

*... Αφιερωμένο στον κο Αναγνωστόπουλο, τον άνθρωπο που ήταν δίπλα μας κάθε στιγμή, στους γονείς μας, καθώς και στο αγαπημένο μας τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ, που ευχόμαστε να ξεπεράσει όλες τις δυσκολίες που συναντά τον τελευταίο καιρό.*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία «Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες Ενεμάτων Τροποποιημένων με Τασιενεργές Ενώσεις και Πολυμερικά Γαλακτώματα» απευθύνεται κατά κύριο λόγο στους σπουδαστές του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών των Τ.Ε.Ι. της χώρας και στοχεύει στην παροχή των γνώσεων, που απαιτούνται στον τομέα της ενίσχυσης των εδαφών.

Αποτελεί πειραματική έρευνα, εκτός από πτυχιακή εργασία, στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ενεμένης άμμου με υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη. 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 έξι κεφάλαια, που το καθένα έχει τη δική του ιδιαιτερότητα:

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρει θεωρητικές πληροφορίες για την κατηγορία των ρητινών, που περιλαμβάνει τη χημεία των ρητινών, τα γενικά τους χαρακτηριστικά, επισκευές ρωγμών σε σκυρόδεμα και εφαρμογές.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ενίσχυση των εδαφών. Συγκεκριμένα αναφέρεται στις μεθόδους ενίσχυσης τους, αλλά περιλαμβάνει και πλούσιο υλικό φωτογραφιών από ατυχήματα, λόγω αστοχίας των εδαφών.

Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει τα είδη των εδαφών, τα διαχωρίζει, και παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες τους.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελείται από την πειραματική διαδικασία. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην παραγωγή των δοκιμίων, τη συντήρηση, αλλά και στις διάφορες δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών, στις οποίες καταπονήθηκαν τα δοκίμια. Περιλαμβάνονται αναλυτικοί πίνακες και διαγράμματα από κάθε δοκιμή, καθώς μέσω αυτών βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλεκτρόλυση. Για ποιο λόγο πρέπει κάποιος να καταφύγει στη λύση της ηλεκτρόλυσης, ποιες είναι οι εφαρμογές της, αλλά και ποια η χημική της διάσταση. Αναλύεται επίσης η πειραματική διαδικασία της ηλεκτρόλυσης και τα αποτελέσματα της, μέσω πινάκων και διαγραμμάτων.

Η βιβλιογραφία που παρατίθεται στις τελευταίες σελίδες του βιβλίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιον που επιθυμεί να εμβαθύνει τις γνώσεις του στο συγκεκριμένο αντικείμενο, αλλά και για να έχει πληρέστερη θεωρητική κάλυψη.

Τέλος υπάρχει η ανάγκη έκφρασης ευχαριστιών προς το πρόσωπο του καθηγητή του τμήματος Π.Ε.Υ./Α.Τ.Ε.Ι.Θ. και Αναγνωστόπουλου Κωνσταντίνου, για την πολύτιμη συνεργασία του, αλλά και στον φίλο και συμφοιτητή Καραβάτο Σαραφιανό για την καταλυτική συμμετοχή του στην πειραματική διαδικασία.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 1

<b>ΡΗΤΙΝΕΣ.....</b>	<b>8</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	8
1.2. Χημεία των ρητινών.....	9
1.2.1. Ταξινόμηση πολυμερών .....	9
1.2.2. Παραγωγή και σκλήρυνση εποξειδικής ρητίνης.....	16
1.3. Κατηγορίες ρητινών.....	17
1.3.1. Εφαρμογές.....	18
1.4. Επισκευές ρωγμών στο σκυρόδεμα με ρητινενέσεις.....	21
1.4.1. Φύση του προβλήματος-απαιτήσεις.....	21
1.4.2. Λύση.....	21
1.4.3. Εφαρμογή.....	21
1.4.4. Σημειώσεις.....	22
1.5. Ενίσχυση φέροντος δομικού στοιχείου με μανδύα .....	24
1.5.1. Φύση του προβλήματος-απαιτήσεις.....	24
1.5.2. Λύση.....	24
1.5.3. Εφαρμογή.....	24
1.5.4. Σημειώσεις.....	26
1.6. Σύνθεστες αποκαταστάσεις-επικόλληση ελασμάτων σε σκυρόδεμα.....	28
1.6.1. Φύση του προβλήματος-απαιτήσεις.....	28
1.6.2. Λύση.....	28
1.6.3. Εφαρμογή.....	28
1.6.4. Σημειώσεις.....	29
1.7. Ρητινένωση σε ακραίες κλιματολογικές συνθήκες.....	31
1.8. Γενικά χαρακτηριστικά των εποξειδικών ρητινών.....	32

1.8.1. Ορισμός.....	32
1.8.2. Φυσικές ιδιότητες.....	32
1.8.3. Χημικές ιδιότητες.....	33
1.8.4. Διαλυτότητα.....	33
1.8.5. Ανθεκτικότητα.....	33
1.8.6. Ιξώδες.....	33
1.8.7. Ιστορικό χρήσης εποξειδικών ρητινών.....	34
1.9. Χρήσεις εποξειδικών ρητινών.....	35
1.9.1. Περιπτώσεις χρήσης εποξειδικών ρητινών.....	35
1.9.2. Άλλες χρήσεις.....	35
1.10. Τρόπος ελέγχου.....	35
1.10.1. Συσκευασία των εποξειδικών συγκολλητικών μέσων.....	36
1.10.2. Αποθήκευση εποξειδικών ρητινών.....	36
1.11. Βασικές εφαρμογές.....	36
1.12. Υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη.....	38
1.12.1. Γιατί εποξειδική ρητίνη;.....	38
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 2</b>	
<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ.....</b>	<b>40</b>
2.1. Περίληψη – ιστορικά στοιχεία.....	40
2.1.1. Εισαγωγή.....	41
2.2. Βελτιώσεις εδαφών.....	42
2.2.1. Μέθοδοι βελτίωσης κατά Attewell & Farmer, Τσότσο & Van Impe.....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 3</b>	
<b>ΕΙΔΗ ΕΛΑΦΩΝ.....</b>	<b>64</b>
3.1. Γενικά.....	64
3.2. Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη.....	66
3.2.1. Γενικές κατηγορίες εδαφών.....	69

3.2.2. Χονδρά και λεπτά κλάσματα.....	70
3.2.3. Ορυκτολογική σύνθεση.....	71
3.2.4. Μεγέθη κόκκων.....	72
3.2.5. Σχήμα κόκκων.....	73
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 4</b>	
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>79</b>
4.1. Παρασκευή δοκιμίων.....	79
4.2. Μέτρα Ατομικής Προστασίας.....	99
4.2.1. Προειδοποιητική σήμανση.....	100
4.2.2.Κουτί πρώτων βοηθειών.....	102
4.3. Εργαστηριακές δοκιμές.....	104
4.3.1. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	104
4.3.2. Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian Test).....	110
4.3.3. Δοκιμή τριαξονικής θλίψης.....	111
4.4. Συμπεράσματα.....	122
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 5</b>	
<b>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>123</b>
5.1. Γενικά.....	123
5.2. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	124
5.2.1.Χρόνος σκλήρυνσης 7 ημέρες.....	126
5.2.2. Χρόνος σκλήρυνσης 28 ημέρες.....	130
5.2.3.Χρόνος σκλήρυνσης 90 ημέρες.....	135
5.2.4. Χρόνος σκλήρυνσης 180 ημέρες.....	139
5.3. Μέτρο ελαστικότητας.....	146
5.4. Δοκιμή κατά γενέτειρα-Brazilian Test.....	148
5.5. Δοκιμή τριαξονικής θλίψης.....	152
5.5.1.Χρόνος σκλήρυνσης 7 ημέρες.....	152

5.5.2. Χρόνος σκλήρυνσης 28 ημέρες.....	161
5.5.3. Χρόνος σκλήρυνσης 90 ημέρες.....	173
5.6. Συμπεράσματα.....	185
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 6</b>	
<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....</b>	<b>186</b>
6.1. Γενικά.....	186
6.1.1. Παράγοντες ενίσχυσης της ηλεκτρόλυσης.....	187
6.2. Παραδείγματα ηλεκτρολυτικής διάβρωσης .....	187
6.2.1. Αρνητικές συνέπειες ηλεκτρολυτικής διάβρωσης .....	188
6.3. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	189
6.4. Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	193
6.4.1. Θλιπτική αντοχή.....	195
6.4.2. Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.....	197
6.4.3. Μέτρο ελαστικότητας.....	199
6.5. Συμπεράσματα.....	201
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>202</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 1

### ΡΗΤΙΝΕΣ

#### 1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η λέξη «εποξεική» προέρχεται από δύο ελληνικές λέξεις, από το πρόθεμα - επί, που σημαίνει “πάνω” και **οξύ**, που σημαίνει “οξύς / όξινο”. Η ιστορία της εποξικής χημείας άρχισε πιθανότατα στις αρχές του 1900, όταν ο Ρώσος χημικός Prileschajev ανακάλυψε ότι οι ολεφίνες αντιδρούν με το υπεροξειδίο 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 δισφαινόλη 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 συνδεδεμένες 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:

- 1) Τις αντιδράσεις **πολυπροσθήκης**, ή αλυσιδωτού πολυμερισμού και
- 2) Τις αντιδράσεις **πολυσυμπύκνωσης**.

Τα πολυμερή που παράγονται χαρακτηρίζονται ως πολυμερή αλυσιδωτού πολυμερισμού ή πολυμερή συμπύκνωσης αντίστοιχα.

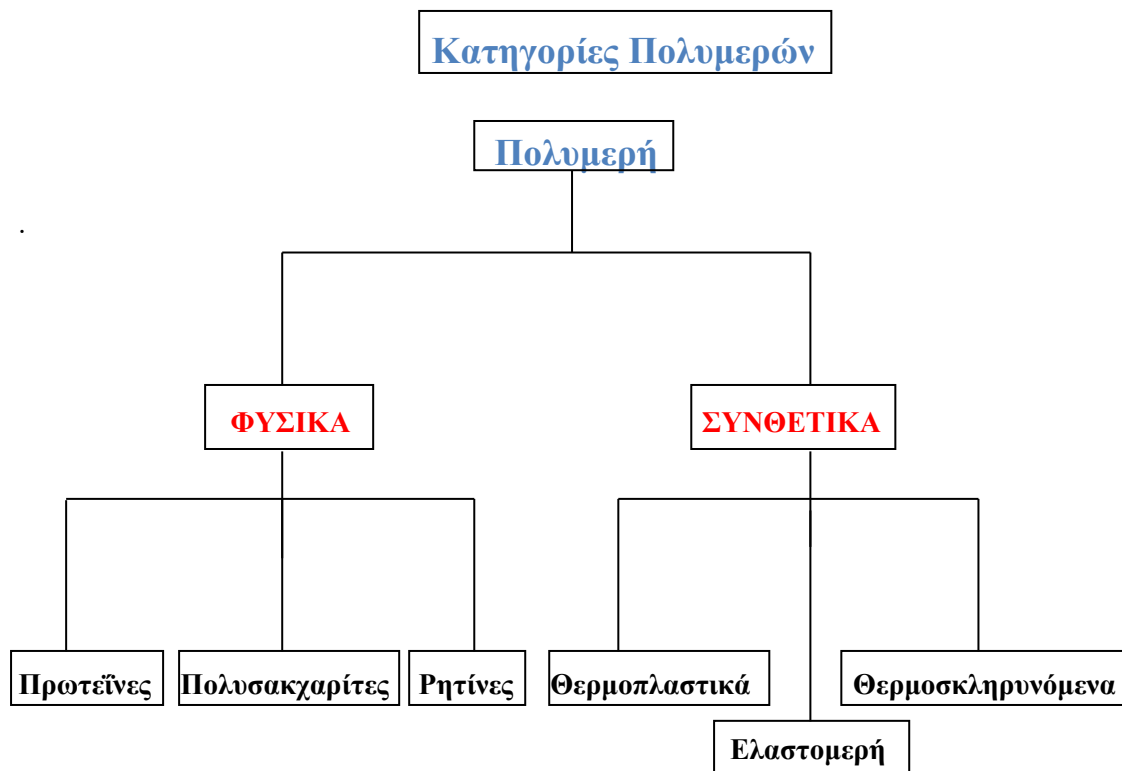
### 1.2.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

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 :

- πρωτεΐνες,
- πολυσακχαρίτες και
- ρητίνες.

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία είναι αυτή των συνθετικών πολυμερών. Αυτά με τη σειρά τους διαιρούνται σε:

- θερμοπλαστικά,
- ελαστομερή και
- 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):

$$\text{Βαθμός πολυμερισμού} = \frac{\text{Μοριακό βάρος πολυμερούς στοιχείου}}{\text{Μοριακό βάρος μονομερούς στοιχείου}} \quad (1.1)$$

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

- 1) Στα **φυσικά** πολυμερή και
- 2) Στα **συνθετικά** πολυμερή

Τα **συνθετικά** πολυμερή μπορούν επίσης να διαιρεθούν βάσει:

- 1) Της **χημικής** δομής
- 2) Της **θερμικής** συμπεριφοράς
- 3) Της **χρηστικής** ιδιότητας

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

Τα πολυμερή βάσει της χημικής δομής διαιρούνται σε δυο κατηγορίες:

- 1) Στα **ομοιοπολυμερή** (ή απλώς πολυμερή ) τα οποία προέρχονται από την επανάληψη μιας και μόνης δομικής μονάδας .
- 2) 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 , διαιρούνται 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.

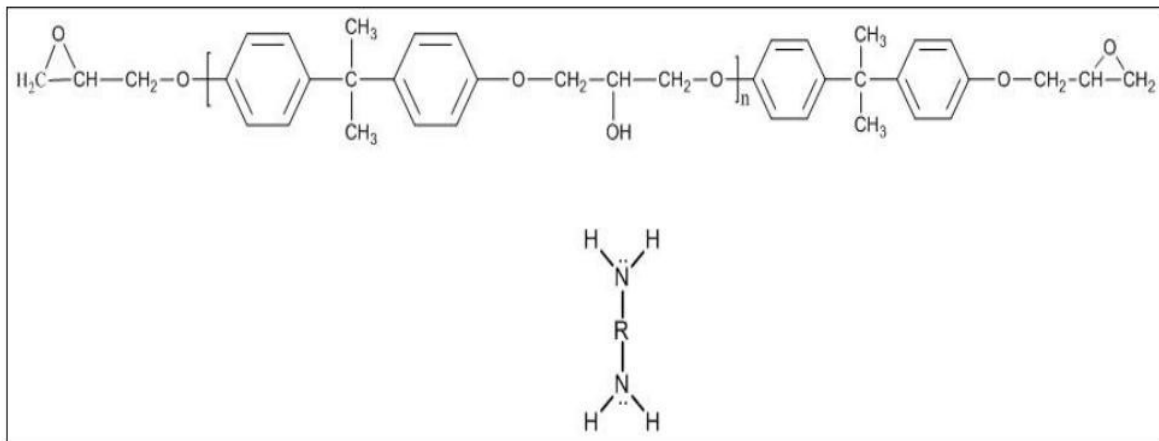
**Χαρακτηριστικά Θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών:**

- Πολύ σκληρά,
- Ανθεκτικά στην θερμότητα,
- Δεν μορφοποιούνται με πλαστικότητα ,
- Άτηκτα,
- Αδιάλυτα
- 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.

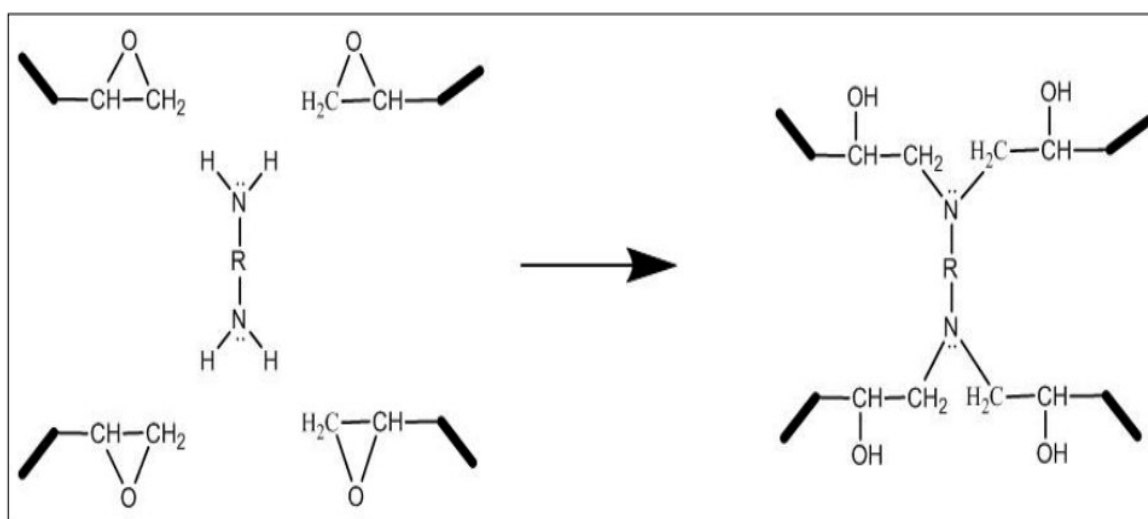
Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και χαρακτηρίζονται από την παρουσία του οξιρανικού δακτυλίου. Ανάλογα με τον αριθμό των δακτυλίων που βρίσκονται παρόντες στο μόριο, οι εποξειδικές ρητίνες χωρίζονται σε διδραστικές (δύο οξιρανικοί δακτύλιοι), ή πολυδραστικές (τρεις ή περισσότεροι δακτύλιοι). Ο οξιρανικός δακτύλιος αντιδρά με ένα ευρύ φάσμα άλλων οργανικών ενώσεων. Για την ένωση δυο 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. Ενίοτε, 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.



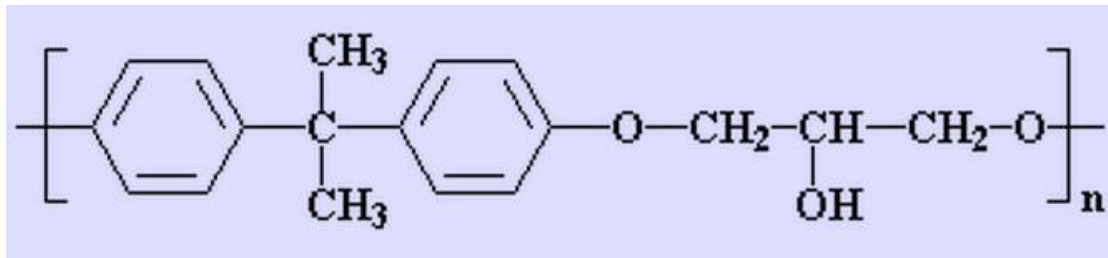
**Σχήμα 1.2:** Διδραστικό μόριο και εκκινητής (διαμίνη)

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



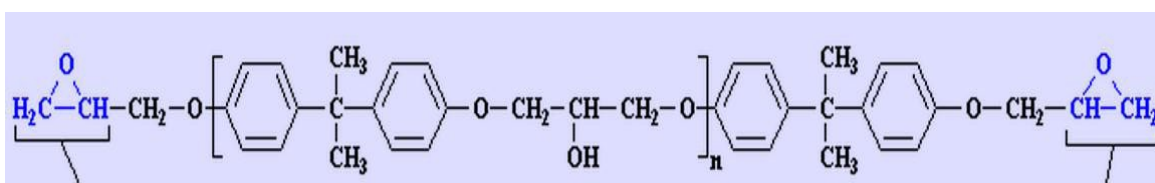
**Σχήμα 1.3:** Σχηματική αναπαράσταση αντίδρασης διαμίνης με τους οξιρανικούς δακτυλίους μακρομορίων

**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 μικροσκοπίων, 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.



**Έποξυ - ομάδα**

**Έποξυ - 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:

- **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.
- Η επεξεργασία των ρητινών είναι εύκολη και γρήγορη για θερμοκρασίες από **50° C** μέχρι **1500° C** και εξαρτάται από την εκλογή του πρόσθετου.
- Υψηλές μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να οφείλονται στη μικρή συστολή τους (με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η παρουσία τάσεων).
- Άριστη **ηλεκτρική μόνωση**.
- 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.
- **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).
- 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.
- **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 :

- Διγλυκοδιλαιθέρας της διφαινόλης A (DGEBRA) ,
- Τετραγλυκιδιλαιθέρας της διανυλίνης (TGMDA) ,
- Εποξειδική φαινολοκρεζολικής νεολάκης,
- Κυκλοαλειφατικές εποξειδικές (CA).

## 1.2.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ

Οι συνηθέστερες εποξειδικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης Α, όπου παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης Α. Οι εποξειδικές ρητίνες τελικά μετατρέπονται σε θερμοσκληρυνμένο 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 αγωγίμα και μη αγωγίμα 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:

➤ **Σκληρυνόμενες τεχνητές ρητίνες :**

i. **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 αναμειγνύονται 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.

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

➤ **Ρητίνες για βερνίκια , μέσα διαποτίσεως, κόλλες κλπ :**

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

ii. **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. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

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 πολουρεθανικό 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:

- Ως υλικό οι εποξειδικές ρητίνες έχουν αντοχή **5-10** φορές μεγαλύτερη από το σκυρόδεμα σε **θλίψη** και **2-6** φορές σε **εφελκυσμό**.
- Η πρόσφυση με το σκυρόδεμα και το χάλυβα είναι υψηλή.
- Παρουσιάζουν μικρή συστολή ξήρανσης και μικρό βαθμό ερπυσμού.
- Έχουν μεγάλη συγκολλητική ικανότητα.
- Είναι υλικό με χαμηλό ιξώδες, γεγονός που επιτρέπει την εισχώρηση σε όλο το βάθος της ρωγμής.
- Μικρή έως καθόλου μείωση της συνάφειας με τη πάροδο του χρόνου και εξαιρετική ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές προσβολές.
- Δεν παρουσιάζουν γήρανση.
- 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. ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΡΗΤΙΝΕΝΕΣΕΙΣ**

### **1.4.1. ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ-ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ**

Οι ρωγμές σε στοιχεία σκυροδέματος (δοκούς, πλάκες, υποστρώματα, τοιχία κλπ.) δημιουργούν πρόβλημα στη μονολιθικότητα και την αντοχή του δομικού στοιχείου.

### **1.4.2. ΛΥΣΗ**

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση της μονολιθικότητας του δομικού στοιχείου, ώστε να εξασφαλισθεί η δυνατότητα του στοιχείου να λειτουργεί όπως σχεδιάστηκε αρχικά, πρέπει να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Υψηλές μηχανικές αντοχές.
- Άριστη πρόσφυση και μεγάλη συγκολλητική ικανότητα.
- Κατάλληλο ιξώδες, ώστε να μπορούν να διεισδύουν και στα μικρότερα κενά της ρωγμής.

### **1.4.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

Η πλήρης διαδικασία εφαρμογής των ρητινενέσεων έχει ως εξής:

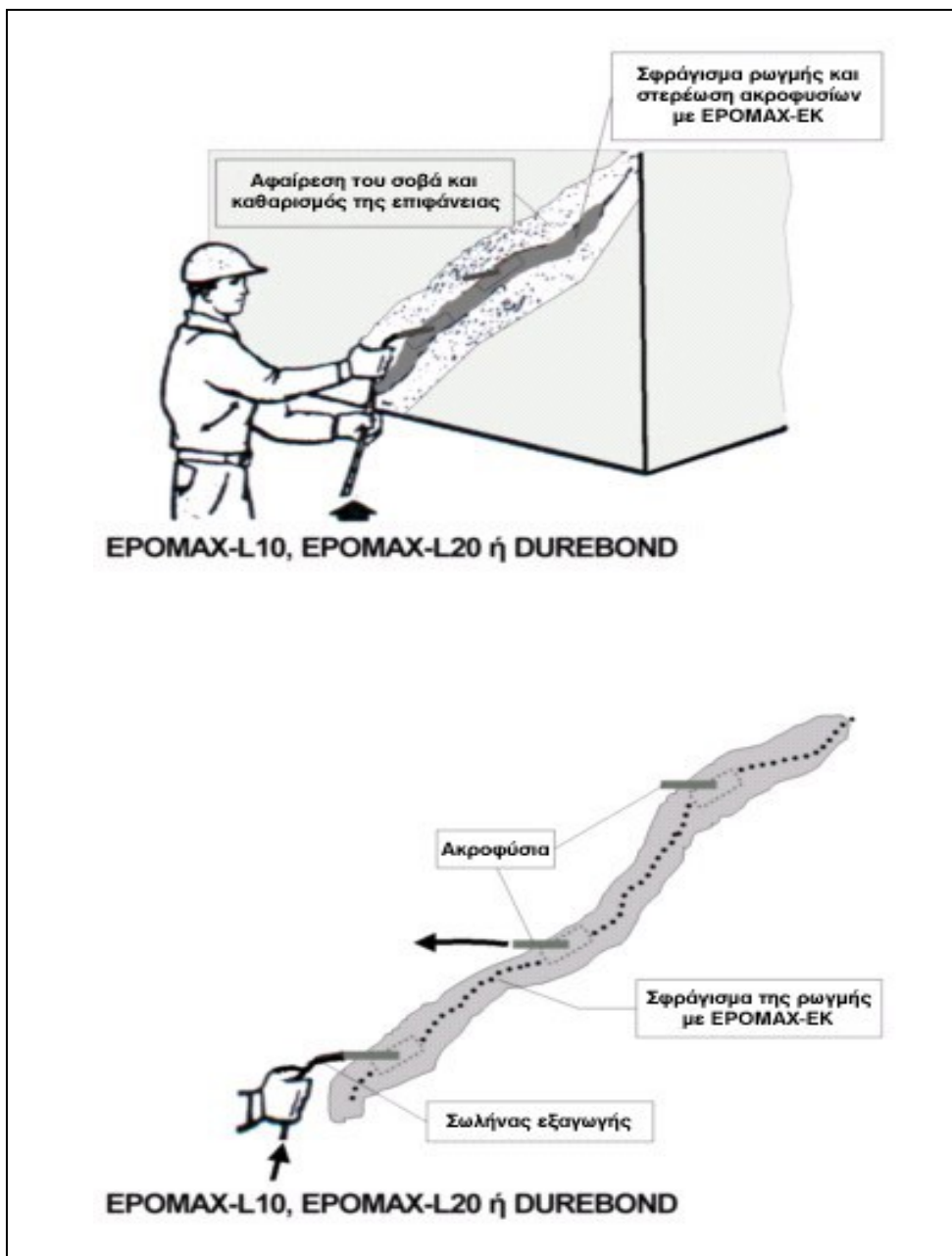
1. Καθαίρεται ο τυχόν προϋπάρχων σοβάς εκατέρωθεν της ρωγμής και καθαρίζεται καλά η επιφάνεια του σκυροδέματος.
2. Σφραγίζεται η ρωγμή με την εποξειδική πάστα (με σπάτουλα) και ταυτόχρονα τοποθετούνται - στερεώνονται τα ακροφύσια κατά μήκος της ρωγμής, σε αποστάσεις περίπου 20 cm, με το ίδιο υλικό.
3. Μετά τη σκλήρυνση της, διενεργείται η διαδικασία της ένεσης της ρητίνης με τις ενέσιμες εποξειδικές ρητίνες, ανάλογα με το εύρος της ρωγμής.
  - a. Τοποθετείται ο σωλήνας εξαγωγής της ρητίνης (π.χ. αλφαδολάστιχο) στο πρώτο ακροφύσιο. Εάν η ρωγμή είναι οριζόντια, ξεκινάμε από το ένα άκρο της. Εάν είναι κατακόρυφη, τότε θα ξεκινήσουμε από το χαμηλότερο ακροφύσιο.

- b. Με χειρισμό της βάνας εξαγωγής της ρητίνης στο καζανάκι πίεσης, πρεσάρεται η ρητίνη στο ακροφύσιο μέχρις ότου αρχίσει να εξέρχεται από το επόμενο ακροφύσιο, ή μέχρις ότου καταστεί αδύνατη η άσκηση περαιτέρω πίεσης.
- c. Σφραγίζεται το πρώτο ακροφύσιο με την ειδική τάπα και η ρητίνη πρεσάρεται στο αμέσως επόμενο ακροφύσιο, μέχρι να εξέλθει από το μεθεπόμενο κ.ο.κ.
- d. Η διαδικασία συνεχίζεται ως ανωτέρω για όλα τα ακροφύσια. Την επόμενη ημέρα οι προεξοχές των ακροφυσίων μπορούν να αφαιρεθούν (με σπάσιμο) και στη συνέχεια να αποκατασταθεί ο τυχόν προϋπάρχων σοβάς.

#### 1.4.4. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

- Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής, ένα άτομο πρέπει να κρατά σταθερά το σωλήνα εξαγωγής στα ακροφύσια, να ταπώνει τα ακροφύσια και να καθοδηγεί ένα δεύτερο άτομο για το χειρισμό της βάνας εξαγωγής της ρητίνης.
- Η ανάμιξη των εποξειδικών υλικών πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε να χρησιμοποιείται όλη η ποσότητα του Α και του Β συστατικού κάθε φορά.
- Η ρητίνες συνιστάται να μη χύνονται κατευθείαν μέσα στο καζανάκι πίεσης, αλλά, αφού αναμιχθούν τα 2 συστατικά της ρητίνης μέσα στο δοχείο του συστατικού Α, να τοποθετείται το δοχείο αυτό μέσα στο καζανάκι πίεσης. Έτσι αποφεύγεται η ρύπανσή του και η πιθανότητα σκλήρυνσης υπολειμμάτων ρητίνης μέσα σε αυτό που μπορεί να οδηγήσει σε αχρήστευσή του.
- Πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στη διάρκεια του χρόνου εφαρμογής σε σχέση με το pot life του υλικού για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ώστε να μην πήξει το υλικό όσο διαρκεί η διαδικασία της ρητινένεσης.
- Μετά το τέλος της εφαρμογής πρέπει οπωσδήποτε να καθαρισθούν το καζανάκι πίεσης και τα εργαλεία με το διαλυτικό (ξέπλυμα με πρεσάρισμα του στο καζανάκι πίεσης και στο σωλήνα εξαγωγής).
- Κατά την εφαρμογή πρέπει να χρησιμοποιούνται προστατευτικά γυαλιά και γάντια.

Η διαδικασία εφαρμογής των ρητινένεσεων σε ρωγμές οι οποίες εμφανίζονται σε στοιχεία σκυροδέματος απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.6**.



Σχήμα 1.6: Τρόπος εφαρμογής ρητινένεσης

## **1.5. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΜΑΝΔΥΑ**

### **1.5.1. ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ-ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ**

Στις αποκαταστάσεις-ενισχύσεις αυτού του είδους, το προς έγχυση σκυρόδεμα πρέπει να έχει την κατάλληλη ρευστότητα και διεισδυτικότητα, ώστε κατά τη σκυροδέτηση να μη δημιουργούνται κενά (φωλιές), δεδομένου ότι οι μανδύες έχουν γενικά μικρό πάχος (8-15 cm), που καθιστά δύσκολη τη διάστρωση του σκυροδέματος. Όταν απαιτείται η δημιουργία μανδύα ακόμα λεπτότερου πάχους (4-8 cm), όπου η έγχυση σκυροδέματος είναι γενικά δυσχερής, απαιτείται η χρήση χυτού κονιάματος μεγάλης ρευστότητας και υψηλών αντοχών. Επίσης, το προς έγχυση σκυρόδεμα ή κονίαμα πρέπει να έχει άριστη πρόσφυση στο παλαιό σκυρόδεμα, ώστε να εξασφαλίζεται η μονολιθική σύνδεση μεταξύ τους.

### **1.5.2. ΛΥΣΗ**

#### **➤ Μανδύες συνήθους πάχους (8-15 cm)**

Το υλικό πλήρωσης του μανδύα είναι σκυρόδεμα, στο οποίο προστίθεται ο υπερρευστοποιητής, εξασφαλίζοντας στο προς έγχυση σκυρόδεμα την επιθυμητή ρευστότητα, με παράλληλη αύξηση των αντοχών του, λόγω της καλής συμπύκνωσης που επιτυγχάνεται.

#### **➤ Μανδύες λεπτού πάχους (4-8 cm)**

Ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται το χυτό, μη συρρικνούμενο τσιμεντοκονίαμα, το οποίο έχει πολύ καλή ρευστότητα και πολύ υψηλές αντοχές.

### **1.5.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

#### **Εργασίες προετοιμασίας:**

1. Καθαίρεται το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα όπου απαιτείται και διαμορφώνονται στο παλαιό σκυρόδεμα κοιλότητες για τον καλύτερο εγκιβωτισμό του προς έγχυση υλικού.
2. Αποκαλύπτονται οι παλαιοί οπλισμοί, όπου αυτό χρειάζεται.
3. Εκτραχύνεται μηχανικά (π.χ. με αμμοβολή) η επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος.



4. Γίνεται καλή έκπλυση του παλαιού σκυροδέματος με άφθονο νερό υπό πίεση.
5. Οπλίζεται ο μανδύας σύμφωνα με τη στατική μελέτη ενίσχυσης, με συγκόλληση του νέου οπλισμού στον παλιό με καβίλιες ή «πάπιες».
6. Όπου είναι δυνατό, η επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος επαλείφεται πριν την έγχυση με την εποξειδική ρητίνη-γέφυρα πρόσφυσης, για να εξασφαλισθεί η άριστη πρόσφυση μεταξύ του παλαιού σκυροδέματος και του προς έγχυση σκυροδέματος ή κονιάματος.

➤ **Μανδύες συνήθους πάχους (8-15cm)**

Ακολουθεί η έγχυση του σκυροδέματος, με την προσθήκη του υπερρυστοποιητή σε αναλογία 0.6-0.8 % επί του βάρους του τσιμέντου ή σε αναλογία 1.2-1.7 % επί του βάρους του τσιμέντου, ώστε να προκύψει κάθιση σκυροδέματος περίπου 20 cm. Κατά την σκυροδέτηση είναι απαραίτητη η δόνηση του σκυροδέματος, ώστε να επιτευχθεί η ακόμη καλύτερη συμπύκνωσή του.

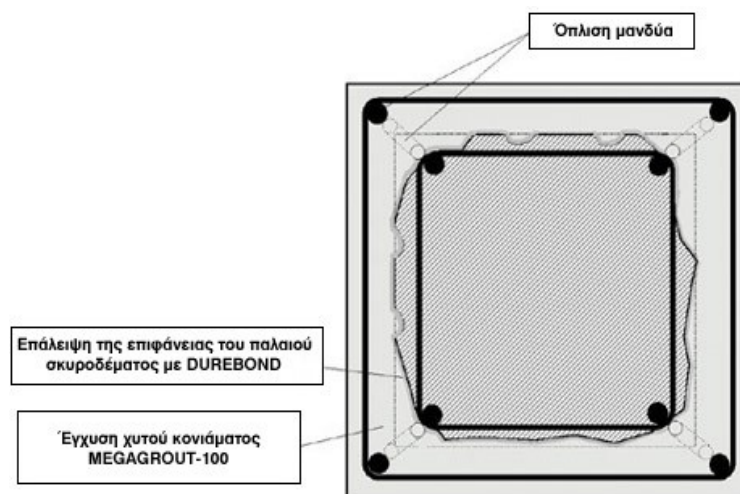
➤ **Μανδύες λεπτού πάχους (4-8 cm)**

1. Το υλικό μετά την ενυδάτωσή του, είναι ρευστό και λεπτόκοκκο και μέρος του μπορεί να διαφύγει από τους αρμούς μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του ξυλοτύπου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει οι αρμοί των ξυλοτύπων να σφραγίζονται με το υπερταχείας πήξης σφραγιστικό τσιμέντο ή με το ταχύπηκτο τσιμεντοκονίαμα.
2. Ένα σακί 25 kg προστίθεται σε 3,0 kg νερό υπό συνεχή ανάδευση, με δράπανο χαμηλών στροφών, έως ότου δημιουργηθεί μία ομοιογενής ρευστή μάζα. Στο μίγμα προστίθεται ποσότητα νερού έως 0,5 kg υπό ανάδευση, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ρευστότητα.
3. Κατόπιν το κονίαμα εγχέεται, λαμβάνοντας μέριμνα ώστε να αποφεύγεται η παγίδευση αέρα. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το τσιμεντοκονίαμα έχει γεμίσει όλο το χώρο ανάμεσα στο καλούπι και την υπάρχουσα κατασκευή.
4. Εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα επιφάνειες πρέπει να κρατούνται υγρές για τουλάχιστον 24 ώρες, καλυπτόμενες με υγρές λινάτσες ή φύλλα πολυαιθυλενίου. Κατανάλωση: 21.5 kg/m<sup>2</sup>/cm πάχους στρώσης ή 2.1 kg για πλήρωση χώρου όγκου 1 lit.

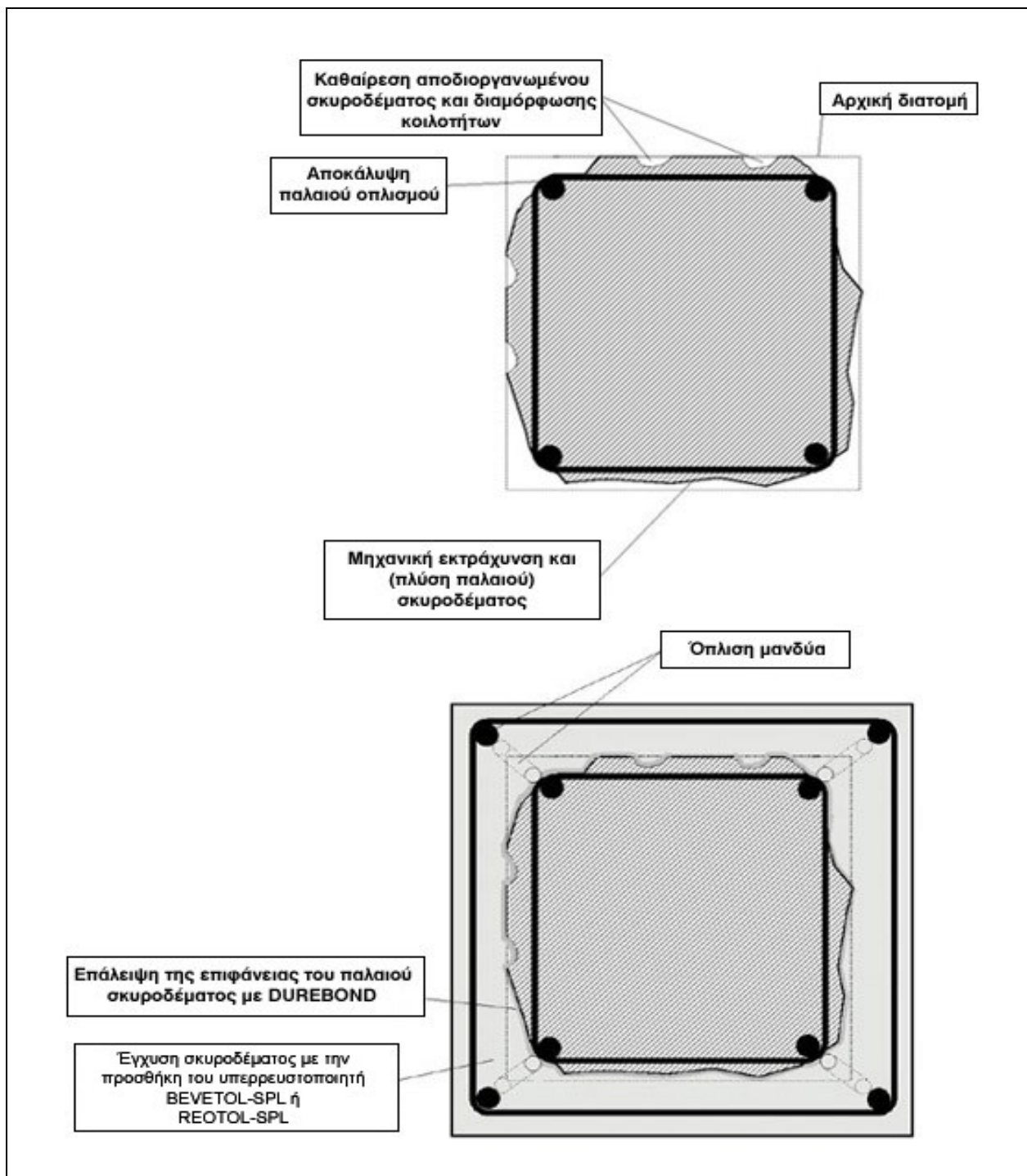
#### 1.5.4. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

- Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της εφαρμογής πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ **+5°C** και **+35°C**.
- Η αντοχή του προς έγχυση σκυροδέματος πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή του παλαιού σκυροδέματος τουλάχιστον κατά **10 MPa**
- Η μέγιστη κοκκομετρία των αδρανών του προς έγχυση σκυροδέματος δεν πρέπει να ξεπερνά τα **20 mm**.
- Το μέγιστο πάχος εφαρμογής του ανά στρώση είναι **10cm**.
- Υλικό που έχει αρχίσει να πήζει δεν πρέπει να μαλακώνεται ξανά με νερό.
- Το προϊόν διατηρεί τη ρευστότητά του για περίπου **60 min** σε θερμοκρασίες μεταξύ **+15°C** και **+25°C**.
- Σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας συνιστάται η αποθήκευση των σάκων σε ψυχρό μέρος και η ανάμιξη του υλικού με κρύο νερό, ώστε να έχουμε την επιθυμητή ρευστότητα για αρκετό χρονικό διάστημα (περίπου **60 min**).
- Σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και απαίτησης γρήγορης ανάπτυξης των αντοχών, συνιστάται η ανάμιξη του υλικού με χλιαρό νερό και η προστασία του από το κρύο με θερμομονωτικά καλύμματα στους ξυλότυπους.
- Το προϊόν περιέχει τσιμέντο, το οποίο αντιδρά αλκαλικά με το νερό και ταξινομείται ως ερεθιστικό.

