

**Θέμα:**  
**Μέθοδοι, μέσα και έλεγχοι συμπύκνωσης εδάφους έδρασης  
εύκαμπτων οδοστρωμάτων**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**  
**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΙΤΗΤΩΝ ΑΛΦ/ΤΙΚΑ:**  
**ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ**  
**ΛΘΑΝΑΣΙΟΥ ΗΡΩ**  
**ΚΑΛΛΙΝΤΕΡΗΣ ΣΩΤΗΡΗΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝ.**

**Πάτρα 2011**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>  
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

## Πρόλογος

Μετά από μελέτη της βιβλιογραφίας που συγκεντρώσαμε σχετικά με το θέμα της πτυχιακής εργασίας, διαπιστώσαμε ότι η συμπύκνωση του εδάφους έδρασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι εργασία πρωταρχικής σημασίας για την καλή κατασκευή και λειτουργία της οδού.

Προϋπόθεση για τη σωστή εκτέλεση της συμπύκνωσης είναι η γνώση από την πλευρά του Μηχανικού των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς τους εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί σαν έδαφος έδρασης.

Προκειμένου να συγκεντρώσει τα απαραίτητα εδαφοτεχνικά στοιχεία που θα τον οδηγήσουν στη σωστή επιλογή μεθόδου και μέσω συμπύκνωσης, επιβάλλεται να εκτελεστούν ορισμένες δοκιμές κατάταξης και χαρακτηρισμού τους εδάφους, ελέγχου της μηχανικής του αντοχής καθώς και προσδιορισμού της βέλτιστης υγρασίας με την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη πυκνότητα.

Μετά την επιλογή του τρόπου και των μηχανημάτων, μπορούν να ξεκινήσουν οι εργασίες συμπύκνωσης, κατά τη διάρκεια των οποίων εκτελούνται επιτόπιες δοκιμές ελέγχου της ποιότητας του συμπυκνωμένου εδάφους.

Στην εργασία μας αναπτύσσουμε τις απαιτούμενες δοκιμές πριν και μετά τη συμπύκνωση, καθώς και την επίδραση των αποτελεσμάτων τους στην εκτέλεση των εργασιών. Επίσης, αναφέρουμε την χρήση κάθε μηχανήματος σε σχέση με το έδαφος που πρόκειται να συμπυκνωθεί. Κατόπιν, παραθέτουμε κάποιες παρατηρήσεις – συμπεράσματα στα οποία φαίνεται η αλληλεπίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους και της συμπύκνωσης.

## **1.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΟΔΟΠΟΙΑ**

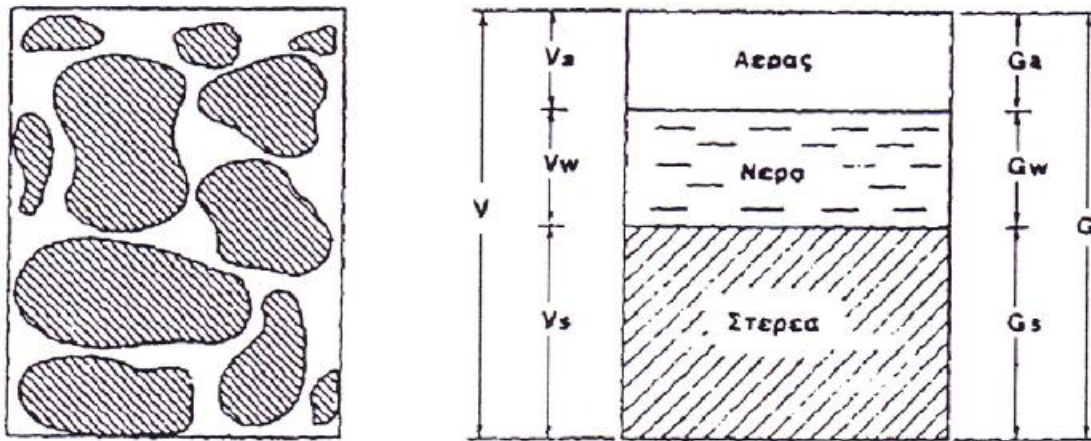
Σε κάθε έργο οδοποιίας η σύσταση των εδαφικών υλικών και η μηχανική συμπεριφορά των κατασκευών που συντίθενται από τα υλικά αυτά, αποτελούν παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την λειτουργία της οδού. Η χρήση του εδάφους ως υλικού κατασκευής αφενός, και ως δομής παραλαβής φορτίων αφετέρου, του προσδίδουν ένα πρωταρχικό ρόλο που επιβάλλει ιδιαίτερη μελέτη για κάθε περίπτωση. Ειδικότερα, στον χώρο των χωματουργικών εργασιών, όπου τα εδαφικά υλικά καλύπτουν το σύνολο των δραστηριοτήτων, απαραίτητα στοιχεία μιας άρτιας μελέτης είναι οι εργαστηριακοί έλεγχοι των ιδιοτήτων των υλικών, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συμπύκνωσης, η πρόβλεψη των αναμενόμενων καθιζήσεων των επιχωμάτων, η επίδραση του παγετού στο οδόστρωμα και, συνοπτικά, οι νόμοι συμπεριφοράς της οδού υπό την επήρεια φορτίων, θερμοκρασιακών μεταβολών και ποικίλων υδραυλικών συνθηκών. Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνεται στις αναμενόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες πολλές φορές, λόγω του χαρακτήρα των χωματουργικών έργων μπορεί να είναι σημαντικές. Ακόμη, την ολοκληρωμένη μελέτη συνοδεύουν οι δοκιμές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων ορυγμάτων, η τεκμηριωμένη πρόταση για ενδεχόμενη χρησιμοποίησή τους σε κατασκευές επιχωμάτων καθώς και οι συναφείς έρευνες για προμήθεια δάνειων υλικών ή φυσικών αμμοχάλικων.

Η εξεύρεση μαθηματικών ομοιωμάτων που να αναπαριστούν πιστά τους νόμους συμπεριφοράς των υλικών συναντά σημαντικές δυσκολίες. Το έδαφος παρουσιάζει μία εκπληκτική ετερογένεια και ανισοτροπία και έχει ως υλικό τον πιο πολυσύνθετο χαρακτήρα από όσα συναντά ο μηχανικός. Ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων του, φυσικών και μηχανικών, προσκρούει σε σοβαρά εμπόδια λόγω τεχνικών δυσκολιών τόσο στη φάση της δειγματοληψίας, όσο και κατά τους εργαστηριακούς ελέγχους. Εξ' άλλου, τα έργα οδοποιίας εμφανίζουν μία γραμμική μορφή, καλύπτοντας μεγάλες αποστάσεις με διαφορετικής σύστασης εδάφη, όπου μία πλήρης εδαφοτεχνική αναγνώριση είναι πρακτικά ανέφικτη. Η μελέτη των χωματουργικών έργων συχνά βασίζεται σε αναλυτικές μεθόδους με απλοποιητικές παραδοχές, σχετικές με την ομοιογένεια και την ισοτροπία των εδαφικών σχηματισμών. Ακόμη, η περιορισμένη από λόγους οικονομίας έρευνα για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων, οδηγεί τον μηχανικό σε χρήση ημιεμπειρικών σχέσεων που στόχο έχουν μία ποιοτική περισσότερο παρά ποσοτική αξιολόγηση των δεδομένων. Επιβάλλεται, ωστόσο, κάθε φορά η γνώση του τομέα εφαρμογής και η δυνατότητα ερμηνείας των διαφόρων θεωριών συμπεριφοράς του εδάφους, έτσι ώστε η εναλλακτική λύση βασισμένη σε ημιεμπειρικούς προσδιορισμούς, να καταλήγει σε παραδεκτά αποτελέσματα.

## 1.2. ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ

Το έδαφος χαρακτηρίζεται από την κοκκώδη φύση της στερεάς φάσης του που συνδυάζεται με την υγρά και την αέρια φάση. Οι αναλογίες των τριών αυτών φάσεων έχουν ιδιαίτερη σημασία για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού. Η συμπεριφορά του όσον αφορά στα έργα οδοποιίας, εξαρτάται άμεσα από τη σχέση μεταξύ των τριών αυτών φάσεων. Στη βελτίωση του εδάφους μεταβάλλεται η σχέση αυτή, δηλαδή η βελτίωση μπορεί να εκφρασθεί μέσω της μεταβολής των σχέσεων αυτών.

Η περιγραφή και η ανάλυση της συμπεριφοράς αυτής βασίζεται στη προσομοίωση ενός μοναδιαίου στοιχείου, όπου οι αναλογίες των φάσεων εκφράζονται είτε ως ποσοστά βάρους είτε ως ποσοστά όγκου, υπό την προϋπόθεση πάντοτε ο αέρας να είναι αβαρής.



Σχ. 1.1

- τον όγκο και το βάρος των στερεών:  $V_s$  και  $G_s$
- τον όγκο και το βάρος του ύδατος:  $V_w$  και  $G_w$
- τον όγκο του αέρα:  $V_a$
- τον όγκο των κενών:  $V_v = V_a + V_w$

Ως παράμετροι που εκφράζουν την αναλογία των κενών χρησιμοποιούνται το **πορώδες** (porosity) και ο **δείκτης πόρων** (void ratio) που χαρακτηρίζουν το εδαφικό υλικό από άποψη πυκνότητας υφής. Οι παράμετροι αυτές ορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

πορώδες

$$n = \frac{V_v}{V}$$

δείκτης πόρων

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Μεταξύ τους ισχύει η σχέση :

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

Από πλευράς ειδικού βάρους διακρίνουμε:

-το φαινόμενο ειδικό βάρος  $\gamma = \frac{G}{V}$

-το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών  $\gamma_s = \frac{G_s}{V_s}$

-το ξηρό ειδικό βάρος  $\gamma_d = \frac{G_s}{V}$

-το ειδικό βάρος του νερού  $\gamma_w = \frac{G_w}{V_w}$

Οι παραπάνω σχέσεις είναι κλασσικές σχέσεις της Εδαφομηχανικής και ευρύτατα γνωστές. Ο μηχανικός οδοποιίας θα πρέπει, εκ παραλλήλου, να γνωρίζει την φυσική σημασία και την τάξη μεγέθους για όλες τις παραπάνω παραμέτρους του εδάφους, επειδή είναι υποχρεωμένος να επιλύει πρακτικά προβλήματα χωρίς να διαθέτει πλήρη αποτελέσματα εργαστηριακών ελέγχων. Οι αριθμητικές τιμές του φαινόμενου ειδικού βάρους ( $\gamma$ ) των φυσικών εδαφών κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1,5 και 2 t/m<sup>3</sup>. Το εύρος των τιμών είναι πιο περιορισμένο για το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών  $\gamma_s=2,6-2,8$  t/m<sup>3</sup>, ενώ το ειδικό βάρος του νερού λαμβάνεται πάντοτε  $\gamma_w=1$  t/m<sup>3</sup>.

Η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους εκφράζεται από δύο παραμέτρους:

την **φυσική υγρασία** (water content) και τον **βαθμό κορεσμού** (saturation degree)  $w = \frac{G_w}{G_s}$  (%)  $S_r = \frac{V_w}{V_v}$

Για κορεσμένο έδαφος η τιμή του βαθμού κορεσμού είναι  $S_r=1$  (100%), δηλαδή όλα τα κενά είναι γεμάτα νερό, ενώ δεν υπάρχει θεωρητικά ανώτατο όριο για τις αριθμητικές τιμές της φυσικής υγρασίας που ξεπερνά πολλές φορές το 100% (συμβαίνει λεπτόκοκκα εδάφη να έχουν  $w=400\%$ ). Η περιεκτικότητα υγρασίας επηρεάζει τόσο περισσότερο τη συμπεριφορά, όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος και όσο αυξάνει τόσο υποβαθμίζεται η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

Η στερεά φάση του εδάφους χαρακτηρίζεται από την κοκκομετρική καμπύλη (γνωστή δοκιμή μέχρι λεπτόκοκκη άμμο και δοκιμή καθίζησης για το κλάσμα ιλύος και αργίλου). Ανάλογα με το μέγεθός τους οι κόκκοι κατατάσσονται σε χαλίκι (60-2 mm), άμμο (2-0,06 mm), ιλύ (0,06-0,002 mm)

και άργιλο (<0,002 mm). Ανάλογα με την αναλογία κάθε κατηγορίας ονομάζεται και το έδαφος.

Η κοκκομετρία σε συνδυασμό με την υγρασία του εδάφους και τα όρια του Atterberg (αφορούν το λεπτόκοκκο κλάσμα) είναι παράμετροι που δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Συγκρίνοντας τη φυσική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους με κάποιες χαρακτηριστικές τιμές για το συγκεκριμένο έδαφος (οι οποίες προκύπτουν πειραματικά) εξάγονται συμπεράσματα για την υφή και την κατάσταση του εδάφους. Από τις χαρακτηριστικές αυτές τιμές (όρια συρρίκνωσης, πλαστικότητας και υδαρότητας) προκύπτουν επίσης συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του εδάφους όταν μεταβάλλεται η υγρασία του. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μεταβολή της υγρασίας επηρεάζει τόσο περισσότερο τις ιδιότητες των εδαφών, όσο περισσότερο λεπτόκοκκα είναι. Γι' αυτό άλλωστε οι κανονισμοί προδιαγράφουν χαμηλά μέγιστα ποσοστά λεπτόκοκκων (π.χ. 6%), ώστε οι ιδιότητές τους να έχουν μικρή επιρροή στις ιδιότητες του συνολικού μίγματος. Η αύξηση της υγρασίας στα λεπτόκοκκα έχει δύο ουσιώδεις δυσμενείς επιρροές:

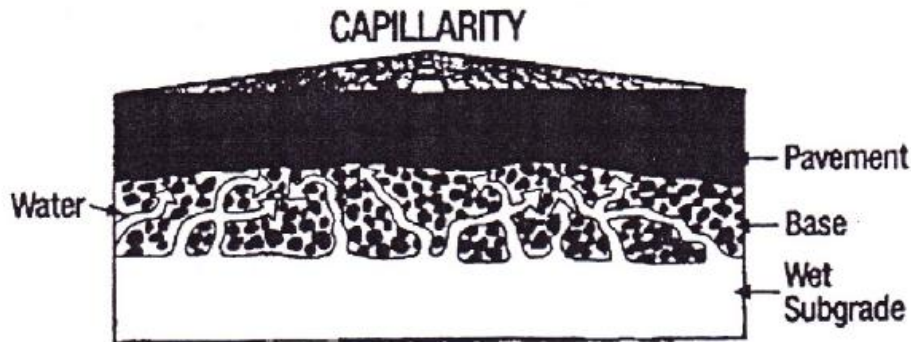
- Υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών (χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η φέρουσα ικανότητα για περιεκτικότητα υγρασίας ίση με το όριο υδαρότητας είναι το 1/100 της φέρουσας ικανότητας για περιεκτικότητα υγρασίας ίση με το όριο πλαστικότητας)
- Μη σταθερότητα όγκου, δηλαδή διόγκωση με αύξηση της περιεκτικότητας υγρασίας και συρρίκνωση με μείωση της περιεκτικότητας υγρασίας.

Τα εδάφη διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα **μη συνεκτικά** και τα **συνεκτικά**. Τα μη συνεκτικά εδάφη δεν περιέχουν καθόλου αργιλικά συστατικά ή τα περιέχουν σε μικρό ποσοστό. Σε αντίθεση με τα συνεκτικά εδάφη, η περιεκτικότητα σε νερό ελάχιστα μεταβάλλει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Χαρακτηριστικό μη συνεκτικό έδαφος είναι η άμμος.

Από την άλλη, τα συνεκτικά εδάφη περιέχουν αργιλικά συστατικά και μεταβάλλουν έντονα την μηχανική τους συμπεριφορά υπό την επίδραση του νερού των πόρων (διογκώνονται κατά τη διαβροχή και συρρικνώνονται κατά την ξήρανση). Σε ξηρή κατάσταση είναι ψαθυρά, σε υγρή μαλακά και σε περίπτωση μεγάλης περιεκτικότητας σε νερό καθίστανται ροώδη. Σημαντική παράμετρός τους είναι ο χρόνος ξήρανσης και λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό της δυνατότητας κυκλοφορίας και συμπύκνωσης. Χαρακτηριστικό συνεκτικό έδαφος είναι η άργιλος.

## 1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν αρκετούς όρους όταν καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες διαφόρων εδαφών. Η κατανόηση αυτών των όρων είναι ουσιώδης για την κατανόηση των αρχών και τεχνικών συμπύκνωσης του εδάφους.



Σχ. 1.2

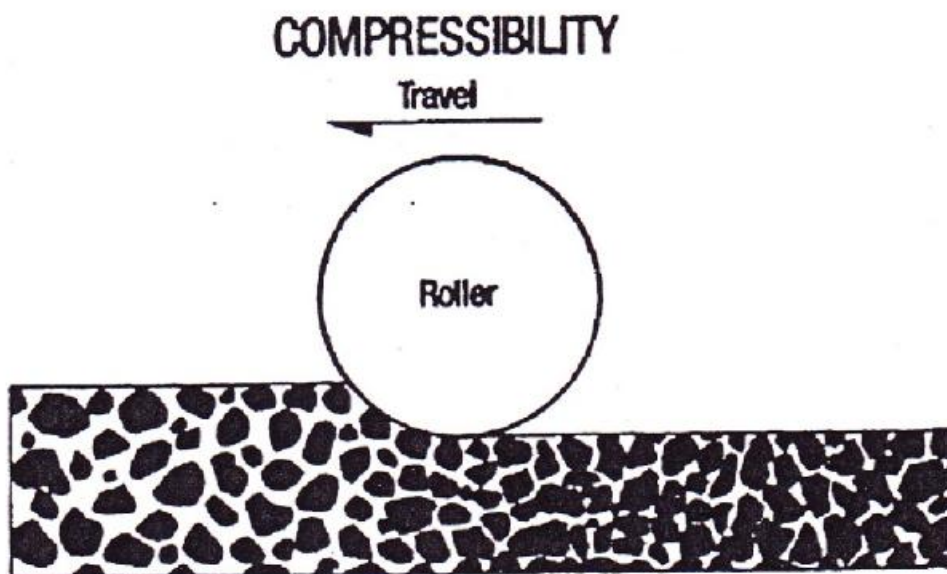
### Τριχοειδές φαινόμενο (Σχ. 1.2)

Το τριχοειδές φαινόμενο είναι η ικανότητα του εδάφους να απορροφά νερό προς τα άνω ή από τα πλάγια. Αυτό είναι ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό για υλικό βάσης που χρησιμοποιείται σαν επίπεδο μεταξύ του υποστρώματος και του οδοστρώματος ενός δρόμου. Το νερό κρατείται στο έδαφος μέσα σε μικρούς πόρους και κενά. Θεωρείται ελεύθερο αλλά μπορεί να μετακινηθεί μόνο με ταπείνωση του υδάτινου ορίζοντα ή με εξάτμιση. Με μία βάση με την ιδιότητα του τριχοειδούς φαινομένου το παγιδευμένο νερό θα μαλάκωνε και θα διόγκωνε το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ανεπαρκούς στηριζόμενης επιφάνειας και την πρόωρη χειροτέρευση του οδοστρώματος.

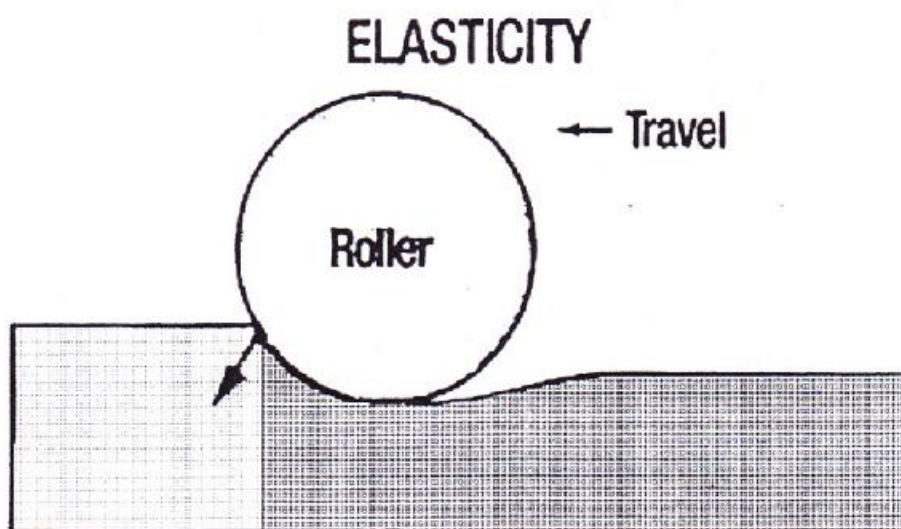
### Συμπιεστότητα (Σχ. 1.3)

Η συμπιεστότητα είναι ο βαθμός συστολής όγκου ενός εδάφους όταν μια δύναμη εφαρμόζεται σε αυτό. Εδάφη με μεγάλη συμπιεστότητα έχουν κόκκους οι οποίοι εύκολα επανατοποθετούνται από μόνους τους για να μειώσουν τον διαθέσιμο χώρο για κενά αέρος ή νερού. Τα αργιλώδη εδάφη έχουν συνήθως μεγαλύτερη συμπιεστότητα από τα κοκκώδη.





Σχ. 1.3

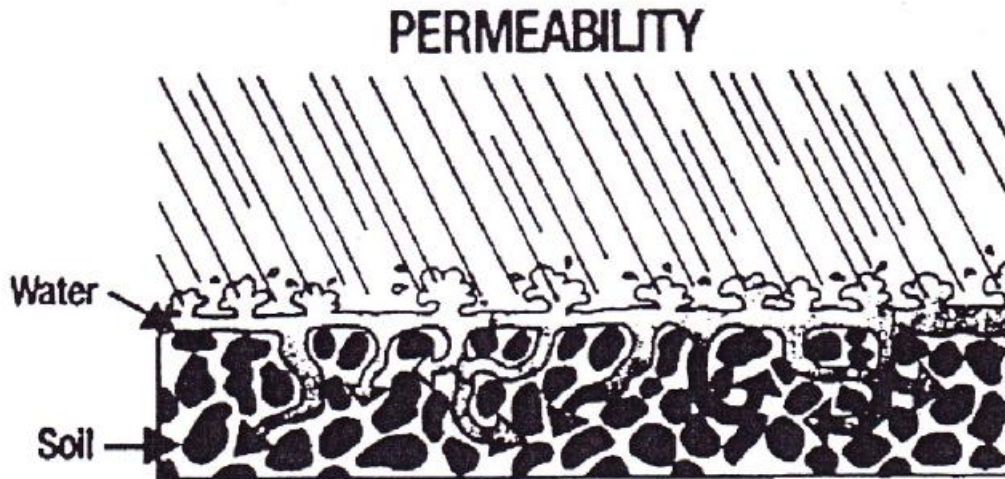


Σχ. 1.4

Ελαστικότητα (Σχ. 1.4)

Ελαστικότητα είναι η τάση του εδάφους να επανακτήσει το αρχικό του σχήμα μετά την μετακίνηση ενός φορτίου συμπίκνωσης. Αυτή είναι μια ανεπιθύμητη ιδιότητα για εδάφη που πρέπει να φέρουν κυμαινόμενα φορτία. Οδοί με πολύ ελαστικές βάσεις ή υποστρώματα, γρήγορα αστοχούν εξαιτίας της σταθερής ευκαμψίας κάτω από συνθήκες φόρτισης και μη φόρτισης. Τα

ελαστικά εδάφη συνήθως σταθεροποιούνται χημικά προτού συμπυκνωθούν και χρησιμοποιηθούν για να φέρουν κάποιο φορτίο. Τέλος, τα οργανικά εδάφη έχουν πολύ υψηλή ελαστικότητα.



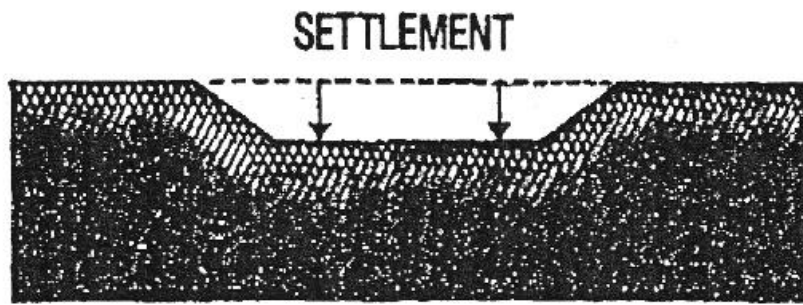
Σχ. 1.5

### Διαπερατότητα (Σχ. 1.5)

Διαπερατότητα είναι η ευκολία με την οποία το νερό ρέει διαμέσου ενός εδάφους. Δεν είναι το ίδιο τριχοειδές, που είναι η ικανότητα του εδάφους να απορροφά νερό. Η υφή του εδάφους, η κοκκομετρική διαβάθμιση και βαθμός συμπύκνωσης επηρεάζουν τη διαπερατότητα ενός εδάφους. Συνήθως τα χονδρόκοκκα εδάφη είναι περισσότερο διαπερατά από τα λεπτόκοκκα, γιατί έχουν μεγαλύτερα κενά μεταξύ των κόκκων τους.

### Πλαστικότητα

Η πλαστικότητα αναφέρεται στη συμπιεστότητα και το βαθμό συνοχής ενός εδάφους. Η μέτρηση της πλαστικότητας εκφράζεται με τον **δείκτη πλαστικότητας (PI)**. Εδάφη, όπως τα περισσότερα αργιλώδη που έχουν υψηλό δείκτη πλαστικότητας, είναι αρκετά συμπυκνούμενα και έχουν μεγάλο βαθμό συνοχής. Ένα έδαφος με δείκτη πλαστικότητας  $PI=0$  είναι μη συνεκτικό ή μη πλαστικό. Επίσης η περιεχόμενη υγρασία επηρεάζει τον δείκτη πλαστικότητας (βλ. παρ. 3.3)



Σχ. 1.6

### Καθίζηση (Σχ. 1.6)

Καθίζηση είναι η διαδικασία υποχώρησης της επιφανειακής στάθμης του εδάφους, που οφείλεται στην σταθεροποίηση του υλικού επιχώματος. Η καθίζηση είναι συχνό αποτέλεσμα της ανεπαρκούς συμπίκνωσης. Ελαφρώς συμπυκνωμένοι εδαφικοί κόκκοι θα επανατοποθετηθούν από μόνοι τους με την πάροδο του χρόνου, έτσι ώστε να μειώσουν τον διαθέσιμο χώρο για νερό και αέρα. Το αποτέλεσμα είναι η καθίζηση να είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μείωση του όγκου των κενών.

### Διατμητική αντοχή

Η διατμητική αντοχή είναι η αντίσταση των εδαφικών κόκκων να ολισθαίνουν μεταξύ τους, όταν εφαρμόζεται μία δύναμη συμπίκνωσης. Η διατμητική αντοχή ενός εδάφους είναι το αποτέλεσμα της εσωτερικής τριβής (αντίσταση σε ολίσθηση) και της συνοχής (έλξη μεταξύ των κόκκων). Κόκκοι ανώμαλου σχήματος έχουν υψηλότερη διατμητική αντίσταση από τους κόκκους με ομαλό σχήμα και απαλή υφή. Όσο υψηλότερη είναι η διατμητική αντοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη συμπίκνωσης που απαιτείται για να προσεγγίσουμε την αναγκαία πυκνότητα. Ας σημειώσουμε ότι η άργιλος έχει χαμηλή διατμητική αντοχή.



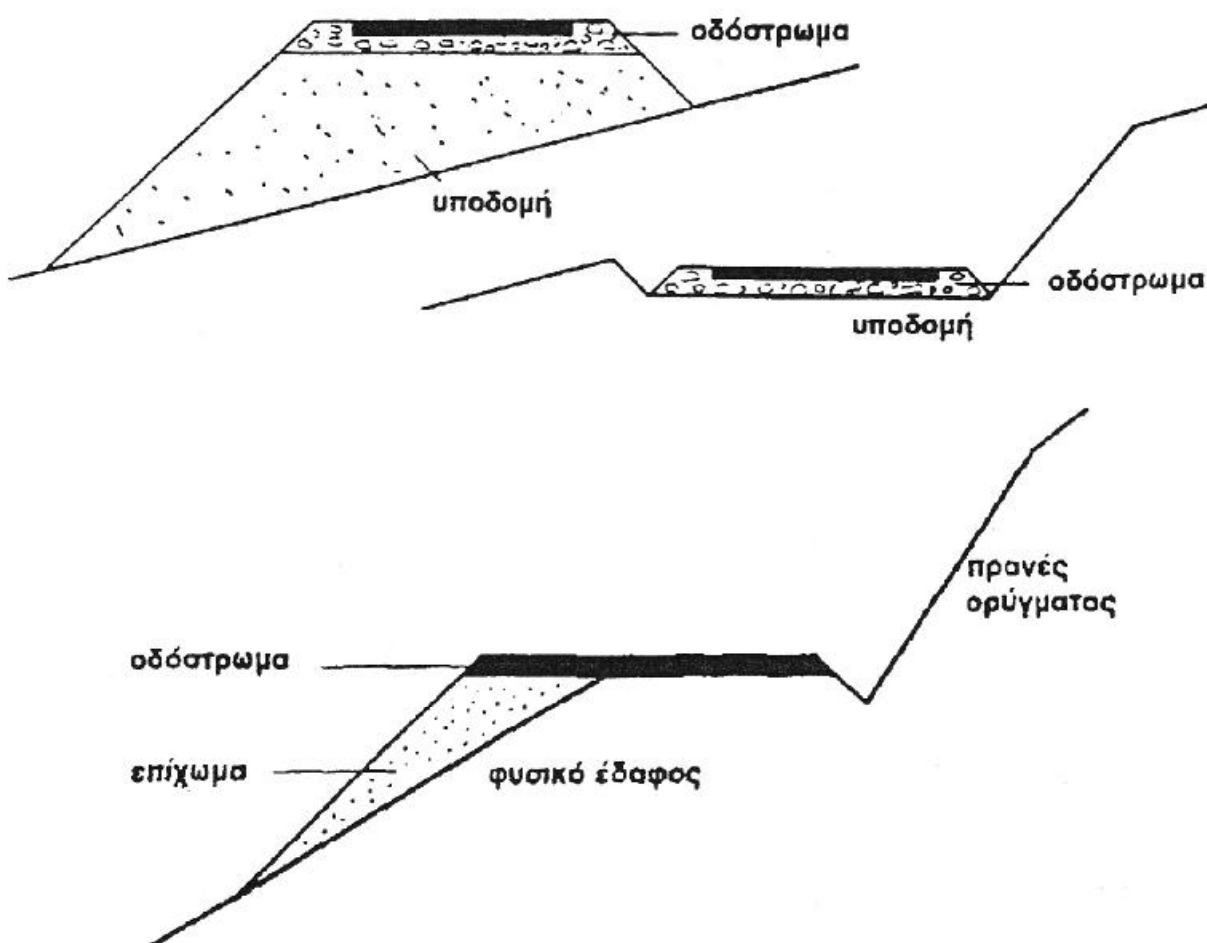
Σχ. 1.7

## Συρρίκνωση – Διαστολή (Σχ. 1.7)

Ορατή συρρίκνωση ή διαστολή είναι μία ένδειξη ότι το έδαφος είναι λεπτόκοκκο, όπως η άργιλος. Ο κύκλος συρρίκνωσης και διαστολής είναι αποτέλεσμα της αυξομείωσης της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους. Αυτός ο τύπος εδάφους παρέχει μια κακή θεμελίωση, αφού οι σταθερές αλλαγές στον όγκο μπορούν να προκαλέσουν κατασκευαστική αστοχία σε κτίρια ή δρόμους.

## 1.4 ΕΔΑΦΟΣ ΕΔΡΑΣΗΣ

Έδαφος έδρασης οδοστρώματος ονομάζεται το έδαφος πάνω στο οποίο θα εδραστούν – θεμελιωθούν οι στρώσεις του οδοστρώματος: υπόβαση, βάση, ασφαλτικό. Στην περίπτωση επιχώματος, έδαφος έδρασης είναι το εδαφικό υλικό του επιχώματος, ενώ στην περίπτωση ορύγματος μπορεί να είναι και το μητρικό έδαφος, όπως αυτό διαμορφώνεται μετά την εκσκαφή (Σχ. 1.8)



Σχ. 1.8

## **1.5 ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ**

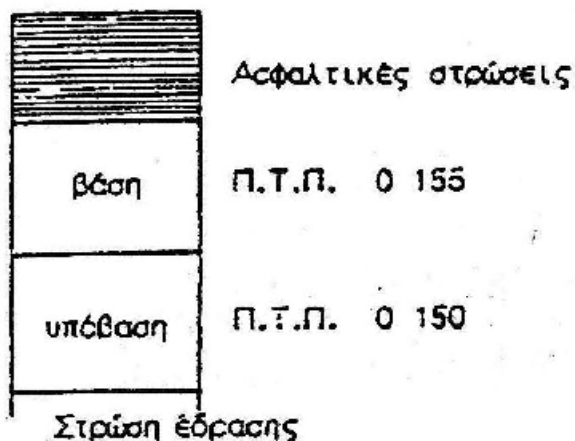
Υπάρχουν, γενικά, τρία είδη οδοστρωμάτων: τα **εύκαμπτα**, τα **ημιδύσκαμπτα** και **δύσκαμπτα** (Σχ. 1.9), τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στην κατασκευαστική τους δομή, όσο και στον τρόπο λειτουργίας τους.

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα χωρίζονται σε δύο ομάδες, ανάλογα με τον τύπο βάσης στο σύστημα των στρώσεων (τάπητας κυκλοφορίας – βάση-υπόβαση). Στην πρώτη ομάδα ανήκουν τα οδοστρώματα με βάση από ασύνδετα υλικά (“σκυρωτή” βάση, δηλαδή βάση από διαβαθμισμένα αδρανή χωρίς συνδετικό υλικό), ενώ στη δεύτερη ανήκουν τα οδοστρώματα με όλες τις στρώσεις (τάπητα κυκλοφορίας, βάση και υπόβαση) από ασφαλτόμιγμα θερμό ή ψυχρό. Τα οδοστρώματα της δεύτερης ομάδας είναι γνωστά σαν εύκαμπτα οδοστρώματα “ολικού πάχους”.

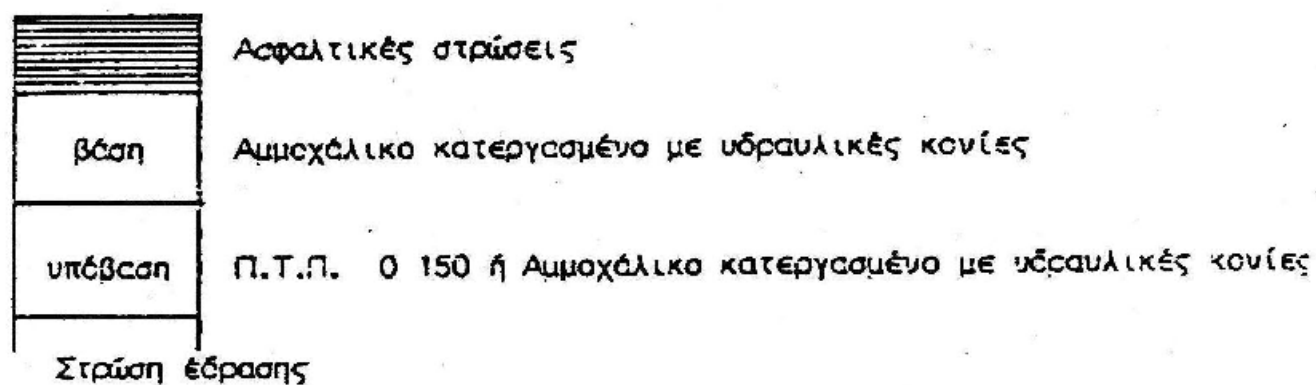
Η αποκλειστική χρήση του ενός τύπου εύκαμπτων οδοστρωμάτων δεν δικαιολογείται, δεδομένου ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα “ολικού πάχους” έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων. Τα πλεονεκτήματα των οδοστρωμάτων “ολικού πάχους” έναντι των οδοστρωμάτων με “σκυρωτή” βάση, είναι τα εξής:

- Η ασφαλική βάση μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις, συγκριτικά με την βάση από ασύνδετα αδρανή, με αποτέλεσμα να απαιτείται πάντοτε λιγότερο ολικό πάχος οδοστρώματος,
- Λόγω έλλειψης “σκυρωτής” βάσης, η οποία είναι διαπερατή από το νερό, μειώνεται στο ελάχιστο ο κίνδυνος της μείωσης της αντοχής της υπόβασης, λόγω αύξησης της υγρασίας από επιφανειακά νερά,
- Επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ταχύτητα κατασκευής διότι το ασφαλτόμιγμα διαστρώνεται, συμπυκνώνεται και σταθεροποιείται σε συντομότερο χρονικό διάστημα από τη “σκυρωτή” βάση,
- Γίνεται μια σχετική εξοικονόμηση αδρανών,
- Τα οδοστρώματα “ολικού πάχους” είναι η ιδανική περίπτωση για την εφαρμογή της σταδιακής κατασκευής (δηλαδή κατασκευή βάσεως και τάπητα κυκλοφορίας σε διαφορετική χρονική περίοδο),
- Επιφέρεται μικρότερη αναστάτωση στους υπόγειους αγωγούς, λόγω μικρότερου συνολικού πάχους,
- Τα οδοστρώματα αυτού του τύπου δεν επηρεάζονται από την υγρασία και την παγωνιά.

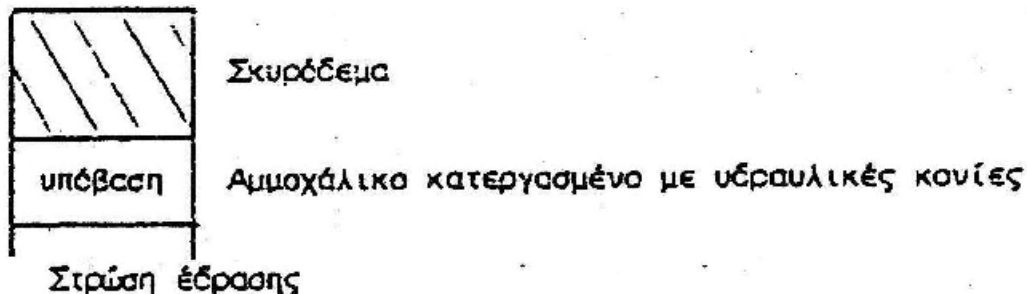
### Εύκαμπτο οδόστρωμα



### Ημιδύσκαμπτο οδόστρωμα



### Δύσκαμπτο οδόστρωμα



Σχ. 1.9

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

## 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

**Συμπύκνωση** είναι η κλασικότερη και πιο παλιά, αλλά και πιο σημαντική και οικονομική μέθοδος μηχανικής σταθεροποίησης του εδάφους. Κατά τη συμπύκνωση με προσφορά μηχανικής ενέργειας υποχρεώνονται οι κόκκοι του εδάφους να αναδιαταχθούν σε πυκνότερο σχηματισμό, με αποτέλεσμα να μειωθούν τα κενά. Μειώνεται δηλαδή το πορώδες ( $n$ ) του εδάφους, και αποκτά συνεκτικότερη υφή, μεγαλύτερη πυκνότητα και αντοχή.

Εδώ να σημειώσουμε ότι στη συμπύκνωση μειώνεται ο όγκος του αέρα ( $V_a$ ) που περιέχεται στο έδαφος, σε αντιδιαστολή με τη στερεοποίηση, που εκτός του ότι είναι μακροχρόνιο φαινόμενο, μειώνεται και ο όγκος του νερού ( $V_w$ ), δηλαδή απομακρύνεται και ποσότητα υγρασίας.

Η συμπύκνωση ανήκει στις χωματουργικές εργασίες και εκτελείται στην τελευταία τους φάση, στην οποία συμπυκνώνονται οι διάφορες εδαφικές στρώσεις. Ως μέθοδος βελτίωσης των χαρακτηριστικών του εδάφους εντάσσεται στις κύριες μεθόδους μηχανικής σταθεροποίησης.



Σχ. 2.1



## **2.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ**

Η απαίτηση μηχανικής σταθεροποίησης των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μιας οδού, δηλαδή υπεδάφους, επιχώματος και υλικών οδοστρωσίας πηγάζει από την ανάγκη διατήρησης μιας σταθερής μηχανικής συμπεριφοράς και αποτροπής των κινδύνων εμφάνισης καθιζήσεων και παραμορφώσεων στο σώμα της οδού μετά το τέλος των εργασιών.

Για την εκτέλεση της συμπύκνωσης μιας εδαφικής μάζας ο Μηχανικός μπορεί να διαμορφώσει ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα τρεις βασικούς παράγοντες:

- τη φυσική υγρασία
- την ενέργεια συμπύκνωσης και
- τον τρόπο συμπύκνωσης

Οι οποίοι επηρεάζουν τις ιδιότητες της εδαφικής δομής που υπόκειται σε συμπύκνωση. Ο βέλτιστος συνδυασμός των τριών αυτών παραγόντων είναι συνάρτηση της φύσης του εδάφους. Κάθε ένας από τους παράγοντες αυτούς επηρεάζει τις ιδιότητες της εδαφικής δομής που υπόκειται σε συμπύκνωση.

Ιδιαίτερα με τη συμπύκνωση επιτυγχάνεται:

- μείωση των μελλοντικών καθιζήσεων
- αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους
- μείωση της διαπερατότητας
- μείωση των παραμορφώσεων (συμπιεστότητας)
- ενίσχυση της ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους (επίδραση στους νόμους τάσεων – παραμορφώσεων)
- διακοπή των τριχοειδών φαινομένων.

Η καθίζηση επιχώματος προέρχεται από την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους που οφείλεται στην καλύτερη διάταξη των εδαφικών κόκκων, στη θραύση των χονδρότερων κόκκων και στην απομάκρυνση του ύδατος.

Υποδομές και βάσεις με καλή συμπύκνωση, έχουν φέρουσα ικανότητα και αντιστέκονται περισσότερο στις παραμορφώσεις από φορτίο, με αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους του οδοστρώματος. Επίσης η συμπύκνωση αυξάνει την πυκνότητα με σύγχρονη μείωση του δυναμικού της περιεκτικότητας σε υγρασία, ακόμη και στη περίπτωση που επακολουθήσει κορεσμός. Και οι δύο αυτοί παράγοντας προκαλούν αύξηση της αντοχής.

Η διαπερατότητα μειώνεται, αφού από τη στιγμή που θα διαστρωθεί και συμπυκνωθεί κάποια στρώση είναι λιγότερο υδατοδιαπερατή και συνεπώς καθίσταται λιγότερο ευπρόσβλητη από το νερό. Μειώνεται δηλαδή, η πιθανότητα μεταβολής της περιεκτικότητας υγρασίας και συνεπώς της επιρροής της στις μηχανικές ιδιότητες και στην πιθανότητα διόγκωσης του εδάφους. Εδώ να τονίσουμε ότι η διείδυση υγρασίας, είτε από την επιφάνεια είτε από το υπέδαφος είναι ο μεγαλύτερος εχθρός του οδοστρώματος, γιατί χαλαρώνοντας την υποδομή – θεμελίωσή του, μειώνει τη συνολική αντοχή και επιταχύνει την ανάπτυξη των παραμορφώσεων.

Εκτός από τα παραπάνω, με την συμπύκνωση επιτυγχάνεται ενίσχυση της ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους. Αποκτά δηλαδή το έδαφος τόση ελαστικότητα όση χρειάζεται να αντιστέκεται στις μικροπαραμορφώσεις και να επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μετά από την επίδραση κάποιου φορτίου.

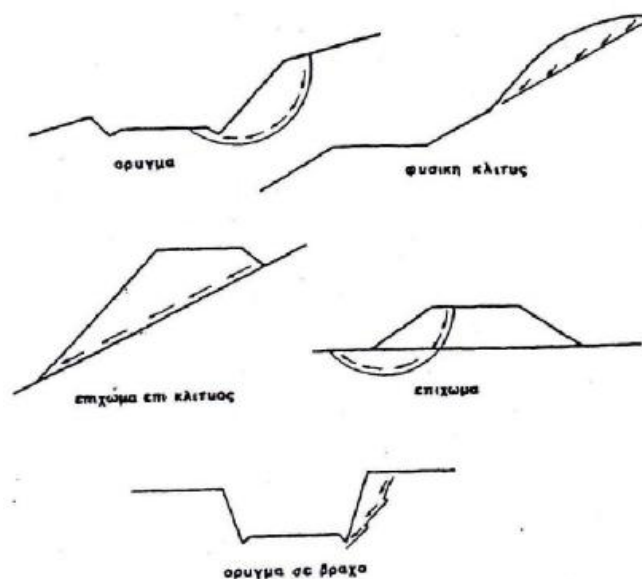
Επίσης με τη διακοπή των τριχοειδών έχουμε τη μείωση της ευπάθειας του εδάφους στον παγετό, μια που γενικά οι ζημιές λόγω παγετού οφείλονται στην κακή υπόβαση.

## 2.3 ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Σε δομικές εργασίες, όπως επιχώματα, υποβάσεις, βάσεις κ.λ.π. χρειάζεται ομοιόμορφη συμπίκνωση του εδάφους κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Ιδιαίτερα για έργα οδοποιίας, στα οποία παρουσιάζονται μεγάλα δυναμικά και στατικά φορτία, η καλή συμπίκνωση όλων των στρωμάτων από την υπόβαση μέχρι την στρώση κυκλοφορίας, αποτελεί βασικό παράγοντα για την εν γένει συμπεριφορά του έργου από άποψη παραμόρφωσης λόγω της επίδρασης της κυκλοφορίας.

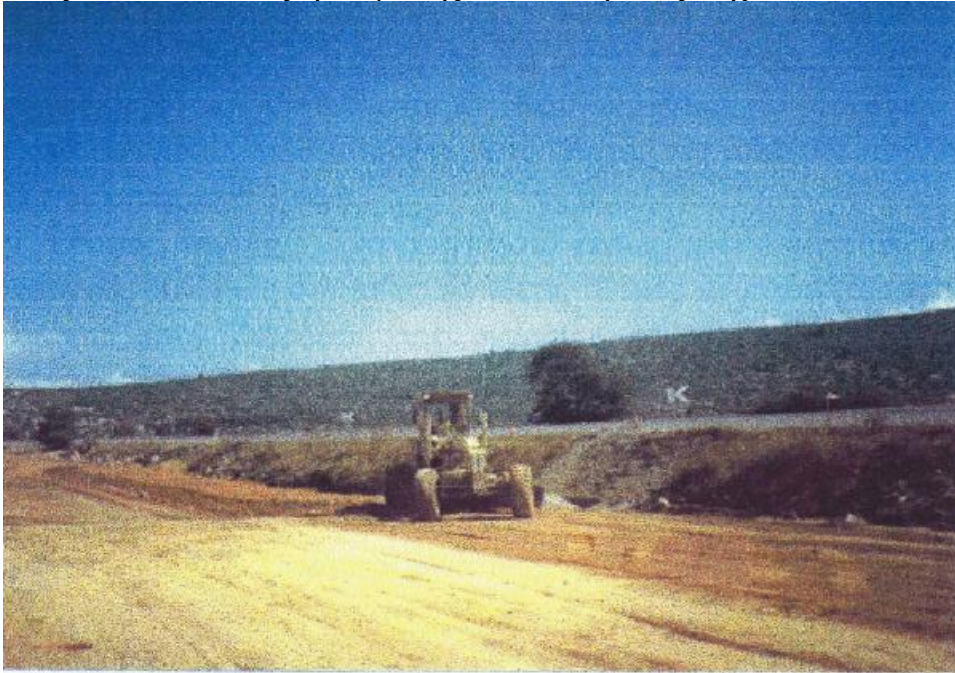
Γενικά η συμπίκνωση είναι η τελευταία και η σημαντικότερη από τις χωματουργικές εργασίες οι οποίες περιλαμβάνουν το σύνολο των δραστηριοτήτων που εκτελούνται μέχρις ότου ολοκληρωθεί η κατασκευή της επιφάνειας της σκάφης της υποδομής της οδού. Σκάφη λέγεται η τεχνητή επιφάνεια η οποία ανταποκρίνεται αφενός στο σχεδιασμό της μηκοτομής και αφετέρου δεν παρουσιάζει τα προβλήματα του φυσικού εδάφους. Στη συνέχεια τοποθετούνται οι στρώσεις της υπόβασης, της βάσης και οι ασφαλτοτάπητες, που απαρτίζουν την επιδομή της οδού.

Όμως η αποπεράτωση ενός οδικού έργου δεν οδηγεί σε μία σταθερή, από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς, κατάσταση, αλλά, αντίθετα, σε διάφορα φαινόμενα που εξελίσσονται μέσα στο χρόνο. Τέτοια είναι η στερεοποίηση του υπεδάφους, ο ερπυσμός, η κόπωση των ασφαλτικών υλικών και η μεταβολή των υδραυλικών συνθηκών, που είναι σε θέση να οδηγήσουν σε σημαντικές παραμορφώσεις και ρηγματώσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος με επιπτώσεις στη λειτουργικότητα της οδού. Ένα μεγάλο μέρος από τις φθορές και τις βλάβες που δημιουργούνται κατ' αυτό τον τρόπο, οφείλεται σε αστοχία των χωματουργικών εργασιών: καταπτώσεις και κατολισθήσεις πρανών ορυγμάτων, καθιζήσεις και ολισθήσεις επιχωμάτων, παραμορφώσεις λόγω ανεπαρκούς συμπίκνωσης (Σχ. 2.2).



Σχ. 2.2 Τύποι ολισθήσεων

Από τα παραπάνω διαφαίνεται η σημαντικότητα της συμπύκνωσης στα έργα οδοποιίας, η οποία είναι μέγιστη, καθ' ότι με τις χωματουργικές εργασίες διαμορφώνεται η υποδομή του δρόμου και οποιαδήποτε αστοχία τους είναι αδύνατο να μην μεταφερθεί αργά ή γρήγορα, στο οδόστρωμα. Πρωταρχικής σημασίας είναι συνεπώς η επιμελής εκτέλεσή τους (Σχ. 2.3).



Σχ. 2.3

Μια ικανοποιητική συμπύκνωση στη διάρκεια της κατασκευής, διατηρεί τα επιχώματα και οδοστρώματα σε πολύ καλή κατάσταση, με αποτέλεσμα την μειωμένη συντήρηση, που έχει σαν συνέπεια το οικονομικό όφελος.

## **2.4 ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ–ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗ ΥΓΡΑΣΙΑ**

Τα εδάφη και τα εδαφικά μίγματα για να συμπεριφερθούν ικανοποιητικά σαν επιχώματα, υποδομές, υποβάσεις και βάσεις, πρέπει να αντιστέκονται στις μεταβολές του όγκου λόγω διακυμάνσεων της περιεχόμενης υγρασίας και να έχουν ικανοποιητική ευστάθεια για αντίσταση στις μετακινήσεις, από κάποιο φορτίο. Όμως η αντοχή σε διάτμηση του εδάφους οφείλεται στην εσωτερική τριβή και την συνοχή. Οι ιδιότητες αυτές επηρεάζονται από το ποσοστό των κενών που υπάρχουν στο έδαφος και από την ποσότητα του νερού που υπάρχει στα κενά.

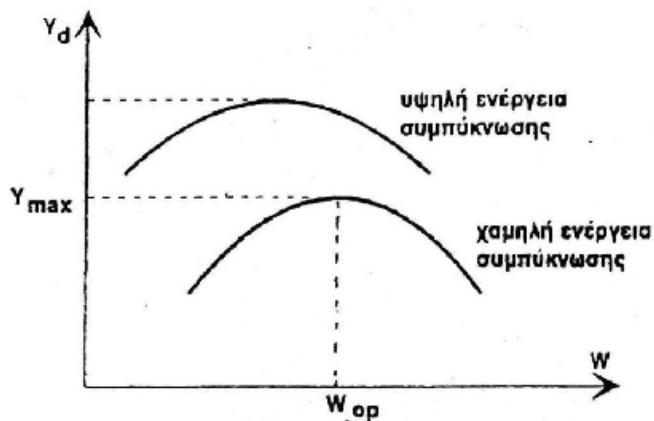
Έδαφος, που έχει μεγάλο ποσοστό κενών, γίνεται ασταθές αν εκτεθεί σε δυσμενείς συνθήκες υγρασίας. Αντίθετα, έδαφος με μικρό ποσοστό κενών αντιστέκεται στην διείδυση της υγρασίας και παρουσιάζει μεγαλύτερη ευστάθεια από το έδαφος που έχει μεγάλο ποσοστό κενών.

Η υγρασία και η πυκνότητα του εδάφους δεν διατηρούνται μόνιμα. Υπάρχει όμως μια περιεχόμενη υγρασία και πυκνότητα όπου το έδαφος παρουσιάζει μέγιστη αντίσταση στη μεταβολή. Ο βαθμός συμπύκνωσης δεδομένου εδάφους εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία και από την ενέργεια συμπύκνωσης που εφαρμόζεται. Μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας ή της ενέργειας συμπύκνωσης έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της πυκνότητας του εδάφους. Όμως κάθε έδαφος έχει μια πρόσφορη περιεχόμενη υγρασία όπου αποκτά μέγιστη πυκνότητα με δεδομένη ενέργεια συμπύκνωσης.

Μετά τη συμπύκνωση του εδάφους με ελεγχόμενες συνθήκες, οι εδαφικοί κόκκοι συμπίεζονται λόγω μείωσης των κενών που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων. Η διάταξη των εδαφικών κόκκων εξαρτάται από την ενέργεια συμπύκνωσης, που η μέγιστη δράση της αναπτύσσεται όταν η περιεχόμενη υγρασία είναι βέλτιστη. Γι αυτό σε μια κατασκευή, το έδαφος είναι περισσότερο ευσταθές όταν συμπυκνωθεί με την υγρασία εκείνη που δίδει την μέγιστη αντίσταση στις διακυμάνσεις της περιεχόμενης υγρασίας, δηλαδή η αύξηση του βαθμού συμπύκνωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φέρουσας αντοχής του εδάφους και την μείωση των πιθανοτήτων για καθιζήσεις.

Στην κατασκευή, ο βαθμός συμπύκνωσης εκφράζεται με τον όρο σχετική συμπύκνωση ή σχετική πυκνότητα που είναι λόγος εκφραζόμενος σαν εκατοστιαίο ποσοστό της ξηρής πυκνότητας του εδάφους ( $\gamma_d$ ) προς τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα που έχουμε επιτύχει με τη δοκιμή PROCTOR. Η σχετική πυκνότητα καλά συμπυκνωμένου εδάφους ανέρχεται σε 100%, όμως επιτρέπονται αποκλίσεις 5% - 10% ανάλογα με τη φύση της κατασκευής της φύσης του εδάφους κ.ά. βέβαια οι απαιτήσεις ως προς τον βαθμό συμπύκνωσης δεν είναι ίδιες για όλες τις στρώσεις. Είναι αυξημένες για τις στρώσεις της μη σταθεροποιημένης βάσης και μικρότερες για τις ενδιάμεσες στρώσεις επιχώματος.

