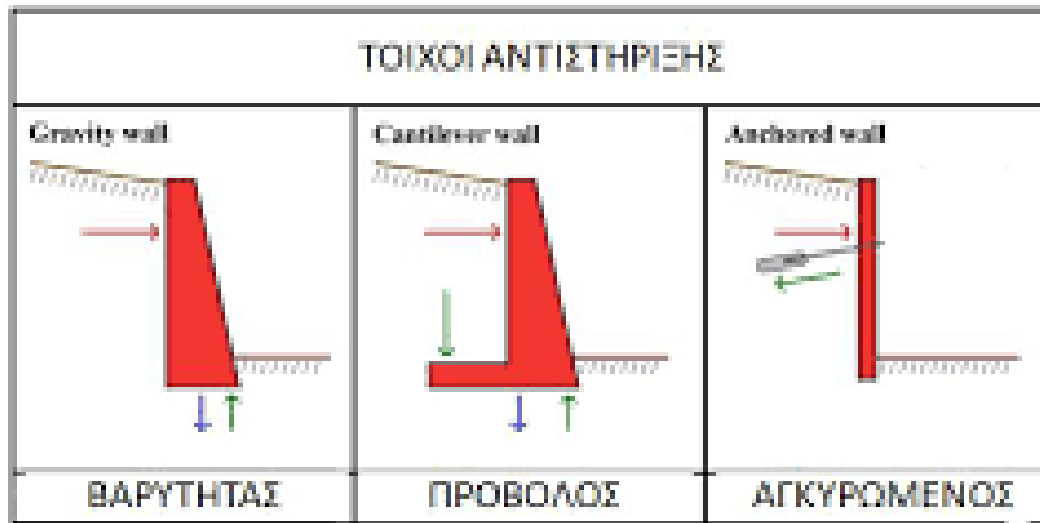


# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-- ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



## ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

2<sup>η</sup> ΔΙΑΛΕΞΗ – ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΟΔΩΝ –  
ΕΔΑΦΟΣ – ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

### 3. Γεωλογική και Γεωτεχνική Αναγνώριση Οδικών Χαράξεων

#### 1. Περιεχόμενο της γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης

Η γεωλογική-γεωτεχνική αναγνώριση

ένα από τα πρώτα βήματα για σχεδιασμό και κατασκευή ενός οδικού έργου.

#### Σημαντικά ζητήματα σχεδιασμού:

- Οι κλίσεις πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων,
- οι συνθήκες ισορροπίας γεωλογικών σχηματισμών , οι δυνατότητες αντιστήριξης,
- η φέρουσα ικανότητα εδαφών για διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων

#### αλλά και προβλήματα κατασκευής:

- όπως η εκσκαψιμότητα διαφόρων σχηματισμών,
- οι θέσεις δανείων υλικών και
- οι συνθήκες υπόγειας δίκαιας,

αντιμετωπίζονται μέσω της γεωτεχνικής αναγνώρισης.

# 1. Περιεχόμενο της γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης

*Ειδικότερα, σε περιπτώσεις μεγάλων οδικών έργων,*

❑ όπως η κατασκευή αυτοκινητοδρόμων, όπου μέσω εκσκαφών και επιχωματώσεων μετακινείται ένας τεράστιος όγκος χωματισμών, η προκαταρκτική αυτή φάση της υλοποίησης του έργου είναι καθοριστικής σημασίας.

➤ Στα τέλη της δεκαετίας του '90, χαράξεις αυτοκινητοδρόμων σε ημιορεινές περιοχές μετατοπίσθηκαν σημαντικά ως προς τον αρχικό σχεδιασμό, επειδή διαπιστώθηκε ότι δεν ήταν εξασφαλισμένη η ευστάθεια των γεωλογικών σχηματισμών σε ανοικτό όρυγμα ενώ αδύνατη ήταν η κατασκευή σήραγγας.

# 1. Περιεχόμενο της γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης

- Οι μέθοδοι γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης είναι πολλές –διαφέρουν ως προς την έκταση και το κόστος αλλά και ως προς το βάθος της έρευνας.
- Σε επίπεδο προκαταρκτικής μελέτης οδοποιίας, (πιθανές επιλογές πολλές), **περιορίζεται σε μεθόδους που εκτελούνται σύντομα και με χαμηλό κόστος αντίθετα, όταν καθορισθεί η τελική χάραξη του άξονα, μέθοδοι πιο λεπτομερείς και ακριβείς πρέπει να εφαρμοσθούν.**
- Σε προκαταρκτική μελέτη, ενδιαφέρει η δυνατότητα υλοποίησης, από γεωτεχνικές δυσκολίες, η κάθε πιθανή χάραξη, με αντίστοιχες επιπτώσεις στη συνολική δαπάνη. Όταν η βασική επιλογή της χάραξης ολοκληρωθεί, μέσω της γεωτεχνικής αναγνώρισης, ακολουθεί:
  - ✓ η επιλογή του είδους των κατασκευών και γεωκατασκευών και
  - ✓ η διαστασιολόγηση των έργων,
  - ✓ με αντίστοιχες εκτιμήσεις σε θέματα προμέτρησης και προϋπολογισμού.

# 1. Περιεχόμενο της γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης

Ανάλογα με το είδος του οδικού έργου, το φυσικό ανάγλυφο, το στάδιο μελέτης και τα επί μέρους τεχνικά έργα, γίνεται ένας βασικός σχεδιασμός της γεωτεχνικής αναγνώρισης.

## Ο σχεδιασμός αυτός περιλαμβάνει:

- τον καθορισμό του τεχνικού αντικειμένου της επιτόπιας έρευνας
- την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού
- την προεκτίμηση χρόνου και κόστους
- την επιλογή μεθόδων καταγραφής και λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων
- τις ενέργειες για άρση τυχόν εμποδίων εκτέλεσης της γεωτεχνικής αναγνώρισης.

Παράλληλα, απαραίτητη είναι μια εκτεταμένη έρευνα γραφείου (desk review) (συλλογή δεδομένων από παλαιότερες γεωτεχνικές έρευνες, γεωλογικούς χάρτες, αεροφωτογραφίες καθώς και σε δημιουργία καταλλήλων τοπογραφικών υποβάθρων).

Η γεωλογική και γεωτεχνική αναγνώριση είναι στενά συνδεδεμένη, εκτός από τα αμιγώς τεχνικά θέματα κατασκευής, και με το σημαντικότερο ζήτημα των απαλλοτριώσεων. Η οριστική επιλογή των μεθόδων εκτέλεσης των χωματοουργικών εργασιών και η διαστασιολόγηση γεωκατασκευών και τεχνικών έργων οδηγεί στον ακριβή καθορισμό της ζώνης κατάληψης της οδού και διευκολύνει τη διενέργεια των απαιτούμενων απαλλοτριώσεων.

## 2. Μέθοδοι γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης

- Μεγάλη ποικιλία μεθόδων γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης
- Η σύγχρονη τεχνολογία τελειοποιεί υφιστάμενες μεθόδους και εισάγει καινούργιες, περισσότερο σύγχρονες και αποτελεσματικές.
- Από την πολύ απλή μέθοδο του οπτικού ελέγχου των γαιωδών σχηματισμών και τον έλεγχο “επαφής” (feel test) του εδαφικού δείγματος, μέχρι τις ηλεκτρικές διαγραφίες και τη σεισμική διάθλαση, υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων αναγνώρισης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με το έργο, το στάδιο μελέτης και το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα.
- Παράλληλα και πολύ συχνά, η γεωλογική και γεωτεχνική αναγνώριση περιλαμβάνει μεθόδους έρευνας αρχείων, εγγράφων, μελετών και παλαιότερων ερευνών με στοιχεία χρήσιμα για τη διαμόρφωση της γεωτεχνικής εικόνας του έργου.

## 2. Μέθοδοι γεωλογικής και γεωτεχνικής αναγνώρισης

Το σύνολο των μεθόδων αναγνώρισης εδαφών και γεωλογικών σχηματισμών διαιρείται σε έξι μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τα εργαλεία της έρευνας και τη φύση των ελέγχων.

Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- η έρευνα γεωλογικών στοιχείων
- η επί τόπου γεωτεχνική αναγνώριση
- οι γεωφυσικές μέθοδοι αναγνώρισης
- οι ερευνητικές γεωτρήσεις
- οι ερευνητικές διατρήσεις
- η εργαστηριακή έρευνα.

### 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

#### α) Γεωλογικοί χάρτες

Οι γεωλογικοί χάρτες καλύπτουν το σύνολο της επικράτειας και διατίθενται σε κλίμακα **1:50.000**.

- Περιλαμβάνουν στοιχεία στρωματογραφικά για τους ιζηματογενείς σχηματισμούς και λιθολογίας για τους μεταμορφωσιγενείς σχηματισμούς.

Άλλα συναφή και χρήσιμα στοιχεία, όπως :

- η θέση ρηγμάτων,
- πληροφορίες υδρογεωλογικού χαρακτήρα αλλά και
- λατομικές περιοχές

είναι δυνατό να ανευρεθούν στους γεωλογικούς χάρτες.



# 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

Η έρευνα των γεωλογικών στοιχείων συνίσταται:

- στη συγκέντρωση όλων των χρήσιμων στοιχείων γεωλογικού χαρακτήρα, και
- παράλληλα, την καταγραφή στο πεδίο των λιθολογικών, στρωματογραφικών, τεκτονικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών των γεωσχηματισμών.

α) **Γεωλογικοί χάρτες:** Οι γεωλογικοί χάρτες καλύπτουν το σύνολο της επικράτειας (διατίθενται σε κλίμακα 1:50.000).

Περιλαμβάνουν στοιχεία στρωματογραφικά για τους ιζηματογενείς σχηματισμούς και λιθολογίας για τους μεταμορφωσιγενείς σχηματισμούς.

Άλλα συναφή και χρήσιμα στοιχεία, όπως

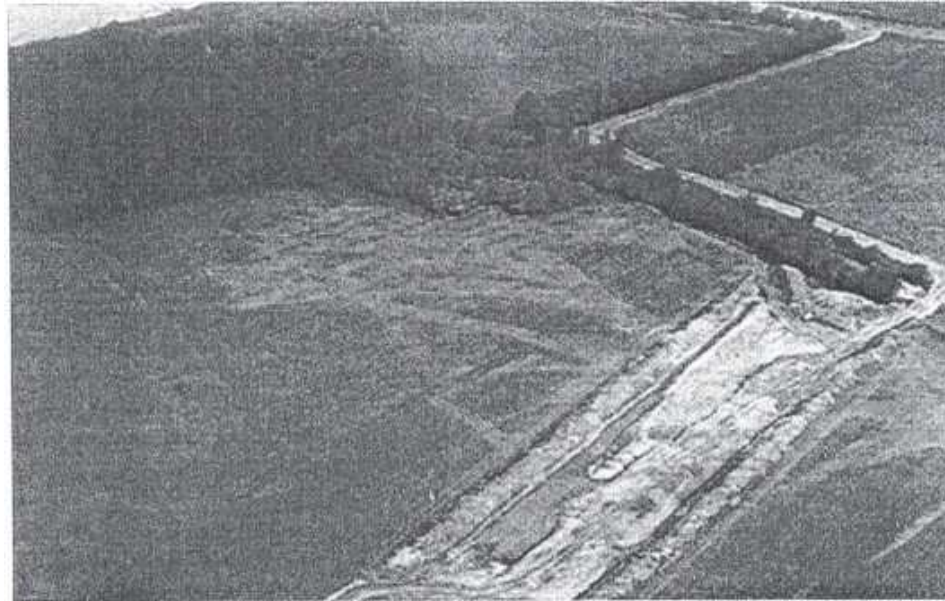
- η θέση ρηγμάτων,
- πληροφορίες υδρογεωλογικού χαρακτήρα αλλά και
- λατομικές περιοχές

είναι δυνατό να ανευρεθούν στους γεωλογικούς χάρτες.

# 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

## β) Αεροφωτογραφίες

- Οι αεροφωτογραφίες είναι στοιχεία πολύ χρήσιμα σε επίπεδο γεωλογικής αναγνώρισης.  
Πλεονέκτημα: αποδίδουν μια εικόνα του εδάφους όπως στην πραγματικότητα είναι και όχι μια αναπαράσταση υψομετρικού χαρακτήρα, όπως ένα κοινό τοπογραφικό διάγραμμα.
- Η φωτογεωλογική ερμηνεία μιας ζώνης εδάφους (Εικ. 8) κατατάσσει τους σχηματισμούς σε ένα γεωλογικό χάρτη ανάλογα με τη συνεκτικότητα και τη σκληρότητα τους και όχι με την ηλικία τους.



- **Εικόνα 8.** Εντοπισμός επιφανειακών αμμοχαλικωδών σχηματισμών λόγω διαφορετικής ανάπτυξης των καλλιεργειών .

### 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

- Το είδος και η εικόνα της βλάστησης και η παρουσία νερού, **(διακρίνονται καθαρά στις αεροφωτογραφίες)**, είναι πληροφορίες για τη φύση του εδάφους.
- Σε μελέτες οδοποιίας απαιτούνται αεροφωτογραφίες μιας ευρύτερης ζώνης του έργου, πλάτους 1-2 km, (ικανοποιητική η απόδοση συνόλου της χάραξης σε κλίμακα 1:10.000).

#### γ) Υδρολογικά στοιχεία

- Στοιχεία υδρολογικά της κάθε περιοχής είναι χρήσιμα στη φάση αυτήν της έρευνας.
- Τα βροχομετρικά στοιχεία επιτρέπουν την εκτίμηση παροχών απορροής και τη διαστασιολόγηση υδραυλικών τεχνικών έργων.

# 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

## δ) Γεωλογική χαρτογράφηση

### Γεωλογική χαρτογράφηση:

- εφαρμοσμένη έρευνα πεδίου σε επίπεδο τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης,
- ❖ κύριος στόχος: η ποιοτική κατάταξη διαφόρων σχηματισμών από μηχανική συμπεριφορά. Στην έρευνα πεδίου, εκτός των αμιγώς γεωλογικών θεμάτων είναι και ζητήματα υδρολογίας, υδρογεωλογίας που συνιστούν την υδρογεωλογική χαρτογράφηση.
- Γεωλογική χαρτογράφηση: Πλήρης απεικόνιση επί τοπογραφικού διαγράμματος των χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής.
- Η γεωλογική χαρτογράφηση στηρίζεται σε στοιχεία εκ γεωλογικών χαρτών και σε επιτόπια διερεύνηση των γεωσχηματισμών.
- Περιλαμβάνει: τη στρωματογραφική διάρθρωση των υπογείων οριζόντων, τον καθορισμό του τύπου και της έκτασης των γεωλογικών σχηματισμών, στοιχεία της τεκτονικής δομής της περιοχής, πτυχώσεις, μεταπτώσεις, επωθήσεις, διακλάσεις του βραχώδους υπόβαθρου με τις διευθύνσεις και τις διαστάσεις τους.
- Το σύνολο των στοιχείων συγκεντρώνεται και παρουσιάζεται σε γεωλογικό χάρτη που συνοδεύεται από αναλυτικό υπόμνημα και συναφή τεχνική έκθεση.

# 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

## ε) Υδρογεωλογική χαρτογράφηση

Είναι η αποτύπωση, σε τοπογραφικό διάγραμμα των στοιχείων διάταξης των υπογείων υδροφορέων και των συνθηκών υπόγειας δίκαιτας.

**Μέσω της υδρογεωλογικής χαρτογράφησης επιδιώκεται:**

- ο εντοπισμός υπογείων υδροφορέων (Σχ. 1) και η εκτίμηση των αντιστοιχών αποθεμάτων,
  - ο καθορισμός του υδρολογικού μηχανισμού συλλογής του υδατικού δυναμικού και των συνθηκών ροής καθώς και
  - η εκτίμηση για τις πιθανές διαδρομές φυσικής αποστράγγισης.
- ❖ Η υδρογεωλογική χαρτογράφηση είναι βασική προϋπόθεση για την εκπόνηση της υδρογεωλογικής μελέτης αλλά και για τη διαστασιολόγηση υδραυλικών έργων οδοποιίας.

