



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

**Μηχανικός και Ορυκτολογικός Χαρακτηρισμός
Μαρμάρου από τον Δήμο Γορτύνης**



Διπλωματική Εργασία

Χαμάκος Στέφανος

Εξεταστική Επιτροπή:

Ξηρουδάκης Γ., Επικ. Καθηγητής (επιβλέπων),
Γκαμαλέτσος Πλ., Επικ. Καθηγητής
Σαράτσης Γ., ΕΔΙΠ

Χανιά

Φεβρουάριος, 2025

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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. Επίσης σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία υποβάλλεται σε αξιολόγηση και οι απόψεις που περιέχονται δε σημαίνει αποδοχή των απόψεων της/του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Ευχαριστίες

Με τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη και την υψηλή εκτίμηση που με διέπει, επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους εκείνους που συνέβαλλαν αποφασιστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Καταρχήν, είναι καθήκον και τιμή μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα επίκ. καθηγητή μου Δρ. Γ. Ξηρουδάκης για την αξιοσημείωτη αφοσίωση, την πολύτιμη καθοδήγηση και την ανεκτίμητη υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής μου προσπάθειας. Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Δρ. Γ. Σαράτσης και επίκ. καθ. Δρ. Πλ. Γκαμαλέτσος για το χρόνο που διέθεσαν. Τέλος, θα ήθελα να ευαρεστήσω την εταιρεία Καμπουράκης Α.Ε. για τη διάθεση των δειγμάτων μαρμάρου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την παροχή αναγκαίων ερευνητικών πόρων, εγκαταστάσεων και ευκαιριών που ενίσχυσαν την επιστημονική μου ανάπτυξη.

Η αμέριστη συμπαράσταση και το ηθικό κουράγιο που μου παρείχαν η οικογένεια και οι φίλοι μου αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο αυτής της επιτυχίας και για αυτό τους είμαι ευγνώμων.

Προπτυχιακός Φοιτητής:

Χαμάκος Στέφανος (ΑΜ: 2018020115)

Φεβρουάριος 2025, Χανιά

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη και τον χαρακτηρισμό του μαρμάρου από την περιοχή της Γόρτυνας, στο Ηράκλειο της Κρήτης. Το συγκεκριμένο μάρμαρο, αν και έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν, δεν έχει μελετηθεί στον ίδιο βαθμό όσο άλλα ελληνικά μάρμαρα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει τα γεωλογικά, ορυκτολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μαρμάρου, ώστε να αξιολογηθεί η ποιότητα και η δυνατότητα για περαιτέρω χρήση του.

Για τη μελέτη του δείγματος πραγματοποιήθηκαν πειράματα με περιθλασιμετρία ακτινών X (PXRD) και η φασματομετρία φθορισμού ακτινών X (XRF), προκειμένου να προσδιοριστεί η χημική και ορυκτολογική του σύσταση. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής δοκιμή θλίψης, δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian Test), καθώς και δοκιμές κάμψεις με εγκοπή. Τα αποτελέσματα για την χημική και ορυκτολογική σύσταση έδειξαν πως το μάρμαρο Γόρτυνας παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη, μικρή παρουσία δολομίτη. Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών ανέδειξαν μέση αντοχή θλίψης από 101,41 - 127,34 MPa και μέση τιμή ενέργειας θραύσης $5,8 \pm 3,3$ kJ/m². Από τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η ποιότητα του μαρμάρου Γόρτυνας.

Η μελέτη φιλοδοξεί να αποτελέσει μια βάση για περαιτέρω έρευνα και αξιολόγηση της περιοχής.

Λέξεις κλειδιά: Μάρμαρο Γόρτυνας Κρήτη, ιδιότητες μαρμάρου, λατομεία μαρμάρου, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

Abstract

This thesis focuses on the study and characterization of marble from the area of Gortyna, in Heraklion, Crete. Although this particular marble has been used in the past, it has not been studied to the same extent as other Greek marbles. The purpose of this thesis is to highlight the geological, mineralogical, and mechanical properties of the marble in order to evaluate its quality and potential for further use.

For the study of the sample, experiments were conducted using Powder X-Ray Diffraction (PXRD) and X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF), in order to determine its chemical and mineralogical composition. To assess the mechanical properties of the marble, uniaxial compression tests, indirect tensile strength tests (Brazilian Test), and notched beam bending tests were performed.

The results of the chemical and mineralogical analyses showed that the Gortyna marble has a high calcite content and a minor presence of dolomite. The mechanical tests revealed an average compressive strength ranging from $101.41 \pm 127,34$ MPa and an average fracture energy of 5.8 ± 3.3 kJ/m². These findings confirm the quality of the Gortyna marble. This study aims to serve as a foundation for further research and evaluation of the area.

Keywords: Gortynis marble, Crete, marble properties, marble quarrying, physical and mechanical properties.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα.....	vi
Κατάλογος Εικόνων.....	viii
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή στο Θέμα	1
1.2 Ερευνητικό Πρόβλημα και Στόχοι	2
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2. Το Μάρμαρο Γόρτυνας.....	5
2.1 Μάρμαρο: Σχηματισμός, Ιδιότητες και Ταξινόμηση	5
2.2 Ιστορικές και Σύγχρονες Χρήσεις του Μαρμάρου στην Ελλάδα	6
2.3 Γεωλογική Επισκόπηση Κρήτης	6
2.4 Μάρμαρο Γόρτυνας: Γεωλογικό Πλαίσιο και Χαρακτηριστικά	7
2.5 Υφιστάμενη Εκμετάλλευση και Εφαρμογές Μαρμάρου Γόρτυνας.....	9
Κεφάλαιο 3. Μέθοδοι Εξερεύνησης Πιθανών Κοιτασμάτων Μαρμάρου	10
3.1 Γεωλογική Χαρτογράφηση και Τηλεπισκόπηση για Εξερεύνηση.....	10
3.2 Βιώσιμη εξόρυξη και περιβαλλοντικοί προβληματισμοί.....	11
3.3 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις εξορύξεις.....	12
3.4 Κατανάλωση Φυσικών Πόρων.....	13
Κεφάλαιο 4. Φυσικοχημικός Χαρακτηρισμός Μαρμάρου	14
4.1 Χημική Ανάλυση των Κύριων Στοιχείων & Ορυκτολογική Σύσταση	14
4.2 Μηχανικές Ιδιότητες	15
4.3 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης	16
4.3.1 Προετοιμασία Δοκιμίων	16
4.3.2 Διαδικασία Δοκιμής.....	18
4.4 Δοκιμή Έμμεσου Εφελκυσμού (Brazilian Test)	23
4.4.1 Σκοπός του Πειράματος.....	23

Περιεχόμενα

4.4.2 Προετοιμασία Δοκιμίων	23
4.4.3 Πειραματική Διαδικασία.....	24
4.4.4 Ενέργεια Θραύσης (Fracture Energy).....	24
4.5 Αντοχή σε Κάμψη με Εγκοπή	25
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	28
Βιβλιογραφία	30
Ελληνική	30
Ξενόγλωσση	30
Πηγές διαδικτύου	32
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Πειραμάτων	34

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1:1: Το Ερεχθείο του Παρθενώνα (Graham, 29/4/2025).</i>	1
<i>Εικόνα 2:1: Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης(χαρτογραφηση ΙΓΜΕ, κλίμακα 1:500000).</i>	
<i>Εντός της έλλειψης φαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος.....</i>	7
<i>Εικόνα 2:2: Η θέση εμφάνισης του γκρι μαρμάρου Γόρτυνας που εντοπίζεται στην περιοχή, νότια της αρχαίας πόλης της Γόρτυνας, στο νομό Ηρακλείου, Κρήτης.</i>	7
<i>Εικόνα 2:3: Τμήμα του τοπογραφικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (Bellas & Keupp, 2017).</i>	9
<i>Εικόνα 4:1: Κυλινδρικό δοκίμιο μαρμάρου για δοκιμή μονοαξονικής θλίψης</i>	17
<i>Εικόνα 4:2:Πυρηνοληψία από “μπαστούνι” μαρμάρου Γόρτυνας.</i>	18
<i>Εικόνα 4:3:Το δοκίμιο λίγο πριν και αμέσως μετά την αστοχία σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....</i>	19
<i>Εικόνα 4:4:Υπολογισμός εφαπτομενικού, μέσου και τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας για το δοκίμιο 1.3</i>	20
<i>Εικόνα 4:5: Υπολογισμός Ενέργειας Θραύσεως.....</i>	21
<i>Εικόνα 4:6: Κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου για δοκιμή Brazil.</i>	23
<i>Εικόνα 4:7: Πριν και μετά την διαδικασία Brazilian για το δοκίμιο 1.6B.</i>	24
<i>Εικόνα 4:8: (Α) Η κάμψη τριών σημείων με εγκοπή, (Β) η κάμψη τριών σημείων με εγκοπή σε ημικυλινδρικό δοκίμιο, (Γ) το πείραμα άμεσου εφελκυσμού σε κυλινδρικό δοκίμιο και (Δ) η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού με δακτύλιο και εγκοπή.</i>	26
<i>Εικόνα 4:9: Ημικυλινδρικό δοκίμιο μαρμάρου για δοκιμή κάμψης με εγκοπή, πριν και μετά την θραύση του</i>	26
<i>Εικόνα Α:1: Πειράματα θλίψης.</i>	34
<i>Εικόνα Α:2: Πειράματα έμμεσου εφελκυσμού.</i>	34

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 4:1: Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων (% κ.β.) των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρου της Γόρτυνας.....</i>	14
<i>Πίνακας 4:2: Ημιποσοτική ορυκτολογική σύσταση των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρων της Γόρτυνας.</i>	15
<i>Πίνακας 4:3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών θλίψεως.....</i>	21

<i>Πίνακας 4:4: Διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπισης για όλα τα δοκίμια εμμέσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής εμβαδόν επιφάνειας θραύσης dh.....</i>	<i>25</i>
<i>Πίνακας 4:5: Αποτελέσματα δοκιμής θραυστομηχανικής.....</i>	<i>27</i>

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στο Θέμα

Το μάρμαρο, είναι ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα το οποίο σχηματίζεται μέσω της μεταμόρφωσης ασβεστόλιθου υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Η κρυσταλλική δομή του μαρμάρου του προσδίδει μια ημιδιαφάνεια που επιτρέπει στο φως να διεισδύσει στην επιφάνειά του, διαποτίζοντάς το με μια φωτεινή ποιότητα που εκτιμάται τόσο από καλλιτέχνες όσο και από αρχιτέκτονες. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητά του στις καιρικές συνθήκες, το έχει παγιώσει σαν ένα από τα σημαντικότερα υλικά στην ανθρώπινη ιστορία.

Από τους μεγαλοπρεπείς ναούς της αρχαίας Ελλάδας μέχρι τα πολυτελή ανάκτορα της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, το μάρμαρο έχει χρησιμεύσει ως απτή έκφραση δύναμης, τέχνης και πολιτιστικής ταυτότητας. Το Ερεχθείο (*Εικόνα 1.1*), ένα διαρκές σύμβολο της κλασικής ελληνικής αρχιτεκτονικής, αποτελεί απόδειξη της διαρκούς γοητείας του πεντελικού μαρμάρου, η παρθένα λευκή του επιφάνεια είναι ένας φάρος διαύγειας και ακρίβειας στον αθηναϊκό ουρανό. Ομοίως, τα εξάισια γλυπτά του Μιχαήλ Άγγελου, λαξευμένα από το θρυλικό μάρμαρο Carrara της Ιταλίας, ενσωματώνουν τις βαθιές συναισθηματικές και καλλιτεχνικές δυνατότητες που ενυπάρχουν σε αυτό το μεταμορφωμένο αριστούργημα.



Εικόνα 1:1: Το Ερεχθείο του Παρθενώνα (Graham, 29/4/2025).

Παρότι η ιστορική σημασία του μαρμάρου είναι δεδομένη, η χρήση του παραμένει σημαντική και στις σύγχρονες εφαρμογές. Η σύγχρονη αρχιτεκτονική και ο σχεδιασμός συνεχίζουν να αγκαλιάζουν τη διαχρονική κομψότητα του μαρμάρου, ενσωματώνοντάς το σε μια ποικιλία εφαρμογών, από δάπεδα και πάγκους μέχρι περίπλοκα μωσαϊκά και γλυπτά. Αυτή η διαρκής ελκυστικότητα πηγάζει όχι μόνον από τις αισθητικές ιδιότητες του μαρμάρου, αλλά και από την εγγενή ανθεκτικότητα, καθιστώντας το ένα υλικό ικανό να μεταβαίνει απρόσκοπτα μεταξύ των παραδοσιακών και μοντέρνων σχεδιαστικών ευαισθησιών.

