



**Πολυτεχνείο Κρήτης
Technical University of Crete
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**

Ορυκτολογικός-Πετρογραφικός Χαρακτηρισμός και
Προσδιορισμός Φυσικομηχανικών Ιδιοτήτων Δειγμάτων
Μαρμάρου από Ενεργό Λατομείο στην ΠΕ Δράμας.



Διπλωματική Εργασία

Αγγελάτος-Ραντόπουλος Γεράσιμος

AM:2015020051

Εξεταστική Επιτροπή:

Γεώργιος Ξηρουδάκης, Επικ. Καθηγητής (επιβλέπων),
Πλάτωνας Γκαμαλέτσος, Επικ. Καθηγητής
Γεώργιος Τριανταφύλλου, ΕΔΙΠ

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ξεκινήσω την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής ευχαριστώντας όλους εκείνους που συνέβαλαν στην διεκπεραίωσή της. Αυτή η προσπάθεια δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη και καθοδήγηση αυτών και είναι χαρά μου να εκφράσω την εκτίμηση και τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Ξηρουδάκη Γεώργιο ως επιβλέπων για την καθοδήγηση που μου πρόσφερε και τον χρόνο που αφιέρωσε σε εμένα. Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Επίκουρο Καθηγητή Γκαμαλέτσο Πλάτωνα και τον κ. Τριανταφύλλου Γεώργιο μέλος ΕΔΙΠ τόσο για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν όσο και για την ηθική υποστήριξη όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Επιπλέον, όπως είναι φυσικό είμαι ευγνώμον στην εταιρία ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΛΕΥΚΑ ΜΑΡΜΑΡΑ για την συνεισφορά τους σε πρώτη ύλη διότι χωρίς αυτή δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο για την πολύτιμη βοήθεια του στο εργαστήριο μηχανικής πετρωμάτων. Η συνεισφορά του ήταν καθοριστική καθώς ήταν πρόθυμος να μοιραστεί την εργαστηριακή εμπειρία του και να με βοηθήσει στην σωστή διεξαγωγή όλων των πειραμάτων. Ακόμα ένα ευχαριστώ στον συμφοιτητή και φίλο κ. Παπουτσή Γεώργιο για το καλό κλίμα της συνεργασίας μας.

Τέλος δεν μπορεί να λείπει το ευχαριστώ από την οικογένεια μου που με στήριζε όλα αυτά τα χρόνια αλλά και από όλους εκείνους που περισσότερο ή λιγότερο μου στάθηκαν και με συμβούλεψαν με τον τρόπο τους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη του δολομιτικού μαρμάρου από το ενεργό λατομείο της εταιρίας ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗ στην περιφερειακή ενότητα Δράμας. Σκοπός της εργασίας είναι μια πλήρη περιγραφή του μαρμάρου του λατομείου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται εκτενώς οι μηχανικές, χημικές, ορυκτολογικές και φυσικές του ιδιότητες. Τα στοιχεία που προκύπτουν είναι συγκεντρωμένα και εύχρηστα ως προς τις ανάγκες της εταιρίας.

Αρχικά, δημιουργήθηκαν δοκίμια (καρότα) για τις ανάγκες όλων των εργαστηριακών δοκιμών που διεκπεραιώθηκαν. Μετά την θραύση τους και κατάλληλη επεξεργασία, προσδιορίστηκαν μεταξύ άλλων, η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, έμμεσο εφέλκυσμό και κάμψη στα 112,04 MPa, 5,24 MPa και 4,88 MPa αντίστοιχα. Μέσω της τεχνικής της περίθλασης ακτινών X (XRD) προσδιορίστηκε η ορυκτολογική σύσταση του μαρμάρου. Επιπλέον, μελετήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες του όπως είναι η υδαταπορροφητικότητα (0,3% κ.β.) και η διαφορά τους από το απόλυτο λευκό με μέσο όρο τις 7,14 μονάδες.

Λέξεις Κλειδιά: Χαρακτηρισμός Μαρμάρου, λευκό μάρμαρο Δράμας, δοκιμές μηχανικής πετρωμάτων

Abstract

The present thesis focuses on the study of dolomitic marble from the active open pit of the company DERMITZAKI Bros. in the region of Drama in Greece. Its mechanical, mineralogical and physical properties are extensively investigated, and its chemical composition is measured. The final aim of the work is to conduct a complete description of the marble of the open pit. The resulting data will be gathered and easy to use for the needs of the company.

As can be seen from the cover photo, samples were created for the needs of each experiment. After breaking them and appropriate processing, the average strength in uniaxial compression, indirect tension and bending were measured at 112.0 MPa, 5.24 MPa και 4.88 MPa respectively, among others. By the technique of X-ray diffraction, the chemical composition and the crystal structure of the marble were calculated. Its water absorption capacity was also measured at 0.3% w/w and its difference from absolute white at the average of 7.14 units.

Keywords: Marble characterization, white marble of Drama, rock mechanics tests

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	x
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο και επιστημονικό υπόβαθρο.....	2
1.1.1 Μάρμαρο.....	2
1.1.2 Επιστήμη που το μελετά	2
1.1.3 Ελληνικά μάρμαρα.....	3
1.1.4 Χρήσεις του Μαρμάρου.....	5
1.1.5 Επίδραση στην οικονομία.....	5
1.2 Γεωλογικό υπόβαθρο	5
1.2.1 Γεωλογία Δράμας.....	5
1.2.2 Λατομικοί χώροι μαρμάρων	6
Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία.....	8
2.1 Μακροσκοπική εξέταση – Μέθοδοι	8
2.1.1 Χημική ανάλυση κύριων στοιχείων.....	8
2.1.2 Ορυκτολογική ανάλυση	9
2.1.3 Προσδιορισμός χρώματος.....	9
2.1.4 Φυσικές ιδιότητες	10
2.2 Μηχανικές ιδιότητες & θεωρητική προσέγγιση	10
2.2.1 Προετοιμασία δειγμάτων	10
2.2.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	11
2.2.3 Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.....	13

2.2.4	Αντοχή σε κάμψη.....	14
Κεφάλαιο 3:	Αποτελέσματα.....	16
3.1	Μακροσκοπική & μικροσκοπική εξέταση μικροσκοπίας	16
3.2	Προσδιορισμός χρωματικών παραμέτρων.....	19
3.3	Ορυκτολογική & Χημική Ανάλυση.....	20
3.4	Φυσικές ιδιότητες	22
3.4.1	Υδαταπορροφητικότητα σε ατμοσφαιρική πίεση.....	22
3.4.2	Φαινόμενη πυκνότητα και ανοικτό πορώδες.....	24
3.5	Μηχανικές ιδιότητες	27
3.5.1	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	27
3.5.2	Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.....	29
3.5.3	Αντοχή στην κάμψη τριών σημείων	30
3.6	Στατιστική μελέτη αποτελεσμάτων	31
Κεφάλαιο 4:	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	36
Βιβλιογραφία		37
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....		37
Ελληνική Βιβλιογραφία.....		38
Ηλεκτρονικές Πηγές		38

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραγωγής Ο.Π.Υ(Ορυκτών πρώτων υλών), δετίας	4
Σχήμα 1.2 Γεωτεκτονικές πλάκες της Ελλάδας. (Παγκόσμιο Ινστιτούτο ελληνικού πολιτισμού)	6
Σχήμα 1.3 Θέσεις λατομικών χώρων στην ΠΕ Δράμας. (Εικόνα από δορυφόρο)	7
Σχήμα 2.1. Αντιπροσωπευτικά δείγματα δοκιμίων υδατοαπορρόφησης για κάθε όγκο Δ1 Δ2 και Δ3 από αριστερά προς τα δεξιά.	10
Σχήμα 2.2 Αρχικά και τελικά ογκοτεμάχια προς δημιουργία δοκιμίων.	11
Σχήμα 2.3 Μέτρα Ελαστικότητας (Κούκης et al, 2002).	12
Σχήμα 2.4 Διαφορετικά είδη θραύσης δοκιμίου (Muhammad Fakir, June 2017)	12
Σχήμα 2.5 (α) Πυρηνολήπτης, (β) τροχός κοπής και (γ) τροχός λείανσης.....	13
Σχήμα 2.6 (α) Χαρακτηριστικά παραδείγματα θραύσης δοκιμίων έμμεσου εφελκυσμού. (Arindam Basu, 2013), (β) η πειραματική διάταξη.	14
Σχήμα 2.7 Η πειραματική διάταξη του πειράματος της κάμψεως τριών σημείων.	15
Σχήμα 3.1 Φωτογραφία απο την μακροσκοπική παρατήρηση δοκιμίων από το 1ο ογκοτεμάχιο που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη.....	16
Σχήμα 3.2. Φωτογραφίες αντιπροσωπευτικών δειγμάτων μετά από την παρατήρησή τους με στερεοσκόπιο.	17
Σχήμα 3.3. Μικροφωτογραφία στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Δράμας, όπου διακρίνεται ένας ισοκοκκώδης ιστός (Nicols J, μεγέθυνση x25).....	18
Σχήμα 3.4 Μικροφωτογραφίες στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Δράμας, όπου διακρίνεται μια λεπτόκοκκη δολομιτική κρυσταλλική μάζα, με τη μορφή και τον τρόπο σύνδεσης των κόκκων να διαμορφώνουν ένα ιστό “ψευδο-λατυποπαγούς” τύπου (Nicols J, μεγέθυνση x100).	19
Σχήμα 3.5 Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων – X (PXRD) των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» Δράμας. Συντομογραφίες ορυκτών κατά Whitney & Evans (2010): Dol: δολομίτης Cc: ασβεστίτης & Pl: πλαγιόκλαστο.....	21

Σχήμα 3.6 Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της υδαταπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση των δειγμάτων μαρμάρου από το Λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ», κατά EN 13755.....	23
Σχήμα 3.7 Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους των δειγμάτων μαρμάρου από το Λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ», κατά EN 1936.....	25
Σχήμα 3.8 Δοκίμιο πριν και μετά την αξονική του κατάτμηση.....	27
Σχήμα 3.9 Δοκίμιο πριν και μετά την διατμητική του αστοχία σε δύο επίπεδα	28
Σχήμα 3.10 Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης Δοκιμίου 1Δ2 11°	29
Σχήμα 3.11 Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης για το 2Δ4ο n3 στην δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.....	30
Σχήμα 3.12 Πρισματικά δοκίμια πριν την κάμψη	31
Σχήμα 3.13 Πρισματικά δοκίμια μετά την θραύση.....	31
Σχήμα 3.14. Ιστόγραμμα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής	34
Σχήμα 3.15 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας.....	35
Σχήμα 3.16. Ιστόγραμμα αντοχής έμμεσου εφελκυσμού.....	35

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3:1. Αποτελέσματα από την μελέτη προσδιορισμού των χρωματικών παραμέτρων δειγμάτων μαρμάρων, από το Λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ».	19
Πίνακας 3:2. Ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων μαρμάρων από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» στην περιοχή της Δράμας. Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε ορυκτής φάσης, στη σύσταση των προς εξέταση δειγμάτων.	21
Πίνακας 3:4. Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων (% κ.β.) των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» της περιοχής Δράμας, που εξετάστηκαν με τη μέθοδο φασματομετρίας ακτίνων – Χ φθορισμού (XRF).....	22
Πίνακας 3:4. Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδαταπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση, για το πρώτο ογκοτεμάχιο από το Λατομείο «Πύργων»	23
Πίνακας 3:5. Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδαταπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση, για το δεύτερο ογκοτεμάχιο από το Λατομείο «Πύργων».....	24

Πίνακας 3:6. Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδαταπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση, για το τρίτο ογκοτεμάχιο από το Λατομείο «Πύργων».....	24
Πίνακας 3:7. Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους, για το πρώτο ογκοτεμάχιο από το Λατομείο «Πύργων».	26
Πίνακας 3:8. Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους, για το δεύτερο ογκοτεμάχιο από το Λατομείο «Πύργων».	26
Πίνακας 3:9. Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους, για το τρίτο ογκοτεμάχιο από το Λατομείο «Πύργων».	27
Πίνακας 3:10. Τιμές στατιστικής επεξεργασίας μηχανικών ιδιοτήτων	34

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το μάρμαρο είναι πέτρωμα που έχει δημιουργηθεί από μεταμόρφωση ασβεστόλιθων (ιζηματογενών ανθρακικών πετρωμάτων). Αποτελείται κυρίως από τα ορυκτά ασβεστίτη και δολομίτη και δευτερευόντως από προσμίξεις αργιλικών ορυκτών, χαλαζία, μοσχοβίτη κ.α. Στο σήμερα, που η χρήση του προσανατολίζεται κυρίως στην επιστήμη της δομικής μηχανικής έναντι των τεχνασμάτων της γλυπτικής προγενέστερων χρόνων, κρίνεται αναγκαία η εκτενής ανάλυση των φυσικομηχανικών αντοχών που παρουσιάζει. Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως είναι η παρασκευή κονιόδους ανθρακικού ασβεστίου, προϊόν σημασίας σε πολλές βιομηχανίες, η παρασκευή χημικών προϊόντων, αδρανών υλικών, υάλου, ως προσθετικό στις ζωοτροφές και άλλες.

Αρχικά, η επιστήμη της μηχανικής των πετρωμάτων χρησιμοποιούσε κατά κύριο λόγο τις δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για τον έλεγχο των προϊόντων μαρμάρου. Πλέον όμως, καθώς απαιτείται πιο ενδελεχής και πολύπλευρος έλεγχος έχουν εισαχθεί στην διαδικασία προσδιορισμού των ιδιοτήτων του μαρμάρου και οι επιστήμες της ορυκτολογίας και της φυσικοχημείας. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων και η εσωτερική συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή, πως επηρεάζουν οι φυσικές του ιδιότητες μαζί με τις χημικές του ιδιότητες και τις ενώσεις τους την αντοχή του μαρμάρου στον χρόνο, τις καιρικές συνθήκες, τον περιβάλλοντα χώρο όπως και τον καθορισμό του χρώματος, της υφής και της σκληρότητας του υλικού.

Σε αυτή την διπλωματική θα γίνει πειραματική μελέτη μηχανικών αντοχών που χαρακτηρίζουν το μάρμαρο από το λατομείο της εταιρίας Δερμιτζάκη στην περιφέρεια Δράμας μέσω εργαστηριακών ελεγχόμενων δοκιμών. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν καταπόνηση σε θλίψη, εφελκυσμό και κάμψη. Πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων μετρήθηκαν επίσης πειραματικά η υδαταπορροφητικότητα, το ενεργό πορώδες, η ένταση του λευκού χρώματος και η ορυκτολογική σύσταση του μαρμάρου διαμορφώνοντας έναν ολόπλευρο χαρακτηρισμό του. Κάτι τέτοιο συντελεί στην δημιουργία μιας βιβλιοθήκης δεδομένων για τα χαρακτηριστικά και τις αντοχές που παρουσιάζουν διάφορα μάρμαρα κατηγοριοποιώντας τα γεωγραφικά.

