

# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Μελέτη αντοχής τεχνητής πέτρας σε κλιματική καταπόνηση**



**Επιτροπή:**

**Καθ. Ζ. Αγιουτάντης (επιβλέπων)**

**Καθ. Θ. Μαρκόπουλος**

**Αν.Καθ. Γ. Εξαδάκτυλος**

**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ Π. ΜΑΥΡΙΓΙΑΝΝΑΚΗΣ**  
**ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

**Χανιά**  
**Μάρτιος 2004**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή δεν θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί χωρίς την βοήθεια και την υποστήριξη, υλική και ηθική ορισμένων ατόμων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλους τον καθηγητή κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία που κοντά του τα τελευταία τρία χρόνια έχω αποκτήσει γνώσεις και εμπειρίες σε θέματα που έχουν σχέση με την μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε στην χρήση των συσκευών του εργαστηρίου της Μηχανικής Πετρωμάτων καθώς και για την καθοδήγηση του πάνω σε θέματα που είχαν σχέση με το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας αλλά και στην συγγραφή αυτής.

Βασικό μέρος των πειραματικών διαδικασιών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του τομέα της Ανίχνευσης και Εντοπισμού του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή Μαρκόπουλο Θεόδωρο για την πλήρη παραχώρηση του τμήματος του εργαστηρίου του στο οποίο εδράζεται ο κλιματικός θάλαμος, και αποτέλεσε την βάση του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Μαθιός Πυρίμαχα Α.Ε. για την παραχώρηση των δειγμάτων που δοκιμάστηκαν στο πειραματικό μέρος, καθώς και για την συνεργασία τους τον γεωλόγο της εταιρίας Κοκκινιώτη Παναγιώτη και τον μεταλλειολόγο μηχανικό Καγιαρά Ευθύμιο.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον διευθυντή των εργαστηρίων Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας κύριο Περδικάτση Βασίλειο για την πολύτιμη βοήθεια του και το ενδιαφέρον του στο κεφάλαιο που έχει σχέση με την ορυκτολογική σύσταση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Επίσης ευχαριστώ το μέλος της εξεταστικής επιτροπής αναπληρωτή καθηγητή Εξαδάκτυλο Γεώργιο για τις παρατηρήσεις του και συμβουλές του.

Τέλος δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Κλεφτάκη Σπύρο που κοντά του τα τελευταία χρόνια έμαθα να χειρίζομαι και να εκτελώ τις δοκιμές που πραγματοποιούνται στο εργαστήριο της Μηχανικής Πετρωμάτων, αλλά και για την καθοδήγηση του στην σειρά των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν και είχαν σχέση με την μελέτη γήρανσης υλικών, καθώς και για τις συμβουλές του κατά την διάρκεια της συγγραφής.

# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....1**

1.1	ΟΡΙΣΜΟΙ .....	1
1.2	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....5**

2.1	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	5
2.1.	Μηχανική γήρανση λόγω αλλαγής φάσεων .....	6
2.1.2	Γήρανση Λόγω ψύξης.....	6
2.2	ΠΙΕΣΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	11
2.3	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ .....	17
2.3.1	Ενυδάτωση, μετατροπή των ανυδριτών σε ένυδρα .....	17
2.3.2	Διόγκωση αργιλικών ορυκτών.....	19
2.3.3	Προσρόφηση νερού στην επιφάνεια ή στα τοιχώματα των πόρων σε πετρώματα και σχετικά φαινόμενα .....	21
2.4	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	23
2.5	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	23
2.6	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	28
2.6.1	Παραμένουσες τάσεις .....	29
2.6.2	Αιφνίδια διάρρηξη πετρωμάτων .....	30
2.6.3	Σχισμός και αποφλοίωση.....	31

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΗΜΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....32**

3.1	ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....	32
3.2	ΧΗΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ .....	36
3.2.1	Νερό .....	36
3.2.2	Οξέα που συμμετέχουν στις διαδικασίες χημικής γήρανσης.....	39

3.3	ΤΡΟΠΟΙ ΧΗΜΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	40
3.3.1	Ενυδάτωση (Hydration) .....	40
3.3.2	Διάλυση (Dissolution) .....	43
3.3.3	Οξειδοαναγωγή .....	47
3.4	ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ. ....	48
3.4.1	Ορυκτά του σιδήρου .....	48
3.4.2	Ορυκτά του μαγγανίου.....	49
3.4.3	Θειούχα ορυκτά .....	50

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ.....53**

4.1	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΓΗΡΑΝΣΗ .....	53
4.1.1	Βακτήρια .....	54
4.1.2	Φωτομόκητες και μπλε-πράσινη άλγη.....	55
4.1.3	Άλγη.....	57
4.1.4	Μύκητες.....	58
4.1.5	Λειχήνες.....	59
4.2	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	60
4.2.1	Το πρόβλημα του φαινομένου της σφήνας από την ανάπτυξη των ριζών.....	60
4.2.2	Μηχανισμοί των ριζών.....	62
4.3	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΖΩΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ .....	63

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....66**

5.1	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	66
5.2	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	68
5.3	ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ .....	68
5.3.1	Χαρακτηριστικά δοκιμίων πετρώματος.....	70
5.3.2	Τριβή μεταξύ δίσκων φόρτισης και πετρώματος.....	71
5.3.3	Επίδραση των μηχανών φόρτισης.....	72
5.3.4	Ρυθμός φόρτισης.....	75
5.3.5	Επίδραση περιβάλλοντος.....	76

5.3.6	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.....	77
5.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	80
5.4.1	Προετοιμασία των δοκιμίων .....	84
5.4.2	Διαδικασία δοκιμής.....	84

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 «ΠΡΑΣΙΝΕΣ» ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΠΕΤΡΑ.....85**

6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	85
6.2	ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	86
6.3	ΤΕΧΝΗΤΗ ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΗ ΠΕΤΡΑ .....	88
6.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	90
6.5	ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	92

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....104**

7.1	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	105
7.1.1	Κλιματικός θάλαμος .....	105
7.1.2	Συσκευή υπερήχων .....	107
7.1.3	Μηχανή άσκησης θλιπτικών φορτίων .....	110
7.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	113
7.2.1	Προετοιμασία των δοκιμίων .....	113
7.2.2	Μέτρηση υπερήχων .....	113
7.2.3	Μέτρηση υδατοαπορροφητικότητας.....	114
7.2.4	Τοποθέτηση στον κλιματικό θάλαμο.....	114
7.2.5	Υπολογισμοί και μετρήσεις .....	115
7.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	116
7.3.1	Πρώτη σειρά δοκιμίων.....	116
7.3.2	Δεύτερη σειρά δοκιμίων .....	124
7.3.3	Τρίτη σειρά δοκιμίων.....	129

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....135**

8.1	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ .....	135
8.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	138
8.3	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ .....	141
8.4	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ.....	141
8.5	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	142
8.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΗΣ ΠΕΤΡΑΣ.....	142

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....144**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΟΡΙΣΜΟΙ**

Η σωστή κατανόηση του αντικειμένου της παρούσας εργασίας απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό των σχετικών εννοιών. Μια τέτοια έννοια η οποία αναφέρεται στην διαχρονική αντοχή των υλικών είναι και η έννοια της «γήρανσης». Πολλές δημοσιεύσεις αναφέρονται σ' αυτή, όπως για παράδειγμα του Reiche (1950) ο οποίος έδωσε τον παρακάτω ορισμό:

Γήρανση είναι η αντίδραση των υλικών που βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας στην λιθόσφαιρα σε ή κοντά στην επαφή με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και πιθανόν ακόμα πιο σημαντικό, με την βιόσφαιρα.

Ο Keller (1975), αφαιρώντας την έκφραση «που βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας» και παραφράζοντας τον Reiche, διατύπωσε:

Γήρανση αναπόφευκτα είναι η αντίδραση της λιθόσφαιρας σε ή κοντά στην επαφή (διεπιφάνεια ή interzone) με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και την υδρόσφαιρα, είναι ένα δυναμικό τμήμα του κύκλου των πετρωμάτων το οποίο δρα στην διεπιφάνεια.

Ο κατά Loughnan's ορισμός (1969), σύμφωνα με τον Yatsu, (1988) είναι:

Τα πετρώματα στην ή κοντά στην επιφάνεια της γης είναι τρωτά από επιθέσεις τόσο μηχανικές όσο και χημικές διεργασίες οι οποίες μπορούν να τα μεταμορφώσουν σε τέτοιο βαθμό ώστε τα προϊόντα να εμφανίζουν μικρή ομοιότητα με τα αρχικά υλικά.

Από την στιγμή της θραύσης των πετρωμάτων ως αποτέλεσμα της άμεσης επαφής με τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες ή τον καιρό, ο όρος γήρανση χρησιμοποιείται για να περιγράψει αυτή την κατάσταση. Η γήρανση μπορεί να είναι ουσιαστικά μηχανική, τα πετρώματα αστοχούν ή θρυμματίζονται

λόγω φυσικών διεργασιών, ή μπορεί να είναι χημική, που απαρτίζεται από χημικές αλλαγές οι οποίες οδηγούν στην αποσύνθεση τους.

Σύμφωνα με τον Ollier (1969),

Γήρανση είναι η αστοχία και η αλλαγή των υλικών κοντά στην επιφάνεια της γης σε προϊόντα τα οποία είναι περισσότερο σε κατάσταση ισορροπίας με τις προγενέστερες μηχανικές και χημικές συνθήκες. Πολλά πετρώματα έχουν διαμορφωθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, υψηλές πιέσεις και απουσία αέρα και νερού, και ένα μεγάλο μέρος της γήρανσης είναι, στην πραγματικότητα, η επίδραση χαμηλών θερμοκρασιών, χαμηλών πιέσεων, και η παρουσία νερού και αέρα. Πολλά είδη αλλαγών είναι πιθανά, ωστόσο, και έστω ένα υλικό το οποίο είναι το προϊόν μίας διαδικασίας γήρανσης κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες κάτω από κάποιες άλλες συνθήκες γήρανσης μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη. Η γήρανση δεν είναι απλά η μείωση των ορυκτών σε στοιχειώδης ποσότητες : αλλά και η δημιουργία νέων ορυκτών σε μία συνθήκη γήρανσης είναι αποδεκτή ως μέρος της γήρανσης.

Σύμφωνα με το λεξικό της Γεωλογίας (Gary et al., 1972) δίνεται ο ακόλουθος ορισμός:

Η καταστροφική διαδικασία ή ομάδα διαδικασιών που συνιστά το μέρος της αποσάθρωσης βάσει του οποίου υλικά της γης και των πετρωμάτων σε έκθεση ατμοσφαιρικών παραγόντων στην ή κοντά στην επιφάνεια της γης αλλάζουν χαρακτήρα (χρωματισμό, υφή, σύνθεση, σταθερότητα, ή μορφή) με μικρή ή χωρίς μεταφορά των χαλαρών ή τροποποιημένων υλικών, συγκεκριμένα, ο φυσικός κατακερματισμός και η χημική αποσύνθεση του πετρώματος τα οποία παράγουν ένα επί τόπου μανδύα απορριμμάτων και δημιουργούν υλικό για μεταφορά. Η πιο συνηθισμένη γήρανση πραγματοποιείται στην επιφάνεια, αλλά μπορεί να πάρει χώρα σε υπολογίσιμα βάθη, όπως σε πετρώματα με ασυνέχειες που επιτρέπουν εύκολη διείσδυση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου και κίνηση των επιφανειακών νερών. Ορισμένοι συγγραφείς περιορίζουν την γήρανση στην καταστροφική διαδικασία χαμηλότερη των 100 °C και 1 kbar, άλλοι διερευνούν την περίοδο που πραγματοποιούνται βιολογικές αλλαγές και την δράση αέρα, νερού και πάγου.

Επίσης σημειώνεται ότι η διαδικασία της γήρανσης περιέχει όχι μόνο τον μηχανικό κρματισμό και την χημική αποσύνθεση αλλά επίσης πληροφορίες για τα προϊόντα της



γήρανσης στην επιφάνεια της γήρανσης ή στα υλικά τα οποία εκτίθενται στην διήθηση των μετεωρικών νερών και του ατμοσφαιρικού αέρα. Κατά αυτό το τρόπο ο διαχωρισμός μεταξύ της γήρανσης και της διαγέννησης είναι ξεκάθαρη. Τα τελικά στάδια περιορίζονται σε ιζηματογενή περιβάλλον όπου τα ιζήματα είναι βαθιά θαμμένα και ενσωματώνονται υπό πίεση χάνοντας αέρα και νερό, (Yatsu, 1988).

## **1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Τα τελευταία χρόνια η όλο και αυξανόμενη ζήτηση υλικών στην κατασκευαστική αγορά αλλά και η αύξηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατασκευών σε συνάρτηση με την μείωση των φυσικών πόρων έχει στρέψει την βιομηχανία των κατασκευών στην ανάπτυξη δομικών υλικών με σκοπό την αντικατάσταση των φυσικών πετρωμάτων. Με βάση τα παραπάνω, υιοθετήθηκε από τη βιομηχανία η ονομαζόμενη «πράσινη» ή βιώσιμη έννοια οικοδόμησης, η οποία είναι βασισμένη στην κατασκευή λειτουργικότερων και οικονομικότερων κτηρίων με σεβασμό στο περιβάλλον. Για τη βιώσιμη οικοδόμηση χρησιμοποιούνται οικοδομικά υλικά και μέθοδοι που προάγουν την περιβαλλοντική ποιότητα, την οικονομική ζωτικότητα και την κοινωνική παροχή μέσω του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας του περιβάλλοντος των κατασκευών.

Η παρούσα διατριβή έχει ως αντικείμενο μελέτης την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών αντοχής τους και επιλεγμένων μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών που κινούνται στο φάσμα των «πράσινων» υλικών και των βιώσιμων κατασκευών. Συγκεκριμένα, υλικά που παράγονται από την βιομηχανία των κατασκευών και διατίθενται παγκοσμίως με την μορφή διακοσμητικών τεχνητών λίθων ευρείας εφαρμογής δοκιμάστηκαν σε δοκιμές μηχανικής γήρανσης. Κατάλληλα κυλινδρικά δοκίμια που προερχόταν από την εταιρία Μαθιός Πυρίμαχα Α.Ε. και σύστασης ίδιας με αυτή που χρησιμοποιούνταν για την παρασκευή των προϊόντων της, δοκιμάστηκαν και αξιολογήθηκαν με διάφορους εργαστηριακούς τρόπους (δοκιμή ψύξης – θέρμανσης, δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, δοκιμή υπερήχων).

Οι δοκιμές της μηχανικής γήρανσης που εκτελέστηκαν είχαν σκοπό τη διερεύνηση της αντοχής των υλικών αυτών σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που τοποθετούνται και πιο συγκεκριμένα σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης σύμφωνα με πρότυπες προδιαγραφές (ASTM D5312). Επίσης μελετήθηκαν οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων των τεχνητών διακοσμητικών λίθων με την πάροδο του χρόνου, σε συνάρτηση των θερμοκρασιακών μεταβολών του περιβάλλοντός των.

Για την δοκιμή ψύξης – θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε ένας κλιματικός θάλαμος (climatic chamber), Τύπου GTS 600 της Angelantoni Industry, ειδικά κατασκευασμένος για να εκτελεί αξιόπιστες δοκιμές σε βιομηχανικές εφαρμογές και κατάλληλος για κάθε εφαρμογή που χρειάζεται έλεγχο της θερμοκρασίας και δοκιμές που έχουν σχέση με την υγρασία. Η συσκευή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές σε υλικά βιομηχανικών εφαρμογών ή οικιακά προϊόντα τα οποία υποβάλλονται σε παραλλαγές δοκιμών θερμοκρασίας και υγρασίας. Η λειτουργία του κλιματικού θαλάμου υποστηρίζεται από H/Y με κατάλληλο λογισμικό (Software) το οποίο έχει την ικανότητα να υποστηρίζει την λειτουργία και τον έλεγχο θερμοστατικών και κλιματικών θαλάμων αυτού τύπου. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων διατάξεων και αισθητήρων.

Για τις δοκιμές θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μία άκαμπτη μηχανή άσκησης θλιπτικών φορτίων MTS 1600 kN, με δυνατότητα φόρτισης τόσο με έλεγχο φορτίου (load control) όσο και με έλεγχο μετατόπισης (displacement control). Η συγκεκριμένη μηχανή έχει δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής τόσο των ασκούμενων δυνάμεων όσο και των παραμορφώσεων με την χρήση κατάλληλων υπολογιστών με τα απαραίτητα λογισμικά. Η δοκιμή σε μονοαξονική φόρτιση πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας και της αντοχής σε θλίψη των υλικών σύμφωνα με τα παγκόσμια πρότυπα. Οι δοκιμές στα κυλινδρικά δοκίμια έγιναν με έλεγχο μετατόπισης και με ρυθμό φόρτισης 0,0075 mm/sec.

Για τον υπολογισμό της ποιότητας των υλικών μέσω της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων ήταν απαραίτητο η ταχύτητα να μετράται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε συσκευή παραγωγής παλμών και καταγραφής του χρόνου διάδοσης. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο ήταν το PUNDIT 6 (αρχικά από την έκφραση «Portable Ultrasonic Non – destructive Digital Indicating Tester»). Για την διάδοση και την μέτρηση των υπερήχων χρησιμοποιήθηκαν πομποί/δέκτες με δυνατότητα μέτρησης ταχυτήτων θλιπτικών (P) και διατμητικών (S) κυμάτων της εταιρίας CNS Farnell.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ**

### **2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ**

Οι μηχανικές και χημικές διαδικασίες γήρανσης πραγματοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις συνθήκες περιβάλλοντος. Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια προσπάθεια να αναπτυχθούν οι μηχανισμοί των μηχανικών διαδικασιών σύμφωνα με το είδος των τάσεων που διαπιστώνονται στα πετρώματα, όπως αυτές που οφείλονται στη φάση των αλλαγών, στη φάση της ενυδάτωσης, στις αλλαγές στην κρυσταλλική δομή και τις θερμικές τάσεις, ενώ έγιναν και κάποιες παρατηρήσεις για την διαδικασία της γήρανσης οφειλόμενη στη λεγόμενη αποφόρτιση.

#### **2.1.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΕΩΝ**

Η γήρανση λόγω ψύξης και αλάτων (κρυσταλλοποίηση των αλάτων από υδατικό διάλυμα) οφείλεται στην αλλαγή φάσεων, η πρώτη λόγω της μετατροπής του νερού σε πάγο και η δεύτερη λόγω της κρυσταλλοποίησης (διαμόρφωση στερεού) από υδατικό διάλυμα.

#### **2.1.2 ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΨΥΞΗΣ**

Πολυάριθμες μελέτες έχουν γίνει γύρω από την γήρανση λόγω ψύξης: Αυτές είχαν σχέση με τους μηχανισμούς, τις κλιματικές συνθήκες και την ευαισθησία των πετρωμάτων. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρείται συχνά σε κρύες περιοχές και μεγάλα υψόμετρα, όπου η ψύξη και η θέρμανση είναι έντονες. Αυτός ο τύπος μηχανικής γήρανσης είναι γνωστός με ονομασίες όπως θρυμματισμός ψύξης, συντριπτική ψύξη, σχισμός ψύξης και όλες αυτές υποδηλώνουν των διαχωρισμό των υλικών σε τμήματα, συνήθως πετρωμάτων, λόγω διαστολής του νερού κατά την ψύξη (Washburn, 1979) σύμφωνα με τον Yatsu, 1988.

Στο φαινόμενο της γήρανσης λόγω ψύξης, εισέρχεται μεγάλος αριθμός παραγόντων όπως η ύπαρξη ρωγμών, το πορώδες, η αντοχή των πετρωμάτων, η κλίμακα της ψύξης, η ποσότητα νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, η μετατροπή του νερού σε πάγο και

άλλοι. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η γήρανση λόγω της ψύξης του νερού να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων αναπτύχθηκαν για να την περιγράψουν. Ο McGreevy (1981) ανέπτυξε πέντε λειτουργικές υποθέσεις: (α) την ογκομετρική διαστολή του νερού λόγω ψύξης, (β) την πίεση κρυσταλλοποίησης του πάγου, (γ) την τριχοειδή θεωρία, (δ) την θεωρία ταξινόμησης του νερού, (ε) και την θεωρία της υδραυλικής πίεσης.

Στη διαδικασία της συντριπτικής ψύξης, ο πιο βασικός παράγοντας που παίρνει μέρος είναι το 9% της ογκομετρικής διαστολής κατά την ψύξη (κατά την μεταβολή του νερού από υγρή σε στερεή φάση, δηλαδή πάγο) και η ύπαρξη της πίεσης που σχετίζεται με την ογκομετρική διαστολή. Η τελευταία δεν θα πρέπει να εξισώνεται με την πίεση της κρυσταλλοποίησης που συνοδεύεται από τον σχηματισμό στερεάς φάσης από τον διαλύτη των διαλυμάτων.

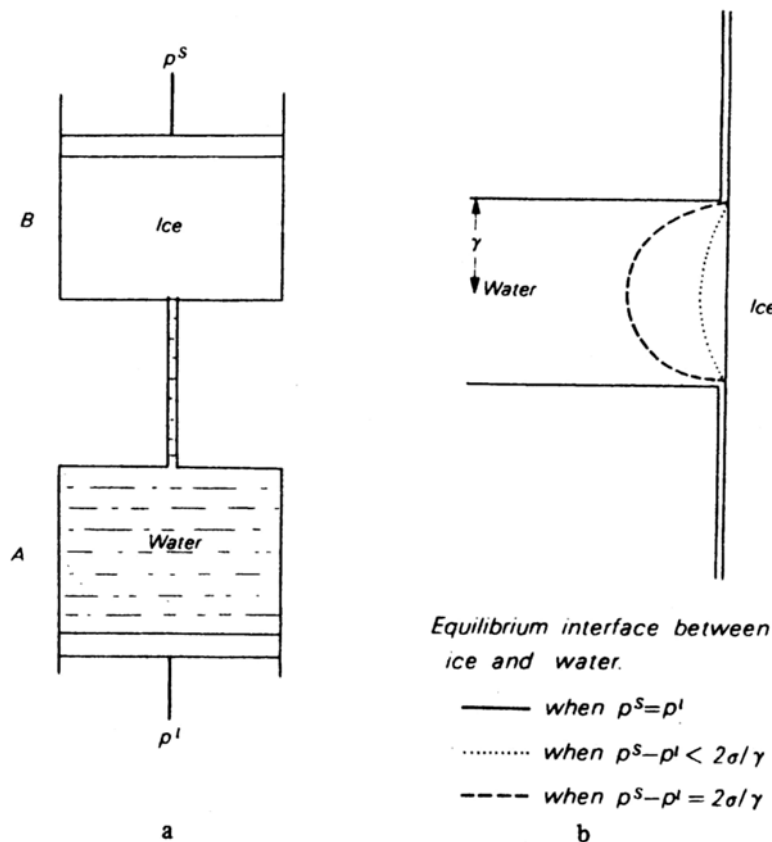
Πολλοί μηχανισμοί ο οποίοι σχετίζονται με ή προκαλούνται και συνεργάζονται με την ψύξη, είναι (α) η συγκέντρωση μηχανικών τάσεων γύρω από την ακμή μιας μικρορωγμής και η φθορά λόγω τάσεων, (β) το φαινόμενο Taber-Everett και (γ) το φαινόμενο Powers (υδραυλική πίεση), όπως αναφέρονται από τον Yatsu (1988).

#### **α) Συγκέντρωση μηχανικών τάσεων γύρω από την ακμή μιας μικρορωγμής και η φθορά λόγω τάσεων**

Ο τρόπος δράσης αυτών των μηχανισμών αναπτύσσεται εν συντομία. Αρχικά θεωρήθηκε ένα πέτρωμα με μικρορωγμές, όπου το ένα άκρο της μικρορωγμής ήταν ανοικτό προς την εξωτερική επιφάνεια ενώ το άλλο άκρο βρισκόταν στο εσωτερικό του πετρώματος. Αν και εφόσον η μικρορωγμή ήταν γεμάτη με νερό και η ψύξη ξεκινούσε από τη εξωτερική πλευρά και συνεχιζόταν προς το εσωτερικό, ο πάγος ήταν δυνατόν να συγκροτήσει ένα αποτελεσματικό παρέμβυσμα και ένα κλειστό σύστημα θα μπορούσε αναπτυχθεί σύμφωνα με τον Battle (1960). Η διαστολή του νερού λόγω της ψύξης προκαλούσε υδραυλική πίεση και μετακινιόταν υποχρεωτικά προς στην εσωτερική πλευρά της μικρορωγμής και των άκρων, τότε προκαλούταν τοπική συγκέντρωση τάσεων όπως παρουσιάστηκε από τον Inglis (1913). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο μηχανισμός των τάσεων θα έπρεπε να δράσει στις άκρες με αποτέλεσμα η μικρορωγμή να διευρυνόταν. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να επαναληφθεί και τελικά το σώμα να κατακεραματιστεί.

### β) Φαινόμενο Taber-Everett

Ήταν το 1929 όταν ο Taber παρουσίασε μία θεωρία εντελώς αντίθετη από την παραδοσιακή θεωρία της ψύξης και την μεταβολή του όγκου του νερού κατά την ψύξη. Ισχυρίστηκε ότι η πίεση που συνοδεύει την ψύξη των εδαφών οφειλόταν στην ανάπτυξη κρυστάλλων πάγου και όχι στην μεταβολή όγκου. Ατυχώς κανένας δεν επιδοκίμασε τις θέσεις του, μέχρι που η εργασία του δέχθηκε θεωρητικό υπόβαθρο από τον Everett (1961). Ο Everett με σκοπό την θεωρητική επαλήθευση των ευρημάτων του Taber, κατασκεύασε ένα απλό μοντέλο. Στην αρχή πήρε δύο κυλίνδρους, A και B όπως στο Σχήμα 2.1, ο κάθε κύλινδρος ήταν κλειστός από ένα έμβολο και συνδεόταν με ένα σωλήνα. Αρχικά οι κύλινδροι ήταν γεμάτοι με νερό υπό πίεση  $p^i$ . Η ψύξη ξεκινούσε από την κορυφή του B κυλίνδρου και σταδιακά επεκτεινόταν από τον B προς τον A και η θερμοκρασία έφτανε κάτω από τους  $0^\circ\text{C}$ . Καθώς η ψύξη συνεχιζόταν, συνοδευόταν με διαστολή του νερού στο B, που ήταν αισθητή με το μάτι μέσω της κίνησης των εμβόλων. Ήταν αντιληπτό ότι καμία δημιουργία πάγου δεν πραγματοποιούνταν στο A, ενώ το B είχε γεμίσει με πάγο. Παραπέρα μετακίνηση θερμοκρασίας είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πάγου σε μια από τις δύο πλευρές.



Σχήμα 2.1: Μοντέλο του Everett για δράση πάγου (Everett, 1961) όπως αναφέρεται στον Yatsu (1988).

Όσο οι πιέσεις από τα έμβολα ήταν ίσες π.χ.  $p^l = p^s$ , η επιφάνεια ισορροπίας μεταξύ πάγου και νερού ήταν επίπεδη. Η ανάπτυξη ενός κρυστάλλου πάγου μέσα στο σωλήνα θα έμπλεκε την διαμόρφωση υψηλότερου χημικού δυναμικού από το όγκο του πάγου μέσα στο B. Σύμφωνα με τον Gibbs, το χημικό δυναμικό ενός μικρού κρυστάλλου, εμποτιζόμενο και σε ισορροπία με ένα υγρό υποβάλλει μια υδροστατική πίεση  $p^l$ , είναι  $\mu(p^s)$  και εκφράζεται

$$\mu(p^s) = \mu(p^l) + V^s \frac{d(\sigma A)}{dV} \quad (2.1)$$

όπου

$\mu(p^l)$ : είναι το χημικό δυναμικό του όγκου στερεού σε πίεση  $p^l$

$V^s$ : Ο όγκος του στερεού

$\sigma$ : Η απελευθέρωση ενέργειας μεταξύ στερεού και υγρού

A: Η επιφάνεια

V: Ο συνολικός όγκος του στερεού.

Αν το  $\sigma$  εξαρτάται από το V

$$\mu(p^s) = \mu(p^l) + V^s \sigma \frac{d(\sigma A)}{dV} \quad (2.2)$$

Θεώρησε ότι ο βαθμός στο οποίο το χημικό δυναμικό των μικρών κρυστάλλων ξεπερνούσε αυτό του όγκο του στερεού μπορούσε να αποδοθεί με μία αυξημένη πίεση ( $p^s$ ) με τον κρύσταλλο, όπως:

$$\mu(p^s) - \mu(p^l) = V^s (p^s - p^l) \quad (2.3)$$

αλλά συγκρίνοντας τις (2.2) και (2.3)

$$p^s - p^l = \sigma \frac{dA}{dV} \quad (2.4)$$

η πίεση του πάγου στο στόμιο του σωλήνα αυξανόταν σε  $p^s$  σύμφωνα με την καμπύλη του σχήματος. Εάν το επάνω έμβολο παρέμενε σταθερό, και η θερμοκρασία παρέμενε σταθερή, μια υπέρβαση πίεσης,  $\Delta p^s = p^s - p^l$  ( $p^l$  είναι ίση με την τιμή της  $p^l$ ), καθιστούσε εντονότερη στο B την μετανάστευση και την ψύξη του νερού μέσα στο σωλήνα. Εάν αυτή η πίεση ξεπερνούσε την αντοχή των τοιχωμάτων του κυλίνδρου B, τότε είχε σαν αποτέλεσμα αστοχία λόγω του πάγου. Στην εδαφομηχανική η ποσότητα  $\Delta p^s$  ονομάζεται πίεση διόγκωσης (Heaving pressure).

Εάν η επιφάνεια μεταξύ πάγου και νερού είναι ημισφαιρική,

$$\Delta p^s = \sigma \frac{dA}{dV} = 2\sigma/r \quad (2.5)$$

όπου  $r$  είναι η ακτίνα του σωλήνα και  $R$  η ακτίνα του δοχείου  $B$ , τότε το  $1/r$  θα πρέπει να αντικατασταθεί με  $(1/r-1/R)$  στην παραπάνω σχέση.

Στο εξιδανικευμένο μοντέλο του, πρότεινε ότι η καταστροφή λόγω ψύξης σχετίζεται με κατασκευές από πετρώματα τα οποία εμφανίζουν πορώδες και μικρορωγμές. Προς τιμή των ερευνητών, το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε «φαινόμενο Taber – Everett» στην διαδικασία της γήρανσης λόγω ψύξης.

Οι Blachere (1969) και ο Young (1974) δεν έμειναν απόλυτα ευχαριστημένοι με την θεωρία του Everett, και γι' αυτό το λόγο δημοσίευσαν το άρθρο με τίτλο «Αστοχία της τριχοειδούς θεωρίας για την φθορά λόγω ψύξης εφαρμοζόμενης στα κεραμικά», όπου όρισαν την εργασία του Everett ως τριχοειδή θεωρία. Ερεύνησαν με λεπτομέρεια την συμπεριφορά πορωδών κεραμικών ράβδων εμποτισμένων σε νερό κατά την διάρκεια της ψύξης και της θέρμανσης, κάνοντας αλλαγές στο μήκος και τις θερμοκρασίες. Η πίεση στη φάση του πάγου  $P_i$  προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις δοκιμές της ψύξης και την μεταβολή του όγκου, ενώ το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκε με ηχητικές μεθόδους. Υπολόγισαν την πίεση που προβλεπόταν από την τριχοειδή θεωρία  $P_{cap}$ , και παρατήρησαν ότι  $P_i > P_{cap}$  δηλαδή ότι η πίεση που δημιουργούταν γύρω από τον πάγο στην φάση της ψύξης ήταν σίγουρα μεγαλύτερη από αυτή που προβλεπόταν από την τριχοειδή θεωρία.

Έτσι, κατέληξαν, ότι η τριχοειδής θεωρία στην καταστροφή λόγω ψύξης δεν φαινόταν να είναι εφαρμόσιμη κατά την ψύξη του νερού σε κεραμικά υλικά γιατί η πλαστικότητα του πάγου ήταν πολύ χαμηλή για διατήρηση ισορροπίας. Παρόλα αυτά υπήρχε ένα ερώτημα για τον υπολογισμό της πίεσης  $P_i$ . Οι δυναμικές ελαστικές σταθερές είχαν μετρηθεί με ηχητικές μεθόδους και χρησιμοποιήθηκαν αντί των στατικών ελαστικών σταθερών, οι οποίες θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς του  $P_i$  κατά την αλλαγή του μήκους των δοκιμίων κατά την ψύξη. Οι στατικές και δυναμικές σταθερές είχαν διαφορετικές τιμές και για πετρώματα είχε διατυπωθεί ότι η σχέση  $E_{dynamic}/E_{static}$  ήταν μεταξύ 0,8 και 2,90 (Lama and Vuturuki, 1978). Επιπλέον το μέτρο ελαστικότητας διαφοροποιούνταν με τις συνθήκες των δειγμάτων, υγρά, στεγνά, υπό ψύξη, εμπότιση με νερό και άλλα. Άλλο ένα πρόβλημα με τον υπολογισμό του  $P_i$  ήταν ότι χρησιμοποιούσαν την διόγκωση λόγω ψύξης. Οι καμπύλες ψύξης (διόγκωση) και οι καμπύλες θέρμανσης δεν συμπίπτουν μεταξύ τους και δεν

πραγματοποιείται η ανάκτηση της ανηγμένης παραμόρφωσης. Αυτό σήμαινε ότι η υπολειπόμενη παραμόρφωση μετά από ένα κύκλο ψύξης θέρμανσης αναμενόταν λόγω της δημιουργίας μικρορωγμών, π.χ. συμπεριφορά ερπυσμού, και όχι στην υπολειπόμενη τάση, ήταν γιατί τα σύνορα των δειγμάτων ήταν ελεύθερα. Συνεπώς η ελαστική παραμόρφωση ήταν υπερτιμημένη.

### γ) Φαινόμενο Powers (υδραυλική πίεση)

Η υπόθεση της υδραυλικής πίεσης εξελίχθηκε από τον Powers (1945), και ονομάστηκε φαινόμενο Powers. Απέβλεπε στην εξήγηση του μηχανισμού με τον οποίο η ψύξη μπορούσε να τραυματίσει την διαδικασία σκλήρυνσης του τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Η υπόθεσή του απέδωσε την καταστροφή λόγω ψύξης στην παρουσία υδραυλικής πίεσης που δημιουργούταν από την εξέλιξη του μετώπου του πάγου σε κρίσιμους εμποτισμένους πόρους. Εάν τα αλληλοσυνδεόμενα κενά, ήταν περισσότερο από 91,7% γεμάτα με νερό, η αύξηση του όγκου που σχετιζόταν με την ψύξη θα δημιουργούσε την υπέρβαση του νερού ώστε να μετακινηθεί μέσω των κενών, με αποτέλεσμα την ασκούμενη υδραυλική πίεση.

## 2.2 ΠΙΕΣΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων οποιουδήποτε άλατος θα μπορούσε να ήταν επαρκής για να προκαλέσει στο πέτρωμα κατακερματισμό. Η διαδικασία της γήρανσης λόγω ύπαρξης άλατος έχει μεγάλο ενδιαφέρον και πολλές εργασίες και μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο συγκεκριμένο θέμα. Ο Evans (1969-1970) ανασκόπησε τις περισσότερες από αυτές τις μελέτες που είχαν πραγματοποιηθεί μέχρι την χρονιά του 1970, σχολιάζοντας τις ενδείξεις που συσσωρεύονται από το πεδίο των παρατηρήσεων και των πειραμάτων καθώς και την διατύπωση των πολλών θεωριών. Από τότε μέχρι σήμερα η τάση μελέτης του συγκεκριμένου αντικειμένου συνεχίζεται.

Η γήρανση λόγω άλατος εμπεριέχει τρία είδη τάσεων:

- ✓ Πίεση λόγω της ανάπτυξης κρυστάλλων του διαλύματος
- ✓ Τάσεις που ασκούνται λόγω της διαστολής πολλών αλάτων σε περιορισμένο χώρο κατά την θέρμανση (θερμική τάση)
- ✓ Τάσεις που οφείλονται στην ενυδάτωση (οφειλόμενη στο κρυσταλλικό νερό)



όπως διατυπώθηκαν από τους Cooke και Smalley (1968), και έγιναν γενικά αποδεκτά (όπως, Kwaad 1970, Goudie 1977, Cooke 1979, Chapman 1980). Τα διαθέσιμα άλατα που συναντάμε σε ζεστές έρημους είναι το  $\text{CaCO}_3$ , το  $\text{CaSO}_4$ , το  $\text{NaCl}$ , το  $\text{MgSO}_4$  και το  $\text{NaSO}_4$ , ενώ είναι γενικά αποδεκτό ότι το θεικό νάτριο είναι το πιο ισχυρό από όλα, γιατί διαστέλλεται περισσότερο κατά την ενυδάτωση. Επίσης, στην έρημο της Σαουδικής Αραβίας, όπως καταγράφηκε από τον Champman (1980), οι τάσεις που προκαλούν τον κατακερματισμό των πετρωμάτων θα έπρεπε να οφείλεται στην κρυσταλλοποίηση του  $\text{NaCl}$  που περιέχεται σε διαλύματα και εγκλωβίζεται σε κενά κοντά στην επιφάνεια των πετρωμάτων. Οι William και Robinson (1981) σχεδίασαν κάποια πειράματα με σκοπό να ανακαλύψουν όχι μόνο τις ενέργειες διαχωρισμού του άλατος και της γήρανσης λόγω της ψύξης, αλλά και τον συνδυασμό και των δύο διαδικασιών. Παρατήρησαν «ότι ο πιο θεαματικός κατακερματισμός» πραγματοποιούταν κατά την διάρκεια της ψύξης και θέρμανσης διαλυμένου χλωριούχου νατρίου όπως και του διαλύματος ανθρακικού νατρίου. Όταν διαλύματα άλατος ψύχονταν, σύμφωνα με την περιγραφή τους, κρύσταλλοι καθαρού άλατος αναπτύσσονται με αποτέλεσμα το διάλυμα να γίνεται ασθενέστερο, και πάνω από το ευτηκτικό σημείο ( $-3,5^\circ\text{C}$  για το ανθρακικό νάτριο,  $-21,2^\circ\text{C}$  για το χλωριούχο νάτριο) το διάλυμα στερεοποιείται και δημιουργούνται ξεχωριστά κρύσταλλοι άλατος και πάγου. Για να εξηγήσουν τον κατακερματισμό, αιτιολόγησαν ότι όταν ένα πέτρωμα ψύχεται σε ένα διάλυμα άλατος, υποβάλλεται σε πίεση ως αποτέλεσμα της διόγκωσης του νερού που μετατρέπεται σε πάγο, και η πίεση οφείλεται στην ανάπτυξη κρυστάλλων πάγου και άλατος. Ως αποτέλεσμα η συνολική πίεση που ασκείται στο πέτρωμα ήταν μεγαλύτερη όταν υπήρχε άλας από όταν απουσίαζε. Σκόπιμα στις πειραματικές τους διαδικασίες φαίνεται ότι έλαβαν υπόψη τους την ανάπτυξη των ρωγμών λόγω των τάσεως διάβρωσης που οφειλόταν σε διαλύματα αλάτων και σημειωνόταν κοντά στα ευτηκτικά σημεία των δύο αλάτων, ακολουθώντας την δημιουργία τάσεων λόγω των κρυστάλλων. Με αυτή την θεώρηση, είναι εύλογο ότι τα δύο άλατα μπορούσαν να παράγουν παρόμοια αποτελέσματα (Williams και Robinson, 1981) παρόλη την διαφορά στην συμπεριφορά τους κατά την ψύξη.

Μετά από μία προσεκτική αξιολόγηση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην προσομοίωση της γήρανσης λόγω άλατος σε ζεστές έρημους, οι McGreevy και Smith (1982) έκαναν παρατηρήσεις που αφορούσαν την επιλογή της κατάλληλης θερμοκρασίας, του ποσοστού υγρασίας, του άλατος και τις τεχνικές άλατος οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστοχία του πετρώματος.

Η θεωρία της πίεσης λόγω κρυσταλλοποίησης από διάλυμα αναπτύχθηκε από τον Correns (1949) και από τότε καμία έρευνα στο ζήτημα δεν έχει γίνει εκτός από κάποιες συμπληρωματικές έρευνες (Weyl 1959, Wellman και Wilson, 1965). Ο Correns στην εξίσωση, θεώρησε ότι η συνθήκη της ισορροπίας θα μπορούσε να υπολογιστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, την απαιτούμενη ποσότητα έργου για την μετατροπή ισοθερμικά και αντιστρέψιμα ενός πολυκορεσμένου διαλύματος (με οσμωτική πίεση  $p$ ) μέσα σε διάλυμα με οσμωτική πίεση  $p_s$  και ότι τα δύο θα έπρεπε να θεωρούνται ίσα, σύμφωνα με την αρχή μέγιστου έργου.

Οι κρύσταλλοι που αναπτύσσονται κάτω από φορτίο  $B$  και επεκτείνονται σε στρώση πάχους  $h$ , και οι οποίοι αποτελούνται από  $n$  μόρια παράγουν έργο

$$A_1 = B h \quad (2.6)$$

Μια ποσότητα υπερκορεσμένου διαλύματος, το οποίο περιέχει ακριβώς  $n$  μόρια, διαλύεται μέχρι να αποκτήσει οσμωτική πίεση  $p_s$ . Η αραίωση θα πρέπει να εκτελεστεί ανάστροφα. Το έργο θα είναι

$$A_2 = nRT \ln p/p_s \quad (2.7)$$

και επειδή  $A_1 = A_2$  λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας

$$Bh = nRT \ln p/p_s \quad (2.8)$$

Αν  $P$  είναι η πίεση σε ένα κρύσταλλο και  $q$  η επιφάνεια, πίεση,  $B = P q$ , και  $q h$  είναι ο όγκος της ποσότητας του κρυστάλλου. Έτσι

$$Bh = Pqh \quad (2.9)$$

και

$$Bh = nRT \ln p/p_s \quad (2.10)$$

ενώ διαιρώντας και τα δύο μέλη με  $n$  μόρια

$$\frac{Pqh}{n} = RT \ln p/p_s \quad (2.11)$$

όπου  $\frac{qh}{n}$  είναι ο όγκος του κρυστάλλου ενός μορίου συστατικού,  $v_{solid}$ . Η (2.11) γίνεται

$$P v_{solid} = RT \ln p/p_s \quad (2.12)$$

καθώς η οσμωτική πίεση  $p$  στην εξίσωση ( $p=RTC$ , όπου το  $C$  είναι ο αριθμός των μορίων στο διάλυμα) μπορεί να αντικατασταθεί από την συγκέντρωση, και έχουμε

$$Pv_{solid} = RT \ln C/C_s \quad (2.13)$$

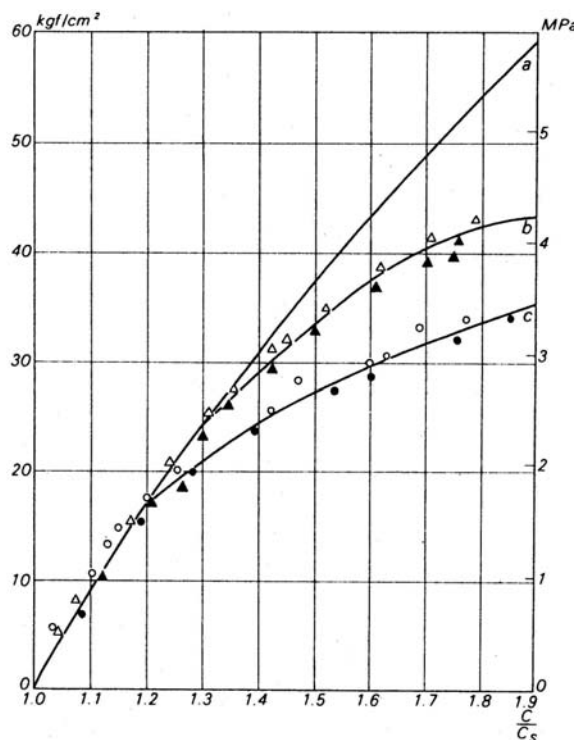
ή

$$P = \frac{RT}{v_{solid}} \ln C/C_s \quad (2.14)$$

Αυτή είναι η παράγωγος της πίεσης κρυσταλλοποίησης κατά Correns, σύμφωνα με τον Yatsu (1988).

Ο Correns ταξινόμησε τις θεωρητικές τιμές χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.14) με πραγματικές μετρήσεις που προέκυψαν από διάφορες επιφάνειες κρυστάλλων  $Al_2(SO_4)$  υπό πίεση σε υπερκορεσμένες συνθήκες με  $C/C_s=2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι τιμές ταιριάζουν τέλεια με τις θεωρητικές τιμές μέχρι που η τιμή του  $C/C_s$  φτάσει την τιμή 1,3 όπου η τιμή της πίεσης είναι 2.45 MPa (24.2 Atm). Σε μεγαλύτερο βαθμό υπερκορεσμού, οι πιέσεις πραγματικά μετριοούνται μικρότερες από τις θεωρητικές.

Οι Winkler και Singer (1972) υπολόγισαν την πίεση κρυσταλλοποίησης του Αλίτη χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Correns, σε θερμοκρασία  $0^\circ C$ ,  $25^\circ C$  και  $50^\circ C$ , με αύξηση

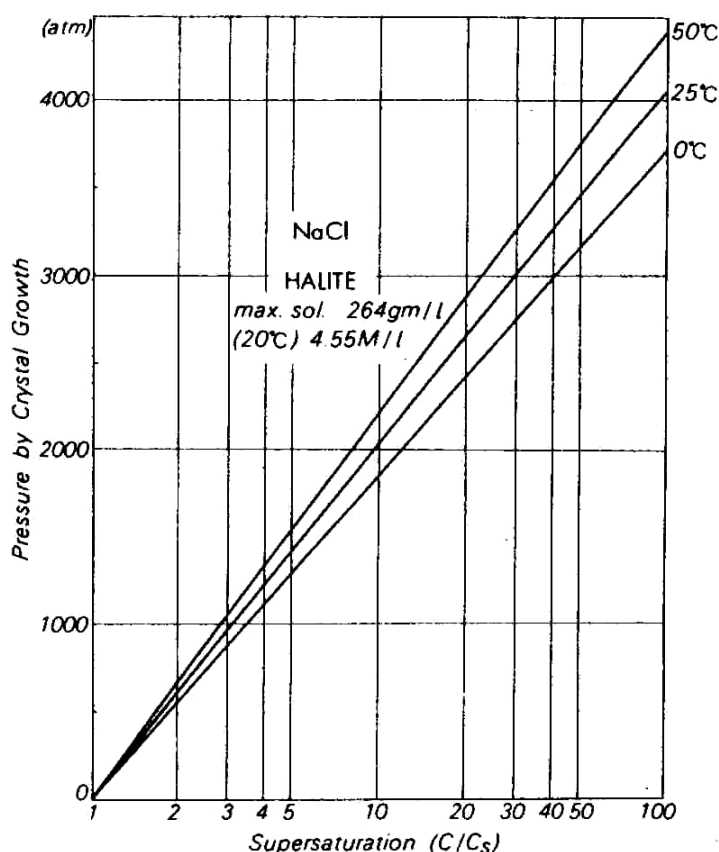


Σχήμα 2.2: Συσχέτιση μεταξύ πίεσης λόγω διόγκωσης και υπερκορεσμού, σύμφωνα με τον Yatsu 1988.

της τιμής υπερκορεσμού, και φτιάχνοντας το Σχήμα 2.3. Επίσης υπολόγισαν την πίεση κρυσταλλοποίησης για διάφορα άλατα, με την ίδια εξίσωση, δημιουργώντας τον Πίνακα 2.1.

Οι Wellman και Wilson (1965) λίγο νωρίτερα είχαν εξελίξει ένα μοντέλο για την πίεση κρυσταλλοποίησης. Η λογική τους ήταν η ακόλουθη. Η χημική ελεύθερη ενέργεια μιας ποσότητας στερεού αυξάνει καθώς αυξάνει η επιφάνεια. Το έργο που απαιτείται κατά την διάρκεια ανάπτυξης ενός κρυστάλλου σε μία επιφάνεια του είναι  $(P_l - P_s)dV$ , όπου  $P_l$  η πίεση του υγρού,  $P_s$  η πίεση του στερεού και  $dV$  η αύξηση του όγκου. Αυτό θα πρέπει να είναι ίσο με το έργο ανάπτυξης της επιφάνειας, το οποίο είναι ίσο με  $\sigma dA$ , όπου  $\sigma$  η τάση μεταξύ επιφάνειας του κρυστάλλου και του κορεσμένου διαλύματος, και  $dA$  η αύξηση της επιφάνειας. Εφόσον το  $\sigma$  είναι ανεξάρτητο του  $V$ , έχουμε

$$P_s - P_l = \sigma \frac{dA}{dV} \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.3: Πίεση κρυσταλλοποίησης για τον αλίτη.

Λίγο νωρίτερα ο Weyl είχε σκεφτεί ότι οι κρύσταλλοι θα μπορούσαν να αναπτυχθούν μετατοπίζοντας το στερεό υλικό. Έτσι κατά την ανάπτυξη, ο κρύσταλλος ασκούσε μια τάση, π.χ. την δύναμη της κρυσταλλοποίησης ενάντια του στερεού. Αυτό το φαινόμενο της δύναμης κρυσταλλοποίησης ερχόταν σε αντίθεση με την πίεση του διαλύματος όπου η εξωτερική τάση προκαλούσε την διάλυση του κρυστάλλου (Weyl, 1959). Στο μοντέλο του, στόχος ήταν ο υπολογισμός της πίεσης του διαλύματος και της πίεσης κρυσταλλοποίησης, και αποτελούνταν από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους και μία μεμβράνη διαλύματος στην επιφάνεια επαφής των κυλίνδρων. Οι κύλινδροι πιέζονταν μεταξύ τους με μία συνολική κανονική πίεση τάσης  $S$  και η υδροστατική πίεση του διαλύματος περιμετρικά των κυλίνδρων ήταν  $p$ , οπότε η ενεργή τάση ήταν  $(S-p)$ . Συμπεραίνοντας ότι η παρούσα διάχυση ήταν ανάλογη της συγκέντρωσης, το ποσοστό μετανάστευσης της ανόργανης ύλης με διάχυση εσωτερικά (από έξω προς τα μέσα) ή εξωτερικά, η διάχυση της ενεργής κανονικής τάσης ως συνάρτηση από το κέντρο  $\sigma(r)$  και  $\bar{\sigma}$ , υπολογιζόταν δυναμικά. Όταν το ενδιάμεσο νερό είναι υπερκορεσμένο αναφορικά με τα ορυκτά, θα πραγματοποιηθεί καθίζηση στην περιοχή της επαφής, καθώς ο υπερκορεσμός θα διαχωριστεί από τον συντελεστή τάσης όταν η διαλυτότητα  $\Delta C/b$  είναι μεγαλύτερη από την μέση τιμή της κανονικής τάσης  $\bar{\sigma}$  μεταξύ των κόκκων, και καθώς αυτή η τάση αυξάνεται πάνω από αυτό το όριο, παίρνει μέρος η πίεση του διαλύματος. Το μοντέλο του Weyl έγινε γενικά αποδεκτό καθώς είναι πιο ρεαλιστικό και προτιμήθηκε από άλλες προσεγγίσεις. Παρόλα αυτά δεν είναι εντελώς πειστικό. Θεώρησε ότι η συγκέντρωση του διαλύματος  $C$  στη μεμβράνη θα πρέπει να είναι γραμμική συνάρτηση της ενεργής κανονικής τάσης  $\sigma(r)$  κατά μήκος της μεμβράνης, έτσι η συνοριακή συνθήκη στην περιφέρεια καθορίζεται από τον υπερκορεσμό  $\Delta C$  και ο συντελεστής τάσης της διαλυτότητας  $b$  σύμφωνα με την γραμμική προσέγγιση

$$C = C_s + \Delta C = C_s + b\sigma(R) \quad (2.16)$$

όπου  $C_s$  είναι η συγκέντρωση του διαλύματος κάτω από ξεχωριστή υδραυλική πίεση και  $\sigma(R)$  η κανονική τάση στην περιφέρεια.