Η συμπύκνωση ενός εδάφους μετριέται ποσοτικά με την πυκνότητά του η οποία αποτελεί καθοριστικό κριτήριο για την ποιότητα της συμπύκνωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι δε μετριέται η φαινομενική πυκνότητα του εδάφους που συμπυκνώθηκε, αλλά η ξηρή φαινόμενη πυκνότητά του ( $\gamma_d$ ), δηλαδή μετριέται η πυκνότητα του εδάφους, αφού έχουμε αφαιρέσει το βάρος του νερού που περιέχεται, δηλαδή είναι ανεξάρτητη από το ποσοστό υγρασίας. Όμως δεν παύει για μια συγκεκριμένη ενέργεια συμπύκνωσης, η τιμή της ξηρής πυκνότητας του εδαφικού υλικού που υφίσταται συμπύκνωση να είναι συνάρτηση της φυσικής υγρασίας. Το διάγραμμα φυσικής υγρασίας, ξηρής



Σχ. 2.4

πυκνότητας ( $w\%$ ,  $\gamma_d$ ) που φαίνεται στο (Σχ. 2.4) έχει την μορφή μιας καμπύλης που στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ η μέγιστη ξηρή πυκνότητα επιτυγχάνεται για μια συγκεκριμένη τιμή της φυσικής υγρασίας. Αυτή η συγκεκριμένη τιμή ονομάζεται βέλτιστη υγρασία και για κάθε υλικό είναι συνάρτηση της ενέργειας συμπύκνωσης.

Αύξηση της ενέργειας συμπύκνωσης, για δεδομένη υγρασία εδάφους, έχει σαν αποτέλεσμα την πυκνότερη διάταξη των εδαφικών κόκκων και αύξηση της ξηρής πυκνότητας, μέχρις ότου ο όγκος του αέρα μειωθεί τόσο, ώστε η συνέχιση της συμπύκνωσης να μην δίνει αισθητή μεταβολή όγκου. Τότε η καμπύλη του διαγράμματος ( $w\%$ ,  $\gamma_d$ ) μετατοπίζεται σχεδόν παράλληλα δείχνοντας ότι επιτυγχάνεται υψηλότερη τιμή για τη μέγιστη πυκνότητα. Η μέγιστη ξηρή πυκνότητα αντιστοιχεί στην περίπτωση αυτή, σε μια μικρότερη τιμή της βέλτιστης φυσικής υγρασίας.

Πάντα η συμπύκνωση των εδαφών (συνεκτικών και μη) εκτελείται όταν έχουν βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία. Όταν η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους είναι μικρότερη από τη βέλτιστη, το έδαφος δύσκολα συμπιέζεται. Αντίθετα, όταν η περιεχόμενη υγρασία είναι μεγαλύτερη της βέλτιστης, οι εδαφικοί κόκκοι απωθούνται από την υδροστατική πίεση του νερού, που υπάρχει στα διάκενα. Έτσι τα συνολικά κενά αυξάνονται και η ξηρή πυκνότητα μειώνεται. Γι αυτό πάντα λαμβάνονται μέτρα, προσαρμοζόμενα στις κλιματολογικές και καιρικές συνθήκες π.χ. η εκτέλεση εργασιών συμπύκνωσης απαγορεύεται κατά τη διάρκεια συνεχούς βροχόπτωσης.

Έτσι και στην περίπτωση μη συνεκτικών εδαφών, εάν η διάστρωση και η συμπύκνωση των υλικών εκτελείται σε εποχή ξηρασίας και υψηλών θερμοκρασιών, απαιτείται το υλικό κάθε στρώσης να αναμοχλεύεται και να διαβρέχεται ομοιόμορφα (Σχ. 2.5) πριν τη συμπύκνωση μέχρι να επιτευχθεί η

βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία, η οποία πρέπει να διατηρείται σταθερή σ' όλη τη διάρκεια της συμπύκνωσης. Στην περίπτωση συνεκτικών εδαφών, αν η περιεχόμενη υγρασία είναι υπερβολική και μεγαλύτερη από τη βέλτιστη, τότε με αναμόχλευση και αερισμό και με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, επιδιώκεται ο υποβιβασμός της περιεχόμενης υγρασίας μέχρι τη βέλτιστη. Γενικά όμως τα λεπτόκοκκα εδάφη είναι περισσότερο ευαίσθητα στην επίδραση των συνθηκών συμπύκνωσης από ότι τα χονδρόκοκκα.

Τα παραπάνω είναι αναγκαία μια που από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας προκαλούνται καθιζήσεις, συρρικνώσεις, διογκώσεις και φθορές από παγετό.

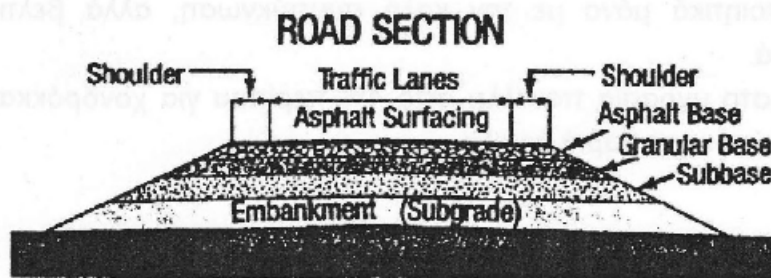
Άρα το πρόβλημα που τίθεται στον κατασκευαστή, είναι ποια πρέπει να είναι η πυκνότητα του εδάφους και κατά συνέπεια ποια πρέπει να είναι η περιεχόμενη υγρασία για να μην υποστεί καθίζηση και ποια είναι η οριακή πυκνότητα, που δεν πρέπει να υπερβεί αυτό, για να εμποδιστεί κάθε μεταγενέστερη διόγκωση. Μερικά δείγματα εδαφους που συμπυκνώθηκαν σε χαμηλές σχετικά περιεκτικότητες υγρασίας θα διογκώνονται περισσότερο, με ακόλουθη απώλεια αντοχής, από αυτά που συμπυκνώθηκαν σε υψηλότερες περιεκτικότητες υγρασίας. Η διόγκωση ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία μέχρι τη βέλτιστη τιμή και ύστερα γίνεται σχετικά σταθερή για περιεκτικότητες σε υγρασία μεγαλύτερες από τη βέλτιστη.

Η μέγιστη ξηρή πυκνότητα του εδάφους εξαρτάται κατά πολύ από την σύσταση του εδάφους και κυμαίνεται μεταξύ 1400 kg/m<sup>3</sup>, περίπου για βαριά άργιλο, μέχρι 2200 kg/m<sup>3</sup> ή περισσότερο για πολύ καλά διαβαθμισμένο χονδρόκοκκο έδαφος. Όμως πρέπει να σημειώσουμε ότι η συμπύκνωση δεν θεωρείται πάντα η καλύτερη λύση για επιχώματα και υποδομές. Αυτό συμβαίνει γιατί εδάφη με κακή κοκκομετρική διαβάθμιση δεν συμπεριφέρονται πάντα ικανοποιητικά μόνο με την καλή συμπύκνωση, αλλά βελτιώνονται βέβαια αισθητά.

Η βέλτιστη υγρασία ποικίλλει από 4% περίπου για χονδρόκοκκα εδάφη, μέχρι 28% περίπου για βαριά άργιλο.

## 2.5. ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

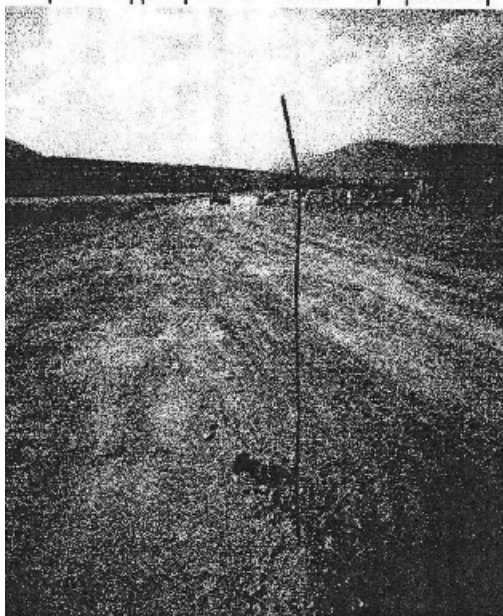
Στις χωματουργικές εργασίες συμπεριλαμβάνεται και η κατασκευή επιχώματος. Αυτό ανήκει στις κύριες χωματουργικές εργασίες και γίνεται πριν από την τελευταία φάση κατά την οποία εκτελείται η συμπύκνωση των διαφόρων στρώσεων. Το επίχωμα είναι κάθε “γέμισμα” εδάφους του οποίου η κορυφή είναι ψηλότερα από την εδραζόμενη επιφάνεια. Μπορεί να βρίσκεται σε εργοτάξιο κτιρίου ή σε αυτοκινητόδρομο. Σε όλα τα έργα, το επίχωμα βρίσκεται πάνω από το φυσικό έδαφος.



Σχ. 2.6

Το παραπάνω σχήμα (Σχ. 2.6) δείχνει το επίχωμα σε σχέση με τα άλλα στρώματα που εμφανίζονται σε μία διατομή δρόμου.

και



Σχ. 2.7

Βασικός στόχος κατά την κατασκευή επιχωμάτων είναι η εξασφάλιση του αμετάβλητου της στάθμης της άνω επιφάνειάς τους (είναι απαράδεκτες κάθε είδους καθιζήσεις διογκώσεις) και φυσικά η ασφάλειά τους έναντι κατολίσθησης. Εδώ να επισημάνουμε ότι η τελική στάθμη επιτρέπεται να διαφοροποιείται μέχρι 3cm από την προδιαγραφείσα από τη μελέτη. Η διαφοροποίηση αυτή καλύπτεται αργότερα από τα ασφαλτικά. Στη φωτογραφία (Σχ. 2.7)

διακρίνεται η έντονα χρωματισμένη ταινία που τοποθετείται σε αφμανές σημείο και υποδηλώνει την τελική στάθμη του επιχώματος.



Έτσι η κατάλληλη και ομοιόμορφη συμπύκνωση του εδάφους, κατά τη διάρκεια της κατασκευής, θα εμποδίσει την αποτυχία του οδοστρώματος από την ανομοιόμορφη καθίζηση και μεταβολή του όγκου, τα δε πρηνή των επιχωμάτων θα μπορούν να κατασκευαστούν με μεγαλύτερες κλίσεις χωρίς κίνδυνο κατολισθήσεων (Σχ. 2.8).

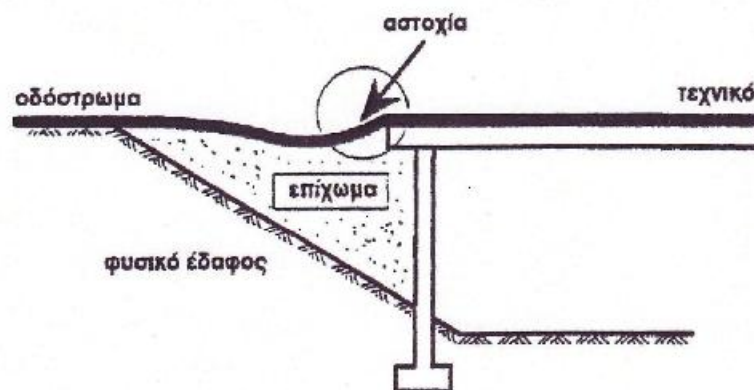


Σχ. 2.8

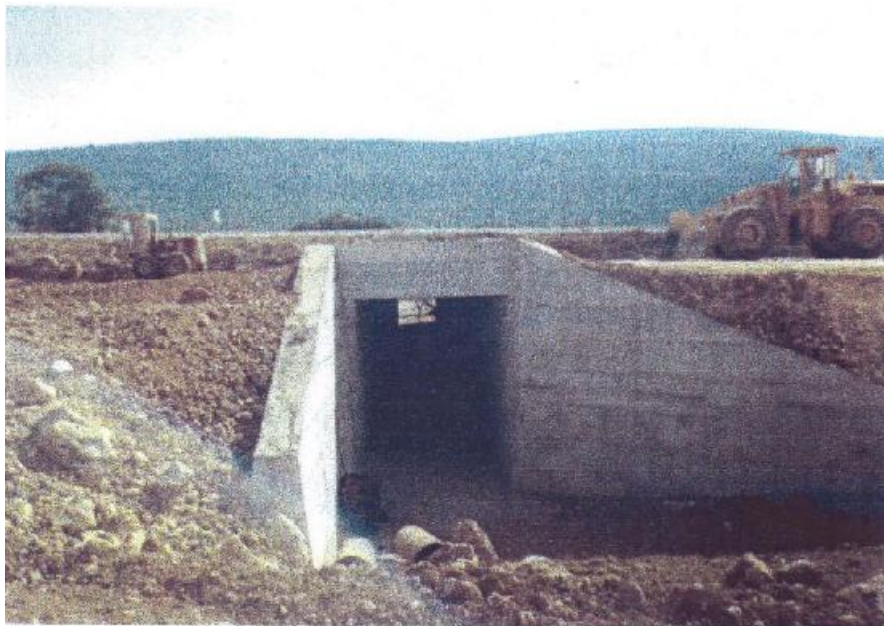
Έτσι καταλαβαίνουμε λοιπόν, ότι το πρόβλημα της σωστής και ασφαλούς κατασκευής επιχωμάτων και ειδικά μεγάλου ύψους είναι πολύ δύσκολο. Οι αστοχίες που έχουν παρατηρηθεί είναι πολλές και καταλήγουν πάντα σε διακοπή της κυκλοφορίας και υψηλό κόστος αποκατάστασης.

Παράγοντες καλής κατασκευής ενός επιχώματος είναι:

- Η σωστή επιλογή υλικών,
- Η κατάλληλη και επιμελημένη προετοιμασία του εδάφους έδρασης του επιχώματος και τελευταία και πιο σημαντική είναι:
- Η επιμελής συμπύκνωση του (Σχ. 2.9), (ιδιαίτερα στο σύνορό τους με τεχνικά έργα για αποφυγή διαφορικών καθιζήσεων, (Σχ. 2.10)).



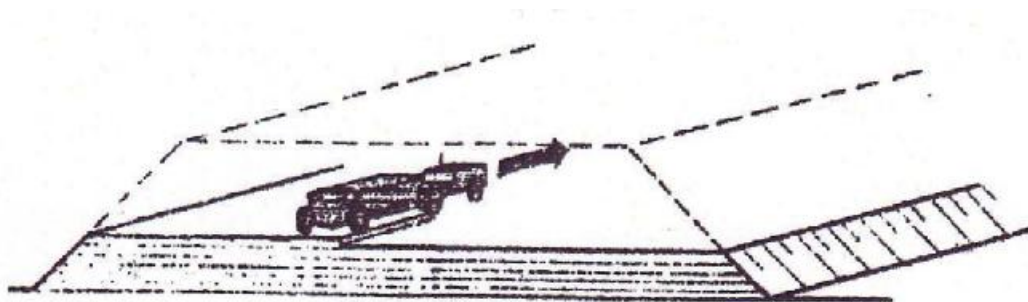
Σχ.2.9



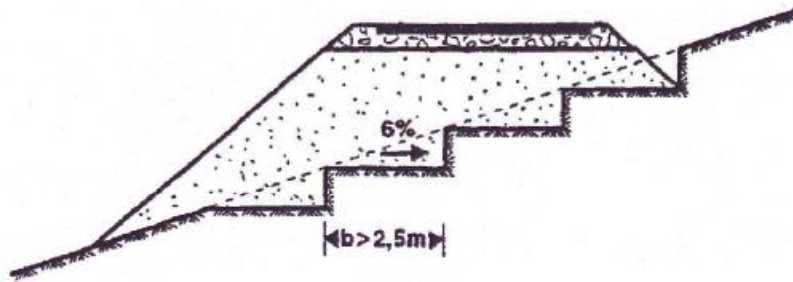
Σχ. 2.10

Σημειώνεται ότι, αν διατίθεται διαφορετικής ποιότητας υλικά, τα καλύτερα τοποθετούνται επιφανειακά, εκεί δηλαδή όπου τα φορτία κυκλοφορίας δεν έχουν διανεμηθεί επαρκώς και συνεπώς είναι μεγαλύτερα. Στο ανώτερο τμήμα του επιχώματος και σε πάχος 2 m δεν πρέπει να τοποθετούνται τεμάχια λίθων διαστάσεων μεγαλύτερων των 20 cm, ενώ στην τελευταία στρώση πάχους 15 cm η μέγιστη διάσταση των υλικών πρέπει να είναι 7.5 cm.

Τα υλικά κατασκευής των επιχωμάτων πρέπει να διαστρώνονται με διαδοχικές στρώσεις με την επιβεβλημένη κάθε φορά, ανάλογα με το είδος των υλικών, κλίση, και αν είναι δυνατόν σ' όλο το πλάτος της διατομής 90 (Σχ. 2.11), διαβρεχόμενα κατάλληλα προκειμένου να επιτύχουμε την βέλτιστη υγρασία. Όταν η εγκάρσια κλίση του εδάφους έδρασης είναι μεγαλύτερη από  $10^\circ$  απαιτείται η κατασκευή βαθμίδων αγκύρωσης, ούτως ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι ολίσθησης του επιχώματος (Σχ. 2.12).



Σχ. 2.11 Επιχωμάτωση με διαδοχικές στρώσεις

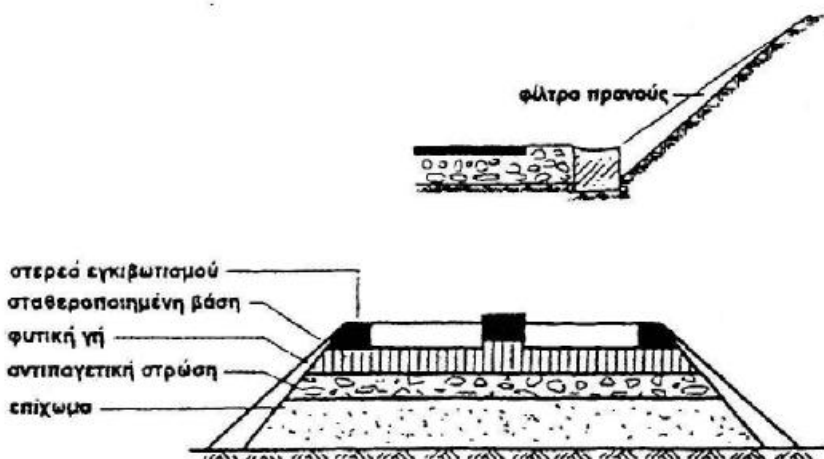


Σχ. 2.12

Το χαλαρό πάχος των στρώσεων εξαρτάται από το είδος των διατιθέμενων υλικών και από τα μέσα συμπύκνωσης. Θα πρέπει να είναι για τα μη βραχώδη (γαιώδη) υλικά μικρότερο των 20 cm και για τα βραχώδη μικρότερο των 40 cm.

Οι διάφορες στρώσεις και η τελική επιφάνεια πρέπει να είναι επίπεδες και να έχουν την ενδεδειγμένη κλίση για την απαγωγή του νερού.

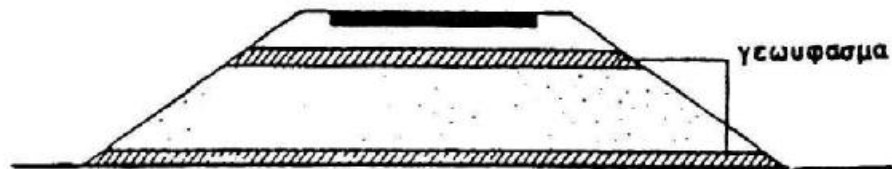
Σημεία του εύρους κατάληψης του δρόμου που είναι διαποτισμένα με νερό πρέπει να απομακρύνονται πριν από την έναρξη των εργασιών συμπύκνωσης και να αντικαθίστανται με όμοιο έδαφος επιτρεπτής περιεκτικότητας σε νερό. Επίσης μετά τον καθαρισμό των φυτικών γαιών και τον έλεγχο του εδάφους, εξετάζεται η ανάγκη εξυγίανσης και κατασκευής φίλτρου και αποστράγγισης που κυρίως στοχεύει στην αντιμετώπιση των υπόγειων νερών ή τέλος και αντιπαγετικής στρώσης (Σχ. 2.13).



Σχ. 2.13 Στρώσεις αποστράγγισης

Αν κριθεί αναγκαία η κατασκευή εξυγιαντικής στρώσης και αν αναμένονται μεγάλες καθιζήσεις τότε το πάχος της στρώσης αυτής θα πρέπει να

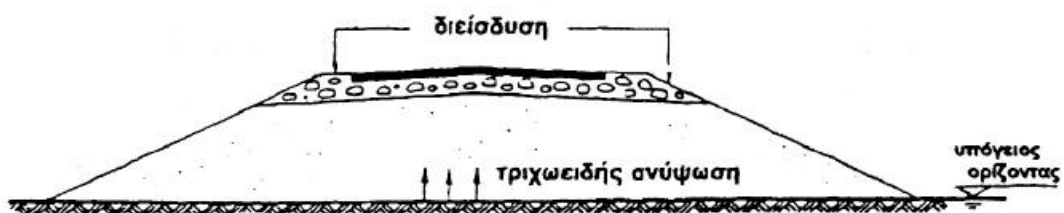
είναι τουλάχιστον κατά 30 cm μεγαλύτερο από τις αναμενόμενες καθιζήσεις. Νεότερη μέθοδος είναι η τοποθέτηση γεωφάσματος (Σχ. 2.14)



Σχ. 2.14

το οποίο εμποδίζει τη διείσδυση του υγιούς υλικού στο μαλακό υπέδαφος, αλλά και διασπά τα τριχωειδή φαινόμενα και εμποδίζει την ανύψωση της εδαφικής υγρασίας στο υλικό του επιχώματος.

Εκτός από τον έλεγχο για την κατασκευή εξυγιαντικής στρώσης γίνεται και έλεγχος για την αναγκαιότητα αντιπαγετικής στρώσης. Αρχικά εξετάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα που καθορίζουν το βάθος διείσδυσης του παγετού μέσα στο έδαφος. Τέτοια μετεωρολογικά δεδομένα είναι η ελάχιστη θερμοκρασία και η διάρκεια του παγετού. Στη βόρεια Ελλάδα το βάθος διείσδυσης του παγετού μπορεί να θεωρηθεί ίσο με 50 – 80 cm. Κατά τη διάρκεια του παγετού το νερό των εδαφικών πόρων παγώνει με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φακοί πάγου. Με τη δημιουργία των φακών μηδενίζεται εκεί η πίεση του νερού των πόρων με αποτέλεσμα να αναρροφάται νερό από χαμηλότερα και να ανεβαίνει προς τα πάνω (Σχ. 2.15).



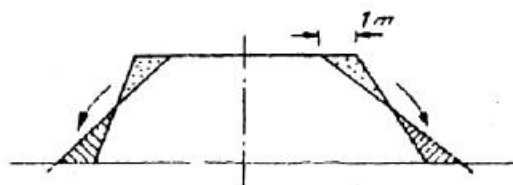
Σχ. 2.15

Έτσι οι φακοί πάγου τροφοδοτούνται και αυξάνουν συνεχώς σε όγκο με επακόλουθο τη διόγκωση του εδάφους. Όταν αργότερα ζεσταίνεται ο καιρός, αυξάνεται απότομα η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους με συνέπεια την κατακόρυφη πτώση της φέρουσας ικανότητάς του και την πρόκληση σημαντικών ζημιών στο οδόστρωμα από τα φορτία της κυκλοφορίας. Εκτός συνεπώς της χαμηλής θερμοκρασίας, απαραίτητο για να υποστεί βλάβη από παγετό το οδόστρωμα είναι η ταυτόχρονη εμφάνιση δύο ακόμα συνθηκών. Αυτές είναι η ύπαρξη κοντά στην επιφάνεια υπόγειου υδάτινου ορίζοντα για τη συνεχή τροφοδοσία των φακών του πάγου και η κατάλληλη εδαφική δομή, ώστε να υφίσταται παροχή νερού από φαινόμενα αναρρόφησης και τριχοειδούς ανύψωσης. Για τα αργιλώδη εδάφη η διαπερατότητα είναι αμελητέα, πρακτικά δηλαδή η παροχή νερού είναι αμελητέα. Για τα χονδρόκοκκα εδάφη οι εσωτερικοί αλληλοσυνδεόμενοι πόροι έχουν σχετικά μεγάλες διατομές με αποτέλεσμα οι δυνάμεις τριχοειδούς ανύψωσης να είναι μικρές. Απομένουν, έτσι, ως επιρρεπή στη διόγκωση από παγετό τα ομοιόμορφα μέσης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδάφη, δηλαδή οι λεπτές ιλυώδεις άμμοι. Η αντιπαγετική στρώση συνίσταται ουσιαστικά στη διακοπή των τριχοειδών φαινομένων ανύψωσης.

Στο εργοτάξιο η συμπύκνωση γίνεται πάντα παράλληλα προς τον άξονα της οδού και από τα άκρα προς το μέσο (προφανές, γιατί η αντίστροφη πρακτική θα οδηγούσε σε εξάπλωση του υλικού) και σε περίπτωση στροφής (επικλήσεων) από το χαμηλότερο στο υψηλότερο σημείο. Το πιο δύσκολο σημείο είναι η συμπύκνωση των άκρων των επιχωμάτων, όπου λόγω του κινδύνου κατάρρευσης χρησιμοποιούνται ελαφρύτερα μέσα.

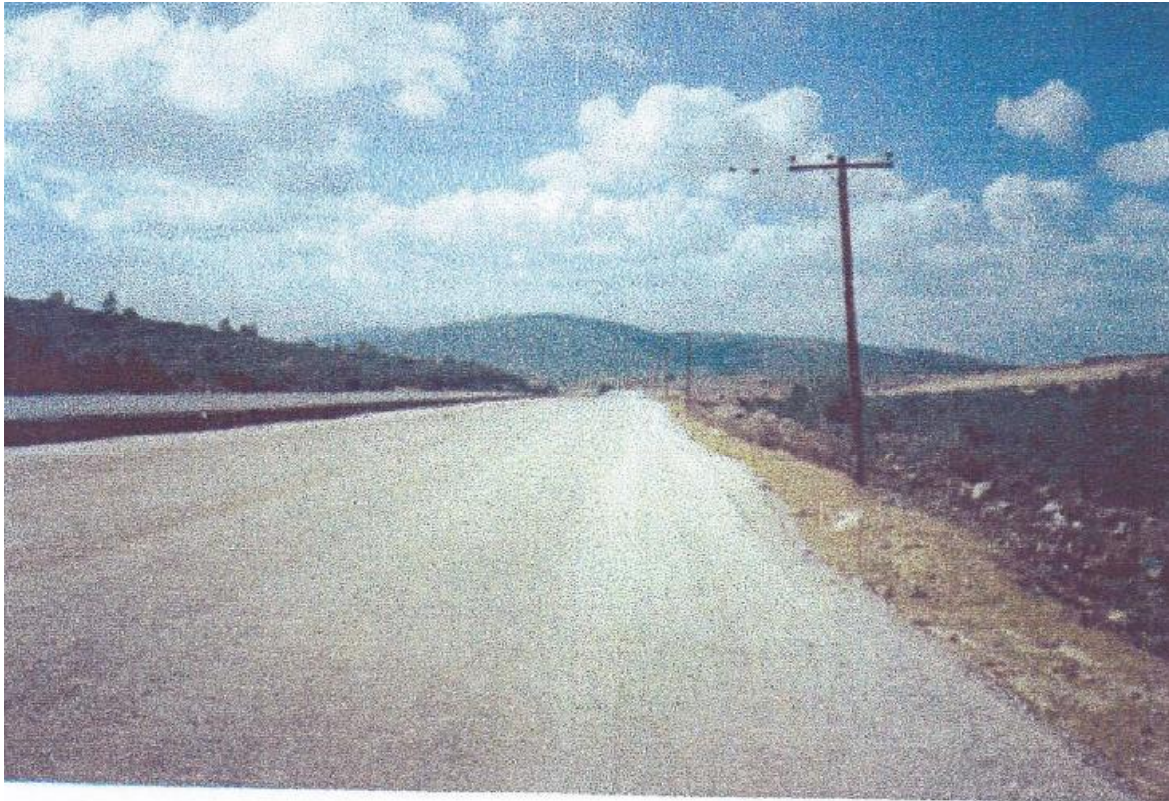
Όσον αφορά τη χρονική περίοδο του έτους, η συμπύκνωση πρέπει να γίνεται κατά τους ξηρούς μήνες οπότε η φυσική υγρασία είναι κατά κανόνα ίση ή μικρότερη της βέλτιστης. Αυτό γιατί η ξήρανση του εδάφους, είναι πρακτικά αδύνατη ενώ η διαβροχή του εύκολη. Σημειώνεται ακόμα, ότι, λόγω των ελεγχόμενων συνθηκών στο εργαστήριο, η συμπύκνωση που επιτυγχάνεται εκεί για ισοδύναμη προσφορά ενέργειας, είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη εκείνης που επιτυγχάνεται στο εργοτάξιο. Γι' αυτό άλλωστε οι προδιαγραφές ορίζουν ως απαίτηση της συμπύκνωσης των στρώσεων του επιχώματος το 95% της εργαστηριακής.

Πρέπει επίσης, το πάνω μέρος των επιχωμάτων κατά την κατασκευή να είναι 1 μέτρο εκατέρωθεν πλατύτερο (Σχ. 2.16).



Σχ. 2.16

έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη δυνατότητα συμπύκνωσης. Αργότερα αφαιρείται το επιπλέον έδαφος και εναποτίθεται στο κάτω μέρος του επιχώματος.

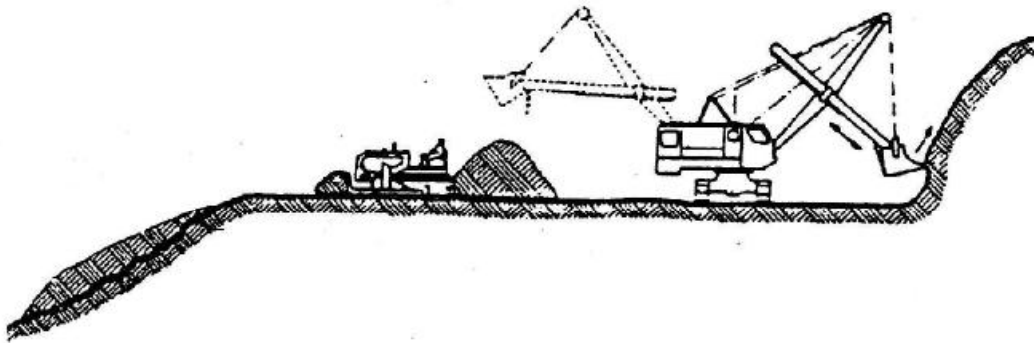


Σχ. 2.17

## **2.6. ΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ**

Οι πυθμένες των ορυγμάτων πρέπει να μορφώνονται έτσι ώστε οι επιφάνειες που προκύπτουν να είναι ομαλές και σύμφωνες με τις προβλεπόμενες από τη μελέτη εγκάρσιες και κατά μήκος κλίσεις καθώς και στην προβλεπόμενη από αυτή στάθμη, μετά από πλήρη συμπίκνωση που γίνεται σύμφωνα με την Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή XI.

Η επιλογή της μεθόδου εκσκαφής του ορύγματος είναι συνάρτηση του είδους και της σκληρότητας του εδάφους, καθώς και των διαστάσεων, του βάθους εκσκαφής και των διαθέσιμων μηχανημάτων (Σχ. 2.18).



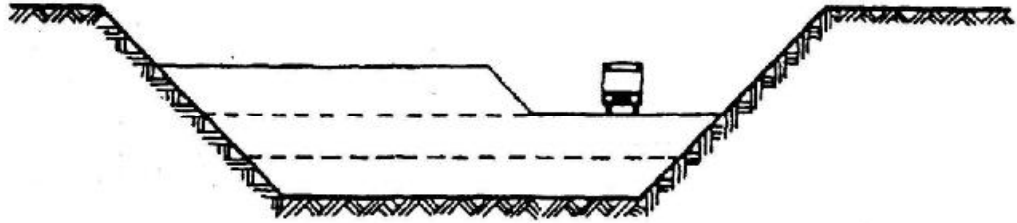
Σχ. 2.18 Εκσκαφή και διαμόρφωση διατομής με συνδυασμό μηχανημάτων

Διακρίνουμε τέσσερις μεθόδους εκσκαφής:

1. Εκσκαφή κατά στρώματα:

Κατά τη μέθοδο αυτή, που ονομάζεται και μετωπική προσβολή, η εκσκαφή πραγματοποιείται σταδιακά κατά οριζόντιες στρώσεις πάχους 1 – 2 m περίπου, σε όλο το μήκος και το πλάτος της οδού. (Αποτελεί συχνή επιλογή του εργολάβου με κυριαρχία των μέσων επιφανειακής εκσκαφής).

Τα αυτοκίνητα κινούνται στην κάτω στάθμη της υπό εκσκαφής στρώσης ενώ τα μηχανήματα εκσκαφής τοποθετούνται ανάλογα με το είδος τους. Οι εκσκαφείς ανεστραμμένοι πτύου εδράζονται στην πάνω επιφάνεια της στρώσης, ενώ οι εκσκαφείς μετωπικού πτύου τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο με τα οχήματα μεταφοράς (Σχ. 2.19).

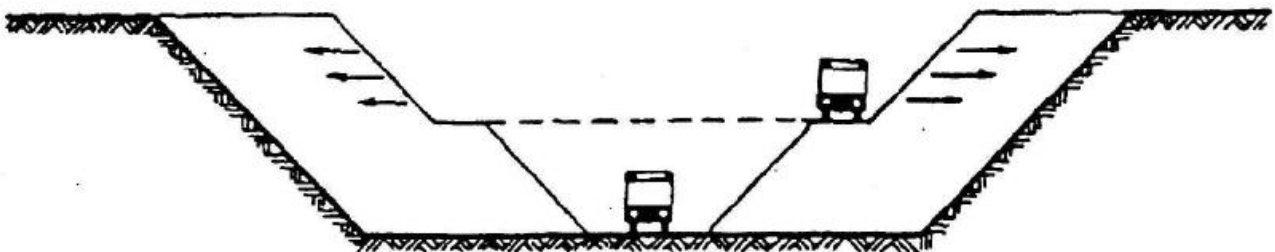


Σχ. 2.19

2. Εκσκαφή δια κεντρικής τάφρου:

Κατά τη μέθοδο αυτή εφαρμόζεται μετωπική προσβολή της διατομής και διανοίγεται μία κεντρική τάφρος, η οποία επεκτείνεται σταδιακά μέχρι τη στάθμη της σκάφης, καθόλο το μήκος της οδού. (Επιλέγεται σπάνια και σε πολύ ευρείες διατομές).

Στη συνέχεια εκτελείται πλευρική προσβολή που είναι δυνατό να επεκταθεί σε πολλά μέτωπα, υπό την προϋπόθεση ότι διατηρείται σε κάθε στάθμη ένα ελάχιστο πλάτος για την κίνηση των μηχανημάτων (Σχ. 2.20).



Σχ. 2.20



3. Εκσκαφή δια εγκάρσιας προσβολής:

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν η μετωπική προσβολή είναι αδύνατη ή ακόμη όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μικτή διατομή (Σχ. 2.21).

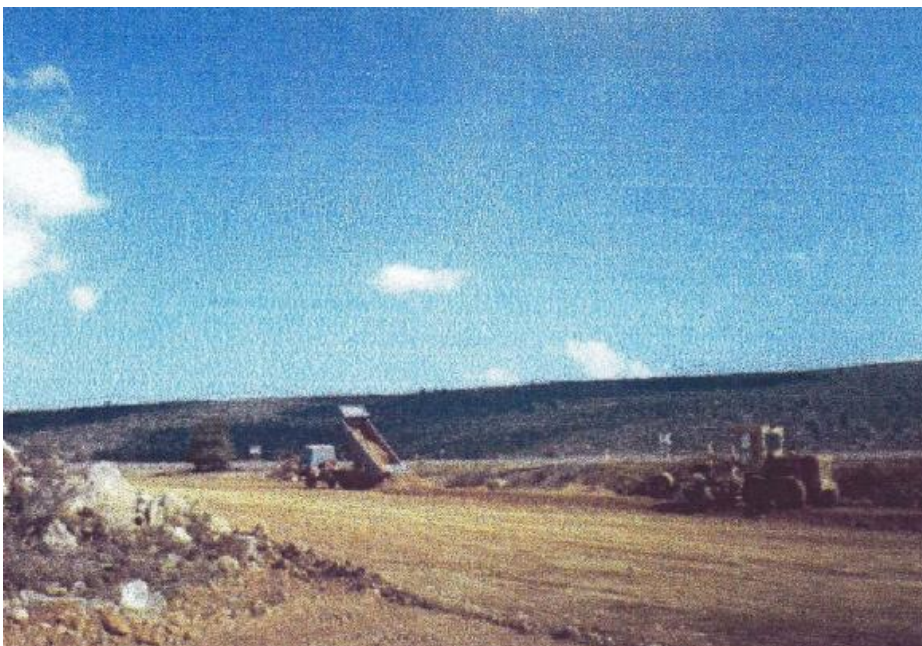


Σχ. 2.21

4. Εκσκαφή δι' εκρηκτικών:

Η πρακτική αυτή ακολουθείται σε βραχώδη εδάφη προς χαλάρωση ή διάσπαση του πετρώματος. Η τεχνική των ανατινάξεων είναι ένα ιδιαίτερο αντικείμενο, το οποίο στον χώρο της Οδοποιίας αναφέρεται στην ποιότητα και την ποσότητα των εκρηκτικών, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση η διάρρηξη των πετρωμάτων σε συγκεκριμένη ακτίνα, που να αντιστοιχεί προσεγγιστικά στην γεωμετρία της διατομής.

Με την ολοκλήρωση των εκσκαφών, αρχίζουν οι εργασίες διαμόρφωσης (Σχ. 2.22) και συμπύκνωσης σε βάθος 30 cm της σκάφης που αποσκοπούν στην δημιουργία μιας επίπεδης επιφάνειας με μηχανικά χαρακτηριστικά κατάλληλα για την έδραση του οδοστρώματος.



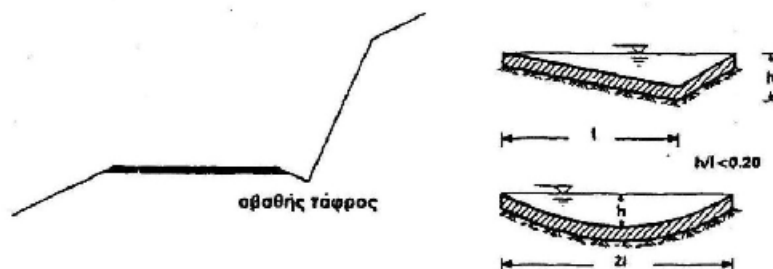
Κατ' αρχήν πρέπει να ελεγχθεί αν υπάρχει ανάγκη εξυγίανσης του πυθμένα. Όταν το φυσικό έδαφος έχει μικρή φέρουσα ικανότητα, είναι σκόπιμη η αντικατάστασή του από υγιές υλικό σε βάθος 10 – 20 cm. Τότε, κατά τη μόρφωση των βραχώνων πυθμένων των ορυγμάτων πρέπει να αφαιρούνται προηγουμένως τα χαλαρά ή ασταθή μεμονωμένα τεμάχια βράχου. Επίσης πρέπει να αφαιρούνται τα τυχόν κομμάτια από πλαστικά εδάφη που υπάρχουν μέχρι βάθους 40 cm. Οι κοιλότητες που δημιουργούνται λόγω της αφαίρεσης των κομματιών που είπαμε παραπάνω, αλλά και άλλες που υπάρχουν για οποιοδήποτε άλλο λόγο, συμπληρώνονται με μη πλαστικά προϊόντα εκβραχισμού μέγιστου κόκκου 63,5 mm.

Κάθε βραχώδης προεξοχή πάνω από την προβλεπόμενη από τη μελέτη στάθμη της οδού πρέπει να θρυμματίζεται με οποιοδήποτε μέσο και να ισοπεδώνεται η επιφάνεια στον καθορισμένο βαθμό, με υλικό υπόβασης. Η εργασία αυτή του θρυμματισμού εκτελείται και στα βραχώδη πρηνή των ορυγμάτων για την διαμόρφωση της επιφάνειας που ορίζεται από τη μελέτη.

Αντίθετα μια εξαιρετική ποιότητα φυσικού εδάφους καθιστά περιττή την κατασκευή υπόβασης και στην περίπτωση αυτή η στρώση της βάσης τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια της σκάφης.

Πάνω στους ήδη διαμορφωμένους πυθμένες των ορυγμάτων αντί της υπόβασης κατασκευάζεται μια ισοπεδωτική στρώση συμπυκνωμένου πάχους το πολύ 10 cm, από υλικό που δημιουργείται μετά από πολλαπλή θραύση. Έτσι κατασκευάζεται υπόβαση σταθεροποιημένου τύπου διαβάθμισης, ανάλογα με την περίπτωση.

Λαμβάνονται επίσης μέτρα προσωρινής αποστράγγισης του πυθμένα των ορυγμάτων (Σχ. 2.23).



Σχ. 2.23

Οι χωματουργικές εργασίες καταλήγουν στη σκάφη που έχει κλίση 4%. Απαιτείται άμεση συμπύκνωση και διαμόρφωση των κλίσεων και του αποστραγγιστικού συστήματος. Αλλιώς με την πρώτη βροχή οι κίνδυνοι υποβάθμισης των εδαφικών ιδιοτήτων είναι μεγάλοι (χαλάρωση, διόγκωση). Γίνεται διαμόρφωση του πυθμένα εξαρχής στη μορφή της τελικής διατομής, γιατί αλλιώς είναι πολύ δύσκολη η εκ των υστέρων εκσκαφή των άκρων.

Έτσι γίνεται η διαμόρφωση της σκάφης, του πυθμένα δηλαδή του ορύγματος, που πραγματοποιείται πριν αρχίσουν οι εργασίες οδοστρωσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>  
ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΙΝ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

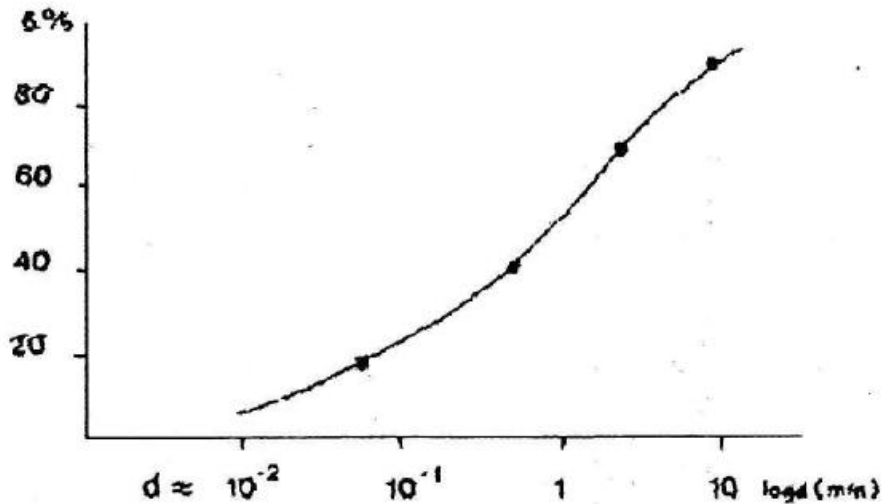
### **3.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ**

Το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων του εδάφους παρουσιάζει ποικιλία, ανάλογη προς εκείνη των ορυκτολογικών του συστατικών. Έτσι, το σχήμα των κόκκων είναι γωνιώδες, στρογγυλό, επίμηκες, βελονοειδές, πλακοειδές κ.λ.π. με ενδιάμεσες μορφικές διαβαθμίσεις. Ο χαρακτηρισμός ενός εδάφους συνήθως προκύπτει από το μέγεθος των κόκκων του και από την αναλογία που υπάρχει μεταξύ των κόκκων διαφόρων διαστάσεων. Τα δεδομένα αυτά, αν και δεν επαρκούν για να προσδιορίσουν με ακρίβεια το υλικό, συνιστούν, ωστόσο, βασικά στοιχεία γεωτεχνικής αναγνώρισης. Η εδαφοτεχνική έρευνα έχει αποκαλύψει τη μεγάλη επιρροή της σύνθεσης του εδάφους (μέγεθος, σχήμα) για τη διαμόρφωση χαρακτηριστικών και κρίσιμων ιδιοτήτων των εδαφών, όπως για παράδειγμα οι μηχανικές και οι υδραυλικές ιδιότητες. Σκοπός, λοιπόν, της κοκκομετρικής ανάλυσης είναι η μελέτη αντιπροσωπευτικού εδαφικού δείγματος, προκειμένου να προσδιορισθεί η ποσοστιαία (%) αναλογία κάθε μεγέθους κόκκων.

Η μελέτη της κοκκομετρικής σύνθεσης γίνεται με κοσκίνισμα ενός εδαφικού δείγματος, που θεωρείται αντιπροσωπευτικό. Προηγείται η διαδικασία ανάμιξης και τετραμερισμού του εδαφικού υλικού. Η εκτέλεση της δοκιμής συνίσταται στη διέλευση του υλικού δια μιας σειράς κοσκίνων, ξεκινώντας από το κόσκινο μεγαλύτερου διαμετρήματος και καταλήγοντας διαδοχικά στο μικρότερου διαμετρήματος κόσκινο. Με ζυγίσεις βρίσκεται το συγκρατούμενο κατά βάρος επί κάθε κοσκίνου ποσοστό  $S_i$  και από αυτά τα διερχόμενα ποσοστά  $\delta_i$  τα οποία και συνήθως αναφέρονται στην κοκκομετρική καμπύλη:

$$\delta_n = 100 - \sum_{i=1}^n S_i$$

Έτσι δημιουργούνται, για το σύνολο των κοσκίνων, ζεύγη τιμών  $d_i$  (άνοιγμα οπής),  $\delta_i$  (διερχόμενο ποσοστό), τα οποία μεταφέρονται σε κατάλληλο διάγραμμα ημιλογαριθμικής κλίμακας και δίνουν χαρακτηριστικά σημεία της κοκκομετρικής καμπύλης (Σχ. 3.1).



Σχ. 3.1

Η κοκκομέτρηση γίνεται με κοσκίνισμα στα αδρά, χονδρόκοκκα υλικά και με έλεγχο της καθίζησης στα λεπτομερή εδάφη κατά το νόμο του Stokes. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται αμερικάνικα κόσκινα τετραγωνικών οπών. Η ονομασία τους και οι διαστάσεις των οπών αντίστοιχα φαίνονται στον πίνακα 3.1

No	2"	1"	3/4"	4	10	12	20	30	40	100	200
d(mm)	50,8	25,4	19,1	4,76	2,0	1,68	0,84	0,59	0,42	0,149	0,074

Πίνακας 3.1: Πρότυπα Αμερικάνικα κόσκινα τετραγωνικών οπών

Το φάσμα των κόκκων διαφόρου μεγέθους συνήθως διαιρείται σε 4 κατηγορίες που χαρακτηρίζουν αντίστοιχα εδαφικά υλικά:

- **Χάλικες** (gravel): διάμετρος μεταξύ 60 mm και 2 mm
- **Άμμος** (sand): διάμετρος κόκκων μεταξύ 2 mm και 0,06 mm
- **Ίλος** (silt): διάμετρος κόκκων μεταξύ 0,06 mm και 0,002 mm
- **Άργιλος** (clay): διάμετρος κόκκων μικρότερη από 0,002 mm

Το φυσικό έδαφος σπάνια αποτελείται από κόκκους μιας μόνο κατηγορίας. Ο χαρακτηρισμός κάθε μορφής εδάφους πραγματοποιείται σύμφωνα με ένα από τα συστήματα κατάταξης εδαφών, σε συνάρτηση με στοιχεία που προκύπτουν από την κοκκομετρική ανάλυση και τα όρια Atterberg.

Η κοκκομετρική καμπύλη αποτελεί ολοκληρωμένη σχηματική αναπαράσταση της κοκκομετρίας του εδάφους. Σε μια προσπάθεια απλοποίησης των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους, έχουν προταθεί δείκτες οι οποίοι εκφράζουν μεγέθη ή αναλογίες που προκύπτουν από την κοκκομετρική καμπύλη. Ο σπουδαιότερος από αυτούς είναι ο **συντελεστής ομοιομορφίας** ή **συντελεστής του Hazen**:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Όπου  $d_{60}$  και  $d_{10}$  το άνοιγμα της οπής του κοσκίνου από όπου διέρχεται ποσοστό 60% και 10% του υλικού αντίστοιχα. Ο συντελεστής ομοιομορφίας δίνει τη δυνατότητα διάκρισης των εδαφικών υλικών σε ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης κοκκομετρίας με βάση κάποιο αριθμητικό κριτήριο. Συνήθως χαρακτηρίζονται ως υλικά ομοιόμορφης κοκκομετρίας εκείνα για τα οποία ο συντελεστής Hazen είναι μικρότερος του 5.

Βάση της κοκκομετρικής καμπύλης διακρίνονται τα εδάφη σε:

- Συνεκτικά και μη συνεκτικά
- Επικίνδυνα και μη επικίνδυνα στον παγετό
- Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα
- Ευαίσθητα και μη στο νερό και τον παγετό
- Ανομοιόμορφα ( $U > 15$ ), μέσης ομοιομορφίας ( $U = 5 - 15$ ) και ομοιόμορφα ( $U < 5$ ) ανάλογα της κλίσης της κοκκομετρικής καμπύλης, όπως αυτή εκφράζεται με τον συντελεστή ομοιομορφίας.

Εάν το εδαφικό υλικό αποτελείται από ομοιόμορφους κόκκους, τότε η κοκκομετρική καμπύλη είναι απότομη, όταν όμως αποτελείται από κόκκους διαφόρων μεγεθών, τότε η κοκκομετρική καμπύλη έχει μικρή κλίση. Ο βαθμός ομοιομορφίας έχει μεγάλη πρακτική σημασία στην οδοποιία, διότι κατά τα κριτήρια των A. Casagrande και L. Schaible, διακρίνονται τα εδάφη σε επικίνδυνα και μη στον παγετό. Πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι εδάφη με  $U > 1$  δεν είναι δυνατόν να συμπυκνωθούν.

Βασικό κριτήριο διάκρισης των εδαφών σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα, αποτελεί το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο Νο 200. Το κριτήριο έχει διαφορετικές τιμές στα συστήματα κατάταξης των εδαφών. Έτσι, ως λεπτόκοκκο χαρακτηρίζεται κατά AASHTO ένα υλικό, του οποίου το διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200 είναι  $\delta > 35\%$ . Αντίθετα το ποσοστό αυτό για το ενοποιημένο σύστημα (USCS) πρέπει να είναι  $\delta > 50\%$ , έτσι ώστε να χαρακτηριστεί το υλικό λεπτόκοκκο. Κατά τρόπο ανάλογο χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκο ένα υλικό που έχει διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200  $\delta < 35\%$  ή  $\delta < 50\%$  αντίστοιχα.

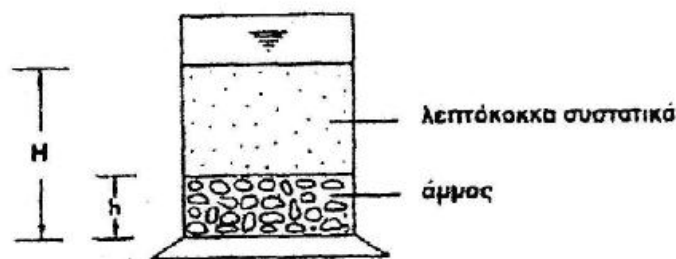
#### Προδιαγραφές

- |    |                          |
|----|--------------------------|
| 1. | AASHTO T-27              |
| 2. | ASTM C 136               |
| 3. | BS 1377 (Δοκιμή 7)       |
| 4. | ΕΛΛ.ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-105/86 |

## 3.2 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΜΜΟΥ

Το **ισοδύναμο άμμου SE** (sand equivalent) είναι μια παράμετρος, η οποία προσδιορίζει την ποιότητα ενός εδαφικού υλικού με υπολογισμό της αναλογίας των λεπτόκοκκων συστατικών ως προς την άμμο. Ως δείκτης χρησιμοποιείται ευρύτατα στην οδοποιία και ιδιαίτερα για τον χαρακτηρισμό διαφόρων εδαφών σχετικά με την δυνατότητα συμπύκνωσης που παρουσιάζουν.

Για την εκτέλεση της αντίστοιχης δοκιμής, λαμβάνεται με τετραμερισμό δείγμα από το διερχόμενο κλάσμα από το κόσκινο Νο 4, το οποίο μετά από κατάλληλη προπαρασκευή εισάγεται μέσα σε κυλινδρικό δοχείο που περιέχει διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου (Σχ. 3.2). Επακολουθεί μηχανική ανατάραξη και στη συνέχεια ο κύλινδρος αφήνεται σε ηρεμία για χρονικό διάστημα 20 λεπτών.



Σχ. 3.2

Στο τέλος της περιόδου των 20 λεπτών μετράται το ύψος  $h$  της άμμου και το ύψος  $H$  του αιωρήματος των λεπτόκοκκων συστατικών. Το ισοδύναμο άμμου προκύπτει:

$$SE = \frac{h}{H} (\%)$$

Εδάφη που έχουν  $SE < 25$  είναι υπερβολικά πλαστικά και, γενικά, ακατάλληλα για επισκευή επιχωμάτων. Εδάφη με  $SE > 60$  είναι πολύ ψαθυρά, συμπυκνώνονται δύσκολα και μόνο υπό προϋποθέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οδικές κατασκευές.

