ενέργεια της σφύρας και να υλοποιηθούν οι θέσεις των επόμενων φάσεων της μεθόδου.

Η εδαφική έκταση που πρόκειται να υποβληθεί σε δυναμική συμπύκνωση χωρίζεται σε επί μέρους περιοχές αναλόγως των χρήσεων, με αντίστοιχες απαιτήσεις, και των κατασκευών που πρόκειται να θεμελιωθούν επάνω σ' αυτές, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Μελέτης. Σε περίπτωση κτιρίων, η αντίστοιχη περιοχή περιλαμβάνει και ένα πλάτος 5 περίπου μέτρων έξω από τις οριογραμμές των θεμελίων του κτιρίου. Επίσης, στην περίπτωση κτιρίων, τα σημεία επιβολής των κρούσεων κατά την πρώτη φάση της δυναμικής συμπύκνωσης επιλέγονται συνήθως στις θέσεις των υποστυλωμάτων των κτιρίων.

Ο κάρναβος των θέσεων πτώσεως βαίνει γενικά πυκνωμένος από φάση σε φάση, έτσι ώστε αρχικά να συμπυκνώνονται οι βαθύτερες εδαφικές στρώσεις και στην συνέχεια οι επιφανειακές. Σε κάθε μία από τις ζώνες αυτές προδιαγράφονται τα κριτήρια αποδοχής (επάρκειας) της συμπύκνωσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της μελέτης και τα αποτελέσματα της αρχικής εφαρμογής της δυναμικής συμπύκνωσης στο δοκιμαστικό πεδίο.

Όπως αναφέρεται σε επόμενες παραγράφους, η επιβολή της κρουστικής ενέργειας στο έδαφος γίνεται σε διαδοχικές «φάσεις». Με την

επιλογή του ενδεδειγμένου χρονικού διαστήματος τόσο μεταξύ δύο διαδοχικών κρούσεων της σφύρας σε μία θέση πτώσεως, όσο και μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων (φάσεων), επιτυγχάνεται η συνολική υποχώρηση (άρα και συμπύκνωση) του εδάφους. Στην περίπτωση όπου οι προς συμπύκνωση σχηματισμοί είναι κορεσμένοι με νερό, θα πρέπει μεταξύ των φάσεων να μεσολαβεί αρκετός χρόνος (έως και τρεις εβδομάδες) για την εκτόνωση των υπερπιέσεων πόρων που αναπτύσσονται λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους. Οι κοιλότητες αυτές πληρούνται με κατάλληλο υλικό (π.χ. αμμοχάλικο) μετά από κάποιο αριθμό πτώσεων της σφύρας σε θέση, ώστε στην επόμενη επανάληψη της μεθόδου η επιφάνεια του εδάφους να έχει επιπεδωθεί. Μετά την ολοκλήρωση της κάθε φάσεως, γίνεται η χάραξη του (πυκνότερου) καννάβου των θέσεων πτώσεως της επόμενης φάσης, κατά την οποία η εισαγόμενη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας εδάφους είναι κατά κανόνα μικρότερη από αυτήν της προηγούμενης φάσης.

Κατά την τελική φάση της Δυναμικής Συμπύκνωσης, που ονομάζεται «φάση σιδερώματος», η πτώση της σφύρας γίνεται από σχετικά μικρότερο ύψος (5 έως 8 μέτρα) σε συνεχή κάρναβο θέσεων πτώσεως που παρουσιάζουν αλληλοκάλυψη κατά 10% περίπου (συνεπώς, οι διαστάσεις του καννάβου είναι ελαφρώς μικρότερες από τις διαστάσεις κατόψεως της σφύρας). Με την τελική αυτή φάση επιδιώκεται η ομοιόμορφη συμπύκνωση των επιφανειακών εδαφικών στρωμάτων της θεμελίωσης. Η επιφάνεια του εδάφους, όπως διαμορφώνεται μετά την τελική φάση της δυναμικής συμπύκνωσης, δεν είναι πάντα κατάλληλη για την έδραση των θεμελίων του υπό κοτασκευή έργου, επειδή τα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται από την πτώση της σφύρας σε ένα σημείο προκαλούν χαλάρωση του επιφανειακού στρώματος στην γειτονική περιοχή.

Γι' αυτό μετά την ολοκλήρωση του «σιδερώματος» απαιτείται η τελική συμπύκνωση της επιφάνειας και η συμπλήρωση του επιχώματος με κάποιες εδαφικές στρώσεις από επίλεκτα υλικά με κλασικές μεθόδους (χρήση δονητικού οδοστρωτήρα). Σε όλες τις φάσεις των εργασιών θα πρέπει να παρακολουθούνται οι επιπτώσεις της δυναμικής συμπύκνωσης στις γειτονικές κατασκευές από τους κραδασμούς που προκαλούνται.



Συνήθως, η μέθοδος εφαρμόζεται σε αποστάσεις τουλάχιστον 20-25 μέτρα από γειτονικές κατασκευές, για την αποφυγή ζημιών από τους κραδασμούς αλλά και από τα εδαφικά υλικά που μπορεί να εκσφενδονισθούν κατά την πρόσκρουση της σφύρας.

Σε μικρότερες από τις ανωτέρω αποστάσεις, η δυναμική συμπύκνωση μπορεί να εφαρμοστεί με πρόγραμμα πτώσεων που αντιστοιχεί σε μειωμένη ενέργεια ανά πτώση σφύρας και αύξηση του αριθμού των πτώσεων, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Βεβαίως, με την μείωση της ενέργειας πτώσεως ανά πρόσκρουση, μειώνεται το βάθος επιρροής της βελτίωσης και συνεπώς η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι μειωμένη εάν απαιτείται βελτίωση σε μεγάλο βάθος<sup>28</sup>.

#### **4.9 Απαιτήσεις ποιοτικών ελέγχων για την παραλαβή δοκιμαστικού πεδίου**

Για τον υπολογισμό του βέλτιστου αριθμού κρούσεων (κτύπων) σε κάθε φάση, πριν από την έναρξη της κυρίως εργασίας σε διάφορες θέσεις του έργου, θα γίνεται δοκιμαστικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου. Κατά την διάρκεια των δοκιμών, θα καταγράφεται για κάθε επιβαλλόμενη κρουστική ενέργεια, η μεταβολή των καθιζήσεων με τον αριθμό των κρούσεων και με τον χρόνο, και εφόσον απαιτείται, η μείωση της πίεσεως των πόρων με τον χρόνο. Μετά το πέρας των εργασιών συμπύκνωσης και με την βοήθεια γεωτεχνικών ερευνών θα επιλεγεί το τελικό πρόγραμμα εφαρμογής της μεθόδου. Από τα αποτελέσματα αυτά και ανάλογα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που θα διαπιστωθούν από θέση σε θέση, είναι δυνατόν να προσαρμόζεται το πρόγραμμα εφαρμογής της Δυναμικής Συμπύκνωσης.

#### **4.10 Ποιοτικός έλεγχος δυναμικής συμπύκνωσης**

Σκοπός των ελέγχων που γίνονται μεταξύ των φάσεων εφαρμογής της Δυναμικής Συμπύκνωσης, αλλά και μετά την τελική φάση, είναι να αποδειχθεί

---

<sup>28</sup> British Standards Institution (1981), "Code of Practice for site investigations" BS 5930:1981, London.

η υλοποίηση της επιθυμητής βελτίωσης των χαρακτηριστικών του εδάφους και η ικανοποίηση των απαιτήσεων της Μελέτης. Οι ποιοτικοί έλεγχοι συνήθως περιλαμβάνουν τις εξής δοκιμές και μετρήσεις:

- Χωροστάθμιση, ώστε να υπολογιστούν τα υψόμετρα της επιφάνειας του εδάφους μετά τη συμπύκνωση (λαμβανομένου υπόψη και του όγκου των πρόσθετων υλικών επίχωσης που χρησιμοποιούνται για την πλήρωση των «κρατήρων»), οπότε, θα προκύψει η μέση ποσοστιαία μεταβολή του όγκου του εδάφους, (εκτιμώντας ένα μέσο βάθος επιρροής της συμπύκνωσης).
- Γεωτεχνικές έρευνες, ώστε να διαπιστωθεί άμεσα η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους.
- Καταγραφές των οργάνων μέτρησης δονήσεων στα γειτονικά κτίρια, σχετικά με το μέγεθος των δονήσεων που προκαλούνται.
- Χρονοδιάγραμμα εργασιών που θα περιλαμβάνει την απαιτούμενη χρονική διάρκεια μεταξύ των διαδοχικών φάσεων.
- Κατασκευαστικά σχέδια περιοχών εφαρμογής της μεθόδου ανάλογα με την επιβαλλόμενη ενέργεια.

