

# Τεχνική συμπυκνώσεως εδαφών και ασφαλτικών ταπήτων

Χ. Ι. Εφραιμίδης  
Επίτ. Καθ. ΕΜΠ

## 1. Εισαγωγή

Συμπύκνωση είναι η εργασία της φυσικής συμπίεσεως του εδάφους για τη μείωση των κενών χώρων μεταξύ των κόκκων του υλικού (αέρας ή νερό) και την αύξηση του φαινομένου ειδικού βάρους, η οποία έχει ως συνέπεια την αύξηση της φέρουσας αντοχής του εδάφους. Η ικανότητα του εδάφους στην παραλαβή φορτίων σε χωματοουργικό έργο ή του ασφαλτικού τάπητα σε έργο οδοποιίας εξαρτάται από την πυκνότητα, επομένως τη συμπύκνωση, 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 ασφαλτικό τάπητα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές και η χρησιμοποίηση των κατάλληλων μηχανημάτων, είναι σημαντικός παράγων, ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα και συμπεριφορά του έργου.

## 2. Διάκριση εξοπλισμού συμπυκνώσεως.

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

**Μεταλλικοί στατικοί κύλινδροι.** Αυτοκινούμενοι, ελκόμενοι.  
Βάρος 3-15 Μρ. Λείοι ή κύλινδροι ή με κασικοπόδαρα.

**Ελαστικοί στατικοί κύλινδροι.** Αυτοκινούμενοι, ελκόμενοι.  
Βάρος 10-50 Μρ.

### Δυναμική συμπύκνωση

**Δονητικοί κύλινδροι.** Αυτοκινούμενοι, ελκόμενοι, με λεία τύμπανα ή με κασικοπόδαρα.  
Βάρος 3-6 Μρ και 10-15 Μρ.

**Δονητικές πλάκες.** Ανεξάρτητες, εξαρτημένες.  
Βάρος 0,1-0,6 Μρ.

**Κοπανιστήρες.** Φυσικής πτώσεως ή εσωτερικής καύσεως.  
Βάρος 0,05-0,5 Μρ και 1,0-3,0 Μρ.

Κάθε ένας από τους τύπους αυτούς έχει μία βέλτιστη περιοχή εφαρμογής με διαφορετικά αποτελέσματα συμπυκνώσεως ανάλογα με το υλικό. Η επιλογή των μηχανημάτων επηρεάζει τη συμπύκνωση.

### **3. Τεχνικές προδιαγραφές συμπυκνώσεως.**

#### **3.1. Η συμπύκνωση εξαρτάται, σε πρώτη ανάλυση, από τους εξής παράγοντες:**

##### **Διαβάθμιση υλικών**

*Η διαβάθμιση επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της συμπυκνώσεως, 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 συμπύκνωση του υλικού είναι δύσκολη ή αδύνατη.*

##### **Περιεχόμενο υγρασίας**

*Το περιεχόμενο υγρασίας ή η ποσότητα νερού μέσα στο υλικό, επηρεάζει σημαντικά την συμπύκνωση, 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 βιαίας αναμίξεως, τα οποία εξασφαλίζουν ακρίβεια στην πρόσδοση του νερού και στη συνέχεια μεταφορά στο χώρο διαστρώσεως και διάστρωση με φίνισερ.

##### **Διεργασία συμπυκνώσεως**

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

#### **3.2. Διάκριση εδαφών.**

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

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

Τα υγρά εδάφη με αυξημένο ποσοστό υγρασίας και οργανικές προσμίξεις δεν συμπυκνώνονται εύκολα και γι' αυτό είναι ακατάλληλα για χωματοουργικά έργα και οδοποιία. Τα υλικά, τα οποία δέχονται συμπύκνωση, είναι μίγματα 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.

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

### 3.3. Βέλτιστη υγρασία.

Κάθε υλικό έχει δική του μέγιστη πυκνότητα, επομένως και μέγιστο αποτέλεσμα συμπυκνώσεως, 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 συμπυκνώσεως, επομένως για την αντοχή του έργου. Ενδεικτικά δίνονται οι εξής τιμές βέλτιστης υγρασίας:

#### Πίνακας Π 1 : Βέλτιστες τιμές υγρασίας

Βαριά άργιλος	17 %
Λασπώδης άργιλος	15 %
Αμμώδης άργιλος	13 %
Άμμος	10 %
Αδρανή υλικά, άμμος, αργιλικά μίγματα	7 %

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

## 4. Μηχανικά μέσα συμπυκνώσεως.

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:

- § Στατικό βάρος (ή πίεση): Στατική συμπύκνωση.
- § Δόνηση: Δονητική συμπύκνωση.
- § Κρούση: Κρουστική συμπύκνωση.
- § Ζύμωση: Ζυμωτική συμπύκνωση.

