## ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ: ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

# ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ΜΑΡΜΑΡΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΝΤΕΛΙΚΟ ΟΡΟΣ ΚΑΙ ΤΗΝ CARRARA ΙΤΑΛΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΠΑΓΟΚΡΥΟΠΛΗΞΙΑΣ

## ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Α. ΤΖΑΓΚΑΡΑΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Θ. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ) Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Β. ΠΕΡΔΙΚΑΤΣΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ



XANIA MAÏOΣ 2004

## προλογος

Θεωρώ χρέος μου να εκφράσω την εκτίμηση και τις ευχαριστίες μου σε ορισμένα άτομα, χωρίς την βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία.

Πρώτα απ' όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Θ. Μαρκόπουλο, για την ακούραστη καθοδήγηση και τις καθοριστικές παρεμβάσεις του κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Γ. Εξαδάκτυλο, για την πολύτιμη βοήθεια και τις παρατηρήσεις του στο κεφάλαιο της αντοχής των πετρωμάτων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον αναπληρωτή καθηγητή κ. Β. Περδικάτση για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές του στο κεφάλαιο της οπτικής κρυσταλλογραφίας.

Ε. Τζαγκαράκη

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι να μελετήσει την εφαρμογή μίας ειδικής εργαστηριακής δοκιμής για την προσέγγιση των συνθηκών του περιβάλλοντος και την κατανόηση των μηχανισμών διάβρωσης των πετρωμάτων.

Δοκίμια μαρμάρων Διονύσου Πεντέλης και Carrara Ιταλίας υποβάλλονται σε κύκλους ψύξης - θέρμανσης, σύμφωνα με το Αμερικανικό Πρότυπο ASTM D 5312. Η δοκιμή πραγματοποιείται στον θάλαμο Τεχνητής Γήρανσης Υλικών του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας, του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Συνολικά πραγματοποιούνται 180 κύκλοι ψύξης – θέρμανσης.

Για την μελέτη της επίδρασης των κύκλων ψύξης - θέρμανσης στα δοκίμια των μαρμάρων, εφαρμόζονται σε αυτά υπέρηχοι, παρασκευάζονται λεπτές τομές οι οπόιες μελετώνται στο πολωτικό μικροσκόπιο και τέλος, πραγματοποιούνται δοκιμές μονοαξονικής θλίψης.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθόδων με τα αντίστοιχα πριν την δοκιμή των κύκλων ψύξης – θέρμανσης, προκύπτει μία μείωση:

- Των ταχυτήτων διάδοσης των υπερήχων.
- Της συνοχής στα όρια των κόκκων των μαρμάρων.
- Των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη και των μέτρων ελαστικότητας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή
Κεφάλαιο 1
Γενικά για τα μάρμαρα.
1.1 Μάρμαρο Διονύσου Πεντέλης10
1.2 Μάρμαρο Carrara Ιταλίας12
Κεφάλαιο 2
Κανονισμός ASTM D 5312-92.
Κεφάλαιο 3
Δοκιμή κύκλων ψύξης - θέρμανσης.
3.1 Περιγραφή θαλάμου19
3.2 Περιγραφή δοκιμής20
Κεφάλαιο 4
Μέθοδος υπερήχων.
Κεφάλαιο 5
Πολωτικό μικροσκόπιο. 32
5.1 Περιγραφή οργάνου33
5.2 Μελέτη δοκιμίων
Κεφάλαιο 6
Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. 

Συμ	ιπεράσματα.	50		
Κεφάλαιο 7				
0.5				
63	Máquago Carrara	:3		
6.2	Μάρμαρο Διονύσου	5		
6.1	Περιγραφή δοκιμής4	2		

Βιβλιογραφία	

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εφαρμόζει την δοκιμή της επιταχυνόμενης (τεχνητής) γήρανσης. Στόχος της δοκιμής αυτής είναι να απομονώσει έναν παράγοντα διάβρωσης, να προσομοιώσει εργαστηριακά την δράση του και να την επιταχύνει. Ο παράγοντας φθοράς που εξετάζεται είναι οι διαδοχικοί κύκλοι ψύξης – θέρμανσης.

Η δοκιμή της επιταχυνόμενης γήρανσης έγινε στον θάλαμο Τεχνητής Γήρανσης Υλικών του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας, του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Ο θάλαμος αυτός επιτρέπει την καθημερινή πραγματοποίηση ενός κύκλου ψύξης - θέρμανσης.

Τα υλικά που εξετάστηκαν σε συνθήκες ψύξης – θέρμανσης ήταν μάρμαρα Διονύσου Πεντέλης και Carrara Ιταλίας. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυλινδρικής διατομής, τέσσερα από κάθε είδος μαρμάρου.

Οι κύκλοι ψύξης – θέρμανσης έγιναν σύμφωνα με το Αμερικανικό Πρότυπο ASTM D 5312 για την αξιολόγηση των πετρωμάτων και τον έλεγχο της διάβρωσης. Συγκεκριμένα, κάθε κύκλος διαρκούσε 24 ώρες και τα δοκίμια υποβάλλονταν σε ψύξη στους -18° C για 13 ώρες και στη συνέχεια, σε θέρμανση στους +32° C για 9 ώρες. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 180 κύκλοι ψύξης – θέρμανσης.

Η επίδραση των εναλλαγών της θερμοκρασίας στα μάρμαρα μελετήθηκε αρχικά με την διάδοση υπερήχων στα δοκίμια, πριν και μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης. Παρατηρήθηκε ότι, μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης, μειώθηκε η ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους κύματος Ρ. Η μείωση αυτή της ταχύτητας των υπερήχων είναι μία ένδειξη για ύπαρξη φθοράς στα δοκίμια.

Για την περαιτέρω διερεύνηση της φθοράς των μαρμάρων, παρασκευάστηκαν από τα δοκίμια λεπτές τομές, πριν και μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης. Οι λεπτές αυτές τομές μελετήθηκαν στο πολωτικό μικροσκόπιο και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Παρατηρήθηκε μία μείωση της συνοχής στα όρια κάποιων κόκκων των μαρμάρων που αποτελεί και αυτό μία ένδειξη φθοράς.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προσδιορίστηκαν οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη σ<sub>C</sub> και τα μέτρα ελαστικότητας Ε των μαρμάρων. Οι τιμές αυτές συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες σ<sub>C</sub> και Ε των δοκιμίων πριν τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης. Παρατηρήθηκε μία σαφή μείωση των τιμών των σ<sub>C</sub> και Ε, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη φθοράς στα μάρμαρα.

Επομένως, η δοκιμή επιταχυνόμενης (τεχνητής) γήρανσης σε συνθήκες ψύξης - θέρμανσης δίνει αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν την μείωση της αντοχής των μαρμάρων εξαιτίας της διάβρωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΜΑΡΜΑΡΑ

Στην εμπορική γλώσσα, με τον όρο μάρμαρα εννοούμε κάθε συμπαγές κρυσταλλικό πέτρωμα, στην ορυκτολογική σύσταση του οποίου επικρατούν τα ορυκτά με σκληρότητα 3 - 4 της σκληρομετρικής κλίμακας Mohs (ασβεστίτης, δολομίτης), που επιδέχεται κοπή, λείανση και στίλβωση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διακοσμητικό ή/και δομικό υλικό.

Ο όρος όμως μάρμαρο, με την πετρογραφική και την γεωλογική έννοια, αφορά τις κατηγορίες εκείνες των πετρωμάτων που προέρχονται από την μεταμόρφωση ασβεστολίθων ή δολομιτών. Πρόκειται για τα λεγόμενα γνήσια μάρμαρα με την επιστημονική έννοια του όρου. Σε αυτά ανήκουν το Πεντελικό μάρμαρο και το μάρμαρο της Carrara Ιταλίας.

Ως μεταμόρφωση ορίζεται η διαδικασία μετατροπής ενός προϋπάρχοντος πετρώματος σε άλλο, υπό συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης μεγαλύτερες από αυτές που επικρατούν στην επιφάνεια της γης και διαφορετικές από εκείνες που έδρασαν κατά το αρχικό στάδιο του σχηματισμού του πετρώματος. Υπό την επίδραση των παραγόντων της μεταμόρφωσης, τα μεταμορφωμένα πετρώματα αποκτούν δύο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, την κρυσταλλικότητα και την σχιστότητα.

Ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση, τα μεταμορφωμένα πετρώματα ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες, από τις οποίες ενδιαφέρον στην προκειμένη περίπτωση παρουσιάζουν τα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα, με κύριο ορυκτολογικό συστατικό τον ασβεστίτη. Η κατηγορία αυτή είναι η πλέον

ενδιαφέρουσα γιατί περιλαμβάνει τα γνήσια μάρμαρα, όπως εκείνα της Πεντέλης και της Carrara.

Μέσα στα μάρμαρα μπορεί να υπάρχουν και άλλα ορυκτά συστατικά σε διάφορες ποσότητες όπως είναι ο χαλαζίας, άστριοι, μοσχοβίτης ή σερικίτης, χλωρίτης, σερπεντίτης, γραφίτης, αργιλικά ή μεταλλικά ορυκτά, γρανάτης, διοψίδιος, τρεμολίτης κ.α. Η παρουσία των ορυκτών αυτών συστατικών, όταν βρίσκονται σε ικανή ποσότητα, επηρεάζει τόσο τις μηχανικές ιδιότητες, όσο και το χρώμα του μαρμάρου. Έτσι, τα φυλλώδη ορυκτολογικά συστατικά όπως είναι ο μοσχοβίτης, ο χλωρίτης κ.α. αυξάνουν τη σχιστότητα του, ενώ τα έγχρωμα δίνουν σε αυτό διάφορες χαρακτηριστικές αποχρώσεις. Ο χαλαζίας, που οι τεχνικοί τον ονομάζουν "γυαλί", εξαιτίας της μεγάλης σκληρότητας του, ακόμα και όταν βρίσκεται σε μικρές ποσότητες και με μικρό μέγεθος κόκκων, αυξάνει την σκληρότητα και την αντοχή του μαρμάρου, αλλά μειώνει σημαντικά τη δυνατότητα για καλή στίλβωση (Τσιραμπίδης, 2000).