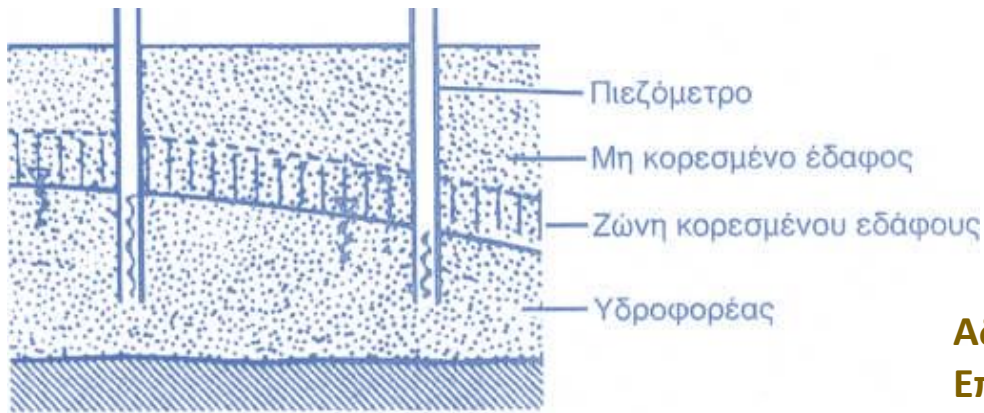
# 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

## σχήμα 1. Υπόγειοι υδροφορείς

Εδαφος

Διαπερατό  
Υπέδαφος

Αδιαπέρατο  
υπόβαθρο

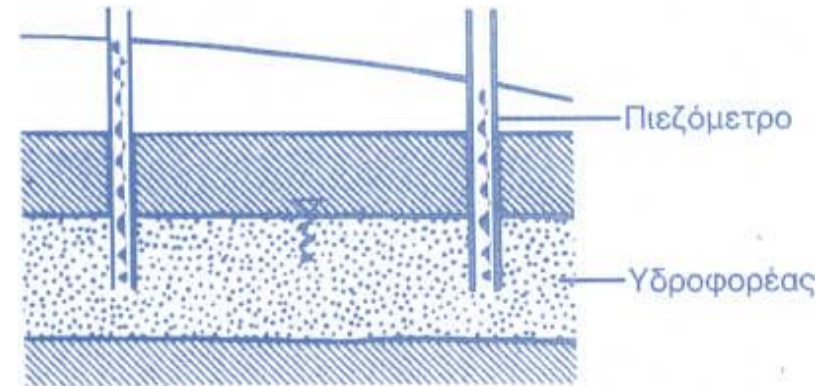


α. Υδροφορέας ελεύθερης επιφάνειας

Αδιαπέρατη  
Επιφάνεια

Διαπερατό  
Υπέδαφος

Αδιαπέρατο  
Υπόβαθρο



β. Υδροφορέας υπό πίεση

# 3. Έρευνα γεωλογικών στοιχείων

στ) Δορυφορικές εικόνες και χρήση GIS

- Για οδικές αρτηρίες μεγάλης σημασίας,
- δορυφορικές εικόνες και
- **χάρτες πολλαπλών επιπέδων πληροφοριών τύπου GIS (Geographic Information Systems)**

είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν, για να διευκολυνθεί ο μελετητής στον εντοπισμό τυχόν

εμποδίων ή σημείων υποχρεωτικής διέλευσης για την επιλογή της χάραξης.



## 4. Γεωτεχνική μακροσκοπική έρευνα

- **Επιτόπια επίσκεψη στην περιοχή του οδικού έργου**
- Και οι σχετικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν κατά μήκος της χάραξης
- ✓ Δίδουν χρήσιμες πληροφορίες για τη σύσταση των σχηματισμών.
- Η μέθοδος της επιτόπιας παρατήρησης, (δεν παρέχει την απαραίτητη ακρίβεια) των στοιχείων του υπεδάφους και κατά συνέπεια, δεν είναι επαρκής, είναι ωστόσο απλή και ανέξοδη.
- ✓ **Γενικές παρατηρήσεις (παρακείμενες οδοί και τεχνικά έργα), και στοιχεία σχετικά με τη μορφολογία και τη φυτοκάλυψη της περιοχής αποτελούν τις πρώτες ενδείξεις για το είδος των σχηματισμών και των αναμενόμενων γεωτεχνικών προβλημάτων.**
- Παρατηρήσεις σε τομές του υπεδάφους σε ανοιχτά σκάμματα, σε κοίτες φυσικών αποδεκτών, σε περιοχές έντονης διάβρωσης, σε ορύγματα υφισταμένων οδών και σε άλλες θέσεις.
- ✓ Οι παρατηρήσεις αυτές δίδουν ενδείξεις για τη διαστρωμάτωση και τη σύσταση των σχηματισμών.
- ✓ Ο μηχανικός θα πρέπει να έχει υπόψη του ότι οι οποιεσδήποτε παρατηρήσεις, για να έχουν αξία, θα πρέπει να φθάνουν σε ένα βάθος μεγαλύτερο των 2 m, δεδομένου ότι ο επιφανειακός μανδύας συχνά αποτελείται από φυτική γη και προσχλωσιγενή εδάφη που δεν επηρεάζουν την οδική κατασκευή και, ιδιαίτερα, τη θεμελίωση των τεχνικών έργων.



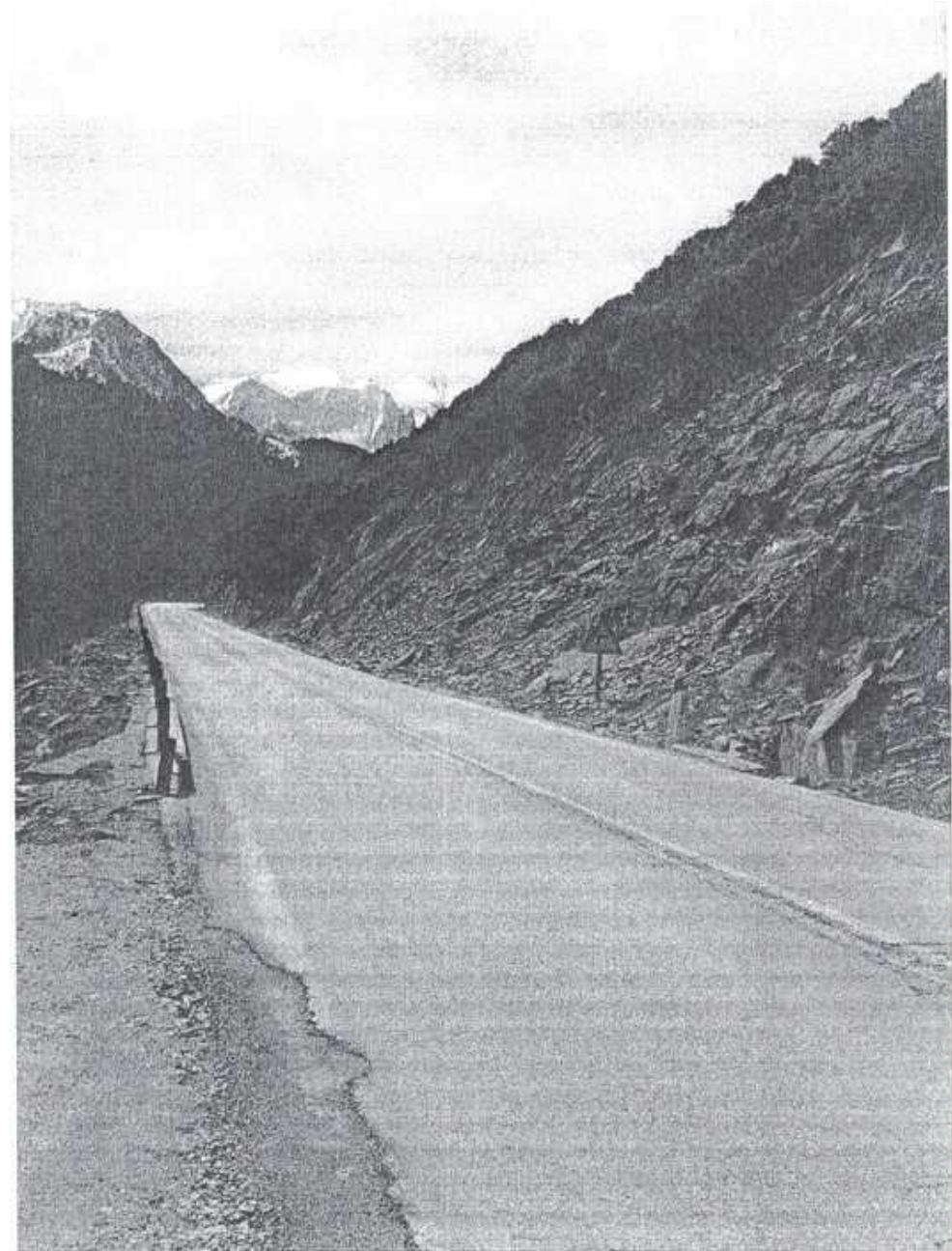
## 4. Γεωτεχνική μακροσκοπική έρευνα

Σημαντικές μπορεί ακόμη να είναι και οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις γεωλογικού χαρακτήρα, όπως:

- οι κλίσεις του φυσικού ανάγλυφου και
- τυχόν “φρύδια” ολίσθησης στα ανάντη φυσικά πρανή.
- Ισχυρές κλίσεις φυσικών πρανών αποτελούν ένδειξη σταθερού βραχώδους υπόβαθρου (Εικ. 9).
- Αντίθετα, ήπιες κλίσεις στις λοφώδεις και ορεινές περιοχές συχνά υποδηλώνουν μικρή μηχανική αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών (Εικ. 10).
- "Ιχνη από παλαιότερες ολισθήσεις σε φυσικές κλιτείς αποτελούν ενδείξεις μιας γαιώδους μάζας που ευρίσκεται σε οριακή ισορροπία.
- Και στις δύο περιπτώσεις, η εκσκαφή ορυγμάτων για διαμόρφωση της διατομής της οδού είναι δυνατό να διαταράξει μια εύθραυστη ισορροπία και, συνεπώς, η όποια τεχνική επέμβαση πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή μετά από σχετική μελέτη.

## 4. Γεωτεχνική μακροσκοπική έρευνα

- **Εικόνα 9· Ισχυρές κλίσεις φυσικών πρανών.**
- Παραλλαγή χάραξης για αποφυγή περιοχής κατολίσθησης.  
(Σε συγκεκριμένο μεγάλο οδικό έργο, η ορατή κατολίσθηση οδήγησε σε μετάθεση της χάραξης προς τα πεδινά και στην κατασκευή οδικής γέφυρας).
- **Σημαντικό βήμα, σε μια μακροσκοπική έρευνα:** η διαπίστωση αν μια κατολίσθηση είναι ενεργός ή σταθεροποιημένη.
- **Επιφάνειες στέψης που δεν καλύπτονται από βλάστηση, εμφανείς ρωγμές, κορμοί δένδρων με απόκλιση από την κατακόρυφο και αστοχίες σε κατασκευές αποτελούν ενδείξεις ενεργού κατολίσθησης που εγκυμονεί και τους μεγαλύτερους κινδύνους για τα χωματουργικά του οδικού έργου.**



## 4. Γεωτεχνική μακροσκοπική έρευνα

➤ Η δειγματοληψία και η εξέταση δειγμάτων στο εργαστήριο όχι κύριος στόχος επιτόπιων παρατηρήσεων.

➤ Σε περίπτωση που βαθύτερα στρώματα φυσικού εδάφους είναι εκτεθειμένα, μια απλή δειγματοληψία δεν είναι άσκοπη.

➤ Ο μηχανικός θα πρέπει να αποσπάσει υλικό και να συλλέξει ξεχωριστά δείγματα για κάθε έναν από τους διαφορετικούς σχηματισμούς αποφεύγοντας τα πιθανώς διαβρωμένα επιφανειακά στρώματα.

➤ Ακόμη και στην περίπτωση αυτής της απλής δειγματοληψίας, τα δείγματα θα πρέπει να αριθμηθούν, να συσκευασθούν σωστά για μεταφορά στο εργαστήριο, ενώ απαραίτητο είναι να σημειωθούν σε τοπογραφικό χάρτη οι θέσεις δειγματοληψίας.



*Εικόνα 10. Πεταλοειδής ολίσθηση σε πρανή ήπιων κλίσεων*

## 5. Οπτική και δια χειρός εξέταση εδαφικών δειγμάτων

- Σε ορισμένες περιπτώσεις οδικών έργων ή σσωνος σημασίας, είναι απαραίτητο να γίνει μια στοιχειώδης γεωτεχνική αναγνώριση με απλές μεθόδους και χωρίς ιδιαίτερο εξοπλισμό.
- Η οπτική και η δια χειρός εξέταση εδαφικών δειγμάτων είναι σε θέση να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τη σύσταση τους.
- Προϋπόθεση αποτελεί η παρουσία ορύγματος ή σκάμματος όπου η πρόσβαση σε υπεδάφια υλικά είναι δυνατή.
- Το χρώμα ενός δείγματος μπορεί να αποτελέσει κριτήριο κατάταξης για ένα εδαφικό υλικό.
- Συνήθως τα βαθιά, σκούρα χρώματα υποδηλώνουν αργιλικά ή οργανικά εδάφη και υψηλά ποσοστά υγρασίας.
- Ακόμη, σκούρες γκριζες ή μαύρες αποχρώσεις σε λεπτόκοκκα εδάφη οφείλονται σε παρουσία οργανικών συστατικών.
- Αντίθετα, φωτεινές γκριζοπράσινες, κίτρινες και κόκκινες αποχρώσεις χαρακτηρίζουν μη οργανικά εδάφη.
- Το βαθύ κόκκινο και το καστανοκίτρινο χρώμα συχνά οφείλονται σε οξειδία του σιδήρου ενώ το λευκό και το ρόδινο χρώμα υποδηλώνουν παρουσία οξειδίων του πυριτίου και του αργιλίου.



## 5. Οπτική και δια χειρός εξέταση εδαφικών δειγμάτων

- Η οπτική εξέταση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων δίδει σαφείς ενδείξεις για την ρύση και την κοκκομετρική σύσταση του υλικού.
- Οι ευμεγέθεις κόκκοι των φυσικών αμμοχάλικων αλλά και χονδρόκοκκης άμμου είναι διακριτοί δια γυμνού οφθαλμού.
- Αντίθετα, σε αργιλικά εδάφη δεν είναι δυνατό να εντοπισθούν διακριτοί κόκκοι του υλικού.
- *Μια απλή επιτόπια εξέταση με στοιχειώδη εργαστηριακά μέσα είναι σε θέση να δώσει άμεσα πληροφορίες για τη σύσταση ενός υλικού.*
- Η δοκιμή θρυμματισμού (breaking test) αποτελεί ένδειξη για την πλαστικότητα του εδάφους, η επιτόπια δοκιμή αποσάθρωσης (slake test) δίδει πληροφορίες για τη συμπεριφορά ορισμένων βράχων, η ενστάλαξη υδροχλωρικού οξέος καταγράφει την παρουσία ανθρακικού ασβεστίου.
- Η απλή επιτόπια εξέταση δειγμάτων εδαφών δεν μπορεί να αντικαταστήσει την εργαστηριακή έρευνα, η οποία δίδει ακριβείς και πλήρεις απαντήσεις αναφορικά με τη σύσταση των διαφόρων σχηματισμών.
- Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί για μια συνοπτική αναγνώριση υπεδάφινων συνθηκών και να οδηγήσει την γεωτεχνική έρευνα και την εργαστηριακή ανάλυση στην σωστή κατεύθυνση, υποδεικνύοντας μεθόδους και δοκιμές που ανταποκρίνονται καλύτερα στα πρώτα ευρήματα για κατάταξη των εδαφών.

## 6. Μέθοδοι γεωφυσικής αναγνώρισης

- ✓ Αποτελούν αξιόπιστα εργαλεία για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας και της σύστασης των υπεδάφινων σχηματισμών.
- ✓ Σε προβλήματα οδικών χαράξεων, είναι δυνατό να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες. Έτσι, ανάλογα με το πρόβλημα, επιλέγεται η γεωφυσική μέθοδος που θα δώσει τις ακριβέστερες πληροφορίες.
- Η αρχή της κάθε μιας από τις γεωφυσικές μεθόδους αναγνώρισης συνίσταται στον προσδιορισμό, μέσω μετρήσεων από την επιφάνεια του εδάφους, μιας ιδιότητας των υπεδάφινων σχηματισμών.
- Η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση μιας ιδιότητας ή μιας παραμέτρου επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη φύση, τη σύσταση και τις λοιπές ιδιότητες του κάθε σχηματισμού.
- Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μεθόδων είναι ένα σύνθετο πρόβλημα και απαιτεί εξειδίκευση.
- Ο ειδικός μελετητής θα πρέπει να είναι σε θέση να προσδιορίσει το κάθε εύρημα τόσο από πλευράς γεωμετρίας, δηλαδή σχήμα, όγκο, διεύθυνση, όσο και από πλευράς γεωλογικής, να διακρίνει, δηλαδή, ανάμεσα σε σχηματισμούς που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά, εκείνον που αντιστοιχεί στην κάθε περίπτωση σε κάθε, δηλαδή, διαφορετική τιμή της παραμέτρου. Η ποικιλία των μεθόδων αυτών είναι μεγάλη. Οι πιο διαδεδομένες σε έργα οδοποιίας είναι οι εξής:

## 6. Μέθοδοι γεωφυσικής αναγνώρισης

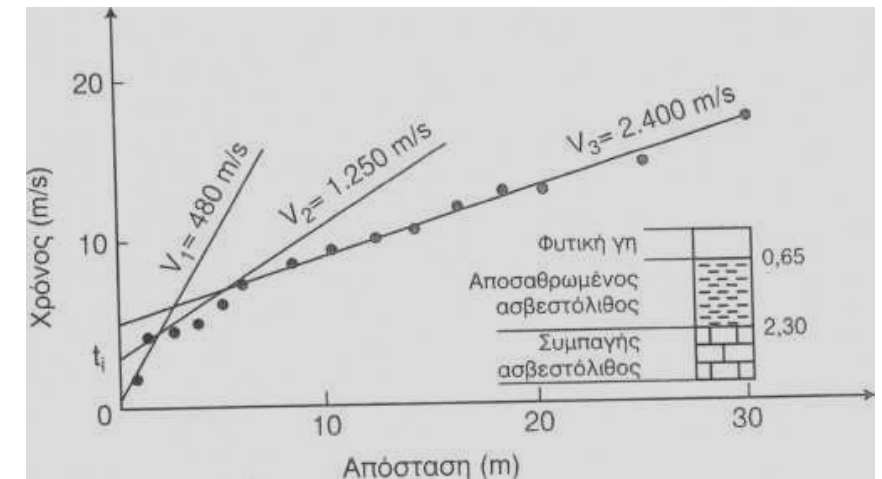
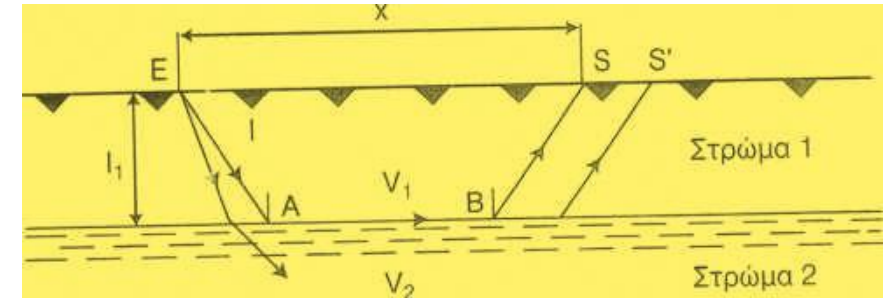
### α) Μέθοδος ηλεκτρικής αγωγιμότητας

- Βασίζεται στη διαφορετική ηλεκτρική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί.
- Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός βράχου εξαρτάται από τη σύσταση της βραχώμαζας, την πυκνότητα των ασυνεχειών και την παρουσία νερού στα κενά της βραχώμαζας.
- Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός βράχου είναι αντιστρόφους ανάλογη από την ποσότητα και την αγωγιμότητα της περιεχόμενης υγρασίας.
- Η μέθοδος εφαρμόζεται για εντοπισμό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, για αναγνωριστική προσέγγιση της υπόγειας στρωματογραφίας και για εκτίμηση του βάθους του σταθερού υποβάθρου.
- Η μέθοδος συνίσταται στην εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στην εδαφική μάζα και στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης.
- Μετακινώντας και μεταθέτοντας τα ηλεκτρόδια εισαγωγής του ρεύματος επιτυγχάνεται η καταγραφή της στρωματογραφίας του υπεδάφους.

