



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΗΜΙΚΑ  
ΕΝΕΜΕΝΗΣ ΑΜΜΟΥ  
ΜΕ ΕΠΙΘΕΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ο μελετητής:

**ΖΗΜΟΥ ΑΔΑΜΑΝΤΙΑ**

Ο επιβλέπων:

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ**

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2018

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία «Μηχανική Συμπεριφορά Χημικά Ενεμένης Άμμου με Εποξειδική Ρητίνη» απευθύνεται κατά κύριο λόγο στους σπουδαστές του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. των Τ.Ε.Ι. της χώρας και στοχεύει στην παροχή των γνώσεων, που απαιτούνται στον τομέα της ενίσχυσης των εδαφών.

Αποτελεί κυρίως πειραματική έρευνα, εκτός από πτυχιακή εργασία, στις μηχανικές ιδιότητες ενεμένης άμμου με υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη και μπετονίτη υπό μονοαξονικές και δυναμικές φορτίσεις. Με αυτόν τον τρόπο γεφυρώνεται η απόσταση που χωρίζει τη θεωρία από την πράξη, αφού συνδυάζει θεωρητικές γνώσεις, αλλά και πρακτικές.

Το περιεχόμενο χωρίζεται σε τρία κεφάλαια, τα οποία περιέχουν:

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται σε θεωρητικές πληροφορίες για την εποξειδική ρητίνη. Περιέχει ιστορικά και χημικά στοιχεία, κατηγορίες και τρόπους σωστής χρήσης των εποξειδικών ρητινών.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται κυρίως σε θεωρητικές πληροφορίες για τις κατηγορίες των εδαφών, που περιλαμβάνει τη γαλλική άμμο, τα γενικά της χαρακτηριστικά, καθώς και ένα τύπο ελληνικής άμμου. Περιλαμβάνει επίσης την ενίσχυση των εδαφών. Συγκεκριμένα αναφέρεται στις μεθόδους ενίσχυσης τους ιστορικά. Αυτό το κεφάλαιο αναλύει επίσης τη βελτίωση εδαφών με χρήση χημικών ενεμάτων, τον τρόπο μελέτης των μεθόδων, γενικά χαρακτηριστικά ενεμάτων, και αναφορές σε κάποια συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών τους.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελείται από τα υλικά της πειραματικής διαδικασίας. Υπάρχουν δεδομένα για την εποξειδική ρητίνη, τον λόγο επιλογής της καθώς και χαρακτηριστικά του μπετονίτη που χρησιμοποιήσαμε. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών, στις οποίες καταπονήθηκαν τα δοκίμια. Περιλαμβάνονται αναλυτικοί πίνακες και διαγράμματα από κάθε δοκιμή, καθώς μέσω αυτών βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα.

Η τελευταία σελίδα αναφέρεται στην βιβλιογραφία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιον που επιθυμεί να εμβαθύνει τις γνώσεις του στο συγκεκριμένο αντικείμενο, αλλά και για να έχει πληρέστερη θεωρητική κάλυψη.

Υπάρχει ανάγκη έκφρασης ευχαριστιών ως προς το πρόσωπο του καθηγητή και σπουδαίο επιστήμονα, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Ιδρύματος, του Αναγνώστου Κωνσταντίνου, για την πολύτιμη βοήθεια και συνεργασία του.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Κεφάλαιο 1: Εποξειδική Ρητίνη.....</b>	<b>5</b>
1.1. Ιστορική αναδρομή.....	5
1.2. Χημεία των ρητινών.....	5
1.2.1. Ταξινόμηση πολυμερών	
1.2.2. Παραγωγή και σκλήρυνση εποξειδικής ρητίνης	
1.3. Κατηγορίες ρητινών.....	11
1.3.1. Εφαρμογές	
1.4. Ρητινένωση σε ακραίες κλιματολογικές συνθήκες.....	15
1.5. Γενικά χαρακτηριστικά των εποξειδικών ρητινών.....	16
1.5.1. Ορισμός	
1.5.2. Φυσικές ιδιότητες	
1.5.3. Χημικές ιδιότητες	
1.5.4. Διαλυτότητα	
1.5.5. Ανθεκτικότητα	
1.5.6. Ιξώδες	
1.5.7. Ιστορικό χρήσης εποξειδικών ρητινών	
1.6. Χρήσεις εποξειδικών ρητινών.....	19
1.6.1. Περιπτώσεις χρήσης εποξειδικών ρητινών	
1.6.2. Άλλες χρήσεις	
1.7. Τρόπος ελέγχου.....	19
1.7.1. Συσκευασία των εποξειδικών συγκολλητικών μέσων	
1.7.2. Αποθήκευση εποξειδικών ρητινών	
1.8. Βασικές εφαρμογές.....	20
1.9. Υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη.....	21
<b>2. Κεφάλαιο 2: Εδάφη.....</b>	<b>22</b>
2.1. Είδη εδαφών.....	22
2.1.1. Γενικά	
2.1.2. Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη	
2.1.3. Γενικές κατηγορίες εδαφών	
2.1.4. Χονδρά και λεπτά κλάσματα	
2.2. Μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών.....	30
2.2.1. Περίληψη – ιστορικά στοιχεία	
2.2.2. Εισαγωγή	
2.2.3. Βελτιώσεις εδαφών	
2.2.4. Μέθοδοι βελτίωσης εδάφους κατά Attewell και Farmer, Τσοτσο, Van Imple	
2.2.5. Συμπεράσματα	
2.3. Βελτίωση εδάφους – Χημική σταθεροποίηση με ενέματα.....	55
2.3.1. Εισαγωγή	
2.3.2. Ταξινόμηση των μεθόδων βελτίωσης	
2.3.3. Επιλογή – τρόπος μελέτης των μεθόδων βελτίωσης	
2.3.4. Χημική σταθεροποίηση με ενέματα	
2.3.5. Γενικά χαρακτηριστικά χημικών ενεμάτων	

<b>3. Κεφάλαιο 3: Πειράματα.....</b>	<b>63</b>
3.1. Υλικά πειραματικής διαδικασίας.....	63
3.1.1. Γαλλική άμμος	
3.1.2. Υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη	
3.1.3. Νερό	
3.1.4. Μπετονίτης	
3.2. Πειραματική διαδικασία.....	71
3.2.1. Παρασκευή δοκιμίων	
3.2.2. Μέτρα Ατομικής Προστασίας	
3.3. Αποτελέσματα μονοαξονικής φόρτισης.....	95
3.4. Αποτελέσματα δυναμικής φόρτισης.....	96
Βιβλιογραφία.....	98

## 1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η λέξη «εποξεική» προέρχεται από δύο ελληνικές λέξεις, από το πρόθεμα - επί, που σημαίνει “πάνω” και **οξύ**, που σημαίνει “οξύς / όξινος”. Η ιστορία της εποξικής χημείας άρχισε πιθανότατα στις αρχές του 1900, όταν ο Ρώσος χημικός Prileschajev ανακάλυψε ότι οι ολεφίνες αντιδρούν με το υπεροξείδιο του βενζοϊκού οξέος σχηματίζοντας εποξειδία. Στα μέσα της δεκαετίας του 1930, ο Γερμανός P. Schlack έκανε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την προετοιμασία των πολυαμίνων υψηλού μοριακού βάρους, κάνοντας τις αμίνες να αντιδράσουν με εποξικές ενώσεις που περιέχουν περισσότερες από μία εποξικές ομάδες. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας περιγράφεται ως η αντίδραση εποξικών ενώσεων της επιχλωρυδρίνης με τη διοφαινόλη Α. Η εποξεική χημεία, όπως την ξέρουμε σήμερα στους τομείς της ναυτιλιακής και βιομηχανικής προστασίας, αναγνωρίστηκε ταυτόχρονα από τον P. Castan από την Ελβετία και τον Αμερικανό S. Greenlee. Οι δύο χημικοί υπέβαλλαν αιτήσεις για διάφορες ευρεσιτεχνίες στα τέλη του 1930. Ο πρώτος τύπος εποξικής ρητίνης κυκλοφόρησε στο εμπόριο από την **Ciba το 1946**.

Εποξύ ή πολυεποξειδίο είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερικό εποξειδίο, το οποίο πήζει όταν αναμειγνύεται με ένα καταλυτικό παράγοντα, τον “**σκληρυντή**”. Οι πρώτες προσπάθειες για την παρασκευή ρητινών για εμπορική χρήση έγιναν το 1927 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Τελικά την επιτυχία για την παρασκευή εποξειδικής ρητίνης μοιράστηκαν οι Pierre Castan (Ελβετία) και S.O. Greenlee (Ηνωμένες Πολιτείες) το 1936.

Αν και αναπτύχθηκαν ευρέως κατά τον δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο, οι εποξειδικές ρητίνες έγιναν εμπορικά διαθέσιμες κατά το 1950, προσφέροντας υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Λόγω των ιδιοτήτων τους, βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία και μια από τις διαδεδομένες εφαρμογές τους είναι η χρήση τους ως μήτρες στα συνθετικά υλικά.

## 1.2. ΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ

Πολυμερές ή μακρομόριο ονομάζεται ένα σύνθετο μόριο το οποίο αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μικρές δομικές μονάδες συνδεόμενες μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Ο όρος “μακρομόριο” ή “πολυμερές” υιοθετείται για μόρια με περισσότερες από δέκα δομικές μονάδες ενώ τα μόρια με λιγότερα από δέκα δομικές μονάδες ονομάζονται ολιγομερή.

Το μόριο του πολυμερούς είναι συνήθως επίμηκες γραμμικό σαν αλυσίδα και υπάρχει ένα τμήμα του, που επαναλαμβάνεται το οποίο και χαρακτηρίζεται ως “επαναλαμβανόμενη μονάδα”. Η επαναλαμβανόμενη μονάδα χρησιμοποιείται για το χημικό συμβολισμό του πολυμερούς.

Οι αντιδράσεις για το σχηματισμό των πολυμερών χαρακτηρίζονται ως αντιδράσεις πολυμερισμού και διακρίνονται σε δύο κύρια είδη:

- I. Τις αντιδράσεις **πολυπροσθήκης**, ή αλυσιδωτού πολυμερισμού και
  - II. Τις αντιδράσεις **πολυσυμπύκνωσης**.
- Τα πολυμερή που παράγονται χαρακτηρίζονται ως πολυμερή αλυσιδωτού πολυμερισμού ή πολυμερή συμπύκνωσης αντίστοιχα.

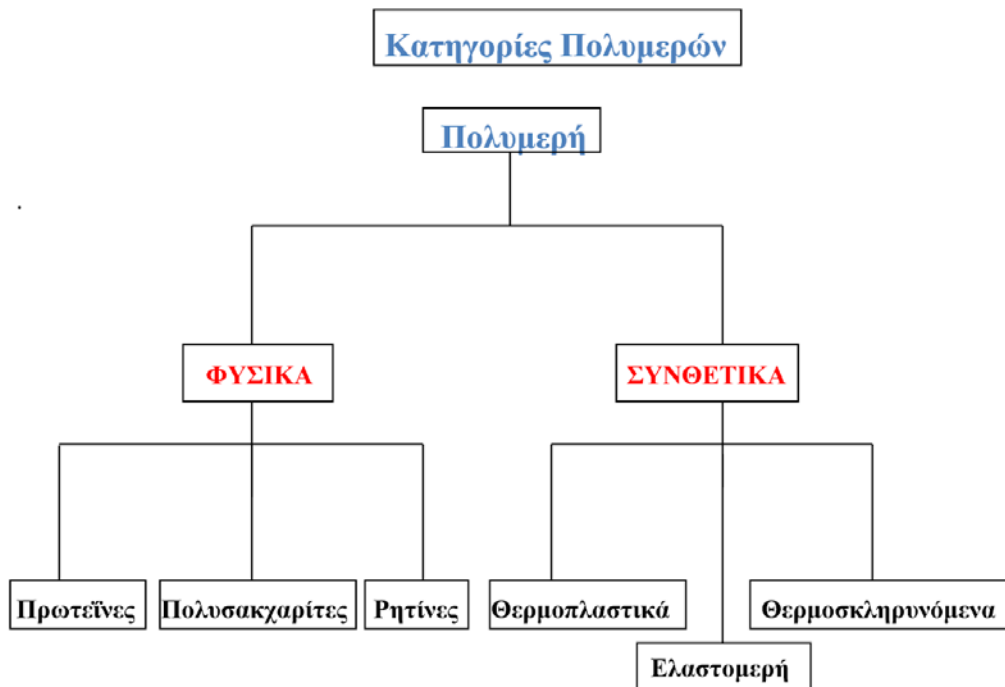
### 1.2.1. Ταξινόμηση πολυμερών

Τα πολυμερή διαιρούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.1**. Η πρώτη κατηγορία είναι τα **φυσικά πολυμερή**, τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε :

- I. πρωτεΐνες,
  - II. πολυσακχαρίτες και
  - III. ρητίνες.
- Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία είναι αυτή των συνθετικών πολυμερών.

Αυτά με τη σειρά τους διαιρούνται σε:

- I. θερμοπλαστικά,
- II. ελαστομερή και
- III. θερμοσκληρυνόμενα



**Σχήμα 1.1:** Κατηγορίες Πολυμερών

Οι ενώσεις από τις οποίες προέρχονται τα πολυμερή ονομάζονται μονομερή και διαφέρουν μαζί με τις δομικές μονάδες (ή μονομερικά στοιχεία) είτε στον τρόπο συνδέσεως των ατόμων τους είτε στον αριθμό των

ατόμων τους. Ο αριθμός των μονομερών στοιχείων του μακρομορίου ονομάζεται βαθμός πολυμερισμού και δίδεται από την σχέση (1.1):

$$\text{Βαθμός πολυμερισμού} = \frac{\text{Μοριακό βάρος πολυμερούς στοιχείου}}{\text{Μοριακό βάρος μονομερούς στοιχείου}}$$

(1.1)

Τα πολυμερή, όπως προαναφέρθηκε, ταξινομούνται σε δυο μεγάλες κατηγορίες :

- I. Στα **φυσικά** πολυμερή και
  - II. Στα **συνθετικά** πολυμερή
- Τα **συνθετικά** πολυμερή μπορούν επίσης να διακριθούν βάσει:
- I. Της **χημικής** δομής
  - II. Της **θερμικής** συμπεριφοράς
  - III. Της **χρηστικής** ιδιότητας

#### Διαίρεση των συνθετικών πολυμερών βάσει της χημικής δομής

Τα πολυμερή βάσει της χημικής δομής διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- I. Στα **ομοιοπολυμερή** (ή απλώς πολυμερή ) τα οποία προέρχονται από την επανάληψη μιας και μόνης δομικής μονάδας .
- II. Στα **συμπολυμερή** τα οποία προέρχονται από την επανάληψη δύο ή περισσότερων δομικών μονάδων.

#### Διαίρεση των συνθετικών πολυμερών βάσει της θερμικής συμπεριφοράς

Τα συνθετικά πολυμερή βάσει της θερμικής συμπεριφοράς , διακρίνονται σε :

- I. **Θερμοπλαστικά** (ή πολυμερή) πολυμερή τα οποία μαλακώνουν και επομένως μπορούν να μορφοποιηθούν με θέρμανση πάνω από μια ορισμένη για κάθε πολυμερές θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται θερμοκρασία υαλώδους μετατοπίσεως  $t_g$  (glass transition temperature). Όταν ψυχθούν, τα θερμοπλαστικά πολυμερή ανακτούν τις αρχικές τους ιδιότητες. Θεωρητικά μπορούν να μορφοποιηθούν με θέρμανση άπειρες φορές διότι δεν μεταβάλλεται η χημική τους δομή. Αποτελούνται από γραμμικά μακρομόρια (πχ. Πολυστυρένιο, πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυαιθιλένιο κ.α.). Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά, διατηρούν δε την ιδιότητα του να μορφοποιηθούν εύκολα με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη αποδίδει στερεό υλικό. Η όλη διεργασία είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά διατίθενται σε υγρή ή στερεά μορφή, είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης.
- II. **Θερμοσκληρυνόμενα** (ή θερμοσταθερά) πολυμερή τα οποία μεταβάλλουν μη αναστρέψιμα τις αρχικές τους ιδιότητες με θέρμανση πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασιακή τιμή, παρουσία συνήθως ορισμένων χημικών ενώσεων. Τα μακρομόρια των

πολυμερών αυτών ενώνονται μεταξύ τους με θέρμανση και σχηματίζουν μακρομοριακά πλέγματα. Κατά την αρχική θέρμανση δεν μεταβάλλεται μόνο η σχετική θέση των μακρομορίων, αλλά και η χημική τους δομή.

**Χαρακτηριστικά Θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών:**

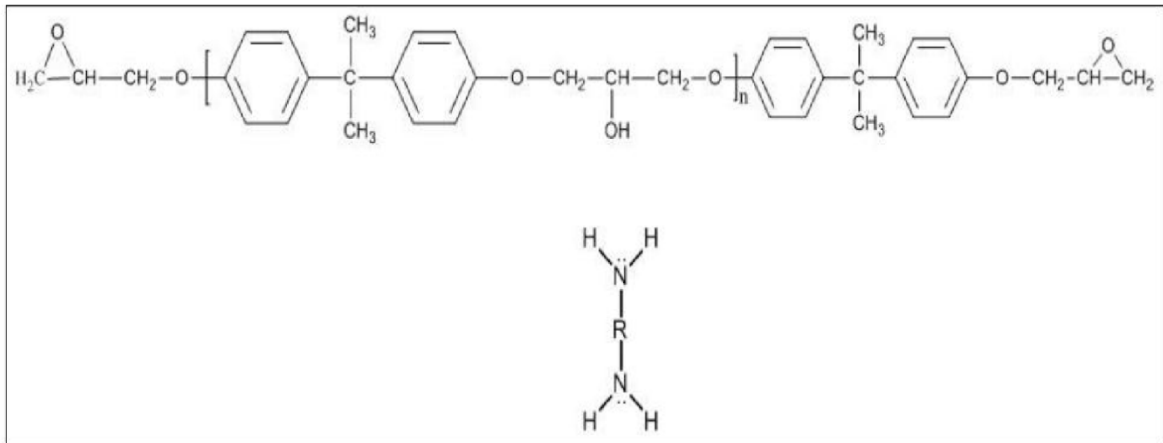
- a. Πολύ σκληρά,
- b. Ανθεκτικά στην θερμότητα,
- c. Δεν μορφοποιούνται με πλαστικότητα ,
- d. Άτηκτα,
- e. Αδιάλυτα
- f. Διαποτίζονται πολύ λίγο από διαλύτες .

III. **Ελαστομερή** (ή ελαστικά) πολυμερή τα οποία είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερελαστικότητας, δηλαδή κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος.

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και χαρακτηρίζονται από την παρουσία του οξιρανικού δακτυλίου. Ανάλογα με τον αριθμό των δακτυλίων που βρίσκονται παρόντες στο μόριο, οι εποξειδικές ρητίνες χωρίζονται σε διδραστικές (δύο οξιρανικοί δακτύλιοι), ή πολυδραστικές (τρεις ή περισσότεροι δακτύλιοι). Ο οξιρανικός δακτύλιος αντιδρά με ένα ευρύ φάσμα άλλων οργανικών ενώσεων. Για την ένωση δύο μορίων στα άκρα των οποίων υπάρχει η συγκεκριμένη ομάδα, απαιτείται ένα τρίτο μόριο που ουσιαστικά χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος, έτσι ώστε να ξεκινήσει η αντίδραση που οδηγεί στο σχηματισμό ενός τρισδιάστατου δικτύου. Το τρίτο αυτό μόριο ονομάζεται **σκληρυντής** και συνήθως είναι κάποιος διδραστικός ανυδρίτης ή αμίνη. Επίσης, χρησιμοποιούνταν και άλλες χημικές ουσίες που ονομάζονται εκκινητές, για να ξεκινήσει ομαλότερα η διαδικασία της αντίδρασης. Οι εποξειδικές ρητίνες που κυκλοφορούν στο εμπόριο αποτελούνται συνήθως από μίγματα μακρομορίων που φέρουν στα άκρα τους τον οξιρανικό δακτύλιο, περιέχουν αρωματικούς δακτυλίους και συνοδεύονται από συστήματα σκληρυντών και εκκινητών.

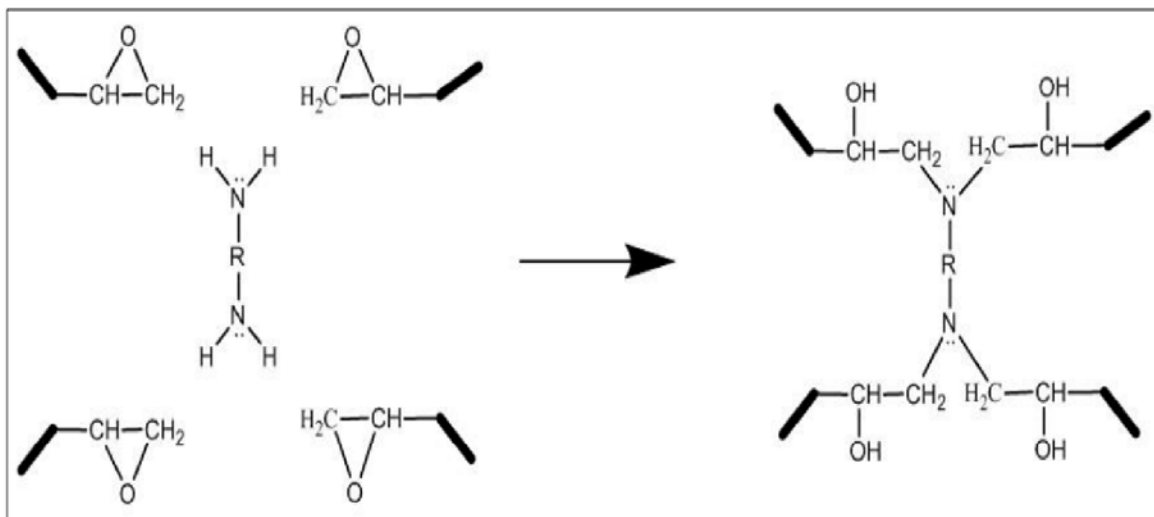
Στο **Σχήμα 1.2** φαίνεται ένα διδραστικό μακρομόριο και ένας εκκινητής (διαμίνη). Στα άκρα του μακρομορίου διακρίνονται οι δύο οξιρανικοί δακτύλιοι.





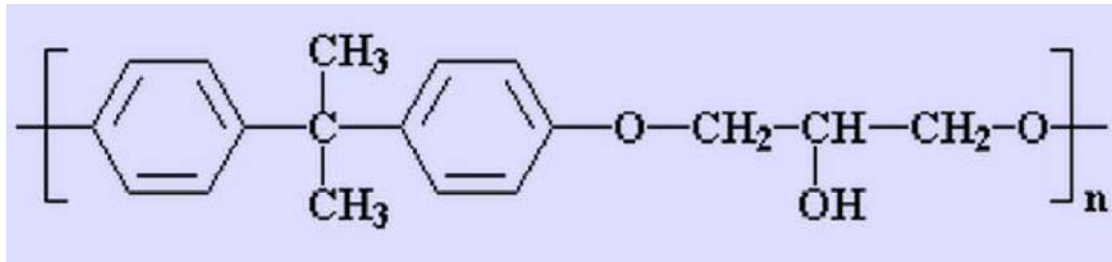
**Σχήμα 1.2:** Διδραστικό μόριο και εκκινητής (διαμίνη)

Στο **Σχήμα 1.3** παρουσιάζεται η αντίδραση της διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους των μακρομορίων.



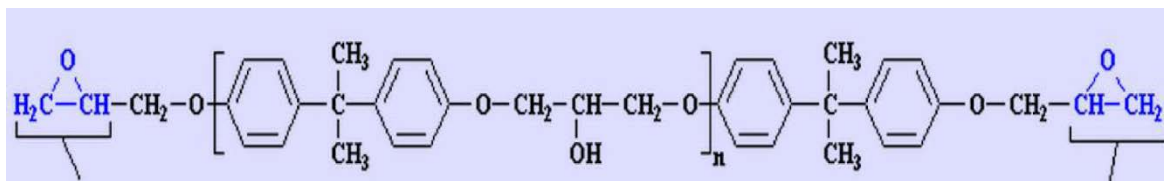
**Σχήμα 1.3:** Σχηματική αναπαράσταση αντίδρασης διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους μακρομορίων

**Εποξειδικό ή πολυεποξειδικό** είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο επόξυ-ομάδες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.4**.



**Σχήμα 1.4.** Δομή Εποξειδικής Ρητίνης

Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να είναι στερεές ή ρευστές. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι άκαμπτα, άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Μελετώντας την δομή των εποξειδικών ρητινών με κάποιο πρόσθετο, όπως σκληρυντή ή πλαστικοποιητή, με την βοήθεια ηλεκτρονικών μικροσκοπιών, παρατηρούμε ότι οι ρητίνες αποτελούνται από σχεδόν μικρού μεγέθους μακρομόρια τρισδιάστατα διακλαδωμένα δίκτυα ή συσσωματώματα, μέτριου μοριακού βάρους, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο από μόρια μικρού μοριακού βάρους. Στο **Σχήμα 1.5** παρουσιάζεται η μορφή μιας μη τροποποιημένης εποξειδικής ρητίνης.