#### **4.11 Όροι και απαιτήσεις υγιεινής – ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος**

Πιθανοί κίνδυνοι κατά την εκτέλεση των εργασιών:

- Κατά περίπτωση, συνθήκες εργασίας σε περιορισμένο χώρο ή και σε ύψος από την επιφάνεια του εδάφους.
- Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας
- Κίνδυνος βραχυκυκλώματος και πυρκαγιάς ή επέκταση της πυρκαγιάς σε υδραυλικά λάδια.
- Κίνδυνος μεταφοράς βαριών αντικειμένων.
- Εργασία σε συνθήκες θορύβου.
- Εργασία κάτω από ανυψωτικά μηχανήματα.

- Κίνδυνος εκσφενδονισμού υλικού από την πτώση της σφύρας στο έδαφος. Πρόκληση δονήσεων σε γειτονικές κατασκευές.

Η συμμόρφωση προς τα παρακάτω νομικά κείμενα, που είναι σχετικά με την ασφάλεια και υγιεινή των εργαζομένων σε τεχνικά έργα είναι υποχρεωτική.

- Π.Δ. 1 073/16-9-81 "Περί μέτρων ασφαλείας κατά την εκτέλεση εργασιών εις εργοτάξια οικοδομικών και πάσης φύσεως έργων αρμοδιότητας Πολιτικού Μηχανικού"
- Υπουργική Απόφαση Δ7/ΑιΦ1140801732/96 Ενσωμάτωση των διατάξεων της οδηγίας 92/104/ΕΟΚ "περί των ελάχιστων προδιαγραφών για την βελτίωση της προστασίας της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων στις υπαίθριες ή υπόγειες εξορυκτικές βιομηχανίες" στον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (Φ.Ε.Κ. 771/8).
- Π.Δ. 305/96 "Ελάχιστες προδιαγραφές ασφαλείας και υγείας που πρέπει να εφαρμόζονται στα προσωρινά ή κινητά εργοτάξια, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 92/57/ΕΟΚ" (Φ.Ε.Κ. 212Α129-8-96), σε συνδυασμό με την υπ' αριθμ. 13015917-5-97 Εγκύκλιο του Υπουργείου Εργασίας και την ΕΓΚΥΚΛΙΟ 11 (Αρ. Πρωτ. Δ16α/165/1ΟΙ258/ΑΦ/19-5-97) του ΥΠΕΧΩΔΕ, σχετικά με το εν λόγω Π.Δ.
- Π.Δ. 396/94 Φ.Ε.Κ. :221/Αι94 «Ελάχιστες προδιαγραφές ασφαλείας και υγείας για τη χρήση από τους εργαζόμενους εξοπλισμών ατομικής προστασίας κατά την εργασία σε συμμόρφωση προς την οδηγία του Συμβουλίου 89/656/ΕΟΚ».

Οι ελάχιστες απαιτήσεις του εξοπλισμού ατομικής προστασίας είναι οι εξής:

- Προστατευτική ενδυμασία: EN 863:1995 Protective clothing - Mechanical properties - Test method: Puncture resistance - Προστατευτική ενδυμασία. Μηχανικές ιδιότητες. Δοκιμή αντοχής σε διάτρηση

- Γάντια προστασίας έναντι μηχανικών κινδύνων: EN 388:2003
- Κράνη προστασίας: EN 397:1995:Industrial safety helmets (Amendment A 1 :2000)
- Υποδήματα ασφαλείας: EN 345-2:1996: Safety Footwear for Professional Use - Part 2.  
Additional Specifications Superseded by EN 150 20345:2004 -  
Υποδήματα ασφαλείας για επαγγελματική χρήση (αντικαταστάθηκε από το πρότυπο EN 15020345:2004)

Επίσης θα ισχύουν:

- Π.Δ. 85/91 (Φ.Ε.Κ. 38/A91) σχετικά με την προστασία των εργαζομένων από τους κινδύνους που διατρέχουν λόγω της έκθεσής τους στο θόρυβο κατά την εργασία σε συμμόρφωση προς την οδηγία 86/188/ΕΟΚ
- Π.Δ 397/94 (Φ.Ε.Κ. 221/N94) «Ελάχιστες προδιαγραφές ασφαλείας και υγείας κατά την χειρωνακτική διακίνηση φορτίων που συνεπάγεται κίνδυνο ιδίως για τη ράχη και την οσφυϊκή χώρα των εργαζομένων σε συμμόρφωση προς την οδηγία του Συμβουλίου 90/269/ΕΟΚ». Όλες οι επί μέρους μηχανικές διατάξεις θα συμμορφώνονται προς τα Πρότυπα για την Ασφάλεια των Μηχανών (Κατάλογος ΕΛΟΤ όπως κάθε φορά ισχύει)

Για την διαχείριση των παντός είδους χρησιμοποιούμενων υλικών θα εφαρμόζονται οι εκάστοτε ισχύουσες διατάξεις όπως τροποποιούνται και προσαρμόζονται στην τεχνική πρόοδο. Ενδεικτικά ισχύουν και θα εφαρμόζονται:

- Π.Δ. 77/93 (Φ.Ε.Κ. 34/N93) Για την προστασία των εργαζομένων από φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες και τροποποίηση και συμπλήρωση του Π.Δ. 307/86 (135/A) σε συμμόρφωση προς την οδηγία του Συμβουλίου 88/642/ΕΟΚ.
- Π.Δ. 399/94 (Φ.Ε.Κ. 221/N94) "Προστασία των εργαζομένων από τους κινδύνους που συνδέονται με την έκθεση σε καρκινογόνους παράγοντες κατά την εργασία σε συμμόρφωση με την οδηγία του Συμβουλίου 90/394/ΕΟΚ" με τα Π.Δ.127/2000.

- Π.Δ.90/1999 (Φ.Ε.Κ. 941N99) Καθορισμός οριακών τιμών έκθεσης και ανωτάτων οριακών τιμών έκθεσης των εργαζομένων σε ορισμένους χημικούς παράγοντες κατά την διάρκεια της εργασίας τους σε συμμόρφωση με τις οδηγίες 91/322/ΕΟΚ και 96/94/ΕΚ της Επιτροπής και τροποποίηση και συμπλήρωση του Π.Δ. 307/86 (135/A) όπως τροποποιήθηκε με το Π.Δ. 77/93 (ΦΕΚ 341N93).
- Π.Δ.338/2001 (Φ.Ε.Κ. 2271N2001) Προστασία της υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων κατά την εργασία από κινδύνους οφειλόμενους σε χημικούς παράγοντες.
- Π.Δ.339/2001 (Φ.Ε.Κ. 2271N2001) Τροποποίηση του Π.Δ. 307/86 (135/A) Προστασία της υγείας των εργαζομένων που εκτίθενται σε ορισμένους χημικούς παράγοντες κατά την διάρκεια της εργασίας τους.<sup>29</sup>

#### 4.12 Τρόπος επιμέτρησης της εργασίας

Η εφαρμογή της δυναμικής συμπύκνωσης επιμετρείται ανά τετραγωνικό μέτρο βελτιωμένης επιφάνειας και λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος της εφαρμοζόμενης ενέργειας στην επιφάνεια αυτή (περίπτωση ελαφριάς και βαριάς συμπύκνωσης).

Στην επιμέτρηση περιλαμβάνονται το κόστος του εξοπλισμού και του προσωπικού που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου, καθώς και (ανοιγμένες) όλες οι εργασίες του δοκιμαστικού πεδίου, οι γεωτεχνικές έρευνες και οι μετρήσεις που απαιτούνται για τον έλεγχο της επιτυγχανόμενης συμπύκνωσης.