Η παρούσα εργασία εμβαθύνει στο μάρμαρο Γόρτυνας, μιας ξεχωριστής ποικιλίας που εξορύσσετε στην περιοχή της Γόρτυνας της Κρήτης. Αναγνωρίζοντας την ανάγκη για ενδεδειγμένη εξέταση των χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων αυτού του μαρμάρου, αυτή η διπλωματική εργασία ξεκινά με την ορυκτοχημική ανάλυση, στοχεύοντας στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, ενώ καταγράφει τη γεωλογική προέλευση και προτείνει δυνατότητες μελλοντικών χρήσεων του.

1.2 Ερευνητικό Πρόβλημα και Στόχοι

Παρά την ιστορική του σημασία και τη σύγχρονη χρήση του, το μάρμαρο Γόρτυνας παραμένει σχετικά ανεπαρκώς μελετημένο σε σύγκριση με άλλα ελληνικά μάρμαρα, όπως το Πεντελικό μάρμαρο, το μάρμαρο της Δράμας και της Καβάλας κ.α.. Η έλλειψη ολοκληρωμένης έρευνας του μαρμάρου της Γόρτυνας έχει οδηγήσει σε μια περιορισμένη εικόνα των ιδιοτήτων του, δυσκολεύοντας την κατανόηση και την αξιοποίησή του στο ευρύτερο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής συντήρησης, της επιστήμης των υλικών και της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική καταγραφή της γεωλογικής προέλευσης των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρου Γόρτυνας, καθώς και η πειραματική προσέγγιση του υλικού μέσω της ορυκτοχημικής του περιγραφής, του προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του, καθώς και η αναφορά ιστορικών και σύγχρονων εφαρμογών του και πιθανής μελλοντικής χρήσης του. Αναλυτικότερα, η παρούσα εργασία στοχεύει στα ακόλουθα θέματα:

Παρουσίαση του γεωλογικού πλαισίου του σχηματισμού μαρμάρου Γόρτυνας:

Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει τη μελέτη της γεωλογικής ιστορίας της Κρήτης, με έμφαση στις τεκτονικές και μεταμορφικές διεργασίες που οδηγούν στη δημιουργία των κοι-

τασμάτων μαρμάρου στην περιοχή του Ηρακλείου.. Η ανάλυση αυτή βασίστηκε σε υπάρχοντες γεωλογικούς χάρτες, στρωματογραφικές μελέτες και πετρογραφικές αναλύσεις του μαρμάρου Γόρτυνας και των γύρω σχηματισμών του.

Χαρακτηρισμός της χημικής & ορυκτολογικής σύστασης και προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου Γόρτυνας: Περιλαμβάνει τη χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων, τη μελέτη της ορυκτολογικής του σύστασης και τον προσδιορισμό της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη, της αντοχής σε κάμψη και τον υπολογισμό της θραυστικής στιβαρότητας (κάμψη με εγκοπή).

Εκτίμηση του μελλοντικού δυναμικού και της βιωσιμότητας της εξόρυξης μαρμάρου Γόρτυνας: Περιλαμβάνει τη δυνατότητα χρήσης τεχνικών τηλεπισκόπησης και γεωλογικών μοντέλων για τον εντοπισμό νέων κοιτασμάτων και τη βελτιστοποίηση των πρακτικών εξόρυξης.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται σε πέντε κεφάλαια, στο κάθε κεφάλαιο πραγματεύεται διαφορετικές πτυχές για την μελέτη του μαρμάρου Γόρτυνας. Η διάρθρωση της εργασίας αποσκοπεί στο να καλύψει σφαιρικά το αντικείμενο της ερευνάς, εστιάζοντας τόσο στην γεωλογική προέλευση του και στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του, όσο και στις ιστορικές και σύγχρονες εφαρμογές του, καθώς και τις μελλοντικές προοπτικές βιώσιμης εκμετάλλευσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο της μελέτης, με κύρια έμφαση την σημασία του μάρμαρου ως υλικό, την ιστορική χρήση και τη σύγχρονη σημασία του. Στο τέλος παρουσιάζονται οι στόχοι της εργασίας καθώς και η δομή της εργασίας.

Στο κεφάλαιο δυο, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την γεωλογική φύση και τις ιστορικές εφαρμογές του μαρμάρου Γόρτυνας. Επίσης παρουσιάζεται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της Κρήτης και ειδικότερα της περιοχής της Γόρτυνας.

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στις μεθόδους εξερεύνησης πιθανών κοιτασμάτων μαρμάρου, περιγράφοντας τεχνικές γεωλογικής χαρτογράφησης και τηλεπισκόπησης. Εξετάζονται ζητήματα βιώσιμης εξόρυξης και περιβαλλοντικής διαχείρισης, θέτοντας το θέμα στους ηθικούς περιορισμούς που σχετίζονται με την κατανάλωση φυσικών πόρων και την αποκατάσταση των λατομικών περιοχών.

Στο κεφάλαιο τέσσερα, πραγματοποιείται η εργαστηριακή μέλετη του μαρμάρου Γόρτυνας. Αρχικά παρουσιάζεται η χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων μέσω της φασματομετρίας ακτινών X φθορισμό (μέθοδος XRF), καθώς και η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων με τη μέθοδο περίθλασης ακτινών X (μέθοδος PXRD). Στη συνέχεια, εξετάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του μετρώματος μέσω μια σειρά από δοκιμές, μονοαξονικής θλίψης, δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού και κάμψη με εγκοπή. Η παρουσίαση των πειραμάτων συνοδεύονται από αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας, καταγραφή και σχολιασμό των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και αξιοποίηση του μαρμάρου Γόρτυνας. Συνοψίζοντας τα κύρια ευρήματα, ενώ διατυπώνονται σκέψεις για τη βιώσιμη χρήση και περαιτέρω διερεύνηση των κοιτασμάτων στην περιοχή.

Κεφάλαιο 2. Το Μάρμαρο Γόρτυνας

2.1 Μάρμαρο: Σχηματισμός, Ιδιότητες και Ταξινόμηση

Το μάρμαρο είναι ένα πέτρωμα περιοχικής μεταμόρφωσης ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων, το οποίο σχηματίζεται αποκλειστικά από ανθρακικά ορυκτά, κυρίως ασβεστίτη και δολομίτη (Θεοδωρίκας, 2017). Οι προσμίξεις που υπάρχουν στον ασβεστόλιθο ανακρυσταλλώνονται κατά τη μεταμόρφωση, με αποτέλεσμα την παρουσία ορυκτών προσμίξεων στο μάρμαρο. Τα πιο κοινά ορυκτά τον γραφίτη, τον σιδηροπυρίτη, τον χαλαζία, τη μαρμαρυγία και τα οξείδια του σιδήρου. Σε επαρκείς ποσότητες, αυτές οι προσμίξεις μπορούν να επηρεάσουν την υφή και το χρώμα του μαρμάρου (Bonewitz, 2008).

Οι διακριτικές ιδιότητες του μαρμάρου, συμπεριλαμβανομένης της σκληρότητας, της αντοχής και της ικανότητάς του να γυαλίζει, είναι άμεσο αποτέλεσμα της μεταμορφικής προέλευσής του (Siegesmund & Török, 2011). Η ανακρυστάλλωση κόκκων ασβεστίτη ή δολομίτη κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του μαρμάρου οδηγεί σε μια πιο συμπαγή και αλληλένδετη υφή, η οποία συμβάλλει στην ενισχυμένη αντοχή του πετρώματος στις καιρικές συνθήκες (Karaca, Hacimustafaoğlu, & Gökçe, 2015). Αυτές οι ιδιότητες έχουν κάνει το μάρμαρο ένα περιζήτητο υλικό για αρχιτεκτονικές και γλυπτικές εφαρμογές σε όλη την ιστορία (Attanasio, Brilli, & Ogle, 2006).

Η όψη του μαρμάρου είναι εξίσου σημαντική, με τη μεγάλη γκάμα χρωμάτων, σχεδίων και υφών. Η ποικιλόμορφη εμφάνιση του επηρεάζεται από την παρουσία βοηθητικών ορυκτών, όπως ο χαλαζίας και τα οξείδια του σιδήρου, καθώς και η αρχική σύσταση και ακαθαρσίες του μητρικού πετρώματος (Attanasio, Brilli, & Ogle, 2006).

Η ταξινόμηση του μαρμάρου βασίζεται σε διάφορους παράγοντες, όπως το χρώμα, την υφή, το μέγεθος των κόκκων και τη συστασή του. Τα δολομιτικά μάρμαρα, που σχηματίζονται από μητρικά πετρώματα πλούσια σε δολομίτες, είναι γενικά λευκά ή γκρίζα. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά στο μάρμαρο, όπως το μέγεθος και η διάταξη των κόκκων, παίζουν επίσης ρόλο στην ταξινόμηση και την καταλληλότητά του για διαφορετικές εφαρμογές (Attanasio, Brilli, & Ogle, 2006).

2.2 Ιστορικές και Σύγχρονες Χρήσεις του Μαρμάρου στην Ελλάδα

Οι ιστορικές και σύγχρονες χρήσεις του μαρμάρου στην Ελλάδα δείχνουν τη διαχρονική του σημασία ως υλικό που εκφράζει την πολιτιστική ταυτότητα, τα καλλιτεχνικά επιτεύγματα και τη συμβολή του στην οικονομία της χώρας. Από τα εμβληματικά μνημεία της αρχαιότητας μέχρι τις σύγχρονες εφαρμογές στην αρχιτεκτονική και την τέχνη (Παρθενώνα, η Αφροδίτη της Μήλου και η Φτερωτή Νίκη της Σαμοθράκης), το μάρμαρο συνεχίζει να διαμορφώνει το ελληνικό τοπίο. Στην αρχαία Ελλάδα, το μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε εκτενώς για την κατασκευή ναών, δημόσιων κτιρίων και άλλων μνημειακών κατασκευών. Όπως θα δείξουν οι επόμενες ενότητες, το μάρμαρο Γόρτυνας της Κρήτης αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της πλούσιας παράδοσης, με τα μοναδικά γεωλογικά χαρακτηριστικά και τις ποικίλες εφαρμογές του (Αρχαίο Θέατρο της Γόρτυνας) που συμβάλλουν στη συνεχιζόμενη ιστορία του μαρμάρου στην Ελλάδα.