**Εποξυ**

-

**ομάδα  
Εποξυ - ομάδα**

**Σχήμα 1.5.** Μορφή μη τροποποιημένης εποξειδικής ρητίνης

Βασικό χαρακτηριστικό της αντίδρασης πολυμερισμού είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται στο μίγμα της ρητίνης με τα διάφορα πρόσθετα. Με την έκλυση θερμότητας η αντίδραση πολυμερισμού χαρακτηρίζεται εξώθερμη. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες παρέχουν σκληρή και αμετάβλητη αντίσταση τριβής και πολύ καλή χημική αντίσταση.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σχέση με τις υγρές ρητίνες είναι η εύκολη επεξεργασία τους, η μηχανική αντοχή, η υψηλή χημική αντίσταση και το άριστο κολλώδες.

Ένας σημαντικός αριθμός εποξειδικών ρητινών είχε ως αποτέλεσμα το γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης και την ευρεία σε έκταση χρήση τους. Οι κυριότερες ιδιότητες των υγρών εποξειδικών ρητινών είναι οι παρακάτω:

- I. **Χαμηλή υδροσκοπικότητα**, καλή διαστατική σταθερότητα και ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση ύδατος, οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών. Είναι υγρά με **χαμηλό ιξώδες**, όπως και τα μίγματά τους με πρόσθετα (πλαστικοποιητές, σκληρυντές), με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία τους.
- II. Η επεξεργασία των ρητινών είναι εύκολη και γρήγορη για θερμοκρασίες από **50° C** μέχρι **1500° C** και εξαρτάται από την εκλογή του πρόσθετου.

- III. Υψηλές μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να οφείλονται στη μικρή συστολή τους (με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η παρουσία τάσεων).
- IV. Άριστη **ηλεκτρική μόνωση**.
- V. Υψηλή δύναμη συγκόλλησης (Στην σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί). Αυτή η ιδιότητα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τις πολλές εφαρμογές.
- VI. **Ποικιλία εφαρμογών**. Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής (Ανάμειξη με κάποιο πρόσθετο της επιλογής μας, χρήση τροποποιητικών και συνθέσεων).
- VII. Καλή **χημική αντίσταση** που εξαρτάται από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Συνολικά οι εποξειδικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή έως άριστη στα οξέα.
- VIII. **Μικρή συστολή** κατά τον πολυμερισμό και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτή η μικρή συστολή είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις εποξειδικές ρητίνες.  
Άλλες εποξειδικές ρητίνες είναι :
- I. Διγλυκοδιαιθέρας της διφαινόλης A (DGEBRA) ,
  - II. Τετραγλυκιδιαιθέρας της διανυλίνης (TGMDA) ,
  - III. Εποξειδική φαινολοκρεζολικής νεολάκης,
  - IV. Κυκλοαλειφατικές εποξειδικές (CA).

### 1.2.2 Παραγωγή και σκλήρυνση εποξειδικής ρητίνης

Οι συνηθέστερες εποξειδικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης A, όπου παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης A. Οι εποξειδικές ρητίνες τελικά μετατρέπονται σε θερμοσκληρυνόμενο προϊόν με την προσθήκη ενός “σκληρυντή” και μπορούν να πολυμερισθούν από ένα ευρύ φάσμα σκληρυντών. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογής, τον απαιτούμενο «χρόνο ζωής σε δοχείο» (pot life), τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην πράξη τα διάφορα συστήματα εποξειδικής ρητίνης-μέσων σκλήρυνσης τροποποιούνται συνήθως με διάφορα πρόσθετα, τα οποία μπορεί να είναι αδρανή ή δραστικά, δηλαδή να αντιδρούν με την επόξυ-ομάδα .

Υπάρχει μια μεγάλη ομάδα εταιρειών που αγοράζει πρώτες ύλες από τους κυρίως παραγωγούς και κατόπιν συνθέτουν (αναμιγνύουν, τροποποιούν) εποξειδικά συστήματα από αυτές τις πρώτες ύλες. Οι τροποποιήσεις αυτές μπορούν να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την εκτέλεση του έργου. Ευρύτερη εφαρμογή έχουν τα αραιωτικά και τα πληρωτικά υλικά .

Τα **αραιωτικά υλικά**, που μπορεί να είναι δραστικά ή αδρανή, μειώνουν το ιξώδες πολλών εμπορικών εποξειδικών ρητινών με πολύ μεγάλο ιξώδες. Τυπικό παράδειγμα δραστικού αραιωτικού αποτελεί ο φθαλικός διβουτυλεστέρας.

Τα **πληρωτικά υλικά** έχουν ως κύριο σκοπό να αυξήσουν το βάρος και τον όγκο του τελικού προϊόντος και μ’ αυτό τον τρόπο να μειωθεί το

κόστος. Συνήθως γίνεται διάκριση σε αγωγή και μη αγωγή πληρωτικά ανάλογα αν αυξάνουν ή όχι την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ρητίνης .

Οι εποξειδικές ρητίνες δεν είναι εύκαμπτα υλικά και ακόμα και με την προσθήκη μεγάλων συγκεντρώσεων πλαστικοποιητή δεν αποκτούν ιδιότητες που να προσεγγίζουν ιδιότητες συνηθισμένων ελαστομερών. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο προστίθενται οι **πλαστικοποιητές**, είναι η ελάττωση του έμφυτου εύθραυστου των εποξειδικών ρητινών. Το αποτέλεσμα της προσθήκης του πλαστικοποιητή είναι η αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσης.

### 1.3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΗΤΙΝΩΝ

Τα πολυμερή ανάλογα με την μορφή στην οποία διατίθενται για την περαιτέρω επεξεργασία τους διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Μεταξύ αυτών και οι **συνθετικές ρητίνες** .

**Συνθετικές ρητίνες** είναι ρητίνες χαμηλού μοριακού βάρους, ενδιάμεσα προϊόντα ή πρώτες ύλες από μακρομοριακές ενώσεις που ευρίσκονται στην υγρή κατάσταση ή είναι διαλυτά ή τηκόμενα στερεά και που λαμβάνουν την απαιτούμενη αντοχή για τις συγκεκριμένες εφαρμογές μόνο κατόπιν της κατάλληλης επεξεργασίας τους. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1) **Βασικές Ύλες** για βερνίκια, επιχρίσματα και κόλλες, φερόμενες με την μορφή διαλυμάτων και γαλακτωμάτων.

2) **Τεχνικές Ρητίνες** ως συνδετικά μέσα για ξύλινα αντικείμενα, δέρματα, τεχνητό λίθο και ενδιάμεσα προϊόντα για την κυρίως επεξεργασία των πολυμερών, ενώ συνήθως μαζί με τα πρόσθετα επεξεργάζονται προς μια «μάζα μορφώσεως», δηλαδή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των τελικών εμπορικών προϊόντων του πολυμερούς με μορφοποίηση υπό θέρμανση και πίεση.

Οι τεχνητές ρητίνες αποτελούνται από μία ευρεία συλλογή πολυμερών:

#### I. **Σκληρυνόμενες τεχνητές ρητίνες :**

A. **Θερμοσκληρυνόμενες Ρητίνες:** Σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού. Τέτοιες είναι οι *φαινολικές ή φαινοπλάστης* (phenolic), οι *εποξειδικές* (epoxy), οι *βινυλεστερικές* (vinylester) και οι *πολυεστερικές* (polyester) ρητίνες, οι οποίες αποτελούν και τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες. Αυτές αναμειγνυόμενες με φυτικές ρητίνες (κυρίως με κολοφώνιο), με λινέλαιο ή με τερεβινθέλαιο δίνουν πολλά είδη υλικών, τα οποία διαλύονται μόνο στα έλαια. Χρησιμοποιούνται στην παρασκευή βερνικιών και χρωμάτων, κυρίως σε εξωτερικές επιφάνειες, λόγω της αντοχής τους στις καιρικές συνθήκες και στην ταχεία ξήρανση.

B. **Μονομερείς Ρητίνες Χυτεύσεως :** πολυμεθακρυλικό μεθύλιο

#### II. **Ρητίνες για βερνίκια , μέσα διαποτίσεως, κόλλες κλπ :**

**A. Θερμοπλαστικές Ρητίνες:** Είναι διαλύματα πτητικών διαλυτών (20-60%) επίσης αραιές υδατικές διασπορές. Τέτοιες είναι το πολυχλωριούχο βινύλιο, πολυοξικό βινύλιο, πολυβινυλική αλκοόλη.

**B. Ρητίνες σκληρυνόμενες ως πλέγμα :** Τέτοιες είναι ρητίνες φορμόλης – ουρίας (αμινοπλάστες) , οι οποίες διαλύονται στο οινόπνευμα και στους υδρογονάνθρακες, οι ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες, οι εποξειδικές ρητίνες, η πολυουρεθάνη, γλυκεροφθαλικές ρητίνες. Τα παρασκευαζόμενα βερνίκια είναι άχρωμα και ανθεκτικά στο φως, αντέχουν στις καιρικές συνθήκες και ξεραίνονται ταχύτατα. Η σχηματιζόμενη μεμβράνη επί της χρωματιζόμενης επιφάνειας, έχει μεγάλη σκληρότητα, ενώ ακόμη ένα μεγάλο πλεονέκτημα της μεμβράνης είναι και το γεγονός ότι μπορεί να αποκτήσει πολύ μεγάλη αντοχή.

### 1.3.1. Εφαρμογές

Τα εποξειδικά βρίσκουν αξιόλογη χρήση σε εφαρμογές όπως:

#### **A. Χρώματα και επικαλυπτικά**

Η ευρύτερη εφαρμογή των εποξειδικών ρητινών γίνεται στον τομέα των επικαλυπτικών με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και αντοχή σε χημικά μέσα. Περιλαμβάνονται τα επικαλυπτικά σε μορφή σκόνης για πλυντήρια, στεγνωτήρια και άλλες ηλεκτρικές συσκευές κουζίνας. Τα επικαλυπτικά με βάση τα εποξειδικά σε σκόνη, που η συγκόλληση τους γίνεται με τήξη, χρησιμοποιούνται ευρέως για αντιδιαβρωτική προστασία χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ελαίων και αερίων, σε σωληνώσεις (χαλύβδινες) για τη μεταφορά πόσιμου νερού, σε ράβδους οπλισμού σκυροδέματος κλπ .

Εποξειδικά επικαλυπτικά χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως ως αστάρια για τη βελτίωση της πρόσφυσης των θαλασσιών χρωμάτων και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Μεταλλικά δοχεία κονσέρβας και άλλα δοχεία για τρόφιμα, όπως π.χ. τομάτες που είναι όξινες συνήθως επικαλύπτονται με εποξειδικά για να αποτραπεί η διάβρωση τους. Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται επίσης για δάπεδα υψηλών απαιτήσεων και για διακοσμητικά δάπεδα.

#### **B. Συγκολλητικά**

Τα εποξειδικά συγκολλητικά ανήκουν στα συγκολλητικά εκείνα που ονομάζονται «δομικά συγκολλητικά» (που περιλαμβάνουν επίσης πολυουρεθάνες, ακρυλικά, κυανοακρυλικά κλπ.). Τα υψηλών απαιτήσεων αυτά εποξειδικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροσκαφών, αυτοκινήτων, ποδηλάτων κλπ όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές πρόσφυσης.

Τα εποξειδικά συγκολλούν ξύλο, μέταλλο, γυαλί, πέτρα και κάποια πλαστικά. Μπορεί να είναι εύκαμπτα ή δύσκαμπτα, διαφανή ή αδιαφανή/έγχρωμα, σκληρυνόμενα γρήγορα ή πολύ αργά και είναι γενικώς

ασυγκρίτως καλύτερα από τα κοινά συγκολλητικά όσον αφορά την αντίστασή τους στη θερμότητα και στα χημικά.

### **C. Βιομηχανικά εργαλεία παραγωγής και σύνθετα υλικά**

Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλουπιών, μοντέλων, αντικολλητικών φύλλων, στη χύτευση και στη βιομηχανική παραγωγή βοηθημάτων.

Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή στοιχείων ενισχυμένων με ίνες ή από σύνθετα υλικά. Είναι πιο ακριβά από τις πολυεστερικές ρητίνες και τις ρητίνες από βινυλεστέρα, αλλά γενικώς παράγουν ισχυρότερα και πιο ανθεκτικά στη θερμοκρασία σύνθετα υλικά

### **D. Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα**

Οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, σε κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, στον εξοπλισμό διανομής μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων, στους μονωτήρες μετασχηματιστών και στους μονωτήρες. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι εξαιρετικοί ηλεκτρικοί μονωτές και προστατεύουν τα ηλεκτρικά στοιχεία από μικρά κυκλώματα, σκόνη και υγρασία .

### **E. Ναυτιλιακές εφαρμογές**

Τα εποξειδικά πωλούνται σε καταστήματα σιδηρικών, σε σετ δύο συστατικών. Μπορεί όμως να πωλούνται σε καταστήματα με ναυτιλιακά είδη για θαλάσσιες εφαρμογές. Τα εποξειδικά δεν χρησιμοποιούνται ως εξωτερική στρώση ενός σκάφους γιατί **επηρεάζονται από τις UV ακτίνες**. Συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την επισκευή και συναρμολόγηση σκαφών, και κατόπιν επικαλύπτονται από ένα πολυουρεθανικό χρώμα ή βερνίκι θαλάσσης που παρέχουν **UV προστασία**.

### **F. Αεροδιαστημικές εφαρμογές**

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται ως το υλικό της δομικής μήτρας το οποίο μετά ενισχύεται με ίνες, όπως υάλου, άνθρακος, Kevlar και βορίου. Επίσης χρησιμοποιούνται ως δομική κόλλα .

### **G. Ρητινενέσεις**

Η χρήση των εποξειδικών ρητινών είναι ιδιαίτερα αυξημένη στις επεμβάσεις κυρίως για την αποκατάσταση ρωγμών αλλά και για άλλες εφαρμογές. Η τεχνική της ρητινένεσης απαντάται κυρίως στον φέροντα οργανισμό κατασκευών από σκυρόδεμα και τις τοιχοποιίες. Στοχεύει στην επανάκτηση της αρχικής φέρουσας ικανότητας ρηγματομένων φορέων καθώς και της ακαμψίας τους. Συνιστάται για την προστασία κατά της διάβρωσης του οπλισμού, τη δημιουργία ανθεκτικής σύνδεσης τμημάτων σκυροδέματος και για τη στεγανοποίηση. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής έγχυσης εποξειδικών ρητινών είναι:

- I. Ως υλικό οι εποξειδικές ρητίνες έχουν αντοχή **5-10** φορές μεγαλύτερη από το σκυρόδεμα σε **θλίψη** και **2-6** φορές σε **εφελκυσμό**.
- II. Η πρόσφυση με το σκυρόδεμα και το χάλυβα είναι υψηλή.

- III. Παρουσιάζουν μικρή συστολή ξήρασης και μικρό βαθμό ερπυσμού.
  - IV. Έχουν μεγάλη συγκολλητική ικανότητα.
  - V. Είναι υλικό με χαμηλό ιξώδες, γεγονός που επιτρέπει την εισχώρηση σε όλο το βάθος της ρωγμής.
  - VI. Μικρή έως καθόλου μείωση της συνάφειας με τη πάροδο του χρόνου και εξαιρετική ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές προσβολές.
  - VII. Δεν παρουσιάζουν γήρανση.
  - VIII. Δεν επηρεάζουν τις διαστάσεις των στοιχείων προς εφαρμογή.
- Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τη κατάλληλη επιλογή εποξειδικής ρητίνης θα πρέπει να εκτιμηθούν οι ιδιότητες της ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία προορίζεται όπως το ιξώδες, το μέτρο ελαστικότητας και ο χρόνος πήξης. Στην **Εικόνα 1.1** φαίνεται η διαδικασία έγχυσης ενέματος εποξειδικής ρητίνης σε σκυρόδεμα.



**Εικόνα 1.1:** Έγχυση εποξειδικής ρητίνης

Οι ρητινενέσεις έχουν ευρεία εφαρμογή στην επισκευή σκυροδεμάτων, στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύονται κάποιες από αυτές τις περιπτώσεις.

#### **1.4 ΡΗΤΙΝΕΝΕΣΗ ΣΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Όταν η θερμοκρασία του σκυροδέματος που έχει εμφανίσει ρωγμές, κατά την διάρκεια της ρητινένεσης, είναι πολύ χαμηλή, το ιξώδες της εποξειδικής ρητίνης θα αυξηθεί. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού πραγματοποίησης της ρητινένεσης. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία του σκυροδέματος είναι μεγάλη, η ρητίνη θα πήξει πρόωρα (μικρός χρόνος εργασιμότητας) με επακόλουθο, την μη σωστή διείσδυση της στις ρωγμές. Γι' αυτούς τους λόγους θα πρέπει να προστατεύουμε την

επιφάνεια των ρωγμών, και όλο τον εξοπλισμό της ρητινένεσης από ακραίες θερμοκρασίες.

### **Γενικά, όσον αφορά τις ιδιότητες της ρητίνης, με την αύξηση της θερμοκρασίας:**

- I. Μειώνεται το ιξώδες.
- II. Μειώνεται ο χρόνος εργασιμότητας
- III. Μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας.
- IV. Μειώνονται οι αντοχές, κυρίως σε θερμοκρασίες πάνω από **50°C**.

**!!! Η ρητίνη καίγεται περίπου στους 250°C.**

### **Με την μείωση της θερμότητας:**

- I. Αυξάνεται το ιξώδες
- II. Αυξάνεται ο χρόνος εργασιμότητας.

Αν η ρητινένεση πρέπει να γίνει σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός θα πρέπει να εξεταστεί αν υπάρχει παγετός στις ρωγμές. Ο πάγος εμποδίζει την ανάπτυξη συνεκτικότητας μεταξύ σκυροδέματος και εποξειδικής ρητίνης, οπότε η ρητινένεση δεν θα είναι επιτυχημένη Έτσι, είναι σωστό να θερμαίνουμε την επιφάνεια πριν την διαδικασία. Η θέρμανση θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, αφού τυχόν υπερθέρμανση θα προκαλέσει το κλείσιμο των ρωγμών.

Επιπλέον, μετά το τέλος της ρητινένεσης οι ρωγμές θα ξανανοιξουν και η ρητίνη θα δεχτεί μεγάλες εφελκυστικές τάσεις, πριν αποκτήσει τις τελικές της αντοχές, με δυσμενή αποτελέσματα για την επιτυχία της επισκευής. Γενικά, πρέπει να επιλέγεται έμμεση θέρμανση των ρωγμών, θερμαίνοντας τον χώρο όπου βρίσκονται οι ρωγμές, παρά άμεση θέρμανση. Το ιδανικότερο είναι ο χώρος να θερμαίνεται λίγες ώρες πριν και λίγες ώρες μετά την ρητινένεση.

Σαν συμπέρασμα των παραπάνω, οι εποξειδικές ρητίνες χάνουν ευκολότερα τις ιδιότητες τους σε ακραίες θερμοκρασίες σε σχέση με το σκυρόδεμα ή τον χάλυβα. Γι' αυτό τα μέλη που επισκευάστηκαν θα πρέπει να προφυλάσσονται από ακραίες θερμοκρασίες, κυρίως από πυρκαγιά, σε όλη την διάρκεια της ζωής τους.

## **1.5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

### **1.5.1. Ορισμός**

Οι εποξειδικές ρητίνες είναι συνθετικές ρητίνες που παρασκευάζονται από την αντίδραση εποξειδίου (συνήθως επιχλωρυδρίνη) με μια ουσία που περιέχει υδροξύλιο, όπως η διφαινυλοπροπάνη (ή διάνη) ή μια πολυσθενής αλκοόλη (π.χ γλυκερόλη). Οι διανικές εποξειδικές ρητίνες έχουν τη μορφή είτε ιξωδών κίτρινων υγρών, με μοριακή μάζα **350-750**, διαλυτών σε ακετόνη και τολουόλη, είτε στερεών με χρώμα κίτρινο ή καστανό (μοριακή μάζα **800-3500**), που διαλύονται σε μείγμα τολουόλης



και βουτανόλης. Η κατεργασία των εποξειδικών ρητινών (στερεοποίηση) πραγματοποιείται σε συνθήκες συνθήκες και θερμοκρασίες είτε χαμηλές, (έως 15° C) είτε υψηλές (60-180° C), ανάλογα με τον τύπο του στερεοποιητή που χρησιμοποιείται (μπορεί να είναι πολυαμίνες, πολυβασικά οξέα, πολυσθενείς φαινόλες, κ.α). Οι στερεές ρητίνες έχουν μεγάλη μηχανική ανθεκτικότητα και αντοχή **στο νερό, στις υψηλές θερμοκρασίες και στα χημικά αντιδραστήρια**. Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται για την παρασκευή κολλητικών ουσιών μεγάλης αντοχής, ως στεγανοποιητικές ουσίες, καθώς και στη βιομηχανία εποξειδικών βερνικιών κ.α.

### 1.5.2. Φυσικές ιδιότητες

Η χρωματική γκάμα των εποξειδικών ρητινών ποικίλει από μια ανοιχτή κιτρινοπράσινη έως μια σκούρα κιτρινοκαφέ απόχρωση που εξαρτάται από την ηλικία τους. Αν έχει γίνει κακή ανάμιξη μπορεί να έχουν μια πορτοκαλή απόχρωση. Οι περισσότερες σύγχρονες εποξειδικές ρητίνες **έχουν αρχικά διαφανές χρώμα και με την πάροδο του χρόνου γίνονται σκούρες κίτρινες έως καφέ**. Γενικά είναι πολύ σκληρές και όχι εύθριπτες. Αν έχει γίνει κακή ανάμιξη μπορεί να είναι μαλακές και να χαράσσονται με το νύχι, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει την εντύπωση ότι πρόκειται για θερμοπλαστικές κόλλες. Τα καλύτερα διαλυτικά όταν έχει γίνει κακή ανάμιξη είναι ζεστό νερό, ασετόν, polystrippa, nitromors, desolve-x.

### 1.5.3. Χημικές ιδιότητες

Οι εποξειδικές ρητίνες είναι πλαστικά θερμοσκληρυνόμενα και παράγονται με αντιδράσεις ανάμεσα σε μονομερή ή πολυμερισμένα με δύο τουλάχιστον εποξειδικές ομάδες του τύπου και περιέχουν αμινομάδες ή όξινες ομάδες ή παράγωγά τους, τα οποία αντιδρώντας με τις εποξειδικές ομάδες σχηματίζουν διακλαδιζόμενους δεσμούς. Οι πιο γνωστοί σκληρυντές περιέχουν αμινομάδες και η αντίδραση ανάμεσα στην αμινομάδα του σκληρυντή και τις εποξειδικές ομάδες είναι πολύ εύκολη και πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, χωρίς παράλληλα να σχηματίζονται υποπροϊόντα. Οι συγκολλήσεις με εποξειδικές ρητίνες αντέχουν σε χημική προσβολή και άριστη στεγανότητα στην υγρασία, ηλεκτρική μόνωση και προστασία από την ηλεκτρολυτική διάβρωση.

### 1.5.4. Διαλυτότητα

Η διαλυτότητα των εποξειδικών ρητινών επηρεάζεται από το μέσο μοριακό βάρος τους και αυξάνεται καθώς το μοριακό βάρος μειώνεται. Τα διαλυτικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι κετόνες, οι εστέρες και οι αλκοόλες, ενώ σαν αραιωτικά η ακετόνη, το τολουόλιο, η βουτανόλη και η προπανόλη. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι αδιάλυτες στις αλκοόλες,

στους αλειφατικούς και αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Συνήθως, το καλύτερο διαλυτικό είναι ένα μείγμα από διάφορα διαλυτικά υλικά.

### **1.5.5. Ανθεκτικότητα**

Γενικά οι εποξειδικές ρητίνες έχουν μεγάλη αντίσταση στα οξέα, στις βάσεις, στους οργανικούς διαλύτες και στο νερό. Επηρεάζονται όμως από τις υπεριώδεις ακτίνες και η μακροχρόνια έκθεση των εποξειδικών ρητινών στις υπεριώδεις ακτίνες προκαλεί κιτρίνισμα, κρακελάρισμα και απολέπιση. Η ανθεκτικότητα στις υπεριώδεις είναι μεγαλύτερη στα προϊόντα που δεν έχουν αρωματικές ομάδες. Επίσης, οι εποξειδικές ρητίνες βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες της πέτρας, όπως αντίσταση σε συμπίεση, έλξη και κάμψη και παρουσιάζουν καλές συγκολλητικές ιδιότητες.

### **1.5.6 Ιξώδες**

Το ιξώδες της εποξειδικής ρητίνης παίζει σημαντικό ρόλο όταν χρησιμοποιείται για εμποτισμό του υλικού και με το χαμηλότερο δυνατό ιξώδες επιτυγχάνεται βαθύτερη εισχώρηση της ρητίνης μέσα στη μάζα. Όμως οι περισσότερες εποξειδικές ρητίνες έχουν αρκετά μεγάλο ιξώδες, δηλαδή μικρή ρευστότητα και επομένως διεισδύουν με δυσκολία στο εσωτερικό της πορώδους δομής.