---

<sup>29</sup> British Standards Institution (1981), "Code of Practice for site investigations" BS 5930:1981, London.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο. ΛΙΘΙΝΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ, ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΞΗΡΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (STONE COLUMNS, WET AND DRY)**

### **5.1 Γενικά**

Οι δονούμενοι λίθινοι πάσσαλοι αντικατάστασης είναι μια τεχνική βελτίωσης της φέρουσας ικανότητας του φορτίου του εδάφους. Σε πολλές περιπτώσεις, πρέπει να σημειωθεί ότι το τοπικό έδαφος από τη φύση δεν είναι δυνατόν να αντέξει το βάρος της προτεινόμενης κατασκευής. Εξ ου και η χρήση των τεχνικών βελτίωσης του εδάφους μπορεί να είναι αναγκαίες. Η χρήση των λίθινων πασσάλων είναι μια τέτοια τεχνική. Ο λίθινος πάσσαλος αποτελείται από θρυμματισμένα χονδρόκοκκα αδρανή σε διάφορα μεγέθη. Η αναλογία σύμφωνα με την οποία τα αδρανή διαφορετικών μεγεθών θα πρέπει να αναμειγνύονται αποφασίζεται από τα κριτήρια σχεδιασμού.

Οι λίθινοι πάσσαλοι είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι αν και οι τρεις θετικές επιπτώσεις που αναφέρονται παρακάτω μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα έργο. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η μελετημένη περίπτωση του αναχώματος σε μαλακό συνεκτικό έδαφος.

### **5.2 Κατάλληλοι τύποι εδαφών**

Οι λίθινοι πάσσαλοι τοποθετούνται σε συνεκτικά εδάφη, αλλά και σε προφίλ εδαφών που αποτελούνται από μικτά στρώματα κοκκωδών και συνεκτικών εδαφών. Οι λίθινοι πάσσαλοι εφαρμόζονται με επιτυχία για την πρόληψη της υγροποίησης σε άμμο και ιλυώδη άμμο.

### **5.3 Εύρος βάθους**

Το εύρος βάθους για τους λίθινους πασσάλους κυμαίνεται μεταξύ 5m και 35m. Με το μεγάλο αριθμό των σχεδίων των ΗΠΑ για τους σκοπούς της πρόληψης του φαινομένου της τήξης, το μέσο βάθος των λίθινων πασσάλων είναι πολύ μεγαλύτερο στις ΗΠΑ από ότι στην Ευρώπη και κυμαίνεται από

10m έως 20m.

#### **5.4 Επιπτώσεις στο έδαφος**

Οι λίθινοι πάσσαλοι έχουν τριπλό αποτέλεσμα στο έδαφος:

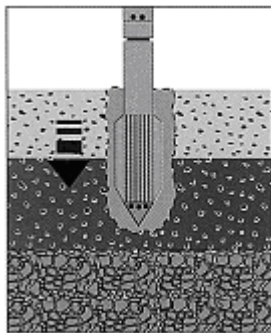
1. Καθαρή άμμος και αμμοχάλικο και μικρό ποσοστό ιλυώδους άμμου (μέχρι 20% περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή) συμπιέζονται κατά τη διαδικασία εγκατάστασης του λίθινου πασσάλου.
2. Πάσσαλος και έδαφος, αποτελούν μια ενισχυμένη μήτρα με άμεση αύξηση της διατμητικής αντοχής και του μέτρου δυσκαμψίας.
3. Οι πάσσαλοι επιταχύνουν την αποστράγγιση των συνεκτικών εδαφών. Οι πάσσαλοι λειτουργούν ως κάθετα στραγγιστήρια.

#### **5.5 Υγρή μέθοδος με τροφοδοσία από πάνω λίθινων πασσάλων (Wet Top Feed Stone Columns)**

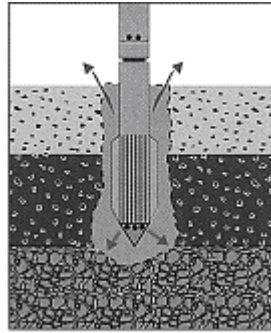
##### **5.5.1 Τυπική εγκατάσταση εξέδρας (ομοίως με την αντίστοιχη εγκατάσταση στη δονητική συμπύκνωση)**

##### **5.5.2 Εγκατάσταση**

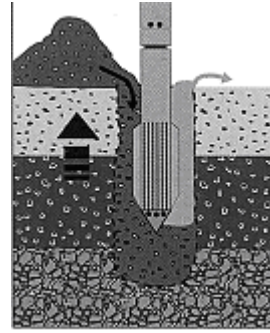
Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι η βασική μέθοδος εγκατάστασης των λίθινων πασσάλων. Σε συνθήκες του εδάφους, όπου το νερό που διαχέεται είναι διαθέσιμο και η διάθεσή του δεν επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον, η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ακριβή από τη μέθοδο ξηρού λίθινου πασσάλου.



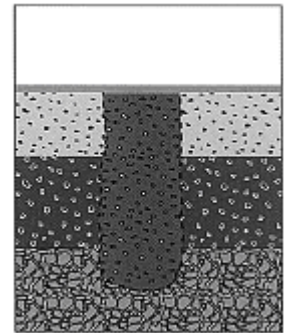
**Διείσδυση**  
Ο δονητικός πάσσαλος διεισδύει από τις δονήσεις στο απαιτούμενο βάθος



**Διεύρυνση οπής**  
Η οπή που δημιουργείται από τον πάσσαλο δόνησης διευρύνεται για την εναπόθεση των αδρανών



**Εγκατάσταση**  
Ο λίθινος πάσσαλος εγκαθίσταται με την προσθήκη χαλικιού από την κορυφή



**Ολοκλήρωση**  
Η επιφάνεια ισοπεδώνεται και τελικά ο κύλινδρος συμπυκνώνεται.

Ανάλογα με το πρόβλημα θεμελίωσης, το είδος του εδάφους και τα χαρακτηριστικά απόδοσης των διαφόρων δονητικών πασσάλων διαμέτρου 0.5m έως 2.0m γίνεται η εγκατάσταση.

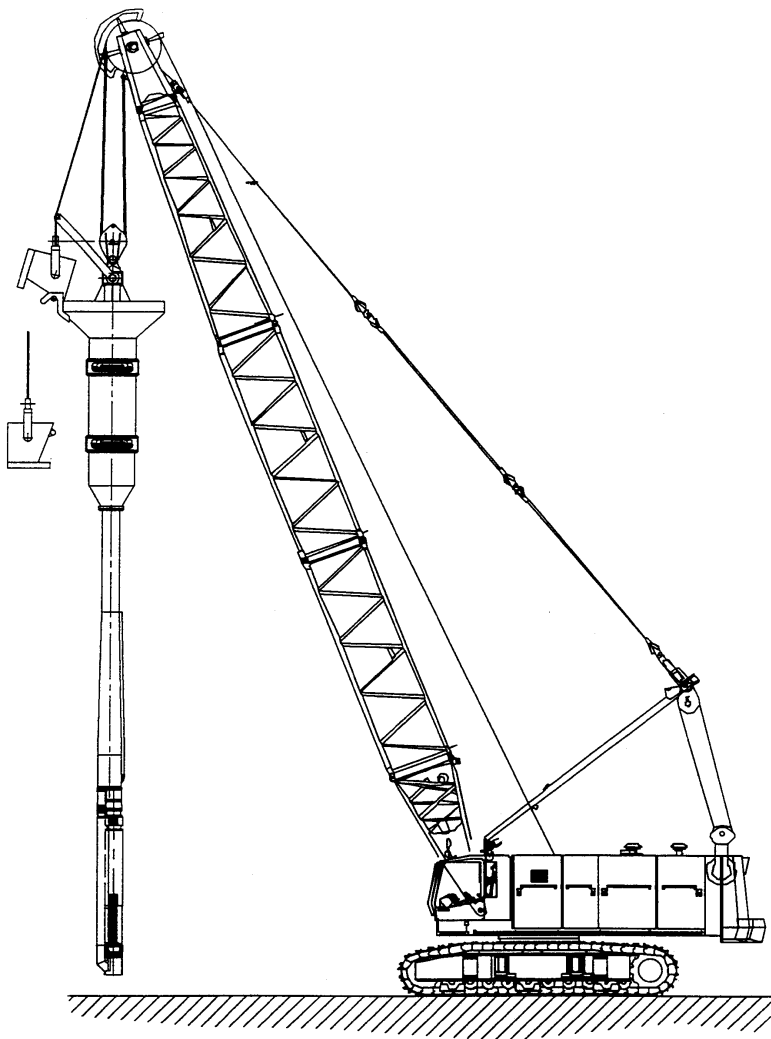
### 5.5.3 Πότε χρησιμοποιείται η ξηρά μέθοδος και πότε η υγρή