## 6. Μέθοδοι γεωφυσικής αναγνώρισης

### β) Μέθοδος σεισμικής διάθλασης

- Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κάθε σχηματισμού και, συγκεκριμένα, του μέτρου παραμόρφωσης  $E$  και του συντελεστή Poisson  $\nu$ .
- Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης μελετά την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων που ποικίλλει από 300 m/s σε χαλαρά γαιώδη υλικά έως 6.000 m/s στους συμπαγείς βράχους.
- Η μέθοδος βασίζεται στο φαινόμενο της διάθλασης των κυμάτων, που είναι ανάλογο με τη διάθλαση του φωτός, την αλλαγή κατεύθυνσης, δηλαδή, όταν τα κύματα περνούν από ένα μέσο διαφορετικής σύστασης σε ένα άλλο (Σχ. 2).



Σχήμα 2. Αρχή και πεδίο εφαρμογής σεισμικής μεθόδου [23].



## 6. Μέθοδοι γεωφυσικής αναγνώρισης

- Σε επίπεδο εφαρμογής, η μέθοδος συνίσταται στη διοχέτευση ενός σεισμικού κύματος στο υπέδαφος και την καταγραφή της απόκρισης σε διάφορες θέσεις ενός ευθύγραμμου τμήματος, στις οποίες είναι τοποθετημένες οι δέκτες, τα γεώφωνα.
- Τα διαγράμματα απόστασης/χρόνου απόκρισης επιτρέπουν τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας αλλά και, παράλληλα, παρέχουν πληροφορίες για τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού κάθε στρώματος.
- ✓ Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καταγραφή της διάταξης των υπόγειων σχηματισμών διαφορετικής πυκνότητας, ενώ είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες για το βαθμό κερματισμού και την εκσκαψιμότητα της κατά θέσεις βραχώμαζας.

## 6. Μέθοδοι γεωφυσικής αναγνώρισης

### γ) Μαγνητική μέθοδος

- Είναι η μέτρηση, στην επιφάνεια του εδάφους, των οριζοντίων συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούνται από έναν πομπό ηλεκτρικού ρεύματος.
- Μέσω μαθηματικών συσχετίσεων που συνδέουν χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου με την ειδική αντίσταση του εδάφους, συλλέγονται πληροφορίες για το πάχος του επιφανειακού μανδύα και τη διάταξη των γεωλογικών σχηματισμών.

### δ) Βαρυτημετρική μέθοδος

- Η μέθοδος βασίζεται στις μικρές διαφορές που μπορεί να παρουσιάζει η επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$  στην επιφάνεια του εδάφους ανάλογα με την ακτίνα της Γης στο συγκεκριμένο σημείο και την πυκνότητα των υπεδάφινων σχηματισμών. **Η μέθοδος ενδείκνυται κυρίως για τον εντοπισμό υπογείων στοών και σπηλαίων.**
- Η μέθοδος εφαρμόζεται σπάνια λόγω δυσκολίας πρακτικής και αδυναμίας στην ερμηνεία αποτελεσμάτων.

# 6. Μέθοδοι γεωφυσικής αναγνώρισης

## ε) Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

a/a	Θέματα / Εντοπισμός υπεδάφιων κατασκευών	Ηλεκτρική	Ηλεκτρομαγνητική	Σεισμική	Γεω-ραντάρ	Ραδιοκύματα
1.	Λιθολογική διαστρωμάτωση	**	*	**	*	—
2.	Βάθος υποβάθρου	**	**	**	—	*
3.	Ετερογενείς σχηματισμοί	*	—	**	—	—
4.	Μεταλλικοί αγωγοί και δεξαμενές	—	**	—	**	—
5.	Κοιλότητες, σπήλαια	—	**	*	**	*
6.	Υπόγεια δίκτυα	—	**	—	*	—
7.	Περιοχές ραδιενεργών ρύπων	**	**	—	—	—
8.	Οργανικά απόβλητα	—	—	—	*	—
9.	Βάθος υδροφόρου ορίζοντα	**	**	—	—	—

- Πρόκειται για υψηλής ευκρίνειας διασκόπηση μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που είναι σε θέση να δώσει λεπτομερείς πληροφορίες για υπόγειες κατασκευές, δίκτυα κλπ.
- Στον Πίνακα 3 δίδεται ενδεικτικά το πεδίο εφαρμογής της κάθε μεθόδου σε γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα που απαιτούν αναγνώριση των συνθηκών του υπεδάφους, συμπεριλαμβάνοντας και δύο σύγχρονες μεθόδους αναγνώρισης, το γεωραντάρ, που αποτελεί μια απλοποιημένη και εύχρηστη εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, και τα ραδιοκύματα χαμηλής συχνότητας.

## 7. Ερευνητικές γεωτρήσεις

Η εκτέλεση ερευνητικών γεωτρήσεων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή μέθοδος γεωτεχνικής αναγνώρισης

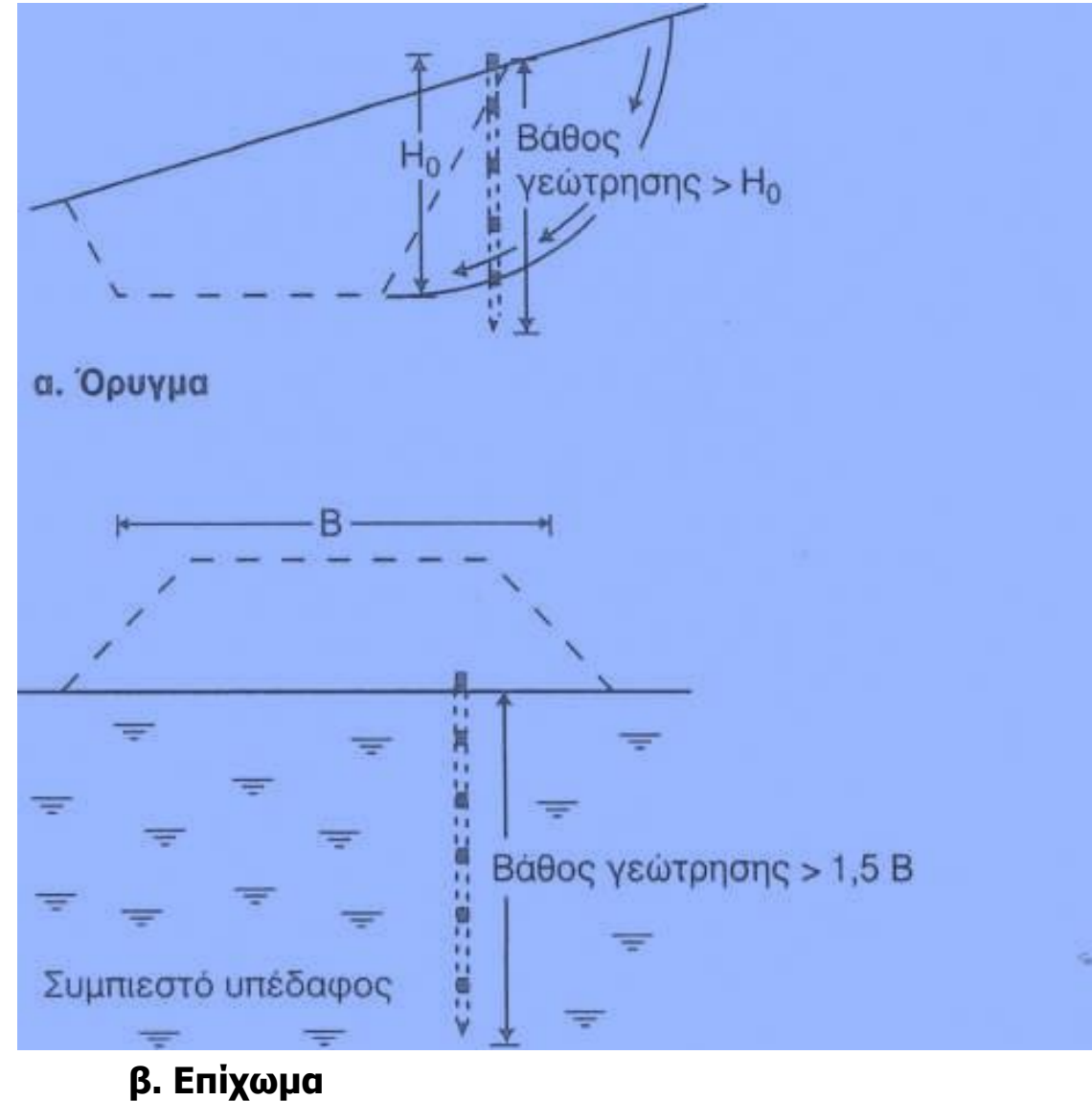
- ✓ γίνεται σε συγκεκριμένες θέσεις και μόνον σε επίπεδο προμελέτης ή οριστικής μελέτης οδοποιίας.
- ✓ Από την άλλη πλευρά, τα στοιχεία μιας ερευνητικής γεώτρησης δίδουν ασφαλείς και ακριβείς πληροφορίες για τους υπεδάφιους σχηματισμούς που είναι απαραίτητες σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως:
  - η θεμελίωση τεχνικών έργων
  - η θεμελίωση υψηλών επιχωμάτων
  - η διάνοιξη σηράγγων
  - η διαμόρφωση πρανών ορυγμάτων μεγάλου ύψους.

Συλλέγονται πληροφορίες χρήσιμες σε κάθε έργο οδοποιίας, όπως:

- το βάθος του υπόγειου ορίζοντα,
- η σκληρότητα και η εκσκαψιμότητα των υλικών στις θέσεις των ορυγμάτων,
- η ποιότητα των προϊόντων εκσκαφής,
- η καταλληλότητα για κατασκευές επιχωμάτων,
- η διάταξη των ασυνεχειών της βραχώμαζας.

## 7. Ερευνητικές γεωτρήσεις

- Οι γεωτρήσεις για έργα οδοποιίας εκτελούνται σε ένα βάθος που κυμαίνεται συνήθως από 15 έως 30 m ανάλογα με την κατηγορία της οδού και το είδος του υπό μελέτη τεχνικού έργου.
- Σε περιοχές ορυγμάτων οι γεωτρήσεις είναι σκόπιμο να εκτελούνται εκατέρωθεν του άξονα της οδού κοντά στα φρύδια των πρανών εκσκαφής (Σχ. 3).



Σχήμα 3. Βάθος γεώτρησης σε όρυγμα και επίχωμα.

# 7. Ερευνητικές γεωτρήσεις

- Το βάθος της γεώτρησης θα πρέπει να ξεπερνά το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς εδάφους-ερυθράς και να κατέρχεται χαμηλότερα από την επιφάνεια του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης.
- Σε περιπτώσεις ορυγμάτων σε πρανή ενεργών ή παλαιότερων κατολισθήσεων, το βάθος της γεώτρησης θα πρέπει να φθάνει χαμηλότερα από την επιφάνεια ολίσθησης.
- Σε θέσεις έδρασης οδικών επιχωμάτων επί συμπιεστών εδαφών, το βάθος των γεωτρήσεων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 1,5 B, όπου B το μέσο πλάτος του επιχώματος.
- Εφόσον, μέσω μιας γεωφυσικής μεθόδου έχει προσδιορισθεί βραχώδες ή σταθερό υπόβαθρο σε μικρό βάθος, η γεώτρηση θα πρέπει να συναντά το υπόβαθρο.
- Κατά τη φάση της εκτέλεσης της γεώτρησης συγκεντρώνονται πληροφορίες για τη μηχανική αντοχή των σχηματισμών (δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT)), ενώ παράλληλα συλλέγονται δείγματα, κατά το δυνατόν αδιατάρακτα, από το υπέδαφος για εργαστηριακό έλεγχο.
- Η ταχύτητα εκτέλεσης μιας γεώτρησης εξαρτάται από το είδος του υπεδάφιου σχηματισμού.
- Σε σκληρούς βράχους ο ρυθμός διάτρησης μπορεί να ξεπεράσει τα 50 μέτρα την ημέρα, ενώ αντίθετα, ο ρυθμός είναι βραδύτερος σε αργίλους και αμμοχάλικα όπου είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων σωλήνωση, σε κάθε βήμα της διάτρησης.



## 7. Ερευνητικές γεωτρήσεις

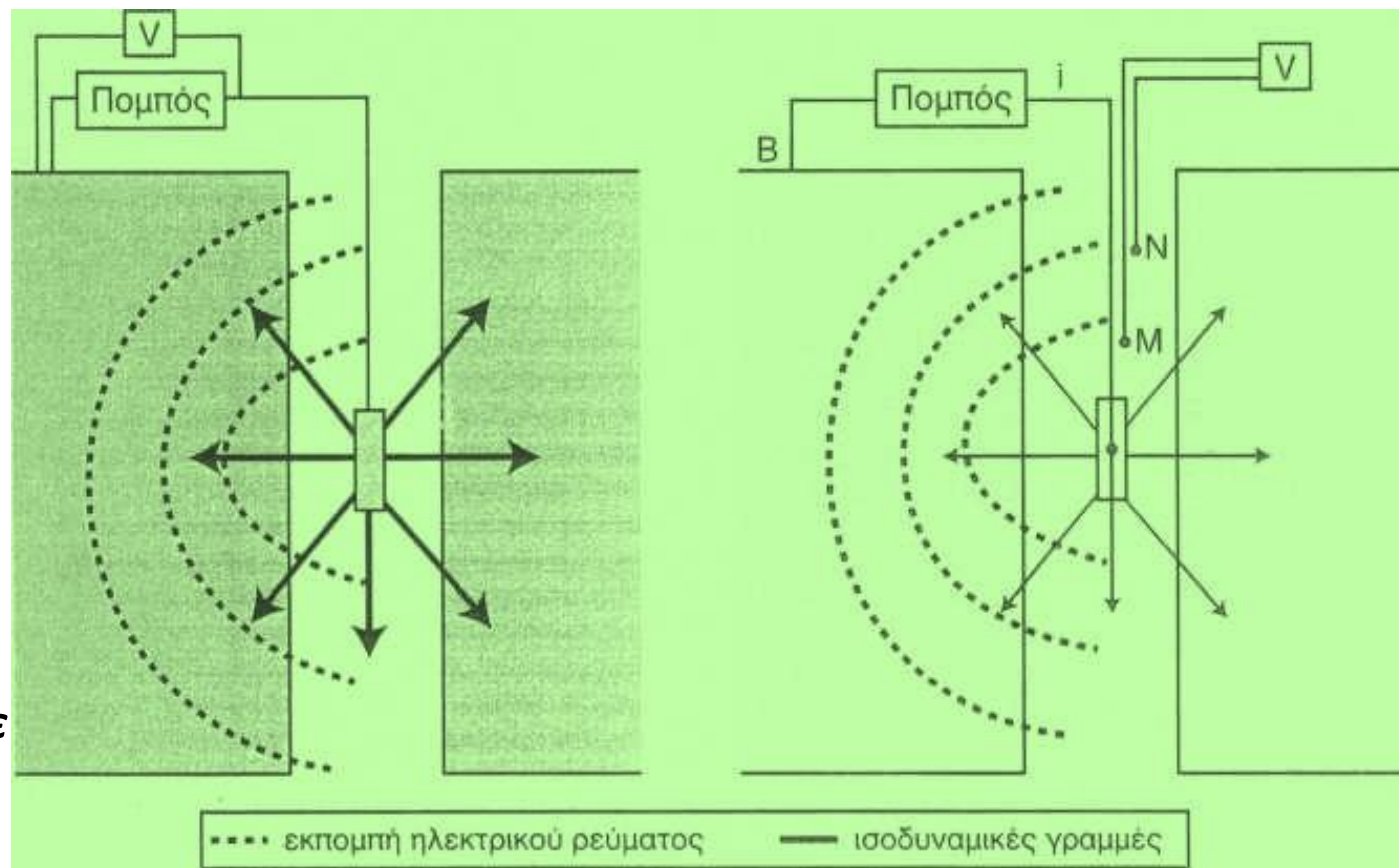
- Η τοποθέτηση πιεζομέτρων στους σωλήνες των γεωτρήσεων για καταγραφή της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα είναι συνήθης πρακτική ακόμη και για έργα οδοποιίας.
- **Ανάλογα με τη φύση του έργου, αλλά και κάποιων επί μέρους τεχνικών προβλημάτων, και άλλα όργανα είναι δυνατό να προσαρμοσθούν στις διανοιχθείσες γεωτρήσεις (αποκλισιόμετρα, ηλεκτρικοί πομποί).**
- **Υπάρχει μια μεγάλη σειρά μεθόδων γεωτεχνικής διερεύνησης που βασίζονται σε εκτέλεση επί τόπου δοκιμών μέσα σε υφιστάμενες γεωτρήσεις.**
- **Οι μέθοδοι αυτές, που διαφέρουν τόσο ως προς την αρχή λειτουργίας όσο και ως προς το αντικείμενο έρευνας, παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε περιπτώσεις γεωτρήσεων με ελλιπή στοιχεία ή με ανεπαρκή δειγματοληψία.**

# 7. Ερευνητικές γεωτρήσεις

Μέθοδοι έρευνας με δοκιμές σε οπές γεωτρήσεων αναφέρονται :

- η μέθοδος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας,
- η μέθοδοι των ακτινών  $\gamma$ ,
- οι διαγραφίες νετρονίων,
- οι ηχητικές διαγραφίες και
- η τηλεκατόπτρευση.