Όταν χρησιμοποιούνται σαν διαλυτικά κετόνες και αρωματικοί υδρογονάνθρακες, δεν επιτρέπεται πλήρης αλληλοσύνδεση των μορίων. Το καλύτερο διαλυτικό, όπου παράλληλα ελέγχεται και ο χρόνος αντίδρασης πολυμερισμού της ρητίνης είναι μίγμα τολουολίου και μεθανόλης. Ο εμποτισμός της πέτρας π.χ με τη μέθοδο αυτή, μειώνει το πορώδες της, χρήση διαλύματος **10%** εποξειδικής ρητίνης για στερέωση σε ψαμμίτη και ασβεστόλιθο έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους κατά **9.6%** και **22.8%** αντίστοιχα. Εξάλλου διάλυμα **20%** έχει λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα αφού η μείωση του πορώδους είναι **9.17%** και **14%** αντίστοιχα.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι η ταχύτητα κίνησης της ρητίνης μέσα στους τριχοειδείς πόρους της πέτρας αυξάνει κατά **40%**, όταν η πέτρα έχει προηγουμένως εμποτιστεί με το διαλυτικό της ρητίνης.

### **1.5.7. Ιστορικό χρήσης εποξειδικών ρητινών**

Οι εποξειδικές ρητίνες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη συντήρηση όταν τη δεκαετία του 1960 χρειάστηκε να γίνουν μεγάλης κλίμακας επεμβάσεις στα μνημεία που η περιοχή τους κατακλύστηκε από τεχνητή λίμνη του φράγματος του Assuan στην Αίγυπτο, τεράστια μνημεία χρειάστηκε να κοπούν σε κομμάτια και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν σε άλλη θέση. Η συγκόλληση των κομματιών έγινε με εποξειδικές ρητίνες, επειδή κατά την εποχή εκείνη ήταν το καλύτερο υλικό που είχε στη διάθεση της η τεχνολογία. Το γεγονός όμως ότι οι εποξειδικές ρητίνες είναι υλικά μη αναστρέψιμα αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα.

## **1.6 ΧΡΗΣΕΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

### 1.6.1 Περιπτώσεις χρήσης εποξειδικών ρητινών

Στην Ιταλία έχουν χρησιμοποιηθεί δυο περιπτώσεις εποξειδικών ρητινών: Στην πρώτη περίπτωση, υπήρξε αρνητικό αποτέλεσμα γιατί μετά από ένα χρόνο, το πολυμερές που παρέμεινε στην εξωτερική επιφάνεια παρουσίασε μεταβολές στο χρώμα, θρυμματιζόταν και απολεπιζόταν. Στην δεύτερη περίπτωση η κατάσταση του συντετριμμένου μαρμάρου ήταν ικανοποιητική.

Περισσότερο εκτεταμένη, μέχρι σήμερα, είναι η χρήση εποξειδικών, σαν συνδετικά διαφόρων κονιαμάτων ή σαν δομικά συγκολλητικά για επανασύνδεση αποκολλημένων μερών. Για τέτοιου είδους εφαρμογές χρησιμοποιούνται εποξειδικά προϊόντα αναμιγμένα με σιλικονικές ρητίνες.

### 1.6.2. Άλλες χρήσης

Οι εποξειδικές κόλλες μπορούν να κολλήσουν ένα μεγάλο πλήθος υλικών, ιδίως μέταλλα. Χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν παραδοσιακές μεθόδους ένωσης των μετάλλων όπως την συγκόλληση, τις μεταλλικές κολλήσεις.

Είναι κόλλες κατάλληλες για κολλήσεις όλων σχεδόν των υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, ξύλο, ελαστικό εκτός από ορισμένα πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο. Επίσης κολλούν μη πορώδη υλικά επειδή στερεοποιούνται χωρίς συρρίκνωση και χωρίς να παράγουν αέρια ή υγρά παραπροϊόντα.

## 1.7 ΤΡΟΠΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ

Για να χρησιμοποιηθεί η κάθε κόλλα πρέπει να γίνει καταγραφή και έλεγχος των παρακάτω χαρακτηριστικών της :

- I. Τρόπος παρασκευής
- II. Τρόπος εφαρμογής
- III. Χρώμα μετά τη στερεοποίηση
- IV. Ιξώδες
- V. Χρόνος σκλήρυνσης
- VI. Αποτελεσματικότητα συναρτήσεως του χρόνου
- VII. Πρόσφυση
- VIII. Επίδραση των υπεριωδών ακτινών
- IX. Επίδραση της θερμοκρασίας
- X. Επίδραση της υγρασίας
- XI. Αντιστρεψιμότητα
- XII. Δείκτης διάθλασης

### 1.7.1 Συσκευασία των εποξειδικών συγκολλητικών μέσων

Οι εποξειδικές κόλλες πρέπει να συσκευάζονται από τον προμηθευτή σε δύο διαφορετικά και διακεκριμένου τύπου δοχεία. Ένα για την εποξειδική ρητίνη (**συστατικό Α**) και ένα για τον σκληρυντή (**συστατικό Β**). Τα συστατικά **Α** και **Β** πρέπει να έχουν τέτοια αναλογία ώστε να

σχηματίζουν μίγμα καθορισμένου βάρους συγκολλητικού υλικού. Επιπλέον, τα συστατικά **A** και **B** πρέπει να είναι εμφανώς αντίθετου χρώματος.

### 1.7.2. Αποθήκευση εποξειδικών ρητινών

Τα συσκευασμένα συστατικά **A** και **B** πρέπει να αποθηκεύονται σε θέση με θερμοκρασία μεταξύ **10° C** και **20° C** και κατά τις οδηγίες του εργοστασίου παραγωγής. Μετά από αποθήκευση τριών μηνών το συστατικό **A** ( **η εποξειδική ρητίνη** ) πρέπει να ελέγχεται έναντι κρυσταλλώσεως. Ο έλεγχος της εποξειδικής ρητίνης πρέπει να γίνεται οπτικά σε τρεις μέρες πριν την χρησιμοποίηση της και αν υπάρχουν δείγματα κρυσταλλώσεως τότε δεν επιτρέπεται η χρησιμοποίηση της. Επίσης, επειδή οι εποξειδικές ρητίνες επηρεάζονται από τον ήλιο θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατή η μακροχρόνια αποθήκευση τους.

## 1.8 ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Μερικές από τις σημαντικότερες εφαρμογές των εποξειδικών ρητινών αναφέρονται πιο κάτω:

- I. Στην κατασκευή κτιρίων και αυτοκινητοδρόμων και γενικά σε κατασκευές όπου υπάρχουν απαιτήσεις για υψηλή χημική αντίσταση.
- II. Σαν βασικό συγκολλητικό σκυροδέματος.
- III. Σαν συγκολλητικά σε δομικά μέρη της ατράκτου αεροσκαφών.
- IV. Σαν συγκολλητικό πλαστικών και μεταλλικών κομματιών σε βάρκες και αυτοκίνητα, ώστε να υπάρχει τέλεια στεγανότητα.
- V. Σαν φυλλώδεις ρητίνες για την κατασκευή πλαισίων και τελειωμάτων αεροσκαφών και πυραύλων.
- VI. Ως διαλύματα επίστρωσης που έχουν βασικό συστατικό την ρητίνη και είναι πολύ χρήσιμα για την συντήρηση και την κατασκευή τελειωμάτων, όπως τελειώματα θαλάσσιας υφής, τελειώματα λιθοδομής ή τελειώματα αεροσκαφών. Επίσης χρησιμοποιούνται για επαλείψεις κατασκευαστικού χάλυβα, επαλείψεις δεξαμενών, επαλείψεις πτυσσόμενων αγωγών και για επαλείψεις σε πλάκες από σκυρόδεμα.
- VII. Στην κατασκευή τριχών για πινέλα.
- VIII. Συστήματα έποξυ-ρητινών χρησιμοποιούνται σαν συγκολλητικά, επικαλυπτικά και σαν μέσα ενσωμάτωσης ηλεκτρικών εξαρτημάτων.
- IX. Τυπικές εφαρμογές χυτών έποξυ-ρητινών αποτελούν οι κατασκευές ανθεκτικών σε χημικά αντλιών και σωλήνων, μήτρων καθώς και ηλεκτρικών μονωτικών ειδών.

Μειονέκτημα των έποξυ-ρητινών αποτελεί το υψηλό τους κόστος. Επίσης ειδικές χρήσεις για εποξειδικές ρητίνες, **100 %** χωρίς διαλύτες, για τη συγκόλληση με ενέσεις μικρορωγμών και μικρών κενών σε σκυρόδεμα. Έχοντας κατάλληλη σύνθεση μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας όσο και μεγάλης υγρασίας. Εξασφαλίζουν πρόσφυση σε ξηρές και υγρές επιφάνειες και **στερεοποιούνται ακόμη και κάτω από την επιφάνεια ύδατος!** Η πρόσφυση εξασφαλίζεται πάνω

σε γνωστά δομικά υλικά όπως σκυρόδεμα, μέταλλα, μάρμαρα, πέτρα, ξύλα κτλ. Συνδυάζουν υψηλή αντοχή, δεν χάνουν όγκο κατά την σκλήρυνση και δεν γίνονται εύθραυστες. Είναι απόλυτα μη διαβρωτικές και είναι κατάλληλες για χρήση σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή δομικό χάλυβα. Επίσης υπάρχουν ρητίνες δύο συστατικών για επαλείψεις επιφανειών (υγρών και στερεών). Η ξηρή μεμβράνη που σχηματίζουν έχει πυρανασχετικές ιδιότητες και έτσι δεν επιτρέπουν την εξάπλωση της φωτιάς. Οι ρητίνες αυτές προορίζονται για υγρομόνωση, για προστασία και διακόσμηση δαπέδων, τοίχων και ορόφων σε οικοδομικούς, βιομηχανικούς, αγροτικούς κ.α. χώρους.

X. Εφαρμόζονται σε επιφάνειες σκυροδέματος, τσιμεντοκονιάματος, πέτρας, σοβάδων, τούβλων, γύψου, αμιαντοτσιμέντου, ασφάλτου κ.α.

XI. Για την σύνδεση παλιού και νέου σκυροδέματος κυρίως σε υγρούς χώρους.

XII. Για την προστασία κτιρίων από την διάβρωση και τη διείσδυση υγρασίας.

XIII. Για την υγρομόνωση υπογείων χώρων και παταριών, δαπέδων πριν από την επίστρωσή τους με πλακάκια, μοκέτα κ.α. Επίσης για την υγρομόνωση πωινών και δεξαμενών.

### 1.9 ΥΔΑΤΟΔΙΑΛΥΤΗ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ

Κάποιες από τις εποξειδικές ρητίνες έχουν την δυνατότητα να διαλύονται στο νερό με συνέπεια την παραγωγή ενεμάτων πολύ χαμηλότερου κόστους. Η διαλυτοποίηση αυτή έχει βέβαια ως αρνητικό επακόλουθο την μείωση των αντοχών, η οποία και είναι ανάλογη με την ποσότητα νερού που αναμιγνύεται. Διάφορα υλικά χρησιμοποιούνται στις χημικές ενέσεις ανάλογα με τον σκοπό που αυτές γίνονται και τις ιδιότητες του εδάφους. Τα κυριότερα είναι πυριτικό νάτριο, ακρυλαμίδες, ουρεθάνη και ρητίνες. Συγκεκριμένα, μία από τις κυριότερες κατηγορίες χημικών διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται είναι αυτή των εποξειδικών ρητινών. Οι εποξειδικές ρητίνες γενικά απαρτίζονται από δύο συστατικά, την εποξειδική ρητίνη (**συστατικό Α**) και το σκληρυντή της (**συστατικό Β**). Το τελικό προϊόν το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη των δύο συστατικών χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή και πρόσφυση, ανθεκτικότητα, αδιαβρωσιμότητα από οξέα, αλκάλια και οργανικές ουσίες και χαμηλή συρρίκνωση. Παρόλο που έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα όσον αφορά τη χρήση εποξειδικών ενεμάτων προς αποκατάσταση κατασκευαστικών ζημιών ή προς ενίσχυση της αντοχής ρηγματωμένου σκυροδέματος (Issa & Debs, 2007), δεν έχει υπάρξει κάποια δημοσιευμένη έρευνα σχετική με την εφαρμογή και αποτελεσματικότητα αυτής της κατηγορίας ενεμάτων στην ενίσχυση του εδάφους ή της βραχώμαζας και ειδικότερα των χαμηλού κόστους υδατοδιαλυτών εποξειδικών ενεμάτων.

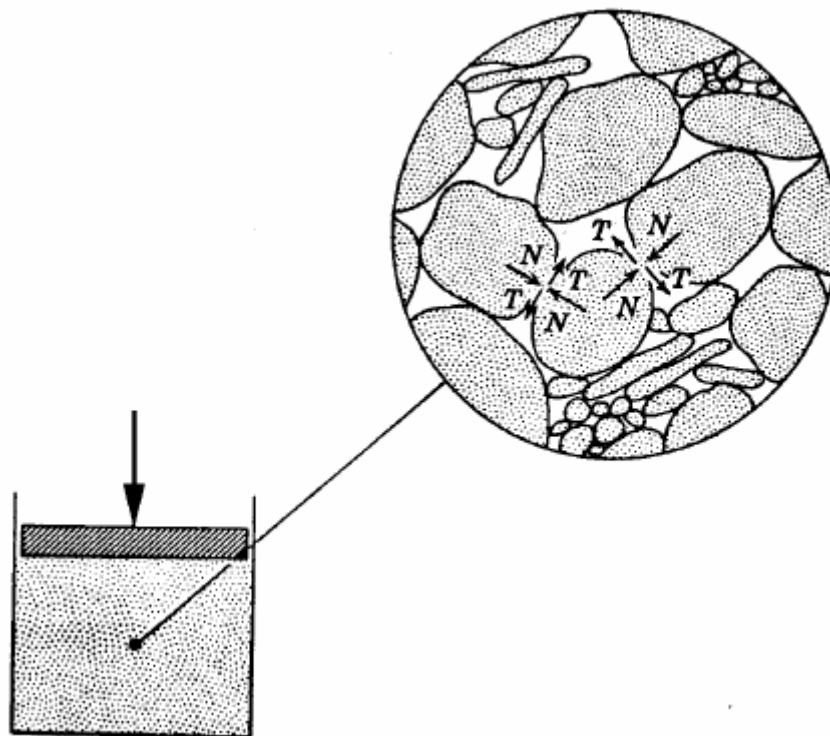
## 2.1. ΕΙΔΗ ΕΔΑΦΩΝ

### 2.1.1. Γενικά

Το έδαφος, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.1**, είναι ένα μή-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ των οποίων (πόροι) περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή/και αέρια (συνήθως αέρα). Τα εδαφικά υλικά προέρχονται από τη μηχανική ή/και χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Η μηχανική αποσάθρωση οφείλεται σε παράγοντες, όπως ο παγετός, οι συνεχείς θερμοκρασιακές μεταβολές, η διάβρωση από το νερό και τον αέρα, οι λειτουργίες φυτών, ζώων και του ανθρώπου, και οδηγεί σε κατατεμαχισμό και θρυμματισμό των βράχων. Αντίστοιχα, η χημική αποσάθρωση προκαλεί την αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών. Γενικά, η χημική αποσάθρωση είναι ο κυριότερος παράγων γένεσης λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (ιλύων και αργίλων), ενώ η μηχανική αποσάθρωση συντελεί κυρίως στη δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών (χαλικών και άμμων), χωρίς όμως να αποκλείεται και η μερική συμμετοχή της εναλλακτικής μεθόδου αποσάθρωσης στη γένεση εδαφικών σχηματισμών κάθε τύπου.

Η μεταφορά και απόθεση των ιζηματογενών εδαφικών σχηματισμών με το νερό οδηγεί στο διαχωρισμό τους κατά μέγεθος κόκκων. Έτσι, χονδρόκοκκα ιζήματα (χάλικες και άμμοι) αποτίθενται συνήθως στις κοίτες των ποταμών και σε περιοχές κοντά στις εκβολές τους. Αντίθετα, τα λεπτόκοκκα ιζήματα (ιλείς και άργιλοι) μεταφέρονται αιωρούμενα σε μεγάλες αποστάσεις και αποτίθενται με αργό ρυθμό στον πυθμένα των θαλασσών και λιμνών μακριά από τις εκβολές των ποταμών, σχηματίζοντας οριζόντιες ή περίπου οριζόντιες στρώσεις. Αρκετά συνηθισμένη είναι και η διαδοχική απόθεση στρώσεων χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων στην ίδια περιοχή, που οφείλεται είτε σε τεκτονικές κινήσεις του γήινου φλοιού (που συχνά μετατρέπουν κοίτες ποταμών σε πυθμένες ωκεανών και το αντίθετο) είτε στη διαδοχή περιόδων έντονων βροχοπτώσεων και

απορροών (που οδηγούν στην απόθεση χονδροκλαστικών κυρίως ιζημάτων) με ήπιες περιόδους (που οδηγούν στην απόθεση λεπτόκοκκων εδαφών). Ανεξάρτητα από τον τρόπο γένεσης, μεταφοράς και απόθεσης των εδαφών, η διάταξη των κόκκων τους δημιουργεί κενά (πόρους) τα οποία, κατά την ιζηματογένεση στους πυθμένες των θαλασσών, επληρούντο με νερό.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της δομής του κόκκου του εδάφους.

Στο μακρό χρονικό διάστημα, όμως, που μεσολάβησε από την ιζηματογένεση πολλοί εδαφικοί σχηματισμοί βρέθηκαν τελικά πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και το νερό των πόρων αντικαταστάθηκε μερικά ή ολικά από αέρα. Έτσι, σήμερα, τα περισσότερα εδάφη περιέχουν στους πόρους τους και νερό και αέρα.

### 2.1.2 Χονδροκόκκα και λεπτόκοκκα εδάφη

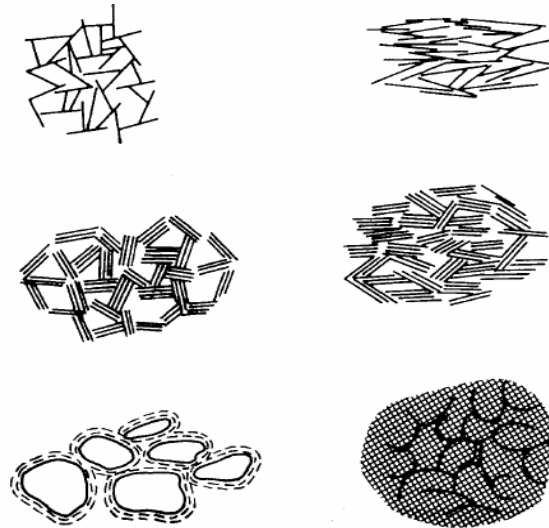
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα ιζηματογενή εδάφη, που αποτελούν το σύνολο σχεδόν των εδαφικών σχηματισμών, διακρίνονται σε **χονδροκόκκα** (χάλικες και άμμοι) και **λεπτόκοκκα** (ιλείς και άργιλοι).

Αναφέρθηκε, επίσης, ότι τα χονδρόκοκκα ιζήματα προέρχονται κυρίως από τη μηχανική αποσάθρωση των βράχων, ενώ τα λεπτόκοκκα ιζήματα από τη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Οι διαφορές μεταξύ των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων εκτείνονται και πέραν του τρόπου γένεσής τους.

Ειδικότερα, το μέγεθος των κόκκων τους διαφέρει σημαντικά: εδάφη με κόκκους **μεγαλύτερους από 2 mm** ανήκουν στην κατηγορία των **χαλικών**, οι **άμμοι** έχουν κόκκους με διαστάσεις **από 2mm έως 0.06 mm** (η διάσταση αυτή είναι περίπου ίση με το μικρότερο μέγεθος κόκκου που είναι ορατός δια γυμνού οφθαλμού), οι **ιλεις** έχουν κόκκους **από 0.06 mm έως 0.002 mm** και, τέλος, οι **αργίλοι** έχουν κόκκους με μέγεθος **μικρότερο από 0.002 mm**.

Οι κόκκοι των άμμων και των χαλικιών είναι γενικά σφαιροειδείς, με την έννοια ότι η μέγιστη και η ελάχιστη διάσταση του κόκκου δεν διαφέρουν σημαντικά: ακόμη και στην περίπτωση πολύ πεπλατυσμένων κόκκων, ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση δεν υπερβαίνει συνήθως το **πέντε (5)**. Η μορφή της επιφάνειας των κόκκων ποικίλλει και κυμαίνεται μεταξύ **λειας** (στην περίπτωση εδαφών που η επιφάνεια των κόκκων τους έχει λειανθεί από τη διάβρωση) και **γωνιώδους** (στην περίπτωση πρόσφατων κλαστικών ιζημάτων). Η διάταξη των κόκκων των χονδρόκοκκων εδαφών καθορίζεται από το βάρος, τις διαστάσεις, τη μορφή της επιφάνειας και τις μηχανικές δυνάμεις επαφής που ασκούνται μεταξύ των κόκκων. Η μηχανική αυτή διάταξη των κόκκων δημιουργεί μια δομή (**εδαφικός σκελετός**) με πυκνότητα που κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής (πολύ χαλαρή δομή) και μιας μέγιστης τιμής (πολύ πυκνή δομή). Πάντως, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης πυκνότητας δεν είναι σημαντική, επειδή σε όλες τις περιπτώσεις οι κόκκοι βρίσκονται σε επαφή. Σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα εδάφη, οι κόκκοι των λεπτόκοκκων εδαφών είναι πολύ πεπλατυσμένοι και έχουν τη μορφή πλακιδίων (αργιλικά πλακίδια) με μικρό πάχος που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μόνιό τους. Στο **Σχήμα 3.2** απεικονίζεται η διάταξη των αργιλικών πλακιδίων.

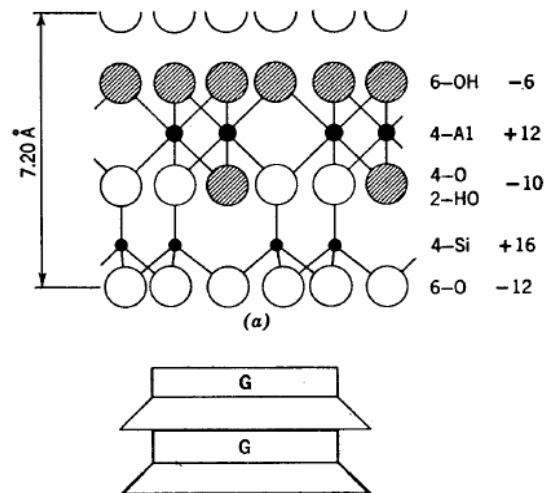




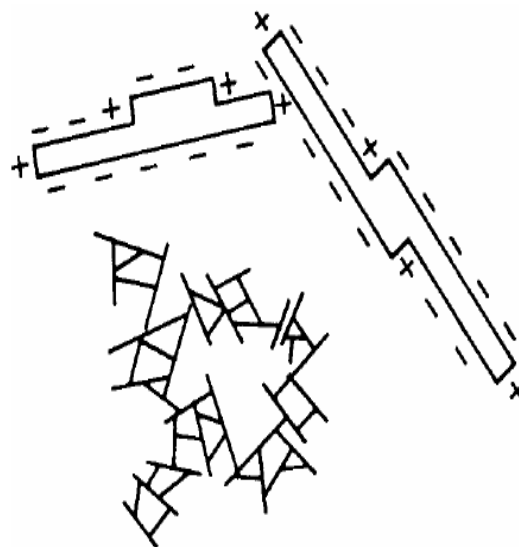
**Σχήμα 3.2:** Διάταξη (δομή) αργιλικών πλακιδίων.