Η εγκυρότητα της υπόθεσης δεν εξακριβώνεται. Το πρόβλημα είναι η τιμή του συντελεστή τάσης της διαλυτότητας  $b$ , παρόλα αυτά διατύπωσε ότι δεν ήταν σκοπός της εργασίας του να ανακαλύψει την πιθανή τιμή του συντελεστή. Άλλο ένα μειονέκτημα του μοντέλου του ήταν ότι δεν λάμβανε υπόψη του όλη την δυναμική ενέργεια κατά την διάρκεια κρυσταλλοποίησης.

Πίνακας 2.1: Πιέσεις κρυσταλοποίησης για ορισμένα άλατα (Winker and Singer, 1972), σύμφωνα με τον Yatsu 1988.

Salt	Chemical formula	Density (gms/ cm <sup>3</sup> )	Molecular weight (gms/ mole)	Molar volume (cm <sup>3</sup> / mole)	Crystallization pressure (atm.)					
					C/C <sub>s</sub> = 2 0°C	C/C <sub>s</sub> = 2 50°C	C/C <sub>s</sub> = 10 0°C	C/C <sub>s</sub> = 10 50°C	C/C <sub>s</sub> = 50 0°C	C/C <sub>s</sub> = 50 50°C
Anhydrite	CaSO <sub>4</sub>	2.96	136.14	46.00	335	398	1120	1325	1900	2262
Bischofite	MgCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	1.57	203.31	129.50	119	142	397	470	675	803
Dodecahydrate	MgSO <sub>4</sub> · 12 H <sub>2</sub> O	1.45	336.00	231.90	67	80	222	264	378	450
Epsomite	MgSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O	1.68	246.48	147.00	105	125	350	415	595	708
Gypsum	CaSO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	2.32	127.00	54.80	282	334	938	1110	1595	1900
Halite	NaCl	2.17	58.54	27.85	554	654	1845	2190	3135	3737
Heptahydrate	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 7 H <sub>2</sub> O	1.51	232.10	153.80	100	119	334	365	568	677
Hexahydrate	MgSO <sub>4</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	1.75	228.00	130.10	118	141	395	469	671	800
Kieserite	MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	2.45	138.39	56.55	272	324	910	1079	1543	1840
Mirabilite	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10 H <sub>2</sub> O	1.46	322.19	220.00	72	83	234	277	397	473
Natron	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10 H <sub>2</sub> O	1.44	286.14	198.70	78	92	259	308	440	524
Tachyhydrate	2 MgCl <sub>2</sub> · CaCl <sub>2</sub> · 12 H <sub>2</sub> O	1.66	514.40	309.50	50	59	166	198	282	336
Thenardite	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.68	142.04	53.0	292	345	970	1150	1650	1965
Thermonatrite	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	2.25	124.00	55.0	280	333	935	1109	1590	1891

### 2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ

Ο όρος ενυδάτωση αναφέρεται με πολλούς τρόπους. Με την ευρεία έννοια σημαίνει συνδυασμός με νερό, συνεπώς η ύγρανση μπορεί να ονομαστεί ενυδάτωση. Η ενυδάτωση είναι ο τύπος διαλύματος όταν ο διαλύτης είναι το νερό. Διάλυση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα μόρια ενός διαλύτη συνδέονται με ιόντα ή μόρια διαλυμένης ουσίας στο διάλυμα. Τα μόρια του νερού μπορούν να συνδεθούν με ένα ιόν με ηλεκτροστατική δύναμη ή με ισοσθενείς δεσμούς. Μερικά ιόντα συγκρατούν μόρια νερού στην στερεά κατάσταση. Το στερεό αυτό λέγεται ένυδρο, κατά συνέπεια περιέχει μόρια νερού στην δομή του καθώς το νερό κρυσταλλοποιείται. Μερικά αργιλικά ορυκτά διογκώνονται λόγω των εξωτερικών πιέσεων που ασκούνται από τα εγκλείσματα νερού μεταξύ των στρώσεων. Το αντίθετο της ενυδάτωσης είναι η αφυδάτωση. Αυτή η παράγραφος έχει αφιερωθεί στα ακόλουθα:

- ✓ Ενυδάτωση, μετατροπή των ανυδριτών σε ενυδρίτες
- ✓ Διόγκωση αργιλικών ορυκτών
- ✓ Απορρόφηση νερού στην επιφάνεια ή στα τοιχώματα των πόρων πετρωμάτων και παρόμοια φαινόμενα.

### 2.3.1 ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ, ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΑΝΥΔΡΙΤΩΝ ΣΕ ΕΝΥΔΡΑ

Η ενυδάτωση είναι γνωστή ως ένας από τους κυριότερους μηχανισμούς γήρανσης των αλάτων. Μερικά κοινά άλατα μπορούν εύκολα να ενυδατωθούν και αφυδατωθούν σύμφωνα με τις αλλαγές της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Η απορρόφηση του νερού συνθέτεται ως τμήμα της κρυσταλλικής δομής, αυξάνοντας τον όγκο των αλάτων και την εξωτερική πίεση πάνω στα τοιχώματα των πόρων. Ο Γερμανός γεωμορφολόγος Mortensen (1933) που αναγνώρισε την σημαντικότητα της ενυδάτωσης ως διαδικασία γήρανσης σε άνυδρες περιοχές, πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό της πίεσης P:

$$P = \frac{RT}{V} \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (2.17)$$

όπου

P: Η πίεση ενυδάτωσης σε Atm

T: Η απόλυτη θερμοκρασία σε °K

V: Ο όγκος του νερού που κρυσταλλοποιείται σε ml

R: Η σταθερά του αερίου

p<sub>1</sub>: Η πίεση ατμού του νερού σε θερμοκρασία T, mmHg

p<sub>2</sub>: Η πίεση διαχωρισμού του ανυδρίτη σε T, mmHg

Οι Winkler και Winhelm (1970) χρησιμοποιώντας την ιδέα του Mortensen και επεκτείνοντας την, ανέπτυξαν την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = \frac{nRT}{(V_h - V_a)} \times 2.3 \log \frac{P_w}{P'_w} \quad (2.18)$$

όπου

P: είναι η πίεση ενυδάτωσης στην ατμόσφαιρα

n: ο αριθμός των μορίων νερού που κερδίζονται κατά την ενυδάτωση στο επόμενο υψηλότερο ανυδρίτη

R: σταθερά του αερίου, 82,07 cc atm °K<sup>-1</sup> gm-mole<sup>-1</sup>,

T: απόλυτη θερμοκρασία σε °K

V<sub>h</sub>: ο όγκος του ανυδρίτη, σε cm<sup>3</sup> ανά γραμμομόριο ένυδρου άλατος,

V<sub>a</sub>: ο όγκος του ανυδρίτη πριν την ενυδάτωση, σε cm<sup>3</sup> ανά γραμμομόριο άνυδρου άλατος,

P<sub>w</sub>: πίεση ατμού του νερού σε mm.mercury στην δεδομένη θερμοκρασία

P<sub>w</sub>': πίεση ατμού του ένυδρου άλατος σε mm.mercury στην δεδομένη θερμοκρασία.

Υποθέτοντας τις πληροφορίες της πίεσης εξάτμισης των ανυδριτών από τους Mortensen (1933) και Gmelin (1937-1939) και άλλες χημικές σταθερές από τον Weast (1967), υπολόγισαν την πίεση ενυδάτωσης μερικών κοινών αλάτων σε διάφορες θερμοκρασίες και συνθήκες σχετικής υγρασίας (Πίνακας 2.2).

Η ενυδάτωση εμφανίζεται όχι μόνο σε ξηρές περιοχές αλλά επίσης και σε άλλα μέρη ως γεωλογικό φαινόμενο. Για παράδειγμα ο Grob (1976) ανέφερε ότι σε ένα αριθμό Σουηδικών σιδηροδρομικών γραμμών ηλικίας 100 ετών, σημειώθηκε διόγκωση των πετρωμάτων οφειλόμενη στην ενυδάτωση ανυδριτών, με αποτέλεσμα οι σήραγγες να υποφέρουν από μετατοπίσεις και σύγκλιση στηρίζων.

Πίνακας 2.2: Πίεση λόγω ενυδάτωσης (σε atm) ορισμένων αλάτων σε συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Winker and Wilhelm, 1970), σύμφωνα με τον Yatsu 1988.

Relative Humidity (%)	Temperature (°C)			
	0°	20°	40°	60°
<b>CaSO<sub>4</sub> · ½ H<sub>2</sub>O to CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O (plaster of Paris to gypsum)</b>				
100	2190	1755	1350	926
90	2000	1571	1158	724
80	1820	1372	941	511
70	1600	1145	702	254
60	1375	884	422	0
50	1072	575	88	
<b>MgSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O to MgSO<sub>4</sub> · 6 H<sub>2</sub>O Kieserite to Hexahydrate 65.3°C</b>				
100	418			
90	226			
80	13			
70				
60				
50				
40				
<b>MgSO<sub>4</sub> · 6 H<sub>2</sub>O to MgSO<sub>4</sub> · 7 H<sub>2</sub>O Hexahydrate to Epsomite</b>				
	10°	20°	30°	40°
100	146	117	92	96
90	132	103	77	69
80	115	87	59	39
70	97	68	40	5
60	76	45	17	
50	50	19	0	
40	20	0		
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O to Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · 7 H<sub>2</sub>O Thermonatrite to Heptahydrate</b>				
	0°	10°	20°	30°
100	938	770	611	430
90	799	620	457	276
80	637	455	284	94
70	448	264	88	
60	243	46		
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · 7 H<sub>2</sub>O to Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · 10 H<sub>2</sub>O Heptahydrate to Natron</b>				
	0°	10°	20°	30°
100	816	669	522	355
90	666	504	350	185
80	490	320	160	0
70	282	112	0	
60	60			
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10 H<sub>2</sub>O Thenardite to Mirabilite</b>				
	20°	25°	31°	32.4°
100	483	400	285	252
90	331	246	135	93
80	162	77	0	0
75	66	0		



### 2.3.2 ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Είναι γνωστό ότι ορισμένα είδη αργιλικών ορυκτών έχουν την φυσική ιδιότητα να διογκώνονται όταν προσροφούν νερό, φαινόμενο το οποίο προκαλεί τη μηχανική γήρανση πετρωμάτων που περιέχουν αργίλους, και δημιουργούν προβλήματα και αστοχίες στις κατασκευές.

Οι διαστασιολογικές αλλαγές ή η μεταβολή του όγκου που σχετίζεται με την απόκτηση ή την απώλεια ποσότητας νερού, είναι γνωστή ως διόγκωση ή συρρίκνωση. Το πρόβλημα των αργίλων δεν είχε αναγνωριστεί από τους εδαφομηχανικούς μέχρι τα τέλη του 1930, σύμφωνα με τον Chen (1975). Πρώτοι οι μηχανικοί στις σιδηροδρομικές γραμμές αντιμετώπισαν πολυάριθμες πιέσεις της γης σε αργιλικές ζώνες στην σήραγγα Tanna, στην γραμμή Tokaido στην Ιαπωνία, τον Νοέμβριο του 1925 και οι γεωλόγοι στο Hokkaido Imperial University το θεώρησαν ως «υδρο – διόγκωση» των αργίλων.

Το πρώτο σημαντικό διεθνές συνέδριο στις Η.Π.Α. πάνω σε αργίλους έγινε στο Colorado School of Mines τον Απρίλιο του 1959. Από τότε έχουν γίνει αρκετά συνέδρια με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και μεγάλος αριθμός εργασιών και μελετών. Μετά από καιρό, η έννοια της πίεσης διόγκωσης κατάφερε να κερδίσει την αποδοχή των γεωμορφολόγων ως μια σημαντική διαδικασία που παίζει ρόλο στην μηχανική γήρανση.

Οι McGreevy και Smith (1984) διεξήγαγαν πειράματα γήρανσης λόγω άλατος σε ψαμμίτη. Παρατήρησαν ότι οι στρώσεις που περιείχαν σμεκτίτη αστοχούσαν πιο εύκολα από αυτούς που είχαν λιγότερους αργίλους και διαπίστωσαν ότι αυτή η αστοχία οφειλόταν στην διόγκωση των αργίλων. Η ικανότητα του φαινομένου διόγκωσης στην μηχανική γήρανση είναι δεδομένη στα πετρώματα τα οποία περιέχουν ορυκτά που διογκώνονται.

Αναφορικά με την ενυδάτωση του σμεκτίτη, οι MacEwan και Wilson (1980) διατύπωσαν τα ακόλουθα:

- ✓ Η αργιλική ορυκτολογική στρώση από μόνη της μπορεί να ονομαστεί υπόστρωμα, το οποίο έχει συνολικά ένα αρνητικό φορτίο οφειλόμενο στην ανταλλαγή ιόντων στην δομή του.
- ✓ Η ανταλλαγή κατιόντων αντισταθμίζει το συνολικό φορτίο της στρώσης και συμβαίνει μεταξύ των στρώσεων.

- ✓ Ουδέτερα μόρια που περιέχουν  $H_2O$ , υπάρχουν μεταξύ των στρώσεων και συσχετίζονται με τα κατιόντα και τις στρώσεις.

Ο μηχανισμός διόγκωσης ή ο λόγος για τον οποίο ο σμεκτίτης και άλλα αργιλικά ορυκτά αυξάνουν την απόσταση μεταξύ των στρώσεων, αναλόγως της αύξησης του  $d_{(001)}$  (ίσο με  $c \sin \beta$ ) πάνω σε ύγρανση, έχει γίνει αμφιλεγόμενο αντικείμενο. Οι Fink *et al.* (1968) κατέγραψαν τρεις τύπους σχέσεων μεταξύ αργίλων και νερού σε σχέση με την διόγκωση του μοντμοριλλονίτη: την ενυδάτωση των κατιόντων, την ενυδάτωση των εκτεθειμένων επιφανειών αργίλου και την οσμωτική ενέργεια. Συνέχισαν να δηλώνουν ότι η ενυδάτωση των κατιόντων και οι εκτεθειμένες επιφάνειες των αργίλων που έρχονται σε επαφή με χαμηλές ποσότητες νερού, και η διαστολή των αργίλων σε αυτές τις χαμηλές ποσότητες νερού πραγματοποιούνται σε στάδια.

### **2.3.3 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ή ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ**

Πολυάριθμες εργασίες και μελέτες έχουν δημοσιευθεί σε περιοδικά εδαφομηχανικής και επιστήμης των εδαφών που έχουν σχέση με την διόγκωση των εδαφών. Λόγω της βαρύτητας που έχει η γνώση για την κατανόηση της μηχανικής γήρανσης μαλακών εδαφών όπως αργιλικού σχιστόλιθου και ίλως, το βάρος έχει δοθεί στην αποσύνθεση των αργιλικών πετρωμάτων. Το φαινόμενο της διόγκωσης των αργιλικών πετρωμάτων έχει αναγνωριστεί και μελετηθεί από πολλούς. Για παράδειγμα ο Yatsu (1964, 1966) κατασκεύασε μια απλή μηχανή και μέτρησε την πίεση διόγκωσης σε 30 δείγματα αργιλικού σχιστόλιθου, τέφρας, μυλωνίτη και σεπερντίνη από την Ιαπωνία, και έδειξε ότι ο όγκος αυξάνει και η πίεση διόγκωσης  $P$  κάτω από συνθήκες περιορισμού είναι συνάρτηση του χρόνου όπως:

$$P = P_o(1 - e^{-kt}) \quad P = P_o(1 - e^{-kt}) \quad (2.19)$$

όπου,

$P_o$ : είναι η οριακή ή μέγιστη

$t$ : χρόνος σε λεπτά

$k$ : σταθερά

όπου  $P_0$  και  $k$  εξαρτώνται από το είδος και τα περιεχόμενα αργιλικά ορυκτά στα πετρώματα. Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση διόγκωσης τόσο νωρίτερα δημιουργείται αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω της απορρόφησης του νερού.

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί η έννοια της ενέργειας διόγκωσης. Αν η αλλαγή του όγκου  $\Delta V$  σημειώνεται κάτω από πίεση  $P$ , η ποσότητα της ενέργειας,  $-W$ , του εξωτερικού συστήματος θα είναι

$$-W = P\Delta V$$

Η ποσότητα είναι ίση με την ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα στο οποίο πραγματοποιήθηκε η αλλαγή του όγκου. Ανάλογα, σε ορισμένες περιπτώσεις διόγκωσης κάτω από σταθερό φορτίο (π.χ. την ατμοσφαιρική πίεση συν την τάση φόρτισης στην κατάσταση διόγκωσης), η κατάσταση θα χάσει ενέργεια η οποία καθορίζεται από την παραπάνω σχέση. Αυτή η ενέργεια ονομάζεται ενέργεια διόγκωσης και συγκροτείται πριν την διαστολή. Το μέγεθος της ενέργειας διόγκωσης ποικίλει με τις φυσικές ιδιότητες του υλικού στο οποίο ασκείται η διόγκωση και η διατύπωση της κατάστασης πριν την διαστολή (Matsoukoura και Yatsu, 1980).

Η αντοχή εφελκυσμού των ιζηματογενών πετρωμάτων μπορεί να προέρχεται από την σύνδεση τμημάτων, πλήρωση των ενδιάμεσων κενών μεταξύ τους με κρυστάλλους ή άμορφα υλικά, δυνάμεις van de Waals μεταξύ γειτονικών επιπέδων που είναι σε επαφή, ηλεκτροστατικών έλξεων. Κατά την ύγρανση το νερό εισχωρεί μέσα στις μικρορωγμές και τα κενά των πόρων που είναι ανοικτά, ή όχι πληρωμένα με υλικά και η συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων αυξάνεται στις άκρες των διάκενων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η μετάδοση των ρωγμών στη μάζα των πετρωμάτων.

Αρκετές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για να εξηγήσουν τον μηχανισμό προσρόφησης του νερού στα πετρώματα που οδηγούν στην διόγκωση:

- ✓ Η θεωρία της ελεύθερης ενέργειας, η οποία δίνει την εξήγηση της πίεσης απόσπασης μεταξύ των τοιχωμάτων των πόρων.
- ✓ Η θεωρία DLVO (π.χ. ελκτικές δυνάμεις van de Waals) στην οποία οι απωθητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες των ελκτικών δυνάμεων και οι μικρορωγμές επεκτείνονται (Ohshima 1974, Pashley 1981a - 1981b, Pashley and Israelachvili 1984a - 1984b).

Η θεωρία DLVO σχετίζεται με τον μηχανισμό μοριακού δυναμικού του νερού κοντά σε πυριτικές επιφάνειες, καθώς η θεωρία της ελεύθερης ενέργειας διεπιφάνειας σχετίζεται με την φαινομενολογική ή θερμοδυναμική ερμηνεία προσρόφησης του νερού σε πυριτικές επιφάνειες. Σύμφωνα με τους Badman et al. (1981) που σχετιζόταν με την προσρόφηση νερού σε μη πορώδη πυριτικό ασβέστιο, τσιμέντο και πορώδη υλικά τσιμέντου και της οποίας τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν και σε πετρώματα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ελεύθερη ενέργεια διεπιφάνειας. Σύμφωνα με αυτή την εργασία, μπορεί να υπολογιστεί το χημικό δυναμικό σε στενούς πόρους και η ελεύθερη ενέργεια διεπιφάνειας  $F(H)$  ενός στενού πόρου που δίνεται από την σχέση:

$$F(H) = \frac{1}{V_m} \int_0^H \mu(t, H) dt \quad (2.20)$$

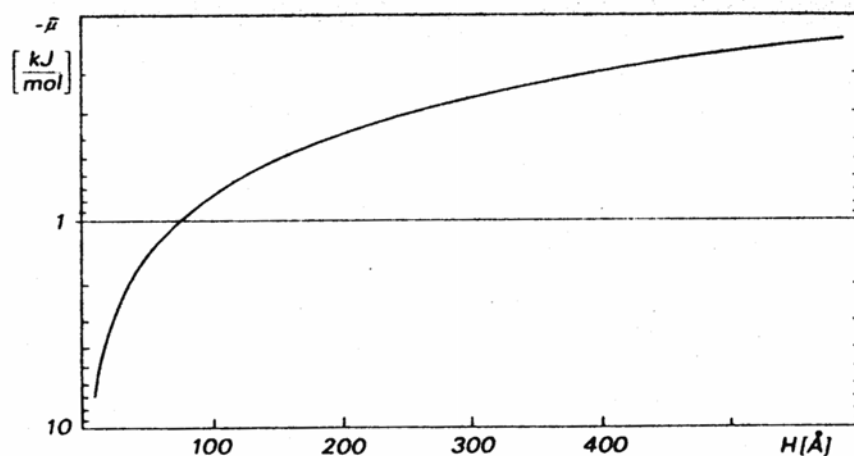
όπου,

$V_m$ : είναι ο μοριακός όγκος του νερού

$H$ : το πλάτος του κενού

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η τιμή της  $F(H)$  που αντιστοιχεί σε μέση τιμή χημικού δυναμικού  $\mu$  σε πόρο πλάτους  $H$ . Η πίεση αποσύνδεσης  $\Pi(H)$  μεταξύ των τοιχωμάτων του πόρου, η οποία προάγει την ανάπτυξη των μικρορωγμών, λόγω των  $F(H)$  με  $H$ , είναι

$$\Pi(H) = \frac{\partial F(H)}{\partial H} \quad (2.21)$$



Σχήμα 2.4: Μέση τιμή χημικού δυναμικού σε πόρους σύμφωνα με την εξίσωση 2.20.

## **2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**

Οι επαναλαμβανόμενες θερμικές διαστολές και συστολές των πετρωμάτων θεωρούνται ότι είναι η αφορμή της αποφλοΐωσης και του κατακερματισμού των πετρωμάτων. Πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ρόλο στις ρωγμές ή τον θρυμματισμό των τεμαχίων παίζουν οι πυρκαγιές των δασών. Το γενικότερο φαινόμενο οφείλεται στις αλλαγές θερμοκρασίας και συχνά ονομάζεται ηλιακή γήρανση. Από την σκοπιά των μηχανικών και την τεχνολογία των υλικών μπορεί αυτή η γήρανση να ταξινομηθεί στην κατηγορία της καταστροφής λόγω θερμικών τάσεων ή κύκλων θερμικών τάσεων. Ο θρυμματισμός που προκαλείται λόγω των πυρκαγιών των δασών ονομάζεται και θερμικό σοκ.

## **2.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Οι θερμικές τάσεις είναι οι τάσεις που σχετίζονται με τις μεταβολές θερμοκρασίας. Αν ένα στοιχείο σε ένα σώμα θερμαίνεται, το στοιχείο έχει την τάση να αλλάξει διαστάσεις λόγω διαστολής. Όταν αυτή η ελεύθερη διαστολή προκαλείται σε ένα σώμα για οποιοδήποτε λόγο, οι θερμικές τάσεις αυξάνονται. Όταν ένα σώμα θερμαίνεται ομοιόμορφα, αναπτύσσονται θερμικές τάσεις εάν εξωτερικά δεν υπάρχουν περιορισμοί και επιτρέπουν την ελεύθερη διαστολή ή όταν αποτελείται από διαφορετικά συστατικά κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετικό συντελεστή διαστολής. Αν η ελεύθερη διαστολή ή η σύσταση των στοιχείων του σώματος επιτρέπονται δεν παρουσιάζεται η ύπαρξη τάσεων λόγω των αλλαγών της θερμοκρασίας.

Όταν θερμικές τάσεις δημιουργούνται λόγω ξαφνικών αλλαγών της θερμοκρασίας, η διαδικασία αναφέρεται ως θερμικό σοκ. Ξαφνικές αλλαγές στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος, θέρμανση ή ψύξη με οποιοδήποτε τρόπο δημιουργούν απότομη θερμοκρασιακή βαθμίδα στο σώμα. Η διαφορά μεταξύ θερμικών τάσεων και θερμικού σοκ είναι ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των τάσεων είναι πολύ απότομος στο θερμικό σοκ. Στην περίπτωση της ξαφνικής θέρμανσης, η επιφανειακή τάση είναι θλιπτική, η αστοχία στην επιφάνεια μπορεί να οφείλεται στο σχηματισμό αποφλοΐωσης λόγω θλίψης και των διατμητικών τάσεων που προκαλούνται λόγω της θλίψης. Στο κέντρο του σώματος αναπτύσσονται τάσεις εφελκυσμού που εξαρτώνται από την κλίμακα της θέρμανσης και την μετάδοση της θερμοκρασίας. Ορισμένα υλικά όπως τα πετρώματα γίνονται ψαθυρά ακολουθώντας την ξαφνική εφαρμογή τάσης και έτσι μπορεί να μην αντέχουν την τάση από το θερμικό σοκ.

Σε ένα ισότροπο ομογενές σώμα, με σεβασμό τόσο στις θερμικές όσο και στις μηχανικές ιδιότητες, με σκοπό να κατανοήσουμε τις βασικές εξισώσεις θερμικών τάσεων (γενικεύοντας τον νόμο του Hooke), σύμφωνα με τον Yatsu (1988). Το  $\tau$  αντιπροσωπεύει το στάδιο θερμοκρασίας από αρχική κατάσταση χωρίς τάσεις σε ομοιόμορφη θερμοκρασία,  $T_0$ . Χρησιμοποιώντας  $u_i$  ( $i=x, y, z$ ) για να υποδηλώσουμε την συνιστώσα της μετατόπισης,  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) για να υποδηλώσουμε την συνιστώσα της παραμόρφωσης και  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) των συνιστωσών των τάσεων.

Όταν υπάρχει ελεύθερη διόγκωση, οι συνιστώσες παραμόρφωσης για ένα ισότροπο υλικό είναι:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = a_\tau, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$$

Όταν τα στάδια της θερμοκρασίας σε ένα ομογενές σώμα δεν είναι ομοιόμορφα, τα στοιχεία των συνιστωσών της παραμόρφωσης αποτελούνται από δύο μέρη. Οι γραμμικές εξισώσεις των συνιστωσών των τάσεων και της ελεύθερης θερμικής διαστολής λόγω της θερμοκρασίας είναι:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_{xx} - \nu (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \right\} + a\tau = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{xx} - \frac{\nu}{1+\nu} \Theta_s \right) + a\tau \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_{yy} - \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) \right\} + a\tau = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{yy} - \frac{\nu}{1+\nu} \Theta_s \right) + a\tau \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_{zz} - \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \right\} + a\tau = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{zz} - \frac{\nu}{1+\nu} \Theta_s \right) + a\tau \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\sigma_{xy}}{2G}, \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{2G}, \varepsilon_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{2G} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

όπου,

$$\Theta_s = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$$

E: είναι το μέτρο Ελαστικότητας

G: μέτρο διάτμησης

$\nu$ : λόγος Poisson και

$a$ : ο συντελεστής της γραμμικής διαστολής.

Σε ένα στερεό σώμα, η θερμότητα μεταφέρεται κυρίως μέσω της επαφής. Η θεωρία της θερμικής μετάδοσης βασίζεται στο νόμο του Fourier, και οδηγεί σε μία ισορροπία ενέργειας:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \tau}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \tau}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial \tau}{\partial t} \quad (2.23)$$

όπου,

k: είναι η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του στερεού

$\tau$ : είναι η αύξηση της θερμοκρασίας από την αρχική

Q: η εσωτερική ανάπτυξη θερμοκρασίας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα όγκου

$\rho$ : η πυκνότητα του υλικού

c: η ακριβής θερμοκρασία του υλικού και

$t$ : ο χρόνος.

Εάν το σώμα δεν έχει εσωτερική πηγή θερμότητας και θερμική αγωγιμότητα, k, είναι σταθερή η παραπάνω εξίσωση μειώνεται σε

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \tau$$

όπου  $\kappa = \frac{k}{\rho c}$  (όπου το  $\kappa$  είναι γνωστό ως συντελεστής θερμικής διάχυσης (thermal diffusivity) του υλικού).

Η θερμική διάχυση και η συγκεκριμένη θερμότητα είναι συχνά ανισότροπες, και επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως την θερμοκρασία, την πίεση, το πορώδες, την πυκνότητα και την υγρασία.

Οι Čermak και Rybach (1982) συγκέντρωσαν τα αποτελέσματα από 500 περιπτώσεις πετρωμάτων από εργασίες που είχαν δημοσιευθεί και είχαν σχέση με την ικανότητα θερμικής μετάδοσης των υλικών. Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται συγκεντρωμένες οι θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων αυτών.

Τα τελευταία χρόνια η αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων που προέρχονται από την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα και ένας τρόπος αντιμετώπισης του είναι η αποθήκευση των αποβλήτων μέσα σε μάζες πετρωμάτων. Αναμφίβολα τα προϊόντα της πυρηνικής σχάσης μπορούν εξασθενήσουν και να παραχθεί θερμότητα. Συνεπώς πληροφορίες για τις θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων που

Πίνακας 2.3: Θερμικές ιδιότητες πετρωμάτων: θερμική αγωγιμότητα  $k$ , θερμική διάχυση  $\kappa$ , ειδική θερμότητα  $c_p$ , αριθμός υπολογισμών  $n$ , RT θερμοκρασία δωματίου, (Čermak και Rybach 1982), σύμφωνα με τον Yatsu 1988.

Rock	Locality	$T$ [°C]	$k$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>			$\kappa$ 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			$c_p$ kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>		
			n	range	mean	n	range	mean	n	range	mean
Alkali Granite	Lake Baikal shore, USSR	RT	2	2.1...2.4	2.27	2	9.4...9.8	9.6	2	0.84...0.92	0.88
Granite	Switzerland (Alpine rocks)	20	8	1.3...2.5	2.19	8	6.8...12.8	11.1	8	0.67...0.80	0.75
	Germany	50	16	s.d.±0.45	3.09	16	s.d.±2.12	13.8	16	s.d.±0.06	0.86
Diorite	USSR, shield areas	RT	3	2.2...2.8	2.46	3	7.3...8.6	7.8	3	1.13...1.17	1.14
Gabbro	Kola peninsula, USSR	RT	9	2.5...4.1	2.99	9	9.3...12.2	9.7	9	0.88...1.13	1.00
Rhyolite	Ontario and Quebec, Canada	20	5	3.1...4.1	3.52						
Liparite	Sweden	RT	26	s.d.±0.51	3.26						
Andesite	Hungary	RT	6	1.6...2.5	1.97						
Basalt	Germany	50	3	1.6...1.8	1.68	3	6.3...6.9	6.58	3	0.88...0.89	0.88
Tuff	Kola peninsula, USSR	RT	3	2.7...4.4	3.45	3	9.4...13.3	11.1	3	1.00...1.17	1.09
Marble	Switzerland (Alpine rocks)	20	9	2.0...3.4	2.41	9	9.2...15.3	10.9	10	0.67...0.92	0.80
Gneiss	Switzerland (Alpine rocks)	20	55	1.2...3.1	2.12	55	6.0...15.7	10.6	55	0.46...0.92	0.75
	Switzerland (Alpine rocks)	20	55	1.2...2.6	1.74	55	6.2...12.8	8.7			
Schist	Switzerland (Alpine rocks)	20	18	1.7...4.1	2.88	18	7.8...18.3	13.1	18	0.67...1.05	0.80
	Switzerland (Alpine rocks)	20	18	1.0...3.1	2.05	18	4.5...14.1	9.3			
Slate	Germany	50	11	s.d.±0.74	2.63	11	s.d.±3.32	11.17	11	s.d.±0.07	0.91
Conglomerate	Southern Siberia, USSR	RT	77	1.5...3.8	2.30	10	6.8...9.8	7.5			
Sandstone	Germany	RT	17	2.3...3.9	3.03	17	10.6...21.1	13.2	17	0.76...1.08	0.96
Shale	East-European platform, USSR	RT	17	2.3...4.0	2.98	17	7.0...12.7	9.16	17	0.88...1.42	1.18
Limestone	Germany	50	11	1.7...2.7	2.21	11	8.2...12.2	10.54	11	0.82...0.95	0.85

Soles 1978). Οι Reiter και Hartman (1971) πρότειναν μια μέθοδο προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας δειγμάτων από πετρώματα. Ενώ οι Adams et al. (1976) προσπάθησαν να υπολογίσουν την θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων επί τόπου (in situ) μετρώντας την βαθμιαία εξασθένιση σε βάθος του πλάτους του θερμοκρασιακού κύματος.

Η συγκεκριμένη θερμοκρασία σε σταθερή πίεση  $c_p$  σχετίζεται με την  $c_v$  σύμφωνα με την σχέση :

$$c_p - c_v = TV \left( \frac{\alpha_v^2}{\beta} \right) \quad (2.22)$$

όπου,

T: η θερμοκρασία,

V: ο αριθμός των μορίων,

$\alpha_v$ : ο συντελεστής της ογκομετρικής θερμικής διαστολής,

$\beta$ : η ισοθερμική αγωγιμότητα.

Οι επιπτώσεις στην αντοχή και τις παραμορφώσεις των πετρωμάτων σε σχέση με την θερμοκρασία έχουν μελετηθεί ελάχιστα. Οι Wai και Lo (1982) μελέτησαν τις επιπτώσεις στις



τάσεις και τις παραμορφώσεις σε ασβεστόλιθο και γρανιτικό γνεύσιο του Precambrian Shield μέχρι την θερμοκρασία των 350 °C. Στον Πίνακα 2.4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους. Από τα δεδομένα τους συμπεραίνουμε ότι το μέγεθος της παραμόρφωσης του γνεύσιου αυξάνει ελαφρώς με την θερμοκρασία μέχρι τους 120 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες τα μεγέθη μειώνονται σε ποσοστό 25% ανά 100 °C, και ο λόγος Poisson γενικά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ ο ίδιος λόγος για τον ασβεστόλιθο φαίνεται να είναι ανεπηρέαστος από τις αλλαγές των θερμοκρασιών. Η αντοχή του γνεύσιου σε μονοαξονική θλίψη μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στο εύρος των 100°C μέχρι 350 °C σε αναλογία 30 MPa ανά 100 °C. Επίσης στον ασβεστόλιθο παραμένει σταθερή η αντοχή του μέχρι την τιμή της θερμοκρασίας να γίνει 350 °C, όπου ξαφνικά η αντοχή αυξάνεται.

Στις θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το εύρος της μεταφερόμενης θερμοκρασίας στην επιφάνεια και με αυτό το τρόπο η κλίση της θερμοκρασίας. Τοπικές αυξομειώσεις στην κλίση της θερμοκρασίας προκαλούν στα πετρώματα θερμικές τάσεις η οποίες μπορούν να προκαλέσουν την διάδοση των υπαρχόντων μικρορωγμών (Mirkovich, 1978).

Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό φούρνο.

Rock type	Depth (m)	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Compressive wave velocity (m/s)		Test temp. (°C)	Uniaxial compressive strength (MPa)	E <sub>30</sub> (GPa)	Poisson's ratio	Strain at failure(%)
			Before drying	After drying					
Limestone	186.67	26.4	5990	5820	21	126	68.7	0.31	0.19
	186.03	26.3	5940	5780	167	127	72.6	0.32	0.18
	186.46	26.3	5950	5890	269	145	64.8	0.34	0.23
	187.44	26.3	6110	5940	302	112	*	*	—
	187.73	26.4	6050	6030	332	202	61.2	0.31	0.37
	186.96	26.4	5930	5820	347	189	62.2	0.32	0.35
Granitic gneiss A	224.67	25.5	5500	4490	71	186	64.5	0.25	0.27
	224.90	25.7	5420	4360	196	203	51.9	0.23	0.37
	224.98	25.8	5480	4580	302	173	38.0	0.22	0.39
	225.05	25.7	5480	4590	357	155	*	*	—
Granitic gneiss B	261.91	25.9	5010	3930	23	214	60.3	0.25	0.35
	261.63	25.8	5130	3860	113	232	62.4	0.22	0.36
	261.70	25.8	5350	4170	181	226	55.2	0.22	0.40
	261.77	25.8	5280	4010	261	198	42.5	0.26	0.44
	261.84	25.8	5210	3890	357	168	34.0	0.29	0.42
Granitic gneiss C	302.53	25.6	5550	4760	24	163	60.8	0.30	0.25
	301.60	25.5	5100	4030	117	137	50.7	0.30	0.25
	301.78	25.6	4840	3620	187	152	46.0	0.30	0.30
	301.68	25.5	4760	3700	256	123	32.5	0.25	0.36
	301.54	25.5	4950	3500	355	96	24.5	0.40	0.35

Τελικά δύο είναι τα είδη της θερμικής γήρανσης που μπορούν να συναντηθούν στην φύση, η θερμική καταπόνηση και το θερμικό σοκ. Το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας του αέρα είναι πολύ μεγάλο κυρίως σε άνυδρες περιοχές, και σε περιοχές με έλλειψη βλάστησης και μεγάλους πέτρινους όγκους. Πιστεύεται σε τέτοιες περιοχές οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται μπορούν να προκαλέσουν αποσύνθεση και κατακερματισμό των πέτρινων όγκων. Στην αναφορά για την μηχανική γήρανση που προκαλείται λόγω κυκλικών αλλαγών της θερμοκρασίας θα πρέπει να θεωρηθεί ότι οι μηχανισμοί θερμικής κόπωσης και καταπόνησης λόγω των τάσεων δεν θα μπορούσαν να απορριφθούν ως μη ρεαλιστικές, όμως δεν θα πρέπει να ξεχνιέται η διόγκωση των αλάτων σε περιοχές χωρίς ιδιαίτερη βλάστηση.

## **2.6 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ**

Στις γεωεπιστήμες, η απομάκρυνση υλικών επικάλυψης ονομάζεται αποφόρτιση. Η λέξη αποφόρτιση σημαίνει ελευθέρωση, ανακούφιση ή απαλλαγή ενός φορτίου ή βάρους. Η αποφόρτιση προτάθηκε από τον Gilbert (1904) ως ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την ονομαζόμενη απολέπιση θόλων (exfoliation domes).

Στις γρανιτικές περιοχές της Sierras Nevada σε πολλούς λόφους και κορυφές υπάρχουν σχηματισμοί θόλων. Ο Gilbert το καλοκαίρι του 1903 επισκέφτηκε την Sierra όπου και διατύπωσε την θεωρία της διαστολής λόγω αποφόρτισης. Σύμφωνα με αυτόν, όταν δημιουργήθηκε ο γρανίτης από την ψύξη του μάγματος που ήταν θαμμένος κάτω από ένα μεγάλο κάλυμμα παλαιότερων πετρωμάτων, υπήρξε εφαρμογή θλιπτικών τάσεων. Αυτή η πίεση ήταν φυσικά σε ισορροπία με τις εσωτερικές δυνάμεις διαστολής που προκαλούν την διαστολή στην περίπτωση που απομακρυνθεί η εξωτερική πίεση. Αυτή πιθανότατα είναι η καταγωγή της ευρείας θεωρίας για την αποφόρτιση ή πίεσης απελευθέρωσης, και γι' αυτό το λόγο πολλά βιβλία περί γεωμορφολογίας έχουν προσφέρει λεπτομερείς επεξηγήσεις για τους μηχανισμούς της φύσης περί αποφορτίσεως.

### **2.6.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ**

Ο Αυστριακός γεωλόγος Kieslinger (1958 και 1960) υποστήριξε την θεωρία της παραμένουσας τάσης σε πετρώματα, είτε πρόσφατα είτε παλαιότερα, και διάρρηξη πετρωμάτων σε λατομεία και σήραγγες. Σύμφωνα με τον Kieslinger, πολλά πετρώματα έχουν φορτιστεί στην διάρκεια της γεωλογικής τους ιστορίας, λόγω των τεκτονικών πιέσεων και για άλλους λόγους. Όταν αυτή η πίεση απομακρύνεται λόγω διάβρωσης των επιφανειών και

χαλάρωσης, η αύξηση του αρχικού όγκου δεν λαμβάνει μέρος αμέσως, αλλά αργά και σταδιακά. Έτσι παραμένουσες τάσεις συναντάμε ακόμα και σε μικρά τμήματα, αλλά και σε πολλές περιπτώσεις σε λεπτά τμήματα πετρωμάτων.

Ο Coates (1964) πείστηκε για την ύπαρξη της παραμένουσας τάσης και περιέγραψε τις περιπτώσεις σε μηχανικές εφαρμογές όπως περιπτώσεις δαπέδων λατομείων στο Οντάριο, σε οριζόντιες παραμορφώσεις σε σήραγγες και ύπαρξη μεγάλων διαρρήξεων στο Βόρειο Οντάριο.

Οι Bjerrum και Jørstad (1968) μελέτησαν την ευστάθεια πρανών στην Νορβηγία κάνοντας απόπειρα να εξηγήσουν την ολίσθηση των πρανών λαμβάνοντας υπόψη την εσωτερική παραμένουσα τάση και την πίεση του νερού. Παραδέχτηκαν ότι η ευστάθεια πρανών σε σκληρά Νορβηγικά πετρώματα είναι πέρα για πέρα εξαρτώμενη από την έκταση και τη συνέχεια των ασυνεχειών, την ύπαρξη των εσωτερικών παραμένουσων τάσεων, τις τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων, τις αστοχίες και άλλα, που στην ουσία το σύνολο των παραμέτρων, τα μεγέθη τους και η βαρύτητα τους είναι άγνωστη και ανίκανη να αντιμετωπιστεί με την συμβατική ανάλυση ευστάθειας.

Στην Αμερική ο Varnes (1970) ένας μεγάλος υποστηρικτής της παραμένουσας τάσης, και οι συνεργάτες του (Varnes και Lee, 1972) θεώρησαν ότι η παραμένουσες τάσεις είναι υπεύθυνες για την δημιουργία απολεπίσεων και αποφλοιώσεων. Σύμφωνα με το Varnes, αν ο γρανίτης κρυσταλλοποιείται σε βάθος και αποφορτίζεται λόγω αποκάλυψης και διάβρωσης, οι συμπιεσμένοι κρύσταλλοι δεν είναι δυνατόν να αποφορτιστούν πλήρως λόγω των συνοριακών δυνάμεων. Ένας ψαμμίτης ο οποίος στερεοποιείται κάτω από υψηλή πίεση δεν είναι δυνατόν να χαλαρώσει όταν ελευθερωθεί. Εντούτοις, η ισορροπία επιτυγχάνεται μεταξύ των δυνάμεων διαστολής στο εσωτερικό των κρυστάλλων και αυτές που συγκρατούν τους κρυστάλλους στα σύνορα τους ή στην στερεοποίηση. Η παραμένουσα τάση στα πετρώματα μπορεί να υπάρξει μόνο σε ένα σύστημα ισορροπίας εσωτερικών δυνάμεων.

Οι Reik και Vardar (1974) θεώρησαν ότι οι δυνάμεις που μετριούνται επί τόπου στα βουνά θα πρέπει να απαρτίζονται από: α) τις τάσεις λόγω βαρύτητας, β) τις τάσεις που γεννιούνται λόγω των υπάρχουσων τεκτονικών δυνάμεων, γ) και τις παραμένουσες τάσεις. Κατασκεύασαν μοντέλα για την παραμένουσα τάση με την χρήση πλακιδίων πλεξιγκλάς με σπές τις οποίες τις γέμισαν με ρητίνη καθώς τα πλακίδια ήταν κάτω από φορτία.

Εντούτοις, οι ερωτήσεις παραμένουν για το πώς μπορούν να εξηγηθούν φαινόμενα όπως η διάρρηξη πετρωμάτων, αποφλοίωση και απολέπιση πετρωμάτων, χωρίς να καταφεύγουμε στην λογική της παραμένουσας τάσης.

### **2.6.2 ΑΙΦΝΙΔΙΑ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Η διάρρηξη των πετρωμάτων είναι ξαφνική αφού εκρηκτικές αποκολλήσεις όγκων από τοιχώματα και οροφές υπογείων ανοιγμάτων μπορούν να πραγματοποιηθούν αμέσως μετά την εκσκαφή των ανοιγμάτων ή και λίγο αργότερα. Η δραστηριότητα αυτή των πετρωμάτων έχει παρατηρηθεί σε λατομικές περιοχές, υπόγεια ανοίγματα και σήραγγες και η συχνότητά τους αυξάνει καθώς αυξάνει το βάθος τους, ειδικά σε εκσκαφές από 700m και πάνω (Wahlstrom, 1973). Ο Blake (1972) λαμβάνοντας υπόψη του τους μηχανισμούς της ξαφνικής διάρρηξης έδωσε την εξής εξήγηση: όταν οι μεταλλευτικές εκσκαφές που δημιουργούνται με την εκσκαφή υπογείων ανοιγμάτων διαταράσσουν το πεδίο των βαρυτικών και τεκτονικών τάσεων, η ενέργεια των τάσεων και των παραμορφώσεων συγκεντρώνεται γύρω από το άνοιγμα. Όταν το εντατικό πεδίο φτάσει την αντοχή του πετρώματος, το πέτρωμα αστοχεί εξαιτίας των γεωμετρικών και των γεωλογικών επιπτώσεων ή λόγω του βάθους.

Στις υπόγειες εκσκαφές, μια ακαριαία ελαστική παραμόρφωση εμφανίζεται αρχικά και λίγο αργότερα καθώς αναπτύσσονται οι τάσεις συνοδεύοντας τις προσωρινές ελαστικές παραμορφώσεις μετατρέπονται σε σταθερή κατάσταση ερπυσμού, με αποτέλεσμα να φτάνουμε σε μία κατάσταση τάσεων πολύ κοντά στο όριο διαρροής του πετρώματος και τελικά το πέτρωμα να εκρήγνυται. Η χρονική καθυστέρηση εξαρτάται από την αντοχή του πετρώματος και το βάθος.

Η ξαφνικές διαρρήξεις των πετρωμάτων στις μεταλλευτικές κατασκευές είναι έντονα επικίνδυνες για τον ανθρώπινο παράγοντα. Γενικά, φαίνεται ότι η θεωρία της παραμένουσας τάσης στο μηχανισμό των εκρηκτικών διαρρήξεων των πετρωμάτων έχει υποχωρήσει.

### **2.6.3 ΣΧΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ**

Οι γεωλόγοι δίνουν μεγάλο ενδιαφέρον στις οικογένειες των ασυνεχειών, καταγράφοντας τις παραμορφώσεις ανά περιοχές που μπορούν με ακρίβεια να τις αξιολογήσουν μόνο αν έχουν κατανοήσει την προέλευση των ασυνεχειών. Κάποιες οικογένειες ασυνεχειών μπορούν να σχηματίζονται λόγω τεκτονικών δυνάμεων ενώ κάποιες άλλες όχι. Κάτι αντίστοιχο είναι και εμφάνιση σχισμών στα πετρώματα. Η δημιουργία σχισμής μπορεί να οριστεί σε δύο

κατηγορίες: η μία είναι η οριζόντια και η άλλη είναι κατά προσέγγιση αλλά όχι ακριβώς παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους. Σύμφωνα με την ορολογία των γεωλόγων ο όρος αποφλοιώση ορίζεται ως η διαδικασία όπου λεπτά (από μερικά εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα) τμήματα, ομόκεντρα κελύφη, φέτες, φλούδες σπάνε διαδοχικά, θρυμματίζονται και απομακρύνονται από την επιφάνεια ενός μεγαλύτερου όγκου πετρώματος. Ο Bradley ταξινόμησε την αποφλοιώση στις εξής κατηγορίες:

- θερμική αποφλοιώση που είναι αποτέλεσμα υψηλών θερμοκρασιών στο πέτρωμα
- χημική που πραγματοποιείται όταν υπάρχει αλλαγή στην χημική σύσταση του πετρώματος με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση του όγκου
- και φυσική απολέπιση που παρατηρείται σε συμπαγή κρυσταλλικά πετρώματα ακολουθώντας την εκτόνωση συσσωρευμένων τάσεων όταν λόγω της αποσάθρωση αποκαλύπτονται κάποια πετρώματα που ήταν θαμμένα.

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΗΜΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ**

Τα ορυκτά και τα πετρώματα είναι ευάλωτα (ευπαθή) σε επιθέσεις από το νερό, το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και άλλους χημικούς παράγοντες κάτω από υποαερόβιες συνθήκες. Η αντίδραση καλείται χημική γήρανση, και για τη μελέτη της έχει δημοσιευθεί πλήθος εργασιών. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλά δεδομένα από τους γεωχημικούς, παρατηρείται έλλειψη στοιχείων για τη μελέτη της χημικής γήρανσης από τη σκοπιά της χημικής θερμοδυναμικής, του μηχανισμού και της κινητικής της γήρανσης. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια παρατίθενται με συντομία οι βασικές αρχές της χημικής θερμοδυναμικής. Πολλοί συγγραφείς όπως για παράδειγμα οι Schmitt (1962), Garrels and Christ (1965), Stumm and Morgan (1970, 1981), Morel (1983), Nordstrom and Munoz (1985) μελετούν τη χημική γήρανση με βάση θεωρίες της χημικής θερμοδυναμικής.

#### **3.1 ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

Πριν την εισαγωγή των νόμων της θερμοδυναμικής είναι απαραίτητο να σημειωθούν οι θεμελιώδεις μεταβλητές και οι χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας ενός θερμοδυναμικού συστήματος. Οι θεμελιώδεις μεταβλητές ενός συστήματος είναι:

T: η απόλυτη θερμοκρασία, μια εντατική ιδιότητα (intensive property),

S: η εντροπία, μια εντατική ιδιότητα,

P: η πίεση, μια εντατική ιδιότητα,

V: ο όγκος, μια εκτατική ιδιότητα (extensive property), και

N<sub>i</sub>: ο αριθμός των γραμμομορίων του συστατικού *i*, μια εκτατική ιδιότητα.

Ο όρος εντατική ιδιότητα (intensive property), σημαίνει μια ιδιότητα ανεξάρτητη από την ποσότητα ή το σχήμα της ουσίας που μελετάται, ενώ εκτατική ιδιότητα (extensive property) είναι μια μη έμφυτη ιδιότητα του συστήματος, όπως ο όγκος ή η εσωτερική ενέργεια που μεταβάλλεται με την ποσότητα της ουσίας στο σύστημα. Η εντροπία καθορίζεται ως μέτρο

του μεγέθους διαταραχής ενός συστήματος και μεταβάλλεται όταν το σύστημα απορροφά ή ενσωματώνει θερμότητα:

$$dS = \frac{dq}{T} \quad (3.1)$$

όπου  $dS$  είναι η μεταβολή της εντροπίας,  $dq$  η μεταβολή της θερμότητας και  $T$ , η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η μεταβολή.

Οι καταστάσεις μεταφοράς ενέργειας σε ένα σύστημα είναι:

$q$ : η θερμότητα που μεταφέρεται στο σύστημα από το περιβάλλον του, και

$w$ : το έργο που γίνεται σε ένα σύστημα από το περιβάλλον του.