Για κάθε μια από τις μεθόδους αυτές υπάρχουν προϋποθέσεις εφαρμογής που έχουν σχέση με τη διάμετρο της γεώτρησης, την ύπαρξη σωλήνων, την παρουσία νερού, ενώ θέματα εξοπλισμού και κόστους συχνά περιορίζουν το πεδίο εφαρμογής τους.



Σχήμα 4. Ηλεκτρικές διαγραφίες.



## 8. Ερευνητικές διατρήσεις

- Η ερευνητική διάτρηση αποτελεί μια μέθοδο γεωτεχνικής αναγνώρισης που εφαρμόζεται κυρίως για την εκτέλεση χωματοургικών εργασιών.
- Είναι πολύ απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος από τη γέωτρηση αλλά, αντίστοιχα, και το φάσμα των πληροφοριών που παρέχει είναι λιγότερο ευρύ.
- Για την εκτέλεση των διατρήσεων χρησιμοποιούνται ελικοειδή τρυπάνια (αρίδες) -διάφοροι τύποι - ανάλογα με μέγεθος, βάρος, είδος του σπειρώματος.
- Συνήθως η διάτρηση εκτελείται με τη βοήθεια ενός κινητήρα μικρής ισχύος.



Σχήμα 5. Γεωερευνητικές διατρήσεις [23]

## 8. Ερευνητικές διατρήσεις

- ✓ Οι ερευνητικές διατρήσεις φθάνουν συνήθως σε βάθος μικρότερο εκείνο των γεωτρήσεων.
- Μια αντιπροσωπευτική τιμή βάθους διάτρησης είναι τα 10 μέτρα (αλλά και μεγαλύτερα βάθη).
- Η αντίσταση κατά την εισχώρηση είναι μια σημαντική πληροφορία για τη σκληρότητα και τη μηχανική αντοχή των σχηματισμών, ενώ, παράλληλα, λαμβάνονται δείγματα εδάφους από διάφορα βάθη.
- Σε αντίθεση με τις γεωτρήσεις, τα δείγματα που λαμβάνονται μέσω των διατρήσεων είναι **διαταραγμένα**. Έτσι, είναι δυνατή η εκτέλεση δοκιμών Proctor, CBR αλλά δεν μπορούν να γίνουν τριαξονικές δοκιμές ή δοκιμές διάτμησης σε αδιατάρακτα δοκίμια που είναι απαραίτητες για διαστασιολόγηση των θεμελιώσεων των τεχνικών έργων.

## 8. Ερευνητικές διατρήσεις



δοκιμή Proctor



τριαξονικές δοκιμές θλίψης



## 9. Εργαστηριακή έρευνα

✓ Το τελευταίο στάδιο γεωτεχνικής αναγνώρισης.

- Στο στάδιο αυτό επιτυγχάνεται ακριβής καταγραφή των ιδιοτήτων των εδαφικών δειγμάτων και, μέσω αυτής, μια πλήρης αναγνώριση των εξεταζομένων γεωσχηματισμών υπό την προϋπόθεση σωστής και αντιπροσωπευτικής δειγματοληψίας.
- Εργαστηριακή έρευνα σπάνια σε επίπεδο προκαταρκτικής μελέτης οδοποιίας, αλλά και τότε, είναι πολύ περιορισμένη και συνήθως κινείται στο πλαίσιο ορισμένων δοκιμών κατάταξης.
- Αντίθετα, σε επίπεδο οριστικής μελέτης, η εργαστηριακή έρευνα καλύπτει φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφών και προσανατολίζεται σε ειδικές δοκιμές ανάλογα με τη φύση του κάθε γεωτεχνικού προβλήματος.

# 9. Εργαστηριακή έρευνα

Οι δοκιμές κατάταξης εδαφών χρησιμοποιούνται για προσδιορισμό φυσικών παραμέτρων και, εν συνεχεία, για κατάταξη του κάθε εδαφικού δείγματος ή υλικού ανάλογα με τα αποτελέσματα των δοκιμών. **Στις δοκιμές κατάταξης συμπεριλαμβάνονται:**

- η κοκκομετρική ανάλυση και ο προσδιορισμός διαφόρων συναφών δεικτών όπως ο συντελεστής ομοιομορφίας και ο συντελεστής καμπυλότητας της κοκκομετρικής καμπύλης
- τα όρια Atterberg
- η φυσική υγρασία και ο βαθμός κορεσμού
- το φαινόμενο και το απόλυτο ειδικό βάρος
- η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο για την κατάταξη αργίλων, μαργών και ασβεστολιθικών εδαφών
- η δοκιμή του “κυανού του μεθυλενίου” για κατάταξη αργιλικών εδαφών
- η περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες.

✓ Συνήθως στα κοινά έργα οδοποιίας, οι εκτελούμενες δοκιμές κατάταξης είναι η κοκκομετρία και τα όρια Atterberg. Οι υπόλοιπες δοκιμές εκτελούνται σε ειδικές μόνον περιπτώσεις.

## 9. Εργαστηριακή έρευνα

Οι δοκιμές μηχανικής αντοχής, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων:

- διατμητικής αντοχής του εδάφους,
- της συνοχής και
- της γωνίας τριβής.

Τα κυριότερα γεωτεχνικά προβλήματα οδοποιίας, όπως η ευστάθεια πρανών, η θεμελίωση τεχνικών έργων, θέματα αντιστήριξης αλλά και προβλήματα ολίσθησης είναι συνυφασμένα με τη διατμητική αντοχή των εδαφών.

Οι κατ' εξοχήν δοκιμές διατμητικής αντοχής είναι:

- η δοκιμή του κιβωτίου διάτμησης
- η τριαξονική δοκιμή, με μια ποικιλία ως προς τις διατάξεις επιπόνησης και στράγγισης του δοκιμίου (UU, CU, CD)
- η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης
- η δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης (ring shear test) για προσδιορισμό της παραμένουσας αντοχής.

## 9. Εργαστηριακή έρευνα

- ✓ Ιδιαίτερη σημασία για την οδοποιία έχουν οι **δοκιμές φέρουσας ικανότητας** εδαφών και γεωκατασκευών.
- ✓ Προσδιορίζεται η παραμορφωσιμότητα του εδάφους, η σχέση, δηλαδή, μεταξύ ασκούμενης πίεσης και αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης.
- Οι παράμετροι φέρουσας ικανότητας των εδαφών είναι βασικά δεδομένα εισαγωγής για τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και συχνά προσδιορίζονται με επί τόπου δοκιμές.
- Οι εργαστηριακές δοκιμές φέρουσας ικανότητας εδαφών παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν σε εδαφικά δείγματα προ της κατασκευής και να δώσουν μια σαφή εικόνα της παραμορφωσιμότητας του εδάφους σε στάδιο μελέτης.

# 9. Εργαστηριακή έρευνα

Από τις εργαστηριακές δοκιμές, οι πλέον διαδεδομένες είναι:

- η δοκιμή Καλιφορνιακού δείκτη CBR
- η τριαξονική δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας  $E$  (ή μέτρου επανάταξης  $M_R$ ).

Στο πλαίσιο την οριστικής μελέτης ενός οδικού έργου γίνονται ειδικές δοκιμές, όπως

- η δοκιμή Proctor που χρησιμεύει για την παρασκευή των εργαστηριακών δειγμάτων και τον έλεγχο της συμπύκνωσης,
- οι δοκιμές συμπίεσότητας στο οιδήμετρο,
- οι εργαστηριακές δοκιμές διαπερατότητας.



## 9. Εργαστηριακή έρευνα

Ανάλογες είναι οι κατηγορίες εργαστηριακών δοκιμών στους *βραχώδεις σχηματισμούς*, όπου διακρίνονται επίσης δοκιμές κατάταξης και δοκιμές μηχανικής αντοχής.

- Οι πρώτες πληροφορίες για την ποιότητα ενός βράχου προέρχονται από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, όπου προσδιορίζεται ο δείκτης RQD που περιγράφει την πυκνότητα των ρωγμών και των ασυνεχειών του βράχου.
- Στην περίπτωση της εργαστηριακής έρευνας, η πετρογραφική κατάταξη γίνεται με έλεγχο αντιπροσωπευτικών δειγμάτων (λεπτών τομών) στο πολωτικό μικροσκόπιο.

Αντίστοιχα οι δοκιμές μηχανικής αντοχής σε βραχώδη δείγματα είναι:

- ❖ η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού
- ❖ η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (βραζιλιανή δοκιμή)
- ❖ η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης
- ❖ η δοκιμή σημειακής φόρτισης.

# 9. Εργαστηριακή έρευνα

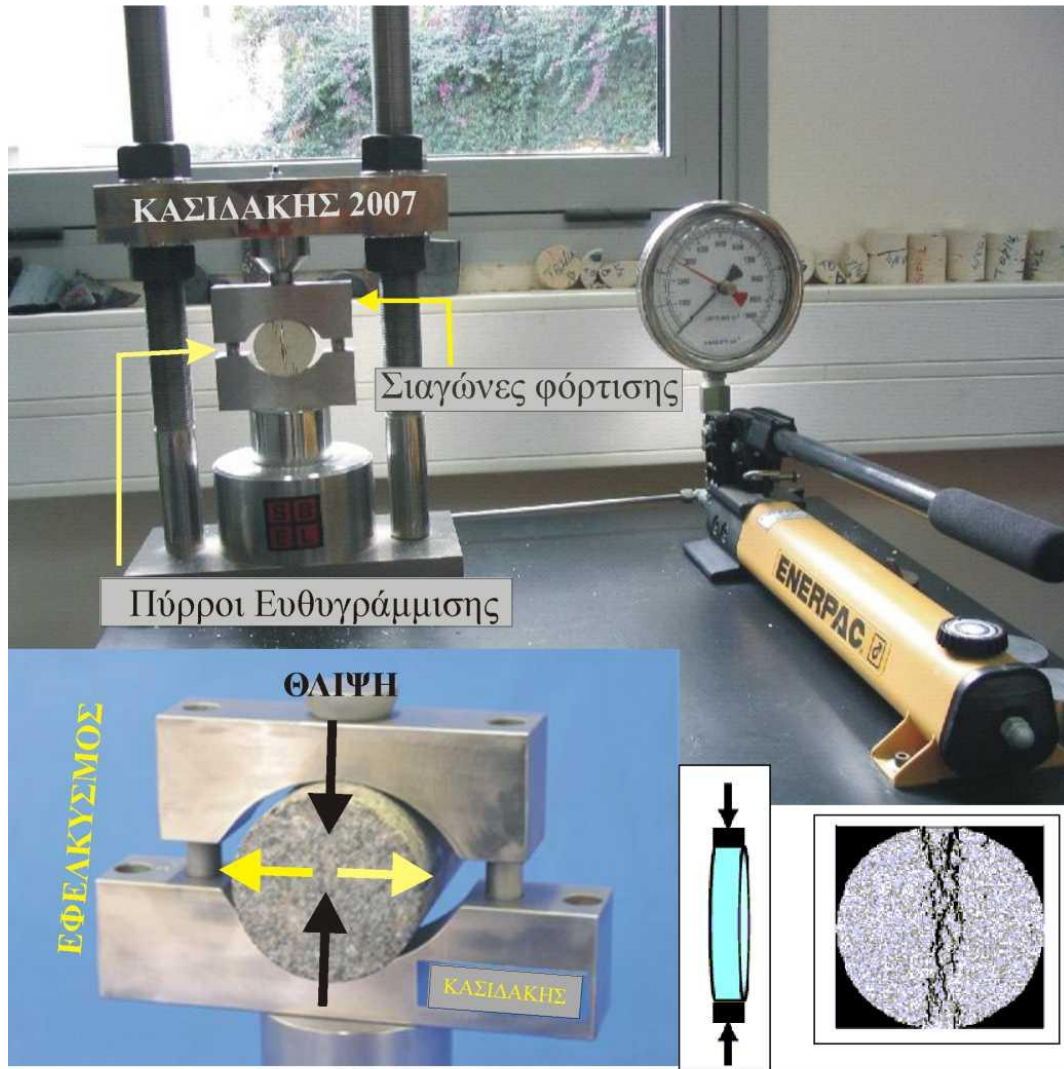
- ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ – ΒΡΑΖΙΛΙΑΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

[BRAZILIAN TEST] : Από τους βραζιλιάνους Cameiro και Barcellos που πρώτοι εφάρμοσαν τη μέθοδο στην

Κατά τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται δοκίμια με μορφή δίσκου [το ύψος  $H$  θα πρέπει να είναι το μισό της διαμέτρου  $D/2$ ] τα οποία υποβάλλονται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι τη θραύση . Η συσκευή διαθέτει ημιελλειπτικές σιαγώνες οι οποίες συγκρατούνται από δύο πύρρους. Η κίνηση των σιαγόνων είναι αποκλειστικά κατακόρυφη. Η εφελκυστική αντοχή προκύπτει

$$\sigma_t = 0,636P/\pi \cdot D \cdot L$$

$P$ =φορτίο ,  $D$ =διάμετρος ,  $L$ = ύψος (mm)



## 9. Εργαστηριακή έρευνα

- **Ιδιαίτερη σημασία σε βραχώδεις σχηματισμούς έχει η μορφή και η πυκνότητα των ασυνεχειών.**
- **Ειδικές δοκιμές για προσδιορισμό χαρακτηριστικών των ασυνεχειών εφαρμόζονται στις περιπτώσεις αυτές, (εργαστηριακή δοκιμή σονόμετρου) για εύρεση του δείκτη ασυνεχειών (discontinuity index) που αντιστοιχεί στην πυκνότητα των ασυνεχειών αλλά και η δοκιμή διάτμησης κατά Hoek and Bray (1981) για την εύρεση της διατμητικής αντοχής στην επιφάνεια της ασυνέχειας.**
- **Τέλος, σε βραχώδεις σχηματισμούς εκτελούνται στο εργαστήριο δοκιμές που έχουν σχέση με την υδροφιλία και την ευαισθησία του πετρώματος στο νερό. Τέτοιες δοκιμές είναι η δοκιμή υδαταπορροφητικότητας που χαρακτηρίζει την ικανότητα προσρόφησης νερού από το πέτρωμα και η δοκιμή διαβρωσιμότητας (slake durability test) που περιγράφει τη συμπεριφορά του πετρώματος σε κύκλους ύγρυνσης-ξηράνσης.**

# 9. Εργαστηριακή έρευνα

- Στον Πίνακα 4 οι σημαντικότερες εργαστηριακές δοκιμές που πρέπει, κατά περίπτωση, να εκτελεσθούν σε εδαφικά δείγματα για τη μελέτη γεωκατασκευών και τεχνικών έργων όπως προτείνονται από την Ομοσπονδιακή Διεύθυνση Έργων Οδοποιίας των Ε(ΠΑ (FHWA).
- Ο μελετητής καλείται να επιλέξει τις δοκιμές εκείνες που θα προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα απαραίτητα για τη μελέτη, τη διαστασιολόγηση και τον ποιοτικό έλεγχο των προς κατασκευή έργων.