Το μειονέκτημα της υγρής μεθόδου είναι η μεγαλύτερη κατανάλωση αδρανών, λόγω του μεγαλύτερου κενού που δημιουργήθηκε από την εκτόπιση του επί τόπου εδάφους και την κρίσιμη επίδραση στο περιβάλλον, λόγω της διαρροής της λάσπης που προκύπτει από τη έγχυση νερού. Στους πιο κρίσιμους χώρους (γύρω από τα ποτάμια, κοντά σε περιοχές της πόλης κλπ.) η μέθοδος αυτή δεν είναι πλέον ανεκτή και αντικαθίσταται από την ξηρά μέθοδο. Επίσης, αντικαθίσταται από την ξηρά μέθοδο σε περιοχές, όπου το χαλίκι αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα κόστους (άνω του 50% του συνολικού κόστους), δεδομένου ότι περίπου 15% αμμοχάλικου θα πάει χαμένο, σε σύγκριση με 5% για την ξηρά μέθοδο. Για τη βελτίωση των εδαφών με πάνω από 30% με ελάχιστο κόκκο 0.06mm ή περισσότερο από 5% στο κλάσμα αργίλου, η υγρή μέθοδος δε συνίσταται, δεδομένου ότι ο χειρισμός της λάσπης θα γίνει πολύ ακριβός και θα χρειαστεί πολύ επίχωση, καθώς πολύ μεγάλη ποσότητα επί τόπου εδάφους ξεπλένεται.



## 5.6 Ξηρή μέθοδος με τροφοδοσία από κάτω λίθινων πασσάλων (Dry Bottom Feed Stone Columns)

### 5.6.1 Γεωτρύπανο με κάδο σκυροδέματος (Rig with skip bucket)



Πλεονεκτήματα:

§ Απλή λειτουργία

Μειονεκτήματα:

- § Ο εξοπλισμός είναι σχετικά «βαριά κεφαλή»
- § Ο όγκος του αμμοχάλικου που διατίθεται μπορεί μόνο να βρεθεί από τον αριθμό των κάδων του φορτωτή που τοποθετούνται στον κεκλιμένο κάδο.
- § Δε μπορεί να λειτουργήσει αν ο φορτωτής δεν μπορεί να φτάσει άμεσα στο δονητικό πάσσαλο ώστε να γεμίσει τον κάδο.

### 5.6.2 (Vibro Cats and other “predators”)

Σε χώρες όπου η διαδικασία των λίθινων πασσάλων χρησιμοποιείται για ένα πιο περιορισμένο βάθος από ό,τι στις ΗΠΑ, και όπου το μέγεθος της χώρας είναι πολύ μικρότερο, όπως η Γαλλία, η Γερμανία και η Μεγάλη Βρετανία, ειδικοί μεταφορείς Δονητών, που ονομάζονται Vibro Cats, Vibro Tiger ή V-REX έχουν εξελιχθεί.

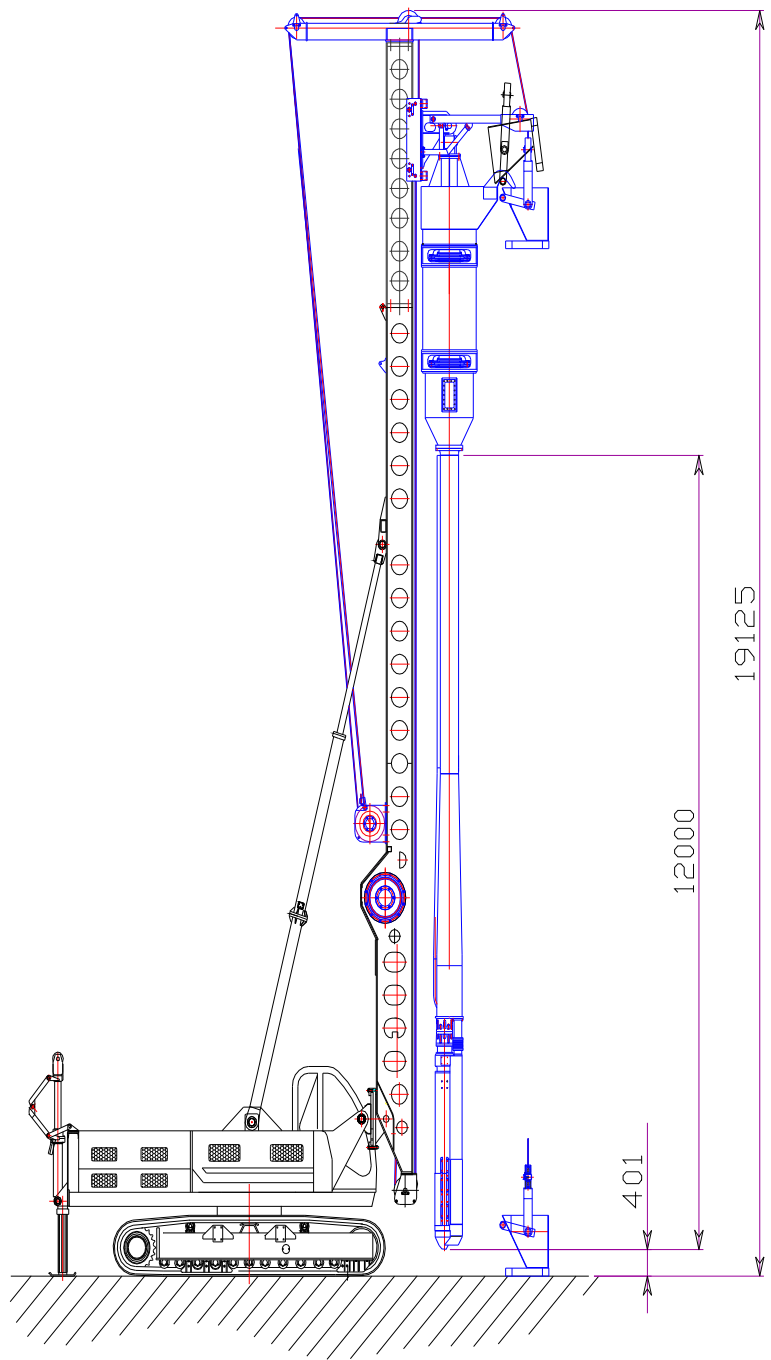
Πλεονεκτήματα:

- § Υπολογιστής ελέγχει την παλινδρομική κίνηση του Δονητικού πασσάλου με εφαρμογή κατάλληλης δύναμης επιταχύνει την εγκατάσταση του πασσάλου.

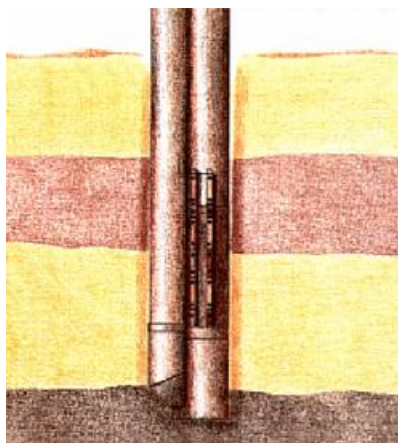
Μειονεκτήματα:

- § Το εξειδικευμένο γεωτρύπανο απαιτεί υψηλή αρχική επένδυση.

Το βάθος επεξεργασίας περιορίζεται σε 12m χρησιμοποιώντας ένα σύστημα διπλού κλειδώματος και σε 18m για ένα συμβατικό ενιαίο σύστημα κλειδώματος.



### 5.6.3 Εγκατάσταση



#### **Διείσδυση**

Ο δονητικός πάσσαλος διεισδύει στο απαιτούμενο βάθος από τη δόνηση και από την εκτόξευση του αέρα.

#### **Εγκατάσταση**

Προσθέτοντας χαλίκι μέσα από ένα σωλήνα λειτουργώντας παράλληλα και ο Δονητικός πάσσαλος δημιουργείται ο λίθινος πάσσαλος.