Η καθαρότητα του γνήσιου μαρμάρου εξαρτάται κυρίως από το είδος και τη φύση της μεταμόρφωσης. Τα καθαρά και λεπτόκοκκα ασβεστιτικά μάρμαρα, λευκά ή χιονόλευκα, είναι πολύ σπάνια. Τέτοιου είδους μάρμαρα είναι της Πεντέλης και της Carrara στην Ιταλία.

Ο ιστός των μαρμάρων είναι γρανοβλαστικός ή σακχαροειδής που σημαίνει ότι όλοι οι κόκκοι του έχουν σχεδόν ίσο μέγεθος. Το μέγεθος των κόκκων, η έκταση των ενδιάμεσων πόρων, η υφή, η ορυκτολογική σύσταση, οι ξένες προσμίξεις και η παρουσία φλεβιδίων ή διακλάσεων, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό όλες τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των μαρμάρων. Το χρώμα των μαρμάρων δεν επηρεάζει καμία από αυτές και επομένως δεν είναι ενδεικτικό της ποιότητας τους αλλά μόνο της αισθητικής τους εμφάνισης.

#### 1.1. ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ ΠΕΝΤΕΛΗΣ

Το λευκό μάρμαρο Διονύσου είναι ένα μικροκοκκώδες έως λεπτοκοκκώδες μάρμαρο, με γρανοβλαστικό ιστό. Το κύριο ορυκτολογικό συστατικό του είναι ο ασβεστίτης, ο οποίος εμφανίζεται σε ξενοβλαστικούς, ισοδιαμετρικούς, πολυγωνικούς, αλλά και ακανόνιστους ή επιμήκεις κρυστάλλους. Παρουσιάζει σχιστότητα και πολυάριθμους δίδυμους κρυστάλλους, σαφώς προσανατολισμένους.

Τα επουσιώδη ορυκτά που απαντώνται στα Πεντελικά μάρμαρα είναι ο μοσχοβίτης και ο χλωρίτης και τα συμπτωματικά ο σιδηροπυρίτης, ο αιματίτης και ο αλβίτης. Ο μοσχοβίτης έχει αργυρό ή ανοιχτό τεφροπράσινο χρώμα και εμφανίζεται ή μεμονωμένος σε διάσπαρτα φυλλάρια, ή συγκεντρωμένος σε στρωματίδια μαζί με χλωρίτη. Ο χλωρίτης παρουσιάζεται και αυτός σε φυλλάρια, με σμαραγδοπράσινο χρώμα, τα οποία στο μικροσκόπιο εμφανίζουν έντονο πλεοχρωισμό (Ρήγας, 1988).

Η συνηθέστερη χρωματική παραλλαγή των Πεντελικών μαρμάρων είναι εκείνη που παρουσιάζει λευκό χρώμα με παράλληλες ζώνες κυανότεφρου και σμαραγδοπράσινου χρώματος. Το πάχος των ζωνών, τα όρια των οποίων δεν είναι πάντα σαφή, αυξομειώνεται, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται στρωματίδια, φακοειδείς ενστρώσεις και φλεβίδια, που καθιστούν τα Πεντελικά μάρμαρα αρκετά ανομοιογενή.

Η ορυκτολογική σύσταση και η χημική ανάλυση του μαρμάρου Διονύσου φαίνεται στους πίνακες 1.1 και 1.2 αντίστοιχα.

Εξορύσσεται από τα μεγάλα αποθέματα της περιοχής Διονύσου Αττικής, δίπλα στο Πεντελικό όρος. Οι άριστες φυσικομηχανικές αντοχές (πίνακας 1.3) συνδυαζόμενες με τη λευκότητα του ασβεστιτικού αυτού μαρμάρου, το καθιστούν υλικό ασυναγώνιστο.

Ασβεστίτης	98
Δολομίτης	-
Χαλαζίας	0,5
Μοσχοβίτης	0,5
Σερικίτης	0,5
Χλωρίτης	0,5

Πίνακας 1.1. Ορυκτολογική σύσταση μαρμάρου Διονύσου (% κ.β.).

	Πίνακας 1.2. Χ	ημική	ί ανάλυση	μαρμάρου Διονύσου	(% к.	β.)
--	----------------	-------	-----------	-------------------	-------	-----

CaO	54.8
MgO	1.55
SiO <sub>2</sub>	1.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2
K <sub>2</sub> O	0.09
Na <sub>2</sub> O	0.04
MnO	0.02
CO <sub>2</sub>	43.05

Πίνακας 1.3. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου.

	Διόνυσος
Πορώδες (%)	0.6±1
Μέγεθος κόκκων [μm]	250-350
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη [MPa]	90.3
Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό [MPa]	7
Λόγος Poisson	0.33
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	45

### 1.2. MAPMAPO CARRARA ITAAIA $\Sigma$

Το μάρμαρο της Carrara εξορύσσεται από τα Απέννινα όρη της Ιταλίας. Είναι ένα μετομορφωμένο πέτρωμα που αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από κρυστάλλους ασβεστίτη. Ο ιστός του είναι κοκκοβλαστικός έως γρανοβλαστικός με ισομεγέθεις κυρίως κρυστάλλους. Αντίθετα με το μάρμαρο Διονύσου, το μάρμαρο της Carrara είναι πιο ομοιογενές, χωρίς επίπεδα σχιστότητας.

Τα δοκίμια που εξετάζονται είναι τύπου Λοράνο. Το ορυχείο Λοράνο βρίσκεται σε μία από τις τρεις βασικές μαρμαροφόρες λεκάνες πίσω από την πόλη της Carrara.

Οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Carrara φαίνονται στον πίνακα 1.4.

	Carrara
Πορώδες (%)	$0.8{\pm}1$
Μέγεθος κόκκων [μm]	200-300
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη [MPa]	73.2
Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό [MPa]	5.6
Λόγος Poisson	0.33
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	49

Πίνακας 1.4. Φυσικές και μηγανικές ιδιότητες μαρμάρου Carrara.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ASTM D 5312-92

#### 1. Σκοπός.

Η δοκιμή που περιγράφεται καλύπτει τις διαδικασίες για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των πετρωμάτων και τον έλεγχο της διάβρωσης όταν αυτά υπόκεινται σε συνθήκες ψύξης - θέρμανσης.

Το πρότυπο αυτό δεν έχει σκοπό να προσδιορίσει όλους τους παράγοντες ασφάλειας. Είναι ευθύνη του χρήστη του προτύπου να προσδιορίσει κατάλληλες συνθήκες ασφάλειας και υγιεινής και να καθορίσει την εφαρμοσιμότητα του προτύπου πριν από την χρήση.

### 2. Σχετικά πρότυπα.

#### Πρότυπα ASTM:

D 4992: Έλεγχος πετρωμάτων σε διάβρωση.

D 5121: Προετοιμασία των δοκιμίων για τον έλεγχο της αντοχής.

#### 3. Σπουδαιότητα και Χρήση.

Αυτή η δοκιμή είναι σχεδιασμένη για να καθορίσει την επίδραση της ψύξηςθέρμανσης (freeze and thaw) στα πετρώματα και τον έλεγχο σε διάβρωση. Αναπτύχθηκε για να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις πρόσθετες δοκιμές που περιγράφονται στο Πρότυπο D 4992. Η δοκιμή δεν παρέχει μία απόλυτη τιμή αλλά μία ένδειξη της αντοχής σε ψύξηθέρμανση. Επομένως, τα αποτελέσματα της δοκιμής δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλήρη βάση για τον καθορισμό της ανθεκτικότητας των πετρωμάτων.

### 4. Απαραίτητες εργαστηριακές συσκευές.

Οι απαραίτητες συσκευές για την πραγματοποίηση της δοκιμής ψύξης – θέρμανσης είναι:

- Κυκλικός αδαμάντινος κόπτης, για την κοπή των δοκιμίων.
- Θάλαμος ψύξης θέρμανσης με χρονοδιακόπτη, σχεδιασμένος για ψύξη για 16 ώρες στους -18° C και στην συνέχεια για θέρμανση στους 32° C (± 2,5° C) τουλάχιστον για 8 ώρες σε καθημερινή βάση. Αυτός ο τύπος θαλάμου επιτρέπει την καθημερινή πραγματοποίηση ενός κύκλου ψύξης-θέρμανσης ακόμα και τα Σαββατοκύριακα.
- Συσκευή ξήρανσης (φούρνος) ικανή να ξηραίνει τα δοκίμια σε θερμοκρασία 110
   $\pm 5^{\circ}$  C.
- Δοχεία που κρατούν τα δοκίμια μερικώς σε διάλυμα αλκοόλης / νερού. Τα δοχεία αυτά πρέπει να είναι ανοξείδωτα ή από PVC (Polyvinyl Chlorite).
- Ζυγαριά με ακρίβεια 0.1 %.
- Φωτογραφική μηχανή, για την φωτογράφηση των δοκιμίων πριν και μετά.
- Στερεοσκόπιο, ή άλλη κατάλληλη μεγεθυντική συσκευή ικανή για μεγέθυνση τουλάχιστον 20 φορές του αρχικού μεγέθους, για την εξέταση των δοκιμίων πριν και μετά την δοκιμή.
- 5. Ειδικά διαλύματα.

Το ειδικό διάλυμα που απαιτείται για την δοκιμή είναι 0.5 % ισοπροπυλική αλκοόλη / νερό. Καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής το διάλυμα πρέπει να συμπληρώνεται.