1.1 Αντικείμενο και επιστημονικό υπόβαθρο

1.1.1 Μάρμαρο

Όπως προαναφέρθηκε, το μάρμαρο είναι ένα μεταμορφωμένο ιζηματογενές ανθρακικό πέτρωμα αποτελούμενο κυρίως από ασβεστίτη και δολομίτη σε διάφορες αναλογίες. Από την περιεκτικότητα του μαρμάρου σε ασβεστίτη ή δολομίτη αυτό χαρακτηρίζεται ως ασβεστιτικό ή δολομιτικό και μπορεί να παρουσιάσει διαφορές ως προς κάποιες ιδιότητές του. Η ετυμολογία της λέξης πηγάζει από τα αρχαία ελληνικά και το ρήμα μαρμαίρω, που σημαίνει «λάμπω» (Etymonline-Marble, 2024). Η ποιότητα και το χρώμα των μαρμάρων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη σύσταση των πετρωμάτων από τα οποία προήλθαν, τις προσμίξεις τους καθώς και από το βαθμό της μεταμόρφωσής τους, δηλαδή τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που υφίστανται μέχρι να πάρει την κρυσταλλική του μορφή (MatmAKE, 2024). Ο βαθμός μεταμόρφωσης επίσης, προσδιορίζει την κοκκομετρία του μαρμάρου, δηλαδή το μέγεθος των κόκκων των κρυστάλλων του. Διακρίνεται σε λεπτόκοκκα, μεσόκοκκα και χονδρόκοκκα. Εμπορικά, σαν μάρμαρο δεν χαρακτηρίζεται μόνο ο μεταμορφωμένος ασβεστόλιθος, αλλά και επιπλέον πετρώματα που μπορούν να λειανθούν και να στιλβωθούν όπως ο δολομίτης, ο σερπεντίνης και ο γρανίτης. Τυπικές τιμές για την σκληρότητα του μαρμάρου είναι 3-4 στην κλίμακα Mohs και το ειδικό του βάρος κυμαίνεται από 1,8 έως 2,85 kg/cm³. (MatmAKE, 2024)

1.1.2 Επιστήμη που το μελετά

Η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει την ολόπλευρη μελέτη του μαρμάρου. Οι επιστήμες που αξιοποιούνται κατά κύριο λόγο είναι η γεωλογία και η επιστήμη των υλικών. Οι κλάδοι της γεωλογίας που χρησιμοποιούνται είναι η ορυκτολογία και η πετρολογία ενώ περί της επιστήμης των υλικών πρωταγωνιστικό ρόλο παίζει η μηχανική των πετρωμάτων. Η ορυκτολογία και η πετρολογία βοηθούν στον προσδιορισμό της σύστασης του πετρώματος, στην προέλευση στις συνθήκες δημιουργίας του και την κατανομή των ορυκτών του. Η μηχανική των πετρωμάτων εξετάζει τις φυσικομηχανικές του ιδιότητες. Δηλαδή ιδιότητες όπως το πορώδες, την πυκνότητα, την σκληρότητα και την θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Επίσης, σημαντικό αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης επιστήμης είναι ο προσδιορισμός της αντοχής του υλικού σε διαφορετικές εντατικές καταστάσεις. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι δοκιμές: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Αντοχή σε

αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσος εφελκυσμός), Αντοχή σε κάμψη και Θραυστική στιβαρότητα.

1.1.3 Ελληνικά μάρμαρα

«Τα ελληνικά μάρμαρα είναι από τα πλέον γνωστά στον κόσμο» (Christos Karkalis et al, 2020). Πέρα από τα κοιτάσματα και τις ποικιλίες που υπάρχουν, ουσιαστικά έχουν ταυτιστεί με τα αρχαία αριστουργήματα της γλυπτικής και της αρχιτεκτονικής της αρχαίας Ελλάδας. Έτσι, η ζήτηση για ελληνικό μάρμαρο ανέκαθεν υπήρξε σημαντική και ο κλάδος έχει ένα έντονο εξαγωγικό προσανατολισμό, κατατάσσοντας την Ελλάδα ανάμεσα στους σημαντικότερους παραγωγούς και εξαγωγούς μαρμάρου σε παγκόσμιο επίπεδο. Γνήσια κρυσταλλικά ελληνικά μάρμαρα είναι τα λευκά μάρμαρα Πεντέλης και Διονύσου, τα λευκά – ημίλευκα μάρμαρα της περιοχής Δράμας - Καβάλας – Θάσου, τα μάρμαρα Τρανοβάλτου Κοζάνης, τα μάρμαρα Νάξου και τα ροζ μάρμαρα Λαύκου Πηλίου. Τα χαρακτηριστικά που έχουν αποδώσει στα ελληνικά μάρμαρα την φήμη τους είναι η καθαρότητά τους, η ποικιλία χρωμάτων και νερών που προσφέρουν καθώς και η ιστορική τους σημασία.

Τα αποθέματα των κοιτασμάτων μαρμάρου στην Ελλάδα είναι τεράστια, πολλοί μάλιστα τα χαρακτηρίζουν πρακτικά ανεξάντλητα. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μαρμάρων σε διάφορους χρωματισμούς και τύπους, κυρίως όμως υπάρχουν λευκά μάρμαρα, ορισμένα από τα οποία είναι από τα καλύτερα μάρμαρα του κόσμου. Γι' αυτό και η Ελλάδα θεωρείται η χώρα με τη μεγαλύτερη ποικιλία σε λευκά και ανοιχτόχρωμα μάρμαρα. Εκτός από τα λευκά, υπάρχουν και πολλοί τύποι χρωματιστών, όπως μαύρα, γκρι, μπλε, κόκκινα και πράσινα με πολύ καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Τα τελευταία χρόνια η ετήσια εθνική παραγωγή μαρμάρων κυμαίνεται γύρω από τους 800.000 τόνους. Ενδεικτικά, φαίνεται η δραστηριότητα παραγωγής του μαρμάρου από το 2017 έως το 2022 στο Σχήμα 1.1 (*Μιράντα Λάμπου και άλλοι, 2024*) Οι εξαγωγές που γίνονται αφορούν κυρίως ογκομάρμαρα με συνολική αξία που υπερβαίνει τα 90.000.000 €. Η εκμετάλλευση των μαρμάρων γίνεται κατά κύριο λόγο με επιφανειακές εκμεταλλεύσεις (λατομεία μαρμάρων), στις οποίες γίνεται η απόσπαση (κοπή) των μαρμάρων με χρήση συρματόσχοινων ή ειδικού εξοπλισμού, δίνοντας τελικά τις πολύ χαρακτηριστικές εικόνες των ορθογωνισμένων όγκων στα λατομεία. Υπόγειες εκμεταλλεύσεις υπάρχουν σήμερα στην Ελλάδα με μεγαλύτερη αυτή στην περιοχή του Διονύσου Αττικής.



Σχήμα 1.1. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραγωγής Ο.Π.Υ(Ορυκτών πρώτων υλών), δετίας

Η ιστορία των ελληνικών μαρμάρων είναι μια πολύπλοκη παράθεση από γεγονότα και αναφορές που χρονολογούνται από την αρχαιότητα μέχρι τη σύγχρονη εποχή. Αυτή η ιστορία δείχνει την αξία και τη σημασία που είχε το μάρμαρο για τους αρχαίους Έλληνες και πώς αυτή η αξία συνεχίζεται και σήμερα. Συνοπτικά, και χρονολογικά, η ιστορία του ελληνικού μαρμάρου ξεκίνησε στον πολιτισμό της αρχαίας Ελλάδας, όπου χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ναών, αγαλμάτων, μνημείων και άλλων αρχιτεκτονικών δημιουργιών όπως ο Παρθενώνας στην Ακρόπολη και ο ναός τους Ποσειδώνα στο Σούνιο. Οι εξαγωγές των πετρωμάτων από το έδαφος γινόταν είτε εκμεταλλευόμενοι τις φυσικές ρωγμές, είτε με θερμικό σοκ είτε με σφυροκόπημα. Οι εκμεταλλεύσεις όπως είναι λογικό ήταν επιφανειακές. Συνέχισε στην ρωμαϊκή περίοδο προσφέροντας την ποιότητά του στα μνημεία και τα αγάλματα της εποχής όπως και διακοσμώντας εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κτηρίων. Κατά τη Βυζαντινή περίοδο, η χρήση των ελληνικών μαρμάρων συνεχίστηκε, αν και με περιορισμένη έκταση. Χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή βασιλικών εκκλησιών, μοναστηριών και άλλων θρησκευτικών κτιρίων. Η μείωση της χρήσης του μεγιστοποιήθηκε κατά την οθωμανική περίοδο. Σήμερα, η αξία των ελληνικών μαρμάρων συνεχίζει να είναι υψηλή. Τα μάρμαρα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για την αναστήλωση και την ανακατασκευή αρχαίων μνημείων και γλυπτών, καθώς και για τη δημιουργία νέων έργων τέχνης και αρχιτεκτονικής. Διάσημοι γλύπτες και αρχιτέκτονες παγκοσμίως συνεχίζουν να επιλέγουν το μάρμαρο για την ανώτερη ποιότητά του και την αντοχή του στο χρόνο. Πλέον η εκμετάλλευση εκτός από επιφανειακή μπορεί να είναι και

υπόγεια και η εξόρυξη γίνεται με τη χρήση μηχανημάτων, όπως αλυσοπρίονα για συρματοκοπές και γερανοί, προστατεύοντας παράλληλα το φυσικό περιβάλλον.

1.1.4 Χρήσεις του Μαρμάρου

Κατά κύριο λόγο το μάρμαρο χρησιμοποιείται στην διακοσμητική. Τα υγιή ογκομάρμαρα είναι που προσφέρουν τα μεγαλύτερα κέρδη αλλά δεν είναι η μοναδική πηγή αυτών. Σε εκμεταλλεύσεις με έντονες ασυνέχειες και σε σημεία που είναι ιδιαίτερα απαιτητική η εξόρυξη συμπαγών όγκων, το προϊόν θραύεται και χρησιμοποιείται σαν αδρανές υλικό σε πολλούς τύπους κατασκευών. Η εξέλιξη της τεχνολογίας χαρίζει στην βιομηχανία του μαρμάρου δύο σημαντικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, μέσω καινοτόμων τεχνικών καθίσταται η εξόρυξή του ολοένα οικονομικότερη και αποδοτικότερη και δεύτερον, χάρη στον εξελιγμένο μηχανολογικό εξοπλισμό δύναται να δημιουργηθούν προϊόντα και υποπροϊόντα χρήσιμα σε ένα μεγάλο φάσμα βιομηχανιών. Ένα τέτοιο υποπροϊόν είναι η μαρμαρόσκονη διαφόρων κοκκομετριών που απασχολεί μεγάλη γκάμα βιομηχανιών όπως στην βιομηχανία φαρμάκων, καλλυντικών, συνθετικών υλικών (πλαστικών), χαρτιού και άλλες.

1.1.5 Επίδραση στην οικονομία

Το ελληνικό μάρμαρο είναι από τα σημαντικότερα εξαγωγικά προϊόντα της Ελλάδας προσφέροντας έμπρακτα στην εθνική οικονομία. Η Ελλάδα βρίσκεται στην πέμπτη θέση παγκοσμίως και στην δεύτερη θέση εντός της ΕΕ όσον αφορά τις εξαγωγές μαρμάρων προσφέροντας τα $\frac{3}{4}$ της παραγωγής της σε 120 χώρες. Συγκεκριμένα, η αξία των εξαγωγών σημειώνει αύξηση για τα έτη 2020 και 2021 από 288 σε 360 εκατομμύρια ευρώ. Μετά την επιδημία του Covid-19 το 2020 υπήρξε ανοδική πορεία. Ο κλάδος του μαρμάρου προσφέρει άμεσα εργασία σε 6500 εργαζόμενους ενώ έμμεσα φτάνει τους 18000. ([Stone news, 2024](#))

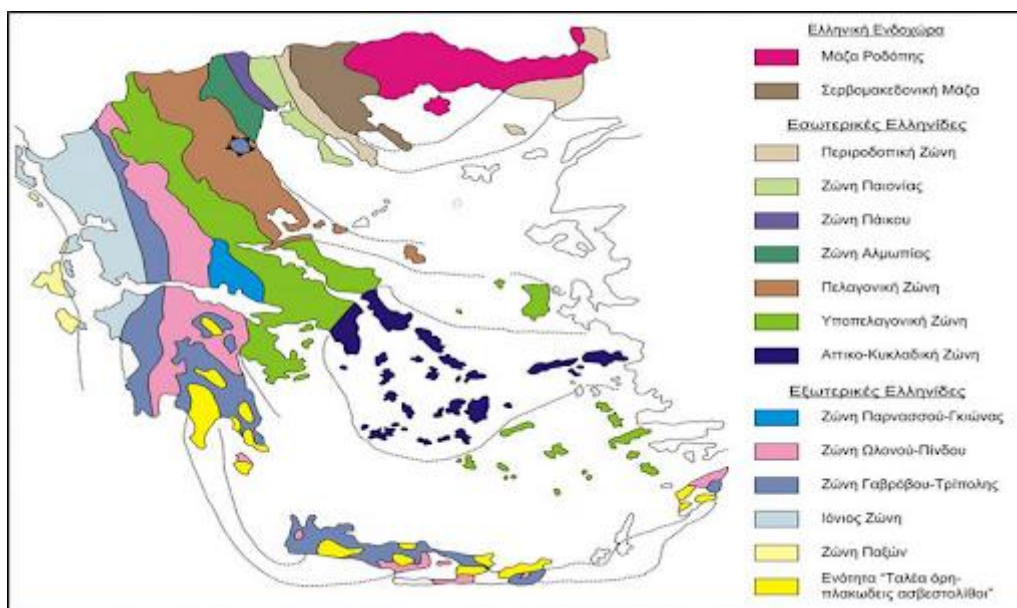
1.2 Γεωλογικό υπόβαθρο

1.2.1 Γεωλογία Δράμας

Υπάρχουν συγκεκριμένες γεωτεκτονικές ζώνες κατά τον ελλαδικό χώρο που παρουσιάζουν εκτεταμένα μαρμαροφόρα κοιτάσματα. Τέτοιες μαρμαροφόρες περιοχές είναι μεταξύ άλλων η περιφέρεια της ανατολικής Μακεδονίας, Θράκης, Καβάλας, Δράμας και Θάσου. Αυτές οι περιοχές κατά την αρχαιότητα είχαν έντονα αποθέματα ασβεστόλιθου ή άλλων ασβεστολιθικών πετρωμάτων που με την πάροδο του χρόνου μεταμορφώθηκαν στο σημερινό μάρμαρο. Για την μεταμόρφωση αυτή,

καίρια σημασία είχαν οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών που επηρεάζουν τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και η υδατική κινητικότητα μέσα στους εν λόγω γεωλογικούς σχηματισμούς.

Γεωγραφικά, ο νομός Δράμας βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Ελλάδας και συγκεκριμένα, στην Ανατολική Μακεδονία. Ο Ν. Δράμας, γεωλογικά, ανήκει στη μάζα της Ροδόπης (Σχήμα 1.2) ενώ τα γεωλογικά στρώματα που δομούν την κεντρική Ροδοπική μάζα είναι Άνω Παλαιοζωικής έως Κάτω Μεσοζωικής ηλικίας (Κάτω-Μέσο Τριαδικό). Αναλυτικότερα, η μάζα της ελληνικής Ροδόπης χωρίζεται σε δύο τεκτονικές μονάδες, την κατώτερη τεκτονική ομάδα Παγγαίου και την ανώτερη τεκτονική ομάδα Σιδηρόκερου. Στην ομάδα Παγγαίου απαντώνται γνεύσιοι, μάρμαρα, μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και στην ομάδα Σιδηρόκερου μιγματίτες, γνεύσιοι, οφθαλμογενέσιοι και αμφιβολίτες. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Ανατολικής Μακεδονίας χωρίζονται, σύμφωνα με τα λιθολογικά χαρακτηριστικά τους, σε τέσσερις σειρές. από τις βαθύτερες προς τις ανώτερες είναι οι εξής: η σειρά των γνευσίων του υποβάθρου, η σειρά των μαρμάρων, η σειρά των μαρμαρυγικών σχιστολίθων και η σειρά σχιστολίθων και μαρμάρων.



Σχήμα 1.2 Γεωτεκτονικές πλάκες της Ελλάδας. (Παγκόσμιο Ινστιτούτο ελληνικού πολιτισμού, 2024)

1.2.2 Λατομικοί χώροι μαρμάρων

Στο νομό Δράμας, η εξορυκτική δραστηριότητα λαμβάνει χώρα σε θέσεις της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού, κυρίως στις περιοχές του Βόλακα, του Γρανίτη, του Οχυρού, του Νευροκοπίου, των πηγών Αγγίτη, του Ξηροποτάμου, του

Μοναστηρακίου, και του Βαθυλάκκου (*Σχήμα 1.3*). Στην περιοχή του Βόλακα από το 1990 έχει αρχίσει να υλοποιείται και υπόγεια εκμετάλλευση προστατεύοντας το ανάγλυφο και μεγιστοποιώντας την αποληψιμότητα του εμπορεύσιμου υλικού.