#### **Ολοκλήρωση**

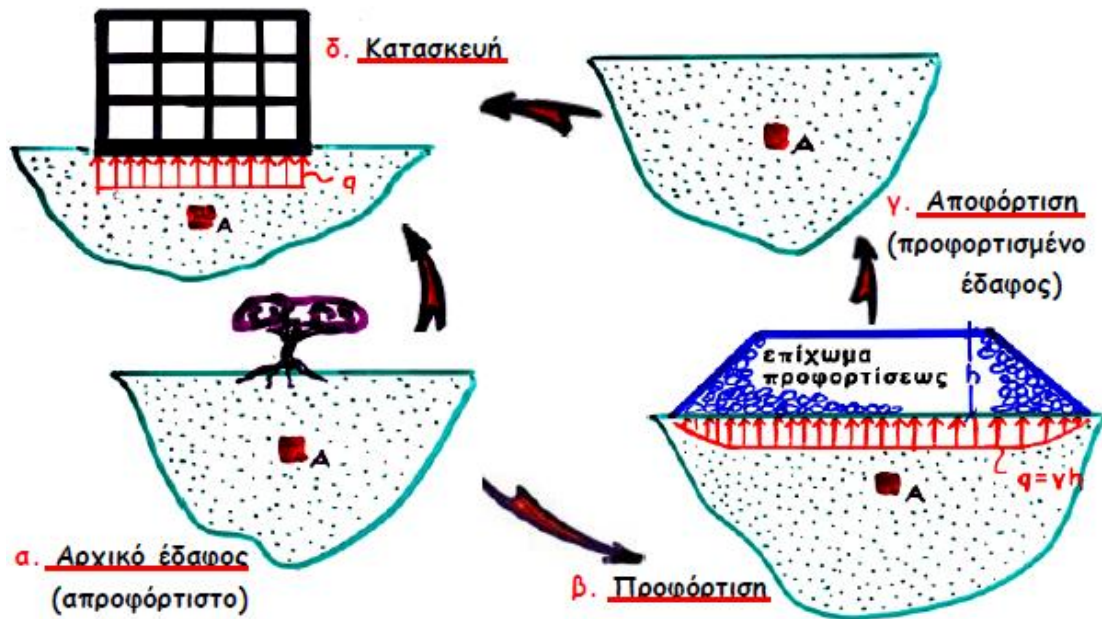
Η επιφάνεια ισοπεδώνεται και ο κύλινδρος συμπυκνώνεται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>. ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ (PRELOADING)

Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότερες 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 (οδοποιία, λιμένες, αεροδρόμια, εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, κλπ.). Αποτέλεσμα αυτού είναι μία παρατηρούμενη αύξηση στη χρήση μεθόδων βελτίωσης των χαρακτηριστικών του υπεδάφους προκειμένου να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητά του και να μειωθεί η συμπίεστότητά του.

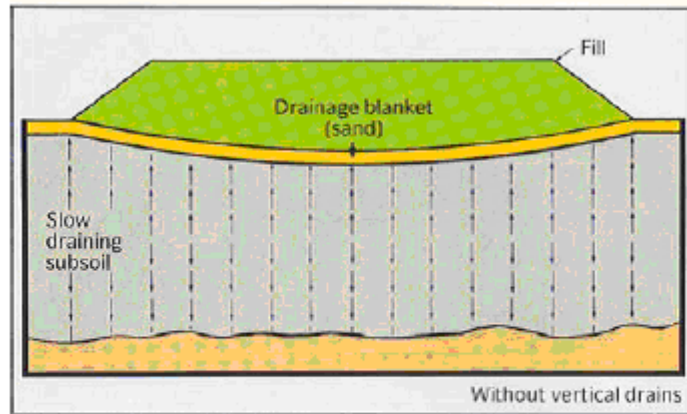
Μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, αφενός για τη μείωση της συμπίεστότητας του υπεδάφους και κατ' επέκταση των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής ενός έργου και αφετέρου για την αύξηση της διατμητικής του αντοχής, είναι και η προφόρτιση, κυρίως αργιλικών εδαφών, με σκοπό την ολοκλήρωση του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων από στερεοποίηση και την επίτευξη ικανοποιητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης πριν από την κατασκευή του έργου. Η διαδικασία της προφόρτισης συχνά επιταχύνεται με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή και αύξηση του ύψους της προφόρτισης, εφόσον η φέρουσα ικανότητα του εδάφους το επιτρέπει.

Η προφόρτιση είναι μια προσωρινή φόρτιση, συνήθως με ένα επίχωμα από εδαφικό υλικό κατάλληλα συμπυκνωμένο, που εφαρμόζεται σε μια περιοχή για να βελτιώσει τις ιδιότητες - κυρίως τη συμπίεστότητα και αντοχή - του εδάφους. Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι το σύνολο σχεδόν των παραμορφώσεων του εδάφους είναι μή-αντιστρεπτές, δηλαδή δεν αναιρούνται με την απομάκρυνση του αιτίου που τις προκάλεσε (του επιχώματος προφόρτισης στην προκειμένη περίπτωση).

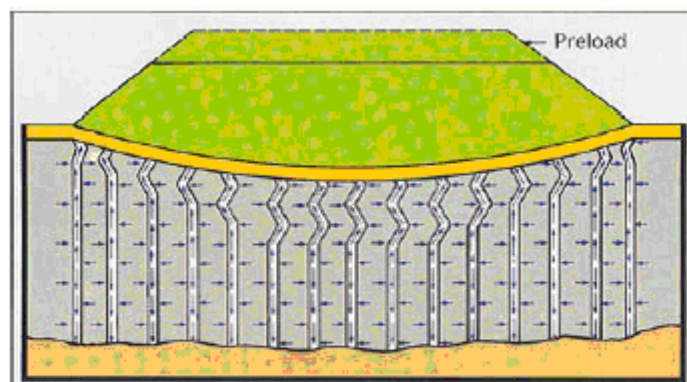


Οι περισσότερες εφαρμογές πεδίου περιλαμβάνουν την εκτίμηση των καθιζήσεων με μετρήσεις κατά τη διάρκεια της προφόρτισης και γεωτεχνική έρευνα πριν και μετά, καθώς και προβλέψεις της καθίζησης με υπολογισμό των κατακόρυφων τάσεων σε συνδυασμό με εργαστηριακά αποτελέσματα.

«Καθίζηση» δεν σημαίνει τίποτα περισσότερο από μείωση του όγκου των κενών του εδάφους. Στην περίπτωση κορεσμένου εδάφους, καθίζηση μπορεί να προκύψει μόνο με την απομάκρυνση του νερού που βρίσκεται μέσα στους πόρους του. Λαμβάνοντας υπόψη την πολύ χαμηλή διαπερατότητα των αργιλικών εδαφών αντιλαμβάνεται κανείς ότι ο χρόνος που απαιτείται για να στραγγίσει το νερό από τους πόρους του εδάφους και να ολοκληρωθεί το φαινόμενο της στερεοποίησης μπορεί να είναι πολύ μεγάλος (ακόμα και δεκαετίες). Ο χρόνος αυτός είναι ανάλογος του τετραγώνου της απόστασης που πρέπει να διανύσει το νερό για να φθάσει σε ένα ελεύθερα στραγγιζόμενο στρώμα (π.χ. ένα πολύ εκτεταμένο στρώμα άμμου ή στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους).



Ροή του νερού στους πόρους και της εξέλιξης των καθιζήσεων χωρίς χρήση κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηριών



Ροή του νερού στους πόρους και της εξέλιξης των καθιζήσεων με χρήση κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηριών

## 6.1 Κατάλληλοι τύποι εδαφών

Όλα τα εδάφη που αναδιατάσσουν τα σωματίδια τους σε πυκνότερη μορφή, όταν υπόκεινται μια καθαρά στατική φόρτιση είναι κατάλληλα για προφόρτιση. Σε καθαρή άμμο και χαλίκια, για να είναι αποτελεσματική η προφόρτιση, η στατική πίεση που απαιτείται για να προκληθεί αναδιοργάνωση σωματιδίων είναι σε υπερβολικά υψηλά επίπεδα, λόγω της υψηλής τριβής μεταξύ των σωματιδίων. Αν και έχει περιστασιακά εφαρμοστεί η προφόρτιση σε άμμο και χαλίκια σχεδόν ποτέ δεν έδωσε κανένα σημαντικό αποτέλεσμα βελτίωσης του εδάφους. Τα καλύτερα εδάφη για προφόρτιση είναι τα συνεκτικά εδάφη που έχουν αντοχή σε διάτμηση ώστε να μπορούν να φέρουν το φορτίο της προφόρτισης.

## **6.2 Εύρος βάθους**

Το εύρος βάθους της προφόρτισης εξαρτάται από το πλάτος της επίχωσης της. Εξαρτάται επίσης από τη διάρκειά της και τις συνθήκες αποστράγγισης της συνεκτικής στρώσης του εδάφους που πρέπει να συμπυκνωθεί. Αν για παράδειγμα η στρώση έχει ένα κατώτατο όριο μη στράγγισης (undrained lower boundary), η διάρκεια της φόρτισης πρέπει να είναι 4 φορές μεγαλύτερη από αυτήν κατά την οποία θα αποστραγγίζονταν και τα δύο όρια.