### Προδιαγραφές

1. AASHTO T-176
2. ASTM D 2419



### 3.3 ΟΡΙΑ ATTERBERG

Η φυσική κατάσταση ενός εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε νερό. Ανάλογα με τη φυσική του υγρασία, το εδαφικό υλικό παίρνει τη μορφή μιας ρευστής μάζας ή ενός κονιάματος ή ακόμη ενός στερεού σώματος. Η κατάσταση των συνεκτικών εδαφών μπορεί, έτσι, να χαρακτηριστεί σαν: **ρευστή, πλαστική, ημιστερεή, και στερεή**. Η φυσική υγρασία έχει άμεση επίδραση στην συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και κυρίως εκείνων που χαρακτηρίζονται ως “λεπτόκοκκα εδάφη”, αφού η μεταβολή της επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Τα διαχωριστικά όρια των καταστάσεων του εδάφους ονομάζονται **όρια Atterberg** και είναι:

1. Το όριο υδαρότητας (LL)
2. Το όριο πλαστικότητας (PL)
3. Το όριο συρρικνώσεως (SL)

Τα όρια Atterberg είναι αριθμητικές τιμές της φυσικής υγρασίας που αντιστοιχούν σε σχηματοποιημένες βαθμίδες στις οποίες παρατηρείται έντονη μεταβολή της κατάστασης ενός εδαφικού υλικού (Σχ. 3.3) Συγκεκριμένα:

- Το **όριο υδαρότητας LL** (liquid limit) χαρακτηρίζει την μετάβαση από την πλαστική κατάσταση στην υδαρή
- Το **όριο πλαστικότητας PL** (plasticity limit) προσδιορίζει την φυσική υγρασία για την οποία το υλικό αρχίζει να συμπεριφέρεται ως πλαστικό σώμα, δηλαδή αντιστοιχεί, εξ’ ορισμού, στο χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεά κατάσταση, και
- Το **όριο συρρικνώσεως SL** (shrinkage limit) χαρακτηρίζει την φυσική υγρασία για την οποία το υλικό έχει τον μικρότερο δυνατό όγκο. Παραπέρα μείωση της φυσικής υγρασίας,  $w < SL$ , δεν επιφέρει μεταβολή όγκου. Το όριο συρρικνώσεως αποτελεί το όριο μεταξύ της ημιστερεής και της στερεής κατάστασης του εδαφικού υλικού.



Σχ. 3.3

Στην οδοποιία χρησιμοποιείται συχνά ως παράμετρος, ο δείκτης πλαστικότητας PI (plasticity index):

$$PI = LL - PL$$

που προσδιορίζει την έκταση της πλαστικής περιοχής, δηλ. εκφράζει το ποσοστό μεταβολής της υγρασίας για το οποίο το έδαφος μεταπίπτει από τη στερεή στην υδαρή κατάσταση. Μια υψηλή τιμή του δείκτη πλαστικότητας, αποτελεί ένδειξη υλικού με έντονα πλαστική συμπεριφορά (λεπτόκοκκα εδάφη) και ακαταλληλότητα για κατασκευή επιχωμάτων. Μαλακά εδάφη με υψηλό δείκτη πλαστικότητας, απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα για την ξήρανσή τους μέχρι να είναι δυνατή η συμπύκνωσή τους.

Αντίθετα, τα χονδρόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν χαμηλές τιμές του δείκτη πλαστικότητας, είναι όμως ιδιαίτερα ευαίσθητα στις κλιματολογικές συνθήκες και κυρίως στο ποσοστό υγρασίας, γιατί μια μικρή μεταβολή είναι δυνατό να προκαλέσει τη μετάβαση από μια κατάσταση σε άλλη. Έτσι, υπάρχει κίνδυνος είτε λόγω υπερβολικής υγρασίας (υδαρή κατάσταση) να καταστεί αδύνατη κάθε εργασία, είτε λόγω υπερβολικής ξηρασίας (στερεά κατάσταση) να εκτελείται πολύ δύσκολα η συμπύκνωση. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι οι δοκιμές Atterberg εκτελούνται σε εδαφικό υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No 40 ( $d = 0,42 \text{ mm}$ ).

Στον πίνακα 3.2 δίνεται η κατάταξη των εδαφών ανάλογα με την πλαστικότητά τους, κατά Atterberg.

ΒΑΘΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Έδαφος με μικρή πλαστικότητα	$PI < 7$
Έδαφος με μέση πλαστικότητα	$7 \leq PI \leq 17$
Έδαφος με μεγάλη πλαστικότητα	$PI > 17$

Πίνακας 3.2

Ο λόγος του δείκτη πλαστικότητας (PI) προς το όριο υδαρότητας (LL), ονομάζεται **σχετική πλαστικότητα**, και συμβολίζεται ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{PI}{LL}$$

Ο δείκτης συνεκτικότητας CI (consistency index):

$$CI = \frac{LL - w}{LL - PL}$$

Χαρακτηρίζει, σε συνάρτηση με την φυσική υγρασία, την κατάσταση του υλικού από πλευράς συνεκτικότητας.

Συγκεκριμένα:

$CI < 0$  αντιστοιχεί στην **υδαρή κατάσταση**

$0 < CI < 1$  αντιστοιχεί στην **πλαστική κατάσταση**

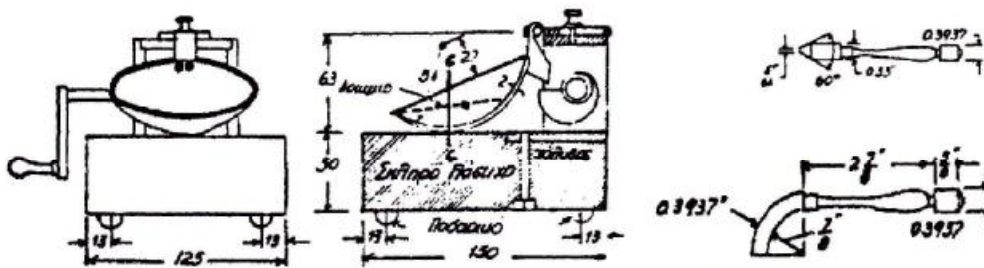
$CI > 1$  αντιστοιχεί στην **στερεά κατάσταση**

Τα όρια Atterberg είναι εξ' ορισμού φυσικές παράμετροι του εδάφους. Η αξιολόγηση όμως των αριθμητικών τιμών τους και κατά κύριο λόγο του δείκτη πλαστικότητας (PI) δίνει σημαντικές δυνατότητες ερμηνείας της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών σε φυσική κατάσταση. Για τον λόγο αυτό, ο δείκτης πλαστικότητας αποτελεί, σε διεθνές επίπεδο, βασική παράμετρο των προδιαγραφών Οδοποιίας για τον προσδιορισμό της ποιότητας των εδαφικών υλικών.

### 3.3.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ

Όπως αναφέρθηκε, το όριο υδαρότητας εδάφους είναι η περιεκτικότητα υγρασίας, όπου το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ρευστή κατάσταση.

Η δοκιμή γίνεται με χρήση της **πρότυπης συσκευής Casagrande** (Σχ. 3.4) και όλου του εξοπλισμού που χρειάζεται για τον προσδιορισμό του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας.



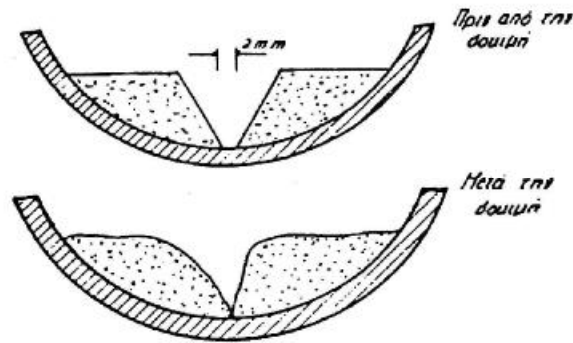
Σχ. 3.4

Λαμβάνεται δείγμα 100 gr υλικού, που διέρχεται από το κόσκινο Νο 40 και το οποίο πλάθεται με 15 – 80 cm<sup>3</sup> αποσταγμένο νερό σε γυάλινη πλάκα με τη βοήθεια σπάτουλας. Τοποθετούμε μίγμα εδάφους – αποσταγμένου νερού βάρους 50 – 80 gr στο κύπελλο της συσκευής και το χαράζουμε με το ειδικό εργαλείο (Σχ. 3.5). στη συνέχεια, περιστρέφουμε τον στρόφαλο της συσκευής με ταχύτητα 2 χτυπημάτων ανά δευτερόλεπτο περίπου, μέχρι να συγκολληθούν τα κάτω χείλη της χαραγής σε μήκος ½” (Σχ. 3.6).



Σχ. 3.5

Αφαιρούμε 5 – 10 gr του δείγματος από σημείο κοντά στη χαραγή, για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας και καταγράφουμε τον αριθμό των χτυπημάτων στον οποίο αυτή αντιστοιχεί. Επαναλαμβάνεται η δοκιμή στο ίδιο δοκίμιο 5 – 6 φορές μετά από συμπλήρωση του βάρους του δείγματος και τροποποίηση της υγρασίας.



Σχ.3.6

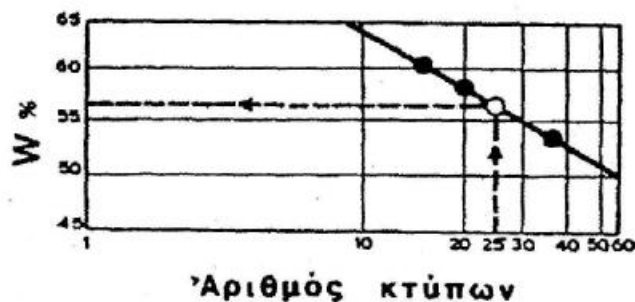
Βρίσκουμε την **περιεκτικότητα σε νερό ( $w\%$ )** του εδάφους που ξηράνανε:

$$w = \frac{G_w}{G_s} \times 100 \quad (\%)$$

Όπου  $G_w$  το βάρος του νερού (gr)

Και  $G_s$  το βάρος του ξηρού δείγματος (gr).

Σχεδιάζουμε σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα της “**καμπύλης ροής**”, που παριστάνει την σχέση μεταξύ περιεχόμενης υγρασίας ( $w$ ) και του αντίστοιχου αριθμού χτυπημάτων (Σχ. 3.7). το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στα 25 χτυπήματα θεωρείται σαν όριο υδαρότητας του εδάφους που εξετάσαμε.



Σχ. 3.7

## Προδιαγραφές

1. AASHO T 89/60
2. ASTM D 4318-83
3. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε – 105/86

### 3.3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το όριο πλαστικότητας είναι η πιο χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό όπου το έδαφος παραμένει πλαστικό.

Για την δοκιμή παίρνουμε δείγμα 20 gr εδάφους (διερχόμενο από το κόσκινο Νο 40) και το αναζυμώνουμε καλά, ώστε να γίνει ομοιόμορφο. Από



Σχ.3.8

την παραπάνω ποσότητα παίρνουμε δείγμα βάρους 8 gr και πλάθουμε ραβδίσκους πάνω σε μια πλάκα από πωρόλιθο ή πάνω σε απορροφητικό χαρτί, με ρυθμό μεταξύ 80 και 90 κινήσεων ανά λεπτό (Σχ. 3.8). όταν η διάμετρος του ραβδίσκου γίνει 3 mm, ο ραβδίσκος θραύεται ξανά σε έξι ή οκτώ κομμάτια. Αναζυμώνουμε τα κομμάτια και πλάθουμε ξανά το δείγμα, μέχρις

ότου γίνει ραβδίσκος διαμέτρου 3 mm.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρις ότου ο ραβδίσκος θρυμματισθεί από την απαιτούμενη για την κυλίνδρωση πίεση και το έδαφος δεν μπορεί πλέον να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο (ο θρυμματισμός είναι δυνατόν να γίνει όταν ο ραβδίσκος έχει διάμετρο μεγαλύτερη των 3 mm). Στη συνέχεια, συγκεντρώνουμε αμέσως τα κομμάτια του ραβδίσκου και τα τοποθετούμε σε έναν υποδοχέα που έχει προζυγισθεί (Σχ. 3.9) ο υποδοχέας με το έδαφος ζυγίζεται και καταγράφεται το βάρος. Το έδαφος, που είναι μέσα στον



Σχ. 3.9

υποδοχέα, ξηραίνεται σε κλίβανο μέχρι σταθερού βάρους στους 110 °C, ζυγίζεται και η απώλεια βάρους αναφέρεται σαν βάρος νερού.

Το **όριο πλαστικότητας** υπολογίζεται από την σχέση:

$$PL = \frac{G_w}{G_s} \times 100$$

PL το όριο της πλαστικότητας (%)

$G_w$  το βάρος του νερού (gr)

Και  $G_s$  το βάρος του εδάφους που ξηράνθηκε στον κλίβανο (gr).

### Προδιαγραφές

1. AASHO T 90/61
2. ASTM D 4318-83
3. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-105/86

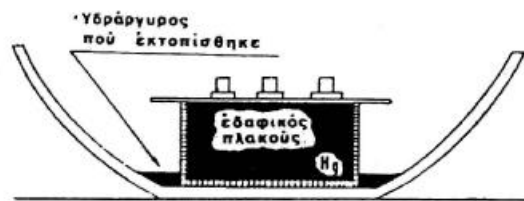
### **3.3.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΕΩΣ**

Όταν η περιεχόμενη υγρασία ενός εδάφους μειωθεί κάτω από το όριο πλαστικότητας, παίρνει μια τιμή, όπου δεν επέρχεται στη συνέχεια μείωση του όγκου του εδάφους. Κάτω από αυτή την συγκεκριμένη τιμή, το έδαφος βρίσκεται σε στερεή κατάσταση.

Για την δοκιμή παίρνουμε δείγμα 30 gr από το έδαφος που διέρχεται από το κόσκινο No 40. Το δείγμα τοποθετείται σε μια κάψα πορσελάνης και αναμιγνύεται καλά με αρκετή ποσότητα νερού. Ποσότητα από το παραπάνω δείγμα, τοποθετείται σε μια μικρή κάψα τμηματικά, μέχρις ότου η μικρή κάψα γεμίσει τελείως και το επιπλέον έδαφος προεξέχει στα χείλη της. Το επιπλέον έδαφος απομακρύνεται με την βοήθεια κανόνα. Ζυγίζουμε τη μικρή κάψα με το έδαφος και το βάρος καταγράφεται σαν βάρος καψιδίου και υγρού εδάφους.

Ο εδαφικός πλακούντας αφήνεται να ξηραθεί στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου, μέχρις ότου το χρώμα του να γίνει από σκούρο σε ανοικτό. Στη συνέχεια ξηραίνουμε τον πλακούντα σε κλίβανο, μέχρι σταθερού βάρους σε 110 °C και το βάρος καταγράφεται σαν βάρος καψιδίου και ξηρού εδάφους. Η χωρητικότητα του καψιδίου σε cm<sup>3</sup>, που ισούται με τον όγκο του εδαφικού πλακούντα, προσδιορίζεται με πλήρωση του καψιδίου μέχρι υπερχειλίσεως με υδράργυρο και μέτρηση του όγκου του υδραργύρου με ογκομετρικό σωλήνα.

Ο όγκος αυτός καταγράφεται σαν όγκος του υγρού εδαφικού πλακούντα. Ο όγκος του ξηρού εδαφικού πλακούντα προσδιορίζεται με τον παρακάτω τρόπο: γεμίζουμε ένα κύπελλο, που έχει διάμετρο 50 mm και ύψος 25 mm, με υδράργυρο μέχρι υπερχειλίσεως και στη συνέχεια απομακρύνουμε τον πλεονάζοντα υδράργυρο. Το γεμάτο κύπελλο τοποθετείται μέσα σε μια κάψα με διάμετρο 150cm και ο εδαφικός πλακούντας τοποθετείται στην επιφάνεια του υδραργύρου. Στη συνέχεια ο πλακούντας βυθίζεται προσεκτικά μέσα στον υδράργυρο, με την βοήθεια γυάλινης πλάκας, που έχει τρεις περόνες (Σχ. 3.10).



Σχ. 3.10

Η γυάλινη πλάκα πιέζεται σταθερά στα χείλη του κυπέλλου, ο όγκος του υδραργύρου που εκτοπίζεται μετριέται με ογκομετρικό σωλήνα και ο όγκος καταγράφεται σαν όγκος ξηρού εδαφικού πλακούντα.

Το **όριο συμπυκνώσεως** υπολογίζεται από την σχέση:

$$SL = W \times \frac{V - V_0}{G_s} \times 100$$

Όπου SL το όριο συμπυκνώσεως (%)

W η περιεχόμενη υγρασία υγρού εδάφους, κατά βάρος επί τοις εκατό του εδάφους που ξηράνθηκε στον κλίβανο

V ο όγκος του υγρού εδαφικού πλακούντα (cm<sup>3</sup>)

V<sub>0</sub> ο όγκος του ξηρού εδαφικού πλακούντα (cm<sup>3</sup>)

Και G<sub>s</sub> το βάρος του ξηρού εδαφικού πλακούντα (gr)



### 3.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ

Ο δείκτης ομάδας GI (group index) είναι μια παράμετρος που προκύπτει από την κοκκομετρική διαβάθμιση και τα όρια Atterberg ενός υλικού. Η αναλυτική του έκφραση είναι η εξής:

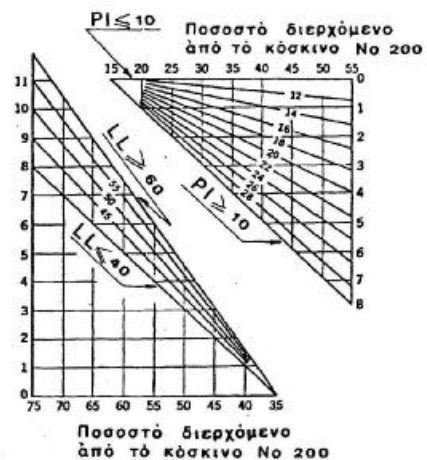
$$GI = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$$

Όπου

- a το μεταξύ 35% και 75% τμήμα του ποσοστού του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No 200 ( $0 < a < 40$ )
- b το μεταξύ 15% και 55% τμήμα του ποσοστού του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No 200 ( $0 < b < 40$ )
- c το μεταξύ 40 και 60 τμήμα του ορίου υδαρότητας ( $0 < c < 20$ )
- d το μεταξύ 10 και 30 τμήμα του δείκτη πλαστικότητας ( $0 < a < 20$ )

Ο δείκτης ομάδας χρησιμοποιείται συχνά ως ενδεικτικό στοιχείο της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ανάλογες δοκιμές μηχανικής αντοχής. Αποτελεί, ακόμη, βασική παράμετρο σε ορισμένες μεθόδους διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, όπως η μέθοδος STEELE που συναντά εφαρμογή στον Ελληνικό χώρο. Το κύριο μειονέκτημα της χρήσης του δείκτη ομάδας ως κριτηρίου μηχανικής αντοχής είναι προφανές: η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών σε φυσική κατάσταση επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες, όπως η διάταξη των κόκκων και το ποσοστό υγρασίας. Οι παράγοντες αυτοί, που προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό την διατμητική αντοχή του υλικού, δεν αναπαρίστανται από δείκτες που προκύπτουν από δοκιμές σε διαταραγμένα δοκίμια, όπως ο δείκτης ομάδας. Εδώ, πρέπει να σημειώσουμε ότι όσο πιο μικρή τιμή έχει ο δείκτης ομάδας, τόσο καλύτερο είναι το έδαφος. Εύκολα προκύπτει ότι μικρές τιμές έχουν τα χονδρόκοκκα μη πλαστικά εδάφη.

Τέλος, στο διάγραμμα (Σχ. 3.11) παρουσιάζονται νομογραφήματα για τον



Σχ. 3.11

προσδιορισμό του δείκτη ομάδας GI. Ο δείκτης ομάδας υπολογίζεται σαν το άθροισμα των αναγνώσεων στις κατακόρυφες κλίμακες των νομογραφημάτων.

### **3.5 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΕΛΑΦΩΝ**

Οι εδαφικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν ατελείωτη ποικιλία και για τον λόγο αυτό στάθηκε αδύνατη η ενιαία ταξινόμησή τους, προκειμένου να ενταχθούν σε ομάδες και υποομάδες με κοινές βασικές ιδιότητες. Παρά τη δυσκολία αυτή, έχουν επινοηθεί χρήσιμα συστήματα κατάταξης βασισμένα σε έναν ή δύο δείκτες των ιδιοτήτων. Σε πολλές εφαρμογές η χρήση των συστημάτων είναι τόσο πλατειά, ώστε να είναι αναγκαία η γενική, τουλάχιστον, γνώση τους. Ταυτόχρονα είναι απαραίτητο να συνεκτιμάται το γεγονός ότι κανένα σύστημα κατάταξης των εδαφών δεν δίνει επαρκή περιγραφή για όλες τις εφαρμογές. Σε ορισμένα μάλιστα συστήματα αγνοούνται βασικές εδαφοτεχνικές ιδιότητες, απαραίτητες για την εκτέλεση των θεμελιώσεων. Επίσης, πρέπει να τονισθεί ότι τα συστήματα κατάταξης βασίζονται σε ιδιότητες των εδαφικών κόκκων ή αναζυμωμένων δειγμάτων, χωρίς αναφορά στο άθικτο έδαφος, όπως αυτό βρίσκεται στη φύση. Κατά την διάρκεια, όμως, των κατασκευών αλλά και μετά από αυτές, η συμπεριφορά των εδαφών καθορίζεται κυριαρχικά από τις ιδιότητες του αδιατάρακτου εδαφικού υλικού. Έτσι, τα συστήματα κατάταξης των εδαφών αποτελούν αφετηρία και βοηθητικό μέσο για την εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς των εδαφών.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η αναγνώριση των εδαφών, η διαπίστωση δηλαδή της ταυτότητας και της σύστασής τους, ακολουθεί η κατάταξή τους. Στην κατάταξη ομαδοποιούνται ομοειδή εδάφη με βάση τον περιορισμένο αριθμό κοινών χαρακτηριστικών. Σκοπός είναι η κάθε ομάδα που δημιουργείται να έχει παραπλήσια μηχανική συμπεριφορά. Τα κριτήρια ομαδοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση με διάφορες μορφές έκφρασης, η ύπαρξη οργανικών ενώσεων και για τα λεπτόκοκκα εδάφη τα όρια Atterberg. Η κατάταξη χρησιμοποιείται ευρύτατα σε έργα οδοποιίας για την κατ' αρχήν εξαγωγή συμπερασμάτων, που αφορούν στην καταλληλότητα των εδαφών για την θεμελίωση του οδοστρώματος και των επιχωμάτων, για την κατασκευή των επιχωμάτων και για την ευστάθεια των πρανών.

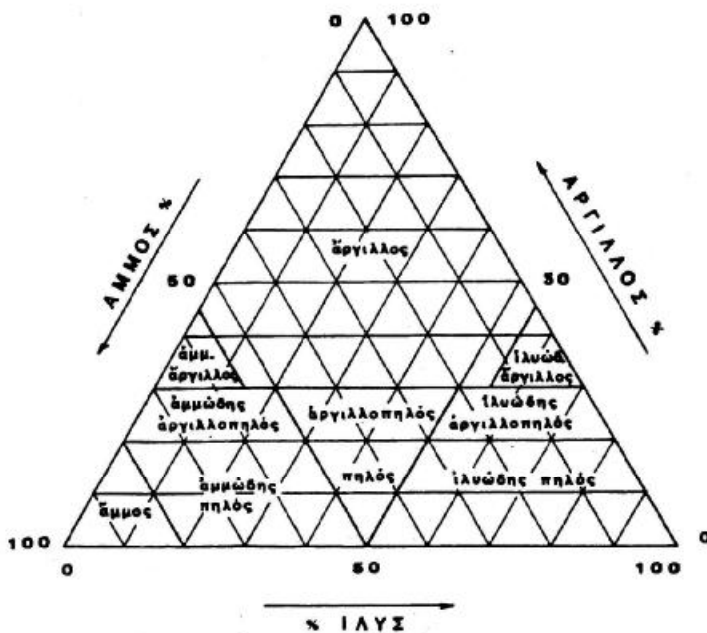
### 3.5.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΥΦΗΣ

Η κατάταξη εδαφών βάση της υφής ή φυσικής συνθέσεως, στηρίζεται αποκλειστικά στην διανομή μεγέθους κόκκων. Στον πίνακα 3.3 ορίζονται συνθετικά του εδάφους από άποψη μεγέθους κόκκων κατά PRA (Public Roads Administration).

	Διαστάσεις κόκκων σε mm	Όρια προτύπων κοσκίνων ASTM
Χαλίκια	76.2 ~ 2.00	3" ~ No 10
Άμμος χονδρή	2.00 ~ 0.25	No 10 ~ No 60
Άμμος λεπτή	0.25 ~ 0.05	No 60 ~ No 270
Ίλυς	0.05 ~ ,0005	-
Άργιλος	< 0,005	-
Κολλοειδή	< 0,001	-

Πίνακας 3.3: Συνθετικά εδάφους κατά PRA

Στο (Σχ. 3.12) δίνεται τριγωνικό διάγραμμα για την κατάταξη εδαφών βάσει υφής κατά PRA.



Σχ. 3.12

Η κατάταξη εδαφών βάσει της υφής έχει κυρίως αξία για μη συνεκτικά εδάφη. Για πλαστικά εδάφη δεν είναι τόσο κατάλληλη, διότι οι ιδιότητες εξαρτώνται λιγότερο από την διανομή μεγέθους κόκκων. Αν το έδαφος περιέχει χαλίκια, π.χ. 8-10% ή και περισσότερο, τότε το όνομα που αποδίδεται στο έδαφος, πρέπει να

περιέχει ένα στοιχείο των χαλικιών ή λίθων (κροκάλων) π.χ. χαλικώδης άργιλος, χαλικώδης αμμώδης άργιλος κ.λ.π.

### 3.5.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ ΑΑSHO: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS

Σε αυτή την κατάταξη, που αποτελεί τη γνωστότερη μέθοδο κατάταξης και είναι αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως στην Ελλάδα, τα εδαφικά υλικά ταξινομούνται σε :

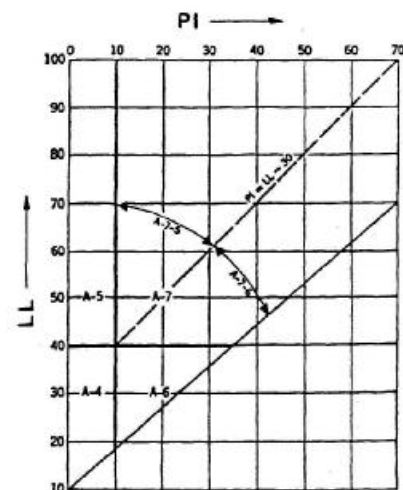
α) **κοκκώδη υλικά** (χονδρόκοκκα), που έχουν ποσοστό 35% ή λιγότερο διερχόμενο από το κόσκινο No 200.

β) **ιλοαργιλώδη υλικά** (λεπτόκοκκα), που έχουν ποσοστό μεγαλύτερο του 35% διερχόμενο από το κόσκινο No 200.

Οι παραπάνω δύο κατηγορίες καλύπτουν το σύνολο των διαβαθμίσεων των εδαφών και των εδαφικών μιγμάτων και μπορούν να αναγνωρισθούν εύκολα με το κόσκινο No 200. Αυτές διαιρούνται σε **επτά εδαφικές ομάδες** που συμβολίζονται με A-1, A-2, ..., A-7 και υποδιαιρούνται σε **υποομάδες**, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.4.

Η εκτίμηση μεταξύ των εδαφών γίνεται με τον δείκτη ομάδας (GI). Με μέσες συνθήκες καλής αποστραγγίσεως και συμπυκνώσεως, η φέρουσα αντοχή υλικού υποδομής είναι αντίστροφα ανάλογη του δείκτη ομάδας **GI=20 πολύ κακό**.

Η κατάταξη των εδαφών γίνεται με προσδιορισμό του ποσοστού των κόκκων που διέρχονται από το κόσκινο No 200 και No 40, με προσδιορισμό του δείκτη πλαστικότητας (PI), του ορίου υδαρότητας (LL) και του δείκτη ομάδας GI). Στο διάγραμμα του (Σχ. 3.13) παριστάνονται οι διακυμάνσεις του ορίου υδαρότητας και του δείκτη πλαστικότητας των ιλοαργιλωδών υλικών, δηλαδή των ομάδων A-4, A-5, A-6 και A-7. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος, ο δείκτης πλαστικότητας της υποομάδας A-7-5 είναι ίσος ή μικρότερος του LL-30 και ο δείκτης πλαστικότητας της υποομάδας A-7-6 είναι μεγαλύτερος του LL-30.



Σχ. 3.13

#### Προδιαγραφές

- 1) AASHO M-145
- 2) ASTM D 3282

Γενική κατάσταση	Χονδρόκοκκα εδάφη (διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200 μικρότερο από 35%)										Λεπτόκοκκα εδάφη (διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200 μεγαλύτερο από 35%)									
	A-1		A-3		A-2-4		A-2-5		A-2-6		A-2-7		A-4		A-5		A-6		A-7	
	A-1-a	A-1-b	A-3		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7	A-7-5	A-7-6	A-7	A-7	A-7	A-7	A-7	A-7
Κοκκομετρία: διερχόμενο ποσοστό No 10 (2mm) No 40 (0,42 mm) No 200 (0,074 mm)	50 max 30 max 15 max	50 max 25 max	51 min 10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	35 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min
Όρια Atterberg: Όριο υδαρότητας LL Δείκτης πλαστικότητας PI	6 max		NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min	40 max 11 min
Δείκτης ομάδας GI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Χαρακτηριστικά συστατικά	Χαλίκια, άμμος	Χαλίκια, άμμος	Λεπτή άμμος	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Χαλίκια, ιλυώδης άργιλώδης άμμος.	Ιλυώδη εδάφη	Ιλυώδη εδάφη	Αργιλικά εδάφη	Αργιλικά εδάφη	Αργιλικά εδάφη	Αργιλικά εδάφη	Αργιλικά εδάφη	Αργιλικά εδάφη
Εκτίμηση ως υπέδαφος	Εξαιρετικό έως καλό										Μέτριο έως ακατάλληλο									
<b>Μέθοδος κατάταξης:</b> Γνωρίζοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, ακολουθούμε τον πίνακα από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η ζητούμενη ομάδα ή υποομάδα είναι η πρώτη που θα συναντήσουμε και στην οποία ανταποκρίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών. Η ένδειξη του δείκτη ομάδας μπορεί να τοποθετηθεί σε παρένθεση μετά το σύμβολο της ομάδας, π.χ. A-2-6 (3), A-4 (5), A-6 (12).																				
Πίνακας 3.4: Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO																				

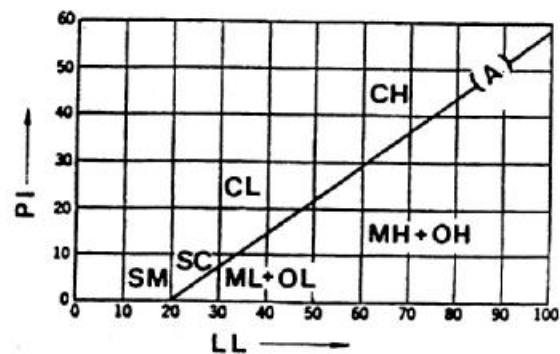
### 3.5.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ CEUSA: CORPS OF ENGINEERS U.S. ARMY

Αυτό το σύστημα κατάταξης εδαφών υιοθετήθηκε από το Σώμα Μηχανικών των ΗΠΑ, αποτελεί τροποποίηση του αρχικού συστήματος κατά Casgrande και βρίσκει μεγάλη εφαρμογή για την αναγνώριση και κατάταξη, στο εργοτάξιο, εδαφών οδών και αεροδρομίων.

Για την αναγνώριση και της ανάγκες χαρτογραφίσεως, χρησιμοποιούνται τρεις τύποι συμβόλων :

- γράμματα – σύμβολα
- παραστάσεις – σύμβολα
- έγχρωμα σύμβολα

τα γράμματα – σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σύστημα κατάταξης είναι τα ακόλουθα:



Σχ. 3.14

G	Χαλίκι
S	Άμμος
M	ΐλύς
C	Άργιλος
W	Καλή κοκκομετρική διαβάθμιση
P	Μέτρια κοκκομετρική διαβάθμιση
U	Ομοιόμορφη κοκκομετρική διαβάθμιση
L	Χαμηλή συμπιεστότητα
H	Υψηλή συμπιεστότητα

Για τον χαρακτηρισμό των εδαφών χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των γραμμάτων. Το GP, για παράδειγμα, σημαίνει χαλίκι με μέτρια κοκκομετρική διαβάθμιση, ενώ το CH συμβολίζει άργιλο με μεγάλη συμπιεστότητα.

Τα εδάφη, σε αυτό το σύστημα κατάταξης, διαιρούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- 1) χονδρόκοκκα
- 2) λεπτόκοκκα
- 3) οργανικά ιώδη

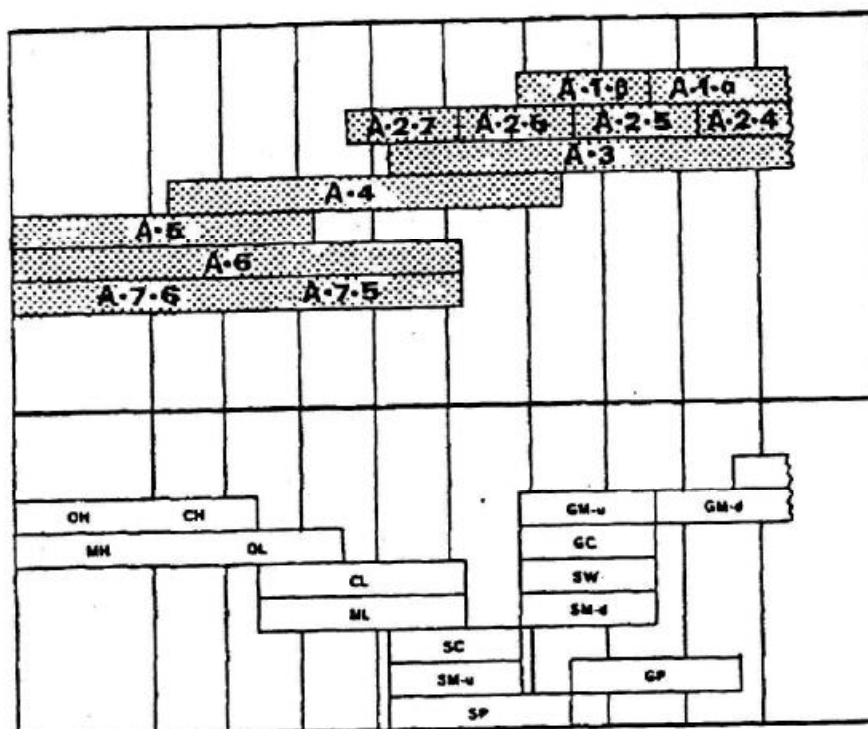
Στο (Σχ. 3.14) παριστάνεται διάγραμμα που δείχνει την σχέση μεταξύ των διαφόρων ομάδων λεπτόκοκκων εδαφών, ως προς το όριο υδαρότητας και δείκτη πλαστικότητάς του. Όταν αυξάνεται η απόσταση πάνω από τη γραμμή «Α», αυξάνεται η σφιρότητα και η αντοχή «εν ξηρώ», ενώ όταν αυξάνεται η απόσταση κάτω από την γραμμή «Α», ελαττώνεται η σφιρότητα και η αντοχή «εν ξηρώ».

Στον πίνακα 3.5 φαίνονται χαρακτηριστικά εδαφών θεμελιώσεως οδών και αεροδρομίων, ενώ στον πίνακα 3.6 φαίνεται ο τρόπος αναγνώρισεως και κατατάξεως των εδαφών με βάση δεδομένες εργαστηριακές δοκιμές.

Τέλος, στο (Σχ.3.15) φαίνεται μια συσχέτιση των κατατάξεων κατά AASHO και CEUSA.

### Προδιαγραφές

- 1) ASTM D-2487/83
- 2) DIN 18196
- 3) FOCS 64
- 4) BS 5930/81
- 5) BS 8031/81



ΚΥΡΙΕΣ ΔΙΑΙΡΕΣΕΙΣ		γ-	$\gamma_d$ pcf	C B R στό έργοτεξλο
1	2		12	13
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ	ΧΑΛΙΚΙΑ ΚΑΙ ΧΑΛΙΚΟΜΙΓΗ ΕΔΑΦΗ	κή	125-140	60-80
		κή	120-130	35-60
		κή	115-125	25-50
		ς ρλα	130-145	40-80
		κα κα ατδ	120-140	20-40
	ΑΜΜΟΙ ΚΑΙ ΑΜΜΟΔΗ ΕΔΑΦΗ	κή	110-130	20-40
		κκή	105-120	15-25
		κκή	100-115	10-20
		ς τρλα	120-135	20-40
		ρλα κκα ρατδ	105-130	10-20
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ	ΧΑΜΗΛΟ ΩΣ ΜΕΣΟ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟ LL < 50	ς ρλα	100-125	5-15
		μή α	100-125	5-15
		τρλα	90-105	4-8
	ΥΨΗΛΟ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟ LL < 50	ς τρλα	80-100	4-8
		ί μή ατδ	90-110	3-5
		ί μή ατδ	89-105	3-5
		ς		



### **3.5.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ FAA: FEDERAL AVIATION AGENCY**

Ειδικά για την κατασκευή των καταστροφμάτων των αεροδρομίων, καθιερώθηκε η ταξινόμηση της FEDERAL AVIATION AGENCY (FAA) που δίνεται στον πίνακα 3.7. για την κατάταξη αυτή, συνεκτιμάται η κοκκομετρική διαβάθμιση (ποσοστό εδάφους διερχόμενο από το κόσκινο Νο 10), η πλαστικότητα αλλά και οι συνθήκες στράγγισης και παγοπληξίας.

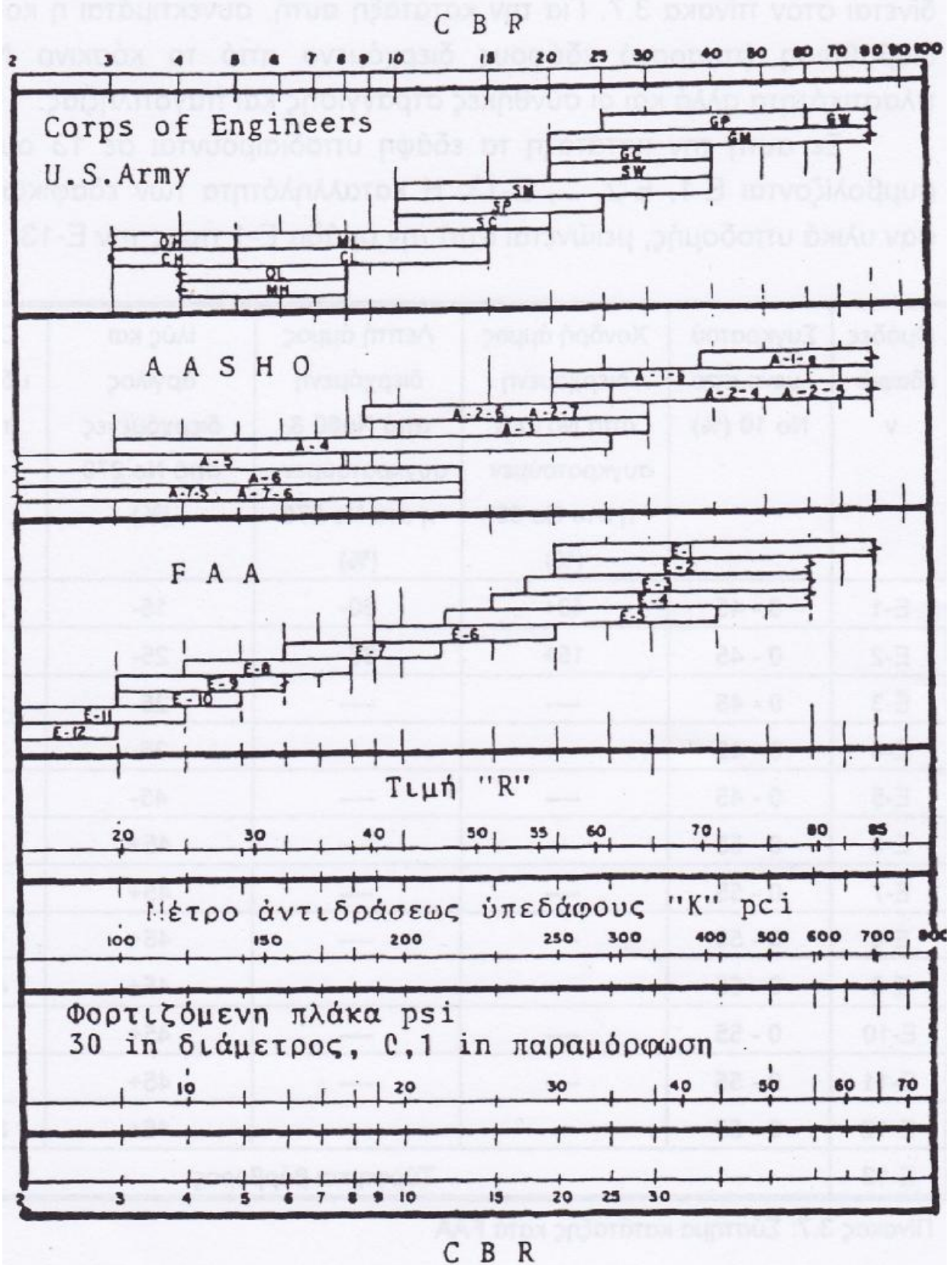
Σε αυτή την κατάταξη τα εδάφη υποδιαιρούνται σε 13 ομάδες, που συμβολίζονται E-1, E-2, ..., E-13 . Η καταλληλότητα των εδαφικών ομάδων, σαν υλικά υποδομής, μειώνεται από την ομάδα E-1 προς την E-13.

Ομάδες εδαφών	Συγκρατούμενο από Νο 10 (%)	Χονδρή άμμος διερχόμενη από Νο10 & συγκρατούμενη στο Νο 60 (%)	Λεπτή άμμος διερχόμενη από Νο60 & συγκρατούμενη στο Νο 270 (%)	Ιλύς και άργιλος διερχόμενες από Νο 270 (%)	Οριο υδαρότητας LL	Δείκτης πλαστικότητας PI
E-1	0 - 45	40+	60-	15-	25-	6-
E-2	0 - 45	15+	85-	25-	25-	6-
E-3	0 - 45	---	---	25-	25-	6-
E-4	0 - 45	---	---	35-	35-	10-
E-5	0 - 45	---	---	45-	40-	15-
E-6	0 - 55	---	---	45+	40-	10-
E-7	0 - 55	---	---	45+	50-	10 - 30
E-8	0 - 55	---	---	45+	60-	15 - 40
E-9	0 - 55	---	---	45+	40+	30-
E-10	0 - 55	---	---	45+	70-	20 - 50
E-11	0 - 55	---	---	45+	80-	30+
E-12	0 - 55	---	---	45+	80+	---
E-13	Τύρφη και βόρβορος					

Πίνακας 3.7: Σύστημα κατάταξης κατά FAA

Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζεται μια συσχέτιση των συστημάτων κατάταξης εδαφικών υλικών.

Σημειώνεται, τέλος, και η κατάταξη που γίνεται στην **ΠΤΠ XI** και αφορά στη δυσχέρεια εκσκαφής των διαφόρων εδαφών. Ανάλογα με αυτήν, τα εδάφη κατατάσσονται σε **γαίες**, **ημίβραχους** και **βράχους**. Ως γαίες ορίζονται τα εδάφη των οποίων η εκσκαφή είναι δυνατή με χειρονακτικά μέσα και ως βράχοι εκείνα που απαιτείται η χρήση εκρηκτικών. Ως ημίβραχοι ορίζονται τα ενδιάμεσα εδάφη. Η κατάταξη των εδαφών με βάση αυτών των διαχωρισμό έχει μεγάλη οικονομική σημασία για τον εργολάβο.



Πίνακας 3.8: Συσχέτιση κατατάξεων εδαφικών υλικών

### **3.6 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΕΠΙΧΩΜΑ**

Απαραίτητες προϋποθέσεις για την άρτια κατασκευή ενός επιχώματος είναι η σωστή επιλογή των υλικών, η κατάλληλη προετοιμασία εδάφους έδρασης, η βελτιστοποίηση της συμπύκνωσης και γενικά η εξασφάλιση των συνθηκών διά των οποίων επιτυγχάνεται η ευστάθεια της κατασκευής και ελαχιστοποιούνται οι παραμορφώσεις επιχώματος και υπεδάφους.

Όσον αφορά τα υλικά κατασκευής ενός επιχώματος, τα προϊόντα εκσκαφών δεν έχουν πάντοτε τα απαιτούμενα μηχανικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για κατασκευή επιχωμάτων. Η Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή XI ορίζει ότι για επιχώματα ύψους μεγαλύτερου των 15 μέτρων πρέπει να χρησιμοποιούνται εδάφη ομάδων A-1, A-2-4, A-2-5 και A-3 συμπυκνωμένα σε βαθμό 90% κατά την τροποποιημένη μέθοδο Proctor. Εδάφη των ομάδων A-2-6, A-2-7, A-4, A-6 και A-7 χρησιμοποιούνται σε περίπτωση που δεν διατίθενται άλλα υλικά μετά από ειδικό έλεγχο, ωστόσο ακόμα και σε μικρότερα επιχώματα ύψους 5-15 m θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση εδαφών με δείκτη πλαστικότητας  $PI > 10$  ή ισοδύναμο άμμου  $SE < 35$ . Η χρήση εδαφών με μεγάλη πλαστικότητα μπορεί να προκαλέσει με την πάροδο του χρόνου καθιζήσεις στο σώμα του επιχώματος, με αποτέλεσμα να εμφανιστούν παραμορφώσεις και αστοχίες στην επιφάνεια κυκλοφορίας της οδού.

Σε περίπτωση που τα προϊόντα εκσκαφής αποτελούνται από οργανικά εδαφικά υλικά ή εδάφη με μεγάλη πλαστικότητα, καθώς και σε οδούς με ελάχιστα ή μηδενικά ορύγματα, είναι απαραίτητο να αναζητηθούν υγιή υλικά από δανειοθαλάμους. Πριν από την χρησιμοποίησή τους, τα υλικά αυτά, θα πρέπει να υφίστανται δοκιμές κοκκομετρίας και ορίων Atterberg για να διαπιστωθεί η καταλληλότητά τους.

Τόσο τα προϊόντα εκσκαφών, όσο και τα υλικά δανειοθαλάμων πρέπει να αξιολογούνται, έτσι ώστε κατά τη διάστρωση της καλύτερης ποιότητας υλικά να τοποθετούνται στις ανώτερες στρώσεις επιχωμάτων. Τα βραχώδη προϊόντα εκσκαφών χρησιμοποιούνται στην κατασκευή επιχωμάτων, υπό την προϋπόθεση ότι περιέχουν σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων συστατικών για να είναι δυνατή η συρρίκνωσή τους. Στο ανώτερο τμήμα του επιχώματος και σε πάχος 2 m δεν πρέπει να τοποθετούνται τεμάχια λίθων διαστάσεων μεγαλύτερων των 20 cm, ενώ στην τελευταία στρώση πάχους 15 cm η μέγιστη διάσταση των υλικών πρέπει να είναι 7,5 m.

Όταν χρησιμοποιούνται βραχώδη προϊόντα εκσκαφών για την κατασκευή επιχωμάτων, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στρώση σκάφης με βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, επί της οποίας να εδραστεί απ' ευθείας η βάση του οδοστρώματος. Στην περίπτωση αυτή, για την κατασκευή της ανώτερης στρώσης του επιχώματος πάχους 60 cm, τα βραχώδη προϊόντα πρέπει να αναμιγνύονται με αμμοχάλικα χειμάρρων με δείκτη πλαστικότητας  $PI < 4$  και να υφίστανται συμπύκνωση, κατά τρόπο ώστε να αποφεύγονται τα κενά και οι συγκεντρώσεις λίθων στη μάζα του υλικού.

### Προδιαγραφές

#### **1. ΠΡΟΤ . ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. XI**

### **3.7 ΔΟΚΙΜΗ PROCTOR**

Με τη συμπύκνωση ενός υλικού, επιχειρείται η τακτοποίηση των κόκκων ενός εδαφικού υλικού σε όσο το δυνατόν πυκνότερη διάταξη γίνεται, με την βοήθεια του νερού και κάποιας ενέργειας συμπυκνώσεως (στατικής ή δυναμικής) έτσι ώστε να μειωθούν τα κενά αέρος και να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Η διεύρυνση της σχέσης «ξηράς πυκνότητας – υγρασίας» για διάφορες ενέργειες συμπυκνώσεως γίνονται σύμφωνα με διάφορες πρότυπες μεθόδους (AASHTO, ASTM, BS κ.λ.π.) γενικά όμως, όλες στηρίζονται στο γεγονός ότι για δεδομένη ενέργεια συμπύκνωσης (π.χ. 3 στρώσεις υλικού με 25 χτυπήματα ανά στρώση), η τιμή ξηράς πυκνότητας ενός εδάφους αυξάνει όσο αυξάνει η υγρασία αναμίξεως, αλλά αυτό συμβαίνει μέχρι ένα ποσοστό υγρασίας, η οποία καλείται βέλτιστη υγρασία, και αντιστοιχεί στη μέγιστη ξηρά πυκνότητα του υλικού. Οι εργαστηριακές δοκιμές συμπύκνωσης του εδάφους έχουν σκοπό να προσδιορίσουν αυτή την βέλτιστη υγρασία, με την οποία πρέπει να συμπυκνωθεί το έδαφος στο έργο, για να επιτύχουμε το μέγιστο της πυκνότητάς του.

Στον Ελληνικό χώρο, ο έλεγχος της συμπύκνωσης εκτελείται αποκλειστικά με βάση την επιτευχθείσα στο έργο τιμή της ξηράς πυκνότητας. Αντίστοιχα η διαδικασία προσδιορισμού των βέλτιστων συνθηκών συμπύκνωσης κινείται με στόχο τον καθορισμό στο εργαστήριο ενός πρότυπου ζεύγους τιμών, **ξηράς πυκνότητας  $\gamma_d$**  και **φυσικής υγρασίας  $w$** , προς το οποίο θα πρέπει να προσανατολίζεται η εκτέλεση των εργασιών στο εργοτάξιο. Η μέθοδος που ακολουθείται διεθνώς για την εξερεύνηση αυτού του πρότυπου ζεύγους τιμών είναι η μέθοδος Proctor.

#### **3.7.1 ΠΡΟΤΥΠΗ ΔΟΚΙΜΗ PROCTOR**

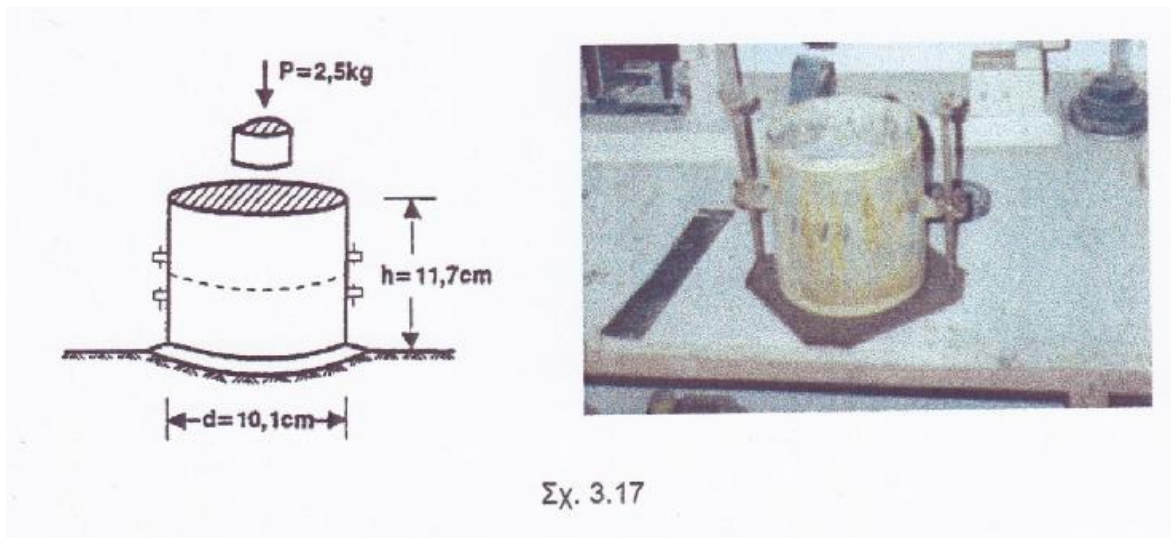
Η δοκιμή Proctor (1933) είναι ένας ποιοτικός έλεγχος των υλικών στο εργαστήριο. Είναι ανεξάρτητη της υπόλοιπης διαδικασίας συμπύκνωσης και μπορεί να εκτελεσθεί πριν ακόμα αρχίσει οποιαδήποτε χωματουργική εργασία. Σκοπός της είναι να προσδιορίσει για κάθε υλικό, υπό συγκεκριμένη ενέργεια συμπύκνωσης, ένα ζεύγος τιμών  $\gamma_d$ ,  $w$  που θα αποτελέσει σημείο αναφοράς για την εκτέλεση των εργασιών στο



Σχ. 3.16

εργοτάξιο.

Από κάθε εδαφικό υλικό λαμβάνονται πολλά δείγματα, τα οποία υφίστανται αποξήρανση (Σχ. 3.16) και στη συνέχεια διαβρέχονται έτσι ώστε να αποκτήσουν διαφορετική το καθένα περιεκτικότητα σε νερό  $w$ . Το κάθε δείγμα τοποθετείται κατόπιν στην μήτρα Proctor ( $d=10.1$  cm,  $h=11.7$  cm) η οποία απεικονίζεται στο (Σχ. 3.17), σε 3 ισοπαχείς στρώσεις, όπου κάθε στρώση δέχεται 25 χτύπους από ένα τύπτρο 2,5 kg που πέφτει από ύψος 30,5 cm (Σχ. 3.18).



Σχ. 3.17

Η ενέργεια συμπύκνωσης είναι σε αυτή τη περίπτωση 60 kgm/lit. Γενικά, η **ενέργεια συμπύκνωσης** ή **ειδική ενέργεια** (specific energy) σε περιπτώσεις εργαστηριακών δοκιμών προσδιορίζεται από την σχέση:

$$E = \frac{N \cdot G \cdot h}{V}$$

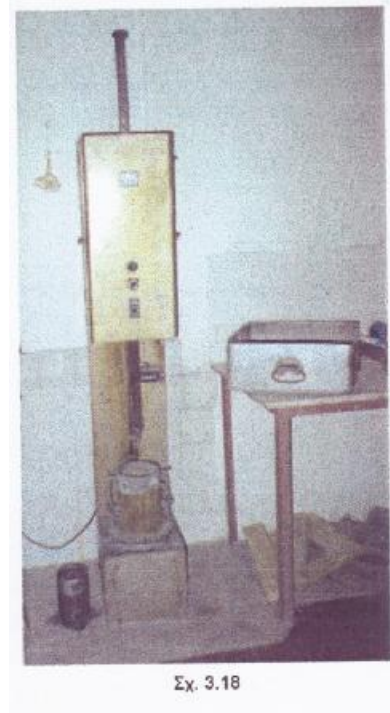
Όπου  $N$  ο αριθμός των κτύπων

$G$  το βάρος του τύπτρου

$h$  το ύψος πτώσης

$V$  ο όγκος του δοκιμίου.