Σχήμα 1.3 Θέσεις λατομικών χώρων στην ΠΕ Δράμας. (Εικόνα από δορυφόρο)

Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία

Οι εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του προς εξέταση μαρμάρου πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο πετρογραφίας της σχολής μηχανικών ορυκτών πόρων του πολυτεχνείου Κρήτης. Για τον σκοπό της διπλωματικής εργασίας παραχωρήθηκαν από την εταιρία ΑΦΟΙ Δερμιτζάκης τρεις όγκοι μαρμάρων Δ1 Δ2 και Δ3 από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» που στην συνέχεια κόπηκαν στην μέση(Δ11, Δ12, Δ21, Δ22, Δ31 και Δ32). Έπειτα, για κάθε όγκο μαρμάρου δημιουργήθηκαν εργαστηριακά 12 κυλινδρικά δοκίμια και 1 ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο για προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων, 6 για τον προσδιορισμό υδαταπορροφητικότητας και μερικά από τα σπασμένα για τις ανάγκες των τεχνικών ορυκτολογικής και χημικής ανάλυσης. Οι διαδικασίες περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

2.1 Μακροσκοπική εξέταση – Μέθοδοι

Πετρογραφικά, τα δείγματα μαρμάρου εξετάστηκαν βάση του προτύπου EN 12407. Το εν λόγω πρότυπο συνδυαστικά με τα αποτελέσματα της χημικής και ορυκτολογικής ανάλυσης ταξινομεί το πέτρωμα και καθορίζει σημαντικά χαρακτηριστικά του. Οι φυσικές του ιδιότητες όπως το πορώδες, η πυκνότητα, το ειδικό βάρος και η υδαταπορροφητικότητα διαμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό από στοιχεία όπως η κοκκομετρία, τα ιστολογικά του χαρακτηριστικά και η παρουσία ή απουσία προσμίξεων και διακλάσεων στην κύρια μάζα του. (Τσιραμπίδης., 1996; Triantafyllou et al, 2010) Επιδρούν επίσης σε σημαντικό βαθμό σε όλες τις μηχανικές του ιδιότητες.

2.1.1 Χημική ανάλυση κύριων στοιχείων

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της χημικής σύστασης των δειγμάτων είναι η φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού (X-ray fluorescence or XRF). Η αρχή της βασίζεται με την μέτρηση της ακτινοβολίας ακτίνων-X που εκλύεται από το δείγμα κατά τον βομβαρδισμό του με ακτινοβολία ακτίνων-X. Για τον προσδιορισμό (% κ.β.) της σύστασης των δειγμάτων σε κύρια στοιχεία, χρησιμοποιήθηκε φασματόμετρο Ενεργειακής διασποράς (ED) S2 Ranger της Bruker AXS, με χρήση λυχνίας Παλλαδίου, που ανήκει στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας & Οργανικής Πετρογραφίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

2.1.2 Ορυκτολογική ανάλυση

Για την ορυκτολογική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περιθλασιμετρίας κόνεως ακτινών-X. Σκοπός της μεθόδου είναι προσδιορισμός (ποσοτικά και ποιοτικά) της ορυκτολογικής σύστασης αλλά και της κρυσταλλικής δομής των φάσεων του απαρτίζουν το δείγμα. Δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε 3 φορές (Για Δ1 Δ2 και Δ3) κονιοποιημένο αρχικό δείγμα μικρότερο από 63μm από υπολείμματα και τρίματα αποτυχημένων κοπών εκ του αρχικού όγκου μαρμάρου. Αρχικά, υλικό σε μορφή κόνεως βάρους 1g τοποθετήθηκε σε κοιλότητα βάθους 1mm και έκτασης μερικών εκατοστών, με τρόπο ώστε να σχηματίζει επίπεδη πάνω επιφάνεια, σε πλαστικό πλακίδιο (*Γκαμολέτσος, 2022*). Έπειτα, πραγματοποιείται άμεση μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτινών-X που προσπίπτουν πάνω στο προπαρασκευάσμα κρυσταλλικής κόνεως.

Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο τύπου AXS D8 ADVANCE της εταιρείας Bruker, που ανήκει στο Εργαστήριο Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Για την ακριβέστερη ανάλυση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ειδικές συνθήκες ακτινοσκόπησης που περιλάμβαναν: χρήση λυχνίας Cu, μονοχρωματιστή με φίλτρο Ni, τάση λυχνίας $U=35\text{kV}$ και ένταση ρεύματος $I=35\text{mA}$ στην περιοχή των γωνιών 2θ μεταξύ 4° - 70° , με βήμα $0,05^\circ$ και χρόνο $198,8\text{ s/ανά βήμα}$.

Για τον ποιοτικό προσδιορισμό των ορυκτολογικών φάσεων χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων JCPDS και το λογισμικό EVA Diffraction (Bruker), ενώ για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ορυκτολογικών φάσεων των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AutoQuan (Rayflex), που λειτουργεί με τη μέθοδο εκλέπτυνσης της κρυσταλλικής δομής Rietveld.

2.1.3 Προσδιορισμός χρώματος

Επιπροσθέτως, εξετάστηκε το χρώμα των δειγμάτων και συγκεκριμένα η φωτεινότητά του και η διαφορά του από το τέλειο λευκό. Μέσω της εταιρίας CIE (International commission on illumination.1976) και του μοντέλου CIE-Lab, μετρήθηκαν οι απαραίτητες μεταβλητές και υπολογίστηκαν μέσω μαθηματικών σχέσεων οι χρωματικοί παράγοντες. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με άξονες τα μεγέθη L, a, b τα οποία υπολογίζονται βάση των τιμών των τριχρωματικών συντελεστών X, Y, Z από μαθηματικές σχέσεις. Το εν λόγω

μοντέλο έχει διακριτική φασματική ικανότητα καλύτερη του ανθρώπινου οφθαλμού. Ο παράγοντας L εκφράζει την φωτεινότητα με τιμές 0-100, με 100 το απόλυτα λευκό, ενώ οι μεταβλητές a, b σχετίζονται με το χρώμα.

2.1.4 Φυσικές ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες που μελετήθηκαν και προσεγγίστηκαν είναι η φαινόμενη πυκνότητα, το ανοικτό πορώδες και η υδαταπορροφητικότητα. Η υδαταπορροφητικότητα σε ατμοσφαιρική πίεση μελετήθηκε με βάση το πρότυπο EN 13755 και η φαινόμενη πυκνότητα με το ανοικτό πορώδες με το EN 1936. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δημιουργήθηκαν 6 κυλινδρικά δοκίμια για κάθε όγκο Δ1 Δ2 και Δ3 ύψους 70 ± 5 χιλιοστών και διαμέτρου 50 ± 5 χιλιοστών. Στο σχήμα 2.1 φαίνονται αντιπροσωπευτικά δείγματα δοκιμών υδατοαπορρόφησης για κάθε όγκο Δ1 Δ2 και Δ3 από αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 2.1. Αντιπροσωπευτικά δείγματα δοκιμών υδατοαπορρόφησης

2.2 Μηχανικές ιδιότητες & θεωρητική προσέγγιση

2.2.1 Προετοιμασία δειγμάτων

Από τα 3 ογκοτεμάχια Δ1 Δ2 και Δ3 από την εταιρία Αφοί Δερμιτζάκη και . Λόγω δυνατότητας επεξεργασίας συγκεκριμένου εύρους διαστάσεων υλικού από τον εργαστηριακό εξοπλισμό, τα εν λόγω ογκοτεμάχια χρειάστηκε να κοπούν στην μέση σε επίπεδο παράλληλο με το πρόσωπο [Σχήμα 2.2](#) (Δ11, Δ12, Δ21, Δ22, Δ31 και Δ32).



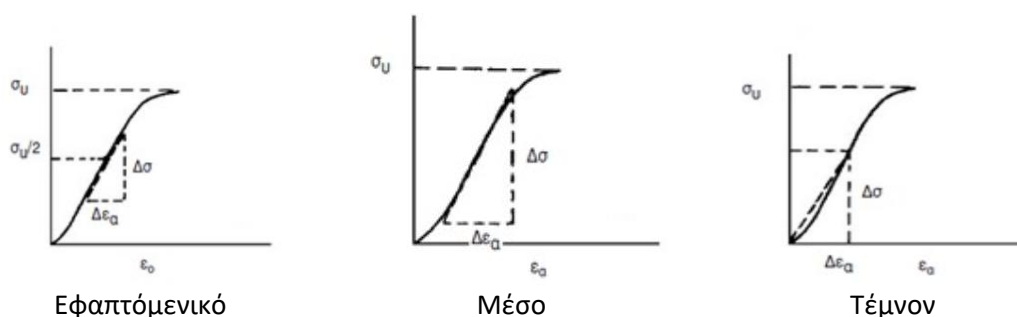
Σχήμα 2.2 Αρχικά και τελικά ογκοτεμάχια προς δημιουργία δοκιμίων.

Στην συνέχεια, για τις ανάγκες των πειραμάτων προσδιορισμού των μηχανικών αντοχών, δημιουργήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια μέσω του εργαστηριακού πυρηνολήπτη που έπειτα λειάνθηκαν σε κατάλληλο μηχάνημα. Τα κυλινδρικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν είχαν διάμετρο 50 ± 5 mm και ύψος αντίστοιχο στις ανάγκες του κάθε πειράματος, 100 ± 10 mm για την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, 30 ± 3 mm για την δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού και 70 ± 5 mm για την μέτρηση της υδαταπορρόφητικότητας. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν για την δοκιμή κάμψης ορθογώνια παραλληλεπίπεδα δοκίμια μήκους 150 ± 20 mm, ύψους $25,0 \pm 3,5$ mm και πλάτους $50,0 \pm 1,5$ mm. Καθώς όλες οι κοπές και προπαρασκευές έγιναν παρουσία νερού για συγκράτηση της θερμοκρασίας των κοπτικών και μείωσης της φθοράς του εξοπλισμού, τα δοκίμια παρέμειναν 24 h πριν την θραύση τους σε θερμοκρασία δωματίου για απομάκρυνση της επιπλέον υγρασίας τους.

2.2.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

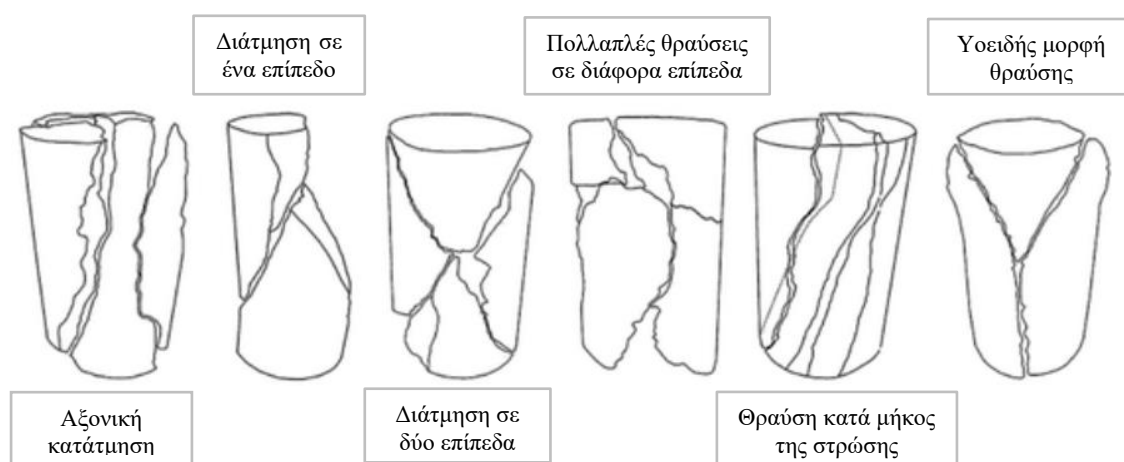
Η αντοχή μονοαξονικής θλίψης (UCS) εκτελείται σε άκαμπτη πρέσα, μηχάνημα που σταδιακά αυξάνει ισόποσα την τάση σε δύο αντίθετα επίπεδα του ίδιου άξονα του δοκιμίου (πάνω & κάτω) έως ότου το δοκίμιο αστοχήσει. Κατά την διάρκεια της δοκιμής, μετρούνται η τάση (σ) και η παραμόρφωση ($\Delta\epsilon$). Τοποθετώντας αυτές τις δύο μεταβλητές σε διάγραμμα (Τάσης-παραμόρφωσης) μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας (E). Υπάρχουν τρία μέτρα ελαστικότητας, το τέμνον, το

εφαπτόμενο και το μέσο. Στην ουσία πρόκειται για το ίδιο φυσικό μέγεθος, απλώς αλλάζει ο τρόπος υπολογισμού. Το εφαπτόμενο υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης στο 50% του κάθετου άξονα στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, το τέμνον ενώνοντας την αρχή των αξόνων με το σημείο θραύσης και το μέσο από την μέση κλίση στο κεντρικό τμήμα της καμπύλης. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος Poisson. Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως ο αρνητικός λόγος της εγκάρσιας προς τη διαμήκη παραμόρφωση του υλικού όταν αυτό εντείνεται μονοαξονικά κατά τον διαμήκη άξονα. (Stefanos, 2017).



Σχήμα 2.3 Μέτρα Ελαστικότητας (Κούκης et al, 2002).

Η γεωμετρία της ρήξης αφού αστοχήσει το δοκίμιο εξαρτάται και από την ποιότητα της βραχομάζας από την οποία προήλθε αλλά και από τις συνθήκες προπαρασκευής του δοκιμίου. Οι πιο σύνηθες γεωμετρίες απεικονίζονται στο [Σχήμα 2.4](#) παρακάτω.

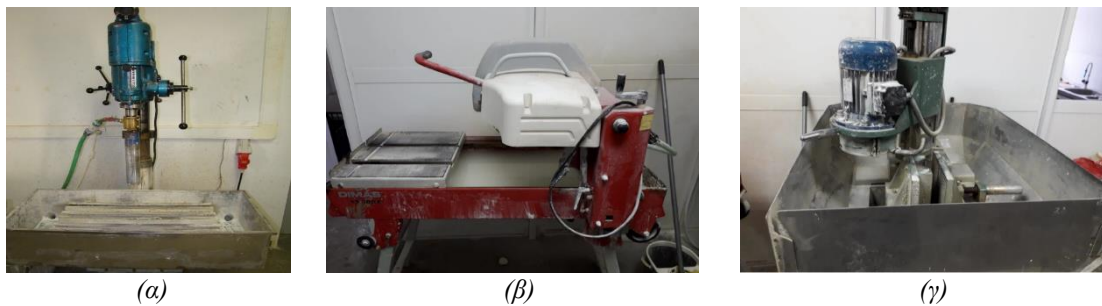


Σχήμα 2.4 Διαφορετικά είδη θραύσης δοκιμίου (Muhammad Fakir et al, June 2017)

Για την μορφοποίηση και επεξεργασία των δειγμάτων μαρμάρου ακολουθήθηκαν οι παρακάτω μηχανική επεξεργασία:

- Πυρηνοληψία για τη δημιουργία κυλινδρικών δειγμάτων ([Σχήμα 2.5α](#)).

- Κοπή με διαμαντένιο δισκοπρίονο (Σχήμα 2.5β).
- Λείανση: Εξομάλυνση για τη μείωση της τριβής στις επιφάνειες φόρτισης (Σχήμα 2.5γ).
- Δοκιμές θραύσης στην μηχανή MTS 815, ικανής να εφαρμόζει φορτία έως 1600 kN.