## **6.3 Επιπτώσεις στο έδαφος**

Με την προφόρτιση το έδαφος ενοποιείται. Μετά το τέλος της προφόρτισης το έδαφος συμπεριφέρεται σαν προ-στερεοποιημένο, εάν η προφόρτιση έχει εφαρμοστεί για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Η προφόρτιση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης του νερού στους πόρους, η οποία πρέπει να εξαλειφθεί πριν από την εφαρμογή συμπύκνωσης. Η αυξημένη πίεση στους πόρους διαχέεται πρώτα στα όρια του αποστραγγισμένου εδάφους, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από τα όρια αποστράγγισης παραμένει αμετάβλητη για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα.

## **6.4 Σε ποιες περιπτώσεις η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και αποτελεσματική**

- Όταν είναι διαθέσιμος αρκετός χρόνος για την στερεοποίηση των σωματιδίων που καθιζάνουν.
- Όταν είναι διαθέσιμο αρκετό υλικό επίχωσης σε κοντινή απόσταση, ή μπορεί να μεταφερθεί με συμφέροντες όρους.
- Όταν η επίχωση της προφόρτισης δεν προκαλεί προβλήματα ευστάθειας σε πρηνή.



### **6.5 Σε ποιες περιπτώσεις η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί**

- Σε άμμο και χαλίκια
- Αν δεν εξασφαλίζεται η σταθερότητα των επιχωμάτων.
- Όταν υπάρχει έλλειψη εξοπλισμού χωματουργικών εργασιών ή υλικού επιχωμάτωσης.
- Εάν δεν υπάρχει αρκετός χρόνος αναμονής ώστε να μειωθεί η πίεση του νερού στους πόρους.

### **6.6 Σε ποιες περιπτώσεις ενδείκνυται η περιορισμένη χρήση της μεθόδου**

- Αν δεν επιτυγχάνεται επαρκής αύξηση της ακαμψίας και αντοχής του εδάφους, τότε η προφόρτιση θα πρέπει να συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους.

### **6.7 Παράγοντες σχεδιασμού προφόρτισης**

Θα πρέπει εδώ να αναφερθούν ορισμένοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τόσο τη χρονική εξέλιξη όσο και το μέγεθος των καθιζήσεων και που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της προφόρτισης:

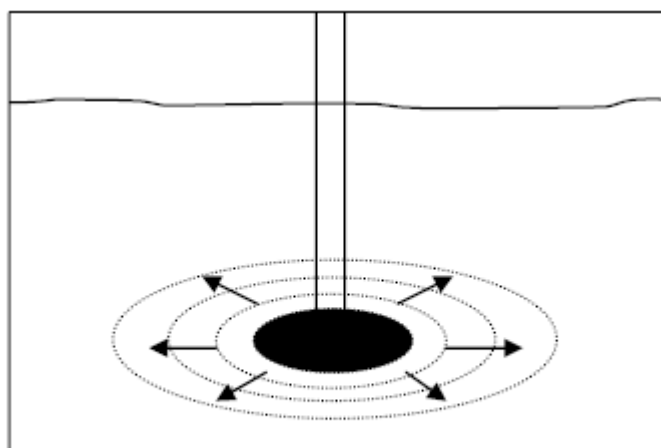
- § Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού συνεχών ενστρώσεων άμμου ή αμμοϊλύος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική επιτάχυνση της στερεοποίησης λόγω οριζόντιας στραγγίσης ακόμα και χωρίς τη χρήση στραγγιστηρίων. Η ευεργετική παρουσία αυτών των ενστρώσεων, εφόσον εντοπιστούν με βεβαιότητα, μπορεί να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό της προφόρτισης με ή χωρίς στραγγιστήρια, λαμβάνοντας υπόψη τη μικτή ροή που προκύπτει (τόσο κατακόρυφη προς τις ενστρώσεις όσο και οριζόντια προς τα στραγγιστήρια).
- § Αν οι προαναφερθείσες ενστρώσεις δεν είναι συνεχείς, ο μόνος τρόπος για να αξιοποιηθούν είναι μέσω κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή ανακουφιστικών φρεάτων.
- § Σε οργανικά εδάφη και τύρφες ένα μεγάλο μέρος των καθιζήσεων (πολλές φορές το μεγαλύτερο) προέρχεται από δευτερογενή συμπίεση, που έπεται

της πρωτογενούς στερεοποίησης και είναι ερπυστικού τύπου, χωρίς να σχετίζεται με εκτόνωση πίεσης πόρων και στράγγιση νερού. Συνεπώς η χρήση στραγγιστηρίων από μόνη της για την ταχεία ολοκλήρωση του φαινομένου της πρωτογενούς στερεοποίησης δεν αρκεί για την αντιμετώπιση των μελλοντικών καθιζήσεων του έργου και θα πρέπει να συνδυάζεται με κατάλληλη υπερφόρτιση του εδάφους .

- § Προκειμένου να μειωθούν αποτελεσματικά οι καθιζήσεις από δευτερογενή συμπίεση θα πρέπει να γίνεται προφόρτιση του εδάφους με φορτίο που θα προκαλεί αύξηση των ενεργών τάσεων στο έδαφος τουλάχιστον 50% μεγαλύτερες (και αν αυτό είναι εφικτό 100% μεγαλύτερες) από αυτές της κατασκευής. Η προφόρτιση προτείνεται να παρατείνεται και πέραν του χρόνου ολοκλήρωσης της πρωτογενούς στερεοποίησης, εφ' όσον το χρονοδιάγραμμα του έργου το επιτρέπει.
- § Η γεωτεχνική έρευνα θα πρέπει απαραίτητα να συμπληρώνεται με την εκτέλεση επαρκούς αριθμού στατικών πενετρομετρήσεων σε συνδυασμό με δοκιμές αποτόνωσης των πιέσεων πόρων με τη βοήθεια πιεζοκώνου, προκειμένου αφενός μεν να εντοπίζεται η πιθανή παρουσία λεπτών αμμωδών/ αμμοϊλυωδών ενστρώσεων, αφετέρου δε να μετράται επί τόπου η διαπερατότητα του εδάφους, δεδομένου ότι και τα δύο επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα αποστράγγισης του εδάφους και κατά συνέπεια τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης και την τελική επιλογή του καννάβου των στραγγιστηρίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°. ΕΝΕΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (COMPACTION GROUTING)

Το 1980, η επιτροπή της Αμερικανικής Κοινωνίας των Αστικών Μηχανικών (ASCE) ορίζει τις ενέσεις εδάφους ως μία τεχνική όπου ένα υλικό ένεμα από τσιμεντοκονίαμα με λιγότερο από 25 mm (1 ίντσα) καθίζηση αποτελούμενο από επαρκή ιλύ ώστε να έχει ελαστικότητα, καθώς και επαρκή άμμο για να αναπτυχθεί εσωτερική τριβή, εγχέεται κάτω από υψηλή πίεση στο έδαφος, χωρίς να διεισδύσει στους πόρους του, αλλά να παραμείνει ως μια διευρυνόμενη μάζα γύρω από το σημείο της ένεσης έχοντας με αυτόν τον τρόπο ως αποτέλεσμα την ελεγχόμενη συμπίεση των γύρω χαλαρών εδαφών ή την ελεγχόμενη μετατόπιση φερόντων κατασκευών.



Σχηματική παράσταση της συμπίκνωσης εδάφους με χρήση ενέσεων.

### 7.1 Πλεονεκτήματα

Όντας μία από τις βασικές τεχνικές συμπίκνωσης για χαλαρά ή μαλακά εδάφη, η χρήση της συμπίκνωσης με ενέσεις έγινε ευρέως διαδεδομένη λόγω:

- § της ικανότητάς της να προκαλεί βαθιά συμπίκνωση
- § της ικανότητάς της να ισοπεδώνει τοπικά το έδαφος

- § του μικρού όγκου του απαραίτητου εξοπλισμού που απαιτεί η εφαρμογή της, πράγμα που επιτρέπει την εφαρμογή της σε στενές ζώνες (π.χ. σε υπόγεια κτιρίων)
- § της σχετικά περιορισμένης έκτασης μόλυνσης του περιβάλλοντος που προκαλεί
- § του μικρού όγκου αποβλήτων που παράγει
- § των λιγότερων κραδασμών που υφίστανται οι γειτονικές κατασκευές.