#### 6. Δειγματοληψία.

Ο αριθμός και η ποικιλία των δειγμάτων από μία θέση εξαρτώνται από την γεωλογική σύνθεση της περιοχής και αφήνεται στην κρίση του ατόμου που θα κάνει την δειγματοληψία και ο οποίος πρέπει να έχει σχετική εμπειρία. Όμως, σε καμία περίπτωση ο αριθμός των δειγμάτων δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 5 για κάθε πέτρωμα.

Κάθε δοκίμιο πρέπει να έχει το απαραίτητο μέγεθος ώστε να πραγματοποιηθεί η δοκιμή χωρίς άλλη μηχανική καταπόνηση. Τα δοκίμια που επιλέγονται πρέπει να έχουν κατάλληλο μέγεθος για να το χειριστεί η μηχανή, αλλά όχι μικρότερο από 125 mm η κάθε πλευρά. Σε κάθε περίπτωση, τα δείγματα πρέπει να είναι αντισπροσωπευτικά των διαφόρων πετρωμάτων της υπό εξέταση περιοχής.

#### 7. Διαδικασία.

- Εξέταση κάθε δοκιμίου μακροσκοπικά και μικροσκοπικά σε μεγέθυνση τουλάχιστον x 20. Σημείωση πιθανών επιπέδων στρώσεων (bedding planes), μικρορωγμών (microfractures) και άλλων επιπέδων αδυναμίας και της κατάστασης τους. Αναλυτική περιγραφή κάθε δοκιμίου σύμφωνα με το Practice D 5121.
- Ονομασία κάθε δοκιμίου με κατάλληλο μαρκαδόρο. Φωτογράφηση κάθε δοκιμίου με έγχρωμο φιλμ (υγρά ή μερικώς υγρά δοκίμια δίνουν μεγαλύτερες λεπτομέρειες). Στις φωτογραφίες να συμπεριλαμβάνεται κλίμακα.

- Ξήρανση κάθε δοκιμίου σε φούρνο στους 110 ± 5° C, ζύγισμα και καταγραφή του βάρους. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των ζυγίσεων πρέπει να είναι λιγότερο από 4 ώρες.
- Τοποθέτηση κάθε δοκιμίου με την κομμένη τους πλευρά σε δοχείο πάνω σε μοκέτα (synthetic fiber). Προσθήκη αρκετού διαλύματος αλκοόλης / νερού στο δοχείο έτσι ώστε να καλύψει το δοκίμιο και παραμονή για τουλάχιστον 12 ώρες.
- Αφαίρεση διαλύματος ώστε η μοκέτα μόλις να σκεπάζεται με το διάλυμα.
- Τοποθέτηση του δοχείου και των δοκιμίων στον θάλαμο ψύξης θέρμανσης. Τα δοκίμια υπόκεινται σε ψύξη στους -18° C για τουλάχιστον 12 ώρες (δεν υπάρχει μέγιστο όριο χρονικής παραμονής των δοκιμίων σε ψύξη) και στην συνέχεια σε θέρμανση στους +32° C για τουλάχιστον 8 ώρες, αλλά όχι περισσότερο από 12 ώρες. Συμπλήρωση, ανά τακτά διαστήματα, του διαλύματος της αλκοόλης, έτσι ώστε να παραμένει πάντα καλυμμένη η μοκέτα με διάλυμα.
- Επανάληψη της διαδικασίας ψύξης-θέρμανσης για συνολικό αριθμό κύκλων ισοδύναμο με τον ενδεικτικό αριθμό που είναι 5 κύκλους πιο κοντά στην επιθυμητή γεωγραφική περιοχή, όπως καθορίζεται από τον χάρτη κλιματικών δεδομένων του Ν.Ο.Α.Α. (National Oceanic and Atmospheric Agency). Ο χάρτης αυτός καθορίζει την γεωγραφική κατανομή της δριμύτητας των κύκλων ψύξης θέρμανσης. Το σχήμα λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τον ετήσιο αριθμό κύκλων ψύξης - θέρμανσης, αλλά και το μέγεθος της υγρασίας που σχετίζεται με κάθε κύκλο και τις ακραίες θερμοκρασίες των κύκλων. Επομένως, ο ενδεικτικός αριθμός δεν είναι μία πρόβλεψη του ετήσιου αριθμού των κύκλων ψύξης θέρμανσης αλλά μάλλον ένας δείκτης της δριμύτητας της διαδικασίας ψύξης θέρμανσης ανά γεωγραφική περιοχή. Επειδή η δριμύτητα αλλάζει από περιοχή σε

περιοχή δεν μπορεί να υπάρχει αξιόπιστος δείκτης για τον έλεγχο σε διάβρωση του πετρώματος για δεδομένη περιοχή παρά μόνο αν η δοκιμή προσαρμοστεί στα δεδομένα της περιοχής. Ο δείκτης δριμύτητας της ψύξης - θέρμανσης επιτρέπει αυτού του είδους την προσαρμογή.

 Εξέταση των δοκιμίων μετά από μερικές μέρες για τυχόν αλλαγές στην κατάσταση τους και φωτογράφηση αν απαιτείται.

## 8. Υπολογισμοί.

## Α. Ποσοτική εξέταση

Για κάθε δοκίμιο εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

% απώλεια βάρους = (A-B)/A \*100

Όπου:

Α: η ξηρή μάζα του δοκιμίου πριν την δοκιμή και

Β: η ξηρή μάζα του μεγαλύτερου εναπομείναντος κομματιού μετά την δοκιμή.

### <u>Β. Ποιοτική εξέταση</u>

Κάθε 5 κύκλους γίνεται οπτική εξέταση των δοκιμίων για τυχόν αλλαγές κατά την διάρκεια της δοκιμής και περιγραφή των αλλαγών. Καθορίζεται ο τύπος της διάβρωσης (spalling, splitting, disintegration) και καταγράφονται τυχόν αλλαγών στα προσημειωμένα επίπεδα αδυναμίας.

Φωτογράφηση των δοκιμίων μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών με έγχρωμο φιλμ. Στις φωτογραφίες να συμπεριλαμβάνεται κλίμακα.

9. Έκθεση.

Δίνονται οι παρακάτω πληροφορίες:

Αριθμός δοκιμίου.

- Προέλευση δοκιμίου (θέση μητρικού πετρώματος).
- Περιοχή προβλεπόμενης χρήσης πετρώματος.
- Είδος πετρώματος.
- Τα αποτελέσματα της ποσοτικής εξέτασης με ακρίβεια 0.1 %.
- Περιγραφή της ποιοτικής εξέτασης και των αποτελεσμάτων.
- Έγχρωμες φωτογραφίες των δοκιμίων πριν και μετά την εκτέλεση των δοκιμών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΔΟΚΙΜΗ ΚΥΚΛΩΝ ΨΥΞΗΣ - ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

#### 3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΑΛΑΜΟΥ

Η δοκιμή κύκλων ψύξης – θέρμανσης που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε στον θάλαμο Τεχνητής Γήρανσης Υλικών του Εργαστηρίου Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας, του Πολυτεχνείου Κρήτης (Σχήμα 3.1). Ο θάλαμος του εργαστηρίου επιτρέπει την καθημερινή πραγματοποίηση ενός κύκλου ψύξης-θέρμανσης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- Χωρητικότητα: 600 λίτρα
- Συνήθης θερμοκρασιακή διακύμανση: από -20 έως +80° C με ακρίβεια ± 1° C σε απόσταση 100 mm από τα τοιχώματα του.
- Θέρμανση από τους  $-10^{0}$  C στους  $+80^{0}$  C με ταχύτητα  $0.5^{0}$  C ανά λεπτό.
- Ψύξη από τους  $+80^{\circ}$  C στους  $-10^{\circ}$  C με ταχύτητα  $0.5^{\circ}$  C ανά λεπτό.
- Διακύμανση σχετικής υγρασίας: από 10 % έως 98%.

Ο χειρισμός του θαλάμου γίνεται μέσω ενός Η/Υ στον οποίο είναι συνδεδεμένος, με την χρήση ενός προγράμματος, του Winkratos Software, που έχει σχεδιαστεί από την εταιρεία που κατασκευάζει τον θάλαμο.



Σχήμα 3.1. Θάλαμος Τεχνητής Γήρανσης Υλικών.

## 3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Πριν την πραγματοποίηση της δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης, τα δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα για να μπουν στον θάλαμο τεχνητής γήρανσης, όπως προβλέπει το Αμερικανικό πρότυπο ASTM σύμφωνα με το οποίο έγινε η δοκιμή.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυλινδρικής διατομής, 4 από κάθε είδος μαρμάρου. Αρχικά λειάνθηκαν ώστε να αποκτήσουν τέλειες έδρες στις βάσεις. Μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους, 3 ύψη και 3 διάμετροι για να βγει ο μέσος όρος (πίνακες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα).

	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Hm (cm)
Δ1	8,990	9,005	8,985	8,993
Δ2	9,510	9,500	9,495	9,502
Δ3	9,675	9,675	9,675	9,675
Δ4	10,000	10,000	9,985	9,995
K1	9,110	9,115	9,120	9,115
K2	9,470	9,485	9,470	9,475
K3	9,650	9,660	9,660	9,657
K4	9,575	9,570	9,560	9,568

Πίνακας 3.1. Μετρήσεις υψών δοκιμίων.

Πίνακας 3.2. Μετρήσεις διαμέτρων δοκιμίων.