Μετά τη δοκιμή λαμβάνεται δείγμα βάρους  $G=50-100$  gr από τη βάση του κυλίνδρου. Το δείγμα υφίσταται αποξήρανση και υπολογίζεται στη συνέχεια το βάρος του  $G_S$ . Η **φυσική υγρασία** του δείγματος



Σχ. 3.18

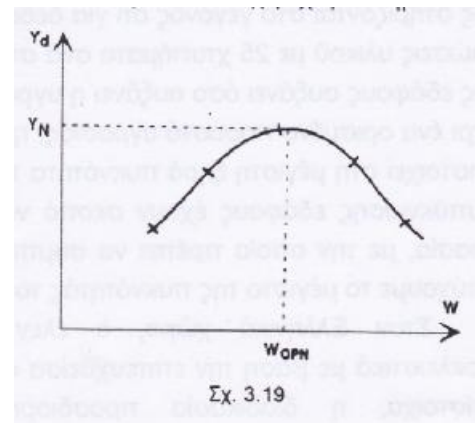
είναι:

$$W(\%) = \frac{G - G_s}{G_s} \times 100$$

Η **ξηρά πυκνότητα** υπολογίζεται από την σχέση :

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V}$$

Προσδιορίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο ένα ζεύγος τιμών  $w, \gamma_d$  για κάθε ένα από τα δείγματα του εδάφους, συνήθως 5 ή 6, και οι τιμές ,μεταφέρονται σε ένα διάγραμμα ( $w, \gamma_d$ ) όπου χαράσσεται η αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη που ονομάζεται **καμπύλη Proctor**. Επί της καμπύλης ευρίσκεται η μέγιστη τιμή ξηράς πυκνότητας  $\max \gamma_d = \gamma_N$  και η αντίστοιχη **βέλτιστη τιμή της φυσικής υγρασίας  $W_{OPN}$**  (Σχ. 3.19). Το ζεύγος των τιμών αυτών αποτελεί το σημείο αναφοράς προς το οποίο πρέπει να κινηθεί η διαδικασία της συμπύκνωσης στο εργοτάξιο.



### Προδιαγραφές

1. AASHTO T-99
2. ASTM D698
3. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-105/86
4. BS 1377 (ΔΟΚΙΜΗ 12)
5. DIN 18127

### 3.7.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ PROCTOR

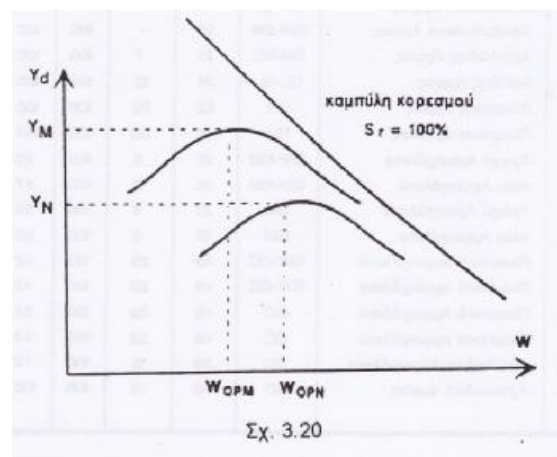
Παραλλαγή της κλασσικής δοκιμής Proctor αποτελεί η τροποποιημένη δοκιμή Proctor (modified Proctor, AASHTO T-180) όπου οι μικρές αλλαγές αποσκοπούν στην αύξηση της ενέργειας συμπύκνωσης. Οι σύγχρονες Ελληνικές αλλά και ξένες προδιαγραφές αναφέρονται σχεδόν πάντοτε στην τροποποιημένη μέθοδο Proctor. Τα δείγματα κατασκευάζονται κατά τον ίδιο τρόπο και



τοποθετούνται σε 5 στρώσεις στην μήτρα Proctor, όπου συμπυκνώνονται. Σε περίπτωση που ένα εδαφικό υλικό περιέχει στοιχεία διαμέτρου μεγαλύτερης των 5 mm (συγκρατούμενα σε κόσκινο Νο4) αντί της κλασσικής συσκευής χρησιμοποιείται η συσκευή CBR (d=15.2 cm, h=11.7 cm). το δείγμα που τοποθετείται στη συσκευή είναι το διερχόμενο από το κόσκινο 3/4". Το συγκρατούμενο επί του κόσκινου ποσοστό αντικαθίσταται με άλλο ισοβαρές στοιχείων 5-20 mm. Μετά την τοποθέτηση του δείγματος στον κύλινδρο, κάθε στρώση δέχεται 56 κτύπους από ένα τύπτρο βάρους 4,5 kg από ύψος 46 cm. Ο υπολογισμός των τιμών  $\gamma_d$ , και  $w$  για κάθε δείγμα, καθώς και η χάραξη της καμπύλης Proctor, γίνονται με την ίδια ακριβώς διαδικασία, όπως και στην κλασσική δοκιμή. Η καμπύλη που προκύπτει ωστόσο, για το ίδιο υλικό, είναι κάπως μετατοπισμένη στο διάγραμμα ( $w, \gamma_d$ ), δίνει μεγαλύτερη τιμή για την ξηρά πυκνότητα  $\max \gamma_d = \gamma_M$  και μικρότερη για την βέλτιστη φυσική υγρασία  $W_{OPN}$  πράγμα που σημαίνει αυξημένες απαιτήσεις συμπύκνωσης στο εργοτάξιο (Σχ. 3.20).

Το **διάγραμμα Proctor** δείχνει ότι:

- Για δεδομένο εδαφικό υλικό, η τιμή της μέγιστης πυκνότητας αυξάνει και της βέλτιστης υγρασίας μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας συμπύκνωσης
- Για συγκεκριμένη φυσική υγρασία, η τιμή της ξηράς πυκνότητας αυξάνει με την ενέργεια συμπύκνωσης, μέχρις ότου το έδαφος κορεσθεί  $S_r=100\%$ . Οι διάφορες καμπύλες Proctor έχουν ως περιβάλλουσα την καμπύλη κορεσμού.



Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε ότι επειδή στην πρότυπη δοκιμή Proctor χρησιμοποιείται μικρότερη ενέργεια συμπύκνωσης, αυτή ανταποκρίνεται προς τα παλαιότερα μηχανικά μέσα συμπύκνωσης, που είχαν μεγαλύτερη ισχύ. Αντίθετα, στην τροποποιημένη δοκιμή Proctor η συμπύκνωση είναι ισχυρότερη. Αυτή αναπτύχθηκε από το σώμα Στρατιωτικών Μηχανικών των ΗΠΑ, για την παροχή βαρύτερης πρότυπης συμπύκνωσης στην κατασκευή οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

## Προδιαγραφές

1. AASHTO T-180
2. ASTM D 1557
3. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-105/86
4. BS 1377 (Δοκιμή 13)
5. DIN 18127

Α/ Α	Εδαφος	Κατά ταξη USCS	Όρια Atterberg		Κοκκομετρία ΔΠ (%)				Σιμβολική Proctor		Τροποποιημένη Proctor	
			WL	P	3/4"	No4	No40	No200	Υ <sub>π</sub>	W <sub>ορπ</sub>	Υ <sub>μ</sub>	W <sub>ορμ</sub>
1.	Λεπτόκοκκη άμμος	SP	22	-	100	100	100	5	1,56	17	1,64	15
2.	Μεσόκοκκη άμμος	SW-SM	25	-	100	100	40	10	1,64	15	1,76	12
3.	Χονδροκόκκη άμμος	SW-SM	20	-	100	100	30	12	1,79	14	1,90	12
4.	Αργιλώδης άμμος	SM-SC	21	7	100	100	55	25	1,85	14	1,94	12
5.	Θωώδης άμμος	CL-ML	34	12	100	100	70	45	1,61	20	1,74	17
6.	Πλαστική άμμος	CH	62	36	100	100	98	90	1,38	30	1,54	25
7.	Πλαστική άργιλος	CH	71	35	100	100	98	92	1,32	32	1,51	24
8.	Τραχύ Αμμοχάλικο	GW-GM	21	6	100	49	21	9	2,12	9	2,20	8
9.	Λείο Αμμοχάλικο	GW-GM	21	6	100	47	21	9	2,05	9	2,12	8
10.	Τραχύ Αμμοχάλικο	GM	21	6	100	55	25	18	2,04	10	2,10	9
11.	Λείο Αμμοχάλικο	GM	21	6	100	55	25	18	2,01	10	2,06	9
12.	Πλαστικό Αμμοχάλικο	GW-GC	49	29	100	42	19	9	1,97	12	2,11	9
13.	Πλαστικό Αμμοχάλικο	GW-GC	49	29	100	42	19	9	1,95	11	2,06	8
14.	Πλαστικό Αμμοχάλικο	GC	49	29	100	54	28	18	1,89	13	2,08	8
15.	Πλαστικό Αμμοχάλικο	GC	49	29	100	54	28	18	1,89	11	2,02	10
16.	Αργιλώδες Αμμοχάλικο	SC	30	12	100	72	55	37	1,51	23	1,62	19
17.	Αργιλώδης άμμος	SC	38	12	100	100	80	45	-	-	-	-

Πίνακας 3.9: Φυσικές ιδιότητες και χαρακτηριστικές τιμές Proctor διαφόρων εδαφών

## 3.8 ΔΟΚΙΜΗ CBR

### 3.8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Η πιο διαδεδομένη παράμετρος φέρουσας ικανότητας εδαφικών υλικών για μελέτες οδών και οδοστρωμάτων είναι ο **Καλιφορνιακός Δείκτης** ή **δείκτης CBR** (California Bearing Ratio). Δημιούργημα των μηχανικών της Διεύθυνσης Οδών της Καλιφόρνιας (1938), ο Καλιφορνιακός Δείκτης έγινε γρήγορα δημοφιλής σε όλο τον κόσμο και αποτελεί **βασική παράμετρο μηχανικής αντοχής** εδαφικών και θραυστών υλικών στις περισσότερες μεθόδους διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων.

Η αντίστοιχη δοκιμή συνίσταται στην προπαρασκευή ενός δοκιμίου, συμπυκνωμένου εντός κυλινδρικής συσκευής σύμφωνα με τις επί τόπου αναμενόμενες συνθήκες ή, εναλλακτικά, σύμφωνα με τις βέλτιστες συνθήκες κατά 67 Proctor (Σχ. 3.21). Το πείραμα εκτελείται είτε αμέσως μετά τη συμπύκνωση του δοκιμίου είτε μετά από υδρεμποτισμό 4 ημερών (Σχ. 3.22). Στην δεύτερη περίπτωση η δοκιμή εκτελείται μετά από στράγγιση του δείγματος επί 15-30 min και η αναμενόμενη αντοχή είναι μικρότερη απ' ότι στην πρώτη περίπτωση.



Σχ. 3.21

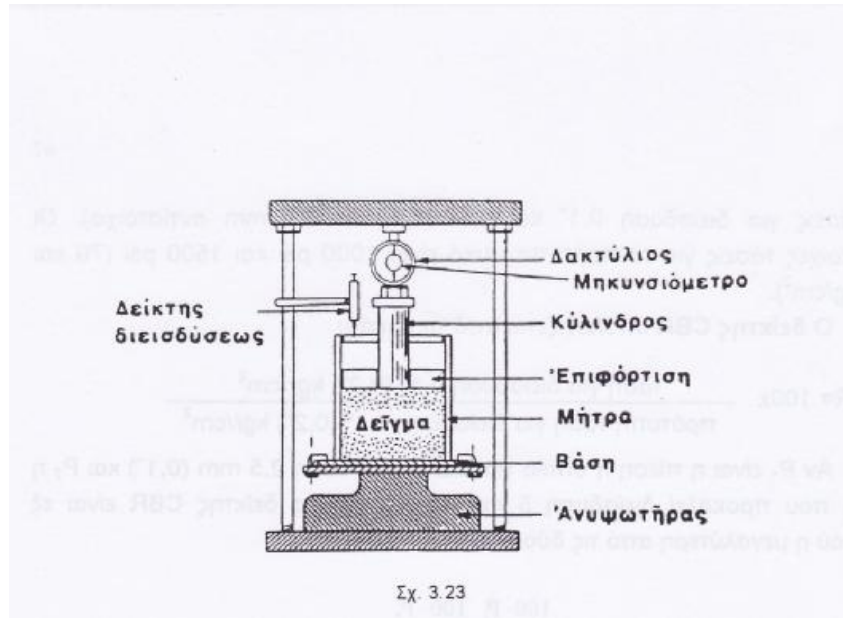


Σχ. 3.22

Το δοκίμιο διαμορφώνεται από το κλάσμα του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο Νο 3/4". Το συγκρατούμενο επί του κοσκίνου 3/4" ποσοστό αντικαθίσταται με άλλο ισοβαρές διαβάθμισης 5-20 mm. Η αντικατάσταση αυτή θεωρείται ότι δεν αλλοιώνει την μηχανική αντοχή του υλικού, αντικαθιστάμενο ποσοστό είναι μικρότερο του 10%. Όταν αντίθετα, το εδαφικό δείγμα περιέχει περισσότερο από 10% στοιχεία συγκρατούμενα επί του

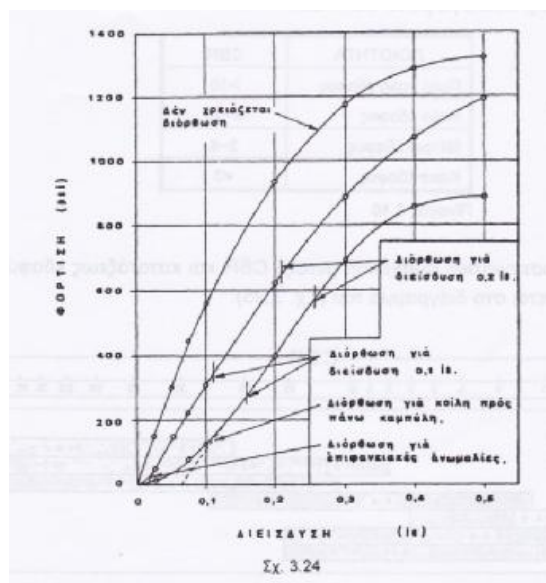
κοσκίνου 3/4", η δοκιμή CBR κρίνεται ακατάλληλη για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας.

Με ένα έμβολο κυκλικής διατομής  $d=4.9$  cm προκαλείται με σταθερή ταχύτητα  $v=1,27$  mm/min διάτρηση και μετρείται η τάση για κάθε διείσδυση



0,1", μέχρι να φτάσει σε ολική διείσδυση 0,5" (Σχ. 3.23).

Χαράσσουμε την **καμπύλη «πίεσεως – διεισδύσεως»** με τετμημένες τις διεισδύσεις και τεταγμένες τις πιέσεις. Για να ληφθούν ακριβείς τιμές των φορτίων, από τα δεδομένα της δοκιμής, προσδιορίζεται το σημείο μηδέν της καμπύλης, για διόρθωση επιφανειακών ανομοιομορφιών του δοκιμίου και της αρχικής κοίλης προς τα πάνω καμπύλης (εφόσον υπάρχει τέτοια περίπτωση). Στο (Σχ. 3.24) φαίνονται μέθοδοι διόρθωσης της καμπύλης. Για να



προσδιορίσουμε τον δείκτη CBR, παίρνουμε από την καμπύλη που χαράξαμε,

Τις τάσεις για διείσδυση 0,1" και 0.5" (2,5 και 5,0 mm αντίστοιχα). Οι αντίστοιχες τάσεις για το πρότυπο υλικό είναι 1000psi και 1500 psi (70 και 105kg/cm<sup>2</sup>).

Ο δείκτης **CBR** υπολογίζεται από την σχέση:

$$CBR = 100 \times \frac{\text{τάση για διείσδυση } 0,1'' (0,2'') \text{ kg/cm}^2}{\text{πρότυπη τάση για διείσδυση } 0,1'' (0,2'') \text{ kg/cm}^2}$$

Αν  $P_1$  είναι η πίεση η οποία προκαλεί διείσδυση 2,5 mm (0.1") και  $P_2$  η πίεση που προκαλεί διείσδυση 5 mm (0.2"), τότε ο δείκτης CBR είναι εξ ορισμού η μεγαλύτερη από τις δυο τιμές:

$$\frac{100 \cdot P_1}{70} , \frac{100 \cdot P_2}{105}$$

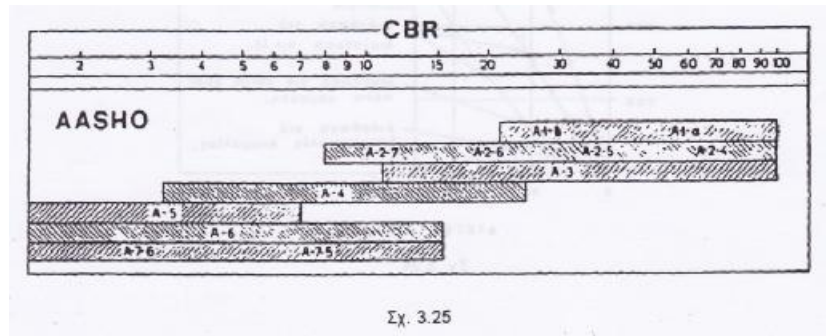
Όπου η πίεση  $P$  μετράται σε kg/cm<sub>2</sub>. Η τιμή CBR=100 αντιστοιχεί σε πρότυπο θραυστό υλικό λατομείου συμπυκνωμένου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Είναι προφανές ότι για ορισμένα θραυστά υλικά εξαιρετικής ποιότητας, η τιμή του δείκτη CBR μπορεί να ξεπερνά το 100.

Στον πίνακα 3.10 φαίνεται ο χαρακτηρισμός του εδάφους έδρασης του οδοστρώματος, ανάλογα με το CBR του.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ	CBR
Πολύ καλό έδαφος	>10
Καλό έδαφος	6~10
Μέτριο έδαφος	3~6
Κακό έδαφος	<3

Πίνακας 3.10

Η προσεγγιστική συσχέτιση μεταξύ του CBR και κατατάξεως εδαφών κατά AASHO φαίνεται στο διάγραμμα του (Σχ. 3.25).



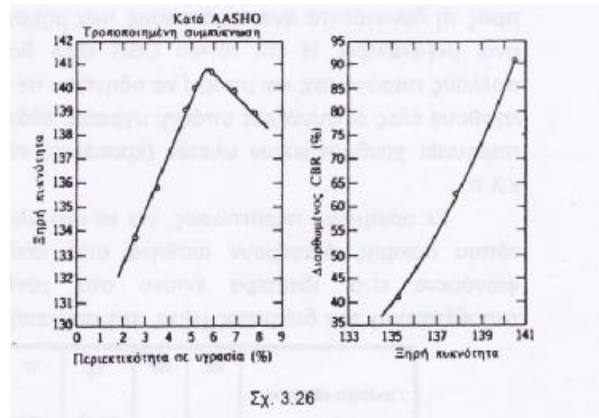
Σχ. 3.25

Ο δείκτης CBR έχει ημιεμπειρικό χαρακτήρα και δεν είναι εύκολο να συνδεθεί μέσω αναλυτικών σχέσεων με άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως οι ελαστικές σταθερές, η συνοχή και η γωνία τριβής. Λόγω όμως του ιδιαίτερου ρόλου του στην οδοποιία, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι συσχέτισμού του δείκτη CBR προς το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , το μέτρο αντίδρασης  $k$ , τα όρια Atterberg και άλλες εδαφικές παραμέτρους. Η χρήση των μεθόδων αυτών, πρέπει να περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μια ποιοτική αξιολόγηση του υλικού και όχι σε οριστικές μελέτες διαστασιολόγησης.

Οι κυριότεροι παράγοντες του εδάφους που επηρεάζουν το CBR είναι η υφή του εδάφους, η υγρασία και η πυκνότητα. Η μέθοδος δοκιμής που θα επιλεγεί εξαρτάται βασικά από τον τύπο του υλικού δοκιμής. Τα κοκκώδη υλικά δεν επηρεάζονται πολύ από την διόγκωση κατά την περίοδο του εμποτισμού και γι' αυτό η επιφόρτιση δεν παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη φάση αυτής της δοκιμής. Αντίθετα, τα αργιλικά εδάφη που επηρεάζονται σημαντικά από τις πιέσεις διόγκωσης, θα δώσουν τιμές CBR ανάλογα με το βάρος της προφόρτισης που χρησιμοποιείται κατά την περίοδο του εμποτισμού. Τα βάρη της προφόρτισης είναι εξαιρετικά σημαντικά κατά τη διάρκεια της διείδυσης στη δοκιμή για κοκκώδη υλικά, αλλά όχι μεγάλης σημασίας για τα λεπτόκοκκα εδάφη. Για το λόγο αυτό υπάρχουν δυο τύποι δοκιμών.

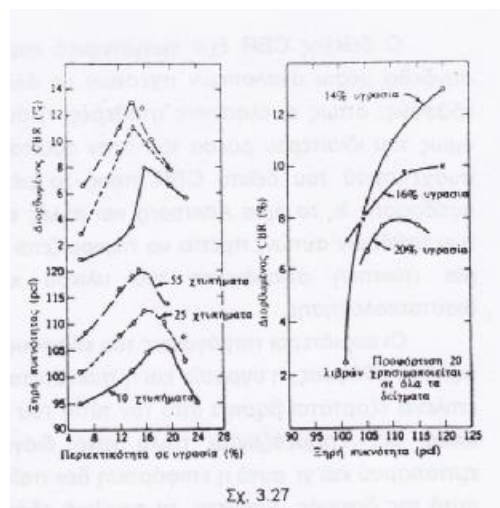
Για **κοκκώδη υλικά** τα δείγματα συνήθως συμπυκνώνονται κάτω από συνθήκες βελτίωσης περιεκτικότητας σε υγρασία αλλά τρεις διαφορετικές

συμπυκνώσεις. Οι προσδιορισμοί του CBR γίνονται τότε σε δείγματα του υλικού συμπυκνωμένου σε κάθε μια από τις τρεις συμπυκνώσεις (ΣΧ. 3.26). λόγω της κοκκώδους φύσης των υλικών, συχνά προκαλούνται σφάλματα. Γι' αυτό τουλάχιστον δυο δοκίμια πρέπει να προπαρασκευάζονται για κάθε τιμή



υγρασίας και πυκνότητας και να υπολογίζεται ο μέσος όρος των CBR και για τα δυο αυτά δείγματα.

Για **λεπτόκοκκα εδάφη** μια σειρά δοκιμών του CBR συνήθως γίνονται με διάφορες συνθήκες υγρασίας και πυκνότητας. Για να γίνει αυτό, τα δείγματα εδάφους συμπυκνώνονται σε τρεις συμπυκνώσεις και διάφορες περιεκτικότητες σε υγρασία. Το (Σχ. 3.27) δείχνει τυπικά αποτελέσματα δοκιμών για ένα ιλυώδες αργιλικό υλικό. Στο κάτω αριστερό διάγραμμα παριστάνεται η σχέση υγρασίας πυκνότητας που προέκυψε κατά τη συμπύκνωση των δοκιμίων. Στις επάνω αριστερά καμπύλες φαίνονται οι τιμές του CBR που αντιστοιχούν σε



κάθε ένα από τα δοκίμια μετά την περίοδο εμποτισμού 4 ημερών.

Η δοκιμή CBR είναι δυνατό να εκτελεσθεί και **επί τόπου**, με τον κατάλληλο εξοπλισμό, στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιείται κυρίως και

για ποιοτικό έλεγχο κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Συνοδεύεται πάντοτε από τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας και του ξηρού ειδικού βάρους του υλικού. Διαφέρει από την εργαστηριακή δοκιμή, η οποία εκτελείται σε αναζυμωθέντα δοκίμια, ως προς το αδιατάρακτο των δειγμάτων που βρίσκονται σε φυσική κατάσταση και υπό την έννοια αυτή η αξιοπιστία της ως προς την δυνατότητα αναπαράστασης των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι μεγαλύτερη. η επί τόπου CBR είναι δοκιμή που επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα αν δεν ληφθούν όλες οι συνθήκες υπόψη: υγρασία εδάφους, βαθμός συμπίκνωσης, παρουσία χονδρόκοκκων υλικών (κροκάλες) κάτω από το σημείο δοκιμής κ.λ.π.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, για το ίδιο το υλικό, τα αποτελέσματα της επί τόπου δοκιμής διαφέρουν αισθητά από εκείνα της εργαστηριακής. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο στα χονδρόκοκκα εδάφη όπου η τοποθέτηση του δείγματος μέσα στη συσκευή παίζει καθοριστικό ρόλο για την εκτέλεση της δοκιμής. Αντίθετα, τα αργιλώδη εδάφη παρουσιάζουν συνήθως μικρές αποκλίσεις μεταξύ CBR εργαστηρίου και επί τόπου, υπό την προϋπόθεση ότι οι δοκιμές εκτελούνται κάτω από τις ίδιες συνθήκες συμπίκνωσης (Πίνακας 3.11).

Ποιότητα εδάφους	WL	WP	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	W (%)	CBR εργαστηρίου	CBR επί τόπου
Πλαστική άργιλος	69	27	1,5	25	9	8
Αργιλος	59	22	1,5	25	4	3
Πυκλής άργιλος	37	23	1,7	19	5	11
Αμμόδης άργιλος	30	18	1,5	19	2	3
Αργιλώδης άμμος	-	-	1,8	12	14	7
Ομοιομορφη άμμος	-	-	1,6	8	24	8
Θραυστό λατομείο	-	-	2,2	5	412	44

Πίνακας 3.11

### Προδιαγραφές

1. AASHTO T-193
2. ASTM D 1883
3. BS 1377 (Δοκιμή 16)
4. MIL – STD – 621A
5. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-105/86
6. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-106/86



### **3.8.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΤΟΠΟΥ CBR**

Εάν επιχειρηθεί μια σύγκριση του επί τόπου CBR με το εργαστηριακό CBR με το εργαστηριακό CBR, θα παρατηρήσουμε κυρίως τα εξής:

1. Το εργαστηριακό CBR γίνεται σε δοκίμια ομοιόμορφα και πρότυπα συμπυκνωμένα στη βέλτιστη υγρασία και με δεδομένη ενέργεια συμπύκνωσης, ενώ αντίθετα το επί τόπου CBR γίνεται σε διάφορα σημεία του εδάφους, τα οποία έχουν συμπυκνωθεί από κάποιο οδοστρωτήρα σε άγνωστο αριθμό διελεύσεων και άρα διαφορετικό βαθμό συμπύκνωσης από σημείο σε σημείο και με άγνωστη υγρασία αναμίξεως, η οποία είναι πρακτικά αδύνατο να έχει διανεμηθεί ομοιόμορφα.
2. Στο εργαστηριακό CBR τα δοκίμια υποβάλλονται σε εμποτισμό 4 ημερών και έτσι έχουν πάντα τα δοκίμια τις ίδιες συνθήκες υγρασίας (κορεσμός), ενώ στο επί τόπου CBR το έδαφος, ανάλογα της εποχής που γίνεται η δοκιμή, μπορεί να είναι ξερό (καλοκαίρι) με αποτέλεσμα πολύ μεγάλες συγκριτικά τιμές CBR ή να είναι υγρό (χειμώνα) με χαμηλές τιμές CBR.
3. Στο εργαστηριακό CBR γίνεται μια αλλοίωση του φυσικού υλικού, γιατί αυτό κοσκινίζεται πριν την δοκιμή με το κόσκινο 3/4" (19 mm) και γίνεται αντικατάσταση του χονδρόκοκκου αυτού υλικού με υλικό διερχόμενο από το κόσκινο Νο 4 (4,75 mm), ενώ στο επί τόπου CBR συμπυκνώνεται το πραγματικό υλικό χωρίς καμία αλλοίωση και όπου η ύπαρξη χονδρόκοκκου υλικού ή κροκάλων κάτω από το έμβολο του CBR μπορεί να αυξήσει, συγκριτικά με το εργαστηριακό, την τιμή του CBR.
4. Το εργαστηριακό CBR είναι χρονοβόρο, ενώ το επί τόπου CBR γίνεται μέσα σε 0,5-1 ώρα, άλλα απαιτεί την ύπαρξη φορτηγού για αντίδραση.

Για τους παραπάνω λόγους συνιστάται κατά την εκτέλεση επί τόπου δοκιμής CBR, να γίνεται:

- Δειγματοληψία του εδάφους για την κοκκομετρική ανάλυση του και την εύρεση του δείκτη πλαστικότητας για κατάταξη του εδάφους σύμφωνα με το AASHTO M 145 και σύγκρισή του με το υλικό στο οποίο έγινε εργαστηριακό CBR
- Την εκτέλεση της δοκιμής προσδιορισμού επί τόπου πυκνότητας για την εύρεση του βαθμού συμπύκνωσης του υλικού και την ανάλογη ερμηνεία του αποτελέσματος επί τόπου CBR

- Τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας του εδάφους, για την σύγκρισή της με την βέλτιστη υγρασία Proctor και την υγρασία του δοκιμίου στο εργαστηριακό CBR μετά τον 4ήμερο εμποτισμό του υλικού (πιθανός κορεσμός).

### **3.8.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΥΠΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΜΕ CBR**

Σύμφωνα με το σύστημα AASHTO M145, οι διάφοροι τύποι των εδαφών διακρίνονται στις κατηγορίες: A-1,A-2 (αμμοχάλικα), A-3 (λεπτόκοκκος άμμος), A-4, A-5 (ιλυώδη εδάφη) και A-6, A-7 (αργιλικά εδάφη) με βάση την κοκκομετρική διαβάθμισή τους και τα όρια υδαρότητας (LL), πλαστικότητας (PL) και τον δείκτη πλαστικότητας (PI).

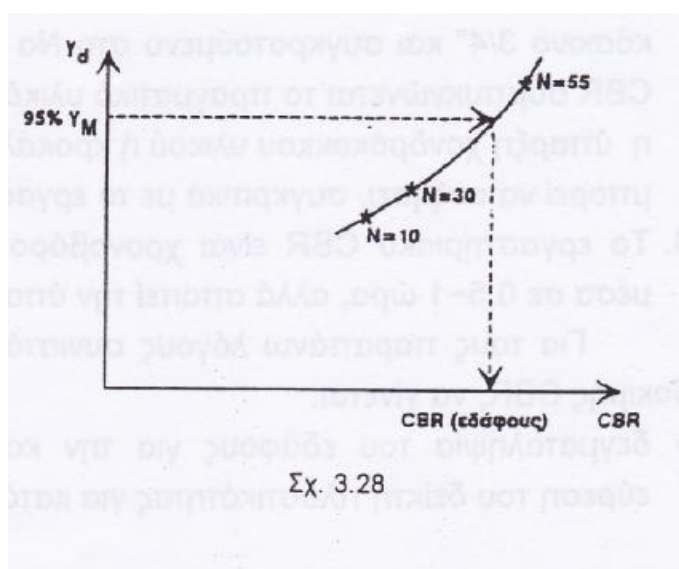
Στον πίνακα 3.8 φαίνονται οι πιθανές τιμές CBR για διάφορα είδη συμπυκνωμένων εδαφών, είτε με το σύστημα AASHTO είτε με το ενοποιημένο σύστημα (GW, GC, SC, CL, CH κ.λ.π.). Γενικά αναμένονται χαμηλές τιμές CBR: 3-15% για αργιλοϊλυώδη εδάφη, ενδιάμεσες τιμές 20-40% για αργιλώδη αμμοχάλικα, ενώ για μη πλαστικά καλά διαβαθμισμένα αμμοχάλικα, συνήθως μετρώνται τιμές CBR περίπου 40-80%. Συνιστάται πάντως από το FAA να μην λαμβάνεται τιμή CBR μεγαλύτερη από 50% για μη σταθεροποιημένα αμμοχάλικα.

### **3.8.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ CBR ΕΝΟΣ ΕΛΑΦΟΥΣ**

Ο υπολογισμός της τιμής του δείκτη CBR ενός συγκεκριμένου εδαφικού υλικού πραγματοποιείται ως εξής:

- Εκτελείται μια τροποποιημένη δοκιμή Proctor και υπολογίζεται η βέλτιστη τιμή της φυσικής υγρασίας  $W_{OPM}$  και η μέγιστη ξηρά πυκνότητα κατά Proctor  $\gamma_M$
- Εν συνεχεία εκτελούνται τρεις (3) δοκιμές CBR με  $W=W_{OPM}$  σε δοκίμια συμπυκνωμένα με 15, 35 και 55 κτύπους (τροπ. Proctor)

- Υπολογίζονται αντίστοιχα οι τιμές CBR και  $\gamma_d$  και τοποθετούνται τα σημεία στο αντίστοιχο διάγραμμα
- Η τιμή του δείκτη CBR του εδάφους ευρίσκεται για  $\gamma_d=95\% \gamma_M$  (Σχ. 3.28)



Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την μέθοδο που συχνά εφαρμόζεται στην Ελλάδα, ο αριθμός των κτύπων είναι αντίστοιχα N=10, 30, ΚΑΙ 55 χωρίς να αλλάζει η ουσία ή το τελικό αποτέλεσμα του εργαστηριακού ελέγχου.

Οι τιμές του δείκτη CBR για τα χονδρόκοκκα εδάφη, όπως προτείνεται μετά από μακρόχρονες εργαστηριακές εμπειρίες (LCPC), φαίνονται στον πίνακα 3.12.

Χαρακτηρισμός εδάφους	Εμπειρίες LCPC	Διεθνής βιβλιογραφία	Προτεινόμενη τιμή
GW (ΔΠ No 200<5%, U>4) αμμοχάλικο καλής διαβάθμισης	>22	>40	20
GP (ΔΠ No 200<5%, U<4) αμμοχάλικο κακής διαβάθμισης	—	>30	20
GM (ΔΠ No 200>12%) ιλυώδες αμμοχάλικο	>36 (IP<7) >13 (IP>7)	>40 >20	20 10
GC (ΔΠ No 200>12%) αργιλώδες αμμοχάλικο	>17	>20	10
SW (U>6) άμμος καλής διαβάθμισης	>25	>20	10
SP (U<6) άμμος κακής διαβάθμισης	>6	>10	6-8

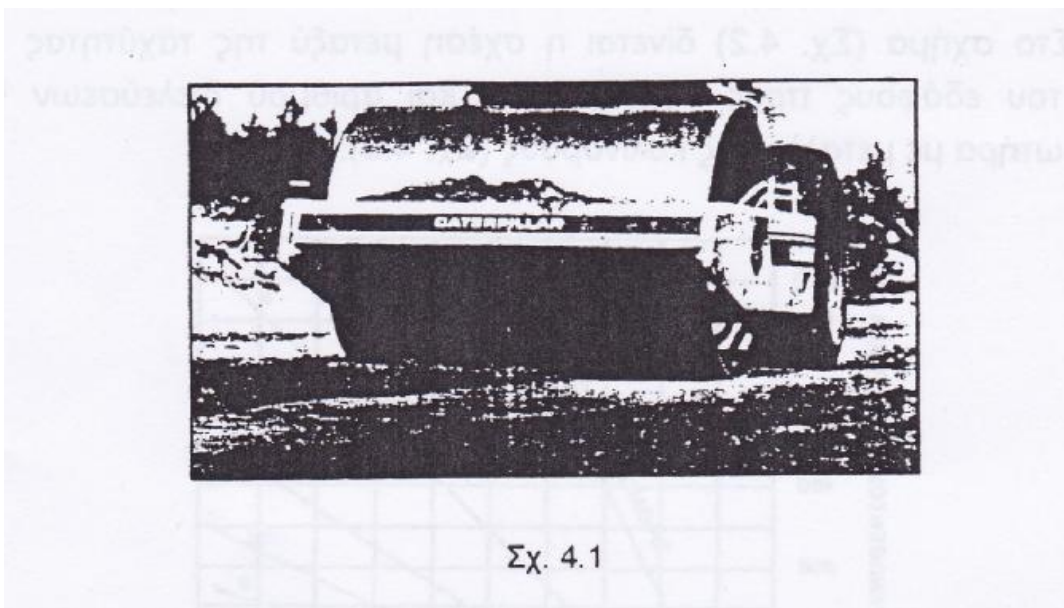
Πίνακας 3.12

Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι προτεινόμενες τιμές είναι σχετικά μικρές, αλλά είναι βέβαιο ότι η τιμή μιας μηχανικής παραμέτρου που υπεισέρχεται σε υπολογισμούς, όταν δεν βασίζεται σε εργαστηριακά δεδομένα, θα πρέπει να βρίσκεται προς την πλευρά της ασφάλειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>  
ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ  
ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

## 4.1 ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Ο σύγχρονος μηχανικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε έργα Οδοποιίας, παρουσιάζει μια τεράστια ποικιλία, η οποία διευρύνεται ακόμη περισσότερο με την πάροδο των ετών. Η μηχανοποίηση των χωματουργικών εργασιών έχει αυξήσει πολύ την ταχύτητα εκτέλεσής τους και έχει μειώσει σημαντικά το κόστος τους. Σήμερα διατίθενται στην αγορά πληθώρα μηχανικών μέσων με κύριο στόχο τη βέλτιστη απόδοση ανά κατηγορία χωματουργικών εργασιών. Η επικρατούσα τάση είναι στη χρήση όλο και μεγαλύτερων και ισχυρότερων μηχανημάτων (Σχ. 4.1).



Όμως στα σημαντικά οδικά έργα θα πρέπει προκειμένου να επιλέξουμε το καταλληλότερο μηχάνημα για την επίτευξη μιας οδικής κατασκευής με άρτια μηχανική συμπεριφορά, κατά το στάδιο της μελέτης, να διερευνάται η επίδραση των συνθηκών συμπύκνωσης στις ιδιότητες των εδαφικών υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

Η συμπύκνωση του εδάφους επιτυγχάνεται με την περιοδική επαναλαμβανόμενη επιβολή ενός φορτίου κάθετα στο προς συμπύκνωση έδαφος. Κατά τη διαδικασία αυτή απομακρύνεται το νερό και ο αέρας που βρίσκεται στους πόρους του.

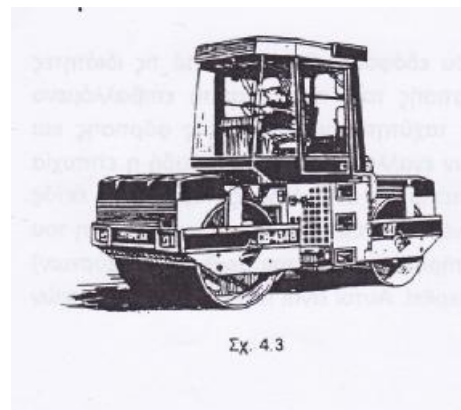
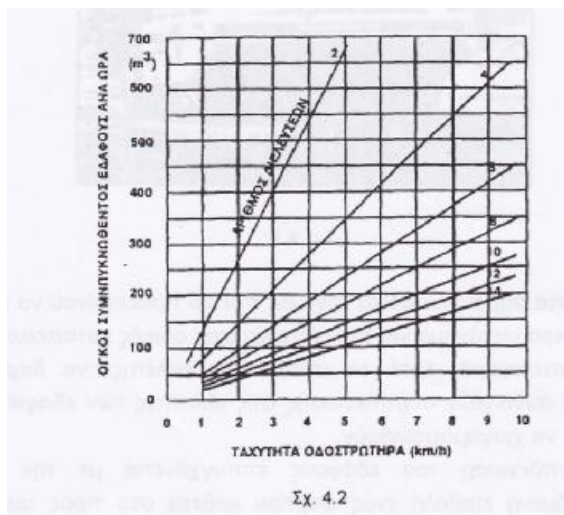
Ο **βαθμός συμπύκνωσης** του εδάφους εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους από τα δεδομένα φόρτισής του, που είναι το επιβαλλόμενο φορτίο, η διάρκεια επιβολής του, η ταχύτητα εναλλαγής της φόρτισης και εκφόρτισης και φυσικά το πλήθος των εναλλαγών αυτών. Δηλαδή η επιτυχία μιας διαδικασίας

συμπύκνωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες εκτός από την ενέργεια συμπύκνωσης (η ενέργεια συμπύκνωσης είναι ανάλογη του βάρους και του είδους του οδοστρωτήρα όπως και του αριθμού διελεύσεων) και την υγρασία που ήδη έχει αναφερθεί. Αυτοί είναι η πίεση των ελαστικών και η ταχύτητα του μηχανήματος.

Η **ταχύτητα** εξάλλου, επηρεάζει ουσιαστικά και την απόδοση του μηχανήματος. Επισημαίνεται ότι, θεωρείται πολύ αποδοτικό τα της καλής ποιότητας εδάφη να συμπυκνώνονται με επιμέλεια (μεγάλη βελτίωση της μηχανικής αντοχής). Αυτό επιτυγχάνεται με μικρή αύξηση του αριθμού διελεύσεων. Ωστόσο, πέρα από κάποιον αριθμό διελεύσεων έχει ελάχιστη επιρροή στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του εδάφους.

Η **απόδοση του κάθε μηχανήματος** είναι συνάρτηση του μεγέθους του μηχανήματος, του είδους του εδάφους, της ικανότητας του χειριστή, του εύρους της μέσης κίνησης, του συντονισμού και της οργάνωσης του εργοταξίου, καθώς και της συντήρησης για ανελλιπή λειτουργία.

Στο σχήμα (Σχ. 4.2) δίνεται η σχέση μεταξύ της ταχύτητας και του όγκου του εδάφους προς συμπύκνωση και αριθμού διελεύσεων για ένα οδοστρωτήρα με μεταλλικούς κυλίνδρους (Σχ. 4.3)



Παρατηρείται ότι η απόδοση, που εκφράζεται σε όγκο συμπυκνωθέντος υλικού ανά ώρα, αυξάνει όταν μειώνεται ο αριθμός διελεύσεων από ένα συγκεκριμένο σημείο. Ο αριθμός πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6 και 8. Η εμπειρία έδειξε ότι η αύξηση του αριθμού διελεύσεων πέραν του ορίου συνήθως 8 ή 10 διελεύσεων, δεν προσφέρει ιδιαίτερα στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Το κριτήριο της εκλογής του μηχανήματος συμπύκνωσης για μια δεδομένη συμπύκνωση, είναι η ικανότητά του να συμπυκνώνει το έδαφος στον βαθμό που θέλουμε, με τον οικονομικότερο τρόπο.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπύκνωση του εδάφους με μηχανικά μέσα είναι:

- Η φύση και η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους.
- Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία.
- Το μέγιστο πάχος της εδαφικής στρώσης.
- Ο αριθμός των διελεύσεων του μηχανήματος συμπύκνωσης.
- Ο τύπος του μηχανήματος συμπύκνωσης.

Σε κάθε οδικό έργο ορίζεται, είτε από τις προδιαγραφές, είτε από τα συμβατικά τεύχη, για κάθε στρώση υλικού, ένας απαιτούμενος βαθμός συμπύκνωσης. Συνήθως η τιμή του βαθμού συμπύκνωσης στον ελληνικό χώρο είναι 90% ή 95% κατά Proctor, ενώ σε άλλες χώρες οι αντίστοιχες προδιαγραφές απαιτούν κατά περίπτωση και βαθμούς συμπύκνωσης 100%.

Για να επιτύχουμε τον απαιτούμενο βαθμό συμπύκνωσης σε μεγάλα χωματουργικά έργα είναι απαραίτητο, πριν αρχίσουν οι εργασίες, να κατασκευάσουμε πειραματικά τμήματα έτσι, ώστε να μπορούμε να καθορίσουμε, για τη φύση του εδάφους, το τύπο του μηχανήματος συμπύκνωσης, που θα μας δώσει τον απαιτούμενο βαθμό συμπύκνωσης πιο οικονομικά.



## 4.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΟΤΑΞΙΟ – ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ

Ο επιβλέπων μηχανικός, πριν αρχίσουν οι εργασίες συμπύκνωσης, πρέπει να έχει υπόψη του τα εξής:

- Το βαθμό συμπύκνωσης, που πρέπει να επιτύχει.
- Την περιεκτικότητα υγρασίας, που πρέπει να περιέχει το έδαφος, για την καλύτερη συμπύκνωση.
- Την απόδοση του μηχανήματος, που θα χρησιμοποιηθεί για την συμπύκνωση. Εδώ να σημειώσουμε ότι πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του μηχανικού εξοπλισμού που προορίζεται για συμπύκνωση. Ο τύπος του εξοπλισμού που επιλέγεται για ένα έργο είναι μερικές φορές βασισμένος στην προηγούμενη εμπειρία του ανάδοχου, στον τύπο του εδάφους ή στις προδιαγραφές. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι πόσο καλά μια μηχανή θα συμπεριφερθεί στη μεταφορά και στη διάστρωση του υλικού.

Οι κλιματολογικές και οι εδαφολογικές συνθήκες είναι επίσης σημαντικές. Οι προδιαγραφές για τον μηχανικό εξοπλισμό μερικές φορές παίζουν ρόλο στην απόφαση για το ποια διαδικασία θα ακολουθηθεί. Η συμπύκνωση των εδαφών γίνεται με μορφή ενέργειας με τρεις διαφορετικούς τρόπους (διαδικασίες) και διακρίνεται ανάλογα με την διάρκεια των τάσεων, που εφαρμόζονται.

Αυτές οι τάσεις είναι:

1. Πίεση (κυλίνδρωση).
2. Δόνηση.
3. Κρούση.

Γενικά για τη μηχανική συμπύκνωση του εδάφους χρησιμοποιούνται οι οδοστρωτήρες. Διακρίνονται σε **στατικούς** (με ελαστικά, μεταλλικά ή οδοντωτά πίσωτρα) και σε **δυναμικούς**. Επίσης διακρίνονται σε **αυτοκινούμενους** και **ελκόμενους**. Η κυλίνδρωση γίνεται με στατικούς οδοστρωτήρες, η δόνηση με δονητικούς οδοστρωτήρες και δονητικές πλάκες και η κρούση με διάφορους τύπους κοπάνων.

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μηχανήματα διακρίνονται σε **τροχοφόρα** και **ερπυστριοφόρα**.

Ερπυστριοφόρα: κάνουν καλύτερη εκμετάλλευση της ισχύος του κινητήρα δηλαδή έχουν μεγάλες ωθήσεις. Χρησιμοποιούνται σε ακραία εδάφη δηλαδή σε πολύ μαλακά ή βραχώδη, ή απότομης κλίσης. Επίσης χρησιμοποιούνται σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες καθώς και όταν η ακτίνα κίνησής τους είναι περιορισμένη. Δεν απαιτούν την κατασκευή ή την συντήρηση των προσωρινών δρόμων πρόσβασης.

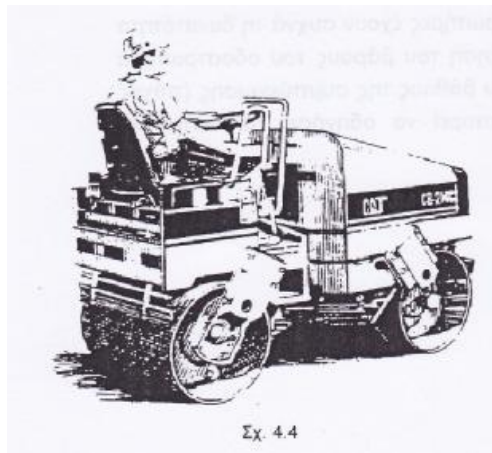
Τροχοφόρα: είναι πολύ πιο ευέλικτα και πιο γρήγορα. Μεταφέρουν στο δρόμο πολύ μικρότερη ισχύ, αφού τμήμα μόνο του βάρους τους πάει στους κινητήριους τροχούς και η προσφυγή ελαστικών – εδάφους είναι περιορισμένη (προσφέρουν όμως ευκαμψία αλλαγής ελαστικών ανάλογα με το τεραίν). Είναι τέλος, πολύ πιο άνετα για τον χειριστή.

Εδώ να σημειώσουμε ότι, οι οδοστρωτήρες έχουν συχνά τη δυνατότητα μεταβολής του βάρους τους. Έτσι η αύξηση του βάρους του οδοστρωτήρα έχει ως κύριο επακόλουθο την αύξηση του βαθμού συμπίκνωσης (πάχος στρώσης). Υπερβολικό βάρος όμως, μπορεί να οδηγήσει σε διατμητική αστοχία του εδάφους.

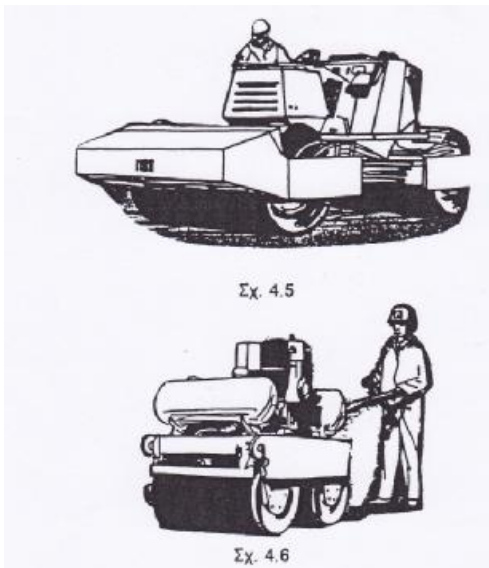
## 4.2.1 ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΟΔΟΣΤΡΩΤΗΡΕΣ ΜΕ ΛΕΙΟΥΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΣ

### α) Αυτοκινούμενοι οδοστρωτήρες δύο κυλίνδρων

Αυτά τα μηχανήματα είναι τα πρώτα του είδους και παλιά ήταν ατμοκίνητα, σήμερα όμως είναι ντιζελοκίνητα. Ο οδοστρωτήρας αυτός έχει ένα μπροστινό κύλινδρο και δύο πίσω κυλίνδρους, ο οποίος είναι ο κινητήριος. Ο πίσω κύλινδρος είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από τον μπροστινό (Σχ. 4.4).



Υπάρχουν όμως και οδοστρωτήρες με δίδυμους τροχούς στη σειρά, βάρους 8-14 tn (Σχ. 4.5).



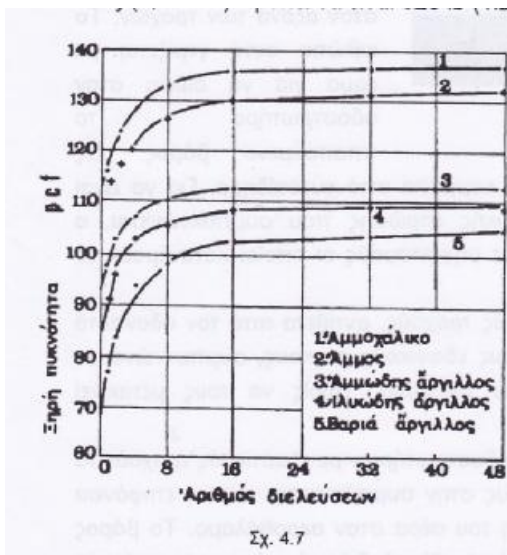
Όλοι οι κύλινδροι αποτελούν κλειστά τύμπανα τα οποία είναι δυνατό να πληρωθούν με νερό ή με υγρή άμμο και έτσι να ρυθμιστεί η απαιτούμενη ειδική φόρτιση των κυλίνδρων. Σε κάθε κύλινδρο υπάρχουν και αποξέστες για να ξεκολλάνε από τους κυλίνδρους τα προσκολλώμενα υλικού. Ακόμα υπάρχουν πάνω από τους κυλίνδρους και ψεκαστήρια νερού για να υγραίνει τους κυλίνδρους όταν αυτό απαιτείται. Η κατανομή του βάρους είναι 30% - 40% στον μπροστινό κύλινδρο και

το υπόλοιπο στους πίσω. Η ειδική φόρτιση των πίσω κυλίνδρων είναι πολύ μεγαλύτερη από του μπροστινού και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη συμύκνωση. Το βάρος του ίδιου του οδοστρωτήρα είναι από 8 - 18 tn (Σχ. 4.6).

Η ταχύτητα κατά συμπίκνωση είναι 2,5 – 5,0 km/h. Οι οδοστρωτήρες χρησιμοποιούνται σε κάθε είδους έδαφος (εκτός από καθαρά αμμώδη) και συμπυκνώνουν στρώματα πάχους από 10 – 30 cm. Ειδικά για τα αργιλώδη εδάφη πρέπει το συμπυκνωμένο στρώμα να μην υπερβαίνει τα 10 – 15 cm.

Τα στοιχεία των κοινών οδοστρωτήρων επηρεάζουν την ταχύτητα της πίεσης, η οποία ελαττώνεται με το βάθος, ενώ το φορτίο ανά μονάδα πλάτους και η διάμετρος των τροχών ελέγχουν την πίεση που ασκεί το μηχάνημα στην εδαφική στρώση. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές η ελάχιστη πίεση ανά in πλάτους (2,54cm) πρέπει να είναι 325 lb (1 lb= 0.453 kg).

Οι κοινοί οδοστρωτήρες είναι κατάλληλοι για συμπίκνωση θραυστών υλικών. Η επίδραση, (Σχ. 4.7). Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα αυτό, η ξηρή πυκνότητα ( $\gamma_d$ ) αυξάνεται πολύ γρήγορα στις 8 πρώτες διελεύσεις, ενώ στη συνέχεια η διέλευση είναι πολύ μικρή.



### β) Ρυμουλκούμενοι στατικοί λείοι κύλινδροι

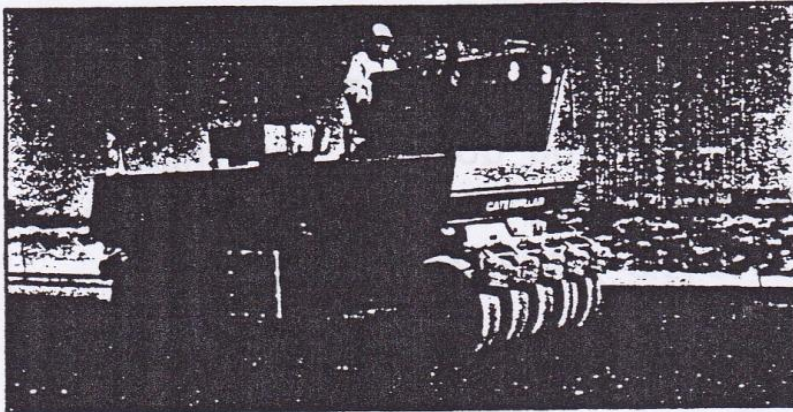
Δεν χρησιμοποιούνται σήμερα επειδή οι αυτοκινούμενοι έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα.