2.3 Γεωλογική Επισκόπηση Κρήτης

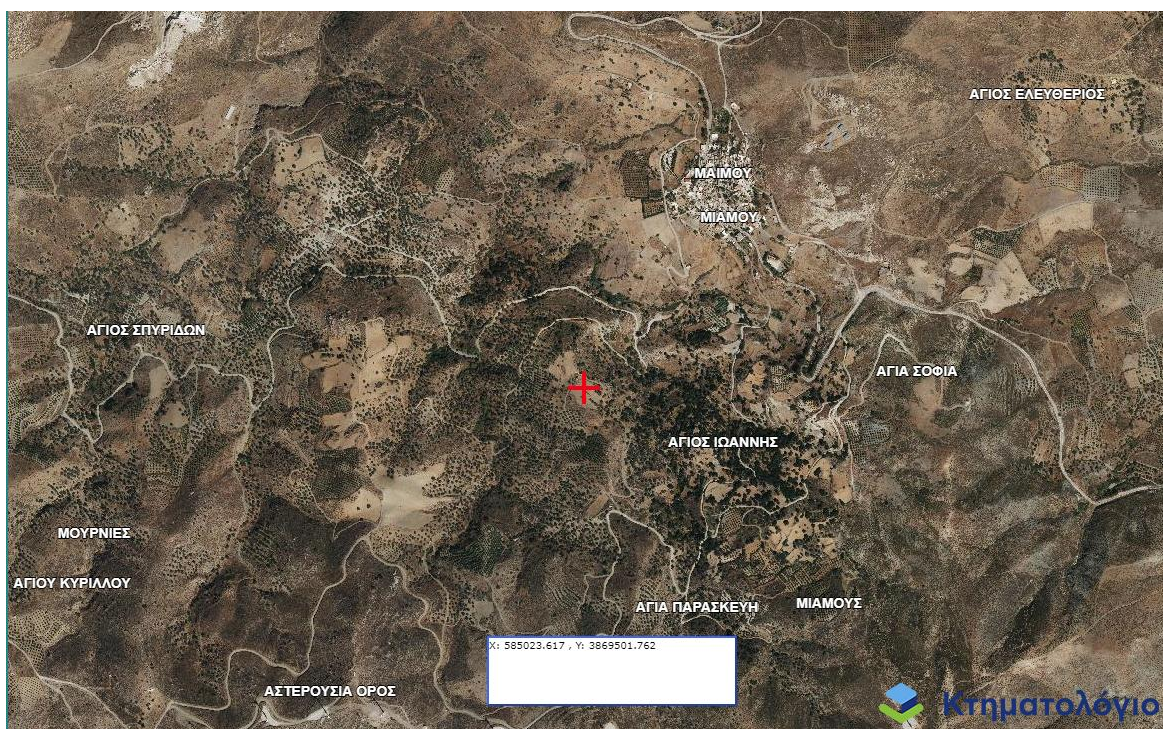
Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από τα διαφορετικά τοπία και τους πλούσιους ορυκτούς της. Η γεωλογία του νησιού χαρακτηρίζεται από ένα μωσαϊκό πετρωμάτων, που κυμαίνονται από αρχαίες μεταμορφωτικές και ιζηματογενείς ενότητες έως πιο πρόσφατες ηφαιστειακές και προσχωσιγενείς αποθέσεις (Fasoulas, 2001). Αυτή η γεωλογική πολυπλοκότητα προέρχεται από την τεκτονική δραστηριότητα, των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας και των διαβρωτικών διεργασιών που έχουν σμιλέψει το νησί για εκατομμύρια χρόνια (Meulenkamp, Dermitzakis, Georgiadou, Jonkers, & Böger, 1988). Στην Κεντρική Κρήτη, που αποτελεί και την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης, η γεωλογική πολυπλοκότητα αποτυπώνεται εντονότερα μέσα από την παρουσία διαδοχικών τεκτονικών ενοτήτων, όπως οι Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι και οι Φυλλίτες-Χαλαζίτες. Η αλληλεπίδραση μεταξύ τεκτονικών ωθήσεων, μεταμορφωτικών διεργασιών και της υποβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική έχει διαμορφώσει το σημερινό γεωλογικό ανάγλυφο της περιοχής. (Papanikolaou, 2021).

Συμπερασματικά, η γεωλογική επισκόπηση της Κρήτης αποκαλύπτει μια πολύπλοκη και δυναμική ιστορία που οδήγησε σε μια ποικιλία από βραχώδεις σχηματισμούς, δομικά χαρακτηριστικά και ορυκτές πηγές. Η κατανόηση αυτού του γεωλογικού πλαισίου είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων και των φυσικών πόρων του νησιού, όπως το μάρμαρο Γόρτυνας (Εικόνα 2.1), το οποίο θα διερευνηθεί λεπτομερέστερα στις επόμενες ενότητες αυτής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.



Εικόνα 2:1: Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης (χαρτογραφηση ΙΓΜΕ, κλίμακα 1:500000). Εντός της έλλειψης φαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος

Τέλος, η γεωλογική εμφάνιση (outcropping) του γκρίζου μαρμάρου Γόρτυνας βρίσκεται στην περιοχή του Μιαμού, η οποία βρίσκεται 12 χιλιόμετρα νότια της αρχαίας πόλης της Γόρτυνας, στο νομό Ηρακλείου της Κρήτης, Ελλάδα (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2:2: Η θέση εμφάνισης του γκρι μαρμάρου Γόρτυνας που εντοπίζεται στην περιοχή, νότια της αρχαίας πόλης της Γόρτυνας, στο νομό Ηρακλείου, Κρήτης.

2.4 Μάρμαρο Γόρτυνας: Γεωλογικό Πλαίσιο και Χαρακτηριστικά

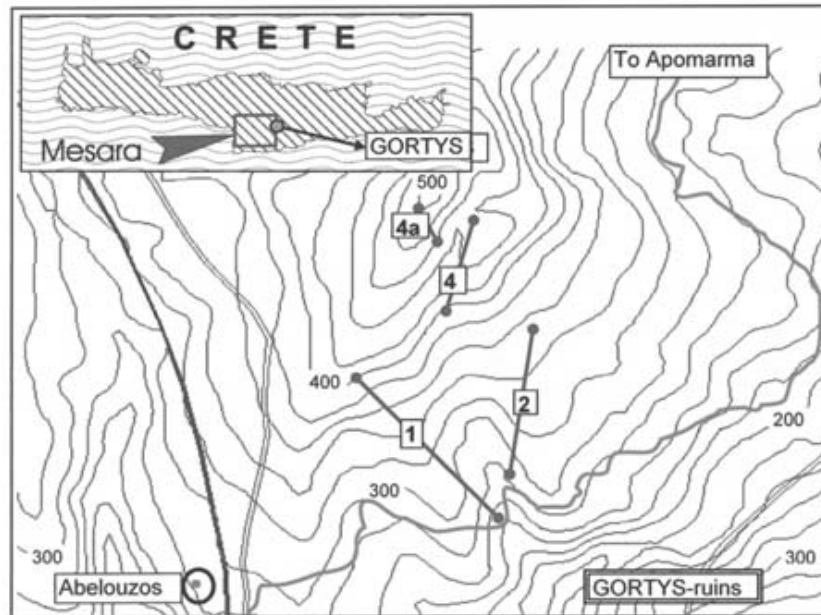
Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στη Γόρτυνα της Κεντρικής Κρήτης, εντός της λεκάνης της Μεσαράς, και παρουσιάζεται σχηματικά στον τοπογραφικό χάρτη της Εικόνας 2:3. Ο χάρτης αποτυπώνει τις υψομετρικές μεταβολές της περιοχής μέσω ισοϋψών καμπυλών,

που κυμαίνονται από τα 200 έως τα 500 μέτρα. Η διαβάθμιση των ισοϋψών φανερώνει την έντονη τοπογραφική διακύμανση, με απότομες κλίσεις να χαρακτηρίζουν τη μορφολογία του εδάφους.

Το μάρμαρο Γόρτυνας, μια πολύτιμη και ξεχωριστή ποικιλία του μεταμορφωμένου βράχου, πήρε το όνομά του από την περιοχή καταγωγής του στο δήμο Γορτυνίας της Κρήτης. Ένα από τα πιο εντυπωσιακά χαρακτηριστικά του μαρμάρου Γόρτυνας είναι η χαρακτηριστική του εμφάνιση, που χαρακτηρίζεται από λευκό έως ανοιχτό γκρι φόντο με προεξέχουσες σκούρες γκρι έως μαύρες φλέβες. Αυτός ο μοναδικός χρωματισμός και το μοτίβο είναι αποτέλεσμα της παρουσίας βοηθητικών ορυκτών, όπως ο γραφίτης και τα οξείδια του σιδήρου, τα οποία υπήρχαν αρχικά στον μητρικό ασβεστόλιθο και έχουν συγκεντρωθεί και ανακαταταξινομηθεί κατά τη διάρκεια της μεταμόρφωσης (Hueston, 29/4/2025).

Όσον αφορά τις φυσικές του ιδιότητες, το μάρμαρο Γόρτυνας παρουσιάζει λεπτόκοκκη έως μέτρια υφή, με συμπλεγμένους κρυστάλλους ασβεστίτη που συμβάλλουν στην αντοχή του. Το μάρμαρο έχει σχετικά χαμηλό πορώδες και υψηλή πυκνότητα, που ενισχύουν περαιτέρω την αντοχή του στις καιρικές συνθήκες και στις μηχανικές καταπονήσεις. Αυτές οι ιδιότητες έχουν κάνει το μάρμαρο μια κατάλληλη επιλογή τόσο για εσωτερικές όσο και για εξωτερικές εφαρμογές, καθώς μπορεί να αντέξει την ακαμψία του χρόνου και την έκθεση στα στοιχεία. (Bigted, 2024).

Στη χημική σύσταση του μαρμάρου Γόρτυνας κυριαρχεί το ασβέστιο (CaCO_3), με μικρές ποσότητες μαγνησίου, σιδήρου και διαφόρων ιχνοστοιχείων. Αυτή η είναι χαρακτηριστική των ασβεστιτικών μαρμάρων.



Εικόνα 2:3: Τμήμα του τοπογραφικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (Bellas & Keupp, 2017).

2.5 Υφιστάμενη Εκμετάλλευση και Εφαρμογές Μαρμάρου Γόρτυνας

Το μάρμαρο Γόρτυνας χρησιμοποιείται συχνά ως υλικό επένδυσης τοίχων σε κατοικίες και εμπορικούς χώρους υψηλής ποιότητας, όπως λόμπι, χώρους υποδοχής και πολυτελή διαμερίσματα, όπου τα μοναδικά μοτίβα και οι ζεστοί, γήινοι τόνοι του δημιουργούν μια αίσθηση κομψότητας (Papadopoulos Marble Granite Stone, 2021). Μια άλλη σημαντική εφαρμογή του μαρμάρου Γόρτυνας είναι στα δάπεδα, όπου χρησιμοποιείται τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Η υψηλή αντοχή στην τριβή και το χαμηλό δυναμικό ολίσθησης του μαρμάρου Γόρτυνας το καθιστούν κατάλληλη επιλογή για χώρους υψηλής κίνησης, όπως εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια και δημόσια κτίρια. Εκτός από τη χρήση του στις κατασκευές και δάπεδα κτιρίων, το μάρμαρο Γόρτυνας βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή σε στοιχεία εσωτερικής διακόσμησης, όπως πάγκοι και διακοσμητικά πάνελ (Μάρμαρα Καμπουράκη Α.Β.Ε.Ε., 2024, Μάρμαρο Γορτύνης).

Κεφάλαιο 3. Μέθοδοι Εξερεύνησης Πιθανών Κοιτασμάτων Μαρμάρου

3.1 Γεωλογική Χαρτογράφηση και Τηλεπισκόπηση για Εξερεύνηση

Η γεωλογική χαρτογράφηση και η τηλεπισκόπηση αποτελούν θεμελιώδεις διαδικασίες στην αναζήτηση και εκμετάλλευση του μαρμάρου, διευκολύνοντας την ακριβή ανάλυση των γεωλογικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε περιοχής.

Γεωλογική Χαρτογράφηση

Η διαδικασία της γεωλογικής χαρτογράφησης αποτελεί μια από τις βασικότερες τεχνικές αναγνώρισης και αποτύπωσης της γεωλογικής δομής μιας περιοχής. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη συστηματική συλλογή γεωλογικών δεδομένων από επιτόπιες παρατηρήσεις. Τα δεδομένα που συλλέγονται απεικονίζονται σε γεωλογικούς χάρτες η οποίοι αποτυπώνουν την κατανομή, την έκταση και τα βασικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου ενισχύεται σημαντικά από την χρήση ψηφιακών εργαλείων και γεωχωρικών συστημάτων (GIS), ενώ σύμφωνα με πρόσφατα επιστημονικά δεδομένα, η γεωλογική χαρτογράφηση μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά με τεχνικές τρισδιάστατης γεωλογικής μοντελοποίησης, προκειμένου να γίνει ακριβότερη η αποτύπωση της υπόγειας γεωμετρίας και να βελτιστοποιηθεί η εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η μελέτη (Yang, et al., 2017) για την τρισδιάστατη ανακατασκευή της λιθολογίας και της γεωμετρίας ενός κοιτάσματος.

Τα κύρια βήματα περιλαμβάνουν:

Συλλογή Δεδομένων: Η συλλογή πληροφοριών μέσω επιτόπιων παρατηρήσεων και δειγματοληψίας συμβάλλει στην καταγραφή των γεωλογικών χαρακτηριστικών, όπως οι τύποι πετρωμάτων και οι δομές τους.

Δημιουργία Χαρτών: Οι γεωλογικοί χάρτες απεικονίζουν διάφορα γεωλογικά χαρακτηριστικά, περιλαμβάνοντας ρήγματα και πτυχώσεις που σχετίζονται με την κατανομή του μαρμάρου στην περιοχή.

Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση αξιοποιεί δορυφορικές και εναέριων δεδομένων υψηλής ανάλυσης για την καταγραφή και ανάλυση γεωμορφολογικών και λιθολογικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας. Στην εξερεύνηση μαρμάρου, αυτή η μέθοδος προσφέρει:

Αναγνώριση Γεωλογικών Χαρακτηριστικών: Οι δορυφορικές εικόνες βοηθούν στην αναγνώριση περιοχών που πιθανόν περιέχουν μάρμαρο, επισημαίνοντας χαρακτηριστικά όπως χρώματα και υφές που υποδηλώνουν την παρουσία μαρμάρου.