	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dm (cm)
Δ1	4,910	4,910	4,930	4,917
Δ2	4,990	4,900	4,915	4,935
Δ3	4,885	4,880	4,920	4,895
Δ4	5,025	5,005	5,010	5,013
K1	4,890	4,880	4,875	4,882
K2	4,905	4,895	4,910	4,903
K3	4,685	4,660	4,635	4,660
K4	4,750	4,780	4,780	4,770

Όπου:

Δ1 έως Δ4: δοκίμια μαρμάρου Διονύσου,

K1 έως K4: δοκίμια μαρμάρου Carrara,

D1: Διάμετρος στην κορυφή του δοκιμίου,

D2: Διάμετρος στην βάση,

D3: Διάμετρος στο μέσον,

Dm: Μέση τιμή διαμέτρων δοκιμίου,

Hm: Μέση τιμή υψών δοκιμίου.

Στη συνέχεια, τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν. Μετά την φωτογράφηση βυθίστηκαν σε απιονισμένο νερό όπου παρέμειναν για 48 ώρες. Ακολούθως, ζυγίστηκαν και μετρήθηκε το βάρος W<sub>1</sub> (gr). Τοποθετήθηκαν στον φούρνο στους 105<sup>0</sup> C για 24 ώρες και μετά σε ξηραντήρα (excicator) έως ότου απέκτησαν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ακολούθως, ζυγίστηκαν ξανά και προσδιορίστηκε το αρχικό βάρος τους εν ξηρώ W<sub>2</sub> (gr). Τα βάρη W<sub>1</sub> και W<sub>2</sub> φαίνονται στον πίνακα 3.3.

	W1 (gr)	W2 (gr)
Δ1	460,30	460
Δ2	482,3	482,1
Δ3	489,5	489,4
Δ4	530,6	530,4
K1	458,2	457,9
K2	482,1	481,7
K3	443,8	443,5
K4	461,5	461,2

Πίνακας 3.3. Αρχικά βάρη δοκιμίων.

Ακολούθως, τα δοκίμια βυθίστηκαν σε λεκάνη που περιήχε διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης 0,5 % και παρέμειναν εκεί για 12 ώρες τουλάχιστον (βάσει του προτύπου ASTM).

Μετά τη πάροδο των 12 ωρών τοποθετήθηκαν στον θάλαμο τεχνητής γήρανσης, σε ταψί με επένδυση από πλαστικό τάπητα εμποτισμένο με διάλυμα ισοπροπυλικής αλκοόλης και ξεκίνησαν οι κύκλοι ψύξης - θέρμανσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ASTM D 5312-92.

Συγκεκριμένα, κάθε κύκλος διαρκούσε 24 ώρες και τα δοκίμια υποβάλλονταν σε ψύξη στους -18° C για 13 ώρες και σε θέρμανση στους +32° C για 9 ώρες, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



#### Σχήμα 3.2. Σχηματικό διάγραμμα κύκλων ψύξης - θέρμανσης.

Μετά την συμπλήρωση 90 κύκλων, τα δοκίμια βγήκαν από τον θάλαμο και ελέγχθηκαν οπτικά. Λόγω της ανθεκτικότητας των μαρμάρων Διονύσου και Carrara, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν άλλοι 90 κύκλοι, για την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των εναλλαγών της θερμοκρασίας στα μάρμαρα.

Αφού ολοκληρώθηκαν συνολικά 180 κύκλοι ψύξης – θέρμανσης τα δοκίμια βγήκαν από τον θάλαμο, τοποθετήθηκαν στον ξηραντήρα στους 105° C για 24 ώρες και μετρήθηκε το νέο βάρος τους εν ξηρώ W2΄ (gr).

Από την σύγκριση των W2 και W2' (βάρος εν ξηρώ των δοκιμίων πριν και μετά την πραγματοποίηση των κύκλων) προκύπτει το ποσοστό απώλειας βάρους που φαίνεται στον πίνακα 3.4. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, η απώλεια βάρους των δοκιμίων, μετά την πραγματοποίηση των κύκλων ψύξης – θέρμανσης, είναι αμελητέα.

	ΑΡΧ. ΞΗΡΟ ΒΑΡΟΣ	ΤΕΛ. ΞΗΡΟ ΒΑΡΟΣ	% ΑΠΩΛΕΙΑ
	W2 (gr)	W2′ (gr)	ΒΑΡΟΥΣ
Δ1	460,0	460,0	0,000
Δ2	482,1	482,0	0,021
Δ3	489,4	489,3	0,020
Δ4	530,4	530,4	0,000
K1	457,9	457,9	0,000
K2	481,7	481,6	0,021
K3	442,5	442,5	0,000
K4	461,2	461,2	0,000

Πίνακας 3.4. Ποσοστό απώλειας βάρους δοκιμίων.

Στη συνέχεια, τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν ξανά. Οι φωτογραφίες των δοκιμίων μαρμάρου Διονύσου, πριν και μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης φαίνονται στα σχήματα 3.4 και 3.5. Αντίστοιχα, οι φωτογραφίες των δοκιμίων μαρμάρου Carrara φαίνονται στα σχήματα 3.6 και 3.7. Από τη σύγκριση των φωτογραφιών αυτών δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη οπτική αλλοίωση στα δοκίμια.

Η όλη προετοιμασία των δοκιμίων για τον θάλαμο τεχνητής γήρανσης φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης.



Σχήμα 3.4. Αρχική εικόνα δοκιμίων μαρμάρου Διονύσου.



Σχήμα 3.5. Τελική εικόνα δοκιμίων μαρμάρου Διονύσου.



Σχήμα 3.6. Αρχική εικόνα δοκιμίων μαρμάρου Carrara.



Σχήμα 3.7. Τελική εικόνα δοκιμίων μαρμάρου Carrara.

# κεφαλαίο 4 Μέθοδος Υπερηχών

Για την περαιτέρω διερεύνηση της φθοράς των δοκιμίων, εφαρμόστηκαν σε αυτά υπέρηχοι, πριν και μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα.

Η μέθοδος των υπερήχων βασίζεται στην διάδοση, μέσω των δοκιμίων, του υπερηχητικού παλμού και την μέτρηση του χρόνου που κάνει ο παλμός αυτός για να διανύσει το μήκος των δοκιμίων. Από τον χρόνο αυτό και το μήκος των δοκιμίων υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους κύματος V<sub>p</sub> εντός των δοκιμίων, σύμφωνα με τη σχέση:

V = l/t

όπου V η ταχύτητα, 1 το μήκος που διανύει το κύμα και t ο χρόνος που χρειάζεται ο παλμός για να διανύσει το μήκος 1 (Operating Manual PUNDIT6).

Για την εφαρμογή των υπερήχων τα δοκίμια τοποθετούνται σε χειροκίνητη πρέσα, υποβάλλονται σε θλίψη με σταθερή πίεση 0,5 MPa και μετράται η ένδειξη που δίνει η συσκευή pundit (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1. Δοκιμή υπερήχων.

Η ταχύτητα διαδόσεως των κυμάτων εντός του πετρώματος εξαρτάται από την πυκνότητα ρ και τις ελαστικές σταθερές Ε και ν του υλικού. Είναι μία χαρακτηριστική ιδιότητα διότι αποτελεί ένα έμμεσο τρόπο εκτίμησης των ιδιοτήτων του υλικού.

Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης των μαρμάρων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη μέθοδο των υπερήχων πριν την έναρξη των κύκλων δίνονται στον πίνακα 4.1.

Μετά την ολοκλήρωση των κύκλων ψύξης - θέρμανσης έγιναν ξανά υπέρηχοι στα μάρμαρα. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 4.2.

Αριθμός δοκιμίου	Μέσο ύψος δοκιμίου Η <sub>m</sub> (cm)	Χρόνος διέλευσης διαμήκους κύματος tp (μs)	Ταχύτητα διαμήκους κύματος Vp (m/s)
Δ1	8,993	17,6	5109,8
Δ2	9,502	22,7	4185,8
Δ3	9,675	30,0	3225,0
Δ4	9,995	20,7	4828,5
K1	9,115	25,9	3519,3
K2	9,475	25,9	3658,3
K3	9,657	31,3	3085,2
K4	9,568	27,0	3543,8

Πίνακας 4.1. Μετρήσεις υπερήχων πριν την έναρζη των κύκλων.

Πίνακας 4.2. Μετρήσεις υπερήχων μετά την ολοκλήρωση των κύκλων.

Αριθμός δοκιμίου	Μέσο ύψος δοκιμίου Η <sub>m</sub> (cm)	Χρόνος διέλευσης διαμήκους κύματος tp (μs)	Ταχύτητα διαμήκους κύματος Vp (m/s)
Δ1	8,993	22,5	3997,0
Δ2	9,502	31,3	3035,7
Δ3	9,675	30,2	3203,6
Δ4	9,995	23,2	4308,2
K1	9,115	31,2	2921,5
K2	9,475	33,3	2845,3
K3	9,657	31,3	3085,2
K4	9,568	28,2	3393,0

Όπου:

Δ1 έως Δ4: δοκίμια μαρμάρου Διονύσου,

K1 έως K4: δοκίμια μαρμάρου Carrara.

Από την σύγκριση των ταχυτήτων διάδοσης των P κυμάτων πριν και μετά την πραγματοποίηση των κύκλων (σχήμα 4.2) φαίνεται μία μείωση της ταχύτητας. Η

μείωση αυτή της ταχύτητας γενικά συνδέεται με φυσικές ιδιότητες της πέτρας π.χ. μία αύξηση στο πορώδες.

Το πορώδες ενός μαρμάρου είναι συνήθως μικρότερο από 1%. Όμως, η διαδοχική ψύξη - θέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε μερική αποκόλληση στα όρια κάποιων από τους κρυστάλλους και άρα αύξηση στο πορώδες. Η αύξηση στο πορώδες εξαιτίας της διάβρωσης στο μάρμαρο είναι πολύ μικρή και επομένως μη ανιχνεύσιμη με τις συνήθεις εργαστηριακές μεθόδους μέτρησης.

Επομένως, η μείωση της ταχύτητας διάδοσης του διαμήκους κύματος P, μετά την πραγματοποίηση των κύκλων ψύξης – θέρμανσης, αποτελεί μία ένδειξη για έναρξη φθοράς στα δοκίμια των μαρμάρων.