## 4.2.2 ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΟΔΟΣΤΡΩΤΗΡΕΣ ΜΕ ΕΛΑΣΤΙΚΑ

Οι οδοστρωτήρες με ελαστικούς τροχούς, υπάρχουν αυτοκινούμενοι ή ρυμουλκούμενοι. Τα ελαστικοφόρα μηχανήματα συμπύκνωσης χρησιμοποιούνται στα μικρά ή μεσαίου μεγέθους έργα πρωτίστως με λεπτή κοκκώδη βάση υλικών. Τα ελαστικοφόρα δεν είναι κατάλληλα για υψηλής ποιότητας συμπύκνωση σε έργα ανύψωσης λεπτού πάχους επιχώματος.

Οι ρυμουλκούμενοι έχουν έναν ή δύο άξονες και το πλαίσιό τους είναι

διαμορφωμένο σε κιβώτιο μεγάλης χωρητικότητας το οποίο εφαρμόζεται πάνω στον άξονα των τροχών. Το κιβώτιο αυτό γεμίζεται με έρμα για να δώσει στον οδοστρωτήρα το απαιτούμενο βάρος.



Σχ. 4.8

Ως έρμα χρησιμοποιείται άμμος, νερό ή κομμάτια από χυτοσίδηρο. Για να είναι ομοιογενείς η πυκνότητα της εδαφικής στρώσης που συμπυκνώνεται, ο οδοστρωτήρας είναι εφοδιασμένος με μηχανισμούς οι οποίοι κατανέμουν το φορτίο ομοιόμορφα σε κάθε τροχό.

Ο οδοστρωτήρας με ελαστικούς τροχούς, αντίθετα από τον οδοντωτό οδοστρωτήρα ο οποίος συνθλίβει τους εδαφικούς κόκκους, συμπυκνώνει με την συσπίρωση των κόκκων που προκαλεί, χωρίς να τους μετακινεί σημαντικά.

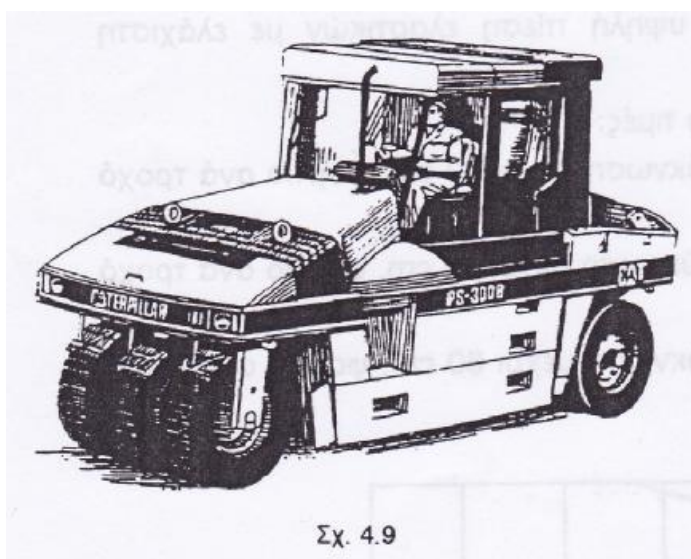
Τα κύρια χαρακτηριστικά των οδοστρωτήρων με ελαστικούς τροχούς τα οποία επηρεάζουν στην απόδοσή τους στη συμπύκνωση, είναι η επιφάνεια έδρασης των ελαστικών και η πίεση του αέρα στον αεροθάλαμο. Το βάρος του οδοστρωτήρα δεν είναι ξεχωριστή μεταβλητή, διότι είναι ίσο με το γινόμενο της επιφάνειας έδρασης και της πίεσης του ελαστικού ( $W = \pi R^2 p$ ). Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπύκνωση του εδαφικού υλικού με οδοστρωτήρα με ελαστικούς τροχούς είναι:

- Η πίεση του ελαστικού
- Το πάχος της εδαφικής στρώσης
- Ο αριθμός διελεύσεων του μηχανήματος

Ένα από τα πλεονεκτήματα του ελαστικοφόρου οδοστρωτήρα είναι η δημιουργία οριζόντιων δυνάμεων συμπίκνωσης, εκτός από των κατακόρυφων. Οι οριζόντιες δυνάμεις επενεργούν προς όλες τις κατευθύνσεις. Με αυτές μετατοπίζονται οι εδαφικοί κόκκοι προς όλες τις διευθύνσεις, πράγμα που είναι απαραίτητο για ομοιόμορφη συμπίκνωση και αύξηση της πυκνότητας. Η δημιουργία δυνάμεων σε κατακόρυφα και οριζόντια επίπεδα σε συνδυασμό με την ελαστικότητα των τροχών (ενέργεια ζύμωσης), δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα συμπίκνωσης.

Οι δυνάμεις συμπίκνωσης που παράγονται από τους ελαστικούς τροχούς δουλεύουν από την κορυφή του στρώματος του επιχώματος προς τα κάτω, προκαλώντας την μεγαλύτερη πυκνότητα. Το μέγεθος των δυνάμεων συμπίκνωσης μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την πίεση των ελαστικών ή την αλλαγή του έρματος (πρόσθετο βάρος που βοηθά στην ισορροπία του μηχανήματος). Η αναζύμωση προέρχεται από την εναλλαγή των τύπων των ελαστικών που βοηθά να διαμορφωθεί η επιφάνεια.

Ένα πλεονέκτημα που έχουν οι ελαστικοφόροι οδοστρωτήρες είναι το ότι υπάρχει μικρή αλληλεπίδραση μεταξύ των τροχών. Έτσι, οι τροχοί «ψάχνουν» μαλακά σημεία που μπορεί να υπάρχουν στο επίχωμα. Γι' αυτό το λόγο, πολλές φορές αναφέρονται ως «αδιαπέρατοι» τροχοί.



Οι οδοστρωτήρες δύο αξόνων έχουν διατεταγμένους έτσι τους τροχούς ώστε οι πίσω τροχοί να καλύπτουν κατά την πορεία τα κενά που αφήνουν μεταξύ τους οι μπροστινοί. Ο ελαστικοφόρος κύλινδρος δεν προωθεί το υλικό και έτσι δεν δημιουργούνται ρήγματα στην επιφάνεια που συμπυκνώνεται.

Ρωγμές, οι οποίες δημιουργούνται από χαλύβδινους κυλίνδρους, κλείνουν με μια επιπλέον διέλευση ελαστικοφόρου κυλίνδρου.

Οι αυτοκινούμενοι οδοστρωτήρες ελαστικών τροχών μοιάζουν γενικά με τους ρυμουλκούμενους δύο αξόνων. Πρέπει όμως να ρυθμίζεται η πίεση των ελαστικών σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές. Χάρης στην ασκούμενη πίεση και στην μάλαξη του συμπυκνωμένου εδάφους οι οδοστρωτήρες αυτοί έχουν δυνατότητα συμπύκνωσης μεγάλου στρώματος εδάφους με μικρό σχετικά αριθμό διαβάσεων.

Η πίεση από έναν ελαστικοφόρο οδοστρωτήρα δεν ασκείται κατά μήκος μιας γενέτειρας, όπως στους χαλύβδινους κυλίνδρους, αλλά σε μια επιφάνεια η οποία σχηματίζεται από το ελλειψοειδές ίχνος ελαστικού. Το μέγεθος της επιφάνειας επαφής μπορεί να μεταβληθεί με αυξομείωση του στατικού φορτίου ή της εσωτερικής πίεσης του ελαστικού. Έτσι, η αύξηση του βάρους του οδοστρωτήρα με συμπλήρωση έρματος με σταθερή πίεση ελαστικών, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας επαφής, άρα και της πίεσης επαφής. Αντίθετα, η αύξηση της πίεσης των ελαστικών με σταθερό βάρος οδοστρωτήρα, έχει ως αποτέλεσμα μείωση της επιφάνειας επαφής.

Ο ελαστικοφόρος οδοστρωτήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε συνεκτικά και σε μη συνεκτικά (ψαθυρά) εδάφη, εφόσον το φορτίο ανά τροχό και η πίεση των ελαστικών έχουν τις σωστές τιμές.

Αμμώδη υλικά συμπυκνώνονται σε βάθος καλύτερα με μεγάλο φορτίο τροχού και μεγάλη πίεση ελαστικών. Αντίθετα, τα επιφανειακά στρώματα συμπυκνώνονται καλύτερα με μικρό φορτίο τροχού και χαμηλή πίεση ελαστικού.

Τέλος, ακόμα ένα πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε έδαφος, είτε σε άσφαλτο. Έτσι ο ανάδοχος κατασκευαστής μπορεί να έχει έναν οδοστρωτήρα και για τις δύο φάσεις του έργου, συμπύκνωση εδάφους και ασφάλτου.

Τα συνεκτικά υλικά απαιτούν υψηλή πίεση ελαστικών με ελάχιστη πίεση 6 at.

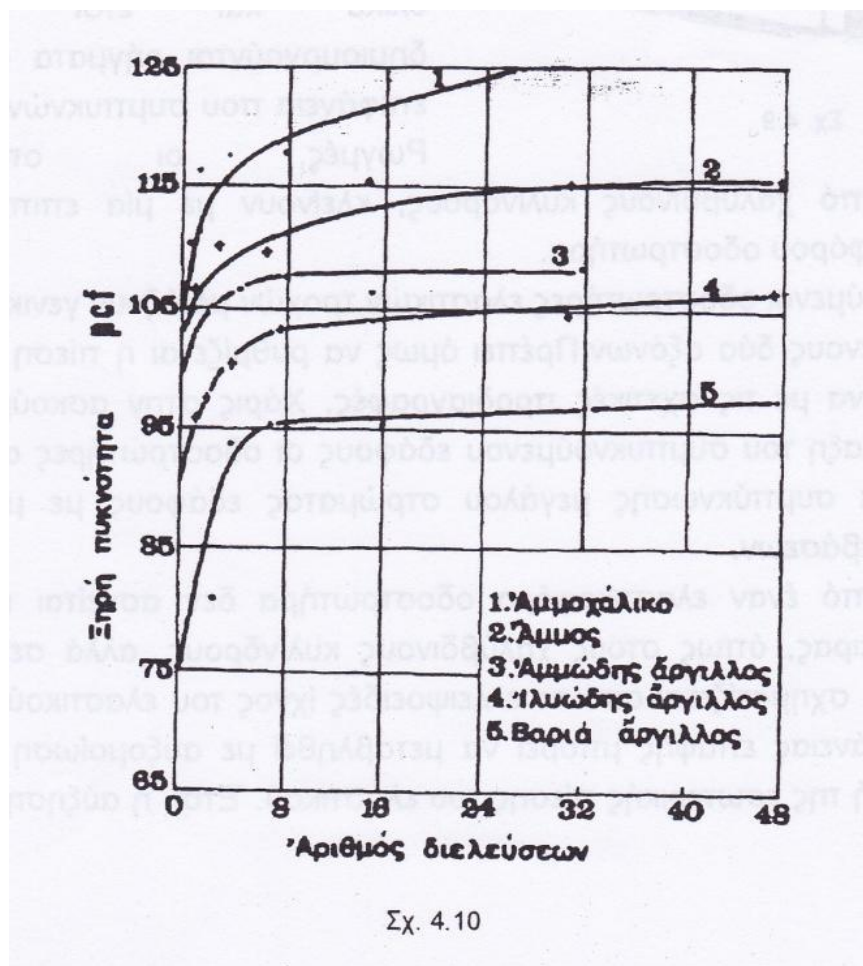
Ενδεικτικά δίνονται οι παρακάτω τιμές:

- Πάχος στρώσης πριν από τη συμπύκνωση μέχρι 30 cm, φορτίο ανά τροχό 1,5 – 2,0 tn.
- Πάχος στρώσης πριν από τη συμπύκνωση μέχρι 45 cm, φορτίο ανά τροχό 2,5 – 3,0 tn.

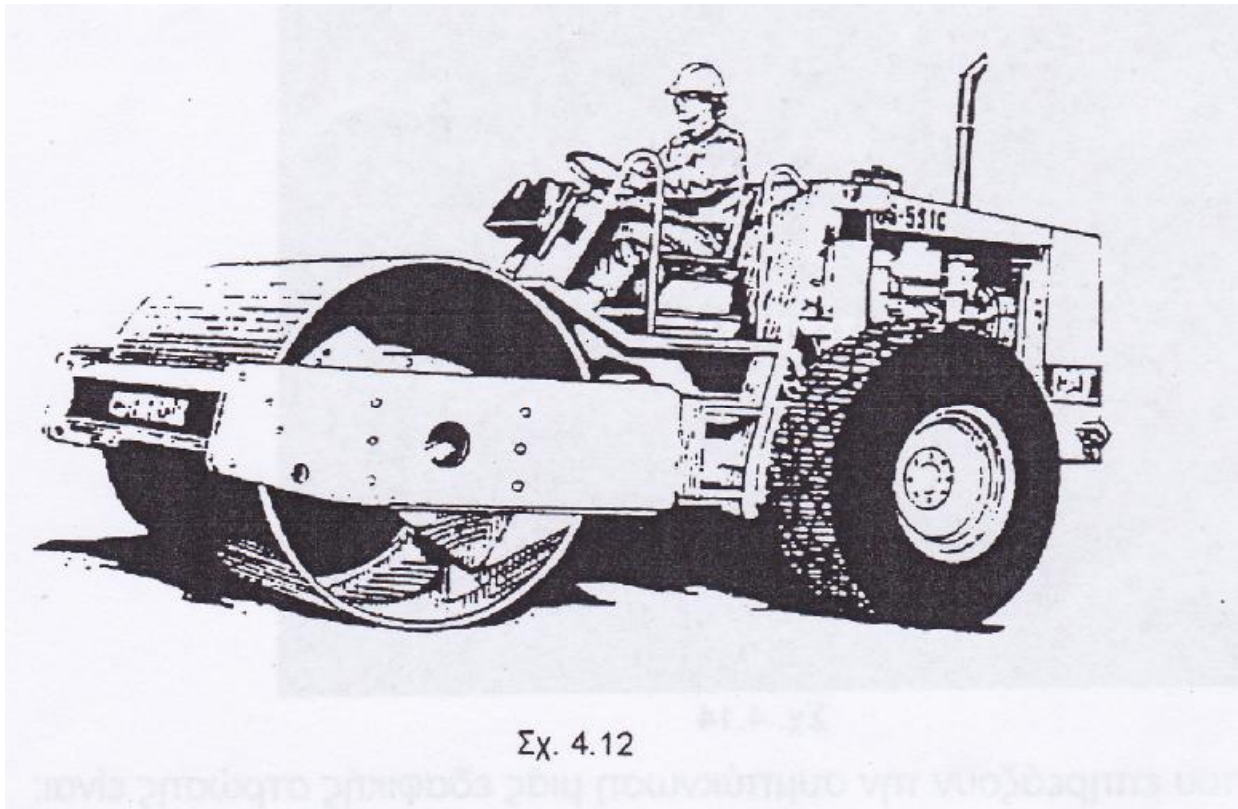
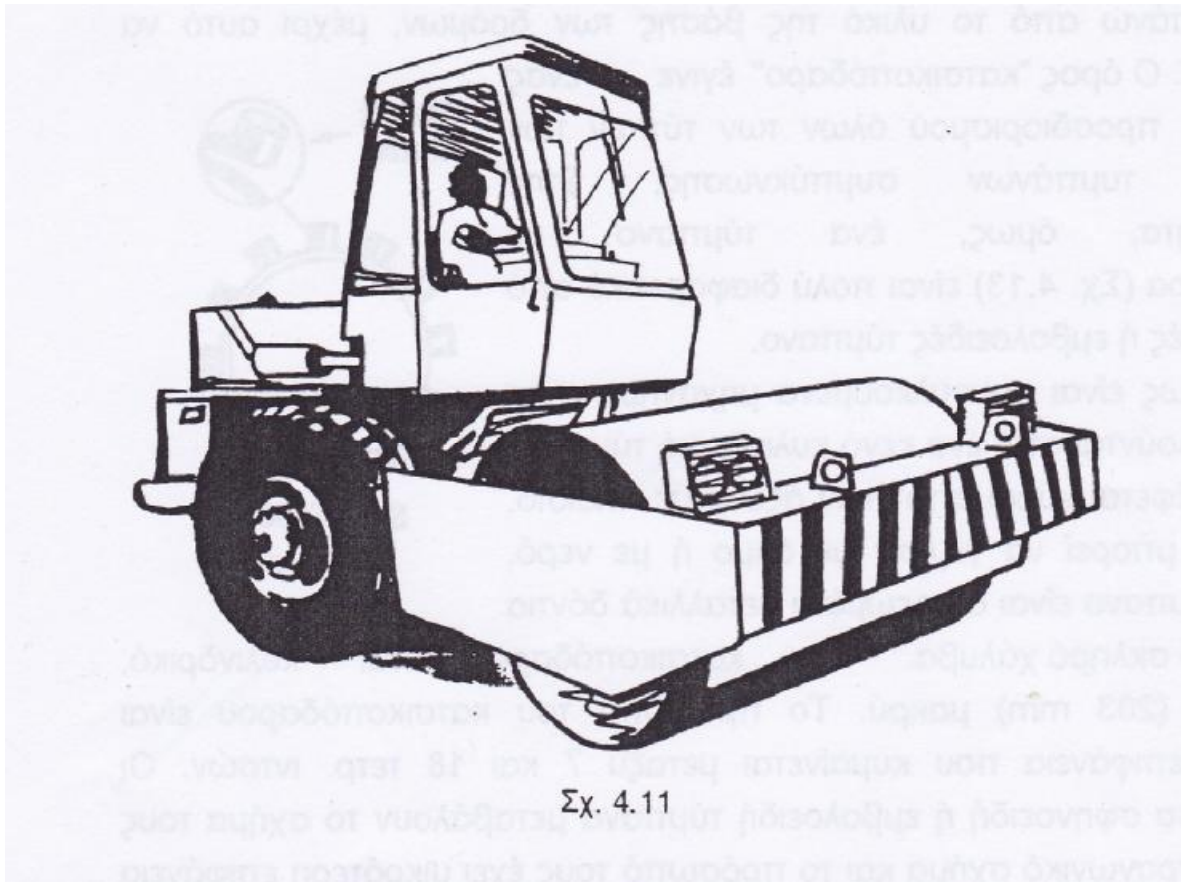
- Πάχος στρώσης πριν από τη συμπύκνωση μέχρι 60 cm, φορτίο ανά τροχό 4,0 – 5,0 tn.

Στο διάγραμμα (Σχ. 4.10) φαίνεται η σχέση μεταξύ ξηρής πυκνότητας πέντε διαφορετικών εδαφών και αριθμού διελεύσεων οδοστρωτήρα με ελαστικούς τροχούς βάρους 12 tn και πίεση αεροθαλάμου 2,6 kg/cm<sup>2</sup>.

Στα σχήματα (Σχ. 4.11) & (Σχ. 4.12) φαίνεται ο συνδυασμός ελαστικοφόρου οδοστρωτήρα και οδοστρωτήρα με χαλύβδινο κύλινδρο.



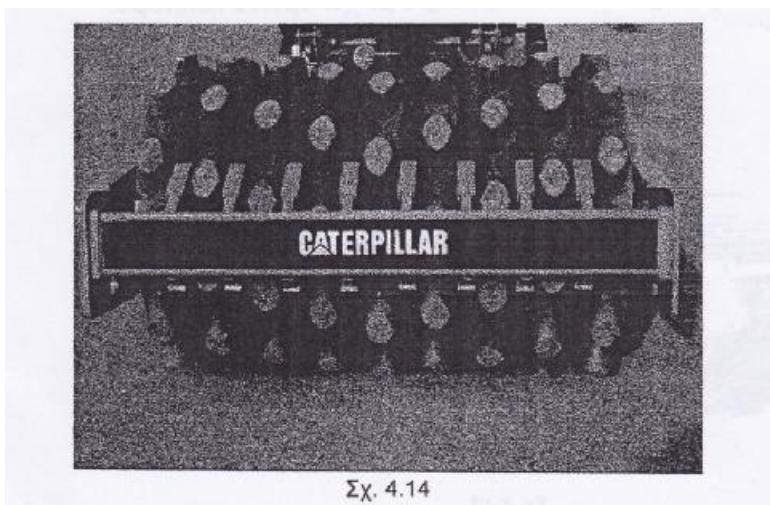
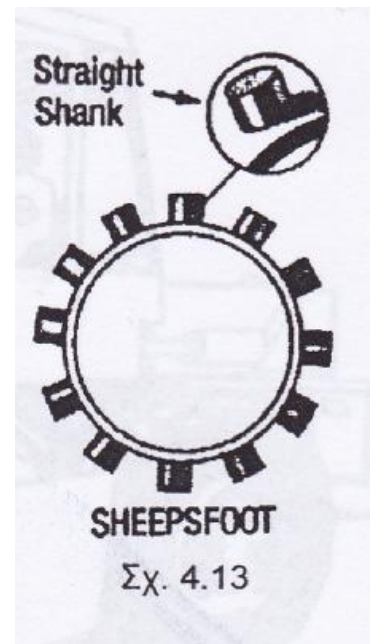




### 4.2.3 ΣΤΑΤΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΟΔΟΣΤΡΩΤΗΡΕΣ (ΜΕ ΚΑΤΣΙΚΟΠΟΔΑΡΑ)

Οι τροχοί με κατσιοκόδαρα ονομάστηκαν έτσι από το γεγονός ότι οι αρχαίοι Ρωμαίοι οδοποιοί χρησιμοποιούσαν κοπάδια κατσιοκών, τα οποία περνούσαν πάνω από το υλικό της βάσης των δρόμων, μέχρι αυτό να συμπυκνωθεί. Ο όρος «κατσιοκόδαρο» έγινε ένας γενικός όρος προσδιορισμού όλων των τύπων των σφηνοειδών τυμπάνων συμπήκνωσης. Στην πραγματικότητα, όμως, είναι πολύ διαφορετικό από ένα σφηνοειδές ή εμβολοειδές τύμπανο.

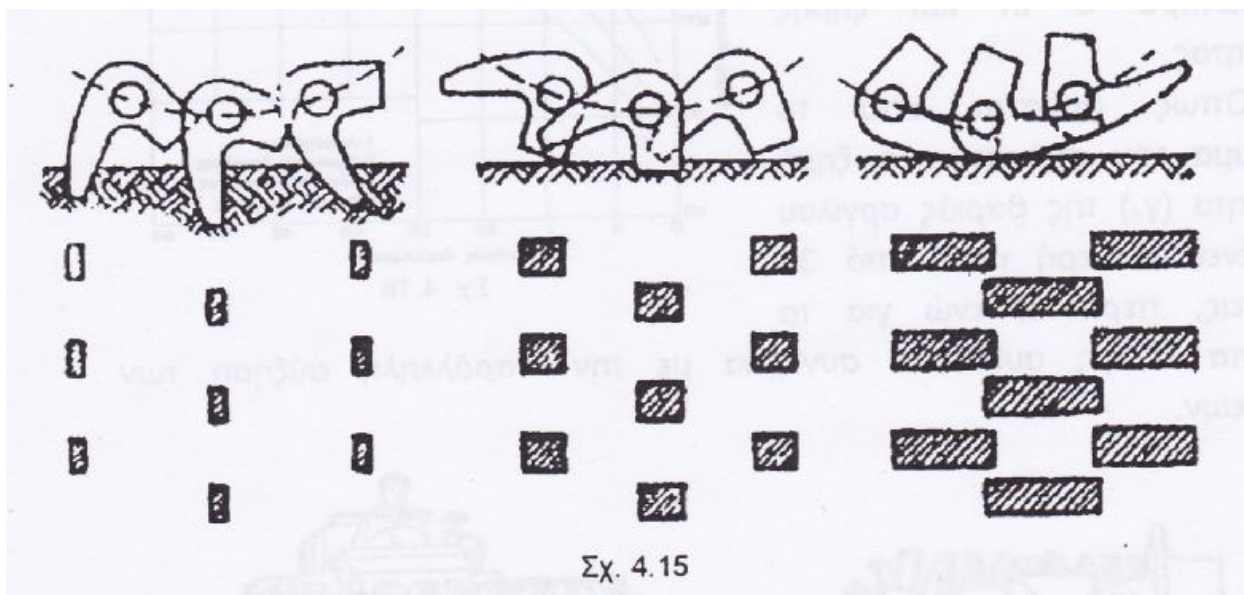
Συνήθως είναι ρυμουλκούμενα μηχανήματα τα οποία αποτελούνται από ένα κενό κυλινδρικό τύμπανο που περιστρέφεται γύρω από τον άξονα με πλαίσιο. Το τύμπανο μπορεί να γεμίσει με άμμο ή με νερό. Πάνω στο τύμπανο είναι στερεωμένα μεταλλικά δόντια με άκρες από σκληρό χάλυβα. Το κατσιοκόδαρο είναι κυλινδρικό, συνήθως 8'' (203 mm) μακρύ. Το πρόσωπο του κατσιοκόδαρου είναι κυκλικό, με επιφάνεια που κυμαίνεται μεταξύ 7 και 18 τετρ. Ιντσών. Οι προεξοχές στα σφηνοειδή ή εμβολοειδή τύμπανα μεταβάλουν το σχήμα τους σε οβάλ ή τετραγωνικό σχήμα και το πρόσωπό τους έχει μικρότερη επιφάνεια από του κατσιοκόδαρου. (Σχ. 4.14). αυτή είναι μια πολύ σημαντική διαφορά.



Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπύκνωση μιας εδαφικής στρώσης είναι:

1. οι διαστάσεις των δοντιών
2. η πίεση των δοντιών
3. το πάχος της εδαφικής στρώσης
4. ο αριθμός διελεύσεων

Η επίδραση της πίεσης του δοντιού είναι ο κυριότερος παράγοντας για τη συμπύκνωση της εδαφικής στρώσης, η οποία είναι συνάρτηση του βάρους του. Η πίεση του δοντιού πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη, αλλά όμως δε πρέπει να υπερβεί μια μέγιστη τιμή η οποία να είναι συνάρτηση της φέρουσας αντοχής του εδάφους. Έτσι, υπάρχει ένα ανώτατο όριο πίεσης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και που διαφέρει ανάλογα με τη φύση του εδάφους. Οι προεξοχές στ τύμπανα με κατσικοπόδαρα διαπερνούν το ανώτερο στρώμα και ουσιαστικά συμπυκνώνουν το κατώτερο. Όταν μια προεξοχή βγάνει έξω από το έδαφος δημιουργεί μια εσοχή στην επιφάνεια του υλικού από το ανώτερο στρώμα εδάφους (Σχ. 4.15).



Όταν στη συνέχεια διαστρωθεί νέο υλικό, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και συμπυκνώνεται το προηγούμενο εδαφικό στρώμα. Στην πραγματικότητα ο συμπυκνωτής με κατσικοπόδαρα συμπυκνώνει από τη βάση προς τη κορυφή.

Η χρησιμοποίηση ενός οδοστρωτήρα με κατσικοπόδαρα έχει ένα δεδομένο πλεονέκτημα. Επειδή η επιφάνεια του εδάφους παίρνει τη μορφή που περιγράψαμε προηγούμενα (εσοχές στο ανώτερο στρώμα του επιχώματος), η διαδικασία επιτρέπει τον αερισμό και την ξήρανση των υγρών αργίλων και ιλύων.

Η συμπύκνωση με οδοντωτό οδοστρωτήρα μπορεί να παρασταθεί με τον παρακάτω τρόπο:

Στην πρώτη διέλευση του οδοστρωτήρα, σε στρώση που έχει διαστρωθεί πρόσφατα, η διείσδυση των δοντιών είναι μεγάλη, επειδή το έδαφος είναι χαλαρό, άρα και η πυκνότητα αυξάνει, άρα και η φέρουσα αντοχή του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μικρότερη διείσδυση των δοντιών.

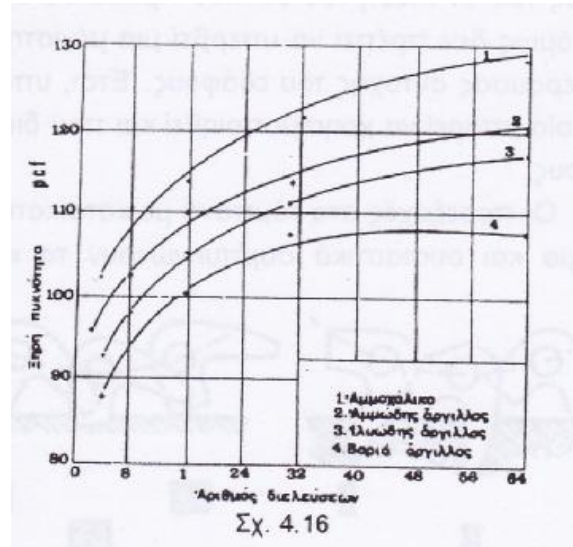
Οι πιέσεις των δοντιών του μέσου βάρους οδοντωτού οδοστρωτήρα κυμαίνονται μεταξύ 100 και 400 psi ( $1\text{psi}=0.07\text{kg/cm}^2$ ). Στον πολύ βαρύ οδοντωτό οδοστρωτήρα οι πιέσεις του δοντιού φτάνουν μέχρι 1000 psi.

Οι οδοντωτοί οδοστρωτήρες είναι περισσότερο κατάλληλοι για συμπύκνωση λεπτόκοκκων συνεκτικών εδαφών. Στο (Σχ. 4.16) παρουσιάζεται οι σχέση μεταξύ του αριθμού διελεύσεων οδοντωτού οδοστρωτήρα 5 tn και ξηρής πυκνότητας.

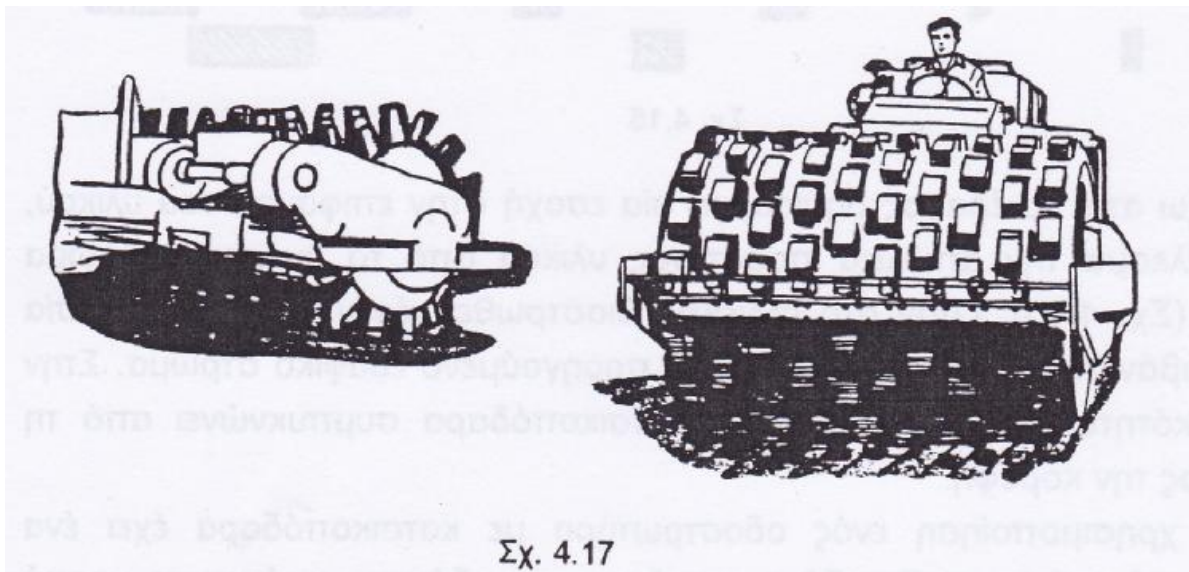
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα (γ<sub>d</sub>) της βαριάς αργίλου παραμένει σταθερή μετά από 32 διελεύσεις, περίπου, ενώ για τα υπόλοιπα εδάφη αυξάνεται συνέχεια με την παράλληλη αύξηση των διελεύσεων.

Οι συμπυκνωτές με κατσικοπόδαρα μπορούν να λειτουργήσουν μόνο με ταχύτητα 6-10km/h, γεγονός που εκμηδενίζει οποιοδήποτε όφελος από τη διείδυση και τη δόνηση. Η πίεση και η παραμόρφωση είναι οι μόνες δυνάμεις συμπυκνώσεις που ασκούνται στο έδαφος.

Συνήθως 6-10 διελεύσεις είναι αναγκαίες για τη συμπύκνωση στρώματος πάχους 8'' (203 mm).



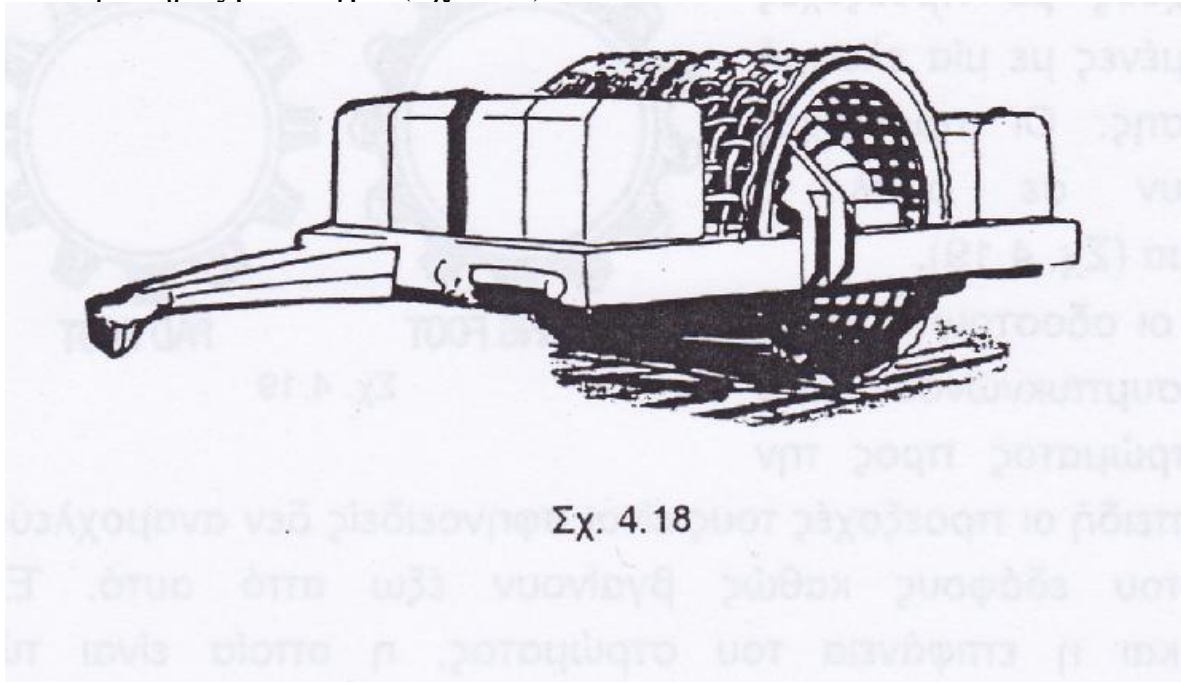
Σχ. 4.16



Σχ. 4.17

Όμως τα μειονεκτήματα των συμπυκνωτών με κατσικοπόδαρα είναι πολυάριθμα. Επειδή οι οδοντωτοί οδοστρωτήρες κατά τη συμπύκνωση μετά τη δράση των οδοντωτών οδοστρωτήρων, οδοστρωτήρες με ελαστικούς τροχούς για την συμπύκνωση της χαλαρής επιφάνειας της εδαφικής στρώσης. Η απώλεια εδαφικού υλικού στην επιφάνεια είναι δυνατόν να κάνει το έδαφος να λειτουργήσει σαν σπόγγος όταν βρέξει και άρα να καθυστερήσει η πρόοδος της συμπύκνωσης. Επίσης, η απώλεια αυτή, δυσκολεύει την διέλευση των μηχανημάτων διάστρωσης νέου υλικού, με αποτέλεσμα, την καθυστέρηση του έργου.

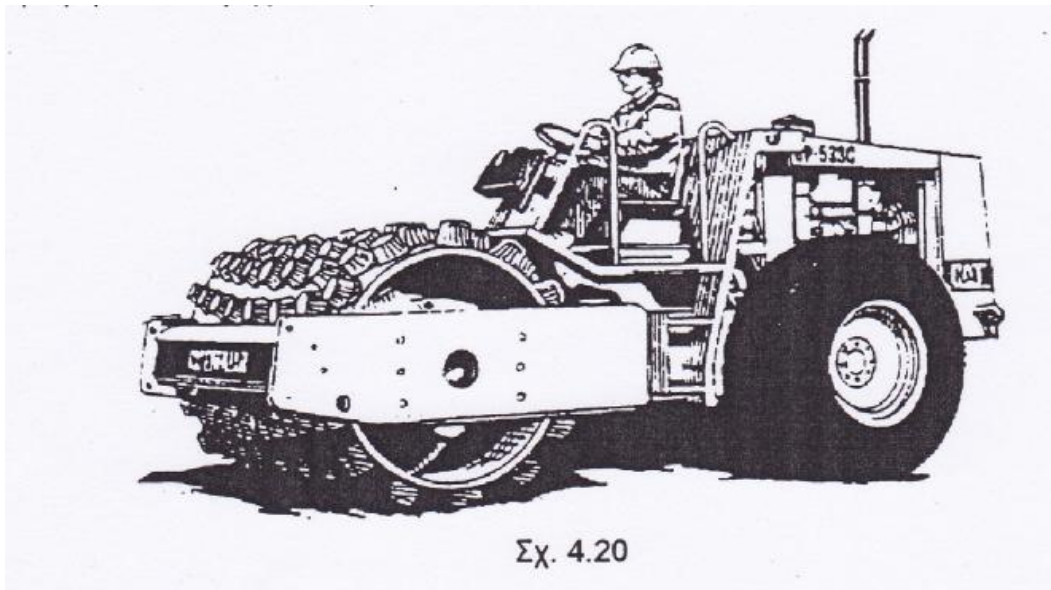
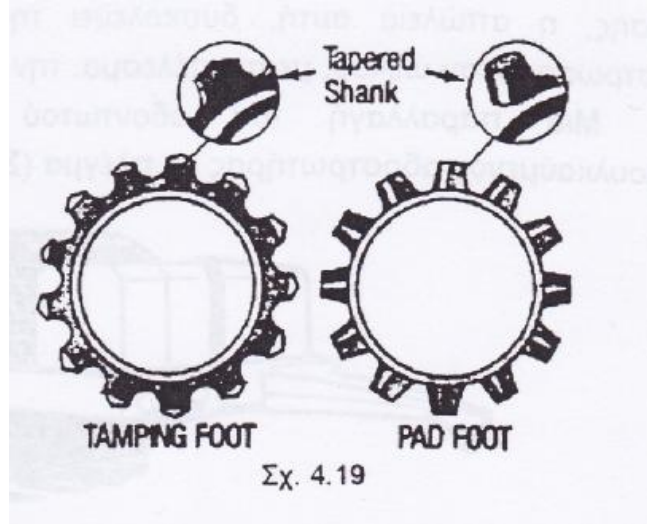
Μια παραλλαγή του οδοντωτού οδοστρωτήρα είναι και ο ρυμουλκούμενος οδοστρωτήρας με πλέγμα (Σχ. 4.18).



#### **4.2.4 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΥΜΠΑΝΑ ΣΦΗΝΟΕΙΔΩΝ ΠΡΟΕΞΟΧΩΝ**

Τα μηχανήματα αυτά είναι υψηλής ταχύτητας, αυτοκινούμενα και μη δονητικά. Συνήθως έχουν τέσσερις μεταλλικούς τροχούς με προεξοχές και είναι οπλισμένες με μια ελαφρή λεπίδα προώθησης. Οι προεξοχές τους καταλήγουν σε οβάλ ή τετραγωνικό σχήμα (Σχ. 4.19).

Όπως και οι οδοστρωτήρες με κατσικοπόδαρα συμπυκνώνουν από τη βάση του στρώματος προς την κορυφή. Όμως, επειδή οι προεξοχές τους είναι σφηνοειδείς δεν αναμοχλεύουν την επιφάνεια του εδάφους καθώς βγαίνουν από αυτό. Έτσι συμπυκνώνεται και η επιφάνεια του στρώματος, η οποία είναι τώρα ομοιόμορφα λεία. (Σχ. 4.20).



Επειδή αυτά τα μηχανήματα δουλεύουν με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 24 και 32 km/h, αναπτύσσουν και τις τέσσερις δυνάμεις συμπυκνώσεις: πίεση, κρούση, δόνησης και παραμόρφωση. Αυτό αυξάνει την ικανότητά τους για συμπύκνωση και παραγωγή.

Γενικά, δύο με τρεις διελεύσεις παρέχουν τις επιθυμητές πυκνότητες σε στρώματα πάχους 8''-12'' (203-305 mm), παρόλο που μπορεί να απαιτηθούν

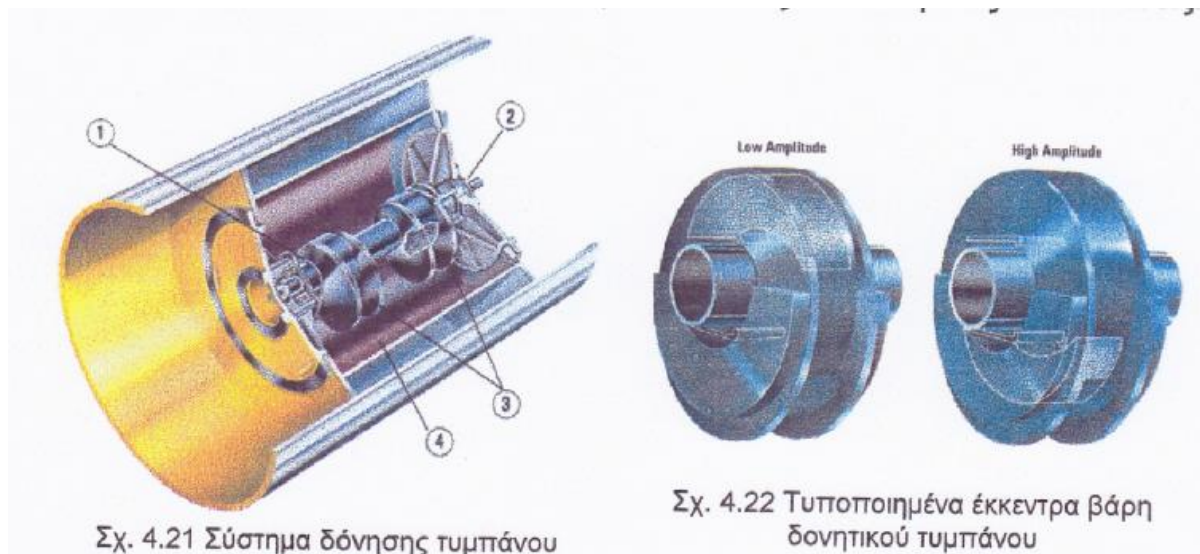
τέσσερις διελεύσεις σε ιλύ με μικρό βαθμό πλαστικότητα ή σε πολύ λεπτή άργιλο. Οι οδοστρωτήρες αυτοί είναι αποτελεσματικοί σε όλα τα εδάφη, εκτός από την καθαρή άμμο.

Το μόνο μειονέκτημα ή περιορισμός, στη χρησιμοποίηση των συμπυκνωτών με σφηνοειδή τύμπανα είναι η καταλληλότητά τους σε μεγάλα έργα. Χρειάζονται μεγάλες και αδιάκοπες διελεύσεις για να αναπτύξουν την ταχύτητα που εξασφαλίζει υψηλή απόδοση. Τέλος, είναι αρκετά πιο ακριβοί από τους οδοστρωτήρες με απλό δονητικό τύμπανο.

#### **4.2.5 ΔΟΝΗΤΙΚΟΙ ΟΔΟΣΤΡΩΤΗΡΕΣ (ΛΕΙΩΝ ΤΥΜΠΑΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕ ΚΑΤΣΙΚΟΠΟΔΑΡΑ)**

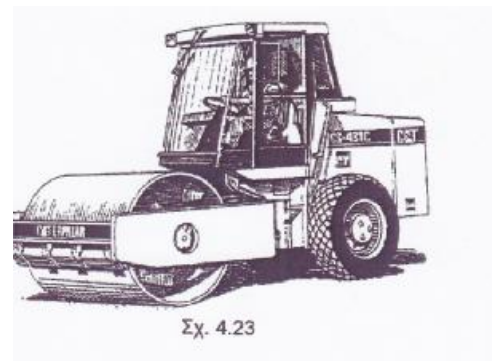
Οι δονητικού οδοστρωτήρες είναι μηχανήματα συμπύκνωσης αυτοκινούμενα ή ρυμουλκούμενα τα οποία συμπυκνώνουν το έδαφος με δόνηση. Οι αυτοκινούμενοι παρόλο που έχουν εκσυγχρονιστεί αρκετά, εξακολουθούν να μειονεκτούν έναντι των ρυμουλκούμενων, επειδή ο χειριστής καταπονείται πολύ από τις δονήσεις.

Μοιάζουν με τους αντίστοιχους Στατικούς με τη διαφορά ότι στους κυλίνδρους υπάρχουν δονητές που προκαλούν τις απαιτούμενες ταλαντώσεις.



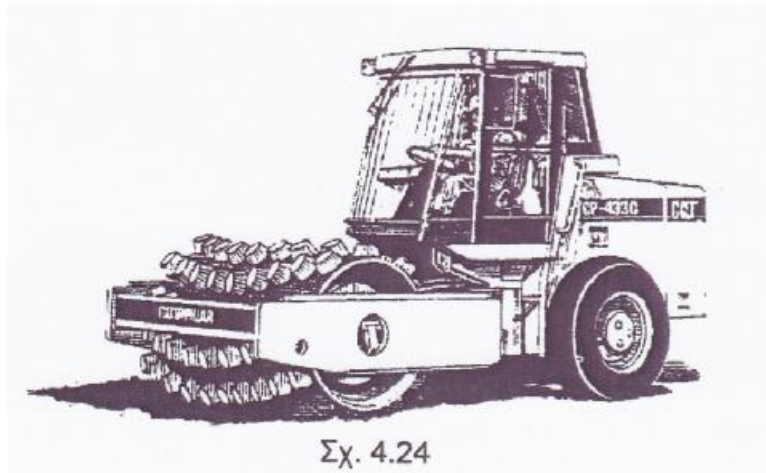
Στους δονητικούς οδοστρωτήρες είναι δυνατό να ρυθμιστεί η συχνότητα των ταλαντώσεων, καθώς επίσης και η ταλαντώμενη δύναμη. Η δόνηση χαρακτηρίζεται από το πλάτος της και από τη συχνότητά της. Η επίδραση των δονήσεων στην πυκνότητα του εδάφους, έχει μεγάλη σημασία. Για να επιταχύνουμε μεγάλη συμπύκνωση, θα πρέπει να υπάρξει συντονισμός μεταξύ εδάφους και δονητή. Για κάθε έδαφος, ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμισή του, υπάρχει ορισμένη συχνότητα δονήσεων (φυσική συχνότητα εδάφους), όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη πυκνότητά του. Η κρίσιμη συχνότητα δονήσεων του δονητή για μια ικανοποιητική συμπύκνωση κυμαίνεται από 0,5-1,5 της φυσικής συχνότητας του εδάφους.

Οι δονητικοί συμπυκνωτές βασίζονται στην αρχή της ανακατάταξης των εδαφικών κόκκων για μείωση των κενών και αύξηση της πυκνότητας. Παράγονται σε δύο τύπους: με **λείο τύμπανο** (Σχ. 4.23) ή με **τύμπανο με προεξοχές** (Σχ. 4.24).





Οι δονητικοί οδοστρωτήρες με λείο τύμπανο αναπτύσσουν τρεις δυνάμεις συμπίκνωσης: πίεση, κρούση και δόνηση. Τα μηχανήματα με τύμπανο με προεξοχές (κατσικοπόδαρα), αναπτύσσουν επιπλέον και παραμορφωτική δύναμη.



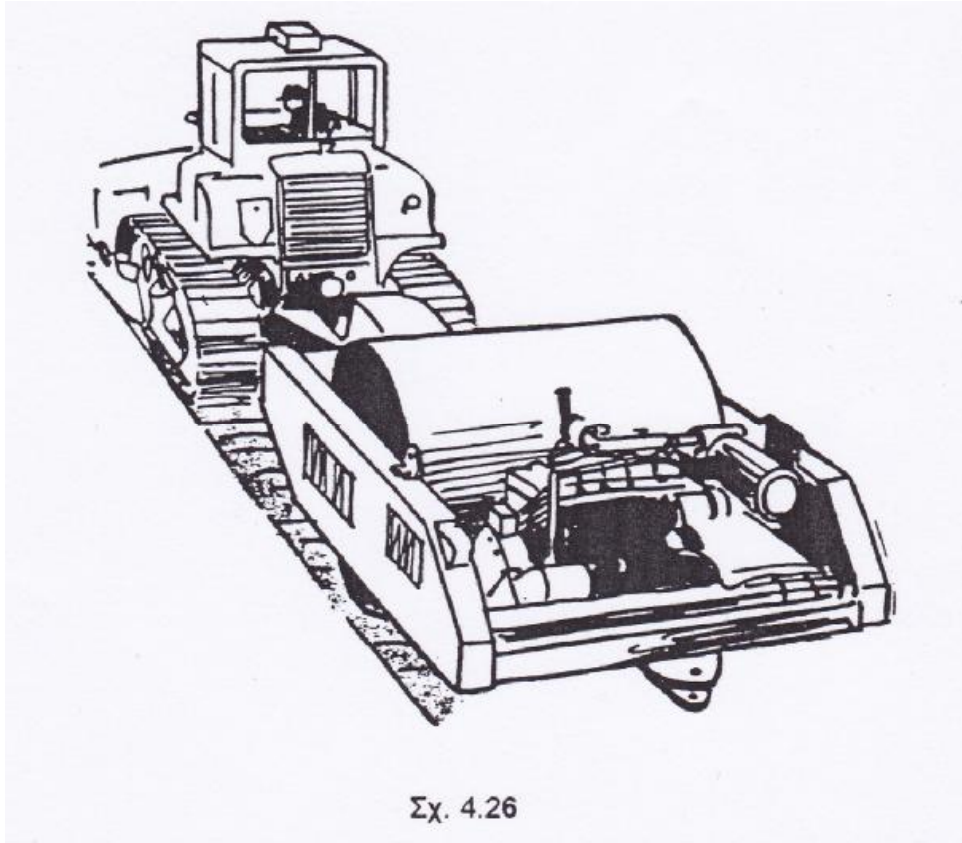
Η συμπίκνωση με δονητικούς οδοστρωτήρες θεωρείται ομοίμορφη σε όλο το στρώμα, και παρουσιάζει το πλεονέκτημα της γρήγορης διεύθεσης των εδαφικών κόκκων σε πυκνότερη θέση με εφαρμογή μικρότερης ενέργειας συμπίκνωσης και μικρότερο βάρος εξοπλισμού. Η πυκνότητα επιτυγχάνεται μέσω των δυνάμεων που αναπτύσσονται από ένα δονητικό τύμπανο που προσκρούει στο έδαφος. Τα αποτελέσματα της συμπίκνωσης είναι συνάρτηση της συχνότητας αυτών των χτυπημάτων, της δύναμης τους, καθώς και της χρονικής περιόδου που αυτά εφαρμόζονται στο έδαφος.



Η σχέση μεταξύ συχνότητας και χρόνου είναι υπολογίσιμη για μικρότερες ταχύτητες διέλευσης στους δονητικούς οδοστρωτήρες. Η ταχύτητα διέλευσης είναι σημαντική γιατί υπαγορεύει τον βαθμό συμπίκνωσης ενός συγκεκριμένου

μέρους επιχώματος. Για τους δονητικούς συμπυκνωτές, μια ταχύτητα μεταξύ 3,2 και 6,4 km/h εξασφαλίζει καλύτερα αποτελέσματα.

Ο ρυμουλκούμενος δονητικός κύλινδρος χρησιμοποιείται πάρα πολύ, λόγω της ικανοποιητικής συμπύκνωσης, του αυξημένου στατικού βάρους και του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας σε σχέση με ισοδύναμο αυτοκινούμενο δονητικό οδόστρωμα. Για την έλξη του δονητικού κυλίνδρου χρησιμοποιούνται



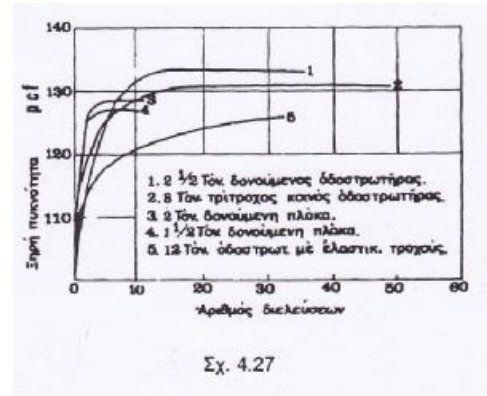
ερπυστριοφόροι προωθητές (Σχ. 4.26).

Οι δονητικοί κύλινδροι και οι επίπεδοι δονητές υψηλής συχνότητας (2100-3000 στροφές/λεπτό) δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε μη συνεκτικό θραυστό υλικό με ομοιόμορφη διαβάθμιση. Οι βαρύτεροι δονητικοί κύλινδροι, συνήθως ρυμουλκούμενοι χαμηλής συχνότητας (1500-2100 στροφές/λεπτό) είναι περισσότερο κατάλληλοι για τη συμπύκνωση συνεκτικών αμμοχαλικών και άλλων συνεκτικών εδαφών.

Η ταχύτητα διέλευσης του δονητικού οδοστρωτήρα πάνω από τη στρώση που πρόκειται να συμπυκνωθεί, επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης. Η βέλτιστη ταχύτητα διέλευσης για αυτοκινούμενους ή ρυμουλκούμενους δονητικούς οδοστρωτήρες κυμαίνεται μεταξύ 1,5-2,0 km/h. Η ταχύτητα και ο αριθμός των απαραίτητων διελεύσεων εξαρτάται από τη φύση του εδάφους, από τον επιθυμητό βαθμό συμπύκνωσης και από το πάχος της στρώσης.

Η σχέση μεταξύ της ξηρής πυκνότητας άμμου η οποία έχει συμπυκνωθεί με τη βέλτιστη εργοταξιακή υγρασία σε στρώσεις πάχους 23cm, με τις διελεύσεις διαφορετικού τύπου δονητών, κοινού οδοστρωτήρα 8 tn και οδοστρωτήρα με ελαστικούς τροχούς 12 tn, φαίνεται στο (Σχ. 4.27).