Αξιολόγηση Τοπογραφίας: Η τηλεπισκόπηση παρέχει δεδομένα για την τοπογραφία και την υποδομή της περιοχής, διευκολύνοντας την εκτίμηση της προσβασιμότητας σε περιοχές εξόρυξης.

Συμπεράσματα

Ο συνδυασμός γεωλογικής χαρτογράφησης και τηλεπισκόπησης είναι καθοριστικός για την αποτελεσματική εξερεύνηση και εκμετάλλευση του μαρμάρου. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν μια συνολική εικόνα που εξασφαλίζει την βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα της εξορυκτικής διαδικασίας (Sikakwe, 2023).

3.2 Βιώσιμη εξόρυξη και περιβαλλοντικοί προβληματισμοί

Η βιώσιμη εξόρυξη και η περιβαλλοντική διαχείριση των πόρων μαρμάρου Ροδόπης είναι καθοριστικής σημασίας για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της βιομηχανίας και την ελαχιστοποίηση του οικολογικού της αποτυπώματος (Melfos & Voudouris, 2016), κάτι αντίστοιχο θα μπορούσε να συμβεί και στο μάρμαρο Γόρτυνας. Η προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του μάρμαρου ως φυσικού πόρου, ενσωματώνοντας οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, συμβάλλει καθοριστικά στη βιώσιμη ανάπτυξη του εξορυκτικού τομέα. Η βελτιστοποίηση των τεχνικών εξόρυξης, η ορθολογική διαχείριση αποβλήτων, η εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η αποκατάσταση των περιοχών εκμετάλλευσης μπορούν να περιορίσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Melfos & Voudouris, 2016). Στην περίπτωση του μαρμάρου Γόρτυνας, εφαρμογή των παραπάνω τεχνικών θα ενισχύσει τη βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης και ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες απαιτήσεις περιβαλλοντικής υπευθυνότητας.

3.3 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις εξορύξεις

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις εξορύξεις θα βοηθήσει όχι μόνο στην πιο αποδοτική λειτουργία της εξόρυξης, αλλά θα μειώσει σημαντικά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Μερικοί τρόποι να επιτευχθεί είναι μέσω των παρακάτω παραδειγμάτων:

- Ηλιακά πάνελ για την τροφοδοσία μηχανημάτων.
- Ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Λύσεις αποθηκεύσεις ενέργειας με την χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ανανεώσιμης ενέργειας για λειτουργική χρήση (MiningWorld, 2024).
- Αποκατάσταση και ανάπλαση του περιβάλλοντος στις περιοχές των λατομείων

Η λατομική δραστηριότητα δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα. Στις ευρύτερες περιοχές που εξορύσσεται μάρμαρο παρατηρείται:

- Σκόνη και θόρυβος εξαιτίας εξορυκτικών δραστηριοτήτων και των φορτηγών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούνται για την διακίνηση του προϊόντος.
- Καταστροφή της πανίδας και της χλωρίδας, κατά την διαδικασία της εξόρυξης παράγονται υπολείμματα δημιουργώντας σωρούς υψηλά σε επίπεδα τοξικότητας, ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα καθώς η πιθανότητα της πλήρους αποκατάστασης είναι πολύ μικρή και γίνεται με αργούς ρυθμούς. (Hatzistathis , Gkanatsas, & Ispikoudis, 1997)
- Μεταβολές στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, στις εξορυκτικές δραστηριότητες δημιουργούνται σημαντικές επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα ενώ ταυτόχρονα διαταράσσουν ουσιαστικά την ισορροπία του υδατικού δυναμικού της περιοχής (Λουλούδης, 1991).

Τρόποι αποκατάστασης των αλλοιώσεων στις εκμεταλλευόμενες περιοχές

- Περιφερειακή δενδροφύτευση κατά την εργασία ώστε να περιορίσει την εξάπλωση τις σκόνη και του θορύβου.
- Γεωργική χρήση.
- Δημιουργία αποθηκών.
- Δημιουργία χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Στόχος της αποκατάστασης των ανενεργών ή εγκαταλελειμμένων λατομείων είναι η επαναχρησιμοποίησή τους, δίνοντας προτεραιότητα στη δημιουργία νέων λειτουργιών

που θα μπορούν να συμβάλλουν στην ευημερία της τοπικής κοινότητας (Αποστολοπούλου, 2017).

3.4 Κατανάλωση Φυσικών Πόρων

Το μάρμαρο θεωρείται μη ανανεώσιμος πόρος, και η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευσή του μπορεί να προκαλέσει ανεπάρκεια για τις μελλοντικές γενιές. Οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα καλούνται ηθικά να υιοθετούν πρακτικές αειφορίας για να περιορίζουν τη σπατάλη των πόρων και να επενδύουν στην αποκατάσταση των εξορυγμένων περιοχών (geology science, 2024).

Κεφάλαιο 4. Φυσικοχημικός Χαρακτηρισμός Μαρμάρου

4.1 Χημική Ανάλυση των Κύριων Στοιχείων & Ορυκτολογική Σύσταση

Για τη χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρου Γόρτυνας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φασματομετρίας των ακτίνων-X φθορισμού (x-ray fluorescence / XRF). Η μέθοδος XRF στηρίζεται στην εκλύομενη ακτινοβολία των ακτίνων-X και η πειραματική της χρήση βασίζεται στον προσδιορισμό χημικής σύστασης των δειγμάτων. Με την βοήθεια του φασματόμετρου Energy Dispersive (ED) S2 Ranger της Bruker AXS καθώς και με τη χρήση της λυχνίας Παλλαδίου (Pd) προσδιορίστηκε η ποσοστιαία σύσταση (% κ.β.) των δειγμάτων σε κύρια στοιχεία. Περαιτέρω, για τον ημιποσοτικό ορυκτολογικό προσδιορισμό των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-X (Powder x-ray diffraction / PXRD). Η μέθοδος PXRD έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης των φάσεων που συνυπάρχουν στα υπό εξέταση δείγματα, με χρήση αντιπροσωπευτικού κονιοποιημένου αρχικού δείγματος. Με τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών, όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-X, οι οποίες προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως (Γκαμαλέτσος, 2024).

Για να προσδιοριστεί η χημική και ορυκτολογική σύσταση από το μάρμαρο που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, εφαρμόστηκε η μέθοδος ED-XRF σε τρία διαφορετικά κομμάτια και προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα των Πινάκων 4.1-4.2.

Πίνακας 4.1: Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων (% κ.β.) των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρου της Γόρτυνας.

Δείγματα	Χημική σύσταση (% κ.β.) των δειγμάτων που αναλύθηκαν									Απόλυτα πόρως
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	
Γ1	54,98	0,94	0,23	0,02	nd	nd	nd	0,02	<0,01	42,49
Γ2	55,31	0,91	0,24	0,01	nd	nd	nd	0,02	<0,01	42,98
Γ3	54,96	1,29	0,60	0,03	0,12	0,03	0,06	0,02	<0,01	42,37
nd: δεν προσδιορίστηκε, λόγω ορίου ανίχνευσης της εφαρμοζόμενης μεθόδου ED-XRF.										

Πίνακας 4:2: Ημιοποσοτική ορυκτολογική σύσταση των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρων της Γόρτυνας.

Δείγματα	Ορυκτές Φάσεις (%)			
	Ασβεστίτης (CaCO ₃)	Δολομίτης CaMg(CO ₃) ₂	Χαλαζίας (SiO ₂)	Πλαγιόκλαστο (Αλβίτης / NaAlSi ₃ O ₈)
Γ1	95,94	3,83	0,23	-
Γ2	96,10	3,66	0,24	-
Γ3	94,75	4,51	0,32	0,42

Όπως προκύπτει από τις αναλύσεις στα δείγματα μαρμάρου, το κύριο οξείδιο που απαντάται σε αφθονία είναι εκείνο το ασβεστίου (CaO), με τα ποσοστά του να κυμαίνονται από 54,96 έως 55,31 % κ.β.). Το οξείδιο του μαγνησίου (MgO) που σχετίζεται με την παρουσία δολομίτη στα δείγματα κυμαίνεται από 0,91 έως 1,29 % κ.β. Τα ποσοστά διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂), που συνδέονται με την παρουσία μικρής ποσότητας χαλαζία στα προς ανάλυση δείγματα, κυμαίνονται από 0,23 έως 0,60 % κ.β. Τα υπόλοιπα κύρια χημικά στοιχεία συμμετέχουν σε σαφώς μικρότερα ποσοστά στη χημική σύσταση των δειγμάτων και οφείλονται σε προσμίξεις (πχ. οξείδια σιδήρου), έως και μη ανιχνεύσιμα (πχ. Al, K και Na για τα δείγματα Γ1 και Γ2). Πρόκειται για συστάσεις μαρμάρων που χαρακτηρίζονται ως ασβεστιτικά μάρμαρα, μιας και η χημική σε συνδυασμό με ορυκτολογική σύσταση αποτελούν βασικές παραμέτρους για τον καθορισμό του εμπορικού τύπου τέτοιων πετρωμάτων. Οι παραπάνω μετρήσεις είναι συγκρίσιμες με τα μάρμαρα Καβάλας, βλ. (Παπουτσή, 2024).

4.2 Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Γόρτυνας, όπως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η αντοχή σε κάμψη και η θραυστική στιβαρότητα (κάμψη με εγκοπή), είναι υψίστης σημασίας όταν εξετάζεται η καταλληλότητά του για διάφορες εφαρμογές στην οικοδομική και αρχιτεκτονική βιομηχανία. Για τον προσδιορισμό των ανωτέρω μηχανικών ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκαν ο κάτωθι εξοπλισμός:

Συσκευή δοκιμής: Η συσκευή πρέπει να διατηρεί σταθερό ρυθμό εφαρμογής δύναμης στο δοκίμιο και να έχει τη δυνατότητα μέτρησης ή καταγραφής τόσο του επιβαλλόμενου φορτίου όσο και των μετακινήσεων των πλακών.

Πλάκες φόρτισης: Οι πλάκες εξασφαλίζουν τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο και απαιτείται να είναι παράλληλες. Αν υπάρχει σφαιρική κεφαλή έδρασης που δεν τηρεί τις προδιαγραφές, πρέπει να αφαιρεθεί ή να στερεωθεί οριζόντια.

Χαλύβδινοι δίσκοι: Οι δίσκοι τοποθετούνται μεταξύ πλακών και δοκιμίου, μειώνοντας τις πλευρικές παραμορφώσεις λόγω τριβής στα σημεία επαφής. Πρέπει να έχουν σκληρότητα μεγαλύτερη από HRC58 και διάμετρο D έως $D + 2 \text{ mm}$. Το πάχος πρέπει να είναι τουλάχιστον 15 mm ή το $1/3$ της διαμέτρου του δοκιμίου, ενώ οι παράλληλες επιφάνειές τους πρέπει να έχουν ανοχή κάτω από 0.005 mm.

Σφαιρική κεφαλή έδρασης: Τοποθετείται στην κορυφή του δοκιμίου, ευθυγραμμισμένη με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Αν η μηχανή δοκιμής δεν διαθέτει τέτοια κεφαλή, τότε απαιτείται να τοποθετηθεί χαλύβδινος δίσκος μ

ε αυτή τη δυνατότητα και να λιπανθεί με ελαφρύ ορυκτέλαιο.

Σιαγόνες φόρτισης: Το δοκίμιο φορτίζεται μέσω δύο χαλύβδινων σιαγόνων, που έχουν σχεδιαστεί ώστε να δέχονται δίσκου σχήματος δοκίμια σε επαφή κατά τόξο 10° τη στιγμή της αστοχίας. Η ακτίνα του τόξου είναι 1.5 φορές η ακτίνα του δοκιμίου, και το πλάτος των σιαγόνων είναι 1.1 φορές το πλάτος του δοκιμίου.

Καταγραφικό όργανο: Για την καταγραφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, προτείνεται η χρήση καταγραφικού οργάνου δύο εισόδων (X-Y recorder).

4.3 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης περιλαμβάνει τη συμπίεση ενός κυλινδρικού δείγματος πετρώματος ανάμεσα σε δύο παράλληλες χαλύβδινες πλάκες και αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πιο διαδεδομένες εργαστηριακές δοκιμές στα πετρώματα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η μονοαξονική ή ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή (UCS), το μέτρο ελαστικότητας, καθώς και ο λόγος Poisson ενός άρρηκτου πετρώματος (Νομικός, 2015). Η μεθοδολογία στοχεύει στον καθορισμό της αντοχής ενός πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη, χρησιμοποιώντας δοκίμια με κανονική γεωμετρία. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών συμβάλλουν στην ταξινόμηση και αξιολόγηση της αντοχής του ακέρατου πετρώματος (Αγιουτάντης, 2019).