Η διαδικασία επάλειψης της επιφάνειας του οπλισμού σκυροδέματος φαίνεται στα **Σχήματα 1.7 και 1.8**.



**Σχήμα 1.7:** Επάλειψη της επιφάνειας του οπλισμού σκυροδέματος.



Σχήμα 1.8: Επάλειψη της επιφάνειας οπλισμού σκυροδέματος.

## **1.6. ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ – ΕΠΙΚΟΛΛΗΣΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

### **1.6.1. ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ-ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ**

Το στοιχείο του φέροντα οργανισμού που έχει ρηγματωθεί πρέπει να αποκατασταθεί και να ενισχυθεί με την επικόλληση λεπτών ελασμάτων στην επιφάνειά του.

### **1.6.2. ΛΥΣΗ**

Τα προς επικόλληση λεπτά ελάσματα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και να έχουν πάχος **1-1.5 mm**. Η επικόλληση των ελασμάτων πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου εξασφαλίζεται με τη χρήση των ενέσιμων εποξειδικών ρητινών (απόσταση ελάσματος-δομικού στοιχείου **0.1-1.0 mm**) ή (απόσταση ελάσματος-δομικού στοιχείου **0.5-3.0 mm**) σε συνδυασμό με την εποξειδική πάστα.

### **1.6.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

Η πλήρης διαδικασία αποκατάστασης έχει ως εξής:

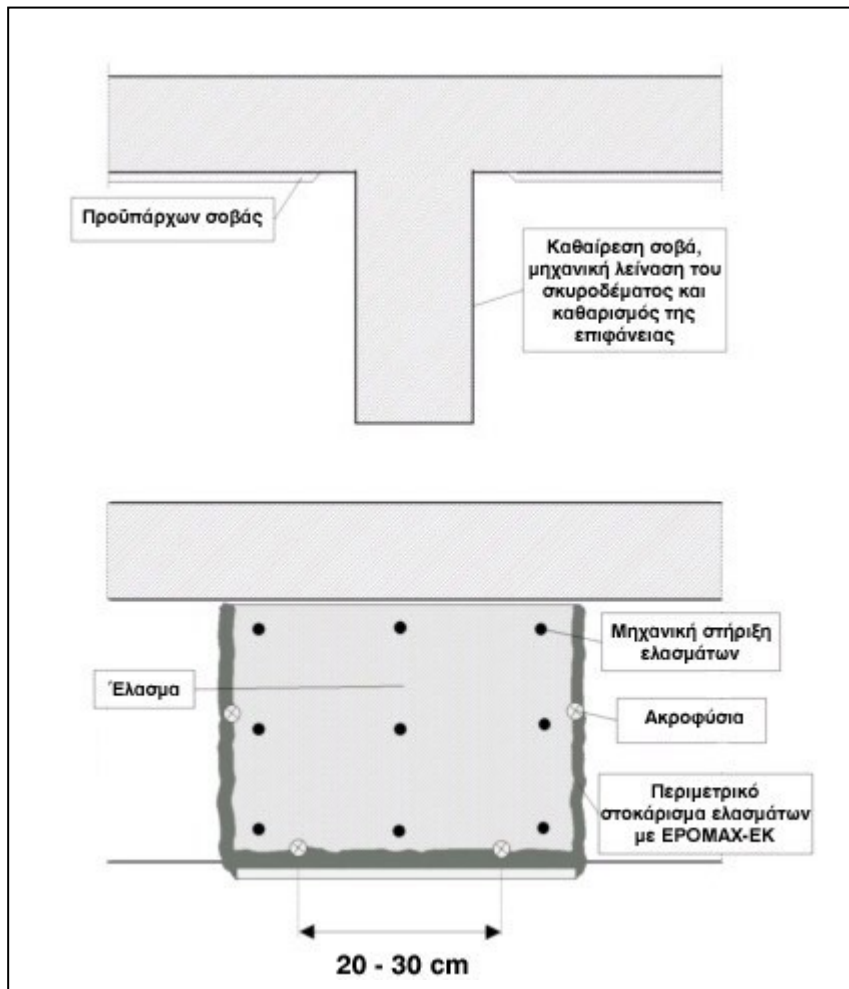
1. Καθαίρεται ο τυχόν προϋπάρχων σοβάς σε όλη την επιφάνεια που θα επικολληθούν τα ελάσματα.
2. Η επιφάνεια του σκυροδέματος λειαίνεται με μηχανικά μέσα και καθαρίζεται επιμελώς με πεπιεσμένο αέρα.
3. Εκτραχύνεται η εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων με αμμοβολή.
4. Τα ελάσματα στηρίζονται με μηχανικό τρόπο (π.χ. με καρφιά ή βύσματα) πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος και στοκάρονται περιμετρικά με την εποξειδική πάστα, στερεώνοντας ταυτόχρονα τα ακροφύσια ρητινένεσεων. Η απόσταση των ακροφυσίων κυμαίνεται από **20-30 cm**, ανάλογα με το μέγεθος του ελάσματος.
5. Αφού σκληρυνθεί διενεργείται η διαδικασία της ρητινένεσης με την εποξειδική ρητίνη:
  - a. Τοποθετείται ο σωλήνας εξαγωγής της ρητίνης στο πρώτο ακροφύσιο. Εάν το έλασμα είναι τοποθετημένο στο κάτω πέλμα της δοκού, ξεκινάμε από το ένα άκρο του. Εάν είναι τοποθετημένο στις παρειές του, ξεκινάμε από το χαμηλότερο ακροφύσιο.

- b. Με χειρισμό της βάνας εξαγωγής της ρητίνης στο καζανάκι πίεσης, πρεσάρεται η ρητίνη στο ακροφύσιο μέχρις ότου αρχίσει να εξέρχεται από το επόμενο ακροφύσιο.
- c. Σφραγίζεται το πρώτο ακροφύσιο με την ειδική τάπα και η ρητίνη πρεσάρεται στο αμέσως επόμενο ακροφύσιο, μέχρι να εξέλθει από το μεθεπόμενο κ.ο.κ.
- d. Η διαδικασία συνεχίζεται ως ανωτέρω για όλα τα ακροφύσια. Την επόμενη ημέρα οι προεξοχές των ακροφυσίων μπορούν να αφαιρεθούν (με σπάσιμο) και στη συνέχεια να αποκατασταθεί ο τυχόν προϋπάρχων σοβάς.

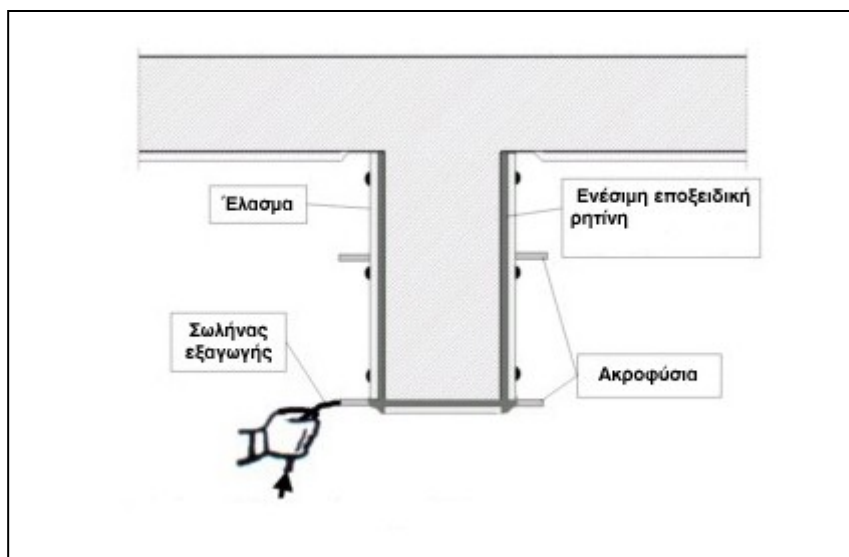
#### 1.6.4. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

- Για την αποφυγή θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών στη μεταλλική πλάκα συνιστάται ο προϋπάρχων σοβάς να αποκατασταθεί με ένα ισχυρό κονίαμα πάχους τουλάχιστον **2 cm**, ενισχυμένο με την οικοδομική ρητίνη.
- Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής, ένα άτομο πρέπει να κρατά σταθερά το σωλήνα εξαγωγής στα ακροφύσια, να ταπώνει τα ακροφύσια και να καθοδηγεί ένα δεύτερο άτομο για το χειρισμό της βάνας εξαγωγής της ρητίνης.
- Η ανάμιξη των εποξειδικών υλικών πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε να χρησιμοποιείται όλη η ποσότητα του Α και του Β συστατικού κάθε φορά.
- Οι ρητίνες, συνιστάται να μη χύνονται κατευθείαν μέσα στο καζανάκι πίεσης, αλλά, αφού αναμειχθούν τα 2 συστατικά της ρητίνης μέσα στο δοχείο του συστατικού Α, να τοποθετείται το δοχείο αυτό μέσα στο καζανάκι πίεσης. Έτσι αποφεύγεται η ρύπανσή του και η πιθανότητα σκλήρυνσης υπολειμμάτων ρητίνης μέσα σε αυτό που μπορεί να οδηγήσει σε αχρήστευσή του.
- Πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στη διάρκεια του χρόνου εφαρμογής σε σχέση με το pot life του υλικού για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ώστε να μην πήξει το υλικό όσο διαρκεί η διαδικασία της ρητινένεσης.
- Μετά το τέλος της εφαρμογής πρέπει οπωσδήποτε να καθαρισθούν το καζανάκι πίεσης και τα εργαλεία με το διαλυτικό (ξέπλυμα με πρεσάρισμα του στο καζανάκι πίεσης και στο σωλήνα εξαγωγής).
- Κατά την εφαρμογή πρέπει να χρησιμοποιούνται προστατευτικά γυαλιά και γάντια.

Στα Σχήματα 1.9 και 1.10 απεικονίζεται η διαδικασία επικόλλησης ελασμάτων στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 1.9: Επικόλληση ελασμάτων στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 1.10: Επικόλληση ελασμάτων στο σκυρόδεμα.

## 1.7. ΡΗΤΙΝΕΝΕΣΗ ΣΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΚΑΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ 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:

- Μειώνεται το ιξώδες.
- Μειώνεται ο χρόνος εργασιμότητας
- Μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας.
- Μειώνονται οι αντοχές, κυρίως σε θερμοκρασίες πάνω από **50oC**.

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

### Με την μείωση της θερμότητας:

- Αυξάνεται το ιξώδες
- 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.

## **1.8. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

### **1.8.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

Οι εποξειδικές ρητίνες είναι συνθετικές ρητίνες που παρασκευάζονται από την αντίδραση εποξειδίου (συνήθως επιγλωρυδρίνη) 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 ιζωδών κίτρινων υγρών, με μοριακή μάζα **350-750**, διαλυτών σε ακετόνη και τολυνόλη, είτε στερεών με χρώμα κίτρινο ή καστανό (μοριακή μάζα **800-3500**), που διαλύονται σε μείγμα τολυνόλης 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 πολυαμίνας, 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.

### **1.8.2. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

### **1.8.3. ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

### **1.8.4. ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

### **1.8.5. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

### 1.8.6. ΙΞΩΔΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ

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.

### 1.8.7. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΧΡΗΣΗΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ

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.

## **1.9. ΧΡΗΣΕΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

### **1.9.1. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

### **1.9.2. ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

## **1.10. ΤΡΟΠΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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

1. Τρόπος παρασκευής
2. Τρόπος εφαρμογής
3. Χρώμα μετά τη στερεοποίηση
4. Ιξώδες
5. Χρόνος σκλήρυνσης
6. Αποτελεσματικότητα συναρτήσεως του χρόνου
7. Πρόσφυση

8. Επίδραση των υπεριωδών ακτινών
9. Επίδραση της θερμοκρασίας
10. Επίδραση της υγρασίας
11. Αντιστρεψιμότητα
12. Δείκτης διάθλασης

#### **1.10.1. ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ**

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 **A** και **B** 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.

#### **1.10.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ**

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.

#### **1.11. ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ**

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

- Στην κατασκευή κτιρίων και αυτοκινητοδρόμων και γενικά σε κατασκευές όπου υπάρχουν απαιτήσεις για υψηλή χημική αντίσταση.
- Σαν βασικό συγκολλητικό σκυροδέματος.
- Σαν συγκολλητικά σε δομικά μέρη της ατράκτου αεροσκαφών.
- Σαν συγκολλητικό πλαστικών και μεταλλικών κομματιών σε βάρκες και αυτοκίνητα, ώστε να υπάρχει τέλεια στεγανότητα.
- Σαν φυλλώδεις ρητίνες για την κατασκευή πλαισίων και τελειωμάτων αεροσκαφών και πυραύλων.

- 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.
- Στην κατασκευή τριχών για πινέλα.
- Συστήματα έποξυ-ρητινών χρησιμοποιούνται σαν συγκολλητικά, επικαλυπτικά και σαν μέσα ενσωμάτωσης ηλεκτρικών εξαρτημάτων.
- 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 πυρρασχετικές ιδιότητες και έτσι δεν επιτρέπουν την εξάπλωση της φωτιάς. Οι ρητίνες αυτές προορίζονται για υγραμόνωση, για προστασία και διακόσμηση δαπέδων, τοίχων και ορόφων σε οικοδομικούς, βιομηχανικούς, αγροτικούς κ.α. χώρους.

- Εφαρμόζονται σε επιφάνειες σκυροδέματος, τσιμεντοκονιάματος, πέτρας, σοβάδων, τούβλων, γύψου, αμιαντοτσιμέντου, ασφάλτου κ.α.
- Για την σύνδεση παλιού και νέου σκυροδέματος κυρίως σε υγρούς χώρους.
- Για την προστασία κτιρίων από την διάβρωση και τη διείσδυση υγρασίας.
- Για την υγραμόνωση υπογείων χώρων και παταριών, δαπέδων πριν από την επίστρωσή τους με πλακάκια, μοκέτα κ.α. Επίσης για την υγραμόνωση πισινών και δεξαμενών.

## 1.12. 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.

### 1.12.1. ΓΙΑΤΙ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ;

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε εποξειδική ρητίνη έναντι άλλων πιθανών υλικών (όπως απλό τσιμεντοκονίαμα, διάφορα είδη σιλικόνης, μαστίχας κτλ.), για ρωγμές μικρού πλάτους (0.1-3mm) έχει να κάνει κυρίως με τις εξής ιδιότητες της ρητίνης: **το χαμηλό ιξώδες και την αντοχή σε γήρανση.**

Το χαμηλό ιξώδες επιτρέπει στην ρητίνη να εισχωρήσει σε όλο το βάθος της ρωγμής και όχι να την γεφυρώσει μόνο επιφανειακά. Έτσι, όχι μόνο η κατασκευή ανακτά αποτελεσματικότερα τις αρχικές της αντοχές, αλλά και προστατεύεται η ίδια η ρητίνη από περιβαλλοντικούς παράγοντες, αφού το μεγαλύτερο μέρος της βρίσκεται στο βάθος της ρωγμής,

Με την μεγάλη της αντοχή σε γήρανση η ρητίνη διατηρεί την αρχική της αντοχή, μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης λόγω της αυξομείωσης του πλάτους των

ρωγμών από διάφορα δυναμικά φορτία (κυρίως σεισμό) και ιδιαίτερα από κλιματολογικές αλλαγές, διατηρώντας την μονολιθικότητα του μέλους.

Άλλα πλεονεκτήματα της χρήσης ρητίνης είναι η μικρή συστολή ξήρανσης που παρουσιάζει, οι μεγάλες μηχανικές αντοχές, η μεγάλη συγκολλητική ικανότητα, το καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται κ.α. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα υπερκαλύπτουν τα όποια μειονεκτήματα της χρήσης του υλικού, όπως η απαίτηση έμπειρου προσωπικού ή το σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας που εμφανίζει.



## ΚΕΦΑΛΙΟ : 2

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

#### 2.1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ιδέα της βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους, με την ανάμιξη υλικών (τσιμέντου, ασβέστου, πολυμερών υλικών κλπ.) ή την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (πασσάλων, διαφραγμάτων, γεωφασμάτων, ηλώσεων κλπ.) άρχισε να εφαρμόζεται από αρχαιολόγων 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 ή 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 άσφαλτο αναμεμιγμένη με αμμώδες έδαφος για κατασκευές δρόμων, από το 3200 πχ., (Asphalt Institute, 1965). Η πρώτη σύγχρονη κατασκευή με ασφαλτικό υλικό επικάλυψης σημειώθηκε το 1802 στη Γαλλία. Το τσιμέντο Portland ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο Joseph Aspdin. Η ονομασία του συνδέθηκε με το χρώμα του που ήταν όμοιο με αυτό του ασβεστολίθου της νήσου Portland κοντά στην Αγγλία.

Το 1904 στη περιοχή St Louis (USA) έγινε η πρώτη εφαρμογή σταθεροποίησης εδάφους με τσιμέντο τύπου Portland. Από το 1940 και μετά οι Γερμανοί αργότερα οι Βρετανοί και οι Αμερικανοί κατασκεύασαν τους αεροδιαδρόμους πολλών πολεμικών αεροδρομίων με την τεχνική εδάφους - τσιμέντου. Την ίδια χρονική περίοδο η τεχνική της σταθεροποίησης εδάφους με διάφορα πρόσθετα (τσιμέντο, άσβεστος, 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.

### **2.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

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

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

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

- Στα θεμέλια κτιρίων για την μείωση των καθιζήσεων, τον έλεγχο της διαπερατότητας ή την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.
- Σε εργασίες εκσκαφής για καλύτερη πλευρική αύξηση της αντοχής σε σήραγγες ή τάφρους και μείωση της διαπερατότητας.
- Στην οδοποιία, στις υποβάσεις δρόμων για αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, μείωση της διάβρωσης και μείωση των μεταβολών του όγκου.
- Σε σταθεροποίηση των πρανών για να αυξηθεί η αντοχή του εδάφους σε διάβρωση, να μειωθεί η διαπερατότητα και ο δείκτης κενών.
- Σε κατασκευές συγκράτησης (αποθήκευσης) ύδατος για την δημιουργία όσο το δυνατόν υδατοστεγανών κατασκευών, όπως φράγματα, κανάλια, δεξαμενές, χωματερές (X.Y.T.A.).
- 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. ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΕΛΑΦΩΝ**

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

- 1) Μέθοδοι στερεοποίησης
- 2) Μέθοδοι όπλισης του εδάφους
- 3) Μέθοδοι συμπύκνωσης
- 4) Μέθοδοι σταθεροποίησης (βελτίωσης) του εδάφους με ανάμιξη:
  - με άσβεστο
  - με τσιμέντο
  - με χημικά πρόσθετα
- 5) Μέθοδοι με εκτέλεση ενέσεων
- 6) Θερμικής δράσης

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

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

## **2.2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑ ATTEWELL ΚΑΙ FARMER (1976), ΤΣΟΤΣΟ (1987), VAN IMPE (1989):**

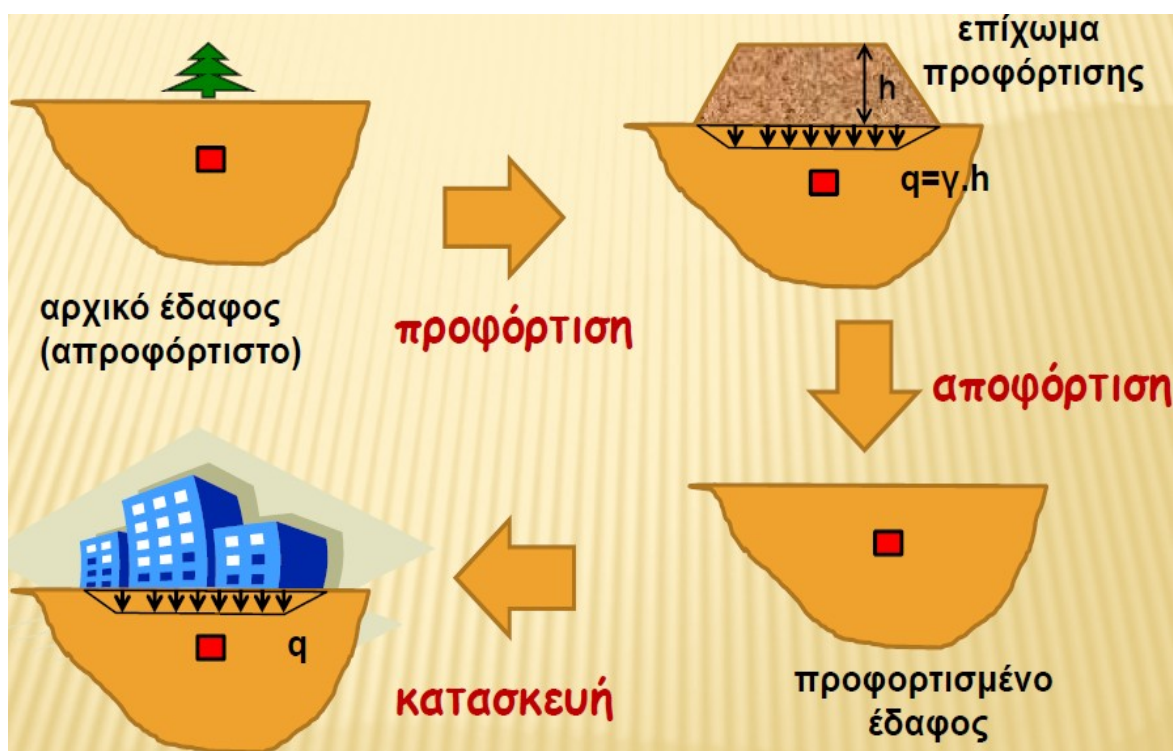
Στις μεθόδους βελτίωσης εδάφους κατατάσσονται οι μέθοδοι που ακολουθούν οι οποίες αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο:

- I.** Η στερεοποίηση
  - I α)** Προφόρτιση
  - Iβ)** Προφόρτιση με τη χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων
  - Iγ)** Ηλεκτρο-όσμωση
- II.** Οπλισμός εδάφους
  - IIα)** Λιθοπάσσαλοι ή χαλικοπάσσαλοι
  - IIβ)** Οπλισμένο έδαφος
- III.** Συμπύκνωση
  - IIIα)** Δυναμική συμπύκνωση
  - IIIβ)** Μέθοδοι μαζικής δόνησης
  - IIIγ)** Τοποθέτηση εκρηκτικής ύλης
- IV.** Σταθεροποίηση του εδάφους με τη χρήση τσιμέντου, ασβέστου ή άλλων χημικών προσθέτων.
  - IVα)** Ασβεστοπάσσαλοι
  - IVβ)** Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου
- V.** Ενέσεις
  - Vα)** Θερμική δράση
  - Vβ)** Θέρμανση του εδάφους
  - Vγ)** Ψύξη του εδάφους

## I. Στερεοποίηση

### I.α) Προφόρτιση:

Η μέθοδος της προφόρτισης συνιστάται 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

### **I.β) Προφόρτιση με την χρησιμοποίηση αμμοστραγγιστηρίων:**

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

### **I.γ) 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.

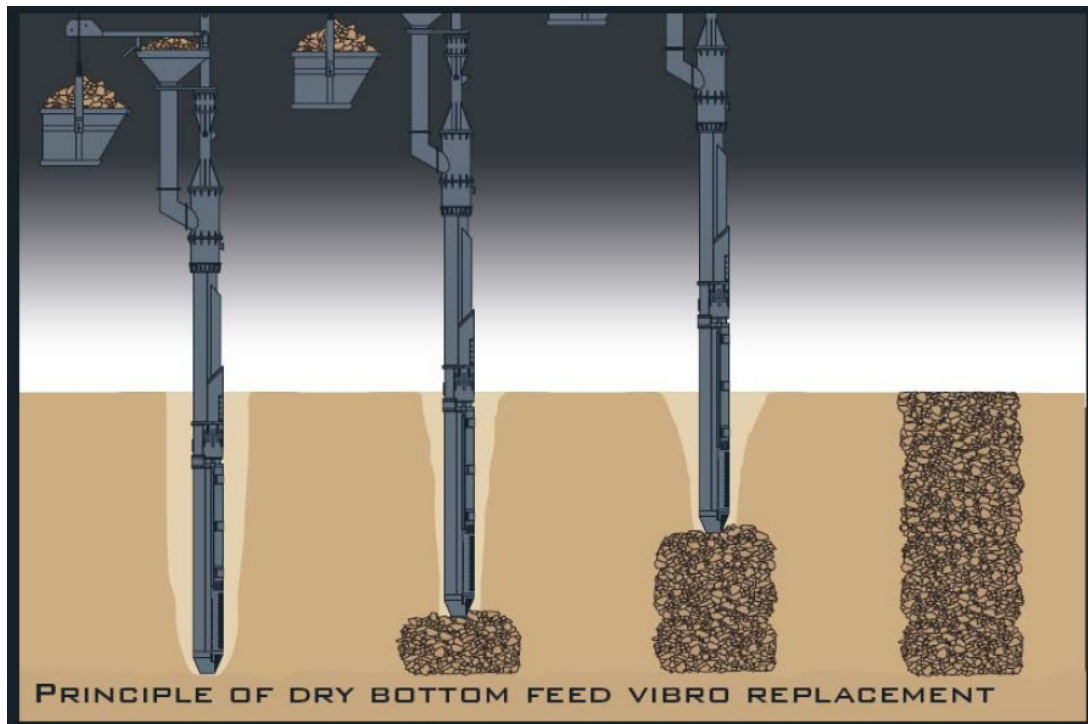
## **I. Οπλισμός εδάφους.**

### **II.α) Λιθοπάσσαλοι ή χαλικοπάσσαλοι:**

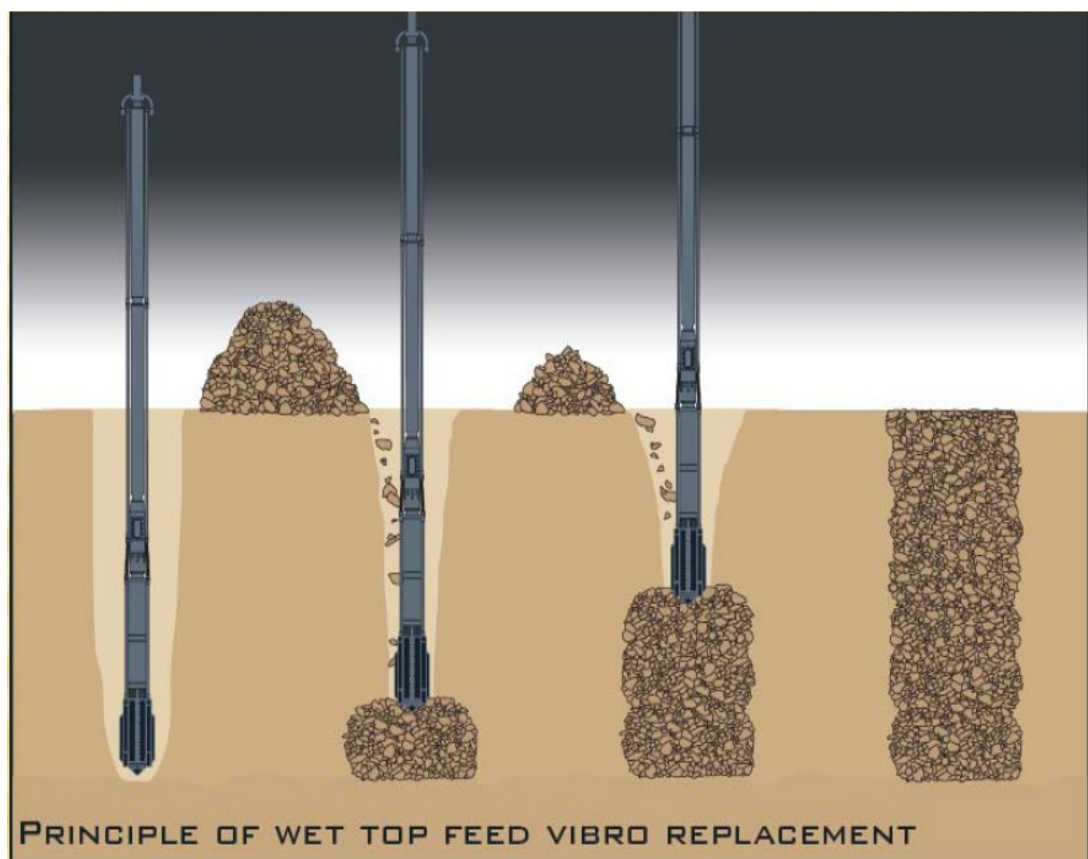
Η μέθοδος συνίσταται στη διάνοιξη κυκλικών οπών στο προβληματικό έδαφος με μήκος σημαντικό και την πλήρωσή τους με χάλικες ή με θραυστό υλικό λατομείου. Σ' αυτήν την περίπτωση κρίσιμη είναι η αντοχή του ιδίου του υλικού του πασσάλου και όχι η μεταφορά του φορτίου από τους πασσάλους στο έδαφος.

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 χαλίκια 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.



## II.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 ατσάλινων 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.

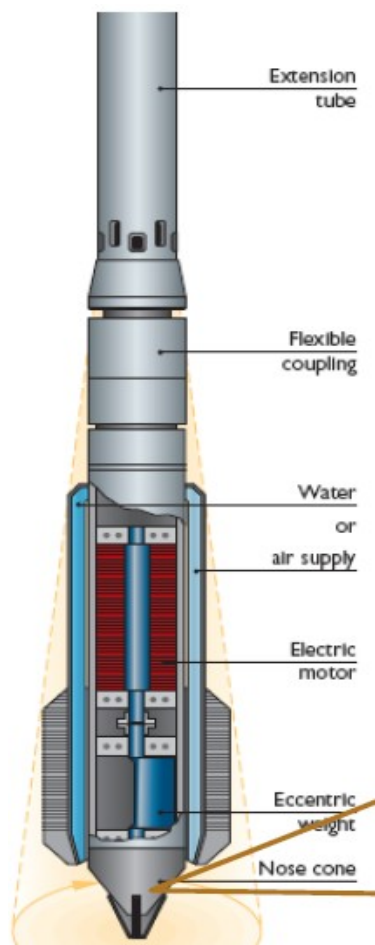


**Εικόνα 2.7:** Ενίσχυση εδάφους με τοποθέτηση γεωπλέγματος.

## **II. Συμπύκνωση.**

### **III.α) 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

### **III.β) Μέθοδοι μαζικής δόνησης:**

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

### **III.γ) 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.

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

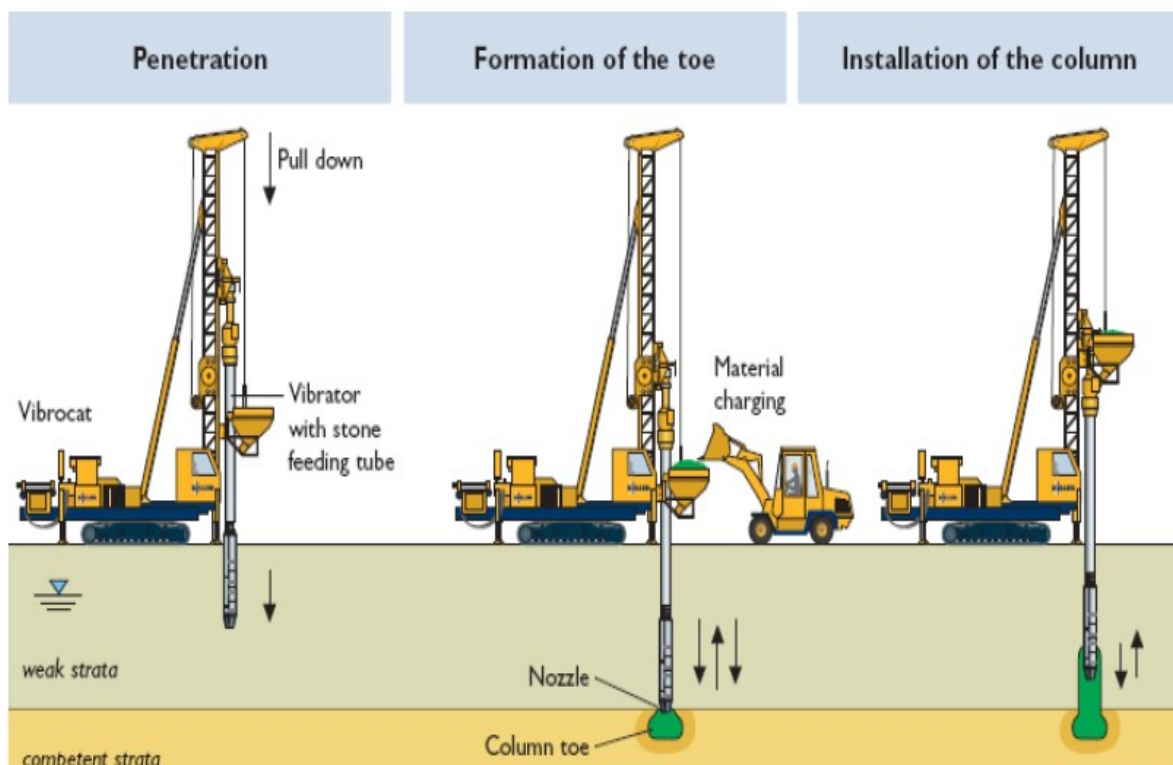
#### IV.α) Ασβεστοπάσσαλοι:

Με ειδικό αυτοκινούμενο μηχάνημα διανοίγεται οπή σε αργιλοϊλύδη 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.

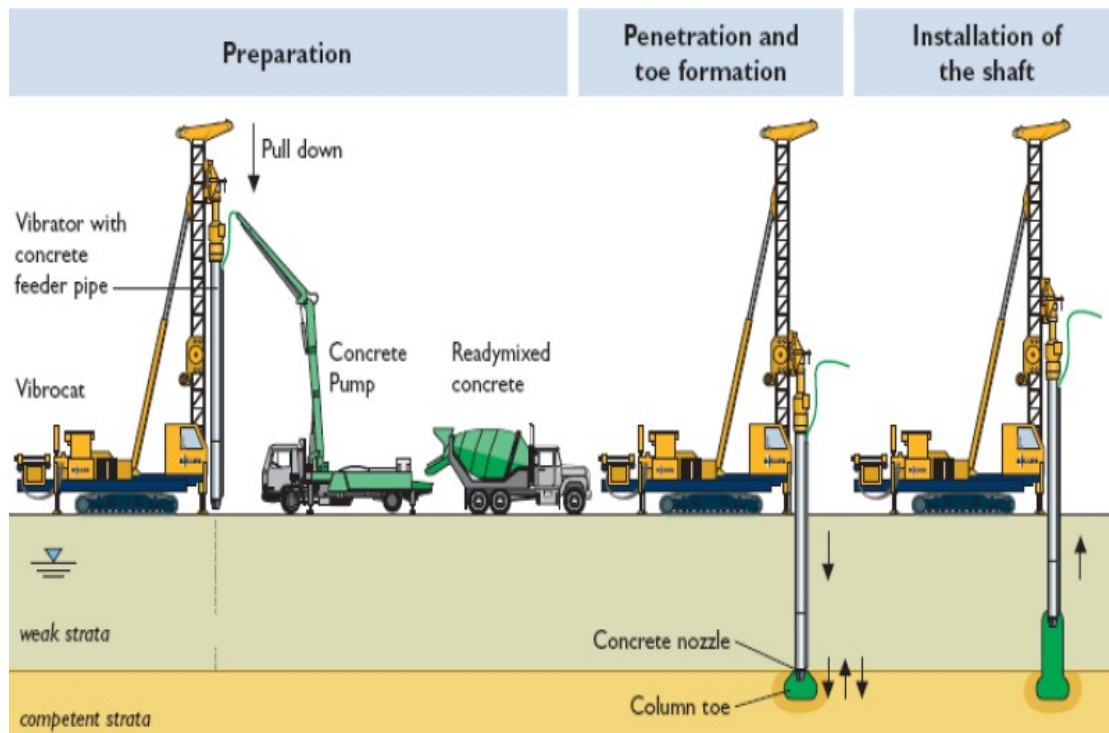
#### IV.β) Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμιξη εδάφους και τσιμέντου.

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 συμπίκνωση 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 συμπίκνωση (Κόλιας, 1979).

Είδος σταθεροποίησης	Επηρεαζόμενες εδαφικές ιδιότητες	Αποτελέσματα της 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 υγρασία</li> </ol>	Βελτίωση της ικανότητας για συμπίκνωση και άλλων ιδιοτήτων του μίγματος, που εξαρτώνται από τις αρχικές ιδιότητες των υλικών.	Βάση-Υπόβαση (Ανεπαρκής για βάση δρόμων βαρείας κυκλοφορίας)
Σταθεροποίηση	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Περιεχόμενη υγρασία</li> </ol>	Δυνατότητα συμπίκνωσης με	Υπέδαφος-Υπόβαση Σπανιότερα για βάση

με άσβεστο	2. Όρια Atterberg 3. Δομή του εδάφους	αυξημένη υγρασία. Μόνιμη ελάττωση της ευπάθειας στις επιδράσεις του νερού και του παγετού. Αύξηση αντοχής.	δρόμων ελαφράς κυκλοφορίας.
Σταθεροποίηση με άσφαλτο	Αντοχή	Δημιουργία στρώσης εύκαμπτης, με αυξημένη φέρουσα ικανότητα ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Κυρίως για βάση Σπανιότερα για υπόβαση
Σταθεροποίηση με τσιμέντο	1. Αντοχή 2. Δομή του εδάφους	Δημιουργία στρώσης με αυξημένη φέρουσα ικανότητα, ανθεκτική στις επιδράσεις του νερού και του παγετού.	Βάση, υπόβαση, υπέδαφος. Αυτοδύναμα οδοστρώματα ελαφράς κυκλοφορίας που φέρουν λεπτή ασφαλτική επίστρωση.