Τεχνικό έργο ή γεωκατασκευή προς μελέτη	Κοκκομετρία	Όρια ATTERBERG	Υδατοπερατότητα	Ειδικό βάρος	Φέρουσα ικανότητα	Ανεμπόδιστη θλίψη	Άμεση διάτμηση	Τριαξονική	Στερεοποίηση
Επίχωμα	**	**	(*)	**	*	*	(*)	(*)	(*)
Θεμελίωση τεχνικού	**	**	(*)	(*)	—	**	*	*	*
Τοίχοι αντιστήριξης	**	**	*	(*)	—	*	**	**	*
Έδραση οδοστρώματος	**	**	*	**	**	(*)	(*)	(*)	—
Δάνεια υλικά	**	**	—	**	**	*	*	(*)	—
Πρανή ορυγμάτων	**	**	**	(*)	—	*	**	**	(*)
Υπέδαφος γεωκατασκευών	**	**	**	**	—	**	**	**	**

Πίνακας 4. Εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών για μελέτη γεωκατασκευών

## 10. Ειδικές επιτόπιες δοκιμές

- Ειδικές επί τόπου δοκιμές εκτελούνται στη φάση υλοποίησης έργων οδοποιίας, για προσδιορισμό φέρουσας ικανότητας φυσικών εδαφών και γεωκατασκευών.
- Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται, συνήθως, σε διαμορφωμένες επίπεδες επιφάνειες και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό αλλά και την παρουσία σημαντικού αντίβαρου, που μπορεί να είναι ένα ανατρεπόμενο φορτηγό εργοταξίου με πλήρες φορτίο. Στις δοκιμές αυτές ανήκουν:
  - η επί τόπου δοκιμή Καλιφορνιακού δείκτη
  - η δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας για προσδιορισμό του μέτρου παραμόρφωσης
  - η δοκιμή πλάκας για προσδιορισμό του μέτρου αντίδρασης • η δοκιμή δυναμικού πενετρόμετρου.

Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται για προσδιορισμό παραμέτρων διαστασιολόγησης

οδοστρωμάτων και εκτελούνται μόνον σε επίπεδο οριστικής μελέτης. Υπερτερούν αισθητά και ουσιαστικά απέναντι σε αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές, επειδή αναπαριστούν κατά τρόπο πιστό και απόλυτα ακριβή τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών μετά από την εκτέλεση των χωματοургικών εργασιών.



# 10. Ειδικές επιτόπιες δοκιμές

Άλλες, σχετικά απλές, επί τόπου δοκιμές είναι οι διάφορες δοκιμές - πενετρομέτρων σε διαμορφωμένες και μη επιφάνειες.

- **Το φορητό Πενετρόμετρο (rocket penetrometer)** δίδει μια αρκετά ακριβή ένδειξη την αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ενός συνεκτικού εδάφους, υπό την προϋπόθεση ότι η αντοχή αυτή παραμένει μικρή,  $q_u (= R_c) < 4,5 \text{ kg/cm}^2$ .
- **Το κωνικό Πενετρόμετρο (cone penetrometer)** επιτρέπει μέσω κατακόρυφης διείσδυσης της αιχμής, τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της τιμής του Καλιφορνιακού δείκτη CBR, για τιμές του δείκτη CBR < 15.

Αντίθετα με τις επί τόπου δοκιμές φέρουσας ικανότητας, οι ως άνω δοκιμές πενετρομέτρου δίδουν ενδείξεις μόνον, για τη μηχανική αντοχή των εδαφών και οι αντίστοιχες μετρήσεις δεν μπορούν να αποτελέσουν βάση για διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων των τεχνικών έργων.

Στην περίπτωση αυτήν, η έρευνα θα πρέπει να συμπληρωθεί στη συνέχεια με εργαστηριακές δοκιμές που θα παρέχουν την απαραίτητη, για τη διαστασιολόγηση των έργων, ακρίβεια.



# 11. Σύνταξη προγράμματος ερευνών

- ✓ Η γεωτεχνική αναγνώριση που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της υλοποίησης ενός οδικού έργου πρέπει να γίνεται μεθοδικά και προγραμματισμένα και να προσανατολίζεται σε συγκεκριμένες τεχνικές έρευνας και εργαστηριακές δοκιμές ανάλογα με τους στόχους που κάθε φορά επιδιώκονται.
- **Ακόμη, στα διάφορα στάδια μελέτης, το βάθος της έρευνας είναι διαφορετικό.**
- Σε επίπεδο προκαταρκτικής μελέτης οδοποιίας μια συνοπτική διαδικασία αναγνώρισης είναι συχνά ικανοποιητική, στο βαθμό που βασική επιδίωξη στο στάδιο αυτό είναι ο εντοπισμός γεωλογικών ζωνών ιδιαίτερης γεωτεχνικής δυσκολίας, θέσεων ρηγμάτων, κατολισθήσεων ή σχηματισμών σε οριακή ισορροπία. Αντίθετα, σε επίπεδο προμελέτης και κυρίως, οριστικής μελέτης, μια πλήρης γνώση των επί τόπου γεωτεχνικών συνθηκών είναι απαραίτητη και, κατά συνέπεια, μια έρευνα σε βάθος των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών είναι επιβεβλημένη.
- Σκόπιμο είναι, σε κάθε επίπεδο μελέτης αλλά και, ενδεχομένως σε φάση υλοποίησης ενός έργου, να συντάσσεται ένα πρόγραμμα γεωτεχνικών ερευνών και σύμφωνα με αυτό να εκτελείται η γεωτεχνική αναγνώριση.

# 11. Σύνταξη προγράμματος ερευνών

- Στον Πίνακα 5 δίδονται ορισμένες οδηγίες για βασικές επιλογές ερευνητικών εργασιών ανάλογα με το επίπεδο μελέτης αλλά και το επί μέρους γεωτεχνικό πρόβλημα κάθε έργου. Η βασική διάκριση ως προς το επίπεδο μελέτης γίνεται ανάμεσα στην προκαταρκτική και την οριστική, δεδομένου ότι για την προμελέτη ισχύει, ό,τι ισχύει για την οριστική.

Γεωτεχνικά θέματα	Έρευνα γραφείου	Γεωλογική & υδρογεωλογική χαρτογράφηση	Μακροσκοπική γεωτεχνική έρευνα	Οπτική εξέταση	Γεωφυσικές μέθοδοι			Γεωφύσεις & Δειγματοληψία	Διατρητικές έρευνες	Εργαστηριακές δοκιμές			
					Σεισμική	Ηλεκτρική	Ραντάρ			Κατάταξη	Διατμητική αντοχή	Οιδήμετρο	Φέρουσα ικανότητα
Προκαταρκτική μελέτη	**	(*)	**	*	(*)	—	(*)	—	(*)	—	—	—	—
Συνολική γεωτεχνική αναγνώριση οριστικής μελέτης	**	**	**	—	**	*	*	—	—	—	—	—	—
Εκκαψιμότητα υλικών	*	*	*	—	**	—	—	—	*	—	—	—	—
Εκκαφές σε ολισθαίνουσες μάζες	**	**	**	—	*	*	—	*	—	—	**	—	—
Καταλληλότητα προϊόντων εκκαφής για επιχωματώσεις	(*)	—	*	*	—	—	—	**	*	**	—	—	*
Θέσεις δανείων	*	—	*	*	—	—	—	—	*	**	*	—	—
Ευστάθεια πρανών ορυγμάτων	*	**	*	(*)	—	—	(*)	**	—	*	**	—	—
Κατασκευή επιχωμάτων	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—	—	*
Καθιζήσεις επιχωμάτων	*	*	*	—	(*)	(*)	—	**	*	*	—	**	—
Ανίχνευση υπογείων στοών και ρηγμάτων	—	—	*	—	(*)	—	**	—	—	—	—	—	—
Θεμελίωση τεχνικών έργων	—	—	*	—	*	—	—	**	*	*	**	*	(*)
Έδραση οδοστρωμάτων	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—	—	**
Ευστάθεια επιχωμάτων	—	—	—	—	—	—	—	**	*	*	**	—	—
Έργα αντιστήριξης	—	*	*	—	*	—	—	**	—	*	**	—	—

Πίνακας 5. Καταλληλότητα μεθόδων γεωτεχνικής αναγνώρισης για επιμέρους ζητήματα έργων οδοποιίας

# 11. Σύνταξη προγράμματος ερευνών

- Σε κάθε περίπτωση, ο μελετητής θα πρέπει να εξαντλεί τα περιθώρια, χρονικά και οικονομικά, για να ολοκληρώσει την εικόνα των συνθηκών του υπεδάφους, χρησιμοποιώντας, ιδιαίτερα, απλές και αποτελεσματικές μεθόδους αναγνώρισης.
- Θα πρέπει, αντίθετα, για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα, να αποφεύγει μεθόδους έρευνας και εργαστηριακές δοκιμές που είναι ακατάλληλες και επιβαρύνουν τον προϋπολογισμό χωρίς να προσθέτουν τίποτε στον κατάλογο των γεωτεχνικών πληροφοριών.
- Στον πίνακα περιλαμβάνονται διάφορες κατηγορίες γεωτεχνικών προβλημάτων οδοποιίας, με εξαίρεση τα έργα σηράγγων και γεφυρών που θεωρούνται τεχνικά έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας και αποτελούν ιδιαίτερα πεδία της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού.

# 4. Εδαφος – Προέλευση και Φυσικές ιδιότητες

## Φύση και προέλευση του εδάφους

- **ΕΔΑΦΟΣ** : σύνολο ορυκτών στερεών κόκκων οι οποίοι προέρχονται από μηχανική ή χημική αποσύνθεση πετρωμάτων. Αυτό το σύνολο χαρακτηρίζεται από βασικά γνωρίσματα που πρέπει να αξιολογηθούν κατάλληλα από τους μελετητές-μηχανικούς σε έργα οδοποιίας.
- Η πρώτη προσπάθεια αναγνώρισης ενός εδάφους σχετίζεται με τα φυσικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά και τη διανυσματική μεταβολή τους.
- Κάθε είδος εδάφους έχει μια οργανωμένη δομή και αντίστοιχα χαρακτηριστικά, τα οποία μεταβάλλονται τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια. Συνήθως, η μεταβολή αυτή είναι εντονότερη κατά την κατακόρυφη παρά κατά την οριζόντια διεύθυνση.
- Η δεύτερη απόπειρα εργαστηριακής ή επί τόπου αναγνώρισης σχετίζεται με την παρουσία νερού στους πόρους της εδαφικής δομής.
- Το νερό μπορεί να διεισδύσει στους πόρους και να πληρώνει ένα μικρό ή μεγάλο μέρος, ακόμη και το σύνολο των κενών που δημιουργεί η δομή του εδαφικού υλικού. Το νερό των πόρων δημιουργεί έτσι έναν μανδύα και επικαλύπτει, σε κάποιο βαθμό, τους κόκκους του εδάφους.

## 1. Φύση και προέλευση του εδάφους

- Ως προς τη σύσταση των ορυκτών κόκκων, μια βασική διάκριση είναι εκείνη μεταξύ των πυριτικών

- χαλαζίας,

- άστριοι,

- μαρμαρυγίες

και των αργιλικών

- καολινίτης,

- μοντμοριλλονίτης,

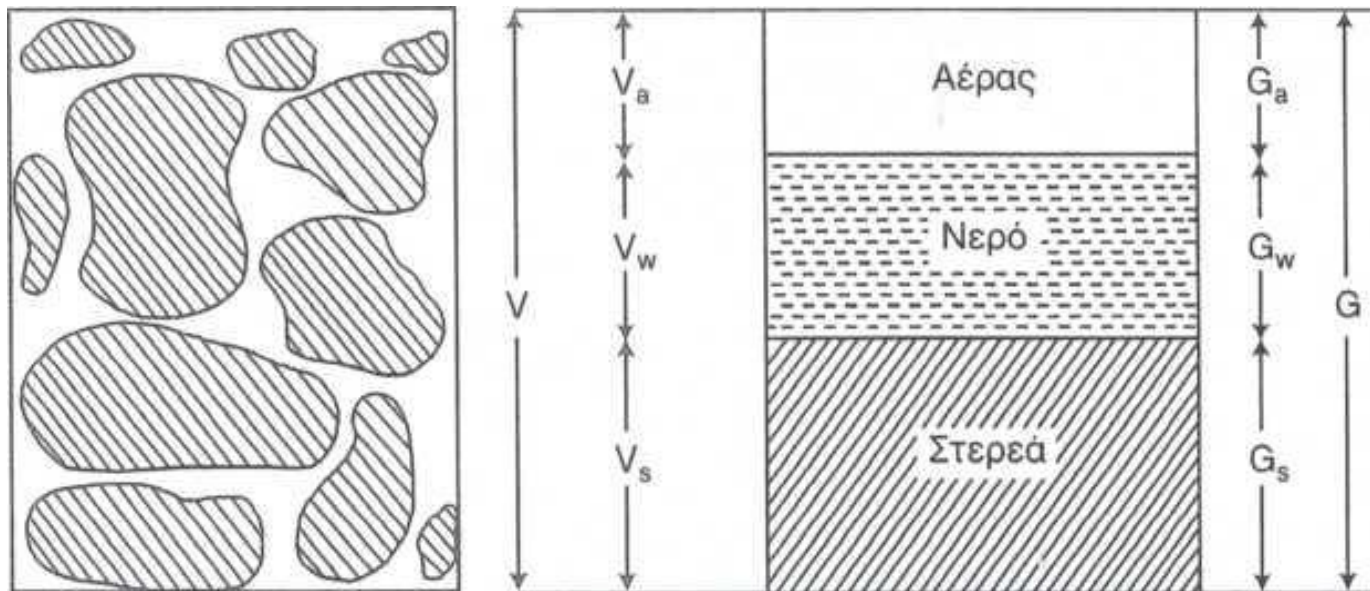
- ιλλίτης.

Η μορφή και τα μεγέθη των σωματιδίων αυτών παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και αναγνωρίζονται με ειδικά εργαστηριακά μικροσκόπια.



## 2. Οι τρεις φάσεις του εδάφους

- Το έδαφος χαρακτηρίζεται από την κοκκώδη φύση της στερεάς του φάσης του που συνδυάζεται με την υγρά και την αέρια φάση.
- Οι αναλογίες των τριών φάσεων έχουν ιδιαίτερη σημασία για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού.
- Η περιγραφή και η ανάλυση της συμπεριφοράς αυτής βασίζεται στην προσομοίωση ενός μοναδιαίου στοιχείου, όπου οι αναλογίες των φάσεων εκφράζονται είτε ως ποσοστά βάρους είτε ως ποσοστά όγκου, με βασική παραδοχή πάντοτε ότι ο αέρας είναι αβαρής (Σχ. 6).



Σχήμα 6. Αναλογίες τριών φάσεων εδαφικών υλικών .



## 2. Οι τρεις φάσεις του εδάφους

Σε ένα εδαφικό δείγμα όγκου  $V$  και βάρους  $G$  διακρίνουμε:

- Τον όγκο και το βάρος των στερεών:  $V_s, G_s$
- Τον όγκο και το βάρος του ύδατος:  $V_w, G_w$
- 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  $\eta = \frac{V_v}{V}$

- • δείκτης πόρων  $e = \frac{V_v}{V_s}$

Μεταξύ τους ισχύει η σχέση:  $\eta = \frac{e}{1+e}$

Η τιμή του πορώδους κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 ενώ ο δείκτης πόρων, θεωρητικά, μπορεί να πάρει τιμές μέχρι το άπειρο. Πρακτικά ο δείκτης πόρων παίρνει τιμές μεταξύ 0,25 και 1,5 με μια μέση τιμή γύρω στο 1.

## 2. Οι τρεις φάσεις του εδάφους

Από πλευράς ειδικού βάρους διακρίνουμε:

- ❑ το φαινόμενο ειδικό βάρος (bulk unit weight)  $\gamma = \frac{G}{V}$
- ❑ Το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών (particle specific gravity) που συχνά ονομάζεται και απόλυτο ειδικό βάρος των εδαφικών συστατικών:  $\gamma_d = \frac{G_s}{V_s}$
- ❑ Το ξηρό ειδικό βάρος (dry specific gravity):  $\gamma_d = \frac{G_s}{V}$  που αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο σε θέματα συμπύκνωσης.
- ❑ Το ειδικό βάρος του ύδατος :  $\gamma_w = \frac{G_w}{V_w}$

Οι παραπάνω σχέσεις είναι κλασσικές σχέσεις της Εδαφομηχανικής και ευρύτατα γνωστές. Ο Μηχανικός Οδοποιίας θα πρέπει, εκ παραλλήλου, να γνωρίζει τη φυσική σημασία και την τάξη μεγέθους για όλες τις παραπάνω παραμέτρους του εδάφους, επειδή είναι υποχρεωμένος να αντιμετωπίζει και να επιλύει πρακτικά προβλήματα χωρίς να διαθέτει πλήρη αποτελέσματα εργαστηριακών ελέγχων.

**Οι αριθμητικές τιμές του φαινομένου ειδικού βάρους των φυσικών εδαφών κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1,5 και 2 t/m<sup>3</sup>.**

## 2. Οι τρεις φάσεις του εδάφους

- Το εύρος των τιμών είναι πιο περιορισμένο για το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών  $\gamma_s = 2,6 - \tau - 2,8 \text{ t/m}^3$ ,
- ενώ το ειδικό βάρος του ύδατος λαμβάνεται πάντοτε  $\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3 = 10 \text{ kN/m}^3$ .

Η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους εκφράζεται από δυο παραμέτρους:

- τη φυσική υγρασία (water content)  $W = \frac{G_w}{G_s}$

που είναι η παράμετρος που χρησιμοποιείται σε έργα οδοποιίας και

- τον βαθμό κορεσμού (saturation degree)  $S_r = \frac{V_w}{V_v}$

που εκφράζει το ποσοστό των πόρων που έχει πληρωθεί με νερό.

- Για κεκορεσμένο έδαφος, η τιμή του βαθμού κορεσμού είναι  $S_r = 1$  (100%) ενώ δεν υπάρχει θεωρητικά ανώτατο όριο για τις αριθμητικές τιμές της φυσικής υγρασίας που ξεπερνά πολλές φορές το 100%.