### 4.1. Στατική συμπύκνωση.

#### 4.1.1. Στατικοί κύλινδροι με χαλύβδινους κυλίνδρους

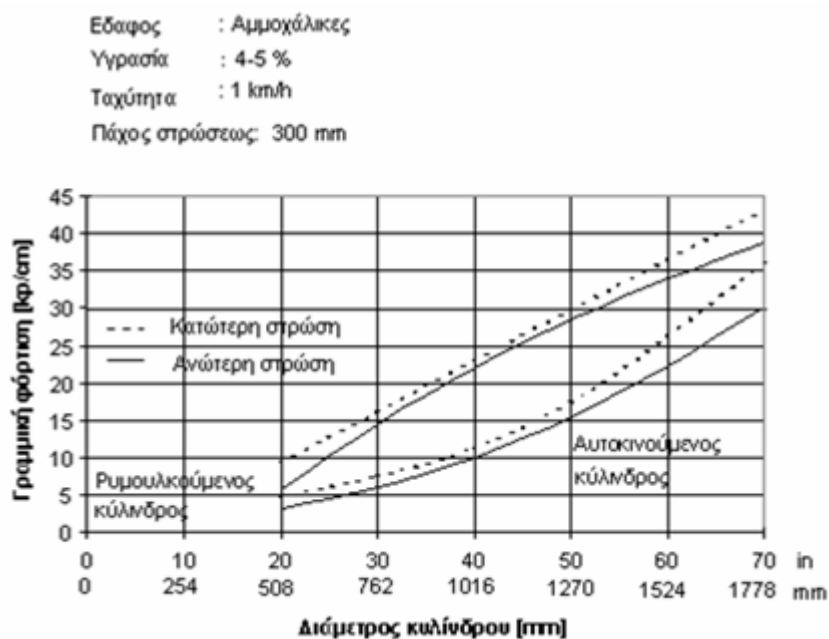
Η στατική συμπύκνωση γίνεται με χαλύβδινους κυλίνδρους κατά προτίμηση μεγάλης διαμέτρου  $>1450$  mm και μεγάλου στατικού βάρους, οι οποίοι είναι αυτοκινούμενοι ή έλκονται από ερπυστριοφόρο ή ελαστικοφόρο ελκυστήρα. Το χαρακτηριστικό στοιχείο του μηχανήματος είναι η **γραμμική φόρτιση του κυλίνδρου  $\text{kg/cm}$  πλάτους κυλίνδρου**, όπως δίνεται στην εικόνα 2.

Στα χωματουργικά έργα πρέπει να προτιμάται η χρησιμοποίηση αυτοκινουμένων κυλίνδρων, γιατί ο ρυμουλκούμενος κύλινδρος καταστρέφει την ανώτερη στρώση του εδάφους, όπως χαρακτηριστικά δείχνει η εικόνα 1. Δεν επιτρέπεται η χρησιμοποίηση ελκομένου τυμπάνου στους ασφαλτικούς τάπητες.



Στην περίπτωση επιχωματώσεων με συνεκτικό έδαφος, όπως π.χ. στην κατασκευή του πυρήνα χωματοφραγμάτων, χρησιμοποιούνται ρυμουλκούμενοι κύλινδροι με μεταλλικές προεξοχές (κατσικοπόδαρα). Με τις προεξοχές αυτές, οι οποίες έχουν διαφορετική μορφή ανάλογα με το έδαφος, γίνεται μία *ζυμωτική* εμπλοκή και συνεργασία των διαδοχικών στρώσεων του εδάφους. Η μορφή και οι διαστάσεις των προεξοχών του τυμπάνου καθορίζονται έτσι, ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα συμπυκνώσεως.

Η σχέση του φορτίου του κυλίνδρου προς τη διάμετρό του επηρεάζει το αποτέλεσμα της συμπυκνώσεως. Οι καμπύλες της εικόνας 2 δίνουν τις οριακές τιμές της *ειδικής φπρτίσεως κυλίνδρου* kg/cm.



Εικόνα 2. 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 kρ/cm<sup>2</sup> για αμμώδες υλικό, 7-14 kρ/cm<sup>2</sup> για άργιλο και 14-28 kρ/cm<sup>2</sup> (και σε εξαιρετικές περιπτώσεις μέχρι 45 kρ/cm<sup>2</sup>) στην περίπτωση πολύ συνεκτικών εδαφών με πέτρες.

#### 4.1.2. 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 φαινόμενο αυτό ονομάζεται *γεφύρωση*, στην κοινή γλώσσα *κοιλίες*, 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 επασκευαστική 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. 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.

$$P = \frac{G}{F} \quad \text{t / cm}^2$$

Το βάρος G στους ελκόμενους συμπυκνωτές μεταβάλλεται με πρόσθεση ή αφαίρεση έρματος, συνήθως νερού.