4.3.1 Προετοιμασία Δοκιμίων

Για να επιτευχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, απαιτείται σχολαστική διαμόρφωση και προετοιμασία των δοκιμίων (βλ. Εικόνα 4.1). Τα κυλινδρικά δοκίμια πρέπει να διαθέτουν ομοιόμορφη διάμετρο σε όλο το ύψος, απόλυτα επίπεδες και παράλληλες βάσεις, καθώς και ευθεία γενέτειρα.

Τα δοκίμια έχουν κυλινδρικό σχήμα με την διάμετρο να είναι μεγαλύτερη ή ίση με 50 mm και να έχουν ύψος περίπου 2 φορές της τιμής της διαμέτρου.

Οι βάσεις τους πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και ορθογώνιες ως προς τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου.

Οι πλευρές πρέπει να είναι λείες και χωρίς ανωμαλίες.



Εικόνα 4.1: Κυλινδρικό δοκίμιο μαρμάρου για δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Η διαμόρφωση των δοκιμίων γίνεται με κοπή ή/και πυρηνοληψία από κατάλληλα δείγματα πετρωμάτων, που συχνά συλλέγονται σε ακανόνιστα κομμάτια ή πυρήνες από γεωτρήσεις. Για την προετοιμασία δείγματος από ακανόνιστα κομμάτια, αρχικά μειώνεται το μέγεθός τους με υδρόψυκτο τροχό μεγάλης διαμέτρου. Η λήψη κυλινδρικών δοκιμίων πραγματοποιείται με εργαστηριακό γεωτρύπανο που φέρει ειδικό κοπτικό αδαμαντοτροχό, εξασφαλίζοντας τη σωστή περιστροφή και ροπή του κοπτικού άκρου. Παράλληλα, ο εξοπλισμός ψύχεται με νερό, που απομακρύνει τα υπολείμματα κοπής.

Για την ακριβή κοπή των πυρήνων σε συγκεκριμένο μήκος, χρησιμοποιείται υγρόψυκτος αδαμαντοτροχός διαμέτρου 15-20 cm, ο οποίος λειτουργεί συνήθως σε ταχύτητα 800-3000 rpm. Η προώθηση του πυρήνα γίνεται είτε χειροκίνητα είτε μηχανικά (Εικόνα 4.2).

Η τελική προετοιμασία των δοκιμίων ολοκληρώνεται με τη λείανση των επιφανειών τους, ειδικά των βάσεων, για την εξάλειψη ανωμαλιών από την κοπή. Αρχικά, επιδιώκεται η δημιουργία επίπεδων βάσεων και ευθείας γενέτειρας, ενώ η τελική λείανση προσφέρει ομαλή επιφάνεια κατάλληλη για τη δοκιμή θλίψης (Νομικός, 2015).



Εικόνα 4.2: Πυρηνοληψία από “μπαστούνι” μαρμάρου Γόρτυνας.

4.3.2 Διαδικασία Δοκιμής

Οι δοκιμές μονοαξονικής (άλλως ανεμπόδιστης) θλίψης (Uniaxial Compression Strength / UCS) εκτελέσθηκαν σε άκαμπτη μηχανή MTS 815 (Εικόνα 4.3) με δυνατότητα άσκησης φορτίων μέχρι 1600 kN. Εκτελέστηκαν έξι (6) δοκιμές θλιπτικής αντοχής με το πρότυπο EN 1926:2006. Κατά τη δοκιμή των έξι δοκιμών, η καταγραφή της αξονικής μετατόπισης καθ’ όλο το ύψος τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του καταγραφικού κελιού φορτίου της μηχανής και αισθητήρων μετατόπισης τύπου LVDT (Linear Variable Displacement Transducer). Πιο συγκεκριμένα:

- Οι σφαιρικές κεφαλές έδρασης λιπάνθηκαν με ελαφρύ ορυκτέλαιο για να μειωθεί η τριβή.
- Το φορτίο κατά την διαδικασία της δοκιμής επιβλήθηκε σε μη διακοπτόμενο ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0.5-1MPa/s.
- Το μέγιστο φορτίο καταγράφεται με ακρίβεια 1%.

Η διαδικασία για 6 δοκίμια εφαρμόστηκε παίρνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.3 που παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.3: Το δοκίμιο λίγο πριν και αμέσως μετά την αστοχία σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη C_0 : Προκύπτει από την μέγιστη τιμή από το διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης

Αναγωγή αντοχής σε τυποποιημένες τιμές για δοκίμιο

$$C_2 = \frac{C_0}{\frac{7}{8} + \frac{2}{8 \cdot \frac{H}{D}}}$$

Υπολογισμός μέτρων ελαστικότητας $E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$

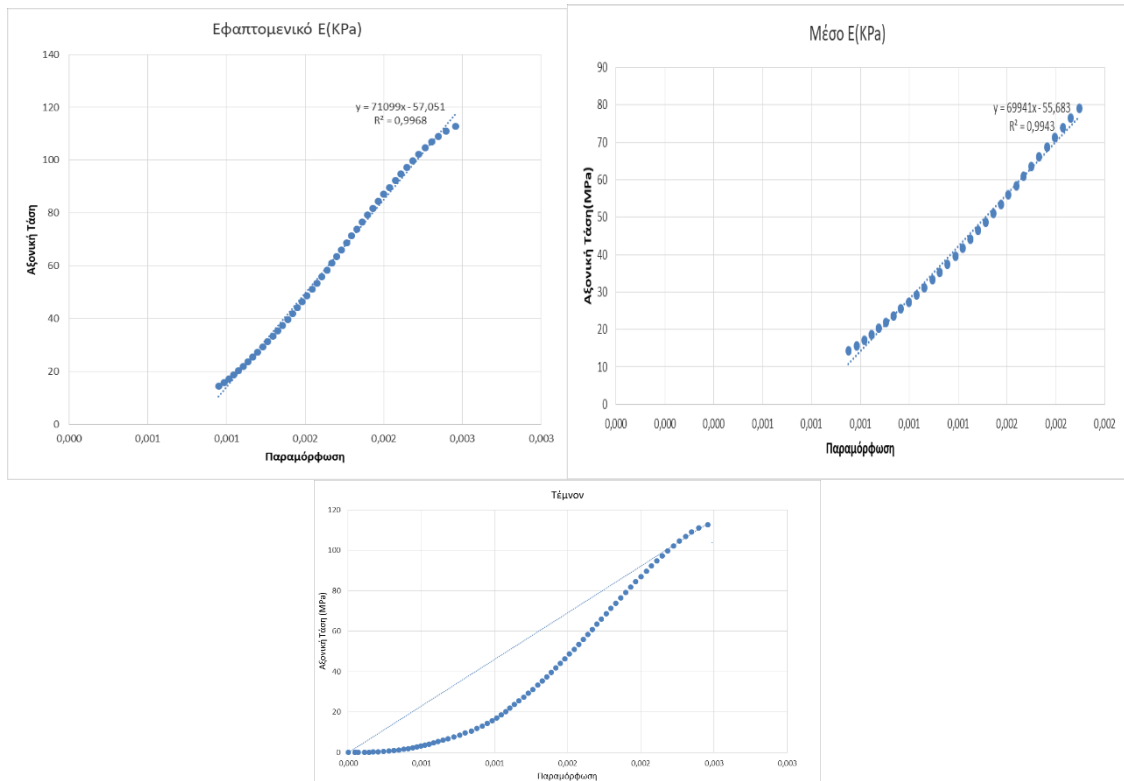
Υπάρχουν τρεις ορισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας:

Εφαπτομενικό E (kPa): Προσδιορίζεται από την εφαπτομένη (κλίση) στο ελαστικό κομμάτι της καμπύλης.

Μέσο E (kPa): Προσδιορίζεται από την βέλτιστη ευθεία του ελαστικού τμήματος της καμπύλης.

Τέμνον E (kPa): Προσδιορίζεται ενώνοντας το σημείο θραύσης με την αρχή των αξόνων.

Στην παρακάτω Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας από την κλίση της καμπύλης στο 50% της αντοχής του μαρμάρου (Εικόνα 4.4α). Αντίστοιχα το μέσο μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης στην ελαστική περιοχή όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4β. Τέλος το τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από το σημείο θραύσης του υλικού (Εικόνα 4.4γ).



Εικόνα 4:4: Υπολογισμός εφαπτομενικού, μέσου και τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας για το δοκίμιο 1.3

Από τα τρία αυτά μέτρα τα πιο αντιπροσωπευτικά της ελαστικής συμπεριφοράς είναι τα δύο πρώτα, καθώς ο τρίτος ορισμός εμπεριέχει και τις αρχικές παραμορφώσεις κατά την φόρτιση του δοκιμίου μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα φόρτισης και να κλείσουν οι πόροι του πετρώματος. Σημειώνεται για την εύρεση του ακριβούς μέτρου ελαστικότητας χρειάζεται η χρήση κύκλων αποφόρτισης, που στην συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιήθηκαν καθώς το συγκεκριμένο υλικό έχει μελετηθεί ως προς τις ιδιότητες του. Τα παρακάτω πειράματα (Πίνακας 4.3) χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση των τιμών αντοχής του μαρμάρου και για την εκτίμηση της ενέργειας θραύσης που μπορεί να συνδεθεί με την θεωρία της θραυστομηχανικής που θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Η ενέργεια που απαιτείται για να σπάσει το δοκίμιο μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου μετατόπισης μέχρι το σημείο θραύσης που στην περίπτωση ψαθυρού γραμμικά ελαστικού υλικού μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$U = \frac{1}{2} \cdot F_{max} \cdot \delta_{max}$$

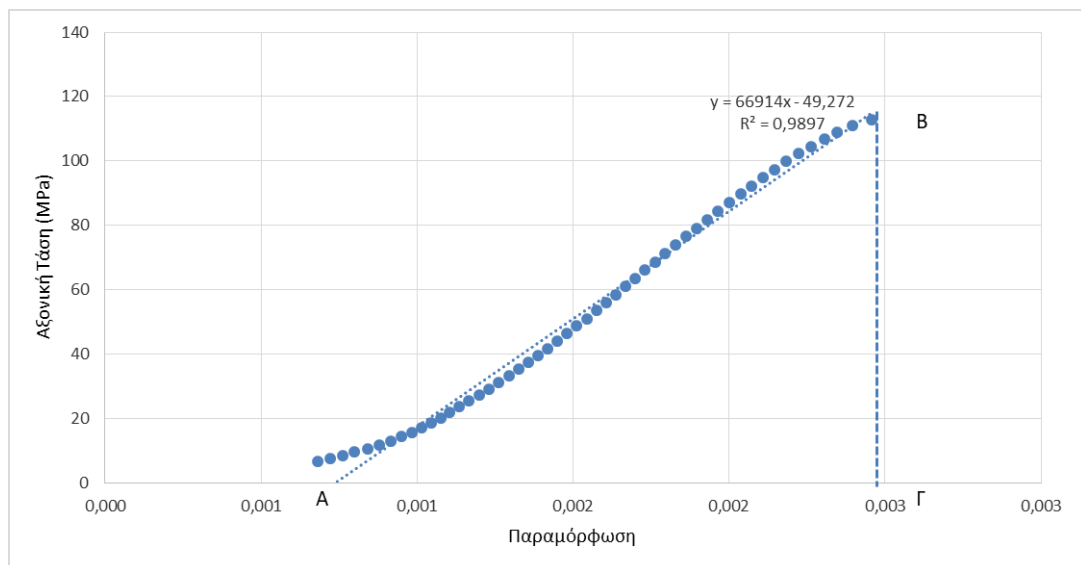
όπου: F_{max} : μέγιστη δύναμη, δ_{max} : μετατόπιση στο σημείο θραύσης.

Στην Εικόνα 4.5 υπολογίζεται η παραμορφωσιακή ενέργεια για το δοκίμιο 1.3. προσεγγίζοντας το εμβαδόν της καμπύλης με το τρίγωνο ABΓ δίδοντας $U = 0,0146 \text{ kJ}$

Στη συνέχεια:

$$G = \frac{U}{A}$$

όπου A είναι η νέα επιφάνεια ρωγμής (συνήθως: μήκος ρωγμής \times πλάτος δοκιμίου). (Χατζηπαναγιώτου, 2010). Στην παρούσα μελέτη τα δοκίμια έσπασαν αξονικά (αξονική κατάτμηση) οπότε η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από την θραύση εκτιμήθηκε από $A = h \cdot d$, όπου h το ύψος και d η διάμετρος του. Για το δοκίμιο 1.3 η επιφάνεια αυτή είναι $A = 0,0019 \text{ m}^2$ που οδηγεί στην ενέργεια θραύσης $G = 7,7 \text{ kJ/m}^2$.