Ιδιαίτερως τα τελευταία 15 χρόνια, η διαδικασία έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό της ρευστοποίησης του εδάφους, αν υπάρχει περιορισμένη εμπειρία σε αυτού του είδους την εφαρμογή της μεθόδου.

## **7.2 Θεωρητική προσέγγιση**

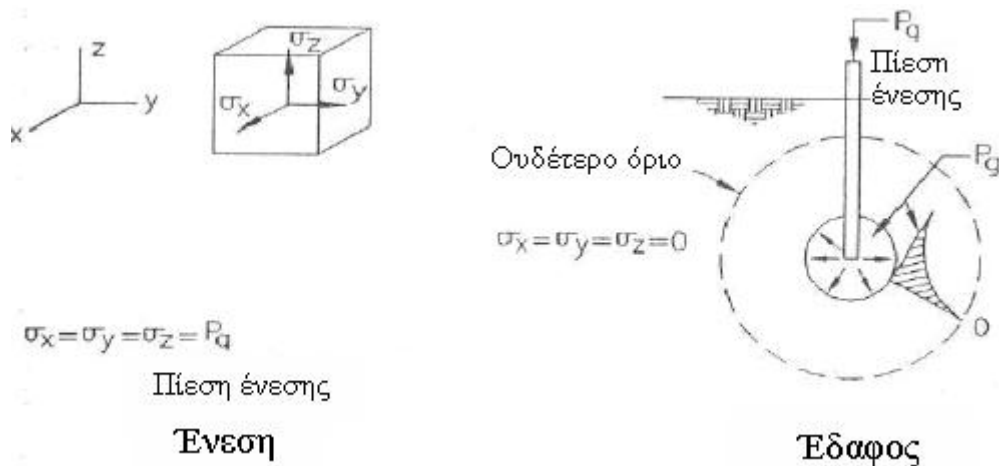
Κρίσιμο σημείο κατά την εφαρμογή της συμπύκνωσης εδάφους με ενέσεις είναι η εναπόθεση των ενεμάτων ώστε να δημιουργείται μία διευρυνόμενη σφαιρική μάζα στην περιοχή του σημείου της έγχυσης.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί υψηλής ρευστότητας ένεμα (χαμηλού ιξώδους) μπορεί να συμβεί υδραυλική ρωγμάτωση στο γύρω έδαφος με αποτέλεσμα τη απώλεια ελέγχου της διαδικασίας συμπύκνωσης. Επιπλέον μπορεί να προκληθούν καταστροφές στις φέρουσες κατασκευές ή και σε τυχόν γειτονικές υπόγειες εγκαταστάσεις. Η συμπύκνωση με ενέσεις έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε σχεδόν όλους τους τύπους εδαφών, αν και επιπλέον προσοχή απαιτείται κατά την εφαρμογή της σε μαλακούς αργίλους όπου η αργή αποστράγγισή τους πιθανόν να προκαλέσει υπερπίεση στους πόρους, φαινόμενο που απαιτεί ειδική διαχείριση για την αντιμετώπισή του.

## **7.3 Υλικό ενεμάτων και τοποθέτησή τους στο έδαφος**

Το έδαφος θεωρείται ως ένα ομοιογενές και ισοτροπικό υλικό και οι πιέσεις που ασκούν τα ενέματα εντός της μάζας του εδάφους θα υποθέσουμε πως διαχέονται σφαιρικά, έχοντας ως κέντρο της σφαίρας το σημείο έγχυσης του ενέματος. Στην περιφέρεια της σφαίρας θεωρούμε ότι προκαλούνται

μηδενικές τάσεις και παραμορφώσεις (ουδέτερο όριο).



Η σημασία της μάζας που δημιουργείται από τα ενέματα και η επίδρασή της στην βελτίωση του εδάφους αναφέρθηκε πρώτη φορά από τους Warner και Brown. Σε αυτή την μελέτη διεξήχθησαν περισσότερες από 100 δοκιμές συμπύκνωσης εδάφους με ενέσεις, χρησιμοποιώντας διαφορετικές αναλογίες πρόσμιξης υλικών ενεμάτων καθώς και διαφορετικούς ρυθμούς έγχυσης τους στο έδαφος.

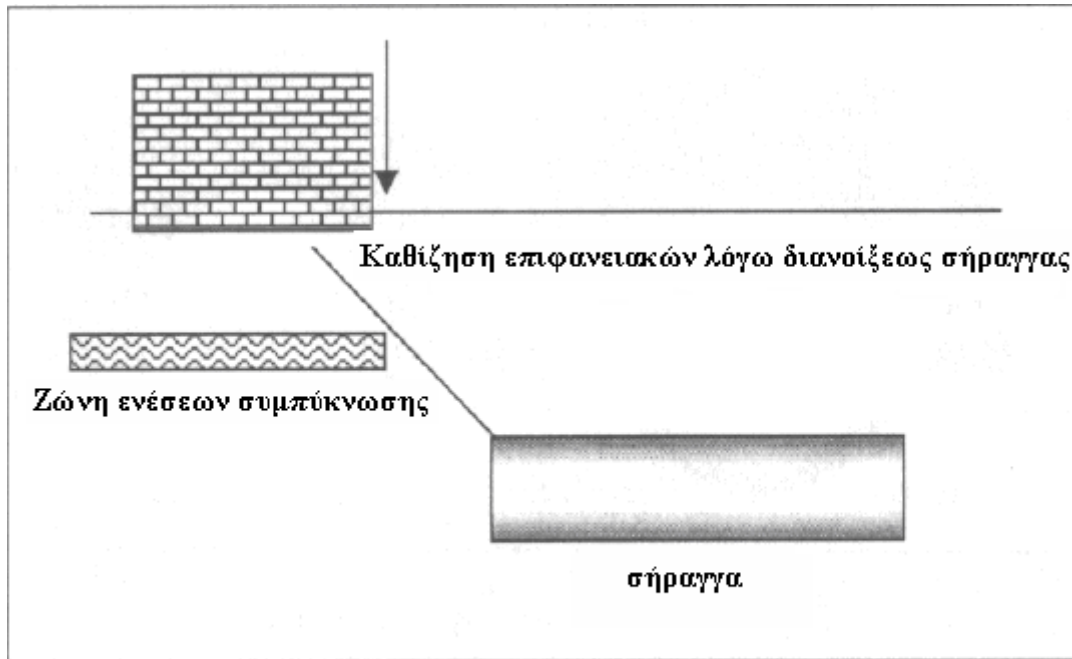
Παρατηρήθηκε, ως αποτέλεσμα, ότι έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα τα πολύ άκαμπτα μείγματα ενεμάτων, που αποτελούνταν από λεπτή άμμο και 12% από τσιμέντο και νερό, απέδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Επισημαίνεται επίσης στην μελέτη τους ότι ο περιορισμός του πηλού στο μείγμα των ενεμάτων που θα χρησιμοποιηθούν συμβάλλει στην επιτυχία της τεχνικής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πηλός προκαλεί μεγάλη ρευστότητα στο μείγμα των ενεμάτων με κίνδυνο την πρόκληση ρευστοποίησης του εδάφους. Προτείνεται επίσης η χρησιμοποίηση ελάχιστης ποσότητας νερού ώστε να παραχθεί ένα πολύ σκληρό άκαμπτο και συνεκτικό ένεμα. Δηλαδή όσο πιο άκαμπτο είναι το ένεμα τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η έγχυσή του. Επίσης, ο μεγάλος ρυθμός έγχυσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε ρήξη του εδάφους και συνεπώς πρέπει να αποφεύγεται. Για το λόγο αυτό δεν προτείνονται ρυθμοί έγχυσης μεγαλύτεροι από 0,06 m<sup>3</sup> ανά λεπτό.

Η απόσταση και η θέση των οπών των ενέσεων έχουν μεγάλη σημασία. Παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους, η περιεκτικότητά του σε νερό, η σχετική πυκνότητά του, η τυχόν απαιτούμενη βελτίωσή του, οι γεωστατικές τάσεις κτλ. επηρεάζουν την τοποθέτηση του υλικού των ενεμάτων στο έδαφος και συνεπώς, το παραγόμενο αποτέλεσμα.