#### 4.2. Δονητική συμπύκνωση.

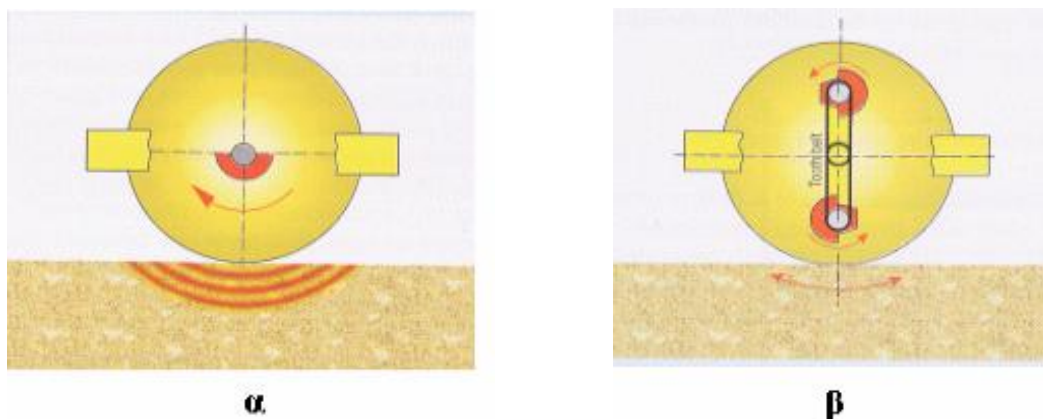
Η δονητική συμπύκνωση βασίζεται στη μετάδοση κινητικής ενέργειας από τη δονητική μηχανή στο έδαφος, έτσι ώστε οι κόκκοι του υλικού να μετακινούνται και να «γεμίζουν» τους κενούς χώρους, οι οποίοι υπάρχουν μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων, με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας και επομένως της αντοχής.

Η δονητική κίνηση της μηχανής προκαλείται από μία ή δύο στρεφόμενες έκκεντρες μάζες, οι οποίες δίνουν φυγόκεντρες δυνάμεις ίσες (δονητικοί κύλινδροι) ή πολλαπλάσιες (δονητικές πλάκες) του στατικού βάρους με κατακόρυφες συνιστώσες ημιτονοειδούς μεταβολής. Η δονητική συμπύκνωση είναι δυναμικό φαινόμενο και επομένως το αποτέλεσμα δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της φυγόκεντρου δυνάμεως και από το στατικό βάρος της μηχανής, αλλά και από τη συχνότητα διεγέρσεως, τη μορφή και την **ιδία συχνότητα** του εδάφους. Η ίδια συχνότητα αναφέρεται στην κινητικότητα, που μπορούν να αποκτήσουν οι κόκκοι του υλικού κάτω από την ενέργεια της δονητικής μηχανής.

Αυτό σημαίνει, ότι διάφορα μεγέθη κόκκων απαιτούν δική τους συχνότητα διεγέρσεως για να είναι το αποτέλεσμα της συμπυκνώσεως βέλτιστο. Και στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία λειτουργίας, **συχνότητα διεγέρσεως, αντίβαρα φυγόκεντρη δύναμη και στατικό βάρος συμπυκνωτού**, πρέπει να προσδιορίζονται με δοκιμές πάνω στο υπό συμπύκνωση υλικό.

#### 4.2.1. . 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 εικόνα 3



Εικόνα 3. Μορφές κυλινδρικών δονητικών συμπυκνωτών:  
(α) Με κυκλική δύναμη διεγέρσεως,  
(β) Με κατευθυνόμενη δύναμη διεγέρσεως. Bomag «Compaction Technology».

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. 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, όπως φαίνεται στην εικόνα 3β. Η κατευθυνόμενη δύναμη διεγέρσεως με τη σταθερή κατακόρυφη διεύθυνση δίνει καλύτερα αποτελέσματα συμπυκνώσεως σε ολόκληρο το πάχος του στρώματος χωρίς εγκλοβισμό αέρος και αναξέλεγκτες κρούσεις και γιαυτό 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 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 (articulated type) 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 τόνους και είναι λίγο μεγαλύτερο από τη μέγιστη τιμή της δύναμης 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 τη 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°

#### **4.2.2. 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°, 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.