Σχήμα 4.2. Ταχύτητες διάδοσης Ρ κυμάτων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΟΛΩΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Μία συστηματική εξέταση των οπτικών χαρακτηριστικών των ορυκτών σε λεπτές τομές στο πολωτικό μικροσκόπιο, επιτρέπει τον προσδιορισμό σχεδόν όλων των ορυκτών που βρίσκονται συνήθως σε ένα πέτρωμα. Όλα τα κρυσταλλικά υλικά έχουν χαρακτηριστικές οπτικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από την κρυσταλλική δομή και είναι ιδιαίτερα ορατές σε πολωμένο φως. Για το λόγο αυτό, η μελέτη των ορυκτών γίνεται σε πολωτικό μικροσκόπιο.

Τα περισσότερα ορυκτά είναι διαφανή, σε λεπτές τομές πετρωμάτων, πάχους περίπου 30 μm. Η μελέτη των ορυκτών σε λεπτές τομές, επιτρέπει τον προσδιορισμό τους, βάσει των οπτικών ιδιοτήτων τους και του τρόπου ανάπτυξης μεταξύ τους.

Επομένως, η οπτική κρυσταλλογραφία είναι η μέθοδος μελέτης των οπτικών ιδιοτήτων των ορυκτών στο πολωτικό μικροσκόπιο.

#### 5.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΡΓΑΝΟΥ

Το πολωτικό (πετρογραφικό) μικροσκόπιο είναι ένα από τα σημαντικότερα όργανα προσδιορισμού και μελέτης των ορυκτών και των πετρωμάτων. Η διαφορά του από το απλό μικροσκόπιο είναι ότι φέρει προσθήκες που επιτρέπουν την πόλωση του φωτός για την μελέτη διαφόρων οπτικών ιδιοτήτων των κρυσταλλικών κυρίως φάσεων.

Συγκεκριμένα, το πολωτικό μικροσκόπιο φέρει κάτω από την τράπεζα έναν πολωτή και έναν δεύτερο στο σωλήνα του μικροσκοπίου, μεταξύ αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού, ο οποίος ονομάζεται αναλυτής. Ο αναλυτής μπορεί να τίθεται σε διασταύρωση με τον πολωτή.

Το φως από κατάλληλη πηγή, από τον πολωτή, εστιάζεται πάνω στην λεπτή τομή με συγκεντρωτικούς φακούς. Η μεγέθυνση, σε τυπική κλίμακα από x20 έως x200 φορές, επιτυγχάνεται από τους αντικειμενικούς φακούς και το σύστημα του προσοφθάλμιου φακού ανάμεσα στα οποία βρίσκεται ο αναλυτής. Η τράπεζα είναι περιστρεφόμενη και υποδιαιρείται σε 360<sup>0</sup>. Ο προσοφθάλμιος φακός φέρει σταυρόνημα του οποίου τα κάθετα νήματα έχουν την διεύθυνση ταλάντωσης πολωτή και αναλυτή.

Το μελετώμενο με το πολωτικό μικροσκόπιο παρασκεύασμα είναι μία λεπτή τομή, πάχους περίπου 30 μm που τοποθετείται πάνω στην στρογγυλή τράπεζα του μικροσκοπίου. Για την <u>παρασκευή των λεπτών τομών</u> κόβεται από την πέτρα ένα κομμάτι σε μορφή πλακιδίου. Στη συνέχεια, η μία πλευρά λειαίνεται δια τριβής πάνω σε ένα περιστρεφόμενο επίπεδο μεταλλικό δίσκο με τη βοήθεια λειαντικών μέσων όπως είναι το SiC σε μορφή σκόνης με την προσθήκη μικρής ποσότητας νερού. Η λείανση γίνεται βαθμιαία με σκόνη όλο και μικρότερης κοκκομετρίας, μέχρι να γίνει

η επιφάνεια λεία και επίπεδη. Η λειασμένη επιφάνεια επικολλάται πάνω σε ένα γυάλινο πλακίδιο και τελικά μειώνεται το πάχος του πετρώματος σε 20 έως 40 μm.

Η εξέταση των οπτικών ιδιοτήτων των ορυκτών γίνεται με <u>πολωμένο φως</u>. Το φυσικό φως που παράγεται από συνήθεις πηγές, όπως ο ήλιος ή οι λάμπες πυρακτώσεως, αποτελείται από μήκη κύματος του ορατού φάσματος, δίχως συγκεκριμένη πόλωση. Όταν όμως διέρχεται μέσα από έναν πολωτή αναλύεται και εξέρχεται πολωμένο σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Επομένως, ο πολωτής επιτρέπει στο φως να ταλαντώνεται μόνο κατά μία διεύθυνση (γραμμικά πολωμένο φως).

Ο αναλυτής επιτρέπει την δίοδο μόνο των ακτίνων που έχουν επίπεδο κραδασμού κάθετα προς το επίπεδο πόλωσης του πολωτή. Ο αναλυτής μπορεί να τοποθετείται κάθετα ή να αφαιρείται στην πορεία του φωτός. Όταν τοποθετείται τότε οι λεπτές τομές εξετάζονται σε διασταυρωμένους πολωτές, ή διασταυρωμένα Nicols, όπως έχει επικρατήσει να λέγεται.

Στην αναγνώριση ενός ορυκτού σε λεπτή τομή με χρήση πετρογραφικού μικροσκοπίου, τα αρχικά διαγνωστικά στοιχεία είναι το σχήμα του κρυστάλλου, τα επίπεδα σχισμών και οι οπτικές ιδιότητες σε γραμμικά πολωμένο φως.

Η αναγνώριση μέσω του σχήματος είναι περιορισμένης χρήσης, γιατί στα πετρώματα τα ορυκτά σπάνια μπορούν να αναπτυχθούν σε καλοσχηματισμένους ιδιόμορφους κρυστάλλους. Ακόμα, το σχήμα που παρατηρείται εξαρτάται από το σχήμα του κρυστάλλου που έχει κοπεί από την λεπτή τομή και έτσι είναι τυχαίο. Παρ΄όλα αυτά, οι γραμμές διάρρηξης που παρουσιάζονται στις λεπτές τομές σαν ραβδώσεις που διατρέχουν τον κρύσταλλο, αποτελούν ένα αξιόπιστο διαγνωστικό στοιχείο.

Τα ισότροπα και ανισότροπα ορυκτά μπορούν να διακριθούν εξετάζοντας την λεπτή τομή με διασταυρωμένους τον πολωτή και τον αναλυτή, έτσι ώστε τα επίπεδα κραδασμού του φωτός μέσα σε αυτά να είναι κάθετα μεταξύ τους και πάντα κάθετα προς την περιστρεφόμενη τράπεζα.

Οπτικά ισότροπα καλούνται τα υλικά όταν επιτρέπουν την διάδοση του φωτός μέσα από αυτά με την ίδια ταχύτητα σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Τέτοια υλικά είναι τα γυαλιά και τα κυβικά υλικά. Αντίθετα, στα οπτικά ανισότροπα υλικά, το φως παρουσιάζει διαφορετική ταχύτητα σε διάφορες κατευθύνσεις. Τα οπτικά ανισότροπα ονομάζονται και διπλοθλαστικά λόγω του φαινομένου της διπλής διάθλασης κατά το οποίο από μία προσπίπτουσα ακτίνα φωτός προκύπτουν δύο διαθλώμενες (Σαπουντζής, 1985).

Περιστρέφοντας την τράπεζα του μικροσκοπίου πάνω στην οποία είναι τοποθετημένη η λεπτή τομή, διαπιστώνουμε ότι τα ισότροπα ορυκτά εμφανίζονται σκοτεινά. Αντίθετα, τα ανισότροπα ορυκτά αναλύουν σε δύο συνιστώσες το πολωμένο φως, με κάθετα επίπεδα ταλάντωσης. Το αποτέλεσμα στρέφοντας την τράπεζα του μικροσκοπίου είναι το ορυκτό να εμφανίζεται σκοτεινό σε τέσσερις θέσεις ανά διαστήματα των 90°, όταν τα επίπεδα ταλάντωσης των δύο συνιστωσών στο ορυκτό είναι παράλληλα με αυτά του πολωτή και του αναλυτή, στις δε ενδιάμεσες θέσεις να παρουσιάζουν διαφορετικά χρώματα πόλωσης.

#### 5.2. ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια μαρμάρων Διονύσου Πεντέλης και Carrara Ιταλίας, που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία, αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από κρυστάλλους ασβεστίτη (CaCO<sub>3</sub>). Ο ασβεστίτης κρυσταλλούται στο τριγωνικό σύστημα και το χρώμα του είναι συνήθως λευκό, άχρωμο.

Στη συνέχεια της έρευνας για την επίδραση των εναλλαγών θερμοκρασίας στα υπό εξέταση μάρμαρα, παρασκευάστηκαν λεπτές τομές πριν και μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης. Οι λεπτές αυτές τομές μελετήθηκαν στο πολωτικό μικροσκόπιο και συγκρίθηκαν μεταξύ τους.

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 φαίνονται οι φωτογραφίες των λεπτών τομών των μαρμάρων Διονύσου, πριν και μετά την δοκιμή, σε γραμμικά πολωμένο φως. Αντίστοιχα, στα σχήματα 5.3 και 5.4 φαίνονται οι φωτογραφίες για τα μάρμαρα Carrara.

Από την παρατήρηση των λεπτών τομών στο πολωτικό μικροσκόπιο γίνεται αμέσως εμφανής η σχιστότητα και η ταινιωτή διδυμία των ασβεστιτικών κρυστάλλων. Στο μάρμαρο Διονύσου εμφανίζονται αρκετοί κρύσταλλοι χαλαζία και κάποια φυλλώδη ορυκτά, σε αντίθεση με το μάρμαρο της Carrara.