Οι χαρακτηριστικές μεταβλητές μιας κατάστασης (characteristic state functions) είναι :

$E$ : η εσωτερική ενέργεια, μια εκτατική ιδιότητα,

$H$ : η ενθαλπία, μια εκτατική ιδιότητα,

$A$ : η ελεύθερη ενέργεια Helmholtz, μια εκτατική ιδιότητα, και,

$G$ : η ελεύθερη ενέργεια Gibbs, μια εκτατική ιδιότητα.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν με συντομία οι θεμελιώδεις νόμοι της θερμοδυναμικής. Ο μηδενικός νόμος αναφέρει:

*Εάν δύο συστήματα είναι και τα δύο σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο σύστημα, τότε είναι σε θερμική ισορροπία και μεταξύ τους.*

Στην περίπτωση αυτή λέγεται ότι έχουν την ίδια θερμοκρασία. Η ιδιότητα που καθορίζεται με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται εμπειρική θερμοκρασία και ο μηδενικός νόμος παραφράζεται ως εξής: Συστήματα σε θερμική ισορροπία έχουν την ίδια θερμοκρασία. Στην ουσία ο νόμος αυτός εισάγει την θερμοκρασία  $T$  σαν μια θερμοδυναμική ιδιότητα.

Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής (διατήρηση ενέργειας) είναι:

*Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας,  $dE$ , είναι το άθροισμα της θερμότητας που μεταφέρεται στο σύστημα,  $dq$ , και το έργο που παράγεται στο σύστημα από το περιβάλλον,  $dw$ :*

$$dE = dq + dw \quad (3.2)$$

Το έργο που γίνεται σε ένα θερμικά μονωμένο σύστημα είναι ανεξάρτητο της πηγής και της διαδρομής, διαμέσου της οποίας το σύστημα περνά από την αρχική στην τελική κατάσταση.

Για μια πεπερασμένη αλλαγή ισχύει:

$$\Delta E = q + W \quad (3.3)$$

Υπάρχουν εξωτερικές δράσεις διαφορετικές από το έργο που οδηγούν σε αλλαγή της κατάστασης και κατά συνέπεια σε μια αλλαγή της ενέργειας του υπό μελέτη συστήματος:

$$q = \Delta E - W \text{ (κλειστό σύστημα)} \quad (3.4)$$

Η ποσότητα,  $q$ , καλείται θερμότητα και παρέχεται ή απορροφάται από το σύστημα. Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής είναι συνεπώς ισοδύναμος με την αρχή διατήρησης της ενέργειας ενός συστήματος.

Ο πλέον ακριβής ορισμός για τον δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής θεωρείται ότι έχει δοθεί από τους Stumm and Morgan (1981) και είναι ο εξής:

*Η αλλαγή της εσωτερικής εντροπίας για ένα κλειστό σύστημα είναι μηδενική στην ισορροπία και θετική για μια αυθόρμητη (spontaneous) διαδικασία. Η θερμότητα που μεταφέρεται σε ένα κλειστό σύστημα, διαιρούμενη με τη θερμοκρασία  $T_a$ , είναι ίση ή μικρότερη από την αύξηση της εντροπίας για κάθε δυνατή διαδικασία.*

Η ολική αλλαγή της εντροπίας ενός κλειστού συστήματος,  $dS_{sys}$ , είναι το άθροισμα της αλλαγής μέσα στο σύστημα,  $dS_{int}$ , και της εντροπίας που μεταφέρεται στο σύστημα από το περιβάλλον,  $dS_{sur}$ ,

$$dS_{sys} = dS_{int} + dS_{sur} \quad (3.5)$$

όπου το  $dS_{sur}$  ορίζεται ως εξής:

$$dS_{sur} = \frac{dq}{T} \quad (3.6)$$

Για μια αντιστρεπτή ή για μια κατάσταση ισορροπίας του συστήματος ισχύει:

$$dS_{int} = 0 \quad (3.7)$$

και για μια αυθόρμητη ή φυσική διαδικασία στο σύστημα,

$$dS_{int} > 0 \quad (3.8)$$

Έτσι για κάθε δυνατή διαδικασία,

$$dS_{int} \geq 0 \quad (3.9)$$

και κατά συνέπεια,

$$dS_{sys} \geq \frac{dq}{T} \quad (3.10)$$



Η ολική αλλαγή της εντροπίας ενός μονωμένου συστήματος, όπως το σύμπαν (universe), είναι  $dS_{uni}$  που αποτελεί το άθροισμα της αλλαγής της εντροπίας μέσα στο σύστημα,  $dS_{sys}$  και εκείνης του περιβάλλοντος,  $-dS_{sur}$ ,

$$dS_{uni} = dS_{sys} - dS_{sur} \quad (3.11)$$

ή

$$dS_{uni} = dS_{sys} - \frac{dq}{T} \quad (3.12)$$

Η τελευταία έκφραση υποδηλώνει πως,

$$dS_{uni} \geq 0 \quad (3.13)$$

για κάθε δυνατή διαδικασία σε ένα μονωμένο σύστημα (σύμπαν). Αναλόγως,

$$dS_{sys} \geq \frac{dq}{T} \quad (3.14)$$

Ο δεύτερος νόμος, η αρχή αύξησης της εντροπίας, παρέχει ένα κριτήριο για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης των φυσικών διαδικασιών: ακολουθούν την κατεύθυνση διαμέσου της οποίας το  $dS_{sys}$  αυξάνει. Επίσης παρέχει ένα κριτήριο για ισορροπία : οι φυσικές διαδικασίες τελειώνουν όταν το  $\int dS_{sys}$  φθάνει στο μέγιστο.

Ο ορισμός του τρίτου νόμου της θερμοδυναμικής σύμφωνα με τον Lupis (1983) έχει ως εξής:

*Αν και η εντροπία κάθε στοιχείου, σε μερική κρυσταλλική κατάσταση και σε απόλυτα μηδενική θερμοκρασία, θεωρείται μηδενική, κάθε ουσία έχει μια πεπερασμένη θετική εντροπία. Η εντροπία όμως μπορεί να μηδενισθεί, σε απόλυτα μηδενική θερμοκρασία, ακόμη και στην περίπτωση τέλειων κρυσταλλικών ουσιών (Τρίτος θερμοδυναμικός νόμος).*

Η αύξηση της εντροπίας λόγω της θερμοκρασιακής ανόδου μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση,  $C_p$ . Καθώς η εντροπία στους 0°K για όλες τις ουσίες είναι μηδενική, η εντροπία σε κάθε θερμοκρασία υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$S = \int_0^T \frac{C_p}{T} dT \quad (3.15)$$

Κατά τη φάση της μετάβασης, από την απόλυτα μηδενική θερμοκρασία στη θερμοκρασία που μελετάται, η εντροπία της μετάβασης  $q_{trans} / T_{trans}$  πρέπει να προστίθεται στον υπολογισμό του S.

### 3.2 ΧΗΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

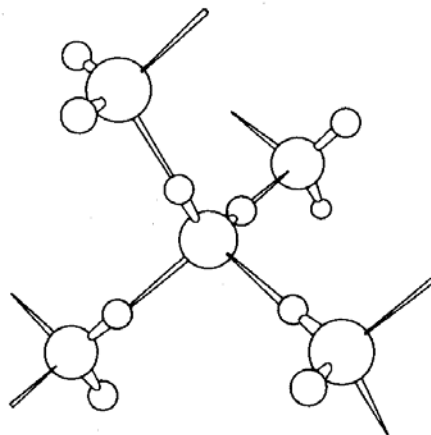
Η συστηματική προσέγγιση της χημικής γήρανσης είναι συνώνυμη με τη μελέτη της χημικής κινητικής, του μηχανισμού και της θερμοδυναμικής των χημικών διαδικασιών της γήρανσης. Πριν όμως από τη μελέτη του μηχανισμού και των μορφών της χημικής γήρανσης πρέπει να προηγηθεί μια αναφορά στους διάφορους χημικούς παράγοντες όπως το νερό και πολλά οξέα που εμπλέκονται στη γήρανση.

#### 3.2.1 ΝΕΡΟ

Το νερό αποτελεί την πιο κοινή ουσία και παίζει σημαντικό ρόλο στη χημική γήρανση, τόσο ως διαλύτης όσο και ως χημικό αντιδραστήριο. Είναι χαρακτηριστικό ότι όλες οι διαδικασίες χημικής γήρανσης δεν θα πραγματοποιούνταν χωρίς την παρουσία του νερού. Στη συνέχεια παρατίθενται στοιχεία για τη δομή των μορίων του νερού, την υγρή κατάστασή του και για τις βασικές χημικές του ιδιότητες.

Τα μόρια του νερού αποτελούνται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο υδρογόνου. Για το οξυγόνο η ηλεκτρονιακή διαμόρφωση του ατόμου του είναι  $1s^2 2s^2 2p^4$  και για το υδρογόνο είναι  $1s^1$ . Το μόριο του νερού είναι αποτέλεσμα επικάλυψης των δύο p τροχιακών του οξυγόνου με το s τροχιακό των δύο ατόμων του υδρογόνου. Το σχήμα του μορίου είναι γωνιώδες και καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά κατεύθυνσης των τροχιακών που εμπλέκονται στη δημιουργία του δεσμού. Η δομή του μορίου του νερού έχει ως αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται από υψηλή διηλεκτρική σταθερά, 81.07 στους 18°C (εν συγκρίσει για παράδειγμα με την αιθυλική αλκοόλη, 25.8 στους 20°C). Στην υψηλή του διηλεκτρική σταθερά οφείλεται μια από τις χαρακτηριστικότερες ιδιότητες του νερού, η συμπεριφορά του ως ηλεκτρολυτικός διαλύτης. Ο λόγος είναι ότι η διαλυτότητα των ηλεκτρολυτών στο νερό είναι μεγάλη εξαιτίας της υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς η οποία εξασθενεί τις δυνάμεις μεταξύ των ιόντων. Όταν ένας διαλύτης προστίθεται στο νερό, αποσυντίθεται στα ιόντα του λόγω της υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς του διαλύτη, ο οποίος μειώνει τις δυνάμεις έλξης μεταξύ των ιόντων.

Η δομή του υγρού νερού είναι σύνθετη, οφείλεται σε δεσμό υδρογόνου και έχει μελετηθεί με πολλούς τρόπους όπως ακτίνες X, Ramman και IR Spectra. Οι Narten et al. (1973) πρότειναν ένα μοντέλο όπως αυτό του Σχήματος 3.1, Yatsu 1988.



Σχήμα 3.1 Δομή του νερού σε υγρή κατάσταση. Οι μεγάλοι κύκλοι αναπαριστούν το οξυγόνο, ενώ οι μικροί τα άτομα του υδρογόνου.

Ένα άτομο οξυγόνου αποτελεί τη βάση και περιβάλλεται από τέσσερα άλλα άτομα οξυγόνου που είναι τοποθετημένα σε μέσες αποστάσεις  $2.85\text{\AA}$  στις γωνίες ενός κανονικού τετραέδρου. Αυτή η δομή προσδίδει μια σχέση προσανατολισμού των γειτονικών μορίων νερού γύρω από ένα μόριο. Η φύση της δομής του υγρού νερού είναι ασυνήθιστη και δεν παρατηρείται στα συνήθη υγρά. Η δομή αυτή αλλοιώνεται και γίνεται ασθενική πάνω από τους  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Έτσι καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, η δομή του υγρού νερού αποσυντίθεται σε μονομερή και το νερό συμπεριφέρεται όπως τα συνήθη υγρά.

Το νερό αποτελεί τον πιο εκτεταμένο ασθενή ηλεκτρολύτη στη φύση. Αποσυντίθεται σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση,



ή σε σύντομη μορφή



Το ιόν  $H_3O^+$  είναι ένα πραγματικό κατιόν που αποτελείται από ένα πρωτόνιο που συνδυάζεται με ένα μόριο νερού. Η μορφή  $H^+$  χρησιμοποιείται απλουστευτικά παρά το γεγονός ότι τα ιόντα υδρογόνου δεν υπάρχουν ελεύθερα σε υδατικά διαλύματα. Η αποσύνθεση του νερού είναι υπεύθυνη για τις αντιδράσεις υδρόλυσης. Η σταθερά ισορροπίας για την παραπάνω αντίδραση στους  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  είναι:

$$\frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = K = 1.8 \times 10^{-16} \quad (3.18)$$

Η συγκέντρωση του νερού,  $[H_2O]$ , σε ασθενή υδατικά διαλύματα είναι κατά προσέγγιση σταθερή και ίση με 55.5 moles/liter, οπότε,

$$[H^+] = [OH^-] = \sqrt{K_w} = 10^{-7} M \quad (3.19)$$

Κατά σύμβαση χρησιμοποιείται η λογαριθμική έκφραση της συγκέντρωσης ή της σταθεράς ισορροπίας. Γενικά,

$$pH = -\log [H^+] \quad (3.20)$$

ή

$$pH = -\log a_{H^+} \quad (3.21)$$

όπου  $a_{H^+}$  είναι η ενεργότητα των ιόντων του υδρογόνου.

Το καθαρό νερό έχει  $pH = 7$  και καλείται ουδέτερο. Εάν το  $pH < 7$  ή  $pH > 7$  το διάλυμα είναι όξινο ή βασικό αντίστοιχα. Η συγκέντρωση των ιόντων του υδρογόνου  $[H^+]$ , στα φυσικά νερά έχει μεγάλη σημασία για όλες τις χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με το σχηματισμό, μετατροπή και διάλυση των ορυκτών. Το  $pH$  του διαλύματος καθορίζει την κατεύθυνση της διαδικασίας μετατροπής των ορυκτών.

### 3.2.2 ΟΞΕΑ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.

Στις διεργασίες της χημικής γήρανσης, όπως είναι οι αλληλεπιδράσεις στερεών (ορυκτών και πετρωμάτων) με το νερό, το πιο διαδεδομένο όξινο συστατικό είναι το  $CO_2$ , το οποίο σχηματίζει ανθρακικό οξύ,  $H_2CO_3$ , με το νερό. Επίσης πολύ διαδεδομένα οξέα είναι το  $HCl$  και το  $H_2SO_4$  τα οποία προέρχονται από ηφαίστεια και θερμές πηγές. Το  $H_2SO_4$  μπορεί ακόμη να προέρχεται από διεργασίες γήρανσης θειούχων ενώσεων με ορυκτά και από την αποσύνθεση οργανικού υλικού. Μερικές ποσότητες του  $HNO_3$  παράγονται από ατμοσφαιρικά συστατικά και βιοτικές δραστηριότητες.

#### Διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ )

Η μέση ατμοσφαιρική συγκέντρωση του  $CO_2$  είναι περίπου 320 ppm κατ' όγκο και παρουσιάζει τάσεις αύξησης. Οι συγκεντρώσεις του  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα είναι γνωστό πως ακολουθούν έναν εποχιακό κύκλο εξαιτίας της φωτοσύνθεσης και αναπνοής των φυτών και

παρουσιάζουν ανοδική τάση κύρια λόγω της αυξανόμενης καύσης πρώτων υλών (πετρέλαιο κ.α.). Η ενσωμάτωση του CO<sub>2</sub> στις σταγόνες της βροχής είναι σύνθετη διαδικασία και ο ρυθμός της είναι μια συνάρτηση με πολλές παραμέτρους, όπως η σταθερά διάχυσης της αέριας φάσης, η συγκέντρωση της αέριας φάσης στην ατμόσφαιρα, η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων της βροχής και ο συντελεστής προσαρμογής που δείχνει την αλληλεπίδραση αερίου – σταγόνας. Σύμφωνα και με το νόμο του Henry η μάζα του αερίου που διαλύεται από έναν δεδομένο όγκο υγρού, σε δεδομένη θερμοκρασία, είναι ανάλογη της πίεσης του αερίου με το οποίο βρίσκεται ισορροπία. Κατά συνέπεια η διαλυτότητα του CO<sub>2</sub> στο καθαρό νερό είναι:

$$[CO_2(aq)] = K_H P_{CO_2} \quad (3.22)$$

όπου  $K_H$  η σταθερά του νόμου του Henry και  $P_{CO_2}$  η μερική πίεση του CO<sub>2</sub>, σύμφωνα με τον Yatsu 1988.

### **Θειούχα και νιτρικά οξείδια**

Πέρα από την προερχόμενη από τον άνθρωπο μόλυνση, πηγές του θειικού οξέος είναι το διοξείδιο του θείου και το υδρόθειο που εκπέμπονται από ηφαίστεια και θερμές πηγές, τα θειούχα ορυκτά (για παράδειγμα πυρίτης και μαρμασίτης) που συναντώνται σε μεταλλεύματα καθώς επίσης και τα κοιτάσματα άνθρακα και οι οργανικοί σχιστόλιθοι. Σχετικά με τις εκπομπές των ηφαιστείων, η κύρια θειούχα ένωση σε μαγματικές θερμοκρασίες και ατμοσφαιρική πίεση είναι το SO<sub>2</sub>. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται το SO<sub>2</sub> αντιδρά με το H<sub>2</sub>O και σχηματίζεται H<sub>2</sub>S. Όταν η μερική πίεση του οξυγόνου αυξάνει, το SO<sub>2</sub> επίσης αυξάνει με κατανάλωση του H<sub>2</sub>S. Το SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα οξειδώνεται με φωτοοξείδωση και σχηματίζει H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Το H<sub>2</sub>S σύμφωνα με τον Eriksson (1952) οξειδώνεται σε SO<sub>3</sub> και διαλύεται στο νερό.

Ξέχωρα από τις πηγές του HNO<sub>3</sub> στη φύση, τα οξείδια του αζώτου NO και NO<sub>2</sub> παράγονται στην ατμόσφαιρα με κεραυνούς. Η αντίδραση του NO<sub>2</sub> με το OH σχηματίζει νιτρικό οξύ (HNO<sub>3</sub>) και εκείνη του NO με το OH νιτρώδες οξύ (HNO<sub>2</sub>). Η ολική ποσότητα των οξειδίων του αζώτου, NO<sub>x</sub>, που παράγονται από κεραυνούς στην ατμόσφαιρα, αποτέλεσε αντικείμενο εκτενούς μελέτης και βρέθηκε πως εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η υγρασία, το περιεχόμενο υγρό νερό, η πίεση και οι πολλαπλές αστραπές. Στη φύση η αποσάθρωση σκουπιδιών και άχυρων από φυτά και άλλα οργανικά υλικά παράγει μεγάλες ποσότητες νιτρικού οξέος.

### 3.3 ΤΡΟΠΟΙ ΧΗΜΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

Όπως έχει προαναφερθεί χημική γήρανση είναι η διαδικασία με την οποία πετρώματα και ορυκτά μετασχηματίζονται με χημικούς συνδυασμούς, σε υλικά πιο σταθερά από ότι ήταν αρχικά, κάτω από τις συνθήκες που επικρατούν πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης. Οι αντιδράσεις που γίνονται είναι μονής κατεύθυνσης. Στις διαγενετικές μεταβολές όμως, σε ιζήματα θαλασσών ή λιμνών, οι αντιδράσεις μπορεί να ακολουθήσουν την αντίθετη κατεύθυνση απ' αυτή της γήρανσης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αυθεντικών ορυκτών όπως ο χαλαζίας και οι άστριοι. Οι αντιδράσεις με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της γήρανσης καλούνται αντιστρεπτή γήρανση (Berner 1971, Machin 1986).

Στην παρούσα ενότητα θα αναπτυχθούν οι χημικές αντιδράσεις που συμμετέχουν στις διαδικασίες της γήρανσης και οι οποίες είναι η ενυδάτωση, η διάλυση και η οξειδοαναγωγή. Γενικά η κατάταξη των τρόπων χημικής γήρανσης στις παραπάνω τρεις κατηγορίες φαίνεται σωστή, αν και σε διάφορες μελέτες απαριθμούνται αρκετοί μερικοί μηχανισμοί αντιδράσεων που θεωρούνται τύποι γήρανσης προκαλώντας στην ουσία σύγχυση.

#### 3.3.1 ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ (HYDRATION)

Στις ξηρές περιοχές επικρατεί η γήρανση λόγω αλάτων (salt weathering), αντικείμενο πάνω στο οποίο έχει δημοσιευθεί μεγάλος αριθμός εργασιών. Από αυτές διαφαίνεται πως στην γήρανση με άλατα εμπλέκονται δυνάμεις που προέρχονται από την ανάπτυξη των κρυστάλλων καθώς και η ενυδάτωση. Οι Sperling and Cooke (1985) σχεδίασαν και εκτέλεσαν περίπλοκα πειράματα, προκειμένου να προσδιορίσουν χωριστά, την επίδραση της κρυσταλλοποίησης των αλάτων και της ενυδάτωσης, κάτω από τις υπό προσομοίωση ζεστές και ξηρές συνθήκες ερήμου. Τα πειράματα τους οδήγησαν στο συμπέρασμα πως η ενυδάτωση του θεικού νατρίου είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός για την αποσάθρωση των πετρωμάτων, αλλά είναι σημαντικά λιγότερο καταστρεπτικός από την πίεση ανάπτυξης των κρυστάλλων.

Η κρυσταλλοποίηση του τρεναρδίτη ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) είναι περισσότερο αποτελεσματική στη γήρανση των πετρωμάτων σε σύγκριση με την ανάπτυξη κρυστάλλων του μιραμπιλίτη ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της κρυσταλλοποίησης και της ενυδάτωσης του θεικού νατρίου, είναι εφικτή κάτω από συνθήκες ερήμου (ζεστή και ξηρασία), με σημαντικές ημερήσιες αλλαγές της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Για πιο αξιόπιστη αξιολόγηση των στοιχείων απαιτείται περαιτέρω γνώση σχετικά με τους ρυθμούς κρυσταλλοποίησης και ενυδάτωσης, δεδομένα που συνήθως είναι ελλιπή.

Από πολλούς ερευνητές, όπως οι Winkler and Wilhelm (1970), υπολογίστηκε η πίεση ενυδάτωσης διαφόρων κοινών αλάτων, σε διαφορετικές θερμοκρασίες και σχετικές υγρασίες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συσχέτιση της τιμής της ελεύθερης ενέργειας Gibbs, που είναι η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού, με τη μέγιστη πίεση ενυδάτωσης κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Η απλουστευμένη σχέση συσχέτισης είναι:

$$\Delta G_f^\circ - \Delta S^\circ (T - 298.15)K + \Delta V_{r,s} (p - 1) = 0 \quad (2.23)$$

όπου,

$\Delta G_f^\circ$  είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας μιας αντίδρασης στη συνηθισμένη θερμοκρασία και πίεση, δηλαδή 298.15 °K και 1 bar,

T η θερμοκρασία που υπολογίζεται από τη μεταβολή της ενθαλπίας,  $\Delta H$ , και τη θερμοχωρητικότητα  $C_p$  και  $\Delta V_{r,s}$  η μεταβολή του μοριακού όγκου.

Ο ρυθμός ενυδάτωσης, στην περίπτωση εισόδου του νερού στη δομή του κρυστάλλου, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Για ορισμένα ορυκτά είναι αρκετά γρήγορος, ενώ για άλλα ο ρυθμός ενυδάτωσης είναι αργός. Ο οψιδιανός, που εμφανίζεται σε ποικιλίες του μαύρου και έχει έντονη λάμψη, φαίνεται να μην ενυδατώνεται, αλλά αυτό δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα καθώς μετασχηματίζεται από οψιδιανός (άνυδρο γυαλί), σε περλίτη (ένυδρο γυαλί). Το νερό που περιέχεται στον οψιδιανό, ο οποίος προέρχεται από λάβα που έχει ψυχθεί, είναι συνήθως λιγότερο από 1%. Το νερό που περιέχεται στον περλίτη είναι συνήθως 3-4% κατά βάρος. Το μεγαλύτερο ποσό της υγρασίας θεωρείται πως έχει απορροφηθεί από το περιβάλλον. Οι Jezek and Noble (1978) χρησιμοποίησαν ηλεκτρονική διάταξη μικροανάλυσης για τη μελέτη της ενυδάτωσης και της ανταλλαγής ιόντων στον περλίτη. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα πως το ποσό του νερού ενυδάτωσης ενός γυαλιού καθορίζεται από την ύπαρξη ρηγματών στην πολυμερισμένη δομή του και ο υψηλός βαθμός ενυδάτωσης, σε ένα λεπτό στρώμα, συνοδεύεται από έντονη ιοντοανταλλαγή κατά μήκος των ρωγμών. Σύμφωνα με τη θεωρία τους ο υψηλός βαθμός ενυδάτωσης και ιοντοανταλλαγής αποτελεί ένα αρχικό στάδιο του τελικού σχηματισμού δευτερογενών αργιλικών ή ζεολιθικών συσσωματωμάτων.

Ο αργός ρυθμός ενυδάτωσης του οψιδιανού χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ηλικίας έργων τέχνης από το υλικό αυτό. Οι Friedman and Smith (1960) εξέτασαν έργα τέχνης από οψιδιανό, προερχόμενα από αρχαιολογικούς χώρους, προκειμένου να αποδείξουν ότι ο ρυθμός ενυδάτωσης του είναι επαρκώς γρήγορος για το σχηματισμό περλίτη, θεωρώντας πως κατά την εποχή κατασκευής των έργων τέχνης νέες επιφάνειες οψιδιανού εμφανίζονται εξαιτίας της αποφλοίωσης του. Στις νέες επιφάνειες πιθανόν η ενυδάτωση να αρχίζει με

απόσπαση του νερού από το περιβάλλον. Το βάθος της ενυδάτωσης μετρούνταν και συσχετιζόταν με το χρόνο κατασκευής αυτών των έργων τέχνης. Οι Friedman et al. (1966) πρότειναν την παρακάτω σχέση μεταξύ του βάθους ενυδάτωσης,  $X$ , και του χρόνου,  $t$ ,

$$X^2 = Kt \quad (2.24)$$

όπου το  $K$  κυμαίνεται από  $0.4 \mu\text{m}^2 / 10^3$  χρόνια στους  $5^\circ\text{C}$  έως  $10^4 \mu\text{m}^2 / 10^3$  years στους  $100^\circ\text{C}$ . Η σταθερά του ρυθμού διάχυσης,  $K$ , εκφράζεται ως,

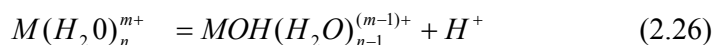
$$K = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.25)$$

όπου  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $E$ , η ενέργεια ενεργοποίησης σε Kcal / mole, και  $R$  η σταθερά των αερίων. Υπολογίστηκε πως η ενέργεια ενεργοποίησης της ενυδάτωσης είναι περίπου 20 Kcal / mole.

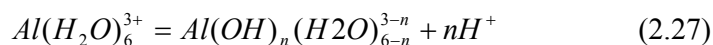
Σε αντίθεση ο σμεκτίτης ενυδατώνεται και αφυδατώνεται πολύ γρήγορα, αντιδρώντας στις αλλαγές της υγρασίας του περιβάλλοντος. Μερικά αργιλικά ορυκτά όπως ο χαλοσίτης, ο βερμικουλίτης, ο ιμογκολίτης και ο αλλοφάνης είναι πολύ επιρρεπή σε αφυδάτωση στον ξηρό αέρα, στο κενό και σε μικρότερο βαθμό σε υψηλές θερμοκρασίες στην ατμόσφαιρα. Είναι επίσης δύσκολο ή γίνεται πολύ αργά να ενυδατωθούν ξανά, ακόμη και σε υγρή ατμόσφαιρα και κανονικές θερμοκρασίες στη φύση.

Οξειδία και υδροξείδια του αλουμινίου ενυδατώνονται σχετικά γρήγορα, μέσα σε μερικές μέρες, σχηματίζοντας ένα φιλμ από  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Επίσης πολύ γρήγορα ενυδατώνονται τα οξειδία του σιδήρου, με αποτέλεσμα οι επιφάνειες τους να παρουσιάζουν τις ιδιότητες του  $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ .

Μια σημαντική χημική ιδιότητα του νερού, που έχει απορροφηθεί στις επιφάνειες μερικών αργιλικών ορυκτών όπως ο βερμικουλίτης και ο σμεκτίτης, είναι η οξύτητα Bronsted. Η ιδιότητα αυτή εκφράζει την οξύτητα των διαλυμένων ανταλλάξιμων κατιόντων και η αντίδραση σύμφωνα με τον Sposito (1984) είναι :



Η έρευνα που έγινε από πολλούς μελετητές σχετικά με την επιφανειακή οξύτητα του μοντμοριλλονίτη, του καολινίτη και της αφυδατικής ουσίας σίλικα τζελ (silica gel) οδήγησε σε μια αντίδραση ταυτόσημη με την παραπάνω:



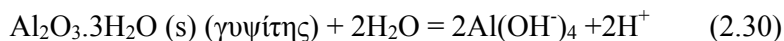
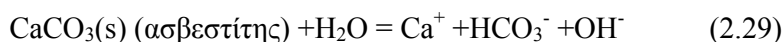


Οι μελετητές προετοίμασαν αργίλους, κορεσμένους σε  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  και  $\text{H}^+$ , και μέτρησαν τις οξύτητές τους σε  $\text{H}_2\text{O}$ , ακετονιτρίλιο (AN) και διμεθυλοφορμαμίδη (DMF) προκειμένου να ερευνηθούν οι όξινες ιδιότητες των αργίλων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως αυτές αυξάνουν δραστικά σε οργανικούς διαλύτες.

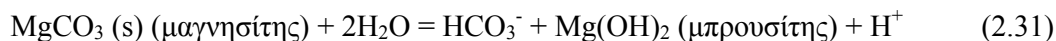
Μια διαδικασία γήρανσης, με αβέβαιη σημασία, έχει ονομασθεί κολλοειδής απόσπαση (colloid plucking). Φαίνεται πιθανό πως τα κολλοειδή των εδαφών έχουν τη δύναμη να αποσπούν πολύ μικρά κομμάτια πετρώματος από τις επιφάνειες με τις οποίες έρχονται σε επαφή. Η ζελατίνη καθώς ξηραίνεται στο γυαλί έχει παρατηρηθεί πως αποσπά κομμάτια γυαλιού και είναι πιθανό κάτι παρόμοιο να συμβαίνει με την ύγρανση και ξήρανση των κολλοειδών εδαφών. Παρόλο που ο μηχανισμός των κολλοειδών δεν έχει επιβεβαιωθεί, ακούγεται λογικό να οφείλεται στην επιφανειακή οξύτητα των αργίλων που είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης νερού στην επιφάνειά τους.

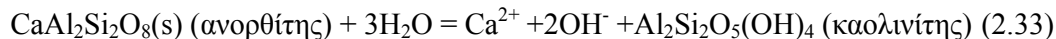
### 3.3.2 ΔΙΑΛΥΣΗ (DISSOLUTION)

Η διάλυση είναι η πιο αποτελεσματική διεργασία στη χημική γήρανση, με την οποία τα φυσικά νερά (ποταμών, λιμνών, ωκεανών και του εδάφους) αποκτούν τη χημική τους σύνθεση. Τα ορυκτά και τα πετρώματα είναι θερμοδυναμικά ασταθή με παρουσία νερού και αέρα, αποσαθρώνονται (μηχανική γήρανση), διαλύονται (χημική γήρανση) και τελικά μεταφέρονται στους ωκεανούς, οι οποίοι λειτουργούν ως δεξαμενές για τη διαλυμένη ύλη που παράγεται από τα υλικά του φλοιού της γης. Ο Habashi (1983) ταξινόμησε τους τύπους των αντιδράσεων διάλυσης όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Ο Morgan (1981) κωδικοποίησε τις τυπικές αντιδράσεις γήρανσης σε δύο κατηγορίες, τις αντιδράσεις διάλυσης και τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Εάν τα είδη των υλικών από τα οποία αποτελείται ένα στερεό είναι ισοδύναμα διαλυτά και η σύνθεση του διαλύματος είναι ισοδύναμη με εκείνη του στερεού. Παραδείγματα τέτοιων αντιδράσεων είναι οι εξής:



Αντίθετα εάν μερικά περισσότερα διαλυτά είδη υλικών περνούν στο διάλυμα σαν διαλυμένη ύλη και άλλα λιγότερο διαλυτά είδη σχηματίζουν ένα παραμένον στρώμα στο στερεό. Αντίστοιχα παραδείγματα τέτοιων αντιδράσεων είναι:





Στον Πίνακα 3.1 ο Habashi (1983) όρισε ως ‘φυσικές’ αντιδράσεις τον διαχωρισμό των ηλεκτρολυτών στο νερό και την ενυδάτωση των ιόντων. Έδωσε τον παρακάτω ορισμό:



Όπου n και m είναι οι αριθμοί ενυδάτωσης των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  αντίστοιχα.

Οι ‘ηλεκτρολυτικοί’ και ‘ηλεκτροχημικοί’ τύποι αντιδράσεων στον πίνακα αυτό σχετίζονται με τις διαδικασίες μεταφοράς ηλεκτρονίων. Ένα είδος αντιδράσεων είναι ο διαχωρισμός των ηλεκτρολυτών στο νερό. Ηλεκτρολύτης είναι μια ουσία της οποίας το διάλυμα έχει την ιδιότητα να είναι αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο όρος διαχωρισμός εκφράζει γενικά το σπάσιμο μιας ενότητας σε δύο μέρη. Ο διαχωρισμός των ηλεκτρολυτών λαμβάνει χώρα μαζί με το σχηματισμό θετικά ή αρνητικά φορτισμένων ιόντων, δηλαδή μαζί με τη διαδικασία του ιονισμού. Όταν ουσίες, όπως το κοινό αλάτι, διαχωρίζονται σε μεγάλη έκταση στο νερό, η σύνθεση του διαλύματος αποτελείται κατά κύριο λόγο από ελεύθερα ιόντα, όπως  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  (ή ακριβέστερα  $\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_{\text{n}}^+$  και  $\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_{\text{m}}^-$ ), εξαιτίας της ενυδάτωσης των ιόντων. Τέτοιες ουσίες ονομάζονται ισχυροί ηλεκτρολύτες. Σε αντίθεση οι ασθενείς ηλεκτρολύτες διαχωρίζονται σε πολύ μικρότερη έκταση σε σχέση με τους ισχυρούς. Κατά τη διαδικασία του διαχωρισμού οι δεσμοί μεταξύ ιόντων ή ατόμων, που στα στερεά είναι κατά κύριο λόγο ιοντικοί, σπάνε σχετικά εύκολα, με το νερό της ενυδάτωσης να παρέχει την ενέργεια για τη διάλυση των ηλεκτρολυτών.

Μεταξύ των εβαποριτών, χλωρίδια όπως το αλάτι ( $\text{NaCl}$ ) και ο συλβίτης ( $\text{KCl}$ ), μερικά θειούχα όπως ο κισερίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) και ο μιραμπιλίτης ( $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) είναι ισχυροί ηλεκτρολύτες. Ο ανυδρίτης είναι πολύ λιγότερο διαλυτός από το αλάτι. Σύμφωνα με τον Blatt (1982), ο γύψος ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) είναι το πρώτο εβαποριτικό ορυκτό που καθιζάνει από την εξάτμιση του θαλασσινού νερού παρά το γεγονός ότι είναι 15% περισσότερο διαλυτός από τον ανυδρίτη. Το αλάτι δεν έχει πολλές εμφανίσεις στη φύση (π.χ. σε προεξοχές βράχων) εν συγκρίσει με το γύψο, επειδή είναι 150 φορές πιο διαλυτός σε σχέση μ’ αυτόν.

Ο βαθμός διαλυτότητας είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης ύλης σε κορεσμένο διάλυμα και δεδομένη θερμοκρασία και εκφράζεται από το λόγο της μάζας (g) της διαλυμένης ύλης σε 100 g διαλύτη ή σε κορεσμένο διάλυμα 100 g. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό οι διαλυτότητες μερικών εβαποριτών είναι οι ακόλουθες:

Εβαπορίτες	Διαλυτότητα (25°C)
Αλάτι NaCl	26.43
Συλβίτης KCl	26.40
Ανυδρίτης CaSO <sub>4</sub>	0.208
Κησερίτης MgSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	26.7

Ο Nernst (1899) απέδειξε πως η ισορροπία μεταξύ ενός στερεού ιοντικού άλατος και του υδατικού του διαλύματος καθορίζεται από τη διαλυτότητα του προϊόντος. Αυτό σημαίνει πως η διαλυτότητα ενός άλατος στο καθαρό νερό εξαρτάται μόνο από τη διαλυτότητα του προϊόντος.

Πίνακας 3.1 Τύποι αντιδράσεων διάλυσης σε υδατικά διαλύματα (Habashi,1983), όπως αναφέρεται από τον Yatsu (1988).

Τύπος	Χαρακτηριστικά	Παραδείγματα
<b>Φυσικός</b>	Ιοντικά στερεά, η διάλυση βασίζεται στην ενυδάτωση και ελέγχεται από τη διάχυση. Ο ρυθμός αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας ανατάραξης.	Χλωριούχο νάτριο στο νερό $\text{NaCl(s)} \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$
<b>Χημικός</b>	Στερεά με ομοιοπολικό δεσμό, η διάλυση ελέγχεται με τη διάχυση ή χημικά, ο ρυθμός αυξάνει με αύξηση της συγκέντρωσης του αντιδραστήριου.	Υδροξείδιο του αλουμινίου σε οξύ ή βάση $\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{Al(OH)}_3 + \text{OH}^- \rightarrow \text{AlO(OH)}_2^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}$ Θεικός μόλυβδος σε κορεσμένο διάλυμα NaCl $\text{PbSO}_4(\text{s}) + 4\text{NaCl}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_2[\text{PbCl}_4](\text{aq}) + \text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ Θειούχος σίδηρος σε οξύ $\text{FeS} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S}$
<b>Ηλεκτροχημικός</b>	Αγώγιμα ή ημιαγώγιμα στερεά, βασίζονται στη μεταφορά ηλεκτρονίων όπως οι διεργασίες οξειδοαναγωγής, ελέγχονται χημικά ή με τη διάχυση, ο ρυθμός είναι μια σύνθετη συνάρτηση της συγκέντρωσης του αντιδραστήριου.	Σίδηρος σε οξύ $\text{Fe} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2$ Θειούχος ψευδάργυρος σε οξυγονωμένο νερό $\text{ZnS(s)} + 2\text{O}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{ZnSO}_4(\text{aq})$ Χρυσός σε διάλυμα με κυάνιο $2\text{Au} + 4\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2[\text{Au(CN)}_2]^- + 2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}_2$
<b>Ηλεκτρολυτικός</b>	Αγώγιμα ή ημιαγώγιμα στερεά, ο ρυθμός είναι ανάλογος του ρεύματος που επιβάλλεται.	Μέταλλα $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$ Σουλφίδια $\text{Ni}_3\text{S}_2 \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{NiS} + 2\text{e}^-$ $\text{NiS} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + \text{S} + 2\text{e}^-$

### 3.3.3 ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗ

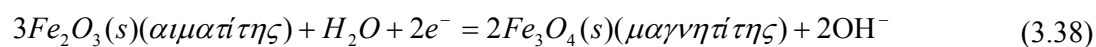
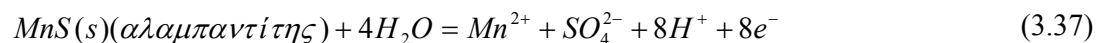
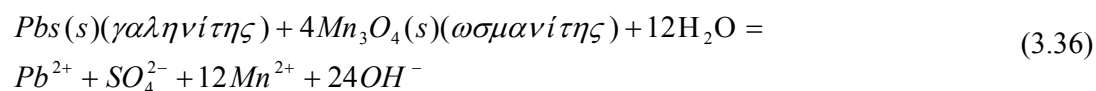
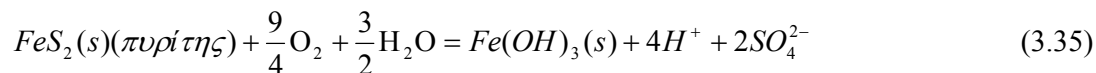
Η οξειδοαναγωγή, που αποτελεί μια συντόμευση της έκφρασης οξείδωση – αναγωγή, ίσως είναι η πιο σημαντική αντίδραση, επειδή και η ίδια η ζωή είναι από τη φύση της μια διαδικασία οξειδοαναγωγής. Στην αρχή του αιώνα μελετήθηκαν εκτενώς τα δυναμικά οξείδωσης – αναγωγής των βιολογικών συστημάτων και προέκυψε σημαντικό πλήθος δεδομένων, που δημοσιεύθηκαν από πολλούς ερευνητές. Τα σημαντικά ευρήματα που προέκυψαν, ιδιαίτερα στο πεδίο της βακτηριολογίας και της βιοχημείας, με τη βοήθεια των δυναμικών οξειδοαναγωγής κατέστη δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και στα εδάφη, για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σ' αυτά. Ο Brown (1934) πρότεινε μια γρήγορη διαδικασία για αρκετά ακριβείς μετρήσεις των δυναμικών στα εδάφη.

Ο Mason (1949) εισήγαγε την άποψη ότι οι διαδικασίες οξείδωσης – αναγωγής σχετίζονται άμεσα με τα διάφορα στάδια του γεωχημικού κύκλου. Θεώρησε πως επειδή το μαγματικό περιβάλλον είναι ισχυρά αναγωγικό, τα πετρώματα που σχηματίζονται με απευθείας στερεοποίηση του μάγματος επιδεικνύουν γενικά χαμηλό βαθμό οξείδωσης. Η γήρανση και η αλλοίωσή τους λαμβάνει χώρα πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης, όπου η παρουσία ελεύθερου οξυγόνου παράγει υψηλό δυναμικό οξείδωσης. Στο τμήμα αυτό του γεωχημικού κύκλου συναντάται η κατάσταση με τη μεγαλύτερη οξείδωση. Η διαγένεση και ο σχηματισμός των πετρωμάτων ίσως είναι αποτέλεσμα κάποιου ποσοστού αναγωγής.

Είναι γνωστό εμπειρικά πως το οξυγόνο οξειδώνει το σίδηρο ή ότι ο σίδηρος σκουριάζει, και για το λόγο αυτό η επιφάνεια του μεταλλικού σιδήρου πρέπει να καλύπτεται με βαφή. Η αντίδραση των μεταλλικών υλικών με το περιβάλλον τους, για παράδειγμα η οξείδωση των μετάλλων, ονομάζεται διάβρωση. Ο όρος διάβρωση με την ευρεία της έννοια υποδηλώνει τη βαθμιαία καταστροφή ενός υλικού ή μιας ουσίας, συνήθως με διάλυση ή με άλλες χημικές διεργασίες. Οι μεταλλωρύχοι συλλέγουν τα μεταλλεύματα, από τα οποία παράγονται τα μέταλλα, με τις διεργασίες στις οποίες τα υποβάλλουν οι μεταλλουργοί. Η διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί ως η επιστροφή των μετάλλων στην αρχική τους μορφή των οξειδίων, θειούχων ή ανθρακικών, όχι σε χαμηλή αλλά σε υψηλή κατάσταση οξείδωσης. Το κόστος που προκαλείται από τη διάβρωση, σε πολλές βιομηχανικές χώρες, θεωρείται ότι υπερβαίνει το 4% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος

τους. Για το λόγο αυτό η έρευνα σχετικά με τη διάβρωση και την πρόληψη της έχει μεγάλη σημασία και συνεχώς διευρύνεται.

Οι Stumm and Morgan (1981) κατέταξαν τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής του σιδήρου και του θείου ως τυπικά παραδείγματα αντιδράσεων γήρανσης:



### 3.4 ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ.

Στην συνέχεια δίνονται μερικά παραδείγματα αντιδράσεων οξειδοαναγωγής με ορυκτά.

#### 3.4.1 ΟΡΥΚΤΑ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Τα κύρια μεταλλεύματα του σιδήρου είναι ο αιματίτης,  $Fe_2O_3$ , ο μαγνητίτης,  $Fe_3O_4$ , ο λιμονίτης,  $FeO(OH)$ , και ο σιδερίτης,  $FeCO_3$ . Χημικά καθαρός σίδηρος παράγεται με αναγωγή των μεταλλευμάτων του στη μεταλλουργία. Ο σίδηρος έχει 8 καταστάσεις οξείδωσης (-II, 0, +I, +II, +III, +IV, +V, +VI). Οι οξειδωτικές καταστάσεις των στοιχείων αντιπροσωπεύονται από τον αριθμό οξείδωσης, δηλαδή τον αριθμό των ηλεκτρονίων τα οποία πρέπει να προστεθούν στα στοιχεία (κατιόντα) για την εξουδετέρωση του φορτίου. Η έννοια επεκτείνεται και στα ανιόντα με τον όρο αρνητικοί αριθμοί οξείδωσης. Ο όρος οξειδωτική κατάσταση χρησιμοποιείται συχνά με την ευρεία έννοια και προσδιορίζεται με ένα θετικό ή αρνητικό αριθμό (αριθμός Roman). Για τον σίδηρο συνηθέστερες είναι οι καταστάσεις Fe(II) και Fe(III), με ηλεκτρονιακές διαμορφώσεις  $d^5$  και  $d^6$  αντίστοιχα. Ο Fe(II) αποκτάται με οξέα που δεν οξειδώνονται και με απουσία αέρα, ενώ ο Fe(III) είναι σταθερός παρουσία αέρα. Το  $Fe_3O_4$  είναι ένα μικτό οξείδιο Fe(II)- Fe(III) το οποίο βρίσκεται στη φύση ως μαγνητίτης. Υδατικά διαλύματα του  $Fe^{2+}$  που δεν περιέχουν άλλους σύνθετους χημικούς παράγοντες, περιέχουν το ιόν  $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$ , που προέρχεται από ενυδάτωση του ιόντος  $Fe^{2+}$  με 6 μόρια νερού. Σε όξινο διάλυμα, το μοριακό οξυγόνο

μετατρέπει το δισθενή σε τρισθενή σίδηρο (ferrous to ferric iron), ενώ σε βασικό διάλυμα η διαδικασία της οξείδωσης είναι πιο ευνοϊκή.

Η διαλυτότητα του Fe στα εδάφη παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον. Μεγάλος αριθμός ερευνητικών εργασιών έχει εστιασθεί στην επίδραση της οξειδοαναγωγής στη διαλυτότητα του σιδήρου σε υδατικά διαλύματα. Οι Schwab and Lindsay (1983) προσπάθησαν να καθορίσουν πως επηρεάζονται, η διαλυτότητα του Fe στα εδάφη και η διαθεσιμότητά του στα φυτά, από την οξειδοαναγωγή. Το συμπέρασμα τους ήταν πως η διαλυτότητα του Fe επηρεάζεται από την τιμή  $pe+pH$ . Όταν  $(pe+pH) > 8$ , η ενεργότητα των  $Fe^{2+}$  ελέγχεται από το υδροξείδιο του σιδήρου ( $Fe_3(OH)_8$ ), ενώ όταν  $(pe+pH) < 8$  ελέγχεται από τον σιδερίτη ( $FeCO_3$ ).

Το  $pe$  εκφράζει τον αρνητικό λογάριθμο της υποθετικής ενεργότητας των ηλεκτρονίων και καθορίζεται ως εξής:

Θεωρείται η οξειδοαναγωγική αντίδραση,



όπου  $O$  το οξειδωτικό στοιχείο,  $ne$  τα  $n$  ηλεκτρόνια,  $Red$  το αναγωγικό στοιχείο,  $\Delta G^\circ$  η πρότυπη ελεύθερη ενέργεια της αντίδρασης και  $K$  η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης. Η υποθετική ενεργότητα των ηλεκτρονίων στην ισορροπία μαθηματικά καθορίζεται ως:

$$(e^-) = \left[ \frac{1}{K} \frac{(Red)}{(O_x)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3.39)$$

Το  $pe$  είναι:

$$pe = -\log(e^-) = \frac{1}{n} \left[ \log K - \log \frac{(Red)}{(O_x)} \right] \quad (3.40)$$

Η ηλεκτρονιακή ενεργότητα είναι μια παράμετρος που δείχνει την ένταση της οξειδοαναγωγής. Μια υψηλή τιμή  $pe$ , δηλαδή χαμηλή συγκέντρωση ( $e^-$ ) δείχνει σχετικά υψηλή τάση για οξείδωση, και μια χαμηλή τιμή  $pe$ , υψηλή ( $e^-$ ), αντιστοιχεί σε σχετικά υψηλή τάση για αναγωγή.

### 3.4.2 ΟΡΥΚΤΑ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ

Το μαγγάνιο είναι ένα στοιχείο το οποίο βρίσκεται σε σχετική αφθονία στο φλοιό της γης και παρουσιάζει 11 οξειδωτικές καταστάσεις (-III, -II, -I, 0, +I, +II, +III, +IV, +V, +VI, +VII).

Το Mn(II) είναι η πιο σταθερή κατάσταση, καθώς οξειδώνεται γρήγορα σε αλκαλικό διάλυμα. Σύμφωνα με τους ερευνητές Cotton and Wilkinson(1966) σε βασικό μέσο σχηματίζεται το υδροξείδιο,  $Mn(OH)_2$ , το οποίο οξειδώνεται εύκολα από τον αέρα. Οι Murray et al. (1985) μελέτησαν τις αρχικές στερεές φάσεις, που προκύπτουν ως προϊόντα κατά την οξείδωση του υδατικού Mn(II) σε pH 9 και 25 °C σε διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου. Η ανάλυση τους περιελάμβανε μορφολογία (TEM), ορυκτολογία (XRD), λόγο O/Mn, οξειδωτικές καταστάσεις του μαγγανίου καθώς και μελέτη του διαλυμένου μαγγανίου. Το στερεό που σχηματίζεται αρχικά, κάτω από τις συνθήκες που περιγράφηκαν παραπάνω, είναι  $Mn_3O_4$  (ουσμάνιτης), με ίχνη από  $\beta MnOOH$  (feitknechtite) και  $\gamma MnOOH$  (μαγγανίτης). Οι αναλύσεις έδειξαν πως στην επιφάνεια παρατηρείται μόνο η οξειδωτική κατάσταση Mn(III). Μετά από μερικούς μήνες η μορφή  $\beta MnOOH$  αρχίζει να παρουσιάζεται σε αφθονία, αλλά αυτό είναι ένα παροδικό χαρακτηριστικό γιατί σε οκτώ μήνες το  $Mn_3O_4$  και το  $\beta MnOOH$  μετατρέπονται πλήρως σε  $\gamma MnOOH$ .

Στη φύση ενώσεις του Mn(IV) και του Mn(III) υπάρχουν ως στερεές φάσεις σε οξειδωτικά περιβάλλοντα, ενώ το Mn(II) επικρατεί σε διαλύματα και σε στερεές φάσεις κάτω από αναγωγικές συνθήκες. Οι Schwab and Lindsay (1983) μέτρησαν τη διαλυτότητα του Mn κάτω από ελεγχόμενες οξειδοαναγωγικές συνθήκες και τα πειραματά τους έδειξαν πως σε ισχυρό οξειδοαναγωγικό περιβάλλον ( $(pe+ pH) > 15$ ), η διαλυτότητα του μαγγανίου ελέγχεται από τα οξειδιά του, ενώ όταν  $(pe+ pH) < 15$  ελέγχεται από το  $MnCO_3$ .