Η απόσταση των οπών των ενέσεων είναι περίπου 2,5 m κάτω από το κέντρο της θεμελίωσης και προτιμάται η διάταξη τους σε τριγωνικό κάρναβο. Θεωρείται κατάλληλος ο επιπλέον σχηματισμός μιας ή δύο σειρών ενέσεων γύρω από την κατασκευή, προκειμένου να αποφευχθούν ζημιές στα γειτονικά δομικά στοιχεία, λόγω πλευρικών φορτίσεων. Σε περίπτωση υψηλής γεωστατικής τάσης (ενέσεις σε μεγάλο βάθος ή κάτω από υφιστάμενα δομικά στοιχεία) η οριζόντια απόσταση των οπών των ενέσεων τρύπες θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη, δεδομένου ότι θα απαιτηθεί μεγαλύτερος όγκος ενέματος και μεγαλύτερες πιέσεις. Η οριζόντια απόσταση των οπών των ενέσεων σε χαλαρό έδαφος είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα απαιτούνταν σε πυκνότερο έδαφος, μιας και θα χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ποσότητα ενεμάτων.

#### **7.4 Περιοχές Εφαρμογής**

Η συμπύκνωση με ενέσεις έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση διαφορικών καθιζήσεων, για την υποσύλωση πλακών και επιφανειακών θεμελιώσεων, για την αντιστάθμιση της υγροποίησης και της πρόληψης προβλημάτων εξαιτίας σεισμών, για την αποκατάσταση επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω διανοίξεως σήραγγας σε μαλακό ή χαλαρό έδαφος, για τη βελτίωση των βάσεων υπόγειων σωληνώσεων και αγωγών αποχέτευσης και για την πρόληψη του σχηματισμού καταβοθρών στα θεμέλια φράγματος.



### **Αποκατάσταση καθίζησης επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω διανοίξεως σήραγγας**

#### **7.5 Εξοπλισμός**

Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για τη συμπύκνωση εδάφους με ενέσεις δεδομένου ότι χρησιμοποιείται πολύ σκληρό τσιμεντοκονίαμα ως ένεμα. Η χωρητικότητα του αναμικτήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την ομοιόμορφη ανάμιξη του παχύρρευστου τσιμεντοκονιάματος. Η αντλία που διοχετεύει το μίγμα στις οπές θα πρέπει:

- § να είναι ικανή να διοχετεύει το τσιμεντοκονίαμα με χαμηλή ροή,
- § να είναι σε θέση να λειτουργεί σε υψηλή πίεση (4000 - 7000 kPa),
- § να μπορεί να παρέχει μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης έως και 20 m<sup>3</sup> / ώρα και
- § να έχει την δυνατότητα μέτρησης της πίεσης στο σημείο της ένεσης.

Το τσιμεντοκονίαμα μεταφέρεται από την αντλία στο σημείο της ένεσης με σωληνώσεις διαμέτρου 38-50 mm και εξαιτίας του σκληρού, υψηλού ιξώδους, τσιμεντοκονιάματος δημιουργούνται υψηλές απώλειες πίεσης στο

εσωτερικό των σωληνώσεων, λόγω τριβής. Για τον λόγο αυτόν η απόσταση της αντλίας από το σημείο έγχυσης πρέπει να είναι όσο μικρότερη γίνεται.

## **7.6 Δεδομένα που απαιτούνται κατά το σχεδιασμό**

Τα στοιχεία που απαιτούνται για το σχεδιασμό της συμπύκνωσης με ενέσεις, όπως και σε άλλες τεχνικές συμπύκνωσης εδάφους, είναι τα εξής:

- § η γεωλογία περιοχής και οι γεωτεχνικές παράμετροι (τύπος εδάφους, βάρος της μονάδας και δομή),
- § η διαπερατότητα του εδάφους,
- § η εκτίμηση της δυνατότητας του εδάφους ή του βράχου να δεχθεί ένεμα,
- § τα στοιχεία ασυνεχειών, διάβρωσης και αποσάθρωσης για τους βράχους
- § τα στοιχεία για τον υπόγειο ορίζοντα και τη χημική σύσταση του νερού
- § η πρόσβαση στο χώρο (ανοικτός χώρος ή εφαρμογή σε υφιστάμενες δομές).
- § Ενδέχεται να χρειάζεται δοκιμαστικό πεδίο τσιμεντενέσεων για τον καθορισμό παραμέτρων της μελέτης.

## **7.7 Παράμετροι ενέσεων**

Θα πρέπει να ελέγχεται το ύψος της πίεσης τόσο στην αντλία, όσο και στο σημείο της ένεσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Επειδή το ύψος της πίεσης και ο ρυθμός έγχυσης του ενέματος συσχετίζονται άμεσα μπορούν να μας δώσουν πληροφορίες για την κατάσταση του εδάφους ή και για τυχόν προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν. Για παράδειγμα, η πτώση της πίεσης μπορεί να σημαίνει ότι το ένεμα γεμίζει είτε μια κοιλότητα, ή εγχέεται σε μία υπόγεια δομή, ή ότι το έδαφος έχει υποστεί υδραυλική ρωγμάτωση, ή ότι έχει ξεπεραστεί η πλευρική αντίσταση που έχει δημιουργήσει ένας αναβαθμός στα κατάντη.

Γενικά κριτήρια προσδιορισμού της ολοκλήρωσης της άντλησης. Η άντληση σταματά για να παρατηρηθεί κάτι από τα παρακάτω:



- Μια απότομη πτώση πίεσης σε σταθερού ρυθμού άντληση. Αυτό δείχνει ότι έχει ξεπεραστεί η διατημητική αντοχή του εδάφους.
- Ανύψωση της επιφάνειας του εδάφους (εκτός από τις περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου για την πρόληψη καθιζήσεων).
- Σε περίπτωση έγχυσης του maximum ποσού ενέματος που είχε αρχικά καθορισθεί (εμφανίζεται σπάνια).
- Σε περίπτωση που τα ενέματα δεν μπορούν πλέον να διοχετευθούν στο έδαφος.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Συμπερασματικά η διαδικασία και η μέθοδος εφαρμογής της βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του εδάφους (αμμώδες, συνεκτικό ή διογκούμενο έδαφος ), την ιδιότητα (φυσική ή μηχανική) που πρέπει να βελτιωθεί, από το είδος και το μέγεθος του γεωτεχνικού έργου αλλά και από την αντίστοιχη κατασκευή. Κατ' επέκταση ο συνδυασμός των παραπάνω δηλαδή η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι και συνάρτηση του κόστους του συνολικού έργου κατασκευής σε σχέση με το κόστος της μεθόδου βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. ASCE (1976) "Subsurface investigation for Design of Foundation of Buildings", ASCE Manual and Report of Engineering Practice, No 56
2. Asphalt Institute (1975). The Asphalt Handbook Manual Series N.4, pp371.
3. Attewel, P. B. and I. W. Farmer (1976). Principles of Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York.
4. Bell, F. G. (1975). Methods of Treatment of Unstable Ground, by A.A. Lilley.
5. British Standards Institution (1981), "Code of Practice for site investigations" BS 5930:1981, London.
6. Hvorslev M.J. (1962) "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes, ASCE.
7. Israel, R. W. (1982). Soil stabilization and Cold Mix Recycling. Published by Bomac Co., USA.
8. ISSMFE (1979) "State of the Art on Current Soil Sampling", ISSMFE, Subcommittee on Soil Sampling.
9. Kamruzzaman M. H. A., H. S. Chew and H. F. Lee (2000). Engineering Behaviour of Cement Treated Singapore Marine Clay. Proc. of an Intern. Conf. On Geotechnical and Geological Eng., 19-24 Nov., Melbourne, Australia
10. Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement – State of the Art Report. Proceedings of the Tenth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering
11. NAVFAC DM 7.1 (1982) "Soil Mechanics Design Manual", U.S. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, VA.

12. NJDEP (1984) "Field Sampling Procedures Manual", New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Hazardous Site Mitigation.
13. stabilized clayey soils. PhD. Thesis Dept. of Civ. Engin. Aristotle Univ. of Thessaloniki, Greece, (in Greek).
14. Stavridakis, I. E. (1997). A study of slaking related to the unconfined compressive strength of cement
15. Theiner, T.H. A.,(2006), Principles of Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York
16. Εφραιμίδης Χ.Ι.,(2006), Τεχνική Συμπύκνωσης Εδάφους, ΕΜΠ
17. Τσότσος, Στ. (1987). Θέματα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, ΑΠΘ