#### IV. 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:

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

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

- Ενέσεις διαποτισμού.
- Ενέσεις εκτοπίσεως ή συμπύκνωσης.
- Ενέσεις εγκλωβισμού.
- 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 αργιλικών 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 αργιλικών εδαφών – μπετονίτη κλπ.).

#### V. Θερμική δράση.

##### VI.α) 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.

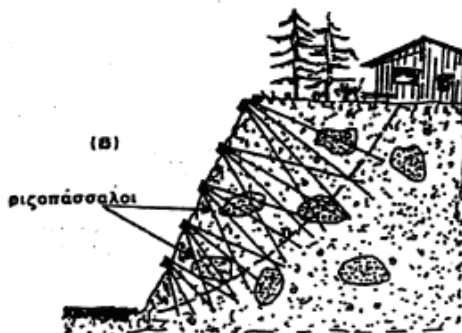
Η πίεση που εφαρμόζεται είναι **1.5 μεγαλύτερη** της ατμοσφαιρικής. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από **300° C** έως **1000° C** με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση λόγω απώλειας του νερού και την αύξηση των ενεργών τάσεων. Σε θερμοκρασίες **550° C** η ικανότητα διόγκωσης της



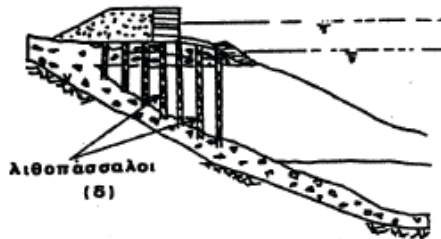
αργίλου καταστρέφεται σε  $1000^{\circ}\text{C}$ , οι κόκκοι άμμου τήκονται και δημιουργούν τεχνητή τσιμεντοποίηση. Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει παραδείγματα των μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών.



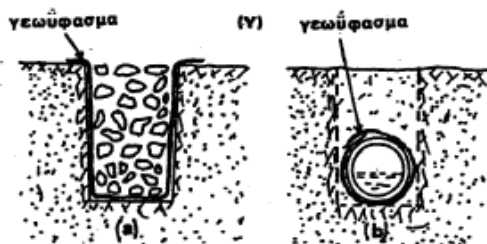
α) Επιστρώσεις - επικαλύψεις με μίγμα εδάφους - τσιμέντου.



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



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



γ) Χρησιμοποίηση γεωψασμάτων 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 τσιμέντο έχει ευρύ φάσμα εφαρμογής στα εδάφη, επίσης είναι οικονομική μέθοδος. Κατά τον Mitchell (1981) η σταθεροποίηση του εδάφους με τσιμέντο 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 σεισμική φόρτιση
- 3) Απροφόρτιστες ή υποστερεοποιημένες άργιλοι και ιλύες

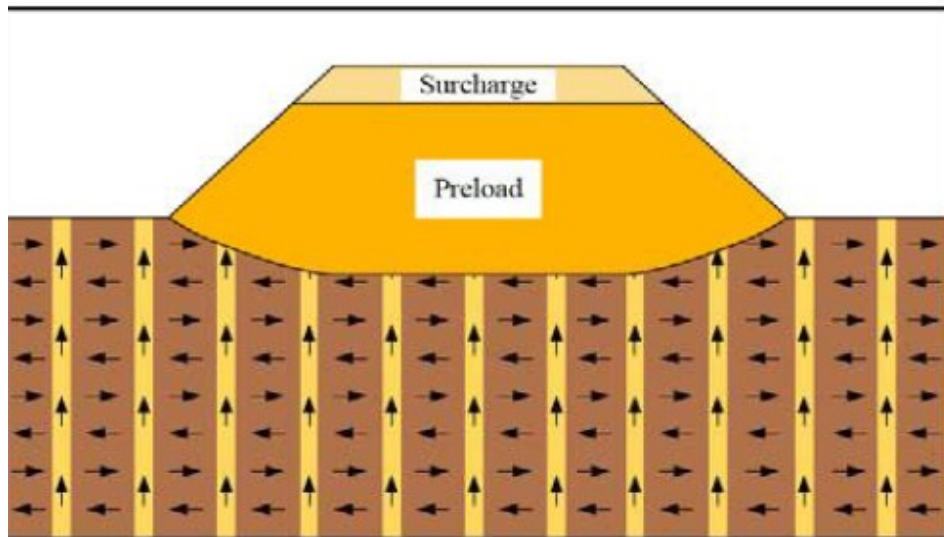
Επίσης άλλοι μέθοδοι ενίσχυσης του εδάφους είναι :

- 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**.

#### **VI .β) 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.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

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

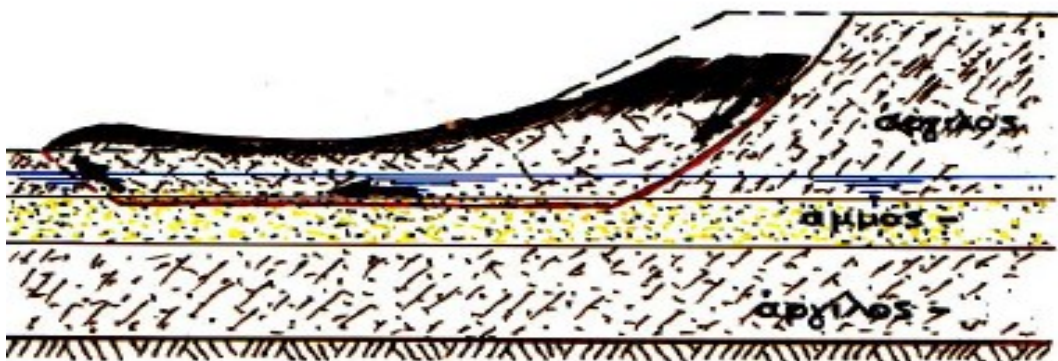
Κατ'έπείταση ο συνδυασμός των παραπάνω δηλαδή η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι και συνάρτησης του κόστους του συνολικού έργου κατασκευής σε σχέση με το κόστος της μεθόδου βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους.

## **Αστοχία των εδαφών**

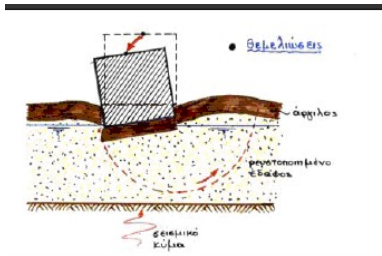
Ορισμένες φορές η έλλειψη ενίσχυσης εδαφών, καθώς και η εφαρμογή της λάθος μεθόδου, οδηγεί σε αστοχία του εδάφους με καταστρεπτικά αποτελέσματα πολλές φορές για τον άνθρωπο. Στις **Εικόνες 2.15-2.22** που ακολουθούν απεικονίζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχίας εδαφών (μέσα από εικόνες και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



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



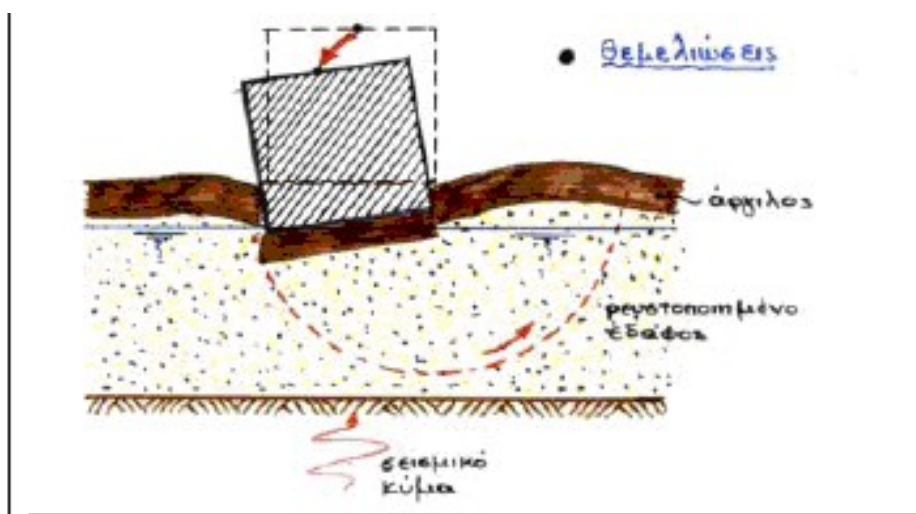
Εικόνα 2.16: Στρώματα εδάφους του δρόμου της παραπάνω εικόνας.



**Κοσάελι (Ιζμίτ), Τουρκία (1999)**



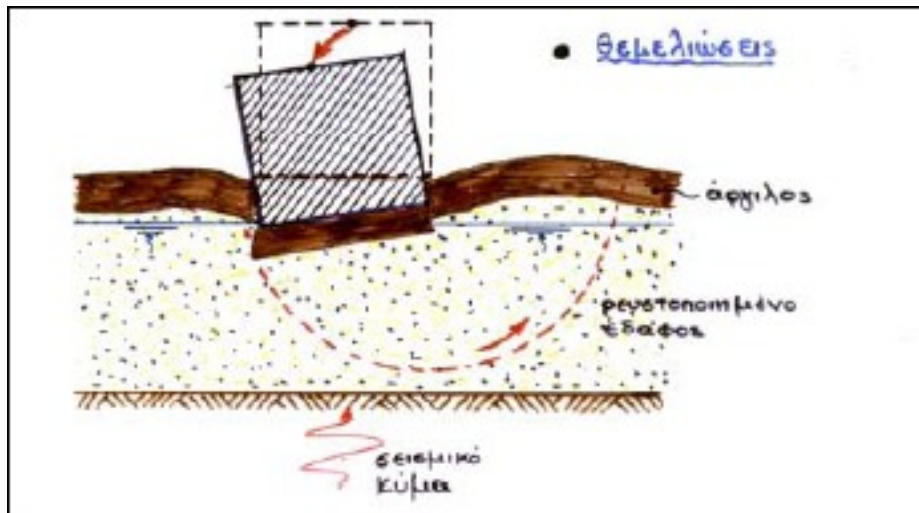
**Εικόνα 2.17:** Κατάρρευση κτιρίου από αστοχία εδάφους στην περιοχή Ιζμίτ της Τουρκίας το 1999.



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



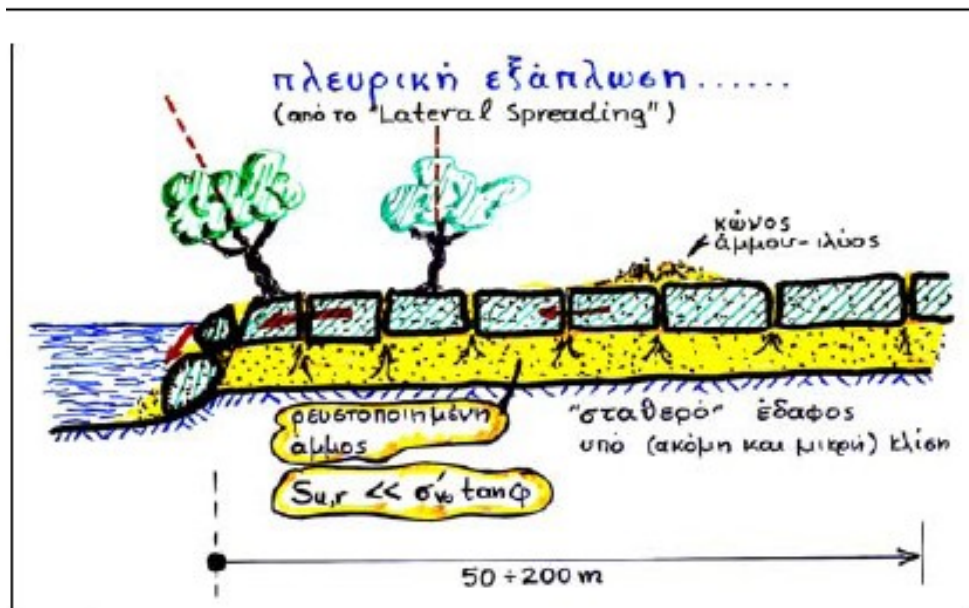
**Εικόνα 2.19:** Κατάρρευση κτιρίων από αστοχία εδάφους στην περιοχή Niigata Ιαπωνίας το 1964.



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



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



Εικόνα 2.22: Πλευρική εξάπλωση του εδάφους της παραπάνω εικόνας.



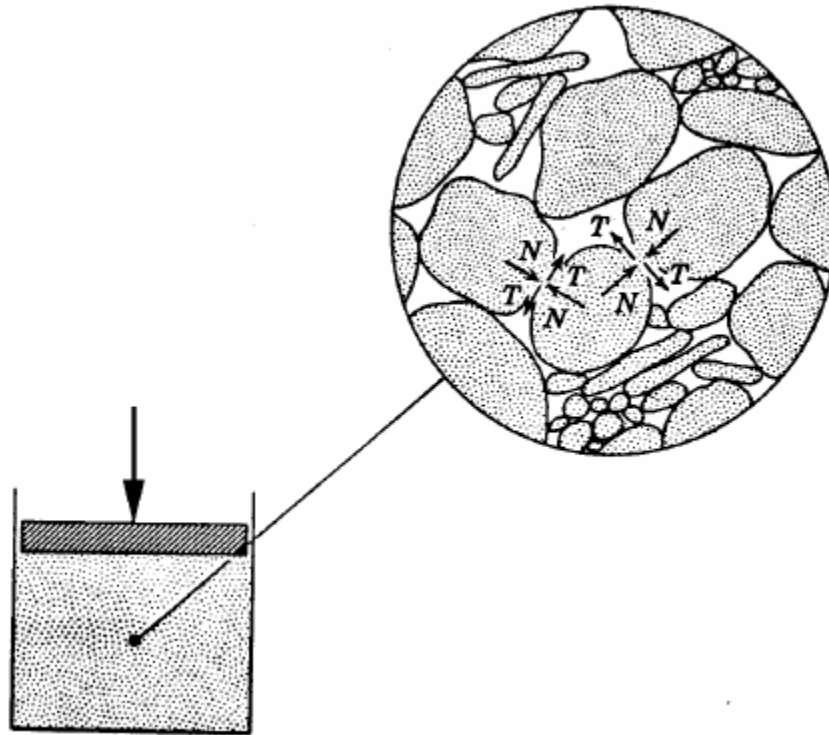
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 3**

### **ΕΙΔΗ ΕΛΑΦΩΝ**

#### **3.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Το έδαφος, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.1**, 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 (χαλίκων 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 3.1:** Απεικόνιση της δομής του κόκκου του εδάφους.

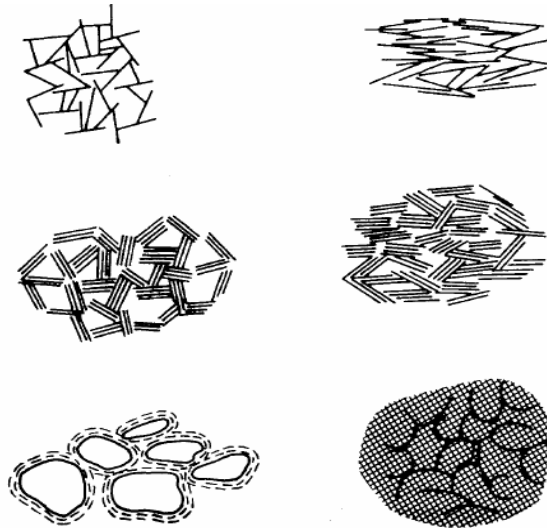
Στο μακρό χρονικό διάστημα, όμως, που μεσολάβησε από την ιζηματογένεση πολλοί εδαφικοί σχηματισμοί βρέθηκαν τελικώς πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και το νερό των πόρων αντικαταστάθηκε μερικά ή ολικά από αέρα. Έτσι, σήμερα, τα περισσότερα εδάφη περιέχουν στους πόρους τους και νερό και αέρα.

### 3.2. ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα ιζηματογενή εδάφη, που αποτελούν το σύνολο σχεδόν των εδαφικών σχηματισμών, διακρίνονται σε **χονδρόκοκκα** (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.

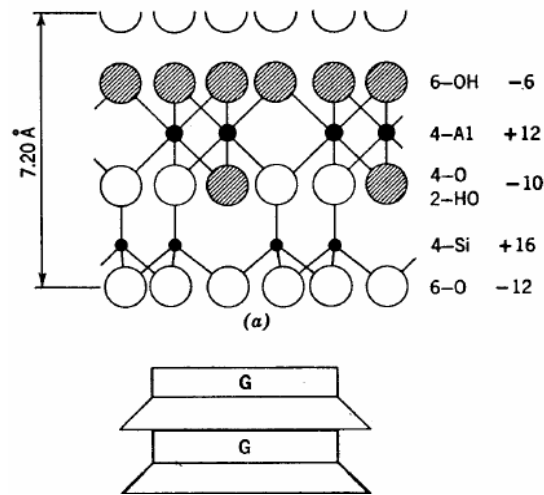
Ειδικότερα, το μέγεθος των κόκκων τους διαφέρει σημαντικά: εδάφη με κόκκους **μεγαλύτερους από 2 mm** ανήκουν στην κατηγορία των **χαλικών**, οι **άμμοι** έχουν κόκκους με διαστάσεις **από 2mm έως 0.06 mm** (η διάσταση αυτή είναι περίπου ίση με το μικρότερο μέγεθος κόκκου που είναι ορατός δια γυμνού οφθαλμού), οι **ιλείς** έχουν κόκκους **από 0.06 mm έως 0.002 mm** και, τέλος, οι **άργιλοι** 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 **λείας** (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 μούριό τους. Στο **Σχήμα 3.2** απεικονίζεται η διάταξη των αργιλικών πλακιδίων.

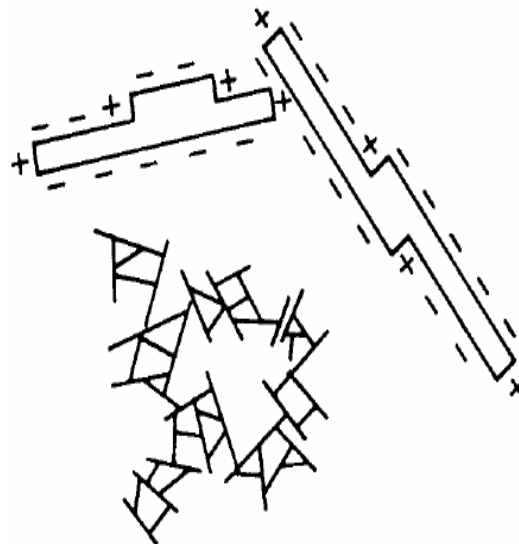


**Σχήμα 3.2:** Διάταξη (δομή) αργιλικών πλακιδίων.

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 **καολίνη**, ενός αργιλικού ορυκτού με πάχος πλακιδίου περί τα **0.1 μm** ( $1 \mu\text{m} = 0.001 \text{mm}$ ) και μεγάλη διάσταση (διάμετρο) **0.3-1 μm**, 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.

### 3.2.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΛΑΦΩΝ

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 συμπίεστότητα 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 συμπίεστότητα, 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 ανοιχτό καστανό μέχρι μαύρο. Η τύρφη είναι τόσο πολύ συμπιεστή, ώστε να αποτελεί σχεδόν πάντοτε ακατάλληλη στρώση για την έδραση θεμελίων.

### **3.2.2. ΧΟΝΔΡΑ ΚΑΙ ΛΕΠΤΑ ΚΛΑΣΜΑΤΑ**

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 N° 200.

### 3.2.3. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ

Το χονδρόκοκκο κλάσμα του εδάφους περιλαμβάνει τα πρωτογενή ή μη αργιλικά ορυκτά, ενώ τα λεπτόκοκκα μόρια αποτελούνται από αργιλικά ή δευτερεύοντα ορυκτά. Η ορυκτολογική σύνθεση μερικών από αυτά τα ορυκτά που σχηματίζουν το έδαφος, δίνεται στον **Πίνακα 3.1**.

**Πίνακας 3.1:** Ορυκτολογική σύνθεση ορυκτών που σχηματίζουν το έδαφος.

Πρωτογενή Ορυκτά	Αργιλικά ορυκτά
Χαλαζίας $\text{SiO}_2$	Καολινίτης
$\text{NaAlSi}_2\text{O}_8$	$(\text{HO})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$
$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Ιλίτης $(\text{K}, \text{H}_2\text{O})_2\text{Si}_8$
Μαρμαρυγίας	$(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_4$
$(\text{OH})_4\text{K}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{20}$	$\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Αμφιβολίτης $(\text{SiO}_{11})_6$	Μοντμοριλλονίτης
Πυρόξενοι $(\text{SiO}_3)_2$	$(\text{OH})_4\text{Si}_8$
Οξείδια του αργιλίου $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_{3.34} \text{Mg}_{.66} \text{O}_{20} \text{nH}_2\text{O}$
Λιμονίτης $\text{Fe}_2\text{O}_2(\text{H}_2\text{O})$	
	Χλωρίτης $(\text{OH})_4$
	$(\text{Si}, \text{Al})_8$
	$(\text{Mg}, \text{Fe})_6\text{O}_{20}$

Τα πρωτογενή ορυκτά είναι χημικά αδρανή, ενώ τα αργιλικά ορυκτά είναι χημικά ενεργά επειδή τα μικροσκοπικά αργιλικά μόρια φέρουν πάνω στην επιφάνεια τους μια καθαρά αρνητική φόρτιση, που προκύπτει από την ιδιαίτερη ατομική δομή τους.



Τα μικροσκοπικά αργιλικά μόρια, έχουν ατομικές δομές που αποτελούνται από τετράεδρο πυριτίου και οκτάεδρο αργιλίου.

Ένα  $\text{Si}^+$  που περιβάλλεται από τέσσερα ιόντα οξυγόνου, σχηματίζει μια τετράεδρη (τεσσάρων εδρών) μονάδα και απεικονίζεται συμβολικά με ένα τραπέζιο. Ένα  $\text{Al}^{+3}$  που περιβάλλεται από έξι ιόντα υδροξυλίου σχηματίζει μια οκτάεδρη μονάδα και απεικονίζεται συμβολικά με ένα ορθογώνιο. Αυτά είναι τα πιο στοιχειώδη δομικά συμπλέγματα στη δομή των αργιλικών ορυκτών. Οι μονάδες  $\text{Si}$  ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν φύλλα πυριτίου και οι μονάδες  $\text{Al}$  ενώνονται για να σχηματίσουν μονάδες αργιλίου.

Το πυρίτιο και το αργίλιο στα φύλλα αυτά μπορούν να αντικατασταθούν μερικά με άλλα στοιχεία όπως το  $\text{Mg}$ ,  $\text{Fe}$  και να προκαλέσουν ανισορροπία φόρτισης στις δομικές μονάδες. Τα αρχικά φύλλα έχουν μικροσκοπικές πυκνότητες των  $7\text{-}2\text{A}^\circ$  για τον Καολινίτη,  $10\text{A}^\circ$  για τον Ιλίτη,  $9\text{-}6$  έως  $21\text{A}^\circ$  για τον Μοντμοριλλονίτη.

Τα φύλλα πυριτίου και τα φύλλα αργιλίου σχηματίζουν στοιβάδες από  $\text{Si-Al}$  ή ενώσεις  $\text{Si-Al-Si}$  για να σχηματίσουν τα ορυκτά Καολινίτη, Ιλίτη και Μοντμοριλλονίτη. Επειδή αυτά τα ορυκτά σχηματίζονται με στοιβάδες φύλλων, ονομάζονται φυλλοποιημένες ή διαστρωματωμένες δομές.

#### 3.2.4. ΜΕΓΕΘΗ ΚΟΚΚΩΝ

Τα μόρια του εδάφους έχουν ακανόνιστες μορφές. Το μέγεθος του κόκκου έχει μόνο θεωρητική σημασία και ορίζεται σαν το ελάχιστο μέγεθος οπής του κόσκινου από όπου διέρχονται οι κόκκοι. Άλλος τρόπος ορισμού του μεγέθους είναι να το θεωρήσουμε ίσο με τη διάμετρο σφαίρας ίδιου όγκου που είναι γνωστή σαν ισοδύναμη διάμετρος. Στην εδαφική μάζα, τα μεγέθη των κόκκων μπορεί να κυμαίνονται από μέγεθος κροκάλας **μεγαλύτερης από 200 mm** μέχρι ένα κολλοειδές μέγεθος κόκκων **μικρότερο από 0,01 του μικρού (μ)**. Τα μεγέθη των κόκκων των χονδρόκοκκων κλασμάτων καθορίζονται συνήθως από το άνοιγμα της βροχίδας του κόσκινου μέσα από την οποία διέρχεται ο κόκκος.

### 3.2.5. ΣΧΗΜΑ ΚΟΚΚΩΝ

Τα μακροσκοπικά σωματίδια (χονδρόκοκκα) έχουν ακανόνιστα σχήματα κύβων, πρισμάτων ή σφαιρών και είναι γωνιώδη, στρόγγυλα ή επιμήκη.

Τα λεπτά κλάσματα έχουν σχήματα πλακών, νιφάδων, ράβδων ή σωλήνων. Το σχήμα τους εξαρτάται από την ορυκτολογική τους σύνθεση. Τα αργιλικά ορυκτά έχουν μορφές δύο φύλλων ή τριών φύλλων και έχουν σχήματα νιφάδων. Μερικές νιφάδες στοιβάζονται η μια πάνω στην άλλη και διαμορφώνουν το μέγεθος του μορίου της αργίλου.

Τα δύο χαρακτηριστικά, το μέγεθος και η μορφή, των στερεών συστατικών του εδάφους αλληλοσχετίζονται και αναφέρονται σαν η *σύσταση του εδάφους*. Είναι ένα φυσικό συσσωμάτωμα κόκκων που διαχωρίζεται με μηχανικό τρόπο. Οι κύριοι εδαφικοί ορίζοντες συμβολίζονται διεθνώς A-B-C (**Σχήμα 3.5**).

Ο ορίζοντας A είναι ο ανώτερος ορίζοντας πλούσιος σε οργανικές ουσίες που του προσδίδουν σκουρόχρωμη όψη. Τα αργιλικά υλικά του ορίζοντα αυτού, καθώς και άλλα ευκίνητα υλικά αποπλένονται και μεταφέρονται στους βαθύτερους ορίζοντες.

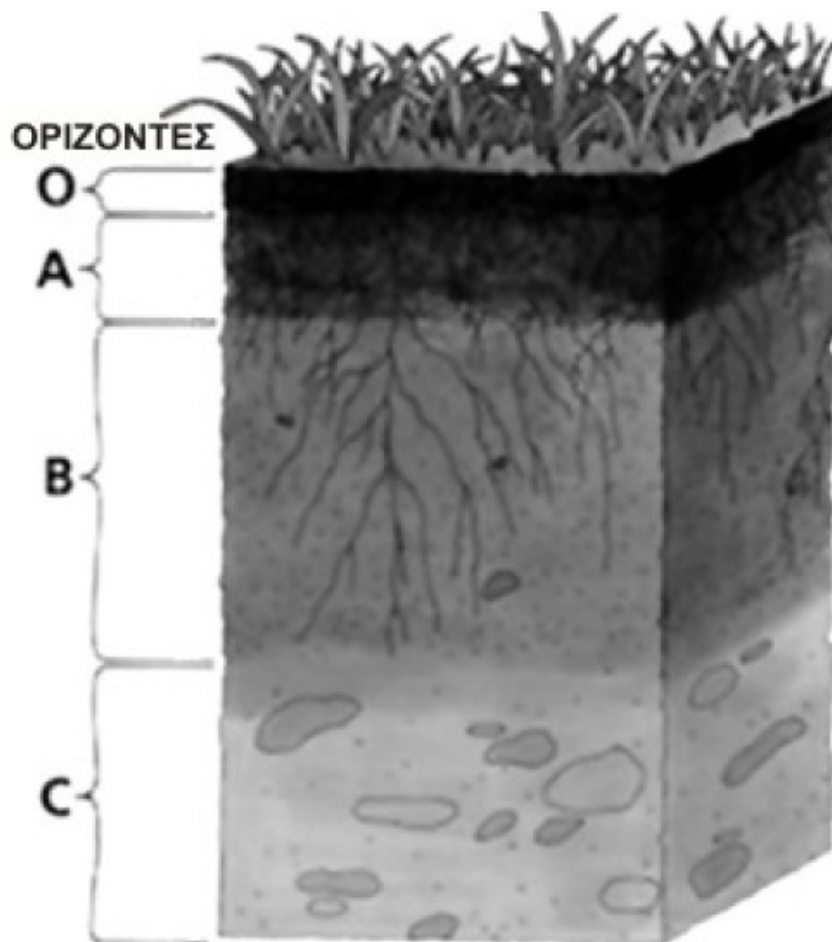
Ο ορίζοντας B είναι ο ενδιάμεσος ορίζοντας στον οποίο συγκετρώνονται διάφορες χημικές ουσίες που προέρχονται από την απόπλυση του ορίζοντα A (οξειδία του σιδήρου, αργιλικά ορυκτά κ.ά.).

Ο ορίζοντας C είναι ο κατώτερος εδαφικός ορίζοντας, που αποτελείται από μητρικό υλικό, μερικά αποσαθρωμένο. Ο ορίζοντας αυτός μπορεί να είναι οξειδωμένος (Cox) ή να περιέχει **CaCO<sub>3</sub>** (Cca). Κάτω από τον ορίζοντα C υπάρχει το μητρικό πέτρωμα.

Η οργανική ύλη αποτελείται από τμήματα φυτών (φύλλα, κλαδιά, κορμούς), οργανικά λείψανα και άμορφα υπολείμματα, γνωστά ως **humus**. Η ανάπτυξη του **humus** συνοδεύεται από έκλυση διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο προκαλεί μείωση του **pH** και δημιουργία όξινου περιβάλλοντος. Επιπλέον η παρουσία του αυξάνει την προσρόφηση νερού, καθώς και τις διεργασίες ιοντοανταλλαγής. Το χρώμα του εδάφους καθορίζει τις συνθήκες αποστράγγισης. Φτωχά σε αποστράγγιση εδάφη έχουν χρώμα κίτρινο, ενώ αντίθετα τα καλά αποστραγγισμένα αερίζονται καλά και έχουν χρώμα κόκκινο, λόγω οξείδωσης του σιδήρου.

Η ταξινόμηση των εδαφών με βάση τη διάμετρο των κόκκων, σύμφωνα με το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης είναι:

- Ογκόλιθοι ή και λίθοι (>300 mm)
- Κροκάλες (75-300 mm)
- Χάλικες (4,5-75 mm)
- Άμμος (0,075-4,75 mm)
- Ιλύς (0,002-0,075 mm)
- Άργιλος (<0,002 mm)



Σχήμα 3.5 : Κύριοι εδαφικοί ορίζοντες.

Στον κατωτέρω **Πίνακα 3.2** παρουσιάζεται η ταξινόμηση των εδαφών με βάση την κοκκομετρία (Moris-Johnson, 1967) και στον **Πίνακα 3.3** η ταξινόμηση με βάση το ενιαίο σύστημα ταξινόμησης. Τα λεπτόκοκκα εδάφη έχουν μέγεθος κόκκων που είναι **<0,075 mm**. Τα χονδρόκοκκα εδάφη έχουν μέγεθος κόκκων που κυμαίνεται **μεταξύ 0,075 mm και 76,2 mm**. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν τα οργανικά εδάφη και η τύρφη.

Τα εδάφη διαχωρίζονται σε:

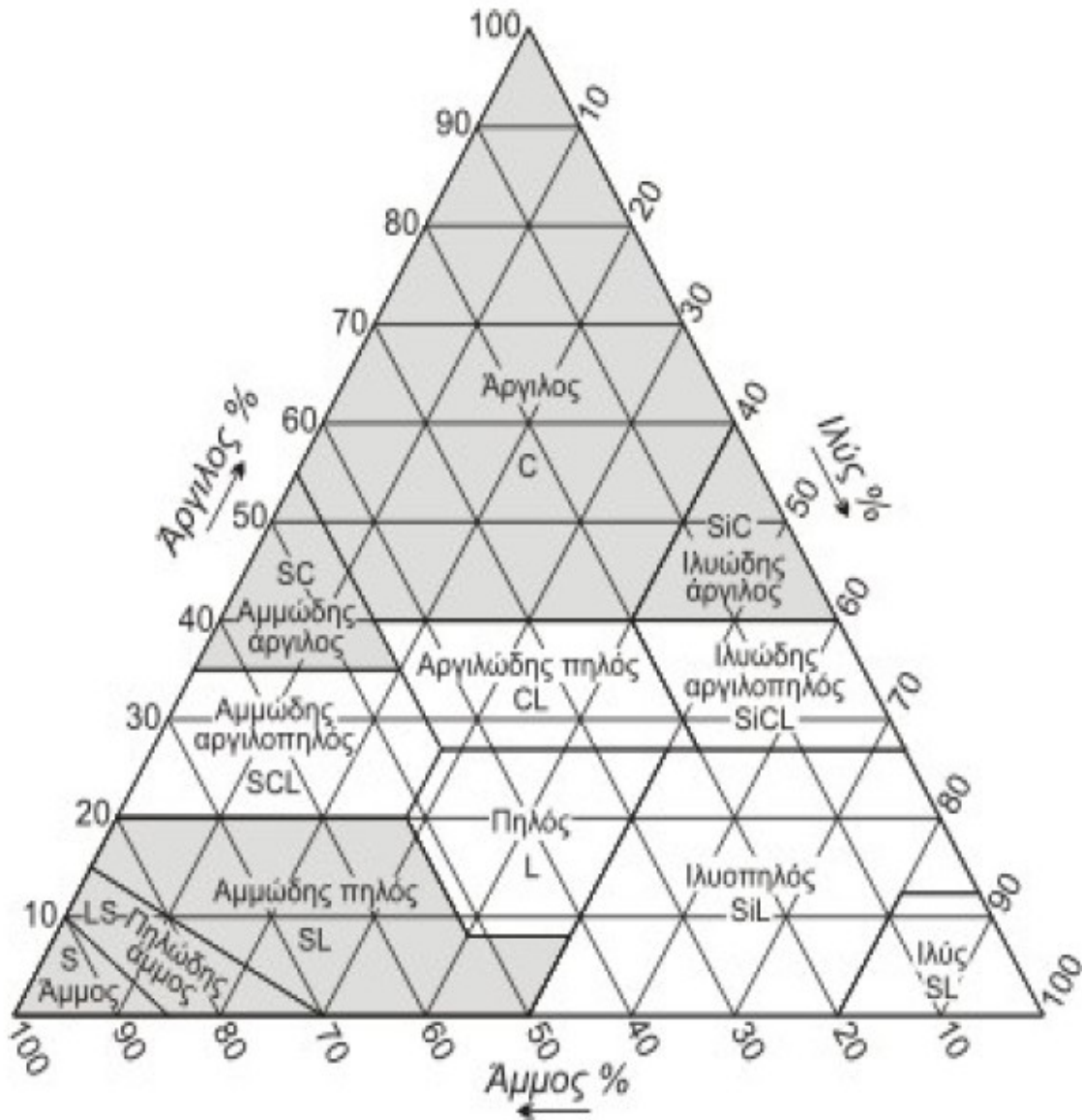
- 1) Συνεκτικά (λεπτόκοκκα, fine grained) και
- 2) μη συνεκτικά (κοκκώδη, coarse grained).

Τα μη συνεκτικά εδάφη χαρακτηρίζονται από την απουσία ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων τους, ενώ αντίθετα στα συνεκτικά μεταξύ των εδαφικών κόκκων αναπτύσσονται δυνάμεις συνοχής.

**Πίνακας 3.2:** Ταξινόμηση εδαφών με βάση την κοκκομετρία.

Υλικό	Μέγεθος κόκκων σε mm
Άργιλος	<0,004
Ιλύς	0,004-0,062
Πολύ λεπτόκοκκη άμμος	0,062-0,125
λεπτόκοκκη άμμος	0,125-0,25
Μεσόκοκκη άμμος	0,25-0,5
Χονδρόκοκκη άμμος	0,5-1,0
Πολύ χονδρόκοκκη άμμος	1,0-2,0
Πολύ μικρά χαλίκια	2,0-4,0
Μικρά χαλίκια	4,0-8,0
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	8,0-16,0
Χαλίκια μεγάλου μεγέθους	16,0-32,0
Χαλίκια πολύ μεγάλου μεγέθους	32,0-64,0

Η υφή (texture) καθορίζεται από τις αναλογίες αργίλου, ιλύος και άμμου. Εκτιμάται στην ύπαιθρο και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των διεργασιών σχηματισμού των εδαφών. Συχνά θεωρείται σκόπιμος και πρακτικός ο διαχωρισμός των εδαφών σε ευρύτερες κατηγορίες: Αργιλώδη, Ιλώδη, Αμμώδη με αντίστοιχες υποδιαίρεσεις (Σχήμα 3.6)



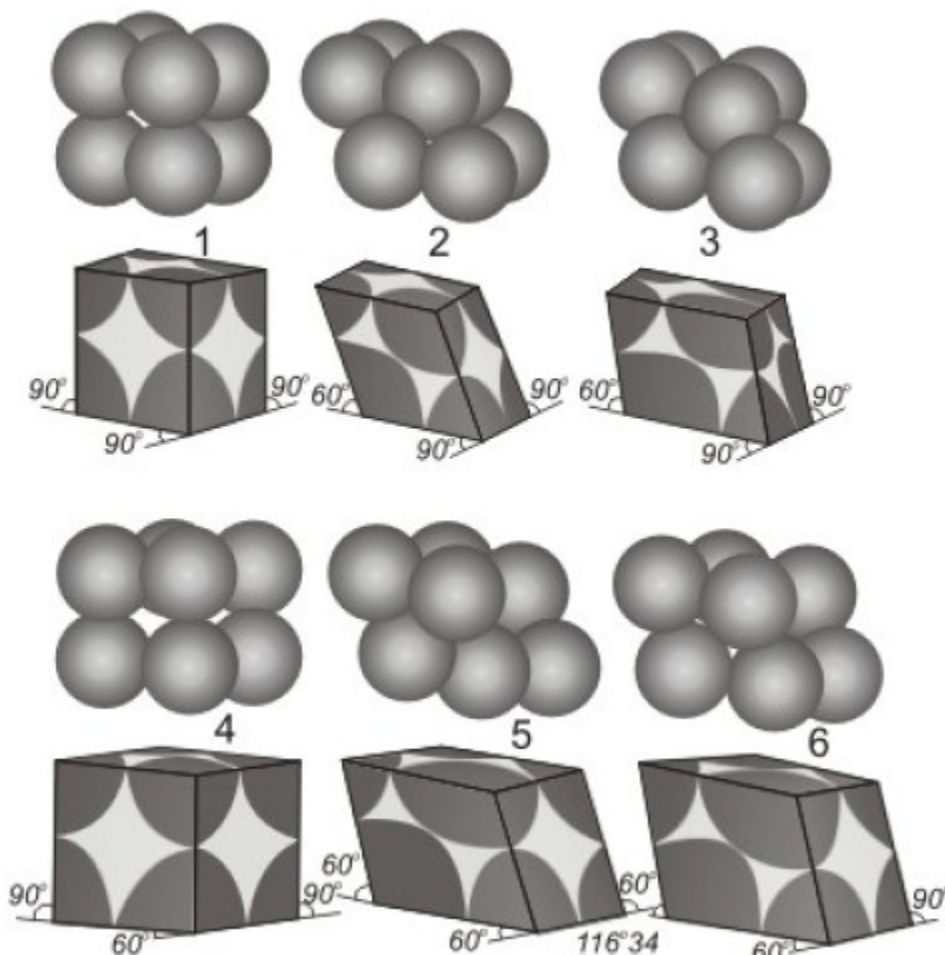
Σχήμα 3.6: Ο διαχωρισμός των εδαφών σε Αργιλώδη, Ιλώδη, Αμμώδη

Πίνακας 3.3: Ταξινόμηση εδαφών με βάση το ενιαίο σύστημα ταξινόμησης.