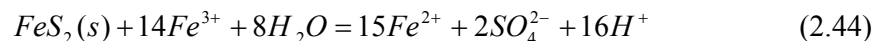
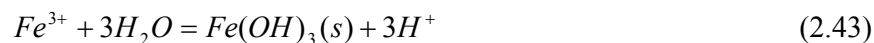
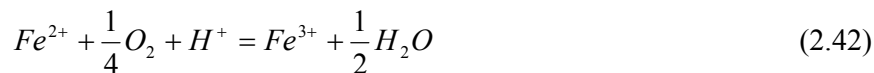
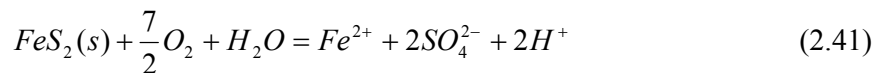
### 3.4.3 ΘΕΙΟΥΧΑ ΟΡΥΚΤΑ

Οι πιο συνήθεις εμφανίσεις του θείου σε μορφή σουλφιδίων είναι ο πυρίτης,  $FeS_2$ , ο πυροτίτης,  $Fe_7S_8-FeS$ , ο χαλκοπυρίτης  $CuFeS_2$ , ο σφαλερίτης,  $ZnS$  και ο γαληνίτης,  $PbS$ . Σε μορφή θεικών ορυκτών οι πιο συνήθεις εμφανίσεις του είναι ο βαρίτης,  $BaSO_4$ , ο σελεστίτης,  $SrSO_4$ , ο γύψος,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , και ο ανυδρίτης  $CaSO_4$ . Μια μεγάλη ποικιλία από αντιδράσεις είναι δυνατές επειδή το S αποτελεί μια από τις πιο βασικές τροφές μικροοργανισμών και ζώων, και έτσι από τους οργανισμούς ξεκινά μια σύνθετη σειρά οξειδοαναγωγικών γεγονότων που περιλαμβάνουν το S.

Σχετικά με την οξείδωση του πυρίτη υπάρχει μια γενική ομοφωνία απόψεων όσον αφορά την ολική ανόργανη διαδρομή που ακολουθείται κάτω από όξινες συνθήκες (pH μικρότερο από 4). Οι Stumm and Morgan (1981) εξήγησαν την οξείδωση του πυρίτη, που



εκτίθεται στον αέρα και το νερό στις εκμεταλλεύσεις άνθρακα, με τις ακόλουθες στοιχειομετρικές εξισώσεις:



Η οξείδωση του σουλφιδίου του πυριτίου σε θειικό (εξίσωση 2.41) απελευθερώνει διαλυμένο σίδηρο και οξύτητα στο νερό. Επακόλουθα ο  $Fe^{2+}$  οξειδώνεται σε  $Fe^{3+}$  (εξίσωση 2.42). Στη συνέχεια ο  $Fe^{3+}$  υδρολύεται και σχηματίζει αδιάλυτο υδροξείδιο, γκαιτίτη, (εξίσωση 2.43). Οποσδήποτε κάποια ποσότητα  $Fe^{3+}$  παραμένει στο διάλυμα και καταλύει την οξείδωση και άλλου πυρίτη (εξίσωση 2.44), με το προϊόν  $Fe^{2+}$  ίσως να εισέρχεται ξανά στον κύκλο των παραπάνω αντιδράσεων. Τα θειικά είναι το σταθερό προϊόν της οξείδωσης του θείου σε περίσσεια οξυγόνου και υπάρχει μια διαφορά εφτά ηλεκτρονίων στην οξειδωτική κατάσταση του θείου στον πυρίτη και στα θειικά.

Στη φύση, οι χημικές ιδιότητες του νερού και η διήθηση του στα εδάφη ίσως να επιδρούν στην οξειδοαναγωγική διαδικασία του πυρίτη. Η μικρομορφολογία και τα προϊόντα οξείδωσης του πυρίτη σε εδάφη που προήλθαν από υποχώρηση της θάλασσας (inland polders) μελετήθηκαν από τους Miedema et al. (1973). Βρέθηκε πως σε ασβεστίτικο περιβάλλον τα προϊόντα της οξείδωσης είναι άμορφα υδροξείδια του σιδήρου και γύψος, ενώ σε μη ασβεστίτικο περιβάλλον είναι άμορφα υδροξείδια του σιδήρου και γιαροσίτης (jarosite). Τα αποτελέσματα δείχνουν πως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα η παροχή κατιόντων από το διηθούμενο νερό, επιδρούν σημαντικά στο σχηματισμό των προϊόντων της οξείδωσης.

Οι υπεύθυνοι των μουσείων μερικές φορές αντιμετωπίζουν τη λεγόμενη ‘ασθένεια των ορυκτών’ στα εκτιθέμενα έργα τέχνης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της οξείδωσης των ορυκτών, με απορρόφηση  $O_2$  και ατμών νερού από τον αέρα του περιβάλλοντος. Ο Steger (1982) σημείωσε πως σκόνες από πυροτίτη οξειδώνονται ακόμη και σε περιβάλλοντα με θερμοκρασία αέρα 28 °C και σχετική υγρασία 62%. Κάτω απ’ αυτές τις συνθήκες ο πυροτίτης αλλάζει το χρώμα του από γκρι του σιδήρου σε καφέ – πορτοκαλί.

Η οξείδωση του γαληνίτη (PbS), του σφαλερίτη (ZnS) και του χαλκοσίτη (Cu<sub>2</sub>S) στον αέρα, στους 52 °C και σε σχετική υγρασία 68% μελετήθηκε από τους Steger and Desjardins (1980). Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, για περιόδους πάνω από πέντε βδομάδες, ο γαληνίτης οξειδώνεται σε PbSO<sub>4</sub>, ο σφαλερίτης σε ZnSO<sub>4</sub>+FeO<sub>3</sub> με παροχή σιδήρου και ο χαλκοσίτης σε CuO και CuS.

Η αντίδραση οξειδοαναγωγής είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από μεταφορά ηλεκτρονίων, έτσι η οξείδωση των μεταλλικών σουλφιδίων προκαλεί αύξηση σε αυθόρμητα ρεύματα της γης (Sato and Mooney, 1960). Μερικές φορές σε περιοχές όπου μεταλλεύματα του θείου οξειδώνονται από τα διηθούμενα νερά του εδάφους, μετρείται αυθόρμητη πόλωση ή δυναμικό που μπορεί να φθάσει το ένα (1) βόλτ ή και περισσότερο. Έρευνες με δυναμικά χρησιμοποιούνται ως μέθοδοι για γεωφυσική ανίχνευση κοιτασμάτων, ιδιαίτερα όταν αυτά βρίσκονται πάνω από τη ζώνη οξείδωσης. Έρευνες αγωγιμότητας που βασίζονται στην οξείδωση σουλφιδίων έγιναν στον Καναδά, Cameron (1979), και έδειξαν πως το σώμα του σουλφιδίου δρα ως ένας αγωγός βυθισμένος σ' έναν ηλεκτρολύτη, που είναι το νερό του εδάφους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΓΗΡΑΝΣΗ ΛΟΓΩ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ**

### **4.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΓΗΡΑΝΣΗ**

Ο όρος μικροοργανισμοί αναφέρεται σε ένα σύνολο από οντότητες όπως: φύκια, βακτηρίδια, μπλε-πράσινη άλγη (blue – green algae), μύκητες, λειχήνες, πρωτόζωα και ιοί.

Οι μικροοργανισμοί παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο από πολλές απόψεις στην γήρανση των πετρωμάτων:

1. Με μικροβιακές αποσυνθέσεις οργανικών υλών από όπου πολλά οργανικά στοιχεία και CO<sub>2</sub> επιστρατεύονται στις διαδικασίες διάβρωσης.
2. Οι ίδιοι οι μικροοργανισμοί συνθέτουν πολλά οργανικά οξέα, που εμπλέκονται στην βιοχημική γήρανση.
3. Ορισμένοι μικροοργανισμοί δρουν άμεσα ως αποσυνθέτες ορυκτών και πετρωμάτων, αποβάλλοντας οργανικά οξέα μέσω των διαδικασιών του μεταβολισμού τους και απελευθερώνοντας ένζυμα, που επιταχύνουν τις χημικές αντιδράσεις.

#### **4.1.1 ΒΑΚΤΗΡΙΑ**

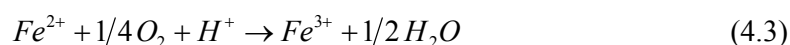
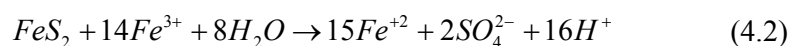
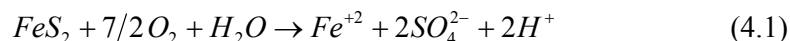
Ο όρος βακτήρια αναφέρεται σε μία ομάδα ποικίλων και πανταχού παρόντων μονοκυτταρικών οργανισμών, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κλάσεις σύμφωνα με την διατροφή τους και τον μεταβολισμό τους, στους ετερότροφους και τους αυτότροφους μικροοργανισμούς. Οι πρώτοι έχουν την ανάγκη οργανικών τροφών για να προμηθευθούν με ενέργεια και άνθρακα, ενώ οι δεύτεροι αποκτούν ενέργεια από το ήλιο ή από την οξείδωση ανόργανων στοιχείων και τον άνθρακα από την αφομοίωση του CO<sub>2</sub>. Τα περισσότερα βακτήρια είναι ετερότροφα και συνεπώς προέρχονται από την αποσύνθεση ενόργανων υλών ενώ μερικά μόνο είναι αυτότροφα.

Τα αυτότροφα βακτήρια χρησιμοποιούν διοξείδιο του άνθρακα ως αποκλειστική πηγή άνθρακα όπως το βακτήριο *Ferrobacillus ferrooxidans*. Ο μηχανισμός δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα από αυτά τα βακτήρια έχει μελετηθεί εκτεταμένα.

Οι μηχανισμοί οξείδωσης του σιδηροπυρίτη και άλλων θειούχων ενώσεων παρουσία βακτηρίων θεωρούνται εξαιρετικά σημαντικοί σε περιοχές με pH<4. Τα βακτήρια που συμμετέχουν στην οξείδωση των ενώσεων αυτών ανήκουν στα γένη *Thiobacillus*. Το γένος *Thiobacillus* περιλαμβάνει το είδος *Thiobacillus ferrooxidans* το οποίο συμμετέχει ενεργά στην οξείδωση θειούχων ενώσεων. Το βακτήριο αυτό χαρακτηρίζεται ως αυτότροφο οξεόφιλο και είναι ικανό να οξειδώσει  $Fe^{2+}$ ,  $S^0$  και σουλφίδια μετάλλων, όπως και άλλες ανόργανες ενώσεις του θείου προς θειϊκές.

Στο κύκλο του θείου, πολλά βακτήρια παίρνουν μέρος και έχουν μελετηθεί σε πολλά βιβλία και εργασίες. Πιο συγκεκριμένα στα σουλφίδια, όπως το πυρίτιο, η γενική άποψη στην διαδικασία οξείδωσης του είναι:

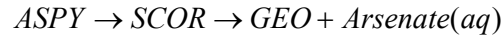
1. Το βακτήριο *Thiobacillus ferrooxidans* αυξάνει την πυριτική διάσπαση, ενώ η παρουσία του *Thiobacillus thiooxidans* δεν έχει καμία ή πολλή μικρή επίδραση στην διάσπαση του πυριτίου.
2. Σε υδατική φάση, η οξείδωση του πυριτίου είναι αποτέλεσμα χημικών και βιολογικών δραστηριοτήτων, σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Η πρώτη και η δεύτερη αντίδραση είναι αβιοτικές, καθώς η τρίτη είναι βιοτική, και συνεπώς αυξάνει το ποσοστό του πυριτίου. Οι βακτηριακοί μηχανισμοί οξείδωσης των θειούχων ενώσεων περιλαμβάνουν άμεσες και έμμεσες αντιδράσεις. Οι άμεσες αντιδράσεις προϋποθέτουν φυσική επαφή μεταξύ των βακτηρίων και των κόκκων των θειούχων ενώσεων. Οι έμμεσες αντιδράσεις δεν απαιτούν φυσική επαφή, αλλά συμμετέχουν στην οξείδωση του  $Fe^{2+}$  προς  $Fe^{3+}$  στην υδατική φάση.

Η οξείδωση του αρσеноπυρίτη από *Ferrooxidans* βακτήρια σχολιάστηκαν από τους Dove και Rimstidt (1985). Σύμφωνα με αυτούς, η οξείδωση του αρσеноπυρίτη δίνει τοπικά χαμηλό pH και έντονες δραστηριότητες αρσενικού και σιδήρου. Μετά και αφού έχει μειωθεί ο αρσеноπυρίτης, οι συγκεντρώσεις του αρσενικού και του σιδήρου μειώνονται

και το pH αυξάνει. Αυτό επιτρέπει στο σκοροδίτη να καθίζηση και απελευθέρωση αρσενίτη



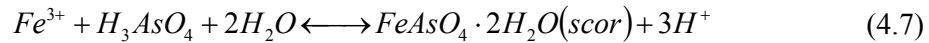
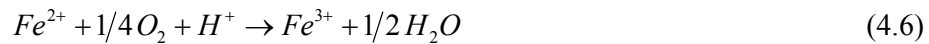
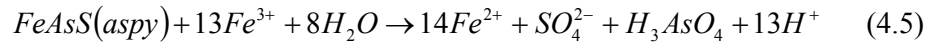
ASPY: αρσеноπυρίτης,

SCOR: σκοροδίτης

GEO: γεωθίτης

aq: υδατικό

Οι χημικές αντιδράσεις θα πρέπει να είναι όπως οι ακόλουθες:



σύμφωνα με τις οποίες ο αρσеноπυρίτης οξειδώνεται σε τρισθενή σίδηρο.

Κλείνοντας την περιγραφή της γήρανσης λόγω βακτηρίων θα πρέπει να αναφερθούν επιγραμματικά οι περιπτώσεις που συναντάται όπως

- Η όξινη απορροή στα μεταλλεία
- Γεωτεχνικά προβλήματα σε περιπτώσεις γήρανσης του πυριτίου.

#### 4.1.2 ΦΩΤΟΜΥΚΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΠΛΕ-ΠΡΑΣΙΝΗ ΑΛΓΗ

Οι φωτομήκυτες είναι ένα είδος βακτηρίων, τα οποία αποτελούν ένα μεταβατικό επίπεδο μεταξύ απλών βακτηρίων (*Eubacteriales*) και ινωδών μυκήτων. Οι ακτινομύκητες είναι διάσπαρτοι σε εδάφη, λάσπες, λιπάσματα και ιζήματα λιμνών και λέγεται ότι είναι δεύτεροι σε αφθονία από τα βακτήρια.

Οι φωτομύκητες είναι ετερότροφοι και χρησιμοποιούν ουσίες που περιέχουν οργανικά οξέα, σάκχαρα, λιπίδια, πρωτεΐνες. Από την σκοπιά της διαδικασίας γήρανσης, μπορούν να εφοδιάζουν τα εδαφικά ορυκτά με οργανικά οξέα κατά την διάρκεια της αποσύνθεσης και του μετασχηματισμού των οργανικών υπολειμμάτων.

Εδώ και πολλά χρόνια είναι γενικά αποδεκτό ότι οι περισσότεροι εδαφικοί φωτομύκητες σταματούν την ανάπτυξη τους σε περιβάλλον με pH 5.0 και έτσι συνθέτουν ένα πολύ μικρό τμήμα των μικροβιακών πληθυσμών σε όξινα εδάφη. Οι Williams et al. (1971)

διατύπωσαν ότι οξεόφιλοι φωτομύκητες μπορούν να είναι διάσπαρτοι σε όξινα εδάφη. Ενώ το 1975 οι Khan και William απομόνωσαν οξεόφιλους φωτομύκητες που αναπτύχθηκαν μεταξύ pH 3.5 και 6.5 από 17 φυσικά εδάφη και μεταλλευτικά απόβλητα. Ανέφεραν ότι κάποιες από τις δραστηριότητες τους συντελούσαν αναμφίβολα στην αποσύνθεση όξινων απορριμμάτων πάνω από τα εδάφη και οργανικών υλών κάτω από το έδαφος.

Η μπλε-πράσινη άλγη ανήκει στην ετερογενή ομάδα προκαρυωτικών και φωτοσυνθετικών οργανισμών που περιέχουν χλωροφύλλη. Διαφέρει από τα φωτοσυνθετικά βακτήρια διότι αναπτύσσει οξυγόνο κατά την διάρκεια της φωτοσύνθεσης ενώ τα δεύτερα φωτοσυνθέτουν αναερόβια χωρίς την ανάπτυξη οξυγόνου.

Αρκετές εργασίες έχουν δημοσιευθεί με θέμα την γήρανση λόγω της μπλε-πράσινης άλγης. Οι Scheffer et al. (1963) ερεύνησαν την δραστηριότητα της μπλε-πράσινης άλγης που τα μεταβολικά προϊόντα της κινητοποιούν σίδηρο και άλλα βαρέα μέταλλα, τα οποία αργότερα καθιζάνουν και δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια των πετρωμάτων. Ο Danin (1983) μελέτησε τη γήρανση των ασβεστόλιθων που οφειλόταν στις αποικίες της μπλε-πράσινης άλγης, στην Ιερουσαλήμ. Υπολόγισε ότι η μέση τιμή της γήρανσης του ασβεστόλιθου είναι 5μm/χρόνο. Απλά θεώρησε ότι το CO<sub>2</sub> που ελευθερώνεται από την μπλε-πράσινη άλγη κατά τις βροχερές νύχτες προκαλούσε τοπική αποσύνθεση του CaCO<sub>3</sub>. Οι Danin et al (1982) μελέτησαν την επιφανειακή γήρανση από λειχήνες και μπλε-πράσινη άλγη σε συμπαγή ασβεστόλιθο Turonian από τα Ιουδαϊκά βουνά μέχρι τη Νεκρή θάλασσα, με ετήσιο ύψους βροχών από 550mm (στην Μεσογειακή ζώνη) μέχρι τα 100mm (στην έρημο). Παρατήρησαν ότι στην Μεσογειακή ζώνη υπήρχαν μικροαυλάκια μεταξύ των αποικιών των λειχήνων που έμοιαζε με πάζλ, ενώ στις περιοχές που ήταν καλυμμένες από μπλε-πράσινη άλγη υπήρχαν αυλάκια βάθους από 0.1 μέχρι 0.3mm. Επίσης παρατήρησαν παρόμοια αυλάκια και οπές βάθους από 10 έως 30mm στις περιοχές που είχαν σημειωθεί βροχοπτώσεις ύψους 100mm, σύμφωνα με τον Yatsu 1988.

Πολύ ενδιαφέροντα ήταν και τα πειράματα που έγιναν από τους Marathe και Chaudhari από το 1971 μέχρι το 1973 και είχαν σχέση με διάβρωση πετρωμάτων από την μπλε-πράσινη άλγη. Μελέτησαν δείγματα πετρωμάτων της Ιώκαινου περιόδου που είχαν καλυφθεί με άλγη και διαπίστωσαν ότι επρόκειτο μόνο για μπλε-πράσινη άλγη. Σύγκριναν τα αποτελέσματα από την διάβρωση των πετρωμάτων που ήταν εκτεθειμένα σε ατμοσφαιρικές συνθήκες με αυτή που προερχόταν από την διάβρωση λόγω της

βιοχημικής δραστηριότητας της άλγης, και παρατήρησαν ότι η αβιοτική διάβρωση ήταν μηδαμινή (μέση απώλεια βάρους  $0.0006 \text{ g/cm}^2$ ) σε σχέση με την διάβρωση που προερχόταν από την βιοχημική διάβρωση της άλγης (μέση απώλεια βάρους  $0.233 \text{ g/cm}^2$ ), Yatsu 1988.

### 4.1.3 ΑΛΓΗ

Ο όρος άλγη αναφέρεται σε μεγάλες ομάδες μορφολογικών και φυσικών οργανισμών που περιέχουν χλωροφύλλη. Ένα χαρακτηριστικό σε όλες τις άλγεις είναι η παραγωγή σπορίων ή γαμετών με μονοκυτταρικές κατασκευές. Η γήινη άλγη περιλαμβάνει την πράσινη άλγη (Chlorophyta), τα διάτομα (Bacillariophyceae) και κιτρινοπράσινη άλγη (Xanthophyceae ή Heterocontae).

Η ικανότητα της άλγης να διαβρώνει τα πετρώματα και τα ορυκτά της επιτρέπει να αποικεί σε άγονες επιφάνειες. Οι Shields και Durrell (1964) έκαναν αρκετές δημοσιεύσεις εργασιών που είχαν σχέση με την άλγη και την σχέση της με την εδαφική γονιμότητα και τις πιθανότητές της να αποικεί σε δυσμενή υποστρώματα. Συναντάται σε ασβεστόλιθους όπου μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις βάθους 4 έως 8mm επιβιώνοντας μέσα στο διαβρωμένο πέτρωμα, σε ημιδιαφανή δολομίτες και χαλαζίες που επιτρέπουν στο φως να τους διαπεράσει, έχοντας ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ανάπτυξη άλγης κάτω από την επιφάνεια των πετρωμάτων.

Η βιοχημική γήρανση λόγω αυτών των ομάδων οφείλεται στον σχηματισμό ανθρακικού οξέος από την εισπνοή  $\text{CO}_2$  και δραστηριότητες ινωδών μορφών. Οι Robert και Berthelin (1986) αναφέρθηκαν στα πρώτα βήματα αποίκησης σε πετρώματα και σε ορυκτά από «πρωτογενή φυτά». Τα περισσότερα από τα δείγματα που χρησιμοποίησαν ήταν από τις Άλπεις, πάνω από τα 2000m, όπου παγωμένα πετρώματα ήταν εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα. Κατά αυτό τον τρόπο, υπό την προϋπόθεση των ευνοϊκών συνθηκών, έγινε μελέτη των δραστηριοτήτων των πρωτογενών φυτών. Η Hyphae εισχωρεί στα πετρώματα ή στα ορυκτά και ακόμα και μεταξύ των στρωμάτων του βιοτίτη. Οι δραστηριότητές της δεν είναι καθαρά φυσικές, αλλά συντρέχουν και βιοχημικές δραστηριότητες λόγω των ποσοτήτων του οξαλικού ασβεστίου που συχνά παρατηρείται στη βάση ανεξάρτητων ορυκτών. Αντίθετα, η διαδικασία διάλυσης συχνά παρατηρείται στις μικροδομές όπου οι οργανισμοί επικολλούνται στα ορυκτά.

#### 4.1.4 ΜΥΚΗΤΕΣ

Γενικά δεν υπάρχει διαφωνία μεταξύ των μικροβιολόγων για το είδος των μικροοργανισμών που απαρτίζουν την ομάδα των μυκήτων. Η ομάδα αυτή συχνά περιγράφεται ως η ομάδα που αποτελείται από ευκαριωτικούς μικροοργανισμούς που δεν περιέχουν χλωροφύλλη και συνήθως αποτελούνται από πολυσάκχαρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις ταξινομούνται ως εξής:

I. Myxophyta

Acrasieae

Phyto-myxineae

Myxomycetes

II. Dicontomycophyta

Dicontomycetes

III. Eumycocophyta

Phycomycetes

Ascomycetes

Basidiomycetes

Deuteromycetes

Οι μύκητες δεν περιέχουν χλωροφύλλη, και εντούτοις είναι ετερότροφοι, και αποκτούν τις απαιτούμενες ποσότητες άνθρακα για την σύνθεση του κυττάρου από την διαδικασία αποσύνθεσης οργανικών υλών. Ως αποτέλεσμα των διαδικασιών αυτών είναι η διοχέτευση με οξέα και CO<sub>2</sub> των εδαφικών ορυκτών. Ποικίλοι μύκητες συμμετέχουν στις ενζυματικές οξειδοαναγωγές ανόργανων υλικών και σε διαδικασίες πετρωμάτων και ορυκτών.

Όσο αναφορά την διάλυση των πυριτίων και των πετρωμάτων, οι μύκητες που περιέχουν τους *Paceiolomyces* και *Aspergillus nigert* απελευθερώνουν SiO<sub>2</sub> από ορυκτά και με αυτό το τρόπο συμμετέχουν στην διάβρωση των πετρωμάτων. Στις περιπτώσεις ορυκτών που περιέχουν Ca, όπως τον αυγίτη (augite) και βολαστονίτη (wollastonite), οι μύκητες συμμετέχουν ελάχιστα στην διάλυση τους, ενώ είναι πιο ενεργοί στην απελευθέρωση SiO<sub>2</sub> από γαρνιερίτης και σαπωνίτη (ομάδα μοντμοριλλονίτη και πλούσια σε μαγνήσιο αργιλικά ορυκτά) σε αντίθεση με τα βακτήρια.

Οι Sylverman και Munoz (1970) παρατήρησαν ότι ο μύκητας *Penicillium simplicissimus*, που απομόνωσαν από διαβρωμένο βασάλτη, προκαλεί την παραγωγή κιτρικού οξέος όταν



αναπτύσσονται glucose-ορυκτά άλατα με βασάλτη, γρανίτη, γρανοδιοτίτη, ανδεσίτη, δονίτη ή χαλαζία. Παρατήρησαν ότι μετά από επτά μέρες ανάπτυξης το 31% του πυριτίου, 11% της αργίλου, 64% του σιδήρου και 59% του μαγνησίου σε μερικά από τα πετρώματα διαλύθηκαν.

Οι Boyle και Voigt (1973) εκτέλεσαν πειράματα σε τροποποιημένα ορυκτά βιοτίτη από *Aspergillus niger*. Η χρωματογραφική ανάλυση έδειξε την παραγωγή κιτρικού και οξαλικού οξέος από τις καλλιέργειες των μυκήτων. Αυτό που παρατήρησαν ήταν ότι σε περιβάλλον μυκήτων, το K, ο Fe και το Mg που απελευθερώνονται από τους μαρμαρυγίες μπορούν να ενσωματωθούν στην διαδικασία μεταβολισμών από τους μύκητες, με αποτέλεσμα να απομακρύνουν αυτά τα ιόντα από την διάλυση ή την πολυσύνθετη διαμόρφωση ή αυξάνοντας την μικροβιακή ανάπτυξη και την διευκόλυνση παραπέρα ανάπτυξης συνθηκών διάβρωσης. Η διάβρωση των μαρμαρυγιών μπορεί να αποτελέσει ζωτικό κομμάτι της περιοδικής σύνδεσης των μεταβολισμών των μυκήτων.

#### 4.1.5 ΛΕΙΧΗΝΕΣ

Ο όρος λειχήνα αναφέρεται σε συμβιωτική σχέση μίας άλγης και ενός μύκητα στην οποία υπάρχει μία λειτουργική σχέση μεταξύ των δύο. Σε αυτούς τους σύνθετους οργανισμούς, ο μύκητας ονομάζεται *mycobiont* και η άλγη *phycobiont*. Ο *mycobiont* είναι γενικά ένας ασκομύκητας και η *phycobiont* είναι είτε μέλος των χλωρόφυτων ή των κυανόφυτων.

Οι λειχήνες είναι γνωστό ότι προκαλούν την διάβρωση των πετρωμάτων και των ορυκτών, και αναγνωρίζονται ως βασικοί οργανισμοί που συναντώνται σε γυμνά πετρώματα. Ο Fry (1922), αφού μελέτησε την διάβρωση του ασβεστόλιθου από λειχήνες, πρότεινε ότι η εξαλλοίωση που προκαλείται οφείλεται στο διοξείδιο του άνθρακα που διαλύεται στο νερό και τα αραιωμένα οξέα «επιτίθενται» στο πέτρωμα. Επίσης, διατύπωσε ότι οι λειχήνες ασκούν και μηχανική δράση στον ασβεστόλιθο (Fry, 1927).

Ο Jones (1965) μελέτησε την βιολογική διάβρωση ασβεστολιθικών οδοστρώσεων σε διάφορες περιοχές της Μεγάλης Βρετανίας οι οποίες ήταν καλυμμένες με στρώματα από λειχήνες. Από το ορατό πράσινο στρώμα των λειχήνων παρατήρησε διείσδυση στο σώμα των ασβεστόλιθων και την δημιουργία έγκοιλων στην επιφάνειά τους λόγω της δράσης αυτής.

Πιο πρόσφατα ο Jones και οι συνεργάτες του μελέτησαν παρόμοιες δραστηριότητες σε βασάλτες, σερπεντίνες και παρόμοια πετρώματα καταφεύγοντας σε παρατήρηση με

SEM, X-ray ανάλυση και ηλεκτρονικές αναλύσεις. Οι Jones et al. (1980) ανέφεραν φαινόμενα διάβρωσης σε βασάλτη από *Pertusaria corallinae*. Αυτό το είδος λειχήνας ήταν διαδεδομένο στο βασάλτη στις δυτικές ακτές της Σκωτίας. Το πέτρωμα αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό από πλαγιόκλαστα και σιδηρομαγνησιακά ορυκτά, ενώ η παρατήρηση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έδειξε ότι οι πλαγιόκλαστοι άστριοι και τα σιδηρομαγνησιακά ορυκτά εμφάνιζαν βαθιά έγκοιλα και στρογγυλεμένες ακμές, και ιδίως τα δεύτερα έδιναν την εντύπωση της ξαφνικής διάλυσης. Αυτές οι αλλαγές οφειλόταν στο οξαλικό οξύ που εκκρίνονταν από το *mycobiont*.

Στις περισσότερες λειχήνες συστατικά είναι αδύναμα φαινορικά οξέα. Σύμφωνα με τους Iskandar και Syers (1972), τα συστατικά των λειχήνων είναι ευδιάλυτα στο νερό και ικανά να σχηματίσουν ευδιάλυτα μέταλλα και να προκαλέσουν χημική διάβρωση ορυκτών και πετρωμάτων. Κάτω από τις φυσικές συνθήκες, ιδιαίτερα στα εδάφη, η διάβρωση των ορυκτών λόγω των συστατικών των λειχήνων εξαρτάται από την διαλυτότητα και την κινητικότητα τους μέσω των εδαφών.

## **4.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί ο ρόλος των φυτών στην διάβρωση, ως προμηθευτές CO<sub>2</sub> και οργανικών οξέων που προέρχονται από την διάλυση των υπολειμμάτων τους.

### **4.2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΣΦΗΝΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΡΙΖΩΝ**

Σε πολλές εργασίες που σχετίζονται με το θέμα συναντώνται εκφράσεις όπως «Οι ρίζες ενσφηνώνουν κατά μήκος των ρωγμών των πετρωμάτων και η δύναμη ενσφήνωσης είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα οι ρωγμές και οι ασυνέχειες να διευρύνονται» ή «οι ρωγμές μπορούν να διευρύνονται λόγω της πίεσης των ριζών και το πέτρωμα να αστοχεί πιο γρήγορα από το συνηθισμένο», ή «η ανάπτυξη των ριζών δημιουργεί σημαντικές τάσεις που αναπτύσσονται μέσα στις ασυνέχειες, καθώς οι κύριες ρίζες διεισδύουν», καθώς και φωτογραφίες στις οποίες ρίζες φαίνονται να έχουν διευρύνει ασυνέχειες ή έχουν διαρρήξει τμήματα πετρωμάτων. Είναι εύλογο να αναρωτηθεί κανείς εάν το αίτιο είναι η πίεση ανάπτυξης των ριζών ή η ύπαρξη των ασυνεχειών.

Πίνακας 4.1: Μέγιστες τάσεις ανάπτυξης ριζών.

Plant	Maximum axial Pressure in MPa	Maximum radial Pressure in MPa
Horsebean ( <i>Faba vulgaris</i> )	1.96	0.62
Corn ( <i>Zea mays</i> )	2.53	0.68
Common vetch ( <i>Vicia sativa</i> )	1.35	–
Horse chestnut ( <i>Aesculus hippocastanum</i> )	0.67	–

Ο Pfeffer (1893) θα πρέπει να ήταν ο πρώτος που μέτρησε την μέγιστη πίεση που ασκεί η ανάπτυξη των ριζών, και τα αποτελέσματα των μετρήσεων του φαίνονται στο Πίνακα 4.1.

Μετά τον Pfeffer πολλές εργασίες ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο θέμα και από αυτές θα πρέπει γίνει αποδεκτό ότι η αξονική πίεση των ριζών ποικίλων ειδών είναι το μέγιστο 3.0 MPa, ενώ η ακτινική πίεση είναι της τάξεως του ενός τρίτου μέχρι του ενός τετάρτου της αξονικής.

Σε ορισμένες περιπτώσεις πετρώματα όπως ψαμμίτες, σχιστόλιθοι, έχουν αντοχή σε εφελκυσμό μικρότερη των 3.0 MPa. Θα ήταν όμως εσφαλμένο να θεωρηθεί ότι πετρώματα χαμηλής αντοχής σε εφελκυσμό θα πρέπει να αστοχούν λόγω της ανάπτυξης των ριζών και αυτό γιατί αντί της αξονικής πίεσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακτινική πίεση.

Όταν ένα πέτρωμα πρόκειται να πάθει διάρρηξη λόγω εφελκυστικών τάσεων, εξαιτίας ενός φυτού, οι ρίζες αυτού εισχωρούν κάθετα στο υπάρχον επίπεδο της ασυνέχειας ή του πόρου. Η δύναμη που θα διαχωρίσει το πέτρωμα είναι ίση με την αντοχή σε εφελκυσμό επί την επιφάνεια στην οποία ασκείται η δύναμη. Η μέγιστη ασκούμενη δύναμη λόγω της τάσης διόγκωσης, και πιο συγκεκριμένα της ακτινικής πίεσης της ρίζας του φυτού, είναι εύκολο να ληφθεί ίση με το γινόμενο της μέγιστης εγκάρσιας περιοχής της ρίζας και του μεγέθους της ακτινικής πίεσης.

Η διαδικασία διάρρηξης των πετρωμάτων από την επίδραση ανάπτυξης των ριζών των φυτών εντός των ρωγματώσεων είναι ανοικτές ακόμα και σήμερα σε πολλές επεξηγήσεις και θεωρίες.

### 4.2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΡΙΖΩΝ

Καθώς οι ρίζες αναπτύσσονται συνεχώς, έχουν σαν αποτέλεσμα την επαφή της επιφάνειας απορρόφησης των ριζών με πρόσθετα εδαφικά υλικά και εδαφικά διαλύματα. Αυτό έχει ως επακόλουθο, τα φυτά να απορροφούν από τα εδαφικά διαλύματα πολλά στοιχεία όπως S, P, Mg, K, Ca, Fe, Mn. Η απορρόφηση θρεπτικών συστατικών από τα φυτά μπορεί να μειώσει τα ανόργανα στοιχεία στα εδαφικά διαλύματα και να επιταχύνει την αβιοτική χημική διάβρωση. Αντίθετα, ποικίλα οργανικά μόρια απελευθερώνονται και ορισμένα από αυτά μπορούν να προκαλέσουν απευθείας χημική διάβρωση. Άλλα πάλι προκαλούν την δημιουργία της ριζόσφαιρας, οποία είναι η ζώνη με οικολογικό ρόλο που περιλαμβάνει την επιφάνεια των ριζών και την περιοχή των περιβαλλόντων εδαφών όπου οι μικροβιακοί πληθυσμοί επηρεάζονται από την ύπαρξη των ριζών. Οργανικά στοιχεία που ελευθερώνονται από την ανάπτυξη των ριζών φαίνονται στον Πίνακα 4.2 και συνήθως ονομάζονται «εξιδρώματα φυτικών ριζών».

Πίνακας 4.2: Συστατικά που απελευθερώνονται στις ρίζες (Yatsu 1988).

Sugars	Amino acids	Organic acids	Nucleotides, flavanones	Enzymes
Glucose	Leucine and isoleucine	Oxalic	Flavanone	Invertase
Fructose	Valine	Malic	Adenine	Amylase
Maltose	γ-Amino butyric acid	Acetic	Guanine	Protease
Galactose	Glutamine	Propionic		
Ribose	α-Alanine	Butyric		
Xylose	β-Alanine	Valeric		
Rhamnose	Asparagine	Citric		
Arabinose	Serine	Succinic		
Raffinose	Glutamic acid	Fumaric		
Oligosaccharides	Aspartic acid	Glycolic		
Saccharose	Glycine	Oxalacetic		
Desoxyribose	Phenylalanine	Benzoic		
Inositol	Threonine	Aconitic		
Lactose	Tyrosine	Tartaric		
	Lysine	Glutaric		
	Proline			
	Methionine			
	Cystathionine			
	Cysteic acid			
	α,ε-Diaminopimelic acid			
	Ornithine			
	Homocysteic acid			
	Homocystine			
	Arginine			
	Isoasparagine			
	Dihydroxyphenylalanine			
	Citrulline			
	Histidine			

Στην ριζόσφαιρα, οι δραστηριότητες των ριζών προκαλούν χημικές αλλαγές, όπως αλλαγές στο pH, στο επίπεδο του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα κατά την διάρκεια αναπνοής των ριζών, στην ποσότητα των οργανικών στοιχείων κατά την εξίδρωση, επιτάχυνση της διάβρωσης των εδαφικών ορυκτών και της ανάπτυξης της ριζόσφαιρας. Ένας μεγάλος πληθυσμός μικροοργανισμών αναπτύσσονται κοντά στην περιοχή των ριζών. Ένας τέτοιος τυπικός πληθυσμός αποτελείται από  $10^9$  βακτήρια,  $10^7$  ακτινομύκητες,  $10^6$  μύκητες,  $10^3$  πρωτόζωα και  $10^3$  άλγη ανά γραμμάριο εδάφους ριζόσφαιρας και υπάρχουν σε απόσταση των 50μm από τις ρίζες.

#### **4.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΖΩΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

Τα ζώα που συμμετέχουν στις διαδικασίες της διάβρωσης των πετρωμάτων ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τα εξωεδαφικά (αυτά που βρίσκονται έξω από τα πετρώματα) και τα ενδοεδαφικά (αυτά που βρίσκονται εντός των πετρωμάτων). Παρόλο αυτό υπάρχουν και ορισμένα που ανήκουν και στις δύο κατηγορίες. Η σχέση μεταξύ των ζώων και των εδαφών έχει αποτελέσει μελέτη εδώ και πολλά χρόνια. Ο Hole (1981) παρουσίασε στον Πίνακα 4.3 την οικολογική ταξινόμηση αντιπροσωπευτικών ζώων που επηρεάζουν τα εδάφη. Αυτή η ταξινόμηση δείχνει καθαρά τον ρόλο που παίζουν τα ζώα στο έδαφος, για αυτό το λόγο είναι πολύ χρήσιμο να θεωρηθούν ως συντελεστές της διάβρωσης. Ανέπτυξε την δραστηριότητα των ζώων, σχετικά με την ανάμιξη, την δημιουργία κενών, τη ρύθμιση της αποσάθρωσης του εδάφους, της κίνησης του νερού και του αέρα μέσα στο έδαφος, των υπολειμμάτων φυτών, της πανίδας και την παραγωγή ειδικών συστατικών.

Αρκετοί είναι οι επιστήμονες που έχουν ασχοληθεί κατά καιρούς με τις διαδικασίες διάβρωσης που οφείλονται στην ύπαρξη ζώων και τις δραστηριότητες τους μέσα σε εδάφη και πετρώματα. Αναφορές όπως των Imeson και Kwaad (1976) που ανέφεραν τα αποτελέσματα ορύξεων σε πρηνή λόγω ζώων, και του Grinnell (1923) που ανέφερε διαδικασίες διάβρωσης λόγω των ορύξεων από ποικίλα τρωκτικά όπως κυνόμυς, ποντικούς και σκίιους εδάφους. Επίσης πολλές δημοσιεύσεις εργασιών έχουν γίνει για τα μυρμήγκια και τους τερμίτες ως εκσκαφείς και αναμικτήρες εδαφών κατά την προσπάθειά τους να δημιουργήσουν φωλιές. Από βιολογικής άποψης είναι αρκετά διαφορετικά, τα μεν μυρμήγκια ανήκουν στα υμενόπτερα ενώ οι τερμίτες στα ισόπτερα. Για τα μυρμήγκια έχουν γίνει πολλές αναφορές σε εργασίες για την οικολογική και κοινωνική τους συμπεριφορά, καθώς και την εδαφική τους βαρύτητα. Τα μυρμήγκια

Πίνακας 4.3: Οικολογική ταξινόμηση των ζώων σύμφωνα με την επίδραση τους στα εδάφη (Hole, 1981)

1. Endo-pedonic animals	A. Litter dwellers	1. In litter	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Rollers (Isopoda; Glomeridae)</li> <li>b. Crawlers and runners (Diplopoda)</li> <li>c. Leapers (Collembola)</li> </ul>
		2. In refuges under stones, logs, near seeps, in cavities	
	B. Soil builders at the surface	1. Soil casters	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Earthworms</li> <li>b. Millipedes</li> </ul>
		2. Soil mounders	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Termites</li> <li>b. Ants</li> <li>c. Crayfish</li> <li>d. Mammals <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Moles</li> <li>2. Rodents</li> <li>3. Rabbits</li> <li>4. Badgers</li> </ul> </li> </ul>
	C. Soil burrowers	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Peristaltic contractors</li> <li>2. Non-peristaltic movers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Earthworms</li> <li>b. Potworms</li> <li>a. Large predatory nematodes</li> <li>b. Ants</li> <li>c. Termite</li> <li>d. Bumble bees, crickets, wasps, hornets, spiders, beetles</li> <li>e. Millipedes</li> <li>f. Mole crickets, moles</li> <li>g. Skunks, lizards, snakes</li> <li>h. Bears, badgers</li> <li>i. Birds (desert owl, petrel)</li> </ul>
	D. Soil pore occupiers	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Non-aquatic mites, etc.</li> <li>2. Aquatic or semi-aquatic dwellers in water films in soil (protozoa, nematodes, tardigrades)</li> </ul>	
2. Exo-pedonic animals	A. Ground walkers	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Ungulates</li> <li>2. Plantigrades</li> </ul>	
	B. Tree dwellers	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Insects</li> <li>2. Amphibia</li> <li>3. Birds</li> <li>4. Mammals</li> </ul>	
	C. Cliff, bluff and building dwellers	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Wasps</li> <li>2. Birds</li> </ul>	
	D. Cave dwellers	1. Bats	
	E. Water dwellers	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Amphibia</li> <li>2. Petrels</li> </ul>	

ευρεία κατανομή από τις αρκτικές έως τις τροπικές περιοχές, και από πολύ ξηρές έως πολύ υγρές περιοχές. Δημιουργούν με τις εκσκαφές τους θαλάμους και γαλαρίες, ενώ κατασκευάζουν και υψώματα. Εκτός από την μηχανική μίξη των εδαφών, προκαλούν έντονο αερισμό αυτών και έχει παρατηρηθεί ότι ως κάτοικοι εμπλουτίζουν τις περιοχές διαμονής τους με οργανικές ύλες, απόλυτα αζωτούχα. Η συμπεριφορά των τερμιτών δεν απέχει πολύ από αυτή των μυρμηγκιών, οι λοφίσκοι που σχηματίζουν είναι πιο έντονοι και συμβάλουν στην αναδιοργάνωση του εδάφους. Οι λοφίσκοι αυτοί μπορούν να ποικίλουν σε διαστάσεις, από μερικά εκατοστά έως και εννέα μέτρα ύψος και είκοσι – τριάντα μέτρα διάμετρο. Οι τόποι διαμονής τους κυμαίνονται από ημιτροπικές μέχρι τροπικές περιοχές, λόγω του γεγονότος ότι αντέχουν σε μικρό εύρος θερμοκρασιών και

υγρασίας λόγω της απαίτησης τους για υψηλά ποσοστά υγρασίας στις φωλιές τους, την παραγωγή σιέλου και την πρόληψη αφυδάτωσης τους.

Τα σκουλήκια είναι γνωστά ως ασπόνδυλα και το πλήθος τους σε είδη είναι περίπου 1800. Οι φυσικές τους επιπτώσεις στα εδάφη είναι αποτέλεσμα των εκσκαφών που δημιουργούν. Επιδρούν στην χημική αποσάθρωση και κατανομή φυτικών συστατικών στα εδάφη μέσα από διάφορες διαδικασίες όπως ενσωμάτωση και διάλυση οργανικών υλών, δημιουργία αζωτούχων προϊόντων, έκκριση φωσφορικών, αλλαγή του pH, αύξηση της συγκέντρωσης ανταλλάξιμων ιόντων και αρκετών άλλων.

Επίσης φαίνεται ότι η συμβολή των ζώων στην διάβρωση είναι περιορισμένη, έμμεση και χαμηλής βαρύτητας σε αντιπαράθεση με την διάβρωση λόγω των μικροοργανισμών και των φυτών.

Γενικότερα επίσης προκύπτει ότι η βιολογική διάβρωση δεν είναι τίποτα άλλο εκτός από μηχανικές και χημικές διαδικασίες διάβρωσης μέσω βιολογικών συντελεστών.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5      ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων και τις δυνατότητες μέτρησής τους στο εργαστήριο, ενώ γίνεται και μία περιγραφή των εργαστηριακών διατάξεων και διαδικασιών οι οποίες εκτελέστηκαν στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

**5.1    ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Οι φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και των άλλων φυσικών υλικών είναι δυνατόν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Στις φυσικές ιδιότητες, και
- Στις μηχανικές ιδιότητες.

Οι φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνουν ιδιότητες που περιγράφουν ποσοτικά ή και ποιοτικά τα φυσικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες περιγράφουν την αντοχή των υλικών αυτών σε διάφορες μορφές καταπονήσεων. Στις μηχανικές ιδιότητες περιλαμβάνονται και οι διάφορες σταθερές ελαστικότητας. Εκτός αυτών των παραπάνω ιδιοτήτων υπάρχουν και άλλες όπως ηλεκτρικές, θερμικές, χημικές κ.λ.π (Αγιουτάντης, 2002).

Οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων αλλά και πολλών δομικών υλικών είναι:

- Ορυκτολογική σύνθεση και δομή
- Ειδική πυκνότητα
- Μοναδιαίο βάρος
- Πορώδες
- Λόγος κενών
- Φυσική υγρασία



- Υγρασία κορεσμού
- Υδατοπερατότητα.

Ενώ οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες είναι οι εξής:

- Συνοχή
- Μέτρο Ελαστικότητας
- Λόγος Poisson
- Αρχική εντατική κατάσταση
- Αντοχές
- Ερπυσμός
- Διόγκωση
- Υδατοαπορροφητικότητα
- Γωνία εσωτερικής τριβής.

## **5.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Η σημαντικότερη κατηγορία μηχανικών παραμέτρων των πετρωμάτων είναι αυτές που αναφέρονται στην αντοχή των υλικών (strength) και στην ικανότητα τους να αντιστέκονται σε εξωτερικές δυνάμεις και εκφράζονται σε μονάδες τάσης. Οι κυριότερες αντοχές που συναντώνται στα πετρώματα εξαρτώνται από το είδος της καταπόνησης που υποβάλλονται, είναι:

- ✓ καταπόνηση σε θλίψη
- ✓ καταπόνηση σε εφελκυσμό
- ✓ καταπόνηση σε διάτμηση
- ✓ καταπόνηση σε κάμψη
- ✓ καταπόνηση σε στρέψη

Επομένως, τα πετρώματα χαρακτηρίζονται από τιμές αντοχής ανάλογα με τον τύπο των εξωτερικών δυνάμεων που υφίστανται. Διακρίνεται η αντοχή σε θλίψη (compressive strength) με ή χωρίς την παρουσία πλευρικών τάσεων, η αντοχή σε διάτμηση (shear

strength), η αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength) και η αντοχή σε κάμψη (bending strength).

Εκτός αυτών των παραμέτρων αντοχής, υπάρχει και σειρά άλλων παραμέτρων αντοχής, όπως: αντοχή στην κρούση, αντοχή στη μηχανική απότριψη, αντοχή στην αποσάθρωση, αντοχή σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης, αντοχή στην επίδραση χημικών, κ.λ.π. Μία άλλη κατηγορία παραμέτρων, που χαρακτηρίζουν τα πετρώματα, είναι αυτές που αναφέρονται στη δυνατότητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (P και S waves).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες από τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται στην πράξη, καθώς και οι πειραματικές διαδικασίες για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών στο εργαστήριο (Αγιουτάντης, 2002).

### **5.3 ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ**

Οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων εξαρτώνται τόσο από την αλληλεπίδραση των κρυστάλλων, των συστατικών και των υλικών συγκόλλησης από τα οποία αποτελούνται όσο και από την ύπαρξη των ρωγμών, των ασυνεχειών και των μικρότερων αστοχιών που εμφανίζονται στην δομή τους. Η αντοχή είναι αυτή που προσδιορίζει και χαρακτηρίζει τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Από την άλλη πλευρά, η κατανομή των ρωγμών, των ασυνεχειών και των αστοχιών στον όγκο των πετρωμάτων είναι τόσο ευμετάβλητη που έχει ως αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες ενός όγκου πετρώματος να διαφοροποιούνται από τμήμα σε τμήμα. Παρόλα αυτά, οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι αυτές που προκύπτουν από δείγματα του πετρώματος επαρκούς μεγέθους που περιέχουν μεγάλο αριθμό στοιχειωδών συστατικών του αλλά περιορισμένο αριθμό βασικών δομικών ασυνεχειών, ώστε να κατέχουν ομοιογενείς ιδιότητες. Συχνά, δείγματα του πετρώματος της τάξεως των μερικών εκατοστών είναι αρκετά για αυτό το σκοπό και μπορούν να δοκιμαστούν στο εργαστήριο.

Οι εργαστηριακές δοκιμές συνήθως αποτελούνται από απλές δοκιμές που αρμόζουν στη φύση του πετρώματος, κατά τις οποίες μετριοούνται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των δοκιμίων. Ένα σημείο το οποίο θέλει ιδιαίτερη προσοχή και έχει παρατηρηθεί επανειλημμένως είναι ότι η μετρούμενη συμπεριφορά των δειγμάτων εξαρτάται άμεσα από το πειραματικό σύστημα. Ο υπολογισμός της συμπεριφοράς που προκαλείται από το σύστημα σε διαφορετικές συνθήκες μπορεί να είναι αρκετά παραπλανητικός και θα πρέπει να

καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια ώστε να διαχωρίζονται οι ιδιότητες του πετρώματος και του συστήματος δοκιμής (Jaeger et al., 1979).

Τα πετρώματα στη φυσική τους θέση βρίσκονται σε ισορροπία κάτω από ένα σύνολο θλιπτικών τάσεων, τις οποίες δέχονται από τα παρακείμενα τμήματα ή κατασκευές. Για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων κάτω από θλιπτικά εντατικά πεδία, καθώς και την εκτίμηση της αντοχής των πετρωμάτων, χρησιμοποιούνται συχνά τα αποτελέσματα εργαστηριακών θλιπτικών δοκιμών σε ακέραιο πέτρωμα.

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια πετρώματος είναι η συνηθέστερη δοκιμή στα πετρώματα. Χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν η μονοαξονική αντοχή των πετρωμάτων,  $\sigma_c$ , και οι ελαστικές σταθερές, Μέτρο Ελαστικότητας (Young's Modulus),  $E$ , και λόγος Poisson,  $\nu$ , των πετρωμάτων. Παρόλη την απλότητα της δοκιμής, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εν λόγω δοκιμή. Προφανώς, πρέπει να δοθεί προσοχή στην φύση και την δομή του πετρώματος καθώς και στη κατάσταση των δειγμάτων δοκιμής. Για δείγματα παρόμοιας ορυκτολογικής σύστασης, η  $\sigma_c$  μειώνεται με την αύξηση του πορώδους, με την αύξηση του βαθμού γήρανσης και αύξηση του βαθμού ρωγματώσεως.

Εξαιτίας των παραπάνω λόγων, η αντοχή σε θλίψη σε δείγματα πετρώματος τα οποία χαρακτηρίζονται από το ίδιο γεωλογικό όνομα μπορεί να ποικίλει. Κατά αυτό τον τρόπο η αντοχή σε θλίψη του ψαμμίτη για παράδειγμα ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων, την πυκνότητα, τη φύση και το υλικό συγκόλλησης των κόκκων, καθώς και τα επίπεδα των πιέσεων και της θερμοκρασίας που έχει υποβληθεί το πέτρωμα κατά την διάρκεια της ιστορίας του (Brady et al., 1993).