Σχήμα 2.5 (α) Πυρηνολήπτης, (β) τροχός κοπής και (γ) τροχός λείανσης

2.2.3 Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

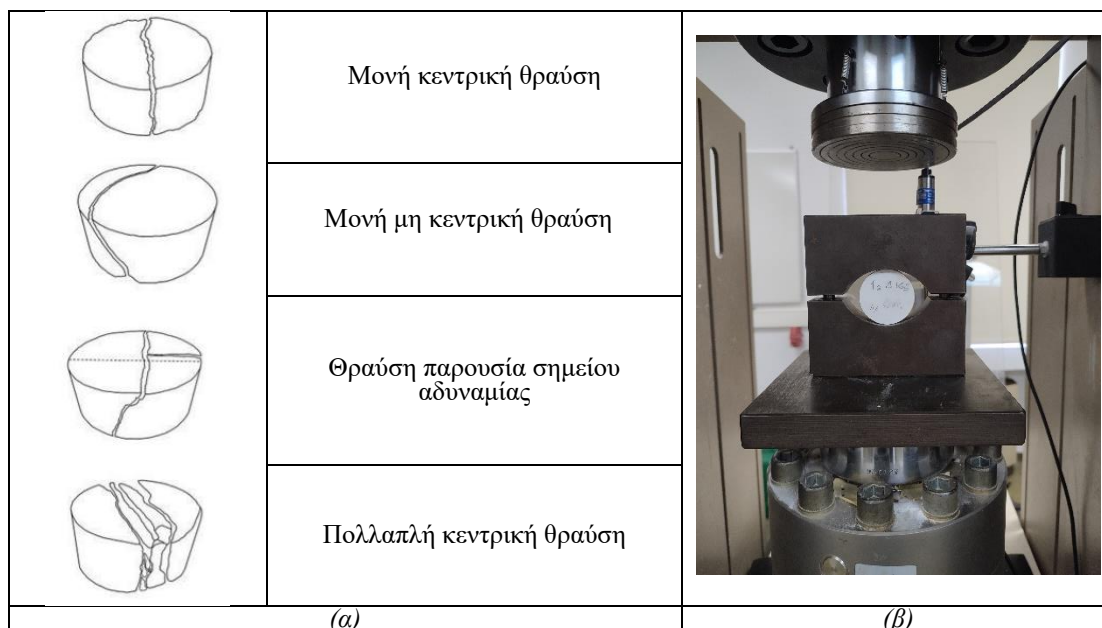
Η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί για τα πετρώματα και προκειμένου να μετρηθεί η μηχανική αντοχή του υλικού χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή του έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian Tensile Strength Test). Κατά την δοκιμή, κυλινδρικό δοκίμιο ύψους σχεδόν μισό της διαμέτρου του, τοποθετείται ανάμεσα σε ημιελλειπτικές σιαγόνες φόρτισης έτσι ώστε να εφάπτονται σε αυτές δύο μικρά αντιδιαμετρικά τόξα ($<10^\circ$) της περιφέρειας του κυλίνδρου. Οι σιαγόνες συγκρατούνται από 2 πύλους επιτρέποντας μόνο την κατακόρυφη μετακίνησή τους. Η γεωμετρία του συστήματος μετατρέπει την κατακόρυφη δύναμη θλίψης που ασκεί η υδραυλική πρέσα, σε διατμητική πάνω στο δοκίμιο. Όπως και στο πείραμα της μονοαξονικής θλίψης, σταδιακά αυξάνεται η τάση που δίνεται από την πρέσα μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Με τις τιμές τάσης και παραμόρφωσης και της εξ. (1) υπολογίζεται η μέγιστη αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό. Σημειώνεται ότι ανάλογα τον βαθμό ανισοτροπίας του υλικού μπορεί να υπάρξουν κεντρικές ή μη θραύσεις. Σε ήπια επίπεδα ανισοτροπίας το υλικό μπορεί να παρουσιάσει μονή ή πολλαπλές κεντρικές θραύσεις και σε έντονα επίπεδα μη κεντρικές θραύσεις που προκύπτουν ανάλογα τα σημεία αδυναμίας του δοκιμίου. Στο Σχήμα 2.6α φαίνονται οι πιθανότεροι τρόποι αστοχίας των δοκιμίων και στο Σχήμα 2.6 β η πειραματική διάταξη.

$$\sigma_{MAX} = 2 \cdot \frac{P_{max}}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

Όπου: P : Το φορτίο

D : Η διάμετρος του δοκιμίου

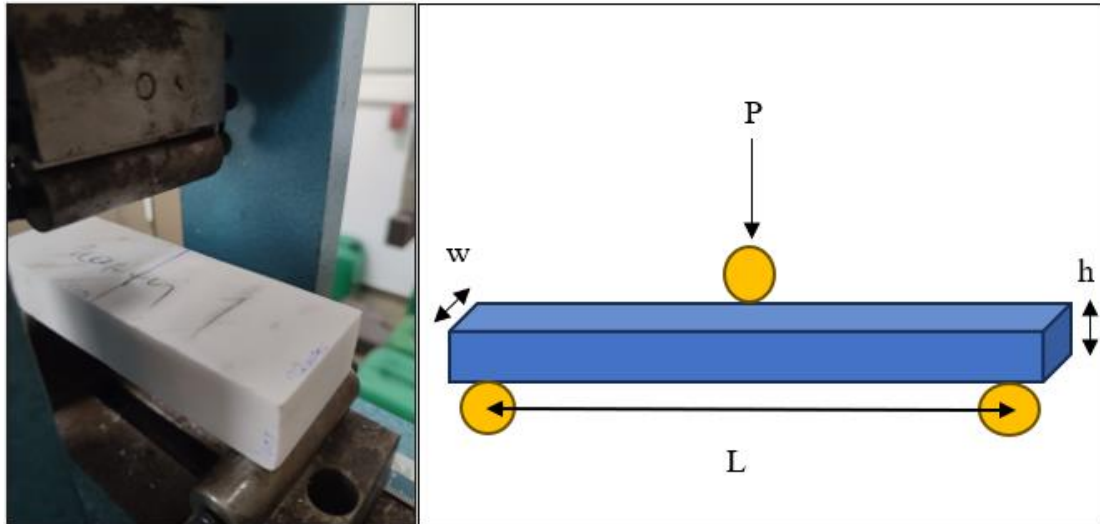
t : Το πάχος του δοκιμίου



Σχήμα 2.6 (α) Χαρακτηριστικά παραδείγματα θραύσης δοκιμίων έμμεσου εφελκυσμού. (Basu et al, 2013), (β) η πειραματική διάταξη.

2.2.4 Αντοχή σε κάμψη

Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε για την μέτρηση αντοχής του μαρμάρου σε κάμψη είναι η δοκιμή πρισματικής δοκού. Πρόκειται για μια απλή και οικονομική δοκιμή που με μέτρηση δύο μεταβλητών παρέχει συμπέρασμα για την συμπεριφορά του υλικού στην κάμψη. Για τα μάρμαρα καθαντά είναι μια απαραίτητη μέτρηση καθώς κατά κόρων χρησιμοποιούνται στην οικοδομική και στην διακοσμική. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια υδραυλική πρέσα που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες δοκιμές με κατάλληλη στο πείραμα κεφαλή. Η κεφαλή αποτελείται από 2 μέρη, στο κάτω μέρος υπάρχουν δυο σταθεροί κύλινδροι σε απόσταση $L = 12.5 \text{ cm}$ που εφάπτονται στα 2 άκρα του δείγματος και στο άνω μέρος ένας σταθερός κύλινδρος που εφάπτεται στο μέσω της δοκού. Και οι τρεις κύλινδροι είναι ομόρροποι με το πλάτος (w) της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Η πειραματική διάταξη του πειράματος της κάμψεως τριών σημείων.

Όπως και στο πείραμα της μονοαξονικής θλίψης, σταδιακά αυξάνεται η τάση που δίνεται από την πρέσα μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Με τις τιμές τάσης και παραμόρφωσης και της εξ. (2) υπολογίζεται η μέγιστη αντοχή του υλικού σε κάμψη ενώ με την εξ. (3) υπολογίζονται οι καμπτικές παραμορφώσεις.

$$\sigma_{MAX} = \frac{3 \cdot P_{max} \cdot L}{2 \cdot w \cdot h^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot h \cdot u}{L^2} \quad (3)$$

Όπου: P: το φορτίο

L: Το μήκος

w: Το πλάτος

h: Το ύψος

u: Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο φόρτισης.

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα

3.1 Μακροσκοπική & μικροσκοπική εξέταση μικροσκοπίας

Στην παρακάτω παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πετρογραφικής εξέτασης που συμπεριλαμβάνει αποτελέσματα από μικροσκοπική οπτική εξέταση όπως και προσδιορισμό χρωματικών παραμέτρων. Τα εξεταστέα μαρμάρινα δοκίμια έχουν προέλευση από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» (Π.Ε. Δράμας).

Όπως φαίνεται στα [Σχήματα 3.1-3.2](#), αντιπροσωπευτικά και για τα τρία ογκοτεμάχια, πρόκειται για λευκά μάρμαρα με πυκνή και συμπαγή υφή και απουσία ορατών μικροδιακλάσεων μικροσκοπικά. Επίσης, στην κύρια μάζα των μαρμάρων δεν παρατηρούνται πόροι, ρωγμές, κοιλότητες, σημάδια αποσάθρωσης ή αποικοδόμησης με αποτέλεσμα να επιβεβαιώνεται η καλή υγεία του πετρώματος.

Παρατηρήθηκαν τεφρά συσσωματώματα μικρών διαστάσεων στην κύρια μάζα των δοκιμίων, με την μεγαλύτερη συχνότητά τους να εμφανίζονται σε δοκίμια προερχόμενα από το 3^ο ογκοτεμάχιο. Τα τεφρά αυτά συσσωματώματα παρατηρήθηκαν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο στερεοσκόπιο και έχουν διαστάσεις από 0,5 έως 1 mm. Διαπερνούν σε κάποιες περιπτώσεις όλη την μάζα των δοκιμίων δημιουργώντας μακροσκοπικά λεπτά γκρίζα φλεβίδια που επιδρούν αρνητικά στην αισθητική του μαρμάρου. Οι τεφρές αυτές ταινιώσεις είναι σε κάποιες περιπτώσεις πληρωμένες με υλικό του οποίου η κοκκομετρία διαφέρει από την λεπτόκοκκη κύρια δολομιτική του μάζα και η σύσταση του οποίου είναι ασβεστιτική.

Όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα της χημικής και της ορυκτολογικής ανάλυσης που παρουσιάζονται στην συνέχεια, τα υψηλά ποσοστά σε δολομίτη που περιείχαν τα δοκίμια του 1^{ου} ογκοτεμαχιδίου όπως και η απουσία σημαντικού ποσοστού προσμίξεων που αυτό είχε, επηρεάζουν σημαντικά την μακροσκοπική του εικόνα και τις χρωματικές του παραμέτρους.

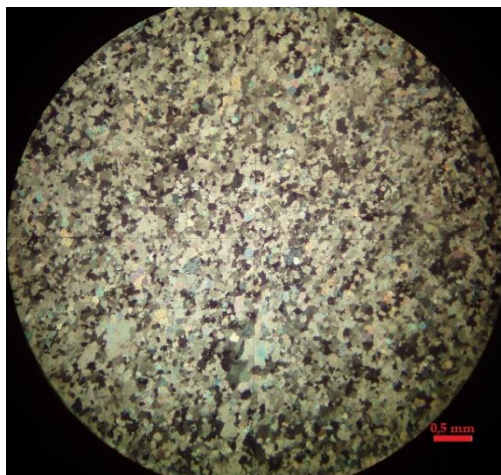


Σχήμα 3.1 Φωτογραφία από την μακροσκοπική παρατήρηση δοκιμίων από το 1ο ογκοτεμάχιο που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη



Σχήμα 3.2. Φωτογραφίες αντιπροσωπευτικών δειγμάτων μετά από την παρατήρησή τους με στερεοσκόπιο.

Παρακάτω παρουσιάζονται και ερμηνεύονται φωτογραφίες λεπτών τομών των προς εξέταση μαρμάρων προερχόμενες από πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός. Με βάση την μικροσκοπική παρατήρηση, παρατηρείται πως η κύρια μάζα των δειγμάτων αποτελείται από κρυστάλλους δολομίτη (Σχήμα 3.3), με τον ιστό τους να είναι κυρίως «ψευδολατυποπαγούς» τύπου. Δεν παρατηρούνται ευρήματα που υποδεικνύουν εξαλλοίωση στους δολομιτικούς κρυστάλλους και έχουν μορφή υποβλαστική.

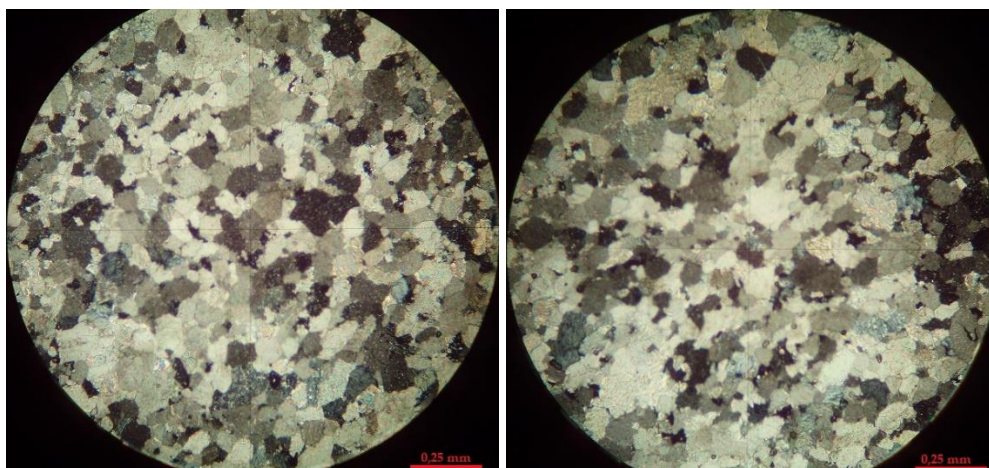


Σχήμα 3.3. Μικροφωτογραφία στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Δράμας, όπου διακρίνεται ένας ισοκοκκώδης ιστός (Nicolis L, μεγέθυνση x25)

Παρουσιάζουν ιστό κυρίως ισοκοκκώδη αλλά και γρανοβλαστικό (Σχήμα 3.4) με απουσία πόρων κατά μήκος του πετρώματος. Επίσης, από την παρατήρηση των λεπτών τομών φάνηκε πως δεν υπάρχουν μικροδιακλάσεις στο πέτρωμα χωρίς να συνεπάγεται την απουσία τους από την ολότητα του πετρώματος. Επίσης διακρίνεται μια λεπτόκοκκη δολομιτική κρυσταλλική μάζα, με τη μορφή και τον τρόπο σύνδεσης των κόκκων να διαμορφώνουν ένα ιστό “ψευδο-λατυποπαγούς” τύπου (Nicolis L, μεγέθυνση x100).

Ως προς την κοκκομετρία τους τα δείγματα χαρακτηρίζονται ως λεπτόκοκκα αφού η κατανομή μεγέθους των κρυστάλλων δολομίτη της κύριας μάζας του πετρώματος έχουν μέγεθος από 0,08 έως 0,2 mm.

Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις της πετρογραφικής εξέτασης συμπεραίνεται ότι τα εξεταζόμενα δείγματα μαρμάρου ως προς την ταξινόμηση του πετρώματος κατά **EN 12407**, προέρχονται από εμφάνιση που χαρακτηρίζεται ως λεπτόκοκκο λευκό δολομιτικό μάρμαρο με συσσωματώματα τεφρής απόχρωσης.