Επίσης, το μάρμαρο Διονύσου φαίνεται περισσότερο αδροκρυσταλλικό, χωρίς κανονική κοκκομετρική διαβάθμιση. Αντίθετα, το μάρμαρο της Carrara παρουσιάζει μία ομοιογένεια όσον αφορά την τάξη μεγέθους των κρυστάλλων.



Σχήμα 5.1. Μάρμαρο Διονύσου πριν την έναρζη των κύκλων.



Σχήμα 5.2. Μάρμαρο Διονύσου μετά την ολοκλήρωση των κύκλων.



<u>Σχήμα 5.3. Μάρμαρο Carrara πριν την έναρζη των κύκλων.</u>



Σχήμα 5.4. Μάρμαρο Carrara μετά την ολοκλήρωση των κύκλων.

Πάνω στις ψηφιακές φωτογραφίες των λεπτών τομών, με τη χρήση του προγράμματος Image - Pro Plus, μετρήθηκαν τα μεγέθη των κρυστάλλων. Συνολικά, μετρήθηκαν 60 κρύσταλλοι για κάθε μάρμαρο. Με τις μετρήσεις αυτές κατασκευάστηκαν ιστογράμματα για την κατανομή του μεγέθους.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων για το μάρμαρο Διονύσου, όπως αυτή μετρήθηκε στο πολωτικό μικροσκόπιο, φαίνεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5. Κατανομή μεγέθους κόκκων μαρμάρου Διονύσου.

Η μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων είναι 319 μm.

Αντίστοιχα, η κατανομή του μεγέθους των κόκκων για το μάρμαρο της Carrara φαίνεται στο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6. Κατανομή μεγέθους κόκκων μαρμάρου Carrara.

Η μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων είναι 259 μm.

Το μάρμαρο Διονύσου, όπως φαίνεται και από τα παραπάνω ιστογράμματα είναι πιο αδρόκοκκο από της Carrara.

Από την μελέτη των λεπτών τομών στο πολωτικό μικροσκόπιο παρατηρήθηκε μία μείωση της συνοχής στα όρια κάποιων κόκκων των μαρμάρων, μετά την δοκιμή κύκλων ψύξης – θέρμανσης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι εσωτερικά στα μάρμαρα υπάρχει κάποια φθορά.

Συγκεκριμένα, αρχικά ο ιστός φαίνεται πιο πυκνός και συνεκτικός και αρκετά από τα όρια των κρυστάλλων δεν είναι ορατά. Μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής κύκλων ψύξης – θέρμανσης όλα τα όρια των κρυστάλλων γίνονται πιο εμφανή. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται να είναι πιο έντονο στο μάρμαρο Διονύσου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Συνεχίζοντας την μελέτη της επίδρασης των εναλλαγών ψύξης – θέρμανσης στα δοκίμια μαρμάρων Διονύσου Πεντέλης και Carrara Ιταλίας, πραγματοποιούνται σε αυτά δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης.

Συγκεκριμένα, μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής των κύκλων ψύξης – θέρμανσης, τα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη έως την θραύση, στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προσδιορίζονται οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη σ<sub>C</sub> και τα μέτρα ελαστικότητας Ε των μαρμάρων. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες σ<sub>C</sub> και Ε των δοκιμίων πριν τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Είναι γνωστό ότι το μέτρο ελαστικότητας Ε εκφράζει την αντίσταση στην παραμόρφωση του πετρώματος, καθώς μετράει την τάση που απαιτείται να εφαρμοστεί σε ένα ελαστικό υλικό για μία συγκεκριμένη παραμόρφωση. Δίνει μία πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πετρώματος σε διάβρωση και επομένως εκτιμά την μείωση της αντοχής του πετρώματος, πριν την φυσική εμφάνιση της διάβρωσης (π.χ. μικρορωγμές).

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται αναλυτικά η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και τα αποτελέσματα.

#### 6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Στόχος της δοκιμής είναι η μέτρηση της αντοχής των πετρωμάτων σε ανεμπόδιστη θλίψη, η μελέτη της ελαστικότητας και της φθοράς των δοκιμίων δεδομένης γεωμετρίας.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής επηρεάζονται από τις ακόλουθες παραμέτρους (Εξαδάκτυλος, 2000):

- την μη-γραμμικότητα, ύπαρξη μικρορωγμών και πλαστικότητα του πετρώματος,
- την ανισοτροπία του πετρώματος,
- τη λίπανση των πλακών εδράσεως.
- το μέγεθος του δοκιμίου,
- τις διαστάσεις του δοκιμίου (λόγος ύψους προς διάμετρο),
- το ρυθμό φόρτισης.

Οι προδιαγραφές της δοκιμής σύμφωνα με την ISRM (International Society of Rock Mechanics) είναι:

- Οι έδρες των κυλινδρικών δοκιμίων είναι επίπεδες με ανοχή 0,02 mm και δεν αποκλίνουν από την "καθετότητα" ως προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0,001 rad (περίπου 3,5 min) ή 0,05 mm σε μήκος 50 mm.
- Η παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου (κατά γενέτειρα) πρέπει να είναι λεία και ευθύγραμμη με ανοχή ±0,3 mm.
- Η διάμετρος των κυλινδρικών δοκιμίων μετράται με ακρίβεια 0,1 mm.

Τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν από άκαμπτη πρέσα τύπου MTS-815, μέγιστης δύναμης ±1600 kN και μέγιστης μετατόπισης ±50 mm, στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1. Συσκευή δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης.

Σε κάθε δοκιμή μετρώνται η αξονική δύναμη F και η αξονική τροπή (ε<sub>a</sub>), ανάλογα με την επιθυμητή συχνότητα μετρήσεων (αριθμός σημείων ανά δευτερόλεπτο). Τα δεδομένα καταγράφονται σε ψηφιακή μορφή και αφού υπολογιστεί η τάση, δίνονται σε ένα αρχείο Excel, όπου στη συνέχεια επεξεργάζονται κατάλληλα.

Για κάθε δοκίμιο υπολογίζονται:

- Η πλήρης καμπύλη αξονικής τάσης αξονικής τροπής.
- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{C}$ .
- Το μέτρο παραμορφωσιμότητας Ε.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

• Αξονική τάση: (MPa)

$$\sigma_{\alpha} = \frac{F}{\pi D^2/4}$$
 ,  $\sigma_z = -\sigma_{\alpha}$ 

• Παράπλευρη τάση:

 $\sigma_c=0 \quad , \quad \sigma_r=\sigma_\theta=\textbf{-}\sigma_c$ 

• Αξονική τροπή: ε<sub>α</sub>

 $\epsilon_{\alpha}$  = -  $\Delta \epsilon_z$  = -  $\Delta H/H_0$  ,  $\Delta H$  =  $H-H_0<0$ 

### 6.2 ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έγιναν σε ένα άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου και στα τέσσερα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην δοκιμή κύκλων ψύξης – θέρμανσης.

Οι διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στον πίνακα 6.1.

	Δ	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4
$H_0 (mm)$	113,65	89,93	95,02	96,75	99,95
D <sub>0</sub> (mm)	48,45	49,17	49,35	48,95	50,13

Πίνακας 6.1. Διαστάσεις δοκιμίων μαρμάρου Διονύσου.

Όπου:

Δ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου,

Δ1 έως Δ4: τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Στα σχήματα από 6.2 έως και 6.6 φαίνονται τα διαγράμματα αξονικής τάσης σ<sub>a</sub> - αξονικής τροπής ε<sub>a</sub> των δοκιμίων. Συγκεντρωτικά, τα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται στο σχήμα 6.7.



<u>Σχήμα 6.2. Καμπύλη σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub>. Αρχικό δοκίμιο Δ.</u>









<u>Σχήμα 6.5. Καμπύλη σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub>. Δοκίμιο Δ3.</u>



<u>Σχήμα 6.7. Καμπύλες σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub> δοκιμίων Διονύσου.</u>

Οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων φαίνονται στον πίνακα 6.1 και συγκρίνονται στο σχήμα 6.8.

Πίνακας 6.1. Αντοχές σε μονοαζονική θλίψη. Μάρμαρα Διονύσου.

	Δ	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4
σ <sub>C</sub> (MPa)	102.03	78.85	54.06	67.65	73.14

Όπου:

Δ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου,

Δ1 έως Δ4: τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.



Σχήμα 6.8. Αντοχές θλίψης μαρμάρων Διονύσου.

Στη συνέχεια της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, προσδιορίζονται τα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας Ε των δοκιμίων. Ο υπολογισμός γίνεται στα διαγράμματα αξονικών

τάσεων – αξονικών τροπών που αντιστοιχούν στο τμήμα της δοκιμής έως την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ<sub>C</sub> (μέγιστη αξονική τάση).

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Ε υπολογίζεται από την κλίση της γραμμής γραμμικής παλινδρόμησης που προσαρμόζεται στα σημεία δεδομένων (τιμές τάσεων – τροπών), στο μέσον περίπου της αντοχής θλίψης των διαγραμμάτων αξονικής τάσης σ<sub>a</sub> - αξονικής τροπής ε<sub>a</sub> των δοκιμίων (εντολή slope στο Excel).

Η κλίση είναι η κατακόρυφη απόσταση διαιρούμενη με την οριζόντια απόσταση, μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων της γραμμής, που αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μεταβολής κατά μήκος της γραμμής παλινδρόμησης.

Η εξίσωση της κλίσης της γραμμής παλινδρόμησης είναι:

$$b = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^{2} - (\sum x)^{2}}$$

όπου:

x: η αξονική τροπή ε<sub>a</sub>,

y: η αξονική τάση  $σ_a$ ,

n: το πλήθος των σημείων.