Εκτός των εσωτερικών παραγόντων, που αναφέρθηκαν -ορυκτολογική σύσταση, μέγεθος κόκκων, πορώδες- και επηρεάζουν την δοκιμή, υπάρχει και ένας αριθμός εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν σημαντικά τις δοκιμές, που είναι:

✓ Γεωμετρία των δοκιμών:

I. Σχήμα

II. Λόγος ύψους – διαμέτρου

III. Μέγεθος

✓ Συντελεστή τριβής μεταξύ δίσκων φόρτισης και επιφάνειας δοκιμών

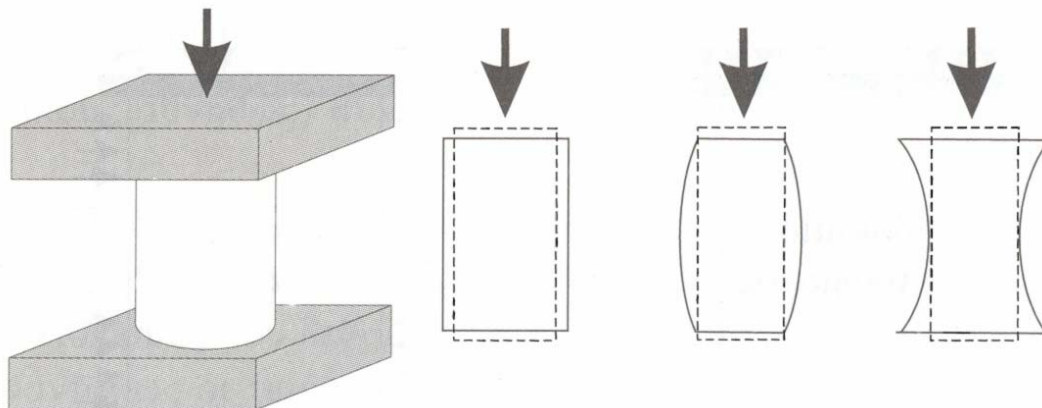
- ✓ Ρυθμός φόρτισης
- ✓ Περιβάλλον

Για αυτό το λόγο οι παραπάνω εξωτερικοί παράγοντες θα πρέπει να καθορίζονται και συσχετίζονται έτσι ώστε οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της δοκιμής να είναι αξιοποιήσιμα και ρεαλιστικά (Vutukuri et al., 1974).

### **5.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Για τη μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του «ακέραιου» πετρώματος στο εργαστήριο, κατασκευάζονται δοκίμια σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές (ISRM, 1979). Τα στοιχειώδη χαρακτηριστικά για προβλεπόμενη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι:

- ✓ Τα δοκίμια πρέπει να είναι κυλινδρικά με μήκος διπλάσιο – τριπλάσιο της διαμέτρου, ενώ η διάμετρος κατά προτίμηση δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 54 mm. Η διάμετρος των δοκιμίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές την διάμετρο του μεγαλύτερου κόκκου του πετρώματος.
- ✓ Οι βάσεις του κυλίνδρου πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους με ανοχή περίπου 0.02 mm και ορθογώνιες ως προς τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου με ανοχή 0.001 ακτίνια.
- ✓ Οι πλευρές του δοκιμίου πρέπει να είναι λείες και χωρίς ανωμαλίες, με ανοχή 0.3 mm σε όλο το μήκος.
- ✓ Δεν επιτρέπεται η χρήση πρόσθετων υλικών για ενίσχυση ή κατεργασία των άκρων του δοκιμίου.
- ✓ Τα δοκίμια πρέπει να φυλάσσονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην επηρεάζεται η φυσική τους υγρασία, ενώ ο χρόνος αποθήκευσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις 30 ημέρες.
- ✓ Η φόρτιση των δοκιμίων κατά την διάρκεια της δοκιμής θα πρέπει να γίνεται με σταθερό ρυθμό φόρτισης της τάξεως των 0.5 - 1.0 MPa/sec.
- ✓ Ενώ κατά την διάρκεια της δοκιμής θα πρέπει να καταγράφονται τα αξονικά φορτία και οι αξονικές και ακτινικές παραμορφώσεις.
- ✓ Τέλος ο αριθμός των δοκιμίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον έξι.



Σχήμα 5.1: Τυπικοί τρόποι παραμόρφωσης δοκιμίων που υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη.  
(Αγιουτάντης, 2002).

### 5.3.2 ΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΣΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής τάσης σε ένα δοκίμιο συχνά δεν περιγράφει αξιόπιστα την πραγματική εντατική κατάσταση του δοκιμίου, λόγω των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στα επίπεδα επαφής με τις πλάκες φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της τριβής, μεταβάλλεται η πλευρική ένταση του δοκιμίου στις περιοχές των πλακών φόρτισης. Στο Σχήμα 5.1 φαίνονται διάφορες περιπτώσεις παραμόρφωσης δοκιμίων ανάλογα με τις συνοριακές καταστάσεις στα σημεία επαφής. Όταν ο συντελεστής τριβής είναι μεγάλος, τότε οι πλευρές του δοκιμίου παρουσιάζουν μία κυρτότητα, ενώ σε περιπτώσεις πολύ χαμηλού συντελεστή τριβής που επιτυγχάνεται με προσθήκες πλαστικών υλικών ανάμεσα από τις πλάκες και το δοκίμιο, οι πλευρές του δοκιμίου μπορεί να πάρουν ένα κοίλο σχήμα. Οι συνθήκες ομοιόμορφης φόρτισης επιτυγχάνονται μόνο όταν οι πλάκες φόρτισης παρακολουθούν την παραμόρφωση του δοκιμίου (Αγιουτάντης, 2002).

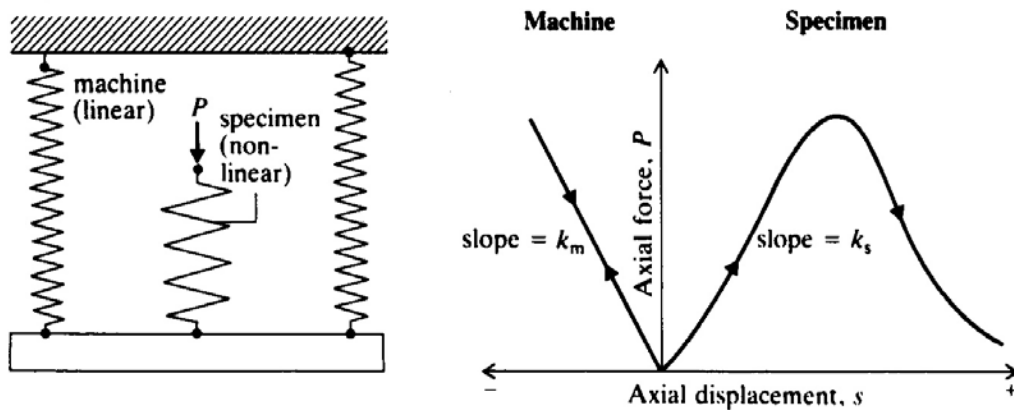
### 5.3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η δοκιμή μονοαξονικής θλιπτικής καταπόνησης αναφέρεται στην περίπτωση όπου ασκείται μία μόνο ορθή τάση σε μόνο μία πλευρά ενός όγκου πετρώματος. Στην βραχύμαζα, οι συνθήκες αυτές συναντώνται συνήθως σε στύλους πετρωμάτων που υποστηρίζουν οροφές υπόγειων εκμεταλλεύσεων, παρειές υπόγειων ανοιγμάτων, κ.λ.π.

Στην περίπτωση όμως των εργαστηριακών δοκιμών απαιτείται η ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού που έχει την δυνατότητα να ασκεί φορτία και να καταγράφει τιμές των φορτίων και

παραμορφώσεων κατά την διάρκεια της δοκιμής. Ο εξοπλισμός αυτός πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα όργανα και συσκευές (Αγιουτάντης, 2002):

- ✓ Συσκευή δοκιμής: Η συσκευή πρέπει να μπορεί να επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως να έχει την δυνατότητα να μετρήσει και να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο.
- ✓ Πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες φόρτισης χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους. Στην περίπτωση που υπάρχει σφαιρική κεφαλή έδρασης που δεν πληροί τις προδιαγραφές, θα πρέπει να αφαιρεθεί ή να στερεωθεί στην οριζόντια θέση.
- ✓ Χαλύβδινοι δίσκοι: Οι δίσκοι (platens) τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο και αποσκοπούν στο να ελαττώσουν την υπερβολική πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω των δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής. Η σκληρότητα των δίσκων (στην κλίμακα Rockwell) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από HRC58 και η διάμετρος τους να είναι μεταξύ  $D$  και  $D + 2 \text{ mm}$ , όπου  $D$  η διάμετρος των δοκιμίων. Το πάχος των δίσκων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον  $15 \text{ mm}$  ή  $D / 3$  και οι παράλληλες επιφάνειες τους πρέπει να έχουν ανοχή μικρότερη από  $0.005 \text{ mm}$ .
- ✓ Σφαιρική κεφαλή έδρασης: Η σφαιρική κεφαλή έδρασης πρέπει να βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονας της πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Αν η μηχανή δοκιμής δεν διαθέτει σφαιρική κεφαλή έδρασης, τότε ένας από τους δύο χαλύβδινους δίσκους πρέπει να έχει αυτή την δυνατότητα.



Σχήμα 5.2: Ελαστικό ισοδύναμο συστήματος δυνάμεων κατά την δοκιμή σε θλίψη (Brady and Brown, 1985).

Κατά την διάρκεια της δοκιμής και κατά την άσκηση φορτίων από την μηχανή δοκιμής εκτός από την παραμόρφωση των δοκιμίων του πετρώματος πραγματοποιείται και παραμόρφωση της μηχανής με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις να επιδρά στην διαμόρφωση του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης. Το δοκίμιο και η μηχανή κατά την άσκηση των φορτίων μπορούν να χαρακτηριστούν ως δύο ελατήρια τα οποία φορτίζονται παράλληλα (Σχήμα 5.2). Η μηχανή αντιπροσωπεύεται από ένα γραμμικά ελαστικό ελατήριο σταθεράς  $K_M$ , και το δοκίμιο ως ένα μην γραμμικά ελαστικό ελατήριο σταθεράς  $K_\Delta$ . Οι θλιπτικές δυνάμεις και μετατοπίσεις που δέχεται το δοκίμιο θεωρούνται θετικές, ενώ συγχρόνως η μηχανή εφελκύεται. Η αποθηκευόμενη ενέργεια των ελατηρίων κατά την δοκιμή ισούται με:

$$U = \frac{1}{2} P^2 (K_\Delta + K_M) \quad (5.1)$$

όπου:

$K_\Delta$ : η σταθερά ελαστικότητας του δοκιμίου

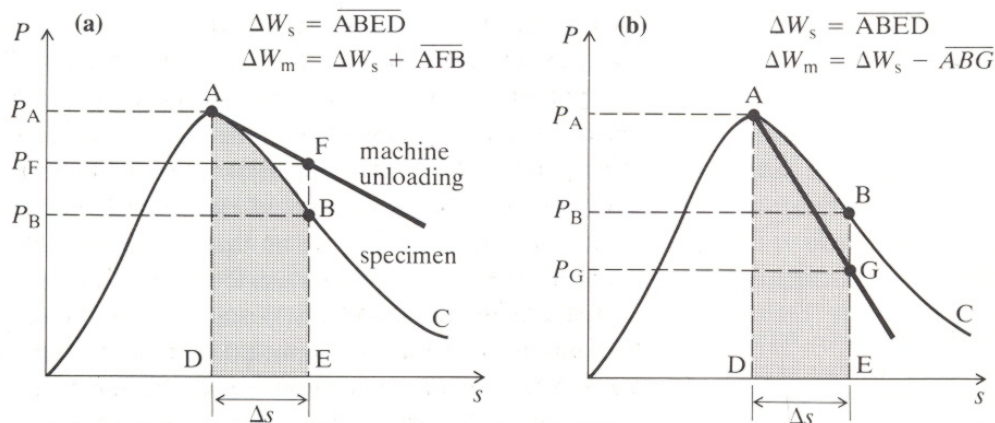
$K_M$ : η σταθερά ελαστικότητας της μηχανής θλίψης

$P$ : η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την αστοχία του υλικού και που αντιστοιχεί στην μέγιστη παραμόρφωση.

Υπάρχουν δύο ειδών μηχανές φόρτισης πετρωμάτων και οι οποίες διακρίνονται σε:

- ✓ άκαμπτη συσκευή (stiff testing machine)
- ✓ συνήθης (παραμορφούμενη) συσκευή

Η διαφορά μεταξύ τους οφείλεται στο γεγονός ότι οι συσκευές που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία παραμορφώνονται κατά την φόρτιση ενός δοκιμίου και αποθηκεύουν στα φέροντα στοιχεία τους μία ενέργεια παραμόρφωσης. Η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται τη στιγμή έναρξης της αστοχίας του δοκιμίου, με συνέπεια να προκαλεί άμεση και πολλές φορές εκρηκτική θραύση του δοκιμίου. Αντίθετα οι άκαμπτες συσκευές (για τις οποίες ισχύει  $K_M \gg K_\Delta$ ) παραμορφώνονται πολύ λιγότερο και συνήθως δεν προκαλείται απότομη θραύση του δοκιμίου. Κάτω από τις συνθήκες ομαλής αστοχίας του δοκιμίου, είναι δυνατόν να μελετηθεί η συμπεριφορά του πετρώματος και μετά την αστοχία (post failure analysis). Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για δοκιμές με συσκευές που έχουν ελαστικές σταθερές α) μικρότερες και β) μεγαλύτερες από εκείνες του δοκιμίου. Στην πρώτη περίπτωση, η δυναμική ενέργεια που απελευθερώνεται από την μηχανή είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη από το δοκίμιο, με

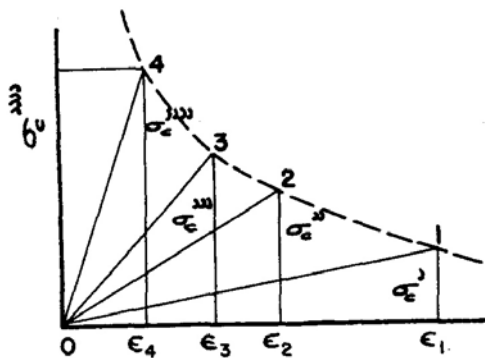


Σχήμα 5.3: Συμπεριφορά παραμορφούμενης και μη παραμορφούμενης συσκευής φόρτισης (Brady and Brown, 1985).

συνέπεια την απότομη θραύση του. Ο τύπος της συσκευής δοκιμής δεν επηρεάζει την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, πριν από την αστοχία (Brady and Brown, 1985)

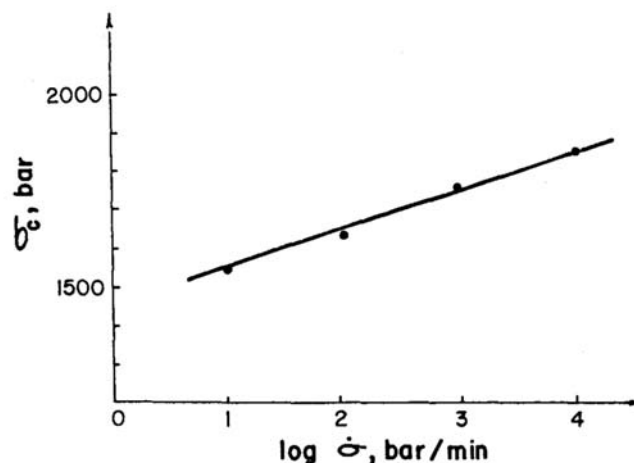
#### 5.3.4 ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η αντοχή των πετρωμάτων σε θλίψη συνήθως αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης των δοκιμίων κατά την διάρκεια της δοκιμής. Αυτό παρατήρησαν οι Filcek και Kleczek το 1965, όταν εκτέλεσαν δοκιμές σε λιγνίτη χρησιμοποιώντας ποικίλους ρυθμούς φόρτισης. Παρατήρησαν ότι όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός φόρτισης η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης ακολουθούσε την καμπύλη 0-1 (Σχήμα 5.4) και η αντοχή σε θλίψη είναι μικρότερη (σ'ε) ενώ η αστοχία είναι μη βίαιη. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης, η καμπύλες ακολουθούν τις καμπύλες 0-2, 0-3, 0-4 αντίστοιχα και οι τιμές των αντοχών αυξάνονται επίσης, ενώ η αστοχία των δοκιμίων γίνεται απότομη και βίαιη.



Σχήμα 5.4: Επίδραση του ρυθμού φόρτισης στην αντοχή σε θλίψη του λιγνίτη (Vutukuri et al. 1974).





Σχήμα 5.5: Αντοχή σε θλίψη σε συνάρτηση του ρυθμού φόρτισης (Vutukuri et al. 1974).

Αργότερα ο Houpert (1970) μελέτησε το ίδιο πρόβλημα εκτελώντας δοκιμές θλίψης σε γρανίτη και τα αποτελέσματα του ήταν αντίστοιχα και φαίνονται στο Σχήμα 5.5 (Vutukuri et al. 1974).

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός φόρτισης επηρεάζει την αντοχή σε θλίψη και σε περιπτώσεις που υπάρχει αιφνίδια φόρτιση των πετρωμάτων (όπως στις περιπτώσεις διατρήσεως και εκρήξεων) ο ρυθμός φόρτισης κατά την εργαστηριακή δοκιμή θα πρέπει να είναι υψηλός. Αντίθετα, στις περιπτώσεις στατικών φορτίσεων και σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές (ISRM, 1972) ο ρυθμός φόρτισης θα πρέπει να είναι μεταξύ 0,5 – 1,0 MPa/sec.

### 5.3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Το ποσοστό της υγρασίας που περιέχουν τα δοκίμια επηρεάζει επίσης την αντοχή τους σε θλίψη. Οι Obert, Windes και Duvall το 1946 εκτέλεσαν δοκιμές σε διαφορετικά πετρώματα και για διαφορετικές συνθήκες όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Για τα πετρώματα που δοκίμασαν, παρατήρησαν μια αύξηση της μέσης τιμής της αντοχής κατά 6% για τα δοκίμια που είχαν ξηραθεί, ενώ μία μείωση κατά 12% της αντίστοιχης μέσης τιμής για αυτά που είχαν εμποτιστεί σε νερό. Επίσης οι Boretti et al. το 1966 εκτέλεσαν αντίστοιχα πειράματα σε διάφορους ψαμμίτες και τα αποτελέσματα αυτών φαίνονται στον Πίνακα 5.2 (Vutukuri et al. 1974).

Πίνακας 5.1: Επίδραση της υγρασίας στην αντοχή σε θλίψη (Vutukuri et al. 1974).

Moisture condition	Ratio of oven-dried and saturated compressive strength to air-dried compressive strength						
	Marble	Limestone	Granite	Sandstone 1	Sandstone 2	Slate	Average
Oven-dried	1.01	1.03	1.07	1.01	1.18	1.06	1.06
Air-dried	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Saturated	0.96	0.85	0.92	0.90	0.80	0.85	0.88

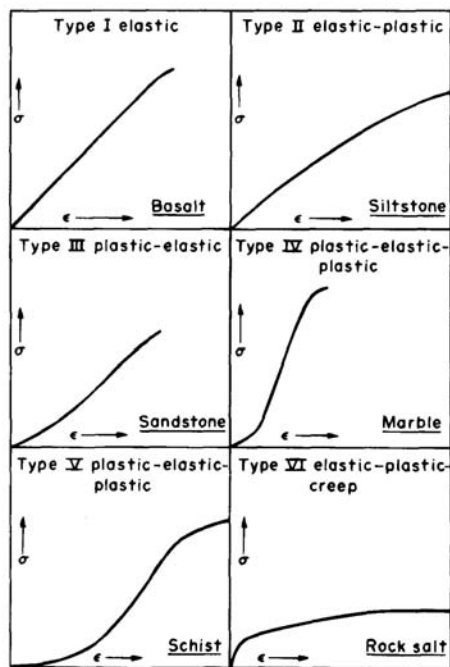
Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η υγρασία των πετρωμάτων επηρεάζει σε πολλές περιπτώσεις την αντοχή των δειγμάτων δοκιμών. Οι τιμές των αντοχών θα πρέπει να διορθώνονται σύμφωνα με τις επί τόπου (in situ) συνθήκες των πετρωμάτων ώστε να αποφεύγονται πιθανόν αστοχίες. Το σωστότερο είναι οι δοκιμές να γίνονται κάτω από συνθήκες περιβάλλοντος καθώς η υγρασία των δοκιμών κατά την προετοιμασία τους αλλάζει και θα πρέπει να επανέρχονται στην φυσική τους υγρασία. Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές (ISRM, 1972) τα δοκίμια των θα πρέπει να τοποθετούνται 5-6 μέρες πριν την δοκιμή τους σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20 \pm 2$  °C και υγρασίας 50%.

Πίνακας 5.2: Αντοχή σε θλίψη ψαμμιτών σε MPa (Vutukuri et al., 1974).

State	1		2		3		4		5	
	Perpendicular to stratification	Parallel to stratification	Perpendicular to stratification	Parallel to stratification	Perpendicular to stratification	Parallel to stratification	Perpendicular to stratification	Parallel to stratification	Perpendicular to stratification	Parallel to stratification
In air-dry state	150.2 (21783)	137.3 (19908)	125.6 (18219)	88.4 (12823)	93.9 (13618)	99.4 (12965)	93.5 (13561)	83.2 (12070)	69.2 (10039)	54.5 (7909)
After water saturation	103.7 (15038)	92.5 (13419)	87.9 (12752)	76.5 (11090)	63.4 (9202)	53.5 (7753)	81.4 (11800)	65.1 (9443)	55.2 (8009)	50.3 (7299)

### 5.3.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Σύμφωνα με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω και αφού έχουν κατασκευαστεί τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Τα δοκίμια φορτίζονται είτε με έλεγχο του φορτίου (load control) είτε με έλεγχο μετατόπισης (displacement control) κατά τον διαμήκη άξονά τους και συγχρόνως καταγράφεται η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση που υφίστανται. Οι παραμορφώσεις αυτές προκύπτουν μετά από μετρήσεις διαστολής ή/ και συστολής των υλικών, οι οποίες επιτυγχάνονται με μηχανικά (strain gages), είτε με ηλεκτρικά μηχανοσκόμια (electrical strain gages) κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου, είτε μετρώντας τη σύγκλιση των πλακών, από τις οποίες εφαρμόζεται η θλιπτική τάση στο δοκίμιο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να κατασκευαστεί η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (stress – strain curve) για κάθε δοκίμιο και κατά επέκταση του πετρώματος από το οποίο προήρθε το δοκίμιο. Η καμπύλη αυτή αποτελείται συνήθως από δύο κλάδους, τον κλάδο μέχρι την διαρροή ή θραύση του δοκιμίου και τον φθίνοντα κλάδο μετά την διαρροή ή θραύση του δοκιμίου. Έτσι, διακρίνονται καμπύλες που περιγράφουν είτε ελαστική συμπεριφορά, είτε πλαστική συμπεριφορά, είτε συνδυασμό και των δύο. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τυπικές μορφές τέτοιων συναρτήσεων που προκύπτουν από πειράματα σε διάφορα πετρώματα (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 5.6: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για πετρώματα (Αγιουτάντης, 2002).

Το μέγιστο της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης, που αποτελεί το όριο ανάμεσα στην πλαστική και ψαθυρή περιοχή, είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος του υλικού που ονομάζεται αντοχή σε θλίψη για ορισμένο πλευρικό περιορισμό. Στις περιπτώσεις των μονοαξονικών δοκιμών, η παράμετρος ονομάζεται αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και συνήθως συμβολίζεται με  $C_0$ . Επίσης, από την κλίση της καμπύλης τάσεως – παραμορφώσεως μπορεί να υπολογιστεί το Μέτρο Ελαστικότητας των πετρωμάτων που δοκιμάστηκαν (Σχήμα 5.7), και αυτό μπορεί να γίνει με τους εξής τρεις τρόπους:

- ✓ Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας (Tangent Young's Modulus),  $E_t$ , υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσεως – παραμορφώσεως στο σημείο του 50% της μέγιστης τιμής της αντοχής. Στο Σχήμα το  $E_t = 51,0$  GPa.
- ✓ Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (Average Young's Modulus),  $E_{av}$ , που προκύπτει από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης. Για την καμπύλη του Σχήματος είναι  $E_{av} = 51,0$  GPa.
- ✓ Τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας (Secant Young's Modulus),  $E_s$ , ορίζεται από τη κλίση της ευθείας που ενώνει την συμβολή των αξόνων με κάποιο σημείο της καμπύλης, το οποίο δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το υλικό. Για το παράδειγμα του Σχήματος  $E_s = 31,0$  GPa.

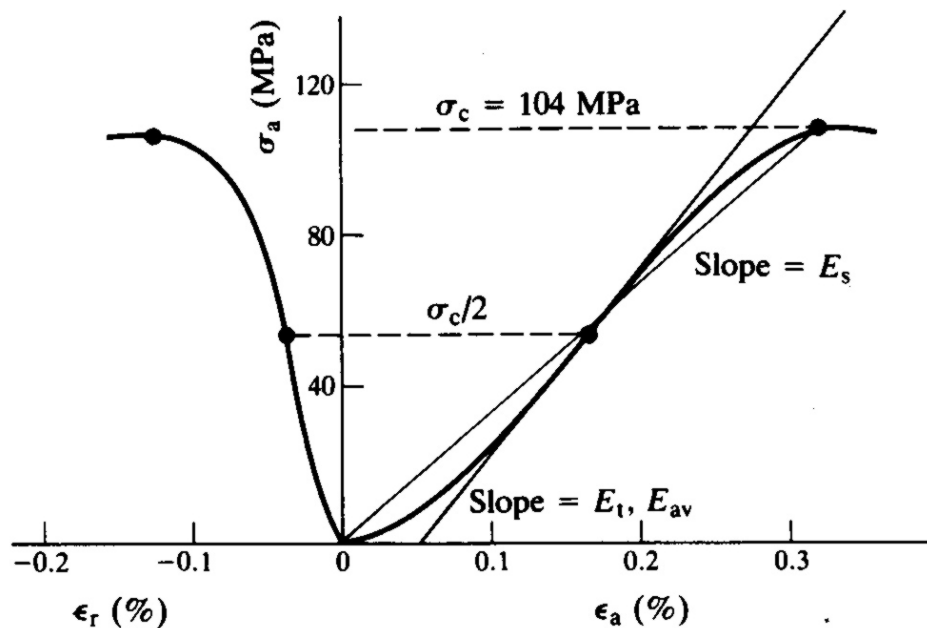
Αντίστοιχα με κάθε τιμή του Μέρου Ελαστικότητας, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του λόγου Poisson ως:

$$\nu = - \frac{(\Delta \sigma_a / \Delta \varepsilon_a)}{(\Delta \sigma_a / \Delta \varepsilon_r)} \quad (5.2)$$

Για τα δεδομένα του παραδείγματος οι αντίστοιχες τιμές του  $\nu$  για τα τρία Μέτρα Ελαστικότητας  $E_t$ ,  $E_{av}$  και  $E_s$  είναι αντίστοιχα 0.29, 0.31 και 0.40. Επίσης, λόγω της αξονικής συμμετρίας των κυλινδρικών δοκιμών, η ογκομετρική ανηγμένη παραμόρφωση,  $\varepsilon_v$ , για κάθε σημείο της καμπύλης είναι ίση με

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \quad (5.3)$$

Έτσι για παράδειγμα για τάση  $\sigma_a = 80$  MPa οι λόγοι Poisson είναι αντίστοιχα  $\varepsilon_a = 0.220\%$ ,  $\varepsilon_r = -0.055\%$  και  $\varepsilon_v = 0.110\%$  (Brady and Brown, 1985).



Σχήμα 5.7: Αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε πετρώματα (Brady and Brown, 1985).

#### 5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων μέσα σε στερεά υλικά εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές σταθερές των υλικών αυτών. Σε ορισμένα υλικά πολλές φορές η ποσότητα τους σχετίζεται με την ελαστική τους ακαμψία με συνέπεια η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων υπερήχων να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της ποιότητάς τους για τον καθορισμό των ελαστικών τους ιδιοτήτων. Διακρίνονται τρεις παραλλαγές στην μεθοδολογία του τρόπου μέτρησης των σεισμικών κυμάτων:

- ✓ με υπέρηχους υψηλών συχνοτήτων (100 kHz – 10 MHz, high frequency ultrasonic pulse)
- ✓ με υπέρηχους χαμηλών συχνοτήτων (2 -3 kHz, low frequency ultrasonic pulse)
- ✓ με συντονισμό (resonant method)

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μη καταστροφικών δοκιμών που εφαρμόζεται για τη μέτρηση των ελαστικών σταθερών των πετρωμάτων είναι με την χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων και την μέτρηση του χρόνου διάδοσης των κυμάτων κατά μήκος των δοκιμίων. Ο χρόνος διάδοσης υπολογίζεται μετρώντας τον χρόνο καθυστέρησης μεταξύ του πομπού και του

δέκτη που βρίσκονται στα δύο άκρα των δοκιμίων. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να υπολογιστούν τόσο η διαμήκη όσο και η εγκάρσια ταχύτητα των κυμάτων που διαδίδονται μέσα στο σώμα του δοκιμίου.

Θεωρητικά, η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος και την πυκνότητα του. Στην πράξη, το δίκτυο των ασυνεχειών και των σχισμών που πιθανόν υπάρχουν στην δομή του δοκιμίου του πετρώματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Με αυτό τον τρόπο, η ταχύτητα των υπερήχων μπορεί να αποτελέσει ένα δείκτη ένδειξης του σχισμού και της αστοχίας στην δομή των δοκιμίων.

Σε κάτι τέτοιο στηρίχθηκε ο Formaintraux το 1976 εκτελώντας την ακόλουθη διαδικασία. Πρώτα υπολόγισε την διαμήκη ταχύτητα (longitudinal velocity,  $V_l^*$ ) από τον τύπο

$$\frac{1}{V_l^*} = \sum_i \frac{C_i}{V_{l,i}} \quad (5.4)$$

όπου,

$V_{l,i}$ : η ταχύτητα του διαμήκους κύματος του ορυκτολογικού συστατικού  $i$

$C_i$ : το ποσοστό του ορυκτού στο πέτρωμα

Μέσες τιμές ταχυτήτων διαμήκη κυμάτων τόσο για ορυκτά όσο και για μερικά τυπικά πετρώματα φαίνονται στους Πίνακες 5.3 και 5.4 αντίστοιχα. Στην συνέχεια μετρώντας την πραγματική ταχύτητα του διαμήκους κύματος σε δοκίμια πετρώματος δημιούργησε τον λόγο  $V_l / V_l^*$  και στην συνέχεια ένα συντελεστή ποιότητας (Index Quality) σύμφωνα με

$$IQ\% = \frac{V_l}{V_l^*} \times 100\% \quad (5.5)$$

Τα πειράματα του Formaintraux καθιέρωσαν ότι ο συντελεστής IQ εξαρτάται από το πορώδες σύμφωνα με

$$IQ\% = 100 - 1.6 n_p \% \quad (5.6)$$

όπου,

$n_p\%$ : είναι το πορώδες του πετρώματος χωρίς ρωγμές εκφρασμένο σε ποσοστό.

Στην περίπτωση όπου έστω και ένα μικρό τμήμα του πετρώματος έχει οριζόντιες ρωγμές η παραπάνω σχέση δεν ισχύει.

Πίνακας 5.3: Τυπικές ταχύτητες διαμήκων κυμάτων ορυκτών (Goodman, 1989).

Mineral	$V_l$ (m/s)
Quartz	6050
Olivine	8400
Augite	7200
Amphibole	7200
Muscovite	5800
Orthoclase	5800
Plagioclase	6250
Calcite	6600
Dolomite	7500
Magnetite	7400
Gypsum	5200
Epidote	7450
Pyrite	8000

Πίνακας 5.4: Τυπικές ταχύτητες  $V_l^*$  πετρωμάτων (Goodman, 1989).

Rock	$V_l^*$ (m/s)
Gabbro	7000
Basalt	6500–7000
Limestone	6000–6500
Dolomite	6500–7000
Sandstone and quartzite	6000
Granitic rocks	5500–6000

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας του IQ στις ρωγμές, ο Formaintraux βασισμένος σε εργαστηριακές μετρήσεις και μικροσκοπικές παρατηρήσεις σε ρωγμές πρότεινε τον προσδιορισμό του συντελεστή IQ συναρτήσει του πορώδους (Σχήμα 5.8) ως βάση για την περιγραφή του βαθμού ρωγματώσης στα δοκίμια.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων υπερήχων εξαρτάται άμεσα από τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος καθώς και τον βαθμό ανισοτροπίας του υλικού. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ιδιότητες πετρώματος υπολογίζοντας την ταχύτητα διάδοσης τόσο των διαμήκη όσο και των εγκάρσιων κυμάτων υπερήχων σε κανονικά κυλινδρικά δοκίμια πετρωμάτων. Αυτό είναι εφικτό στο εργαστήριο με τη χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (πομπού) και τη μετατροπή υψηλής συχνότητας ηλεκτρικού παλμού σε μηχανικό παλμό στην μία επιφάνεια του δοκιμίου και τη μετατροπή του μηχανικού σε ηλεκτρικό παλμό από τον δέκτη στην άλλη πλευρά του δοκιμίου. Με την χρήση ενός παλμογράφου (oscilloscope) είναι δυνατόν να μετρηθεί ο χρόνος που απαιτεί το κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη. Έτσι είναι δυνατόν να υπολογιστούν τόσο η ταχύτητα των θλιπτικών κυμάτων,  $V_p$  (compressional wave), όσο και των διατμητικών κυμάτων  $V_s$  (shear wave).

$$V_p = \frac{d}{t_p} \quad (5.7)$$

$$V_s = \frac{d}{t_s} \quad (5.8)$$

όπου d είναι η απόσταση πομπού και δέκτη.

Αν θεωρηθεί ότι τα πετρώματα είναι ομογενή, ελαστικά και ισότροπα, τότε οι ελαστικές σταθερές του σώματος δίνονται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad (5.9)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.10)$$

όπου,

G: το μέτρο διάτμησης

K: το μέτρο συμπίεσης και

$\rho$ : η πυκνότητα του υλικού.

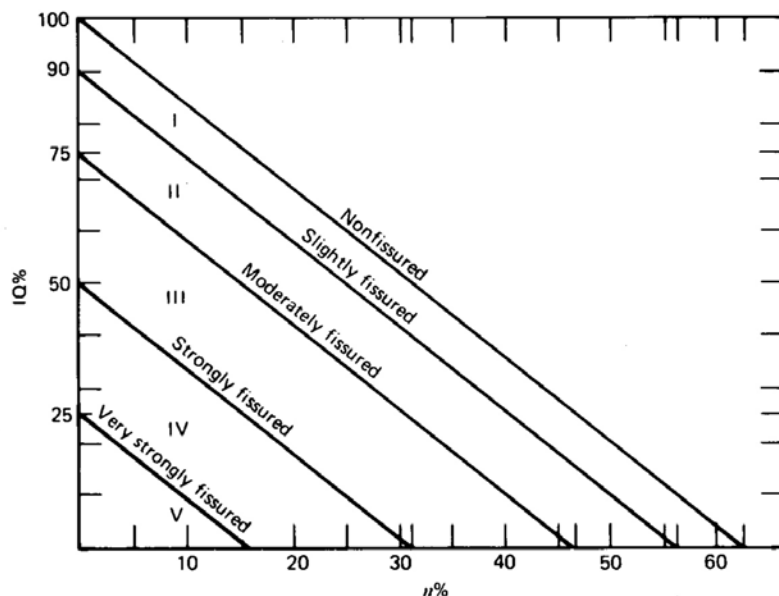
Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι

$$E = \frac{V_s^2}{g} \left[ \frac{3 \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \right] \quad (5.11)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (5.12)$$

που είναι και τα ονομαζόμενα δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας και ο δυναμικός λόγος Poisson αντίστοιχα και τα οποία έχουν συνήθως τιμές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στατικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού.





Σχήμα 5.8: Ταξινόμηση δοκιμίων πετρωμάτων σύμφωνα με τον βαθμό ρηγμάτωσης κατά τον Formaintraux (Goodman, 1989).

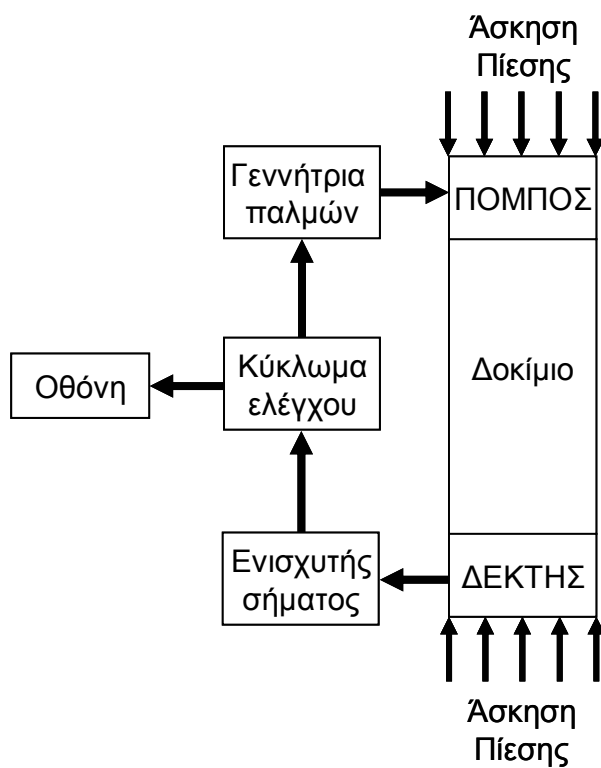
#### 5.4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια μπορεί να είναι κυλινδρικά ή ορθογωνικά με βάσεις παράλληλες μεταξύ τους με ανοχή περίπου 0.005 mm / mm της πλευρικής διάστασης. Για την καλύτερη επαφή των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων με τα δοκίμια συνιστάται η λείανση της επιφάνειας των δοκιμίων. Για πειράματα σε υψηλές συχνότητες, η ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου (π.χ. διάμετρος) πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια του μήκους κύματος του παλμού. Η απόσταση μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια από το μεγαλύτερο κόκκο του υλικού. Για τις δοκιμές χαμηλής συχνότητας, το μήκος κύματος του παλμού πρέπει να είναι τουλάχιστον πενταπλάσιο της ελάχιστης διάστασης του δοκιμίου, ενώ το μήκος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσιο της διαμέτρου του.

#### 5.4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Στη περίπτωση κυλινδρικών δοκιμίων, οι πομποί τοποθετούνται σε επαφή με τις δύο βάσεις του δοκιμίου αφού έχει τοποθετηθεί ανάμεσα τους λεπτό φύλλο μολύβδου πάχους 0.05 mm ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων στο δοκίμιο. Στη

συνέχεια το όλο σύστημα πομπών και δοκιμίου τοποθετείται σε μηχανή άσκησης θλιπτικής δύναμης όπου ασκείται πίεση της τάξεως των 4 MPa ώστε να υπάρξει όσο καλύτερη επαφή μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων και των επιφανειών του δοκιμίου. Στην συνέχεια με μείωση της πίεσης στα 0.3 MPa μετράται ο χρόνος διάδοσης των θλιπτικών και των διατμητικών κυμάτων με την χρήση ενός παλμογράφου (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Πειραματική διάταξη μέτρησης υπερήχων

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6      «ΠΡΑΣΙΝΕΣ» ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΠΕΤΡΑ**

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην παγκόσμια τάση για βιώσιμες κατασκευές, στα δομικά υλικά, και ποιο συγκεκριμένα στις τεχνητές πέτρες, ενώ περιγράφονται οι φυσικές ιδιότητες και η ορυκτολογική σύσταση τεχνητών λίθων που δοκιμάστηκαν στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

**6.1    ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αύξηση του πληθυσμού της γης και η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση πρώτων υλών και πηγών ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση των αποθεμάτων της γης σε τέτοια υλικά, ειδικά αν ληφθεί υπόψη ότι προέρχονται από μη ανανεώσιμες πηγές. Η αύξηση των κατασκευών, για παράδειγμα, έχει επηρεάσει σημαντικά το περιβάλλον αν υπολογίσει κανείς ότι οι κατασκευές απορροφούν το 1/6 των παγκόσμιων αποθεμάτων σε νερό, το 1/4 της παραγωγής ξυλείας και τα 2/5 σε υλικά και ενέργεια (SBTM, 1996).

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία των κατασκευών έχει υιοθετήσει την ιδέα της βιώσιμης ανάπτυξης βασισμένη στις αρχές της παραγωγικότητας, της υγείας και της ασφάλειας και της επιστροφής του κεφαλαίου. Με βάση τα παραπάνω, υιοθετήθηκε από τη βιομηχανία η ονομαζόμενη «πράσινη» ή βιώσιμη έννοια οικοδόμησης, η οποία είναι βασισμένη στην κατασκευή λειτουργικότερων και οικονομικότερων κτηρίων με σεβασμό στο περιβάλλον. Για τη βιώσιμη οικοδόμηση χρησιμοποιούνται οικοδομικά υλικά και μέθοδοι που προάγουν την περιβαλλοντική ποιότητα, την οικονομική ζωτικότητα και την κοινωνική παροχή μέσω του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας του περιβάλλοντος των κατασκευών.

Η βιώσιμη οικοδόμηση θα πρέπει να υιοθετεί πρακτικές υπεύθυνες απέναντι στο περιβάλλον με οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια. Ο κλάδος των οικοδομικών και τεχνικών έργων πρέπει να συναντήσει την πρόκληση της συμβολής στην οικονομική ανάπτυξη παρέχοντας νέα σπίτια, γραφεία και καταστήματα βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα των πόλεων και των επαρχιών. Βιώσιμος σημαίνει μακροχρόνιος και ανθεκτικός, επομένως η βιώσιμη

ανάπτυξη είναι η οικονομική ανάπτυξη που διαρκεί. Στον κλάδο των κατασκευών, η βιωσιμότητα είναι μεγάλης σπουδαιότητας για τους εξής λόγους (Times, 2002):

- ✓ 50% των φυσικών πόρων που λαμβάνονται από τη φύση έχουν σχέση με τις κατασκευές,
- ✓ πάνω από 50% της παγκόσμιας παραγωγής αποβλήτων προέρχεται από τον τομέα των κατασκευών, και
- ✓ το 40% της κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη έχει σχέση με τις κατασκευές.

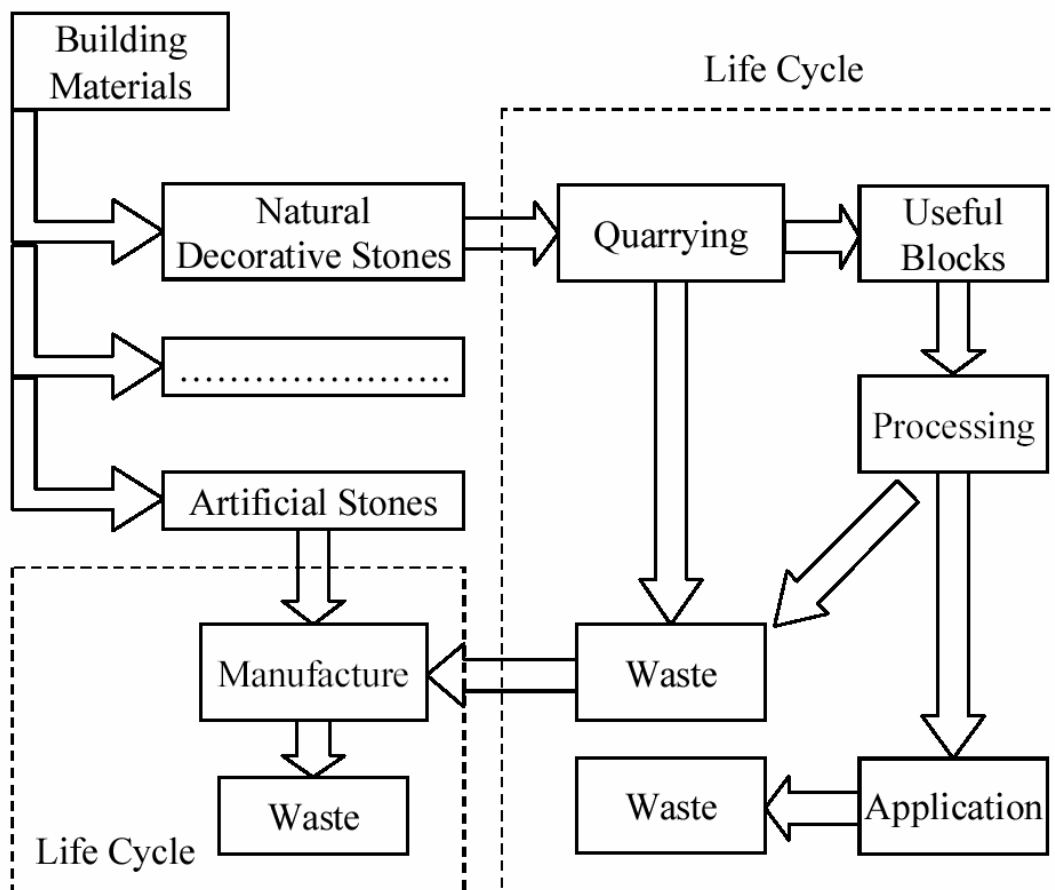
Η εξασφάλιση των πρώτων υλών για την κατασκευή των δομικών υλικών είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση των βασικών αναγκών για την κατασκευή κατοικιών καθώς επίσης και για την δημιουργία των εγκαταστάσεων της βιομηχανίας ή για τη δημιουργία της υποδομής. Οι αυξημένες απαιτήσεις της κοινωνίας σε παραγωγή πρώτων υλών, που είναι μια από τις ποικίλες δυνατότητες χρήσης του εδάφους, θα πρέπει να εξετάζονται και να αξιολογούνται κατάλληλα (VBZ, 2001).

## **6.2 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Η αξιολόγηση του Κύκλου Ζωής (KZ, Life Cycle) μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης ως κεντρική μέθοδος για την αξιολόγηση δομικών υλικών, προκατασκευασμένων τμημάτων κατασκευών και ολόκληρων κτισμάτων. Ο Γερμανικός Σύλλογος Υλικών Κατασκευών (German Building Materials Association) έχει καθιερώσει δυνατότητες και όρια για την αξιολόγηση του Κύκλου Ζωής στον τομέα των κατασκευών (VBZ, 2002).

Σε περίπτωση δομικών υλικών, ένας κύκλος ζωής θα πρέπει να περιλαμβάνει και να καθορίζει τα απόβλητα (ή τις εκπομπές) που δημιουργούνται καθώς και τις πρώτες ύλες και την ενέργεια που απαιτείται κατά τη διάρκεια του KZ ενός προϊόντος. Επίσης, θα πρέπει να προσεγγιστεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος αυτής της διαδικασίας. Εάν η αξιολόγηση του Κύκλου Ζωής πραγματοποιείται για τη σύγκριση προϊόντων αυτό το βήμα μπορεί να περιλαμβάνει την πρόταση των πιο συμβατών με το περιβάλλον προϊόντων (Κομνίτσας και Αγιουτάντης, 2003).

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική ακολουθία KZ για φυσικές διακοσμητικές πέτρες που παράγονται ως αποτέλεσμα της εξόρυξης. Όπως μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί, στις περισσότερες περιπτώσεις πολλά απόβλητα παράγονται είτε στην πηγή είτε στο σημείο εφαρμογής. Ένα σχέδιο αποβλήτων βασισμένο στις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης εστιάζει

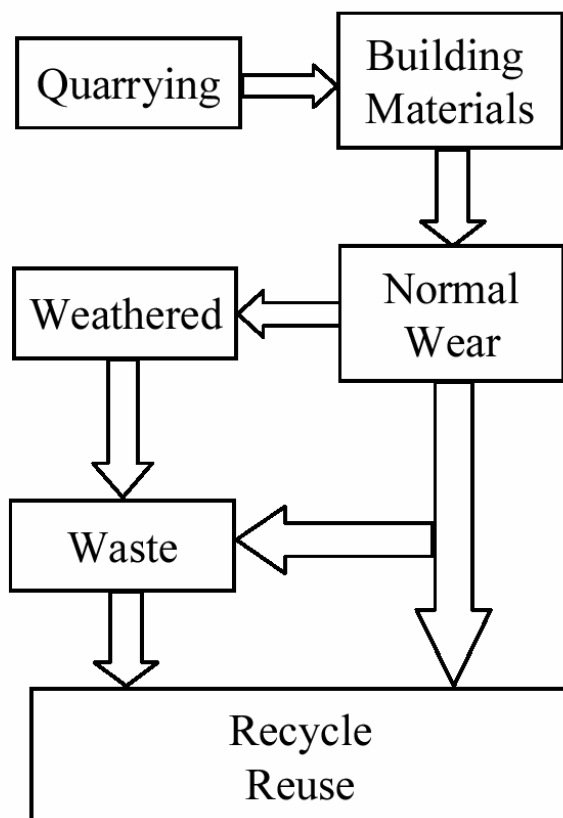


Σχήμα 6.1: Ο Κύκλος Ζωής των δομικών υλικών (Μαυριγιαννάκης et al, 2003):

πρώτιστα στη μείωση παραγόμενων ποσοτήτων αποβλήτων, καθώς επίσης και στην προώθηση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης. Το Σχήμα 6.2 παρουσιάζει μια λεπτομερή ακολουθία ΚΖ, όταν εισάγεται σε αυτόν εκτενής διάβρωση στις διακοσμητικές πέτρες λόγω γήρανσης. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να παραχθούν περισσότερα απόβλητα από την αντικατάσταση διαβρωμένων και εξαλλοιωμένων τμημάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

### 6.3 ΤΕΧΝΗΤΗ ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΗ ΠΕΤΡΑ

Μία εταιρία η οποία εξελίσσεται συνεχώς στον Ελλαδικό χώρο και έχει λάβει υπόψη της στον τομέα της παραγωγής νέων δομικών προϊόντων όλα τα προαναφερόμενα είναι η ΜΑΘΙΟΣ ΠΥΡΙΜΑΧΑ Α.Ε.. Η ΜΑΘΙΟΣ ΠΥΡΙΜΑΧΑ Α.Ε, αποτελεί μια παραδοσιακή επιχείρηση της οικογένειας του Δημήτριου Μαθιού, η οποία από το 1880 δραστηριοποιείται



Σχήμα 6.2: Ο ΚΖ των δομικών υλικών και η επίδραση της γήρανσης,  
(Μαυριγιαννάκης et al, 2003):

στη παραγωγή και το εμπόριο πυρίμαχων και οξύμαχων οικοδομικών υλικών και τις βιομηχανικές κατασκευές.