Περιγραφή		Σύμβολο	Τυπική Ονομασία		
Χονδροκόκκα Εδάφη	Χαλίκια Λνω του 50% του κλάσματος έχει μέγεθος >4,699 mm	Καθαρά χαλίκια	GW	Καλά διαβαθμισμένα χαλίκια	
		Χαλίκια με λεπτόκοκκες προσμίξεις	GP	Χαλίκια χωρίς διαβάθμιση ή κακά διαβαθμισμένα	
		Καθαρές άμμοι	GM	Πυομιγή χαλίκια	
			GC	Αργιλομιγή χαλίκια	
	Άμμοι Λνω του 50% του κλάσματος έχει μέγεθος <4,699 mm	Καθαρές άμμοι	SW	Καλά διαβαθμισμένες άμμοι	
			SP	Κακά διαβαθμισμένες άμμοι	
		Άμμοι με λεπτόκοκκες προσμίξεις	SM	Πυομιγείς άμμοι	
			SC	Αργιούχες άμμοι	
	Λεπτόκοκκα Εδάφη	Πηλίτες (Ιλύες και Άργιλοι)	LL < 50	ML	Ανόργανες ιλύες και πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ελαφρά πλαστικότητα
				CL	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής ως μέτριας πλαστικότητας
OL				Οργανικές ιλύες και ιλυούχες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας	
LL > 50			MH	Ανόργανες ιλύες, ελαστικές ιλύες	
			CH	Ανόργανες ιλύες υψηλής πλαστικότητας	
			OH	Οργανικές άργιλοι μέτριας ως υψηλής πλαστικότητας	
		PT	Τύρφη και άλλα οργανικά εδάφη		

Ενεργό μέγεθος (effective size) κόκκων είναι η διάμετρος εκείνη, η οποία είναι ίση με τη διάμετρο εκείνου του κόσκινου που συγκρατεί το **90%** του υλικού που κοσκινίσθηκε ή που επιτρέπει να περάσει το **10%**. Η ενεργή διάμετρος ( $d_{ev}$ ) αντιστοιχεί στο λεπτόκοκκο υλικό που πληρώνει τα διάκενα και καθορίζει την τιμή του ολικού πορώδους. Υπολογίζεται από την αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη. Από την ενεργή διάμετρο ( $d_{ev}$ ) υπολογίζεται εμπειρικά ο συντελεστής υδροπερατότητας ή υδραυλικής αγωγιμότητας ( $k$ ) με διάφορους τύπους.

Η διάταξη των κόκκων παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της τιμής του ολικού πορώδους. Στο **Σχήμα 3.7** παρουσιάζονται έξι διαφορετικοί τύποι διάταξης σφαιρικών κόκκων με την ίδια διάμετρο. Το ολικό πορώδες για κάθε τύπο διάταξης είναι **47.6%, 39.5%, 26%, 39.5%, 30.2%, και 26%** αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.7:** Έξι τύποι σφαιρικών κόκκων με ίδια διάμετρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 4

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 4.1. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε πέντε φάσεις:

- Κοσκίνισμα του μη διαβαθμισμένου υλικού για την απόκτηση λεπτόκοκκης διαβαθμισμένης άμμου.
- Παρασκευή δοκιμίων.
- Σκλήρυνση των δοκιμίων για 7, 28, 90 και 180 ημέρες.
- Καταπόνηση των δοκιμίων σε δοκιμές:
  - i. Μονοαξονικής θλίψης.
  - ii. BBRAZILIAN TEST-Εμμεσου εφελκυσμού και
  - iii. Τριαξονικής θλίψης.
- Καταγραφή των αποτελεσμάτων και επεξεργασία αυτών.

Για την διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα είδη υλικών για τα οποία θα γίνει λεπτομερής περιγραφή παρακάτω. Τα κύρια υλικά, τα οποία αποτελούν και τα δομικά υλικά των δοκιμίων είναι:

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

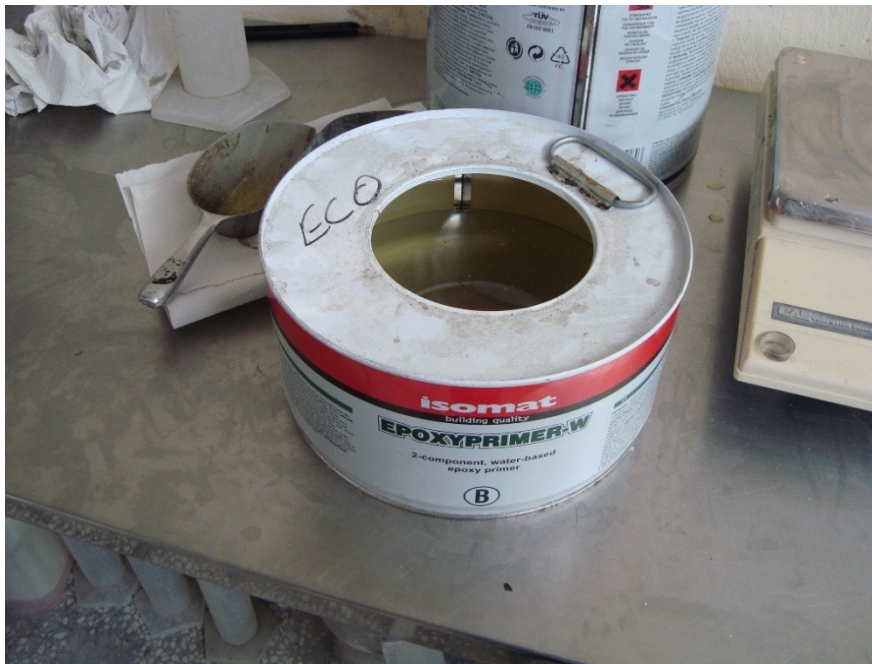
## 2. Υδατοδιαλυτή Εποξειδική Ρητίνη αποτελούμενη από:

- 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 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 ιζώδες των γαλακτωμάτων εποξειδικής ρητίνης, ιδίως όταν αναμιγνύονται με μεγάλες ποσότητες νερού, είναι λίγο μεγαλύτερο από το ιζώδες του νερού. Το χαμηλό ιζώδες 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.

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.

### 3. Νερό



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



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

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 ακρίβειας 0.1γρ.

#### Περιγραφή της διαδικασίας

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρειαζόταν άμμος συγκεκριμένης κοκκομετρικής διαβάθμισης (λεπτόκοκκη). Αρχικά τοποθετήθηκε το κόσκινο Νο 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 κοσκίνισματος 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 κόσκινο No 20

το



**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 ζυγίζονται 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 δοκιμίων ήταν πόσιμο.



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



**Εικόνα 4.14:** Ρήξη 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 ζύγιση 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 ρήψη της στο δοχείο. Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης των παραπάνω υλικών γινόταν σταδιακή ρήψη 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 ρήψη 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 μηχανήμα ανάδευσης.

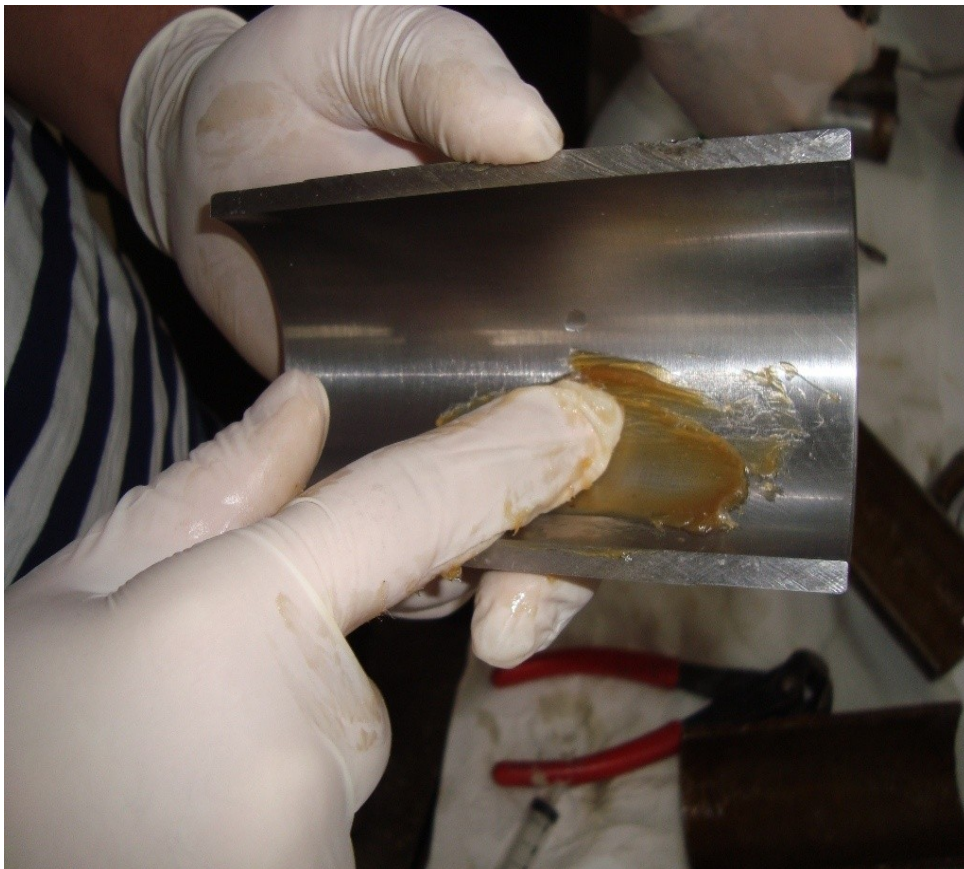


**Εικόνα 4.18:** Ζύγιση Γαλλικής άμμου σε ζυγαριά ακριβείας πριν τη ρήψη της σε μεταλλικό δοχείο, ώστε να γίνει ανάδευση του μίγματος.



**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 ρήψη του μίγματος, το οποίο θα παραμείνει στις μήτρες μέχρι να γίνει η κατάλληλη σκλήρυνση του (Εικόνα 4.20). Όλες οι μήτρες ήταν ανοξείδωτες, 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 καινούριου τύπου, σταθεροί πλαστικοί δακτύλιοι (Εικόνα 4.22).



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

*Σημείωση:* Διαπιστώθηκε στην πορεία των πειραμάτων, ότι η χρήση του γράσου αποτρέπει την διαφυγή του νερού του μίγματος όσο αυτό παραμένει στις μήτρες. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η μείωση της αντοχής του τελικού μίγματος.



**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 σφικτήρες – 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 ρήξη του μίγματος στις ήδη συναρμολογημένες μήτρες με μεγάλη προσοχή, ώστε να μην ξεχειλίσει το μίγμα (**Εικόνα 4.23**). Η ρήξη πρέπει να πραγματοποιείται σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο, για να μην προλάβει να πήξει το μίγμα και γίνει αδύνατη η ρήξη 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:** Ρήξη του τελικού μίγματος στις συναρμολογημένες μήτρες.

Στον πυθμένα του μεταλλικού δοχείου ανάμιξης του μίγματος μαζευόταν στερεό υλικό και ήταν αδύνατη η ρήξη 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 3 ημερών (κατά μέσο όρο) γινόταν αποσυναρμολόγηση των μητρών με ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη αστοχία στα δοκίμια. Οι μήτρες υπόκεινται σε ελαφριά 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.

## 4.2. 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.

#### 4.2.1. 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 δοκιμίων.



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

#### **4.2.2. 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
- Τσιμπίδα
- Ύφασμα λεπτό καθαρισμού (cleansing tissue, βαμβάκι)
- Αντισηπτικό διάλυμα (προτίμηση Μερκουροχρώμ)
- Υγρό σαπούνι σε πλαστική συμπιέσιμη φιάλη

- Ελαστικός επίδεσμος
- Αντισταμμινική αλοιφή (έντομα, αλλεργίες κλπ.)
- Αποστειρωμένες γάζες, κουτιά των 5cm , 10cm και 15cm



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



### 4.3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

#### 4.3.1. ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

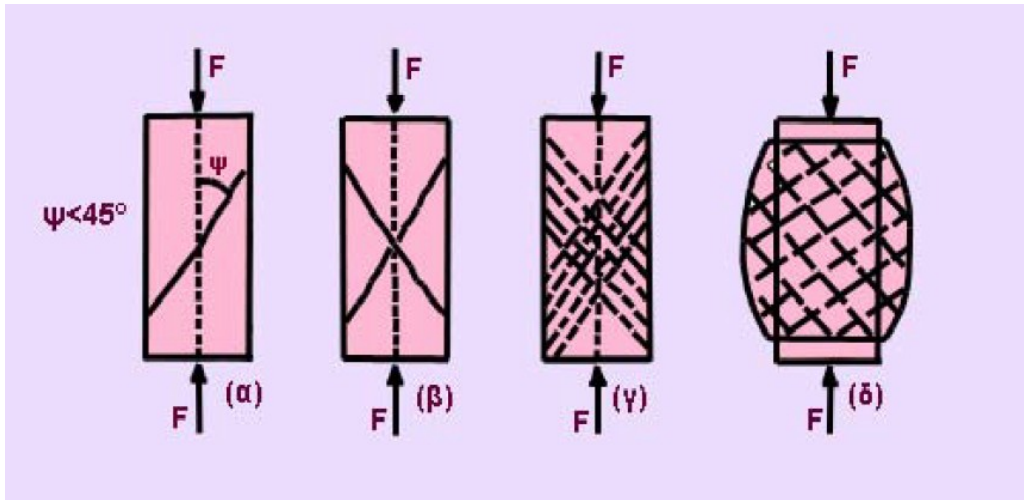
Με τον όρο θλίψη εννοούμε την απλή καταπόνηση κατά την οποία σε ένα δοκίμιο ασκούνται δύο ίσα και αντίθετα αξονικά φορτία με φορά τέτοια που να τείνουν να προκαλέσουν συμπίεση του δοκιμίου. Στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης συναντάμε συχνά τους όρους **θλιπτική τάση** και **θλιπτική παραμόρφωση**.

Η δοκιμή αυτή έχει σαν σκοπό τον άμεσο και ακριβή προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων. Τα δοκίμια είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους (L) προς διάμετρο (D), L/D 2.0 μέχρι 3.0 και διάμετρο όχι μικρότερη από 54 mm. Οποσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των συστατικών που αποτελούν τη δομή του εδάφους. Τα άκρα του δοκιμίου είναι λεία και επίπεδα με μέγιστη απόκλιση 0.02 mm και παράλληλα μεταξύ τους, ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0.001 rad.

Η περιμετρική κυλινδρική επιφάνεια είναι ελεύθερη από προεξοχές, δηλαδή λεία, απαλλαγμένη από απότομες ανωμαλίες με μέγιστη απόκλιση από την ευθεία για όλο το μήκος του δοκιμίου 0.3 mm.

Η μονοαξονική (ανεμπόδιστη) θλίψη χρησιμοποιείται ευρύτατα, καθώς είναι η πλέον απλή δοκιμή. Η δοκιμή αυτή γίνεται μόνο σε συνεκτικά εδάφη, που μπορούν να φέρουν μονοαξονικό φορτίο. Τέτοια εδάφη είναι οι στιφρές άργιλοι, λεπτόκοκκης άμμου κ.α. όπου τα μορφωμένα δείγματα μπορούν να διατηρήσουν το σχήμα τους χωρίς την βοήθεια παράπλευρης πίεσης - εγκιβωτισμού.

Στην **Εικόνα 4.40** παρουσιάζονται τέσσερεις τρόποι αστοχίας δοκιμίων σε θλιπτικές συνθήκες.



**Εικόνα 4.40:** Τρόποι αστοχίας των δοκιμίων σε θλιπτικές συνθήκες

- α) Θραύση σε διάτμηση
- β) Συζυγής θραύση σε διάτμηση
- γ) Πολλαπλή θραύση σε διάτμηση
- δ) Αστοχία με διαρροή

**Διαδικασία:**

Το εδαφικό δοκίμιο τοποθετείται στο ειδικό μηχάνημα κοπής και λείανσης δοκιμίων (**Εικόνα 4.41**). Το δοκίμιο κόβεται μόνον κατά τη διαμήκη διεύθυνση, αφού η διάμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου θα παραμείνει σταθερή. Το τελικό μήκος πρέπει να έχει τιμή 11.3 cm (προσεγγιστικά).



**Εικόνα 4.41:** Μηχάνημα κοπής και λείανσης δοκιμίων

Μετά τη μόρφωση του το δοκίμιο μετρήθηκε με το ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας  $\pm 0.01$  mm (**Εικόνα 4.42**). Ο μέσος όρος των μετρήσεων είχε τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Μήκος κυλινδρικού δοκιμίου:  $L = 11.3$  cm.
- Διάμετρος δοκιμίου:  $D = 5.43$  cm.



**Εικόνα 4.42:** Ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας  $\pm 0.01$ mm.

Αφού λοιπόν έχει γίνει επαλήθευση των διαστάσεων του δοκιμίου με το ηλεκτρονικό παχύμετρο, ακολουθεί η τοποθέτηση του στην πρέσα για την δοκιμή θλίψης (**Εικόνα 4.43**). Η πρέσα αποτελείται από 3 βασικά μέρη:

- Την κυρίως διάταξη
- Το πορτάκι ασφαλείας
- Την ψηφιακή ένδειξη

Η μηχανή φόρτισης (πρέσα) διαθέτει δυο χαλύβδινες πλάκες κυκλικού σχήματος και σκληρότητας όχι μικρότερης του HRC 58. Η μια από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη. Οι πλάκες αυτές έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15 mm και οι επιφάνειες τους δεν πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0,005 mm. Το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση είναι κεντρωμένα σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

Εκτός από την πρέσα απαραίτητη θεωρείται και η χρησιμοποίηση μηκυσιόμετρου, με το οποίο μετρείται η παραμόρφωση του δοκιμίου (**Εικόνα 4.46**). Σημειώνεται ότι μία επανάληψη (κύκλος) του δείκτη ισοδυναμεί με 1 mm παραμόρφωσης του δείγματος.

Ουσιαστικά, αφού το δοκίμιο στη συγκεκριμένη περίπτωση καταπονείται σε δοκιμή θλίψης, η παραμόρφωση θα είναι βράχυνση.



**Εικόνα 4.43:** Συνολική διάταξη πρέσας στο εργαστήριο σκυροδέματος στο Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.44** η ένδειξη της εφαρμοζόμενης δύναμης εμφανίζεται ψηφιακά. Σημειώνεται ότι, η δυνατότητα μέτρησης της δύναμης που ασκούν οι πλάκες στο δοκίμιο εκφράζεται σε kN. Η ακρίβεια ένδειξης φτάνει πρώτο δεκαδικό ψηφίο. Στην **Εικόνα 4.45** απεικονίζεται το πορτάκι ασφαλείας της πρέσας, με το άνοιγμα του οποίου, πραγματοποιείται αυτόματη διακοπή της λειτουργίας ολόκληρης της διάταξης της πρέσας.



Εικόνα 4.44: Ψηφιακή ένδειξη τοποθετημένη στο μηχάνημα πρέσας.



Εικόνα 4.45: Πορτάκι ασφαλείας στο μηχάνημα της πρέσας..



**Εικόνα 4.46:** Αναλογικό μηκυνσιόμετρο. Μετράει την παραμόρφωση δοκιμίου σε εκατοστά του χιλιοστού.

Η φόρτιση γίνεται με ταχύτητα τάξης μεγέθους 1-5 mm/λεπτό. Λόγω της σχετικής υψηλής παραμορφωσιμότητας των δοκιμίων έναντι των δύσκαμπτων πλακών της συσκευής (από χάλυβα), το πείραμα γίνεται ουσιαστικά με έλεγχο των παραμορφώσεων (strain controlled). Κατά τον άξονα κατάλληλα διαμορφωμένου δοκιμίου (συνήθως κυλινδρικού) εφαρμόζεται ένα σταδιακά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο μέχρι τη θραύση του. Το πείραμα διαρκεί κάθε φορά 5-10 λεπτά. Η τάση που αντιστοιχεί στη θραύση αποτελεί την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη και υπολογίζεται από την σχέση (4.1):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

όπου:

$\sigma$ : θλιπτική τάση σε MPa

$F$ : δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο σε kN

A: εμβαδόν διατομής σε mm<sup>2</sup>

Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της θλιπτικής αντοχής:

- Η τριβή μεταξύ των πλακών επιβολής του φορτίου και των βάσεων του δοκιμίου.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου όπως το σχήμα (κυλινδρικό, πρισματικό, ακανόνιστο), ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο ("κανονικός" λόγος  $h/d=2$ ) και το μέγεθος του δοκιμίου
- Ο ρυθμός φόρτισης
- Η υγρασία
- Η ορυκτολογική σύσταση δοκιμίου, μέγεθος κόκκων, πορώδες κ.α.

**ΠΡΟΣΟΧΗ!** Η υγρασία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή. Είναι καλύτερα οι δοκιμές να γίνονται στις ίδιες συνθήκες με αυτές που επικρατούν επιτόπου. Για αυτό και η ISRM προτείνει να γίνονται δοκιμές σε περιβάλλον  $20\pm 2^\circ$  C και σχετική υγρασία 50%.

#### **4.3.2. ΔΟΚΙΜΗ ΎΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (BRAZILIAN TEST-ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ).**

Ένας έμμεσος τρόπος προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής ( $\sigma_t$ ) των δοκιμίων είναι η δοκιμή κατά γενέτειρα (Brazilian Test) αρκετά διαδεδομένη λόγω της απλότητας της σε αντίθεση με τις δυσκολίες κατά την εκτέλεση του άμεσου τρόπου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής.

Τα δοκίμια είναι σχήματος δίσκου του οποίου το ύψος (L) ποικίλει (5-11 cm) και η διάμετρος (D) είναι 5.43cm. Τα άκρα του δοκιμίου είναι επίπεδα και παράλληλα μεταξύ τους. Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή καλά θα είναι να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές και επιτόπου συνθήκες. Κάποιες φορές όμως είναι δυνατόν οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές η το δοκίμιο να είναι σε ξηρή κατάσταση.

##### **Διαδικασία.**

Το δοκίμιο διαμορφώνεται στις παραπάνω διαστάσεις ενώ η κυλινδρική επιφάνεια του (περίμετρος) είναι ελεύθερη από προεξοχές, δηλαδή λεία και απαλλαγμένη από απότομες ανωμαλίες με μέγιστη απόκλιση από την ευθεία για όλο το μήκος του δοκιμίου 0.3 mm. Έπειτα μετριέται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού παχύμετρου ακριβείας 0.01 mm.

Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετείται στην πρέσα και εφαρμόζεται σε αυτό ένα σταδιακά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο με σταθερή ταχύτητα φόρτισης από 150-200 N/sec, ώστε η θραύση του δοκιμίου να επέλθει σε 15-30 sec.

Επειδή η συσκευή δεν είναι εφοδιασμένη με καταγραφέα (φορτίου - παραμόρφωσης) ο χειριστής δίνει προσοχή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος με σκοπό να προσδιοριστεί το μέγιστο φορτίο, δηλαδή το φορτίο που σημειώνεται κατά τη θραύση του δοκιμίου.

Αν το φορτίο κατά τη θραύση είναι  $F_{max}$  τότε η έμμεση εφελκυστική αντοχή του υλικού δίνεται από τη σχέση (4.2):

$$\sigma_e = \frac{2 * F_{max}}{\pi * L * D} \quad (4.2)$$

όπου:

$\sigma_e$ : εφελκυστική τάση σε MPa

$F_{max}$ : δύναμη που προκαλεί θραύση του δοκιμίου σε kN

$\pi$ : μαθηματική σταθερά ίση με 3,14 (κατά προσέλευση)

$L$ : μήκος δοκιμίου

$D$ : διάμετρος δοκιμίου

Η εφελκυστική αντοχή ( $\sigma_t$ ) των εδαφών είναι από τις λιγότερο συχνά προσδιοριζόμενες μηχανικές ιδιότητες των εδαφών αφού στις εφαρμογές χρησιμοποιείται συνήθως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και εκτιμάται ότι η εφελκυστική αντοχή ενός δοκιμίου αποτελεί το 5-10% της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη.

### 4.3.3. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Η τριαξονική θλίψη, είναι η πλέον διαδεδομένη δοκιμή για τον προσδιορισμό της αντοχής των εδαφικών υλικών. Η δοκιμή αυτή παρέχει τιμές  $\phi$ ,  $c$  δηλαδή την γωνία εσωτερικής τριβής και της φαινόμενης συνοχής των δοκιμίων. Το πείραμα μπορεί να γίνει είτε σε αστράγγιστες συνθήκες (με μέτρηση ή όχι της πίεσης των πόρων και στερεοποίηση), είτε σε συνθήκες πλήρους στράγγισης (με στερεοποίηση). Με μία σειρά πειραμάτων (3 τουλάχιστον, ή π.χ. 2 και μία μονοαξονική θλίψη), όπου κάθε πείραμα μπορεί να αναπαρασταθεί με κύκλο Mohr, γίνεται η εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής. Τα πειράματα ανάλογα με την κατηγορία (αστράγγιστα ή στραγγιζόμενα), κρατάνε από λίγες ώρες έως ημέρες.



Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης είναι ουσιαστικά μία εξέλιξη της μονοαξονικής δοκιμής, όπου είναι δυνατός ο έλεγχος της παράπλευρης τάσης - πίεσης ( $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$ ). Έτσι είναι δυνατή η διενέργεια πολλών δοκιμών με διαφορετικά σεί ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) που οδηγούν στην αστοχία, σχεδιασμός των αντίστοιχων κύκλων Mohr, της περιβάλλουσας αστοχίας και τέλος της εκτίμησης των παραμέτρων  $\phi$  και  $c$ . Επιπλέον είναι δυνατός ο έλεγχος της πίεσης - υπερπίεσης πόρων και των συνθηκών στράγγισης.

Το εδαφικό δοκίμιο τοποθετείται στο ειδικό μηχάνημα κοπής και λείανσης δοκιμίων το οποίο φαίνεται στην **Εικόνα 4.47**. Το δοκίμιο κόβεται μόνον κατά τη διαμήκη διεύθυνση, αφού η διάμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου θα παραμείνει σταθερή. Το τελικό μήκος πρέπει να έχει τιμή 11.3 cm (προσεγγιστικά).



**Εικόνα 4.47:** Συνολική διάταξη μηχανήματος κοπής δοκιμίων, αποτελούμενη από τον τροχό και τη βάση τοποθέτησης δοκιμίων.

Μετά τη μόρφωση του το δοκίμιο μετρήθηκε με το ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας  $\pm 0.01$  mm (**Εικόνα 4.48**). Η διάμετρος ( $D$ ) του δοκιμίου μετριέται με τη λήψη του μέσου όρου δυο μετρήσεων της διαμέτρου σε ορθή γωνία μεταξύ τους, η μια στο μέσον του δοκιμίου και η άλλη στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Το δοκίμιο μετρήθηκε και κατά την διαμήκη διεύθυνση.

Ο μέσος όρος των μετρήσεων είχε τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Μήκος κυλινδρικού δοκιμίου:  $L = 11.3 \text{ cm}$ .
- Διάμετρος δοκιμίου:  $D = 5.43 \text{ cm}$ .

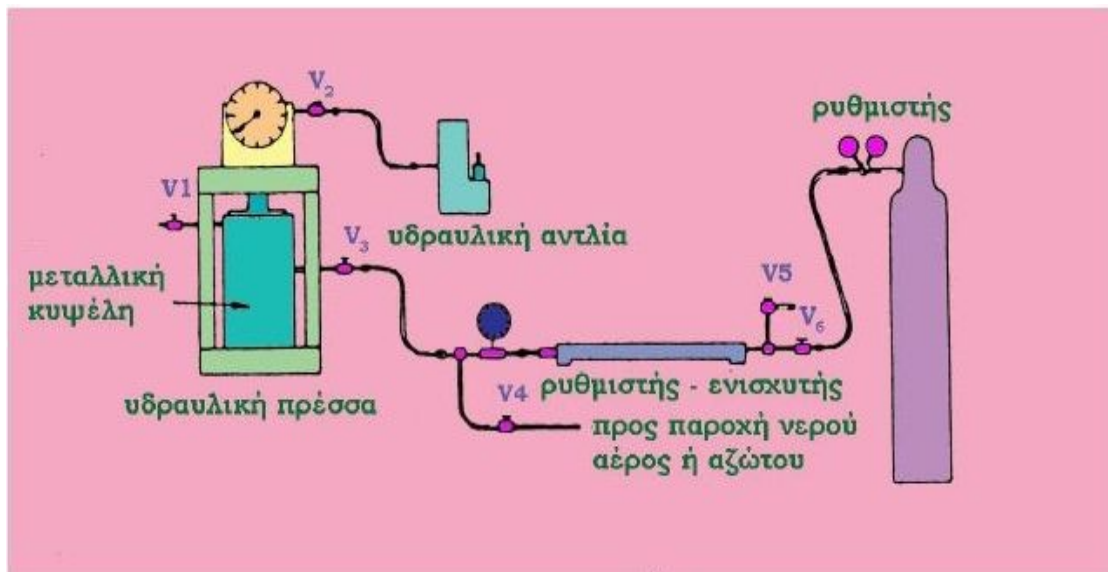


**Εικόνα 4.48:** Ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας  $\pm 0.01\text{mm}$ .

Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτούνται οι παρακάτω συσκευές:

- Η συσκευή επιβολής του αξονικού φορτίου (πρέσα),
- Σύστημα εφαρμογής και μέτρησης πλευρικής πίεσης (πρέσα πλευρικής πίεσης) και
- Τριαξονικό κελί υψηλών πιέσεων (Hoek cell) και ελαστικές μεμβράνες

Οι συσκευές αυτές περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω. Στην **Εικόνα 4.49** παρουσιάζεται σχηματικά το σύστημα εφαρμογής της τριαξονικής θλίψης.



Εικόνα 4.49: Συσκευή τριαξονικής θλίψης

**Συσκευή αξονικής φόρτισης (πρέσα):** Η συσκευή αυτή η οποία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.50**, είναι κατάλληλα εξοπλισμένη με μανόμετρο ή ηλεκτρονική ένδειξη για την εφαρμογή, τον έλεγχο και την μέτρηση του αξονικού φορτίου. Το φορτίο εφαρμόζεται συνεχώς και βαθμιαία στο δοκίμιο με σταθερή ταχύτητα φόρτισης 0.5-1.0 MPa/sec. Η θραύση του δοκιμίου πρέπει να επέλθει σε 5-15 min.



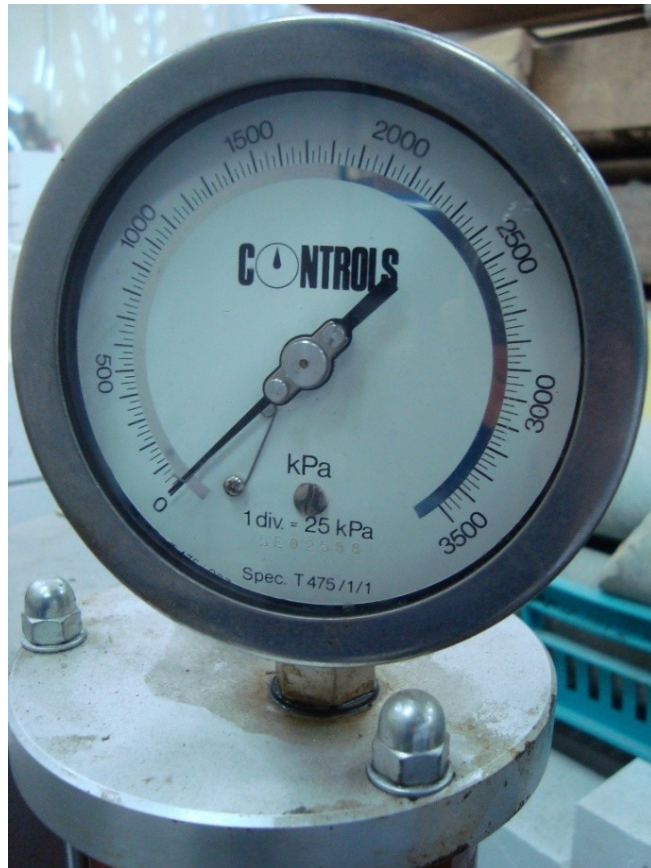
**Εικόνα 4.50:** Διάταξη πρέσας στο εργαστήριο σκυροδέματος στο Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

**Σύστημα εφαρμογής και μέτρησης πλευρικής πίεσης (πρέσα πλευρικής πίεσης):** Περιλαμβάνει υδραυλική αντλία για την επιβολή σταθερής πλευρικής πίεσης, την οποία πρέπει να διατηρεί μια απόκλιση όχι μεγαλύτερη του 2% της επιθυμητής, καθώς επίσης και ένα κατάλληλο μηχανισμό για την μέτρηση της (μανόμετρο ή ηλεκτρονική ένδειξη).

Στην **Εικόνα 4.51** φαίνεται η πρέσα της πλευρικής πίεσης η οποία εφαρμόζεται με την βοήθεια λαδιού. Το λάδι είναι αποθηκευμένο στο δοχείο, το οποίο βρίσκεται στο κάτω μέρος του μανομέτρου, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Η **Εικόνα 4.52** παρουσιάζει σε μεγέθυνση το μανόμετρο, ενώ στην **Εικόνα 4.53** διακρίνεται καθαρά η βαλβίδα ρύθμισης της εφαρμογής της πίεσης.



**Εικόνα 4.51:** Πρέσα πλευρικής πίεσης.



**Εικόνα 4.52:** Ένδειξη της εφαρμοζόμενης πλευρικής πίεσης εκφρασμένη σε kPa.



**Εικόνα 4.53:** Βαλβίδα ρύθμισης της εφαρμοζόμενης πίεσης.

**Τριαξονικό κελί υψηλών πιέσεων (Hoek cell) και ελαστικές μεμβράνες:** Στο κελί αυτό, το οποίο φαίνεται αποσυναρμολογημένο στην **Εικόνα 4.54**, τοποθετούνται τα δοκίμια τα οποία περιβάλλονται με αδιαπέρατη εύκαμπτη μεμβράνη. Το κελί είναι εξοπλισμένο με τέσσερις χαλύβδινες προσθήκες, μια σφαιρική έδραση, όπου προσαρμόζονται ανά δύο στις άκρες του δοκιμίου και έχουν σκληρότητα όχι μικρότερη από HRC 58 κατά Rockwell, ενώ οι επιφάνειες δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0.005 mm. Το τριαξονικό κελί πρέπει να έχει κατάλληλη είσοδο για την πλήρωση του με λάδι καθώς επίσης και βαλβίδα διαφυγής του αέρα (δύο ταχυσύνδεσμοι).

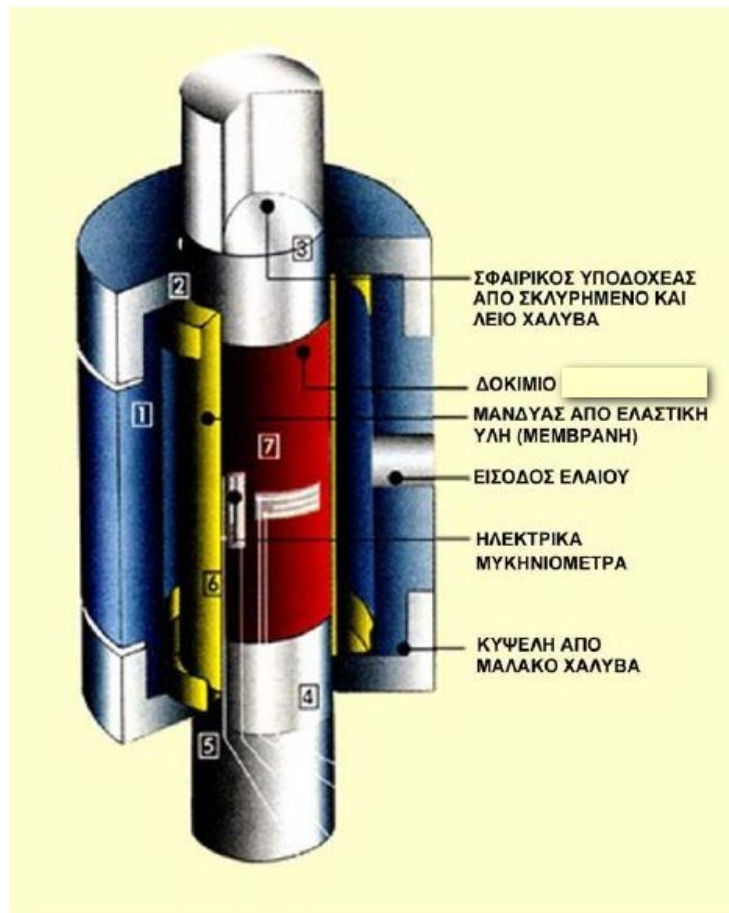
Στην **Εικόνα 4.55** βλέπουμε το κελί υψηλών πιέσεων (Hoek cell) συναρμολογημένο και έτοιμο για χρήση, ενώ στην **Εικόνα 4.56** που ακολουθεί παρουσιάζεται σε τομή ένα μοντέλο θαλάμου Hoek με τα σημαντικότερα σημεία από τα οποία αποτελείται να φαίνονται ονομαστικά.



**Εικόνα 4.54:** Τριαξονικό κελί υψηλών πιέσεων αποσυναρμολογημένο (Hoek cell).



Εικόνα 4.55: Συναρμολογημένο τριαξονικό κελί υψηλών πιέσεων (Hoek cell).



Εικόνα 4.56: Θάλαμος Hoek για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών

#### Σύντομη περιγραφή πειράματος τριαξονικής δοκιμής

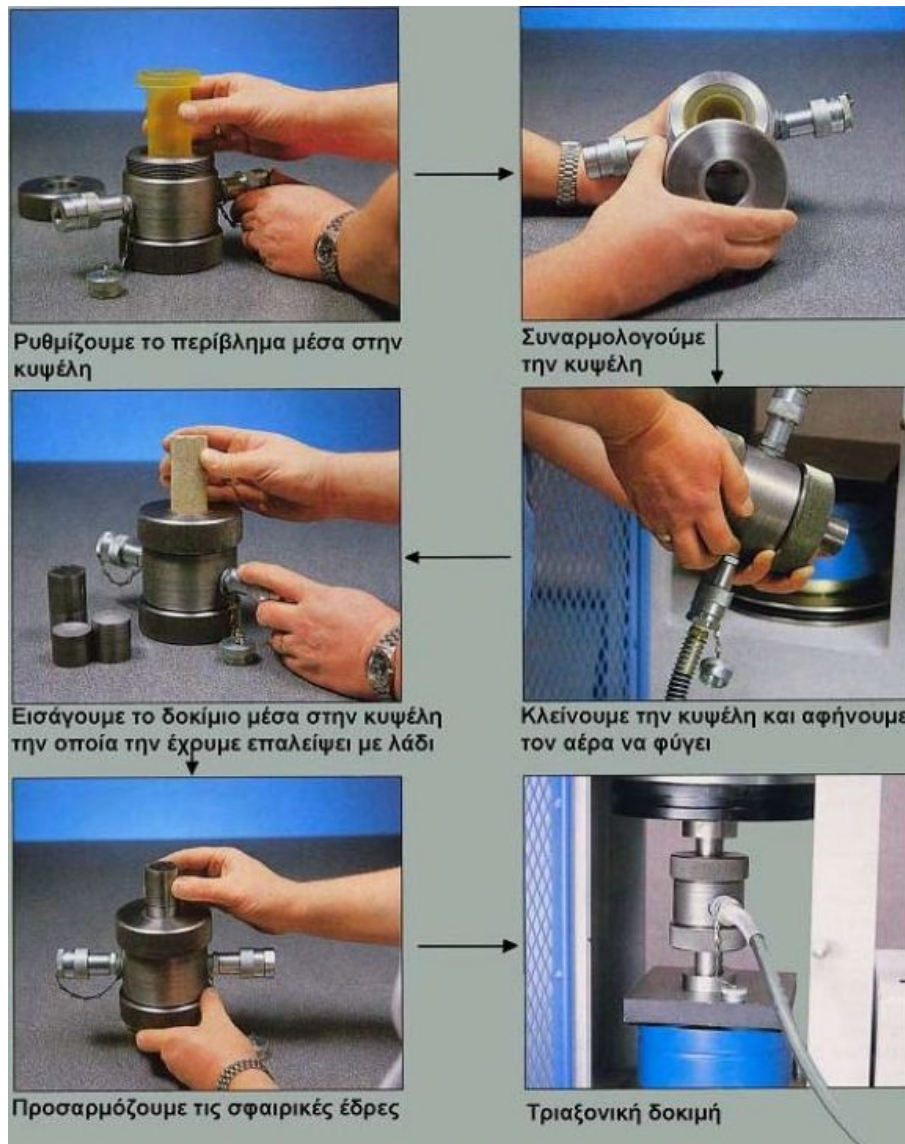
Η όλη διαδικασία και μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας διεκπεραιώνεται σε δύο φάσεις:

**ΦΑΣΗ 1<sup>η</sup>:** Πλήρωση της πρέσας με υδραυλικό υγρό (λάδι) και με τη ρύθμιση των κατάλληλων βαλβίδων, το υγρό κυκλοφορεί στο κύκλωμα.