Σχήμα 3.4 Μικροφωτογραφίες στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Δράμας

3.2 Προσδιορισμός χρωματικών παραμέτρων

Ο προσδιορισμός του χρώματος των μαρμάρων έγινε μέσω του μοντέλου CIE Lab ή αλλιώς (L^* a^* b^*). Πρόκειται για ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με άξονες τα μεγέθη L^* , a^* , b^* τα οποία υπολογίζονται με μαθηματικές σχέσεις μέσω των τριχρωματικών συντελεστών X, Y, Z . Το προαναφερθέν μοντέλο είναι εργαλείο της CIE (International commission on illumination) και περιλαμβάνει όλο το φάσμα χρωμάτων συμπεριλαμβανομένων και αυτών που δεν είναι διακριτά από τον άνθρωπο. Τα μεγέθη a^* και b^* δίνουν πληροφορίες που αφορούν το χρώμα ενώ ο παράγοντας L^* εκφράζει την φωτεινότητα με κλίμακα 0-100. Στην επεξεργασία των μετρήσεων υπολογίστηκε επιπλέον το μέγεθος ΔE^*_{ab} που εκφράζει με την σειρά του το πόσο απέχει το χρώμα του υλικού από το τέλειο λευκό. Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον (Πίνακας 3.1) τα αποτελέσματα της μελέτης για αντιπροσωπευτικά μακροσκοπικά δείγματα από τους τρεις όγκους μαρμάρων με προέλευση το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» ($\Delta 1$, $\Delta 2$ και $\Delta 3$ αντίστοιχα).

Πίνακας 3.1. Αποτελέσματα από την μελέτη προσδιορισμού των χρωματικών παραμέτρων δειγμάτων μαρμάρων, από το Λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ».

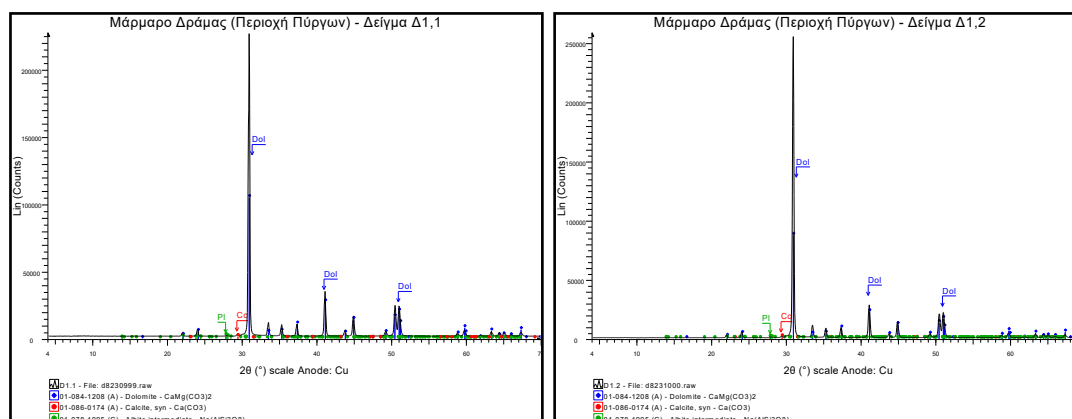
Δείγμα	a^*	b^*	L^*	ΔE^*_{ab}
$\Delta 1 \alpha$	0,12	0,95	93,66	6,41
$\Delta 1 \beta$	0,19	1,11	93,61	6,49
$\Delta 2 \alpha$	0,06	1,95	92,80	7,46
$\Delta 2 \beta$	0,08	1,17	92,55	7,54

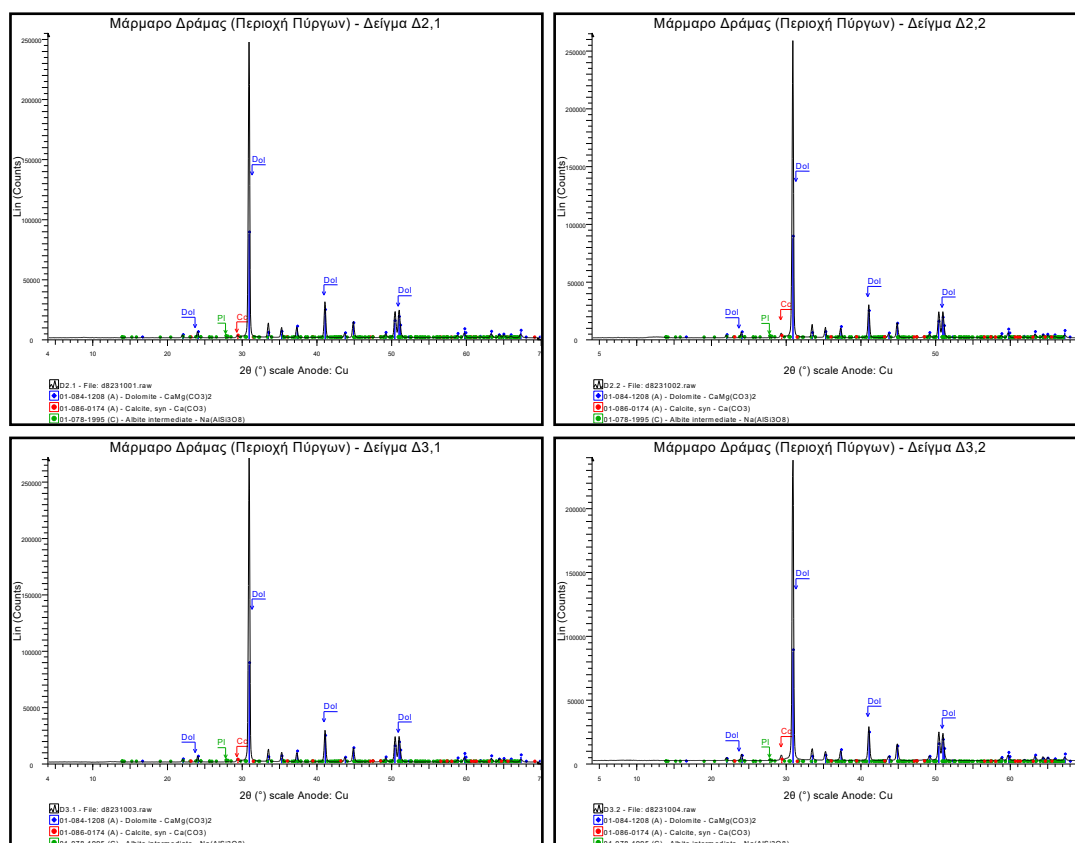
$\Delta 3 \alpha$	0,20	1,30	92,27	7,84
$\Delta 3 \beta$	-0,04	1,00	92,22	7,84

Συμπερασματικά, το χρώμα των μαρμάρων που ερμηνεύεται στην συγκεκριμένη μελέτη είναι τύπου λευκού χρώματος. Η μέση τιμή ΔE^*ab είναι 7,25 που δείχνει μικρό ποσοστό διαφοράς από το τέλειο λευκό όπως και η τιμή του μεγέθους φωτεινότητας L παίρνει τιμές μεγαλύτερες τους 92 για κάθε ένα εκ των δειγμάτων. Αυτό οφείλεται στην καθαρότητα της συγκεκριμένης παρτίδας μαρμάρων, δηλαδή στην κυριαρχία ενός κύριου ορυκτολογικού συστατικού (δολομίτη) και την απουσία σημαντικού ποσοστού περιεχομένου σε μη ανθρακικά ορυκτά.

3.3 Ορυκτολογική & Χημική Ανάλυση

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης αποτυπώνονται στο παρακάτω [Σχήμα 3.5](#). Παρουσιάζονται ακτινοδιαγράμματα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων Χ (PXRD) με τα αποτελέσματα της ποιοτικής ορυκτολογικής ανάλυσης των δειγμάτων. Από παρατήρηση προκύπτει πως επικρατεί η ορυκτή φάση του δολομίτη, ενώ υπάρχουν σε μικρότερη ένταση και ανακλάσεις των ορυκτών φάσεων του ασβεστίτη και του νατριούχου πλαγιόκλαστου (αλβίτης). Τα ποσοστά της κάθε ορυκτής φάσης των δειγμάτων φαίνονται αναλυτικά στον [Πίνακα 3.2](#) και κυμαίνονται από 96,55 έως 99,17% για τον δολομίτη, από 0,62 έως 3,26% για τον ασβεστίτη και από 0,19 έως 0,38% για τον αλβίτη. Συμπεριλαμβανομένων και των αποτελεσμάτων της μικροσκοπικής παρατήρησης από προηγουμένως, τα δείγματα μαρμάρου είναι πολύ υψηλής καθαρότητας ως προς την περιεκτικότητά τους σε δολομίτη και κατατάσσονται κατά EN 12407 στον τύπο πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως δολομιτικά μάρμαρα.





Σχήμα 3.5 Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων – X (PXRD) των δειγμάτων μαρμάρων από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» Δράμας. Συντομογραφίες ορυκτών κατά Whitney & Evans (2010): Dol: δολομίτης Cc: ασβεστίτης & Pl: πλαγιόκλαστο.

Δείγματα	Ορυκτές φάσεις (%)		
	Δολομίτης {CaMg(CO ₃) ₂ }	Ασβεστίτης (CaCO ₃)	Πλαγιόκλαστο (NaAlSi ₃ O ₈)
Δ1,1	99,17	0,62	0,21
Δ1,2	99,05	0,64	0,31
Δ2,1	98,63	1,05	0,32
Δ2,2	97,04	2,58	0,38
Δ3,1	97,88	1,76	0,36
Δ3,2	96,55	3,26	0,19

Πίνακας 3:2. Ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων μαρμάρων από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» στην περιοχή της Δράμας. Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε ορυκτής φάσης, στη σύσταση των προς εξέταση δειγμάτων.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την χημική ανάλυση των προς εξέτασης δειγμάτων είναι η φασματομετρία ακτίνων φθορισμού (XRF). Τα κύρια στοιχεία που βρέθηκαν στο δείγμα είναι το μαγνήσιο (Mg) και το ασβέστιο (Ca) σε περιεκτικότητες από 18,83% κ.β. έως 21,18% κ.β. και από 32,01% κ.β. έως 35,02% κ.β. αντίστοιχα..

Στα δείγματα βρέθηκαν επιπλέον, ιχνοστοιχεία σε μικρότερες περιεκτικότητες όπως SiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , Al_2O_3 , Na_2O , TiO_2 και K_2O . Οι χημικές συστάσεις που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δείγματα στον (Πίνακας 3.4) αποτελούν κλασσικές συστάσεις δολομιτικού μάρμαρου κάτι που ενισχύει το συμπέρασμα της ένταξης του δείγματος στον τύπο πετρώματος δολομιτικού μαρμάρου. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης βρίσκονται σε καλή συσχέτιση με εκείνα της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων από το Λατομείο της περιοχής «ΠΥΡΓΩΝ», που παρουσιάστηκε προηγούμενα.

Πίνακας 3.3. Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων (% κ.β.) των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ» της περιοχής Δράμας, που εξετάστηκαν με τη μέθοδο φασματομετρίας ακτίνων – Χ φθορισμού (XRF).

Δείγματα	Χημική σύσταση (% κ.β.) των δειγμάτων μαρμάρων που αναλύθηκαν									Απώλεια πύρωσης
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O	
Δ1,1	32,01	21,18	0,14	0,05	0,01	0,04	0,02	<0,10	0,01	46,57
Δ1,2	32,16	21,06	0,22	0,06	0,01	0,07	0,04	<0,10	0,01	46,32
Δ2,1	32,54	20,98	0,23	0,06	0,02	0,07	0,04	<0,10	0,01	46,04
Δ2,2	33,89	19,77	0,27	0,05	0,02	0,08	0,05	<0,10	0,02	45,83
Δ3,1	33,21	20,44	0,25	0,05	0,01	0,08	0,05	<0,10	0,03	45,88
Δ3,2	35,02	18,83	0,13	0,08	0,03	0,04	0,03	<0,10	0,02	45,79

3.4 Φυσικές ιδιότητες

3.4.1 Υδαταπορροφητικότητα σε ατμοσφαιρική πίεση

Η υδαταπορρόφηση υπολογίστηκε μέσω μια σειράς πειραμάτων που ορίζει το πρότυπο EN 13755 και την παρακάτω μαθηματική σχέση (εξ. 4) .

$$A_{atm} = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (4)$$

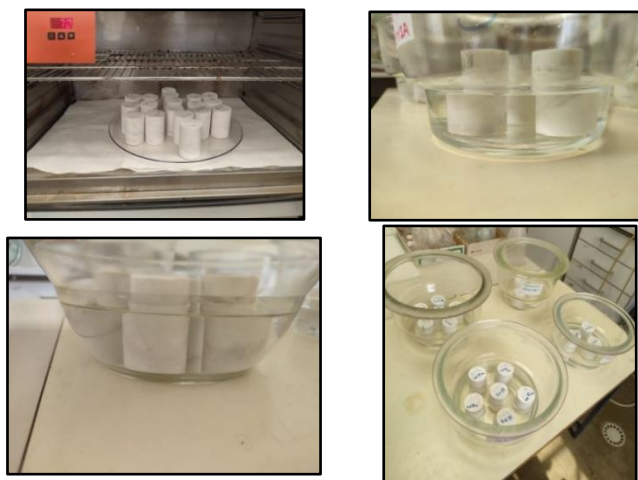
Με : A_{atm} : Η υδαταπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση (κ.β. %)

m_s : Το βάρος του δοκιμίου μετά την απορρόφηση της υγρασίας

m_d : Το βάρος του δοκιμίου μετά την ξήρανσή του

Στις εικόνες του Σχήματος 3.6 φαίνονται φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης σε







ατμοσφαιρική πίεση των δειγμάτων μαρμάρου από το Λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ», κατά EN 13755.









Σχήμα 3.6 Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της υδαταπορρόφησης

Για κάθε ένα από τα ογκοτεμάχια Δ1, Δ2 και Δ3, υποβλήθηκαν σε εξέταση 6 δοκίμια. Αρχικά, ξηράθηκαν σε κατάλληλο φούρνο, μετρήθηκε το βάρος τους, υποβλήθηκαν σε βύθιση με κατάλληλο τρόπο και ξανά μετρήθηκε το βάρος τους ώστε να μετρηθεί το ποσοστό απορρόφησης της υδάτινης φάσης από αυτά. Τέλος, αφού ξανά ξηράθηκαν μετρήθηκαν τυχόν αποκλίσεις. Στους παρακάτω τρεις πίνακες (3:5 έως 3:7) φαίνονται αναλυτικά τόσο οι τιμές βάρους των επιμέρους δοκιμίων, οι τιμές των υδαταπορροφήσεων τους, όσο και οι τελικές μέσες τιμές υδαταπορροφητικότητας για το κάθε ογκοτεμάχιο. Η μέση τιμή υδαταπορροφητικότητας όλων των δειγμάτων που εξετάστηκαν $A_b = 0.3\%$ κ. β.







Πίνακας 3:4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 1^{ov} ογκοτεμαχίου

Δοκίμια από το πρώτο ογκοτεμάχιο με κωδικό Δ1							Βάρη δοκιμίων (g)					Υδατοαπορρόφηση
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm ³)	Φωτογραφία	m _d	m ₄₈	m ₇₂	m ₉₆	m ₁₄₄	(% κ.β.)
Δ1 1α	4,505	4,510	7,140	7,152	114,254		321,08	322,02	322,03	322,06	322,06	0,31
	4,515		7,115									
	4,510		7,200									
Δ1 1β	4,510	4,513	7,010	7,010	112,134		317,05	318,07	318,08	318,08	318,08	0,32
	4,515		7,020									
	4,515		7,000									
Δ1 1γ	4,515	4,515	6,845	6,813	109,080		307,20	308,21	308,22	308,22	308,22	0,33
	4,515		6,800									
	4,515		6,795									
Δ1 2α	4,515	4,513	7,035	7,027	112,406		318,03	318,570	319,02	319,03	319,03	0,31
	4,510		7,020									
	4,515		7,025									
Δ1 2β	4,515	4,518	7,355	7,357	117,946		333,01	333,39	334,02	334,02	334,02	0,30
	4,520		7,360									
	4,520		7,355									
Δ1 2γ	4,510	4,513	6,990	6,978	111,622		314,02	315,02	315,03	315,04	315,04	0,32
	4,515		6,985									
	4,515		6,960									
							M.O.					0,32
							m _d : Αρχικό βάρος m ₄₈ : Βάρος στις 48 ώρες και ούτω καθ' εξής					0,3 % κ.β.