Η εταιρία ιδρύεται ως ατομική επιχείρηση από τον Δημήτριο Μαθιό το 1880 με αντικείμενο τις βιομηχανικές πυρίμαχες κατασκευές (καμινάδες, φούρνους, κλπ). Η Μαθιός εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου και το 1986 μετατρέπεται από οικογενειακή επιχείρηση σε ανώνυμη εταιρία με την σημερινή της επωνυμία. Κατά την περίοδο 1987-89 γίνεται σειρά νέων επενδύσεων με αυτοχρηματοδότηση (κτίρια γραφείων, νέα μονάδα παραγωγής πυρίμαχων μαζών, νέα μονάδα διόγκωσης βερμικουλίτη, νέος φούρνος προκατασκευασμένων και μονωτικών τούβλων, μονάδα διαβάθμισης ταξινόμησης πρώτων υλών, κλπ). Ενώ το 1991 αγοράζει οικόπεδο στην Βιομηχανική Περιοχή Σίνδου Θεσσαλονίκης, στο οποίο ανεγείρει αποθηκευτικούς χώρους για την διακίνηση των προϊόντων της στην Βόρεια Ελλάδα και τις Βαλκανικές χώρες. Το 1995 επεκτείνει την παραγωγή τεχνητής πέτρας και αρχίζει να πραγματοποιεί εξαγωγές. Από το 2003 μέχρι

σήμερα έχει απορροφήσει νέα αναπτυξιακά και περιβαλλοντικά προγράμματα επιδοτούμενα από το Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Μια άλλη προσέγγιση για την μείωση μεταλλευτικών και βιομηχανικών αποβλήτων, που ήδη εφαρμόζεται σε διάφορες χώρες συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, είναι η χρήση τεχνητών διακοσμητικών λίθων σε αντικατάσταση των φυσικών. Οι τεχνητές πέτρες μπορεί να είναι παρόμοιας υψηλής ποιότητας με τις φυσικές πέτρες και μπορούν επίσης να παρουσιάσουν παρόμοιες ή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε πολλές περιπτώσεις. Επίσης οι τεχνητές πέτρες μπορούν να είναι χαμηλότερου κόστους σε αντιστοιχία με τις φυσικές πέτρες και η διαθεσιμότητά τους είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε εξορυκτική δραστηριότητα. Ένα από τα προϊόντα που παράγει η Μαθιός Πυρίμαχα Α.Ε. είναι τεχνητές διακοσμητικές πέτρες τις οποίες τις διαθέτει τόσο στην Ελληνική αγορά όσο και σε αγορές του εξωτερικού με μεγάλη ανταπόκριση. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική εφαρμογή αυτών των τεχνητών διακοσμητικών λίθων.

Η τεχνητή πέτρα που δοκιμάστηκε στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας ήταν της σειράς «masterstone» (εμπορική επωνυμία) που παράγει η Μαθιός Πυρίμαχα Α.Ε.. Η τεχνητή αυτή πέτρα είναι μία προσπάθεια «αναγέννησης» της φυσικής πέτρας, της οποίας η τοποθέτηση και εφαρμογή της δίνουν την εικόνα επιφανειών φυσικής πέτρας. Η υφή και οι χρωματισμοί της «masterstone» δίνουν μια εντελώς φυσική αίσθηση τόσο από απόσταση όσο και με παρατήρηση από κοντά. Η γκάμα της σειράς αυτών των προϊόντων μπορούν να αντικαταστήσουν όλα τα είδη φυσικών επιφανειών στις κατασκευές από ελαφριές και ανθεκτικές παραδοσιακές επιφάνειες με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Χάρη στην ποιότητα των επιφανειών και την αντοχή των χρωματισμών των διακοσμητικών λίθων μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε εσωτερικούς χώρους όσο και εξωτερικούς με την ίδια επιτυχία.

Πίνακας 6.1: Διαστάσεις τεχνητών διακοσμητικών λίθων (masterstone).

Διάσταση	Από (cm)	Έως (cm)
Ύψος	2	20
Μήκος	10	85
Πάχος	2	8



Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστική εφαρμογή τεχνητών διακοσμητικών λίθων, (φωτογραφία από πολυκατοικία στα Χανιά) .

Τα προϊόντα αυτά παρέχονται σε πληθώρα διαστάσεων και χρωματισμών με αποτέλεσμα να γίνονται ιδιαίτερα ανταγωνιστικά σε σχέση με τα φυσικά προϊόντα για οικιακές εφαρμογές, επαγγελματικούς και βιομηχανικούς χώρους (Πίνακας 6.1).

#### **6.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**

Για την εκτέλεση των δοκιμών που προαναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο ήταν απαραίτητη η κατασκευή ικανοποιητικού αριθμού κυλινδρικών δοκιμίων παρασκευασμένα από το ίδιο υλικό που χρησιμοποιούνταν από την βιομηχανία για την παραγωγή των προϊόντων της. Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια προερχόταν από το ίδιο «χαρμάνι» παραγωγής





Σχήμα 6.4: Διακοσμητική τεχνητή πέτρα «highland».

με το εμπομαζόμενο προϊόν «highland» της σειράς «masterstone» της Μαθιός Πυρίμαχα Α.Ε. (Σχήμα 6.4).

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας εργασίας ήταν κυλινδρικά δοκίμια με σχέση ύψους – διαμέτρου δύο προς ένα, και ποιο συγκεκριμένα ύψους 100 mm και διαμέτρου 50 mm (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Κυλινδρικό δοκίμιο από το ίδιο υλικό που παρασκευάζονται τα προς κατανάλωση πλακίδια.

Πίνακας 6.2: Συνοπτικός πίνακας δοκιμών.

Ξήρανση	Κανονική (Κ)		Βιομηχανική (Α)		Γρήγορη (Γ)	
Είδος	Λευκά (L)	Κόκκινα (R)	Λευκά (L)	Κόκκινα (R)	Λευκά (L)	Κόκκινα (R)
1 <sup>η</sup> Σειρά	16	16	-	-	-	-
2 <sup>η</sup> Σειρά	10	-	10	-	10	-
3 <sup>η</sup> Σειρά	-	10	-	10	-	10

Οι εργαστηριακές δοκιμές εκτελέστηκαν για τρεις (3) σειρές κυλινδρικών δοκιμών. Η κάθε σειρά είχε κάποια ιδιαιτερότητα (Πίνακας 6.2). Η πρώτη σειρά των δοκιμών αποτελούνταν από τριάντα δύο (32) δοκίμια, από τα οποία δεκαέξι ήταν λευκά (με κωδικό L) και δεκαέξι ήταν κόκκινα (με κωδικό R), και όλα ήταν από το ίδιο χαρμάνι με αυτό που χρησιμοποιούνταν στην παραγωγική διαδικασία. Η ξήρανση τους έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η δεύτερη σειρά των δοκιμών αποτελούνταν από τριάντα (30) δοκίμια λευκά, τα οποία όμως είχαν διαφορές όσο αφορά το τρόπο ξήρανσης τους. Για την ακρίβεια τα δέκα από αυτά είχαν υποστεί ξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (με κωδικό K), αλλά δέκα με βιομηχανική ξήρανση στους 60 – 70 °C (με κωδικό Α), και δέκα με γρήγορη ξήρανση στους 100 °C (με κωδικό ΓΞ). Τέλος η τρίτη σειρά αποτελούνταν επίσης από τριάντα (30) κόκκινα κυλινδρικά δοκίμια (R) τα οποία είχαν υποστεί τους ίδιους τρόπους ξήρανσης με τα δοκίμια της δεύτερης σειράς και κωδικούς ΔΑΞ, ΔΚΞ και ΔΓΞ αντίστοιχα για αργή, κανονική και γρήγορη ξήρανση.

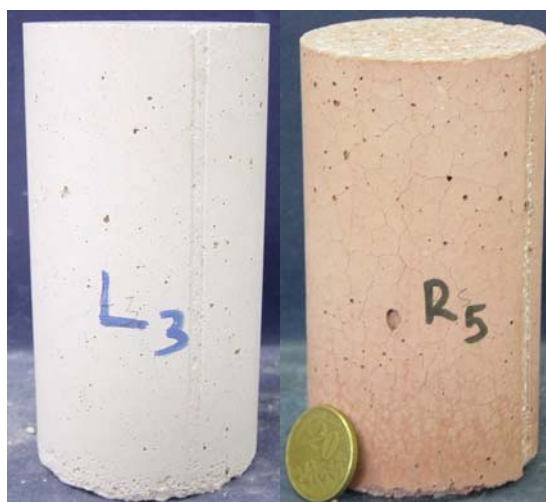
## 6.5 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τον προσδιορισμό των υλικών από τα οποία αποτελούνταν τα δοκίμια που μελετήθηκαν στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας αλλά και για την ερμηνεία της συμπεριφοράς τους στις δοκιμές μηχανικής γήρανσης ήταν επιτακτικός ο προσδιορισμός τόσο των αδρανών όσο και του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται από την βιομηχανία για την παρασκευή των προαναφερόμενων προϊόντων.



Σχήμα 6.6: Συσκευή XRD (Εργαστήριο Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας).

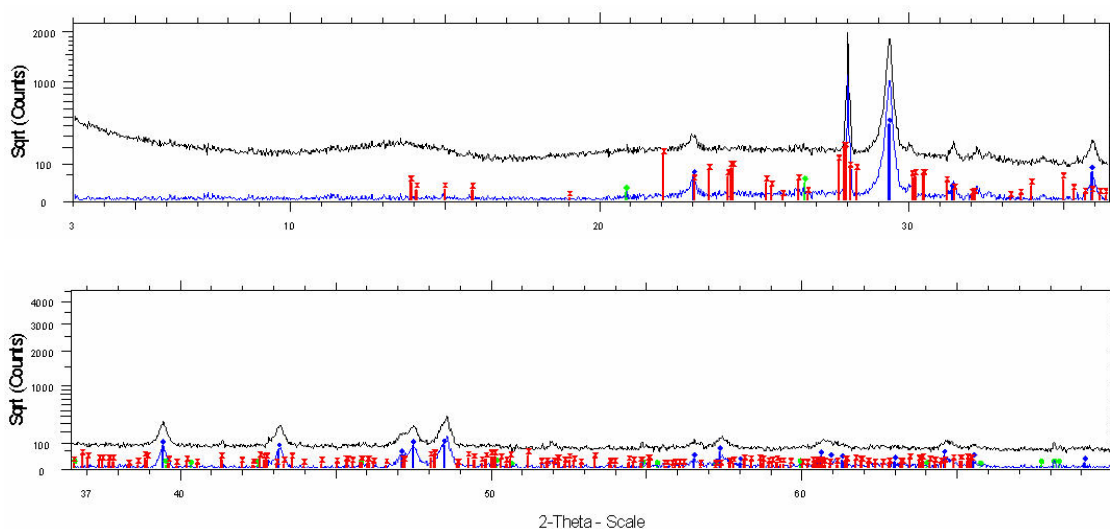
Για αυτό το λόγο κρίθηκαν απαραίτητες οι ορυκτολογικές αναλύσεις XRD (Σχήμα 6.6) και στις δύο μορφές των δειγμάτων τόσο για το υλικό που αποτελούσε τα λευκά δοκίμια (L) όσο και το υλικό των κόκκινων δοκιμίων (R), Σχήμα 6.7. Οι μετρήσεις έγιναν στο



Σχήμα 6.7: Τα δύο είδη υλικών .

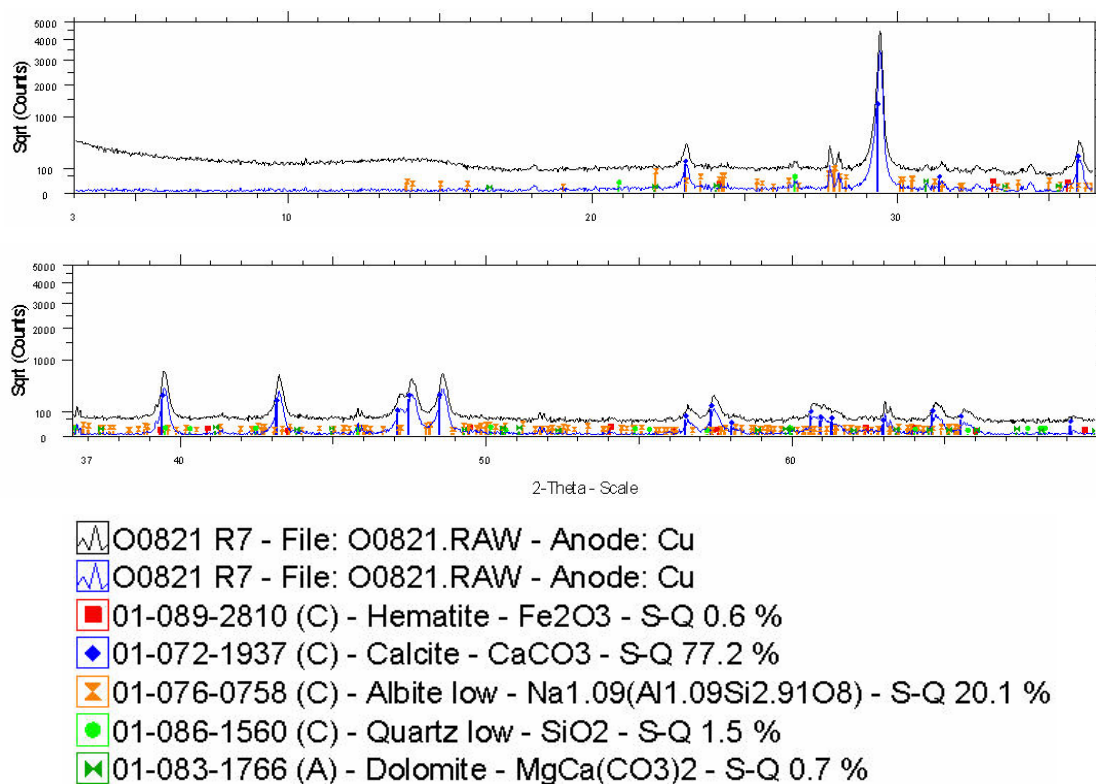
περιθλασίμετρο κόνεως ακτίνων X, D500 της εταιρίας SIEMENS του Εργαστηρίου Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας και χρησιμοποιήθηκε λυχνία χαλκού με μονοχρωματογράφο γραφίτη. Ο ποιοτικός προσδιορισμός των κρυσταλλικών φάσεων έγινε με το λογισμικό πακέτο Diffraction Plus της εταιρίας Brucker και την βάση δεδομένων Powder Diffraction File. Τα αποτελέσματα αυτής της επεξεργασίας είναι τα γωνιογράμματα των Σχημάτων 6.8 και 6.9 για τα το λευκό και το κόκκινο δείγμα αντίστοιχα. Το υψηλός θόρυβος (background) που απεικονίζεται με την μαύρη γραμμή στα γωνιογράμματα οφείλεται στην παρουσία άμορφων φάσεων.

Η ποσοτική ανάλυση έγινε με το λογισμικό Autoquan που βασίζεται στην μέθοδο Rietveld. Στα προς μελέτη δείγματα έγινε προσθήκη 20% κορούνδιο, προκειμένου να προσδιοριστεί το ποσοστό του άμορφου υλικού. Στην συνέχεια με την μέθοδο Rietveld γίνεται προσομοίωση του πειραματικού γωνιογράμματος με ένα θεωρητικό, το οποίο υπολογίστηκε με βάση τις κρυσταλλικές δομές των κρυσταλλικών φάσεων του δείγματος. Τα αποτελέσματα των ποσοτικών αναλύσεων παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.10 και 6.11 για το λευκό (L) και το κόκκινο (R) δείγμα αντίστοιχα.



- O0820 A10 - File: O0820.RAW - Anode: Cu
- O0820 A10 - File: O0820.RAW - Anode: Cu
- 01-072-1937 (C) - Calcite -  $\text{CaCO}_3$  - S-Q 29.5 %
- 01-076-0758 (C) - Albite low -  $\text{Na}_{1.09}(\text{Al}_{1.09}\text{Si}_{2.91}\text{O}_8)$  - S-Q 68.8 %
- 01-086-1560 (C) - Quartz low -  $\text{SiO}_2$  - S-Q 1.7 %

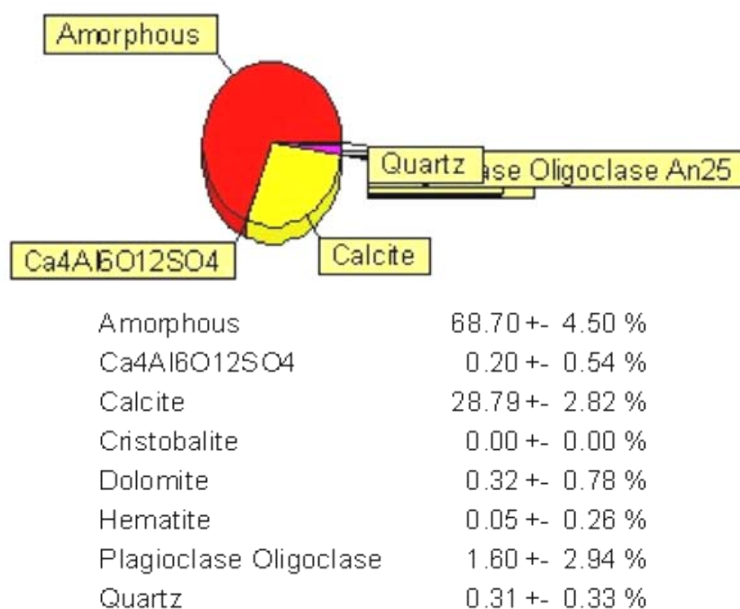
Σχήμα 6.8: Γωνιόγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X δείγματος (L): προσδιορίστηκαν τα ορυκτά ασβεστίτη, αλβίτη και χαλαζία .



Σχήμα 6.9: Γωνιόγραμμα περιθλασίμετρίας ακτίνων X δείγματος (R): προσδιορίστηκαν τα ορυκτά ασβεστίτη, αλβίτη, χαλαζία, δολομίτη και αιματίτη.

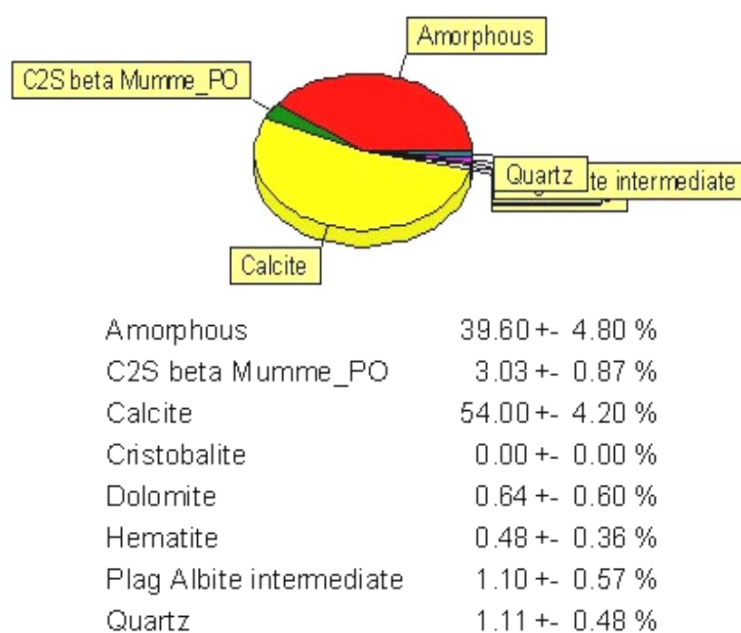
Αυτό που παρατηρείται είναι ότι το δείγμα L παρουσιάζει αυξημένο ποσοστό άμορφου υλικού της τάξεως του 69%, ενώ το ποσοστό του ασβεστίτη είναι της τάξεως του 29% και πολύ μικρότερα είναι τα ποσοστά του δολομίτη, του πλαγιόκλαστου και του χαλαζία, (Σχήμα 6.9). Όσο για το δείγμα R το ποσοστό του άμορφου είναι 40% ενώ μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του ασβεστίτη 54% που συναντάται τόσο στο αδρανές όσο και στις φάσεις του τσιμέντου. Και εδώ είναι μικρότερα τα ποσοστά του αιματίτη, του δολομίτη και του χαλαζία, (Σχήμα 6.10).

Στα Σχήματα 6.12 και 6.13 παρουσιάζονται εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) που λήφθηκαν στο Εργαστήριο Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας για το δείγμα L στις οποίες διακρίνεται η ύπαρξη κρυστάλλου περλίτη ο οποίος εφάπτεται με το συνδετικό υλικό (matrix). Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα. Από την φασματική ανάλυση 1 φαίνεται η μεγάλη συγκέντρωση Si λόγω της ύπαρξης του περλίτη αλλά και Ca λόγω της ύπαρξης των φάσεων του τσιμέντου. Επίσης και στην ανάλυση 2 η οποία είναι κυρίως πάνω στο συνδετικό υλικό φαίνεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση Ca και



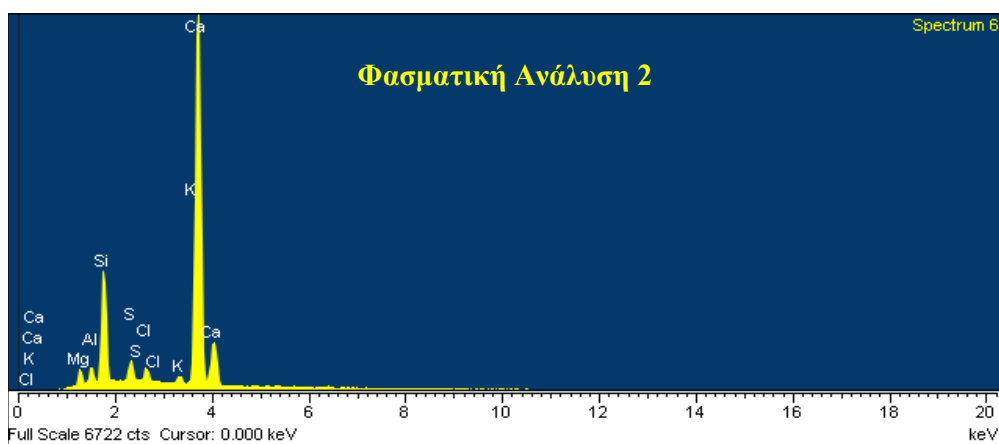
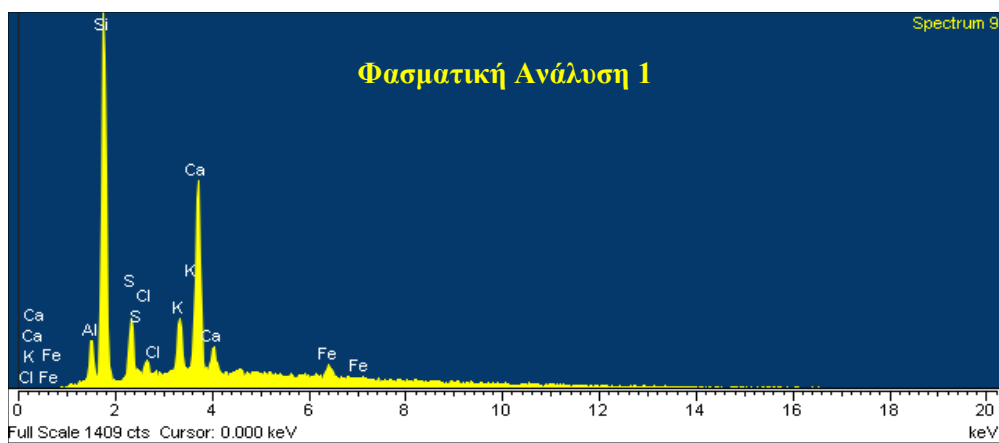
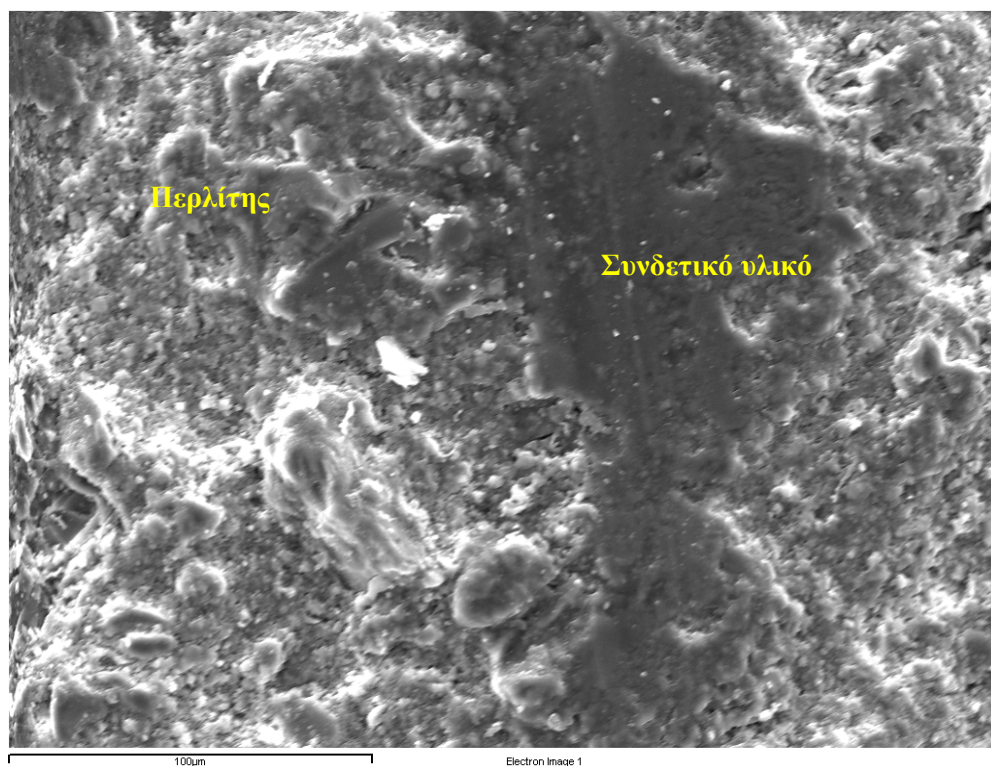
Σχήμα 6.10: Ποσοστά ορυκτών δείγματος (L).

λιγότερου Si. Ενώ στην φασματική ανάλυση 3 παρατηρούνται θεϊκά άλατα καθώς και Si λόγω του συνδετικού υλικού.

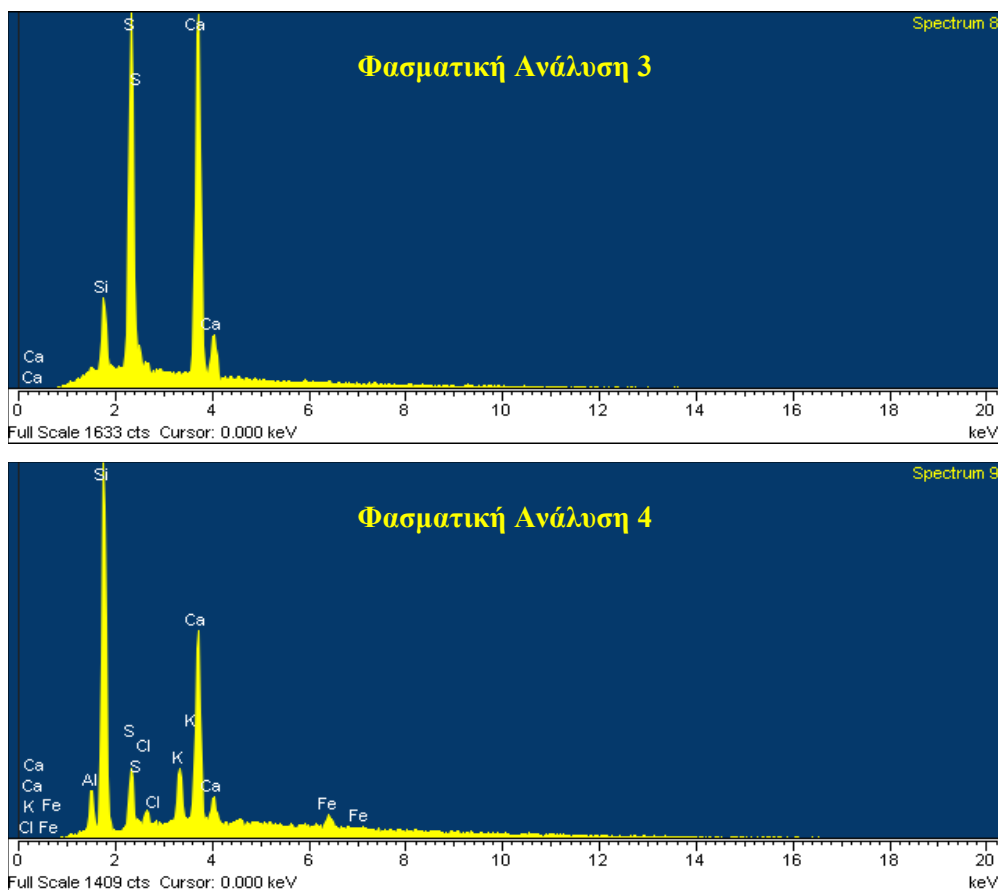


Σχήμα 6.11: Ποσοστά ορυκτών δείγματος (R).





Σχήμα 6.12: Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και φασματικές αναλύσεις δείγματος (L).

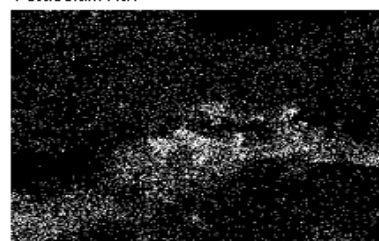
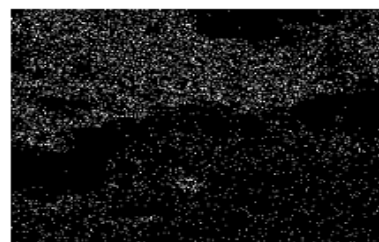
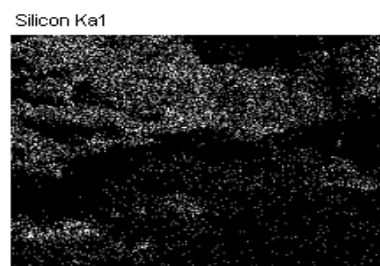
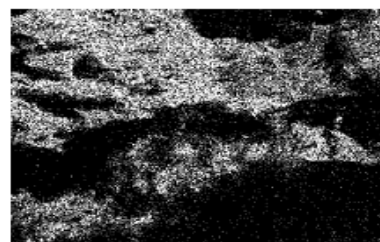
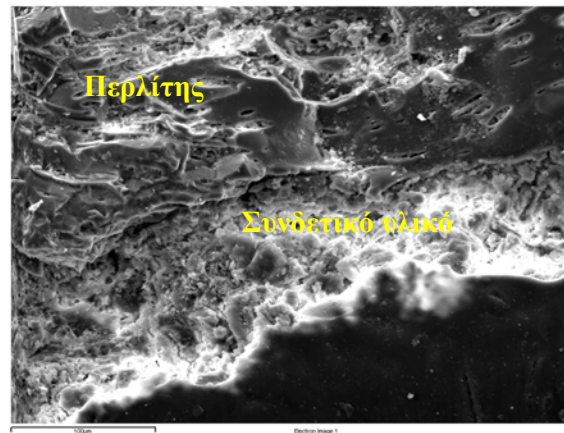


Σχήμα 6.13: Φασματικές αναλύσεις δείγματος (L).

Στο Σχήμα 6.14 μπορεί να παρατηρηθεί η επαφή μεταξύ ενός κρυστάλλου περλίτη με την συνδετικό υλικό καθώς και η ύπαρξη Si, K και Al μόνο στην περιοχή του κρυστάλλου του περλίτη, ενώ αντίθετα παρατηρείται η ύπαρξη Ca μόνο στην συνδετικό υλικό. Στο Σχήμα 6.15 φωτογραφίζεται ένας κόκκος περλίτη ο οποίος χαρακτηρίζεται από την παρουσία Si, K, Al και Na, ενώ δεν παρατηρείται η παρουσία Ca λόγω της πολύ χαμηλής συγκέντρωσης.

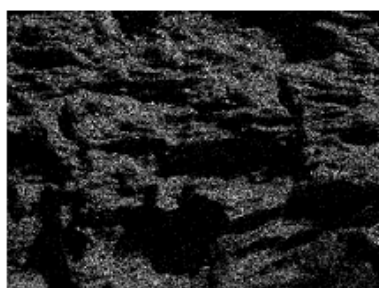
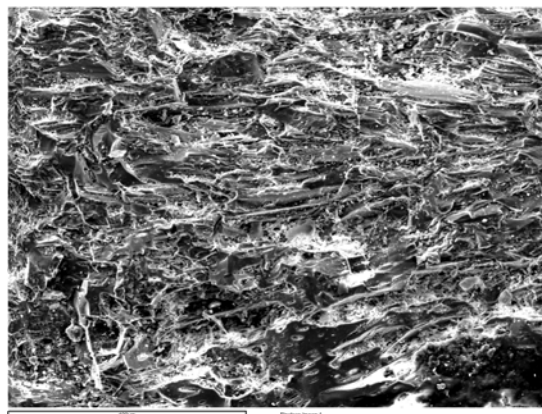
Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες φωτογραφίες του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και φασματικές αναλύσεις για το δείγμα R όπου μπορεί να παρατηρηθεί η επαφή ενός κρυστάλλου ασβεστίτη και του συνδετικού υλικού, ενώ η φασματική ανάλυση 5 δείχνει την παρουσία Ca τόσο στο φάσμα του ασβεστίτη όσο και του συνδετικού υλικού. Ενώ στην φασματική ανάλυση 6 εκτός της παρουσίας του Ca υπάρχει και Si λόγω της ύπαρξης του συνδετικού υλικού.





Σχήμα 6.14 Κρύσταλλος περλίτη σε επαφή με συνδετικό υλικό.

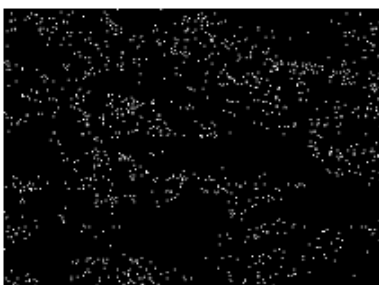
Στο Σχήμα 6.17 παρατηρείται η επαφή ενός κρυστάλλου ασβεστίτη με το συνδετικό υλικό, όπου το Ca συγκεντρώνεται κυρίως στον ασβεστίτη ενώ το Si λείπει από τη περιοχή του ασβεστίτη και παρατηρείται μόνο στο συνδετικό υλικό. Τέλος στο Σχήμα 6.18 παρατηρείται η συγκέντρωση Ca συγκεντρωμένη στον ασβεστίτη και διάχυτη στο συνδετικό υλικό, ενώ αντίθετα το Si παρατηρείται μόνο στο συνδετικό υλικό.



Silicon Ka1



Aluminum Ka1

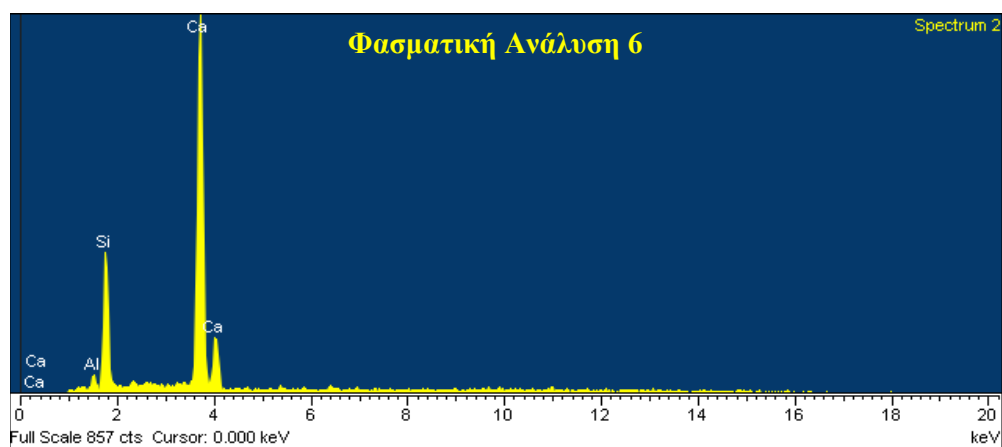
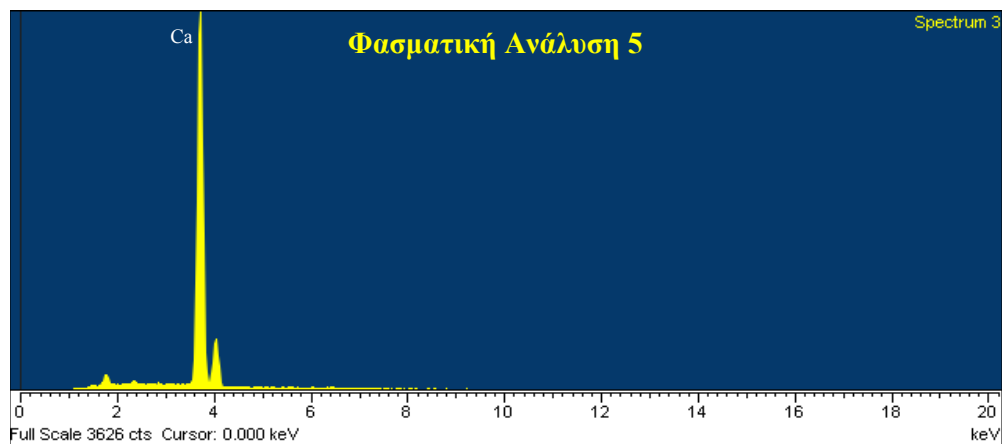
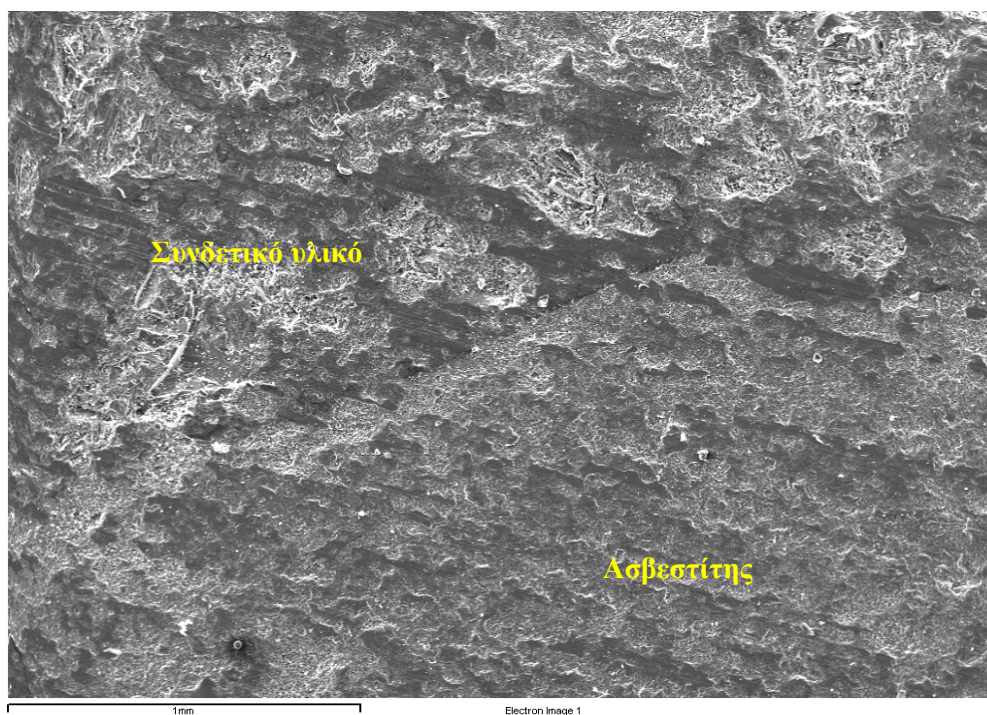


Sodium Ka1\_2

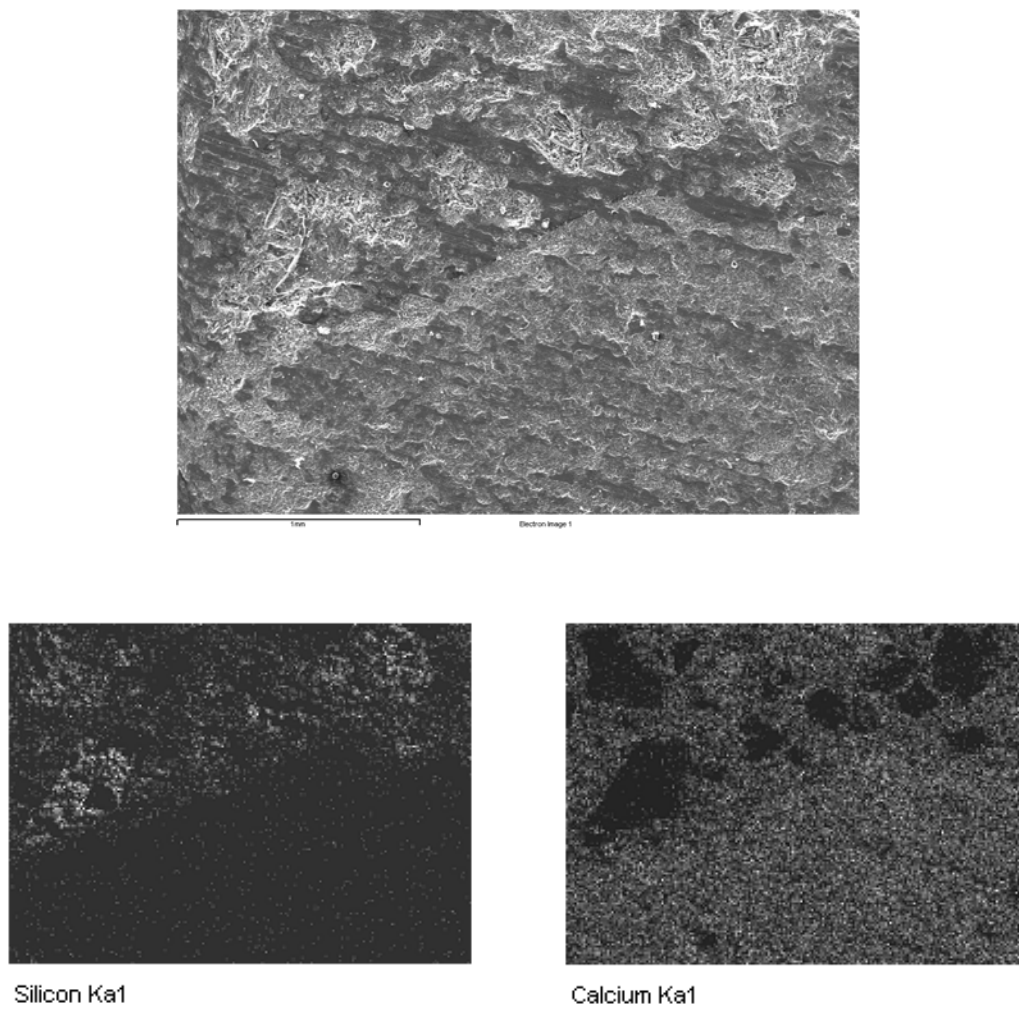


Potassium Ka1

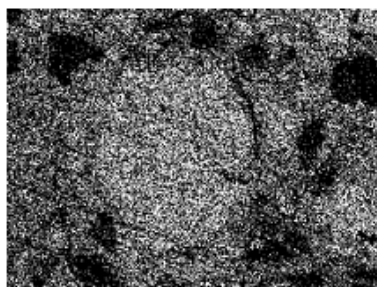
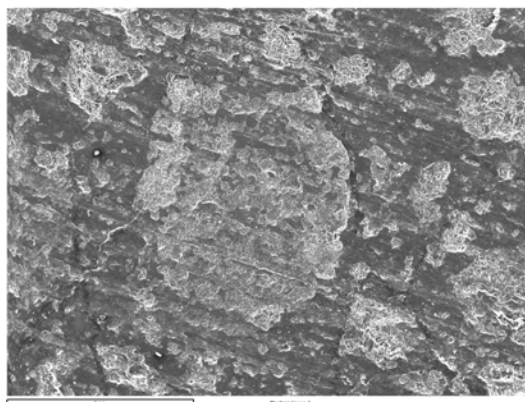
Σχήμα 6.15: Κρύσταλλος περλίτη στο δείγμα L.



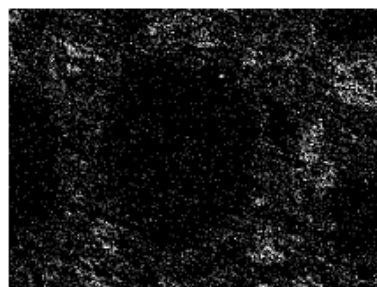
Σχήμα 6.16: Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και φασματικές αναλύσεις δείγματος (R)



Σχήμα 6.17: Επαφή κρυστάλλου ασβεστίτη με συνδετικό υλικό στο δείγμα (R)



Calcium Ka1



Silicon Ka1

Σχήμα 6.18: Κρύσταλλος ασβεστίτη μέσα στο συνδετικό υλικό, στο δείγμα (R)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ**

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας είχε ως αντικείμενο την μελέτη της συμπεριφοράς μιας ομάδας υλικών που χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία για την παρασκευή τεχνητών διακοσμητικών λίθων, σε συνθήκες μηχανικής γήρανσης. Οι δοκιμές της μηχανικής γήρανσης που εκτελέστηκαν είχαν σκοπό τη διερεύνηση της αντοχής των υλικών αυτών σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που τοποθετούνται και πιο συγκεκριμένα σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης σύμφωνα με πρότυπες προδιαγραφές (ASTM D5312). Επίσης μελετήθηκαν οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων των τεχνητών διακοσμητικών λίθων με την πάροδο του χρόνου, σε συνάρτηση των θερμοκρασιακών μεταβολών του περιβάλλοντός των.

### **7.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών ήταν απαραίτητη η χρήση των ακόλουθων εργαστηριακών διατάξεων:

- ✓ Κλιματικός θάλαμος
- ✓ Συσκευή υπερήχων
- ✓ Μηχανή δοκιμής θλίψης

#### **7.1.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ**

Η συσκευή που περιγράφεται παρακάτω είναι ένας κλιματικός θάλαμος (climatic chamber), Τύπου GTS 600 της Angelantoni Industry, ειδικά κατασκευασμένος για να εκτελεί αξιόπιστες δοκιμές σε βιομηχανικές εφαρμογές και κατάλληλος για κάθε εφαρμογή που χρειάζεται έλεγχο της θερμοκρασίας και δοκιμές που έχουν σχέση με την υγρασία. Η συσκευή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές σε υλικά βιομηχανικών εφαρμογών ή οικιακά προϊόντα τα οποία υποβάλλονται σε δοκιμές εναλλαγών θερμοκρασίας και υγρασίας. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του κλιματικού θαλάμου.

Ο κλιματικός θάλαμος έχει την δυνατότητα:

- Ψύξης
- Θέρμανσης
- Έλεγχο σχετικής υγρασίας
  - Αφύγρανση
  - Ύγρανση
  - Παραγωγή ατμού
- Δοκιμή CO<sub>2</sub>
- Δοκιμή NO<sub>2</sub>
- Δοκιμή βροχής
- Δοκιμή ηλιακής ακτινοβολίας

*Πίνακας 7.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά κλιματικού θαλάμου.*

<b>ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b> <b>ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ Μοντέλο GTS 600</b>	
Σύνηθες θερμοκρασιακό εύρος	-20 °C έως +80 °C
Ακρίβεια θερμοκρασίας	± 1 °C σε σταθερές συνθήκες (100mm από τοιχώματα)
Ταχύτητα θερμοκρασιακής μεταβολής	0,5 °C/min θέρμανσης από -10 °C σε +80 °C 0,5 °C/min ψύξης από +80 °C σε -10 °C
Εύρος σχετικής υγρασίας	από 10 % έως 98 %
Ακρίβεια σχετικής υγρασίας	±3%...±5% και σε κάθε περίπτωση όχι μικρότερη από ± 1 °C από την διαφορά από το σημείο δρόσου
Εύρος σημείου δρόσου	Από + 4 °C έως + 79 °C



**Σύστημα ελέγχου**

Η λειτουργία του κλιματικού θαλάμου υποστηρίζεται από Η/Υ με κατάλληλο λογισμικό (Software) το οποίο ονομάζεται Winkratos και το οποίο έχει την ικανότητα να υποστηρίζει την λειτουργία και τον έλεγχο θερμοστατικών και κλιματικών θαλάμων αυτού τύπου. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων διατάξεων και αισθητήρων. Μερικές από τις δυνατότητες που δίνονται μέσω του προγράμματος είναι:

- Δημιουργία και επεξεργασία αρχείων θερμικών κύκλων.
- Γραφική απεικόνιση θερμικών κύκλων.
- Καταγραφή σε πραγματικό χρόνο όλων των παραμέτρων σε ένα πείραμα.
- Γραφικές παρουσιάσεις των καταγραφόμενων παραμέτρων.
- Παρουσίαση των καταγραφόμενων παραμέτρων σε μορφή πίνακα.

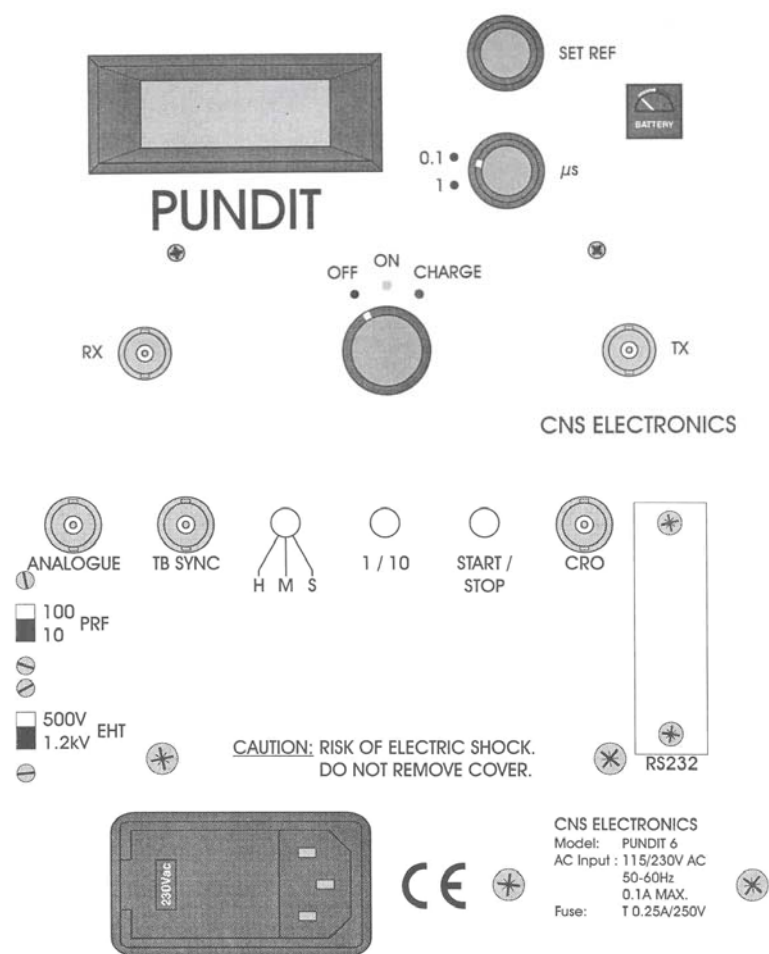


Σχήμα 7.1: Κλιματικός θάλαμος GTS 600 της Angelantoni Industry



### 7.1.2 ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Για τον υπολογισμό της ποιότητας των υλικών από την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων ήταν απαραίτητο η ταχύτητα να μετράται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε συσκευή παραγωγής παλμών και καταγραφής του χρόνου διάδοσης. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο ήταν το PUNDIT 6 (αρχικά από την έκφραση «Portable Ultrasonic Non – destructive Digital Indicating Tester»), μία συσκευή φορητή, αρκετά απλή στην λειτουργία, με μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων και σταθερότητα. Έχει την δυνατότητα παραγωγής συχνοτήτων υπερήχων και άμεσης μέτρησης του χρόνου διέλευσης του κύματος από τον πομπό στο δέκτη. Η κλίμακα μέτρησης είναι από 0,1  $\mu$ s έως 9999  $\mu$ s, με ακρίβεια μέτρησης της τάξεως του  $\pm 0,1 \mu$ s και ένδειξη σε οθόνη LCD (Σχήμα 7.2).