**ΦΑΣΗ 2<sup>η</sup>:** Διοχέτευση του λαδιού στην τρόμπα υψηλής πίεσης και παράλληλα εξαέρωση της.

Γίνεται σύνδεση της πρέσας πλευρικής πίεσης με το τριαξονικό κελί, με λάστιχο υψηλής πίεσης μέσο ταχυσυνδέσμου. Ρυθμίζεται η επιθυμητή πλευρική πίεση σ3 στην ειδική συσκευή πλευρικής πίεσης με την βοήθεια αντιστοίχισης βαρών-πλευρικής πίεσης σ3. Τοποθετείται η μεμβράνη στο κελί και στη συνέχεια το δοκίμιο. Τοποθετούνται πάνω και κάτω οι δυο μεταλλικές προσθήκες (**Εικόνα 4.58**), με τα σφαιρικά άκρα έξω από το κελί, ενώ απέχουν εξίσου από τα άκρα του κελιού. Πιέζονται ελαφρά ώστε να εφαρμόζουν σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου (βλέπε **Εικόνα 4.59**). Ρυθμίζονται οι κατάλληλες βαλβίδες μέχρι να ασκηθεί στο κελί μικρή πίεση (περίπου 3-5 bar), ώστε το δοκίμιο και οι δυο προσθήκες να συγκρατούνται πλέον από την πίεση. Σχηματικά η διαδικασία αυτή που περιγράφεται φαίνεται και στην **Εικόνα 4.57**:





**Εικόνα 4.57:** Προετοιμασία δοκιμίου για δοκιμή στην τριαξονική θλίψη.

Στρέφεται το κελί σε τέτοια θέση ώστε ο ελεύθερος ταχυσύνδεσμος (παίζει το ρόλο της βαλβίδας εξαέρωσης) να βρίσκεται προς τα πάνω και πιέζεται η μπίλια του ταχυσυνδέσμου ώστε να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας. Εφαρμόζεται πάλι η μικρή πίεση στο κελί όπως παραπάνω. Τοποθετείται το κελί στην πρέσα αξονικής φόρτισης και εξασκείται ένα μικρό αξονικό φορτίο, ενώ συγχρόνως γίνεται ευθυγράμμιση του κελιού με τον άξονα φόρτισης.



**Εικόνα 4.58:** Βοηθητικό εξάρτημα στήριξης του κελιού τριαξονικής δοκιμής.



**Εικόνα 4.59:** Διαδικασία σταθεροποίησης του κελιού τριαξονικής δοκιμής.

Ανεβάζουμε την υδατική πίεση στο επιθυμητό σημείο. Το δείγμα είναι σε ομοιόμορφη - υδροστατική πίεση  $\sigma_f = \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Μηδενίζουμε την μέτρηση κατακόρυφου φορτίου. Επιβάλλουμε αξονικό φορτίο στο δείγμα (P). Μετράμε το φορτίο P και την αξονική παραμόρφωση  $\Delta l$ . Αυξάνονται προοδευτικά και ομοιόμορφα οι δυο πιέσεις (αξονική και πλευρική), μέχρι η αξονική και η πλευρική πίεση να εξισωθούν στην τιμή της επιθυμητής

πλευρικής ( $\sigma_3$ ). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αντλίας πλευρικής πίεσης, λαμβάνοντας υπόψη την αντιστοιχία πλευρικής πίεσης και ορθού φορτίου. Στην φάση αυτή πρέπει να σταθεροποιηθεί η πλευρική πίεση στην πρέσα. Αυτό γίνεται με κλείσιμο της κατάλληλης βαλβίδας και διατήρηση της μέσω ειδικού κομπλέρ. Τώρα πλέον το αξονικό φορτίο αυξάνεται συνεχώς και βαθμιαία ενώ η πλευρική πίεση διατηρείται σταθερή με απόκλιση από την επιθυμητή τιμή μικρότερη του 2%. Η τιμή της πλευρικής πίεσης ( $\sigma_3$ ) και του αξονικού φορτίου (P) αναγράφονται στο δελτίο δοκιμής. Επίσης αναγράφονται τα στοιχεία του δείγματος και ότι άλλο κρίνεται απαραίτητο. Το δοκίμιο αστοχεί όταν με την αύξηση της παραμόρφωσης, το φορτίο μένει σταθερό ή μειώνεται. Καταγράφουμε το οριακό φορτίο για να κάνουμε τους υπολογισμούς αντοχής. Μετά την θραύση, γίνεται αποφόρτιση και των δυο πιέσεων αργά και ταυτόχρονα μέχρι να απελευθερωθεί το δοκίμιο με τις προσθήκες από την πίεση στο κελί. Στη συνέχεια απομακρύνονται οι προσθήκες και το δοκίμιο (χρησιμοποιώντας τον εξολκέα, αν είναι απαραίτητο)

Από τις υπολογιζόμενες αξονικές και πλευρικές τάσεις κατά τη θραύση σχεδιάζονται είτε οι αντίστοιχοι κύκλοι Mohr είτε διαγράμματα πλευρικής πίεσεως  $\sigma_3$  - αξονικής τάσης θραύσεως  $\sigma_1$  και προσδιορίζονται οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής. Προσαρμόζεται η βέλτιστη καμπύλη, ή συνηθέστερα διάφορα ευθύγραμμα τμήματα για διαφορετικά τμήματα της καμπύλης. Κάθε ένα από αυτά τα ευθύγραμμα τμήματα χαρακτηρίζεται από την κλίση του  $m$  και το τμήμα  $b$  που ορίζεται στον άξονα  $y$ .

Χρησιμοποιώντας αυτές τις δυο παραμέτρους, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο εύρος πλευρικών πιέσεων, προκύπτουν από τις σχέσεις (4.3) και (4.4):

$$\text{Γωνία τριβής } \varphi: \quad \boxed{\phi = \arcsin \frac{m-1}{m+1}} \quad (4.3)$$

$$\text{Συνοχή } c: \quad \boxed{c = b \frac{1 - \sin \varphi}{2 * \cos \varphi}} \quad (4.4)$$

#### 4.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από όλα τα παραπάνω που αναφέρθηκαν προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Όσον αφορά την παρασκευή των δοκιμίων οι ποσότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι ακριβείς και να μην αποκλίνουν από αυτές που έχουν υπολογιστεί. Οποιαδήποτε μικρή διαφορά στην ποσότητα τους μπορεί να έχει ως αντίκτυπο τη μείωση της αντοχής των δοκιμίων, τη μείωση της εργασιμότητάς τους και άλλων σημαντικών ιδιοτήτων τους.

Κατά τη διαδικασία ανάδευσης του μίγματος η ρήψη της άμμου στο μίγμα θα πρέπει να είναι σταδιακή. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκύψει μίγμα με μεγάλη σκληρότητα και ελάχιστη εργασιμότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί έπειτα να γίνει εύκολη ρήψη του μίγματος στα καλούπια, αλλά και την εμφάνιση ρωγμών στο τελικό δοκίμιο.

Επίσης κατά την πειραματική διαδικασία δοκιμάστηκαν δύο υλικά επάλειψης των μητρών, μέσα στις οποίες γινόταν η σκλήρυνση των δοκιμίων. Τα δύο αυτά υλικά ήταν το γράσο και το λάδι. Από τα αποτελέσματα αποδείχτηκε, ότι η αντοχή των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε γράσο ήταν μικρότερη από αυτών που χρησιμοποιήθηκε λάδι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το γράσο δεν επιτρέπει τη διαρροή της περίσσειας του νερού από το μίγμα, ενώ και κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης των δοκιμίων χωρίς τις μήτρες υπήρχε μία στρώση γράσου που περικλείει το δοκίμιο και δεν επέτρεπε το νερό να εξατμιστεί.

Σε όσα μίγματα παρατηρείται λιμνάζων νερό στην επιφάνεια τους, πρέπει να αφαιρείται με σύριγγα ή με οποιονδήποτε άλλο τρόπο. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με ιδιαίτερη προσοχή, για να αποφευχθεί η αφαίρεση οποιουδήποτε άλλου υλικού του μίγματος, εκτός του νερού. Η περίσσεια νερού έχει σαν αποτέλεσμα την καθυστέρηση της πήξης του δείγματος, με συνέπεια τη μικρότερη αντοχή των δοκιμίων.

Τα μίγματα με υψηλή περιεκτικότητα νερού ( $ER/W=1/2$  και  $1/1$ ) απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής μέσα στα καλούπια, γιατί υπάρχει η περίπτωση θραύσης του κατά τη διάρκεια αφαίρεσης των καλουπιών. Υπήρξαν περιπτώσεις κατά τη πειραματική διαδικασία, όπου τα καλούπια των δοκιμίων αφαιρέθηκαν πρόωρα με αποτέλεσμα την καταστροφή των δοκιμίων. Έπειτα τα δοκίμια αυτά οδηγούνται υποχρεωτικά σε απόρριψη.

Πριν την καταπόνηση των δοκιμίων σε οποιαδήποτε μορφή δοκιμής (μονοαξονική θλίψη, εφελκυσμό κλπ) πρέπει να γίνεται προσεκτική λείανση των επιφανειών των δοκιμίων, έτσι ώστε οι πλάκες της πρέσας να εφάπτονται σε ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 5

### ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 5.1. ΓΕΝΙΚΑ.

Μετά την πειραματική διαδικασία ακολουθεί η μελέτη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της. Τα δοκίμια καταπονήθηκαν στις παρακάτω δοκιμές:

- Μονοαξονική θλίψη
- Εφελκυσμός (Brazilian Test)
- Τριαξονική θλίψη

Προτού πραγματοποιηθεί μία δοκιμή μεσολαβούσε ο απαιτούμενος χρόνος σκλήρυνσης, που αντιστοιχεί σε κάθε δοκίμιο. Όσο μεγαλύτερος ήταν ο χρόνος σκλήρυνσης τόσο μεγαλύτερη ήταν και η αντοχή του δοκιμίου. Οι χρόνοι σκλήρυνσης των δοκιμίων είναι οι παρακάτω:

- 7 ημέρες
- 28 ημέρες
- 90 ημέρες
- 180 ημέρες

Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε 4 κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε εποξειδική ρητίνη και νερό αντίστοιχα. Οι αναλογίες είναι οι ακόλουθες:

- ER/W=1/2
- ER/W=1/1
- ER/W=1.5/1
- ER/W=2/1

## 5.2. ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.

Μετά την καταπόνηση σε θλίψη τα δοκίμια παρουσιάζουν διαγώνια ρωγμή κατά μήκος του δοκιμίου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.1**:



**Εικόνα 5.1:** Αστοχία του δοκιμίου μετά την καταπόνηση του σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

*Σημείωση: Το δοκίμιο που απεικονίζεται στις **Εικόνες 5.1 και 5.2**, καταπονήθηκε σε μονοαξονική θλίψη μέχρι και το σημείο απόσχισης του. Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια*

*καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη μέχρι το σημείο θραύσης τους και οι ρωγμές δεν ήταν ιδιαίτερα εμφανείς.*



**Εικόνα 5.2:** Αστοχία του δοκιμίου που προκλήθηκε έπειτα από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Στους Πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3, παρουσιάζονται η επιμήκυνση, η δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, η παραμόρφωση του και η θλιπτική τάση για τις αναλογίες  $ER/W = 1/1$ ,  $ER/W = 1.5/1$ ,  $ER/W = 2/1$  αντίστοιχα για χρόνο σκλήρυνσης **7 ημερών**.

### 5.2.1. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 7 ΗΜΕΡΕΣ

Πίνακας 5.1: Θλιπτική αντοχή δοκιμίου 7 ημερών με αναλογία ER/W = 1/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: 7 Ημέρες			
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	σ (MPa)
			ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,2	0,04	0,09
10	0,3	0,09	0,12
15	0,3	0,13	0,14
20	0,4	0,18	0,16
30	0,4	0,27	0,18
40	0,5	0,36	0,21
50	0,5	0,45	0,22
60	0,6	0,54	0,25
70	0,6	0,63	0,27
80	0,7	0,72	0,29
90	0,7	0,81	0,30
100	0,7	0,90	0,32
110	0,8	0,99	0,33
120	0,8	1,08	0,34
130	0,8	1,16	0,34
140	0,8	1,25	<b>0,35</b>
150	0,8	1,34	<b>0,35</b>
160	0,8	1,43	<b>0,35</b>
170	0,8	1,52	<b>0,35</b>
180	0,8	1,61	<b>0,35</b>
190	0,8	1,70	<b>0,35</b>
200	0,8	1,79	<b>0,35</b>
210	0,8	1,88	<b>0,35</b>
220	0,8	1,97	<b>0,35</b>
230	0,8	2,06	<b>0,35</b>
240	0,8	2,15	<b>0,35</b>
250	0,8	2,24	<b>0,35</b>
260	0,8	2,33	<b>0,35</b>
270	0,8	2,42	<b>0,35</b>
280	0,8	2,51	<b>0,35</b>
290	0,8	2,60	<b>0,35</b>
300	0,8	2,69	<b>0,35</b>
310	0,8	2,78	<b>0,35</b>
320	0,8	2,87	<b>0,35</b>
330	0,8	2,96	<b>0,35</b>
340	0,8	3,05	0,34
350	0,8	3,14	0,33

Όπου:

Δl: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN



$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Παρατηρείται στον **Πίνακα 5.1**, ότι η τάση  $\sigma$  αυξάνεται σταδιακά, μέχρι να φτάσει στο όριο θραύσης, όπου και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Από εκείνο το σημείο και έπειτα η τάση μειώνεται, αφού έχει επέλθει η θραύση του δοκιμίου. Για την αναλογία ER/W:1/1 παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη αντοχή λαμβάνει την τιμή  $\sigma_{\max} = 0.35 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.2** : Θλιπτική αντοχή δοκιμίου 7 ημερών με αναλογία ER/W = 1.5/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>7 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1.5/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,2	0,04	0,09
30	0,5	0,20	0,22
40	0,7	0,36	0,30
60	0,8	0,47	0,35
70	0,9	0,63	0,39
90	1,0	0,78	0,43
100	1,1	0,92	0,48
120	1,2	1,15	0,52
190	1,4	1,70	0,60
220	1,5	1,97	0,65
250	1,6	2,24	0,69
290	1,7	2,60	0,73
330	1,8	2,96	0,77
340	1,8	3,05	<b>0,78</b>
350	1,8	3,14	<b>0,78</b>
360	1,8	3,23	<b>0,78</b>
370	1,8	3,32	<b>0,78</b>
380	1,8	3,41	<b>0,78</b>
390	1,8	3,49	<b>0,78</b>
400	1,8	3,58	<b>0,78</b>
450	1,8	4,03	<b>0,78</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Από τον **Πίνακα 5.2** φαίνεται ότι η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου με αναλογίες ER/W:1.5/1 λαμβάνει την τιμή  $\sigma_{\max} = 0.78 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.3 :** Θλιπτική αντοχή δοκιμίου 7 ημερών με αναλογία ER/W = 2/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>7 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,2	0,04	0,09
15	0,3	0,05	0,13
20	0,4	0,08	0,17
30	0,6	0,14	0,24
40	0,7	0,20	0,30
50	0,9	0,32	0,38
60	1,1	0,45	0,46
70	1,3	0,57	0,54
80	1,4	0,72	0,60
100	1,5	0,84	0,65
110	1,6	0,99	0,69
120	1,7	1,11	0,73
140	1,8	1,25	0,78
150	1,9	1,40	0,82
160	2,0	1,54	0,86
200	2,2	1,79	0,93
230	2,3	2,06	1,00
250	2,4	2,24	1,04
290	2,5	2,60	<b>1,08</b>
300	2,5	2,69	<b>1,08</b>
310	2,5	2,78	<b>1,08</b>
320	2,5	2,87	<b>1,08</b>
330	2,5	2,96	<b>1,08</b>
340	2,5	3,05	<b>1,08</b>
350	2,5	3,14	<b>1,08</b>
360	2,5	3,23	<b>1,08</b>
370	2,5	3,32	<b>1,08</b>
380	2,5	3,41	<b>1,08</b>
390	2,5	3,49	<b>1,08</b>
400	2,5	3,58	<b>1,08</b>
450	2,5	4,03	<b>1,08</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

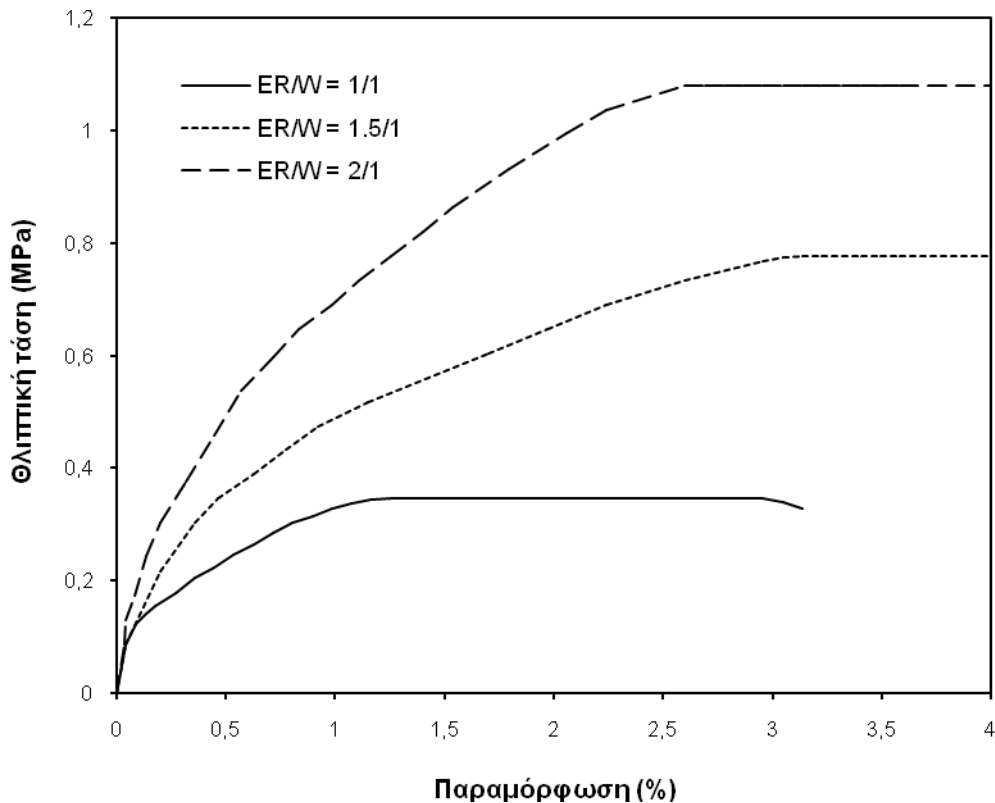
F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.3** παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση του δοκιμίου με αναλογίες ER/W:2/1 ανέρχεται στην τιμή  $\sigma_{\max} = 1,08 \text{ MPa}$ .

Με την βοήθεια των Πινάκων 5.1, 5.2 και 5.3 δημιουργήθηκε το Διάγραμμα 5.1 (τάσης-παραμόρφωσης), όπου και μπορούν να συγκριθούν οι αντοχές των δοκιμίων με 3 διαφορετικές αναλογίες και να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα.



**Διάγραμμα 5.1:** Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για χρόνο σκλήρυνσης δοκιμίου 7 ημερών και αναλογίες  $ER/W = 1/1$ ,  $ER/W = 1,5/1$ ,  $ER/W = 2/1$ .

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει το αναμενόμενο συμπέρασμα ότι το δοκίμιο με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε εποξειδική ρητίνη π.χ.  $ER/W = 2/1$  παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από τα άλλα δυο δοκίμια με μικρότερη περιεκτικότητα σε εποξειδική ρητίνη και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό. Παρατηρείται επίσης ότι αρχικά ο ρυθμός αύξησης της αντοχής του δοκιμίου είναι έντονος, ενώ στη συνέχεια ομαλοποιείται και καταλήγει σε ευθεία γραμμή (όριο θραύσης).

## 5.2.2. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 28 ΗΜΕΡΕΣ

Πίνακας 5.4: Αντοχή σε θλίψη μετά από 28 ημέρες με αναλογία ER/W = 1/2

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F(kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00
5	0,2	0,08	0,09
15	0,3	0,13	0,13
20	0,4	0,17	0,17
30	0,5	0,23	0,22
40	0,6	0,29	0,26
50	0,8	0,42	0,35
60	0,9	0,48	0,39
70	1,0	0,55	0,43
80	1,2	0,70	0,52
100	1,3	0,78	0,56
110	1,4	0,92	<b>0,60</b>
120	1,4	1,00	<b>0,60</b>
130	1,3	1,08	0,58
140	1,3	1,17	0,55
150	1,2	1,25	0,53
160	1,2	1,33	0,52
170	1,2	1,42	0,50
180	1,1	1,50	0,48
190	1,1	1,58	0,46
200	1,0	1,67	0,43
210	0,9	1,75	0,41
220	0,9	1,83	0,39
230	0,9	1,92	0,37
240	0,8	2,00	0,35
250	0,7	2,08	0,30
260	0,7	2,17	0,29
270	0,6	2,25	0,26
280	0,6	2,33	0,24
290	0,5	2,42	0,22

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον Πίνακα 5.4 η μέγιστη τάση είναι  $\sigma_{\max} = 0.6 \text{ MPa}$  με την αντίστοιχη μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη να λαμβάνει την τιμή  $F = 1.4 \text{ kN}$ .

Πίνακας 5.5: Ολιπτική αντοχή σε 28 ημέρες με αναλογία ER/W = 1/1

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>			
$\Delta l$	F	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,2	0,04	0,09
10	0,3	0,08	0,13
15	0,4	0,13	0,17
20	0,5	0,17	0,22
30	0,8	0,25	0,35
40	1,2	0,38	0,52
50	1,9	0,59	0,80
90	2,2	0,71	0,95
100	2,6	0,85	1,14
110	3,0	0,93	1,29
120	3,5	1,08	1,51
130	4,2	1,35	<b>1,81</b>
140	4,2	1,48	<b>1,81</b>
150	4,1	1,56	1,77
220	3,9	1,77	1,67
230	3,6	1,92	1,57
240	3,4	2,03	1,47
250	3,3	2,12	1,43
260	3,2	2,20	1,38
270	3,1	2,29	1,34
280	3,0	2,37	1,30
290	2,9	2,46	1,25

Όπου:

**$\Delta l$** : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**$\epsilon\%$** : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**$\sigma$** : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5.5** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων με αναλογία ER/W = 1/1 φτάνει σε  **$\sigma_{\max} = 1.81$  MPa**, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες.

**Πίνακας 5.6:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 28 ημερών με αναλογία ER/W = 1.5/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,3	0,04	0,13
10	0,5	0,09	0,22
15	0,7	0,13	0,30
20	0,8	0,17	0,35
30	1,4	0,26	0,60
40	2,4	0,43	1,04
50	3,8	0,64	1,64
60	5,1	0,87	2,20
70	6,1	1,03	2,64
80	7,2	1,24	3,11
90	8,0	1,40	3,46
100	8,6	1,52	3,72
150	9,3	1,63	4,02
160	10,3	1,79	4,43
170	10,6	1,92	<b>4,58</b>
180	10,6	2,01	<b>4,58</b>
190	10,6	2,11	<b>4,58</b>
200	10,5	2,21	4,54
210	10,4	2,35	4,49
220	10,0	2,51	4,30
230	9,3	2,74	4,00

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.6** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη με αναλογία ER/W = 1.5/1 είναι  $\sigma_{\max} = 4.58 \text{ MPa}$ , για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες.

**Πίνακας 5.7:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 28 ημερών με αναλογία 2/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>
-------------------------------------

$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00
20	0,9	0,11	0,39
30	1,8	0,19	0,78
40	3,4	0,35	1,47
50	5,1	0,50	2,20
60	6,4	0,64	2,76
70	7,6	0,75	3,28
80	8,7	0,88	3,76
90	9,5	0,95	4,10
100	10,2	1,03	4,41
110	10,7	1,11	4,62
120	11,1	1,18	4,80
130	11,5	1,26	4,97
140	11,7	1,29	5,05
150	11,9	1,32	5,14
160	12,0	1,41	5,18
170	12,1	1,50	<b>5,23</b>
180	12,0	1,59	5,18
190	12,0	1,68	5,18
200	12,0	1,77	5,18
210	11,9	1,85	5,14
220	11,8	1,94	5,10
230	11,7	2,03	5,05
240	11,4	2,12	4,92
250	11,3	2,21	4,88
260	11,1	2,29	4,80
270	10,9	2,38	4,71
280	10,6	2,47	4,58
290	10,4	2,56	4,49
300	10,2	2,65	4,41
310	10,0	2,74	4,32
320	9,8	2,82	4,23
330	9,6	2,91	4,15

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

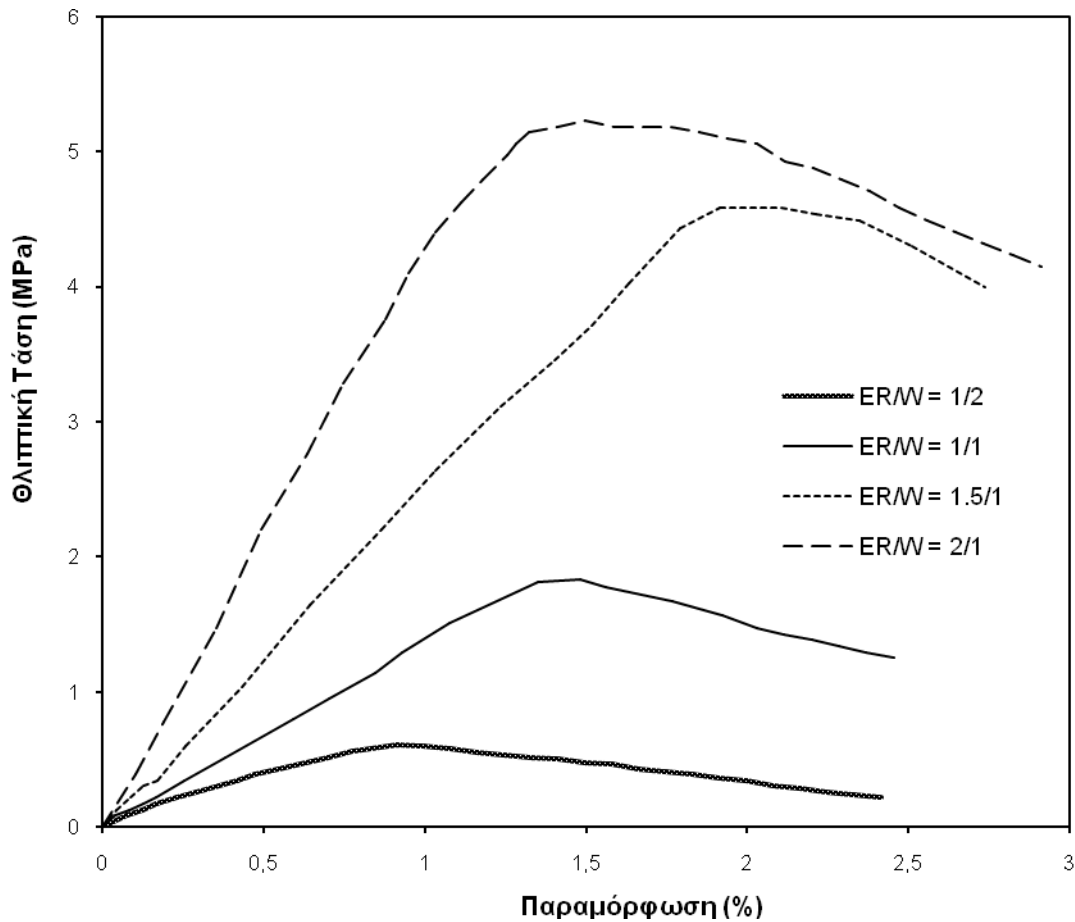
$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.7** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων είναι  $\sigma_{max} = 5.23$  MPa για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και για αναλογία ER/W = 2/1.

Σύμφωνα με τους **Πίνακες 5.4, 5.5, 5.6 και 5.7** δημιουργήθηκε το **Διάγραμμα 5.2**.

Αποτελεί διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης για 4 διαφορετικές αναλογίες εποξειδική ρητίνη/ νερό, με κοινό χαρακτηριστικό το χρόνο σκλήρυνσης (28 ημέρες).



**Διάγραμμα 5.2:** Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για χρόνο σκλήρυνσης δοκιμίου 28 ημέρες και αναλογίες εποξειδική ρητίνη/νερό: 1/2, 1/1, 1,5/1, 2/1.

Όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 5.2**, τα δοκίμια με αναλογίες  $ER/W = 1.5/1$  και  $ER/W = 2/1$  φτάνουν σε πολύ υψηλά επίπεδα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη,  $\sigma_{max}=4.58$  MPa και **5.23 MPa** αντίστοιχα. Όσον αφορά τα δοκίμια των αναλογιών 1/2 και 1/1 η μέγιστη αντοχή τους φτάνει σε επίπεδα  $\sigma_{max}=0.6$  και **1.81 MPa** αντίστοιχα.

### 5.2.3. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 90 ΗΜΕΡΕΣ

**Πίνακας 5.8:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε 90 μέρες με αναλογία  $ER/W = 1/2$



Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00
5	0,2	0,05	0,10
10	0,4	0,09	0,16
15	0,6	0,14	0,24
20	0,7	0,18	0,30
30	1,0	0,27	0,42
40	1,3	0,36	0,56
50	1,6	0,45	0,69
60	1,9	0,54	0,82
70	2,2	0,63	0,95
80	2,4	0,72	1,04
90	2,5	0,81	<b>1,08</b>
100	2,4	0,90	1,04
110	2,3	0,99	0,99
120	2,0	1,08	0,86
130	1,9	1,17	0,82
140	1,6	1,26	0,69
150	1,4	1,35	0,60

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.8** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη κυμαίνεται στα  $\sigma_{\max} = 1,08 \text{ MPa}$ , με χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2.

*Παρατήρηση: Αν και τα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών και αναλογία ER/W = 1/2, δεν μπορούσαν να αναπτύξουν αντοχή, τα αντίστοιχα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 90 ημερών αναπτύσσουν αντοχή  $\sigma_{\max} = 1.08 \text{ MPa}$ . Σε αυτό το σημείο είναι εμφανής ο ρόλος που παίζει ο χρόνος σκλήρυνσης στα δοκίμια, ώστε να αναπτύξουν την επιθυμητή αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.*

**Πίνακας 5.9:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε 90 ημέρες με αναλογία ER/W = 1/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1

0	0,0	0,00	0,00
5	0,4	0,05	0,17
10	0,6	0,09	0,26
15	0,9	0,14	0,39
20	1,1	0,19	0,49
30	1,6	0,28	0,69
40	2,0	0,38	0,86
50	2,5	0,47	1,08
60	3,0	0,56	1,30
70	3,7	0,69	1,60
80	4,4	0,85	1,92
90	5,0	0,96	2,16
100	5,6	1,06	2,42
110	6,0	1,14	2,60
120	6,4	1,22	2,76
130	6,6	1,30	<b>2,85</b>
140	6,6	1,36	<b>2,85</b>
150	6,6	1,45	<b>2,85</b>
160	6,5	1,50	2,81
170	6,4	1,59	2,76
180	6,2	1,69	2,68
190	5,8	1,78	2,51
200	5,5	1,88	2,38

Όπου:

**Δl:** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%:** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ:** Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.9** η μέγιστη αντοχή που αναπτύσσουν τα δοκίμια σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι  $\sigma_{\max}=2.85 \text{ MPa}$ , με χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/1$ .

**Πίνακας 5.10:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε 90 ημέρες με αναλογία  $ER/W = 1.5/1$ .

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>			
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1.5/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,4	0,05	0,17
10	0,6	0,09	0,26

15	1,0	0,14	0,44
20	1,4	0,19	0,61
30	2,2	0,28	0,94
40	2,9	0,38	1,24
50	3,5	0,47	1,53
60	4,5	0,56	1,95
70	5,5	0,69	2,36
80	6,5	0,83	2,81
90	7,7	0,98	3,33
100	8,9	1,16	3,84
110	10,1	1,34	4,36
120	10,9	1,46	4,69
130	11,7	1,60	5,05
150	12,5	1,72	5,40
160	12,9	1,80	5,59
170	13,2	1,87	5,70
180	13,4	1,93	5,79
190	13,5	1,98	<b>5,83</b>
200	13,3	2,06	5,75
240	12,9	2,16	5,56
250	12,4	2,25	5,34

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.10**, όπως φαίνεται, η μέγιστη αντοχή που αναπτύσσεται σε μονοαξονική θλίψη φτάνει την τιμή των  **$\sigma_{\max}=5,83$  MPa**.

**Παρατήρηση:** Σε αυτό το σημείο είναι εμφανές, πως τα δοκίμια με μικρή ρευστότητα ( $ER/W = 1.5/1$  και  $2/1$ ) και σε συνδυασμό με χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες, αναπτύσσουν πολύ υψηλή αντοχή για ένα τόσο λεπτόκοκκο υλικό. Στην αναλογία  $ER/W = 2/1$  η αντοχή θα φτάσει σε ακόμη υψηλότερα επίπεδα, το οποίο θα φανεί στον επόμενο πίνακα.

**Πίνακας 5.11:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε 90 ημέρες με αναλογία  $ER/W = 2/1$ .

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>			
<b>Δl (mm)</b>	<b>F (kN)</b>	<b>ε (%)</b>	<b>Τάση (MPa)</b>
			<b>ER/W = 2/1</b>
0	0,0	0,00	0,00
5	0,8	0,05	0,33
10	1,2	0,09	0,50
15	1,6	0,14	0,71

20	2,2	0,19	0,96
30	3,3	0,28	1,42
40	4,0	0,38	1,74
50	5,2	0,47	2,24
60	6,1	0,56	2,63
70	7,4	0,66	3,20
80	8,6	0,75	3,71
90	9,6	0,84	4,15
100	10,7	0,94	4,63
110	11,7	1,03	5,05
120	13,0	1,13	5,62
130	14,7	1,27	6,35
140	15,8	1,38	6,83
150	16,6	1,48	7,17
160	17,4	1,55	7,52
170	17,9	1,65	7,73
180	18,2	1,72	<b>7,86</b>
190	18,2	1,78	<b>7,86</b>
200	17,9	1,88	7,73
210	17,1	1,97	7,37
220	15,6	2,06	6,73

Όπου:

**Δl:** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%:** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ:** Τάση σε MPa

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 11** η μέγιστη ανοχή των δοκιμίων σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι  **$\sigma_{\max}=7.86$  MPa!** Αυτή είναι η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε κάποιο από τα δοκίμια της έρευνας στη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης.

#### 5.2.4. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 180 ΗΜΕΡΕΣ

**Πίνακας 5.12:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε 180 ημέρες με αναλογία ER/W = 1/2.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>180 Ημέρες</b>			
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00
5	0,4	0,05	0,17
10	0,5	0,09	0,22

15	0,6	0,14	0,26
20	1,0	0,18	0,43
30	1,4	0,27	0,60
40	1,6	0,37	0,69
50	1,9	0,46	0,82
60	2,2	0,55	0,95
70	2,4	0,64	1,04
80	2,5	0,73	1,08
90	2,5	0,82	<b>1,10</b>
100	2,5	0,91	<b>1,10</b>
110	2,4	1,01	1,04
120	2,3	1,10	0,99
130	2,1	1,19	0,91
150	1,9	1,37	0,82

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Από τον **Πίνακα 5.12** φαίνεται πως η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων με αναλογία  $ER/W = 1/2$  σε μονοαξονική θλίψη, για 180 ημέρες, είναι  $\sigma_{max}=1.10$  MPa. Πρέπει να παρατηρηθεί πως η αναλογία  $ER/W = 1/2$  παρουσιάζει σχεδόν ίδια αντοχή σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε σχέση με αυτήν των 90 ημερών, αφού η διαφορά είναι μόλις 0,02 MPa.

**Πίνακας 5.13**: Αντοχή δοκιμίων σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 180 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/1$ .

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>180 Ημέρες</b>			
<b>Δl (mm)</b>	<b>F (kN)</b>	<b>ε (%)</b>	<b>Τάση (MPa)</b>
			<b>ER/W = 1/1</b>
0	0,0	0,00	0,00
5	0,5	0,04	0,22
10	0,8	0,09	0,35
15	1,0	0,13	0,43
20	1,4	0,18	0,60
30	2,1	0,27	0,91

40	2,7	0,35	1,17
50	3,3	0,44	1,43
60	3,9	0,53	1,68
70	4,3	0,62	1,86
80	4,9	0,71	2,12
90	5,3	0,80	2,29
100	5,6	0,88	2,42
110	5,9	0,97	2,55
120	6,3	1,06	2,72
130	6,7	1,15	2,89
150	6,8	1,33	<b>2,92</b>
160	6,6	1,41	2,85
170	6,5	1,50	2,81
180	6,5	1,59	2,81
190	6,4	1,68	2,77
200	6,3	1,77	2,72
240	6,3	2,12	2,72

Όπου:

**Δl:** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%:** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ:** Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.13** η μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει την τιμή  $\sigma_{\max}=2,92 \text{ MPa}$  για χρόνο σκλήρυνσης 180 ημέρες και αναλογία ER/W =1/1.

**Πίνακας 5.14:** Αντοχή δοκιμίων σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 180 ημέρες και αναλογία ER/W = 1,5/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>180 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,6	0,04	0,25
10	1,0	0,09	0,43
15	1,2	0,13	0,52
20	1,6	0,18	0,69
30	2,5	0,26	1,08
40	3,4	0,35	1,47
50	4,3	0,44	1,86
60	5,4	0,53	2,33
70	6,6	0,62	2,85
80	7,9	0,71	3,41
90	9,2	0,79	3,97
100	10,3	0,88	4,45
110	11,1	0,97	4,80
120	12,3	1,06	5,31
130	1,6	1,15	0,69
150	13,0	1,32	5,62
160	13,6	1,41	5,88
170	13,8	1,50	5,96
180	13,8	1,59	5,96
190	13,9	1,68	<b>6,00</b>
200	13,7	1,77	5,92
240	13,6	2,12	5,88
250	13,5	2,21	5,83
260	13,3	2,29	5,75

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.14** η μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει την τιμή  $\sigma_{\max}=6,00$  MPa για χρόνο σκλήρυνσης 180 ημέρες και αναλογία ER/W =1,5/1.