Εικόνα 4:5: Υπολογισμός Ενέργειας Θραύσεως

Πίνακας 4:3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών θλίψεως.

Δοκίμιο	Διάμετρος d (mm)	Υψος h (mm)	C ₀ (MPa)	C ₂ (MPa)	Εφαπτομενικό E (kPa)	Μέσον E (kPa)	Τέμνον E (kPa)	Ενέργεια Θραύσεως (kJ/m ²)
1.3	50,05	99,75	113,29	113,34	63,0	58,8	56,6	7,7
1.5	50,05	98,66	127,34	127,57	69,1	75,3	63,7	4,6
1.8	50,08	98,18	114,60	114,89	81,1	80,1	57,3	3,3
1.10	50,05	99,40	101,95	102,4	60,9	55,2	50,7	3,2
2.3	50,05	97,40	101,41	101,76	62,8	55,6	51,0	4,2
3.2	50,05	96,75	124,52	125,06	73,8	73,8	62,0	11,6
μ±σ			113,85±10,89	114,11±10,96	68,5±7,8	66,5±11,2	56,9±5,4	5,8±3,3

Παρατηρήσεις

Οι τιμές της αντοχής σε θλίψη κυμαίνονται για τα δείγματα μεταξύ 101,41 MPa και 127,34 MPa (C₀) και 102,04 MPa έως 127,57 MPa (C₂), με μέσες τιμές 113,85±10,89

MPa και $114,11 \pm 10,96$ MPa αντίστοιχα. Η διαφορά μεταξύ C_0 και C_2 υποδηλώνει πιθανή ενίσχυση του υλικού ή επιρροή του τρόπου φόρτισης στη μέγιστη αντοχή.

Οι ελαστικές σταθερές E (εφαπτομενικός, μέσος και τέμνων συντελεστής) κυμαίνονται εντός φυσιολογικών ορίων για μαρμάρινα υλικά. Ο εφαπτομενικός E εμφανίζει τιμές από 60,9 έως 81,1 kPa, με μέση τιμή $68,5 \pm 7,8$ kPa, γεγονός που υποδηλώνει μια σχετι-κά μέτρια δυσκαμψία του υλικού. Ο μέσος E ($66,5 \pm 11,2$ kPa) και ο τέμνων E ($56,9 \pm 5,4$ kPa) ακολουθούν αντίστοιχη τάση.

Η ενέργεια θραύσεως, η οποία είναι δείκτης της ικανότητας του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν τη θραύση, παρουσιάζει υψηλή διασπορά. Οι τιμές κυμαίνονται από 3,2 έως 11,6 kJ/m², με μέση τιμή $5,8 \pm 3,3$ kJ/m². Η σημαντική μεταβλητότητα υποδηλώνει πιθανές ανομοιογένειες στη δομή των δειγμάτων, όπως μικρορωγμές, εγκλείσματα ή διαφορές στην κρυσταλλική σύσταση.

Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια ήταν σε συμφωνία μεταξύ τους. Οι μικρές σχετικά τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων οφείλεται σε μικρές διαφορές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων, στις συνθήκες φόρτισης της μηχανής, στο προσανατολισμό των ασυνεχειών ή/και σε μικρά σπασίματα που είχαν δημιουργηθεί κατά την προετοιμασία των δοκιμίων.

Η αστοχία του μαρμάρου έχει παρατηρηθεί σε τέσσερις διακριτές μορφές: α) σε αξονική κατάτμηση, β) σε διατμητική αστοχία, γ) σε άνοιγμα προϋπαρχόντων ασυνεχειών και δ) ολίσθηση σε προϋπάρχον επίπεδο αδυναμίας (Gao, Feng, Wang, & Zhang, 2020). Στην περίπτωση του μαρμάρου που μελετήθηκε παρουσίασε δυο διαφορετικές αστοχίες, θραύση σε αξονική κατάτμηση και εφελκυστική αστοχία όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.3.

Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια ήταν σε συμφωνία μεταξύ τους. Οι μικρές σχετικά τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων οφείλονται σε μικρές διαφορές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων, στις συνθήκες φόρτισης της μηχανής, στο προσανατολισμό των ασυνεχειών ή/και σε μικρά σπασίματα που είχαν δημιουργηθεί κατά την προετοιμασία των δοκιμίων.

4.4 Δοκιμή Έμμεσου Εφελκυσμού (Brazilian Test)

Η αντοχή σε εφελκυσμό κατά με την δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian Test) εκφράζει την ικανότητα ενός πετρώματος να αντέχει δυνάμεις τάνυσης. Αυτή η ιδιότητα είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόκρισης των πετρωμάτων όταν εκτίθενται σε στατικά ή δυναμικά φορτία (Νομικός, 2015).

4.4.1 Σκοπός του Πειράματος

Η μέθοδος του έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian Test) εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής ενός υλικού. Η δοκιμή είναι από τις πιο διαδομένες λόγω της ευκολίας στην προετοιμασία των δοκιμίων καθώς και στην εκτέλεσή της.

4.4.2 Προετοιμασία Δοκιμίων

Η προετοιμασία των κυλινδρικών δειγμάτων έλαβε χώρα στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία (βλ. Εικόνα 4.6):

Διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο μεγαλύτερη ή ίση των 50 mm και πλάτος περίπου ίσο με την ακτίνα.

Τα δοκίμια προετοιμάστηκαν μόνο με νερό στα κοπτικά και λειαντικά εργαλεία.

Οι κυλινδρικές επιφάνειες ήταν λείες και τα άκρα του δοκιμίου διαμορφώθηκαν σε επίπεδες και παράλληλες επιφάνειες.



Εικόνα 4.6: Κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου για δοκιμή Brazil.

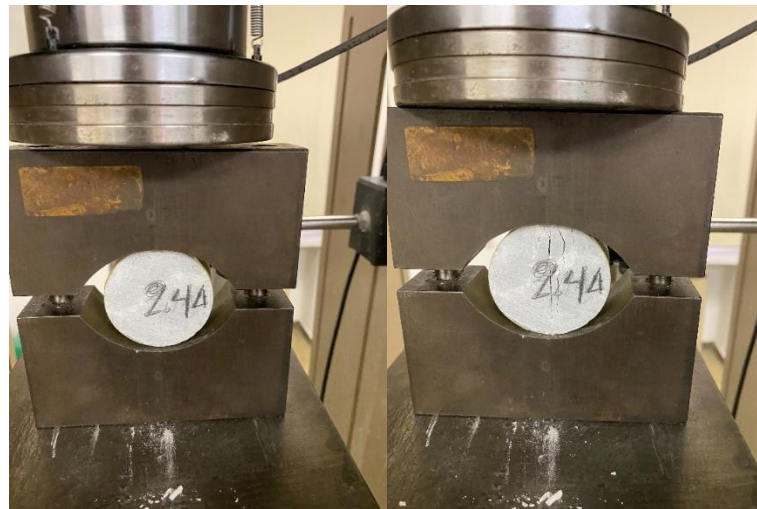
4.4.3 Πειραματική Διαδικασία

Η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού εκτελείτε με άσκηση αντιδιαμετρικής σημειακής φόρτισης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7, η οποία παρουσιάζει και τον αναμενόμενο τρόπο θραύσης, ανάλογα με τη μέθοδο εφαρμογής του σημειακού φορτίου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, η δοκιμή έγινε με το πρότυπο ISRM 1981 στη μηχανή MTS 815, όπου η φόρτιση εφαρμόζεται σε ένα μικρό τόξο του δοκιμίου ($<10^\circ$), ώστε να είναι αξιόπιστη η εκτίμηση με την εξίσωση:

$$T = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot D \cdot H}$$

Λειάνθηκαν οι κεφαλές των δοκιμίων με ελαφρύ ορυκτέλαιο

Το φορτίο κατά την διαδικασία της δοκιμής ασκούνταν με σταθερό ρυθμό και χωρίς διακοπές αυξανόμενο κατά 200N/s. Εκτελέστηκε η διαδικασία για 6 δοκίμια παίρνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.5



Εικόνα 4.7: Πριν και μετά την διαδικασία Brazilian για το δοκίμιο 1.6B.

4.4.4 Ενέργεια Θραύσης (Fracture Energy)

Η ενέργεια θραύσης προσδιορίστηκε από την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη φόρτισης-παραμόρφωσης (load-displacement curve) κατά τη διάρκεια της θραύσης του δείγματος. Η συνολική απορροφηθείσα ενέργεια μέχρι τη ρηγμάτωση του υλικού (W , σε kJ) διαιρείται με την επιφάνεια θραύσης A (σε m^2) και προκύπτει:

$$G_f = \frac{W}{A} (kJ/m^2)$$

όπου:

W είναι η ενέργεια μέχρι τη θραύση (υπολογισμένη από το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης)

A είναι η επιφάνεια θραύσης του δείγματος (m^2)

G_f είναι η ενέργεια θραύσης ανά μονάδα επιφάνειας.

Πίνακας 4.4: Διάγραμμα Φορτίο-Μετατόπισης για όλα τα δοκίμια εμέσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής εμβαδόν επιφάνειας θραύσης dh

ΔΟΚΙΜΙΟ	Διάμετρος d (mm)	Υψος h (mm)	Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	Ενέργεια Θραύσεως (kJ/m^2)
1,6B	50,05	27,4	0,72	0,03
1,6C	50,05	27,2	1,00	0,05
1,9A	50,05	25,25	0,67	0,06
2,4A	50,07	24,50	0,78	0,03
2,4C	50,05	24,20	1,03	0,09
2,4D	50,07	27,60	0,71	0,05
$\mu \pm \sigma$			$0,81 \pm 0,16$	$0,05 \pm 0,02$

Παρατηρήσεις

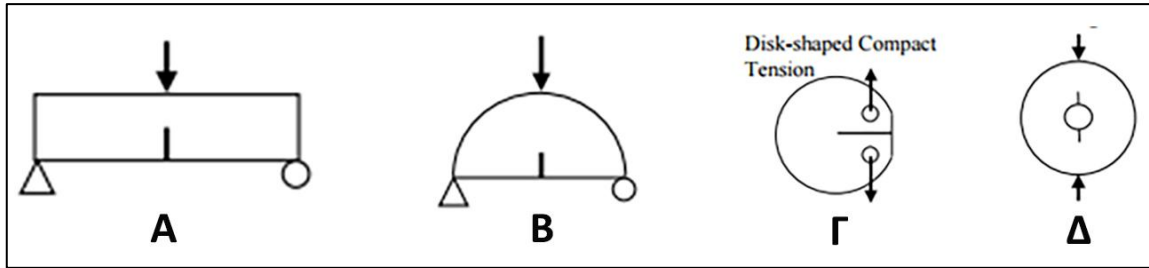
Η αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 0,71 MPa και 1,03 MPa, με μέση τιμή $0,81 \pm 0,16$ MPa.

Αντίστοιχα, η ενέργεια θραύσης, η οποία εκφράζει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν από την καταστροφή, εμφανίζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Οι τιμές κυμαίνονται από $0,03 \text{ kJ/m}^2$ έως $0,09 \text{ kJ/m}^2$, με μέσο όρο $0,05 \pm 0,02 \text{ kJ/m}^2$. Η υψηλή τυπική απόκλιση υποδηλώνει την παρουσία τοπικών αδυναμιών, πιθανών ρωγμών ή διαφοροποιήσεων στη μικροδομή των δειγμάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής Brazilian του μαρμάρου που μελετήθηκε παρουσίασε θραύση σε αξονική κατάρτιση που προκαλείτε από την δημιουργία εφελκυστικών τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.7.

4.5 Αντοχή σε Κάμψη με Εγκοπή

Η θραυστική στιβαρότητα (Fracture Toughness / K_{IC}) αποτελεί μια βασική ιδιότητα των υλικών και καθορίζει την αντίσταση του υλικού στη διάδοση ρωγμών. Υπάρχει μεγάλη γκάμα πειραμάτων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της, όπως η ASTM E399 και EN12372, όπου -ιδιαίτερα για την περίπτωση των πετρωμάτων- επικρατούν οι δοκιμές με τη χρήση κυλινδρικής διατομής πειραματικών διατάξεων, όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 4.8.