Οι δονητικοί συμπυκνωτές με λείο τύμπανο ήταν τα πρώτα μηχανήματα που παρουσιάστηκαν και είναι κυρίως αποτελεσματικά σε κοκκώδη υλικά, με μέγεθος κόκκου κυμαινόμενο μεταξύ μεγάλων λίθων και λεπτής άμμου. Χρησιμοποιούνται, επίσης, σε ημισυνεκτικά εδάφη με το πολύ 10% περιεχόμενο συνεκτικό έδαφος.

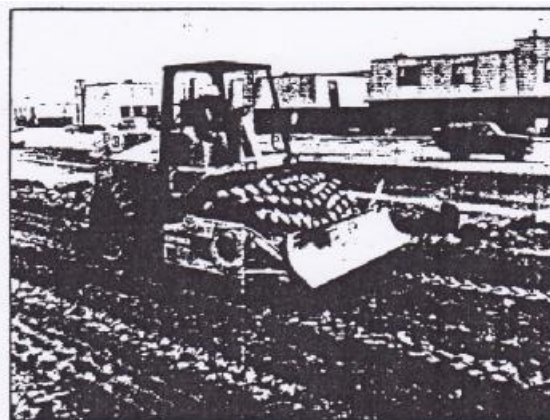


Σχ. 4.27

Η συμπύκνωση με δονητή είναι τόσο αποτελεσματικότερη όσο το έδαφος παρουσιάζει μεγαλύτερη γωνία εσωτερικής τριβής και μικρή συνοχή, επειδή οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των κόκκων εμποδίζουν την γρηγορότερη διευθέτησή τους. Άρα για να έχει επιτυχία η συμπύκνωση με δονητή, θα πρέπει το έδαφος να παρουσιάζει γωνία τριβής, δηλαδή να είναι κοκκώδες.

Είναι αποδοτικοί (μεγαλύτερο πάχος στρώσεων με λιγότερες διελεύσεις) για τα μη συνεκτικά εδάφη, αφού η δόνηση παρέχει περισσότερη ενέργεια η οποία υπερνικά ευκολότερα την εσωτερική τριβή και καταλήγει σε πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων. Είναι όμως ακατάλληλοι για συνεκτικά εδάφη, γιατί η δόνηση θα είχε ως μοναδικό αποτέλεσμα τη στιγμιαία αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, αφήνοντας ανεπηρέαστη την ενεργό τάση η οποία προκαλεί τελικά την πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων.

Το πάχος του στρώματος ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του συμπυκνωτή, όμως γενικά, το πάχος στρώματος για κοκκώδες υλικό δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 24'' (607 mm), όμως με τους δονητικούς συμπυκνωτές επιτυγχάνεται βάθος συμπύκνωσης μέχρι και 80 cm. Όταν χρησιμοποιούνται μεγάλοι λίθοι στο επίχωμα, το στρώμα μπορεί να είναι πολύ παχύ – στρώματα μέχρι και πάχους 1,2 m δεν είναι ασυνήθιστα. Ένα πράγμα που πρέπει να θυμόμαστε σε αυτή την περίπτωση, είναι ότι το πάχος πρέπει να είναι περίπου 1 πόδι (305 mm) περισσότερο από το μέγιστο μέγεθος κόκκου. Αυτό επιτρέπει συμπύκνωση στρώματος εδάφους χωρίς την προεξοχή μεγάλων λίθων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχ. 4.28

Όταν άρχισαν να παράγονται οι συμπυκνωτές με κατσικοπόδαρα,

το φάσμα των υλικών επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει εδάφη με το πολύ 50% συνεκτικό υλικό και μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκων. Όταν το κατσιοπόδαρο τρυπάει την άνω επιφάνεια του στρώματος, σπάει τους φυσικούς δεσμούς μεταξύ των κόκκων συνεκτικού εδάφους και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη συμπύκνωση. Οι προεξοχές του τυμπάνου είναι έτσι κατασκευασμένες ώστε να μην αναμοχλεύουν το έδαφος κατά την έξοδο τους από αυτό και να αυτοκαθαρίζονται. Το τυπικό πάχος στρώματος για τύπανα με κατσιοπόδαρα σε συνεκτικό έδαφος είναι 12-18 in (305-357 mm).

Τέλος, να σημειώσουμε ότι για την καλή συμπύκνωση πρέπει στην αρχή να γίνει μια προσυμπύκνωση χωρίς τη λειτουργία του δονητή.

## 4.2.6 ΔΟΝΗΤΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ

Οι δονητικές πλάκες (Σχ. 4.29) αποτελούνται από μια πλάκα επί της οποίας είναι σταθερά συνδεδεμένος ο δονητής. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε μηχανήματα με ελαστικά χαμηλής πίεσης. Έχουν μεγάλη απόδοση σε ορισμένα είδη άμμου όπου τα άλλα μηχανήματα είναι ακατάλληλα.

Η δονητική πλάκα εκτελεί ελαφρές αναπηδήσεις με ταυτόχρονη μετακίνηση προς κάθε επιθυμητή διεύθυνση.

Οι δονητικές πλάκες κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη με επιφάνεια πλάκας 0,65-1,25 m<sup>2</sup>, βάρους 700-3200 kg και ταχύτητα 8-20 m/min. Υπάρχει ακόμα και συστοιχία μικρών δονητικών πλακών (4-6) συνδεδεμένες με προωθούντα ελκυστήρα.

Κατά τη διάρκεια πειραμάτων με δονητικές πλάκες, παρατηρήθηκε ότι στη συμπύκνωση χαλαρού εδάφους οι πλάκες βυθίζονται στο έδαφος με αποτέλεσμα το δύσκολο χειρισμό τους στην πρώτη διέλευση. Για να αποφύγουμε αυτή τη δυσάρεστη κατάσταση χρησιμοποιούμε αρχικά ένα κοινό οδόστρωμα και στη συνέχεια τον δονητή.

Υπάρχουν και σπάνιοι τύποι δονητικών πλακών βάρους 10-20 tn (διαστάσεων 2x2 m<sup>2</sup> περίπου) οι οποίοι δεν μετακινούνται μόνοι τους, αλλά με τη βοήθεια γερανού. Τότε η δυναμική – κρουστική συμπύκνωση συνίσταται σε επανειλημμένες πτώσεις στην επιφάνεια του εδάφους από ύψος 15-25 m. Κατά τις πρώτες πτώσεις δημιουργείται κρατήρας βάθους 1,0 m. Η παραγωγικότητα της μεθόδου αυτής είναι μεγάλη. Η δόνηση που προκαλείται έχει ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση μέχρι βάθους:

$$(0,4-0,7) \cdot \sqrt{w \cdot h}$$

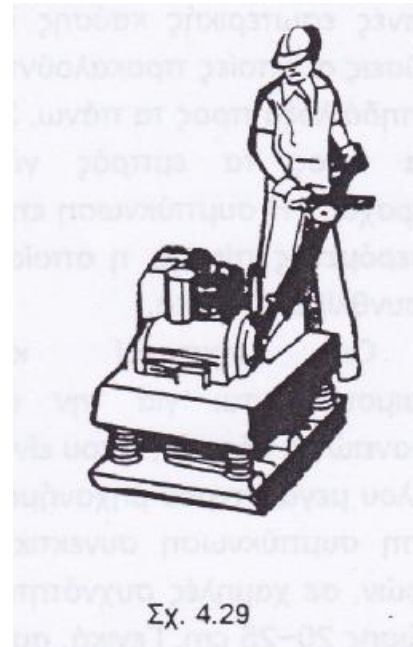
Όπου : 0,4 συντελεστής για συνεκτικά εδάφη

0,7 συντελεστής για κοκκώδη εδάφη

w το βάρος της μεταλλικής πλάκας σε t

h το ύψος πτώσης της πλάκας

Από αριθμητική εφαρμογή του τύπου προκύπτει ότι με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται συμπύκνωση μέχρι βάθους 10 m σε σύγκριση με τη συμπύκνωση λίγων δεκάδων εκατοστών που επιτυγχάνουν οι συμβατικές μέθοδοι. Είναι προφανές ότι λόγω των ισχυρών κραδασμών δεν πρέπει να βρίσκονται κτίσματα σε ακτίνα πολλών μέτρων.



#### **4.2.7 ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΕΣ (ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΚΟΠΑΝΟΙ – ΒΑΤΡΑΧΟΙ)**

Οι κρουστικοί συμπυκνωτές είναι μηχανήματα με περιορισμένη χρήση και με μεγάλο κόστος συμπύκνωσης. Λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα ή με μηχανές εσωτερικής καύσης και συμπυκνώνουν το έδαφος με διαδοχικές κρούσεις οι οποίες προκαλούνται με εκρήξεις και κάνουν τον συμπυκνωτή να αναπηδά λοξά προς τα πάνω. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας η μηχανή εκτελεί ένα άλμα προς τα εμπρός γι' αυτό λέγεται και «βάτραχος». Η συμπύκνωση επιτελείται διαμέσου της επιφερόμενης πίεσης, η οποία κατασυντρίβει, αλέθει και συνθλίβει τα υλικά.

Οι μηχανικοί κόπανοι (Σχ. 4.30) χρησιμοποιούνται για τη συμπύκνωση μικρών επιφανειών ή θέσεων, όπου είναι δύσκολη ή αδύνατη η άλλου μεγαλύτερου μηχανήματος. Είναι κατάλληλοι για τη συμπύκνωση συνεκτικών και λεπτόκοκκων εδαφών, σε χαμηλές συχνότητες και με μέσο πάχος στρώσης 20-25 cm. γενικά αυτά τα μηχανήματα δεν αποδίδουν σε πολύ υγρά συνεκτικά εδάφη.



Οι μικρότερες μηχανές του είδους αυτού έχουν βάρος 70-150 kg, 60-80 κρούσεις το λεπτό και ύψος αναπήδησης 35-40 cm.

Οι μεγαλύτερες μηχανές φτάνουν σε βάρος τα 1000 kg και τις 60 κρούσεις ανά λεπτό. Αναπηδούν ως 40 cm και μετακινούνται κατά 15 cm σε κάθε άλμα.

Ο απαιτούμενος αριθμός κρούσεων των μηχανημάτων αυτών στο ίδιο σημείο κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5.

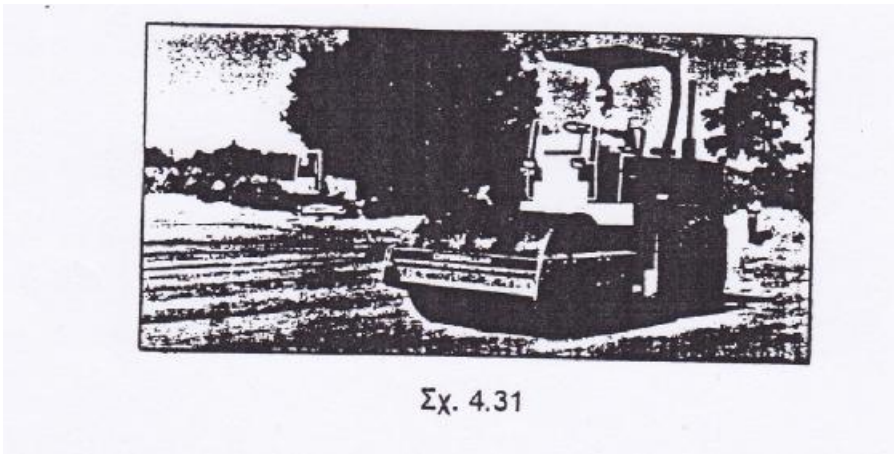
Οι μηχανικοί κόπανοι βέρους 500-1000 kg, χρησιμοποιούνται για τη συμπύκνωση συνεκτικών λεπτόκοκκων εδαφών. Ο απαιτούμενος αριθμός κρούσεων των μηχανημάτων αυτών στο ίδιο σημείο κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5. Ο μηχανικός κόπανος των 500 kg είναι δυνατό να συμπυκνώσει ικανοποιητικά από 20-250 m<sup>3</sup>/ώρα, αλλά γενικά, με τους κρουστικούς συμπυκνωτές επιτυγχάνεται συμπύκνωση εδάφους μέχρι 80 cm.

### **4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ**

Πρωτού σχεδιαστεί ένα έργο συμπύκνωσης, πρέπει ο κατασκευαστής να λάβει υπόψη του το μέγεθος του έργου, τις απαιτήσεις του επιχώματος, τις συνθήκες της τοποθεσίας και τις προδιαγραφές. Βασικά, υπάρχουν δύο τύποι σχεδιασμού του έργου: η **Μέθοδος Σχεδιασμού** και η **Προοδευτική Μέθοδος**.

#### **A) Μέθοδος Σχεδιασμού**

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για μικρά κυρίως έργα. Το υλικό του επιχώματος μεταφέρεται στην περιοχή διαστρώνεται σε στρώμα του οποίου το πάχος εξαρτάται από τις ικανότητες του οδοστρωτήρα. Έπειτα, συμπυκνώνεται το εδαφικό στρώμα σε ολόκληρη τη περιοχή μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη πυκνότητα. Στη συνέχεια, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται ακόμα ένα εδαφικό στρώμα. Αυτή η εναλλασσόμενη διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή στάθμη επιχώματος.

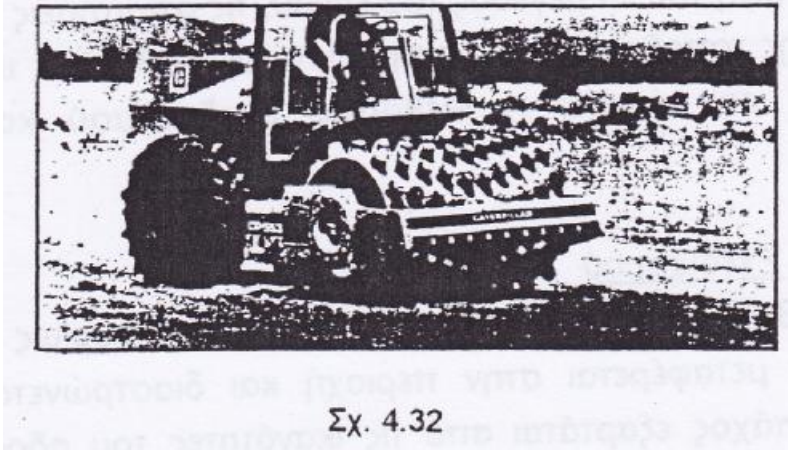


Σε αυτή τη μέθοδο, η ευκινησία και η ταχύτητα του μηχανήματος είναι σημαντικές παράμετροι, γιατί ο μεταφορικός και διαστρωτικός εξοπλισμός μένει ανενεργός κατά τη φάση συμπύκνωσης. Εάν είναι δυνατό να χωριστεί το έργο σε συνεχόμενα γειτονικά επιχώματα, τα μηχανήματα μεταφοράς και διάστρωσης θα συνέχιζαν την εργασία.

#### **B) Προοδευτική Μέθοδος**

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά σε μεγάλα έργα, κυρίως σε κατασκευές αυτοκινητοδρόμων και μεγάλων επιχωμάτων. Εδώ, υπάρχει συνεχόμενη λειτουργία του μηχανικού εξοπλισμού καθώς το υλικό διαστρώνεται προοδευτικά μπροστά από τους οδοστρωτήρες. Αυτό συνεχίζεται για μία ορισμένη απόσταση, μέχρι να διαστρωθεί το επόμενο στρώμα εδαφικού υλικού. Έτσι είναι απαραίτητο ο μηχανικός – κατασκευαστής να φροντίσει για

τον κατάλληλο συντονισμό των μηχανημάτων φόρτωσης, διάστρωσης και



συμπύκνωσης του υλικού, ώστε να εξασφαλιστεί η συνεχόμενη λειτουργία τους.

Τέλος, η ικανότητα ευελιξίας του οδοστρωτήρα δεν είναι τόσο σημαντική, γιατί οι διελεύσεις τείνουν να είναι μακριές και ευθείες. Όμως, είναι σημαντικό για τον οδοστρωτήρα να είναι αξιόπιστος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συνεχόμενη λειτουργία του.



## **4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΛΑΦΟΣ**

### **4.4.1 ΒΡΑΧΟΣ**

Ο βράχος χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σαν υλικό κατασκευής επιχώματος στην κατασκευή αυτοκινητοδρόμων. Χρησιμοποιείται, επίσης, σε φράγματα, αεροδρόμια, κτίρια και επιχώματα λεπτόκοκκα, που αν δεν συμπυκνωθεί το επίχωμα θα λάβει χώρα σημαντική καθίζηση.

Ο βράχος συνήθως διαστρώνεται σε στρώματα πάχους 18”-48” (457-1219 mm). ο τρόπος με τον οποίο το εδαφικό υλικό θα διαστρωθεί πριν τη συμπύκνωση είναι ζωτικής σημασίας. Το μηχάνημα διάστρωσης (Σχ. 4.33),



Σχ. 4.33

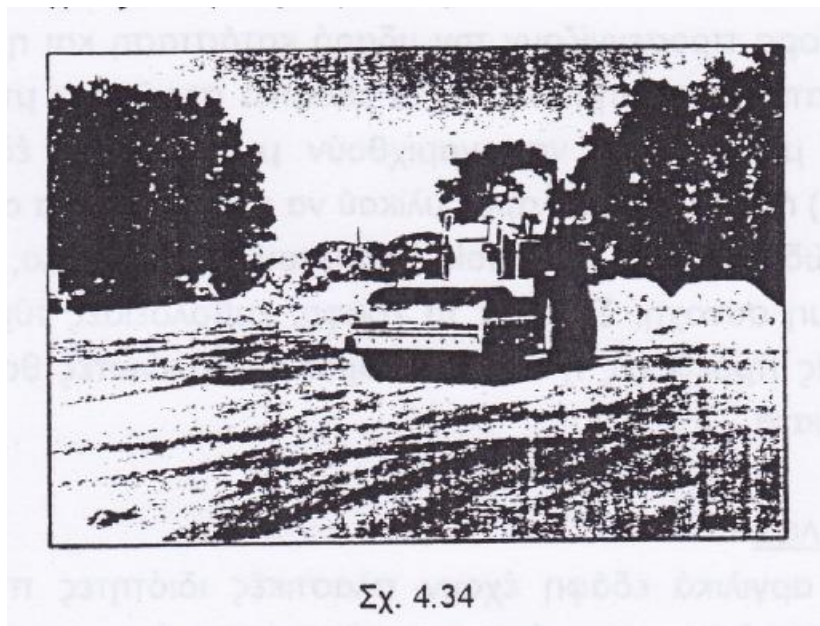
Που απλώνει το υλικό σε επίπεδα, δημιουργεί ένα ομοιόμορφο εδαφικό στρώμα επειδή η προωθητική λεπίδα του μηχανήματος «προσανατολίζει» εκ νέου το υλικό και τα φορτηγά, επίσης, κάνουν μια μικρή συμπύκνωση. Έτσι, μια ελαφρώς πυκνή και ομαλή επιφάνεια προετοιμάζεται για τον συμπυκνωτή.

Οι μεγάλες δυνάμεις συμπύκνωσης είναι απαραίτητες μετά τη διάστρωση για να επαναδιατάξουν τις μεγάλες πέτρες, για πυκνότητα και σταθερότητα. Γι' αυτή τη δουλειά, επιλέγουμε τους μεγάλους οδοστρωτήρες με το λείο δονητικό τύμπανο. Παρόλα αυτά οι οδοστρωτήρες υπόκεινται σε μεγάλες πιέσεις πάνω

στα επιχώματα από βράχο. Το τύμπανο πρέπει να είναι κατασκευασμένο από χονδρό, υψηλού βαθμού ατσάλι. Αν παρουσιαστούν φαινόμενα κρούσης στην επιφάνεια του υλικού, είναι πιθανό να χρειαστεί να μειωθεί ο αριθμός των διελεύσεων. Μια άλλη λύση είναι η εξής: στη περίπτωση που το μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με περισσότερα του ενός τύμπανα, χαμηλότερα τύμπανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την επιφανειακή καταστροφή του υλικού.

#### **4.4.2 ΑΜΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΛΙΚΙ**

Στην άμμο και το χαλίκι το πιο κατάλληλο και οικονομικό μηχάνημα είναι ο οδοστρωτήρας με λείο δονητικό τύμπανο. οι ψηλές πυκνότητες μπορούν να επιτευχθούν με λίγες διελεύσεις σε καθορισμένου, από το μέγεθος του μηχανήματος, πάχους εδαφικές στρώσεις.



Αυτοστραγγιζόμενη άμμος και χαλίκι, με λιγότερο από 10% περιεχόμενο λεπτόκοκκο υλικό, μπορούν εύκολα να συμπυκνωθούν, κυρίως όταν είναι κορεσμένα. Στην περίπτωση που απαιτείται υψηλή πυκνότητα υλικού και το πάχος των στρώσεων είναι μεγάλο, πρέπει να προστίθεται νερό. Αυτό το νερό θα αποστραγγιστεί από την εδαφική στρώση κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης.

Εάν η άμμος και το χαλίκι περιέχουν πάνω από 10% λεπτόκοκκα, το έδαφος τότε δεν είναι αποστραγγιζόμενο και μπορεί να γίνει ελαστικό όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι υψηλή. Γι' αυτόν τον τύπο εδάφους, υπάρχει μια

βέλτιστη τιμή περιεχόμενης υγρασίας στην οποία μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη πυκνότητα. Για να προσεγγιστεί η βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία, είναι δυνατό να απαιτηθεί η ξήρανση του υγρού εδάφους.

Σε άμμο και χαλίκι με φτωχή κοκκομετρική διαβάθμιση, είναι δύσκολο να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα κοντά στην επιφάνεια του επιχώματος. Σε αυτά τα εδάφη υπάρχει μικρή διατμητική αντοχή και τα ανώτερα στρώματα τείνουν να ανυψωθούν πίσω από το τύμπανο του οδοστρωτήρα. Αυτό, δεν αποτελεί πρόβλημα όταν συμπυκνώνονται πολλαπλά εδαφικά στρώματα. Το προηγούμενο ανώτερο στρώμα θα συμπυκνωθεί όταν το επόμενο στρώμα δεχθεί την επίδραση του οδοστρωτήρα. Παρόλα αυτά, η δυσκολία στη συμπύκνωση της επιφάνειας πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν θα γίνουν δοκιμές εύρεσης της πυκνότητας στο επίχωμα.

#### **4.4.3 ΙΛΥΣ**

Οι ιλύες είναι μη πλαστικά λεπτόκοκκα εδάφη, τα οποία συνήθως συμπυκνώνονται με απλό δονητικό συμπυκνωτή λείου τυμπάνου. Μπορούν να διαστρωθούν και να συμπυκνωθούν σε παχιά στρώματα.

Όπως όλα τα λεπτόκοκκα εδάφη, η ικανότητά τους προς συμπύκνωση εξαρτάται από τη φυσική τους υγρασία. Για καλύτερα αποτελέσματα συμπύκνωσης, η περιεκτικότητα σε νερό δεν πρέπει να απέχει πολύ από την βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία. Εάν η περιεκτικότητα σε νερό είναι μεγάλη, οι ιλύες γρήγορα προσεγγίζουν την υδαρή κατάσταση και η συμπύκνωσή τους είναι αδύνατη. Αυτό σημαίνει ότι τα εδαφικά στρώματα μπορεί να πρέπει να αεριστούν με δίσκους, να αναμιχθούν με ξηρότερο έδαφος (μια ακριβή διαδικασία) ή ο δανειοθάλαμος υλικού να είναι καλύτερα αποστραγγισμένος.

Ιλυώδη εδάφη τα οποία περιέχουν και άργιλο, μπορεί να έχουν υπολογίσιμη συνοχή. Σε αυτά τα εδάφη, εμβολοειδές τύμπανο, τύμπανο με σφηνοειδείς προεξοχές ή ελαστικοδόροι συμπυκνωτές θα δώσουν καλύτερα αποτελέσματα.

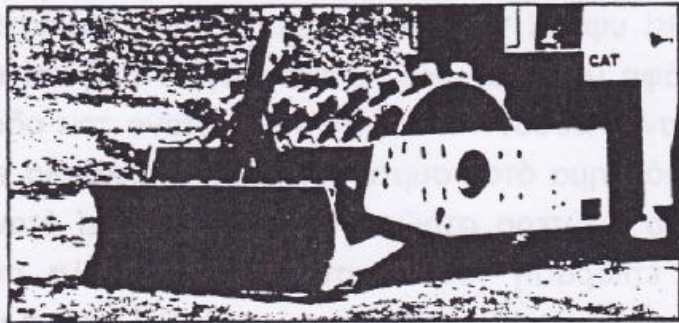
#### **4.4.4 ΑΡΓΙΛΟΣ**

Τα αργιλικά εδάφη έχουν πλαστικές ιδιότητες που σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά της συμπύκνωσης εξαρτώνται άμεσα από τη περιεχόμενη υγρασία. Όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι χαμηλή, η άργιλος γίνεται σκληρή και στιφνή. Παραπάνω από την βέλτιστη υγρασία, η άργιλος γίνεται ολοένα και πιο πλαστική και δύσκολη να συμπυκνωθεί.

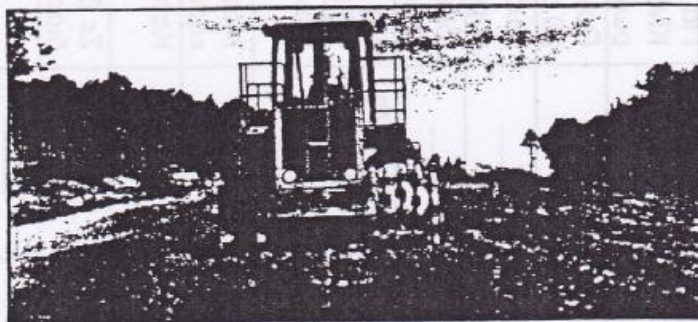
Το κύριο πρόβλημα στη συμπύκνωση της αργίλου είναι πολύ συχνά η ανάγκη να ρυθμιστεί η περιεκτικότητα σε νερό. Η προσθήκη νερού με τη

βοήθεια υδροφόρων φορτηγών, δίσκους ή εδαφικούς σταθεροποιητές, είναι χρονοβόρα. Αντίθετα, διήθηση νερού στο δανειοθάλαμο υλικού, μπορεί να είναι μια καλύτερη εναλλακτική λύση. Η ξήρανση υγρής αργίλου μπορεί να είναι γίνεi μόνο σε ζεστές και ξηρές καταστάσεις, ακόμα και με τη χρήση δίσκων και εδαφικών σταθεροποιητών.

Παρατεταμένη συμπύκνωση με οδοστρωτήρα με κατσικοπόδαρα, γίνεται μερικές φορές για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε νερό.



Σχ. 4.35



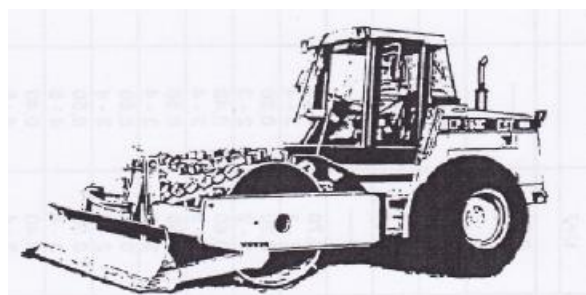
Σχ. 4.36

Ακόμα και στη βέλτιστη υγρασία, η άργιλος απαιτεί υψηλότερη ενέργεια συμπύκνωσης και μικρότερου πάχους εδαφική στρώση σε σύγκριση με τα μη συνεκτικά εδάφη. Συμπυκνωτές με τύμπανα εμβολοειδών προεξοχών δουλεύουν καλύτερα στην περίπτωση αυτή, γιατί καθώς

οι προεξοχές διεισδύουν στο έδαφος σπάνε τους φυσικούς δεσμούς μεταξύ των κόκκων. Ελαστικοφόροι συμπυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αργίλους με ένα χαμηλό έως μέσο δείκτη πλαστικότητας (PI).

Σε έργα που η υψηλή παραγωγή είναι μια απαίτηση και χρησιμοποιείται άργιλος σαν υλικό επιχώματος, καλά αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση οδοστρωτήρων με τύμπανα σφηνοειδών προεξοχών σε συνδυασμό με δονητικούς οδοστρωτήρες εξοπλισμένους με τύμπανο εμβολοειδών προεξοχών. Οι οδοστρωτήρες με εμβολοειδές τύμπανο εξοπλισμένοι με προωθητική λεπίδα (Σχ. 4.37), είναι κατάλληλοι για διάστρωση του υλικού και θρυμματισμό των μεγάλων, σκληρών σβόλων αργίλου που συχνά βρίσκονται στους δανειοθαλάμους.

Αυτά τα μηχανήματα εκτελούν τις πρώτες διελεύσεις. Η τελική πυκνότητα επιτυγχάνεται με δονητικό οδοστρωτήρα εμβολοειδούς τυμπάνου.



Σχ. 4.37



Μηχανήματα συμπτύκνωσης	Είδη εδαφών					Θραύσματα βράχων, πετρώδη εδάφη	Παρατηρήσεις
	Αμμοχάλικο	Ισόκοκοι άμμοι	Ελαφρώς συνεκτικά εδάφη		Ισχυρώς συνεκτικά εδάφη		
			Δείκτης πλαστικότητας <20	Δείκτης πλαστικότητας >20			
	U>7			Ξηρά	Υγρά		
Στατικοί οδοστρωτήρες 4-10 tn (Μέση πίεση 5 kg/cm <sup>2</sup> )	0,20 6-8	—	—	0,20 6-8	—	Ξηρά 0,15 6-8	Υγρά —
Στατικοί οδοστρωτήρες άνω των 10 tn	0,20 5-6	—	—	—	—	—	—
Οδοστρωτήρες με ελαστικά επίσπαρα (Πίεση 2 kg/cm <sup>2</sup> )	0,20 6-8	—	0,20 4-6	0,20 6-8	0,20 4-6	0,15 6-8	—
Οδοντωτοί οδοστρωτήρες 5-8 tn	—	—	0,20 6-8	0,20 6-10	0,20 6-8	0,20 8-12	0,20 6-8
Κρουστική πλάκα 2-3 tn	0,70 2-3	0,70 3-4	0,20 2-3	0,60 3-4	0,60 2-3	0,50 4	0,60 3-4
Μηχανικοί κόπανοι (βάτραχοι)	0,20 1-2	0,20 2-3	0,20 2-3	0,20 2-3	0,20 2-3	0,20 3-4	0,20 3-4
Μηχανικοί κόπανοι 500 kg	0,40 2-3	0,40 3-4	0,30 3-4	0,30 3-4	0,30 3-4	0,35 4	0,30 3-4
Μηχανικοί κόπανοι 1000 kg	0,50 2-3	0,50 3-4	0,40 3-4	0,40 3-4	0,40 3-4	0,35 4	0,40 3-4
Βαρύς επιφανειακός δονητής άνω του 1,5 tn	0,60 2-3	0,60 3-4	—	—	—	—	—
Δονητικός οδοστρωτήρας 2,3 tn	0,50 3-4	0,50 4-6	—	0,40 4-6	0,40 4-6	—	—
Δονητικός οδοστρωτήρας 1,35 tn	0,40 3-4	0,40 4-6	—	0,30 4-6	0,30 4-6	—	—

Πίνακας 4.1: Χαλαρό πάχος στρώσεως σε m (άνω) και απαιτούμενος αριθμός διελεύσεων των μηχανημάτων για διάφορα είδη εδαφών.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**  
**ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ**

## **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα εξαγόμενα επιτόπιων μελετών συμπύκνωσης έχουν δείξει έντονα ότι είναι αναπόφευκτη η μεταβλητότητα του τελικού προϊόντος. Οι αιτίες της μεταβλητότητας των μετρήσεων συμπύκνωσης είναι πολλές, με κυριότερη από αυτές το γεγονός ότι οι δοκιμές αυτές γίνονται σε μικρά δοκίμια (από μια οπή διαμέτρου 4 έως 6 ιντσών περίπου) και γίνεται η παραδοχή ότι το εξαγόμενο της δοκιμής αντιπροσωπεύει ένα σχετικά μεγάλο μήκος οδού. Πρέπει να τονιστεί ακόμη, ότι είναι αδύνατο ο κατασκευαστής της οδού να παραδώσει ένα τελείως ομοιόμορφο προϊόν. Αυτό οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα κατασκευής και τα οικονομικά του προβλήματος. Είναι αμφίβολο αν μια υπηρεσία μπορεί να δαπανήσει χρήματα που απαιτούνται για την κατασκευή ενός τελείως ομοιόμορφου προϊόντος. Πρέπει μάλλον να γίνει δεκτό ότι υπάρχει η μεταβλητότητα και να γίνει προσπάθεια να ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.

Ένας άλλος παράγοντας είναι η μεταβλητότητα των δοκιμών ή η δυσκολία του τεχνικού να αναπαράγει τα αποτελέσματα των δοκιμών του. Ένας από τους κυριότερους παράγοντες είναι ο ανθρώπινος που κρίνει αν ο μέσος παράγοντας συμπύκνωσης είναι επαρκής. Όσον αφορά την ίδια δοκιμή, ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στη μεταβλητότητα των εξαγομένων των δοκιμών είναι η δυσκολία εκλογής της σωστής τιμής εργαστηριακού ελέγχου.

Σύμφωνα με την Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή XI, οι έλεγχοι συμπύκνωσης πρέπει να εκτελούνται συνεχώς. Η έκτασή τους καθορίζεται από την απαίτηση παροχής αποδείξεων για την καθολική ομοιόμορφη και επαρκή συμπύκνωση καθώς και της φέρουσας ικανότητας των εδαφών στις διάφορες ζώνες των χωματουργικών έργων. Ο αριθμός θα εξαρτηθεί από το είδος εργασίας, οι δε θέσεις τους καθορίζονται από τις τοπικές συνθήκες. Η πυκνότητα της στρώσης, η οποία εκφράζεται σε ποσοστό της μέγιστης εργαστηριακής πυκνότητας (τιμή Proctor) κατά τη μέθοδο AASHTO T-180, Μέθοδος D (τροποποιημένη Μέθοδος AASHTO), θα βρίσκεται μετά από τον προσδιορισμό του ξηρού φαινομένου βάρους επί αδιατάρακτων δειγμάτων εδάφους ή με τη βοήθεια των μεθόδων άμμου, γύψου, ισοδυνάμου υγρού (ρευστού) λη και αναλόγων, συμπεριλαμβανομένων και των μεθόδων προσδιορισμού της πυκνότητας με τα ραδιοϊσότοπα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι στη τελευταία περίπτωση, μια τουλάχιστον μέτρηση επί δέκα (10) διαδοχικών εδαφών, η συμπύκνωση μπορεί να ελεγχθεί με διεισδύμετρο.

Ο έλεγχος της εργοταξιακής συμπύκνωσης του εδάφους, που σχεδόν συνοδεύεται και από τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, περιλαμβάνει εκτός των άλλων τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας, της εδαφικής πυκνότητας και του βαθμού συμπύκνωσης καθώς και μια σειρά άλλων δοκιμών που θα περιγραφούν στις επόμενες παραγράφους.



## 5.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΚΑΤΑ PROCTOR

Ο έλεγχος της συμπίκνωσης με βάση τη μέθοδο Proctor περιλαμβάνει δύο φάσεις:

- Τη **δοκιμή Proctor**, που αποτελεί έναν εργαστηριακό προσδιορισμό της μέγιστης ξηράς πυκνότητας ( $\gamma_d$ ) και της βέλτιστης φυσικής υγρασίας ( $W_{OPN}$ ) για μια συγκεκριμένη ενέργεια συμπίκνωσης (βλ. παράγρ. 3.7)
- Τον **εργοταξιακό έλεγχο**, που συνίσταται στον υπολογισμό της επιταχθείσης μετά τη συμπίκνωση ξηράς πυκνότητας ( $\gamma_d$ ) του εδαφικού δείγματος και την σύγκριση αυτής με την μέγιστη κατά Proctor.

Αφού ολοκληρωθεί η διασταύρωση και η συμπίκνωση κάθε στρώσης υλικού, ακολουθεί ο έλεγχος του βαθμού συμπίκνωσης δια προσδιορισμού της ξηράς πυκνότητας ( $\gamma_d$ ) που επιτεύχθηκε στο εργοτάξιο. Ο **βαθμός συμπίκνωσης DC** (Degree of Compaction) σύμφωνα με τη μέθοδο Proctor είναι :

$$\boxed{DC(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_N} \times 100} \quad \text{ή} \quad \boxed{DC(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_M} \times 100}$$

Όπου  $\gamma_N$ ,  $\gamma_M$  η ξηρά πυκνότητα κατά την Πρότυπη και Τροποποιημένη Proctor αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός της ξηράς πυκνότητας είναι δυνατό να γίνει με διάφορες μεθόδους. Η σύγχρονη τεχνική οδήγησε σε χρήση των ακτινών  $\gamma$  για τον έλεγχο σε γρήγορο ρυθμό των διαφόρων στρώσεων της οδού από πλευράς ξηράς πυκνότητας. Τα αντίστοιχα μηχανήματα (gamma-densimeters) γνώρισαν σημαντική επιτυχία αντικαθιστώντας τα παλιότερα μηχανήματα μεμβράνης. Εκτιμήθηκε ιδιαίτερα η ακρίβεια των μετρήσεων και ο εύκολος χειρισμός τους και για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιήθηκαν σε πολλά μεγάλα εργοτάξια για τον προσδιορισμό της ξηράς πυκνότητας. Σε περίπτωση κατασκευής επιχωμάτων από ομοιογενές εδαφικό υλικό. Ο ρυθμός εκτέλεσης του έργου της συμπίκνωσης κατά τη μέθοδο Proctor, συνιστάται να έχει ως ελάχιστες τιμές:

- Δοκιμές Proctor:  $1/5000\text{m}^3$
- Υπολογισμός ξηράς πυκνότητας:  $1/500\text{m}^3$  υλικού

Στην Ελλάδα, για τον προσδιορισμό της ξηράς πυκνότητας του υλικού, εφαρμόζεται η μέθοδος της άμμου ή της ελαστικής μεμβράνης (βλ. παράγρ. 5.4). λαμβάνεται δείγμα από την επιφάνεια κάθε συμπυκνωμένης στρώσης και

υπολογίζεται, με αποξήρανση, το βάρος των στερών συστατικών  $G_s$  και ο όγκος  $V$  του δείγματος.

Ανάλογα με τις συμβατικές υποχρεώσεις, η τιμή του βαθμού συμπύκνωσης είναι κατά της Ελληνικές προδιαγραφές ίση τουλάχιστον προς 90% κατά την Τροποποιημένη μέθοδο proctor. Αν μετά τον έλεγχο διαπιστωθεί ότι δεν επιτεύχθηκε ο απαιτούμενος βαθμός συμπύκνωσης, οι εργασίες πρέπει να συνεχιστούν με ενδεχόμενο να χρειασθεί άλλος τύπος οδοστρωτήρα μεγαλύτερου βάρους.

### Προδιαγραφές

1.ΠΡΟΤ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. ΧΙ

## **5.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ**

Ο έλεγχος προτεινόμενης υγρασίας εδάφους στον τόπο του έργου, γίνεται με εκσκαφή μικρής κοιλότητας σε αυτό, την λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων με βάρος ανάλογο της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της ομοιογένειας του εδάφους (για λεπτόκοκκα ομοιογενή εδάφη 100gr ενώ για χονδρόκοκκα ή ετερογενή, τουλάχιστον, 250 gr) σε προζυγισμένους στεγανούς υποδοχείς και στη συνέχεια ζύγιση αφενός μεν το ταχύτερο μετά τη δειγματοληψία και αφετέρου μετά την ξήρανσή τους.

### **5.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ ΑΜΜΟΛΟΥΤΡΟ**

Ο υποδοχέας με το υγρό έδαφος, μετά την αφαίρεση του καλύμματος, τοποθετείται σε θερμαινόμενο αμμόλουτρο με γυμνή φλόγα αεριογόνου συσκευής. Το αμμόλουτρο είναι δοχείο με διάμετρο 20 cm, περίπου, που περιέχει άμμο μέχρι ύψους 1,5 cm. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, το δείγμα να ανακατεύεται με σπαθίδα, για να υποβοηθείται η εξάτμιση.

Μετά από ξήρανση 1 ώρας, ο υποδοχέας απομακρύνεται από το αμμόλουτρο, καλύπτεται, αφήνεται να ψυχθεί σε ξηραντήρα με χλωριούχο ασβέστιο και ζυγίζεται. Η περιεχόμενη υγρασία (επί του βάρους ξηρού υλικού) υπολογίζεται από την σχέση:

$$W_{\%} = \frac{G_2 - G_3}{G_3 - G_1} \cdot 100$$

Όπου :  $G_1$  το βάρος του υποδοχέα

$G_2$  το βάρος του υποδοχέα & του υγρού εδάφους

$G_3$  το βάρος του υποδοχέα & του ξηρού εδάφους

Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλη ποσότητα δειγμάτων, ώστε να μειώνεται στο ελάχιστο το σφάλμα από την δειγματοληψία. Επίσης, είναι κατάλληλη για ξήρανση χονδρόκοκκων εδαφών, απαιτεί όμως επισταμένη παρακολούθηση για πρόληψη υπερθερμάνσεως του εδάφους.

### **5.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣΒΕΣΤΙΟΥ**

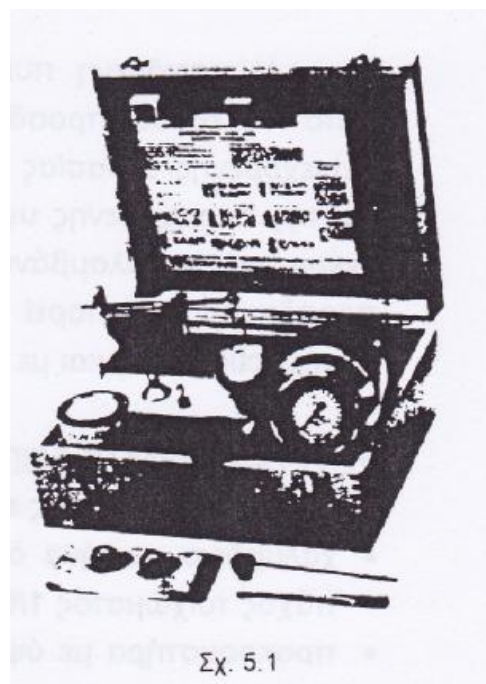
Ο έλεγχος γίνεται με ειδική συσκευή (Σχ. 5.1). η μέτρηση με την συσκευή στηρίζεται στην ιδιότητα του ανθρακασβεστίου να αποσυντίθεται «εν ψυχρώ» από το νερό, ενώ συγχρόνως παράγεται ασετιλίνη με έκλυση θερμότητας κατά την αντίδραση:

(ασετιλίνη)

Έτσι κατά την ανάμειξη υγρού εδάφους με ανθρακασβέστιο, μετριέται η αναπτυσσόμενη πίεση από τη έκλυση της ασετιλίνης με μανόμετρο και στη συνέχεια, με βάση ορισμένο πίνακα, βρίσκεται η υγρασία που αντιστοιχεί στο έδαφος.

#### **Προδιαγραφές**

1. AASHTO T-127



## 5.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η φαινόμενη πυκνότητα φυσικού συμπυκνωμένου εδάφους στον τόπο του έργου, προσδιορίζεται με μέτρηση βάρους, του όγκου και της περιεχόμενης υγρασίας **αδιατάρακτων δειγμάτων** ή με εύρεση του βάρους και της περιεχομένης υγρασίας **διαταραγμένου δείγματος** και μέτρηση του όγκου που καταλαμβάνει το δείγμα πριν την αφαίρεσή του. Επίσης, ο ίδιος προσδιορισμός μπορεί να γίνει με την **μέθοδο αντικατάστασης με άμμο** (compaction test) και με **πυρηνικές μεθόδους**, όπως θα δούμε παρακάτω.

### 5.4.1 ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΟ ΔΕΙΓΜΑ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΤΡΗΣΕΩΣ

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός αποτελείται από:

- Χαλύβδινο σωλήνα διατρήσεως με μήκος 5", εσωτερική διάμετρο 4" και πάχος τοιχώματος 1/8", γωνιασμένο στο ένα άκρο
- Προσκουστήρα με ύψος 1", εσωτερική διάμετρο 4" και πάχος τοιχώματος 1/4"
- Χαλύβδινο κόπανο
- Συσκευή εξαγωγής δείγματος από τον σωλήνα.

Για την δοκιμή, αρχικά υπολογίζουμε τον εσωτερικό όγκο ( $V_s$ ) του σωλήνα διατρήσεως και βρίσκουμε το βάρος του ( $G_c$ ). Στη συνέχεια, ο σωλήνας διατρήσεως τοποθετείται με τον προσκουστήρα σε μικρή ισοπεδωμένη επιφάνεια του εδάφους, που τον περιβάλλει. Αποκόπτουμε το έδαφος, που προεξέχει από τον σωλήνα, καθαρίζουμε την επιφάνειά του και βρίσκουμε το βάρος του ( $G_s$ ) με ζύγιση.

Από μακρύνουμε τον εδαφικό πυρήνα από τον σωλήνα με την συσκευή εξαγωγής και παίρνουμε αντιπροσωπευτικό δείγμα, που τοποθετείται σε αεροστεγές δοχείο, για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Η υγρή φαινόμενη πυκνότητα υπολογίζεται από την σχέση :

$$\gamma_{υγρ} = \frac{G_s - G_c}{V_s} \quad (\text{kgf/m}^3)$$

Η ξηρή πυκνότητα θα είναι:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{υγρ}}{100 + W\%} \cdot 100 \quad (\text{kgf/m}^3).$$

## Προδιαγραφές

1.ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-106/86

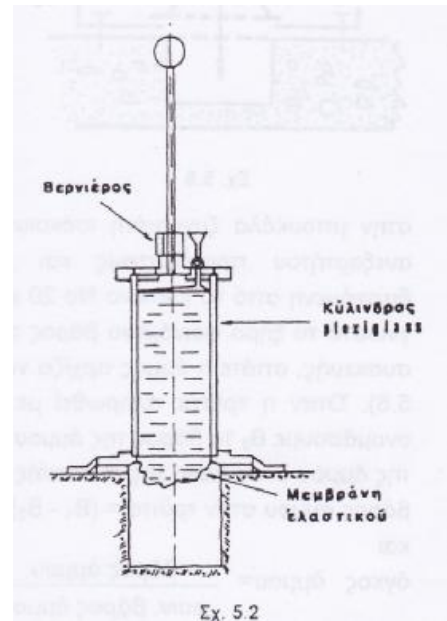
## 5.4.2 ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΟ ΔΕΙΓΜΑ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΠΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟ

Η αρχή αυτής της μεθόδου συνίσταται στην εισαγωγή νερού μέσα σε έναν σάκο από ελαστικό, μέχρις ότου ο σάκος γεμίσει την κοιλότητα στο έδαφος που σκάφτηκε και στη συνέχεια προσδιορισμό του όγκου της οπής με μέτρηση της ποσότητας του νερού που χρειάστηκε να γεμίσει ο σάκος.

Η συσκευή αποτελείται από έναν κύλινδρο Plexiglass με εσωτερική διατομή  $100\text{ cm}^2$  και ύψος  $30\text{ cm}$  (Σχ. 5.2). Μέσα στον κύλινδρο ολισθαίνει έμβολο με στέλεχος που καταλήγει σε χειρολαβή. Το στέλεχος έχει υποδιαίρεσεις και βερνιέρο, ώστε να είναι γνωστή με ακρίβεια, κάθε φορά η θέση του εμβόλου. Στο κατώτερο άκρο του ο κύλινδρος εδράζεται σε δακτυλιοειδή βάση και φράσσεται με λεπτή μεμβράνη από ελαστικό. Η βάση του κυλίνδρου αποτελείται από ανεξάρτητα στοιχεία, που μπορούν να συναρμολογούνται με ακρίβεια. Κάτω από τη βάση της συσκευής προσαρμόζεται ειδική βάση για τη μεταφορά της.

Για τη δοκιμή. Ο κύλινδρος γεμίζεται στην αρχή με καθαρό νερό. Στην επιφάνεια που έχουμε εκλέξει με εμβαδό  $30 \times 30\text{ cm}^2$ , μετά από καθαρισμό και ισοπέδωσή της, τοποθετούμε το κινητό μέρος της βάσης, που στερεώνεται για να μην μετακινηθεί. Στη συνέχεια, τοποθετούμε το υπόλοιπο της συσκευής στη βάση και πιέζουμε τη χειρολαβή, μέχρις ότου η στάθμη του νερού μέσα στον κύλινδρο παραμένει σταθερή. Καταγράφουμε τον όγκο του νερού με ανάγνωση στο στέλεχος με τις υποδιαίρεσεις. Ανυψώνουμε το έμβολο, για να αποκολληθεί η μεμβράνη από το έδαφος και την επαναφέρουμε μέσα στη συσκευή. Αφαιρούμε τη συσκευή από το κινητό μέρος της βάσης, που παραμένει στο έδαφος και την τοποθετούμε δίπλα στην ειδική βάση.

Στη συνέχεια, το έδαφος σκάβεται με κατάλληλο όργανο και το υλικό τοποθετείται σε στεγανό υποδοχέα. Το υλικό που συλλέξαμε, ζυγίζεται και προσδιορίζεται η περιεκτικότητά του σε υγρασία. Η συσκευή τοποθετείται ξανά στην αφαιρετή βάση της και με πίεση της χειρολαβής αναγκάζεται ο σάκος από ελαστικό να εισέλθει μέσα στην οπή και έτσι η μεμβράνη, λόγω της μεγάλης ελαστικότητάς της, προσαρμόζεται τελείως σε όλες τις ανωμαλίες του εδάφους. Καταγράφουμε τον όγκο του νερού με ανάγνωση στο στέλεχος με τις υποδιαίρεσεις. Η διαφορά μεταξύ της δεύτερης μέτρησης και της πρώτης, δίνει τον όγκο της οπής. Από τα δεδομένα της δοκιμής υπολογίζεται η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους “εν θέσει”.



Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε ότι η μέθοδος της μεμβράνης από ελαστικό δίνει αποτελέσματα της ίδιας η μεγαλύτερης ακρίβειας από τις άλλες μεθόδους, που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η ταχύτητα εκτελέσεως της μέτρησης είναι μεγάλη σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους. Αυτή η μέθοδος δίνει αποτέλεσμα με μεγάλη ακρίβεια τόσο στα λεπτόκοκκα, όσο και στα χονδρόκοκκα εδάφη

### Προδιαγραφές

1. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε – 106/86

### **5.4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΑΜΜΟ**

Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι η εύρεση της εργοταξιακής συμπύκνωσης εδαφών σε σχέση προς την εργαστηριακή συμπύκνωση Proctor.

Η δοκιμή γίνεται σε επιχώματα οδών και φραγμάτων, καθώς και στις σκαφές, υποβάσεις και βάσεις οδών και αεροδρομίων. Η συχνότητα των δοκιμών είναι ανά 300 m για οδούς και ανά 150 m για αεροδρόμια. Κάθε φορά, σε κάθε χιλιομετρική θέση, γίνονται τρεις (3) δοκιμές: μια στο μέσο και δύο προς τα άκρα του επιχώματος.

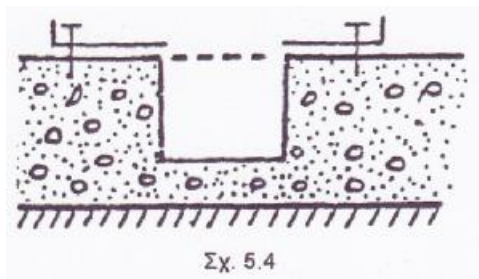
Για την εκτέλεσή της χρησιμοποιείται ο ακόλουθος εξοπλισμός (Σχ.5.3):

- Μεταλλική πλάκα εδράσεως της συσκευής με ανάλογη τρύπα στο κέντρο
- Συσκευή, αποτελούμενη από πλαστική μπουκάλα γνωστού όγκου και μεταλλικό κώνο με στρόφιγγα ελέγχου ροής, επίσης γνωστού όγκου
- Σφυρί, καλέμι, βούρτσα, στεγανός σακος.
- 

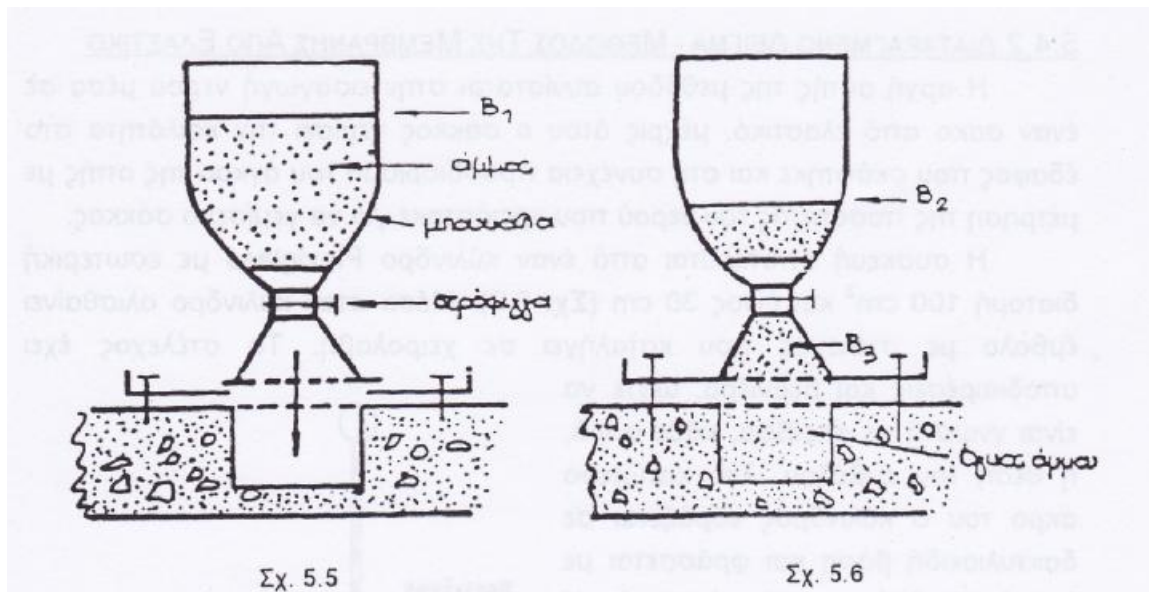


Σχ. 5.3

Εδραιώνουμε την πλάκα εδράσεως στο έδαφος και με τη βοήθεια του καλεμιού σκάβουμε τρύπα, διαμέτρου περίπου 15 mm και βάθους 14-16 mm (Σχ. 5.4), στο συμπυκνωμένο έδαφος και τα εξαγόμενα υλικά συγκεντρώνονται προσεκτικά μέσα στον στεγανό σάκο. Στη συνέχεια, τοποθετούμε τη συσκευή πάνω στην πλάκα εδράσεως, η οποία περιέχει στην μπουκάλα ζυγισμένη ισόκοκκη άμμο βάρους  $B_1$  (Σχ. 5.5). Η άμμος, ανεξαρτήτου προελεύσεως και χημικής συστάσεως, πρέπει να είναι διερχόμενη από το κόσκινο No 20 και



Σχ. 5.4



συγκρατούμενη στο Νο 30 και να είναι γνωστό το ξηρό φαινόμενο βάρος της. Κατόπιν, ανοίγουμε τη στρόφιγγα της συσκευής, οπότε η άμμος αρχίζει να ρέει μέσα στη τρύπα του εδάφους (Σχ. 5.6). όταν η τρύπα πληρωθεί με άμμο, αυτή θα σταματήσει να ρέει. Αν ονομάσουμε B2 το βάρος της άμμου που έμεινε στη μπουκάλια και B3 το βάρος της άμμου στον κώνο συσκευής, τότε:

$$\text{Βάρος άμμου στην τρύπα} = (B1 - B2) - B3$$

Και

$$\text{Όγκος άμμου} = \frac{\text{βάρος άμμου}}{\text{φαιν.βάρος άμμου}} = \text{όγκος οπής}$$

Η **επί-τόπου πυκνότητα** βρίσκεται σαν λόγος του ξηρού βάρους του εδάφους της τρύπας διά των όγκο της, ο οποίος έχει υπολογισθεί έμμεσα με την πλήρωση της τρύπας με άμμο γνωστού βάρους. Έτσι:

$$\text{Επί-τόπου πυκνότητα} = \frac{\text{βάρος ξηρού εδάφους}}{\text{όγκος οπής}}$$

Ο **βαθμός συμπίκνωσης** βρίσκεται σαν ο λόγος της επί τόπου πυκνότητας δια της διορθωμένης εργαστηριακής μέγιστης ξηράς πυκνότητας Proctor, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Βαθμός συμπίκνωσης} = \frac{\text{επί-τόπου ξηρά πυκνότητα}}{\text{διορθ.εργαστ.τιμή Proctor}}$$

Σύμφωνα με την Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή XI, ο απαιτούμενος βαθμός συμπίκνωσης για επιχώματα είναι 90% της τροποποιημένης μεθόδου με τις υποδιαρέσεις. Η διαφορά μεταξύ της δεύτερης μέτρησης και της πρώτης, δίνει τον όγκο της οπής. Από τα δεδομένα της δοκιμής υπολογίζεται η **ξηρή φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους «εν θέσει»**.

Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε ότι η μέθοδος της μεμβράνης από ελαστικό δίνει αποτελέσματα της ίδιας η μεγαλύτερης ακρίβειας από τις άλλες μεθόδους, που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η ταχύτητα εκτέλεσως της μέτρησης είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους. Αυτή η μέθοδος δίνει αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια τόσο στα λεπτόκοκκα, όσο και στα χοδρόκοκκα εδάφη.

Proctor (AASHTO T-180) και για σκάφη (υποδομή) μεγαλύτερος από το 95% της τροποποιημένης μεθόδου Proctor.

Η διαδικασία εκτέλεσης της παραπάνω δοκιμής συμπύκνωσης εδάφους, φαίνεται παραστατικά στις παρακάτω φωτογραφίες (Σχ. 5.7 – Σχ. 5.13).



Σχ. 5.7 Γέμισμα μπουκάλας με άμμο



Σχ. 5.8 Στερέωση πλάκας έδρασης

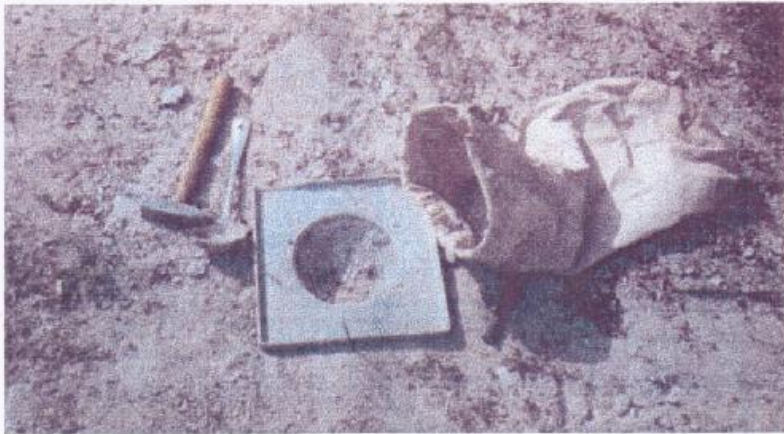


Σχ. 5.9 Σκάψιμο εδάφους με καλέμι



Σχ. 5.10 Φύλαξη εδαφικού υλικού σε σάκκο





Σχ. 5.11



Σχ. 5.12 Τοποθέτηση συσκευής



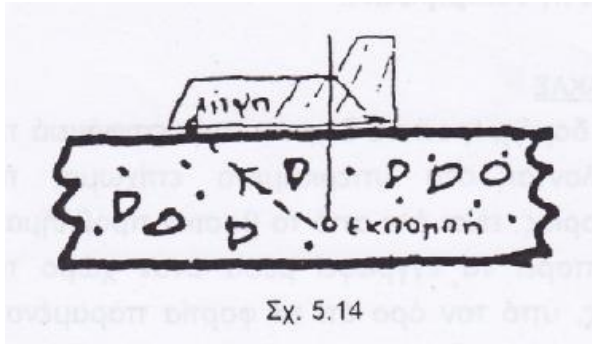
Σχ. 5.13 Τελική στάθμη άμμου στη  
μπουκάλια

### **Προδιαγραφές**

1. AASHTO T-191
2. ASTM D1556
3. BS 1377/75
4. DIN18125
5. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε-106/86

#### 5.4.4 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Με την πυρηνική μέθοδο γίνεται έμμεσος προσδιορισμός της υγρασίας και της πυκνότητας του εδάφους, μέσω συσκευής που εκπέμπει ακτίνα  $\gamma$  και μετρά



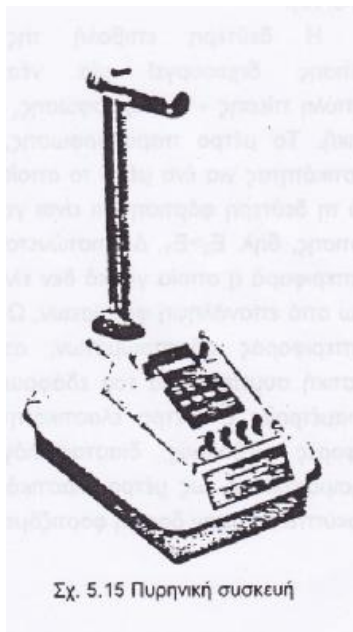
την έντασή της μετά από μία διαδρομή μέσα στο έδαφος (Σχ. 5.14). Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου πρέπει να διορθώνονται, γιατί παρουσιάζουν διαφορές περίπου 3-5% από τα αντίστοιχα αποτελέσματα της κλασσικής δοκιμής συμπίκνωσης (μέθοδος αντικατάστασης άμμου.

Τα **πλεονεκτήματα** της πυρηνικής μεθόδου, είναι τα παρακάτω:

- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν θέλουμε στο ίδιο σημείο να παρακολουθήσουμε την αύξηση του βαθμού συμπίκνωσης (ή της ξηρής πυκνότητας  $\gamma_d$  του εδάφους) σε συνάρτηση με τον αριθμό διελεύσεων του οδοστρωτήρα
- Δίνει την απάντηση αμέσως (χωρίς καθυστερήσεις για ζυγίσματα και ξήρανση δειγμάτων εδάφους) και έτσι αξιοποιείται καλύτερα ο ακριβός μηχανικός εξοπλισμός του αναδόχου έργου, αφού μόλις επιτύχουμε τον απαιτούμενο βαθμό συμπίκνωσης, οι οδοστρωτήρες μπορούν να προχωρήσουν και να συμπυκνώνουν το επόμενο κομμάτι, ενώ μπορεί να αρχίσει η μεταφορά υλικών και η διαδικασία συμπίκνωσης στο κομμάτι που ελέγχθηκε.

#### Προδιαγραφές

1. ASTM D2922
2. ASTM D2950
3. ASTM D3017



## 5.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας εδάφους γίνεται κυρίως, με τη **δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας** και τη **δοκιμή CBR**.

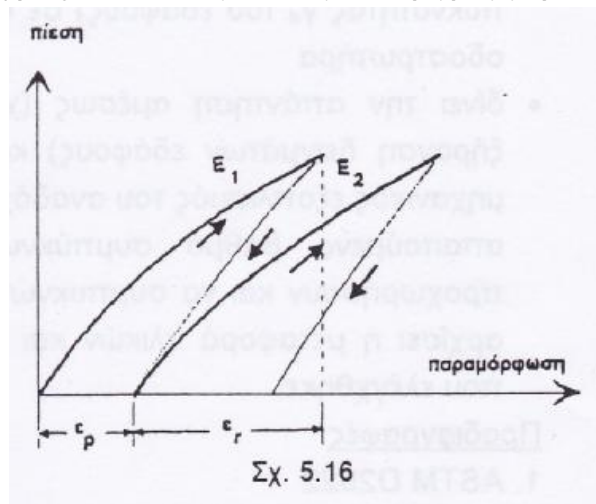
### 5.5.1 ΔΟΚΙΜΗ ΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Η ισορροπία μιας εδαφικής δομής, η οποία δέχεται στην επιφάνειά της κατακόρυφα φορτία που οφείλονται στο υπερκείμενο επίχωμα, την οδοστρωσία και τα φορτία κυκλοφορίας, είναι ένα από τα βασικά προβλήματα της Οδοποιίας. Το φαινόμενο μπορεί να εγγραφεί μέσα στον χώρο της ελαστικής – πλαστικής ισορροπίας, υπό τον όρο ότι τα φορτία παραμένουν μικρά. Όταν οι τάσεις φθάσουν στο όριο θραύσης, τότε οι παραμορφώσεις αυξάνουν ραγδαία και παρατηρείται διαρροή του εδάφους.

Σε μια τριαξονική δοκιμή ενός εδαφικού δείγματος, αυξάνοντας την κατακόρυφη φόρτιση, παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα πίεσης – παραμόρφωσης η αντίστοιχη σχέση εκφράζεται από μια καμπύλη γραμμή. Η αποφόρτιση δεν αποκαθιστά την αρχική ισορροπία, αλλά αφήνει ένα μέρος της παραμόρφωσης  $\epsilon_p$ , το ποίο **ονομάζεται πλαστική (παραμένουσα) παραμόρφωση** (Σχ. 5.16).

Η δεύτερη επιβολή της φόρτισης δημιουργεί μια νέα καμπύλη πίεσης – παραμόρφωσης, η οποία δεν είναι παράλληλη προς την αρχική. Το μέτρο παραμόρφωσης, που είναι αντίστοιχο προς το μέτρο ελαστικότητας για ένα μέσο το οποίο δεν είναι απόλυτα ελαστικό, προκύπτει από τη δεύτερη φόρτιση και είναι γενικά μεγαλύτερο από εκείνο της αρχικής φόρτισης, δηλαδή  $E_2 > E_1$ . Διαπιστώνεται, κατά συνέπεια, ότι το έδαφος έχει μια συμπεριφορά η οποία γενικά δεν είναι ούτε ελαστική, αλλά ούτε και σταθερή κάτω από επανάληψη φορτίσεων. Ωστόσο, στα διάφορα μαθηματικά μοντέλα συμπεριφοράς οδοστρωμάτων, αποτελεί κοινή παραδοχή η γραμμική ελαστική συμπεριφορά του εδάφους που αναπαρίσταται από τις ελαστικές παραμέτρους  $E$  (μέτρο ελαστικότητας) και  $\nu$  (συντελεστής Poisson). Στις διάφορες μεθόδους διαστασιολόγησης, ημιεμπειρικές και αναλυτικές, χρησιμοποιείται, ως μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο παραμόρφωσης  $E$  που προκύπτει από την δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας (plate bearing test).

Οι προδιαγραφές που ισχύουν από χώρα σε χώρα σχετικά με τους όρους εκτέλεσης της δοκιμής φορτιζόμενης πλάκας είναι διαφορετικές. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα είναι : τα γεωμετρικά στοιχεία της πλάκας, η



ταχύτητα και ο χρόνος επιβολής των φορτίων καθώς και η ασκούμενη πίεση. Οι πλάκες που συνήθως χρησιμοποιούνται έχουν διάμετρο 30-60-75 cm, ενώ η ασκούμενη πίεση είναι 2,5 kg/cm<sup>2</sup>. Σε περίπτωση που η δοκιμή εκτελείται επί στρώσεων οδοστρωσίας η ασκούμενη πίεση είναι 5,0 kg/cm<sup>2</sup>. Η δοκιμή συνίσταται στην εφαρμογή μιας ορισμένης δύναμης P διαμέσου μιας πλάκας διαμέτρου 2<sup>a</sup> (όπου η α η ακτίνα της πλάκας) επί του εδάφους και στη μέτρηση της κατακόρυφης βύθισης ΔZ. Η διαδικασία είναι δυνατό να επαναληφθεί ν φορές και αντίστοιχα να προσδιορισθεί το μέτρο E<sub>v</sub>. Στην Ελλάδα υπολογίζεται συνήθως το μέτρο παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη δεύτερη φόρτιση, το οποίο θεωρείται ως αντιπροσωπευτικό της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Γενικά, η μέθοδος υπολογισμού του **μέτρου ελαστικότητας E** (elastic modulus) για στατικά φορτία, βασίζεται στη θεωρία **Boussinesq**, σύμφωνα με την οποία:

$$E = \frac{2 \cdot p \cdot a}{\Delta Z} \cdot (1 - \nu^2)$$

Όπου:

p η ασκούμενη πίεση (=P/πa<sup>2</sup>)

a η ακτίνα της πλάκας

ΔZ η κατακόρυφη βύθιση

C συντελεστής ακαμψίας της πλάκας ( C=π/4 δύσκαμπτη πλάκα, C=1 για εύκαμπτη πλάκα

Το μέτρο ελαστικότητας που προσδιορίζεται από την δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας δεν έχει έννοια παρά τη περίπτωση που το έδαφος έδρασης εμφανίζει μια σημαντική ομοιογένεια. Παρ' όλες ωστόσο τις αδυναμίες που προαναφέρθηκαν, σχετικά με την δυνατότητα επακριβούς απεικόνισης της συμπεριφοράς του εδάφους, το μέτρο ελαστικότητας τοποθετείται στην πρώτη σειρά μηχανικών παραμέτρων στον χώρο της Οδοποιίας, λόγω ακριβώς της μεθόδου προσδιορισμού του, που αναπαριστά ουσιαστικά τον τρόπο επιβολής των φορτίων στο έδαφος έδρασης των οδών.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά την υπεροχή της εν λόγω δοκιμής έναντι εκείνης του CBR, υπάρχουν και για τη δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας όρια του πεδίου εφαρμογής. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να θεωρηθεί ότι η αναπαράσταση της φέρουσας ικανότητας της φορτιζόμενης μάζας εκτείνεται μέχρι ένα βάθος που δεν ξεπερνά το πενταπλάσιο της ακτίνας της πλάκας.

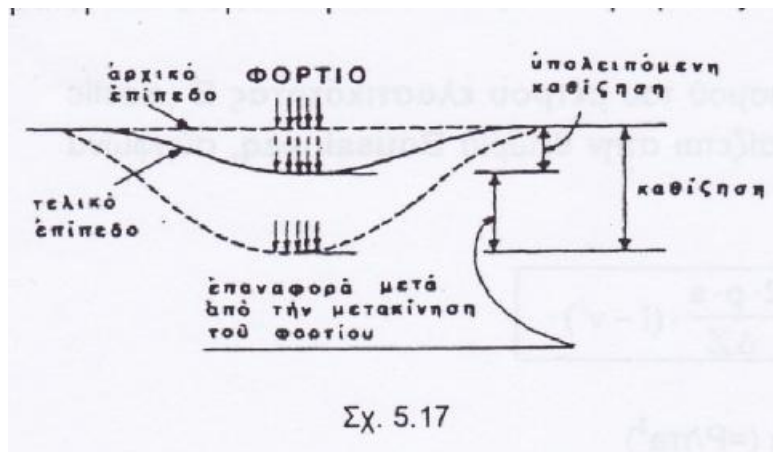
Θα πρέπει γενικά να θεωρηθεί ότι η εμβέλεια της δοκιμής φορτιζόμενης πλάκας είναι ίση με το πενταπλάσιο της ακτίνας της:

$$H=5a$$

Συνεπώς και ο έλεγχος φορτιζόμενης πλάκας αναφέρεται σε διαμορφωμένες στρώσεις υλικών κατασκευής επιχωμάτων ή οδοστρώσας, πεπερασμένου πάχους και όχι σε ημιάπειρες μάζες, όπως η θεωρία υποδεικνύει.

Συχνά για τον έλεγχο της συμπίκνωσης χρησιμοποιούνται δοκιμές φορτιζόμενης πλάκας. Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής πρέπει να είναι εντελώς συγκεκριμένη, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να συσχετίζονται με συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς.

Η δοκιμή αυτή, χρησιμοποιείται στη μέτρηση της αντοχής κάθε στρώσης υλικού και μπορεί να εφαρμοστεί στο υπέδαφος, στην υπόβαση ή βάση και στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η δοκιμαστική φόρτιση είναι εργοταξιακή δοκιμή που μετράει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους με εφαρμογή, πάνω σε αυτό, πίεσεως διαμέσου άκαμπτης φέρουσας επιφάνειας και στη συνέχεια μέτρηση της υποχώρησης. Τα φορτία που εφαρμόζονται προκαλούν ελαστικές και μόνιμες υποχωρήσεις λόγω του συμπίεστου του εδάφους (Σχ. 5.17).



Σχ. 5.17

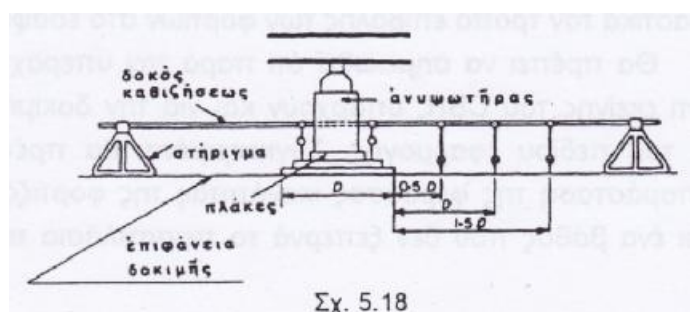
Η δοκιμή που μετράει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους με εφαρμογή, πάνω σε αυτό, πίεσεως διαμέσου άκαμπτης φέρουσας επιφάνειας και στη συνέχεια μέτρηση της υποχώρησης. Τα φορτία που εφαρμόζονται προκαλούν ελαστικές και μόνιμες υποχωρήσεις λόγω

του συμπίεστου του εδάφους (Σχ. 5.17).

Η δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας διαφέρει από τη δοκιμή CBR, γιατί η δοκιμή CBR γίνεται στο εργαστήριο ή στο εργοτάξιο σε μικρή επιφάνεια. Η δοκιμαστική φόρτιση μετράει κυρίως ελαστική και μόνιμη παραμόρφωση, ενώ η δοκιμή CBR μετράει την αντίσταση του εδάφους στην παραμόρφωση, λόγω διατμήσεως.

Τα κριτήρια στη δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας για οδούς είναι 12'' διάμετρος πλάκας φορτίσεως, 0,2'' καθίζηση και δέκα (10) επαναλήψεις φορτίου. Για αεροδρόμια τα κριτήρια είναι 30'' διάμετρος πλάκα φορτίσεως, 0,5'' καθίζηση και 10 επαναλήψεις φορτίου.

Τα όργανα, που χρειάζονται για τη δοκιμή αυτή, περιλαμβάνουν μια συσκευή φορτίσεως (ένα μεγάλο φορητό ή ρυμουλκούμενο), ένα υδραυλικό ανυψωτήρα, πλάκες



Σχ. 5.18

φορτίσεως με διαφορετικούς διαμέτρους και μηκυνσιόμετρα (Σχ. 5.18). η πλάκα φορτίσεως ενισχύεται με άλλες πλάκες μικρότερων διαμέτρων και η φόρτισή της επιτυγχάνεται με το φορτίο του φορτηγού, που μεταδίδεται στην πλάκα μέσω του ανυψωτήρα.

Για την μέτρηση της καθίζησης της πλάκας χρησιμοποιείται ανεξάρτητο πλαισιωτό σύστημα με υποστηρίγματα, που εδράζονται στο έδαφος σε σημεία που δεν επηρεάζονται από την υποχώρηση της πλάκας ή από τους τροχούς του φορτηγού. Σαν καθίζηση λαμβάνεται ο μέσος όρος των αναγνώσεων αριθμού μηκυνσιομέτρων, που είναι τοποθετημένα συμμετρικά στην πλάκα. Τα μηκυνσιόμετρα είναι προσαρμοσμένα σε βραχίονες οι οποίοι είναι στερεωμένοι σε πλαισιωτό σύστημα.

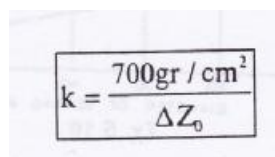
### **5.5.2 ΜΕΤΡΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΥΠΕΛΑΦΟΥΣ**

Μια τυποποιημένη δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του **μέτρου αντίδρασης k** (modulus of subgrade reaction) του εδάφους, το οποίο υπεισέρχεται στη διαστασιολόγηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Το μέτρο αντίδρασης, κατά τη θεωρία του **Westergaard** εκφράζει την αναλογία που υπάρχει μεταξύ κατακόρυφης ασκούμενης πίεσης P και αντίστοιχης υποχώρησης της επιφάνειας του εδάφους ΔZ.

$$p=k \Delta Z$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, το μέτρο k παύει να έχει έννοια από τη στιγμή που τα φορτία φτάσουν σε υψηλές τιμές, οπότε η αναλογία μεταξύ πίεσης και βύθισης δεν ισχύει.

Η δοκιμή εκτελείται στην επιφάνεια του εδάφους σε φυσικές συνθήκες υγρασίας. Η πλάκα που χρησιμοποιείται έχει διάμετρο 75 cm και πάχος 1,5-20,5 cm. Μέσω ενός συστήματος φόρτισης και ενός μηχανήματος καταγραφής εφαρμόζονται στην επιφάνεια του εδάφους πιέσεις, οι τιμές των οποίων είναι γνωστές. Αποτελέσματα δοκιμών έδειξαν ότι η πιο αντιπροσωπευτική τιμή του μέτρου k είναι εκείνη που αντιστοιχεί σε πίεση 700gr/cm<sup>2</sup>. Το **μέτρο αντίδρασης k<sub>s</sub>** υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:


$$k_s = \frac{700 \text{ gr / cm}^2}{\Delta Z_0}$$

Αν οι επιτόπου αναμενόμενες συνθήκες είναι δυνατό κάποια στιγμή να φτάσουν σε κατάσταση κορεσμού, από πλευράς φυσικής υγρασίας, τότε η τιμή του k που λαμβάνεται υπόψη για τους υπολογισμούς πρέπει να υποστεί την κατάλληλη διόρθωση. Η διόρθωση εκτελείται σύμφωνα με αποτελέσματα

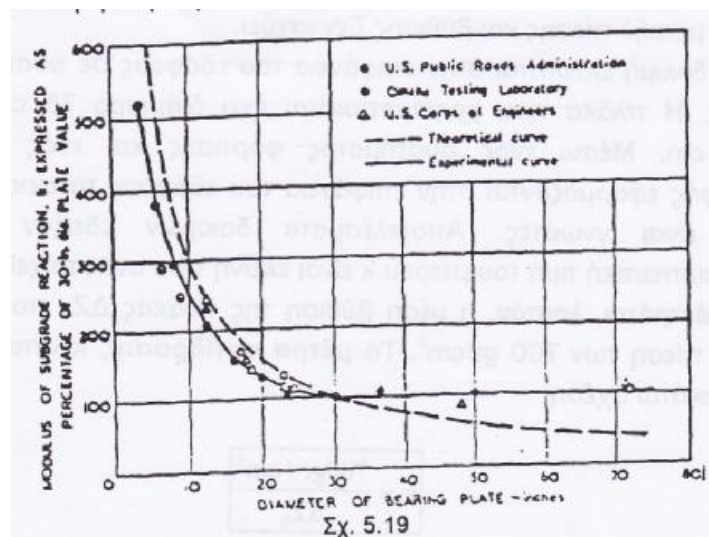
οιδημετρικών δοκιμών επί αδιατάρακτων δειγμάτων στο εργαστήριο. Δύο δείγματα, το πρώτο σε φυσική κατάσταση και το δεύτερο κορεσμένο, υπόκεινται στην οιδημετρική συσκευή σε πίεση  $700 \text{ gr/cm}^2$ . Μετράται αντίστοιχα η κατακόρυφη βύθιση  $\Delta Z_1$  και  $\Delta Z_2$  των δύο δειγμάτων. Η τιμή του μέτρου αντίδρασης  $k_s$  που αντιστοιχεί σε συνθήκες κορεσμού είναι:

$$k_s = \frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \cdot k$$

Οι τιμές του μέτρου αντίδρασης για τα διάφορα εδάφη έχουν την έννοια μιας συγκεκριμένης μηχανικής παραμέτρου, υπό τον όρο ότι αναφέρονται πάντοτε στη διαδικασία εκτέλεση της δοκιμής και κυρίως στην ίδια διάμετρο της πλάκας. Όταν η πλάκα που χρησιμοποιείται έχει διαφορετικές διαστάσεις, τα αποτελέσματα αλλοιώνονται αισθητά. Χαρακτηριστικά φαίνεται η επίδραση αυτή στα παρακάτω δεδομένα:

- $k_0$  : το μέτρο για πλάκα με  $d=75 \text{ cm}$
- $k=1.5k_0$  : το μέτρο για πλάκα με  $d=45 \text{ cm}$
- $k=2.5k_0$  : το μέτρο για πλάκα με  $d=30 \text{ cm}$

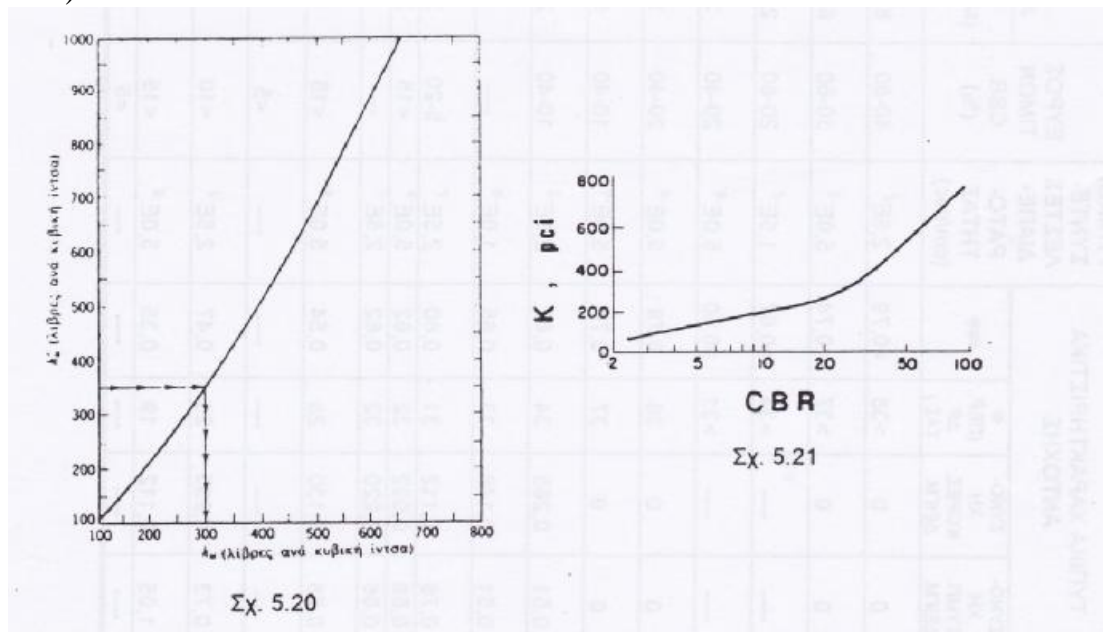
Εάν χρησιμοποιηθεί πλάκα μικρότερης διαμέτρου από  $30''$  ( $75\text{cm}$ ), τότε υπάρχει θεωρητική καμπύλη διόρθωσης αυτού του  $k$



(Σχ. 5.19). Παρατηρούμε ότι αν χρησιμοποιηθεί πλάκα διαμέτρου  $12''$  ( $30\text{cm}$ ), τότε η σχέση μεταξύ της τιμής αυτής του  $k$  και της τιμής του  $k$  για  $30''$  πλάκα είναι περίπου 250% μεγαλύτερη.

Όταν γίνονται δοκιμές σε υλικά μεγάλου μέτρου, προκαλείται κάποια κάμψη της πλάκας. Ο όγκος εκτοπίσματος, λοιπόν, θα διαφέρει από τον όγκο

που προσδιορίζεται με μετρητές κοντά στην περιφέρεια της πλάκας. Οι τιμές αυτές μπορούν να διορθωθούν για κάμψη με τη βοήθεια του διαγράμματος του (Σχ. 5.20).



Στο (Σχ. 5.21) φαίνεται μια προσεγγιστική σχέση μεταξύ του k και του CBR. Βλέπουμε ότι για μικρές CBR έως 20% ισχύει διαφορετική σχέση από αυτή για μεγαλύτερες τιμές CBR 50-80% π.χ.:

CBR = 30%      τιμή k = 27 MN/m<sup>3</sup> = 27kpa/cm = 100pci

CBR=10%      τιμή k = 55 MN/m<sup>3</sup> = 200pci

CBR=40%      τιμή k = 110 MN/m<sup>3</sup> = 400pci

CBR=60%      τιμή k = 165 MN/m<sup>3</sup> = 6100pci

Ας σημειωθεί ότι η σχέση μεταξύ του E και του CBR μπορεί να βρεθεί προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$E = 10 \text{ CBR σε MPa}$$

$$E = 100 \text{ CBR σε kg/cm}^2$$

Όπου E το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( σε MPa ή kg/cm<sup>2</sup>) και το CBR το επί-τόπου CBR.

Η τιμή του E που λαμβάνεται από τη σχέση αυτή, είναι δυνατό να κυμαίνεται από το μισό ως το διπλάσιο από την τιμή που προκύπτει. Για παράδειγμα, έστω CBR=10%, τότε μπορεί το E να είναι E=500 kg/cm<sup>2</sup> έως E=2000 kg/cm<sup>2</sup>, ενώ από τη σχέση θα έπρεπε να είναι E=10x100=1000 kg/cm<sup>2</sup>. Στον πίνακα 5.1 φαίνονται συγκεντρωτικές τυπικές ιδιότητες συμπυκνωμένων υλικών (Proctor, τιμή CBR, μέτρο αντίδρασης k κ.λ.π.).



Συμβολή- αριθμός Εδαφούς	ΕΙΔΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΞΗΡΑΣ ΠΥΚΝΟ- ΤΗΤΑΣ (kg/m <sup>3</sup> )	ΟΡΙΑ ΒΕ- ΛΤΙ- ΣΤΗΣ ΥΓΡΑ ΣΙΑΣ (%)	ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗ- ΤΑΣ		ΤΥΠΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΤΟΧΗΣ				ΤΥΠΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕ- ΛΕΣΤΕΣ ΔΙΑΠΕ- ΡΑΤΟ- ΤΗΤΑΣ (cm/sec)	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ CBR (%)	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΜΕΤΡΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΣ k	
				ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΟ 1,4 kg/cm <sup>2</sup>	ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΟ 3,6 kg/cm <sup>2</sup>	ΣΥΝΟ- ΧΗ ΣΥΜΠ. ΔΕΙΓΜ.	ΣΥΝΟ- ΧΗ ΚΟΡΕΣ. ΔΕΙΓΜ.	φ (ΠΕΡ. ΔΡ. ΤΑΣ.)	εφφ			(MN/m <sup>2</sup> )	(pci)
GW	Καλά διαβαθμιζόμενοι καθαροί χάλικες, αμμοχάλικο	2000-2160	11-8	0,3	0,6	0	0	>38	>0,79	2,5E <sup>2</sup>	40-80	81-136	300-500
GP	Χάλικες καθαροί κακής διαβάθμισης, αμμοχάλικο	1840-2000	14-11	0,4	0,9	0	0	>37	>0,74	5,0E <sup>2</sup>	30-60	68-109	250-400
GM	Ιλιώδεις χάλικες κακής διαβάθμισης, μίγματα χάλικων-άμμου-ιλύος	1920-2160	12-8	0,5	1,1	----	----	>34	>0,67	1,5E <sup>7</sup>	20-60	27-109	100-400
GC	Αργιλώδεις χάλικες κακής διαβάθμισης, μίγματα χάλικων-άμμου-αργίλου	1840-2080	14-9	0,7	1,6	----	----	>31	>0,60	5,0E <sup>8</sup>	20-40	27-81	100-300
SW	Καλά διαβαθμισμένη καθαρή άμμος, χαλικώδεις άμμοι	1760-2080	16-9	0,6	1,2	0	0	38	0,79	5,0E <sup>4</sup>	20-40	54-81	200-300
SP	Άμμοι καθαροί κακής διαβάθμισης, μίγματα άμμου-χαλικών	1600-1920	21-12	0,8	1,4	0	0	37	0,74	5,0E <sup>4</sup>	10-40	54-81	200-300
SM	Ιλιώδεις άμμοι κακής διαβάθμισης, μίγματα άμμου-ιλύος	1760-2000	16-11	0,8	1,6	0,8	0,51	34	0,67	2,5E <sup>3</sup>	10-40	27-81	100-30
SM- SC	Μίγματα άμμου-ιλύος-αργίλου μικρής πλαστικότητας	1760-2080	15-11	0,8	1,4	0,8	0,51	33	0,65	1,0E <sup>6</sup>	----	----	----
SC	Αργιλώδεις άμμοι κακής διαβάθμισης, μίγματα άμμου αργίλου	1680-2000	19-11	1,1	2,2	0,76	0,112	31	0,60	2,5E <sup>7</sup>	5-20	27-81	100-300
ML	Ανόργανες ιλύες και αργιλώδεις ιλύες	1520-1920	24-12	0,9	1,7	0,68	0,092	32	0,62	5,0E <sup>8</sup>	<15	27-54	100-200
ML-CL	Μίγματα ανόργανων ιλύων και αργίλου	1000-1920	22-12	1,0	2,2	0,66	0,220	32	0,62	2,5E <sup>7</sup>	----	----	----
CL	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής και μέσης πλαστικότητας	1520-1920	24-12	1,3	2,5	0,88	0,130	28	0,54	5,0E <sup>8</sup>	<15	13-54	50-200
OL	Οργανικές ιλύες και αργιλιώδεις χαμηλής πλαστικότητας	1280-1600	33-21	----	----	----	----	----	----	----	<5	13-27	50-100
MH	Ανόργανες αργιλώδεις ιλύες, ελαστικές ιλύες	1120-1520	40-24	2,0	3,8	0,73	0,205	25	0,47	2,5E <sup>7</sup>	<10	13-27	50-100
CH	Ανόργανες άργιλοι μεγάλης πλαστικότητας	1200-1620	36-19	2,6	3,9	1,05	0,112	19	0,35	5,0E <sup>8</sup>	<15	13-41	50-150
OH	Οργανικές άργιλοι και ιλιώδεις άργιλοι	1040-1600	45-21	----	----	----	----	----	----	----	<5	7-27	25-100

Πίνακας 5.1: Τυπικές ιδιότητες συμπεκνωμένων υλικών

Ο πίνακας 5.2 δίνει κατά Crouney, μια κατά προσεγγιστική αντιστοιχία μεταξύ μέτρου αντίδρασης εδάφους  $k$  και του μέτρου ελαστικότητας  $E$  του εδάφους, για διάφορα είδη εδαφών.

ΕΔΑΦΟΣ	$k$		$E$
	pci	kgf/cm <sup>3</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
Άργιλος με μεγάλη πλαστικότητα ιλύς με οργανικές προσμίξεις	100	2,8	350
Άργιλος και ιλύς με μικρή πλαστικότητα	200	5,6	700
Άμμος με καλή διαβάθμιση Χαλίκια με κακή διαβάθμιση	500	14,0	1000
Αμμοχάλικα με καλή διαβάθμιση ή χωρίς προσμίξεις αργίλου Θραυστά αμμοχάλικα	1000	28,0	3500

Πίνακας 5.2: Αντιστοιχία  $k$  -  $E$  κατά Crouney

### Προδιαγραφές

1. AASHTO T-222
2. ASTM – D1195
3. DIN – 18134
4. MIL – STD – 621A (U.S. ARMY)
5. ANV – 670319/72 (Ελβετική)
6. ΕΛΛ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. Ε106/86

### 5.5.3 ΔΟΚΙΜΗ CBR (ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ & ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ)

Η δοκιμή CBR (εργοταξιακή και εργαστηριακή), όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.8, είναι μια μέθοδος προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Στην παρούσα φάση της κατασκευής – έλεγχο συμπίκνωσης εδάφους έδρασης – η δοκιμή αυτή γίνεται προκειμένου να ελεγχθεί η φέρουσα ικανότητα επιχώματος άρα και ο βαθμός συμπίκνωσης του έδαφος. Ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι όσο καλύτερο δείκτη CBR έχει ένα έδαφος, τόσο καλύτερα είναι συμπυκνωμένο, αφού ένας από τους βασικούς στόχους της συμπίκνωσης είναι η καλή φορτοικανότητα. Η διαδικασία της δοκιμής περιγράφεται στη παράγραφο 3.8.

## 5.6 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΒΑΘΝΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Εργαστηριακές αναλύσεις και επί τόπου δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Α.Π.Θ. για την εύρεση σχέσεων μεταξύ **βαθμού συμπίκνωσης dc** και **μέτρου ελαστικότητας E**. Οι επί τόπου δοκιμές εκτελέστηκαν διά φορτιζόμενης πλάκας, ενώ στο εργαστήριο έγιναν δοκιμές κατάταξης των αντίστοιχων υλικών που είχαν ποικίλη προέλευση: φυσικά εδάφη, αμμοχάλικα, θραυστά υλικά οδοστρωσίας.

Κύριος στόχος της προσπάθειας αυτής ήταν να δοθεί μια αξιόπιστη συσχέτιση μιας μηχανικής παραμέτρου και συγκεκριμένα του μέτρου ελαστικότητας και των διαφόρων παραμέτρων που προσδιορίζονται συστηματικά στα πλαίσια των απαραίτητων ελέγχων των οδικών κατασκευών που πραγματοποιούνται στην Ελλάδα.

Η σχέση η οποία προτείνεται για το **μέτρο ελαστικότητας E**, είναι:

$$E = \frac{40 \cdot (1,5 + C) \cdot (\gamma_d - 1) \cdot (DC - 70)}{(1 + 0,02 \cdot IP)^2} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

όπου :

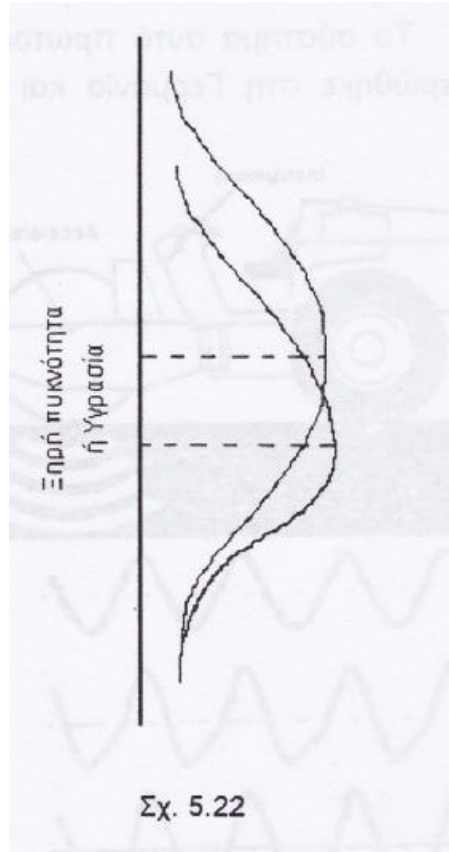
C=	0 για φυσικά υλικά
C=	1 για θραυστά υλικά
$\gamma_d$	το ξηρό ειδικό βάρος ( $\text{tn/m}^3$ )
DC	ο βαθμός συμπίκνωσης (%)
IP	ο δείκτης πλαστικότητας

Η ακρίβεια της σχέσης αυτής έχει ελεγχθεί σε πολλές περιπτώσεις οδικών έργων και κρίνεται απόλυτα ικανοποιητική, ενώ παράλληλα η χρησιμότητά της για διαστασιολόγηση και αξιολόγηση οδοστρωμάτων είναι μεγάλη.

## **5.7 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ**

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή τα αποτελέσματα εξάγονται με τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Σχηματίζεται η καμπύλη κατανομής είτε της ξηρής πυκνότητας  $\gamma_d$ , είτε της περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους  $w$  (Σχ. 5.22).

Βάσει της Πρότυπης Τεχνικής Προδιαγραφής XI, ο μέσος όρος της ξηρής πυκνότητας  $\gamma_d$  από πέντε (5) δειγματοληψίες δεν πρέπει να είναι μικρότερος από την προδιαγραφόμενη. Η τυπική απόκλιση της κατανομής δείχνει την ποιότητα της εργασίας. Είναι προφανές, ότι όσο μικρότερη είναι η τυπική απόκλιση, τόσο πιο επιμελημένη έχει γίνει η συμπύκνωση. Στη συχνή περίπτωση που η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι μεγάλη, τότε επιβάλλεται να δοθεί οδηγία επιπροσθέτων διελεύσεων του οδοστρώτηρα και ίσως εκ νέου διαβροχής του εδάφους. Η Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή XI ορίζει ότι η μικρότερη τιμή της ξηράς πυκνότητας  $\gamma_d$  δεν πρέπει να υπολογίζεται περισσότερο από 5% της προδιαγραφόμενης. Σημειώνεται τέλος, ότι αν η δειγματοληψία γίνει στους αρμούς διέλευσης του οδοστρώτηρα τα αποτελέσματα θα είναι χειρότερα. Θα πρέπει συνεπώς να λαμβάνεται μέριμνα επαρκούς αλληλοκάλυψης της επιφάνειας κατά τις διελεύσεις του οδοστρώτηρα.



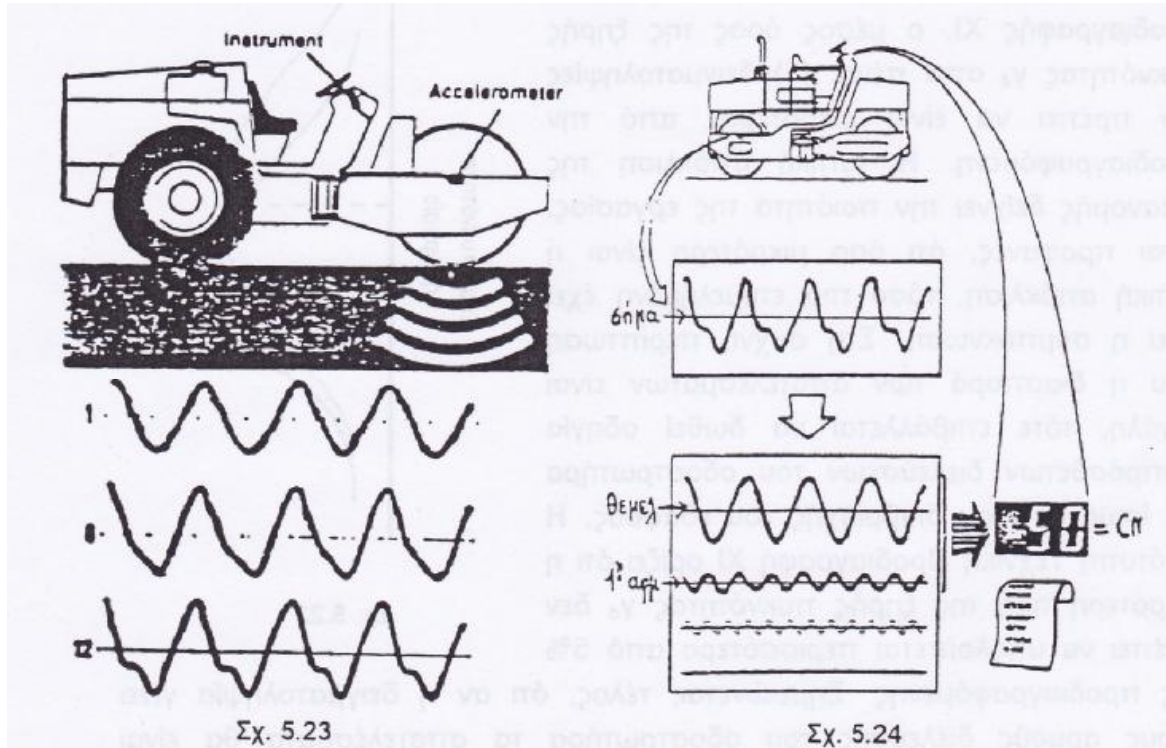
Σχ. 5.22

### **Προδιαγραφές**

1. ΠΡΟΤ. ΤΕΧΝ. ΠΡΟΔ. XI

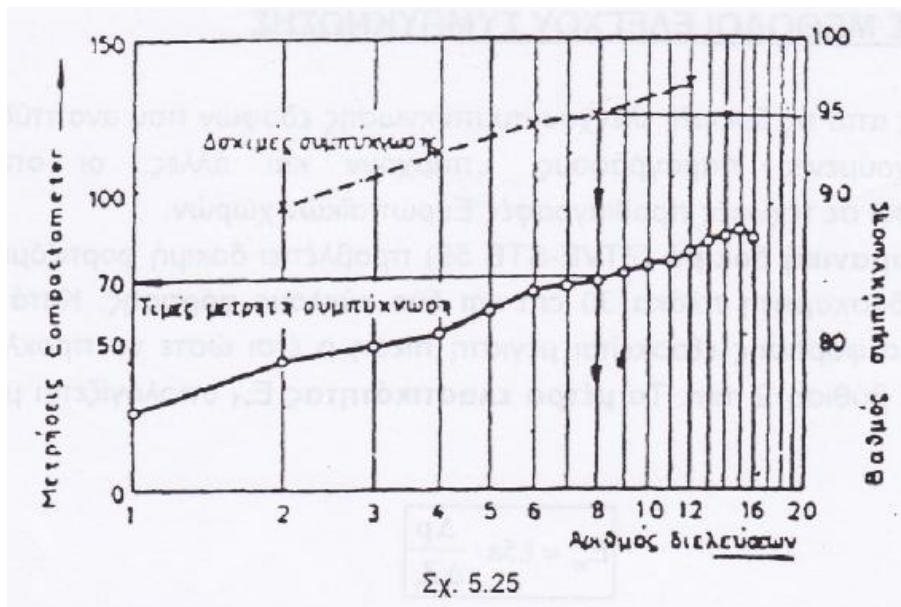
## 5.8 ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΡΗΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ (Compactometer)

Μια τελευταία εξέλιξη στον τομέα του ποιοτικού ελέγχου της συμπίκνωσης εδαφών, είναι ο **μετρητής συμπίκνωσης (compactometer)** (Σχ. 5.23)



Το σύστημα αυτό πρωτοεμφανίστηκε στη Σουηδία και στη συνέχεια καθιερώθηκε στη Γερμανία και στη Γαλλία. Αποτελείται από τον μετρητή επιτάχυνσης (accelerometer) που στερεώνεται εφέδρανο του κυλίνδρου ενός δονητικού οδοστρωτήρα και από τον μετρητή συμπίκνωσης (compactometer) ο οποίος τοποθετείται στον πίνακα οργάνων στο χειριστήριο του οδοστρωτήρα. Γίνεται καταγραφή της επιτάχυνσης και των δονήσεων του κυλίνδρου επάνω στο συμπυκνωμένο έδαφος, το ηλεκτρικό σήμα «φιλτράρεται» και ο λόγος του εύρους της πρώτης αρμονικής, προς το εύρος της θεμελιώδους μας δίνει την τιμή CMV (Σχ. 5.24). Έτσι έχουμε την τιμή CMV (Compactometer Value) που έχει το υπό συμπίκνωση έδαφος, κάθε πέντε (5) ή κάθε τριάντα (30) δευτερόλεπτα κατά τη κίνηση του οδοστρωτήρα πάνω σε αυτό. Αυτό σημαίνει ότι με ταχύτητα οδοστρωτήρα 3 km/h έχουμε μια ανάγνωση CMV κάθε 4m ή κάθε 25m.

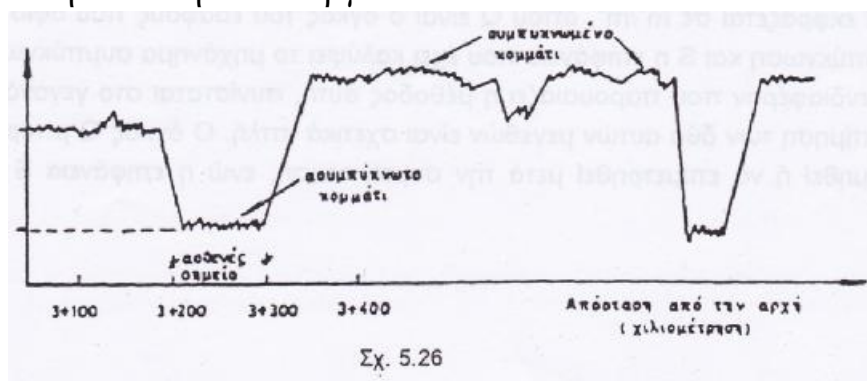
Οι τιμές CMV μπορούν να αναχθούν σε τιμές βαθμού συμπίκνωσης αν κάνουμε ένα διάγραμμα βαθμονομήσεως (καλιμπράρισμα) μεταξύ των τιμών CMV και του βαθμού συμπίκνωσης για διάφορες τιμές αριθμού διελεύσεων του οδοστρωτήρα (Σχ. 5.25).



Σχ. 5.25

Με το διάγραμμα CMV – βαθμού συμπίκνωσης, ξέρουμε ότι π.χ. για 8 διελεύσεις του οδοστρωτήρα, το συγκεκριμένο έδαφος έχει βαθμό συμπίκνωσης 95% και τιμή CMV=70. Έτσι, όταν δει ο χειριστής του οδοστρωτήρα ότι το CMV είναι πάνω από 70, σταματάει να συμπυκνώνει εκείνο το κομμάτι και προχωράει σε επόμενο κομμάτι, αξιοποιώντας πλήρως τον μηχανικό εξοπλισμό του εργοταξίου. Επίσης, δεν αφήνει ασυμπύκνωτα (ασθενή) σημεία, γιατί έχει εποπτεία του βαθμού συμπίκνωσης ταυτόχρονα την ώρα που συμπυκνώνει το τμήμα αυτό. Έτσι, μειώνεται η διασπορά των αποτελεσμάτων, μειώνεται η τυπική απόκλιση και το περιθώριο βαθμού συμπίκνωσης μεταξύ της χαρακτηριστικής τιμής και της μέσης τιμής.

Σε περίπτωση μεγάλου μήκους επιχώματος (όπως κατά την κατασκευή μιας σιδηροδρομικής γραμμής), μπορούμε να βρούμε με την ταυτόχρονη συμπίκνωση και ανάγνωση τιμών CMV, κατά τη διέλευση ενός δονητικού οδοστρωτήρα, τα ασθενέστερα σημεία (σχετικά ασυμπύκνωτα), καθ' όλο το μήκος της γραμμής. Έτσι, έχουμε ένα συνεχές διάγραμμα τιμών CMV, συναρτήσει της απόστασης από την αρχή του έργου (Σχ. 5.26) μέσω της οποίας βρίσκουμε τα σχετικά ασυμπύκνωτα τμήματα (όπου υπάρχει χαμηλό CMV) και προχωράμε στην επανασυμπύκνωση και αποκατάστασή τους. Ο εντοπισμός τέτοιων σημείων με τις κλασικές μεθόδους (π.χ. μια δοκιμή συμπίκνωσης ανά 150 m κ.λ.π.) θα ήταν δυσχερέστατος, αν όχι αδύνατος, με τις αντίστοιχες συνέπειες για την ποιότητα του έργου.



Σχ. 5.26

## 5.9 ΑΛΛΕΣ ΛΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Εκτός από τις δοκιμές ελέγχου συμπίκνωσης εδαφών που αναπτύξαμε στις προηγούμενες παραγράφους, υπάρχουν και άλλες, οι οποίες περιγράφονται σε τεχνικές προδιαγραφές Ευρωπαϊκών χωρών.

Η **Γερμανική δοκιμή** (ZTVE – STB 59) προβλέπει δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας με δύσκαμπτη πλάκα 30 cm και δύο κύκλους φόρτισης. Κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης εξασκείται μέγιστη πίεση  $p$  έτσι ώστε να προκληθεί κατακόρυφη βύθιση 2 mm. Το **μέτρο ελαστικότητας**  $E_{v1}$  υπολογίζεται με τη σχέση:

$$E_{v1} = 1,5a \cdot \frac{\Delta p}{\Delta Z_1}$$

Όπου  $\Delta p$  η διαφορά πίεσης των 3/10 και 7/10 της μέγιστης και  $\Delta Z_1$  η διαφορά των βυθίσεων που αντιστοιχούν στις παραπάνω πιέσεις.

Κατά τον δεύτερο κύκλο, η μέγιστη πίεση ισούται με εκείνη του τελευταίου σταδίου του πρώτου κύκλου. Το **μέτρο ελαστικότητας**  $E_{v2}$  υπολογίζεται με τη σχέση :

$$E_{v2} = 1,5a \cdot \frac{\Delta p}{\Delta Z_2}$$

Όπου η διαφορά πίεσης  $\Delta p$  ορίζεται ανάλογα με τον πρώτο κύκλο και  $\Delta Z_2$  η διαφορά της μέγιστης βύθισης κατά τον δεύτερο κύκλο και της παραμένουσας βύθισης του πρώτου κύκλου.

Οι Γερμανικές προδιαγραφές αναφέρονται στις ελάχιστες τιμές των μέτρων ελαστικότητας  $E_{v1}$  και  $E_{v2}$ , καθώς και στον βαθμό συμπίκνωσης κατά τη συμβατική (normal) μέθοδο Proctor, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3.