**Πίνακας 5.15:** Αντοχή δοκιμίων σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 180 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>180 Ημέρες</b>			
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00
5	0,5	0,05	0,22
10	0,7	0,10	0,30
15	0,9	0,15	0,39
20	1,4	0,19	0,60
30	1,9	0,29	0,82
40	2,8	0,39	1,21
50	3,8	0,48	1,64
60	5,1	0,58	2,20
70	7,2	0,68	3,11
80	8,6	0,77	3,72
90	10,4	0,87	4,49
100	12,3	0,97	5,31
110	13,8	1,06	5,96
120	15,6	1,16	6,74
130	16,3	1,26	7,04
150	17,0	1,45	7,34
160	18,5	1,55	8,00
170	17,9	1,64	7,73
180	18,3	1,74	7,91
190	18,5	1,84	<b>8,00</b>
200	17,6	1,93	7,60
240	17,1	2,32	7,39
250	16,5	2,42	7,13

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

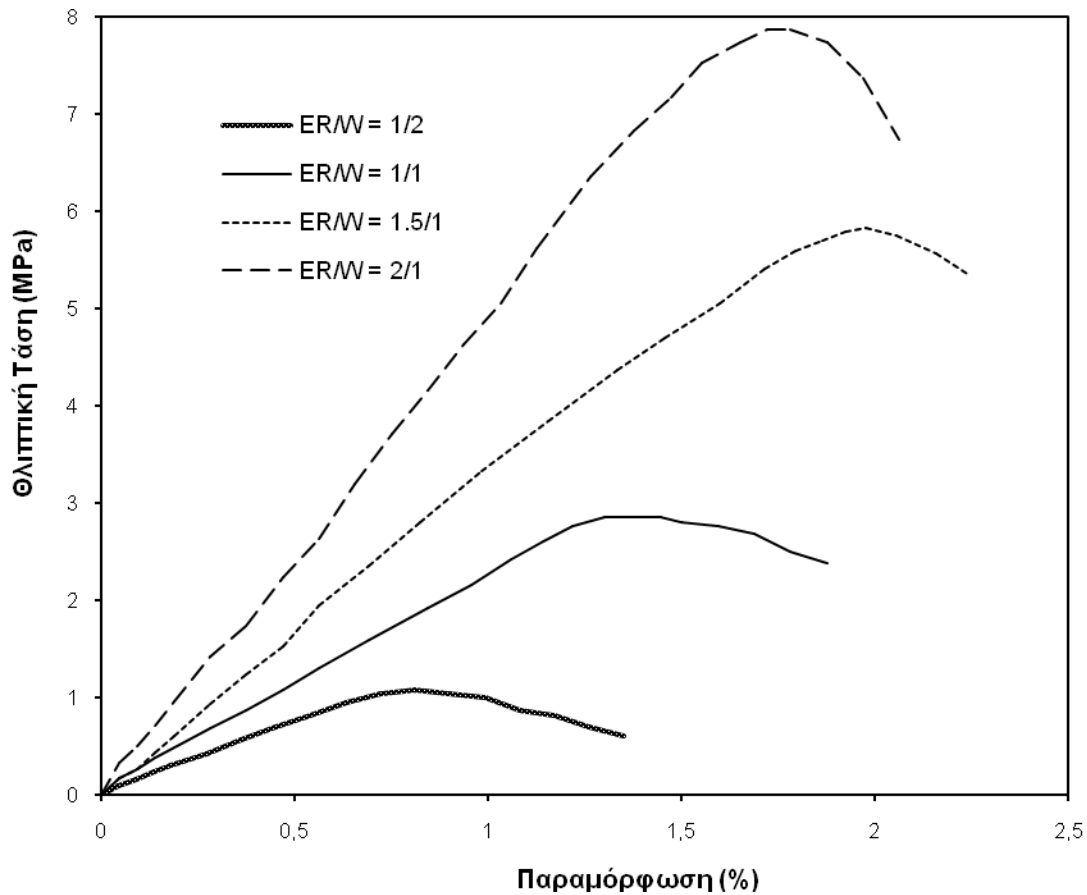
$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Στον **Πίνακα 5.15** η μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει την τιμή  $\sigma_{\max}=8.00$  MPa για χρόνο σκλήρυνσης 180 ημέρες και αναλογία ER/W =2 /1.



Σύμφωνα με τους Πίνακες 5.8, 5.9, 5.10 και 5.11 δημιουργήθηκε το διάγραμμα 5.3. Αποτελεί διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης για 4 διαφορετικές αναλογίες εποξειδικής ρητίνης/ νερό, με κοινό χαρακτηριστικό το χρόνο σκλήρυνσης (90 ημέρες).



**Διάγραμμα 5.3:** Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$ .

Στο διάγραμμα των 90 ημερών η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1, 2/1$  είναι  $\sigma_{max} = 1.08, 2.85, 5.83$  και  $7.86$  MPa αντίστοιχα. Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τη μέγιστη αντοχές των δοκιμίων για κάθε διαφορετικό χρόνο σκλήρυνσης και αναλογία ER/W.

**Πίνακας 5.16:** Πίνακας μέγιστης αντοχής για όλες τις κατηγορίες δοκιμίων.

Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)	ER/W = 1/2	ER/W = 1/1	ER/W = 1.5/1	ER/W = 2/1
7	0	0,35	0,78	1,08
28	0,6	1,81	4,58	5,23
90	1,08	2,85	5,83	7,86
180	1,1	2,92	6	8

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο **Πίνακας 5.16**, αφού συγκρίνοντας τα δεδομένα του βγαίνουν τα πιο σημαντικά συμπεράσματα για τα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

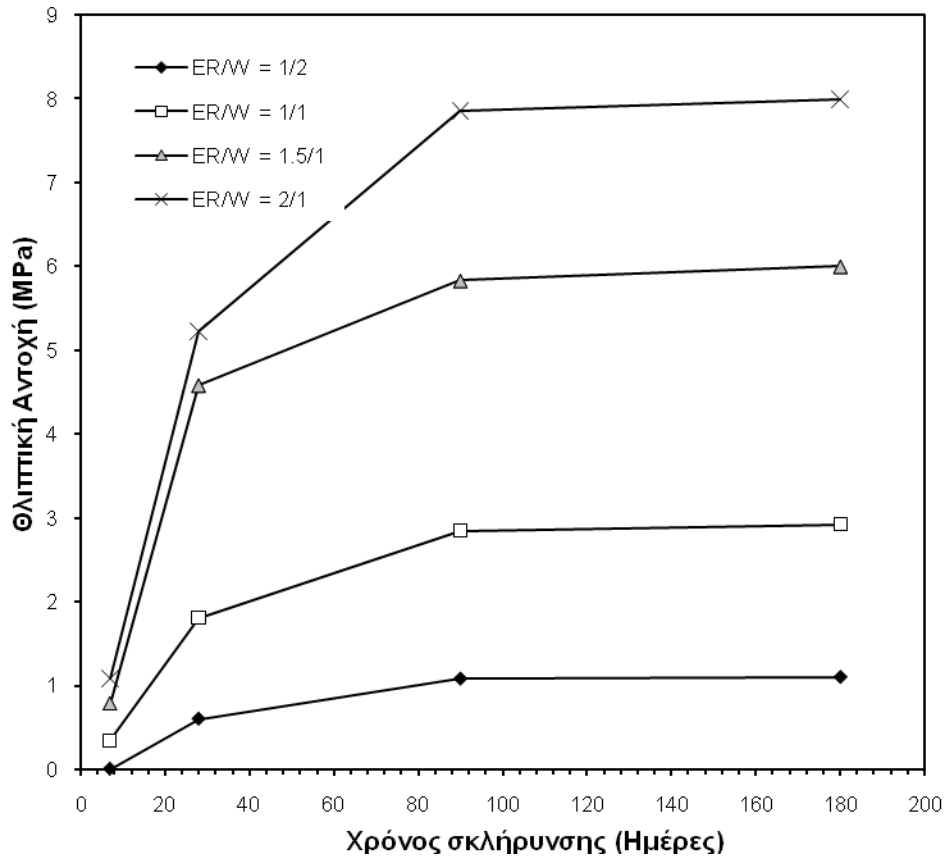
Τα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 28 ημερών παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διαφορά στη μέγιστη αντοχή τους εν συγκρίσει με τα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών. Η διαφορά είναι περίπου πενταπλάσια στη μέγιστη αντοχή σε όλες τις αναλογίες!

Η αύξηση της αντοχής στα δοκίμια 90 ημερών σε σύγκριση με αυτά των 28 ημερών είναι σημαντική, αλλά όχι τόσο μεγάλη όσο στις δύο πρώτες κατηγορίες δοκιμίων (7-28 ημερών).

Στα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 180 ημερών η αύξηση αντοχής είναι πλέον ελάχιστη σε σχέση με αυτήν που είχαν αναπτύξει τα δοκίμια των 90 ημερών.

***Συμπεράσματα:** Τα δοκίμια φτάνουν σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα αντοχής σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες. Οι 7 ημέρες δεν είναι αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να προλάβουν τα δοκίμια να αναπτύξουν σημαντική αντοχή. Από την άλλη πλευρά οι 180 ημέρες ως χρόνος σκλήρυνσης δεν έχει καμία χρησιμότητα, αφού τα επίπεδα αντοχής των δοκιμίων δεν έχουν διαφορά με αυτά των 90 ημερών.*

Η αναλογία  $ER/W = 1/2$  δεν παρουσιάζει σημαντικές τιμές αντοχής, για αυτό και θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα μέσω της ηλεκτρώσμωσης. Η μέθοδος της ηλεκτρώσμωσης θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ακολουθεί διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-χρόνου σκλήρυνσης (**Διάγραμμα 5.4**) με αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$ .



**Διάγραμμα 5.4 :** Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής-χρόνου σκλήρυνσης για αναλογίες ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1, 2/1.

### 5.3. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  είναι ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης, όπως προκύπτει από την εξίσωση  $\sigma = \varepsilon \cdot E$ . Λύνοντας τη δε ως προς  $E$  ισχύει:

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (5.1)$$

Επειδή η ανηγμένη παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος (καθαρός αριθμός), το μέτρο ελαστικότητας  $E$  από την εξίσωση  $\sigma = \varepsilon \cdot E$  εύκολα φαίνεται, ότι έχει μονάδες τάσης. Από τον ορισμό του προκύπτει ότι το  $E$  αντιπροσωπεύει την τάση εκείνη  $\sigma$ , η οποία θα προκαλούσε ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon=1$ , δηλαδή  $\Delta l = l$ .

Από τη σχέση (5.1) υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

**Πίνακας 5.17:** Μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων με χρόνο σκλήρυνσης 7,28,90 και 180 ημέρες σε αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$ .

Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)	$ER/W = 1/2$	$ER/W = 1/1$	$ER/W = 1.5/1$	$ER/W = 2/1$
7	0	20,3	45,5	64
28	68,4	120	250	420
90	150	230	360	570
180	155	235	370	585

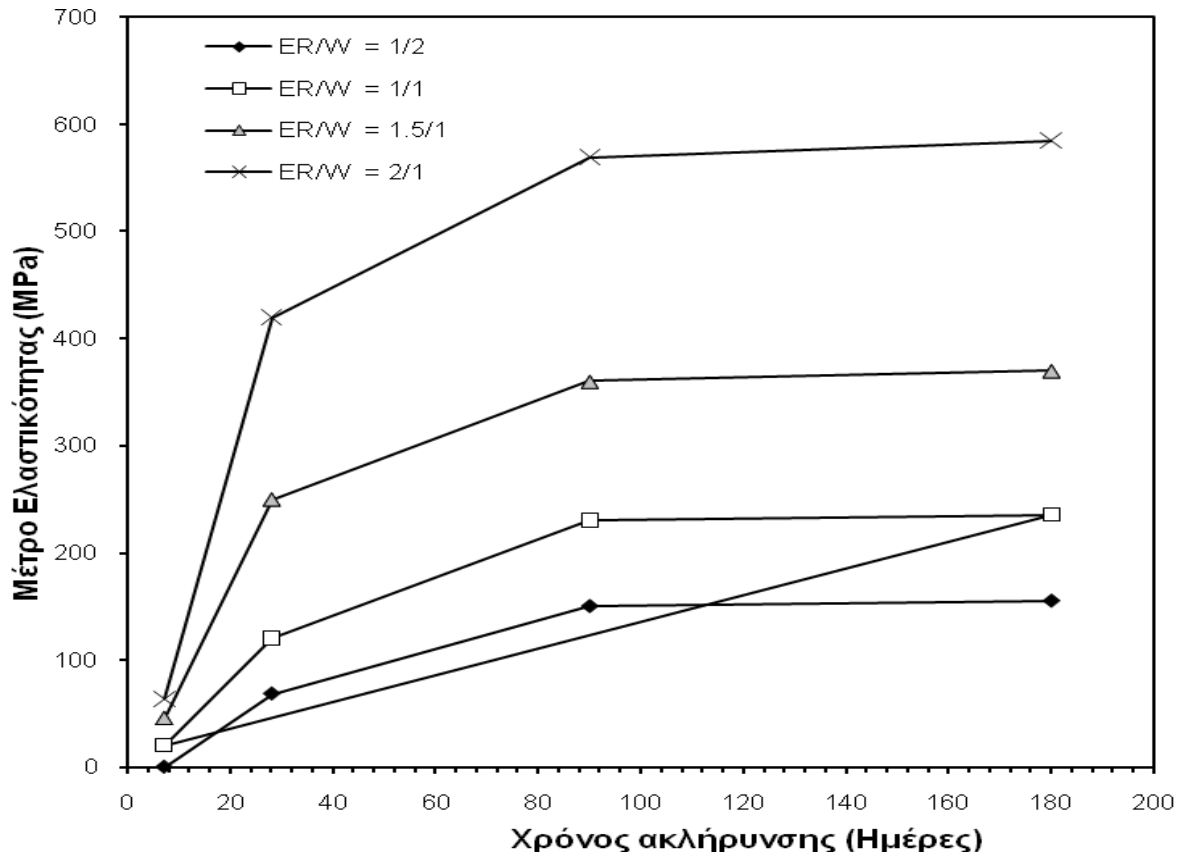
Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται, ότι το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/2$  παίρνει την τιμή 0. Κάτι πολύ λογικό, αφού και η αντοχή αυτών των δοκιμίων είναι ίση με 0.

Εντυπωσιακή αύξηση παρατηρείται από τις 7 ημέρες στις 28, αφού το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων φτάνει ακόμα και στην τιμή των 420 MPa! Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας κατά μέσο όρο εξαπλασιάζεται από τις 7 στις 28 ημέρες χρόνου σκλήρυνσης.

Στον πίνακα 1 παρατηρείται επίσης ότι στις 90 ημέρες το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται αισθητά. Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει με τις 180 ημέρες, όπου η αύξηση του δεν είναι παρά ελάχιστη.

Το μέτρο ελαστικότητας λοιπόν, αν και με το πέρας του χρόνου αυξάνεται ελάχιστα, λαμβάνει ικανοποιητική τιμή στις 90 ημέρες. Ενώ δεν έχει κανένα νόημα η αναμονή ακόμη 90 ημερών, αφού η αύξηση είναι ανεπαίσθητη.

Ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας-χρόνου σκλήρυνσης για αναλογίες δοκιμίων  $ER/W = 1/2$ ,  $1/1$ ,  $1.5/1$  και  $2/1$ .



**Διάγραμμα 5.5:** Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας-χρόνου σκλήρυνσης για τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης.

#### 5.4. ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ – BRAZILIAN TEST

Εκτός από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης τα δοκίμια υποβλήθηκαν και σε δοκιμή κατά γενέτειρα. Η θραύση του δοκιμίου γίνεται εμφανής μετά από ρωγμή του δοκιμίου στο μέσον της διατομής (βλέπε **Εικόνα 5.1, 5.2 και 5.3**).



**Εικόνα 5.1:** Θραύση δοκιμίου μετά από δοκιμή κατά γενέτειρα.



**Εικόνα 5.2:** Ρωγμή σε δοκίμιο μετά από δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



**Εικόνα 5.3:** Διάταξη ρωγμής δοκιμίου μετά από δοκιμή “Brazilian Test”.

***Σημείωση:** Στη δοκιμή κατά γενέτειρα δεν πραγματοποιήθηκε λεπτομερής καταγραφή των τιμών  $\Delta l$  και  $F$ , όπως συνέβη στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Έχει καταγραφεί μόνον η μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη  $F$ , κατά την οποία το δοκίμιο αστοχούσε.*

**Πίνακας 5.18:** Μέγιστες αντοχές δοκιμίων σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμό για χρόνο σκλήρυνσης 7, 28, 90 και 180 ημέρες για αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$ .

Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)	$ER/W = 1/2$	$ER/W = 1/1$	$ER/W = 1.5/1$	$ER/W = 2/1$
7	0	0,1	0,26	0,388
28	0,1	0,33	0,702	0,9
90	0,2	0,63	0,905	1,1
180	0,21	0,65	0,92	1,15

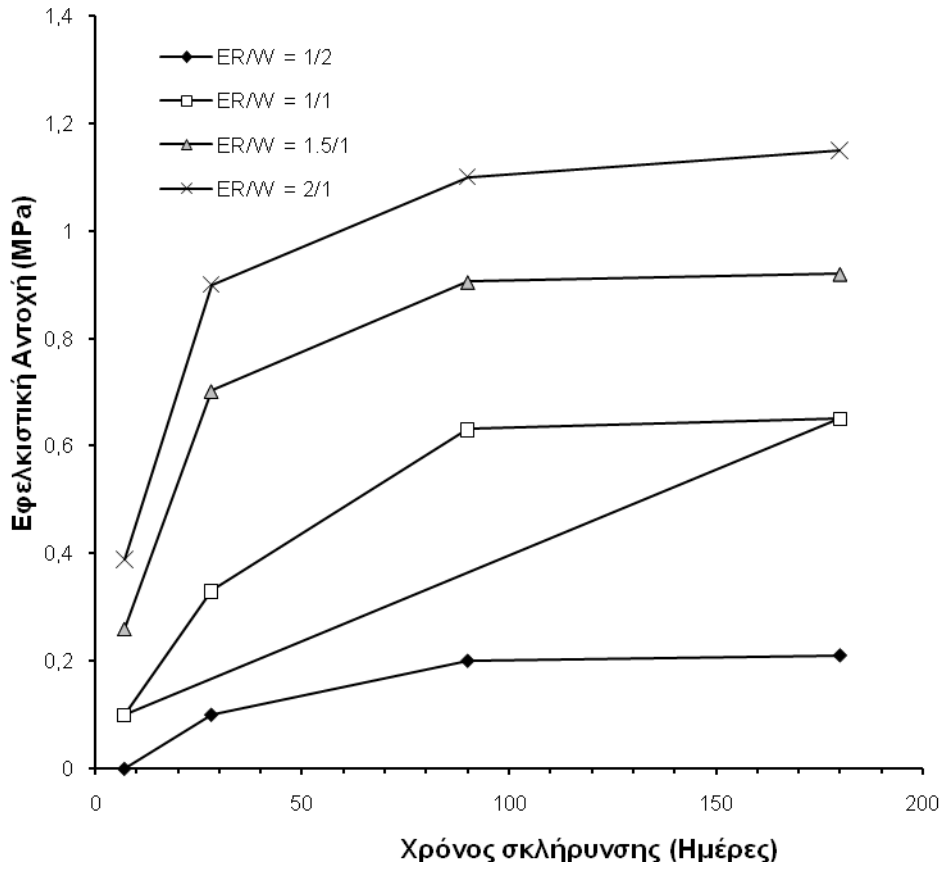
Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5.18** τα δοκίμια με αναλογία  $ER/W = 1/2$  και χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες παρουσίασαν μηδενική αντοχή σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Κάτι αντίστοιχο είχε συμβεί και στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στα δοκίμια με ίδια αναλογία και χρόνο σκλήρυνσης. Αντιθέτως υπάρχει σημαντική αύξηση της αντοχής όταν ο χρόνος σκλήρυνσης είναι πλέον 28 ημέρες, Σε σύγκριση με την αντοχή που παρουσιάζουν τα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών, η αντοχή είναι περίπου τριπλάσια!

Στις 90 ημέρες χρόνου σκλήρυνσης η αντοχή αυξάνεται αισθητά, όσον αφορά τις αναλογίες  $ER/W = 1/2$  και  $1/1$ . Δε συμβαίνει το ίδιο όμως και στις αναλογίες  $1.5/1$  και  $2/1$ . Με μια γρήγορη ματιά στον **Πίνακα 5.18**, είναι εμφανές ότι στην αναλογία  $ER/W = 1.5/1$  η αύξηση της αντοχής των δοκιμίων, με αυτά των 28 ημερών, είναι μόλις 0.203 MPa. Το ίδιο συμβαίνει και στην αναλογία  $ER/W = 2/1$ , αφού η αύξηση αντοχής είναι μόλις 0.2 MPa, σε σχέση με τα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες.

Τα δοκίμια των 180 ημερών παρουσιάζουν ελάχιστη αύξηση αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (σχεδόν μηδαμινή),σε σχέση με τα δοκίμια των 90 ημερών. Η αύξηση της αντοχής είναι της τάξεως του 4%. Άρα η αναμονή ακόμα 90 ημερών είναι δεν μπορεί να επιφέρει καμία ουσιαστική αλλαγή στην αντοχή των δοκιμίων σε έμμεσο εφελκυσμό.

Ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής-χρόνου σκλήρυνσης, όπου και φαίνονται οι συσχετισμοί μεταξύ των αντοχών των δοκιμίων σε έμμεσο εφελκυσμό σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο σκλήρυνσης τους, αλλά και την εκάστοτε αναλογία εποξειδικής ρητίνης προς νερό.





**Διάγραμμα 5.6:** Διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής-χρόνου σκλήρυνσης για δοκίμια με αναλογία ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1 και 2/1.

## 5.5. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

### 5.5.1. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 7 ΗΜΕΡΕΣ

**Πίνακας 5.19:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1

Χρόνος σκλήρυνσης: 7 Ημέρες							
$\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	3,6	1,69	1,56
5	0,3	0,04	0,15	210	3,6	1,77	1,56
10	0,6	0,08	0,25	220	3,6	1,86	1,56
15	0,7	0,13	0,29	230	3,8	1,94	1,64
20	1,1	0,17	0,48	240	4,0	2,03	1,73
30	1,4	0,25	0,59	250	4,4	2,11	1,89
40	1,5	0,34	0,63	260	4,5	2,19	1,94
50	1,6	0,42	0,67	270	4,6	2,28	1,98
60	1,7	0,51	0,72	280	4,8	2,36	2,06
70	1,9	0,59	0,81	290	4,9	2,45	2,12
80	2,0	0,68	0,85	300	5,3	2,53	2,28
90	2,2	0,76	0,94	310	5,5	2,62	2,37
100	2,4	0,84	1,05	320	5,7	2,70	2,44
110	2,5	0,93	1,09	330	5,9	2,78	2,53
120	2,6	1,01	1,12	340	6,2	2,87	2,67
130	2,8	1,10	1,21	350	6,4	2,95	2,76
140	2,8	1,18	1,23	360	6,6	3,04	2,83
150	2,9	1,27	1,25	370	6,8	3,12	2,95
160	3,1	1,35	1,36	380	7,2	3,21	3,12
170	3,3	1,43	1,42	390	7,5	3,29	3,23
180	3,4	1,52	1,45	400	7,5	3,38	3,23
190	3,4	1,60	1,45	450	7,9	3,80	<b>3,40</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.19**, η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{\max}=3,40 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.20:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: 7 Ημέρες							
$\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	6,5	1,76	2,79
5	0,5	0,04	0,21	210	6,7	1,85	2,88
10	0,8	0,09	0,36	220	7,0	1,94	3,04
15	0,8	0,13	0,36	230	7,4	2,03	3,21
20	1,2	0,18	0,52	240	7,8	2,11	3,38
30	1,6	0,26	0,67	250	8,2	2,20	3,55
40	1,8	0,35	0,79	260	8,6	2,29	3,73
50	1,9	0,44	0,83	270	8,9	2,38	3,84
60	2,2	0,53	0,94	280	9,2	2,47	3,98
70	2,4	0,62	1,05	290	9,5	2,56	4,11
80	2,7	0,70	1,16	300	9,9	2,64	4,27
90	2,9	0,79	1,27	310	10,2	2,73	4,41
100	3,2	0,88	1,39	320	10,2	2,82	4,41
110	3,7	0,97	1,58	330	10,8	2,91	4,68
120	3,8	1,06	1,64	340	11,2	3,00	4,83
130	4,1	1,15	1,79	350	11,6	3,08	4,99
140	4,3	1,23	1,87	360	11,9	3,17	5,12
150	4,8	1,32	2,06	370	11,9	3,26	5,12
160	5,1	1,41	2,21	380	11,9	3,35	5,15
170	5,4	1,50	2,33	390	12,2	3,44	5,27
180	5,7	1,59	2,47	400	12,5	3,52	5,38
190	6,0	1,67	2,61	450	12,7	3,96	<b>5,50</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.20, η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{\max}=5.50 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.21:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: 7 Ημέρες							
$\sigma_3 = 3 \text{ MPa}$							

$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	9,7	1,71	4,19
5	0,8	0,04	0,35	210	9,9	1,80	4,28
10	1,0	0,09	0,43	220	10,0	1,89	4,33
15	1,6	0,13	0,68	230	10,5	1,97	4,52
20	1,8	0,17	0,79	240	10,8	2,06	4,67
30	2,1	0,26	0,92	250	11,3	2,14	4,88
40	2,5	0,34	1,09	260	11,6	2,23	5,03
50	3,0	0,43	1,28	270	12,0	2,31	5,19
60	3,3	0,51	1,44	280	12,3	2,40	5,31
70	3,9	0,60	1,69	290	12,6	2,49	5,42
80	4,4	0,69	1,89	300	13,2	2,57	5,68
90	4,7	0,77	2,01	310	13,6	2,66	5,89
100	5,2	0,86	2,26	320	13,9	2,74	6,01
110	5,6	0,94	2,41	330	14,3	2,83	6,16
120	6,0	1,03	2,59	340	14,3	2,91	6,16
130	6,7	1,11	2,88	350	15,0	3,00	6,49
140	7,0	1,20	3,03	360	15,3	3,08	6,62
150	7,4	1,29	3,21	370	15,7	3,17	6,79
160	8,0	1,37	3,46	380	16,0	3,26	6,91
170	8,4	1,46	3,61	390	16,5	3,34	7,11
180	8,6	1,54	3,72	400	16,5	3,43	7,11
190	9,2	1,63	3,99	450	16,9	3,86	<b>7,30</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.21**, η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{\max}=7.30$  MPa.

**Πίνακας 5.22:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1,5/1, για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>7 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 1$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1

0	0,0	0,00	0,00	200	3,7	1,79	1,61
5	0,3	0,04	0,13	210	3,9	1,88	1,68
10	0,5	0,09	0,22	220	4,0	1,97	1,73
15	0,5	0,13	0,22	230	4,3	2,06	1,86
20	0,6	0,18	0,26	240	4,3	2,15	1,86
30	0,7	0,27	0,30	250	4,6	2,24	1,99
40	1,0	0,36	0,43	260	4,7	2,33	2,05
50	1,1	0,45	0,48	270	4,9	2,42	2,12
60	1,2	0,54	0,52	280	5,1	2,51	2,21
70	1,3	0,63	0,56	290	5,3	2,60	2,30
80	1,6	0,72	0,68	300	5,3	2,69	2,30
90	1,8	0,81	0,77	310	5,3	2,78	2,30
100	2,0	0,90	0,86	320	5,7	2,86	2,45
110	2,2	0,98	0,96	330	6,0	2,95	2,57
120	2,4	1,07	1,03	340	6,0	3,04	2,61
130	2,6	1,16	1,12	350	6,2	3,13	2,69
140	2,9	1,25	1,24	360	6,3	3,22	2,73
150	2,9	1,34	1,24	370	6,5	3,31	2,81
160	3,1	1,43	1,33	380	6,5	3,40	2,81
170	3,4	1,52	1,48	390	6,5	3,49	2,81
180	3,6	1,61	1,56	400	6,9	3,58	<b>3,00</b>
190	3,6	1,70	1,56	450	6,9	4,03	<b>3,00</b>

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 23, η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1,5/1, είναι  $\sigma_{\max}=3.00$  MPa

**Πίνακας 5.23:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1,5/1, για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: 7 Ημέρες							
$\sigma_3 = 2$ MPa							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	6,2	1,68	2,66
5	0,4	0,04	0,19	210	6,5	1,76	2,79

10	0,6	0,08	0,25	220	6,6	1,85	2,84
15	1,0	0,13	0,44	230	6,9	1,93	2,99
20	1,3	0,17	0,56	240	7,3	2,01	3,15
30	1,4	0,25	0,61	250	7,5	2,10	3,22
40	1,7	0,34	0,75	260	7,9	2,18	3,43
50	2,1	0,42	0,89	270	8,3	2,27	3,58
60	2,4	0,50	1,05	280	8,4	2,35	3,61
70	2,7	0,59	1,16	290	8,6	2,43	3,72
80	3,0	0,67	1,28	300	9,0	2,52	3,88
90	3,1	0,76	1,34	310	9,3	2,60	4,01
100	3,5	0,84	1,49	320	9,7	2,68	4,19
110	3,6	0,92	1,56	330	9,9	2,77	4,27
120	3,8	1,01	1,63	340	10,3	2,85	4,44
130	4,1	1,09	1,79	350	10,8	2,94	4,65
140	4,4	1,17	1,88	360	10,9	3,02	4,71
150	4,6	1,26	1,98	370	11,3	3,10	4,89
160	4,9	1,34	2,12	380	11,6	3,19	5,01
170	5,3	1,43	2,29	390	11,9	3,27	5,13
180	5,4	1,51	2,33	400	12,1	3,36	5,21
190	5,8	1,59	2,50	450	12,3	3,78	<b>5,30</b>

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.23** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1,5/1, είναι **σ<sub>max</sub>=5.30MPa**

**Πίνακας 5.24:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1,5/1, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>7 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 3 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	7,1	1,68	3,07
5	0,3	0,04	0,12	210	7,4	1,76	3,19
10	0,5	0,08	0,22	220	7,7	1,85	3,33
15	0,9	0,13	0,41	230	8,1	1,93	3,50

20	1,4	0,17	0,59	240	8,5	2,01	3,66
30	2,0	0,25	0,86	250	8,9	2,10	3,84
40	2,4	0,34	1,02	260	9,3	2,18	4,00
50	2,6	0,42	1,11	270	9,5	2,27	4,12
60	2,8	0,50	1,23	280	9,8	2,35	4,23
70	3,4	0,59	1,45	290	10,3	2,43	4,44
80	3,7	0,67	1,61	300	10,8	2,52	4,68
90	4,1	0,76	1,75	310	11,4	2,60	4,94
100	4,4	0,84	1,91	320	11,8	2,68	5,10
110	4,8	0,92	2,08	330	12,3	2,77	5,30
120	5,0	1,01	2,14	340	13,1	2,85	5,66
130	5,3	1,09	2,29	350	13,5	2,94	5,81
140	5,6	1,17	2,43	360	13,9	3,02	6,00
150	5,9	1,26	2,56	370	14,2	3,10	6,12
160	5,9	1,34	2,56	380	14,7	3,19	6,33
170	6,2	1,43	2,69	390	15,1	3,27	6,51
180	6,7	1,51	2,88	400	15,7	3,36	6,79
190	6,9	1,59	2,97	450	16,0	3,78	<b>6,90</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.24** η μέγιστη αντοχή των δοκιμών σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1,5/1$ , είναι  $\sigma_{max}=6.90$  MPa

**Πίνακας 5.25:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/1$ , για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>7 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 1$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	$F$ (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	$F$ (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			$ER/W = 1/1$				$ER/W = 1/1$
0	0,0	0,00	0,00	200	3,2	1,74	1,4
5	0,2	0,04	0,09	210	3,5	1,82	1,50
10	0,4	0,09	0,13	220	3,7	1,91	1,60
15	0,5	0,13	0,13	230	3,7	2,00	1,60
20	0,6	0,17	0,17	240	3,9	2,09	1,70
30	0,7	0,26	0,22	250	3,9	2,17	1,70

40	0,8	0,35	0,26	260	4,2	2,26	1,80
50	0,9	0,43	0,30	270	4,2	2,35	1,80
60	1,0	0,52	0,35	280	4,4	2,43	1,90
70	1,1	0,61	0,39	290	4,4	2,52	1,90
80	1,1	0,70	0,43	300	4,4	2,61	1,90
90	1,1	0,78	0,48	310	4,6	2,69	2,00
100	1,1	0,87	0,52	320	4,6	2,78	2,00
110	1,1	0,96	0,52	330	4,9	2,87	2,10
120	1,1	1,04	0,60	340	4,9	2,95	2,10
130	1,2	1,13	0,65	350	4,9	3,04	2,10
140	1,2	1,22	0,69	360	4,9	3,13	2,10
150	1,2	1,30	0,69	370	5,1	3,21	2,20
160	1,3	1,39	0,73	380	5,3	3,30	2,30
170	1,3	1,48	0,78	390	5,6	3,39	<b>2,40</b>
180	1,3	1,56	0,78	400	5,6	3,48	<b>2,40</b>
190	1,4	1,65	0,82	450	5,6	3,91	<b>2,40</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.25** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/1$ , είναι  $\sigma_{max}=2.40$  MPa

**Πίνακας 5.26:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/1$ , για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>7 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 2$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	6,7	1,76	2,88
5	0,6	0,04	0,26	210	6,9	1,85	2,96
10	0,7	0,09	0,30	220	7,0	1,94	3,04
15	1,1	0,13	0,48	230	7,0	2,03	3,04
20	1,2	0,18	0,52	240	7,3	2,12	3,17
30	1,5	0,26	0,66	250	7,5	2,20	3,23
40	1,9	0,35	0,83	260	7,8	2,29	3,35
50	2,1	0,44	0,91	270	8,0	2,38	3,44
60	2,4	0,53	1,04	280	8,3	2,47	3,57



70	2,7	0,62	1,17	290	8,4	2,56	3,64
80	2,9	0,71	1,26	300	8,7	2,65	3,77
90	3,2	0,79	1,37	310	8,9	2,73	3,83
100	3,5	0,88	1,49	320	8,9	2,82	3,83
110	3,7	0,97	1,60	330	9,2	2,91	3,96
120	4,1	1,06	1,77	340	9,3	3,00	4,02
130	4,5	1,15	1,93	350	9,5	3,09	4,11
140	4,8	1,23	2,06	360	9,5	3,17	4,11
150	5,1	1,32	2,19	370	9,5	3,26	4,11
160	5,6	1,41	2,42	380	9,8	3,35	4,23
170	5,9	1,50	2,56	390	10,0	3,44	4,30
180	5,9	1,59	2,56	400	10,2	3,53	4,42
190	6,3	1,68	2,71	450	10,4	3,97	<b>4,50</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.26** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι  $\sigma_{\max}=4.50$  MPa

**Πίνακας 5.27:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: 7 Ημέρες							
$\sigma_3 = 3$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	8,5	1,73	3,66
5	0,9	0,04	0,39	210	8,8	1,82	3,81
10	1,2	0,09	0,52	220	9,0	1,90	3,90
15	1,6	0,13	0,68	230	9,6	1,99	4,13
20	1,9	0,17	0,81	240	9,8	2,08	4,22
30	2,5	0,26	1,08	250	10,0	2,16	4,30
40	2,7	0,35	1,16	260	10,3	2,25	4,46
50	3,0	0,43	1,31	270	10,7	2,34	4,60
60	3,4	0,52	1,47	280	11,0	2,42	4,74
70	3,8	0,61	1,66	290	11,2	2,51	4,84

80	4,4	0,69	1,89	300	11,6	2,60	4,99
90	4,6	0,78	2,00	310	11,8	2,68	5,08
100	4,9	0,87	2,10	320	11,9	2,77	5,16
110	5,2	0,95	2,25	330	12,1	2,86	5,24
120	5,6	1,04	2,40	340	12,5	2,94	5,39
130	6,0	1,13	2,58	350	12,7	3,03	5,50
140	6,3	1,21	2,74	360	13,0	3,12	5,63
150	6,7	1,30	2,88	370	13,2	3,20	5,70
160	6,9	1,39	2,99	380	13,5	3,29	5,82
170	7,1	1,47	3,07	390	13,9	3,38	5,99
180	7,5	1,56	3,24	400	14,1	3,46	6,07
190	8,0	1,65	3,47	450	14,1	3,9	<b>6,11</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.27** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι  $\sigma_{\max}=6.11$  MPa

### 5.5.2. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 28 ΗΜΕΡΕΣ

**Πίνακας 5.28:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 1$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2				ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00	200	6,3	1,83	2,72
5	1,0	0,05	0,43	210	6,6	1,92	2,86
10	1,5	0,09	0,65	220	6,8	2,01	2,94
15	1,9	0,14	0,82	230	7,0	2,10	3,04
20	2,2	0,18	0,95	240	7,0	2,19	3,04
30	2,8	0,27	1,21	250	7,0	2,29	3,04
40	3,3	0,37	1,43	260	7,4	2,38	3,18
50	3,7	0,46	1,60	270	7,5	2,47	3,24
60	4,2	0,55	1,81	280	7,7	2,56	3,33

70	4,4	0,64	1,90	290	8,1	2,65	3,49
80	4,7	0,73	2,03	300	8,1	2,74	3,49
90	5,0	0,82	2,16	310	8,3	2,83	3,57
100	5,2	0,91	2,25	320	8,4	2,93	3,62
110	5,3	1,01	2,29	330	8,6	3,02	3,71
120	5,6	1,10	2,42	340	8,9	3,11	3,84
130	5,7	1,19	2,46	350	9,0	3,20	3,90
140	5,8	1,28	2,51	360	9,3	3,29	4,00
150	5,9	1,37	2,55	370	9,5	3,38	4,09
160	6,1	1,46	2,64	380	9,5	3,47	4,09
170	6,1	1,55	2,64	390	9,6	3,56	4,14
180	6,1	1,65	2,64	400	9,7	3,66	<b>4,20</b>
190	6,2	1,74	2,68	450	9,7	4,11	<b>4,20</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.28** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/2$ , είναι  $\sigma_{max}=4.20$  MPa.

**Πίνακας 5.29:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/2$ , για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 2$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	$F$ (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	$F$ (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			$ER/W = 1/2$				$ER/W = 1/2$
0	0,0	0,00	0,00	200	11,3	1,74	3,50
5	0,8	0,04	0,35	210	11,5	1,82	3,59
10	1,3	0,09	0,56	220	11,5	1,91	3,59
15	1,6	0,13	0,69	230	11,7	2,00	3,63
20	2,0	0,17	0,86	240	12,1	2,08	3,77
30	2,7	0,26	1,17	250	12,5	2,17	3,89
40	3,3	0,35	1,43	260	12,9	2,26	4,02
50	3,9	0,43	1,68	270	13,2	2,34	4,11
60	4,3	0,52	1,86	280	13,6	2,43	4,23
70	4,8	0,61	2,07	290	14,1	2,52	4,40
80	5,3	0,69	2,29	300	14,5	2,60	4,52
90	5,6	0,78	2,42	310	15,1	2,69	4,70
100	5,9	0,87	2,55	320	15,9	2,78	4,96

110	6,3	0,95	2,72	330	16,1	2,86	5,00
120	6,6	1,04	2,85	340	16,5	2,95	5,12
130	6,8	1,13	2,94	350	17,1	3,04	5,31
140	7,0	1,22	3,02	360	17,9	3,13	5,58
150	7,2	1,30	3,11	370	18,5	3,21	5,74
160	7,4	1,39	3,20	380	19,0	3,30	5,91
170	7,6	1,48	3,28	390	19,5	3,39	6,05
180	7,7	1,56	3,33	400	19,9	3,47	6,19
190	7,9	1,65	3,41	450	20,3	3,91	<b>6,30</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.29** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/2$ , είναι  $\sigma_{max}=6.30$  MPa.