Εικόνα 4.8: (Α) Η κάμψη τριών σημείων με εγκοπή, (Β) η κάμψη τριών σημείων με εγκοπή σε ημικυλινδρικό δοκίμιο, (Γ) το πείραμα άμεσου εφελκυσμού σε κυλινδρικό δοκίμιο και (Δ) η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού με δακτύλιο και εγκοπή.

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Β της Εικόνας 4.8 με τη χρήση του προτύπου της ISRM 2007 με τη θραυστική στιβαρότητα K_{IC} να προσδιορίζεται από το μέγιστο φορτίο P_{max} και το γεωμετρικό συντελεστή Y (Kuruppu et al., 2013):

$$K_{IC} = Y \cdot \frac{P_{max}}{2 \cdot R \cdot B} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$Y = -1.297 + 9.516 \cdot \frac{s}{2 \cdot R} - \left(0.47 + 16.457 \cdot \frac{s}{2 \cdot R}\right) \cdot \frac{a}{R}$$

$$+ \left(1.071 + 34.401 \cdot \frac{s}{2 \cdot R}\right) \cdot \frac{a^2}{R^2}$$

Όπου:

- R: η ακτίνα του δίσκου,
- a: το μέγεθος της εγκοπής,
- s: η απόσταση έδρασης,
- B: το πάχος του δοκιμίου

Για την δημιουργία της εγκοπής χρησιμοποιήθηκε λεπτή λίμα (3mm) μέχρι το μήκος να φτάσει περίπου στο 40% της ακτίνας (Εικόνα 4.9). Σημειώνεται ότι λόγω του ότι το μάρμαρο είναι πολύ λεπτόκοκκο ακόμα και αυτό το μικρό πλάτος των 3mm της ρωγμής θα δώσει ελαφρώς μεγαλύτερη εκτίμηση της θραυστικής στιβαρότητας του υλικού.



Εικόνα 4.9: Ημικυλινδρικό δοκίμιο μαρμάρου για δοκιμή κάμψης με εγκοπή, πριν και μετά την θραύση του

Με βάση την παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκαν συνεχείς μετρήσεις φορτίου και μετατόπισης καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής ξεκινώντας λίγο πριν την επαφή του

μέχρι λίγο μετά την θραύση του δοκιμίου. Η φόρτιση εφαρμόστηκε υπό έλεγχο μετατόπισης με σταθερό ρυθμό και με ομοιόμορφη επαφή του δοκιμίου με τους κυλίνδρους.

Για το μάρμαρο πραγματοποιήθηκαν 3 έγκυρες δοκιμές, τα αποτελέσματα Παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5:

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής θραυστομηχανικής

ΔΟΚΙΜΙΟ	P _{max} (kN)	K _{IC} (MPa√m)	G _{IC} (J/m ²)
01	2,65	1,4	19,9
02	0,80	0,4	9,5
05	3,58	1,8	42,0
μ±σ	2,34±1,42	1,2±0,7	23,8±16,6

Συμπεράσματα

Η μέγιστη φορτίου θραύσης (P_{max}) κυμαίνεται από 0,80 έως 3,58 kN, με μέση τιμή 2,34 ± 1,42 kN. Η κριτική ένταση θραύσης K_{IC} κυμαίνεται από 0,4 έως 1,8 MPa√m, με μέση τιμή 1,2 ± 0,7 MPa√m.

Αντίστοιχα, η κριτική ενεργειακή πυκνότητα G_{IC} κυμαίνεται από 9,5 έως 42,0 J/m², με μέση τιμή 23,8 ± 16,6 J/m². Η σημαντική διασπορά στις μετρήσεις πιθανόν οφείλεται σε μικροδομικές ατέλειες, όπως μικρορωγμές, εγκλείσματα ή διαφοροποιήσεις στη λιθολογική σύσταση των δειγμάτων.

Στο πείραμα της κάμψης με εγκοπή η θραύση του δοκιμίου έγινε παράλληλα με την αρχική εγκοπή πράγμα που δείχνει ότι η ρωγμή διαδόθηκε σε εφελκυσμό (ρωγμή τύπου I) λόγω της κάμψης. Με βάση τα πειράματα η θραυστική στιβαρότητα του συγκεκριμένου μάρμαρου θεωρείται αρκετά υψηλή. Λόγω του μεγάλο πάχους της εγκοπής καθώς και το μικρό πλήθος δοκιμίων έχει υπερεκτιμήσει ελαφρώς την θραυστική στιβαρότητα και ειδικές τεχνικές κοπής πχ με πολύ λεπτό σύρμα θα χρειαζόταν για να υπάρχει πιο αντιπροσωπευτική μέτρηση της ιδιότητας αυτής.

Από τα αποτελέσματα των τριών πειραμάτων παρατηρούμε ότι οι τιμές στην ενέργεια θραύσης στο πείραμα της αντοχής σε κάμψη με εγκοπή είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές στα άλλα δυο πειράματα το οποίο αποδίδεται στην στις βασικές διαφορές ανάμεσα στα πειράματα. Οι δοκιμές θραυστομηχανικής εστιάζουν αποκλειστικά στην ενέργεια που απαιτείται για την διάδοση μιας ήδη υπάρχουσας ρωγμής ενώ στα άλλα δυο πειράματα δημιουργούνται οι ρωγμές.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη του μαρμάρου της Γόρτυνας, με σκοπό την ολοκληρωμένη κατανόηση της γεωλογικής του προέλευσης, της φυσικοχημικής του σύστασης, των μηχανικών του ιδιοτήτων και της σημασίας του τόσο στο ιστορικό όσο και στο σύγχρονο αρχιτεκτονικό τοπίο. Μέσα από μια σειρά πειραματικών διαδικασιών, όπως η μονοαξονική δοκιμή θλίψης, η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) και η δοκιμή κάμψης με εγκοπή, διερευνήθηκαν οι μηχανικές αντοχές του υλικού και αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του υπό διαφορετικά καθεστάτα φόρτισης.

Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών ανέδειξαν την ικανοποιητική αντοχή του μαρμάρου, με τιμές αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό που κυμαίνονται εντός των προβλεπόμενων ορίων για ασβεστίτικά μάρμαρα, ενώ η ανάλυση των ελαστικών σταθερών υποδήλωσε μέτρια δυσκαμψία του υλικού. Η θραυστομηχανική συμπεριφορά παρουσίασε σχετικά υψηλές τιμές κριτικής έντασης θραύσης (K_{IC}) και ενεργειακής πυκνότητας (G_{IC}), γεγονός που καταδεικνύει την ικανότητα του μαρμάρου να αντιστέκεται στη διάδοση ρωγμών, παρότι εντοπίστηκε σημαντική διασπορά στις τιμές, η οποία αποδίδεται σε μικροδομικές ανομοιογένειες, όπως μικρορωγμές ή εγκλείσματα.

Η χημική και ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων επιβεβαίωσε ότι πρόκειται για ένα καθαρό ασβεστίτικο μάρμαρο, με υψηλή περιεκτικότητα σε CaO και ελάχιστες προσμείξεις σε άλλα οξείδια (π.χ. MgO , SiO_2 , Fe_2O_3). Η καθαρότητα αυτή, σε συνδυασμό με τις ορυκτολογικές παρατηρήσεις, ενισχύει τη δυνατότητα του υλικού να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής αισθητικής, όπως στην αρχιτεκτονική και τη διακόσμηση, ενώ παράλληλα υποστηρίζει και την ιστορική σημασία του συγκεκριμένου μαρμάρου ως υλικού που αξιοποιήθηκε εκτενώς στην αρχαιότητα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή της αστοχίας των δοκιμών, καθώς σε όλα τα πειράματα παρατηρήθηκαν κοινά πρότυπα θραύσης: αξονική κατάτμηση και εφελκυστική αστοχία. Οι διαφοροποιήσεις στις τιμές μεταξύ των δοκιμών ήταν περιορισμένες στα δύο πρώτα πειράματα, σε αντίθεση με τη δοκιμή κάμψης με εγκοπή, όπου καταγράφηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στο αυξημένο πάχος της εγκοπής, το οποίο πιθανώς επηρέασε δυσμενώς τα αποτελέσματα, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της θραυστικής στιβαρότητας. Προτείνεται, επομένως, για μελλοντικές μελέτες η χρήση πιο λεπτών εργαλείων κοπής για πιο ακριβείς αποτελέσματα.

Τέλος, στο πλαίσιο της εργασίας, επισημάνθηκε η σημασία της βιώσιμης εκμετάλλευσης του φυσικού πόρου, μέσα από την πρόταση τεχνικών και πρακτικών που μπορούν να διασφαλίσουν τη μακροχρόνια αξιοποίησή του, με σεβασμό τόσο προς το περιβάλλον όσο και προς την πολιτιστική του αξία. Η ανάδειξη του μαρμάρου της Γόρτυνας ως υλικό που συνδυάζει ιστορική σημασία, φυσική καθαρότητα και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες, επιβεβαιώνει τη δυνατότητά του να αποτελέσει ένα βιώσιμο υλικό για σύγχρονες και παραδοσιακές κατασκευές.

Προτάσεις Βελτίωσης και Μελλοντικής Έρευνας

Αν και η παρούσα εργασία πραγματεύεται συνολικά και αναλυτικά στον γεωλογικό και φυσικοχημικό χαρακτηρισμό του μαρμάρου Γόρτυνας, υπάρχουν επιμέρους σημεία στα οποία θα μπορούσε να είχε δοθεί περαιτέρω έμφαση, ώστε να καλυφθεί πιο σφαιρικά το αντικείμενο της έρευνας.

Αρχικά, θα μπορούσε να είχε πραγματοποιηθεί ανάλυση σε μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων, από διαφορετικές θέσεις της ευρύτερης περιοχής ώστε να υπάρχει πιο αντιπροσωπευτική εικόνα για την εσωτερική ομοιογένεια ή ετερογένεια του υλικού.

Επιπλέον, η χρήση μικροσκοπικών τεχνικών (όπως ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM), θα μπορούσε να προσφέρει περισσότερες πληροφορίες για την μικροδομή του μαρμάρου, καθώς και για την παρουσία μικροτωγμών ή εγκλεισμάτων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες (Bello, Martin, & Martin, 1991). Σε επίπεδο μηχανικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, θα μπορούσαν να είχαν γίνει επιπλέον πειράματα για τον προσδιορισμό της απορροφητικότητας, αντοχή σε κύκλους ψύξης- απόψυξης ή δείκτες φθοράς, ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του μαρμάρου σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τέλος, θα μπορούσε να είχε γίνει μια ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) της εξόρυξης και επεξεργασίας του μαρμάρου, όπως για παράδειγμα του Traverso M (Traverso, Rizzo, & Finkbeiner, 2010), ώστε να ενισχυθεί η διάσταση της βιωσιμότητας που ήδη αναλύεται στην εργασία.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Αγιουτάντης, Ζ. (2019). *Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων*, Αθήνα: ΙΟΝ.

Αποστολοπούλου, Α. (2017). Περιβαλλοντική Αποκατάσταση των Λατομείων. (Ε. κ. Αθηνών, Επιμ.)

Γκαμαλέτσος, Π. Ν. (2024). Σημειώσεις μαθήματος "Μεθόδοι Χαρακτηρισμού Ορυκτών και Πετρωμάτων". Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Θεοδώρικας, Σ. (2017). Ορυκτολογία Πετρολογία, Θεσσαλονίκη: Γραφικές Τέχνες Με-
λίσσα

Λουλούδης, Γ. (1991). Υδρογεωλογικές Συνθήκες Νοτίου Λιγνιτοφόρου Πεδίου Πτολεμαίδας. Προβλήματα υπόγειων νερών και αντιμετώπισή τους κατά την Εκμετάλλευση. Αθήνα.

Μάρμαρα Καμπουράκη Α.Β.Ε.Ε., 2024, Μάρμαρο Γορτύνης. (χ.χ.).

Νομικός, Π. (2015). Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων. *Προπτυχιακό εγχειρίδιο. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις*. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-615>.

Παπουτσή, Γ. (2024). Ορυκτολογικός-πετρογραφικός χαρακτηρισμός και προσδιορισμός φυσικομηχανικών ιδιοτήτων δειγμάτων μαρμάρου από ενεργό λατομείο στην Π.Ε Καβάλας. Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (Μη Δημοσιευμένη). Πολυτεχνείο Κρήτης. Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Χατζηπαναγιώτου, Π. (2010). *Εισαγωγή στη μηχανική Θραύσης*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

Ξενόγλωσση

Attanasio, D., Brilli, M., & Ogle, N. (2006). The isotopic signature of Classical marbles. L'Erma di Bretschneider.