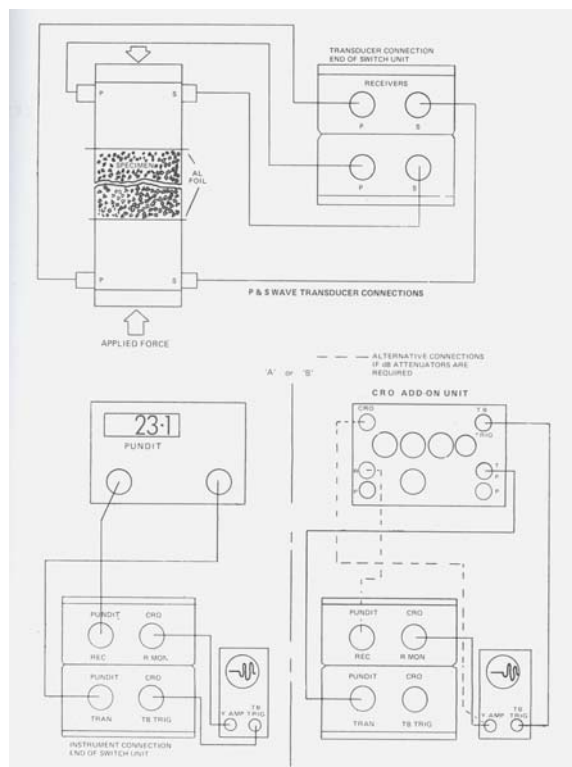


Σχήμα 7.2: Συσκευή υπερήχων Pundit 6.



Σχήμα 7.3: Πομπός/δέκτης κυμάτων P και S.

Για την διάδοση και την μέτρηση των υπερήχων χρησιμοποιήθηκαν πομποί/δέκτες με δυνατότητα μέτρησης ταχυτήτων θλιπτικών (P) και διατμητικών (S) κυμάτων της εταιρίας CNS Farnell. Οι πομποί/δέκτες είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα με μέγιστη φέρουσα ικανότητα 220 kN (22 tons), ειδικά για την χρήση τους στο πεδίο της μηχανικής πετρωμάτων. Έχουν ονομαστική συχνότητα 1 MHz, ενώ η διάμετρος και το ύψος τους είναι 50 mm (Σχήμα 7.3). Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται ο τρόπος της συνδεσμολογίας των πομπών/δεκτών με την συσκευή Pundit για την μέτρηση των ταχυτήτων.



Σχήμα 7.4: Συνδεσμολογία πομπών/δεκτών και Pundit.

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών μέτρησης των ταχυτήτων των υπερήχων στα κυλινδρικά δοκίμια, τα δοκίμια τοποθετούνται ανάμεσα στο πομπό και το δέκτη αφού έχει τοποθετηθεί λεπτό φύλο κασσίτερου πάχους 0,05 mm στην μεταξύ τους διεπιφάνεια για καλύτερη μετάδοση των κυμάτων. Το όλο σύστημα πομπών και δοκιμίου τοποθετείται σε χειροκίνητη πρέσα λαδιού για την άσκηση θλιπτικής τάσης 4,0 MPa για την απόκτηση καλύτερης επαφής, ενώ στην συνέχεια με αποφόρτιση στα 0,3 MPa καταγράφεται η ταχύτητα διάδοσης του κύματος των υπερήχων (Σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5: Τοποθέτηση δοκιμίου στη πρέσα για μέτρηση των υπερήχων.

### 7.1.3 ΜΗΧΑΝΗ ΑΣΚΗΣΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Για τις δοκιμές θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μία άκαμπτη μηχανή άσκησης θλιπτικών φορτίων MTS 1600kN (Σχήμα 7.6), με δυνατότητα φόρτισης τόσο με έλεγχο φορτίου (load control) όσο και με έλεγχο μετατόπισης (displacement control). Η συγκεκριμένη μηχανή έχει δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής τόσο των ασκούμενων δυνάμεων όσο και των παραμορφώσεων με την χρήση κατάλληλων υπολογιστών με τα απαραίτητα λογισμικά (Σχήμα 7.7). Έχει την δυνατότητα ασκήσεως των περισσότερων δοκιμών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων και παρεμφερών υλικών, όπως:

- ✓ Δοκιμή σε θλίψη
- ✓ Τριαξονική δοκιμή
- ✓ Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού
- ✓ Δοκιμή σε κάμψη.

Στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας εκτελέστηκε η δοκιμή σε μοναξονική φόρτιση για τον προσδιορισμό του Μέρους Ελαστικότητας και της αντοχής σε θλίψη των



Σχήμα 7.6: MTS 1600 kN.



Σχήμα 7.7: Σύστημα καταγραφής και ελέγχου.

υλικών σύμφωνα με τα παγκόσμια πρότυπα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι δοκιμές στα κυλινδρικά δοκίμια έγιναν με έλεγχο μετατόπισης και πιο συγκεκριμένα με ρυθμό φόρτισης  $0,0075 \text{ mm/sec}$  (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.8: Δοκιμή αντοχής σε θλίψη.

## 7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται όλα τα βήματα και τα στάδια που εκτελέστηκαν κατά το πειραματικό μέρος της συγκεκριμένης εργασίας για τις τρεις σειρές των πειραματικών δοκιμών. Αυτή η διαδικασία περιλάμβανε παρατήρηση και μετρήσεις των δοκιμών, προετοιμασία και τοποθέτηση στον κλιματικό θάλαμο, εκτέλεση της δοκιμής των υπερήχων, και τέλος δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

### 7.2.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο σύνολο τους τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με σχέση ύψους διαμέτρου δύο προς ένα (2/1). Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε λείανση των επιφανειών των βάσεων ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή παραλληλία. Στην συνέχεια έγινε μέτρηση των διαστάσεων τους και φωτογράφιση τους με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με παράλληλη μακροσκοπική περιγραφή τους (Σχήμα 7.9).

### 7.2.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Αφού είχε επιτευχθεί η παραλληλία των βάσεων τους και είχαν μετρηθεί τα δοκίμια ήταν έτοιμα για την μη καταστροφική δοκιμή υπερήχων, την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων.



Σχήμα 7.9: Κυλινδρικό δοκίμιο.



### 7.2.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

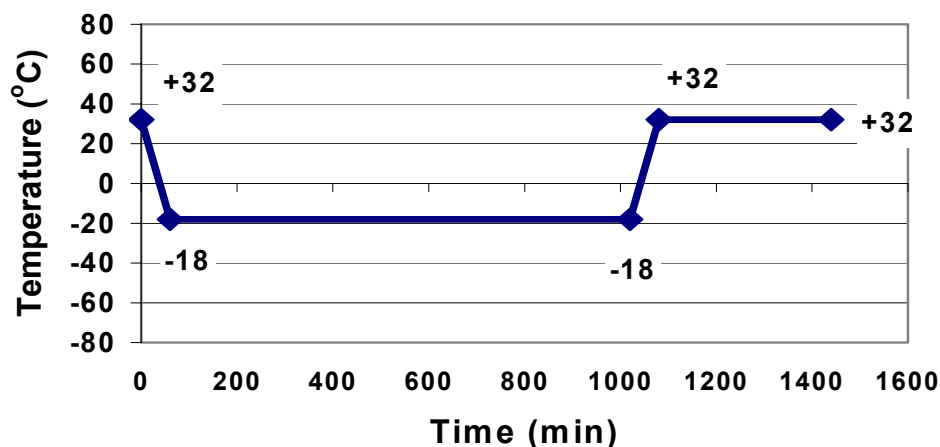
Στην συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνταν σε φούρνο για ξήρανση στους  $100 \pm 5$  °C για 24 ώρες, ενώ κατά την έξοδο τους από το φούρνο τοποθετούνταν σε ξηραντήρα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην συνέχεια ζυγίζονταν σε ζυγαριά ακριβείας (με ακρίβεια τριών δεκαδικών). Ακολουθούσε εμπότιση τους σε δεξαμενή με διάλυμα 0,5% ισοπροπυλικής αλκοόλης σε απιονισμένο νερό για άλλες 24 ώρες. Κατά την έξοδο τους από το διάλυμα ζυγίζόταν (στην ίδια ζυγαριά) και καταγραφόταν το βάρος τους, με αυτό τον τρόπο υπολογιζόταν το ποσοστό απορροφητικότητας του κάθε δοκιμίου.

### 7.2.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΘΑΛΑΜΟ

Αφού είχαν καταγραφεί όλα τα παραπάνω, τα δοκίμια ήταν έτοιμα να υποβληθούν σε δοκιμές μηχανικής γήρανσης και πιο συγκεκριμένα σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο. Γι' αυτό το λόγο τα δοκίμια τοποθετούνταν μέσα σε ανοξείδωτες λαμαρίνες οι οποίες ήταν στρωμένες με απορροφητικό υπόστρωμα (synthetic fiber) το οποίο ήταν εμποτισμένο με το διάλυμα της ισοπροπυλικής αλκοόλης που είχαν εμποτιστεί τα δοκίμια αρχικά (Σχήμα 7.10).



Σχήμα 7.10: Δοκίμια πάνω σε απορροφητικό υπόστρωμα.



Σχήμα 7.11: Κύκλος ψύξης – θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο.

Οι κύκλοι ψύξης θέρμανσης που υποβλήθηκαν τα δοκίμια ήταν της τάξεως των  $-18^{\circ}\text{C}$  σε ψύξη για 14 ώρες και θερμοκρασία θέρμανσης στους  $32^{\circ}\text{C}$  για 8 ώρες. Στο Σχήμα 7.11 φαίνεται ακριβώς ο κύκλος ψύξης – θέρμανσης καθώς και η διάρκεια του που ήταν 22 ώρες. Τα δοκίμια εντός του θαλάμου παρατηρούνταν καθημερινώς για πιθανόν αλλαγές και απώλειες, ενώ γινόταν και αναπλήρωση του διαλύματος αλκοόλης έτσι ώστε να παραμένει καλυμμένο με διάλυμα το απορροφητικό υπόστρωμα.

### 7.2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Κάθε 25 ή 20 κύκλους μέσα στο κλιματικό θάλαμο, τα δείγματα παρατηρούνταν για πιθανόν αλλαγές που μπορεί να έχουν εμφανιστεί κατά την διάρκεια των θερμοκρασιακών μεταβολών που πραγματοποιούνται σε ένα κύκλο ψύξης - θέρμανσης. Σημειώνόταν οποιαδήποτε μορφή διάβρωσης εμφανίζεται (αποφλοιώση, διαχωρισμός, αποσύνθεση). Επίσης η μορφή της διάβρωσης καταγραφόταν με την βοήθεια ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και υπολογιζόταν το ποσοστό απώλειας βάρους του κάθε δοκιμίου σύμφωνα με την σχέση:

$$\% \text{ απώλεια βάρους} = (A-B) A \times 100 \quad (7.1)$$

όπου:

A: είναι το βάρος του δοκιμίου μετά από ξήρανση μέσα σε φούρνο και πριν υποβληθεί σε δοκιμές γήρανσης, και

B: είναι το βάρος του μεγαλύτερου τεμάχους του δοκιμίου μετά από κάθε 25 (ή 20) κύκλους στο κλιματικό θάλαμο.



Μετά από την παραπάνω διαδικασία όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μη καταστροφική δοκιμή υπερήχων και τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των υπερήχων, ενώ ένας αριθμός από τα δοκίμια υποβλήθηκε σε καταστροφική δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, ώστε να προσδιοριστεί η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας των υλικών με την πάροδο του χρόνου μέσα στο Κλιματικό Θάλαμο.

### 7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

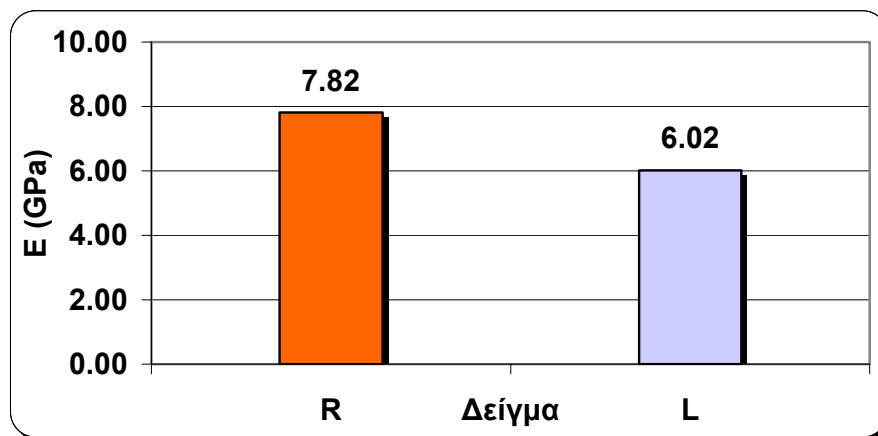
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω πειραματική διαδικασία και παρατήρηση για όλες τις σειρές των δοκιμών. Παρουσιάζονται ανά σειρά δοκιμών τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- ✓ Ποσοστά απορροφητικότητας των δοκιμών
- ✓ Μεταβολές των ταχυτήτων των κυμάτων των υπερήχων
- ✓ Ποσοστά απώλειας των βαρών των δοκιμών
- ✓ Μεταβολές των Μέτρων Ελαστικότητας

#### 7.3.1 ΠΡΩΤΗ ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η πρώτη σειρά των δοκιμών αποτελούνταν από τριάντα δύο δοκίμια τα οποία δεκαέξι ήταν λευκά (με κωδικό L1 έως L16) και δεκαέξι κόκκινα (με κωδικό R1 έως R16). Από αυτά έξι από κάθε κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν για τον αρχικό προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των εν λόγω υλικών, ενώ τα υπόλοιπα υπέστησαν δοκιμές μηχανικής γήρανσης στον κλιματικό θάλαμο με παροδικές μη καταστροφικές δοκιμές υπερήχων και καταστροφικές δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

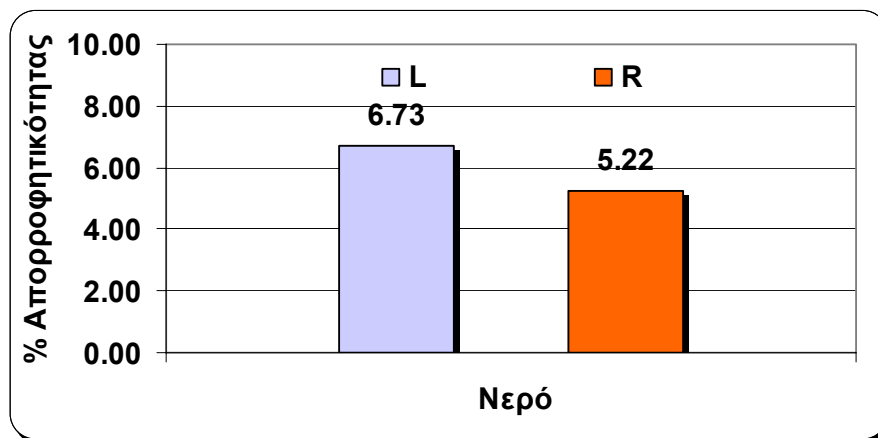
Στο Διάγραμμα 7.1 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας σε GPa που μετρήθηκαν για τα δύο είδη των δοκιμών (R και L) αρχικά χωρίς να έχουν υποστεί καμία μορφή μηχανικής γήρανσης. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό τα R δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, της τάξεως των 7,82 GPa ενώ τα L δοκίμια έχουν μέτρο ελαστικότητας 6,02 GPa.



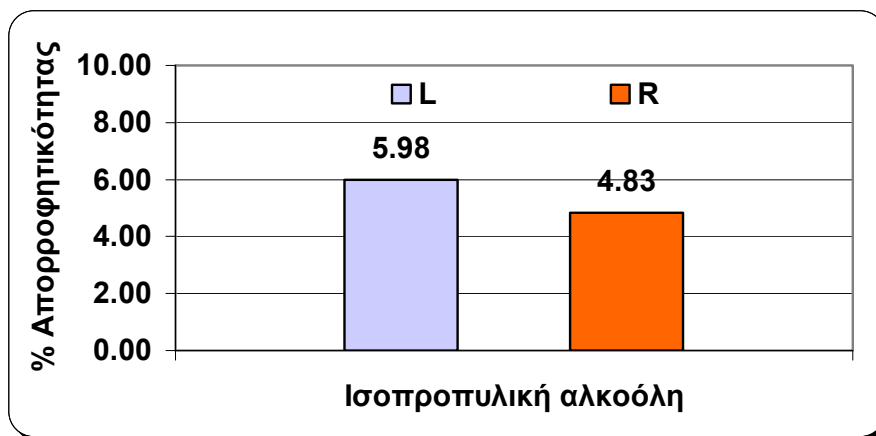
Διάγραμμα 7.1: Μέτρα Ελαστικότητας (GPa) των δειγμάτων R και L.

Στα Διαγράμματα 7.2 και 7.3 παρουσιάζονται τα ποσοστά απορροφητικότητας των δοκιμίων τόσο σε εμπότιση σε απιονισμένο νερό όσο και σε διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα L δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα τόσο στο νερό όσο και στην αλκοόλη σε σύγκριση με τα R δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα τα L δοκίμια εμφάνισαν απορροφητικότητα 6,73 % στο νερό και 5,98 % στην αλκοόλη, ενώ τα R δοκίμια εμφανίζουν μικρότερα ποσοστά με 5,22% στο νερό και 4,83% στην αλκοόλη.

Στα Διαγράμματα 7.4 και 7.5 παρουσιάζονται τα ποσοστά απώλειας βάρους των δειγμάτων L και R σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων μηχανικής γήρανσης (ψύξη – θέρμανση) που έχουν υποστεί μέσα στο κλιματικό θάλαμο. Για τα δοκίμια που έχουν υποστεί εμπότιση σε νερό παρατηρείται ένα αυξημένο ποσοστό απώλειας βάρους. Για τα R δοκίμια φτάνει στο

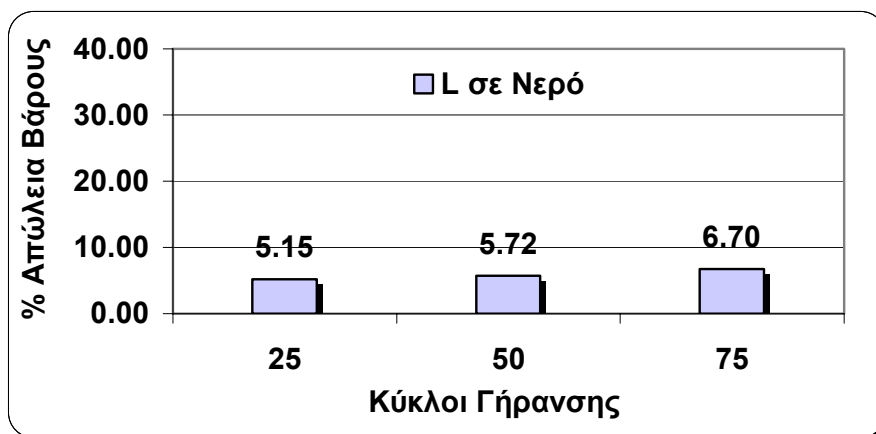


Διάγραμμα 7.2: Ποσοστά % απορροφητικότητας σε νερό των δειγμάτων.

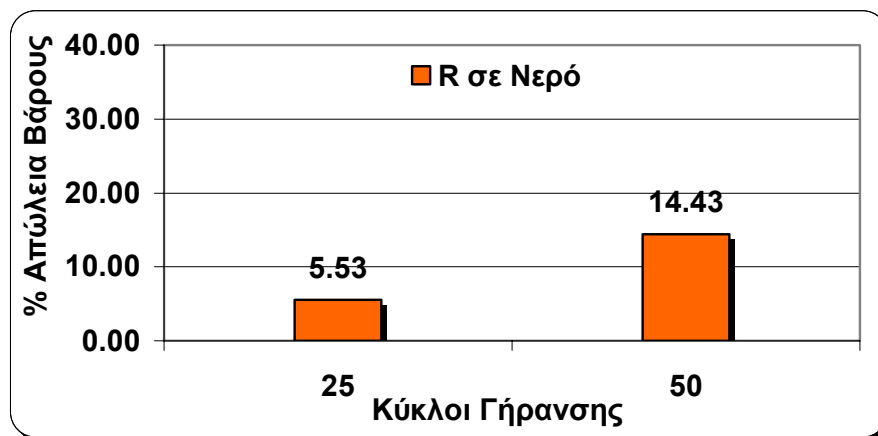


Διάγραμμα 7.3: Ποσοστά % απορροφητικότητας σε διάλυμα αλκοόλης των δειγμάτων.

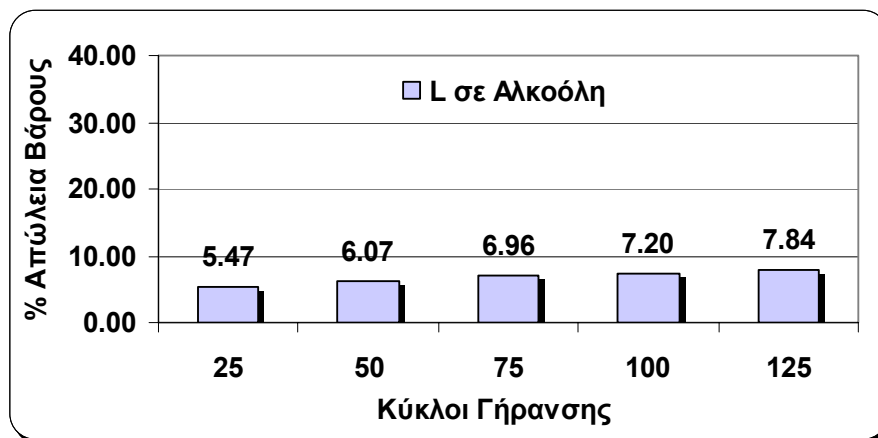
14,43% στους 50 κύκλους, ενώ για τον ίδιο αριθμό θερμοκρασιακών κύκλων οι απώλειες για τα L είναι της τάξεως των 5,72%. Στα Διαγράμματα 7.6 και 7.7 παρουσιάζονται τα ποσοστά απώλειας βάρους για τα δοκίμια που είχαν εμποτιστεί σε διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες για τα R δοκίμια που φτάνουν το 33,94% σε σχέση με τα L δοκίμια που είναι 6,07% στους 50 κύκλους μηχανικής γήρανσης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί τα L δοκίμια παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή στους κύκλους ψύξης – θέρμανσης εντός του κλιματικού θαλάμου πράγμα το οποίο φαίνεται και από τις μεγάλες διαφορές στα ποσοστά απώλειας βάρους μεταξύ των L και R δοκιμίων.



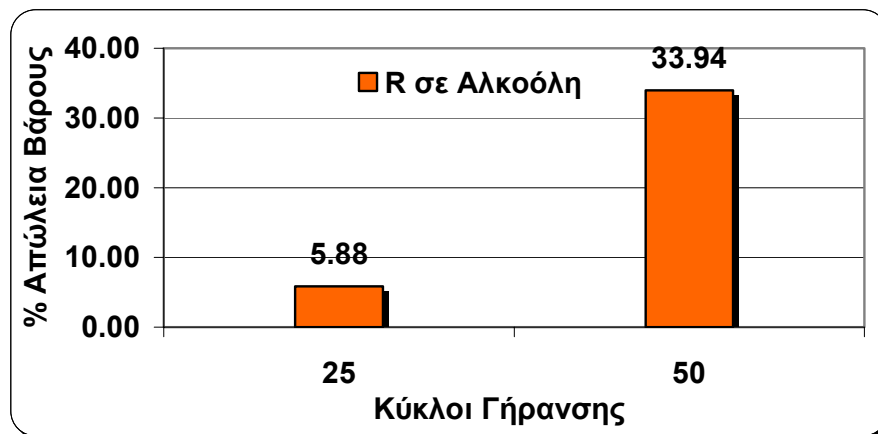
Διάγραμμα 7.4: Ποσοστά % Απώλειας Βάρους L δειγμάτων εμποτισμένων σε νερό.



Διάγραμμα 7.5: Ποσοστά % Απώλειας Βάρους R δειγμάτων εμποτισμένων σε νερό.

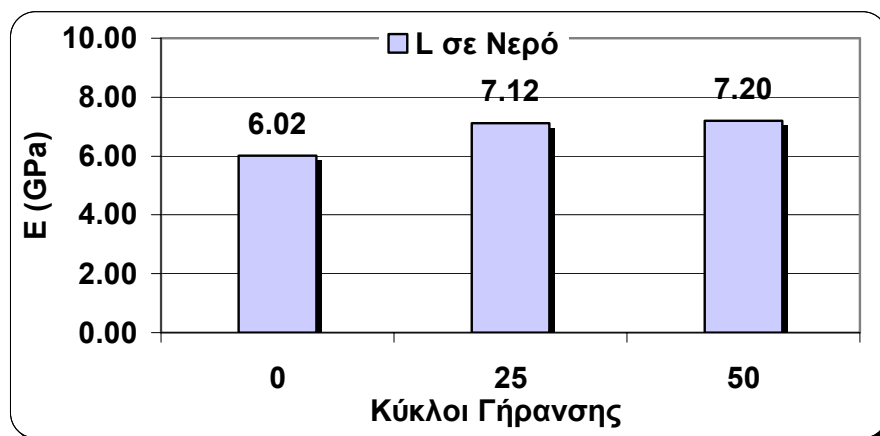


Διάγραμμα 7.6: Ποσοστά % Απώλειας Βάρους L δειγμάτων εμποτισμένων σε αλκοόλη.

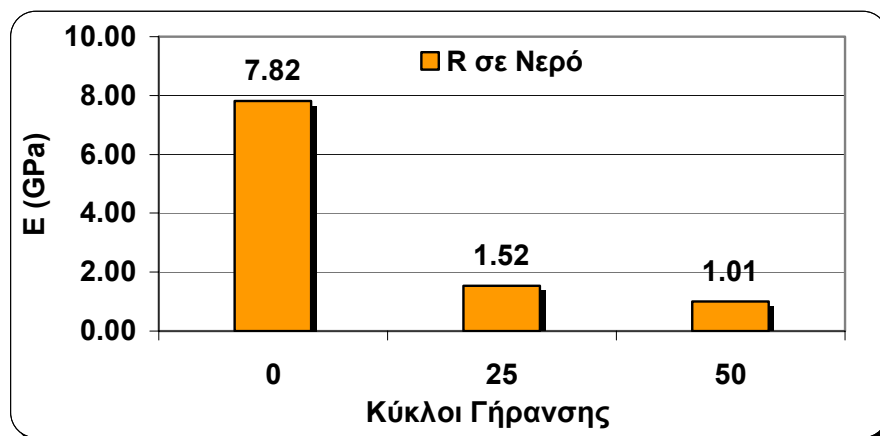


Διάγραμμα 7.7: Ποσοστά % Απώλειας Βάρους R δειγμάτων εμποτισμένων σε αλκοόλη.

Στα Διαγράμματα 7.8 και 7.9 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας για τα δύο είδη δοκιμών L και R σε συνάρτηση του αριθμού των κύκλων στον κλιματικό θάλαμο: για μηδέν κύκλους (δηλαδή χωρίς να έχουν υποστεί μηχανική γήρανση), για 25 κύκλους και 50 κύκλους ψύξης – θέρμανσης. Για τα L δοκίμια που είχαν εμποτιστεί σε νερό μπορεί να παρατηρηθεί μία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας από 6,02 GPa σε 7,20 GPa σε διάστημα 50 κύκλων γήρανσης. Αντίθετα για τα δοκίμια R παρατηρείται μία πτώση του μέτρου ελαστικότητας από 7,82 GPa σε 1,01 GPa μετά από διάρκεια 50 κύκλων πράγμα που δικαιολογείται από το αυξημένο ποσοστό απώλειας βάρους λόγω αποφλοιώσης και απολέπισης των δοκιμών κατά την παραμονή τους στον κλιματικό θάλαμο.



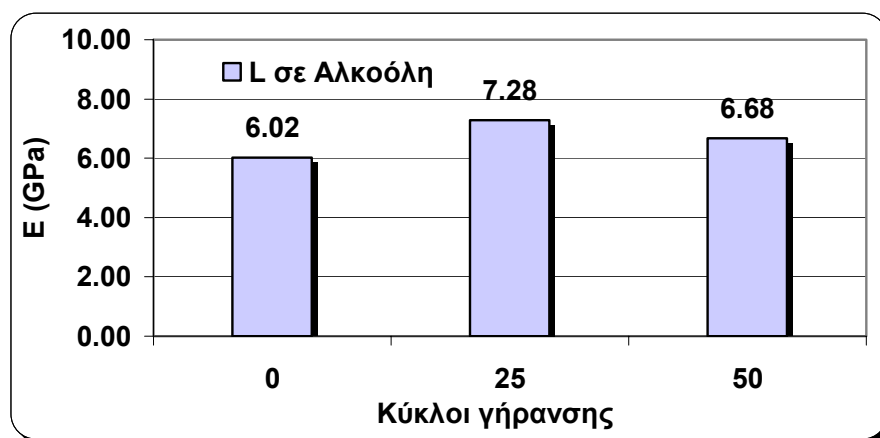
Διάγραμμα 7.8: Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας των δοκιμών L σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.



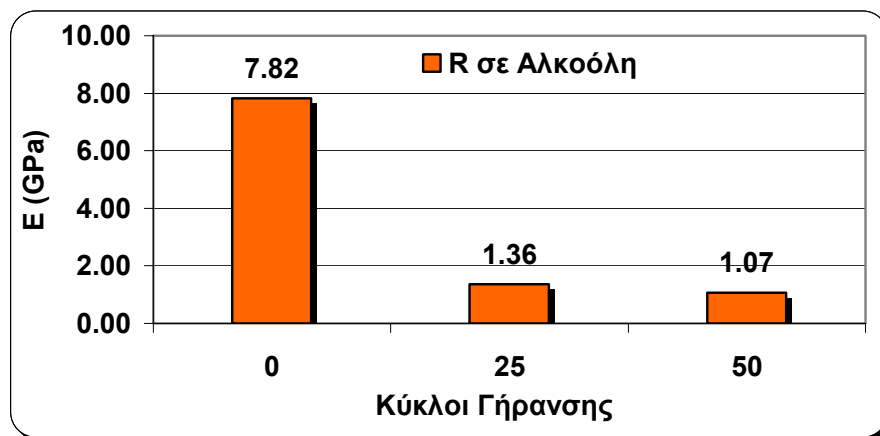
Διάγραμμα 7.9: Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας των δοκιμών R σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.

Στα Διαγράμματα 7.10 και 7.11 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας σε συνάρτηση με τον αριθμό κύκλων παραμονής στο κλιματικό θάλαμο για τα δοκίμια L και R που είχαν εμποτιστεί σε διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης. Παρατηρείται και πάλι μία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των L δοκιμίων από 6,02 GPa σε 6,68 GPa μετά από παραμονή πενήντα κύκλων στον κλιματικό θάλαμο. Αντίθετα τα R δοκίμια εμφανίζουν μία έντονη πτώση των μέτρων ελαστικότητας από 7,82 GPa σε 1,07 GPa.

Εκτός από τα μέτρα ελαστικότητας, ανά τακτά χρονικά διαστήματα όπως έχει αναφερθεί, πραγματοποιούνταν και μη καταστροφικές δοκιμές υπερήχων όπου μετριοταν η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων ( $v_p$ ). Αυτές παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 7.12 και 7.13 για τα δείγματα που είχαν εμποτιστεί σε απιονισμένο νερό και όπου είναι εμφανής η αύξηση της

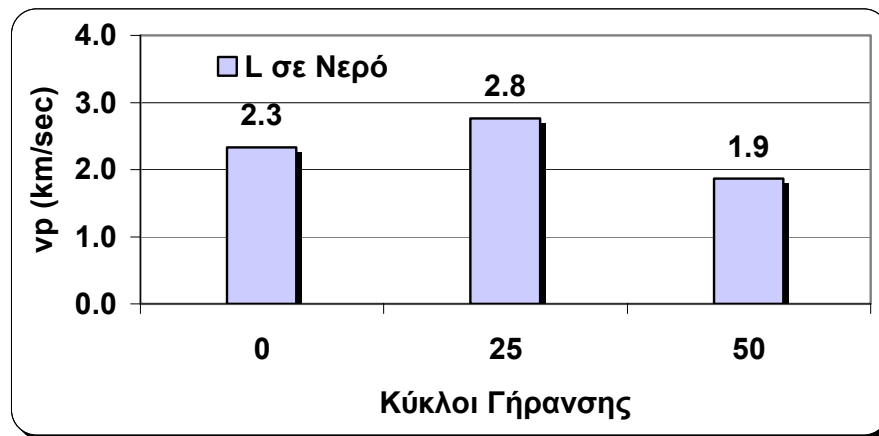


Διάγραμμα 7.10: Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας των δοκιμίων L σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.

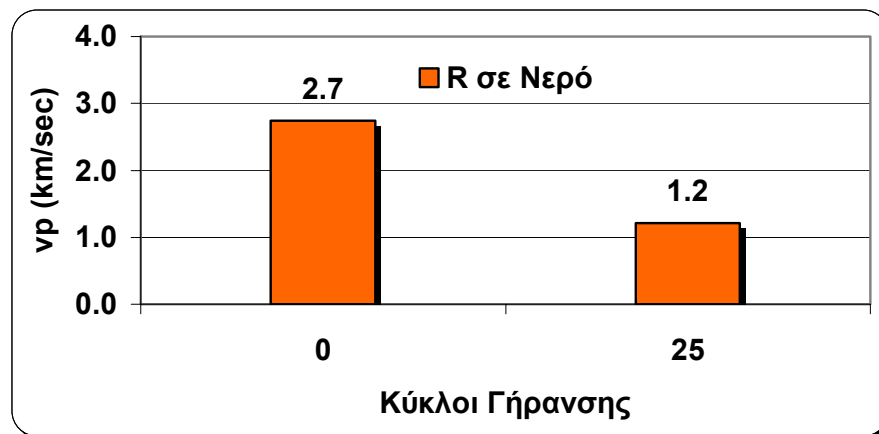


Διάγραμμα 7.11: Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας των δοκιμίων R σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.

ταχύτητας  $v_p$  στους 25 κύκλους ψύξης – θέρμανσης, ενώ στην συνέχεια παρατηρείται μείωση αυτής στους 50 κύκλους. Αντίθετα στα R δοκίμια είναι εμφανής η αυξημένη μείωση της ταχύτητας των υπερήχων από τους 0 στους 25 κύκλους στον κλιματικό θάλαμο.

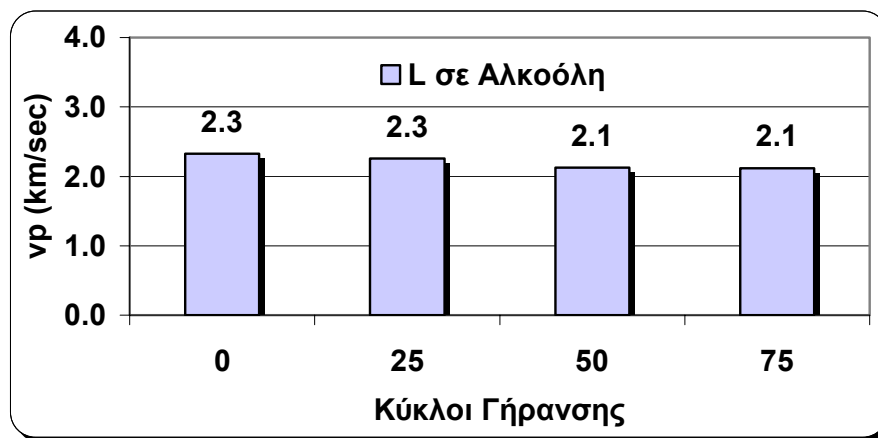


Διάγραμμα 7.12: Μεταβολή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων στα L δοκίμια σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.

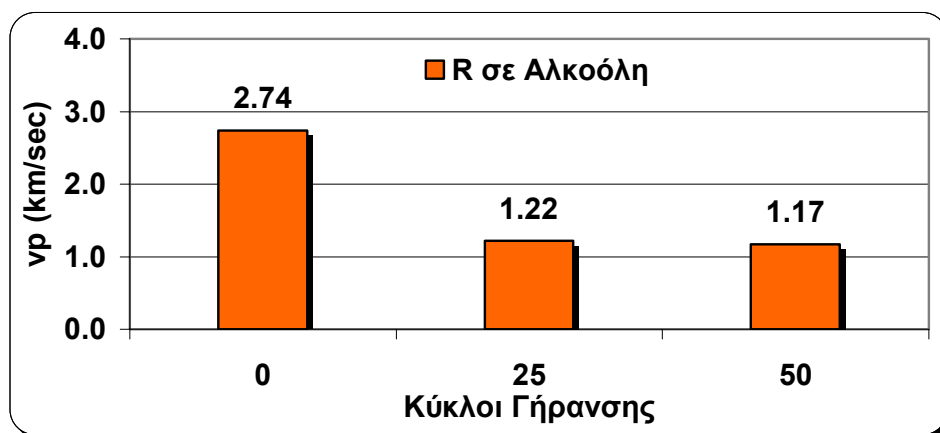


Διάγραμμα 7.13: Μεταβολή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων στα R δοκίμια σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.

Τα Διαγράμματα 7.14 και 7.15 αναφέρονται στις μετρήσεις των ταχυτήτων  $v_p$  για τα δείγματα που είχαν εμποτιστεί σε διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης. Εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι η μείωση της  $v_p$  στα L δοκίμια είναι από 2,3 km/sec αρχικά σε 2,1 km/sec μετά από 75 κύκλους ψύξης – θέρμανσης, ενώ η μείωση της ταχύτητας των R δοκιμίων είναι κατά πολύ πιο έντονη και ποιο συγκεκριμένα από 2,74 km/sec αρχικά μειώνεται σε 1,17 km/sec μετά από 50 κύκλους.



Διάγραμμα 7.14: Μεταβολή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων στα L δοκίμια σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.



Διάγραμμα 7.15: Μεταβολή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων στα R δοκίμια σε συνάρτηση με τους κύκλους παραμονής τους στο κλιματικό θάλαμο.



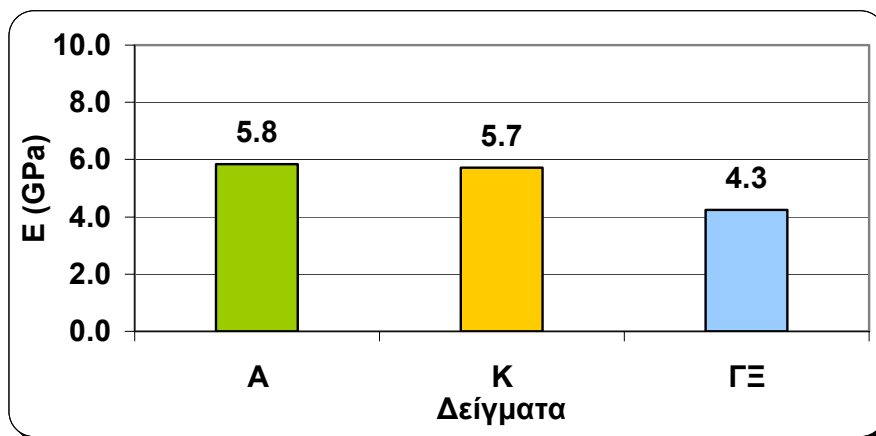
### 7.3.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η δεύτερη σειρά των δοκιμών αποτελούνταν από τριάντα δοκίμια τα οποία ήταν όλα από το ίδιο υλικό με τα λευκά δοκίμια (1<sup>η</sup> σειρά των L δοκιμών). Από αυτά δέκα είχαν κωδικό όνομα K λόγω του κανονικού τρόπου ξήρανσης τους όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, δέκα είχαν κωδικό όνομα A (λόγω της αργής ξήρανσης που είχαν υποστεί) και δέκα κωδικό όνομα ΓΞ (λόγω της γρήγορης ξήρανσης), Σχήμα 7.12. Από αυτά τρία από κάθε κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν για τον αρχικό προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των εν λόγω υλικών, ενώ τα υπόλοιπα υπέστησαν δοκιμές μηχανικής γήρανσης στον κλιματικό θάλαμο με παροδικές (ανά είκοσι κύκλους) μη καταστροφικές δοκιμές υπερήχων και καταστροφικές δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Στο Διάγραμμα 7.16 απεικονίζονται τα μέτρα ελαστικότητας σε GPa που μετρήθηκαν για τα τρία είδη των δοκιμών (K, A και ΓΞ) αρχικά χωρίς να έχουν υποστεί καμία μορφή μηχανικής γήρανσης. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό τα δοκίμια που υπέστησαν αργή ξήρανση (A δοκίμια) εμφανίζουν το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας της τάξεως των 5,8 GPa, τα δοκίμια με κανονική ξήρανση (K δοκίμια) έχουν 5,7 GPa ενώ τα δοκίμια που υπέστησαν γρήγορη ξήρανση (ΓΞ δοκίμια) εμφανίζουν το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας με 4,3 GPa.

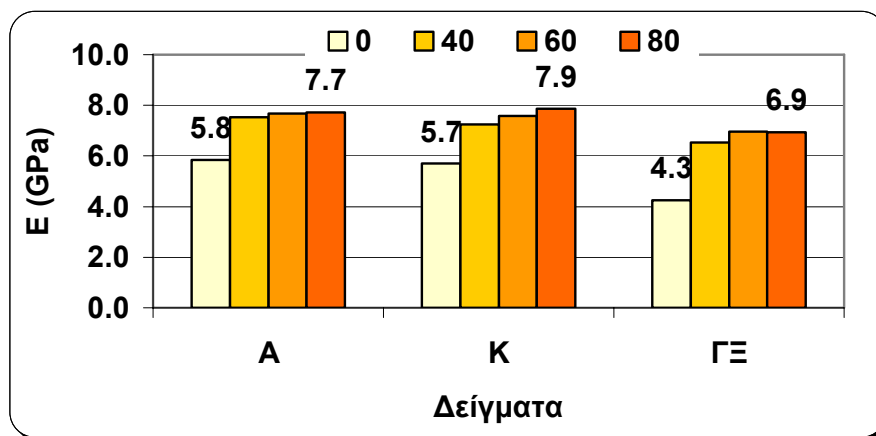


Σχήμα 7.12: Δοκίμια δεύτερης σειράς.

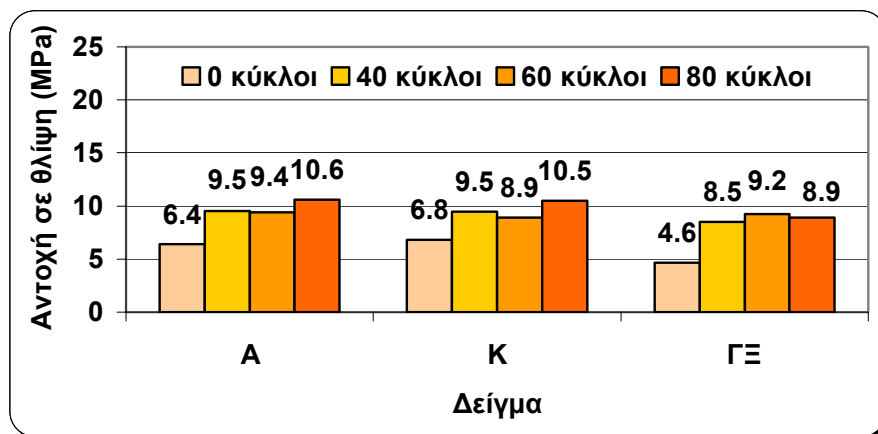


Διάγραμμα 7.16: Μέτρα Ελαστικότητας (GPa) δειγμάτων ίδιας σύστασης και διαφορετικής ξήρανσης δοκιμών δεύτερης σειράς

Στο Διάγραμμα 7.17 παρουσιάζονται συνοπτικά για όλα τα είδη των δειγμάτων της δεύτερης πειραματικής σειράς η μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας σε GPa των δοκιμών όπως μετρήθηκαν εργαστηριακά και αφού είχαν υποστεί μέχρι 80 κύκλους ψύξης - θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο. Αυτό που είναι ευκόλως αντιληπτό από το διάγραμμα είναι η τάση που εμφανίζουν και οι τρεις κατηγορίες των κυλινδρικών δοκιμών να εμφανίζουν αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με την διέλευση 80 κύκλων μηχανικής γήρανσης. Πιο συγκεκριμένα στα A δοκίμια παρατηρείται μία αύξηση από τα 5,8 GPa αρχικά σε 7,7 GPa μετά από 80 κύκλους, στα K δοκίμια αύξηση από 5,7 GPa σε 7,9 GPa, ενώ τέλος στα ΓΞ δοκίμια με το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τα με 4,3 GPa στα 6,9 GPa δηλαδή μία αύξηση της τάξεως των 2,6 GPa.

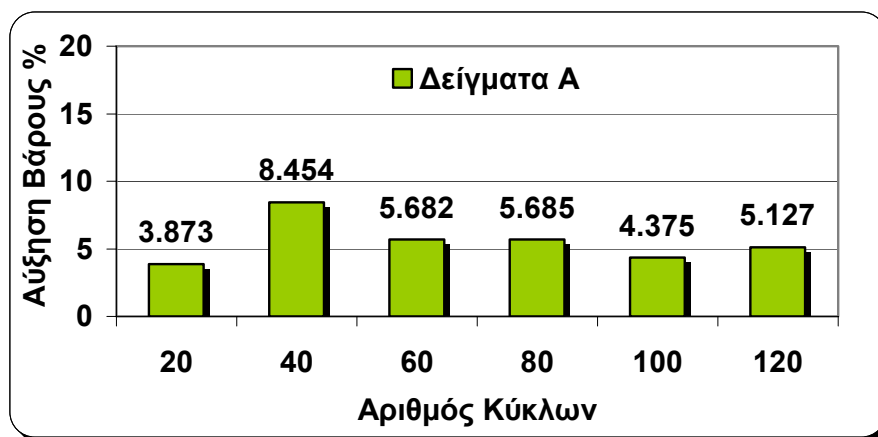


Διάγραμμα 7.17: Μέτρα Ελαστικότητας (GPa) δειγμάτων ίδιας σύστασης και διαφορετικής ξήρανσης δοκιμών δεύτερης σειράς.



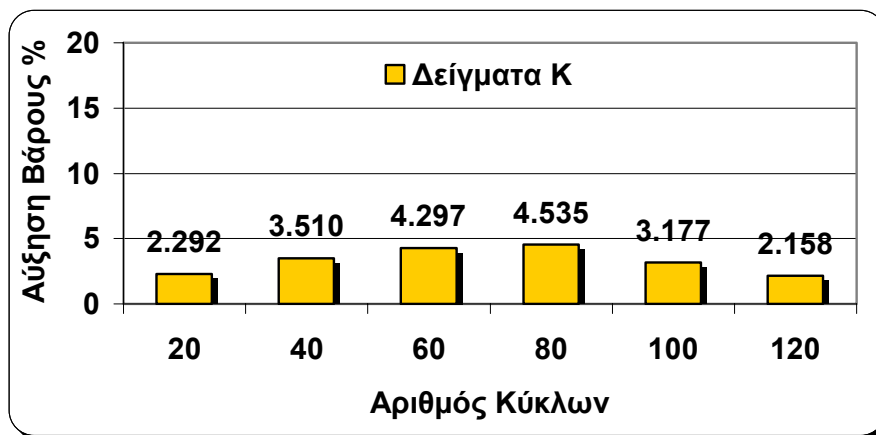
Διάγραμμα 7.18: Αντοχές σε θλίψη (MPa) δειγμάτων ίδιας σύστασης και διαφορετικής ξήρανσης δοκιμών δεύτερης σειράς.

Στο Διάγραμμα 7.18 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε θλίψη των δειγμάτων. Απεικονίζονται οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη των δειγμάτων και για τα τρία είδη διαφορετικής ξήρανσης στους 0, στους 40, στους 60 και στους 80 κύκλους μηχανικής γήρανσης. Στα A δείγματα παρατηρούμε μια σταδιακή αύξηση της αντοχής από 6,4 MPa αρχικά σε 10,6 MPa μετά από 80 κύκλους ψύξης – θέρμανσης, συμπεριφορά που συμβαδίζει με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Τα K δείγματα εμφανίζουν επίσης μία αύξηση της αντοχής από 6,8 σε 10,5 MPa, ενώ και τα ΓΞ μία αύξηση από 4,6 σε 9,2 MPa μέχρι τους 60 κύκλους ενώ στην συνέχεια παρουσιάζουν μία μείωση στα 8,9 MPa ακολουθώντας την συμπεριφορά που έδωσαν και για το μέτρο ελαστικότητας.

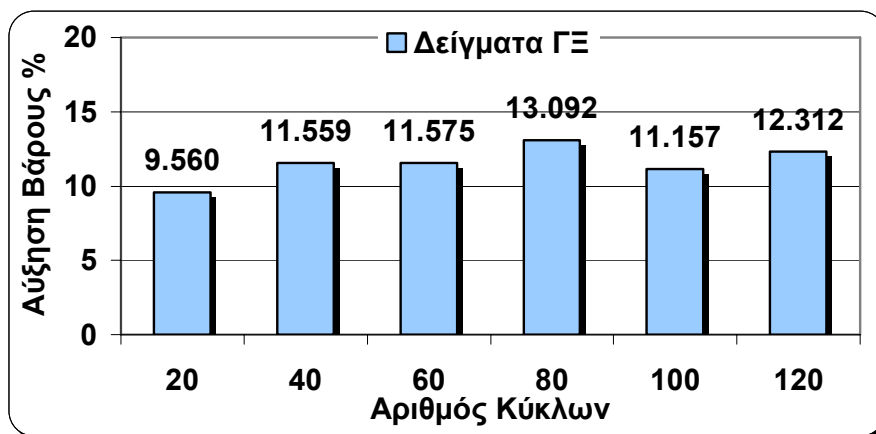


Διάγραμμα 7.19: Ποσοστά αύξησης του βάρους των δειγμάτων A σε διάρκεια εκτέλεσης 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

Τα Διαγράμματα 7.19, 7.20 και 7.21 θα πρέπει να σχολιασθούν παράλληλα εφόσον και τα τρία περιγράφουν την μεταβολή και πιο συγκεκριμένα την αύξηση του βάρους που εμφάνισαν όλα τα δείγματα της δεύτερης σειράς σε διάρκεια μηχανικής γήρανσης ψύξης - θέρμανσης 120 κύκλων. Η αύξηση του βάρους αυτή οφείλεται στην τάση των κρυστάλλων των υλικών να απορροφούν στην κρυσταλλική τους δομή μόρια νερού με αποτέλεσμα να σημειώνεται αύξηση του βάρους των δειγμάτων παρόλο που ταυτόχρονα υφίστανται απώλεια βάρους λόγω αποφλοίωσης και απολέπισης της εξωτερικής. Το ποσοστό αυτό αυξάνεται περίπου μέχρι τους 60 κύκλους οπότε φαίνεται ότι τα υλικά δεν μπορούν να προσροφήσουν περισσότερο νερό στην δομή τους. Στην συνέχεια παρατηρείται μία μείωση του βάρους των δοκιμίων λόγω της αύξησης του ποσοστού απώλειας των υλικών που είναι εμφανής με την αύξηση της απολέπισης και αποφλοίωσης.