**Πίνακας 5.30:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 1/2$ , για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 3$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2				ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00	200	9,4	1,77	4,08
5	0,8	0,04	0,35	210	9,5	1,86	4,11
10	1,5	0,09	0,65	220	10,1	1,95	4,36
15	1,9	0,13	0,82	230	10,5	2,04	4,53
20	2,2	0,18	0,95	240	11,1	2,13	4,79
30	2,7	0,27	1,17	250	11,7	2,22	5,05
40	3,2	0,35	1,38	260	12,1	2,30	5,21
50	3,7	0,44	1,60	270	12,6	2,39	5,43
60	4,1	0,53	1,77	280	13,0	2,48	5,62
70	4,4	0,62	1,90	290	13,6	2,57	5,86
80	4,9	0,71	2,12	300	13,9	2,66	6,00
90	5,1	0,80	2,20	310	14,2	2,75	6,12
100	5,4	0,89	2,33	320	14,6	2,84	6,31
110	5,7	0,98	2,46	330	14,8	2,93	6,40
120	5,9	1,06	2,53	340	15,1	3,01	6,52

130	6,3	1,15	2,71	350	15,5	3,10	6,69
140	6,7	1,24	2,89	360	15,8	3,19	6,81
150	7,0	1,33	3,04	370	16,0	3,28	6,90
160	7,4	1,42	3,20	380	16,4	3,37	7,07
170	8,2	1,51	3,52	390	16,6	3,46	7,19
180	8,7	1,60	3,74	400	17,0	3,55	7,35
190	9,0	1,68	3,90	450	17,6	3,99	<b>7,60</b>

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.30** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, είναι **σ<sub>max</sub>=7.60 MPa**.

**Πίνακας 5.31:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 1 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	9,6	1,78	4,15
5	0,6	0,04	0,26	210	9,6	1,87	4,15
10	1,1	0,09	0,48	220	9,6	1,96	4,15
15	1,4	0,13	0,60	230	9,7	2,05	4,19
20	2,1	0,18	0,91	240	9,7	2,14	4,19
30	2,8	0,27	1,21	250	9,7	2,23	4,19
40	3,5	0,36	1,51	260	9,8	2,32	4,23
50	4,5	0,45	1,94	270	9,8	2,41	4,23
60	5,3	0,54	2,29	280	9,8	2,50	4,23
70	5,9	0,62	2,55	290	9,8	2,59	4,23
80	6,5	0,71	2,81	300	9,8	2,68	4,23
90	7,0	0,80	3,02	310	9,9	2,77	4,28
100	7,5	0,89	3,24	320	10,0	2,85	4,32
110	7,8	0,98	3,37	330	10,2	2,94	4,41
120	8,3	1,07	3,59	340	10,6	3,03	4,58
130	8,6	1,16	3,72	350	10,7	3,12	4,64
140	8,8	1,25	3,80	360	11,0	3,21	4,73
150	8,9	1,34	3,85	370	11,3	3,30	4,89

160	9,2	1,43	3,97	380	11,7	3,39	5,04
170	9,3	1,52	4,02	390	11,9	3,48	5,13
180	9,5	1,61	4,10	400	12,1	3,57	5,21
190	9,6	1,69	4,15	450	12,5	4,01	<b>5,40</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.31** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι  $\sigma_{\max}=5.40$  MPa.

**Πίνακας 5.32:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 2$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	9,1	1,71	3,93
5	0,9	0,04	0,39	210	9,2	1,79	3,97
10	1,4	0,09	0,60	220	9,4	1,88	4,06
15	1,8	0,13	0,78	230	9,6	1,97	4,15
20	2,3	0,17	0,99	240	9,6	2,05	4,15
30	2,9	0,26	1,25	250	9,7	2,14	4,19
40	3,8	0,34	1,64	260	12,0	2,22	5,19
50	4,3	0,43	1,86	270	10,0	2,31	4,31
60	4,9	0,51	2,12	280	10,5	2,39	4,53
70	5,5	0,60	2,38	290	11,0	2,48	4,77
80	6,1	0,68	2,64	300	11,3	2,56	4,90
90	6,6	0,77	2,85	310	11,6	2,65	5,00
100	7,0	0,85	3,02	320	11,9	2,74	5,12
110	7,2	0,94	3,11	330	12,5	2,82	5,38
120	7,7	1,03	3,33	340	12,8	2,91	5,51
130	8,0	1,11	3,46	350	13,2	2,99	5,70
140	8,1	1,20	3,50	360	13,8	3,08	5,96
150	8,2	1,28	3,54	370	14,1	3,16	6,10
160	8,4	1,37	3,63	380	14,7	3,25	6,34
170	8,5	1,45	3,67	390	15,1	3,33	6,52

180	8,8	1,54	3,80	400	15,6	3,42	6,74
190	9,0	1,62	3,89	450	16,0	3,85	<b>6,90</b>

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.32** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι **σ<sub>max</sub>=6.90 MPa**.

**Πίνακας 5.33**: Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 3 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	15,2	1,73	6,56
5	4,4	0,04	1,89	210	15,5	1,81	6,70
10	5,2	0,09	2,25	220	16,1	1,90	6,94
15	5,8	0,13	2,49	230	16,3	1,98	7,06
20	6,5	0,17	2,79	240	16,7	2,07	7,23
30	7,0	0,26	3,01	250	17,5	2,16	7,56
40	7,4	0,35	3,18	260	17,8	2,24	7,70
50	7,6	0,43	3,30	270	18,2	2,33	7,86
60	8,2	0,52	3,56	280	18,5	2,42	7,99
70	8,6	0,60	3,71	290	18,6	2,50	8,05
80	9,0	0,69	3,89	300	18,9	2,59	8,16
90	9,4	0,78	4,08	310	19,2	2,67	8,29
100	9,8	0,86	4,25	320	19,3	2,76	8,34
110	10,2	0,95	4,40	330	19,5	2,85	8,40
120	11,2	1,04	4,83	340	19,7	2,93	8,51
130	11,7	1,12	5,07	350	20,1	3,02	8,67
140	12,2	1,21	5,26	360	20,2	3,11	8,73
150	12,8	1,29	5,51	370	20,5	3,19	8,87
160	13,7	1,38	5,92	380	20,9	3,28	9,01
170	14,1	1,47	6,08	390	21,1	3,36	9,12
180	14,4	1,55	6,21	400	21,3	3,45	9,20
190	14,8	1,64	6,38	450	21,8	3,88	<b>9,40</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.33 η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι  $\sigma_{\max}=9.40$  MPa.

**Πίνακας 5.34:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: 28 Ημέρες							
$\sigma_3 = 1$ Mpa							
$\Delta l$ (mm)	$F$ (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	$F$ (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	14,7	1,72	6,35
5	1,6	0,04	0,69	210	14,9	1,80	6,44
10	2,6	0,09	1,12	220	15,0	1,89	6,48
15	3,6	0,13	1,56	230	15,1	1,97	6,52
20	4,4	0,17	1,90	240	15,2	2,06	6,57
30	5,7	0,26	2,46	250	15,4	2,14	6,65
40	6,8	0,34	2,94	260	16,0	2,23	6,89
50	7,7	0,43	3,33	270	16,2	2,32	7,00
60	8,7	0,51	3,76	280	16,6	2,40	7,19
70	9,6	0,60	4,15	290	16,8	2,49	7,27
80	10,5	0,69	4,54	300	17,2	2,57	7,41
90	11,2	0,77	4,84	310	17,6	2,66	<b>7,60</b>
100	11,6	0,86	5,01	320	17,6	2,74	<b>7,60</b>
110	12,3	0,94	5,31	330	17,2	2,83	7,41
120	12,7	1,03	5,49	340	16,5	2,92	7,12
130	13,1	1,11	5,66	350	15,7	3,00	6,80
140	13,6	1,20	5,88	360	15,4	3,09	6,64
150	13,8	1,29	5,96	370	15,1	3,17	6,50
160	14,1	1,37	6,09	380	15,0	3,26	6,48
170	14,2	1,46	6,14	390	15,0	3,34	6,48
180	14,5	1,54	6,26	400	14,9	3,43	6,44
190	14,7	1,63	6,35				

Όπου:



$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.34 η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, είναι  $\sigma_{\max}=7.60$  MPa.

**Πίνακας 5.35:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: 28 Ημέρες							
$\sigma_3 = 2$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	18,2	1,76	7,86
5	1,5	0,04	0,65	210	18,4	1,84	7,95
10	2,5	0,09	1,08	220	18,8	1,93	8,12
15	3,5	0,13	1,51	230	19,4	2,02	8,37
20	4,1	0,18	1,77	240	19,7	2,11	8,49
30	5,5	0,26	2,38	250	19,9	2,19	8,60
40	7,0	0,35	3,02	260	20,2	2,28	8,71
50	8,2	0,44	3,54	270	20,6	2,37	8,90
60	9,3	0,53	4,02	280	20,9	2,46	9,04
70	10,3	0,61	4,45	290	21,2	2,55	9,16
80	11,6	0,70	5,01	300	21,6	2,63	9,31
90	12,6	0,79	5,44	310	21,9	2,72	9,46
100	13,3	0,88	5,75	320	22,3	2,81	9,62
110	14,2	0,97	6,14	330	22,8	2,90	9,86
120	14,9	1,05	6,44	340	22,9	2,99	9,90
130	15,5	1,14	6,70	350	23,2	3,07	10,03
140	16,1	1,23	6,96	360	23,5	3,16	10,15
150	16,5	1,32	7,13	370	23,9	3,25	10,30
160	17,0	1,40	7,34	380	24,3	3,34	10,48
170	17,3	1,49	7,47	390	24,3	3,42	10,50
180	17,7	1,58	7,65	400	24,6	3,51	10,61
190	18,0	1,67	7,78	450	24,8	3,95	<b>10,70</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.35 η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, είναι  $\sigma_{\max}=10.70$  MPa.

**Πίνακας 5.36:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 3$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	18,5	1,72	7,99
5	1,7	0,04	0,73	210	19,0	1,81	8,19
10	2,7	0,09	1,17	220	19,5	1,89	8,42
15	3,6	0,13	1,56	230	20,1	1,98	8,69
20	4,4	0,17	1,90	240	20,4	2,07	8,81
30	5,7	0,26	2,46	250	21,0	2,15	9,09
40	7,0	0,34	3,02	260	21,5	2,24	9,28
50	8,1	0,43	3,50	270	22,2	2,33	9,60
60	9,4	0,52	4,06	280	22,8	2,41	9,84
70	10,6	0,60	4,58	290	23,2	2,50	10,00
80	11,5	0,69	4,97	300	23,7	2,58	10,25
90	12,5	0,78	5,40	310	24,0	2,67	10,37
100	13,2	0,86	5,70	320	24,5	2,76	10,59
110	13,9	0,95	6,01	330	24,9	2,84	10,74
120	14,4	1,03	6,22	340	25,2	2,93	10,90
130	15,2	1,12	6,57	350	25,7	3,01	11,10
140	15,7	1,21	6,78	360	26,3	3,10	11,34
150	16,3	1,29	7,04	370	26,8	3,19	11,56
160	16,8	1,38	7,26	380	27,3	3,27	11,79
170	17,2	1,46	7,43	390	27,6	3,36	11,94
180	17,6	1,55	7,60	400	28,1	3,45	12,12
190	18,1	1,64	7,82	450	28,5	3,88	<b>12,30</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.36** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, είναι  $\sigma_{\max}=12.30$  MPa.

**Πίνακας 5.37:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 1$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	15,7	1,64	6,77
5	1,1	0,04	0,48	210	16,1	1,72	6,94
10	2,2	0,08	0,95	220	16,4	1,80	7,10
15	3,0	0,12	1,30	230	17,0	1,88	7,35
20	3,8	0,16	1,64	240	17,8	1,96	7,70
30	5,3	0,25	2,29	250	18,5	2,04	7,98
40	6,6	0,33	2,85	260	18,7	2,13	8,09
50	7,8	0,41	3,37	270	18,9	2,21	8,17
60	9,0	0,49	3,89	280	19,2	2,29	8,30
70	9,9	0,57	4,28	290	19,8	2,37	8,57
80	10,6	0,65	4,58	300	20,2	2,45	8,73
90	11,2	0,74	4,84	310	20,6	2,53	<b>8,90</b>
100	11,7	0,82	5,05	320	20,6	2,62	<b>8,90</b>
110	12,4	0,90	5,36	330	20,6	2,70	<b>8,90</b>
120	12,8	0,98	5,53	340	19,8	2,78	8,53
130	13,0	1,06	5,62	350	19,8	2,86	8,53
140	13,5	1,14	5,83	360	19,0	2,94	8,21
150	13,7	1,23	5,92	370	18,0	3,03	7,76
160	14,0	1,31	6,05	380	17,2	3,11	7,43
170	14,2	1,39	6,14	390	16,6	3,19	7,19
180	14,4	1,47	6,22	400	15,7	3,27	6,79
190	14,8	1,55	6,41	450	14,9	3,68	6,44

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.37** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{\max}=8.90$  MPa.

**Πίνακας 5.38:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	18,2	1,75	7,84
5	1,6	0,04	0,69	210	18,7	1,83	8,09
10	2,7	0,09	1,17	220	19,2	1,92	8,27
15	3,6	0,13	1,56	230	19,7	2,01	8,50
20	4,5	0,17	1,94	240	20,2	2,09	8,71
30	6,0	0,26	2,59	250	20,6	2,18	8,90
40	7,4	0,35	3,20	260	21,2	2,27	9,14
50	8,6	0,44	3,72	270	21,5	2,36	9,28
60	9,5	0,52	4,10	280	21,7	2,44	9,37
70	10,6	0,61	4,58	290	21,9	2,53	9,45
80	11,5	0,70	4,97	300	22,1	2,62	9,53
90	12,2	0,79	5,27	310	22,3	2,71	9,61
100	12,9	0,87	5,57	320	22,6	2,79	9,77
110	13,5	0,96	5,83	330	22,8	2,88	9,86
120	14,0	1,05	6,05	340	23,2	2,97	10,01
130	14,5	1,13	6,26	350	23,8	3,05	10,27
140	14,8	1,22	6,39	360	24,3	3,14	10,49
150	15,3	1,31	6,61	370	24,7	3,23	10,66
160	16,1	1,40	6,96	380	25,2	3,32	10,89
170	2,7	1,48	1,18	390	25,5	3,40	11,02
180	17,1	1,57	7,39	400	25,9	3,49	11,18
190	17,6	1,66	7,60	450	26,2	3,93	<b>11,30</b>

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.38** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{\max}=11.30 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.39:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>28 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 3 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	19,7	1,79	8,49
5	1,8	0,04	0,78	210	20,4	1,88	8,80
10	2,7	0,09	1,17	220	20,9	1,96	9,04
15	3,5	0,13	1,51	230	21,6	2,05	9,31
20	4,2	0,18	1,81	240	22,3	2,14	9,64
30	5,8	0,27	2,51	250	22,9	2,23	9,90
40	6,6	0,36	2,85	260	23,5	2,32	10,15
50	7,6	0,45	3,28	270	24,3	2,41	10,49
60	8,4	0,54	3,63	280	24,8	2,50	10,72
70	9,3	0,63	4,02	290	25,4	2,59	10,99
80	10,4	0,71	4,50	300	26,1	2,68	11,28
90	11,3	0,80	4,89	310	27,0	2,77	11,64
100	12,2	0,89	5,27	320	27,6	2,86	11,90
110	13,0	0,98	5,62	330	28,0	2,95	12,08
120	13,8	1,07	5,94	340	28,6	3,04	12,34
130	14,5	1,16	6,26	350	29,1	3,13	12,57
140	15,4	1,25	6,67	360	29,7	3,21	12,83
150	16,0	1,34	6,91	370	30,3	3,30	13,08
160	16,7	1,43	7,20	380	30,5	3,39	13,17
170	17,6	1,52	7,58	390	31,0	3,48	13,40
180	18,1	1,61	7,81	400	31,5	3,57	13,59
190	18,8	1,70	8,10	450	31,7	4,02	<b>13,70</b>

Όπου:

**$\Delta l$ :** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**$\varepsilon\%$ :** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**$\sigma$ :** Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.39** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  **$\sigma_{\max}=13.70 \text{ MPa}$** .

### 5.5.3. ΧΡΟΝΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ: 90 ΗΜΕΡΕΣ

**Πίνακας 5.40:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa.

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2				ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00	200	6,1	1,94	2,64
5	0,6	0,05	0,26	210	6,1	2,04	2,64
10	1,0	0,10	0,43	220	6,2	2,14	2,68
15	1,3	0,15	0,56	230	6,2	2,24	2,68
20	1,7	0,19	0,73	240	6,3	2,33	2,72
30	2,2	0,29	0,95	250	6,6	2,43	2,87
40	2,9	0,39	1,25	260	6,7	2,53	2,90
50	3,3	0,49	1,43	270	7,0	2,62	3,01
60	3,7	0,58	1,60	280	7,2	2,72	3,10
70	4,2	0,68	1,81	290	7,4	2,82	3,21
80	4,5	0,78	1,94	300	7,9	2,92	3,42
90	4,8	0,87	2,07	310	8,5	3,01	3,67
100	5,0	0,97	2,16	320	9,0	3,11	3,89
110	5,2	1,07	2,25	330	9,4	3,21	4,08
120	5,4	1,17	2,33	340	9,9	3,30	4,29
130	5,6	1,26	2,42	350	10,2	3,40	4,40
140	5,7	1,36	2,46	360	10,7	3,50	4,61
150	5,8	1,46	2,51	370	11,0	3,60	4,75
160	5,9	1,55	2,55	380	11,4	3,69	4,94
170	5,9	1,65	2,55	390	11,6	3,79	5,02
180	6,0	1,75	2,59	400	11,8	3,89	<b>5,10</b>
190	6,0	1,85	2,59				

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.40** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, είναι  $\sigma_{\max} = 5.10 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.41:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>
-------------------------------------

$\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/2				ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00	200	8,4	1,82	3,63
5	0,5	0,05	0,22	210	8,4	1,91	3,63
10	1,1	0,09	0,48	220	8,4	2,00	3,63
15	1,5	0,14	0,65	230	8,6	2,09	3,71
20	2,0	0,18	0,86	240	8,9	2,18	3,84
30	2,8	0,27	1,21	250	9,2	2,27	3,99
40	3,5	0,36	1,51	260	9,5	2,36	4,10
50	4,2	0,45	1,81	270	9,8	2,45	4,24
60	4,7	0,54	2,03	280	10,4	2,54	4,50
70	5,3	0,64	2,29	290	10,9	2,63	4,70
80	5,8	0,73	2,51	300	11,4	2,72	4,94
90	6,0	0,82	2,59	310	11,8	2,82	5,09
100	6,4	0,91	2,77	320	12,3	2,91	5,32
110	6,8	1,00	2,94	330	12,8	3,00	5,54
120	7,0	1,09	3,02	340	13,4	3,09	5,77
130	7,3	1,18	3,15	350	13,7	3,18	5,90
140	7,4	1,27	3,20	360	14,0	3,27	6,05
150	7,6	1,36	3,28	370	14,4	3,36	6,21
160	7,7	1,45	3,33	380	15,0	3,45	6,49
170	7,9	1,54	3,41	390	15,5	3,54	6,71
180	8,0	1,63	3,46	400	16,0	3,63	<b>6,90</b>
190	8,3	1,73	3,59				

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.41 η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, είναι  $\sigma_{\max} = 6.90 \text{ MPa}$ .

**Πίνακας 5.42:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 3 \text{ MPa}$							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)

			ER/W = 1/2				ER/W = 1/2
0	0,0	0,00	0,00	200	11,2	1,80	4,82
5	2,3	0,04	0,99	210	11,6	1,89	5,00
10	2,7	0,09	1,17	220	11,9	1,98	5,14
15	3,0	0,13	1,30	230	12,8	2,07	5,51
20	3,3	0,18	1,43	240	13,6	2,16	5,87
30	4,1	0,27	1,77	250	13,9	2,25	6,01
40	4,6	0,36	1,99	260	14,2	2,34	6,14
50	5,0	0,45	2,16	270	15,1	2,43	6,52
60	5,7	0,54	2,46	280	16,0	2,52	6,89
70	6,0	0,63	2,59	290	16,4	2,61	7,07
80	6,3	0,72	2,72	300	16,7	2,70	7,21
90	6,8	0,81	2,94	310	17,4	2,79	7,51
100	6,9	0,90	2,98	320	18,2	2,88	7,87
110	7,2	0,99	3,11	330	18,7	2,97	8,09
120	7,4	1,08	3,20	340	19,0	3,06	8,20
130	7,6	1,17	3,28	350	19,7	3,15	8,51
140	8,2	1,26	3,53	360	18,3	3,24	7,89
150	8,6	1,35	3,72	370	18,5	3,33	8,00
160	9,1	1,44	3,91	380	18,8	3,42	8,12
170	9,4	1,53	4,06	390	19,7	3,51	8,52
180	9,8	1,62	4,23	400	20,1	3,60	<b>8,70</b>
190	10,4	1,71	4,51				

Όπου:

**Δl:** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%:** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ:** Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.42** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/2, είναι **σ<sub>max</sub>=8.70 MPa**.

**Πίνακας 5.43:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1 για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 1 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	9,3	1,87	4,02
5	0,9	0,05	0,39	210	9,4	1,96	4,06



10	1,6	0,09	0,69	220	9,5	2,06	4,11
15	2,4	0,14	1,04	230	9,7	2,15	4,18
20	3,0	0,19	1,30	240	9,7	2,25	4,20
30	4,3	0,28	1,86	250	9,7	2,34	4,20
40	5,4	0,37	2,33	260	10,3	2,43	4,43
50	6,3	0,47	2,72	270	10,8	2,53	4,67
60	7,1	0,56	3,07	280	11,2	2,62	4,84
70	7,7	0,65	3,33	290	11,3	2,71	4,90
80	8,2	0,75	3,54	300	11,6	2,81	5,03
90	8,5	0,84	3,67	310	11,8	2,90	5,10
100	8,8	0,94	3,80	320	12,2	2,99	5,27
110	9,0	1,03	3,89	330	12,8	3,09	5,51
120	9,1	1,12	3,93	340	13,3	3,18	5,74
130	9,2	1,22	3,97	350	13,6	3,27	5,89
140	9,2	1,31	3,97	360	13,6	3,37	5,89
150	9,2	1,40	3,97	370	14,0	3,46	6,04
160	9,3	1,50	4,02	380	14,4	3,55	<b>6,20</b>
170	9,3	1,59	4,02	390	14,4	3,65	<b>6,20</b>
180	9,3	1,68	4,02	400	14,4	3,74	<b>6,20</b>
190	9,3	1,78	4,02				

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.43** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι **σ<sub>max</sub>=6.20 MPa**.

**Πίνακας 5.44**: Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1 για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 2 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	12,7	1,83	5,49
5	1,0	0,05	0,43	210	12,7	1,92	5,49
10	2,0	0,09	0,86	220	12,8	2,01	5,53
15	2,6	0,14	1,12	230	12,8	2,10	5,53
20	3,4	0,18	1,47	240	12,9	2,19	5,57

30	4,8	0,27	2,07	250	12,9	2,28	5,57
40	6,0	0,37	2,59	260	13,3	2,37	5,74
50	7,1	0,46	3,07	270	13,9	2,47	5,99
60	8,2	0,55	3,54	280	14,1	2,56	6,10
70	8,9	0,64	3,85	290	14,6	2,65	6,32
80	9,6	0,73	4,15	300	15,1	2,74	6,50
90	10,0	0,82	4,32	310	15,6	2,83	6,75
100	10,4	0,91	4,49	320	16,0	2,92	6,91
110	10,9	1,00	4,71	330	16,4	3,01	7,08
120	11,2	1,10	4,84	340	16,7	3,11	7,20
130	11,5	1,19	4,97	350	17,2	3,20	7,41
140	11,6	1,28	5,01	360	17,8	3,29	7,67
150	12,0	1,37	5,18	370	18,3	3,38	7,90
160	12,1	1,46	5,23	380	18,6	3,47	8,04
170	12,3	1,55	5,31	390	18,9	3,56	8,17
180	12,4	1,64	5,36	400	19,2	3,65	<b>8,30</b>
190	12,6	1,74	5,44				

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.44** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι **σ<sub>max</sub>=8.33 MPa**.

**Πίνακας 5.45:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1 για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 3 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1/1				ER/W = 1/1
0	0,0	0,00	0,00	200	18,9	1,88	8,18
5	2,7	0,05	1,18	210	19,1	1,98	8,26
10	3,7	0,09	1,59	220	19,4	2,07	8,37
15	4,6	0,14	1,97	230	19,5	2,16	8,42
20	5,4	0,19	2,33	240	19,9	2,26	8,59
30	6,3	0,28	2,71	250	20,1	2,35	8,69
40	6,9	0,38	2,96	260	20,3	2,45	8,77
50	7,5	0,47	3,24	270	20,3	2,54	8,77

60	9,1	0,56	3,94	280	20,6	2,63	8,89
70	10,6	0,66	4,58	290	20,6	2,73	8,89
80	11,6	0,75	5,00	300	20,9	2,82	9,02
90	12,6	0,85	5,45	310	21,1	2,92	9,11
100	13,6	0,94	5,89	320	21,4	3,01	9,25
110	14,4	1,03	6,24	330	21,6	3,10	9,32
120	15,8	1,13	6,83	340	21,9	3,20	9,46
130	16,3	1,22	7,06	350	22,0	3,29	9,51
140	17,1	1,32	7,39	360	22,6	3,39	9,77
150	17,2	1,41	7,42	370	23,0	3,48	9,94
160	17,7	1,51	7,63	380	23,3	3,57	10,05
170	17,9	1,60	7,71	390	23,5	3,67	10,14
180	18,3	1,69	7,89	400	23,9	3,76	<b>10,30</b>
190	18,5	1,79	8,01				

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\epsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.45** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1/1, είναι  $\sigma_{\max} = 10.30$  MPa.

**Πίνακας 5.46:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1 για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 1$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\epsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	21,4	1,82	9,22
5	0,8	0,05	0,35	210	21,6	1,92	9,32
10	2,2	0,09	0,95	220	21,7	2,01	9,37
15	2,8	0,14	1,20	230	21,8	2,10	9,42
20	3,8	0,18	1,65	240	21,8	2,19	9,42
30	5,6	0,27	2,41	250	21,9	2,28	9,47
40	7,3	0,36	3,16	260	21,9	2,37	9,47
50	8,9	0,46	3,86	270	22,0	2,46	<b>9,50</b>
60	10,6	0,55	4,56	280	22,0	2,55	<b>9,50</b>
70	12,1	0,64	5,21	290	21,7	2,65	9,37

80	13,2	0,73	5,71	300	21,2	2,74	9,17
90	14,5	0,82	6,26	310	21,2	2,83	9,17
100	15,7	0,91	6,77	320	21,0	2,92	9,07
110	16,6	1,00	7,17	330	20,9	3,01	9,02
120	17,4	1,09	7,52	340	20,8	3,10	8,97
130	18,1	1,19	7,82	350	20,7	3,19	8,92
140	18,9	1,28	8,17	360	20,4	3,28	8,82
150	19,4	1,37	8,37	370	20,3	3,38	8,77
160	20,0	1,46	8,62	380	20,2	3,47	8,72
170	20,4	1,55	8,82	390	20,0	3,56	8,62
180	20,8	1,64	8,97	400	19,7	3,65	8,52
190	21,0	1,73	9,07				

Όπου:

**Δl:** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%:** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ:** Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.46** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, είναι  $\sigma_{\max}=9.50$  MPa.

**Πίνακας 5.47:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1 για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b><math>\sigma_3 = 2</math> MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	26,9	1,82	11,63
5	1,6	0,05	0,70	210	27,2	1,92	11,73
10	2,8	0,09	1,21	220	27,4	2,01	11,83
15	4,1	0,14	1,76	230	27,7	2,10	11,98
20	5,0	0,18	2,16	240	27,9	2,19	12,03
30	6,8	0,27	2,92	250	28,0	2,28	12,08
40	8,9	0,36	3,83	260	28,2	2,37	12,18
50	10,8	0,46	4,68	270	28,3	2,46	12,23
60	12,6	0,55	5,44	280	28,3	2,55	12,23
70	14,4	0,64	6,24	290	28,3	2,65	12,23
80	16,2	0,73	7,00	300	28,4	2,74	12,28
90	17,6	0,82	7,60	310	28,4	2,83	12,28

100	19,0	0,91	8,20	320	28,4	2,92	12,28
110	20,2	1,00	8,71	330	28,4	3,01	12,28
120	21,2	1,09	9,16	340	28,5	3,10	<b>12,30</b>
130	22,3	1,19	9,61	350	28,5	3,19	<b>12,30</b>
140	23,2	1,28	10,02	360	28,5	3,28	<b>12,30</b>
150	24,0	1,37	10,37	370	28,5	3,38	<b>12,30</b>
160	24,9	1,46	10,77	380	28,5	3,47	<b>12,30</b>
170	25,4	1,55	10,97	390	28,5	3,56	<b>12,30</b>
180	26,0	1,64	11,23	400	28,5	3,65	<b>12,30</b>
190	26,5	1,73	11,43				

Όπου:

**Δl**: βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F**: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%**: Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ**: Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.47** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, είναι **σ<sub>max</sub>=12.30 MPa**.

**Πίνακας 5.48:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1 για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b>σ<sub>3</sub> = 3 MPa</b>							
Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)	Δl (mm)	F (kN)	ε (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 1,5/1				ER/W = 1,5/1
0	0,0	0,00	0,00	200	32,0	1,82	13,80
5	2,1	0,05	0,91	210	32,5	1,92	14,02
10	3,5	0,06	1,51	220	32,8	2,01	14,18
15	6,2	0,11	2,66	230	33,0	2,10	14,23
20	8,6	0,18	3,73	240	33,1	2,19	14,28
30	10,7	0,27	4,64	250	33,2	2,28	14,34
40	12,7	0,36	5,49	260	33,2	2,37	14,34
50	14,8	0,46	6,40	270	33,3	2,46	<b>14,40</b>
60	16,8	0,55	7,25	280	33,3	2,55	<b>14,40</b>
70	18,8	0,64	8,10	290	33,3	2,65	<b>14,40</b>
80	20,5	0,73	8,85	300	33,0	2,74	14,23
90	22,1	0,82	9,54	310	32,8	2,83	14,18
100	23,7	0,91	10,23	320	32,7	2,92	14,12
110	25,1	1,00	10,82	330	32,7	3,01	14,12
120	26,2	1,09	11,30	340	32,3	3,10	13,96

130	27,3	1,19	11,78	350	32,2	3,19	13,91
140	28,3	1,28	12,21	360	32,0	3,28	13,80
150	29,1	1,37	12,58	370	31,8	3,38	13,75
160	29,9	1,46	12,90	380	31,7	3,47	13,70
170	30,5	1,55	13,16	390	31,6	3,56	13,64
180	31,1	1,64	13,43	400	31,5	3,65	13,59
190	31,6	1,73	13,64				

Όπου:

**Δl:** βράχυνση του δοκιμίου σε mm

**F:** Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

**ε%:** Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

**σ:** Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.48** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 1.5/1, είναι  $\sigma_{\max}=14.40$  MPa.

**Πίνακας 5.49:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1 για πλευρική πίεση ίση με 1 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b><math>\sigma_3 = 1</math> MPa</b>							
<b>Δl (mm)</b>	<b>F (kN)</b>	<b>ε (%)</b>	<b>Τάση (MPa)</b>	<b>Δl (mm)</b>	<b>F (kN)</b>	<b>ε (%)</b>	<b>Τάση (MPa)</b>
			<b>ER/W = 2/1</b>				<b>ER/W = 2/1</b>
0	0,0	0,00	0,00	200	27,1	1,87	11,71
5	1,5	0,05	0,65	210	27,5	1,97	11,89
10	2,8	0,09	1,21	220	28,0	2,06	12,07
15	4,1	0,14	1,77	230	28,1	2,15	12,15
20	5,2	0,19	2,25	240	3,0	2,25	12,29
30	7,8	0,28	3,37	250	28,6	2,34	12,34
40	10,3	0,37	4,45	260	28,9	2,43	<b>12,50</b>
50	12,5	0,47	5,40	270	28,3	2,53	12,22
60	14,6	0,56	6,31	280	28,0	2,62	12,09
70	16,6	0,66	7,17	290	27,1	2,72	11,70
80	18,4	0,75	7,95	300	26,5	2,81	11,45
90	19,6	0,84	8,47	310	25,9	2,90	11,20
100	20,8	0,94	8,99	320	25,4	3,00	10,96
110	21,9	1,03	9,46	330	4,1	3,09	10,77
120	22,8	1,12	9,85	340	24,5	3,18	10,60
130	23,9	1,22	10,33	350	24,1	3,28	10,42
140	24,7	1,31	10,67	360	23,9	3,37	10,30
150	25,4	1,40	10,97	370	23,4	3,46	10,12

160	26,0	1,50	11,23	380	23,1	3,56	9,98
170	26,5	1,59	11,45	390	22,5	3,65	9,72
180	26,8	1,69	11,58	400	22,3	3,75	9,63
190	27,0	1,78	11,67				

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.49** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 2/1$ , είναι  $\sigma_{max}=12.50$  MPa.

**Πίνακας 5.50:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία  $ER/W = 2/1$  για πλευρική πίεση ίση με 2 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
$\sigma_3 = 2$ MPa							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	120	31,7	1,12	13,68
5	2,5	0,05	1,08	130	32,2	1,22	13,90
10	4,2	0,09	1,81	140	32,7	1,31	14,10
15	5,8	0,14	2,51	150	33,2	1,41	14,33
20	7,4	0,19	3,20	160	33,8	1,50	<b>14,60</b>
30	10,2	0,28	4,41	170	33,8	1,59	<b>14,60</b>
40	12,9	0,37	5,57	180	32,7	1,69	14,10
50	15,2	0,47	6,57	190	32,0	1,78	13,80
60	19,0	0,56	8,21	200	31,3	1,87	13,52
70	24,8	0,66	10,71	210	31,0	1,97	13,39
80	28,5	0,75	12,31	220	30,6	2,06	13,20
90	29,8	0,84	12,87	230	30,6	2,16	13,20
100	30,6	0,94	13,20	240	30,6	2,25	13,20
110	31,1	1,03	13,45				

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

F: Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.50** η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{\max}=14.60$  MPa.

**Πίνακας 5.51:** Αντοχή σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1 για πλευρική πίεση ίση με 3 MPa

Χρόνος σκλήρυνσης: <b>90 Ημέρες</b>							
<b><math>\sigma_3 = 3</math> MPa</b>							
$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)	$\Delta l$ (mm)	F (kN)	$\varepsilon$ (%)	Τάση (MPa)
			ER/W = 2/1				ER/W = 2/1
0	0,0	0,00	0,00	200	32,4	1,88	14,00
5	3,7	0,05	1,60	210	33,2	1,97	14,33
10	4,6	0,09	1,98	220	33,7	2,07	14,56
15	5,7	0,14	2,45	230	34,3	2,16	14,81
20	6,7	0,19	2,89	240	34,7	2,25	14,99
30	9,0	0,28	3,90	250	34,9	2,35	15,08
40	11,2	0,38	4,84	260	35,3	2,44	15,26
50	13,4	0,47	5,79	270	35,7	2,54	15,41
60	16,2	0,56	6,98	280	36,3	2,63	15,67
70	18,3	0,66	7,90	290	36,7	2,72	15,84
80	20,1	0,75	8,70	300	37,0	2,82	15,96
90	24,5	0,85	10,60	310	37,3	2,91	16,12
100	27,3	0,94	11,78	320	37,8	3,00	16,31
110	4,4	1,03	1,90	330	38,1	3,10	16,47
120	29,0	1,13	12,51	340	38,3	3,19	16,52
130	29,8	1,22	12,86	350	38,7	3,29	<b>16,70</b>
140	29,9	1,31	12,90	360	38,7	3,38	<b>16,70</b>
150	30,6	1,41	13,23	370	37,7	3,47	16,30
160	30,9	1,50	13,35	380	36,6	3,57	15,80
170	31,5	1,60	13,59	390	35,7	3,66	15,42
180	31,7	1,69	13,71	400	35,0	3,76	15,10



190	32,2	1,78	13,90
-----	------	------	-------

Όπου:

$\Delta l$ : βράχυνση του δοκιμίου σε mm

$F$ : Δύναμη καταπόνησης του δοκιμίου σε θλίψη σε kN

$\varepsilon\%$ : Επί τοις εκατό παραμόρφωση του δοκιμίου

$\sigma$ : Τάση σε MPa

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.51 η μέγιστη αντοχή των δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, για χρόνο σκλήρυνσης 90 ημέρες και αναλογία ER/W = 2/1, είναι  $\sigma_{max}=16.70$  MPa.

**Πίνακας 5.52: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστης αντοχής ( $\sigma_1$ ) δοκιμίων τριαξονικής θλίψης για χρόνο σκλήρυνσης 7, 28, 90 και 180 ημέρες, για αναλογίες ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1 και 2/1 με πλευρική πίεση  $\sigma_3=1, 2$  και 3 MPa**

	Αρχική τάση $\sigma_1$ (Mpa)											
	ER/W=1/2			ER/W=1/1			ER/W=1.5/1			ER/W=2/1		
	Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)			Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)			Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)			Χρόνος σκλήρυνσης (ημέρες)		
$\sigma_3$ (MPa)	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90
1	-	4.2	5.1	2.4	5.4	6.2	3	7.6	9.5	3.4	8.9	12.5
2	-	6.3	6.9	4.5	6.9	8.3	5.3	10.7	12.3	5.5	11.3	14.6
3	-	7.6	8.7	6.1	9.4	10.3	6.9	12.3	14.4	7.3	13.7	16.7

## 5.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα δοκίμια με αναλογία ER/W=1/2 και χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών παρουσιάζουν μηδενική αντοχή και στις τρεις δοκιμές. Σε χαμηλά όμως επίπεδα κυμαίνονται και τα δοκίμια με αναλογία ER/W=1/1, ER/W=1,5/1 και ER/W=2/1 στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα νερού του μίγματος που καθυστερεί την σκλήρυνση του δοκιμίου, αλλά και στο μικρό χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο αποτέλεσε σημαντικό πρόβλημα στα πειράματα όμως αντιμετωπίζεται με την διαδικασία ηλεκτρόλυσης, όπως περιγράφεται στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Όπως φαίνεται στους πίνακες και στα διαγράμματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού και μονοαξονικής θλίψης η διαφορά ανάμεσα στην αντοχή των δοκιμίων με χρόνο σκλήρυνσης 90 ημερών και 180 ημερών είναι ελάχιστη. Συνεπώς το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα δοκίμια φτάνουν στην πλήρη αντοχή τους στις 90 ημέρες σκλήρυνσης. Μετά τις 90 ημέρες η αύξηση της αντοχής είναι ελάχιστη, γι' αυτό και δεν παρουσιάζει καμία χρησιμότητα.

Όλα τα χωμάτινα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίασαν ίδια συμπεριφορά μετά το όριο θραύσης τους. Η αντοχή των δοκιμίων μετά το όριο θραύσης δεν ήταν απότομη αλλά σταδιακή και κυμαινόταν σε υψηλά επίπεδα. Μάλιστα πολλά από τα δοκίμια δεν παρουσίαζαν εμφανείς ρωγμές μετά το πέρας των δοκιμών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ : 6**

### **ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ**

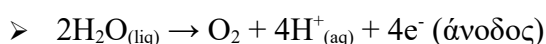
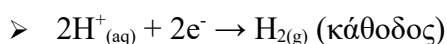
#### **6.1. ΓΕΝΙΚΑ**

**Ηλεκτρόλυση** (λύση δι' ηλεκτρισμού), ονομάζεται η διαδικασία της διάσπασης μιας ουσίας με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος.