Πίνακας 3:5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 2^{ου} ογκοτεμαχίου

Δοκίμια από το δεύτερο ογκοτεμάχιο με κωδικό Δ2							Βάρη δοκιμίων (g)					Υδατοαπορρόφηση	
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm ³)	Φωτογραφία	m _d	m ₄₈	m ₇₂	m ₉₆	m ₁₄₄	(% κ.β.)	
Δ2 1α	4,520	4,515	7,070	7,083	113,403		318,24	319,22	319,23	319,24	319,24	0,31	
	4,515		7,085										
	4,510		7,095										
Δ2 1β	4,510	4,523	7,215	7,213	115,893		325,21	326,21	326,22	326,23	326,23	0,31	
	4,520		7,220										
	4,540		7,205										
Δ2 1γ	4,500	4,507	6,905	6,903	110,129		310,39	311,35	311,37	311,37	311,37	0,32	
	4,510		6,880										
	4,510		6,925										
Δ2 2α	4,515	4,520	7,125	7,105	114,007		321,03	322,00	322,01	322,02	322,02	0,31	
	4,525		7,085										
	4,520		7,105										
Δ2 2β	4,525	4,518	7,020	6,962	111,613		313,78	314,77	314,78	314,78	314,78	0,32	
	4,515		6,930										
	4,515		6,935										
Δ2 2γ	4,515	4,515	7,140	7,153	114,523		322,02	323,00	323,02	323,02	323,02	0,31	
	4,515		7,165										
	4,515		7,155										
												M.O.	0,31
							m _d : Αρχικό βάρος m ₄₈ : Βάρος στις 48 ώρες και ούτω καθ' εξής					0,3 % κ.β.	

Πίνακας 3:6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3^{ου} ογκοτεμαχίου

Δοκίμια από το τρίτο ογκοτεμάχιο με κωδικό Δ3							Βάρη δοκιμίων (g)					Υδατοαπορρόφηση	
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm³)	Φωτογραφία	m _d	m ₄₈	m ₇₂	m ₉₆	m ₁₄₄	(% κ.β.)	
Δ3 1α	4,505	4,512	7,120	7,130	114,003		321,02	321,96	321,98	322,00	322,00	0,31	
	4,515		7,130										
	4,515		7,140										
Δ3 1β	4,515	4,513	7,150	7,143	114,262		321,12	322,04	322,06	322,10	322,10	0,31	
	4,515		7,145										
	4,510		7,135										
Δ3 1γ	4,510	4,512	6,990	7,018	112,213		314,91	315,89	315,90	315,91	315,91	0,32	
	4,515		7,020										
	4,510		7,045										
Δ3 2α	4,510	4,508	6,660	6,688	106,747		300,49	301,42	301,44	301,48	301,48	0,33	
	4,500		6,730										
	4,515		6,675										
Δ3 2β	4,510	4,510	7,250	7,243	115,707		326,33	327,31	327,33	327,33	327,33	0,31	
	4,510		7,235										
	4,510		7,245										
Δ3 2γ	4,500	4,503	7,450	7,460	118,804		333,29	334,28	334,29	334,30	334,30	0,30	
	4,500		7,470										
	4,510		7,460										
												M.O.	0,31
							m _d : Αρχικό βάρος m ₄₈ : Βάρος στις 48 ώρες και ούτω καθ' εξής					0,3 % κ.β.	

3.4.2 Φαινόμενη πυκνότητα και ανοικτό πορώδες

Τα δοκίμια που προέρχονται από το πρώτο προς εξέταση δείγμα (Δ1), έδωσαν μέση τιμή φαινόμενης πυκνότητας 2834 kg/m³ και ανοικτού πορώδους 0,9 % κ.β. Εκείνα τα οποία είχαν προέλευση από το δεύτερο προς εξέταση δείγμα (Δ2) έδωσαν μέση τιμή φαινόμενης πυκνότητάς 2833 kg/m³ και ανοικτού πορώδους 0,9 % κ.β. Τέλος, τα δοκίμια από το τρίτο δείγμα παρουσίασαν τη μικρότερη συγκριτικά τιμή φαινόμενης πυκνότητας, ο μέσος όρος της οποίας υπολογίστηκε σε 2830 kg/m³, ενώ το ανοικτό πορώδες του είχε επίσης μέση τιμή 0,9 % κ.β.



Σχήμα 3.7 Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους των δειγμάτων μαρμάρου από το Λατομείο «ΠΥΡΓΩΝ», κατά EN 1936.

Φαινόμενη πυκνότητα είναι το ποσοστό της μάζας πετρώματος προς τον φαινόμενο όγκο του, δηλαδή τον όγκο που περιλαμβάνει και τα κενά που υπάρχουν στη μάζα του πετρώματος. Εκφράζεται σε kg/m^3 και αναγράφεται με το σύμβολο ρ_b . Οι τιμές της προηγούμενης παραγράφου υπολογίστηκαν βάση του προτύπου **EN 1936** και της [εξ. \(5\)](#).

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \cdot \rho_{rh} \quad (5)$$

Με : ρ_{rh} : Η πυκνότητα του νερού σε (kg/m^3)
 m_d : Το βάρος του ξηρού δοκιμίου
 m_s : Το βάρος του ημιβρεγμένου δοκιμίου στις 24 ώρες ± 2 ώρες
 m_h : Το βάρος του πλήρως βυθισμένου δοκιμίου

Όσο αφορά τον υπολογισμό του ανοικτού πορώδους, χρησιμοποιείται το ίδιο πρότυπο (EN 1936) και η [εξ. \(6\)](#). Πρόκειται για ποσοστιαία μέτρηση και επικρατεί το σύμβολο (p_0):

$$p_0 = \frac{m_d}{m_s - m_h} \cdot 100 \quad (6)$$







Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ομοιομορφία και αναμενόμενες τιμές. Στο σύνολό του το δείγμα δίνει τιμή ανοικτού πορώδους 0,9% κ.β. Με εξαίρεση μερικά δοκίμια που παρουσιάζουν τιμή 1%. Αυτή η ελάχιστη αύξηση παρουσιάζεται και στην πλειοψηφία των αντίστοιχων δοκιμίων στα αποτελέσματα της υδαταπορρόφητικότητας δίνοντας ελάχιστα μεγαλύτερη τιμή και εκεί. Η δε μικρή διαφοροποίηση στις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμίων από τους τρεις όγκους μαρμάρων, αποδίδεται στα διαφορετικά ποσοστά ασβεστιτικού υλικού που αυτά περιέχουν. Τα δοκίμια που προέρχονται από τον πρώτο όγκο, ο οποίος περιέχει και το μεγαλύτερο ποσοστό

δοιομίτη, εμφανίζουν και την υψηλότερη τιμή φαινόμενης πυκνότητας, ενώ εκείνα από τον τρίτο όπου ανιχνεύτηκαν συγκριτικά υψηλότερα ποσοστά “προσμίξεων”, έχουν και μικρότερη μέση τιμή φαινόμενης πυκνότητας.







Συμπερασματικά, η τιμή φαινόμενης πυκνότητας στα εξεταζόμενα δείγματα κυμαίνεται από 2830 έως 2834 kg/m³ με μέση τιμή 2832 kg/m³, ενώ το ανοικτό τους πορώδες έχει μέση τιμή 0,9 % κ.β. Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές για τύπους πετρωμάτων όπως τα συγκεκριμένα Δολομιτικά μάρμαρα και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της δοκιμής υπολογισμού της υδαταπορρόφησης φανερώνουν πως τα δείγματα έχουν μια συμπαγή και ομοιόμορφη υφή.

Στους παρακάτω *Πίνακες 3:7-3:9* παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους για τα ογκοτεμάχια Δ1, Δ2 και Δ3.






Πίνακας 3:7. Συνολικά αποτελέσματα 1^{ου} ογκοτεμαχίου

Δοκίμια από το πρώτο ογκοτεμάχιο με κωδικό Δ1							Βάρη δοκιμίων (g)			Φαινόμενη πυκνότητα	Ανοικτό πορώδες
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm ³)	Φωτογραφία	m _d	m _s	m _b	(Kg/m ³)	(% κ.ο.)
Δ1 1α	4,505	4,510	7,140	7,152	114,254		321,08	322,12	208,81	2834	0,9
	4,515		7,115								
	4,510		7,200								
Δ1 1β	4,510	4,513	7,010	7,010	112,134		317,05	318,14	206,28	2834	1,0
	4,515		7,020								
	4,515		7,000								
Δ1 1γ	4,515	4,515	6,845	6,813	109,080		307,2	308,27	199,89	2834	1,0
	4,515		6,800								
	4,515		6,795								
Δ1 2α	4,515	4,513	7,035	7,027	112,406		318,03	319,07	206,88	2835	0,9
	4,510		7,020								
	4,515		7,025								
Δ1 2β	4,515	4,518	7,355	7,357	117,946		333,01	334,09	216,56	2833	0,9
	4,520		7,360								
	4,520		7,355								
Δ1 2γ	4,510	4,513	6,990	6,978	111,622		314,02	315,09	204,32	2835	1,0
	4,515		6,985								
	4,515		6,960								
									M.O.	2834	0,9

Πίνακας 3:8. Συνολικά αποτελέσματα 2^{ου} ογκοτεμαχίου

Δοκίμια από το δεύτερο ογκοτεμάχιο με κωδικό Δ2							Βάρη δοκιμίων (g)			Φαινόμενη Πυκνότητα	Ανοικτό πορώδες
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm ³)	Φωτογραφία	m _d	m _s	m _b	(Kg/m ³)	(% κ.ο.)
Δ2 1α	4,520	4,515	7,070	7,083	113,403		318,24	319,29	207,00	2834	0,9
	4,515		7,085								
	4,510		7,095								
Δ2 1β	4,510	4,523	7,215	7,213	115,893		325,21	326,29	211,51	2833	0,9
	4,520		7,220								
	4,540		7,205								
Δ2 1γ	4,500	4,507	6,905	6,903	110,129		310,39	311,43	201,87	2833	0,9
	4,510		6,880								
	4,510		6,925								
Δ2 2α	4,515	4,520	7,125	7,105	114,007		321,03	322,09	208,82	2834	0,9
	4,525		7,085								
	4,520		7,105								
Δ2 2β	4,525	4,518	7,020	6,962	111,613		313,78	314,84	204,09	2833	1,0
	4,515		6,930								
	4,515		6,935								
Δ2 2γ	4,515	4,515	7,140	7,153	114,523		322,02	323,10	209,42	2833	1,0
	4,515		7,165								
	4,515		7,155								
									M.O.	2833	0,9

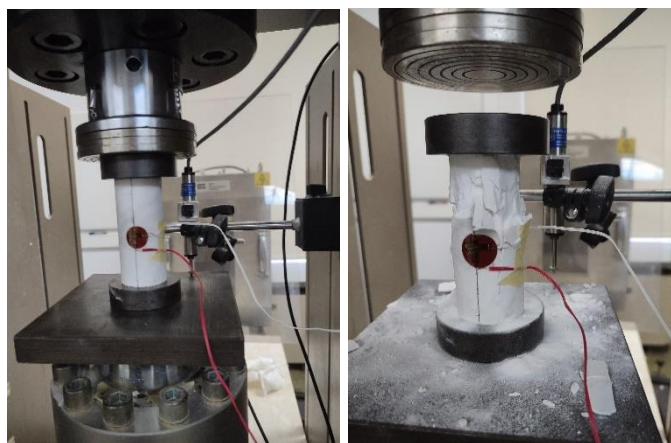
Πίνακας 3:9. Συνολικά αποτελέσματα 3^{ου} ογκοτεμαχίου

Δοκίμια από το τρίτο ογκοτεμάχιο με κωδικό Δ3							Βάρη δοκιμίων (g)			Φαινόμενη Πυκνότητα	Ανοικτό πορώδες
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm³)	Φωτογραφία	m _d	m _s	m _n	(Kg/m³)	(% κ.ο.)
Δ3 1α	4,505	4,512	7,120	7,130	114,003		321,02	322,05	208,58	2829	0,9
	4,515		7,130								
	4,515		7,140								
Δ3 1β	4,515	4,513	7,150	7,143	114,262		321,12	322,14	208,68	2830	0,9
	4,515		7,145								
	4,510		7,135								
Δ3 1γ	4,510	4,512	6,990	7,018	112,213		314,91	315,95	204,66	2830	0,9
	4,515		7,020								
	4,510		7,045								
Δ3 2α	4,510	4,508	6,660	6,688	106,747		300,49	301,55	195,39	2831	1,0
	4,500		6,730								
	4,515		6,675								
Δ3 2β	4,510	4,510	7,250	7,243	115,707		326,33	327,37	212,08	2831	0,9
	4,510		7,235								
	4,510		7,245								
Δ3 2γ	4,500	4,503	7,450	7,460	118,804		333,29	334,36	216,57	2830	0,9
	4,500		7,470								
	4,510		7,460								
									M.O.	2830	0,9

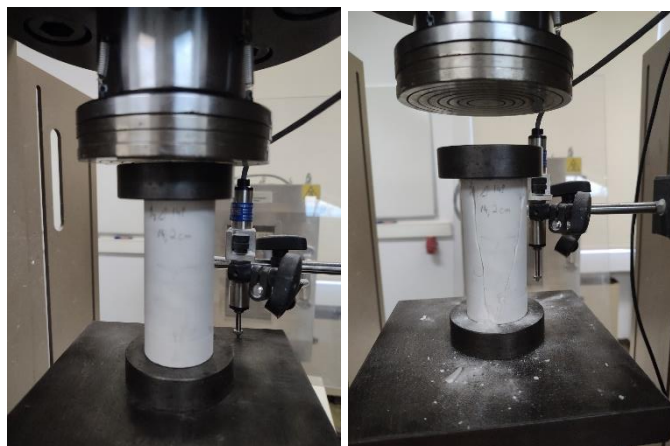
3.5 Μηχανικές ιδιότητες

3.5.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Στα πλαίσια των δοκιμών μονοαξονικής (ανεμπόδιστης) θλίψης δημιουργήθηκαν (18) δοκίμια. Με επεξεργασία των μεταβλητών θραύσης τους υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας του Young, ενώ σε 3 από τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα για τον υπολογισμό του λόγου Poisson. Τα αριθμητικά αποτελέσματα, οι συγκεντρωτικοί πίνακες και τα διαγράμματα της κάθε δοκιμής παραθέτονται στο παράρτημα Α. Με βάση το [Σχήμα 2.4](#), παρατηρείτε πως τα περισσότερα δοκίμια αστόχησαν κυρίως εφελκυστικά (βλ. [Σχήμα 3.8](#)). Ωστόσο, μερικά από τα δοκίμια παρουσίασαν και διατμητική αστοχία τόσο σε ένα αλλά και δύο επίπεδα. (βλ. [Σχήμα 3.9](#)).