- Bellas, S., & Keupp, H. (2017). Contribution to the Late Neogene Stratigraphy of the Ancient Gortys Area (Southern Central Crete, Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11220>
- Bello, M., Martin, L., & Martin, A. (1991). Scanning electron microscopy to establish the marble weathering mechanism in the Alhambra of Granada (Spain). Retrieved from <https://digitalcommons.usu.edu/microscopy/vol5/iss3/7/>
- Bonewitz, R. L. (2008). *Rocks and Minerals*. Dorling Kindersley.
- Fasoulas, C. (2001). The tectonic development of a Neogene basin at the tip of the active European margin: the Heraklion basin, Crete, Greece. *Journal of Geodynamics*, 31(1), pp. 49-70. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(00\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(00)00017-X)
- Gao, Y., Feng, X.-T., Wang, Z., & Zhang, X. (2020). Strand failure characteristics of jointed marble under true triaxial compression. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Hatzistathis, A., Gkanatsas, P., & Ispikoudis, I. (1997). Surface mining impacts and the planning process for their restoration. *Proceedings of IAEG*. Athens.
- Karaca, Z., Hacımustafaoğlu, R., & Gökçe, M. V. (2015). Grain properties, grain-boundary interactions and their effects on the characteristics of marbles used as building stones. *Construction and Building Materials*, pp. 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.023>
- Kuruppu, M., Obara, Y., Ayatollahi, M., Chong, K., & Funatsu, T. (2013, December). ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp.267-274. Doi: <https://doi-org/10.1007/s00603-013-0422-7>
- Melfos, V., & Voudouris, P. (2016). Fluid evolution in Tertiary magmatic-hydrothermal ore systems at the Rhodope metallogenic province, NE Greece. A review. *Geologia Croatica*. <https://doi.org/10.4154/gc.2016.12>
- Meulenkamp, E., Dermitzakis, M., Georgiadou, -D., Jonkers, H., & Böger, H. (1988). *Field guide to the Neogene of Crete*. Department of Geology and Paleontology.

Papadopoulos Marble Granite (2021, February) Papadopoulos Marble Granite Stone. Retrieved from Grey marble Gortynis for tranquility: <https://papamarble.com/project/grey-marble-gortynis/>

Papanikolaou, D.I. (2021). The Geology of Greece. Springer. Doi:978-3-030-60731-9

Siegesmund, S., & Török, A. (2011). Building stones. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_2

Sikakwe, G. U. (2023). Mineral exploration employing drones, contemporary geological satellite remote sensing and geographical information system (GIS) procedures: A review. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 31. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100988>

Traverso, M., Rizzo, G., & Finkbeiner, M. (2010). Environmental performance of building materials: Life cycle assessment of a typical Sicilian marble (Perlato di Sicilia). International Journal of Life Cycle Assessment. DOI:10.1007/s11367-009-0135-z

Yang, F., Wang, G., Santosh, M., Li, R., Tang, L., Cao, H., . . . Liu, C. (2017). Delineation of potential exploration targets based on 3D geological modeling: A case study from the Laoangou Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit, China. Ore Geology Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.013>

Πηγές διαδικτύου

Bigted. (2024, March 13). Stone repairs & restoration. Retrieved from The science Behind Marble: Exploring its Physical and Chemical Properties: <https://stonerepairsandrestoration.co.uk/the-science-behind-marble-exploring-its-physical-and-chemical-properties>

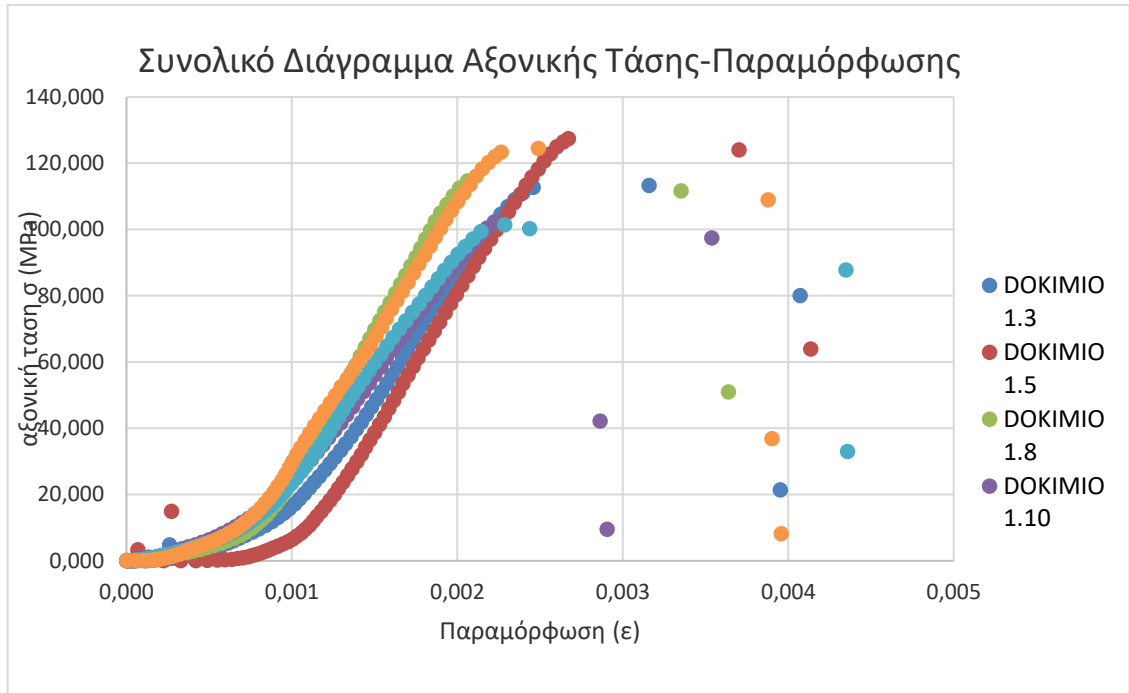
geology science. (2024). Marble: From Quarry to Sculpture. Retrieved from <https://geologyscience.com/geology/marble-from-quarry-to-sculpture/>

Graham, H. (29/4/2025). Παρθενώνας. Ανάκτηση από <https://pixabay.com/el/αθήνα-παρθενώνας-ελλάδα-ακρόπολη-2361798/>

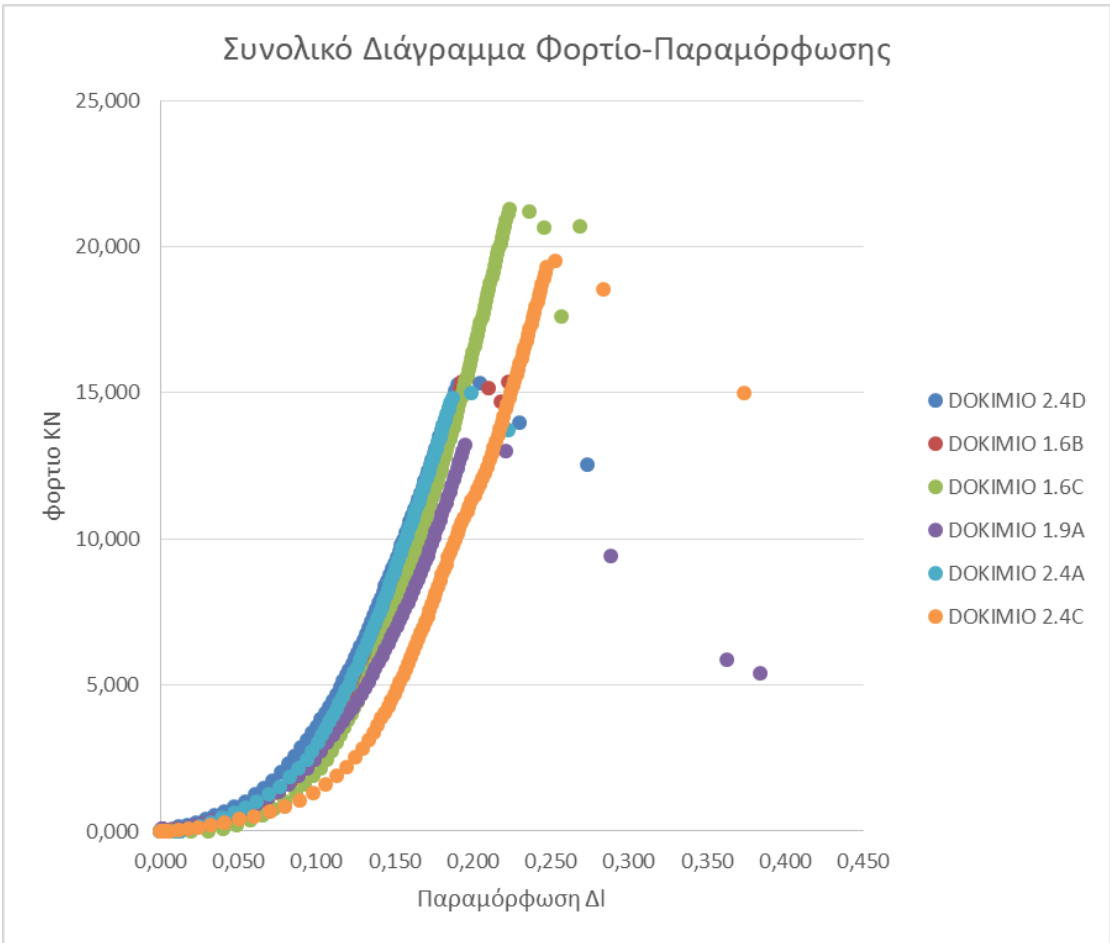
Hueston, F. (29/4/2025). From Earth to Elegance: What Makes Marble Colors? Retrieved from <https://loveyourstone.com/from-earth-to-elegance-what-makes-marble-colors/>

MiningWorld. (2024, August 8). Mining World. Retrieved from <https://mining-world.com/sustainable-and-green-mining-practices-implementing-environmentally-friendly-mining-practices-including-waste-management-water-conservation-and-reducing-carbon-footprints/>

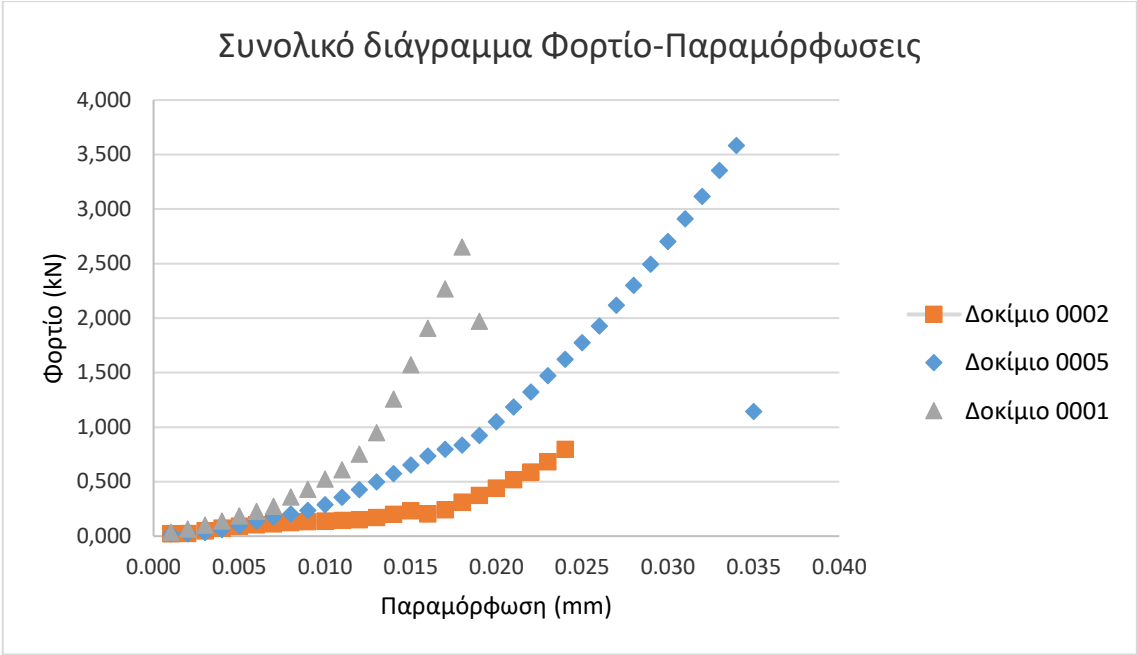
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Πειραμάτων



Εικόνα Α:1: Πειράματα θλίψης.



Εικόνα Α:2: Πειράματα έμμεσου εφελκυσμού.



Εικόνα Α:3: Πειράματα κάμψης με εγκοπή.