Από την εφαρμογή της εντολής slope στα πειραματικά δεδομένα του Excel των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, προκύπτουν οι τιμές για τα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας Ε που φαίνονται στον πίνακα 6.2.

	Δ	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4
E (GPa)	39,14	19,22	10,46	13,59	19,35

Πίνακας 6.2. Μέτρα ελαστικότητας μαρμάρων Διονύσου.

Όπου:

Δ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου,

Δ1 έως Δ4: τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας, πριν και μετά την δοκιμή κύκλων ψύξης – θέρμανσης, συγκρίνονται στο σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9. Μέτρα ελαστικότητας μαρμάρων Διονύσου.

Στη συνέχεια, για κάθε δοκίμιο μαρμάρου υπολογίζεται ο συντελεστής φθοράς. Ο συντελεστής φθοράς D συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας Ε δίνεται από την σχέση:

$$D_E = 1 - \frac{E}{E_0}$$

Όπου:

Ε<sub>0</sub>: το αρχικό μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων,

Ε: το μέτρο ελαστικότητας μετά την πραγματοποίηση των κύκλων ψύξης –
 θέρμανσης.

Συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων, το D δίνεται από την σχέση:

$$D_{Vp} = 1 - \left(\frac{V_P}{V_{P0}}\right)^2$$

Όπου:

 $V_{P0}$ : η αρχική ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων,

 $V_P$ : η ταχύτητα διάδοσης μετά την πραγματοποίηση των κύκλων ψύξης – θέρμανσης.

Ο συντελεστής D εκφράζει την φθορά των δοκιμίων λόγω μικρορηγματώσεων. Οι τιμές των  $D_E$  και  $D_{Vp}$ , για κάθε δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου, φαίνονται στον πίνακα 6.6.

	APXIKA	ΤΕΛΙΚΕΣ τιμές		ΔΕΙΚΤΕΣ ΦΘΟΡΑΣ	
	Vp	E V <sub>P</sub>		D <sub>E</sub>	Dvn
	m/sec	GPa	m/sec	- L	- •p
Δ1	5109,8	19,22	3997	0,509	0,388
Δ2	4185,8	10,46	3035,7	0,733	0,474
Δ3	3225	13,59	3203,6	0,653	0,013
Δ4	4828,5	19,35	4308,2	0,506	0,204

Πίνακας 6.6. Συντελεστές φθοράς D μαρμάρων Διονύσου.

### 6.3 MAPMAPO CARRARA

Αντίστοιχα, όπως και τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου, τα δοκίμια μαρμάρου Carrara υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη. Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έγιναν σε ένα άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου και στα τέσσερα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην δοκιμή κύκλων ψύξης – θέρμανσης.

Οι διαστάσεις των δοκιμίων Carrara φαίνονται στον πίνακα 6.3.

	K	K1	K2	K3	K4
$H_0 (mm)$	116	91,15	94,75	96,57	95,68
<b>D</b> <sub>0</sub> (mm)	66,40	48,82	49,03	46,60	47,70

Πίνακας 6.3. Διαστάσεις δοκιμίων μαρμάρου Carrara.

Όπου:

Κ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Carrara,

K1 έως K4: τα δοκίμια μαρμάρου Carrara μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Στα σχήματα από 6.10 έως και 6.14 φαίνονται τα διαγράμματα αξονικής τάσης σ<sub>a</sub> - αξονικής τροπής ε<sub>a</sub> των δοκιμίων. Συγκεντρωτικά, τα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται στο σχήμα 6.15.



<u>Σχήμα 6.10. Καμπύλη σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub>. Αρχικό δοκίμιο Κ.</u>



<u>Σχήμα 6.11. Καμπύλη σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub>. Δοκίμιο Κ1.</u>



<u>Σχήμα 6.12. Καμπύλη σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub>. Δοκίμιο Κ2.</u>



<u>Σχήμα 6.13. Καμπύλη σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub>. Δοκίμιο K3.</u>



<u>Σχήμα 6.15. Καμπύλες σ<sub>a</sub> - ε<sub>a</sub> δοκιμίων Carrara.</u>

Οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων φαίνονται στον πίνακα 6.4 και συγκρίνονται στο σχήμα 6.16.

Πίνακας 6.4. Αντοχές σε μονοαζονική θλίψη. Μάρμαρα Carrara.

	K	K1	K2	K3	K4
σ <sub>C</sub> (MPa)	87,03	78,12	77,43	69,72	68,22

Όπου:

Κ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Carrara,

K1 έως K4: τα δοκίμια μαρμάρου Carrara μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.



Σχήμα 6.16. Αντοχές θλίψης μαρμάρων Carrara.

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας Ε των δοκιμίων. Από την εφαρμογή της εντολής slope στα πειραματικά δεδομένα του Excel των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, προκύπτουν οι τιμές για τα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας Ε που φαίνονται στον πίνακα 6.5.

<u>Πίνακας 6.5. Μέτρα ελαστικότητας μαρμάρων Carrara.</u>

	K	K1	K2	K3	K4
E (GPa)	22,57	18,25	18,54	15,90	18,24

Όπου:

Κ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Carrara,

K1 έως K4: τα δοκίμια μαρμάρου Carrara μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας, πριν και μετά την δοκιμή κύκλων ψύξης – θέρμανσης, συγκρίνονται στο σχήμα 6.17.



Σχήμα 6.17. Μέτρα ελαστικότητας μαρμάρων Carrara.

Οι συντελεστές φθοράς για τα μάρμαρα Carrara φαίνονται στον πίνακα 6.7.

	APXIKA	ΤΕΛΙΚΕΣ		ΔΕΙΚΤΕΣ	
		TIN	ΛΕΣ	$\Phi\Theta OPA\Sigma$	
	VP	Е	VP	$D_{\rm E}$	$D_{Vp}$
	m/sec	GPa	m/sec		
K1	3519,3	18,25	2921,5	0,191	0,311
K2	3658,3	18,54	2845,3	0,179	0,395
K3	3085,2	15,9	3085,2	0,296	0,000
K4	3543,8	18,24	3393	0,192	0,083

Πίνακας 6.7. Συντελεστές φθοράς D μαρμάρων Carrara.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την μελέτη των λεπτών τομών των μαρμάρων στο πολωτικό μικροσκόπιο, παρατηρήθηκε μία μείωση της συνοχής γύρω από τα όρια κάποιων κόκκων των μαρμάρων, μετά την πραγματοποίηση των κύκλων ψύξης – θέρμανσης. Η μείωση αυτή της συνοχής γύρω από τα όρια των κόκκων είναι ένδειξη ενός αρχικού σταδίου διάβρωσης των μαρμάρων και φαίνεται να είναι πιο έντονη για το μάρμαρο του Διονύσου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το μάρμαρο αυτό είναι πιο ανομοιογενές από το μάρμαρο της Carrara.

Η μείωση της ταχύτητας του διαμήκους κύματος P, κατά την διάδοση <u>υπερήχων</u> στα δοκίμια, αποτελεί και αυτή μία ένδειξη για ύπαρξη φθοράς σε αυτά. Όμως, επειδή οι υπέρηχοι διαδίδονται μόνο κατά μία διεύθυνση, επηρεάζονται άμεσα από την ανισοτροπία του πετρώματος.

Είναι γνωστό ότι το μάρμαρο Διονύσου είναι ένα ανισότροπο υλικό, με επίπεδα σχιστότητας λόγω των φυλλοπυριτικών ορυκτών που περιέχει. Ο προσανατολισμός των ρωγμών επηρεάζει την μέτρηση των υπερήχων και επομένως και τον δείκτη φθοράς D<sub>Vp</sub>. Επομένως, όταν οι υπέρηχοι διαδίδονται παράλληλα στα επίπεδα σχιστότητας του μαρμάρου δεν εντοπίζουν την φθορά.

Αντίθετα, το μάρμαρο της Carrara είναι πιο ομοιογενές, ισότροπο υλικό, χωρίς επίπεδα σχιστότητας. Όμως, από την σύγκριση των δεικτών φθοράς  $D_E$  και  $D_{Vp}$  (πίνακας 7.1) φαίνεται ότι ο δείκτης φθοράς  $D_{Vp}$ , όταν οι υπέρηχοι διαδίδονται προς μία κατεύθυνση, δεν δίνει ούτε για το μάρμαρο της Carrara αξιόπιστα αποτελέσματα.

<u>Πίνακας 7</u>	′.1. Δείκ	τες φθο	ράς D	μαρ	<u>μάρων.</u>

	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	K1	K2	K3	K4
D <sub>E</sub>	0,509	0,733	0,653	0,506	0,191	0,179	0,296	0,192
$D_{Vp}$	0,388	0,474	0,013	0,204	0,311	0,395	0,000	0,083

Όπου:

Δ1 έως Δ4: τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου.

K1 έως K4: τα δοκίμια μαρμάρου Carrara.

Επομένως, η διάδοση των υπερήχων προς μία κατεύθυνση δεν είναι αξιόπιστη μέθοδος εύρεσης της φθοράς. Για να μπορεί η μέθοδος των υπερήχων να δώσει ακριβή αποτελέσματα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κυβικά δοκίμια και οι υπέρηχοι να γίνουν και προς τις τρεις κατευθύνσεις.

Τα αποτελέσματα της <u>δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης</u> επηρεάζονται και αυτά από την ανισοτροπία του πετρώματος. Η αντοχή των μαρμάρων του Διονύσου επηρεάζεται από τον προσανατολισμό των επιπέδων σχιστότητας σε σχέση με την κατεύθυνση του επιβαλλόμενου θλιπτικού φορτίου. Αυτό ερμηνεύει τις διαφορετικές αντοχές σε μονοαξονική θλίψη που εμφανίζουν τα δοκίμια του Διονύσου, μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης, καθώς και τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας Ε (πίνακας 7.2).