## 2. Οι τρεις φάσεις του εδάφους

Μεταξύ των παραπάνω παραμέτρων ισχύουν διάφορες σχέσεις, όπως, για παράδειγμα, εκείνη που εκφράζει το ειδικό βάρος ως συνάρτηση του ειδικού βάρους των στερεών συστατικών και του ύδατος:

- $\gamma = (1 - n)\gamma_s + nS_r\gamma_w$

Μια αντίστοιχη σχέση είναι εκείνη μεταξύ ξηρού και φαινόμενου ειδικού βάρους:

- $\gamma_d = \frac{G_s}{V} \cdot \frac{G_s}{G} = \gamma \cdot \frac{G_s}{G} = \frac{\gamma}{G/G_s} = \frac{\gamma}{(G_s+G_w)/G_s} = \frac{\gamma}{1+w}$

➤ Για την αντιμετώπιση των γεωτεχνικών προβλημάτων και ιδιαίτερα των προβλημάτων συμπύκνωσης, αλλά ακόμη και καθιζήσεων ή διατμητικής αντοχής, καθοριστική σημασία έχει η αποσαφήνιση των εννοιών που εκφράζουν οι ως άνω φυσικές παράμετροι, από όπου θα προκύψει, σε κάθε περίπτωση, η απαραίτητη για τους υπολογισμούς σχέση.

➤ Στην ειδική περίπτωση εδαφών που ευρίσκονται κάτω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα το ειδικό βάρος των στερεών συστατικών προκύπτει, βάσει της αρχής του Αρχιμήδη:

- $\gamma'_s = \gamma_s - \gamma_w$

και αντίστοιχα το φαινόμενο βάρος του βυθισμένου εδάφους:  $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$



### 3. Κοκκομετρία

- Ο χαρακτηρισμός και η κατάταξη ενός εδάφους 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 κοκκομετρική σύνθεση των εδαφών, (η αναλογία, που υπάρχει μεταξύ κόκκων διαφόρου μεγέθους) αποτελεί σε πολλά προβλήματα γεωκατασκευών οδοποιίας, κριτήριο καταλληλότητας και αποδοχής του συγκεκριμένου υλικού.
- Χονδρόκοκκο εδάφη με ομαλή κατανομή διαβάθμισης συμπυκνώνονται εύκολα και παρουσιάζουν ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά, και είναι, συνήθως, η πρώτη επιλογή για χωματουργικά έργα οδοποιίας. -

### 3. Κοκκομετρία

- Αργιλοχαλικώδη εδάφη καθώς και προϊόντα βραχωδών εκσκαφών μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε γεωκατασκευές.
- Αντίθετα, ομοιόμορφης κοκκομετρίας αμμώδη υλικά και αργιλικά εδάφη είναι εκείνα που δημιουργούν πολλά προβλήματα όταν χρησιμοποιηθούν σε έργα οδοποιίας.

Η μελέτη της κοκκομετρικής σύνθεσης γίνεται με κοσκίνισμα εδαφικού δείγματος, με διέλευση δηλαδή του δείγματος διαδοχικά από κόσκινα μειούμενου διαμετρήματος. Προηγείται η διαδικασία ανάμιξης, τετραμερισμού και ξήρανσης του δείγματος.

Η εκτέλεση της δοκιμής συνίσταται στη διέλευση του υλικού δια μιας σειράς κόσκινων, ξεκινώντας από το κόσκινο μεγαλύτερης διάστασης βροχίδας (π.χ.  $1^{1/2}$  in.) και καταλήγοντας διαδοχικά στο μικρότερης βροχίδας κόσκινο (συνήθως No 200). Δια ζυγίσεων ευρίσκεται το συγκροτούμενο κατά βάρος επί κάθε κόσκινου ποσοστό  $S_i$  και εξ αυτών τα διερχόμενα ποσοστά  $d_i$  τα οποία και συνήθως αναφέρονται στην κοκκομετρική καμπύλη:

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



### 3. Κοκκομετρία

- Έτσι δημιουργούνται για το σύνολο των κόσκινων 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.
- Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται Αμερικάνικα κόσκινα τετραγωνικών οπών και συνεπώς ο όρος “διαμέτρημα” υποδηλώνει τη διάσταση της πλευράς της τετραγωνικής βροχίδας. Η ονομασία τους και οι διαστάσεις των οπών αντίστοιχα φαίνονται στον Πίνακα 6.

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

Πίνακας 6. Ονομασία και διαμέτρημα κόσκινων

### 3. Κοκκομετρία

- Η κοκκομετρική ανάλυση των λεπτόκοκκων συστατικών, διαστάσεων μικρότερων των 80 μικρών, εκτελείται δι' ιζηματομετρίας κατά το νόμο του Stokes.
- Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής σε εφαρμογές οδοποιίας είναι σπάνια, δεδομένου ότι το κλάσμα  $d < 80$  m είναι πάντοτε ανεπιθύμητο.
- Η θέση, η κλίση και η μορφή της κοκκομετρικής καμπύλης μέσα στο αντίστοιχο διάγραμμα είναι σε θέση να δώσουν πληροφορίες για το είδος του εδαφικού υλικού. Η θέση, κατ' αρχήν, πλησιέστερα στο αριστερό ή το δεξιό άκρο του διαγράμματος δίδει γενικές πληροφορίες σχετικές με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσοντας το υλικό, αντίστοιχα σε λεπτόκοκκο ή χονδρόκοκκο.
- Μια τεταμένη καμπύλη που καλύπτει, σε οριζόντια διάσταση, μεγάλο μέρος του διαγράμματος, αντιπροσωπεύει ένα υλικό καλής κοκκομετρικής κατανομής.

# 3. Κοκκομετρία

Αντίθετα μια σχεδόν κατακόρυφη καμπύλη αποτελεί ένδειξη υλικού ομοιόμορφης κοκκομετρίας.

Τέλος, μια καμπύλη που ξεκινά από τα χονδρόκοκκα κλάσματα με έναν κατακόρυφο κλάδο και συνεχίζει με έναν σχεδόν οριζόντιο κλάδο σε λεπτόκοκκα συστατικά, δημιουργώντας ένα “γόνατο”, δίδει ενδείξεις για ενδιάμεσα κλάσματα που απουσιάζουν (gap-graded material).

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

- Χάλκες (gravel): διάμετρος κόκκων μεταξύ 60 mm και 2 mm
- Άμμος (sand): διάμετρος κόκκων μεταξύ 2 mm και 0,06 mm
- Ιλύς (silt): διάμετρος κόκκων μεταξύ 0,06 mm και 0,002 mm
- Άργιλος (clay): διάμετρος κόκκων μικρότερη από 0,02 mm.
- Φυσικοί λίθοι διαστάσεων 10-30 cm ονομάζονται κροκάλες (cobbles).

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.

### 3. Κοκκομετρία

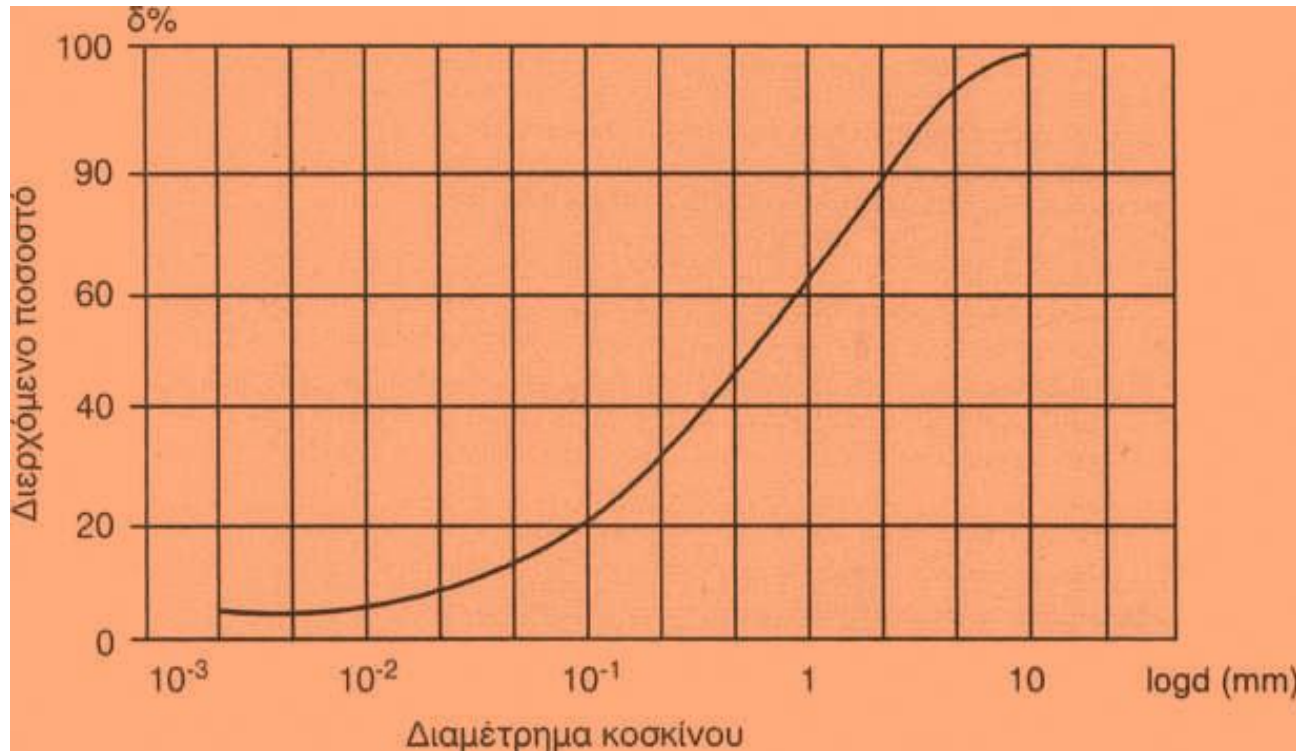
Η κοκκομετρική καμπύλη (Σχ. 7) αποτελεί ολοκληρωμένη σχηματική αναπαράσταση της κοκκομετρίας του εδάφους. Σε μια προσπάθεια απλοποίησης των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους, έχουν προταθεί δείκτες οι οποίοι εκφράζουν μεγέθη ή αναλογίες που προκύπτουν από την κοκκομετρική καμπύλη. Ο σπουδαιότερος από αυτούς 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 κόσκινου από όπου διέρχεται ποσοστό 60% και 10% του υλικού αντίστοιχα.

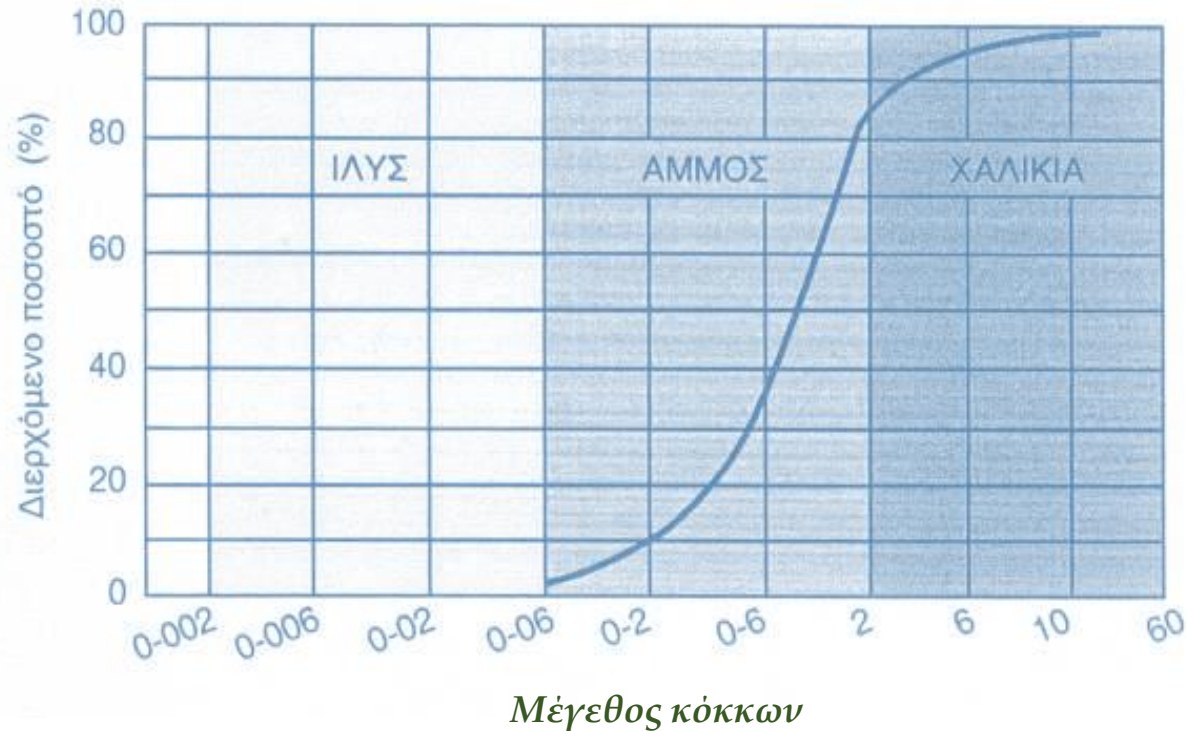
Ο συντελεστής ομοιομορφίας δίνει τη δυνατότητα διάκρισης των εδαφικών υλικών σε ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης κοκκομετρίας με βάση κάποιο αριθμητικό κριτήριο.

Συνήθως χαρακτηρίζονται ως υλικά ομοιόμορφης κοκκομετρίας εκείνα για τα οποία ο συντελεστής του Hazen είναι μικρότερος του 5 και εξαιρετικά ομοιόμορφης κοκκομετρίας (very uniform soils) εκείνα των οποίων ο συντελεστής ομοιομορφίας παίρνει τιμές μικρότερες του 3. Αντίθετα, καλά διαβαθμισμένα εδάφη είναι εκείνα για τα οποία ο συντελεστής U είναι μεγαλύτερος του 15.



Σχήμα 7. Κοκκομετρική καμπύλη.

### 3. Κοκκομετρία



Σχήμα 8. Μέγεθος κόκκων εδαφικών υλικών.

- Βασικό κριτήριο διάκρισης των εδαφών σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αποτελείτο διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο No 200.
- Το κριτήριο αυτό έχει διαφορετικές τιμές στα συστήματα κατάταξης εδαφών.
- Έτσι, ως λεπτόκοκκο χαρακτηρίζεται κατά AASHTO ένα υλικό, του οποίου το διερχόμενο ποσοστό από το No 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 No 200  $\delta < 35\%$  ή  $\delta < 50\%$  αντίστοιχα.



### 3. Κοκκομετρία



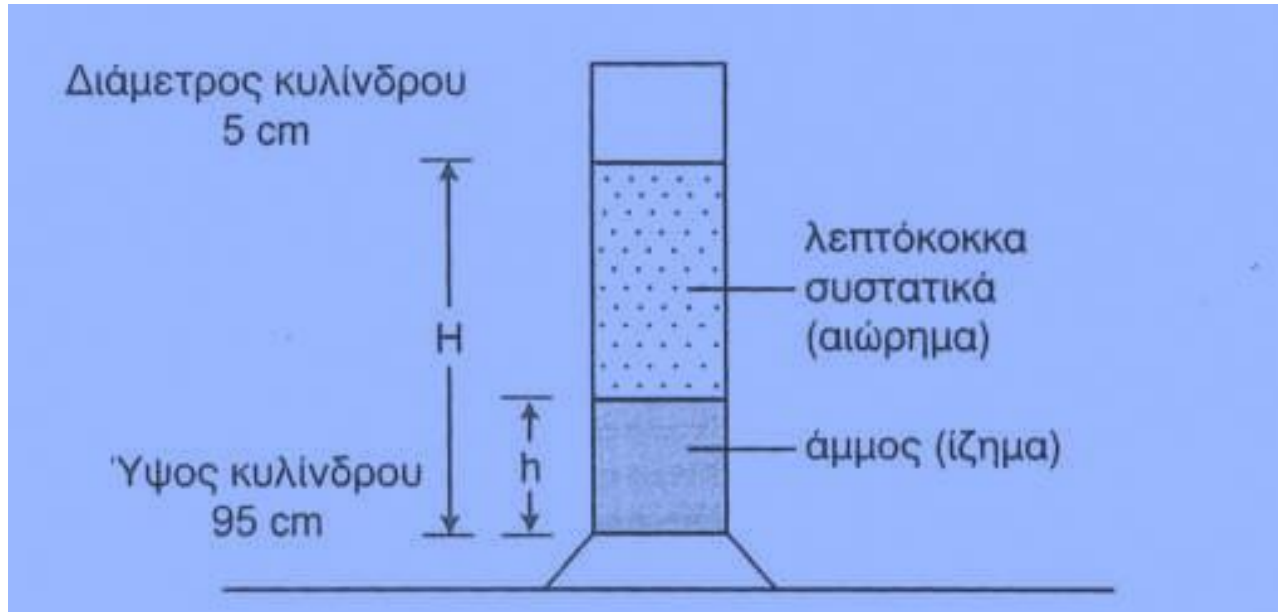
Εργαστήριο κοκκομετρικής ανάλυσης



## 4. Ισοδύναμο άμμου

- Το ισοδύναμο άμμου (sand equivalent) είναι μια παράμετρος, η οποία προσδιορίζει την ποιότητα ή την ψαθυρότητα ενός εδαφικού υλικού δι' υπολογισμού της αναλογίας των λεπτόκοκκων συστατικών προς την άμμο.
- Ως δείκτης χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Οδοποιία και ιδιαίτερα για τον χαρακτηρισμό διαφόρων εδαφών σχετικά με τη δυνατότητα συμπίκνωσης που παρουσιάζουν, καθώς επίσης και για καταλληλότητα αδρανών υλικών για παραγωγή σκυροδέματος ή ασφαλτομίγματος.