Αντίθετα, στις άλλες δύο διαστάσεις ο κρύσταλλος των αργιλικών πλακιδίων αναπτύσσεται κανονικά με τη διάταξη μεγάλου αριθμού μορίων. Το **Σχήμα 3.3** παρουσιάζει τη δομή του πλακιδίου του **καολίνης**, ενός αργιλικού ορυκτού με πάχος πλακιδίου περί τα **0.1  $\mu\text{m}$**  ( $1 \mu\text{m} = 0.001 \text{mm}$ ) και μεγάλη διάσταση (διάμετρο) **0.3-1  $\mu\text{m}$** , που έχει δηλαδή λόγο διαμέτρου προς πάχος ίσο με **3-10**. Ο καολίνης είναι ένα από τα αργιλικά ορυκτά με μικρό λόγο διαμέτρου προς πάχος, δηλαδή ένα από τα ολιγότερο ενεργά αργιλικά ορυκτά. Άλλα περισσότερο ενεργά αργιλικά ορυκτά είναι ο **ιλλίτης**, με λόγο διαμέτρου προς πάχος του πλακιδίου ίσο με **10-30**, και ο **μοντμοριλλονίτης**, με αντίστοιχο λόγο διαμέτρου προς πάχος περί το **100**. Λόγω των ιδιαίτερα μικρών διαστάσεων και της πλακοειδούς μορφής των αργιλικών ορυκτών, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πλακιδίων διέπεται και από άλλες δυνάμεις πέραν της βαρύτητας και της τριβής μεταξύ των πλακιδίων. Ειδικότερα, η επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων είναι ηλεκτρικά φορτισμένη, η άνω και κάτω (μεγάλες) επιφάνειες φέρουν αρνητικά φορτία, και η περιφέρεια (το πάχος) φέρει ίσα και αντίθετα θετικά φορτία (βλέπε **Σχήμα 3.4**). Οι επιφανειακές ηλεκτρικές δυνάμεις έλξης και άπωσης, που πρακτικά δεν εμφανίζονται στα χονδρόκοκκα εδάφη, κυριαρχούν στα λεπτόκοκκα εδάφη, επειδή η έντασή τους είναι αρκετές τάξεις μεγέθους ισχυρότερη από τις δυνάμεις βαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα,

ο λόγος των ηλεκτρικών δυνάμεων (που είναι ανάλογες της επιφάνειας) προς τις δυνάμεις βαρύτητας (που είναι ανάλογες της μάζας) εξαρτάται από την **ειδική επιφάνεια**,



**Σχήμα 3.3:** Η δομή του αργιλικού ορυκτού Καολίνη.



**Σχήμα 3.4:** Ηλεκτρικά φορτία στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων.

δηλαδή το λόγο της επιφάνειας προς τη μάζα του πλακιδίου. Η ειδική επιφάνεια ενός σφαιρικού κόκκου μεσόκοκκης άμμου είναι **2.3 m<sup>2</sup>/kg**, ενώ

η ειδική επιφάνεια του Καολίνη είναι **15000 m<sup>2</sup>/kg** και του Μοντμοριλλονίτη **800.000 m<sup>2</sup>/kg**. Η μεγάλη διαφορά στην ειδική επιφάνεια των κόκκων μεταξύ των χονδρόκοκκων (αμμωδών) και των λεπτόκοκκων (αργιλικών) εδαφών καθορίζει την τελείως διαφορετική δομή τους και, κατ' επέκταση, τις διαφορές της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Τα λεπτόκοκκα εδάφη ονομάζονται επίσης και **συνεκτικά**, επειδή παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους (που οφείλεται στις ηλεκτρικές έλξεις μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων). Αντίστοιχα, τα χονδρόκοκκα εδάφη ονομάζονται και **μῆ-συνεκτικά**, επειδή δεν παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους.

### 2.1.3. Γενικές κατηγορίες εδαφών

Μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής γενικές κατηγορίες εδαφών:

**Άμμος και χάλικες** (*sand & gravel*): εδάφη χωρίς συνοχή που αποτελούνται από στρογγυλεμένα, γωνιώδη ή υπογωνιώδη θραύσματα πετρωμάτων ή ορυκτών. Σωματίδια μεγέθους **μικρότερου των 2mm** χαρακτηρίζονται σαν άμμος, **2mm-75mm** χαρακτηρίζονται σαν χάλικες και **από 7,5 cm και πάνω** χαρακτηρίζονται σαν κροκάλες.

**Ανόργανος ιλύς** (*silt*): λεπτόκοκκο έδαφος με μικρή ή μηδενική πλαστικότητα. Οι λιγότερο πλαστικές ποικιλίες αποτελούνται από κόκκους ομοιόμορφους (ίσης περίπου διαμέτρου) χαλαζία και αναφέρονται συχνά με την ονομασία «**παιπάλη**». Οι τύποι της ιλύος με μεγαλύτερη πλαστικότητα περιλαμβάνουν αξιόλογο ποσοστό λεπτών πλακοειδών σωματιδίων και χαρακτηρίζονται σαν **Πλαστική ιλύς**. Λόγω της λείας υφής της η ανόργανη ιλύς εκλαμβάνεται συχνά σαν άργιλος αλλά αυτό μπορεί εύκολα να αποφευχθεί χωρίς εργαστηριακές δοκιμές με απλές πρακτικές μεθόδους. Η ιλύς είναι σχετικά αδιαπέρατη. Όταν όμως βρίσκεται σε χαλαρή κατάσταση μπορεί να ανυψωθεί σε γεωτρητική οπή ή σε ερευνητικό φρέαρ σαν ιξώδες ρευστό.

**Οργανική ιλύς** (*organic silt*) : είναι λεπτόκοκκο και πλαστικό έδαφος, με προσμίξεις λεπτών σωματιδίων οργανικής ύλης. Είναι δυνατό

επίσης να περιλαμβάνει όστρακα καθώς και ορατά τεμάχια φυσικών ουσιών σε αποσύνθεση. Το χρώμα του εδάφους αυτού κυμαίνεται από ανοικτό μέχρι σκούρο φαιό. Η διαπερατότητα της οργανικής ιλύος είναι πολύ μικρή και η συμπιεστότητα της πολύ μεγάλη.

**Άργιλος (clay)** : λεπτόκοκκο υλικό που αποτελείται από σωματίδια ορατά ή μη με το μικροσκόπιο που προέρχονται από την αποσύνθεση των συστατικών των πετρωμάτων. Είναι πλαστική για μέση έως μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό. Τα ξηρά δείγματα είναι πολύ σκληρά και δεν αποβάλλουν σκόνη όταν η επιφάνεια τους τρίβεται με τα δάκτυλα. Η διαπερατότητα της αργίλου είναι πολύ μικρή.

**Οργανική άργιλος (organic clay)** : η οργανική άργιλος οφείλει μερικές από τις πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες της στην παρουσία λεπτά καταμερισμένων οργανικών υλών. Όταν είναι κορεσμένη έχει μεγάλη συμπιεστότητα, σε ξηρή όμως κατάσταση εμφανίζει σημαντική αντοχή. Το χρώμα της είναι συνήθως βαθύ φαιό ή μαύρο. Η οργανική άργιλος είναι δυνατό να έχει ευδιάκριτη χαρακτηριστική οσμή.

**Τύρφη (peat)** : η τύρφη αποτελείται από ινώδεις συμπλέγματα μακροσκοπικά ή μικροσκοπικά ορατών σωματιδίων, από οργανική ύλη σε αποσύνθεση. Το χρώμα της κυμαίνεται από ανοικτό καστανό μέχρι μαύρο. Η τύρφη είναι τόσο πολύ συμπιεστή, ώστε να αποτελεί σχεδόν πάντοτε ακατάλληλη στρώση για την έδραση θεμελίων.

#### **2.1.4. Χονδρά και λεπτά κλάσματα**

Η στερεή φάση του εδάφους είναι κατά κύριο λόγο θρυμματισμένα τεμάχια βράχου. Μερικά από τα σωματίδια αυτά διακρίνονται με γυμνό μάτι, δηλαδή μακροσκοπικά, ενώ άλλα φαίνονται μόνο με το μικροσκόπιο. Τα μακροσκοπικά σωματίδια περιγράφονται σαν χονδρά κλάσματα και τα μικροσκοπικά σωματίδια περιγράφονται σαν λεπτά κλάσματα. Στη διαδικασία της αποσύνθεσης της βραχώδους μάζας, μερικά ορυκτά διατηρούν τα μακροσκοπικά τους μεγέθη ενώ άλλα παίρνουν το μικροσκοπικό τους μέγεθος. Η δοκιμή κοκκομετρικής ανάλυσης διαχωρίζει

τα χονδρά και τα λεπτά κλάσματα σαν συγκρατούμενα ή διερχόμενα από το κόσκινο Νο 200.

## 2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

### 2.2.1. Περίληψη - ιστορικά στοιχεία

Η ιδέα της βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους, με την ανάμειξη υλικών (τοιμέντου, ασβέστου, πολυμερών υλικών κλπ.) ή την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (πασσάλων, διαφραγμάτων, γεωφασμάτων, ηλώσεων κλπ.) άρχισε να εφαρμόζεται από αρχαιοτάτων χρόνων, από την περίοδο των Αιγυπτίων, Σουμερίων, Ασσυρίων, Ελλήνων, Κινέζων, Αράβων και Ρωμαίων. Η χρήση της υδρασβέστου στη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους ήταν γνωστή στους Κινέζους, πριν 3000 έτη, για βελτίωση των δρόμων. Την ίδια χρονική περίοδο επίσης οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν ξύλο η bamboo για την ενίσχυση του εδάφους, μεθόδους που χρησιμοποιούν ακόμη και σήμερα για την δημιουργία φραγμάτων για προστασία του περιβάλλοντος από λασποροές. Οι αρχαίοι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ηφαιστειακή τέφρα, (ποζολάνες – ο όρος Pozzolan προέρχεται από το χωριό Pozzuoli της Ιταλίας), για διάφορες κατασκευές όπως η Απία Οδός, το Κολοσσαίο, το Πάνθεον. Στη Μεσοποταμία οι κάτοικοι χρησιμοποιούσαν άσφαλο αναμεμιγμένη με αμμώδες έδαφος για κατασκευές δρόμων, από το 3200 π.χ., (Asphalt Institute, 1965). Η πρώτη σύγχρονη κατασκευή με ασφαλτικό υλικό επικάλυψης σημειώθηκε το 1802 στη Γαλλία. Το τοιμέντο Portland ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο Joseph Aspdin. Η ονομασία του συνδέθηκε με το χρώμα του που ήταν όμοιο με αυτό του ασβεστολίθου της νήσου Portland κοντά στην Αγγλία.

Το 1904 στη περιοχή St Louis (USA) έγινε η πρώτη εφαρμογή σταθεροποίησης εδάφους με τοιμέντο τύπου Portland. Από το 1940 και μετά οι Γερμανοί αργότερα οι Βρετανοί και οι Αμερικανοί κατασκεύασαν τους αεροδιαδρόμους πολλών πολεμικών αεροδρομίων με την τεχνική εδάφους - τοιμέντου. Την ίδια χρονική περίοδο η τεχνική της σταθεροποίησης εδάφους με διάφορα πρόσθετα (τοιμέντο, ασβέστος, ιπτάμενη τέφρα, χημικές ενώσεις κλπ) επεκτάθηκε στην Αυστραλία, Σκανδιναβία και Ιαπωνία. Άλλες τεχνικές σταθεροποίησης και ενίσχυσης μαλακών και συνεκτικών εδαφών είναι η βαθιά μίξης με πρόσθετα, για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών αυτών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε από την Ιαπωνία το

1970, Σκανδιναβία, (Σουηδία, Φιλανδία) για εφαρμογές σε κτιριακά συγκροτήματα, θεμελιώσεις γεφυρών, κατασκευές αντιστήριξης, κλπ. Η βασική στρατηγική όλων αυτών των τεχνικών είναι να βρεθεί η πιο κατάλληλη, αποτελεσματική και οικονομική μέθοδος που να βελτιώνει το έδαφος, ώστε οι μηχανικές του ιδιότητες να γίνουν παρόμοιες με αυτές των μαλακών βράχων, αυξάνοντας την ασφάλεια των γεωτεχνικών έργων.

### **2.2.2. Εισαγωγή**

Με τον όρο βελτίωση ή ενίσχυση ενός υλικού, φυσικού ή θραυστού, εννοούμε την επεξεργασία του υλικού αυτού που αποβλέπει στη βελτίωση των γεωτεχνικών του ιδιοτήτων (αντοχή, διάβρωση, διαπερατότητα, συμπίεστικότητα, πορώδες, φυσικά χαρακτηριστικά, μηχανικές ιδιότητες κλπ.). Ο Van Impre (1989) διαχωρίζει τις μεθόδους βελτίωσης στις παρακάτω γενικές ομάδες:

- I. Προσωρινές τεχνικές βελτίωσης εδάφους με περιορισμένο χρόνο εφαρμογής, κατά την περίοδο της κατασκευής (ηλεκτρική όσμωση, ψύξη εδάφους κλπ.).
- II. Μόνιμες (διαρκείς) τεχνικές βελτίωσης εδάφους, που εφαρμόζονται χωρίς την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (δυναμική συμπίκνωση, μέθοδοι μαζικής δόνησης κλπ.).
- III. Μόνιμες (διαρκείς) τεχνικές βελτίωσης εδάφους που εφαρμόζονται με την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (οπλισμένο έδαφος, τοιμεντενέσεις, γενικά ενέσεις με διάφορα ενέματα, βαθιές μίξεις με διάφορα μίγματα όπως τοιμέντου, ασβέστου, μπεντονίτη κλπ.).

#### **Οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους εφαρμόζονται:**

- I. Στα θεμέλια κτιρίων για την μείωση των καθιζήσεων, τον έλεγχο της διαπερατότητας ή την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.
- II. Σε εργασίες εκοκαφής για καλύτερη πλευρική αύξηση της αντοχής σε σήραγγες ή τάφρους και μείωση της διαπερατότητας.
- III. Στην οδοποιία, στις υποβάσεις δρόμων για αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, μείωση της διάβρωσης και μείωση των μεταβολών του όγκου.

- IV. Σε σταθεροποίηση των πρανών για να αυξηθεί η αντοχή του εδάφους σε διάβρωση, να μειωθεί η διαπερατότητα και ο δείκτης κενών.
- V. Σε κατασκευές συγκράτησης (αποθήκευσης) ύδατος για την δημιουργία όσο το δυνατόν υδατοστεγανών κατασκευών, όπως φράγματα, κανάλια, δεξαμενές, χωματερές (Χ.Υ.Τ.Α.).
- VI. Στην προστασία περιβάλλοντος, αυξάνοντας την αντίσταση του εδάφους στην φυσική αποσάθρωση από αέρα ή το νερό, περιορίζοντας την μόλυνση του εδάφους με μείωση της μεταφορικής ικανότητας των μολυσμένων ουσιών δημιουργώντας συσσωματώματα που μετατρέπονται σε πολυδυσκίνητες χημικές μορφές.

### **2.2.3. Βελτίωση εδαφών**

Οι μέθοδοι βελτίωσης εδαφών παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 2.1** χωρισμένες στις εξής κατηγορίες:

- I. Μέθοδοι στερεοποίησης
- II. Μέθοδοι όπλισης του εδάφους
- III. Μέθοδοι συμπύκνωσης
- IV. Μέθοδοι σταθεροποίησης (βελτίωσης) του εδάφους με ανάμιξη:
  - A. με άσβεστο
  - B. με τσιμέντο
  - C. με χημικά πρόσθετα
- V. Μέθοδοι με εκτέλεση ενέσεων
- VI. Θερμικής δράσης



**Πίνακας 2.1:** Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ
1. Στερεοποίηση	- Προφόρτιση - Προφόρτιση - Ηλεκτρική όσμωση
2. Οπλισμός του εδάφους (χρησιμοποίηση στοιχείων που μπορούν να παραλάβουν δυνάμεις ελκυσμού ή θλίψης)	- Λιθοπάσσαλοι - Οπλισμένο έδαφος - Χρησιμοποίηση γεωϋφασμάτων - Ριζοπάσσαλοι (Root Piles) - Κάρφωμα εδάφους (Soil nailing)
3. Συμπύκνωση	- Δυναμική συμπύκνωση - Πάσσαλοι συμπύκνωσης - Μέθοδοι μαζικής δόνησης - Εκρήξεις
4. Σταθεροποίηση με ανάμιξη του εδάφους με άβεστο ή τσιμέντο (Χημική σταθεροποίηση)	- Αβεστοπάσσαλοι - Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου - Υποβάσεις δρόμων - Επικαλύψεις πρανών
5. Ενέσεις	- Ενέσεις διαποτισμού - Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης
6. Θερμική δράση	- Θέρμανση του εδάφους - Ψύξη του εδάφους

#### **2.2.4. Μέθοδοι βελτίωσης εδάφους κατά Attewell και Farmer(1976), Τσότσο (1987), Van Impe (1989)**

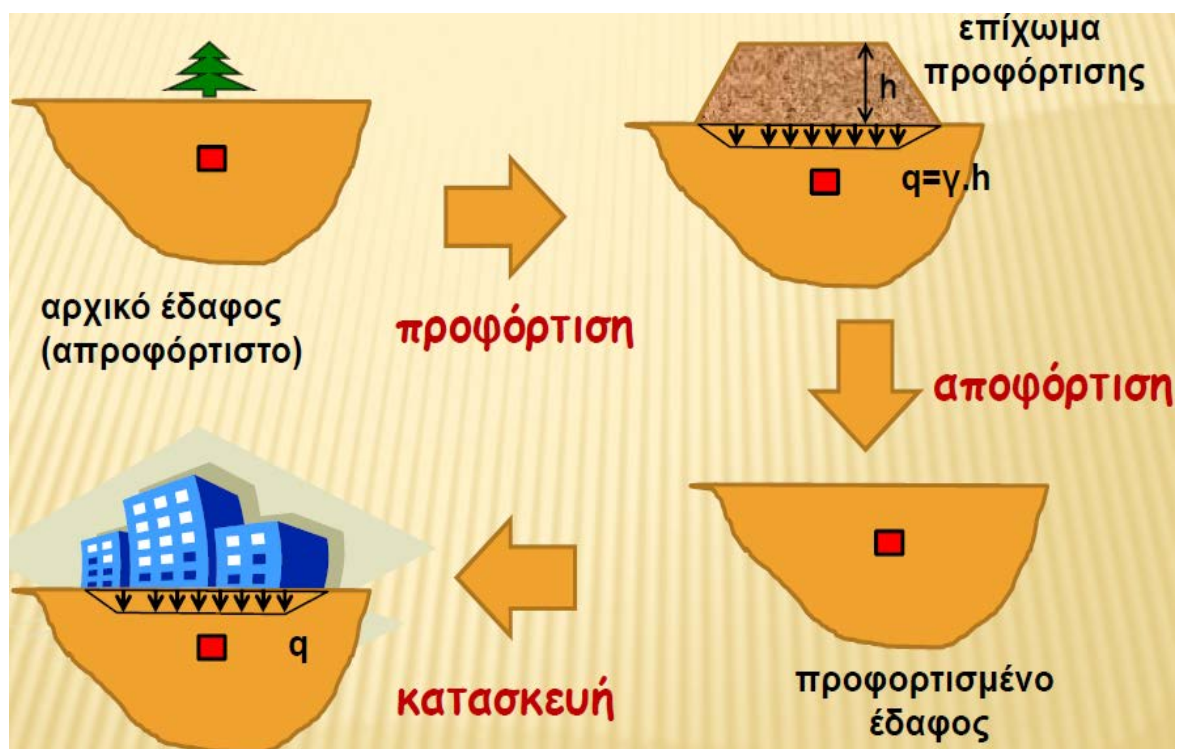
Στις μεθόδους βελτίωσης εδάφους κατατάσσονται οι μέθοδοι που ακολουθούν, οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

- I. Η στερεοποίηση
  - A. Προφόρτιση
  - B. Προφόρτιση με τη χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων
  - C. Ηλεκτρο-όσμωση
- II. Οπλιsmός εδάφους
  - A. Λιθοπάσσαλοι ή χαλικοπάσσαλοι
  - B. Οπλισμένο έδαφος
- III. Συμπύκνωση
  - A. Δυναμική συμπύκνωση
  - B. Μέθοδοι μαζικής δόνησης
  - C. Τοποθέτηση εκρηκτικής ύλης
- IV. Σταθεροποίηση του εδάφους με τη χρήση τσιμέντου, ασβέστου ή άλλων χημικών προσθέτων.
  - A. Ασβεστοπάσσαλοι
  - B. Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου
- V. Ενέσεις
  - A. Θέρμανση του εδάφους
  - B. Ψύξη του εδάφους

## I. Στερεοποίηση

### A. Προφόρτιση:

Η μέθοδος της προφόρτισης συνίσταται στη συσσώρευση εδαφικού υλικού και την τοποθέτησή του με μορφή σωρών πάνω στην προς βελτίωση έκταση. Σχηματικά η διαδικασία της προφόρτισης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.1**.



**Εικόνα 2.1:** Διαδικασία προφόρτισης εδάφους

Άλλοι τρόποι προφόρτισης είναι:

- Η τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων συνήθως σε μικρού πλάτους γραμμικά έργα
- Η κατάλληλη άντληση και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπογείου νερού
- Η πλήρωση δεξαμενών ή άλλων υδατοστεγανών χώρων με νερό
- Η επιφανειακή διαβροχή στεγνών χαλαρών αποθέσεων

## **B. Προφόρτιση με την χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων:**

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

## **C. Ηλεκτρο-όσμωση:**

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

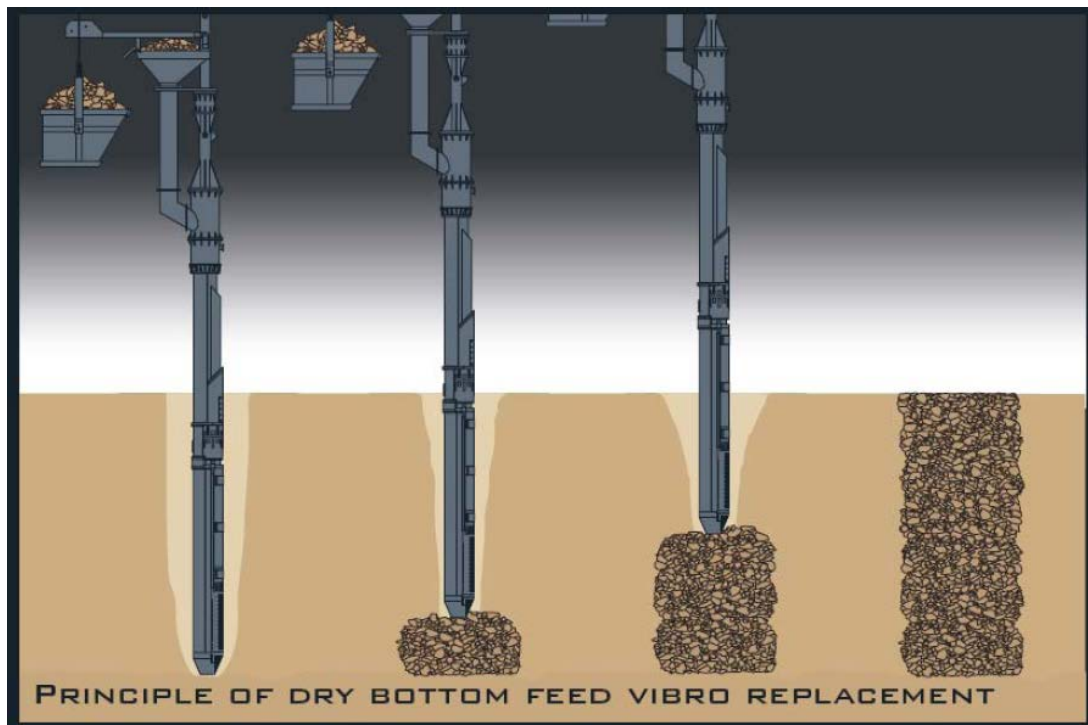
## **II. Οπλισμός εδάφους.**

### **A. Λιθοπάσσαλοι ή χαλικοπάσσαλοι:**

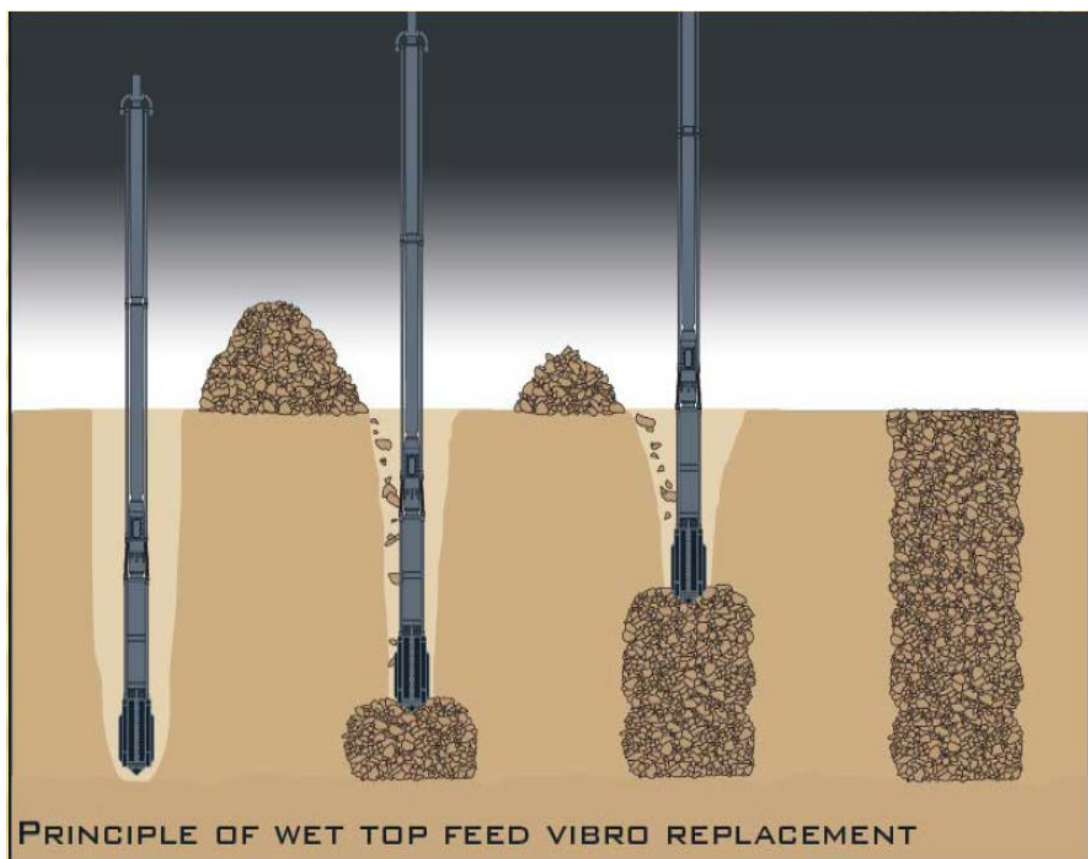
Η μέθοδος συνίσταται στη διάνοιξη κυκλικών οπών στο προβληματικό έδαφος με μήκος σημαντικό και την πλήρωσή τους με χάλικες ή με θραυστό υλικό λατομείου. Σ' αυτήν την περίπτωση κρίσιμη είναι η αντοχή του ίδιου του υλικού του πασσάλου και όχι η μεταφορά του φορτίου από τους πασσάλους στο έδαφος.