Σχήμα 3.8 Δοκίμιο πριν και μετά την αξονική του κατάτμηση



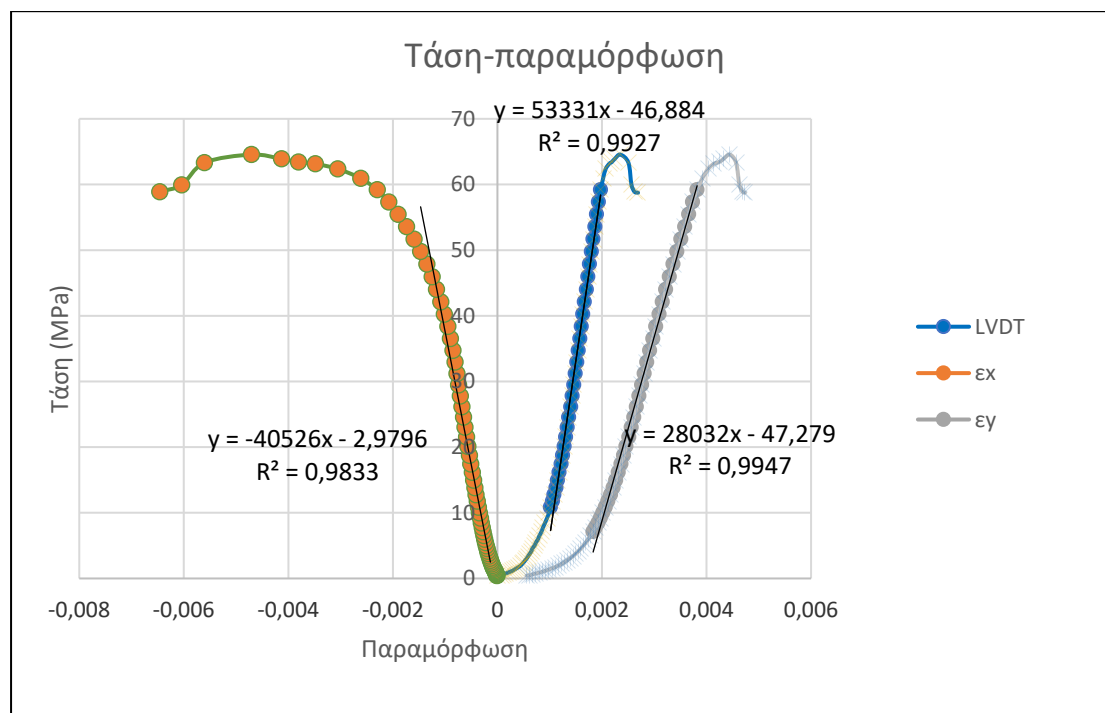
Σχήμα 3.9 Δοκίμιο πριν και μετά την διατμητική του αστοχία σε δύο επίπεδα

Το δοκίμιο των παραπάνω εικόνων είναι το 1Δ2 14° και υπέστη διάτμηση σε δύο επίπεδα όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από τις 2 μη παράλληλες κατά μήκος ρωγμές του. Το δοκίμιο των διπλανών εικόνων είναι το 1Δ2 11° και υπέστη εφελκυστική αστοχία λόγω καλής ομοιογένειας στο εσωτερικό του. Πιο συγκεκριμένα, από τα 18 δοκίμια, και σύγκριση των γεωμετριών θράυσης και με βάση την έρευνα (Basu et al, 2013) προκύπτει πως 11 από αυτά αστόχησαν αξονικά, 4 από αυτά παρουσίασαν διάτμηση σε ένα επίπεδο και 4 διάτμηση σε 2 επίπεδα.

Μετά την λήψη των αποτελεσμάτων του καταγραφικού οργάνου (μετατόπιση και στιγμιαία δύναμη φόρτισης) έγινε αριθμητική επεξεργασία των μεταβλητών με τρόπο που αναγράφεται στην θεωρία της παρούσας έκθεσης. Υπολογίστηκε πως η παρούσα παρτίδα μαρμάρων από το λατομείο της εταιρίας ΑΦΟΙ Δερμιτζάκη στην Καβάλα παρουσιάζει καλές αντοχές για τα δολομιτικά της μάρμαρα. Η μέση μέγιστη αντοχή τους (σ) ανέρχεται στα 112,0 MPa, το μέσο μέτρο ελαστικότητας (E) στα 64,0 GPa ενώ με χρήση των μηχανοσυστημάτων υπολογίστηκε και ο λόγος Poisson ίσος με 0,34. Σύμφωνα με βιβλιογραφία η τιμή 0,34 για τον λόγο Poisson είναι ελαφρώς αυξημένη όσο αναφορά τα δολομιτικά μάρμαρα (Λόγος et al, 2019). Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω ύπαρξης μεμονωμένων μικρορωγμών και μικροδιακλάσεων στη μικροκλίμακα παρόλο που δεν έδειξε κάτι τέτοιο η πετρογραφική εξέταση.

Μια τυπική συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την φόρτιση φαίνεται στο παρακάτω (Σχήμα 3.10) του δοκιμίου 2Δ 2°. Το δοκίμιο δεν παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά σε όλη του την φόρτιση. Αυτό συμβαίνει καθώς στην αρχή της δοκιμής μέρος της φόρτισης απορροφάτε από τα κενά του μικροπορώδους μέχρι αυτά να κλείσουν. Στην συνέχεια ακολουθεί η γραμμική περιοχή από την οποία πάρθηκαν και

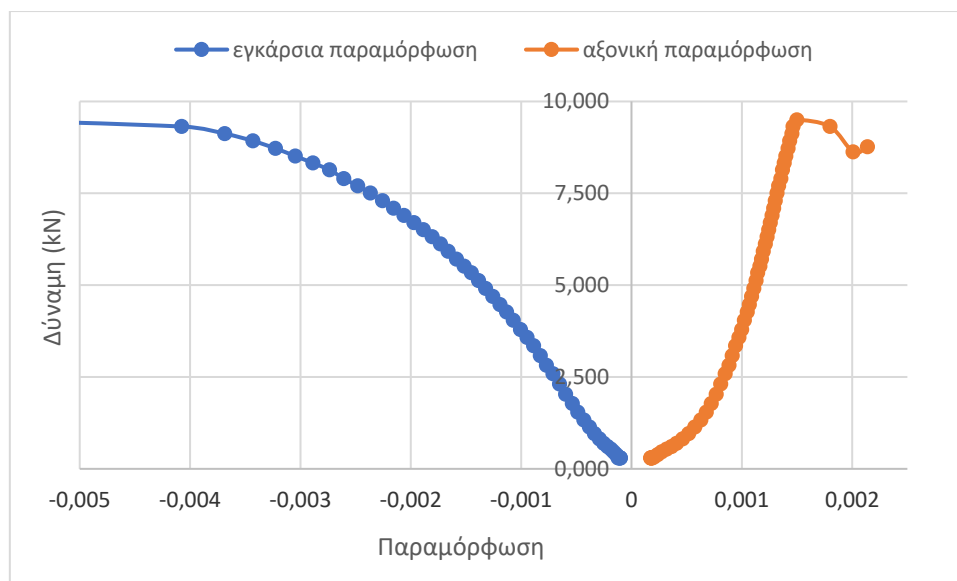
τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας και τέλος, κατά την αστοχία οι τάσεις ξανά χάνουν την γραμμικότητά τους και αρχίζουν την κάθοδο.



Σχήμα 3.10 Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης Δοκιμίου 2Δ 2°

3.5.2 Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

Στα πλαίσια των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (γνωστό και ως πείραμα αντιδιαμετρικής θλίψης) δημιουργήθηκαν (18) δοκίμια με μέση διάμετρο 4,512 cm και μέσο ύψος 2,741 cm. Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν εκρηκτική θραύση με μια κεντρική ρωγμή κατατάσσοντάς τα στην πρώτη περίπτωση της (Σχήμα 2.6α). Με επεξεργασία των μεταβλητών θραύσης τους υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας του Young ενώ σε 3 από τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ηλεκτρικά μινυνσιόμετρα για τον υπολογισμό και του λόγου Poisson. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής του δοκιμίου είναι η εξίσωση (1). Και η τιμή που προέκυψε ανέρχεται στα 5,24 MPa. Στο Σχήμα 3.11 που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά μια τυπική καμπύλη εφελκυστικών τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου 2Δ 4° n3 με τις παραμορφώσεις που καταγράφει το ηλεκτρικό μηχανισμό (strain gauge) βάσει της οποίας έγινε η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας (E) του Young και του λόγου Poisson (ν).



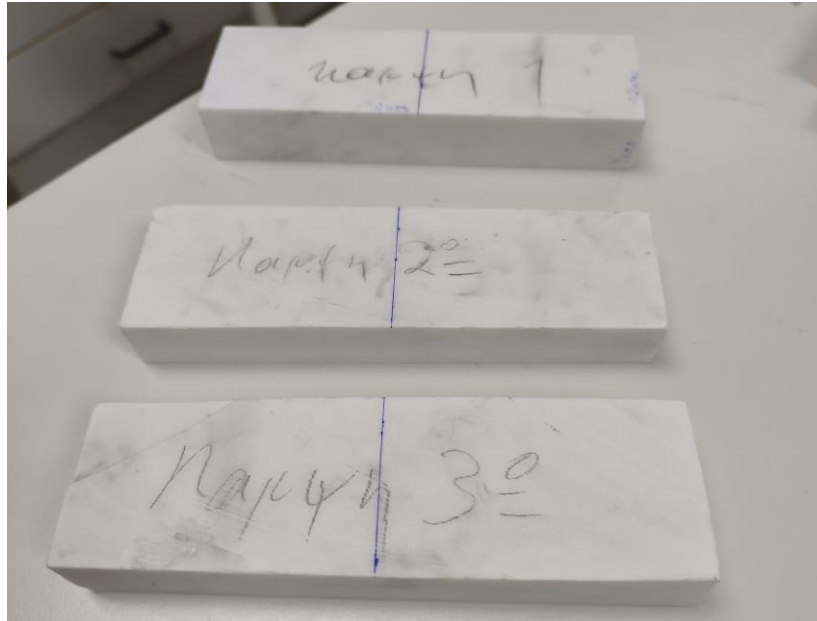
Σχήμα 3.11 Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης για το 2Δ4ο n3 στην δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού

Σημειώνεται πως ο λόγος Poisson για την δοκιμή του έμμεσου εφελκυσμού βρέθηκε αρκετά μεγαλύτερος από τις αναμενόμενες τιμές της βιβλιογραφίας (Lόγό et al, 2019). Αυτό οφείλεται σε ενδεχόμενα σφάλματα των καταγραφών ή στην ανομοιογένεια του υλικού (μικρορωγμές και ανομοιομορφία). Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε ίσο με $E=6.97$ GPa κατά μέσο όρο. Ξανά, τα δοκίμια του 1^{ου} και του 3^{ου} όγκου είχαν παρεμφερή τιμή ίση με 7.3 GPa ενώ το δοκίμιο του 2^{ου} όγκου έριξε τον μέσο όρο με την τιμή ίση με 5,86 GPa.

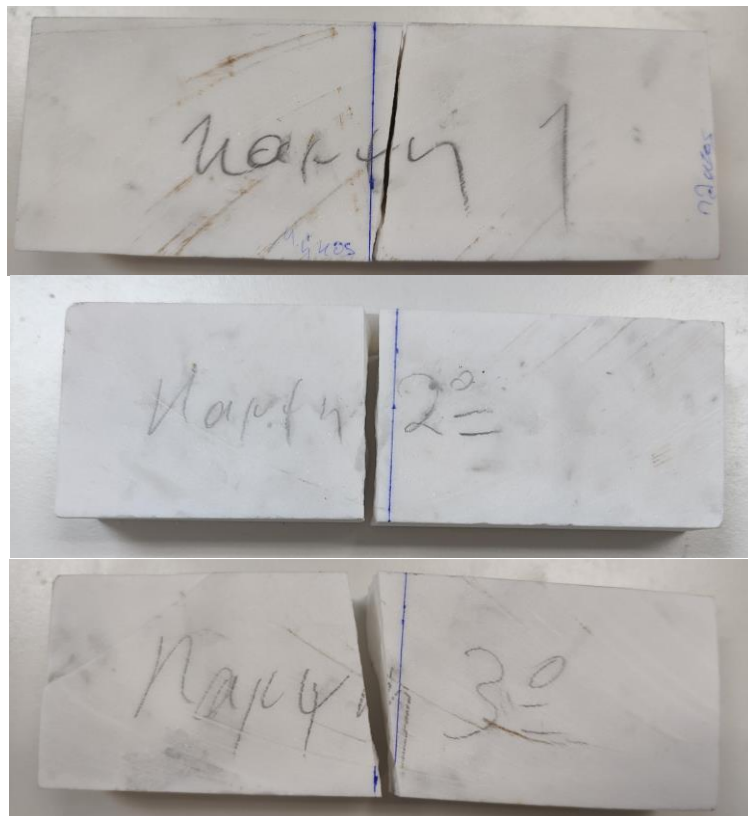
3.5.3 Αντοχή στην κάμψη τριών σημείων

Τα πειράματα προσδιορισμού της αντοχής των μαρμάρων στην κάμψη έγιναν σύμφωνα με το πείραμα της πρισματικής δοκού όπως αναφέρθηκε στην θεωρητική προσέγγιση. Τα πρισματικά δοκίμια που δημιουργήθηκαν ήταν από τα ογκοτεμάχια Δ1 Δ2 και Δ3 αντίστοιχα. Ο μέσος όρος των τιμών της καμπτικής αντοχής και καμπτικής παραμόρφωσης ήταν $\sigma_f = 4,88$ MPa και $\epsilon_f = 0,37$ αντίστοιχα. Επισημαίνεται πως τα πρισματικά δοκίμια του 2^{ου} και του 3^{ου} ογκοτεμαχιδίου παρουσίασαν παρεμφερή τιμές καμπτικής παραμόρφωσης με τιμές 1,2 και 1,7 ενώ μόνο το 1^ο δοκίμιο έδωσε τιμή 8,2. Οι καμπτική αντοχή και στα 3 δοκίμια είχε καλή επαναληψιμότητα και ήταν όμοια με την εφελκυστική αντοχή του πειράματος αντιδιαμετρικής θλίψης.

Παρακάτω, στα [Σχήματα 3.12-3.13](#) παρουσιάζονται τα τρία υπό εξέταση πρισματικά δοκίμια πριν και μετά την θραύση τους. Όπως φαίνεται, και τα τρία δοκίμια έσπασαν σχεδόν κεντρικά και επιπλέον δύο από αυτά παρουσίασαν μια ελαφριά κλίση προς το κέντρο τους.



Σχήμα 3.12 Πρισματικά δοκίμια πριν την κάμψη



Σχήμα 3.13 Πρισματικά δοκίμια μετά την θραύση

3.6 Στατιστική μελέτη αποτελεσμάτων

Στην παρακάτω ενότητα γίνεται μια στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ώστε να προκύψουν αντιπροσωπευτικές τιμές για κάθε ιδιότητα του πετρώματος και να μπορέσει να γίνει μια σύγκριση με πρότυπες τιμές. Πριν από τον υπολογισμό των

στατιστικών ποσοτήτων θα δοθούν κάποιοι ορισμοί για την κατανόηση κάποιων εννοιών.

Για να μην προκύψει ένα τυχαίο σφάλμα, θα υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών από τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο για τις αντοχές και την υδαταπορροφητικότητα των δειγμάτων μαρμάρου (Χριστόπουλος, 2016) Για κάθε σύνολο αποτελεσμάτων υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη:

- **Μέση τιμή:** Η τιμή που αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των μετρήσεων

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

- **Διάμεσος:** Είναι η τιμή εκείνη που χωρίζει την κατανομή σε δύο μέρη που το κατέχουν ισόποσα το 50% της συνολικής πιθανότητας. Παίρνει την τιμή της μεσαίας τιμής στο αύξων ταξινομημένο πλήθος για APTIO πλήθος τιμών και τον μέσο όρο των 2 μεσαίων τιμών για ΠΕΡΙΤΟ πλήθος τιμών.
- **Τυπική απόκλιση:** Είναι η τετραγωνική ρίζα της διασποράς και προσδιορίζει ποσοτικά την απόκλιση της κατανομής από τη μέση τιμή της.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

- **Συντελεστής ασυμμετρίας:** Ο συντελεστής ασυμμετρίας είναι στατιστικό μέτρο που εκφράζει το βαθμό συμμετρίας της κατανομής ενός συνόλου δεδομένων γύρω από τη μέση τιμή. Οι τιμές κοντά στο μηδέν υποδεικνύουν κατανομή παρόμοια με την κανονική κατανομή, υψηλές τιμές υποδεικνύουν ουρά προς τα δεξιά και αρνητικές ουρά προς τα αριστερά.

$$\alpha^3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (9)$$

Χρησιμοποιείται για να φανεί αν μια ιδιότητα (π.χ. αντοχή) εμφανίζει μεροληψία προς υψηλές ή χαμηλές τιμές, κάτι που μπορεί να σχετίζεται με φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού/δείγματος.