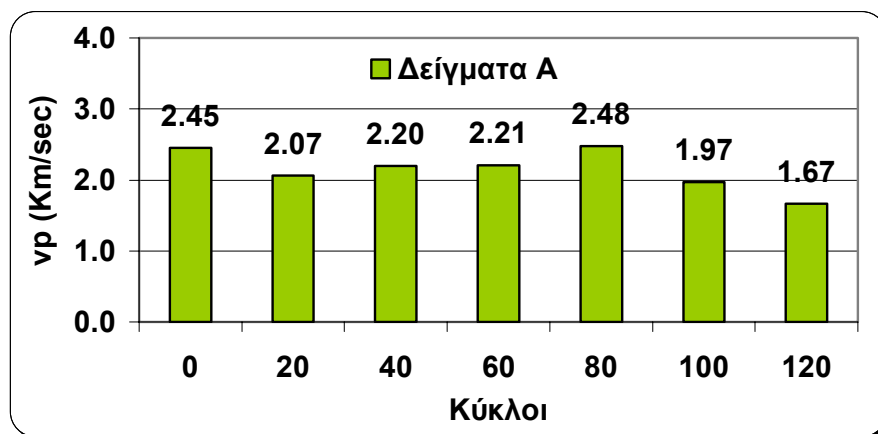


Διάγραμμα 7.20: Ποσοστά αύξησης του βάρους των δειγμάτων Κ σε διάρκεια εκτέλεσης 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

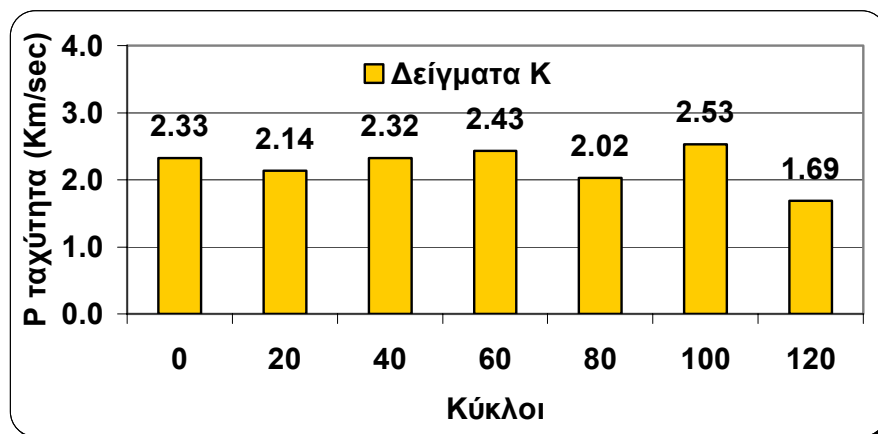


Διάγραμμα 7.21: Ποσοστά αύξησης του βάρους των δειγμάτων ΓΞ σε διάρκεια εκτέλεσης 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

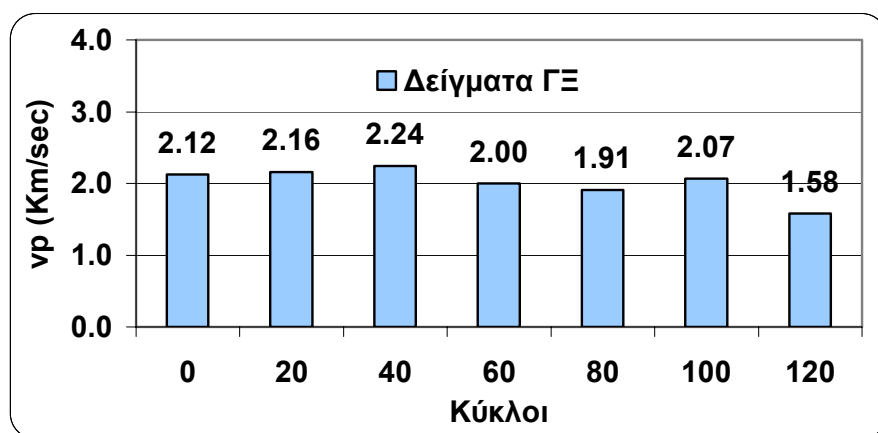
Στα Διαγράμματα 7.22, 7.23 και 7.24 παρουσιάζονται οι μεταβολές των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων που μετρήθηκαν και στα τρία είδη δοκιμών με την μέθοδο της μη καταστροφικής δοκιμής υπερήχων που εφαρμόζοταν στα δοκίμια ανά είκοσι κύκλους μηχανικής γήρανσης στον κλιματικό θάλαμο. Αυτό που παρατηρείται στα διαγράμματα είναι μία αρχική αύξηση της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων στα δοκίμια Α και Κ μέχρι τους ογδόντα και εξήντα κύκλους αντίστοιχα, ενώ στην συνέχεια παρατηρείται μία μείωση της ταχύτητας μέχρι τα 1,6 km/sec στους 120 κύκλους. Αντίθετα για τα δοκίμια ΓΞ παρατηρείται μια μικρή αύξηση της ταχύτητας μέχρι τους εξήντα κύκλους όπου παρατηρείται πτώση της ταχύτητας με αυτήν να καταλήγει στα 1,5 km/sec στους 120 κύκλους. Οι αρχικές ταχύτητες των δοκιμών συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες τιμές των μέτρων ελαστικότητας με μεγαλύτερες αυτές των δοκιμών που είχαν υποστεί αργή ξήρανση (δοκίμια Α) και μικρότερες αυτές των δοκιμών που είχαν υποστεί γρήγορη ξήρανση (δοκίμια ΓΞ) καθώς και με τα διαγράμματα ποσοστών μεταβολής βάρους.



Διάγραμμα 7.22: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκη κυμάτων στα δοκίμια Α κατά την διάρκεια 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.



Διάγραμμα 7.23: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκη κυμάτων στα δοκίμια Κ κατά την διάρκεια 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.



Διάγραμμα 7.24: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκη κυμάτων στα δοκίμια ΓΞ κατά την διάρκεια 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

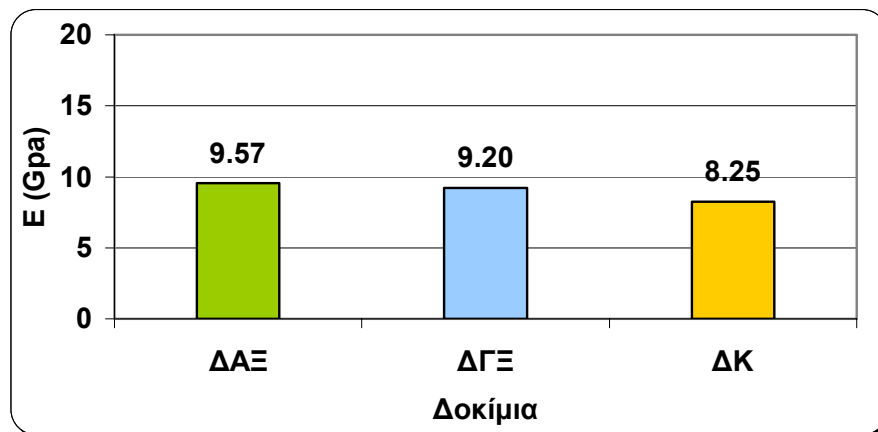
### 7.3.3 ΤΡΙΤΗ ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τέλος η τρίτη σειρά των δοκιμών αποτελούνταν από τριάντα κυλινδρικά δοκίμια ίδιας σύστασης με τα κόκκινα δείγματα της πρώτης σειράς (R δοκίμια) από τα οποία δέκα είχαν κωδικό όνομα ΔΚ λόγω του κανονικού τρόπου ξήρανσης τους όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, δέκα είχαν κωδικό όνομα ΔΑΞ (λόγω της αργής ξήρανσης που είχαν υποστεί) και δέκα είχαν κωδικό όνομα ΔΓΞ (λόγω της γρήγορης ξήρανσης), Σχήμα 7.13. Από αυτά τρία από κάθε κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των εν λόγω υλικών αρχικά, ενώ τα υπόλοιπα υπέστησαν δοκιμές μηχανικής γήρανσης στον κλιματικό θάλαμο με παροδικές (ανά είκοσι κύκλους) μη καταστροφικές δοκιμές υπερήχων και καταστροφικές δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Αρχικά και όπως και στις προηγούμενες σειρές των δοκιμών προσδιορίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμών με δοκιμές μονοαξονικής θλίψης προτού υποβληθούν σε δοκιμή μηχανικής γήρανσης. Στο Διάγραμμα 7.25 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας σε GPa των δοκιμών της τρίτης σειράς και για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους ξήρανσης. Μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα ότι τα μέτρα ελαστικότητας κυμαίνονται από 8,25 GPa για τα δοκίμια με κανονική ξήρανση μέχρι 9,57 GPa για τα δοκίμια που είχαν υποστεί αργή ξήρανση.



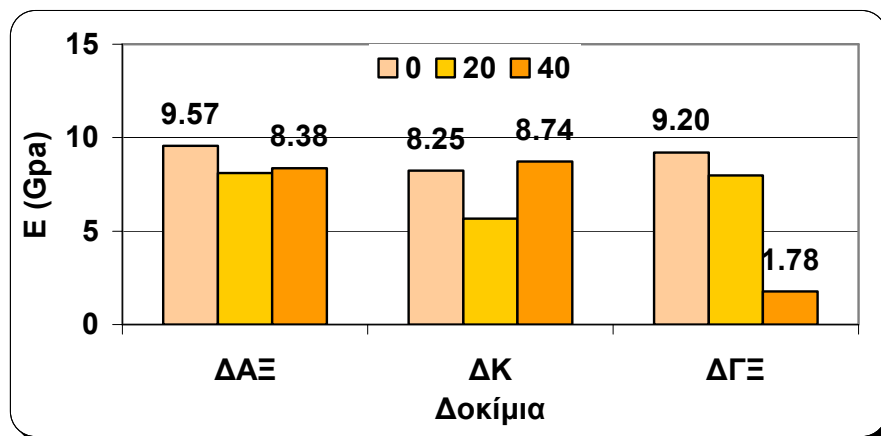
Σχήμα 7.13: Δοκίμια τρίτης σειράς.



Διάγραμμα 7.25: Μέτρα Ελαστικότητας (GPa) δοκιμών τρίτης σειράς ίδιας σύστασης και διαφορετικής ξήρανση.

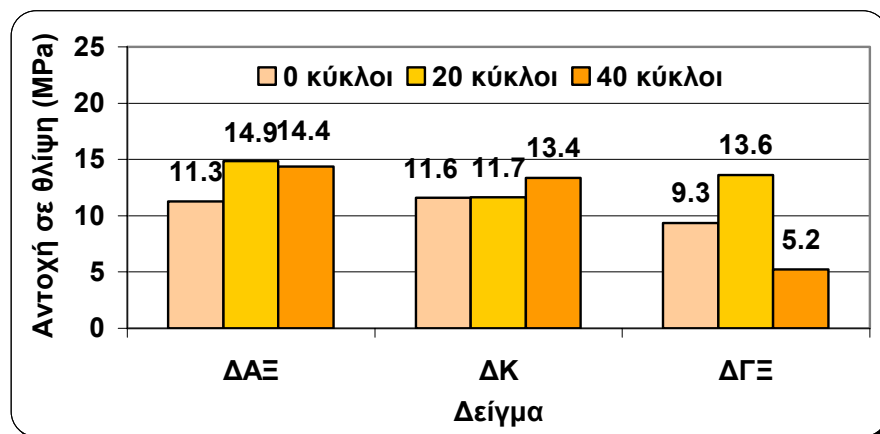
Στο Διάγραμμα 7.26 παρουσιάζονται συνοπτικά για τα τρία είδη των δειγμάτων της τρίτης πειραματικής σειράς η μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας σε GPa των δοκιμίων όπως μετρήθηκαν εργαστηριακά και αφού είχαν υποστεί μέχρι 40 κύκλους ψύξης - θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο. Αυτό που είναι ευκόλως αντιληπτό από το διάγραμμα είναι οι τρεις κατηγορίες των κυλινδρικών δοκιμίων παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά του μέτρου ελαστικότητας με την διέλευση 40 κύκλων μηχανικής γήρανσης. Πιο συγκεκριμένα στα ΔΑΞ δοκίμια παρατηρείται μία μείωση από τα 9,6 GPa αρχικά σε 8,4 GPa, αντίθετα στα ΔΚ δοκίμια παρατηρείται μία αύξηση από 8,25 GPa σε 8,7 GPa με μία ενδιάμεση μείωση στους 20 κύκλους. Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένα δοκίμια υπήρξε μικρότερο στατιστικό δείγμα στους 20 και τους 40 κύκλους. Παρατηρείται ότι τα ΔΚ δοκίμια κατά μέσο όρο το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια των 40 κύκλων ψύξης – θέρμανσης. Τέλος τα ΔΓΞ δοκίμια έχουν μέτρο ελαστικότητας αρχικά με 9,2 GPa και μετά από διέλευση 40 κύκλων παρατηρείται πτώση του μέτρου ελαστικότητας σε 1,8 GPa όπου διαπιστώνεται και το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης.

Στο Διάγραμμα 7.27 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε θλίψη των δειγμάτων. Απεικονίζονται οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη των δειγμάτων και για τα τρία είδη διαφορετικής ξήρανσης στους 0, στους 20 και στους 40 κύκλους μηχανικής γήρανσης. Στα ΔΑΞ δείγματα παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της αντοχής από 11,3 MPa αρχικά σε 14,9 MPa μετά από 20 κύκλους και μείωση σε 14,4 MPa στους 40 κύκλους. Τα ΔΚ δείγματα παρουσιάζουν επίσης μία αύξηση της αντοχής από 11,6 σε 13,4 MPa, ενώ και τα ΔΓΞ μία αύξηση από 9,3 σε 13,6 MPa μέχρι τους 20 κύκλους ενώ στην συνέχεια παρουσιάζουν μείωση της αντοχής στα 5,2 MPa ακολουθώντας συμπεριφορά που έδωσαν και για το μέτρο ελαστικότητας.



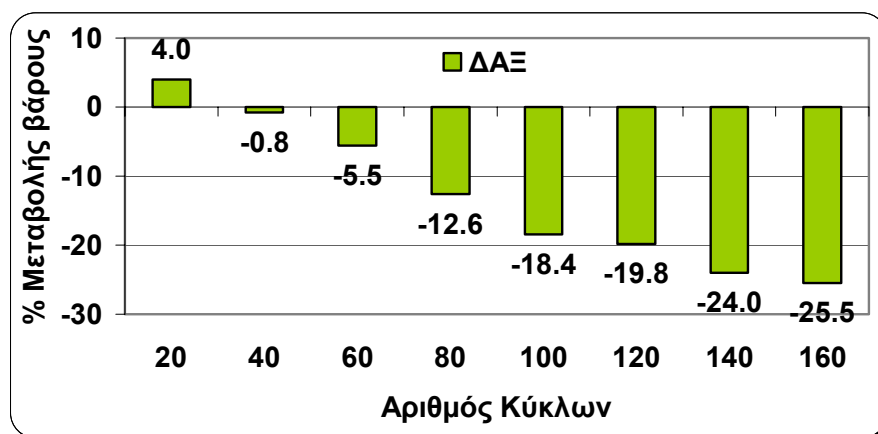
Διάγραμμα 7.26: Μεταβολή των Μέτρων Ελαστικότητας (GPa) των δοκιμίων της τρίτης σειράς σε διάρκεια 40 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.



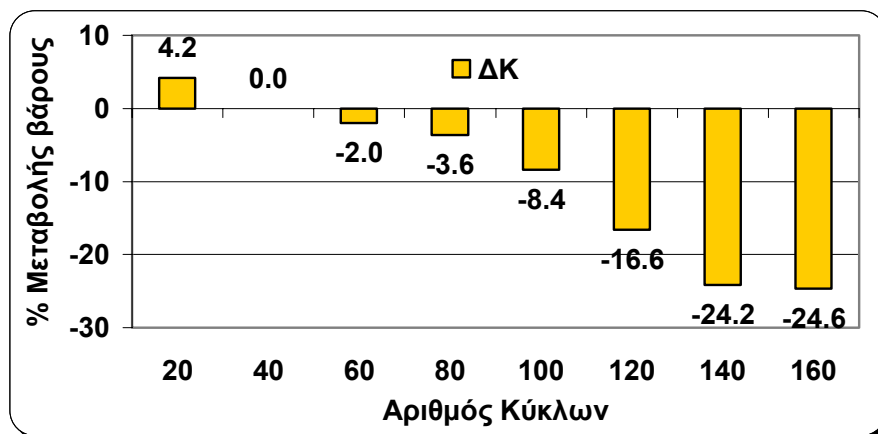


Διάγραμμα 7.27: Μεταβολή των Μέτρων Ελαστικότητας (GPa) των δοκιμών της τρίτης σειράς σε διάρκεια 40 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

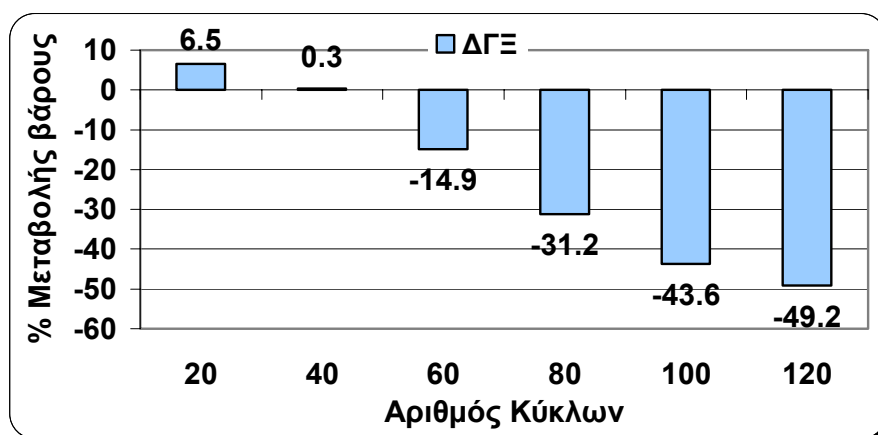
Στα Διαγράμματα 7.28, 7.29 και 7.30 διαπιστώνεται η τάση που εμφανίζουν τα δοκίμια όσο αφορά το ποσοστό μεταβολής του βάρους τους κατά την διάρκεια διαμονής τους εντός του κλιματικού θαλάμου. Σε όλα τα δοκίμια κατά την διέλευση των πρώτων είκοσι κύκλων παρατηρείται μία αύξηση του βάρους τους που κυμαίνεται από 4% έως 6,5% που οφείλεται στα μόρια νερού που προσροφούνται στην κρυσταλλική δομή των υλικών. Τα δοκίμια που είχαν υποστεί ξήρανση είτε κανονική είτε αργή εμφανίζουν ποσοστό αρχικά αύξησης βάρους τους της τάξεως του 4% ενώ μετά την διέλευση 160 κύκλων το ποσοστό απώλειας φτάνει το 25%. Αντίθετα τα δοκίμια που είχαν υποστεί γρήγορη ξήρανση αφενός εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης βάρους που φτάνει το 6,5% ενώ στην συνέχεια το ποσοστό απώλειας βάρους φτάνει κοντά στο 50% και μάλιστα σε μικρότερο αριθμό κύκλων ψύξης – θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο. Μάλιστα τα συγκεκριμένα δοκίμια ΔΓΞ φτάνουν αυτό



Διάγραμμα 7.28: Ποσοστά μεταβολής του βάρους των δειγμάτων ΔΑΞ σε διάρκεια εκτέλεσης 160 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.



Διάγραμμα 7.29: Ποσοστά μεταβολής του βάρους των δειγμάτων ΔΚ σε διάρκεια εκτέλεσης 160 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

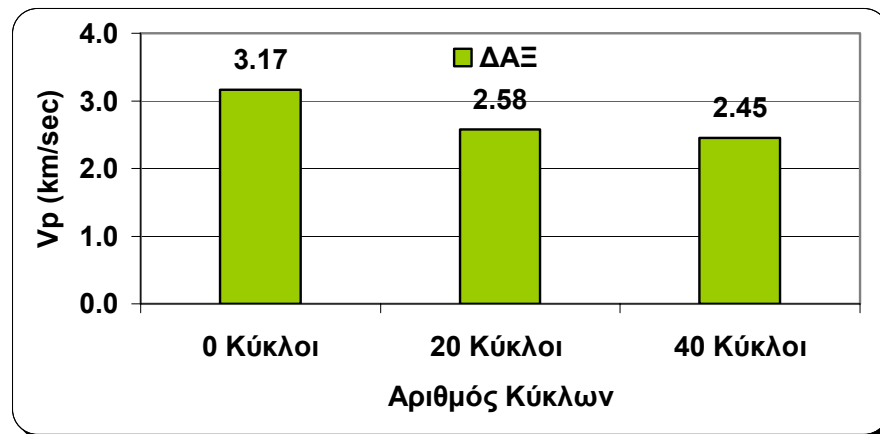


Διάγραμμα 7.30: Ποσοστά μεταβολής του βάρους των δειγμάτων ΔΓΞ σε διάρκεια εκτέλεσης 120 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

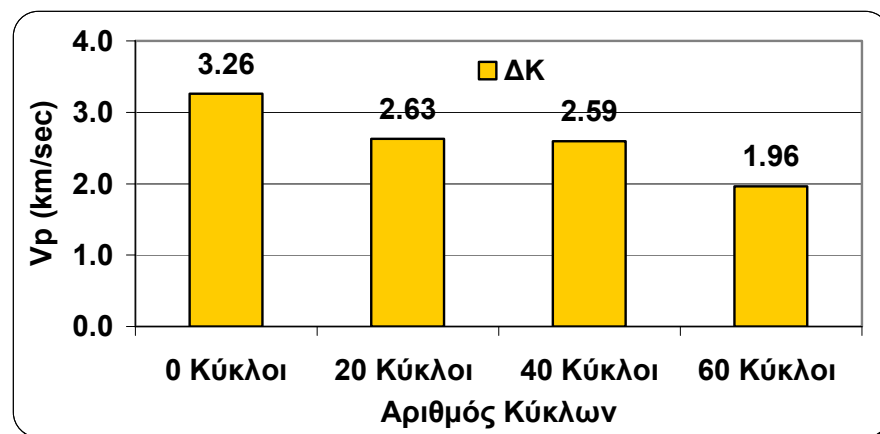
το ποσοστό σε μόλις 120 κύκλους δηλαδή 40 λιγότερους από αυτούς που άντεξαν τα δοκίμια ΔΑΞ και ΔΚ και με ποσοστό απώλειας βάρους σχεδόν το μισό (της τάξεως του 25%).

Όπως και στις προηγούμενες σειρές των δοκιμών έτσι στην τρίτη σειρά πραγματοποιούνταν μη καταστροφικές δοκιμές υπερήχων ανά είκοσι κύκλους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών αντικατοπτρίζονται στα Διαγράμματα 7.31, 7.32 και 7.33. Στα διαγράμματα παρατηρείται η μεταβολή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων ( $v_p$ ) των κυλινδρικών δοκιμίων. Διαπιστώνεται ότι τις μεγαλύτερες ταχύτητες εμφανίζουν τα δοκίμια ΔΚ που κυμαίνονται από 3,26 km/sec αρχικά και φτάνουν σε 1,96 km/sec μετά από 60 κύκλους γήρανσης, ενώ οι αντίστοιχες ταχύτητες για τα δοκίμια ΔΑΞ είναι από 3,17 km/sec αρχικά σε 2,45 km/sec στους 40 κύκλους. Ακόμα πιο χαμηλές ταχύτητες για τα διαμήκη κύματα

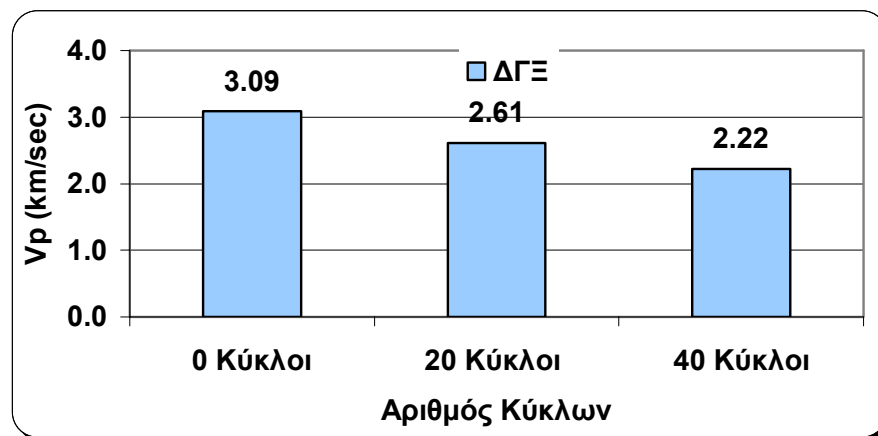
εμφανίζουν τα δοκίμια ΔΓΞ με μετρούμενη αρχική ταχύτητα 3,09 km/sec που πέφτει μετά από 40 κύκλους γήρανσης στα 2,22 km/sec πράγμα που συμφωνεί και με τα παραπάνω ποσοστά απώλειας βάρους των δοκιμίων αλλά και τα μέτρα ελαστικότητας που μετρήθηκαν.



Διάγραμμα 7.31: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκη κυμάτων στα δοκίμια ΔΑΞ κατά την διάρκεια 40 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.



Διάγραμμα 7.32: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκη κυμάτων στα δοκίμια ΔΚ κατά την διάρκεια 60 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.



Διάγραμμα 7.33: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκη κυμάτων στα δοκίμια  $\Delta\Gamma\Xi$  κατά την διάρκεια 40 κύκλων στον κλιματικό θάλαμο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8      ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές μηχανικής γήρανσης, καθώς και στα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών στις οποίες υποβλήθηκαν τα δοκίμια, ενώ γίνεται και μία σύγκριση με τις ιδιότητες φυσικών πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες κατασκευαστικές εφαρμογές.

### **8.1    ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ**

Η συμπεριφορά των δοκιμών κατά την διάρκεια των δοκιμών γήρανσης (λόγω κύκλων ψύξης – θέρμανσης) οφείλεται κυρίως στην αλλαγή των φάσεων του νερού σε πάγο. Το νερό αυτό προέρχεται από το νερό που ευρίσκεται στο διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης και νερού με το οποίο γίνεται αρχικά η εμποτίση και εν συνεχεία η συμπλήρωση των συνθηκών υγρασίας στο απορροφητικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζονται τα δοκίμια κατά την παραμονή τους εντός του κλιματικού θαλάμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον θρυμματισμό των εξωτερικών κυρίως επιφανειών των δοκιμών που βρίσκονται σε επαφή με το διάλυμα της ισοπροπυλικής αλκοόλης, την δημιουργία μικρορωγμών στην εξωτερική επιφάνεια και την διεύρυνση τους από έξω προς τα μέσα. Αυτή η εντατική κατάσταση που δημιουργείται εντός των μικρορωγμών λόγω των κρυστάλλων του πάγου διαιωνίζεται όσο τα δοκίμια υποβάλλονται σε μεταβολές της θερμοκρασίας, από την ψύξη στην θέρμανση και αντίστροφα.

Εκτός από την καταπόνηση που επιδέχονται τα υλικά από το σχηματισμό κρυστάλλων πάγου που προσροφάται εντός της δομής τους λόγω των τριχοειδών φαινομένων, υποβάλλονται και στις επονομαζόμενες θερμικές τάσεις λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας και την τάση που εμφανίζουν τα υλικά με ελεύθερες επιφάνειες να διαστέλλονται, και λόγω των διαφορετικών συντελεστών διαστολής των συστατικών τους. Σε όλα τα προαναφερόμενα εισέρχεται ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων όπως η ύπαρξη

ρωγμών, το πορώδες, η αντοχή του υλικού, η κλίμακα της ψύξης και η ποσότητα του νερού που περιέχεται στους πόρους του υλικού.

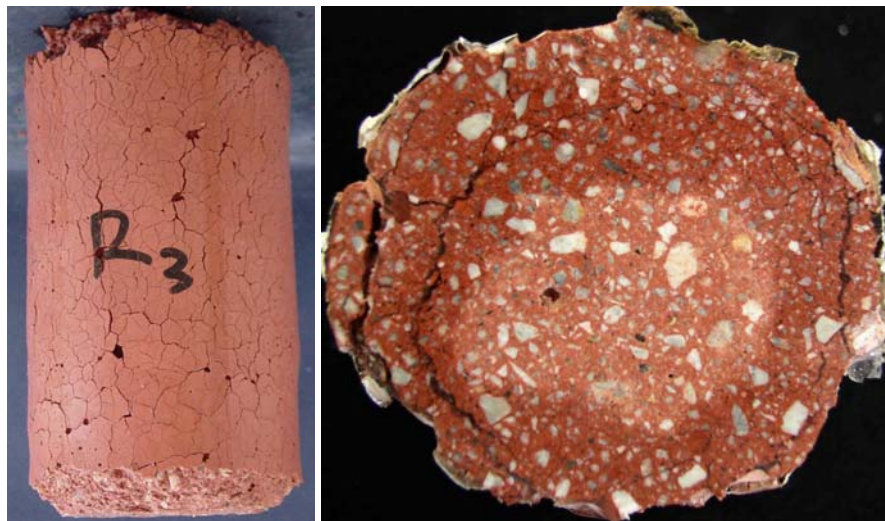
Όλα τα παραπάνω μπορούν να παρατηρηθούν στα διαγράμματα ποσοστών μεταβολής του βάρους των δοκιμών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό που διαπιστώνεται είναι η τάση των κυλινδρικών δοκιμών σε απολέπιση και αποφλοίωση κυρίως στις εξωτερικές επιφάνειες και πιο συγκεκριμένα σε αυτές που βρίσκονται σε επαφή με το κορεσμένο σε διάλυμα απορροφητικό υπόστρωμα με αποτέλεσμα χάρη στα τριχοειδή φαινόμενα να παραμένουν κορεσμένα και τα κυλινδρικά δοκίμια.

Όσο αφορά τα δείγματα L, αυτά εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένη αντοχή και πολύ μικρή απώλεια βάρους κατά την εκτέλεση των δοκιμών μηχανικής γήρανσης. Το ποσοστό της απώλειας του βάρους τους επικεντρώνεται κυρίως λόγω απολέπισης και αποφλοίωσης στις βάσεις των κυλινδρικών δοκιμών που ήταν σε επαφή με το απορροφητικό υπόστρωμα εντός του κλιματικού θαλάμου. Στο Σχήμα 8.1 απεικονίζεται το ίδιο δείγμα μετά από διαφορετικούς αριθμούς κύκλων γήρανσης. Αριστερά στο σχήμα είναι το δείγμα L9 μετά από 75 κύκλους, ενώ δεξιά το ίδιο δείγμα μετά από 200 κύκλους. Είναι ευκόλως αντιληπτό ότι η αποσάθρωση και απολέπιση στο δοκίμιο πραγματοποιήθηκε στην βάση που βρισκόταν σε επαφή με το διάλυμα με αποτέλεσμα κατά τις μεταβολές της θερμοκρασίας και την δημιουργία κρυστάλλων πάγου να επιφέρουν την απώλεια βάρους του δείγματος.

Σε αντίθεση με τα δείγματα L τα R εμφανίζουν μικρότερη αντοχή στην μηχανική γήρανση και αυτό είναι αντιληπτό από τα μεγάλα ποσοστά απώλειας βάρους τα οποία έχουν.



Σχήμα 8.1: Αριστερά το δοκίμιο μετά από 75 κύκλους και αριστερά μετά από 200 κύκλους.



Σχήμα 8.2: Εμφάνιση μικρορωγμών σε όλη την εξωτερική επιφάνεια των R δειγμάτων μετά από 50 κύκλους.

Εμφανίζουν αρχικά την ίδια συμπεριφορά με τα δείγματα L, δηλαδή εμφάνιση απολέπισης και απώλειας βάρους από την βάση που βρίσκεται σε επαφή με το διάλυμα. Αυτό που τα κάνει να διαφέρουν όμως είναι ότι, λόγω των έντονων τριχοειδών φαινομένων που εμφανίζονται παρατηρείται εμφάνιση μικρορωγμών σε όλη την εξωτερική επιφάνεια τους, που με την πάροδο των κύκλων γήρανσης μεταφράζεται σε αστοχία του υλικού και υψηλά ποσοστά απωλειών βάρους, (Σχήμα 8.2).

Η έντονη διαφορά στην συμπεριφορά των δύο διαφορετικών δειγμάτων μπορεί να αποδοθεί στην διαφορετικότητα των ορυκτολογικών συστατικών που εμφανίζουν. Τα μεν δείγματα L παρουσίαζαν μεγαλύτερα ποσοστά συνδετικού υλικού (τσιμέντου) και αδρανούς (περλίτης), ενώ τα δείγματα R εμφάνισαν μικρότερα ποσοστά συνδετικού υλικού ενώ τα αδρανή ήταν κυρίως ασβεστίτης. Οι αναλογίες συνδετικού υλικού και αδρανούς επηρέασαν και την συμπεριφορά των δειγμάτων όσο αναφορά και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

## 8.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η συμπεριφορά στην μηχανική γήρανση που εμφάνισαν τα δείγματα ήταν άρρηκτα συνδεδεμένη με την μηχανική τους συμπεριφορά. Παρατηρήθηκαν τόσο μειώσεις όσο και αυξήσεις των μέτρων ελαστικότητας που εμφάνισαν τα δείγματα κατά την διάρκεια παραμονής τους εντός του κλιματικού θαλάμου.

Όλα τα δείγματα που δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική αντοχή εμφάνισαν κυρίως αστοχίες στις περιοχές και τις βάσεις που ήταν σε επαφή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με το διάλυμα της ισοπροπυλικής αλκοόλης. Αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει τα προαναφερόμενα, δηλαδή την έντονη μηχανική γήρανση που εμφάνισαν οι βάσεις που ήταν εμποτισμένες με διάλυμα κατά την διάρκεια των κύκλων ψύξης-θέρμανσης με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής σε θλίψη των δειγμάτων.

Τα δείγματα με κωδικό R εμφάνισαν, όπως προαναφέρθηκε, μεγαλύτερες απώλειες βάρους που οφειλόταν σε απολέπιση κυρίως στις βάσεις των κυλινδρικών δοκιμίων που βρισκόταν εμποτισμένες, αλλά και στην γενικότερη δομή αυτών. Αυτό το γεγονός τα έκανε να χάνουν την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη, παρά το ότι εμφάνιζαν αρχικώς μεγαλύτερα μέτρα ελαστικότητας από τα αντίστοιχα δείγματα L. Στο Σχήμα 8.3 μπορεί να διαπιστωθεί η τάση που εμφάνισαν τα δοκίμια R κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης να ξεκινάει η αστοχία των δοκιμίων από την βάση που ήταν εμποτισμένη, και η οποία είχε υποστεί την μεγαλύτερη μηχανική γήρανση.

Σε αντίθεση τα δείγματα L εμφάνισαν μεγαλύτερες αντοχές κατά τις δοκιμές γήρανσης. Εντούτοις παρά το ότι παρουσίασαν χαμηλότερα μέτρα ελαστικότητας αρχικά, στην συνέχεια έδωσαν αυξημένα μέτρα ελαστικότητας, λόγω της ποσότητας του νερού που



Σχήμα 8.3: Αριστερά δοκίμιο μετά από 50 κύκλους, δεξιά δοκίμιο μετά από 25 κύκλους και αφού έχουν υποστεί δοκιμή θλίψης. Παρατηρείται έντονη η αστοχία των υλικών στις κάτω βάσεις.

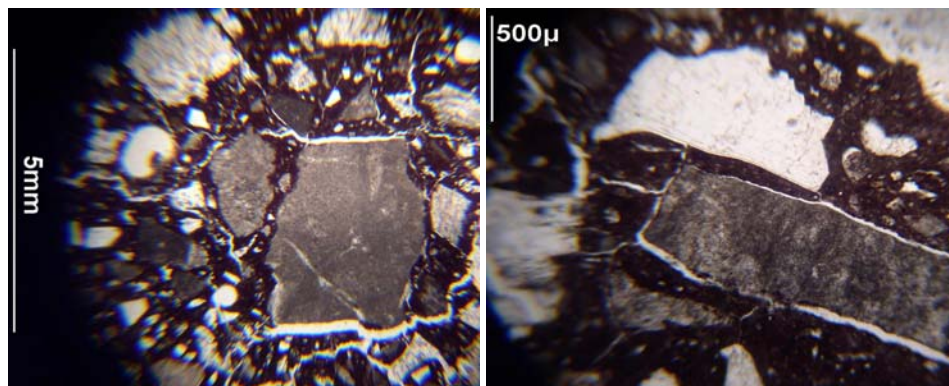




Σχήμα 8.4: Δοκίμιο K-9 σε δοκιμή θλίψης μετά από 120 κύκλους γήρανσης.

προσροφούσαν χάρη στην αυξημένη αναλογία τσιμέντου που διαπιστώθηκε στην δομή τους. Κατά την διάρκεια των δοκιμών αντοχής σε θλίψη δεν εμφάνισαν αντίστοιχες συμπεριφορές αστοχίας με τα δείγματα R. Στο Σχήμα 8.4 απεικονίζεται δοκίμιο της δεύτερης πειραματικής σειράς (K9) κατά την διάρκεια της δοκιμής θλίψης και παρατηρείται ότι η αστοχία του δοκιμίου δεν επέρχεται όπως στην περίπτωση των δοκιμών R, ενώ είναι εμφανής και η εμπότιση στην κάτω βάση του δείγματος.

Σημαντικό ρόλο στις συμπεριφορές των δειγμάτων τόσο στην αντοχή σε θλίψη όσο και τις



Σχήμα 8.5: Φωτογραφίες οπτικού μικροσκοπίου, όπου διακρίνονται οι μικρορωγμές και αποκολλήσεις των κόκκων αδρανών από το συνδετικό υλικό.

δοκιμές γήρανσης έπαιξε το ποσοστό και η ποιότητα του συνδετικού υλικού που είχαν τα δοκίμια. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από φωτογραφίες οπτικού μικροσκοπίου όπου οι εμφανιζόμενες μικρορωγμές και αποκολλήσεις των αδρανών από το συνδετικό υλικό στην δομή των υλικών παίζουν σημαντικό ρόλο (Σχήμα 8.5).

### **8.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ**

Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ήταν παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε για τα μέτρα ελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα αυτό που παρατηρήθηκε, ήταν ότι τα δείγματα L παρουσίασαν μία τάση αύξησης της αντοχής σε θλίψη κατά την πάροδο των κύκλων ψύξης – θέρμανσης όπως και στην περίπτωση του μέτρου ελαστικότητας τους. Η τάση αυτή παρατηρήθηκε για όλα τα είδη ξήρανσης και η αύξηση αυτή ήταν της τάξεως των 5 MPa και οφειλόταν στην διάθεση που εμφάνισαν τα δοκίμια για προσρόφηση νερού λόγω της ύπαρξης κυρίως του συνδετικού υλικού (τσιμέντου).

Παρόμοια συμπεριφορά έδειξαν και τα δείγματα R η οποία όμως ήταν σε μικρότερη κλίμακα αφού η αύξηση ήταν της τάξεως των 3 MPa. Επίσης μετά την αύξηση που εμφάνιζαν κυρίως στους πρώτους κύκλους της γήρανσης στην συνέχεια είχαν πτώση της αντοχής η οποία ήταν ιδιαίτερα έντονη στα δοκίμια που είχαν υποστεί γρήγορη ξήρανση. Γεγονός το οποίο συμβαδίζει με την τάση που εμφάνισαν τα δοκίμια για προσρόφηση νερού στην δομή τους μόνο στους πρώτους κύκλους διαμονής τους εντός του κλιματικού θαλάμου.

### **8.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ**

Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι εκτός των υπολοίπων μακροσκοπικών και μικροσκοπικών παρατηρήσεων, καταγραφών, καθώς και των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης των υλικών τα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των υλικών επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ταχυτήτων διάδοσης των διαμήκων κυμάτων.

Οι τιμές από τις δοκιμές των υπερήχων τόσο για τα δείγματα R όσο και για τα L συμφωνούν με την γενικότερη εικόνα που εμφάνισαν τα δείγματα τόσο με τις μετρήσεις απώλειας (ή αύξησης) του βάρους (κατά την αύξηση του αριθμού κύκλων γήρανσης) όσο και με τις μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας των δοκιμίων. Οι ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων παρουσίασαν αυξητικές τάσεις για τα δοκίμια που εμφάνισαν τάση αύξησης του

βάρους τους όσο και του μέτρου ελαστικότητας ( $L$  δείγματα), ενώ αντίθετα τα δείγματα που παρουσίασαν αυξημένη απολέπιση και μείωση των μέτρων ελαστικότητας οι ταχύτητες των υπερήχων έδειξαν αντίστοιχη συμπεριφορά ( $R$  δείγματα).

Η γενικότερη συμπεριφορά που επέδειξαν τα δείγματα στις δοκιμές των υπερήχων ήταν αποτέλεσμα της γενικότερης αντίδρασης των υλικών με την διέλευση των κύκλων γήρανσης από την δομή τους. Η εμφάνιση ή όχι ρωγμών στην μικροδομή των δοκιμίων είχε ως αποτέλεσμα την επίδραση της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων από την μάζα τους.

### **8.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**

Σημαντικό ρόλο στην γενικότερη εικόνα που επέδειξαν όλα τα δείγματα κατά την παραμονή τους εντός του κλιματικού θαλάμου αλλά και κατά την διάρκεια των δοκιμών που υποβαλλόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά την έξοδο τους από αυτόν ήταν άρρηκτα συνυφασμένη με το τρόπο που είχαν υποστεί ξήρανση κατά την παρασκευή τους. Την πιο ευάλωτη συμπεριφορά από όλα τα δείγματα εμφάνισαν αυτά που είχαν υποστεί γρήγορη ξήρανση στους  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Αυτά έδειξαν τις μικρότερες αντοχές κατά τις δοκιμές γήρανσης εφόσον παρουσίασαν τα μεγαλύτερα ποσοστά απώλειας βάρους σε σύγκριση με τα άλλα δείγματα των σειρών τους ( $2^{\eta}$  και  $3^{\eta}$  σειρά) αλλά διαφορετικών ξηράνσεων (κανονικής και βιομηχανικής). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να παρουσιάσουν τα χαμηλότερα μέτρα ελαστικότητας και τις χαμηλότερες αντοχές σε θλίψη. Όσο για τα δύο άλλα είδη ξήρανσης τα αποτελέσματα των διαδικασιών γήρανσης είχαν παρόμοια αποτελέσματα τόσο για στα ποσοστά απολέπισης και αποφλοίωσης, όσο και για τις αντοχές σε θλίψη και στα μέτρα ελαστικότητας. Με μικρή διαφορά υπέρ τους ήταν τα ποσοστά των δοκιμίων που είχαν υποστεί ξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### **8.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΗΣ ΠΕΤΡΑΣ**

Από την στιγμή που η ικανότητα υποστήριξης μίας διαδικασίας ή της χρήσης ενός υλικού σχετίζεται άμεσα με οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν τη χρήση ή όχι ενός υλικού χρησιμεύουν για τη βελτίωση ενός ή περισσότερων από αυτούς τους παράγοντες. Εάν η χρήση των τεχνητών λίθων αντί των φυσικών μειώνει τον κύκλο ζωής του υλικού, βοηθά στη συντήρηση των φυσικών

πόρων (θετικός περιβαλλοντικός παράγοντας), αλλά συγχρόνως, παράγει απόβλητα με ένα γρηγορότερο ρυθμό (αρνητικός περιβαλλοντικός παράγοντας).

Στην συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης δοκιμίων από φυσική πέτρα και δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τα δείγματα της φυσικής πέτρας προέρχονται από την περιοχή του Βάμου Χανίων και διατίθενται στο εμπόριο ως διακοσμητικοί λίθοι με την εμπορική επωνυμία Ημί-σκληρη Βάμου λόγω της αντοχής τους και της προέλευσης τους. Τα δοκίμια της φυσικής πέτρας ήταν καθαρός ασβεστόλιθος (όπως έδειξαν οι δοκιμές XRD και XRF). Τα χαρακτηριστικά της φυσικής πέτρας ήταν:

Πυκνότητα: 2,05 g/cm<sup>3</sup>

Πορώδες: 23 %

Συντελεστής απορροφητικότητας: 9,5 %

Μέτρο Ελαστικότητας: 12 GPa

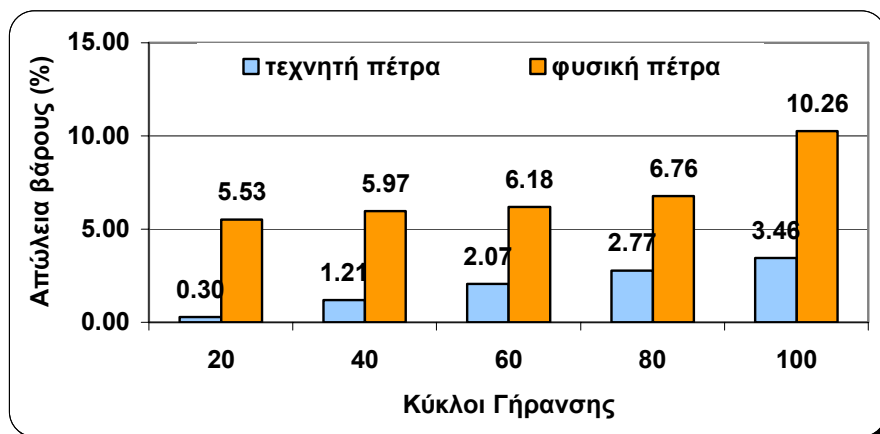
Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά και υπέστησαν τον ίδιο αριθμό κύκλων ψύξης - θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο. Τα δοκίμια της τεχνητής πέτρας που συγκρίνονται ήταν της πρώτης σειράς δοκιμίων, ενώ τα χαρακτηριστικά τους ήταν:

Πυκνότητα: 1,40 g/cm<sup>3</sup>

Πορώδες: 35 %

Συντελεστής απορροφητικότητας: 6,7 %

Μέτρο Ελαστικότητας: 6 GPa



Διάγραμμα 8.1: Σύγκριση φυσικής και τεχνητής πέτρας, απώλεια βάρους μετά από 100 κύκλους στον κλιματικό θάλαμο.

Στο Διάγραμμα 8.1 παρουσιάζονται το ποσοστά απώλειας βάρους φυσικών και τεχνητών λίθων που έχουν υποστεί τους ίδιους κύκλους ψύξης θέρμανσης στον κλιματικό θάλαμο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, φανερώνουν ότι οι τεχνητοί λίθοι μπορούν εύκολα να αντικαταστήσουν φυσικές διακοσμητικές πέτρες, ακόμη και κάτω από ακραίες καιρικές συνθήκες. Αυτό μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στις περιοχές όπου η φυσική πέτρα δεν είναι εύκολα διαθέσιμη, ή όπου υπάρχει ανησυχία για ένα χαμηλό δείκτη αποκατάστασης και αυξημένης μείωσης των φυσικών πόρων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα προέρχεται από ένα απόσπασμα από έντυπο της Μεγάλης Βρετανίας (N&C, 2000) όπου δηλώνεται ότι "μία από τις σπάνιες ομορφιάς κατοικημένες περιοχές της Μεγάλης Βρετανίας με τα πιο χαρακτηριστικά γνωρίσματα τοπίων - δρόμοι ασβεστόλιθων – εξαφανίζεται λόγω της δημοτικότητας και της απαίτησης της κοινωνίας για χρήση του ασβεστόλιθου στους κήπους".

Η χρήση των τεχνητών διακοσμητικών λίθων μπορεί να προσφέρει μια επιλογή βιώσιμης ανάπτυξης, όταν λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες (Maurigiannakis et al, 2003):

- ✓ φαίνεται να παράγονται περισσότερα απόβλητα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των φυσικών λίθων από κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των τεχνητών λίθων
- ✓ η διάβρωση λόγω γήρανσης αυξάνει την παραγωγή αποβλήτων ειδικά όταν οι διαβρωμένοι λίθοι πρέπει να αντικαθίστανται συνεχώς
- ✓ τεχνητά κατασκευασμένες διακοσμητικές πέτρες εμφανίζουν παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά, κάτω από κύκλους γήρανσης, με τις φυσικές πέτρες
- ✓ οι τεχνητές διακοσμητικές πέτρες μπορούν να προσαρμοστούν κατάλληλα σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και επομένως να ελαχιστοποιούνται τα απόβλητα λόγω της διάβρωσης.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αγιουτάντης Ζ.Γ., (2002), Στοιχεία γεωμηχανικής μηχανική πετρωμάτων, εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. ASTM D5312. Test specification for evaluation of durability of rock for erosion control user under freezing – thawing conditions.
3. Brady B.H.G. and E.T. Brown, (1993), Rock mechanics for underground mining, second edition, Chapman and Hall.
4. Goodman R.E., (1989), Introduction to rock mechanics, second edition.
5. Komnitsas K. and Z. Agioutantis, 2003. Risk Assessment and sustainable development framework in the mining industry, Proceedings, International Conference on Sustainable Development Indicators in the Mineral Industries (SDIMI 2003), May 2003, Milos, Greece.
6. Κομνίτσας Κ., (2002), Θέματα προστασίας και αποκατάστασης περιβάλλοντος.
7. ISRM, (1979), International Symposium of Rock Mechanics.
8. Jaeger J.C. and Cook N.G.W., (1979), Fundamentals of rock mechanics, third edition
9. Nature and Countryside (N&C), August 2000. [http://www.environment – go.net/news/archive%20news/news-natsou-aug2000.htm](http://www.environment-go.net/news/archive%20news/news-natsou-aug2000.htm).
10. Maurigiannakis S. and Z. Agioutantis, P. Kokkiniotis and E. Kagiara, Suitability of artificial stone as building material: a sustainable development option for the construction industry, International Conference on Sustainable Development Indicators in the mineral Industries (SDIMI 2003), May 2003, Milos, Greece.
11. Operating manual, PUNDIT6, Portable Ultrasonic non-destructive Digital Indicating Tester, CNS Farnell.
12. Operating instructions for climatic chamber, model GTS 600, serial number: 7359.

13. SBTM, (1996), Sustainable Building Technical Manual, Green Building Design, Construction, and Operations, Public Technology Inc.
14. Times, (2002), Sustainable development in the construction industry – case study of Gardiner & Theobald, the times 100, edition 7, <http://www.thetimes.co.uk>.
15. VBZ, (2001), Verien Deutscher Zementwerke (German Cement Works Association), Activity Report 1999-2001 – Sustainable Building with concrete ([www://vdz-online.de/daten/tb\\_99\\_01/en/pdf/08.pdf](http://www.vdz-online.de/daten/tb_99_01/en/pdf/08.pdf)).
16. VBZ, 2002.<http://www.vdz-online.de>.
17. Vutukuri V.S., R. D. Lama and S. S. Saluja, (1974), Handbook on mechanical properties of rocks: testing techniques and results.
18. Yatsu E., (1988), The nature of weathering an introduction, Sozosha, Tokyo.