Η διαδικασία πραγματοποιείται σε δυο φάσεις. Στην πρώτη φάση πραγματοποιείται διάνοιξη κυκλικής οπής στο έδαφος και διείδυση των χαλικοπασσάλων. Έπειτα πραγματοποιείται τροφοδοσία του εδάφους με χάλικια από την άνω διάταξη του συστήματος. Στην τελική φάση γίνεται η συμπύκνωση του υλικού και η σταδιακή πλήρωση της οπής, μέχρι τη στάθμη της επιφάνειας του εδάφους.

Στις **Εικόνες 2.2 και 2.3** απεικονίζεται η διαδικασία της τοποθέτησης των χαλικοπασσάλων σε ξηρό έδαφος και σε υγρή επιφάνεια εδάφους αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.2:** Τοποθέτηση χαλικοπασσάλων σε ξηρό έδαφος.



**Εικόνα 2.3:** Τοποθέτηση χαλικοπασσάλων σε υγρή επιφάνεια εδάφους.

## **Β. Οπλισμένο έδαφος:**

Το έδαφος μπορεί να βελτιωθεί με την εισαγωγή τοπικά, στοιχείων οπλισμού. Αυτό μπορεί να γίνει με την εισαγωγή μεταλλικών λωρίδων μέσα στο έδαφος (οπλισμένο έδαφος), με τα γεωϋφάσματα, με την εισαγωγή αποάλινων ράβδων, με ηλώσεις (soil nailing) ή με την εισαγωγή ριζοπασσάλων. Οι **Εικόνες 2.4 και 2.5** παρουσιάζουν την μέθοδο ενίσχυσης εδάφους με τοποθέτηση μεταλλικών ελασμάτων σε διαφορετικά είδη εδαφών.



**Εικόνα 2.4:** Ενίσχυση εδάφους με τοποθέτηση μεταλλικών ελασμάτων.



**Εικόνα 2.5:** Ενίσχυση εδάφους με τοποθέτηση μεταλλικών ελασμάτων.

Στην **Εικόνα 2.6 και 2.7** φαίνεται το στάδιο ενίσχυσης εδάφους στον οποίο τοποθετούνται τα γεωφάσματα και τα γεωπλέγματα αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.6:** Ενίσχυση εδάφους με τοποθέτηση γεωφάσματος.

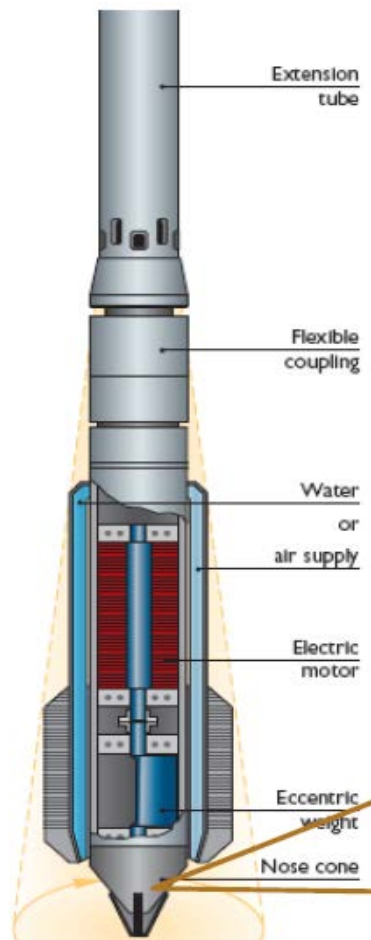


**Εικόνα 2.7:** Ενίσχυση εδάφους με τοποθέτηση γεωπλέγματος.

### **III. Συμπύκνωση.**

#### **A. Δυναμική συμπύκνωση**

Η Διάταξη Δυναμικής Συμπύκνωσης απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.8** με ονομασία των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν, ενώ η διαδικασία Δυναμικής Συμπύκνωσης σε ένα εργοτάξιο παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.9**.



**Εικόνα 2.8:** Διάταξη Δυναμικής Συμπύκνωσης





**Εικόνα 2.9:** Εφαρμογή Δυναμικής Συμπύκνωσης

### **B. Μέθοδοι μαζικής δόνησης:**

Στην μέθοδο αυτή συνιστάται η εισαγωγή δονητή σε χαλαρά, μη συνεκτικά εδάφη όπου προκαλεί ακτινωτή συμπύκνωση.

### **C. Τοποθέτηση εκρηκτικής ύλης**

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

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

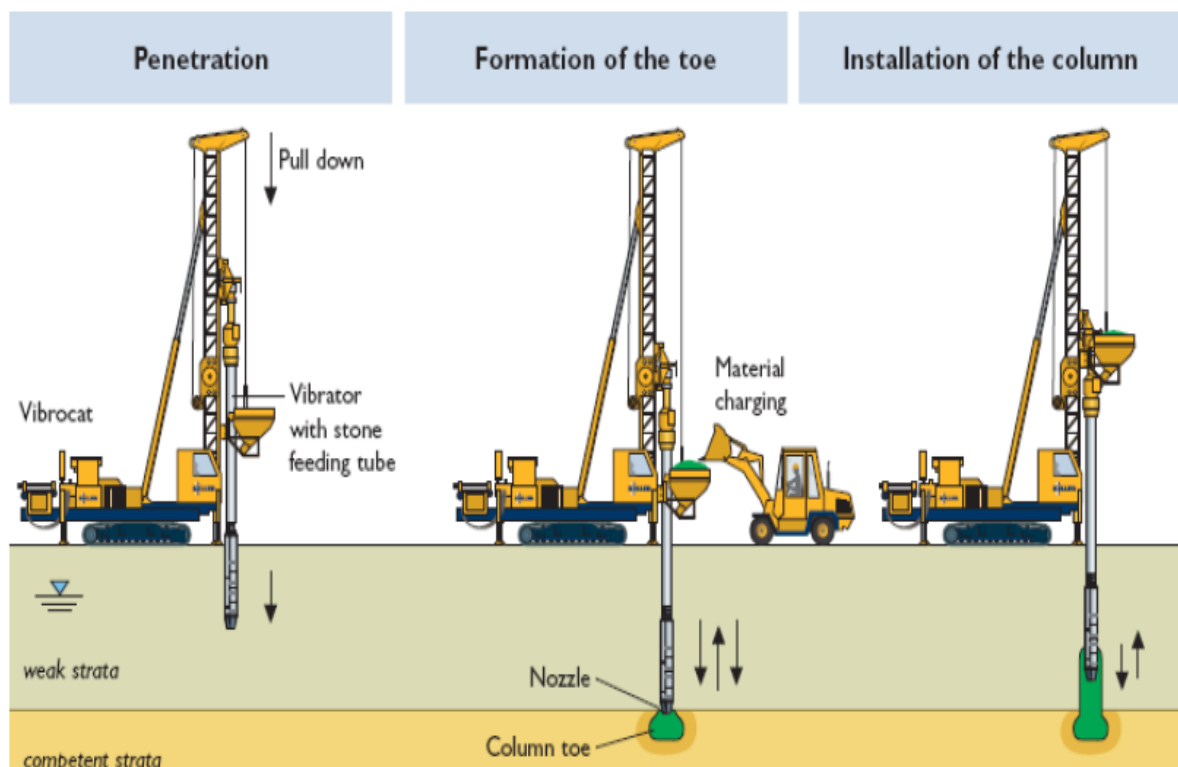
**A. Ασβεστοπάσσαλοι:**

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

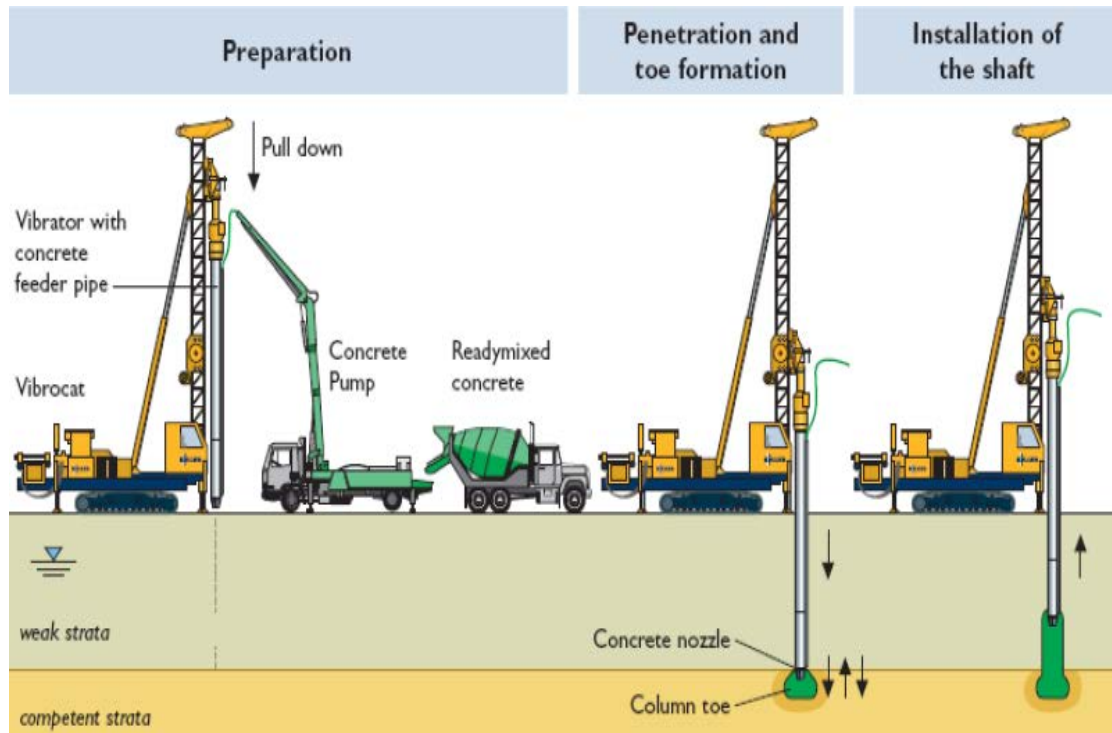
**B. Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου.**

Ο τρόπος κατασκευής των πασσάλων και διαφραγμάτων με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου είναι ο ίδιος με τον τρόπο κατασκευής των ασβεστοπασσάλων.

Στην **Εικόνα 2.10** απεικονίζεται η διαδικασία τοποθέτησης εδαφοπασσάλων, ενώ στην **Εικόνα 2.11** βλέπουμε την διαδικασία ανάμιξης εδάφους με σταθεροποιητικό υλικό όπως είναι π.χ. το τσιμέντο ή ο μπετονίτης. Η μέθοδοι σταθεροποίησης εδαφών με την βοήθεια σταθεροποιητικού υλικού ή με απλή συμπύκνωση εμφανίζονται στον **Πίνακα 2.2**.



**Εικόνα 2.10:** Διαδικασία τοποθέτησης Εδαφοπασσάλων



**Εικόνα 2.11:** Ανάμειξη εδάφους με «σταθεροποιητικό» υλικό (τσιμέντο, μπετονίτης).

**Πίνακας 2.2:** Σταθεροποίηση εδαφών με τσιμέντο, άσβεστο, άσφαλτο ή με απλή συμπύκνωση (Κόλιας, 1979).

Είδος σταθεροποίησης	Επηρεαζόμενες εδαφικές ιδιότητες	Αποτελέσματα ης σταθεροποίησης	Θέση σταθεροποιημένης στρώσης στο οδόστρωμα
Μηχανική σταθεροποίηση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Κοκκομετρική διαβάθμιση</li> <li>2. Πλαστικότητα</li> <li>3. Περιεχόμενη</li> </ol>	Βελτίωση της ικανότητας για συμπύκνωση και άλλων ιδιοτήτων του μίγματος, που εξαρτώνται από τις	Βάση-Υπόβαση (Ανεπαρκής για βάση δρόμων βαρείας κυκλοφορίας)

	υγρασία	αρχικές ιδιότητες των υλικών.	
Σταθεροποίηση με άσβεστο	1. Περιεχόμενη υγρασία 2. Όρια Atterberg 3. Δομή του εδάφους	Δυνατότητα συμπύκνωσης με αυξημένη υγρασία. Μόνιμη ελάττωση της ευπάθειας στις επιδράσεις του νερού και του παγετού. Αύξηση αντοχής.	Υπέδαφος-Υπόβαση Σπανιότερα για βάση δρόμων ελαφράς κυκλοφορίας.
Σταθεροποίηση με άσφαλτο	Αντοχή	Δημιουργία στρώσης εύκαμπτης, με αυξημένη φέρουσα ικανότητα ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Κυρίως για βάση Σπανιότερα για υπόβαση
Σταθεροποίηση με τοιμέντο	1. Αντοχή 2. Δομή του εδάφους	Δημιουργία στρώσης με αυξημένη φέρουσα ικανότητα, ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και	Βάση, υπόβαση, υπέδαφος. Αυτοδύναμα οδοστρώματα ελαφράς κυκλοφορίας που φέρουν λεπτή

		του παγετού.	ασφαλτική επίστρωση.
--	--	--------------	-------------------------

## V. Ενέσεις.

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

- I. Τις ενέσεις στεγανοποίησης που προκαλούν κυρίως μείωση διαπερατότητας και χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση υπογείων ροών και
- II. Τις ενέσεις σταθεροποίησης που έχουν ως στόχο την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας.

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

- I. Ενέσεις διαποτισμού.
- II. Ενέσεις εκτοπίσεως ή συμπύκνωσης.
- III. Ενέσεις εγκλωβισμού.
- IV. Ενέσεις πλήρωσης κενών.

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

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

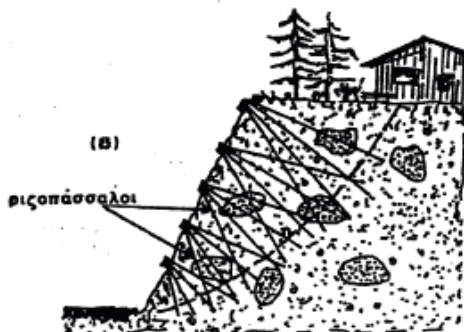
## **A. Θέρμανση του εδάφους:**

Η μέθοδος αυτή είναι η λιγότερο οικονομική από τις προηγούμενες, εφαρμόζεται σε χαλαρά εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα και συνίσταται στη δημιουργία οπών με καρφίδες και την εισβολή πολύ θερμού μίγματος αέρος και καυσίμου μέσα στο έδαφος.

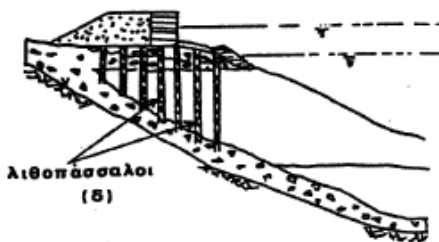
Η πίεση που εφαρμόζεται είναι **1.5 μεγαλύτερη** της ατμοσφαιρικής. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από **300° C** έως **1000° C** με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση λόγω απώλειας του νερού και την αύξηση των ενεργών τάσεων. Σε θερμοκρασίες **550° C** η ικανότητα διόγκωσης της αργίλου καταστρέφεται σε **1000° C**, οι κόκκοι άμμου τήκονται και δημιουργούν τεχνητή τσιμεντοποίηση. Το **Σχήμα 2.1** παρουσιάζει παραδείγματα των μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών.



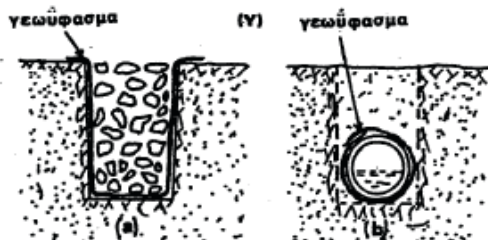
α) Επιστρώσεις - επικαλύψεις με μίγμα εδάφους - τσιμέντου.



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



β) Χρησιμοποίηση λιθοπάσσων και ενίσχυση του εδάφους για την κατασκευή επιχώματος και τοίχου αντιστήριξης.



γ) Χρησιμοποίηση γεωύφασμάτων σε τάφρους ή σωλήνες υδρορροής a,b.



ε) Χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων.

Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών (Mitchel 1981 και Van Impe 1989).

Ειδικότερα όσον αφορά τις μεθόδους βελτίωσης που περιλαμβάνονται στην κατηγορία της σταθεροποίησης του εδάφους διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- 1) Σταθεροποίηση με συμπίκνωση.
- 2) Μηχανική σταθεροποίηση με ανάμιξη δύο ή περισσότερων υλικών.

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

Από τις παραπάνω μεθόδους βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών η σταθεροποίηση με τοιμέντο έχει ευρύ φάσμα εφαρμογής στα εδάφη, επίσης είναι οικονομική μέθοδος. Κατά τον Mitchell (1981) η σταθεροποίηση του εδάφους με τοιμέντο σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους βελτίωσης έχει μέσο σχετικό κόστος.

Ενίσχυση ή και βελτίωση χρειάζονται τα «**μαλακά**» ή τα «**χαλαρά**» εδάφη, δηλ:

- 1) Χαλαρές άμμοι ιδιαίτερα όταν είναι κορεσμένες
- 2) Χαλαρές και μέσης πυκνότητας κορεσμένες άμμοι και αμμοχάλικα υπό οσειμική φόρτιση
- 3) Απροφόρτιστες ή υποστερεοποιημένες άργιλοι και ιλύες

Επίσης άλλοι μέθοδοι ενίσχυσης του εδάφους είναι :

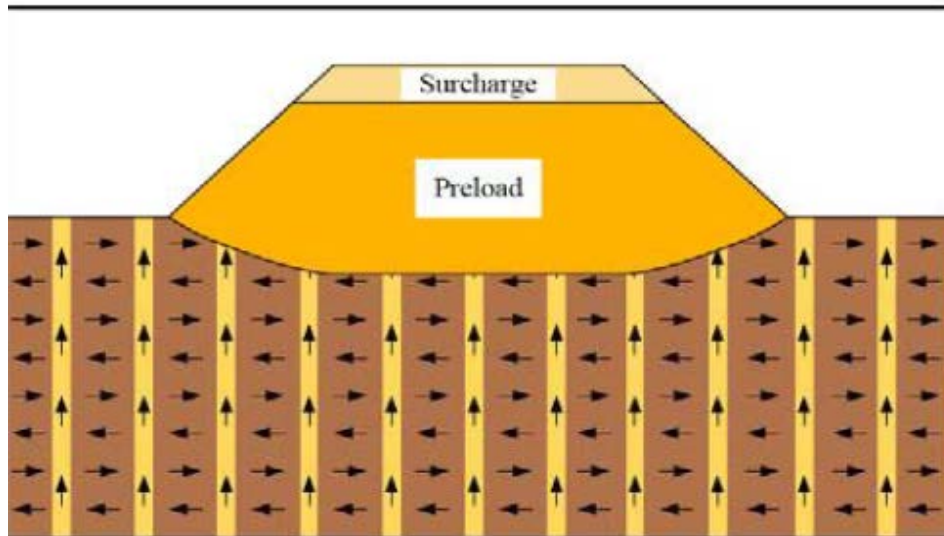
- 1) Η αντικατάσταση «**μαλακού**» εδάφους
- 2) Οι ρητινενέσεις
- 3) Η βελτίωση εδάφους με κατακόρυφα στραγγιστήρια

Στην **Εικόνα 2.12** απεικονίζεται σχηματικά η βελτίωση του εδάφους με την βοήθεια κατακόρυφων στραγγιστηρίων. Η μορφή του στραγγιστηρίου πριν χρησιμοποιηθεί και κατά την διάρκεια χρήσης του, (δηλ. όταν βρίσκεται στο έδαφος) φαίνεται στην **Εικόνα 2.13**.

### **B. Ψύξη του εδάφους:**

Η μέθοδος ψύξης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φραγμών από παγωμένο νερό έξω από την επιφάνεια των κατασκευών.





**Εικόνα 2.12:** Βελτίωση εδάφους με κατακόρυφα στραγγιστήρια.



**Εικόνα 2.13:** Στραγγιστήρια στο εσωτερικό του εδάφους.

Στην **Εικόνα 2.14** που ακολουθεί απεικονίζεται μια έκταση εδάφους στην οποία έχει εφαρμοστεί η μέθοδος βελτίωσης εδάφους με την βοήθεια κατακόρυφων στραγγιστηρίων.



**Εικόνα 2.14:** Εφαρμογή της βελτίωσης εδάφους με κατακόρυφα στραγγιστήρια.

### **2.2.5. Συμπεράσματα**

Συμπερασματικά η διαδικασία και η μέθοδος εφαρμογής της βελτίωσης και ενίσχυσης των εδαφών εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του εδάφους (αμμώδες, συνεκτικό ή διογκούμενο έδαφος), την ιδιότητα (φυσική ή μηχανική) που πρέπει να βελτιωθεί, από το είδος και το μέγεθος του γεωτεχνικού έργου αλλά και από την αντίστοιχη κατασκευή.

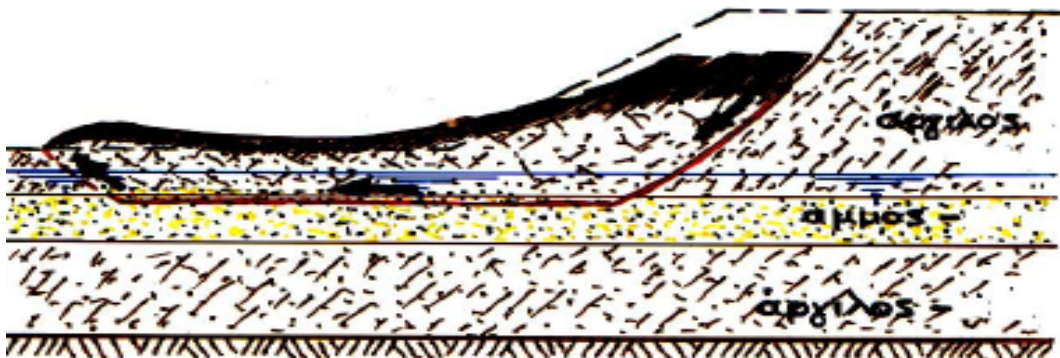
Κατ'επέκταση ο συνδυασμός των παραπάνω δηλαδή η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι και συνάρτησης του κόστους του συνολικού έργου κατασκευής σε σχέση με το κόστος της μεθόδου βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους.

### **Αστοχία των εδαφών**

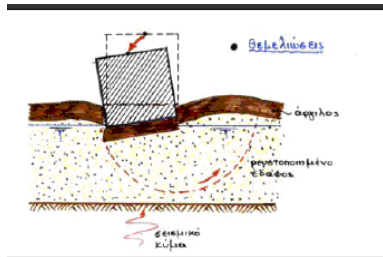
Ορισμένες φορές η έλλειψη ενίσχυσης εδαφών, καθώς και η εφαρμογή της λάθος μεθόδου, οδηγεί σε αστοχία του εδάφους με καταστρεπτικά αποτελέσματα πολλές φορές για τον άνθρωπο. Στις **Εικόνες 2.15-2.22** που ακολουθούν απεικονίζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχίας εδαφών (μέσα από εικόνες και πραγματικές φωτογραφίες) και σχηματική παρουσίαση της αιτίας αστοχίας κάθε φορά.



**Εικόνα 2.15:** Αστοχία του δρόμου στην περιοχή Hokkaido στην Ιαπωνία, το 2003.



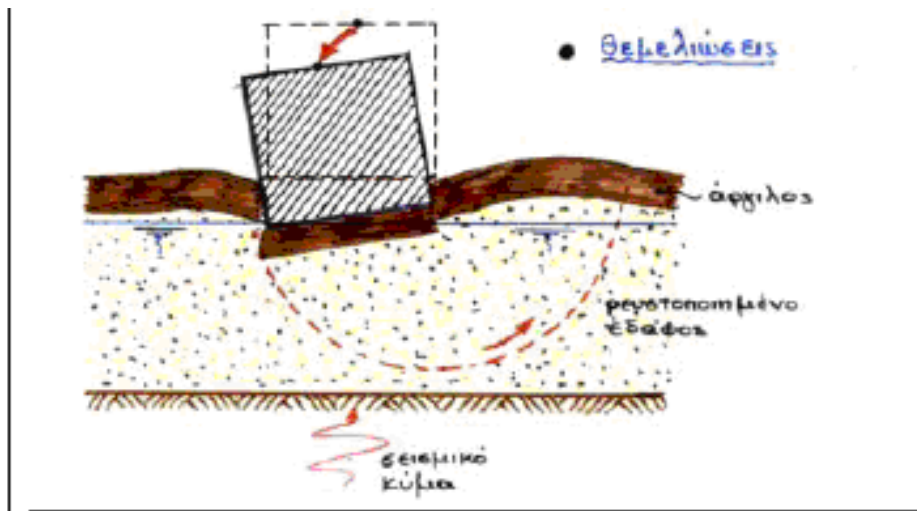
**Εικόνα 2.16:** Στρώματα εδάφους του δρόμου της παραπάνω εικόνας.