	Δ	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4
σ <sub>C</sub> (MPa)	102.03	78.85	54.06	67.65	73.14
E (GPa)	39,14	19,22	10,46	13,59	19,35

Πίνακας 7.2. Αντοχές θλίψης και μέτρα ελαστικότητας μαρμάρων Διονύσου.

Όπου:

Δ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου,

Δ1 έως Δ4: τα δοκίμια μαρμάρου Διονύσου μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Αντίθετα, τα δοκίμια του μαρμάρου της Carrara, μετά την πραγματοποίηση των κύκλων ψύξης – θέρμανσης, παρουσιάζουν παρόμοιες αντοχές σε μονοαξονική θλίψη αλλά και μέτρα ελαστικότητας Ε (πίνακας 7.3).

	K	K1	K2	K3	K4
σ <sub>C</sub> (MPa)	87,03	78,12	77,43	69,72	68,22
E (GPa)	22,57	18,25	18,54	15,90	18,24

Πίνακας 7.3. Αντοχές θλίψης και μέτρα ελαστικότητας μαρμάρων Carrara.

Όπου:

Κ: το άρρηκτο δοκίμιο μαρμάρου Carrara,

K1 έως K4: τα δοκίμια μαρμάρου Carrara μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες, οι τιμές των σ<sub>C</sub> και Ε των δοκιμίων μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης είναι σαφώς μικρότερες από τις αρχικές, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη φθοράς στα μάρμαρα.

Η αρχική συμπεριφορά του μαρμάρου Διονύσου (πριν την δοκιμή ψύξης – θέρμανσης) φαίνεται να είναι καλύτερη από εκείνη του μαρμάρου της Carrara. Αυτό φαίνεται και από την σύγκριση των αρχικών αντοχών των μαρμάρων σε μονοαξονική θλίψη (πίνακες 7.2 και 7.3) και μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη χαλαζία στη σύσταση του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χαλαζίας, ακόμα και σε μικρές ποσότητες και με μικρό μέγεθος κόκκων, αυξάνει την αντοχή του μαρμάρου.

Όμως, μετά την δοκιμή ψύξης – θέρμανσης, το μάρμαρο της Carrara φαίνεται να συμπεριφέρεται καλύτερα, πιθανόν λόγω και της ομοιόμορφης κοκκομετρίας του. Αυτό φαίνεται από την σύγκριση των  $\sigma_{\rm C}$  και Ε των δοκιμίων (πίνακες 7.2 και 7.3), αλλά και των δεικτών φθοράς  $D_{\rm E}$  (πίνακας 7.1). Γενικά, το μάρμαρο του Διονύσου φαίνεται να έχει υποστεί μεγαλύτερη φθορά μετά τους κύκλους ψύξης – θέρμανσης απ' ότι της Carrara. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στην ύπαρξη επιπέδων σχιστότητας στο μάρμαρο, αλλά και στο γεγονός ότι υπάρχει μία ανομοιογένεια στην κοκκομετρία του, όπως παρατηρήθηκε στο πολωτικό μικροσκόπιο.

Τέλος, για να μπορούν τα αποτελέσματα της τεχνητής γήρανσης να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τα υλικά και την αντίσταση τους σε διάβρωση, πρέπει να συσχετιστούν με τη φυσική γήρανση των υλικών. Για τη συσχέτιση αυτή θα πρέπει να υπάρχουν ισοθερμικοί χάρτες από την Μετεωρολογική Υπηρεσία, έτσι ώστε να είναι γνωστή η δριμύτητα της διαδικασίας των κύκλων ψύξης – θέρμανσης, σε κάθε περιοχή που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κάποια υλικά.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allison, R. J. (1988). "A Non Destructive Method for Determining Rock Strength". *Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 13, pp. 729-736.*
- Ashurst, J. and N. Ashurst (1998). "Practical Building Conservation, Volume 1: Stone Masonry". Gower Technical Press.
- Ashurst, J. and F. G. Dimes (1996). "Conservation of Building & Decorative Stone". Reed.
- ASTM Designation: D 5312 92 (Reapproved 1997). "Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions".
- 5. Auberg, R. and M. J. Setzer (1997). "Influence of Water Uptake During Freezing and Thawing". *Frost Resistance of Concrete, pp. 232-245.*
- 6. Βαμβακόπουλος, Β. (1983). "Προστασία και Συντήρηση της Πέτρας". Αθήνα.
- Bortz, S., J. Stecich, B. Wonneberger and I. Chin (1993). "Accelerated Weathering in Building Stone". J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No 7, pp. 1559-1562.
- 8. Bortz, S. A. and B. Wonneberger. "Laboratory Evaluation of Building Stone Weathering". *Degradation of Natural Building stone, pp. 85-105.*
- Cantacuzino, S. and S. Brandt (1980). "Saving Old Buildings". The Architectural Press, London.
- 10. Croci, G. (1998). "*The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*". Computational Mechanics Publications.
- 11. Δάβη, Ε. (1991). "Πετρολογία". Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Εξαδάκτυλος, Γ. (2000). "Ειδικά Κεφάλαια Τεχνικής Μηχανικής και Γεωμηχανικής". Σημειώσεις από το μάθημα: "Ειδικά Κεφάλαια Γεωμηχανικής", Χανιά.

- 13. Κωστάκης, Γ. (1999). "Οπτική Κρυσταλλογραφία". Σημειώσεις από το μάθημα:
  "Ορυκτολογία", Χανιά.
- Feilden, B. M. (1994). "Conservation of Historic Buildings". Reed Publishing Ltd.
- Feller, R. L. (1994). "Accelerated Ageing: Photochemical & Thermal Aspects". The Getty Conservation Institute.
- Goudie, A. S. (1999). "A Comparison of the Relative Resistance of Limestones to Frost and Salt Weathering". *Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 10, pp.* 309-316.
- Hall, K. and A. Hall (1991). "Thermal Gradients and Rock Weathering at Low Temperatures: Some Simulation Data". *Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 2, pp.103-112.*
- 18. Λαμπρόπουλος, Β. (1993). "Διάβρωση και Συντήρηση Πέτρας ". Αθήνα.
- Matsuoka Norikazu (2001). "Microgelivation versus Macrogelivation: Towards Bridging the Gap between Laboratory and Field Frost Weathering". *Permafrost* and Periglacial Processes, Vol. 12, pp. 299-313.
- Mc Greevy, J. P. (1985). "Thermal Properties as Controls on Rock Surface Temperature Maxima and Possible Implications for Rock Weathering". *Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 10, pp. 125-136.*
- Moropoulou, A., P. Theoulakis and T. Chrysophakis (1995). "Correlation between Stone Weathering and Environmental Factors in Marine Atmosphere". *Atmospheric Environment, Vol. 29, No 8, pp. 895-903.*
- Μοροπούλου, Α. (1991). "Ανάλυση και Εκτίμηση των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στις Ιδιότητες της Πέτρας - Διεπιστημονική Προσέγγιση". 1ο Σεμινάριο Κύκλου Συνεχιζόμενης Εκπαίδευσης Ε.Μ.Π.,24-30 Νοεμβρίου, Αθήνα.
- Mostafavi, M. and D. Leatherbarrow (1993). "On Weathering: the Life of Buildings in Time". The MIT Press.
- 24. Μπατής, Γ. και Α. Μοροπούλου (1986). "Οι τεχνικές και μέθοδοι ανάλυσης της φθοράς των υλικών στο εργαστήριο". Πρακτικά του Διεθνούς Συμποσίου στις

Αναστηλώσεις Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Μνημείων, 11-13 Δεκεμβρίου, Θεσσαλονίκη.

- 25. Μπούρας, Χ. και Κ. Ζαμπάς (2001). "Τα έργα της Επιτροπής Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως στην Αθηναϊκή Ακρόπολη". Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων, Αθήνα.
- 26. Operating instruction for climatic chamber, model GTS 600, serial number 7359.
- 27. Operating manual, PUNDIT6, Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester, CNS Farnell.
- 28. Ρήγας, Κ. Ι. (1988). "Γεωλογική έρευνα των Ελληνικών Μαρμάρων και οι Δυνατότητες Αξιοποίησης τους". Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα.
- Σαπουντζή, Ηλία (1985). "Στοιχεία Ορυκτολογίας". University Dtudio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σαπουντζή, Η. και Γ. Χριστοφίδη (1985). "Ορυκτοδιαγνωστική". University Dtudio Press, Θεσσαλονίκη.
- Siegemund, S., K. Ullemeyer and T. Weiss (2000). "Physical Weathering of Marbles Caused by Anisotropy Expansion". *International J. Earth Science, Vol.* 89, pp. 170-182.
- Σκουλικίδης, Θ. Ν. (2000). "Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών των Μνημείων". Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.
- 33. Σκουλικίδης, Θ. (2002). "Μέθοδοι Συντήρησης του Πεντελικού Μαρμάρου".
  Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα.
- Smith, M. R. (1999). "Stone: Building Stone, Rock fill and Armourstone in Construction". Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 16, London.
- 35. "The Greek Marble Index".(1991). Print All Ε.Π.Ε., Αθήνα.
- 36. Τσιραμπίδης, Α. (2000). "Πετρογραφικά Χαρακτηριστικά, Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση και Τύποι Ελληνικών Μαρμάρων". Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου "Το Ελληνικό Μάρμαρο", σ. 63-78, Θεσσαλονίκη.
- Τσουτρέλης, Χ. (1985). "Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων". Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

- Williams, R. B. G. and D. A. Robinson (1991). "Frost Weathering of Rocks in the Presence of Salts – A Review". *Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 2, pp.* 347-353.
- Winkler, E. M. (1979). "Effect of Case Hardening in Stone". Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Congress on the Deterioration and Preservation of Stone. October 24 27, Venezia, pp. 55-63.