Οι Γαλλικές προδιαγραφές καθορίζουν, για κάθε εδαφικό υλικό και είδος χρησιμοποιούμενου μηχανήματος συμπίκνωσης, το μέγιστο πάχος της στρώσης στο επίχωμα και την πλατφόρμα, καθώς και τον λόγο  $Q/S$  αποτελεί κριτήριο για την εκτέλεση της συμπίκνωσης. Ο λόγος  $Q/S$  αποτελεί εξέλιξη του κλασσικού ελέγχου με βάση τον αριθμό των διελεύσεων. Ο λόγος  $Q/S$  εκφράζεται σε  $m^3/m^2$ , όπου  $Q$  είναι ο όγκος του εδάφους που υφίσταται συμπίκνωση και  $S$  η

επιφάνεια που έχει καλύψει το μηχάνημα συμπύκνωσης. Το ενδιαφέρον που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή, συνίσταται στο γεγονός ότι η εκτίμηση των δύο αυτών μεγεθών είναι σχετικά απλή. Ο όγκος  $Q$  μπορεί να εκτιμηθεί ή να επιμετρηθεί μετά την συμπύκνωση, ενώ η επιφάνεια  $S$  είναι γινόμενο του πλάτους  $L$  του μηχανήματος επί την διανυθείσα απόσταση  $D$ , που προσδιορίζεται με ένα χιλιομετρικό μετρητή επί του μηχανήματος.

Στρώση	Εδαφικό υλικό	Βαθμός συμπύκνωσης	$E_{v2}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{v1}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Υπόβαση	Αμμοχάλικα Αμμος Ψαθυρά εδάφη με συντ. ομοιομορφίας $U>7$	103%	1200	500
Σκάφη σε πάχος 20 cm	Ψαθυρά εδάφη $U>7$	103%	1200	550
	Συνεκτικά εδάφη	100%	450	225
Επιχώματα ανώ- τερα των 2 m	Ψαθυρά εδάφη $U<7$	100%	600	270
	Ψαθυρά εδάφη $U>7$	100%	1000	450
Ζώνη Α	Συνεκτικά εδάφη	97%	300	150
Επιχώματα κάτω των 2 m	Ψαθυρά εδάφη $U<7$	95%	450	200
	Ψαθυρά εδάφη $U>7$	95%	700	320
Ζώνη Β	Συνεκτικά εδάφη	92%	200	100
Φυσικό έδαφος στα ανώτερα 0,50 m	Συμπυκνώνεται <ul style="list-style-type: none"> <li>• υπό τις συνθήκες της Ζώνης Α στις διατομές σε όρυγμα και κάτω από επιχώματα με <math>h&lt;2m</math></li> <li>• υπό τις συνθήκες της Ζώνης Β κάτω από επιχώματα με <math>h&gt;2m</math></li> </ul>			

Πίνακας 5.3: Γερμανικές προδιαγραφές συμπύκνωσης

Οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν κατάταξη σε κατηγορίες των εδαφικών υλικών και των μηχανημάτων συμπύκνωσης. Στη συνέχεια, για κάθε είδος εδάφους υπάρχει ένας πίνακας ο οποίος δίνει το πάχος  $e$  της στρώσης και το μέγιστο του λόγου  $Q/S$  για κάθε τύπο μηχανήματος.

Τα μηχανήματα συμπύκνωσης των Γαλλικών προδιαγραφών κατατάσσονται, ανάλογα με τα φορτία τους, ως εξής:

- Οδοστρωτήρες με ελαστικά επίσωτρα, ανάλογα με το φορτίο του τροχού:  
 $P_1$  για φορτίο 2,5-4,0 t  
 $P_2$  για φορτίο 4,0-6,0 t  
 $P_3$  για φορτίο μεγαλύτερο των 6,0 t  
 Συνήθης ταχύτητα οδοστρωτήρων  $v=3,5-5,0$  km/h.



- Δονητικοί οδοστρωτήρες, ανάλογα με το στατικό φορτίο ανά μέτρο πλάτους του κυλίνδρου:  
 $V_1$  για φορτίο 15-25 kg/cm  
 $V_2$  για φορτίο 25-35 kg/cm  
 $V_3$  για φορτίο 35-45 kg/h  
 $V_4$  για φορτίο μεγαλύτερο των 45 km/h  
 Μέγιστη ταχύτητα των οδοστρωτήρων  $v=3,0$  km/h
- Κρουστικοί οδοστρωτήρες:  
 $PD_1$  για φορτίο 30-60 kg/cm  
 $PD_2$  για φορτίο μεγαλύτερο των 60 kg/cm  
 Μέγιστη ταχύτητα των οδοστρωτήρων  $v=3,0$  km/h

Μια εικόνα του συνόλου των προδιαγραφών δίνει ο πίνακας 5.4 για τέσσερις (4) κατηγορίες εδαφών:  $A_2, B_2, C_2$  και  $D_2$  που χρησιμοποιούνται σε στρώσεις επιχώματος. Για κάθε τύπο μηχανήματος παρέχει το πάχος στρώσης  $e$  και την μέγιστη τιμή του λόγου  $Q/S$ .

Τα **πλεονεκτήματα** που παρουσιάζει ένα τέτοιο σύστημα προδιαγραφών, είναι

Λεπτόκοκκα εδάφη	$D < 50$ mm	PI < 10		$A_1$	
	ΔΠ από το	10 < PI < 20		$A_2$	
	No 200	20 < PI < 50		$A_3$	
	> 35%	PI > 50		$A_4$	
Αμμώδη και χαλικώδη εδάφη με λεπτόκοκκα συστατικά	$D < 50$ mm	ΔΠ από το No 200	ΔΠ από το	SE > 35	$B_1$
	ΔΠ από το		No 10 > 70%	SE < 35	$B_2$
	No 200	μεταξύ 5 και 12%	ΔΠ από το	SE > 25	$B_3$
	μεταξύ		No 10 < 70%	SE < 25	$B_4$
	5% και 35%	ΔΠ από το No 200	PI < 10		$B_5$
			PI > 10		$B_6$
Εδάφη με λεπτόκοκκα και χονδρά στοιχεία	$D > 50$ mm	Υψηλό ΔΠ από το No 200		$C_1$	
	ΔΠ από το	Χαμηλό ΔΠ από το No 200	$D < 250$ mm	$C_2$	
	No 200 > 5%		$D > 250$ mm	$C_3$	
Εδαφικά και βραχώδη υλικά μη ευαίσθητα στο νερό	ΔΠ από το	$D < 50$ mm	ΔΠ από το No 10 > 70%	$D_1$	
			ΔΠ από το No 10 < 70%	$D_2$	
	No 200 < 5%	$50 \text{ mm} < D < 250 \text{ mm}$		$D_3$	
		$D > 250 \text{ mm}$		$D_4$	
Ημίβραχοι	Υψηλή μηχανική αντοχή			E	
Φυτική γη	Περιεκτικότητα σε οργανικά ΜΟ $\geq 10\%$			F	
όπου D η μέγιστη διάμετρος κόκκου και ΔΠ το διερχόμενο ποσοστό					

Πίνακας 5.4: Κατάταξη εδαφών κατά τις Γαλλικές προδιαγραφές συμπίκνωσης

πολλά:

- Ο καθορισμός εκ των προτέρων του μέγιστου πάχους της στρώσης  $e$  καθώς και της μέγιστης τιμής του λόγου  $Q/S$ , καθιστά δυνατή την προεκτίμηση, με αρκετή ακρίβεια, του κόστους εκτέλεσης της συμπύκνωσης, καθώς και την επιλογή των καταλληλότερων και περισσότερο οικονομικότερων οδοστρωτήρων.
- Ο λόγος  $Q/S$  είναι μια παράμετρος της οποίας ο προσδιορισμός και ο έλεγχος μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα κατά την πρόοδο των εργασιών. Σε σχέση με τον έλεγχο της ξηράς πυκνότητας κατά Proctor, ο έλεγχος του  $Q/S$  υπερτερεί λόγω του ότι είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε έδαφος, είναι περισσότερο ακριβής σε στρώσεις μεγάλου πάχους, όπου η πυκνότητα μεταβάλλεται με το βάθος και τέλος εξασφαλίζει σχετική οικονομία.

Παρατηρείται ότι η κατάταξη εδαφών κατά τις Γαλλικές προδιαγραφές βασίζεται, όπως και σύμφωνα με τις Αμερικάνικες μεθόδους, σε δοκιμές κοκκομετρικής ανάλυσης και ορίων Atterberg. Το ισοδύναμο άμμου χρησιμοποιείται, επίσης, σε ορισμένες κατηγορίες εδαφών. Υπάρχει για κάθε κατηγορία εδάφους ένας πίνακας, αντίστοιχος προς τον πίνακα 5.5, όπου δίνεται, σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου οδοστρωτήρα, το βέλτιστο πάχος στρώσης  $e$  και ο λόγος  $Q/S$ .

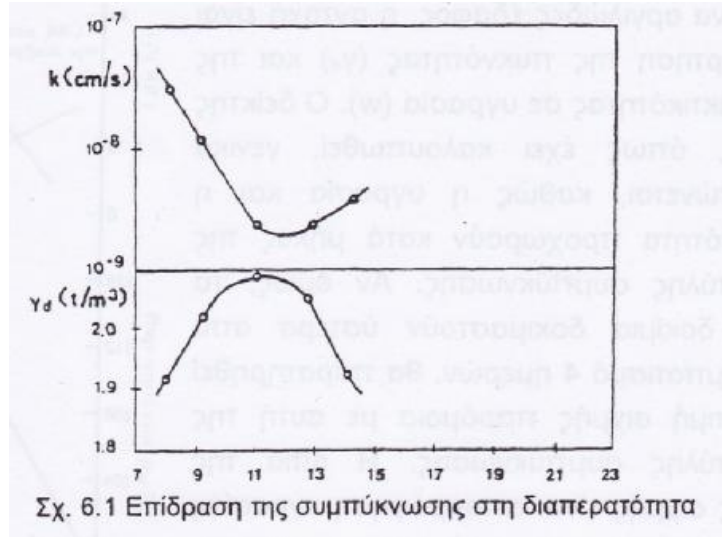
ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΕΔΑΦΗ		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$PD_1$	$PD_2$
$A_2$	$Q/S$	0,04	0,07	0,12	0,04	0,08	0,11	0,12	0,08	0,10
	$e$	0,30	0,40	0,50	0,20	0,40	0,50	0,50	0,30	0,40
$B_2$	$Q/S$	0,06	0,10	0,15	0,08	0,10	0,15	0,20	-	-
	$e$	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50	0,50	-	-
$C_2$	$Q/S$	0,05	0,08	0,10	0,05	0,10	0,12	0,15	-	-
	$e$	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50	0,50	-	-
$D_2$	$Q/S$	0,07	0,10	0,12	0,10	0,12	0,20	0,23	-	-
	$e$	0,30	0,50	0,70	0,50	0,70	0,90	0,90	-	-

Πίνακας 5.5: Καθορισμός μέγιστου πάχους στρώσεων και ρυθμού συμπύκνωσης

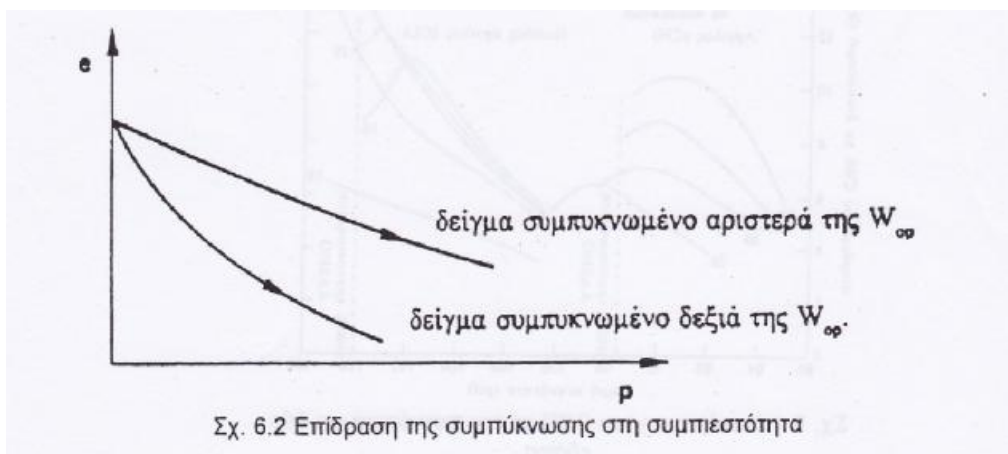
**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**  
**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## 6.1 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ

Εμπειρίες σε λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά κατέγραψαν την επίδραση της συμπύκνωσης στη διαπερατότητα. Χαρακτηριστικά παρατηρείται μια έντονη μείωση της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας, όσο αυξάνει η φυσική υγρασία. Το φαινόμενο πρέπει να αποδοθεί στην πύκνωση της διάταξης των κόκκων του εδάφους, γεγονός που δυσχεραίνει τη ροή του νερού. Στη συνέχεια η αύξηση της φυσικής υγρασίας επιφέρει μικρή αύξηση της διαπερατότητας λόγω της μείωσης της τιμής της ξηρής πυκνότητας ( $\gamma_d$ ) του υλικού. Για μια μεγαλύτερη ενέργεια συμπύκνωσης μειώνονται οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, ενώ παράλληλα αυξάνει η ξηρή πυκνότητα ( $\gamma_d$ ).

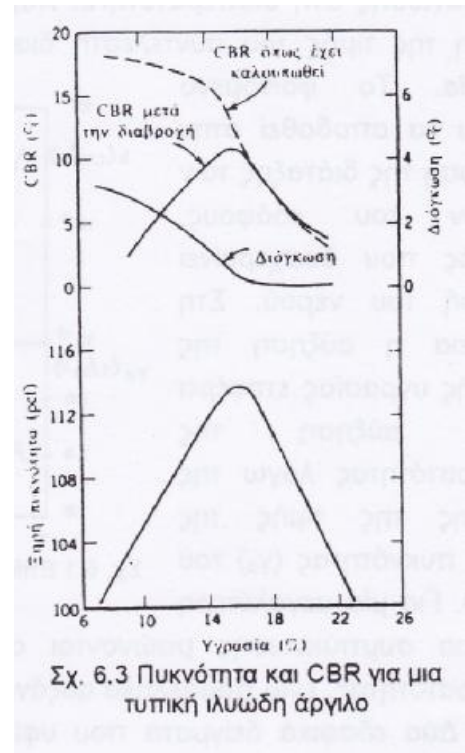


Δύο εδαφικά δείγματα που υφίστανται συμπύκνωση στην ίδια ξηρή πυκνότητα ( $\gamma_d$ ), αλλά με διαφορετική φυσική υγρασία, το πρώτο αριστερά της βέλτιστης φυσικής υγρασίας και το δεύτερο δεξιά της παρουσιάζουν διαφορετικά συμπεστώματα. Αν τοποθετηθούν σε οιδηματικές συσκευές ούτως ώστε να ελεγχθεί η σχέση της αναπτυσσόμενης πίεσης ( $p$ ) προς τον δείκτη πόρων ( $e$ ), κριτήριο συμπίεστούτητας, θα παρατηρηθεί ότι το δεύτερο δείγμα είναι πιο συμπεστώ από το πρώτο. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην μικρότερη συμπίεστούτητα που παρουσιάζουν οι στερεοί κόκκοι που υπάρχουν σε μεγαλύτερη αναλογία στο πρώτο δείγμα.



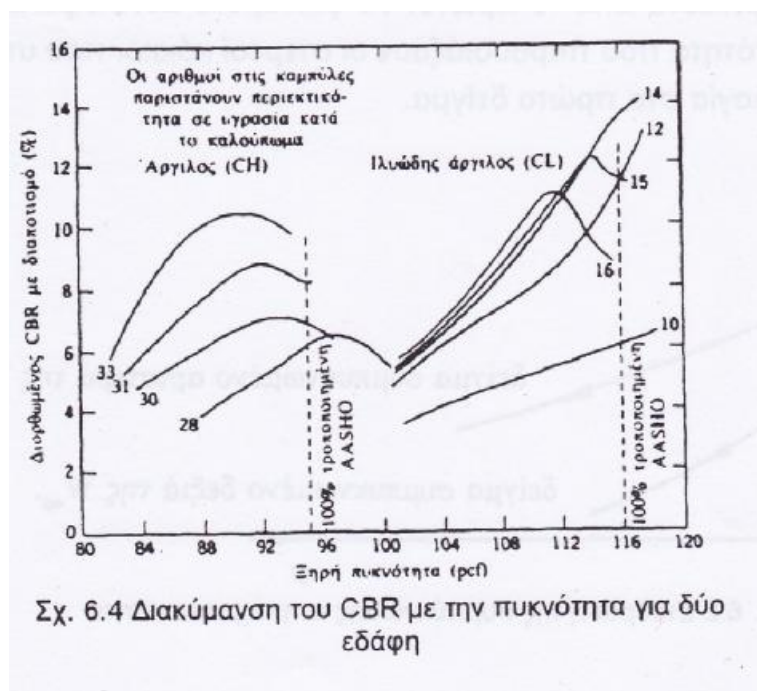
## 6.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Εφόσον ο τελικός σκοπός της δοκιμής συμπίκνωσης είναι η εξασφάλιση επαρκούς ευστάθειας, είναι σημαντική η γνώση της σχέσης ανάμεσα στην **μηχανική αντοχή** και την **πυκνότητα**. Όπως φαίνεται στο (Σχ. 6.3) για ένα αργιλώδες έδαφος, η αντοχή είναι συνάρτηση της πυκνότητας ( $\gamma_d$ ) και της περιεκτικότητας σε υγρασία ( $w$ ). Ο δείκτης CBR, όπως έχει καλουπωθεί, γενικά ελαττώνεται, καθώς η υγρασία και η πυκνότητα προχωρούν κατά μήκος της καμπύλης συμπίκνωσης. Αν όμως, τα ίδια δοκίμια δοκιμαστούν ύστερα από υδρεμποτισμό 4 ημερών, θα παρατηρηθεί μια τιμή αιχμής παρόμοια με αυτή της καμπύλης συμπίκνωσης. Η αιτία της τιμής αιχμής είναι η απορρόφηση υγρασίας και διόγκωση κατά την περίοδο υδρεμποτισμού.



Σχ. 6.3 Πυκνότητα και CBR για μια τυπική ιλυώδη άργιλο

Επειδή η αντοχή του εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε υγρασία και την πυκνότητα, έχει σημασία να γνωρίζουμε την επίδραση της πυκνότητας για διάφορες συνθήκες υγρασίας. Το (Σχ. 6.4) δείχνει την διακύμανση του CBR με την πυκνότητα για δύο εδάφη, το ένα άργιλο (CH) και το άλλο ιλυώδη άργιλο (CL) που υποβλήθηκαν σε δοκιμές μετά από την τυποποιημένη περίοδο



Σχ. 6.4 Διακύμανση του CBR με την πυκνότητα για δύο εδάφη

υδρεμποτισμού 4 ημερών. Οι αριθμοί δίπλα στις καμπύλες δείχνουν την

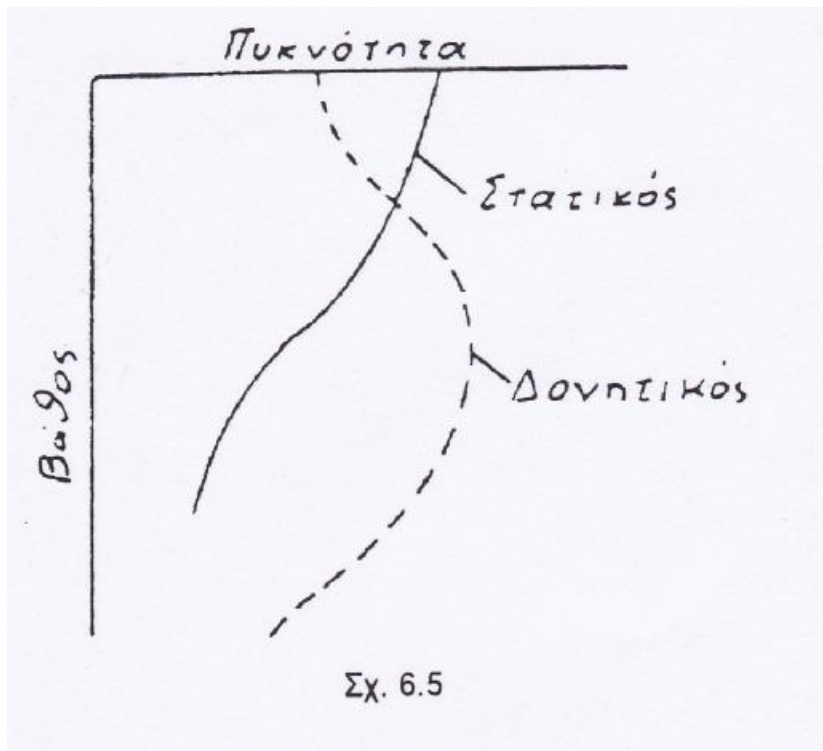
περιεκτικότητα υγρασίας κάθε δοκιμίου κατά το καλούπωμα. Πρέπει να σημειωθεί πρώτα για το υλικό CH, για σταθερή πυκνότητα. Ο CBR αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε υγρασία. Ακόμη ο CBR αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας μέχρι μιας ανώτατης τιμής και κατόπιν ελαττώνεται. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπόψη την πίεση στους πόρους σε κορεσμένο έδαφος. Για παράδειγμα, αν η περιεκτικότητα σε υγρασία κατά το καλούπωμα είναι 28% και η πυκνότητα είναι 100pcf, το έδαφος είναι ασταθές, επειδή μέρος της εφαρμοζόμενης πίεσης παραλαμβάνεται από το νερό των πόρων.

Το ίδιο ισχύει και για το έδαφος ιλυώδους αργίλου του (Σχ. 6.4), αλλά σε μικρότερο βαθμό. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται όταν η συμπύκνωση γίνεται με κρουστικές μεθόδους και όχι στατικά.

### 6.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΝΑ ΣΤΡΩΣΗ

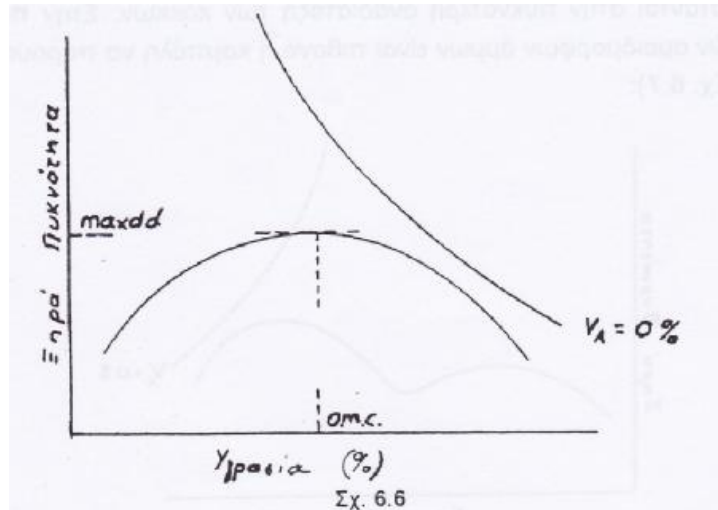
Το πάχος κάθε στρώσης καθορίζεται μετά την επιλογή του μηχανικού εξοπλισμού. Σημειώνεται ότι, οι απαιτήσεις συμπίκνωσης κάθε στρώση, αυξάνουν όσο πλησιάζουμε προς την επιφάνεια του οδοστρώματος.

Το διάγραμμα επιρροής της ξηρής πυκνότητας σε συνάρτηση με το πάχος της στρώσης δίνεται στ (Σχ. 6.5). για σύγκριση δίνεται για στατικό δονητικό οδοστρωτήρα. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι είναι σκόπιμο μετά από τις διελεύσεις του δονητικού οδοστρωτήρα να ακολουθούν διελεύσεις στατικού οδοστρωτήρα για συμπίκνωση των επιφανειακών στρώσεων. Προκύπτει ακόμα ότι το βάθος συμπίκνωσης του δονητικού οδοστρωτήρα είναι διπλάσιο του στατικού.



## 6.4 ΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ PROCTOR

Το τυπικό διάγραμμα της ξηρής πυκνότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία προκύπτει από 5 δοκίμια όπως καθορίζουν οι Προδιαγραφές, δίνεται παρακάτω (Σχ. 6.6):



Το μέγιστο της καμπύλης αυτής καθορίζει την μέγιστη ξηρή πυκνότητα και την βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Το μέγιστο αντιστοιχεί περίπου σε ποσοστό κενών 4%. Σημειώνεται ότι, ενδείκνυται πρώτα να σχεδιαστεί η γραμμή μηδενικών κενών, γιατί έτσι μπορούν αμέσως να αναγνωριστούν τυχόν λάθη (απορρίπτονται όλα τα σημεία του πειράματος που βρίσκονται δεξιά της).

Η εξίσωση της γραμμής μηδενικών κενών είναι:

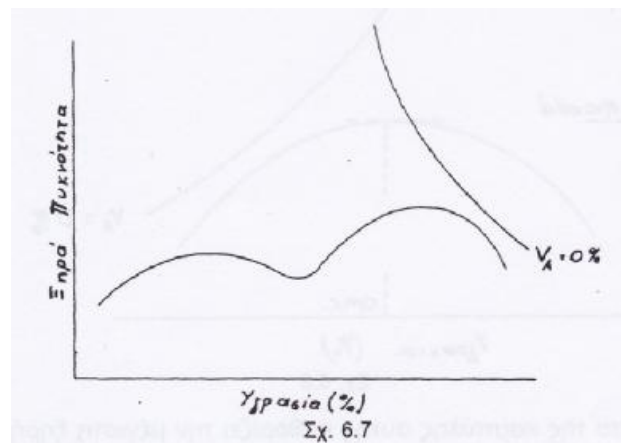
$$\gamma_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{100}\right)}$$

Η εξίσωση κάθε γραμμής συγκεκριμένου ποσοστού κενών είναι:

$$\gamma_d = \frac{\left(1 - \frac{V_a}{100}\right)}{\left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{100}\right)}$$



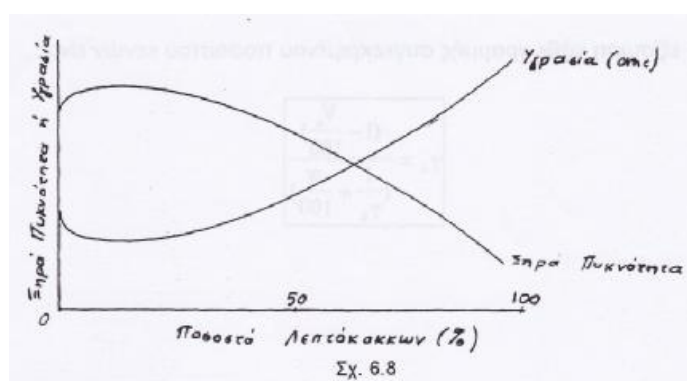
Η εξήγηση της μορφής καμπύλης έχει ως εξής: στο σκέλος της ανόδου η περιεκτικότητα υγρασίας είναι χαμηλή. Η εσωτερική τριβή παρεμποδίζει την εύκολη πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων, γιατί το νερό των πόρων δρα ως λιπαντικό. Έτσι, όσο αυξάνει η ποσότητα του λιπαντικού, τόσο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πυκνότητα. Από κάποια τιμή όμως και πέρα το νερό γεμίζει όλους τους εδαφικούς πόρους και αρχίζει να τους απωθεί (αρχή διόγκωσης). Κατά τη διαδικασία της συμπίκνωσης τώρα αναπτύσσονται υδροστατικές πιέσεις, που ανθίστανται στην πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων. Στην περίπτωση των λεπτών ομοιόμορφων άμμων είναι πιθανό η καμπύλη να παρουσιάζει δύο μέγιστα (Σχ. 6.7):



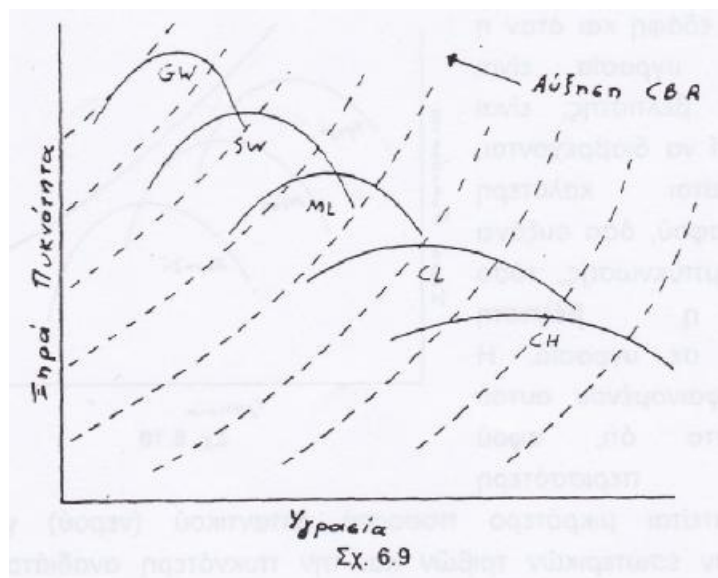
Η πτώση της ξηρής πυκνότητας πριν το δεύτερο απόλυτο μέγιστο, οφείλεται στο ότι η μικρή περιεκτικότητα υγρασίας οδηγεί, λόγω της επιφανειακής τάσης, σε συσσωμάματα των κόκκων, που δεν διασπώνται με την ενέργεια συμπίκνωσης και εμποδίζουν έτσι την πυκνότερη αναδιάταξή τους. Αύξηση της υγρασίας ελαττώνει την επιφανειακή τάση και έτσι επιτυγχάνεται η διάσπαση των συσσωμάτων. Ως σχολιασμό της καμπύλης συμπίκνωσης αναφέρονται τα εξής:

#### Η επιρροή του είδους του εδάφους

Η επιρροή του ποσοστού των λεπτόκοκκων εδαφικών συστατικών στην επιτυγχανόμενη συμπίκνωση δίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 6.8):



Σημειώνεται ότι, για τα λεπτόκοκκα εδάφη ισχύει κατά προσέγγιση ο εξής κανόνας: βέλτιστη περιεκτικότητα υγρασίας = PL-4%. Παρακάτω δίνεται σε άλλη μορφή η επιρροή του ποσοστού των λεπτόκοκκων εδαφικών συστατικών στην επιτυγχανόμενη συμπίκνωση σε σχέση μάλιστα με την διατμητική αντοχή του εδάφους με την τιμή CBR (Σχ. 6.9).

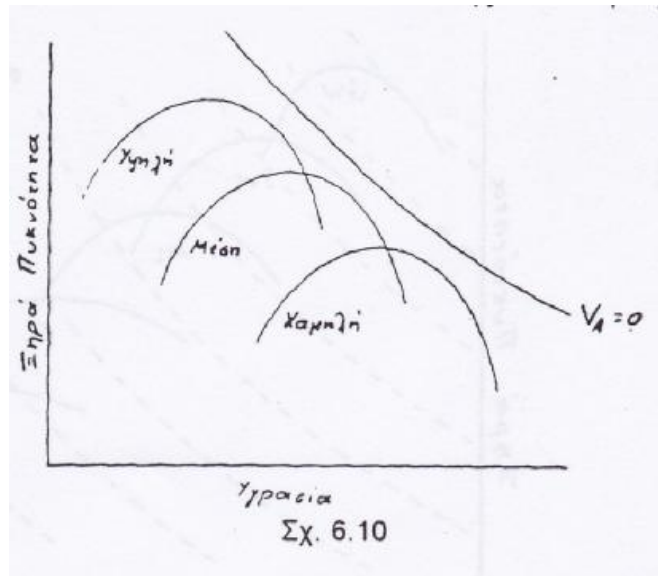


Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι, όσο αυξάνει το ποσοστό λεπτόκοκκων, τόσο μειώνεται η ξηρή πυκνότητα και η αντοχή του εδάφους, ενώ αυξάνεται η βέλτιστη περιεκτικότητα υγρασίας. Αυτό γίνεται γιατί τα λεπτόκοκκα εδάφη έχουν μεγαλύτερο ποσοστό πόρων και συνεπώς «σηκώνουν» περισσότερο νερό στη φάση της «λιπαντικής» τους δράσης πριν οι αναπτυσσόμενες υδροστατικές πιέσεις αρχίσουν να απωθούν τους κόκκους.

Σε σχέση με την αντοχή φαίνεται, ακόμα, ότι για κάθε έδαφος το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας είναι 2% περίπου της βέλτιστης. Η αύξηση της υγρασίας πέρα της βέλτιστης μειώνει έντονα την αντοχή. Παρατηρείται ακόμα ότι, όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος, τόσο πιο ήπια κλίση έχουν οι καμπύλες, δηλαδή τόσο μικρότερη είναι η βελτίωση που προκύπτει από τη μηχανική συμπίκνωση του εδάφους, ή αλλιώς η μεταβολή της περιεκτικότητας της υγρασίας επηρεάζει λιγότερο τη δυνατότητα πυκνότερης αναδιάταξης των κόκκων. Το βασικό συμπέρασμα προκύπτει είναι ότι στα χονδρόκοκκα καλά διαβαθμισμένα εδάφη, σε αντίθεση με τα λεπτόκοκκα, είναι αποδοτική η προσπάθεια καλύτερης συμπίκνωσης.

## Επιρροή της ενέργειας συμπίκνωσης

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα συμπίκνωσης για τυπικό έδαφος και υψηλή, χαμηλή ενέργεια συμπίκνωσης (Σχ. 6.10). από το σχήμα αυτό προκύπτει, όπως άλλωστε αναμενόταν, ότι όλες οι καμπύλες έχουν κοινή περιβάλλουσα την καμπύλη των μηδενικών κενών. Για τα καλής ποιότητας (χονδρόκοκκα) εδάφη και όταν η φυσική τους υγρασία είναι μικρότερη της βέλτιστης, είναι προτιμητέο αντί να διαβρέχονται, να επιχειρείται καλύτερη συμπίκνωση, αφού, όσο αυξάνει η ενέργεια συμπίκνωσης, τόσο μειώνεται η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η εξήγηση του



φαινομένου αυτού συνίσταται στο ότι, αφού προσφέρεται περισσότερη ενέργεια, απαιτείται μικρότερο ποσοστό λιπαντικού (νερού) για την υπερνίκηση των εσωτερικών τριβών και την πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων. Και αφού η αναδιάταξη των κόκκων είναι τελικά πυκνότερη, ο όγκος των πόρων που απομένει και μπορεί να γεμίσει με νερό είναι τελικά μικρότερος (το φαινόμενο δηλαδή της απώθησης των κόκκων λόγω υδροστατικών πιέσεων αρχίζει για μικρότερη περιεκτικότητα υγρασίας). Σημειώνεται τέλος, ότι, υφίσταται προφανής αντιστοιχία της συμπεριφοράς του εδάφους όσον αφορά την ενέργεια συμπίκνωσης στο εργαστήριο με εκείνη στο εργοτάξιο. Μεγαλύτερη ενέργεια συμπίκνωσης στο εργοτάξιο σημαίνει περισσότερες διελεύσεις και κυρίως βαρύτερος οδοστρωτήρας. Η αντιστοιχία μπορεί να προκύψει και θεωρητικά με βάση την προσφερόμενη ενέργεια συμπίκνωσης σε Kgr/lit και κατάλληλους συντελεστές προσαρμογής.

## 6.5 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο δείκτης πλαστικότητας συγκαταλέγεται μεταξύ των φυσικών παραμέτρων του εδάφους. Η σημασία του, ωστόσο, για την μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι μεγάλη. Ιδιαίτερα, η πλαστικότητα ενός πλαστικού εδαφικού βρέθηκε να έχει μεγάλη επίδραση στην παραμορφωσιμότητά του. στον πίνακα 6.1 δίδεται η σχέση μεταξύ παραμόρφωσης και δείκτη πλαστικότητας υπό συνθήκες τριαξονικής θλίψης για ένα θραυστό αμμοχάλικο.

Θραυστό Αμμοχάλικο	Πλευρική πίεση (kg/cm <sup>2</sup> )	Αξονική πίεση (kg/cm <sup>2</sup> )	Δείκτης Πλαστικότητας (PI)		
			NP	PI=3,6	PI=7,2
D=(1/2)"	0	1,40	0,20	0,72	1,01
	0,35	5,60	0,55	1,30	1,80
	0,70	10,00	0,65	2,10	3,30
Θραυστό Αμμοχάλικο	0	2,11	0,60	0,85	1,60
	0,35	4,93	0,85	1,25	---
	0,70	7,00	1,02	1,50	2,60
D=(3/8)"	1,05	14,00	1,40	2,05	3,10

Πίνακας 6.1

## 6.6 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Οι μηχανικές παράμετροι του εδάφους που προαναφέρθηκαν είναι εκείνες που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε προβλήματα Οδοποιίας. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι για τα κλασσικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, η **γωνία τριβής  $\phi$** , η **συνοχή  $c$** , ο **συντελεστής Poisson  $\nu$** , η **αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη  $R_c$** , υπεισέρχονται συχνά σε προβλήματα σχετικά με τη κατασκευή οδών, οδοστρωμάτων και τεχνικών έργων Οδοποιίας.

Εξάλλου μηχανικές παράμετροι, των οποίων η εφαρμογή περιορίστηκε αρχικά στα πλαίσια των δραστηριοτήτων μιας περιοχής ή χώρας, όπως η **ευστάθεια  $R$**  (stability), δημιούργημα της διεύθυνσης οδών της Καλιφόρνιας, διαδόθηκαν στη συνέχεια ευρύτατα και αποτέλεσαν τη βάση διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων διά αντίστοιχων μεθόδων, ο κατάλογος, κατά συνέπεια, των μηχανικών παραμέτρων είναι μεγάλος και σε κάθε χώρα το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν εκείνες που υπεισέρχονται στις προδιαγραμμένες μεθόδους διαστασιολόγησης και ανάλυσης της συμπεριφοράς των οδικών κατασκευών.

Μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων έχουν προταθεί ορισμένες εμπειρικές σχέσεις, των οποίων η χρήση επιβάλλεται όταν υπάρχει αδυναμία εκτέλεσης μιας πλήρους σειράς δοκιμών για λόγους που ήδη έχουν εκτεθεί. Είναι, ωστόσο, αναγκαία μια (κριτική θεώρηση) των σχέσεων αυτών, ούτως ώστε να αποφεύγονται σημαντικά σφάλματα. Ένα δείγμα μιας τέτοιας κριτικής θεώρησης αποτελεί μια συνοπτική ανάλυση της σχέσης μεταξύ του **μέτρου ελαστικότητας  $E$**  και του **δείκτη CBR**, που είναι εκείνη που συχνότερα χρησιμοποιείται στην Οδοποιία. Οι τύποι υπολογισμού του  $E$  σε συνάρτηση του δείκτη CBR, που προτείνονται από διάφορα εργαστήρια και ερευνητικά κέντρα, είναι πολλοί γραμμικής και μη γραμμικής μορφής, ένας απ του απλούστερους και ακριβέστερους (Centre de Recherches Routieres, Βέλγιο) είναι :

$$E=(\text{kg}/\text{cm}^2)=60\text{CBR}$$

Αντίστοιχα το Βρετανικό Κέντρο (TRRL) προτείνει:

$$E(\text{MPa})=17.6 \text{ CBR}^{0.64}$$

Μια πρόχειρη ανάλυση ωστόσο δείχνει ότι οποιαδήποτε συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών είναι παρακινδυνευμένη, γιατί, ενώ ο δείκτης CBR αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα, το μέτρο  $E$  προκύπτει από την απόκριση μιας ημιάπειρης θεωρητικά μάζας. Η ετερογένεια, η ανισοτροπία, η στρωματοποίηση του εδάφους και άλλοι παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια της παραπάνω σχέσης που αποτελεί στην ουσία ένα ποιοτικό κριτήριο για τον χαρακτηρισμό του εδαφικού υλικού:

Μεταξύ του μέτρου αντίδρασης  $k$  και του δείκτη CBR προτείνεται η σχέση:

$$k(\text{kg/cm}^3) = \frac{\text{CBR}}{5} + 3$$

Της οποίας η ακρίβεια είναι μεγαλύτερη για τις τιμές του CBR μεγαλύτερες του 5 και μικρότερες του 20.

Για την εύρεση του CBR από τα όρια υπάρχει τύπος (Laboratoire Central des Ponts et Chausees, Γαλλία):

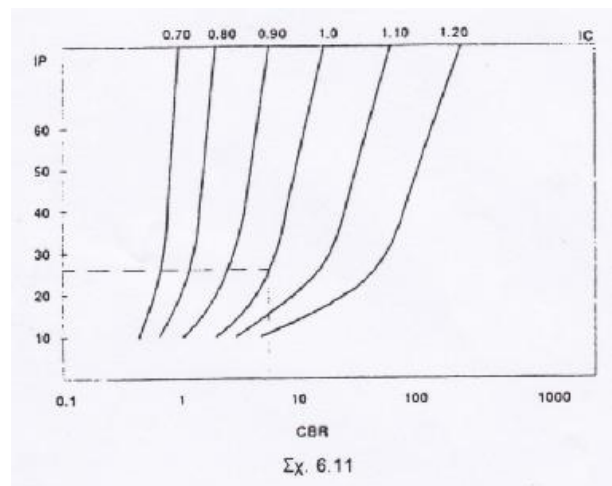
$$\text{CBR} = \frac{4500}{\text{WL} \cdot \text{PI}}$$

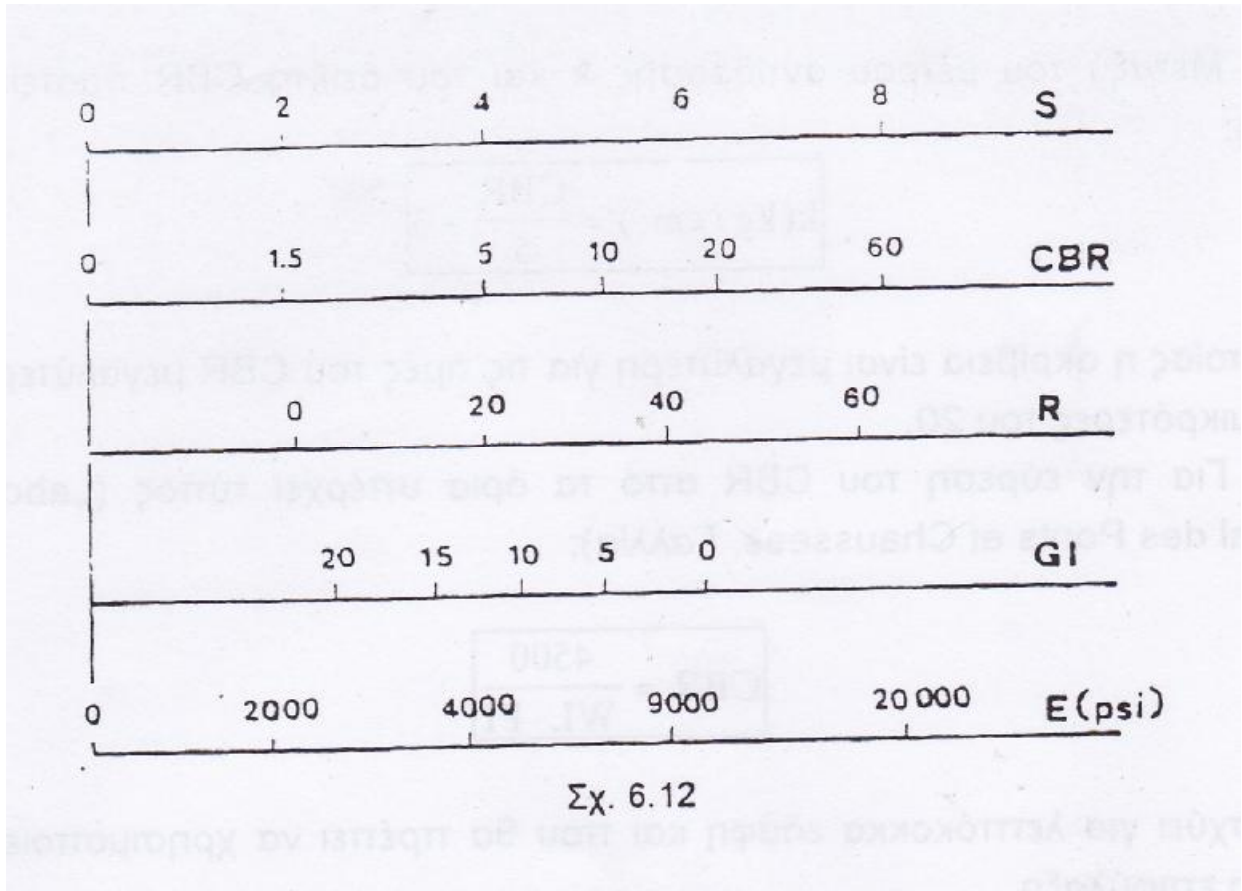
Που ισχύει για τα λεπτόκοκκα εδάφη και που θα πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη επιφύλαξη.

Για την εύρεση του δείκτη CBR από τον δείκτη συνεκτικότητας (CI) χρησιμοποιείται το νομογράφημα του Transport and Road Research Laboratory, Αγγλία (Σχ. 6.11).

Σύμφωνα προς το νομογράφημα η τιμή του δείκτη CBR προσδιορίζεται σε συνάρτηση του δείκτη πλαστικότητας (PI), που είναι φυσική σταθερά του υλικού και του δείκτη συνεκτικότητας (CI), που εξαρτάται από την φυσική υγρασία του δείγματος.

Τέλος, ένα νομογράφημα που συνδέει διάφορες παραμέτρους φέρουσας ικανότητας, για φυσικά εδάφη, (αργιλικά, αμμοϊλυώδη, αμμοχάλικα), την παράμετρο  $S$  κατά AASHO, την ευστάθεια  $R$ , τον δείκτη CBR, τον δείκτη ομάδας (GI) και το μέτρο ελαστικότητας  $E$  δίδεται στο (Σχ. 6.12).





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. ΟΔΟΠΟΙΑ ΜΕΡΟΣ Ε : “Χωματουργία και συναφή τεχνικά έργα” Νικ. – Ιωάν. Γ.Κορωναίου Καθηγητού Ε.Μ. Πολυτεχνείου Αθήνα 1969
2. “ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΟΔΟΠΟΙΑΣ” Αναστάσιος Μουρατίδης Αναπλ. Καθηγητής Α.Π.Θ. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη 1994
3. “ΟΔΟΠΟΙΑ” Χαράλαμπου Παντ. Φραντζή Τακτικού Καθηγητού Πολυτεχνικής Σχολής Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης Ξάνθη 1981
4. “ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ: ΝΕΩΤΕΡΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ” – Τ.Ε.Ε. Αθήνα 28 – 30 Μαΐου 1990  
”Δοκιμές Proctor, CBR, φότριση πλακόσ, συμπύκνωση”  
Εισηγητής: Ν.Μαρσέλλλος Πολ. Μηχανικός
- 5.”ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ : ΝΕΩΤΕΡΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ” – Τ.Ε.Ε. Αθήνα 28 – 30 Μαΐου 1990
6. “ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ : ΝΕΩΤΕΡΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ” – Τ.Ε.Ε. Αθήνα 28 – 30 Μαΐου 1990 – “Υπολογισμός πάχους εύκαμπτων οδοστρωμάτων”  
Εισηγητής : Α. Φ. Νικολαΐδης Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
7. “ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΧΙ” (εκτέλεση χωματουργικών έργων οδοποιίας)  
Φ.Ε.Κ. 264/66 Τεύχος Β’
8. “ΜΕΛΕΤΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ – ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕ Η/Υ – ΤΕΕ ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ”  
“Χωματουργικές εργασίες / υλικά και δοκιμές  
Ευστάθεια και συμπυκνώσεις” Αλέξ. Κόκκαλης Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
9. “ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ Ε105-86”
10. “ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ Ε106-86”  
ΦΕΚ 955 30/12/86 Τεύχος 2<sup>ο</sup>
11. “ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ”  
Ιωάννης Δ. Κοφίτσας Αγρον. Τοπ. Μηχ. Διπλ. Ε.Μ.Π.  
Εκδόσεις
12. “ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ”  
Ιωάννης Δ. Κοφίτσας Αγρον. Τοπ. Μηχ. Διπλ. Ε.Μ.Π.  
Εκδόσεις ΙΩΝ
13. “ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΟΔΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ”  
Χρ. Λαγγιώτης – Σπ. Πηλίτσης – Ι. Κουβόπουλος



Εκδόσεις Τ.Ε.Ε.

14. “ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (2<sup>η</sup> Αμερικανική Έκδοση)”

E. J. Yoder / M. V. Witczak

Εκδόσεις Γκιούρδας

15. “ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ”

Σημειώσεις Σ. Αναγνωστόπουλου

16. “ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΕΚΜΗΧΑΝΙΣΕΩΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ”

X. I. Εφραιμίδη – Αθήνα 1985

17. “ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Ι”

I. Β. Γαλάνης Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Ο.Ε.Δ.Β. Αθήνα 1992

18. “ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ Ι”

Κ. Ι. Χατζής Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός

Ο.Ε.Δ.Β. Αθήνα 1993

19. “AASHTO: Association of State Highway and Transportation Officials”

20. “HANDBOOK OF HIGHWAY ENGINEERING”

R. F. Baker

21. “HIGHWAY ENGINEERING HANDBOOK”

K. B . Woods

22. “AASHO INTERIM GUIDE FOR THE DESIGN OF FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURES”

23. “SHELL DESIGN CHARTS FOR FLEXIBLE PAVEMENTS, 1963”

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ</b>	4
1.1 Σημασία του εδάφους στην οδοποιία	5
1.2 Το έδαφος και τα χαρακτηριστικά του	8
1.3 Ιδιότητες του εδάφους	10
1.4 Έδαφος έδρασης	12
1.5 Εύκαμπτα οδοστρώματα	13
<b>2. ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ</b>	
2.1 Ορισμός της συμπύκνωσης	16
2.2 Σκοπός της συμπύκνωσης	17
2.3 Σπουδαιότητα της συμπύκνωσης	19
2.4 Βαθμός συμπύκνωσης – Περιεχόμενη υγρασία	21
2.5 Συμπύκνωση και κατασκευή επιχώματος	24
2.6 Μόρφωση επιφανειών ορυγμάτων	31
<b>3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ</b>	
3.1 Κοκκομετρία	36
3.2 Ισοδύναμο άμμου	40
3.3 Όρια Atterberg	41
3.3.1. Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας	44
3.3.2. Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας	46
3.3.3 Προσδιορισμός ορίου συρρικνώσεως	47
3.4 Δείκτης ομάδας	49
3.5 Κατάταξη εδαφών	50
3.5.1 Κατάταξη βάσει της υφής	51
3.5.2 Κατάταξη κατά AASHO: American Association of State Highway Officials	52
3.5.3 Κατάταξη κατά CEUSA: Corps of Engineers U.S. Army	54
3.5.4 Κατάταξη κατά FAA: Federal Aviation Agency	57
3.6 Καταλληλότητα εδάφους για επίχωμα	60
3.7 Δοκιμή Proctor	62

3.7.1 Πρότυπη δοκιμή Proctor	62
3.7.2 Τροποποιημένη δοκιμή Proctor	64
3.8 Δοκιμή CBR	67
3.8.1 Περιγραφή δοκιμής	65
3.8.2 Σύγκριση εργαστηριακού και επί τόπου CBR	73
3.8.3 Συσχέτιση τύπου εδάφους με CBR	74
3.8.4 Υπολογισμός δείκτη CBR ενός εδάφους	74
<b>4. ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ</b>	<b>77</b>
4.1 Τρόποι και μηχανήματα συμπύκνωσης	78
4.2 Τεχνική της συμπύκνωσης στο εργοτάξιο – Μηχανήματα	81
4.2.1 Στατικοί οδοστρωτήρες με λείους κυλίνδρους	83
4.2.2 Στατικοί οδοστρωτήρες με ελαστικά	85
4.2.3 Στατικοί οδοντωτοί οδοστρωτήρες (με κατσικοπόδαρα)	90
4.2.4 Μηχανήματα συμπύκν. με τύμπανα σφηνοειδών προεξοχών	94
4.2.5 Δονητικοί οδοστρωτήρες (λείων τυμπάνων και με κατσικοπόδαρα)	96
4.2.6 Δονητικές πλάκες	101
4.2.7 Κρουστικοί συμπυκνωτές (μηχανικοί κόπανοι – βάτραχοι)	102
4.3 Μέθοδοι σχεδιασμού συμπύκνωσης	103
4.4 Επιλογή μηχανήματος ανάλογα με το έδαφος	105
4.4.1 Βράχος	105
4.4.2 Άμμος και χαλίκι	106
4.4.3 Ιλύς	107
4.4.4 Άργιλος	107
<b>5. ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ</b>	<b>110</b>
5.1 Εισαγωγή	111
5.2 Έλεγχος συμπύκνωσης κατά Proctor	112
5.3 Έλεγχος περιεχόμενης υγρασίας	113
5.3.1 Μέθοδος με αμμόλουτρο	113
5.3.2 Μέθοδος ανθρακασβεστίου	114
5.4 Έλεγχος πυκνότητας εδάφους	115
5.4.1 Αδιατάρακτο δείγμα – Μέθοδος με σωλήνα διατήσεως	115
5.4.2 Διαταραγμένο δείγμα – Μέθοδος της μεμβράνης από ελαστικό	116
5.4.3 Μέθοδος με αντικατάσταση με άμμο	117

5.4.4 Πυρηνική μέθοδος	121
5.5 Έλεγχος φέρουσας ικανότητας εδάφους	122
5.5.1 Δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας	122
5.5.2 Μέτρο αντίδρασης υπεδάφους	125
5.5.3 Δοκιμή CBR (επί τόπου & εργαστηριακή)	129
5.6 Φέρουσα ικανότητα και βαθμός συμπύκνωσης	130
5.7 Μέθοδος τυπικής απόκλισης	131
5.8. Χρήση μετρητή συμπύκνωσης ( Compactometer)	132
5.9. Άλλες μέθοδοι ελέγχου συμπύκνωσης	134
<b>6. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>138</b>
6.1 Η επίδραση της συμπύκνωσης στη διαπερατότητα και τη συμπιεστότητα	139
6.2 Μηχανική αντοχή και πυκνότητα	140
6.3 Απαιτήσεις της συμπύκνωσης ανά στρώση	142
6.4 Εξήγηση της μορφής της καμπύλης Proctor	143
6.5 Σχέση μεταξύ πλαστικότητας – παραμορφωσιμότητας	147
6.6. Εμπειρικές σχέσεις μεταξύ μηχανικών παραμέτρων	148
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>151-152</b>