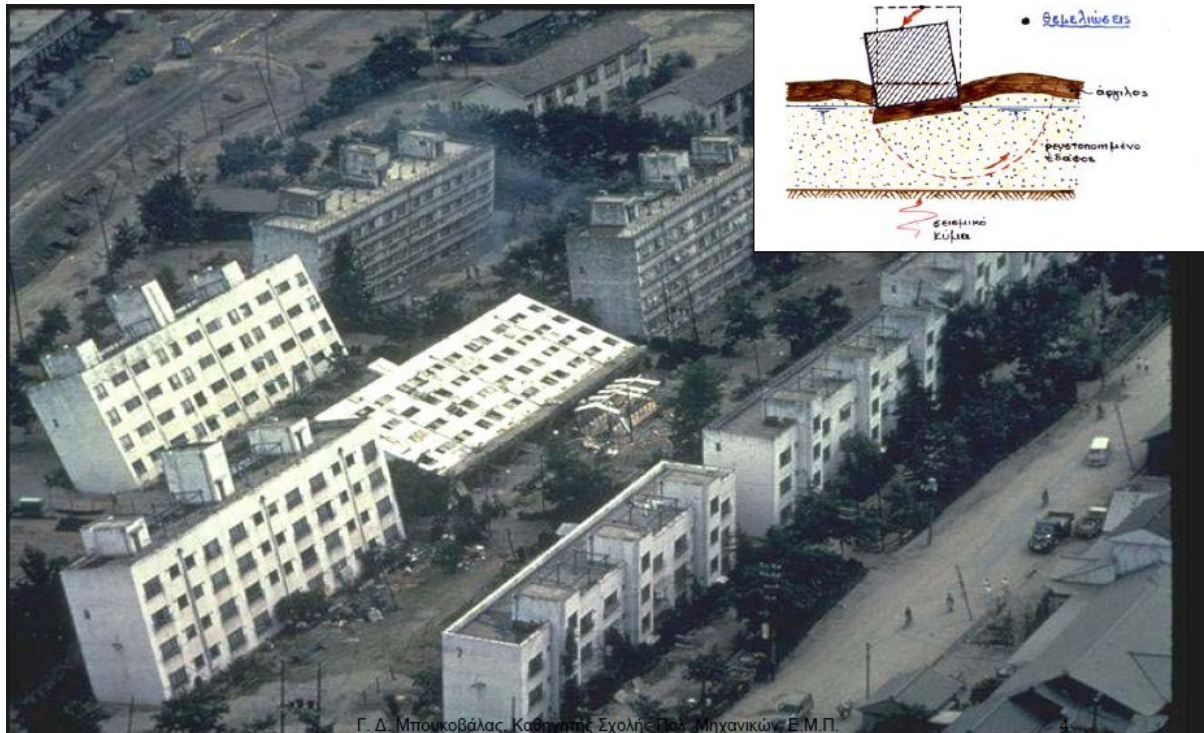
**Kocaeli (Izmit), Τουρκία (1999)**



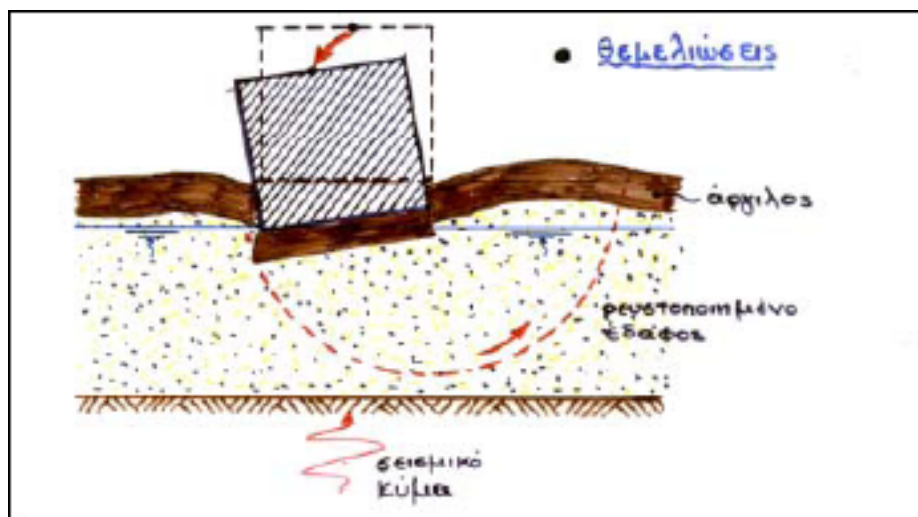
**Εικόνα 2.17:** Κατάρρευση κτιρίου από αστοχία εδάφους στην περιοχή Izmit της Τουρκίας το 1999.



**Εικόνα 2.18:** Στρώματα εδάφους έδρασης κτιρίου.



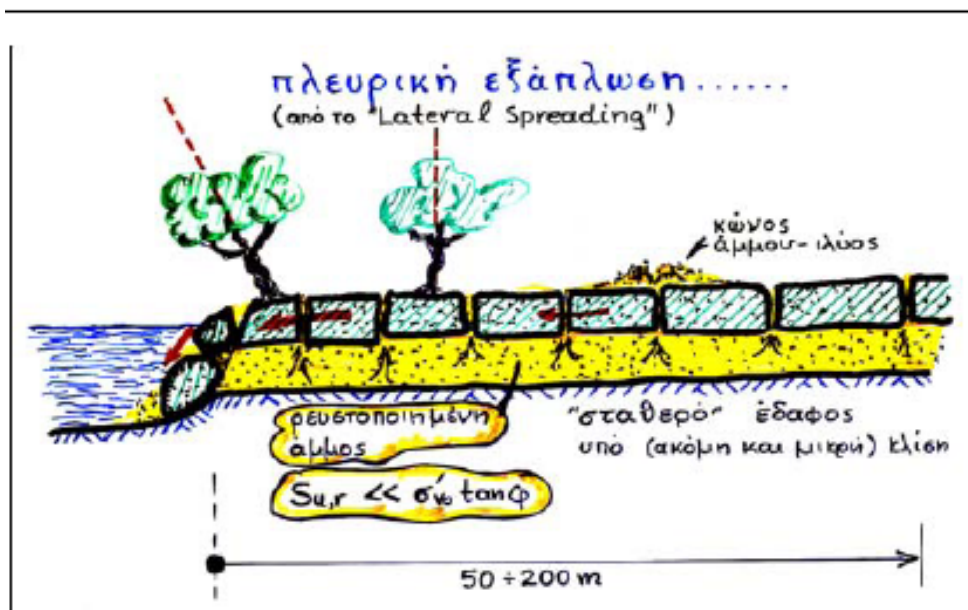
**Εικόνα 2.19:** Κατάρρευση κτιρίων από αστοχία εδάφους στην περιοχή Niigata Ιαπωνίας το 1964.



**Εικόνα 2.20:** Στρώματα εδάφους έδρασης κτιρίων.



Εικόνα 2.21: Πρόκληση καταστροφής εδάφους από το σεισμό στη περιοχή Ιzmit της Τουρκίας το 1999.



Εικόνα 2.22: Πλευρική εξαπλωση του εδάφους της παραπάνω εικόνας.

## **2.3. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΧΗΜΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΝΕΜΑΤΑ**

### **2.3.1 Εισαγωγή**

Με τον όρο βελτίωση του εδάφους εννοούμε ένα σύνολο μεθόδων και τεχνικών με τις οποίες επιδιώκεται να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης, ώστε κατά κανόνα η λύση επιφανειακής θεμελίωσης να είναι αποδεκτή ή σε μερικές περιπτώσεις, η λύση της βαθιάς θεμελίωσης να είναι μικρότερου κόστους.

Με το γενικό χαρακτήρα του ορισμού της βελτίωσης του εδάφους που δόθηκε προηγουμένως η λύση βελτίωσης θα πρέπει να αναζητηθεί ως εναλλακτική λύση σε όλες τις περιπτώσεις μη συμβατικών επιφανειακών θεμελιώσεων , στην πράξη όμως λύση βελτίωσης αναζητείται :

- I. Σε ειδικές περιπτώσεις εδαφών .Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις κατηγορίες εδαφών και τα κυριότερα γεωτεχνικά προβλήματα κάθε κατηγορίας, στις οποίες αναζητούνται λύσεις βελτίωσης.
- II. Σε περιπτώσεις έργων μεγάλης έκτασης .Στην περίπτωση αυτή επιδιώκεται γενική βελτίωση του εδάφους ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση διαφόρων τεχνικών έργων στη συνέχεια.

Αντίθετα όταν τα φορτία είναι συγκεντρωμένα σε μικρή έκταση η λύση των θεμελιώσεων με πασσάλων φαίνεται να είναι γενικά καλύτερη .

### **2.3.2. Ταξινόμηση των μεθόδων βελτίωσης**

Ο προσφορότερος τρόπος ταξινόμησης και συστηματικής μελέτης των μεθόδων βελτίωσης βασίζεται στη διάκριση τους ανάλογα με το μηχανισμό βελτίωσης.

Ο πίνακας 3.2 παρουσιάζει την ταξινόμηση των γνωστότερων μεθόδων βελτίωσης, ανάλογα με το μηχανισμό βελτίωσης .

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η σαφής διάκριση στην εδαφομηχανική των όρων συμπύκνωση, στερεοποίηση και σταθεροποίηση . Με τον όρο συμπύκνωση εννοείται η αύξηση της πυκνότητας του εδάφους με εφαρμογή μηχανικής ενέργειας.

Στον κλασικό ορισμό αναφέρεται σε ακόρεστα εδάφη. Στερεοποίηση είναι η διαδικασία μείωσης του όγκου του εδάφους με αποβολή του νερού των πόρων με ταυτόχρονη μεταφορά των τάσεων που ασκούνται στο έδαφος από την υγρή φάση στο στερεό σκελετό.

Ο όρος σταθεροποίηση είναι γενικότερος όρος που αφορά την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας. Ειδικά στην περίπτωση της βελτίωσης αναφέρεται στη φυσικοχημική δράση του τσιμέντου, της άσβεστου ή άλλων υλικών στο έδαφος .

### **2.3.3. Επιλογή– Τρόπος μελέτης των μεθόδων βελτίωσης**

Η επιλογή μιας μεθόδου βελτίωσης βασίζεται στους παρακάτω παράγοντες:

- I. Στο κόστος εφαρμογής της μεθόδου.
- II. Στο διαθέσιμο χώρο
- III. Στο διαθέσιμο χρόνο
- IV. Στο διαθέσιμο εξοπλισμό
- V. Στην εμπειρία από περιπτώσεις εφαρμογής σε ανάλογα εδάφη.

Η συστηματική μελέτη των μεθόδων βελτίωσης περιλαμβάνει:

- I. Την ανάλυση του μηχανισμού βελτίωσης
- II. Την περιγραφή της τεχνικής της μεθόδου
- III. Τον τρόπο υπολογισμού
- IV. Την ανάλυση των πλεονεκτημάτων – μειονεκτημάτων .
- V. Τον καθορισμό του τρόπου ελέγχου της βελτίωσης.

Είναι απαραίτητο να καθορίζεται από πριν ο τρόπος ελέγχου της βελτίωσης και η λύση της βελτίωσης να γίνεται αποδεκτή μόνο εφόσον ο έλεγχος αυτός έχει επαληθευτεί .

**Πίνακας 3.1** Γεωτεχνικά προβλήματα ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ
Μαλακά αργιλικά εδάφη	Μεγάλες καθιζήσεις από στερεοποίηση
Χαλαρά αμμώδη εδάφη	Πρόβλημα ρευστοποίησης σε περίπτωση σεισμού
Ιλυώδη εδάφη	Περιορισμένη αντοχή,
Οργανικά εδάφη	Χαμηλή αντοχή - Δυσκολία καθορισμού
Τεχνητές επιχωματώσεις	Ανομοιογένεια - Δυσκολία καθορισμού

**Πίνακας 3.2** Μηχανισμός βελτίωσης ανάλογα με τη μέθοδο.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ
Στερεοποίηση	Απλή προφόρτιση
	Προφόρτιση με κατακόρυφα αμμοστραγγιστήρια



Συμπύκνωση	Δυναμική συμπύκνωση
	Αμμοπάσσαλοι συμπύκνωσης
	Μαζική δόνηση
Χημική σταθεροποίηση - Ενέσεις	Διαποτισμού
	Εκτόπισης
	Εγκλωβισμού
Χημική σταθεροποίηση - Επιφανειακή κατεργασία	Με τσιμέντο
	Ασβεστοπάσσαλοι
Χημική σταθεροποίηση - Ανάμιξη σε βάθος	Ασβεστοπάσσαλοι
	jet grouting
Θερμική δράση	Θέρμανση του εδάφους
	Ψύξη του εδάφους
Ενσωμάτωση στοιχείων	Λιθοπάσσαλοι
	Οπλισμένο έδαφος
	Γεωσυνθετικά υλικά
	Μικροπάσσαλοι-Ριζοπάσσαλοι
	Ηλιώσεις

#### 2.3.4. Χημική σταθεροποίηση με ενέματα

Όλες οι μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους είναι δυνατό να εφαρμοστούν μόνο πριν την κατασκευή του έργου λόγω των αναπόφευκτων καθιζήσεων κατά την εφαρμογή τους. Επιπλέον υπάρχουν όρια απόστασης του σημείου εφαρμογής τους από το δομικό έργο. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι κραδασμοί που προκαλούν μερικές από τις μεθόδους .

Για υποθεμελιώσεις και εξασφαλίσεις υπάρχοντων έργων απαιτούνται μέθοδοι που δεν προκαλούν μείωση του όγκου .

Μία λύση είναι η διοχέτευση ρευστών υλών υπό πίεση στους εδαφικούς πόρους : το νερό των πόρων εκτοπίζεται , ο χώρος των πόρων γεμίζει , η πήξη των ρευστών υλών <<στοκάρει>> τον εδαφικό ιστό με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της συμπιεστότητας και την αύξηση της διατμητικής αντοχής .

Δημιουργείται ένα παρόμοιο προς το σκυρόδεμα εδαφικό υλικό αυξημένης αντοχής. Ως ενέματα χρησιμοποιούνται διαλύματα , αιωρήματα και γαλακτώματα , ανάλογα με το είδος του εδάφους και του προβλήματος .

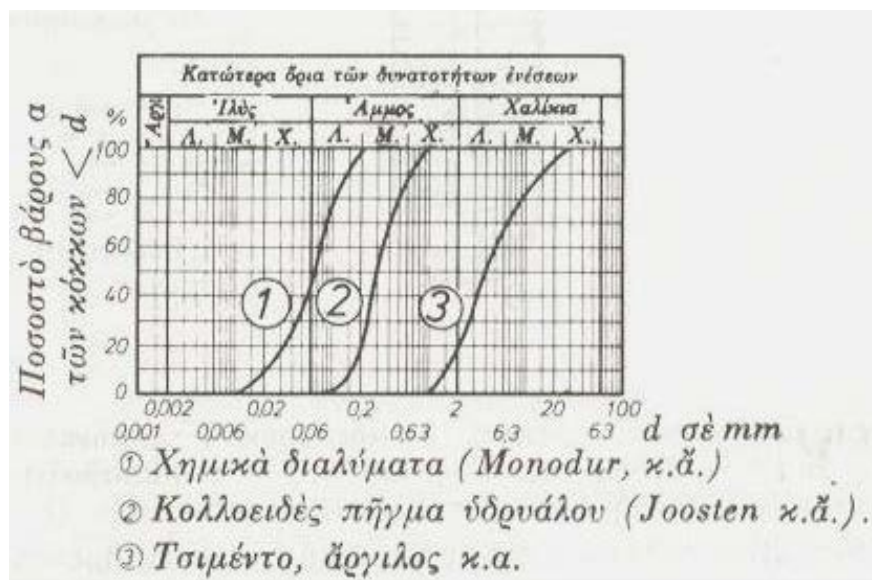
Οι ενέσεις σε ρηγματωμένα βραχώδη πετρώματα αποτελούνται από σχετικά χονδρόκοκκα αιωρήματα --τσιμέντου-άμμου και τσιμέντου-αργίλου

– και αποσκοπούν βασικά στη στεγάνωση και σπανιότερα στη σταθεροποίηση .

Οι ενέσεις σε χαλαρά πετρώματα (πορώδη ) απαιτούν ένεμα προσαρμοσμένο στο είδος του εδάφους είτε αποσκοπούν στη σταθεροποίηση είτε στη στεγάνωση .Επειδή το βάθος διείσδυσης του ενέματος εξαρτάται τόσο από τη διαπερατότητα του εδάφους όσο και από το μέγεθος και τις αμοιβαίες συνδέσεις των πόρων ,έχει αποφασιστική σημασία το ιξώδες και το μέγεθος των σωματιδίων του αιωρήματος .

Για του λόγους αυτούς αιωρήματα τοιμέντου χρησιμοποιούνται μόνο σε χαλικώδη εδάφη ή χονδρόκοκκες άμμους με ελάχιστη διάμετρο κόκκου 0,8mm .Στις χαμηλότερες κοκκομετρικές παροχές με διαπερατότητα  $k=10^{-1}$  ως  $10^{-2}$  cm ,θα χρησιμοποιηθούν χημικά διαλύματα .

Η πίεση με την οποία καταθλίβεται το ένεμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 bar ,οπωδήποτε όμως πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε να μην προκαλούνται τοπικές θραύσεις και ανυψώσεις .



Σχήμα 3.1 Όρια των δυνατοτήτων εισπίεσης.

Θεωρητικά αυξάνοντας την πίεση μπορούμε να καταθλίψουμε ρευστά οποιουδήποτε ιξώδους (συνεκτικότητας) η .Όταν αυξάνεται όμως το ιξώδες, μειώνεται το βάθος διείσδυσης του ενέματος ,το έδαφος φορτίζεται από την αναγκαία υδροστατική πίεση και χάνει τη διαπερατότητά του .

Το άνω όριο της δυνατότητας κατάθλιψης χημικών διαλυμάτων βρίσκεται π.χ. στα 700 ως 800 cP (0,01Poissee=0,01cm<sup>-1</sup> gs<sup>-1</sup> μονάδα της δυναμικής συνεκτικότητας ) . Συνεπώς η άψογη εκτέλεση βελτιώσεων του εδάφους με ενέσεις προϋποθέτει μια κατά το δυνατόν ακριβή γνώση του εδαφικού υλικού .

Η σχετική πυκνότητα , το πάχος , η σύνθεση , η διαπερατότητα και η περιεκτικότητα σε νερό αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν την εκλογή της μεθόδου και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες .

Οποσδήποτε πρέπει να συμβουλευτεί κανείς DIN 4093 <<εισπίεσεις στο υπέδαφος και τα δομικά έργα .>> και DIN 18309 <<εργασίες εισπίεσεων >> .

Τα αιωρήματα είναι ρευστά, συνήθως νερό, μέσα στο οποίο αιωρούνται λεπτότατα σωματίδια άλλου υλικού. Τα αιωρήματα διατηρούνται στην κατάσταση αυτή για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.

Συνήθως παρασκευάζονται αιωρήματα τσιμέντου, μπετονίτη και τσιμέντου – αργίλου. Το ποσοστό του νερού τα στα αιωρήματα τσιμέντου φυσικά είναι πάντοτε μεγαλύτερο από την ποσότητα που απαιτείται για την ενυδάτωση του τσιμέντου.

Συγκεντρώσεις πάνω από 1:1(τσιμέντο:νερό) δεν χρησιμοποιούνται, επειδή τότε η κινηματική συνεκτικότητα  $u$  είναι τριπλάσια από τη συνεκτικότητα του νερού και προκαλεί μεγάλες δυσκολίες κατά την εισπίεση.

Επειδή το νερό δεν είναι δυνατόν να καταναλωθεί από πήξη του τσιμέντου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως θα φιλτραρισθεί και οι πόροι τμηματικά θα γεμίσουν ενώ η αντίσταση στη εισπίεση συνεχώς θα αυξάνεται. Συνεπώς η πίεση στην αντλία θα πρέπει συνεχώς να αυξάνεται.

Όταν το ένεμα διοχετεύεται σε οπή γεώτρησης, ο χώρος περι τον σωλήνα ένεσης πρέπει να περικλυστεί με κάποιο <<συσκευαστή>>.

Τα θιξοτροπικά αιωρήματα, τα οποία παρασκευάζονται σχεδόν πάντα με τον αργιλικό ορυκτό μπετονίτη και με νερό, είναι σε πηκτή κατάσταση όταν ηρεμούν, ενώ μόλις κινηθούν, γίνονται ρευστά.

Αυτά τα κολλοειδή πήγματα δεν δέχονται το νερό και προσφέρονται ιδιαίτερα για στεγανώσεις επειδή παρουσιάζουν μια περιορισμένη αντίσταση και στο κινούμενο νερό. Οποσδήποτε δεν προσφέρονται για σταθεροποίηση του εδάφους, σταθεροποιούν όμως τα αιωρήματα τσιμέντου.

Μικρές δόσεις μέχρι 2% περιορίζουν τη δυνατότητα έκπλυσης τους και αυξάνουν την αντοχή τους. Τα διαλύματα είναι ομογενή μίγματα μιας αέριας ρευστής, ή στερεάς ύλης με ένα ρευστό, το διαλυτικό μέσο.

Δεν υπάρχει κάποια χημική σύνδεση μεταξύ του διαλυμένου υλικού και του διαλυτικού μέσου, η οποία να υπακούει σε απλούς στοιχειομετρικούς νόμους ακέραιων αριθμών.

Όταν αναμιχθούν δύο κατάλληλα διαλύματα, είναι δυνατόν να συμβούν βραδύτερες ή ταχύτερες χημικές αντιδράσεις, κατάλληλες για τις χημικές ενέσεις. Γρήγορες χημικές αντιδράσεις ( συνεπώς και χωριστή μεταφορά μέχρι το σημείο που θα γίνει η αντίδραση στο έδαφος ) παρουσιάζονται στη μέθοδο Joosten, όπου χρησιμοποιείται διάλυμα υδρύαλου (πυριτικό άλας του νατρίου ) και χλωριούχο ασβέστιο.

Η αντίδραση είναι ακαριαία και δίνει ένα κολλοειδές πήγμα πυριτικών αλάτων, το οποίο είναι κατάλληλο για τη σταθεροποίηση του εδάφους. Βραδύτερες αντιδράσεις, οι οποίες επιτρέπουν τη μίξη πριν την κατάθλιψη, παρουσιάζουν τα κολλοειδή πήγματα Monodur και αιθυλικών οξικών αλάτων πάντοτε σε βάση υδρύαλου.

Κατάλληλο πήγμα σχηματίζεται και από τα αποπλύματα θειωδών αλάτων- τα οποία δημιουργούνται κατά την παραγωγή χαρτιού- και χρωμιούχα άλατα. Εδώ και αρκετό καιρό διατίθενται στην αγορά και τεχνικές ύλες, όπως οι εποξειδικές ρητίνες, πολυθιζίνη και άλλα, οι οποίες

αποτελούνται από δύο συστατικά και χρησιμοποιούνται όπως και τα άλλα διαλύματα.

Όμως έχουν υψηλές τιμές και οι μεγάλες αντοχές που προσφέρουν σπάνια απαιτούνται. Για την ένεση εισάγεται στο έδαφος με εισπίεση ή διάτρηση σωλήνας 1 ½" διάτρητος κατά τα τελευταία 50 cm.

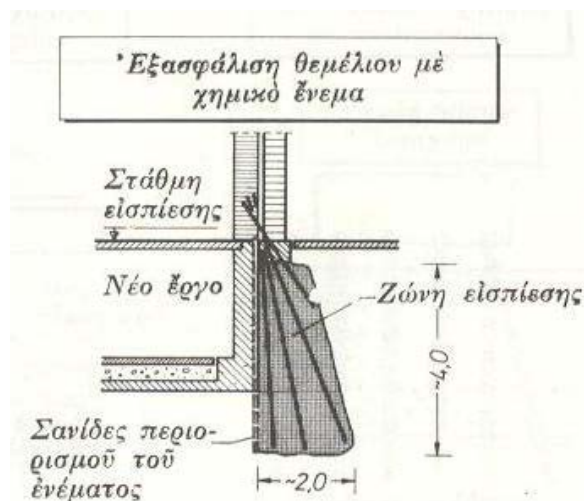
Κατά τη μέθοδο Joosten το διάλυμα πυριτικού νατρίου διοχετεύεται κατά την εισχώρηση του σωλήνα και το διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου στο τέλος κατά την εξαγωγή. Στη μέθοδο Monodur η εισπίεση γίνεται από κάτω προς τα πάνω.