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

#### **4.2.3. Αυτοκινούμενος δίδυμος δονητικός συμπυκνωτής με κασιπόδαρα.**

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 μερταξύ 6 - 7 km/h, ταχύτητα επιστροφής μέχρι 18 km/h . Οι δίδυμοι συμπυκνωτές με κασιπόδαρα χρησιμοποιούνται με επιτυχία στα μεγάλα χωματοουργικά έργα και ιδιαίτερα στην κατασκευή του αργιλικού πυρήνα των χωματοφραγμάτων. Δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα συμπυκνώσεως. Η μορφή και οι διαστάσεις των προεξοχών των τυμπάνων (κασικοπόδαρα) εξαρτώνται από το έδαφος και το επιθυμητό αποτέλεσμα συμπυκνώσεως. Καθορίζονται στη σύμβαση, ή από το εργαστήριο μετά από επιτόπια έρευνα.

#### **4.3. Επίπεδοι δονητικοί συμπυκνωτές.**

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 συμπυκνωτή, ως προς το αποτέλεσμα της συμπυκνώσεως. Αυτό σημαίνει, ότι για να είναι τα αποτελέσματα της συμπυκνώσεως 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 συμπυκνώσεως σε διαβαθμισμένα υλικά.

Οι χρησιμοποιούμενοι επίπεδοι δονητικοί συμπυκνωτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

##### **4.3.1 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 διαγέρσεως έχει τη δυνατότητα της επιτόπιας περιστροφής περί κατακόρυφο άξονα. Κατασκευάζονται σε μεγέθη από 77 κρ μέχρι 2800 κρ, ισχύς 2,6 έως 40 PS.

##### **4.3.2. Εξαρτημένοι επίπεδοι δονητές.**

Η πλάκα του δονητή φέρει μόνο το σύστημα διεγέρσεως, το οποίο παίρνει κίνηση από τον κινητήρα του φορέα (π.χ. φορηγό 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 απτέλεσμα και η ταχύτητα συμπυκνώσεως. Η λειτουργία του εξαρτημένου επιπέδου δονητή είναι καλύτερη σε σύγκριση με τον ανεξάρτητο, γιατί η δόνηση δεν επηρεάζεται από τη μάζα του κινητήρα και των παρελκομένων του.

#### **4.4. 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.

#### **4.5. Εφαρμογές των δονητικών συμπυκνωτών στα χωματουργικά έργα.**

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 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 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.

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. 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.

## 5. Εφαρμογές των δονητικών συμπυκνωτών σε έργα οδοποιίας.

Οι δονητικοί συμπυκνωτές με κυλίνδρους χρησιμοποιούνται με επιτυχία στη συμπύκνωση ασφαλτικών ταπήτων. Στα ανώτερα στρώματα δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, από εκείνα των στατικών κυλίνδρων. 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 μίγμα 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 ασφαλτομίγματος στη φάση συμπυκνώσεως πρέπει να είναι μεταξύ 70° και 100° C. Στη συμπύκνωση με στατικό κύλινδρο η θερμοκρασία μπορεί να είναι χαμηλότερη.

## 6. Απόδοση συμπυκνωτών.

Η απόδοση των συμπυκνωτών, ανεξάρτητα από την απόδοση και την κατασκευαστική διαμόρφωση, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{b \cdot h_f \cdot v \cdot 1000}{z} \cdot \eta_E \cdot \eta_\epsilon \cdot \eta_h \quad \text{Fm}^3 / \text{h}$$

Είναι:

- b = Πλάτος εργασίας συμπυκνωτή (m).
- h<sub>f</sub> = Πάχος στρώματος υλικού μετά τη συμπύκνωση (m).
- v = Ταχύτητα διελεύσεως (km/h).
- z = Αριθμός διελεύσεων.
- η<sub>E</sub> = Βαθμός επικάλυψης, η<sub>E</sub> = (b-b<sub>E</sub>)/b.
- b<sub>E</sub> = Επικάλυψη, 0,2 έως 0,5 m.
- η<sub>ε</sub> = Συντελεστής εκμεταλλεύσεως, 0,7 ως 0,8.
- η<sub>h</sub> = Ανθρώπινος παράγων, 0,75 έως 0,95.

### Εφαρμογή

Μηχάνημα: Ρυμουλκούμενος δονητικός συμπυκνωτής.

Πλάτος εργασίας	b = 2,50 m
Επικάλυψη	b <sub>E</sub> = 0,50 m
Πάχος στρώματος	h <sub>f</sub> = 0,40 m
Ταχύτητα διελεύσεως	v = 2,5 km/h
Αριθμός διελεύσεων	z = 6
Βαθμός εκμεταλλεύσεως	η <sub>ε</sub> = 0,75
Ανθρώπινος παράγων	η <sub>h</sub> = 0,9

$$\eta_E = \frac{b - b_E}{b} = \frac{2,50 - 0,50}{2,50} = 0,8$$

$$Q = \frac{2,5 \cdot 0,40 \cdot 2,5 \cdot 1000}{6} \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,9 = 225 \quad \text{Fm}^3 / \text{h}$$