- **Συντελεστής κύρτωσης :** Ο συντελεστής κύρτωσης εκφράζει το σχήμα της κορυφής της κατανομής σε σχέση με την κανονική κατανομή. Τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν κύρτωση παρόμοια της κανονικής κατανομής, Κατανομές με θετικές τιμές ονομάζονται λεπτοκυρτικές και υποδηλώνουν μυτερή κορυφή με ουρές ενώ κατανομές με αρνητικές τιμές λέγονται πλατυκυρτικές και δείχνουν πιο επίπεδη κορυφή με τιμές κατανεμημένες γύρω από τον μέσο όρο. (Χριστόπουλος, 2016)

$$\alpha^4 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3 \quad (10)$$

Ο συντελεστής κύρτωσης βοηθάει τον έλεγχο της στατιστικής ανάλυσης ανιχνεύοντας ακραίες τιμές ή συγκεντρώσεις δεδομένων που μπορεί να είναι ενδείξεις σφαλμάτων που επηρεάζουν την στατιστική αξιολόγηση και ερμηνεία του δείγματος. Κανονικά ο συντελεστής κύρτωσης βγάζει κανονικό αποτέλεσμα 3 αφαιρείται από τον τύπο ώστε το αποτέλεσμα να είναι πιο κατανοητό γύρω από το μηδέν.

- **Ελάχιστη και μέγιστη τιμή:** Τα άκρα της παρατηρούμενης κατανομής.

Τα παραπάνω στατιστικά μεγέθη υπολογίστηκαν για τις τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων αυτών, της αντοχής σε εφελκυσμό, της αντοχής σε κάμψη και του ποσοστού υδατοαπορρόφησης

Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται αριθμητικά στον παρακάτω [Πίνακα 3.11](#). Ο συντελεστής κύρτωσης για την δοκιμή της κάμψης δεν μπορεί να υπολογιστεί καθώς έχει πλήθος τιμών 3 και χρειάζεται πλήθος μεγαλύτερο του 4.

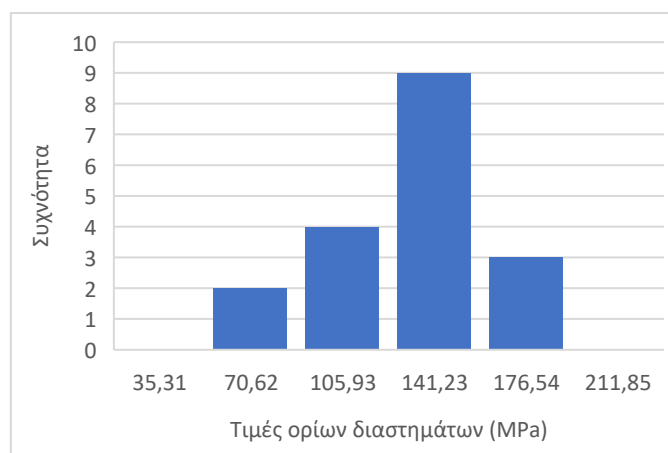
Πίνακας 3:10. Τιμές στατιστικής επεξεργασίας μηχανικών ιδιοτήτων

	Μέση τιμή	Διάμεσος	Τυπική Απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Συντελεστής ασυμμετρίας	Συντελεστής κύρτωσης
Μονοαξονική	112,01	116,85	26,44	53,60	154,30	-0,52	0,17
Μέτρο Ελαστικότητας	64201,21	65000,35	9046,42	47586,75	81956,84	-0,17	-0,02
Έμμεσος εφελκυσμός	5,24	5,30	1,19	2,45	7,46	-0,34	0,71
Κάμψη	4,88	5,05	0,92	3,68	5,91	-0,66	-----
Υδατοαπορρόφηση	0,19	0,31	0,15	0	0,33	-0,49	-1,98

Επίσης, παραθέτονται και ερμηνεύονται παρακάτω 3 ιστογράμματα (Αντοχής στην θλίψη, Μέτρου ελαστικότητας και Έμμεσου εφελκυσμού). Για τον οριζόντιο άξονα (Δηλ. Τα όρια διαστημάτων) χρησιμοποιήθηκε η εξ. (11) όπου S η τυπική απόκλιση και n το πλήθος των τιμών.

$$\text{Διάστημα} = \frac{3,5 \cdot S}{\sqrt[3]{n}} \quad (11)$$

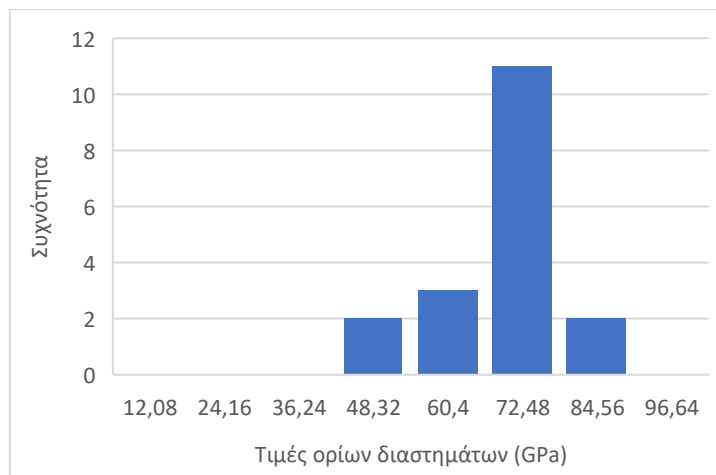
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.14, οι περισσότερες τιμές αντοχής κυμαίνονται γύρω από τα 141 MPa, δείχνοντας ότι το μάρμαρο έχει γενικά υψηλή και ομοιογενή θλιπτική αντοχή.



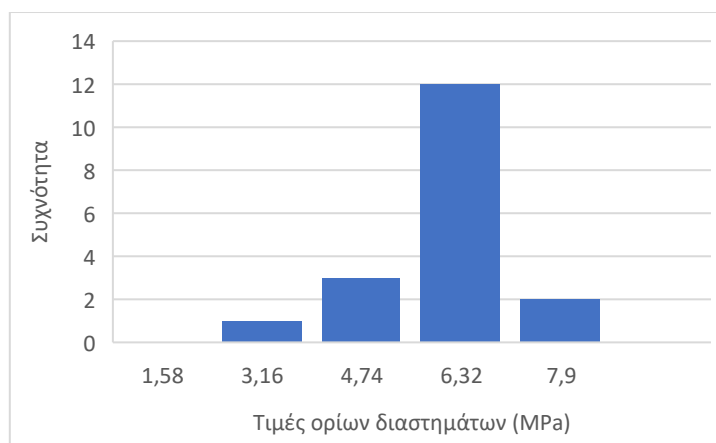
Σχήμα 3.14. Ιστογράμμα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής

Η ερμηνεία τώρα του ιστογράμματος (Σχήμα 3.15) για το μέτρο ελαστικότητας από το πείραμα της μονοαξονικής θλίψεως, δείχνει μεν μια αναλογία προς την κανονική κατανομή με τις περισσότερες τιμές να βρίσκονται λίγο πάνω από την μέση τιμή και ταυτόχρονα επιβεβαιώνει την ελαφρώς αρνητική τιμή (-0,17) του συντελεστή

ασυμμετρίας με ελαφριά ουρά προς τα αριστερά. Ακριβώς η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση του [Σχήματος 3.16](#) για τον έμμεσο εφελκυσμό.



Σχήμα 3.15 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας



Σχήμα 3.16. Ιστόγραμμα αντοχής έμμεσου εφελκυσμού

Με βάση τα αποτελέσματα των στατιστικών μεγεθών προκύπτει πως υπάρχει σχετική ομοιογένεια στις τιμές με ελαφρώς μεγαλύτερη συγκέντρωση προς υψηλότερες τιμές. Παρατηρείται σχετικά μέτρια προς κακή επαναληψιμότητα στις τιμές κάτι που υποδηλώνει την παρουσία μικρορωγμών και σχετική ανομοιογένεια. Καθώς όμως οι τιμές βρίσκονται στην ίδια κλίμακα μεγέθους μπορεί να βγει το συμπέρασμα πως η ομοιογένεια των ρωγμών κυμαίνεται σε καλά επίπεδα και κυρίαρχο ρόλο στις διαφορές των ορίων θραύσης των δοκιμίων κατέχει η παρουσία ρωγμών. Για τα δεδομένα της κάμψης, ο μικρός αριθμός δειγμάτων ($n = 3$) καθιστά αβέβαια τα στατιστικά, αν και οι τιμές κινούνται σε λογικά πλαίσια για το είδος του πετρώματος.

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη μαρμάρου από το ενεργό λατομείο της εταιρείας ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗ στην Δράμα. Σκοπός της ήταν ο πλήρης χαρακτηρισμός του πετρώματος μελετώντας μηχανικές (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, αντοχή σε αντιδιαμετρικό εφελκυσμό και αντοχή σε κάμψη), φυσικές ιδιότητες (υδαταπορροφητικότητα, ανοιχτό πορώδες, πυκνότητα και απώλεια πύρωσης) και συνδυασμό με χημικές ορυκτολογικές (ακτινοδιαγράμματα XRD) και πετρογραφικές αναλύσεις.

Από τα αποτελέσματα της πετρογραφικής ανάλυσης προέκυψε πως το δείγμα δεν περιείχε σημαντικές ποσότητες πόρων και ρωγμών καθώς επίσης δεν παρατηρήθηκαν σημάδια αποσάθρωσης. Το δείγμα χαρακτηρίστηκε ως ημίλευκο με ταινιώσεις τεφρής απόχρωσης. Από την χημική ανάλυση παρατηρήθηκε ότι η κύρια περιεκτικότητα ήταν CaO και MgO με περιεκτικότητα από 32-35 % κ.β. και 18-21% κ.β, αντίστοιχα. Η κύρια ορυκτολογική φάση που διαπιστώθηκε από τα ακτινοδιαγράμματα ήταν αυτή του δολομίτη σε ποσοστό 96,55% έτσι το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως δολομιτικό μάρμαρο.

Με την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του φυσικών ιδιοτήτων του μαρμάρου διαπιστώθηκε η μεγάλη πυκνότητα 2832 kg/m^3 , το μικρό πορώδες (0,9% κ.β.) και η μικρή υδαταπορροφητικότητα (0,3% κ.β.) γεγονός που υποδηλώνει την συμπαγή και ομοιόμορφη μορφή του πετρώματος απαλλαγμένη από πόρους και μικρορωγμές όπως παρατηρήθηκε και στην πετρογραφική ανάλυση. Οι παραπάνω τιμές των φυσικών ιδιοτήτων του μαρμάρου το καθιστούν πάρα πολύ καλή επιλογή για χρήση στην διακοσμητική

Από την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος παρατηρήθηκαν ικανοποιητικές τιμές στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, εφελκυσμό και στην κάμψη 3 σημείων με τις τιμές να υπολογίστηκαν σε 112,0 MPa, 5,24 MPa και 4,88 MPa αντίστοιχα. Ο λόγος Poisson που προσδιορίστηκε από τις δοκιμές ήταν πολύ μεγάλος γεγονός που υποδηλώνει κάποιες μικρορωγμές στο εσωτερικό του πετρώματος που δεν παρατηρήθηκαν όμως με καμία από τις προηγούμενες μεθόδους.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Basu, A., Mishra, D.A. & Roychowdhury, K. (2013). Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. *Bull Eng Geol Environ*, **72**, 457–475. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0505-4>

Badouna, I., Koutsovitis, P., Karkalis, C., Laskaridis, K., Koukouzas, N., Tyrologou, P., Patronis, M., Papatrechas, C., & Petrounias, P. (2020). Petrological and Geochemical Properties of Greek Carbonate Stones, Associated with Their Physico-Mechanical and Aesthetic Characteristics. *Minerals*, **10**(6), 507. <https://doi.org/10.3390/min10060507>

Castro, J., Justo, J., Olson, M. H., & Miranda, M. (2024). Tensile strength of rocks: comparison of different testing methods. *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society* (pp. 1517–1520). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-279>

Fakir, M., Ferentinou, M., & Misra, S. (2017). An Investigation into the Rock Properties Influencing the Strength in Some Granitoid Rocks of KwaZulu-Natal, South Africa. *Geotechnical and Geological Engineering*, **35**(3), 1119–1140. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0168-1>

Lógó, B. A., & Vászárhelyi, B. (2019). Estimation of the Poisson's Rate of the Intact Rock in the Function of the Rigidity. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.14946>.

Triantafyllou, G., Přikryl, R., Repouskou, E., & Markopoulos, Th., (2010). Mineralogical and Microstructure Characterization of a Neogene Natural Building Limestone from Western Crete. *XIX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association*, p. 397-398.

Wang, Q.-Z. (1998). Stress intensity factors of the ISRM suggested CCNBD specimen used for mode-I fracture toughness determination. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**(7), 977–982. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00010-2)

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γκαμαλέτσος, Π., (2022). Εισαγωγή-Συστηματική Ταξινόμηση των Ορυκτών. *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείου Κρήτης*

Κουκής, Γ. &, Σαμπατακάκης Σ.Ν., (2002). Τεχνική Γεωλογία, ,2η ΕΚΔΟΣΗ, Παπασωτηρίου.

Λάμπου, Μ. και άλλοι, (2024). Μεταλλευτική και Λατομική Δραστηριότητα. Αθηνά: τμήμα Ανάπτυξης και Ανάλυσης. Ετήσια έκθεση ΥΠΕΝ. Ανάκτηση από <http://www.latomet.gr/ypan/Hypertrak/BinaryContent.aspx?pagenb=28211>

Στέφανος Κ., (2017). *Μηχανική II – Αντοχή Υλικών*. Πανεπιστημιακές Διαλέξεις, Δημοκρίτειο πανεπιστήμιο Θράκης. Ανάκτηση από https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TME266/strength-01_2017-updtd.pdf

Τσιραμπίδης, Ε.Α., (1996). Τα Ελληνικά Μάρμαρα και Άλλα Διακοσμητικά Πετρώματα. Θεσσαλονίκη. *University Studio Press*.

Χριστόπουλος, Δ.Θ., (2016). Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Ανάκτηση από https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP139/Probability_Statistics_2016.pdf

Ηλεκτρονικές Πηγές

Etymonline-Marble. (30/12/2024) Ανάκτηση από https://www.etymonline.com/word/marble?utm_source=chatgpt.com

King, H. M. (30/12/2024). A non-foliated metamorphic rock formed when limestone is altered by heat and pressure. *Geology.com*. Ανάκτηση από https://geology.com/rocks/marble.shtml?utm_source=chatgpt.com

Stone news. (30/12/2024). The Greek Marble Industry: A Strategic Pillar of Growth and Export Excellence. *Stone news*. Ανάκτηση από <https://stonenews.eu/the-greek-marble-industry-a-strategic-pillar-of-growth-and-export-excellence/>

Παγκόσμιο Ινστιτούτο ελληνικού πολιτισμού. (30/12/2024). Η γεωλογική ιστορία της Ελλάδος. *ΕΛΞΕΥΣΙΣ*. Ανάκτηση από <https://www.elxefsis.com/index.php/el/perivallon/163-gewlogia>