Οι πιο πάνω μέθοδοι έχουν ιδιαίτερη σημασία για τις εκτεταμένες υποθεμελιώσεις και υποστηρίξεις κτιρίων που απαιτούνται κατά την κατασκευή μετρό.

Με τον τρόπο αυτό υπό-θεμελιώνονται γειτονικά έργα ( σχήμα 3.2). Ο χώρος που θα εκταθεί το ένεμα μπορεί να περιοριστεί με σανίδες ή ελαφρές πασσαλοσανίδες. Με τον τρόπο αυτό σταθεροποιείται η περιοχή σήραγγων και αποφεύγονται οι δευτερογενείς καθιζήσεις.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε μερικά και για τη δημιουργία στεγανωτικών τοιχωμάτων ή δακτυλίων ,κατά το μέτωπο εκσκαφής όταν χρειάστηκε σήραγγες να διασχίσουν κορεσμένα χαλαρά εδάφη ή συνέβησαν διαρρήξεις τοιχωμάτων τους από το νερό.

Πρόσφατα όμως επεκτείνεται στις περιπτώσεις αυτές η εφαρμογή της ψύξης του εδάφους, ώστε μετά την κατασκευή της σήραγγας να είναι ευχερής η κατάργηση της στεγανωτικής διάταξης, δηλαδή του εμποδίου που συναντά το υπόγειο νερό.



**Σχήμα 3.2** Εξασφάλιση θεμελίου με χημικό ένεμα.

Το στερεοποιημένο εδαφικό υλικό μοιάζει ως προς τη δομή και τη λειτουργία του με το σκυρόδεμα. Επειδή η αντοχή του πήγματος είναι χαμηλότερη από την αντοχή του βελτιωμένου εδάφους, η θλιπτική καταπόνηση μεταφέρεται στον εδαφικό ιστό ενώ το πήγμα διατηρεί τους κόκκους στη θέση τους.

Μεταξύ εδαφών με ίση διαπερατότητα- η οποία επηρεάζεται σημαντικά από την  $d_{10}$  – τα εδάφη με μεγαλύτερο συντελεστή ανομοιομορφίας  $U = d_{60} / d_{10}$  παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής.

Με τις πιο πάνω χημικές μεθόδους η θλιπτική αντοχή του βελτιωμένου εδάφους μπορεί να φτάσει τα  $250 \text{ KN/m}^2$  ως  $800 \text{ KN/m}^2$ .

Οι πόροι πρέπει να γεμίσουν ολοκληρωτικά επειδή αλλιώς οι πιο πάνω τιμές μπορεί να μειωθούν σημαντικά.

Η μείωση φτάνει το 40 % αν το ένεμα γεμίσει μόνο το μισό όγκο των κενών.

Η βράχυνση ( συμπίεση ) πριν τη θραύση είναι 1 ως 1.5 %. Βασικά επιτρέπεται οι τάσεις να φτάσουν υπολογιστικά μέχρι το πολύ το 1/3 της τιμής των τάσεων θραύσης.

Όταν οι εργαστηριακές τιμές χρησιμοποιούνται για τις συνθήκες του εργοταξίου, πρέπει να μειώνονται τουλάχιστον κατά 10 %. Τα γαλακτώματα είναι ασταθή ετερογενή συστήματα τα οποία αποτελούνται από μια υγρή φάση, το διαλυτικό μέσο, και ένα ρευστό κατανεμημένο σε λεπτότατα σταγονίδια(στην περίπτωση μας ασφάλτιο) τα οποία διατηρούνται σταθερά με τη βοήθεια σταθεροποιητικού.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η μεταφορά του ασφάλτιου (μάλθης) σε λεπτότατη κατανομή. Στο έδαφος το γαλακτώμα <<πήζει>> καθώς αρχίζει η δράση του πηκτικού και το ασφάλτιο καθιζάνει.

Τα ασφατικά γαλακτώματα είναι κατάλληλα μόνο για στεγανώσεις, όχι όμως και για σταθεροποιήσεις λόγω της πλαστικότητάς τους.

### 2.3.5. Γενικά χαρακτηριστικά χημικών ενεμάτων

Οι χημικές ενέσεις χρησιμοποιούνται απ' το 1914 για μια μεγάλη ποικιλία σκοπών κι έχουν προταθεί πολλοί τύποι και σχηματισμοί. Ο Terzaghi συσχέτισε πρώτος τα διάφορα γνωστά ενέματα με την κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους, ενώ οι Riddel, Glossop και Skempton καθόρισαν αργότερα τα όρια.

Αυτά τα όρια παρουσίαζαν διαφορές γιατί ήταν εξαρτημένα απ' την ακριβή σύνθεση του ενέματος (συγκέντρωση και ιζώδες), απ' τη μορφή της κοκκομετρικής καμπύλης και το πορώδες του εδάφους.

Γενικά, άμμοι χονδρότερες από 0,8mm μπορούν να ενεθούν με τσιμέντο, ενώ άμμοι χονδρότερες από 0,1mm μπορούν να ενεθούν με πυριτικά άλατα και ασφαλτούχα προϊόντα. Ο Καθηγητής Β. Ρ. Askalohoff, του πανεπιστημίου της Μόσχας, έχει δημοσιεύσει μια σύνθεση παλαιότερων και πρόσφατων εργασιών, πάνω στον τομέα αυτό, που συνοψίζεται ως εξής:

ΤΑΞΗ Α Χονδρόκοκκη άμμος (μεγαλύτερη από 0,8mm) - μπορεί να ενεθεί με αιωρήματα που περιέχουν σωματίδια της τάξης των 50μ.

ΤΑΞΗ Β Μεσαία άμμος (από 0,1-0,8mm) - μπορεί να ενεθεί με κολλοειδή διαλύματα.

ΤΑΞΗ C Εξαιρετικά λεπτή άμμος και ιλύς - μπορούν να ενεθούν με πραγματικά νευτώνεια διαλύματα χαμηλού ιξώδους.

**Οι μελέτες του C. CARON έχουν δείξει ότι:**

- 1) τα χονδρόκοκκα αιωρήματα είναι γενικά, σώματα Bingham (δηλ. έχουν ακαμψία).
- 2) ενέματα σχηματισμένα από κολλοειδή διαλύματα είναι νευτώνεια και το ιξώδες τους αυξάνει με το χρόνο και
- 3) μίγματα βασισμένα σε οργανικά μονομερή, μολονότι είναι επίσης νευτώνεια, έχουν ιξώδες που παραμένει αμετάβλητο στο πέρασμα του χρόνου.

Απ' την άλλη μεριά, έχει παρατηρηθεί ότι η αντοχή σε θλίψη εδάφους που υπέστη επεξεργασία με αιωρήματα τσιμέντου ή αργίλου τσιμέντου (τάξη A), είναι ανεξάρτητη απ' το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, ενώ η αντοχή σε θλίψη εδάφους επεξεργασμένου με προϊόντα των τάξεων B και C είναι μεγαλύτερη, όσο λεπτότερο είναι το έδαφος. Αυτά τα τελευταία προϊόντα συμπεριφέρονται κατά κάποιο τρόπο σαν μέσα συγκόλλησης.

Η μελέτη ενεμάτων των τάξεων B και C πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο τα χαρακτηριστικά του καθαρού προϊόντος, αλλά και τη συμπεριφορά του προϊόντος στο έδαφος. Τα τελευταία 30 χρόνια έχει πραγματοποιηθεί στο πεδίο αυτό σημαντική πρόοδος και είναι πλέον δυνατό και να στεγανοποιήσουμε και να σταθεροποιήσουμε λεπτές άμμους με χρήση κολλοειδών διαλυμάτων.

## ΥΛΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 1. Γαλλική άμμος



**Εικόνα 4.1:** Εμπορική συσκευασία Γαλλικής άμμου.

Σε ό,τι αφορά την άμμο που χρησιμοποιήθηκε (**Εικόνα 4.1**) ήταν πρότυπη γαλλική φυσική άμμος σύμφωνη με τα πρότυπα EN 196-1. Ήταν καθαρή με κυκλικό σχήμα και γενικά ισομετρικά σωματίδια. Το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται από 0,074mm έως 0,85mm όσον αφορά τη διάμετρο τους. Ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι  $C_u$  4.64, ενώ έχει χαρακτηριστεί ως κακώς διαβαθμισμένη σύμφωνα με την ταξινόμηση USCS. Οι φυσικές ιδιότητες της άμμου με σχετική πυκνότητα 50% είναι οι ακόλουθες:

- Ξηρό βάρος ( $\gamma_d$ ) ίσο με 15.8 kN/m<sup>3</sup>,
- Πορώδες 41.6% και
- Συντελεστή διαπερατότητας ( $k$ ) ίσο με  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s.
- Η γωνία τριβής  $\phi$  είναι 32.3° και προσδιορίστηκε από δοκιμές απευθείας διάτμησης σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D 3080-04.

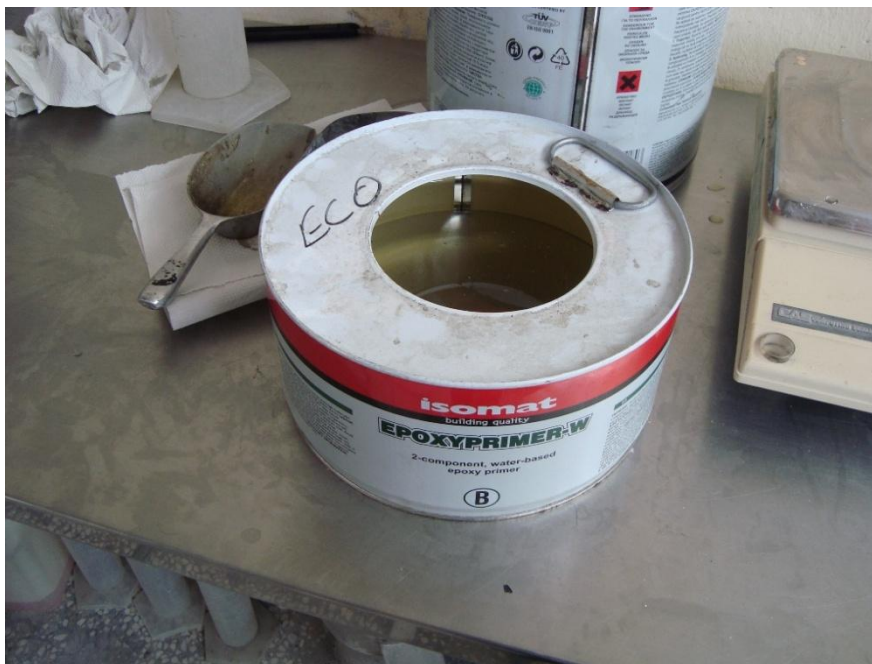
2. Υδατοδιαλυτή Εποξειδική Ρητίνη αποτελούμενη από:

- Την εποξειδική ρητίνη (Συστατικό Α) (**Εικόνα 4.2**) και



**Εικόνα 4.2:** Εμπορική συσκευασία υδατοδιαλυτής εποξειδικής ρητίνης (Συστατικό Α) **Epoxyprimer-W** της εταιρείας **ISOMAT**.

- Τον σκληρυντή (Συστατικό Β) (**Εικόνα 4.3**)



**Εικόνα 4.3:** Εμπορική συσκευασία σκληρυντή (Συστατικό Β) **Epoxyprimer-W** της εταιρείας **ISOMAT**.



Η εποξειδική ρητίνη είναι ένα εμπορικό προϊόν, το οποίο μπορεί κανείς να συναντήσει κανείς με την επωνυμία EPOXY PRIMER-W και διανέμεται από την ελληνική εταιρεία ISOMAT A.E.. Είναι υδατοδιαλυτή και αποτελείται από δύο συστατικά: την εποξειδική ρητίνη και τον σκληρυντή. Η αναλογία του μίγματος κατά βάρος είναι: εποξειδική ρητίνη/σκληρυντής, A/B= 2,5/1. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η εποξειδική ρητίνη, χωρίς την προσθήκη νερού, επιτυγχάνει την τελική της αντοχή μετά το πέρας 7 ημερών. Η μέγιστη θλιπτική αντοχή μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 70 MPa, ενώ η αντοχή σε κάμψη φτάνει τα 35 MPa και η αντοχή σε πρόσφυση έως και τα 3 MPa. Το ιξώδες των γαλακτωμάτων εποξειδικής ρητίνης, ιδίως όταν αναμειγνύονται με μεγάλες ποσότητες νερού, είναι λίγο μεγαλύτερο από το ιξώδες του νερού. Το χαμηλό ιξώδες του γαλακτώματος εποξειδικής ρητίνης σε συνδυασμό με τα μικρού μεγέθους διασκορπισμένα σωματίδια ρητίνης (25-100 nm) στο νερό, επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση του υλικού για σκοπούς έγχυσης-ένεσης, ακόμη και σε ιδιαίτερα λεπτή άμμο.

### **3. Νερό**

Στις **Εικόνες 4.4 και 4.5** που ακολουθούν φαίνεται ο ογκομετρικός κύλινδρος με νερό του Δικτύου Ύδρευσης του Α.Τ.Ε.Ι.Θ. που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δοκιμίων.



**Εικόνα 4.4:** Πόσιμο νερό από το δίκτυο ύδρευσης του Α.Τ.Ε.Ι.Θ.



**Εικόνα 4.5:** Ογκομετρικός κύλινδρος μεταφοράς νερού.

#### 4. Μπετονίτης

Ο μπετονίτης είναι το πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από το αργιλικό ορυκτό μοντμοριλλονίτη,  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ , (N90%), και σχηματίζεται από την εξαλλοίωση όξινων ηφαιστειακών πετρωμάτων. Όταν η περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη είναι μικρότερη (60-80%), το υλικό χαρακτηρίζεται ως “μπεντονιτική άργιλος”. Πήρε το όνομά του από την τοποθεσία Fort Benton της πολιτείας Yoming των Η.Π.Α., όπου πρωτοανακαλύφθηκε και άρχισε να εξορύσσεται.

Ο μοντμοριλλονίτης ανήκει στα αργιλικά ορυκτά, δομής 2:1, αποτελείται δηλαδή από δύο φύλλα τετραέδρων πυριτίου που εμπεριέχουν ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου, σιδήρου και μαγνησίου. Στο διαστρωματικό χώρο, μπορούν να προσροφηθούν κατιόντα και μεγαλομόρια νερού, γι αυτό ο μοντμοριλλονίτης έχει την ιδιότητα της διόγκωσης.

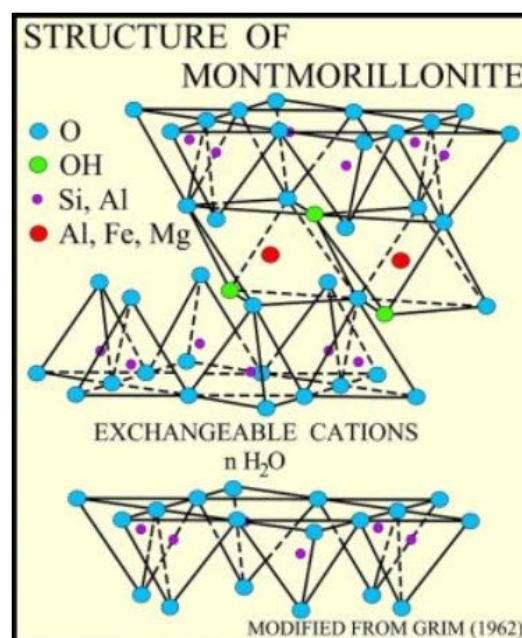
#### 4.1 Ιδιότητες και χρήσεις μπεντονίτη / μοντμοριλλονίτη

Ο μοντμοριλλονίτης χαρακτηρίζεται από μεγάλη προσροφητική ικανότητα, υψηλή πλαστικότητα, δυνατότητα ιοντοανταλλαγής, θιξοτροπία σε ιξώδη αιωρήματα, δυνατότητα να δρα σαν συνδετικό υλικό. Μπορεί να απορροφήσει μεγάλο ποσοστό νερού (περίπου το 75% του όγκου του).

Χρησιμοποιείται σε γεωτρήσεις πετρελαίου (πολφός, λειαντικό, στεγανοποιητικό), σε υδρογεωτρήσεις (στεγανοποιητικό, καθαριστικό τοιχωμάτων), στη σφαιροποίηση σιδηρομεταλλεύματος, σε άμμους χυτηρίων, στην ταφή ραδιενεργών αποβλήτων (δεύσμευση των ραδιενεργών κατιόντων), στην κατασκευή φραγμάτων (συνθετικό τοιμεντενέσεων), σε διαυγαστικές και αποχρωστικές γαίες, σε κεραμικά, στη χαρτοποιία, στη βιομηχανία καλλυντικών, σε απολυμαντικά, σε λιπάσματα και φυτοφάρμακα, στη διάθεση στερεών αποβλήτων κ.α.

##### 4.3.1. Παρουσία κοιτασμάτων μπεντονίτη στην Ελλάδα

Τα βασικότερα κοιτάσματα είναι της Μήλου (Κώμια, Τρογαλάς) και της Κιμώλου. Ο μπεντονίτης της Μήλου περιέχει κυρίως Ca-μοντμοριλλονίτη (σε ποσοστό πάνω από 80%), χαλαζία, αστρίους, καολινίτη και αναλλοίωτο ηφαιστειακό γυαλί. Επίσης αποθέσεις μπεντονίτη υπάρχουν στη Λέσβο, τη Χίο και τον Έβρο (Μέστη, Συκορράχη). Τα ενδεικτικά αποθέματα μπεντονίτη είναι 100 εκατ. τόνοι.



##### 4.3.2. Ο μπετονίτης που χρησιμοποιήσαμε

Ο τύπος μπετονίτη που χρησιμοποιήσαμε είναι ο Zenith-N, ο οποίος είναι ένας Na-activated μπετονίτης από την Μήλο, της βιομηχανίας S&B Industrial Minerals SA.

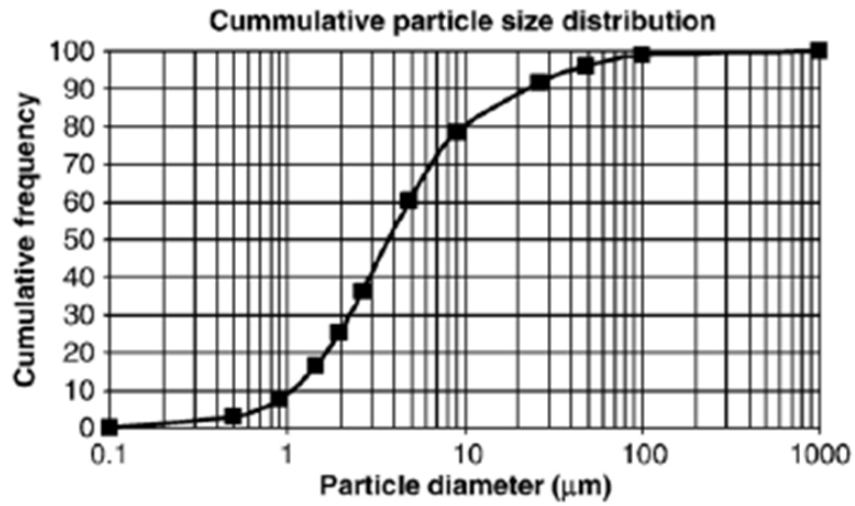
Οι προτεινόμενες δοσολογίες είναι: 6,42 g (μπετονίτης)/ 100 g (νερό).

Η χημική ανάλυση δίνεται στον παρακάτω πίνακα :

Χημική ανάλυση του μπετονίτη Zenith			
Συστατικά	Ποσότητα (%)	Συστατικά	Ποσότητα (%)
Na <sub>2</sub> O	3.70	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5.07
MgO	4.02	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.25
K <sub>2</sub> O	0.65	SiO <sub>2</sub>	59.31
CaO	4.23	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.68	LOI <sup>a</sup>	1.83

MnO	0.08	
<b>Sum</b>		<b>99.83</b>
<sup>a</sup> Απώλεια ανάφλεξης		

Η ανάλυση μεγέθους των σωματιδίων του μπετονίτη παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα :



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 2.1 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε πέντε φάσεις:

- I. Κοσκίνισμα του μη διαβαθμισμένου υλικού για την απόκτηση λεπτόκοκκης διαβαθμισμένης άμμου
- II. Παρασκευή δοκιμίων
- III. Σκλήρυνση των δοκιμίων για 3, 7, 30 και 90 ημέρες.
- IV. Καταπόνηση των δοκιμίων σε δοκιμές:
  - A. Μονοαξονικής θλίψης
  - B. Τριαξονικής δυναμική φόρτιση
- V. Καταγραφή των αποτελεσμάτων και επεξεργασία αυτών.

Η Γαλλική άμμος κοσκινίστηκε σε κατάλληλο κόσκινο το οποίο τοποθετήθηκε σε κατάλληλο δονητικό μηχάνημα (δονητής). Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό δοχείο μέσα στο οποίο έγινε ανάμιξη των υλικών με έναν απλό αναδευτήρα (ικανοποιητικού αριθμού στροφών και αρκετά καλής ταχύτητας). Η ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμίων, ζυγίστηκε σε ζυγαριά μεγάλης ακρίβειας 0.1γρ (**Εικόνα 4.6**). Για την καλύτερη αποκόλληση των σκληρυνόμενων δοκιμίων από την μήτρα παρασκευής τους, χρησιμοποιήθηκε λάδι.



**Εικόνα 4.6:** Ζυγαριά ακριβείας 0.1γρ.

#### Περιγραφή της διαδικασίας

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρειαζόταν άμμος συγκεκριμένης κοκκομετρικής διαβάθμισης (λεπτόκοκκη). Αρχικά τοποθετήθηκε το κόσκινο No 20 με το δοχείο συλλογής κοσκινισμένης άμμου στο κάτω μέρος του, στο δονητικό μηχάνημα (δονητής). Έπειτα γινόταν ρήψη του μη διαβαθμισμένου υλικού στο κόσκινο (**Εικόνα 4.7**).



**Εικόνα 4.7:** Ρήψη της μη διαβαθμισμένης άμμου στο κόσκινο Νο 20.

Ακολούθησε η ενεργοποίηση του δονητικού μηχανήματος με αποτέλεσμα το κοσκίνισμα της άμμου (**Εικόνα 4.8**). Η διαδικασία κοσκινίσματος διαρκούσε κατά μέσο όρο 10 λεπτά της ώρας και ήταν απολύτως αυτόματη χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση.





**Εικόνα 4.8:** Κοσκίνισμα της Γαλλικής άμμου σε κόσκινο Νο 20.



**Εικόνα 4.9:** Κόσκινο τοποθετημένο σε μηχανήμα κοσκινίσματος το οποίο λειτουργεί με δόνηση (δονητής).

Μετά το τέλος του δεκαλέπτου το συγκεντρωμένο υλικό που βρισκόταν στο μεταλλικό δοχείο συλλογής χρησιμοποιούνταν για τη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, (**Εικόνες 4.11-4.12**) ενώ το υλικό που δεν διαπερνούσε το κόσκινο αποθηκευόταν σε διαφορετικό δοχείο για άλλες χρήσεις όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.10**.



**Εικόνα 4.10:** Δοχείο αποθήκευσης υλικού μη διερχόμενο από το κόσκινο Νο 20



**Εικόνα 4.11:** Διαχωρισμός διαβαθμισμένης άμμου από το μη διερχόμενο από το υλικό που συγκρατήθηκε από το κόσκινο.



**Εικόνα 4.12:** Αποθήκευση της κοσκινισμένης άμμου σε πλαστικό δοχείο.

Έπειτα ζυγίζοταν στη ζυγαριά ακριβείας, η κατάλληλη ποσότητα εποξειδικής ρητίνης, σκληρυντή και νερού (**Εικόνες 4.13, 4.14 και 4.15** αντίστοιχα). Σημειώνεται πως το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμών ήταν πόσιμο.



**Εικόνα 4.13:** Ρήψη εποξειδικής ρητίνης (Συστατικό Α) σε μεταλλικό δοχείο και ζύγιση της σε ζυγαριά ακριβείας.



**Εικόνα 4.14:** Ρήψη σκληρυντή (Συστατικό Β) σε μεταλλικό δοχείο και ζύγισή του σε ζυγαριά ακριβείας.



**Εικόνα 4.15:** Ρήψη πόσιμου νερού από ογκομετρικό κύλινδρο σε μεταλλικό δοχείο και ζύγισή του σε ζυγαριά ακριβείας.

Μετά τη ζύγιση των παραπάνω υλικών, πραγματοποιούνταν τοποθέτηση τους σε μεταλλικό δοχείο και ανάδευση τους με κατάλληλο μηχάνημα ανάδευσης πολλών στροφών (**Εικόνα 4.16**). Η διαδικασία ανάδευσης διαρκούσε κατά μέσο 10 λεπτά της ώρας, με σκοπό την διάλυση της εποξειδικής ρητίνης στο νερό και τη δημιουργία ενός ομογενοποιημένου μίγματος (**Εικόνα 4.17**). Στη συνέχεια η κοσκινισμένη άμμος ζυγιζόταν στην ζυγαριά ακριβείας (**Εικόνα 4.18**), πριν την ρίψη της στο δοχείο. Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης των παραπάνω υλικών γινόταν σταδιακή ρίψη κοσκινισμένης γαλλικής άμμου σε κατάλληλη ποσότητα στο μεταλλικό δοχείο (**Εικόνα 4.19**) με σκοπό τον εμποτισμό της άμμου στο μίγμα, καθώς και την ανάδευση με σχετική ευκολία, αφού αν γινόταν ολική ρίψη της άμμου το μίγμα γινόταν ιδιαίτερα σκληρό και η ανάδευση αρκετά δύσκολη.