## 4. Ισοδύναμο άμμου



Σχήμα 9- Δοκιμή ισοδύναμο άμμου.

- Για την εκτέλεση της αντίστοιχης δοκιμής (AASHTO T176) λαμβάνεται δια τετραμερισμού δείγμα 110 g εκ του δια του κόσκινου No4 διερχομένου κλάσματος, το οποίο μετά από κατάλληλη προπαρασκευή εισάγεται εντός κυλινδρικού δοχείου που περιέχει διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου, γλυκερίνης και φορμαλδεΐδης. **Επακολουθεί μηχανική ανατάραξη και στη συνέχεια ο κύλινδρος αφήνεται σε ηρεμία για χρονικό διάστημα 20 λεπτών. Στο τέλος της περιόδου των 20 λεπτών σχηματίζεται, στη βάση του κυλίνδρου ένα ίζημα το οποίο συνίσταται από τους κόκκους της άμμου, ενώ τα λεπτότερα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα στο διάλυμα (Σχ. 9).**

## 4. Ισοδύναμο άμμου

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Ισοδύναμο άμμου</i>	<i>Προδιαγραφές</i>
Σκυρόδεμα	$SE \geq 75$	ΗΠΑ
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	$SE \geq 55$	ΠΤΠ Α-265
Ασφαλτομίγματα	$SE \geq 45$	ΗΠΑ
Βάση οδοστρώματος	$SE \geq 50$	ΠΤΠ 0-155
Υπόβαση	$SE \geq 40$	ΠΤΠ 0-150
Επίχωμα	$SE \geq 25$	ΗΠΑ

*Πίνακας 7. Όρια τιμών ισοδύναμου άμμου.*

- 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:  **$SE=h/H$  (%)**
- Συνήθως, για κάθε εδαφικό δείγμα, εκτελούνται τρεις δοκιμές και τα αντίστοιχα αποτελέσματα δεν πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 3 μονάδες.
- **Στον Πίνακα 7** δίδονται οι ελάχιστες τιμές του ισοδυνάμου άμμου για φυσικά εδαφικά και θραυστά αδρανή υλικά σε διάφορες εφαρμογές οδοποιίας, σύμφωνα με ελληνικές και διεθνείς προδιαγραφές.

## 4. Ισοδύναμο άμμου

Για τα υλικά οδικών επιχωμάτων, διεθνείς προδιαγραφές δίδουν ελάχιστα όρια καταλληλότητας στην τιμή του ισοδύναμου άμμου.

- Προδιαγραφές ΗΠΑ δίδουν ως ελάχιστη τιμή  $SE = 25$ .
- Στην πραγματικότητα το ισοδύναμο άμμου εκφράζει την αναλογία μεταξύ κόκκων άμμου και λεπτόκοκκων συστατικών  $d < 0,074$  mm με επιπρόσθετες πληροφορίες για τη δραστικότητα των σωματιδίων του αργίλου.
- Συνεπώς, στην περίπτωση των υλικών επιχώματος, υπερβολικά μεγάλες τιμές, όπως π.χ.  $SE > 75$ , αποτελούν ένδειξη πολύ ψαθυρού εδάφους χωρίς λεπτόκοκκα συστατικά, πράγμα που οδηγεί σε δυσκολίες συμπίκνωσης και δημιουργίας σταθερής δομής της γεωκατασκευής, ενώ και οι πολύ χαμηλές τιμές ( $SE < 25$ ) υποδηλώνουν ακαταλληλότητα λόγω υπερβολικής πλαστικότητας του υλικού.

## 5. Πλαστικότητα εδαφών - Όρια Atterberg

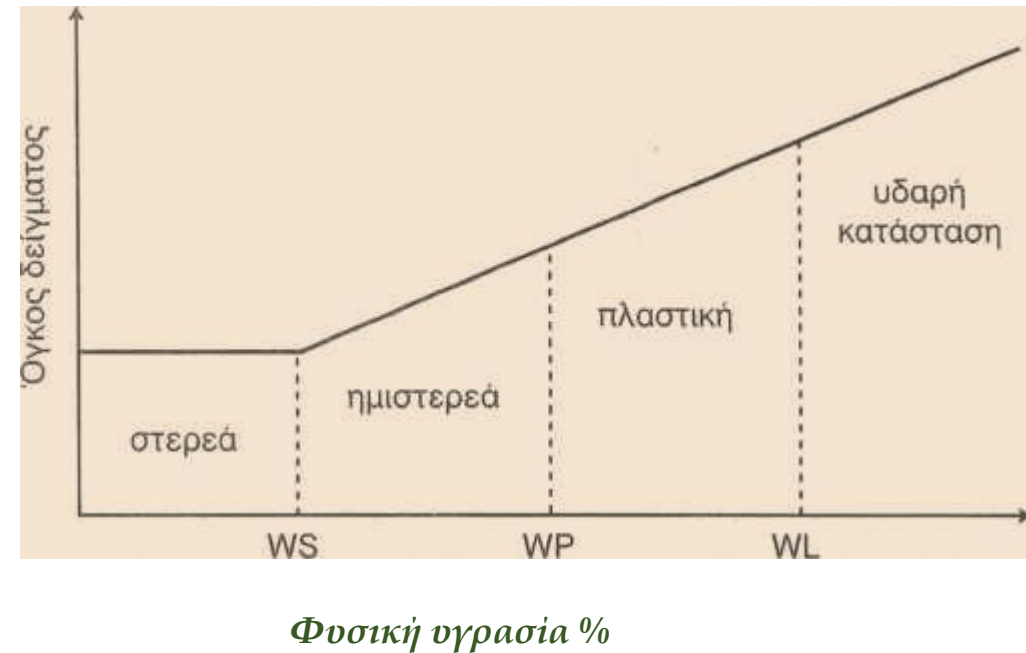
- Η φυσική κατάσταση ενός εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητα του σε νερό. **Ανάλογα με την φυσική του υγρασία το εδαφικό υλικό παίρνει τη μορφή μιας ρευστής μάζας ή ενός κονιάματος ή ακόμη ενός στερεού σώματος.**
- Η φυσική υγρασία έχει άμεση επίδραση στη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και κυρίως εκείνων που χαρακτηρίζονται ως “λεπτόκοκκα εδάφη”, αφού η μεταβολή της επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.
- Τα όρια Atterberg είναι αριθμητικές τιμές της φυσικής υγρασίας που αντιστοιχούν σε σχηματισμένες βαθμίδες στις οποίες παρατηρείται έντονη και χαρακτηριστική μεταβολή της κατάστασης ενός εδαφικού υλικού.

# 5. Πλαστικότητα εδαφών - Όρια Atterberg

Συγκεκριμένα:

- το όριο υδαρότητας WL (liquid limit) χαρακτηρίζει τη μετάβαση από την πλαστική κατάσταση στην υδαρή
- το όριο πλαστικότητας WP (plasticity limit) προσδιορίζει τη φυσική υγρασία για την οποία το υλικό αρχίζει να συμπεριφέρεται ως πλαστικό σώμα
- το όριο συρρίκνωσης WS (shrinkage limit) χαρακτηρίζει τη φυσική υγρασία για την οποία το υλικό έχει το μικρότερο δυνατό όγκο. Παραπέρα μείωση της φυσικής υγρασίας,  $W < WS$ , δεν επιφέρει μεταβολή όγκου.

Σχήμα 10. Όρια Atterberg





## 5. Πλαστικότητα εδαφών - Όρια Atterberg

- Στην Οδοποιία χρησιμοποιείται συχνά ως παράμετρος που χαρακτηρίζει την πλαστικότητα του εδάφους, ο δείκτης πλαστικότητας IP (plasticity index):  $IP = WL - WP$  που προσδιορίζει την έκταση της πλαστικής περιοχής. Μια υψηλή τιμή του δείκτη πλαστικότητας αποτελεί ένδειξη υλικού με έντονα πλαστική συμπεριφορά (λεπτόκοκκα εδάφη) και ακαταλληλότητα για κατασκευή επιχωμάτων.
- 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 σε αμμοχάλικα κατασκευής επιχωμάτων, είτε λόγω υπερβολικής ξηρασίας (στερεά κατάσταση), να εκτελείται πολύ δύσκολα η συμπύκνωση.
- Χαρακτηρίζονται ως “μη πλαστικά”, NP (non-plastic), εδάφη για τα οποία το ένα από τα δύο ως άνω όρια (WL, WP) δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Τέτοια είναι συνήθως χονδρόκοκκο εδάφη, άμμος, αμμοχάλικα αλλά και ορισμένα λεπτόκοκκα, μη αργιλικά, υλικά.
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές Atterberg εκτελούνται σε εδαφικό υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No 40.

## 5. Πλαστικότητα εδαφών - Όρια Atterberg

- Ο δείκτης συνεκτικότητας IC (consistency index)  $IC = \frac{WL-W}{WL-WP}$
- χαρακτηρίζει, σε συνάρτηση με τη φυσική υγρασία, την κατάσταση του υλικού από πλευράς συνεκτικότητας.

Συγκεκριμένα, πιθανή τιμή του δείκτη:

❖  $IC < 0$  αντιστοιχεί στην υδαρή κατάσταση

❖  $0 < IC < 1$  αντιστοιχεί στην πλαστική κατάσταση

❖  $1 < IC$  αντιστοιχεί στη στερεά κατάσταση

✓ Τα όρια του Atterberg είναι εξ ορισμού φυσικές παράμετροι του εδάφους.

➤ Η αξιολόγηση όμως των αριθμητικών τιμών τους και κατά κύριο λόγο του δείκτη πλαστικότητας δίνει σημαντικές δυνατότητες ερμηνείας της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών σε φυσική κατάσταση. Αντίθετα, τα αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν υψηλές τιμές του δείκτη πλαστικότητας και αντίστοιχα μεγάλη παραμορφωσιμότητα.

➤ Τέλος, ο δείκτης πλαστικότητας φαίνεται ότι συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη συνοχής στα λεπτόκοκκα εδάφη. Αμμώδη και ιλυοχαλικώδη εδαφικά υλικά έχουν μικρές τιμές του δείκτη πλαστικότητας.

✓ Για όλους αυτούς τους λόγους, ο δείκτης πλαστικότητας αποτελεί, σε διεθνές επίπεδο, βασική παράμετρο των προδιαγραφών Οδοποιίας για τον προσδιορισμό της ποιότητας και την κατάταξη των εδαφικών υλικών.

## 5. Πλαστικότητα εδαφών - Όρια Atterberg

Όρια καταλληλότητας τιμών του δείκτη πλαστικότητας για φυσικά εδαφικά και θραυστά αδρανή υλικά δίδονται στον Πίνακα 8.

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Δείκτης πλαστικότητας</i>	<i>Προδιαγραφές</i>
Σκυρόδεμα	NP (*)	—
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	NP	ΠΤΠ Α-265
Ασφαλτομίγματα	IP ≤ 6	ΗΠΑ
Βάση οδοστρώματος	IP ≤ 3	ΠΤΠ 0-155
Υπόβαση	IP ≤ 4	ΠΤΠ 0-150
Επίχωμα	IP ≤ 10	ΗΠΑ
(*) Μόνον για αδρανή με φυσική άμμο		

Πίνακας 8. Όρια καταλληλότητας θραυστών υλικών συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας

## 5. Πλαστικότητα εδαφών - Όρια Atterberg



Όρια ATTERBERG



Συσκευή στερεοποίησης



## 6. Δείκτης ομάδας

□ 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 οι εξής:

- $GI = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$

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 ( $0 < d < 20$ ).

➤ Ο δείκτης ομάδας χρησιμοποιείται συχνά ως στοιχείο ενδεικτικό 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 συναντούσε παλαιότερα εφαρμογή στον Ελληνικό χώρο.



## 6. Δείκτης ομάδας

- ❖ 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.
  - Αντίθετα, ο δείκτης ομάδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατάταξη εδαφικών υλικών σε κατηγορίες ή ομάδες. Υψηλές τιμές του δείκτη αποτελούν ένδειξη λεπτόκοκκου υλικού.
  - Το σύστημα κατάταξης AASHTO που είναι εκείνο που κυρίως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Οδοποιίας, προτείνει ως χαρακτηριστική παράμετρο εισαγωγής, εκτός από τα στοιχεία κοκκομετρίας και πλαστικότητας, και τον δείκτη ομάδας.

# 7. Διαπερατότητα

- Διαπερατότητα ή υδατοπερατότητα ενός εδάφους είναι η ιδιότητα που εκφράζει τον τρόπο και κυρίως την ταχύτητα με την οποία το νερό διέρχεται μέσα από τους κόκκους του υλικού υπό τη δράση των δυνάμεων βαρύτητας.

Η ροή μέσω ενός εδαφικού υλικού περιγράφεται από το νόμο του Darcy:

- $Q = k i A$

όπου η παροχή  $Q$  δίδεται συναρτήσει της διατομής  $A$ , της υδραυλικής βαθμίδας  $i$  και του συντελεστή διαπερατότητας  $k$ .

- Ο συντελεστής διαπερατότητας εκφράζει στην πραγματικότητα την ταχύτητα με την οποία το νερό μπορεί να διαπεράσει ένα εδαφικό υλικό.
- Ο συντελεστής αυτός είναι μεγαλύτερος στα κοκκώδη εδάφη, τα οποία δεν κατακρατούν το νερό, και μικρότερος στα λεπτόκοκκα εδάφη, των οποίων η διαπερατότητα είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

# 7. Διαπερατότητα

Στον Πίνακα 9 δίδονται αντιπροσωπευτικές τιμές διαπερατότητας διαφόρων τύπων εδαφών.

Έδαφος	Συντελεστής διαπερατότητας $k$ (cm/sec)
Χάλικες, καθαρά αμμοχάλικα	1 - 100
Χονδρόκοκκη άμμος	$10^{-3}$ - $10^{-2}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$10^{-4}$ - $10^{-3}$
Ίλος, αμμοΐλος	$10^{-6}$ - $10^{-4}$
Άργιλος	$10^{-8}$ - $10^{-5}$

Πίνακας 9. Συντελεστής διαπερατότητας εδαφών

Λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά, όπως μονιμοριλλοντικές άργιλοι, με συντελεστές διαπερατότητας, μικρότερους από  $10^{-7}$  cm/sec θεωρούνται ως αδιαπέρατα υλικά.

*Η διαπερατότητα ενός υλικού εξαρτάται από τη δομή και την ορυκτολογική σύστασή του, την κοκκομετρία και το δείκτη πόρων.* Σύμφωνα με εργαστηριακές παρατηρήσεις και μετρήσεις προτάθηκε από τον Hazen η κάτωθι εμπειρική σχέση που συνδέει την κοκκομετρία με τη διαπερατότητα, σε αμμώδη εδάφη με λεπτόκοκκα συστατικά:  
 $k = C d_{10}^2$  όπου  $d_{10}$  σε cm και  $k$  σε cm/sec. Ο συντελεστής  $C$  παίρνει τιμές μεταξύ 41 και 146 με συγκλίνουσα μέση τιμή  $C = 120$ .

## 8. Άλλες φυσικές παράμετροι

- Εκτός από τις προαναφερθείσες, και άλλες φυσικές παράμετροι δευτερεύουσας σημασίας χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των εδαφών όπως:
  - η δραστηριότητα (activity) των αργιλικών συστατικών,
  - η περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες,
  - η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο κ.α.
- που μικρή σημασία έχουν σε εφαρμογές οδοποιίας.

# 9. Συστήματα κατάταξης εδαφών - Το σύστημα AASHTO

- Ο περιγραφικός και μακροσκοπικός χαρακτηρισμός ενός εδάφους, π.χ. καστανέρυθρη στιφρά άργιλος, είναι γενικά πολύ ασαφής και δεν παρέχει στον Μηχανικό τις πληροφορίες που του είναι απαραίτητες για την εκτέλεση ελέγχων και υπολογισμών.
- Η μελέτη ενός έργου οδοποιίας επιβάλλει μια εργαστηριακή έρευνα, περισσότερο ή λιγότερο εκτεταμένη, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, που θα οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα ως προς τις ιδιότητες, τη συμπεριφορά και την πιθανώς απαιτούμενη προεργασία των εδαφών για εκτέλεση χωματοургικών εργασιών.
- Τα αποτελέσματα της έρευνας χρησιμεύουν για την κατάταξη του εδαφικού υλικού σε μια κατηγορία σύμφωνα με ένα από τα διάφορα συστήματα κατάταξης εδαφών (soil classification systems). Ανάμεσά τους διακρίνονται για την πληρότητά τους το Σύστημα AASHTO και το Ενοποιημένο Σύστημα (USCS).
- Στην Ελλάδα, σε εφαρμογές οδοποιίας, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο το Σύστημα AASHTO που βασίζεται σε αποτελέσματα δοκιμών κοκκομετρικής ανάλυσης και ορίων Atterberg. Στους Πίνακες 10 και 11 δίδονται τα διαγράμματα κατάταξης εδαφών σε ομάδες και υποομάδες κατά τη μέθοδο AASHTO.



# 10. Το διάγραμμα πλαστικότητας και το ενοποιημένο σύστημα (USCS)

- Το Ενοποιημένο Σύστημα κατάταξης εδαφών είναι εκείνο που περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο χρησιμοποιείται διεθνώς.
- Η κατάταξη των εδαφών σε μια από τις ομάδες γίνεται με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών κοκκομετρίας και ορίων Atterberg.
- Υπάρχει μια βασική διάκριση ανάμεσα στα χονδρόκοκκα (χάλικες, άμμος) και στα λεπτόκοκκα εδάφη (ίλος, άργιλος) ενώ εν συνεχεία ακολουθεί η κατάταξη σε ομάδες. Τα χονδρόκοκκα εδάφη διακρίνονται σε 8 ομάδες, τα λεπτόκοκκα σε 6 ομάδες και μια τελευταία ομάδα συγκεντρώνει ορισμένα είδη οργανικών εδαφών.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για την κατάταξη σε ομάδες ενός εδάφους είναι:

- ❖ Το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο No 200
- ❖ Το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο No 4
- ❖ Ο συντελεστής ομοιομορφίας  $U = d_{60} / d_{10}$
- ❖ Ο συντελεστής κοκκομετρικής καμπυλότητας
- ❖ Το διάγραμμα πλαστικότητας

# 10. Το διάγραμμα πλαστικότητας και το ενοποιημένο σύστημα (USCS)

**Πίνακας 10. Κατάταξη εδαφών σε ομάδες AASHTO**

Γενική κατάταξη	Χυδρόκοκκο 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	A-4	A-5	A-6	A-7
Ομάδα κατάταξης							
Κοκκομετρία: διερχόμενο ποσοστό %							
No 10 (2 mm)							
No 40 (0,42 mm)	50 max	51 min					
No200 (0,074 mm)	25 max	10 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
"Όρια Atterberg:							
Όριο υδαρότητας				40 max	41 min	40 max	41 min
Δείκτης πλαστικότητας	6 max	NP		10 max	10 max	11 min	11 min
Δείκτης ομάδας			4 max	8 max	12 max	16 max	20
Αξιολόγηση ως έδαφος έδρασης	Εξαιρετικό έως καλό			Μέτριο έως ακατάλληλο			
<p><b>Μέθοδος κατάταξης:</b> Γνωρίζοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, ακολουθούμε τον πίνακα από αριστερά προς τα δεξιά η πρώτη ομάδα που θα συναντήσουμε, και στην οποία ανταποκρίνομαι τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι η ζητούμενη</p>							

# 10. Το διάγραμμα πλαστικότητας και το ενοποιημένο σύστημα (USCS)

**Πίνακας 10. Κατάταξη εδαφών σε υποομάδες AASHTO**

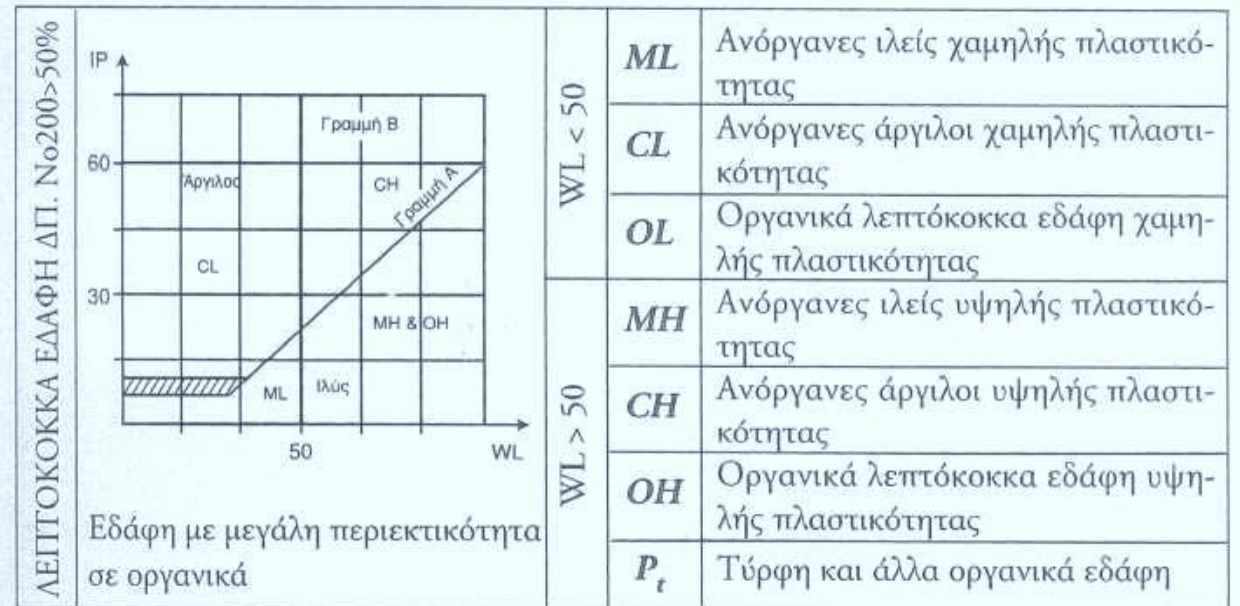
	Χονδρόκοκκο εδάφη διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200 μικρότερο από 35%						Λεπτόκοκκα εδάφη διερχόμενο ποσοστό από το Νο200 μεγαλύτερο από 35%					
	A-1		A-3	A-2(*)				A-4	A-5	A-6	A-7	
Κοκκομετρία	A-1-α	A-1-β		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
διερχόμενο ποσοστό Νο 10 (2 mm) Νο40 (0,42 mm) Νο200 (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	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min
Όρια Atterberg:											IP < WL - 30	IP > WL - 30
Όριο υδαρότητας Δείκτης πλαστικότητας	6 max		NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	41 min 11 min
Δείκτης ομάδας	0		0	0	0	4 max	4 max	8 max	12 max	16 max	20 max	20 max
Χαρακτηριστικά συστατικά	Χαλίκια, άμμος		Λειπή άμμος	Χαλίκια, ιλυώδης άμμος, αργιλώδης άμμος				Ιλυώδη εδάφη		Αργιλικά εδάφη		
Εκτίμηση ως έδαφος έδρασης	Εξαιρετικό έως καλό						Μέτριο έως ακατάλληλο					

# 10. Το διάγραμμα πλαστικότητας και το ενοποιημένο σύστημα (USCS)

## • Πίνακας 12. Ενοποιημένο σύστημα κατάταξης εδαφών

Χαρακτηριστικά εδάφους		Εργαστηριακή κατάταξη	Σύμβολο ομάδας	Περιγραφή	
ΧΩΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ ΔΠ. Νο200 < 50%	ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ ΔΠ. Νο4 < 50%	Καθαρά αμμοχάλικα ΔΠ. Νο200 < 5%	<b>GW</b>	Χάλικες και αμμοχάλικα καλής διαβάθμισης	
		Ένα από τα ως άνω κριτήρια δεν ικανοποιείται	<b>GP</b>	Χάλικες ομοιόμορφης κοκκομετρίας	
		Χάλικες με λεπτόκοκκα ΔΠ. Νο200 > 12%	Σημείο Atterberg κάτω από τη γραμμή A ή $IP < 4$	<b>GM</b>	Ιλυώδεις χάλικες, ιλυώδη αμμοχάλικα
			Σημείο Atterberg πάνω από τη γραμμή A ή $IP > 7$	<b>GC</b>	Αργιλώδεις χάλικες, αργιλώδη αμμοχάλικα
	ΑΜΜΟΙ ΔΠ. Νο4 > 50%	Άμμος ΔΠ. Νο200 < 5%	$U > 6$ και $C_c = 1 + 3$	<b>SW</b>	Άμμος καλής διαβάθμισης
			Ένα από τα ως άνω κριτήρια δεν ικανοποιείται	<b>SP</b>	Άμμος μέτριας διαβάθμισης
		Άμμος με λεπτόκοκκα ΔΠ. Νο200 > 12%	Σημείο Atterberg κάτω από τη γραμμή A ή $IP < 4$	<b>SM</b>	Ιλυώδεις άμμοι
			Σημείο Atterberg πάνω από τη γραμμή A ή $IP > 7$	<b>SC</b>	Αργιλώδεις άμμοι

Για ενδιάμεσες τιμές παραμέτρων, χρησιμοποιείται διπλό σύμβολο (π.χ. GW/GC, SW/SM)



Γραμμή A:  $IP = 0,73 (WL-20)$ , Γραμμή B:  $WL = 50$

Για εδαφικά υλικά με όρια Atterberg κοντά στη γραμμή B ( $\pm 2$  μονάδες) χρησιμοποιείται διπλό σύμβολο (π.χ. CL/CH, ML/MH)

## 11. Συγκριτική κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τα διάφορα συστήματα

- Οι πληροφορίες που υπάρχουν για τα εδαφικά υλικά συχνά αναφέρονται σε ένα σύστημα κατάταξης εδαφών.
- Η μετάβαση από ένα συγκεκριμένο σύστημα σε ένα άλλο, κάθε άλλο παρά απλή υπόθεση είναι και θα πρέπει να βασίζεται στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Ενδεικτικά, ωστόσο, μια αντιστοιχία ομάδων εδάφους κατά τρεις διαφορετικές μεθόδους κατάταξης δίδεται στον Πίνακα 13.
- Το θέμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές Οδοποιίας, όπου συχνά χρησιμοποιείται το σύστημα AASHTO αντί του ευρέως διαδεδομένου σε προβλήματα Εδαφομηχανικής Ενοποιημένου Συστήματος (USCS).



# 11. Συγκριτική κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τα διάφορα συστήματα

- Πίνακας 13. Σύγκριση συστημάτων κατάταξης

<i>USCS</i>	<i>Κατάταξη AASHTO</i>	<i>Κατάταξη FAA</i>
GW	A-1-a	Χαλικώδη, αμμοχαλικώδη εδάφη μη περιλαμβανόμενα στο σύστημα
GP	A-1-a	
GM	A-1-b, A-2-4, A-5	
GC	A-2-6, A-2-7	
SW	A-1-b	E-1, E-2, E-3
SP	A-3	
SM	A-1-b, A-2-5, A-5	E-3, E-4, E-5
SC	A-2-6, A-2-7	E-4, E-5
ML	A-4	E-6, E-8, E-9
CL	A-6, A-7-5	E-7, E-8, E-9
OL	A-4, A-7-5	E-6
MH	A-5	E-9
CH	A-7	E-10, E-11, E-12
OH	A-7	E-11, E-12
P <sub>t</sub>		E-13

Οι αντιστοιχίσεις του πίνακα είναι προσεγγιστικές

## 12. Επίδραση παγετού

Το φαινόμενο της παγοπληξίας οδών και οδοστρωμάτων σε περιοχές όπου αναπτύσσονται χαμηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι συνηθισμένο.

Οι δομικές βλάβες που παρατηρούνται στα οδοστρώματα λόγω παγοπληξίας οφείλονται στη δημιουργία φακών πάγου σε λεπτόκοκκα εδάφη σκάφης ή έδρασης.

Οι αστοχίες στις ανώτερες στρώσεις προκαλούνται κατά δυο διαφορετικούς τρόπους και αντίστοιχα διαφορετικά φαινόμενα:

- α) Κατά την περίοδο του παγετού, σε λεπτόκοκκα εδάφη έδρασης οδοστρωμάτων ή τεχνικών έργων, και εκεί όπου ο υπόγειος ορίζοντας φθάνει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, δημιουργούνται φακοί πάγου με παράλληλη διόγκωση και διαφορικές παραμορφώσεις στο σύνολο της εδαφικής μάζας που μεταφέρονται ως δομικές αστοχίες στο οδόστρωμα (frost heave).
- β) Κατά την περίοδο της άνοιξης, στις ίδιες περιοχές και σε παγόπληκτα εδάφη, η απότομη άνοδος της θερμοκρασίας είναι εξίσου δυσμενής για τις οδικές κατασκευές. Ο πάγος δίνει τη θέση του στο νερό, με αποτέλεσμα τα ανώτερα στρώματα της υποδομής να είναι κεκορεσμένα και να παρατηρείται απότομη πτώση της διατμητικής αντοχής. Το οδόστρωμα, στην περίπτωση αυτήν, κινδυνεύει να παραμορφωθεί, να καθιζήσει και να αστοχήσει υπό τη δράση των φορτίων κυκλοφορίας (spring breakup).

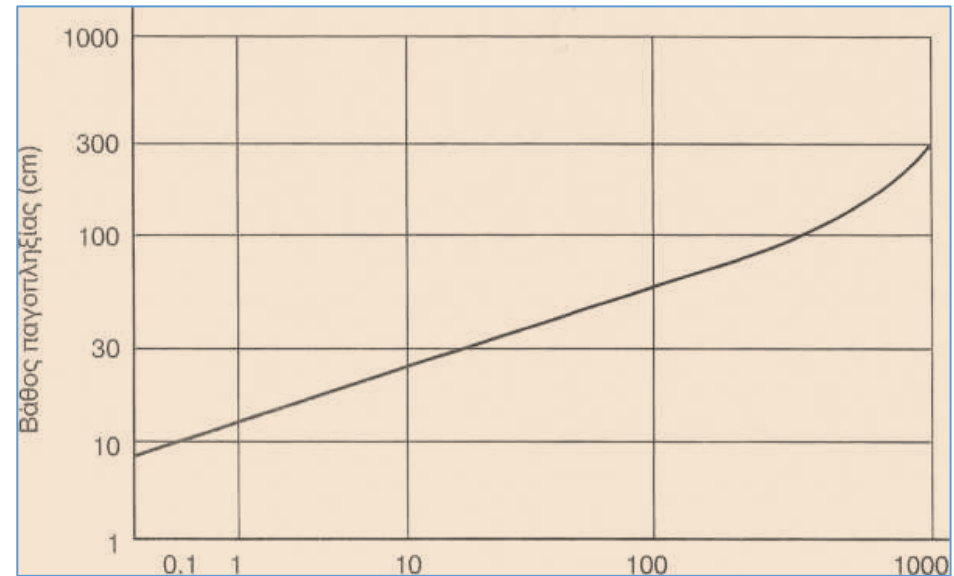
## 12. Επίδραση παγετού

- Ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως παγόπληκτο ή, σωστότερα, ως ευαίσθητο στον παγετό αν περιέχει τουλάχιστον 3% λεπτόκοκκο κλάσμα μικρότερο των 0,02 mm.
- Στον Πίνακα 14 δίδεται η κατάταξη των εδαφών από πλευράς παγοπληξίας όπου τα εδάφη F1 είναι τα λιγότερο και F4 τα περισσότερο παγόπληκτα.
- Τα πλέον ευαίσθητα στον παγετό εδάφη είναι εκείνα που συνδυάζουν παρουσία λεπτόκοκκων σωματιδίων με σχετικώς μεγάλη διαπερατότητα, όπως στρώματα αργίλου με παρεμβολές και ενστρώσεις άμμου, ιλυώδης άμμος και άργιλος χαμηλής πλαστικότητας.
- Σε κάθε περίπτωση, σε περιοχές όπου αναπτύσσονται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, εδάφη κατηγορίας F4 δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως στρώσεις έδρασης οδοστρωμάτων χωρίς τη λήψη κατάλληλων μέτρων αντιπαγετικής προστασίας (εξυγίανση, αποστράγγιση, σταθεροποίηση).
- Ονομάζεται δείκτης παγετού (freezing index) μιας περιοχής μια παράμετρος που εκφράζει τη διάρκεια των χαμηλών θερμοκρασιών. Ο δείκτης παγετού είναι το άθροισμα των βαθμοημερών (degree x days) μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης θερμοκρασίας, υπό την προϋπόθεση, πάντοτε ότι οι βαθμοί ( $^{\circ}\text{C}$ ) προσδιορίζουν αριθμητικά την απόκλιση των αρνητικών θερμοκρασιών από τη θερμοκρασία σχηματισμού του πάγου ( $0^{\circ}\text{C}$ ).
- Είναι προφανές ότι ο δείκτης παγετού στην ίδια περιοχή μπορεί να είναι διαφορετικός από ένα χειμώνα σε άλλον. Στατιστικά στοιχεία κλιματολογικών παρατηρήσεων μπορούν να χρησιμεύσουν για να προσδιορισθούν μέσες και μέγιστες τιμές του δείκτη παγετού σε διάφορες περιοχές για αντιμετώπιση θεμάτων παγοπληξίας οδικών κατασκευών.
- Ο δείκτης παγετού επηρεάζει σημαντικά το βάθος παγοπληξίας του εδάφους (Σχ. 11), αν και το βάθος αυτό εξαρτάται και από άλλους παράγοντες που έχουν ήδη αναφερθεί.

# 12. Επίδραση παγετού

Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή εδάφους
F1	Αμμοχάλικα με ποσοστό 3-20% κόκκων μικρότερων των 0,02 mm
F2	Άμμοι με ποσοστό 3-15% κόκκων μικρότερων των 0,02 mm
F3-a	Αμμοχάλικα με ποσοστό >20% κόκκων μικρότερων των 0,02 mm
F3-b	Άμμοι με ποσοστό >15% κόκκων μικρότερων των 0,02 mm
F3-c	Άργιλοι με IP >12
F4-a	Ανόργανες ιλεις και αμμώδεις ιλεις
F4-b	Λεπτόκοκκες ιλυώδεις άργιλοι με ποσοστό >15% κόκκων < 0,02 mm
F4-c	Άργιλοι με IP < 12
F4-d	Στρωματοποιημένες άργιλοι με ενστρώσεις άμμου

**Πίνακας 14. Κατάταξη ευαίσθητων στον παγετό εδαφών [30**



Δείκτης παγετού (βαθμο-ημέρες)

**Σχήμα 11. Βάθος παγοπληξίας εδάφους συναρτήσει του δείκτη παγετού**