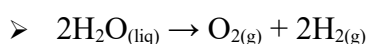
- Η ηλεκτρόλυση αξιοποιείται ειδικά τόσο στην εξαγωγή από τα μεταλλεύματά τους, όσο και στις επιμεταλλώσεις.
- Η ηλεκτρόλυση θεωρείται ειδική χημική αντίδραση και αποτελεί αντικείμενο έρευνας και μελέτης της Ηλεκτροχημείας.

Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, το νερό διασπάται στα βασικά στοιχεία όπου το αποτελούν, υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι η υψηλής καθαρότητας υδρογόνο που παράγεται. Ωστόσο, αποτελεί ακριβή μέθοδο εξαιτίας του κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο απαιτείται.

Κατά την ηλεκτρόλυση, στην κάθοδο ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) ανάγονται σε υδρογόνο ενώ στην άνοδο το νερό οξειδώνεται σε οξυγόνο και πρωτόνια. Οι διεργασίες αυτές περιγράφονται αντίστοιχα από τις παρακάτω αντιδράσεις:



οι οποίες μας δίνουν το συνολικό μηχανισμό της ηλεκτρόλυσης



Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι το παραγόμενο οξυγόνο μπορεί επίσης να εκμεταλλευτεί για βιομηχανική ή άλλη χρήση.

Θεωρητικά 1,23 V εφαρμοζόμενης τάσης αρκούν για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης. Πρακτικά, χρειάζεται περισσότερη τάση (1,55 V με 1,65 V). Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης ορίζεται ως το λόγο του 1,23 V προς την τάση όπου χρησιμοποιείται. Με τάση 1,60 V έχουμε απόδοση

$$\frac{1,23}{1,60} = 0,77 = 77\%$$

Η αντίδραση της καθόδου, εμπλέκει 4 ηλεκτρόνια και η οξείδωση πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς ενδιάμεσων προϊόντων. Σε αυτό οφείλεται η ανάγκη επιπλέον τάσης καθώς η όλη διαδικασία χαρακτηρίζεται από αργό κινητικό μηχανισμό. Η χρήση καταλύτη βοηθάει στη μείωση αυτής της τάσης και επιταχύνει τη διαδικασία. Ένας ιδανικός καταλύτης για την οξείδωση του νερού θα πρέπει να εξισορροπεί την απαιτούμενη ενέργεια του κάθε ενδιάμεσου βήματος και επίσης να εξισορροπεί τους ρυθμούς μεταφοράς κάθε ηλεκτρονίου.

Η απευθείας ηλεκτρόλυση νερού μέχρι και τη δεκαετία του '50 είχε ευρεία χρήση στην παραγωγή υδρογόνου. Σήμερα, ένα μικρό μόνο ποσοστό υδρογόνου παράγεται κατά αυτόν τον τρόπο σε εφαρμογές κυρίως όπου χρειάζεται μικρός όγκος καθαρού υδρογόνου. Ωστόσο παράλληλα παρατηρείται μια αναγέννηση του ενδιαφέροντος με την κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων ηλεκτρολυτών σε συνδυασμό με εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακής ή αιολικής).

### 6.1.1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης γίνεται πιο ισχυρό, όταν:

1. συμμετέχουν δύο ή περισσότερα διαφορετικά μέταλλα σε ένα υδραυλικό δίκτυο
2. τα διάφορα μέταλλα έρχονται σε απευθείας επαφή μεταξύ τους, χωρίς παρεμβολή άλλου υλικού
3. η αγωγιμότητα του διακινούμενου υγρού είναι υψηλή
4. η θερμοκρασία του υγρού είναι υψηλή
5. δημιουργείται ισχυρό ηλεκτρολυτικό κελί εξαιτίας του υπεδάφους, ηλεκτρικών συσκευών κτλ.

6. τα μέταλλα που συμμετέχουν στο δίκτυο έχουν μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ τους
7. η επιφάνεια των μετάλλων είναι καθαρή από άλατα και άλλες επικαθίσεις

## **6.2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ:**

Από την εμπειρία που έχουμε συλλέξει μέσα από τις επισκέψεις μας σε ξενοδοχεία, βιομηχανίες, δίκτυα ύδρευσης κτλ. μπορούμε να πούμε ότι η ηλεκτρόλυση προσβάλλει συχνότερα τα πιο κάτω είδη εγκαταστάσεων:

1. υπόγειες σωληνώσεις και δεξαμενές (λόγω μεταλλικών στοιχείων και υγρασίας εδάφους)
2. boilers νερού χρήσης (λόγω χάλκινης σερπαντίνας και χαλκοσωλήνων εξόδου και επιστροφής)
3. λέβητες θέρμανσης (λόγω χαλκοσωλήνων εισόδου και εξόδου)
4. δίκτυο επιστροφών συμπυκνωμάτων ατμού (λόγω πολύ υψηλής θεοκρασίας)
5. σιδερένια κολεκτέρ αναχωρήσεων – επιστροφών (λόγω χαλκοσωλήνων & υψηλής θερμοκρασίας)
6. δίκτυα ύδρευσης, σε σημεία σύνδεσης σιδηροσωλήνα με χαλκοσωλήνα

### **6.2.1. ΑΡΝΗΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.**

Τα προβλήματα που δημιουργεί το φαινόμενο της διάβρωσης σε μία επιχείρηση ή έναν οργανισμό ή μία ιδιωτική κατοικία είναι ποικίλα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα κυριότερα από αυτά:

1. Κόστος επισκευών & αντικατάστασης δικτύων
2. Σκάψιμο τοίχων ή εδάφους για αντικατάσταση σωληνώσεων
3. Γκρέμισμα τοίχων για αντικατάσταση λεβήτων, boilers κ.ά. μηχανημάτων.
4. Κόστος σε χρόνο απασχόλησης συντηρητών, διοίκησης, εργοδοτών, συν το κόστος ευκαιρίας
5. Απροειδοποίητες διακοπές λειτουργίας σε περιπτώσεις ζημιάς.
6. Απώλεια προϊόντος που διαρρέει (σημαντική όταν το προϊόν δεν είναι φθινό όπως το νερό)

7. Κίνδυνοι λόγω διαρροών (π.χ. νερό που πέφτει πάνω σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις)
8. Ρύπανση του νερού χρήσης με μεταλλικά ιόντα και οξείδια μετάλλων
9. Ανάπτυξη μικροοργανισμών επιβλαβών για την υγεία (π.χ. legionella)

### **6.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ**

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών και ιδιαίτερα εκείνα με αναλογία  $ER/W=1/2$  παρουσίασαν ελάχιστη αντοχή. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος επιστρατεύτηκε η λύση της ηλεκτρόλυσης.

Με την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του νερού από το δοκίμιο σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή ρεύματος από την συσκευή ηλεκτρόλυσης στην άνοδο και την κάθοδο (ράβδοι ηλεκτρόλυσης) (**Εικόνα 6.1**).



**Εικόνα 6.1:** Πειραματική διαδικασία ηλεκτρόλυσης του χωμάτινου δοκιμίου.

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιήθηκε στη πειραματική διαδικασία διαθέτει ψηφιακή ένδειξη με ακρίβεια δυο δεκαδικών ψηφίων για την ένταση του ρεύματος και ένα δεκαδικό ψηφίο για την τάση (**Εικόνα 6.2**).



**Εικόνα 6.2:** Μηχάνημα ηλεκτρόλυσης με ψηφιακή οθόνη ένδειξης τάσης και έντασης ρεύματος.

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης διαθέτει ρυθμιστές έντασης του ρεύματος και της τάσης. Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από την συσκευή ηλεκτρόλυσης στα ηλεκτρόδια πραγματοποιήθηκε μέσω δυο καλωδίων. Τα καλώδια αυτά είχαν ως είσοδο (input) δυο βύσματα στη συσκευή ηλεκτρόλυσης (**Εικόνα 6.3**) και ως έξοδο (output) δυο γάντζους (κροκοδειλάκια), τα οποία συνδέονται με τα ηλεκτρόδια.



**Εικόνα 6.3:** Διάταξη βυσμάτων και καλωδίων στη συσκευή ηλεκτρόλυσης.

Το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το αρνητικό πόλο της πηγής ονομάζεται κάθοδος, ενώ το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το θετικό πόλο ονομάζεται άνοδος. Το υλικό κατασκευής τους εσωτερικά είναι άνθρακας και συγκεκριμένα γραφίτης, ενώ το εξωτερικό τους περίβλημα αποτελείται από στρώση χαλκού (**Εικόνα 6.4**).



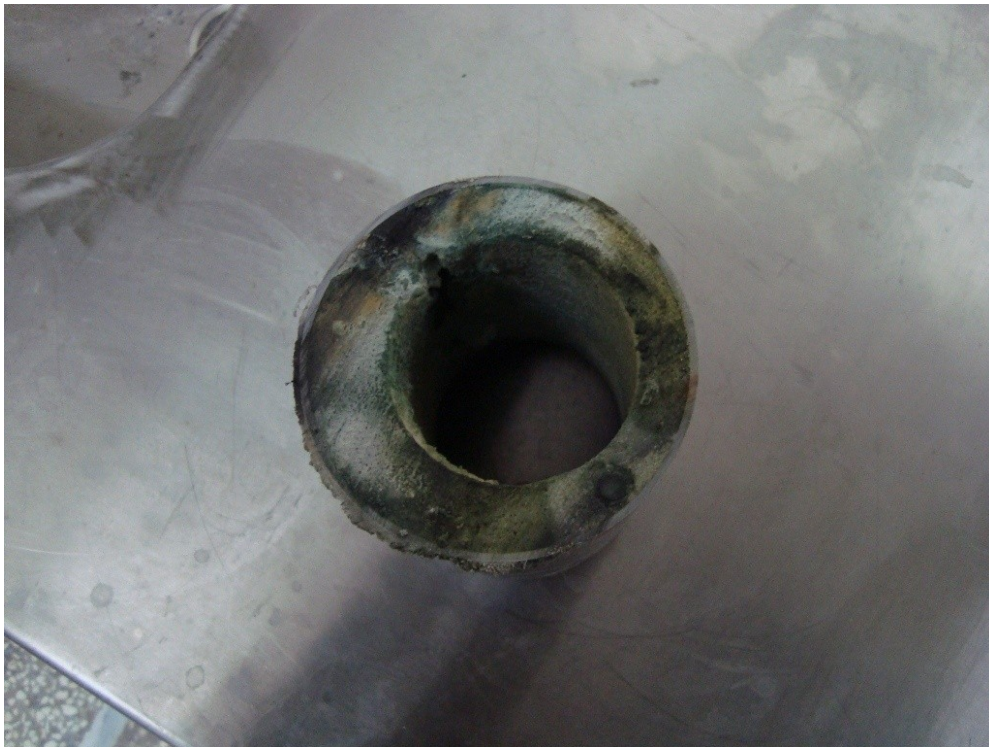
**Εικόνα 6.4 :** Ηλεκτρόδιο από άνθρακα με εξωτερικό περίβλημα χαλκού.

Σωλήνας PVC με διάμετρο 15 cm χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα για το μίγμα. Επιλέχθηκε μεγαλύτερη διάμετρος από 5.43 cm (διάμετρος των μητρών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο), διότι τα ηλεκτρόδια παραμένουν μέσα στο μίγμα κατά τη σκλήρυνση του (**Εικόνα 6.5**). Μετά το πέρας του χρόνου σκλήρυνσης με τη βοήθεια διατρητικού μηχανήματος συλλέγεται το επιθυμητής διαμέτρου δοκίμιο, ίσης με 5.43 cm (**Εικόνα 6.6**). Το διατρητικό μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε χρειάστηκε και η βοήθεια του νερού το οποίο κατέβρεχε το δοκίμιο και βοηθούσε στην ευκολότερη διάτρησή του (**Εικόνα 6.7**). Αρχικά έγινε η απόπειρα διάτρησης του δοκιμίου χωρίς νερό, όμως το μηχάνημα έπαυε να περιστρέφεται κατά τη διαδικασία διάτρησης, αφού το μείγμα ήταν εξαιρετικά λεπτόκοκκο.





**Εικόνα 6.5:** Μίγμα μετά το πέρας του χρόνου σκλήρυνσης του, όπου φαίνεται καθαρά το ηλεκτρόδιο μέσα στο μίγμα (μέσα σε κόκκινο κύκλο).



**Εικόνα 6.6 :** Μίγμα μέσα στη μήτρα μετά από την διαδικασία διάτρησης δοκιμίου διαμέτρου 5.43 cm.



**Εικόνα 6.7 :** Διατρητικό μηχάνημα συλλογής δοκιμίων διαμέτρου 5.43 cm με δυνατότητα διαβροχής νερού.

Τέλος η απομάκρυνση του νερού από τα δοκίμια πραγματοποιήθηκε με την αποσύνθεση του μορίου  $H_2O$  σε υδρογόνο  $H^+$  και υδροξύλιο  $OH^-$ . Τα ανιόντα υδρογόνου οδεύουν ανάλογα με το φορτίο τους (θετικό) στην κάθοδο, ενώ οι υδροξυλομάδες, οι οποίες διαθέτουν αρνητικό φορτίο, προς την άνοδο. Στα ηλεκτρόδια και στην γύρο περιοχή από αυτά παρατηρείται η τέλεση ηλεκτροχημικών δράσεων. Ως αποτέλεσμα των ηλεκτροχημικών αυτών δράσεων είναι η διάβρωση των ηλεκτροδίων.

#### **6.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.**

Μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα και επεξεργάστηκαν, όπως φαίνεται παρακάτω.

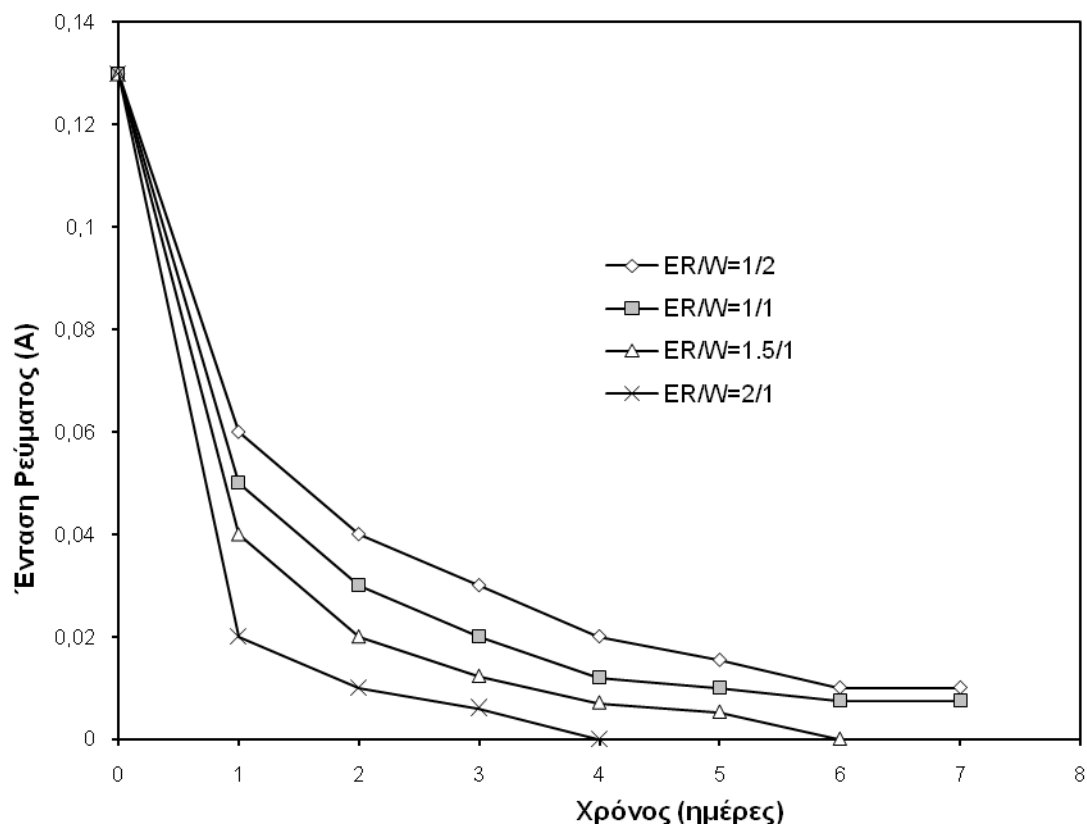
Στον **Πίνακα 6.1** παρουσιάζονται οι τιμές της εφαρμοζόμενης έντασης ρεύματος, όπως αυτές καταγράφηκαν από την ψηφιακή οθόνη του μηχανήματος ηλεκτρόλυσης σε σχέση με τις ημέρες σκλήρυνσης, αλλά και σε σχέση με τις αναλογίες εποξειδικής ρητίνης προς νερό.

**Πίνακας 6.1:** Ένταση ρεύματος σε σχέση με το χρόνο σκλήρυνσης δοκιμίων, για αναλογία  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$

Ημέρες	ER/W=1/2	ER/W=1/1	ER/W=1.5/1	ER/W=2/1
<b>0</b>	0,13	0,13	0,13	0,13
<b>1</b>	0,06	0,05	0,04	0,02
<b>2</b>	0,04	0,03	0,02	0,01
<b>3</b>	0,03	0,02	0,0123	0,0061
<b>4</b>	0,02	0,012	0,0071	0
<b>5</b>	0,0154	0,01	0,0053	
<b>6</b>	0,01	0,0075	0	
<b>7</b>	0,01	0,0075		

Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 6.1**, η ένταση του ρεύματος αρχικά παίρνει την μέγιστη τιμή της (0,13 A), ενώ όσο αυξάνεται ο χρόνος σκλήρυνσης τόσο μειώνεται η ένταση του ρεύματος. Μάλιστα στις αναλογίες  $ER/W = 1.5/1$  και  $2/1$  η ένταση του ρεύματος παίρνει την τιμή 0 πριν το πέρας των 7 ημερών, όπως αρχικά ήταν αναμενόμενο! Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού οι συγκεκριμένες αναλογίες εμπεριέχουν μικρότερη ποσότητα νερού από ότι οι άλλες δύο αναλογίες ( $ER/W = 1/2$  και  $1/1$ ). Στις 6 ημέρες για την αναλογία  $ER/W = 1.5/1$  και στις 4 ημέρες για την αναλογία  $ER/W = 2/1$ , η ένταση του ρεύματος λαμβάνει την τιμή 0. Όταν η ένταση του ρεύματος φτάσει **0 Ampere**, τότε το μίγμα περιέχει πλέον **μηδενική ποσότητα νερού**. Γίνεται κατανοητό ότι το γεγονός αυτό βοηθάει στην ταχύτερη αύξηση της αντοχής του μίγματος, αφού το νερό δρα αρνητικά στην αντοχή του.

Από τα δεδομένα του πίνακα ,σηματίστηκε το **Διάγραμμα 6.1**, όπου και πάλι παρουσιάζονται η ένταση του ρεύματος και ο χρόνος σκλήρυνσης, για όλες τις αναλογίες εποξειδικής ρητίνης προς νερό.



**Διάγραμμα 6.1:** Ένταση ρεύματος σε σχέση με το χρόνο σκλήρυνσης του μίγματος για τις αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$ .

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε, ότι όσο μεγαλύτερη ποσότητα νερού υπάρχει στο μίγμα τόσο περισσότερο χρονικό διάστημα απαιτείται, ώστε η ένταση του ρεύματος να λάβει την ελάχιστη τιμή της.

#### 6.4.1. ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

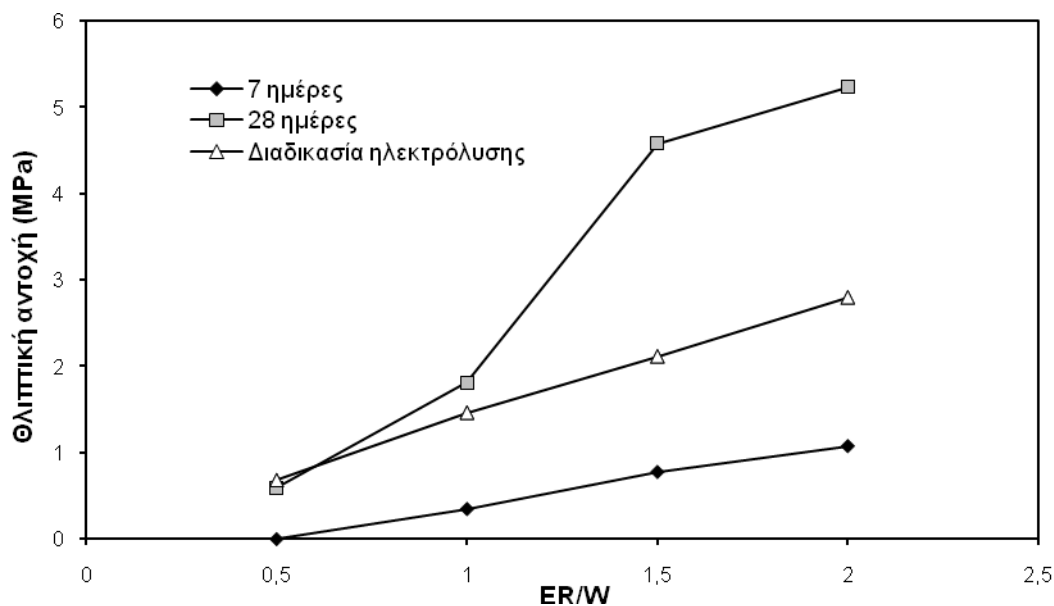
Η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε και στη διαδικασία ηλεκτρόλυσης, όσον αφορά τις δοκιμές αντοχής των δοκιμίων. Ξεκινώντας με τη δοκιμή θλίψης αναμενόταν τα αποτελέσματα να φανερώσουν μεγαλύτερη αντοχή στα δοκίμια ηλεκτρόλυσης σε σχέση με εκείνα που δεν υπέστησαν ηλεκτρώσμωση.

Στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η αντοχή σε δοκιμή θλίψης τόσο με τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης όσο και χωρίς αυτήν, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης και εξαγωγής χρήσιμων συμπερασμάτων.

**Πίνακας 6.2:** Σύγκριση αποτελεσμάτων θλιπτικής αντοχής με και χωρίς τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης, για αναλογίες ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1 και 2/1.

ER/W	Χρόνος σκλήρυνσης		
	7 ημέρες	28 ημέρες	Διαδικασία ηλεκτρόλυσης – 7 ημέρες
1/2	0	0,6	0,69
1/1	0,35	1,81	1,47
1,5/1	0,78	4,58	2,12
2/1	1,08	5,23	2,8

Με τη βοήθεια του **Πίνακα 6.2**, δημιουργήθηκε το **Διάγραμμα 6.2** θλιπτικής αντοχής – αναλογίας ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1 και 2/1.



**Διάγραμμα 6.2:** Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής – αναλογίας ER/W σε δοκίμια 7 και 28 ημερών χωρίς ηλεκτρόλυση και σε δοκίμια με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών υποβαλλόμενα σε διαδικασία ηλεκτρώσμωσης.

Όπως φαίνεται από το **Διάγραμμα 6.2**, η διαδικασία ηλεκτρόλυσης βοήθησε σε μέγιστο βαθμό τα δοκίμια να αναπτύξουν ικανοποιητική αντοχή σε μόλις 7 ημέρες σκλήρυνσης, σε όλες τις αναλογίες ER/W.

Εστιάζοντας στην θλιπτική αντοχή για τις 7 ημέρες σκλήρυνσης με ηλεκτρόλυση και συγκρίνοντας τη με την αντίστοιχη αντοχή για τον ίδιο χρόνο σκλήρυνσης σε αναλογία ER/W = 1/2, διακρίνεται ότι τα δοκίμια χωρίς ηλεκτρόλυση παρουσιάζουν μηδενική θλιπτική αντοχή, ενώ εκείνα με ηλεκτρόλυση φτάνουν στα 0,69 MPa αντοχή σε θλίψη! Μάλιστα στη συγκεκριμένη αναλογία ER/W = 1/2, η αντοχή με ηλεκτρόλυση σε 7 ημέρες ξεπερνάει ακόμη και την αντοχή των 28 ημερών χωρίς ηλεκτρόλυση, αφού στις 28 ημέρες η μέγιστη αντοχή ήταν 0,6 MPa!

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στις υπόλοιπες αναλογίες. Συγκεκριμένα στην αναλογία  $ER/W = 1/1$  η θλιπτική αντοχή σε 7 ημέρες τετραπλασιάζεται, αφού από 0,35 MPa χωρίς ηλεκτρόλυση φτάνει σε αντοχή 1.47 MPa με τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης. Στην αναλογία  $ER/W = 1.5/1$  και  $2/1$  η αύξηση αντοχής κυμαίνεται από 0,78MPa σε 2.12 MPa και από 1.08 MPa σε 2.8 MPa αντίστοιχα, πάντα για 7 ημέρες σκλήρυνσης.

Όπως ήδη φαίνεται από τη δοκιμή θλίψης, με τη βοήθεια της ηλεκτρόλυσης η αντοχή στις 7 ημέρες έφτασε τα 0.69 MPa, δηλαδή σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα αναλογιζόμενοι το ελάχιστο της αναλογίας  $ER/W$ , αλλά και του χρόνου σκλήρυνσης

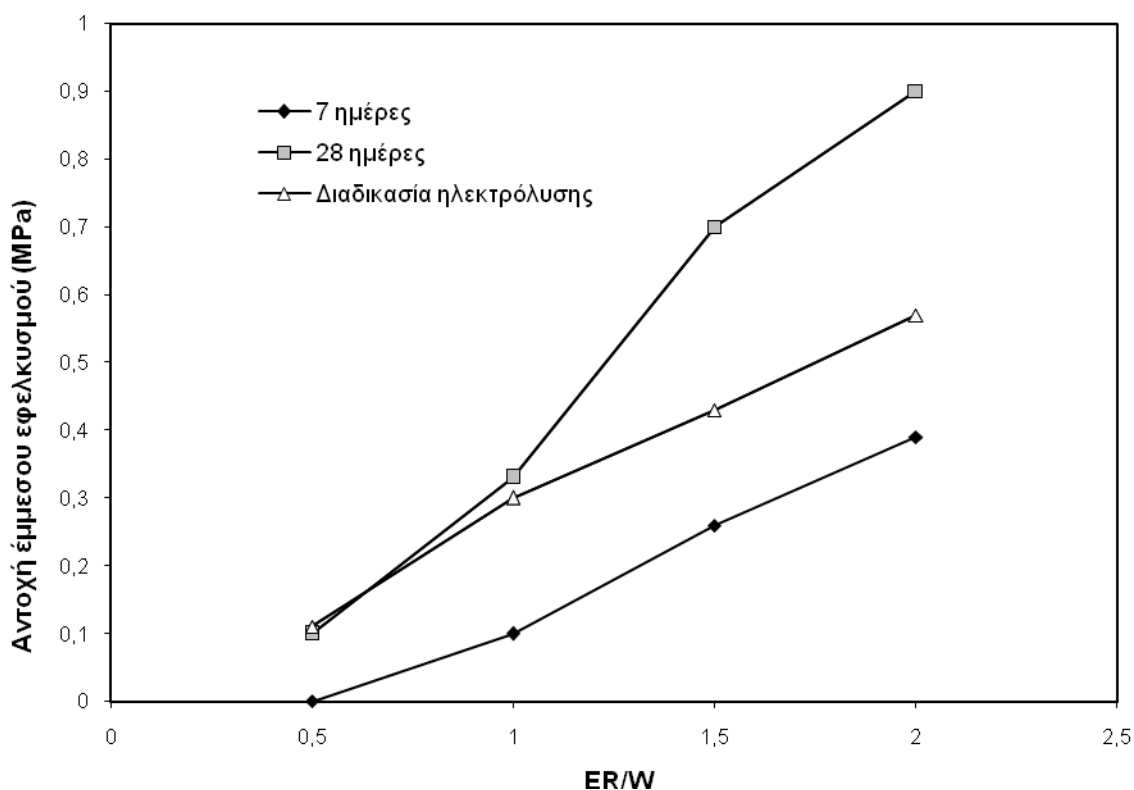
#### 6.4.2. ANTOXH SE EMMESO EΦEΛKYΣMO

Εκτός από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ηλεκτρώσμωση, καταπονήθηκαν και σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Στον **Πίνακα 6.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αντοχής έμμεσου εφελκυσμού και συγκρίνονται με τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία ηλεκτρόλυσης.

**Πίνακας 6.3:** Εφελκυστική αντοχή για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών με διαδικασία ηλεκτρόλυσης, για αναλογίες  $ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1$  και  $2/1$ .

ER/W	Χρόνος σκλήρυνσης		
	7 ημέρες	28 ημέρες	Διαδικασία ηλεκτρόλυσης – 7 ημέρες
1/2	0	0,1	0,11
1/1	0,1	0,33	0,3
1,5/1	0,26	0,7	0,43
2/1	0,39	0,9	0,57

Από τον **Πίνακα 6.3**, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα, όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν σε ηλεκτρόλυση και εκείνων που δεν συμμετείχαν σ' αυτήν, για τη δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού.



**Διάγραμμα 6.3:** Διάγραμμα αντοχής έμμεσο εφελκυσμού – αναλογίας ER/W, για 7 και 28 ημέρες χρόνου σκλήρυνσης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερό, ότι και στον έμμεσο εφελκυσμό η διαδικασία ηλεκτρόλυσης λειτουργεί αυξητικά στην αντοχή των δοκιμίων.

Συγκεκριμένα στην αναλογία  $ER/W = 1/2$  και για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό του μίγματος λαμβάνει την τιμή 0.11 MPa, ενώ χωρίς τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης παρουσίαζε μηδενική αντοχή. Επίσης ακόμη και σε 28 ημέρες η αντοχή σε εφελκυσμό άγγιζε τα 0.1 MPa, δηλαδή λιγότερο από την αντοχή που παρουσιάζει το μίγμα με ηλεκτρόλυση στις 7 ημέρες σκλήρυνσης!

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στις υπόλοιπες αναλογίες. Στην αναλογία  $ER/W = 1/1$  η αντοχή αυξάνεται από 0.1 MPa σε 0.3 MPa. Με άλλα λόγια τριπλασιάζεται η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό με τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης. Μόλις 0.03 MPa λιγότερα από την αντοχή που παρουσιάζει το μίγμα στις 28 ημέρες σκλήρυνσης, χωρίς τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης.

Όσον αφορά την αναλογία 1.5/1, η αύξηση της αντοχής φτάνει σχεδόν σε επίπεδα διπλασιασμού. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό από 0.26 MPa παίρνει την τιμή 0.43 MPa με ηλεκτρόλυση.

Λιγότερη είναι η ενίσχυση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό στην αναλογία  $ER/W = 2/1$ . Χωρίς όμως αυτό να σημαίνει, πως δεν πραγματοποιείται ικανοποιητική αύξηση της

αντοχής των δοκιμίων. Από 0.39 MPa που παρουσίαζε ως αντοχή σε Brazilian Test το μίγμα, μετά από την υποβολή του σε ηλεκτρόλυση φτάνει στα 0.57 MPa σε χρόνο σκλήρυνσης μόλις 7 ημερών.

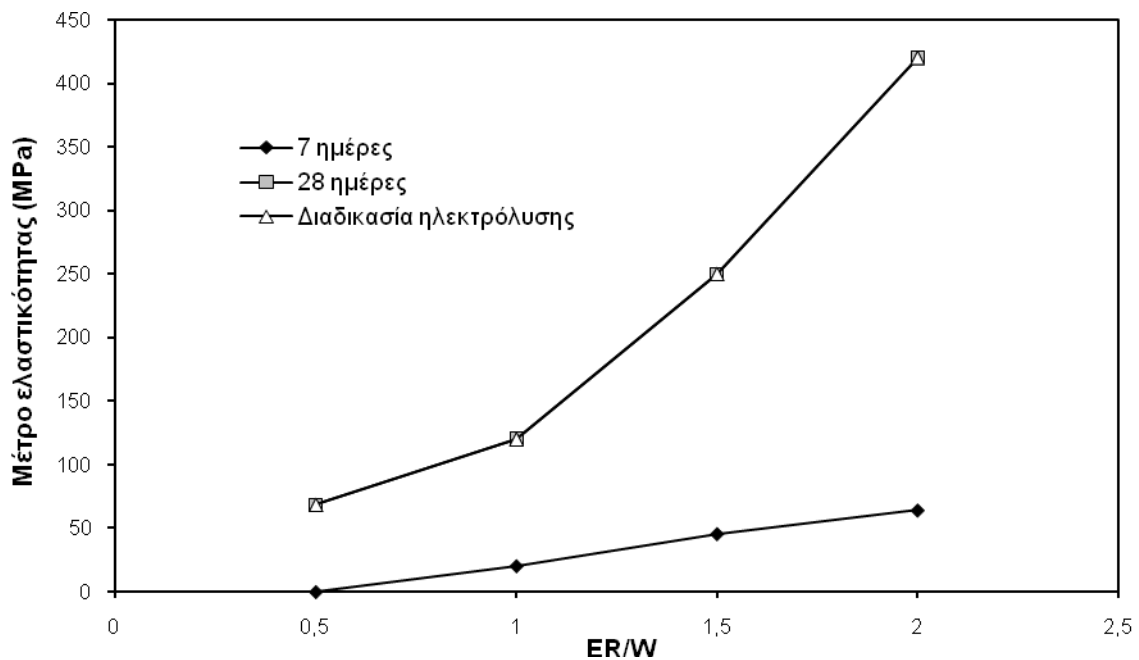
### 6.4.3. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Τελευταία μέγεθος που μετρήθηκε μετά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης είναι αυτό του μέτρου ελαστικότητας. Στον **Πίνακα 6.4**, παρουσιάζεται το μέτρο ελαστικότητας του μίγματος στις 7 και 28 ημέρες σκλήρυνσης, αλλά και έπειτα από τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης, για χρόνο σκλήρυνσης μίας εβδομάδας.

**Πίνακας 6.4: Μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων μετά από ηλεκτρόλυση για αναλογίες ER/W = 1/2, 1/1, 1.5/1 και 2/1.**

ER/W	Χρόνος σκλήρυνσης		
	7 ημέρες	28 ημέρες	Διαδικασία ηλεκτρόλυσης - 7 ημέρες
1/2	0,0	68,4	68,4
1/1	20,3	120,0	120,0
1,5/1	45,5	250,0	250,0
2/1	64,0	420,0	420,0

Από τα δεδομένα του **Πίνακα 6.4** δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας – αναλογίας εποξειδικής ρητίνης / νερού.





**Διάγραμμα 6.4:** Μέτρο ελαστικότητας – αναλογίας ER/W, για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών έπειτα από διαδικασία ηλεκτρόσμωσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας εκτοξεύτηκαν, έπειτα από τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης. Μάλιστα στα δοκίμια μιας εβδομάδας μετά από ηλεκτρόλυση, το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει ίδιες τιμές με αυτά των 28 ημερών, χωρίς ηλεκτρόλυση!

Άρα η ηλεκτρόλυση και στο μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει θεαματικές αλλαγές. Αλλαγές που φανερώνουν ότι τα αποτελέσματα των 28 ημερών παρουσιάζονται σε μόλις 7 ημέρες με τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης.

Συνοπτικά βγαίνει το συμπέρασμα ότι η ηλεκτρόλυση μέσα σε λίγες ημέρες (μία εβδομάδα) επιφέρει εντυπωσιακά αποτελέσματα τόσο στην δοκιμή θλίψης, όσο και στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού, αλλά και του μέτρου ελαστικότητας.

Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης κρίνεται απαραίτητη στην αναλογία  $ER/W = 1/2$  για 7 ημέρες σκλήρυνσης, αφού χωρίς αυτήν, οι τιμές είναι μηδενικές σε θλίψη, Brazilian Test και μέτρο ελαστικότητας.

## 6.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σκέψη της ηλεκτρόλυσης προέκυψε, όταν διαπιστώθηκε ότι στην αναλογία  $ER/W = 1/2$  η αντοχή σε όλες τις δοκιμές ήταν μηδενική, αλλά και το γεγονός ότι όλες οι αναλογίες  $ER/W$  για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες παρουσίαζαν μικρή αντοχή σε όλες τις δοκιμές.

Όπως αποδείχθηκε στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο η ηλεκτρόλυση έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην αύξηση της αντοχής των δοκιμών στην μονοαξονική θλίψη, αλλά και στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Μάλιστα τα αποτελέσματα κρίνονται εντυπωσιακά, αφού όπως αποδείχθηκε σε πολλές περιπτώσεις η αντοχή των δοκιμών με ηλεκτρόλυση για χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών ξεπέρασε την αντοχή των δοκιμών χωρίς ηλεκτρόλυση για χρόνο σκλήρυνσης 28 ημερών!

Η αύξηση της αντοχής σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού και μονοαξονικής θλίψης ελαττώνεται όσο το μίγμα γίνεται λιγότερο υγρό. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού όσο πιο υδαρές είναι το μίγμα ( $ER/W = 1/2$ ) τόσο μεγαλύτερη ποσότητα νερού θα αφαιρεθεί με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Συνεπώς τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η αύξηση της αντοχής. Στις αναλογίες  $ER/W = 1,5/1$  και  $ER/W = 2/1$  η αύξηση της αντοχής είναι σημαντική, όμως είναι μικρότερη σε σχέση με τις αναλογίες  $ER/W = 1/2$  και  $ER/W = 1/1$ , όπου η αύξηση της αντοχής με ηλεκτρόλυση πολλαπλασιάζεται.

Με άλλα λόγια η διαδικασία κρίθηκε επιτυχής σε όλες τις αναλογίες  $ER/W$  και για τις δυο δοκιμές, αλλά και για το μέτρο ελαστικότητας, αφού είναι ξεκάθαρη η αύξηση των τιμών τους.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### ***Ελληνικά Συγγράμματα:***

Μιχάλης Ι. Καββαδάς: “Στοιχεία εδαφομηχανικής” Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα 2009.

Κωσταντίνος και Μιχάλης Γεωργιάδης “Στοιχεία εδαφομηχανικής” Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα 2011.

Παπαχαρίσης και Γραματικόπουλος “Γεωτεχνική μηχανική” Β’ Έκδοση, Εκδόσεις Ν. Μάνου – Ανδρεάδη, Αθήνα 2010.

### ***Αγγλικά Συγγράμματα:***

R.F. Craing: “Soil Mechanics”, Van Nostrand Reinhold, 1974. And

R.D. Holtz and W.W.D. Kovacs: “An Introuction to Geotechnical Engineering”, Prentice-Hall, 1981.

T.W. Lambe and R.V. Whitman: “Soil Mechanics”, J. Wiley and Sons, 1969.

### ***Ιστοσελίδες:***

<http://dspace.lib.ntua.gr>

<http://sunilbhangale.tripod.com/epoxy.html>

<http://www.civilplus.gr>

<http://translate.google.gr>

<http://www.basf-cc.gr>

<http://composite.about.com/od/Resins/a/Epoxy-Resin.htm>

<http://www.csscorp.net/resources/epoxy-101>

<http://www.epoxy-info.co.uk/epoxyhistory.htm>

<http://resources.alibaba.com>

<http://www.scribd.com>

<http://www.sts.gr>

<http://el.wikipedia.org>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Electro-osmosis>

<http://users.ntua.gr>

<http://www.geology.upatras.gr>

<http://der.topo.auth.gr>

<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Soil%20Mechanics/ch02.pdf>

[http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA\\_2.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_2.pdf)

<http://www.legah.metal.ntua.gr>

[http://library.tee.gr/digital/m2546/m2546\\_anagnostopoulos1.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2546/m2546_anagnostopoulos1.pdf)

<http://portal.survey.ntua.gr>

<http://nemertes.lis.upatras.gr>