**Εικόνα 4.16:** Μηχάνημα ανάδευσης πολλών στροφών



**Εικόνα 4.17:** Ανάδευση εποξειδικής ρητίνης, σκληρυντή και πόσιμου νερού σε μεταλλικό δοχείο με κατάλληλο μηχάνημα ανάδευσης.



**Εικόνα 4.18:** Ζύγιση Γαλλικής άμμου σε ζυγαριά ακριβείας πριν τη ρήψη της σε μεταλλικό δοχείο, ώστε να γίνει ανάδευση του μίγματος.



**Εικόνα 4.19:** Ρήψη Γαλλικής άμμου σε μεταλλικό δοχείο και ανάδευση της με το μίγμα εποξειδικής ρητίνης, σκληρυντή και νερού.

Στη συνέχεια αλείφονται με γράσο ή λάδι οι μήτρες στις οποίες θα γίνει ρίψη του μίγματος, το οποίο θα παραμείνει στις μήτρες μέχρι να γίνει η κατάλληλη σκλήρυνση του (**Εικόνα 4.20**). Όλες οι μήτρες ήταν ανοξειδωτες , κυλινδρικού σχήματος και είχαν το ίδιο ύψος, καθώς και την ίδια διάμετρο. Συγκεκριμένα το ύψος των μητρών ήταν 11 cm και η διάμετρος τους 5.43 cm. Ακολουθεί συναρμολόγηση των μητρών. Στις παλαιού τύπου μήτρες χρησιμοποιήθηκαν βιδωτοί μεταλλικοί σφικτήρες (**Εικόνα 4.21**), ενώ στις καινούργιου τύπου, σταθεροί πλαστικοί δακτύλιοι (**Εικόνα 4.22**).



**Εικόνα 4.20:** Αλοιφή των μητρών με γράσο φορώντας κατάλληλα μέτρα ατομικής προστασίας (χειρουργικά γάντια).



**Εικόνα 4.21:** Συναρμολόγηση των παλαιού τύπου ανοξείδωτων μητρών και βίδωμα των μεταλλικών σφικτήρων με κατσαβίδι.





**Εικόνα 4.22:** Συναρμολογημένη μήτρα νέου τύπου με σταθερούς πλαστικούς σφιγκτήρες – δακτύλιοι.

Γράσο τοποθετήθηκε και στον πυθμένα των μητρών και συγκεκριμένα στην επιφάνεια επαφής του τραπεζιού με την μήτρα. Η ενέργεια αυτή είχε ως σκοπό την ευκολότερη αποκόλληση των μητρών μετά το πέρας της σκλήρυνσης των δοκιμίων.

Στη συνέχεια έγινε ρίψη του μίγματος στις ήδη συναρμολογημένες μήτρες με μεγάλη προσοχή, ώστε να μην ξεχειλίσει το μίγμα (**Εικόνα 4.23**). Η ρίψη πρέπει να πραγματοποιείται σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο, για να μην προλάβει να πήξει το μίγμα και γίνει αδύνατη η ρίψη του. Ακολούθησε συμπύκνωση του με κατάλληλη πλαστική ράβδο (**Εικόνα 4.25**). Η συμπύκνωση έγινε έτσι ώστε το μίγμα να απλωθεί ομοιόμορφα στη μήτρα, δηλαδή να μην πέσει το στερεό υλικό στον πυθμένα και στην επιφάνεια μείνει μόνο υγρό υλικό. Σε μια τέτοια περίπτωση, το δοκίμιο δεν θα παρουσίαζε ομοιογένεια, γεγονός το οποίο θα έπαιζε αρνητικό ρόλο στην αντοχή του.



**Εικόνα 4.23:** Ρίψη του τελικού μίγματος στις συναρμολογημένες μήτρες.

Στον πυθμένα του μεταλλικού δοχείου ανάμιξης του μίγματος μαζεύονταν στερεό υλικό και ήταν αδύνατη η ρίψη του στις μεταλλικές μήτρες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε σπάτουλα ή πλαστικό κουτάλι, ώστε να επιτευχθεί αφαίρεση του μίγματος από τον πυθμένα (**Εικόνα 4.24**).



**Εικόνα 4.24:** Αφαίρεση του μίγματος από τον πυθμένα με τη βοήθεια σπάτουλας.



**Εικόνα 4.25:** Συμπύκνωση του μίγματος με κατάλληλη πλαστική ράβδο για ομογενοποίηση του υλικού.

Κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης παρατηρήθηκε διαρροή νερού από τον πυθμένα των μητρών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην περίσσεια του υγρού μίγματος λόγω, της πλήρους κάλυψης των πόρων του μίγματος. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.26**, στην αρχή υπήρχε λιμνάζων υγρό στην επιφάνεια του μίγματος, ενώ κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης το λιμνάζων υγρό υποχωρούσε σταδιακά και διαρρέονταν από τον πυθμένα της μήτρας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.27**.



**Εικόνα 4.26:** Λιμνάζων υγρό στην επιφάνεια του μίγματος αμέσως μετά την ρήξη του υλικού στις μήτρες.



**Εικόνα 4.27:** Φαινόμενο διαρροής υγρού κατά τη διάρκεια σκλήρυνσης του μίγματος.

Μετά το πέρας των εκάστοτε ημερών γινόταν αποσυναρμολόγηση των μητρών με ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη αστοχία στα δοκίμια. Οι μήτρες υπόκεινται σε ελαφρά χτυπήματα στα άκρα τους σε σταθερό συμπαγές υλικό (τραπέζι, πάτωμα κ.λπ), με σκοπό να αποκολληθεί το δοκίμιο από το τοίχωμα τους. Η ίδια διαδικασία γινόταν και με πλαστικό σφυρί. Το χρονικό διάστημα, το οποίο χρειαζόταν για να γίνει η αποσυναρμολόγηση των μητρών εξαρτιόταν από την εκάστοτε αναλογία εποξειδικής ρητίνης/νερό. Όσο πιο υγρό ήταν το μίγμα, τόσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα απαιτούνταν μέχρι την αποσυναρμολόγηση των μητρών. Αναλυτική περιγραφή των αναλογιών θα γίνει παρακάτω. Τα δοκίμια μετά την αποσυναρμολόγηση τους, συντηρούνται, πήζουν και σκληραίνουν στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η αποθήκευση τους έγινε σε κλειστό χώρο, σε συνθήκες δωματίου, χωρίς υγρασία. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνονται: τα δοκίμια κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης τους εντός των μητρών (**Εικόνα 4.28-4.29**) και μετά την αποκόλληση τους από τις μήτρες, αφού είχε ήδη συμπληρωθεί το απαιτούμενο χρονικό διάστημα σκλήρυνσης τους μέσα στις

μεταλλικές μήτρες (**Εικόνα 4.30**). Σημειώνεται ότι μετά την σκλήρυνση του δοκιμίου σε μερικά δοκίμια παρατηρήθηκε στην επιφάνεια τους μια κρούστα, με χρώμα σκούρο κίτρινο, η οποία δημιουργήθηκε από την συγκέντρωση εποξειδικής ρητίνης στο σημείο αυτό (**Εικόνα 4.31**).



**Εικόνα 4.28:** Δοκίμια εντός των μητρών κατά τη διάρκεια σκλήρυνσης τους.



**Εικόνα 4.29:** Δοκίμια μέσα σε μήτρες πριν την αποκόλληση τους από αυτές.



**Εικόνα 4.30:** Δοκίμιο μετά την αποκόλληση του από την μήτρα.



**Εικόνα 4.31:** Εποξειδική ρητίνη σε στερεά μορφή στην επιφάνεια του δοκιμίου μετά την σκλήρυνση του.

#### 4.1. ΜΕΤΡΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν τα απαιτούμενα Μέτρα Ατομικής Προστασίας (ΜΑΠ). Λόγω της έντονης οσμής που εκλύεται από την εποξειδική ρητίνη και από τον σκληρυντή οι ερευνητές πρέπει να φοράνε ιατρικές μάσκες, που καλύπτουν τη μύτη και το στόμα (**Εικόνες 4.32 και 4.33**). Για την αποφυγή της επαφής του δέρματος με υλικά όπως εποξειδική ρητίνη, σκληρυντής, γράσο και λάδι, απαραίτητη είναι η χρήση ιατρικών γαντιών (**Εικόνα 4.34**).





**Εικόνα 4.32:** Χρησιμοποίηση ιατρικής μάσκας κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.



**Εικόνα 4.33:** Ιατρική μάσκα για την προστασία του προσώπου.



**Εικόνα 4.34:** Ιατρικά γάντια για την προστασία των χεριών.

#### 4.1.1. ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΤΙΚΗ ΣΗΜΑΝΣΗ

Στο χώρο που πραγματοποιήθηκε η έρευνα, συγκεκριμένα στο εργαστήριο σκυροδέματος του Α.Τ.Ε.Ι.Θ., υπήρχε η απαιτούμενη σήμανση για την ασφάλεια και υγιεινή των ερευνητών. Συγκεκριμένα υπήρχαν προειδοποιητικές πινακίδες στα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν και στους τοίχους του εργαστηρίου, όπως φαίνεται και στις **Εικόνες 4.35, 4.36, 4.37 και 4.38.**



**Εικόνα 4.35:** Σήμανση για υποχρεωτική συμπεριφορά, απαγόρευση, κίνδυνο και προειδοποίηση στους τοίχους του εργαστηρίου.



**Εικόνα 4.36:** Προειδοποιητική πινακίδα κινδύνου.



**Εικόνα 4.37:** Πινακίδα αγόρευσης αναρτημένη στο μηχάνημα θραύσης δοκιμών.



**Εικόνα 4.38:** Πινακίδα προειδοποίησης κινδύνου ηλεκτροπληξίας.

#### 4.1.2. ΚΟΥΤΙ ΠΡΩΤΩΝ ΒΟΗΘΕΙΩΝ

Ο χώρος του εργαστηρίου είναι εξοπλισμένος με κουτί πρώτων βοηθειών (βλέπε **Εικόνα 4.39**). Στο κουτί υπάρχει το ελάχιστο απαιτούμενο ιατροφαρμακευτικό υλικό:

- > Σκεύασμα για κάψιμο/έγκαυμα (σε σωληνάρια ή πακέτα)
- > Εσπνεύσιμη αμμωνία
- > Σπασμολυτικό (πόννοι μαλακών μυών κλπ.)
- > Επίδεσμοι γάζας των 0,10 x 2,50 m
- > Τριγωνικός επίδεσμος (κρεμάθρα)
- > Λευκοπλάστ ρολό
- > Ψαλίδι
- > Τομπίδα
- > Ύφασμα λεπτό καθαρισμού (cleansing tissue, βαμβάκι)

- Αντισηπτικό διάλυμα (προτίμηση Μερκουροχρώμ)
- Υγρό σαπούνι σε πλαστική συμπιέσιμη φιάλη
- Ελαστικός επίδεσμος
- Αντισταμινική αλοιφή (έντομα, αλλεργίες κλπ.)
- Αποστειρωμένες γάζες, κουτιά των 5cm , 10cm και 15cm



**Εικόνα 4.39:** Κουτί πρώτων βοηθειών πλήρως εξοπλισμένο με ιατροφαρμακευτικό υλικό.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Μελετώντας τα δοκίμια σε ηλικία τριών (3), επτά (7), τριάντα (30) και ενενήντα (90) ν σε μονοαξονική θλίψη με την βοήθεια του σερβοϋδραυλικού μηχανήματος καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα.

Code		3 DAYS	7 DAYS	30 DAYS	90 DAYS
ΑΠ1	ER/W=0.5 and 1.5% B	-	-	0.4	0.75
Z1	ER/W=0.5 and 2.5% B	-	0.3	0.61	0.91
Z2	ER/W=0.5 and 5% B	-	0.4	0.7	1.05
ΑΠ2	ER/W=1 and 1.5% B	0.48	0.6	0.95	1.65
Z3	ER/W=1 and 2.5% B	0.51	0.7	1.45	2.05
Z4	ER/W=1 and 5% B	0.61	0.8	1.6	2.18
ΑΠ3	ER/W=1.5 and 1.5% B	0.6	0.75	1.3	3.1
Z5	ER/W=1.5 and 2.5% B	0.73	0.96	2.1	3.67
Z6	ER/W=1.5 and 5% B	0.77	1.19	2.24	3.78
ΑΠ4	ER/W=2 and 1.5% B	0.65	1	1.7	3.5
Z7	ER/W=2 and 2.5% B	0.86	1.12	2.43	3.7
Z8	ER/W=2 and 5% B	0.95	1.28	2.67	3.85

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι:

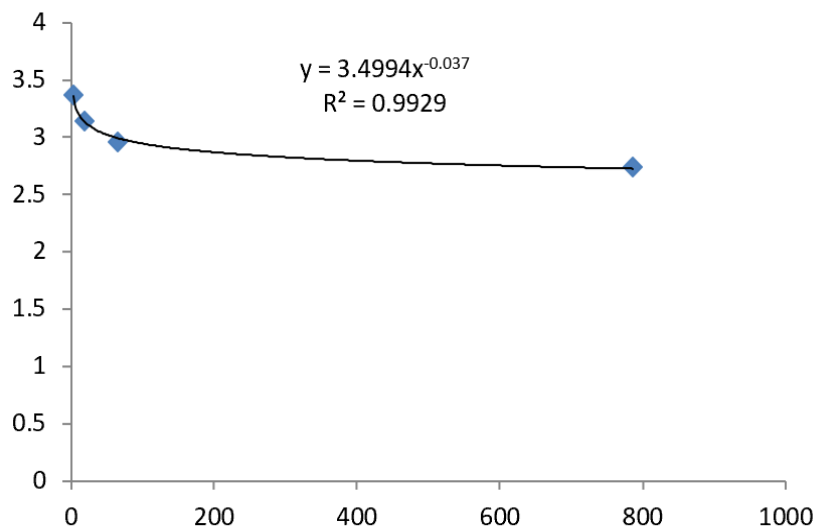
- I. Ο χρόνος ωρίμανσης επηρεάζει αισθητά τη θλιπτική αντοχή του δοκιμίου.  
Για παράδειγμα στα δοκίμια Z4, υπάρχει σταδιακή αύξηση από 0.61MPa στις δοκιμές των τριών ημερών σε 2.18MPa στις δοκιμές των 90 ημερών.
- II. Όσο μεγαλύτερη η αναλογία εποξειδικής ρητίνης προς νερό, τόσο πιο μεγάλη είναι και η αντοχή στη θλίψη.  
Για παράδειγμά, αν δούμε τα δοκίμια Z2, Z4, Z6 και Z8 στις θραύσεις των 30 ημερών, όπου όλα έχουν το ίδιο ποσοστό μπεντονίτη, θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει θεαματική αύξηση της αντοχής από 0.7MPa στα 2.67MPa.
- III. Το ποσοστό προσθήκης του μπεντονίτη έχει σημαντική αλλαγή στα αποτελέσματα. Όσο πιο μεγάλο το ποσοστό, τόσο πιο μεγάλη και η αντοχή του δοκιμίου.  
Και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στα δοκίμια ΑΠ2, Z3 και Z4, όπου έχουν ίδια αναλογία ER/W, στις δοκιμές των 90 ημερών, όπου η αντοχή για 1,5% μπεντονίτη είναι 1.65, αυξάνεται σε 2.05 για 2,5% μπεντονίτη και φτάνει στο 2.18 για 5% μπεντονίτη.

Τα ίδια αποτελέσματα μπορούν να παρατηρηθούν αν αναλύσουμε τα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων, στο παρακάτω πίνακα:

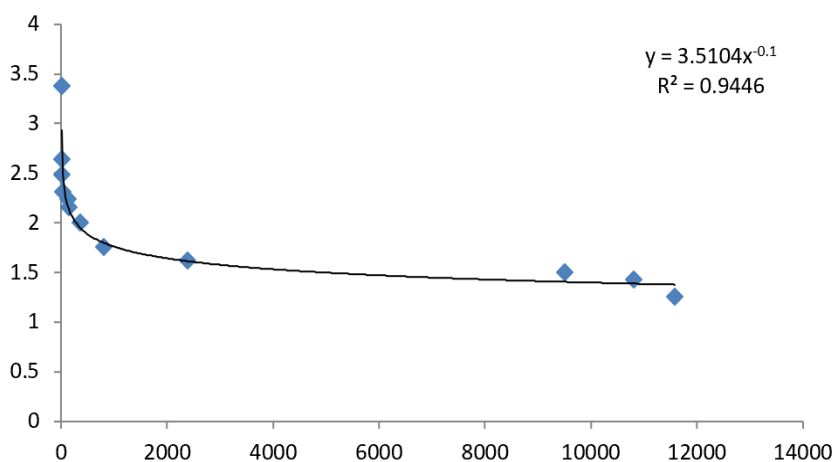
Code		3 DAYS	7 DAYS	30 DAYS	90 DAYS
ΑΠ1	ER/W=0.5 and 1.5% B	-	-	85	155
Z1	ER/W=0.5 and 2.5% B	-	50	118	164
Z2	ER/W=0.5 and 5% B	-	58	130	190
ΑΠ2	ER/W=1 and 1.5% B	40	55	167	255
Z3	ER/W=1 and 2.5% B	44	62	200	320
Z4	ER/W=1 and 5% B	49	70	215	345
ΑΠ3	ER/W=1.5 and 1.5% B	55	75	235	315
Z5	ER/W=1.5 and 2.5% B	63	80	300	370
Z6	ER/W=1.5 and 5% B	70	95	315	385
ΑΠ4	ER/W=2 and 1.5% B	60	73	295	395
Z7	ER/W=2 and 2.5% B	68	84	325	405
Z8	ER/W=2 and 5% B	76	110	345	418

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

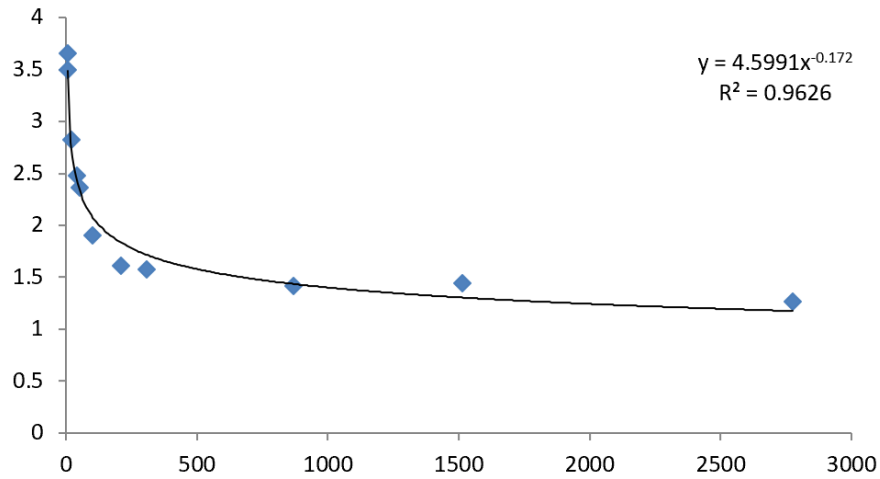
Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα σμαx προς μέγιστο αριθμό κύκλων πριν την θραύση των δοκιμίων.



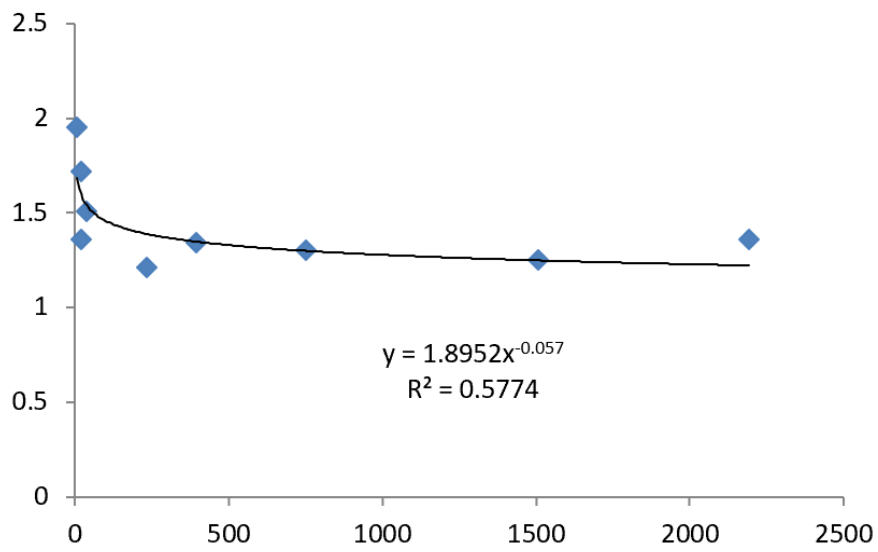
Διαγραμμα 3.1. Z3, ER/W=1, B=2.5%



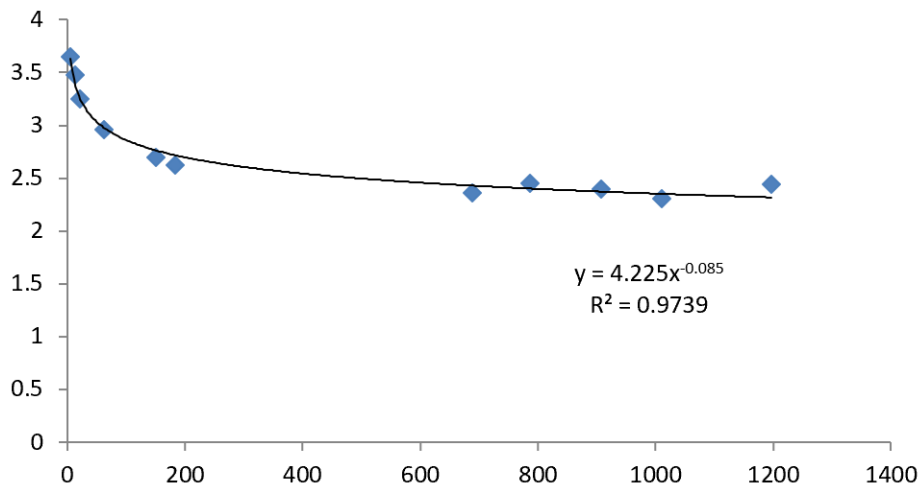
Διαγραμμα 3.2. Z5, ER/W=1.5, B=2.5%



Διαγράμμα 3.3. Z7, ER/W=2, B=2.5%

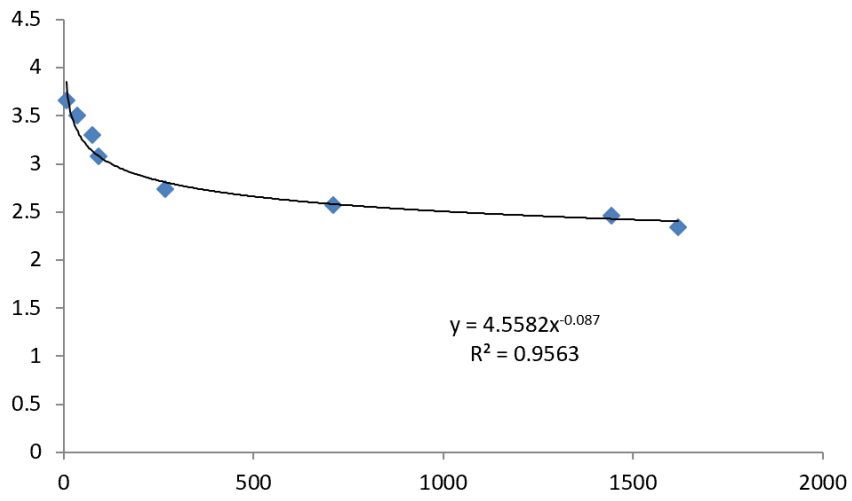


Διαγράμμα 3.4. Z4, ER/W=1, B=5%



Διαγράμμα 3.5. Z6, ER/W=1.5, B=5%





**Διαγραμμα 3.6.** Z8, ER/W=2, B=5%

## Βιβλιογραφία

1. Σοϊλεμεζίδης, Β. (2010). *Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ενεμένων αμμωδών υλικών με εποξειδικές ρητίνες*. Θεσσαλονίκη, Πτυχιακή εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Ίδρυμα.
2. Καραβάτος, Σ. *Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες Χημικά Ενεμένης Άμμου*. Θεσσαλονίκη, Πτυχιακή εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Ίδρυμα.
3. Σταυριδάκης, Ε. *Μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών*. Θεσσαλονίκη, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
4. Ιστοσελίδα: <http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/56-mpedonitis> .  
Στοιχεία για τον μπετονίτη.
5. Ιστοσελίδα: <https://www.isomat.gr/wp-content/uploads/2015/12/s-epoxyprimer-w.pdf> . Στοιχεία για την ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε.