



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**

**Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (ΜΗΧΟΠ)**

**Διπλωματική εργασία**

**Ορυκτολογικός-πετρογραφικός χαρακτηρισμός και  
προσδιορισμός φυσικομηχανικών ιδιοτήτων δειγμάτων  
μαρμάρου από ενεργό λατομείο στην Π.Ε Καβάλας**

**Γεώργιος Παπουτσής**

**(ΑΜ: 2015020064)**

**Εξεταστική επιτροπή**

Δρ. Πλάτων Γκαμαλέτσος , Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή ΜΗΧΟΠ (Επιβλέπων)

Δρ. Ξηρουδάκης Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή ΜΗΧΟΠ

Δρ. Τριανταφύλλου Γεώργιος , ΕΔΙΠ, Σχολή ΜΗΧΟΠ

**Χανιά, Ιούλιος 2024**

## **Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα**

*Ο προπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός και ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κλπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή τη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου. Κατά συνέπεια, δηλώνει 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, δε σημαίνει αποδοχή των απόψεων της/του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).*

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο μηχανικής πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (ΜΗΧΟΠ) του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην εργασία αυτή έγινε ο χαρακτηρισμός των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων της ορυκτολογικής σύστασης και των πετρογραφικών ιδιοτήτων μαρμάρου από ενεργό λατομείο στην Καβάλα, το οποίο ανήκει στην εταιρεία «ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗΣ Α.Β.Ε.Ε.». Την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε ο Επίκουρος Καθηγητής Δρ. Πλάτων Ν. Γκαμαλέτσος και την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή αποτέλεσαν μαζί με τον επιβλέποντα τα μέλη της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Γεώργιο Ξηρουδάκη και Δρ. Γεώργιο Τριανταφύλλου (ΕΔΙΠ).

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντά μου επίκουρο καθηγητή μου Δρ. Πλάτωνα Γκαμαλέτσο, τον επίκουρο καθηγητή Δρ. Γεώργιο Ξηρουδάκη, τον Δρ. Γεώργιο Τριανταφύλλου και τον κ. Στυλιανό Μαυριγιαννάκη για την άψογη συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές τους για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Κων/νο Παππά και την κ. Μαρία Ιχτιάρογλου της εταιρείας «ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗΣ Α.Β.Ε.Ε.» για τα δείγματα που μας παρείχαν. Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου που με στήριξε και μου έδινε κίνητρο να συνεχίζω.

## Περίληψη

Στην εν λόγω διπλωματική εργασία έγινε προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων, ακολουθούμενο από τον ορυκτολογικό και πετρογραφικό χαρακτηρισμό των υπό μελέτη δειγμάτων μαρμάρου που εξορύσσονται από ένα ενεργό λατομείο της Περιφερειακής Ενότητας Καβάλας (ΠΕ Καβάλας), το οποίο ανήκει στην εταιρεία «ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗ Α.Β.Ε.Ε.». Προς την κατεύθυνση αυτήν ελήφθησαν αντιπροσωπευτικοί όγκοι μαρμάρου, από τους οποίους έγινε διαμόρφωση κυλινδρικών δοκιμίων διαφόρων μεγεθών για την εκτέλεση των εργαστηριακών μηχανικών δοκιμών (κάμψη, μονοαξονική θλίψη, έμμεσος εφελκυσμός) σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Επιπλέον, μελετήθηκε η ορυκτολογική και πετρογραφική σύσταση, καθορίστηκε η χημική ανάλυση και προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες, όπως η φαινόμενη πυκνότητα και το ενεργό πορώδες. Με βάση τις αναλύσεις αυτές το μάρμαρο χαρακτηρίζεται ως ασβεστιτικό με περιεκτικότητα ασβεστίτη 97 έως 99 % μέτριας έως καλής αντοχής (86 MPa) κατάλληλο για εξωτερικές επενδύσεις και δαπεδοστρώσεις.

**Λέξεις κλειδιά:** Ελληνικό μάρμαρο, ορυκτολογικός χαρακτηρισμός, φυσικές και μηχανικές αντοχές.

## Abstract

In this thesis, the physical and mechanical properties were determined, followed by the mineralogical and petrographic characterization of marble samples extracted from an active quarry of the Regional Unit of Kavala (PE Kavala), which belongs to the company DERMITZAKI Bros. To this end, representative volumes of marble were taken from which cylindrical specimens of various sizes were formed for the performance of laboratory mechanical tests (bending, uniaxial compression, indirect tensile) in accordance with international standards. In addition, the mineralogical and petrographic composition was studied, chemical analysis was determined and physical properties such as apparent density and active porosity were determined. On the basis of these analyses the marble is characterized as calcareous with a calcite content of 97 to 99 % and a medium strength (86 MPa) suitable for external cladding and flooring.

**Keywords:** Greek marble, mineralogical characterization, physical and mechanical properties

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Λίστα Εικόνων.....	vii
Λίστα Πινάκων .....	ix
1 Εισαγωγή .....	1
2 Πειραματική Διαδικασία .....	4
2.1 Δειγματοληψία – Προετοιμασία Δειγμάτων .....	5
2.2 Μακροσκοπική & Μικροσκοπική Εξέταση – Μέθοδοι Ορυκτολογικής & Χημικής Ανάλυσης.....	7
2.2.1 Μακροσκοπική & μικροσκοπική εξέταση.....	7
2.2.2 Προσδιορισμός των χρωματικών παραμέτρων .....	8
2.2.3 Ορυκτολογική ανάλυση.....	8
2.2.4 Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων.....	9
2.3 Φυσικές Ιδιότητες .....	9
2.4 Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη.....	10
2.5 Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσος εφελκυσμός).....	15
2.6 Κάμψη τριών σημείων .....	17
3 Αποτελέσματα.....	22
3.1 Μακροσκοπική & Μικροσκοπική Εξέταση .....	22
3.2 Προσδιορισμός των χρωματικών παραμέτρων .....	25
3.3 Ορυκτολογική Ανάλυση.....	26
3.4 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης .....	29
3.5 Φυσικές ιδιότητες .....	30
3.5.1 Υδατοαπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση .....	30
3.5.2 Φαινόμενη πυκνότητα και ανοιχτό πορώδες.....	32
3.6 Μηχανικές Ιδιότητες .....	35
3.6.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.....	35
3.6.2 Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσος εφελκυσμός) .....	40
3.6.3 Κάμψη τριών σημείων .....	43
4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	46
5 Συμπεράσματα .....	54
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	57
Παράρτημα Α .....	60
Α1. Πίνακες ογκοτεμαχίου K1 μονοαξονικής θλίψης .....	60
Α2. Πίνακες ογκοτεμαχίου K2 μονοαξονικής θλίψης .....	64
Α3. Αποτελέσματα έμμεσου εφελκυσμού BTS – Δοκίμια ογκοτεμαχίου K1 .....	69
Α4. Αποτελέσματα έμμεσου εφελκυσμού BTS – Δοκίμια ογκοτεμαχίου K2 .....	74
Α5. Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη τριών σημείων.....	79

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Χαρακτηριστικό λατομείο μαρμάρου στην ΠΕ Καβάλας (Dermitzakis Marbles).....	2
Εικόνα 2.1: Οι όγκοι μαρμάρων όταν έφτασαν στην σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.....	4
Εικόνα 2.2: Μέτρηση του ογκομαρμάρου ώστε να κοπεί για να χωρέσει στον πυρηνολήπτη.....	5
Εικόνα 2.3: Στα αριστερά, ο εργαστηριακός πυρηνολήπτης και δεξιά ο δίσκος κοπής.....	6
Εικόνα 2.4: Τα δοκίμια μετά τη λήψη τους και πριν το κόψιμό τους, ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε πειράματος.....	6
Εικόνα 2.5: Ο λειαντής.....	7
Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστικά κυλινδρικά δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των μαρμάρων από την Καβάλα.....	10
Εικόνα 2.7: Δοκίμια πριν από την εργαστηριακή (αριστερή εικόνα) και μετά τη μονοαξονική καταπόνηση (μεσαία εικόνα). Στη δεξιά εικόνα απεικονίζεται οι αισθητήρες μετατόπισης (LVDT) και το μηχανοσκόπιο.....	12
Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικά διαγράμματα Τάσης-Παραμόρφωσης για Πετρώματα (Roberts, 1977).....	13
Εικόνα 2.9: Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας του Young από διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2019; Brady & Brown, 1985). ....	14
Εικόνα 2.10: Η απεικόνιση του έμμεσου εφελκυσμού (Αγιουτάντης, 2019) (βλ. αριστερή εικόνα) και οι σιαγόνες φόρτισης ενός αντιπροσωπευτικού κυλινδρικού δοκιμίου (δεξιά εικόνα).....	15
Εικόνα 2.11: (Α) Η κάμψη τριών σημείων και (Β) η πειραματική διάταξη. ....	17
Εικόνα 2.12: Παραμόρφωση των ινών του ουδέτερου άξονα (Πρασιανάκης, 1985). ....	19
Εικόνα 2.13: Ευθεία δοκός που μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου κατά την κάμψη (Πρασιανάκης, 1985). ....	19
Εικόνα 2.14: Μηχάνημα καταπόνησης κάμψης τριών σημείων. ....	21
Εικόνα 2.15: Τα δοκίμια μαρμάρου πριν από την δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων. ....	21
Εικόνα 3.1. Φωτογραφίες από τη μακροσκοπική παρατήρηση αντιπροσωπευτικών δοκιμών από τα δυο ογκοτεμάχια K1 και K2 αντιστοίχως, που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.....	22
Εικόνα 3.2. Φωτογραφίες (Α έως και ΣΤ) αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από τα δοκίμια μαρμάρου με προέλευση το λατομείο Καβάλας, μετά την παρατήρησή τους στο στερεομικροσκόπιο.....	23
Εικόνα 3.3: Μικροφωτογραφίες Α και Β στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Καβάλας, όπου διακρίνονται ευμεγέθεις κρύσταλλοι ασβεστίτη με χαρακτηριστικές τεκτονικές πολυιδιυμίες, που παρουσιάζουν πολύ υψηλά χρώματα πόλωσης (Nicols L, μεγέθυνση x100). ....	24
Εικόνα 3.4: Μικροφωτογραφίες Α, Β και Γ στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Καβάλας, όπου διακρίνεται ο γρανοβλαστικός και κατά θέσεις πορφυροβλαστικός ιστός του πετρώματος (Nicols L, μεγέθυνση x25). ....	25
Εικόνα 3.5: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-χ (PXRD) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο Καβάλας (1 <sup>ο</sup> μισό / K1-1). Συντομογραφίες ορυκτών κατά (Whitney & Evans, 2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.....	26
Εικόνα 3.6: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-χ (PXRD) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο Καβάλας (2 <sup>ο</sup> μισό / K1-2). Συντομογραφίες ορυκτών κατά Whitney & Evans (2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.....	27
Εικόνα 3.7: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-χ (PXRD) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο Καβάλας (1 <sup>ο</sup> μισό / K2-1). Συντομογραφίες ορυκτών κατά (Whitney & Evans, 2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.....	27
Εικόνα 3.8: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-χ (PXRD) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο Καβάλας (2 <sup>ο</sup> μισό / K2-2). Συντομογραφίες ορυκτών κατά (Whitney & Evans, 2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.....	28
Εικόνα 3.9: Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο της Π.Ε. Καβάλας. ....	31
Εικόνα 3.10: Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο της Π.Ε. Καβάλας. ....	33
Εικόνα 3.11: Κυλινδρικά δοκίμια από τα υπό μελέτη ογκοτεμάχια K1 και K2 από το λατομείο της Π.Ε. Καβάλας. ....	35

Εικόνα 3.12: Η δοκιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, δοκίμιο πριν και μετά το πείραμα. (Α) Αξονική κατάρτιση δοκιμίων από την ύπαρξη και συνένωση μικρορωγμών (Basu et al., 2013) (Β) αξονική κατάρτιση δοκιμίου K2-2.2 (Γ) διατμητική αστοχία σε ένα επίπεδο του δοκιμίου K1-1.5.....	36
Εικόνα 3.13: Χαρακτηριστικοί τρόποι αστοχίας μαρμάρου (Gao et al., 2020). ....	37
Εικόνα 3.14: Διάταξη ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων (Αγιουτάντης, 2019) και η πειραματική διάταξη της δοκιμής μονοαξονικής (ανεμπόδιστης) θλίψης που έλαβε χώρα.....	37
Εικόνα 3.15: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο K1-2.1. ....	39
Εικόνα 3.16: (Α) Μέθοδος εφαρμογής αντιδιαμετρικής σημειακής φόρτισης (Xiao et al., 2022) και (Β) Τυπικοί τρόποι αστοχίας σε αντιδιαμετρική θλιπτική φόρτιση (Basu et al., 2013).....	42
Εικόνα 3.17: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο K1-1.6 στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.....	42
Εικόνα 3.18: (Α) Τα δείγματα κάμψεως πριν τη θραύση τους (ενδεικτικά με μπλε γραμμή συμβολίζεται ο άξονας φόρτισης) και (Β) η θραύση με ελαφριά κλίση του δοκιμίου K1-2.....	44
Εικόνα 3.19: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης του δοκιμίου K1-1 σε κάμψη τριών σημείων. ....	45
Εικόνα 4.1: Ιστόγραμμα τιμών αντοχής των δοκιμίων.....	49
Εικόνα 4.2: Ιστόγραμμα Μέτρου ελαστικότητας.....	50
Εικόνα 4.3: Ιστόγραμμα τιμών αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό. ....	50



## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα από την μελέτη προσδιορισμού των χρωματικών παραμέτρων δειγμάτων μαρμάρων, από το λατομείο Καβάλας (Π.Ε. Καβάλας). ....	25
Πίνακας 3.2: Ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων μαρμάρων από το λατομείο στην περιοχή της Καβάλας. Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε ορυκτής φάσης, στη σύσταση των προς εξέταση δειγμάτων.....	29
Πίνακας 3.3: Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων (% κ.β.) των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο της Καβάλας, που εξετάστηκαν με τη μέθοδο φασματομετρίας ακτίνων-χ φθορισμού (ED-XRF). ....	29
Πίνακας 3.4: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση σε 3 δοκίμια (K1-1α, K1-1β, K1-1γ) από το πρώτο μέρος (K1-1) και σε 3 δοκίμια (K1-2α, K1-2β, K1-2γ) από το δεύτερο μέρος (Δ1-2) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο «Καβάλας».....	31
Πίνακας 3.5: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση σε 3 δοκίμια (K2-1α, K2-1β, K2-1γ) από το πρώτο μέρος (K2-1) και σε 3 δοκίμια (K2-2α, K2-2β, K2-2γ) από το δεύτερο μέρος (Δ2-2) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο «Καβάλας».....	32
Πίνακας 3.6: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους σε 3 δοκίμια (K1-1α, K1-1β, K1-1γ) από το πρώτο μέρος (K1-1) και σε 3 δοκίμια (K1-2α, K1-2β, K1-2γ) από το δεύτερο μέρος (K1-2) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο «Καβάλας».....	34
Πίνακας 3.7: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους σε 3 δοκίμια (K2-1α, K2-1β, K2-1γ) από το πρώτο μέρος (K2-1) και σε 3 δοκίμια (K2-2α, K2-2β, K2-2γ) από το δεύτερο μέρος (K2-2) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο «Καβάλας». ....	34
Πίνακας 3.8: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης / UCS (Co) των δοκιμίων από τα ογκοτεμάχια K1 και K2 από το λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας. ....	40
Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα αντιδιαμετρικής θλίψης BTS (έμμεσου εφελκυσμού) των δοκιμίων από τα ογκοτεμάχια K1 και K2 από το λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας. ....	43
Πίνακας 3.10: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών κάμψεως δοκών μαρμάρου. ....	44
Πίνακας 4.1: Στατιστική επεξεργασία των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου Καβάλας. ....	51
Πίνακας 4.2: Βαθμός σπουδαιότητας των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των διακοσμητικών πετρωμάτων, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται (Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός). ....	52
Πίνακας 4.3: Πρότυπα για τις ιδιότητες των μαρμάρων (πχ. Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός). ....	53

# 1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες ανάγκες της αγοράς για φυσικά διακοσμητικά πετρώματα και δομικών λίθων, πχ. μάρμαρα, γρανίτες κλπ., έχουν αναδείξει τη σπουδαιότητα της μελέτης και κατανόησης των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους. Η επιλογή των υλικών αυτών με βάση τις παραπάνω ιδιότητες είναι βασική προϋπόθεση, σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα (EN 1926 , EN 12372).

Οι επιστήμες, οι οποίες συμβάλλουν στην κατανόηση των διαφόρων ιδιοτήτων ενός πετρώματος είναι αυτές που άπτονται του μηχανικού ορυκτών πόρων (ΜΗΧΟΠ), συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής των πετρωμάτων. Η τελευταία ασχολείται με τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωϋλικών, είτε αυτά βρίσκονται στο φυσικό τους περιβάλλον είτε στο εργαστήριο κάτω από διάφορες εντατικές καταστάσεις. Συνεργατικά με την επιστήμη του μηχανικού ορυκτών πόρων και για τον πλήρη χαρακτηρισμό ενός πετρώματος, ο κλάδος των γεωεπιστημών, που περιλαμβάνει τα αντικείμενα της ορυκτολογίας και πετρολογίας, προσπαθεί να δώσει λύσεις στα ερωτήματα του μηχανικού, ώστε να επιτευχθεί ο λεπτομερής χαρακτηρισμός ενός πετρώματος, με τελικό σκοπό την εύρεση της βέλτιστης και βιώσιμης αξιοποίησής του.

Πιο συγκεκριμένα, τα μάρμαρα από τα αρχαία χρόνια αποτελούσαν αναπόσπαστο κομμάτι της Ελληνικής τέχνης με πολλές εφαρμογές, από το χτίσιμο ναών (πχ. Παρθενώνας κλπ.) έως και την επένδυση των εξωτερικών και εσωτερικών όψεων των κτηρίων (Αποστολίδης, 1991 και βιβλιογραφίες εντός). Ως χαρακτηριστικό μεταμορφωμένο πέτρωμα προερχόμενο από την ανακρυστάλλωση προϋπαρχόντων ανθρακικών ιζηματογενών πετρωμάτων (Winter, 2001 και βιβλιογραφίες εντός), το μάρμαρο, συμπεριλαμβανομένων και των υποπροϊόντων του (πχ. ογκομάρμαρα κλπ.), αποτελείται κυρίως από λεπτο-/αδρό-κοκκο ανακρυσταλλωμένο ασβεστίτη ή/και δολομίτη με χαρακτηριστικό γρανοβλαστικό ιστό (πχ. Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός). Πέραν του ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ), μπορεί να περιέχουν και δολομίτη ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) είτε σε χαμηλή περιεκτικότητα (περίπτωση ασβεστιτικών μαρμάρων) είτε ως την επικρατούσα κρυσταλλική φάση (περίπτωση δολομιτικών μαρμάρων). Σε μικρές αναλογίες μπορεί να απαντούν προσμίξεις πυριτικών ή/και αργιλικών ορυκτών δίνοντας χρωματισμούς και μεταβάλλοντας τις φυσικομηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, η παρουσία οξειδίων ή/και (οξυ)-υδροξειδίων του σιδήρου ή/και του μαγγανίου ενδέχεται να αλλοιώσει το χρώμα του μαρμάρου προς το καστανοκίτρινο ή καστανέρυθρο (πχ. Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός).

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν αντιπροσωπευτικά ογκοτεμάχια μαρμάρου από την Περιφερειακή Ενότητα Καβάλας (ΠΕ Καβάλας) που εκμεταλλεύεται η εταιρεία «ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗΣ Α.Β.Ε.Ε.» (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Χαρακτηριστικό λατομείο μαρμάρου στην ΠΕ Καβάλας (Dermitzakis Marbles)

Ως κατεξοχήν διακοσμητικά υλικά για οικοδομικούς σκοπούς (πχ. Αποστολίδης, 2001, Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός, Τσιραμπίδης, 1996), οι εφαρμογές των προϊόντων από την εξόρυξη μαρμάρου ποικίλουν ανάλογα με την εσωτερική ή εξωτερική χρήση τους (πχ. επενδύσεις, δαπεδοστρώσεις, κλπ.) σύμφωνα με τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες (πχ. πορώδες, καμπτική αντοχή κλπ.), καθώς και την αισθητική τους εμφάνιση (πχ. παρουσία ή όχι χρωματικών στιγμάτων/φλεβιδίων κλπ.).

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και η αισθητική παρουσία του κτηρίου αποτελούν βασικό κομμάτι της μελέτης για το σχεδιασμό κτηρίων ή/και μεγάλων έργων. Πρωταρχικό στάδιο για την επιλογή των μαρμάρων αποτελεί η αξιολόγηση των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών τους (πχ. αισθητική εμφάνιση, παρουσία ή όχι φλεβιδίων, κλπ.), ενώ στη συνέχεια είναι απαραίτητη η παρατήρηση των παραγόντων που επηρεάζουν την τελική επιλογή των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, οι πιο συχνοί παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν είναι η δυνατότητα εφαρμογής της απαιτούμενης μεθόδου κατεργασίας και η επαρκής ποσότητα του υλικού. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες του πετρώματος, ελέγχονται οι χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες που αφορούν πρωτίστως στην ανθεκτικότητά του και εν τέλει συνεκτιμάται το συνολικό κόστος της επένδυσης για την εκάστοτε εφαρμογή. Ο καθορισμός της ποιότητας των πετρωμάτων αποτελεί πρόκληση, προκειμένου να υπάρξει μια κοινή αποδοχή για τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα υλικό ως ποιοτικό ή μη. Ένα μάρμαρο

με ρωγμές ή εγκλείσματα θεωρείται χαμηλής ποιότητας και δεν συνίσταται η χρήση του ως διακοσμητικό. Για τον παραπάνω λόγο, η βιομηχανία μαρμάρου καθορίζει και προσφέρει στους αγοραστές τις σχετικές πληροφορίες του υλικού πριν από την πώλησή του σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα. Για την επιλογή ενός μαρμάρινου προϊόντος πληροφορίες σχετικές με τις φυσικομηχανικές του ιδιότητες (όπως το χρώμα, η υδατοαπορρόφηση, η αντοχή, η σκληρότητα κλπ.) είναι απαραίτητες, καθώς ενδέχεται ορισμένες εξ' αυτών να επηρεάζουν άλλες, όπως ενδεικτικά αναφέρεται από τον Christaras (1990). Ο τελευταίος μελετώντας δείγματα δολομιτικού και ασβεστιτικού μαρμάρου συμπέρανε ότι δείγματα με μεγάλες τιμές υδατοαπορρόφησης παρουσίαζαν μικρότερη αντοχή σε θλίψη, αλλά και χαμηλότερη διάδοση των υπερηχητικών κυμάτων στη μάζα τους (Christaras, 1990).

Επίσης, η παρουσία και η συχνότητα ποικίλων εγκλεισμάτων, φλεβιδίων, ρωγμών, κηλίδων κ.α., καθώς και η διάταξη και το χρώμα τους, δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τη χρωματική και αισθητική εμφάνιση και τη συνολική ποιότητα ενός διακοσμητικού υλικού (Matthews, 1994; Τσιραμπίδης, 1996). Οι παραπάνω παράγοντες θεωρούνται υποκειμενικοί και επομένως δεν μπορούν να ελεγχθούν με τυποποιημένες δοκιμές (Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός). Παρόλα αυτά, αποτελούν θεμελιώδη συστατικά της αρχιτεκτονικής και αισθητικής μελέτης μιας κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, μηχανικές παράμετροι, όπως η αντοχή των φυσικών πετρωμάτων, και φυσικές ιδιότητες, όπως η απορροφητικότητα κα., προσδιορίζονται με τυποποιημένες δοκιμές και πρότυπα, ενώ επηρεάζονται από τα ορυκτοχημικά και πετρογραφικά χαρακτηριστικά τους (Rigoropoulos, Tsikouras, Pomonis, & Hatzipanagiotou, 2011).

Για το σωστό προσδιορισμό των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων ενός αντιπροσωπευτικού φυσικού δείγματος πετρώματος από ένα ενεργό λατομικό πεδίο μεγάλη σημασία έχει η εφαρμοζόμενη μέθοδος δειγματοληψίας του (Τσιραμπίδης, 1996). Προς αυτή την κατεύθυνση, οι διαστάσεις των δοκιμών καθορίζονται σύμφωνα με την κοκκομετρία του υλικού. Σε πιο αδρόκοκκα υλικά απαιτείται μεγαλύτερο μέγεθος δοκιμίου απ' ότι σε λεπτόκοκκα. Επιπλέον, η δειγματοληψία θα πρέπει να ακολουθεί είτε τη στρώση είτε τη σχιστότητα ενός υπό μελέτη γεωϋλικού και είναι αναγκαία διαδοχική δειγματοληψία στην κάθετη διεύθυνση. Τέλος, το προς μελέτη γεωϋλικό θα πρέπει να ελέγχεται για την πιθανή ύπαρξη διαρρήξεων ή εγκλεισμάτων. Σε μία τέτοια περίπτωση, τα αντίστοιχα εξαγόμενα δοκίμια θα πρέπει να εμπεριέχουν αυτή την πληροφορία, διότι σε διαφορετική περίπτωση ενδέχεται τα αποτελέσματα των δοκιμών να μην είναι αντιπροσωπευτικά του αρχικού ογκοτεμαχίου.

## 2 Πειραματική Διαδικασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αξιολογήθηκαν τα χαρακτηριστικά δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα ογκομαρμάρων από ενεργό λατομείο της «ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗ Α.Β.Ε.Ε.» που βρίσκεται στην Π.Ε. Καβάλας, με στόχο τη διερεύνηση των ορυκτολογικών και πετρογραφικών χαρακτηριστικών, καθώς και τον προσδιορισμό των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους. Για την υλοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μια σειρά από τεχνικές, τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται στο παρόν κεφάλαιο. Αρχικά, τα δύο (2) ογκοτεμάχια (blocks) μαρμάρου -που εστάλησαν από την εταιρεία στην Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων / ΜΗΧΟΠ (Εικόνα 2.1)- επεξεργάστηκαν ώστε να έχουν το μισό ύψος για να χωρέσουν στον πυρηνολήπτη (Εικόνα 2.2). Έπειτα, για τις ανάγκες των εργαστηριακών δοκιμών, τα δυο αρχικά ογκοτεμάχια/ογκομάρμαρα K1 και K2 (διαστάσεων Υ: ~30 cm x Μ: ~30 cm x Π: ~30 cm) υποδιαιρέθηκαν σε 4 μικρότερα ίσα μέρη (K1-1 & K1-2) και (K2-1 & K2-2) για τη λήψη των κυλινδρικών δοκιμών απαραίτητα για την περαιτέρω μελέτη τους, σύμφωνα με τα πρότυπα. Στα δοκίμια που κόπηκαν, υπάρχει ο παραπάνω κωδικός, ώστε να ταξινομούνται σωστά σε σχέση με τον αρχικό όγκο μαρμάρου από όπου και προέρχονται.



Εικόνα 2.1: Οι όγκοι μαρμάρων όταν έφτασαν στην σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων





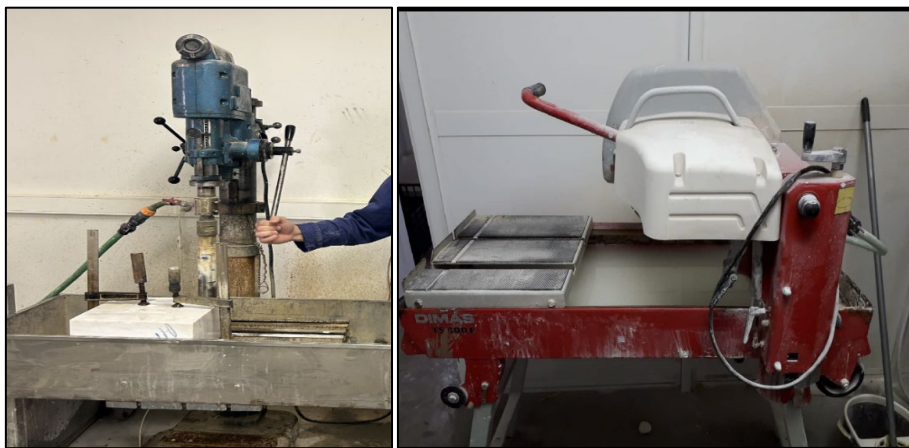
Εικόνα 2.2: Μέτρηση του ογκομαρμάρου ώστε να κοπεί για να μπορέσει να χωρέσει στον πυρηνολήπτη.

## 2.1 Δειγματοληψία – Προετοιμασία Δειγμάτων

Η εξόρυξη του μαρμάρου σήμερα, λόγω της τεχνολογίας έχει αλλάξει και έχει διευκολύνει πολύ τις εκάστοτε εταιρίες και εργαζομένους, κάνοντας το έργο πολύ πιο εύκολο και γρήγορο, με αποτέλεσμα την εκτίναξη του ρυθμού εξόρυξης και εκμετάλλευσης του μαρμάρου. Η διαδικασία της εξόρυξης περιλαμβάνει κάποια στάδια πριν ξεκινήσει η αποκόλληση του όγκου από το μητρικό πέτρωμα. Στις περιπτώσεις που τα λατομεία είναι νέα, θα πρέπει να γίνει γεωλογικός εντοπισμός με σεισμικές διασκοπήσεις και έπειτα με πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει μια πρώτη εκτίμηση για την έκταση την μορφολογία και την ποιότητα του μαρμάρου. Αφού ολοκληρωθεί η μελέτη, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στην εξόρυξη μαρμάρου είναι τα διατρητικά μηχανήματα, τα μηχανήματα κοπής (συρματοκοπή), οι φορτωτές και τα φορτηγά. Οι διαδικασίες εξόρυξης θα πρέπει να γίνονται πάντα με γνώμονα τις απαιτήσεις που θέτει ο δημόσιος φορέας για την ασφαλέστερη λειτουργία του λατομείου, που στην Ελλάδα είναι ο Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (ΚΜΛΕ).

Η σωστή δειγματοληψία αποτελεί ένα από τα προαπαιτούμενα για την βέλτιστη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, τόσο στο εργαστήριο, όσο και στον φυσικό τους χώρο. Ένα δείγμα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του πετρώματος, από το οποίο προέρχεται (και όχι να προέρχεται από την επιλογή των καλύτερων και πιο συνεκτικών τεμαχίων) και θα πρέπει να αξιολογείται, ανάλογα με τη θέση και τον προσανατολισμό του στο φυσικό του χώρο.

Βάσει των ανωτέρω, αρχικά τα ογκοτεμάχια εισήλθαν στον πυρηνολήπτη (Εικόνα 2.3), ώστε να κοπούν 24 κυλινδρικά δοκίμια με ύψος (h)  $10,0 \pm 0,1$  cm και πάχος (d)  $4,5 \pm 0,1$  cm, τα οποία ήταν απαραίτητα για το εργαστηριακό πείραμα της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Εικόνα 2.4). Στην συνέχεια, λήφθηκαν 24 κυλινδρικά δοκίμια για το εργαστηριακό πείραμα του έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test), με ύψος  $3,00 \pm 0,1$  και πάχος  $4,5 \pm 0,1$  cm. Μετά το τέλος της δειγματοληψίας, πραγματοποιήθηκε λείανση στα δοκίμια (Εικόνα 2.5), έτσι ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι εξωγενείς παράγοντες, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις δοκιμές και να αποδώσουν λανθασμένα αποτελέσματα. Επιπλέον, χρειάστηκε να κοπούν με τον τροχό και τέσσερα δοκίμια, για το εργαστηριακό πείραμα της αντοχής σε κάμψη. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η κοπή των δοκιμίων, με χρήση πυρηνολήπτη, για το πείραμα της υδατοαπορρόφησης των λεπτών τομών για την μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων και τέλος για τον ορυκτοχημικό τους χαρακτηρισμό.



Εικόνα 2.3: Στα αριστερά, ο εργαστηριακός πυρηνολήπτης και δεξιά ο δίσκος κοπής.



Εικόνα 2.4: Τα δοκίμια μετά τη λήψη τους και πριν το κόψιμό τους, ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε πειράματος.



Εικόνα 2.5: Ο λειαντής

## 2.2 Μακροσκοπική & Μικροσκοπική Εξέταση – Μέθοδοι Ορυκτολογικής & Χημικής Ανάλυσης

### 2.2.1 Μακροσκοπική & μικροσκοπική εξέταση

Η πετρογραφική εξέταση των δειγμάτων μαρμάρων προερχόμενα από λατομείο της εταιρείας «ΑΦΟΙ ΔΕΡΜΙΤΖΑΚΗΣ Α.Ε.Β.Ε.» στην Περιφερειακή Ενότητα Καβάλας (Π.Ε. Καβάλας), πραγματοποιήθηκε βάση του προτύπου **EN 12407**. Το συγκεκριμένο πρότυπο περιγράφει τον τρόπο διεξαγωγής της περιγραφικής εξέτασης και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής και χημικής ανάλυσης, ταξινομούν το πέτρωμα και προσδιορίζουν σημαντικά τα αισθητικά του χαρακτηριστικά. Στοιχεία όπως η κοκκομετρία, τα ιστολογικά χαρακτηριστικά, η παρουσία ή όχι προσμίξεων και η παρουσία ή όχι διακλάσεων στην κύρια μάζα των πετρωμάτων αυτών, διαμορφώνουν τις περισσότερες φυσικές ιδιότητες, όπως για παράδειγμα το πορώδες, την πυκνότητα, το ειδικό βάρος, την υδατοαπορρόφηση, ενώ επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό και όλες τις μηχανικές τους ιδιότητες (Τσιραμπίδης Α. , 2001; Triantafyllou et al, 2010).

Για τις ανάγκες της μακροσκοπικής παρατήρησης μελετήθηκαν χαρακτηριστικά και αντιπροσωπευτικά κυλινδρικά δοκίμια από τους δυο όγκους, με προέλευση το συγκεκριμένο λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν για τη διενέργεια των δοκιμών προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων της υδατοαπορρόφησης, της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους. Επίσης, με τη χρήση του στερεοσκοπικού μικροσκοπίου τύπου MZ-143-N2GG της εταιρείας Motic, ελήφθησαν φωτογραφίες των δοκιμίων, ενώ



παρασκευάστηκαν οι αναγκαίες λεπτές τομές για τη μελέτη με τη χρήση πολωτικού μικροσκοπίου διερχομένου φωτός τύπου Carl Zeiss της εταιρείας Jena Lab.

### 2.2.2 Προσδιορισμός των χρωματικών παραμέτρων

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε το χρώμα των υπό εξέταση δειγμάτων, όχι με την απλή μακροσκοπική περιγραφή, αλλά μέσω του προσδιορισμού χαρακτηριστικών χρωματικών παραμέτρων με πιο αντιπροσωπευτικές τη φωτεινότητα και τη διαφορά από το τέλειο λευκό, σύμφωνα με την CIE (International Commission on Illumination, 1976). Η CIE χρησιμοποιεί το μοντέλο CIE-Lab ή αλλιώς το μοντέλο  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , δηλαδή ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με άξονες τα μεγέθη  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  τα οποία υπολογίζονται βάσει των τιμών των τριχρωματικών συντελεστών  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  από μαθηματικές σχέσεις. Το εργαστηριακό μοντέλο CIE-Lab περιλαμβάνει ολόκληρο το φάσμα χρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που δεν μπορεί να διακρίνει ο ανθρώπινος οφθαλμός. Ο παράγοντας  $L^*$  εκφράζει τη φωτεινότητα με τιμές 0-100, ενώ οι παράγοντες  $a^*$  και  $b^*$  δίνουν πληροφορίες που αφορούν το χρώμα. Για τη μέτρηση των χρωματικών παραμέτρων αντιπροσωπευτικών μακροσκοπικών δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε το φασματοφωτόμετρο CM-5 της εταιρείας Konica Minolta με λογισμικό SpectraMagicCM-S100.

### 2.2.3 Ορυκτολογική ανάλυση

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας κόνεως ακτινών-X (Powder x-ray diffraction / PXRD) έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης και της κρυσταλλικής δομής 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 ακτινών-X, οι οποίες προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκευάσμα κρυσταλλικής κόνεως (Γκαμαλέτσος, 2024). Αντιπροσωπευτικό τμήμα κάθε δείγματος από τα τρία ογκοτεμάχια που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής κονιοποιήθηκε σε μέγεθος μικρότερο από τα 63  $\mu\text{m}$  και χρησιμοποιήθηκε τόσο για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης, όσο και για τη διενέργεια των χημικών αναλύσεων (βλ. § 2.2.3).

Για την υλοποίηση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε το περιθλασίμετρο τύπου AXS D8 ADVANCE της εταιρείας Bruker. Για την σαφή ανάλυση των δειγμάτων έγινε χρήση των ειδικών συνθηκών ακτινοσκόπησης που περιλάμβαναν τη χρήση λυχνίας Cu, μονοχρωμάτορα με φίλτρο Ni, τάση λυχνίας  $U = 35 \text{ kV}$  και ένταση ρεύματος  $I = 35 \text{ mA}$  στην περιοχή των γωνιών

$2\theta$  μεταξύ  $4^{\circ}$ - $70^{\circ}$ , με βήμα (step) =  $0,05^{\circ}$  και χρόνο 198,8 s/step. Για τον ποιοτικό προσδιορισμό των ορυκτολογικών φάσεων χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων JCPDS και το λογισμικό EVA Diffra (Bruker) και για να γίνει ο ποσοτικός προσδιορισμός των ορυκτολογικών φάσεων των δειγμάτων εφαρμόστηκε το λογισμικό AutoQuan (Rayflex), το οποίο λειτουργεί με τη μέθοδο εκλέπτυνσης της κρυσταλλικής δομής Rietveld.

#### 2.2.4 Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων

Η αρχή της μεθόδου της φασματομετρίας των ακτίνων-X φθορισμού (x-ray fluorescence / 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.

### 2.3 Φυσικές Ιδιότητες

Οι δοκιμές των φυσικών ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με όσα ορίζει το πρότυπο **EN 1936**, ώστε να προσδιοριστεί η φαινόμενη πυκνότητα και το ανοικτό πορώδες. Η φαινόμενη πυκνότητα ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του δοκιμίου προς το φαινόμενο όγκο του (συμπεριλαμβανομένου του όγκου του πορώδους) εκφραζόμενη σε  $\text{kg/m}^3$ . Το ανοικτό πορώδες (% κ.ο.) είναι ο όγκος των ανοικτών πόρων του δοκιμίου ως ποσοστό του φαινόμενου όγκου του. Το πρότυπο **EN 13755** που αφορά στον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικά κυλινδρικά δοκίμια, που ελήφθησαν από τα δυο ογκοτεμάχια (K1 και K2) του λατομείου Καβάλας της Π.Ε. Καβάλας (Εικόνα 2.6). Τα δοκίμια είχαν ύψος  $70 \pm 5 \text{ mm}$  και διάμετρο  $\sim 4.5 \text{ cm}$ . Ο αριθμός δοκιμίων που εξετάστηκε για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων είναι δώδεκα ( $n=12$ ), ήτοι έξι (6) από κάθε ογκοτεμάχιο. Τα δοκίμια αυτά χρησιμοποιήθηκαν και για τις ανάγκες της μακροσκοπικής παρατήρησης.



*Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστικά κυλινδρικά δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των μαρμάρων από την Καβάλα.*

## 2.4 Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη

Η πρώτη εργαστηριακή μέθοδος που πραγματοποιήθηκε ήταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Uniaxial Compression Strength / UCS) που εκτελέστηκε σε άκαμπτη μηχανή MTS 815 με δυνατότητα άσκησης φορτίων μέχρι 1600 kN. Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργαστηριακής μεθόδου, είναι ο προσδιορισμός της αντοχής του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη, στο οποίο ασκείται πίεση αξονικά δια μέσω των πλακών φόρτισης μιας θλιπτικής μηχανής δοκιμίων (πχ. Basu et al. 2013). Για την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής, χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) δοκίμια σε κάθε ογκοτεμάχιο, τα οποία προηγουμένως κόπηκαν στον πυρηνολήπτη με λόγω  $h/d$  (ύψους/πλάτους) περίπου 2,5, με συνολικά δώδεκα ( $n=12$ ) δοκιμές θλιπτικής αντοχής σύμφωνα με το πρότυπο **EN 1926**. Για το σύνολο των 12 δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε το καταγραφικό κελί φορτίου της μηχανής και οι αισθητήρες μετατόπισης (Linear Variable Displacement Transducer / LVDT) για την καταγραφή της αξονικής μετατόπισης σε όλο το ύψος του δοκιμίου (Εικόνα 2.7). Ταυτόχρονα, σε 2 δοκίμια (ένα ανά ογκοτεμάχιο) χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον ηλεκτρικά μηχανοσκόπετρα διάταξης  $90^\circ$  -που καλύπτουν μικρή περιοχή μερικών χιλιοστών του δοκιμίου- για τη μέτρηση της αξονικής και ακτινικής μετατόπισης.

Ως αντοχή σε θλίψη, ορίζεται το πηλίκο της μέγιστης επιβαλλομένης δύναμης τη στιγμή της αστοχίας του δοκιμίου ως προς την αρχική διατομή του δοκιμίου, που μετριέται κάθετα προς την διεύθυνση της δύναμης και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Αγιουτάντης, 2019 και βιβλιογραφίες εντός):

$$C_0 = \frac{F}{A} \quad (1)$$

όπου:  $C_0$ : αντοχή του δοκιμίου σε θλίψη (MPa)

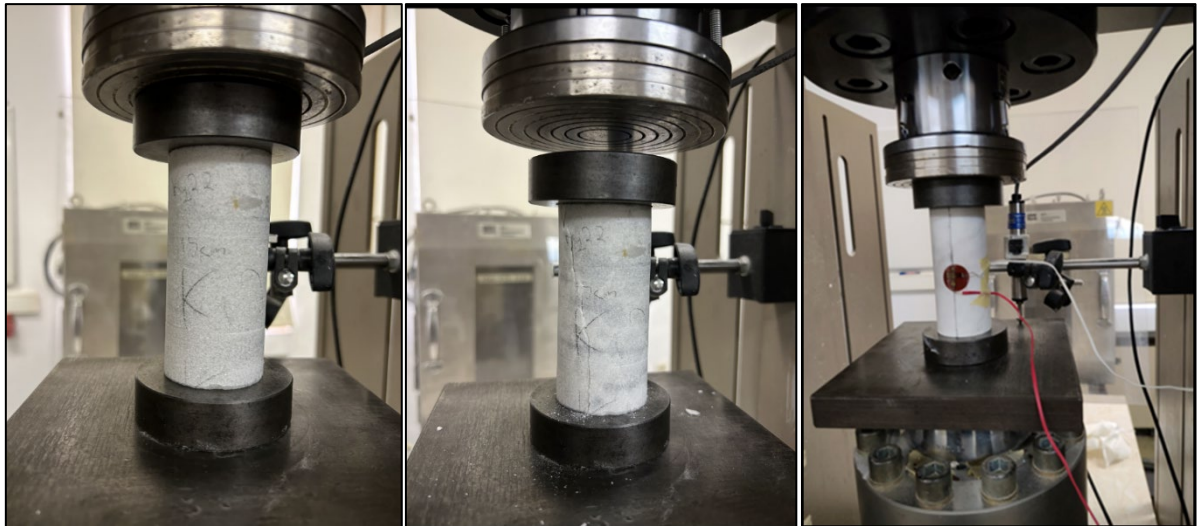
$F$ : επιβαλλόμενη δύναμη την στιγμή της αστοχίας (MN)

$A$ : αρχική διατομή του δοκιμίου ( $\text{m}^2$ ), κάθετη προς την διεύθυνση ενέργειας της δύναμης  $F$ .

Για να μπορέσει να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το σφάλμα κατά τη πειραματική διαδικασία, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν, εκτός από την ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των κόκκων, το πορώδες, αλλά και η τριβή μεταξύ των πλακών επιβολής φορτίου και των βάσεων του δοκιμίου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου (σχήμα, ύψος, μέγεθος), ο ρυθμός φόρτισης της μηχανής, καθώς και το εξωγενές περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα:

- Κατά την φόρτιση, το δοκίμιο έχει την τάση να διογκώνεται πλευρικά σύμφωνα με τον λόγο Poisson. Η πλευρική αυτή διόγκωση δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το ύψος του δοκιμίου και αυτό οφείλεται στις χαλύβδινες πλάκες επιβολής του φορτίου της μηχανής. Το δοκίμιο δεν διογκώνονται τόσο ώστε οι δυο βάσεις του, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής, οι οποίες εμποδίζουν την πλευρική διόγκωση σε αυτά τα σημεία και έτσι το δοκίμιο καταλήγει να μην βρίσκεται σε ομοιόμορφη μονοαξονική καταπόνηση στην περιοχή επιβολής του φορτίου, λόγω των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται. Μια από τις πιο απλές και αποτελεσματικές λύσεις για την μείωση της τριβής μεταξύ ράβδων και δοκιμίου, είναι η λίπανση των δίσκων έδρασης.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου θα πρέπει να είναι κυλινδρικά, καθώς η προετοιμασία τους δεν είναι χρονοβόρα, όμως η δειγματοληψία πρέπει να είναι πολύ προσεκτική και να έχουν διάμετρο και ύψος 2,5-3 φορές μεγαλύτερη την διάμετρο τους. Η διάμετρος των δοκιμίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από τον κόκκο του υλικού.
- Ο ρυθμός φόρτισης θα πρέπει να επιβάλλεται χωρίς διακοπές, με σταθερό ρυθμό φόρτισης 0,5- 1,0 MPa/sec.
- Το φορτίο πρέπει να καταγράφεται με 1% ακρίβεια.

Συνοπτικά, η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης (Εικόνα 2.7) χρησιμεύει για την ένδειξη της αντοχής του πετρώματος, όχι μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο, αλλά και για τον χαρακτηρισμό του ακέραιου πετρώματος από πλευράς αντοχής.



Εικόνα 2.7: Δοκίμια πριν από την εργαστηριακή (αριστερή εικόνα) και μετά τη μονοαξονική καταπόνηση (μεσαία εικόνα). Στη δεξιά εικόνα απεικονίζεται οι αισθητήρες μετατόπισης (LVDT) και το μηκυνσίόμετρο.

- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο  $F_{\max}$  που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και  $A$  είναι η επιφάνεια που υπολογίζεται από την μέση διάμετρο (μέτρηση 6 φορές το κάθε δοκίμιο 0,1mm και βγάζοντας μέσο όρο σε όλο το μήκος του δοκιμίου). Για να γίνει αναγωγή των τιμών σε σταθερό λόγο  $\frac{h}{D}$  λόγω του ότι τα δοκίμια έχουν ίδια διάμετρο, αλλά δεν έχουν ίδιο ύψος και ας προέρχονται από το ίδιο δείγμα, υπάρχει η εξίσωση των (Obert, Windes, & Duvall, 1946):

$$C_1 = \frac{\sigma_c}{0,788 + \frac{0,222}{\frac{h}{D}}} \quad (2)$$

- $\sigma_c$ : η αντοχή που υπολογίζεται για δοκίμιο με λόγο  $\frac{h}{D} > 1$  και
- $C_1$ : ανοιγμένη τιμή για λόγο  $\frac{h}{D} = 1$ .

Ο Protodyakonov (1969) προτείνει την ακόλουθη σχέση ανάγωγης (Protodyakonov, 1969):

$$C_2 = \frac{\sigma_c}{\frac{7}{8} + \frac{2}{8h/D}} \quad (3)$$

- Οπού  $\sigma_c$ : αντοχή, που υπολογίζεται για δοκίμιο με λόγο  $\frac{h}{D} > 1$  και  $C_2$  = η ανηγμένη τιμή για λόγο  $\frac{h}{D} = 2$ .

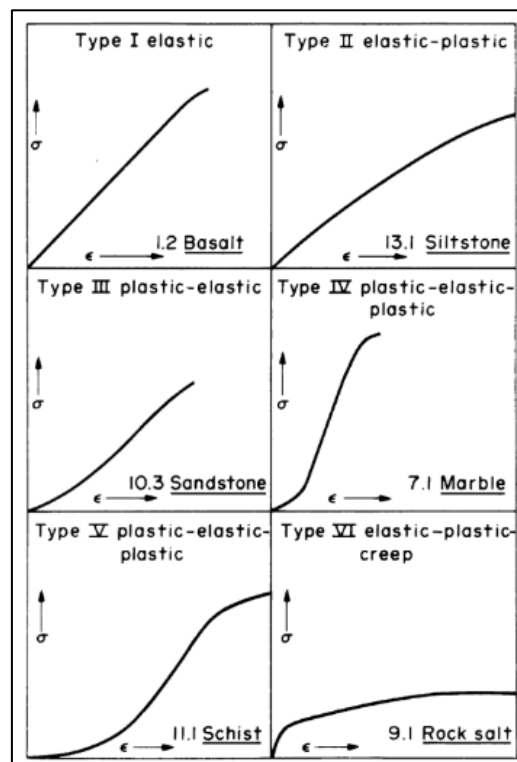
Γενικώς, είναι αποδεδειγμένο πειραματικά ότι η αντοχή ενός δοκιμίου μειώνεται, καθώς αυξάνεται το μέγεθος του. Εν συνεχεία, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της δοκιμής σε ανεμπόδιστη θλίψη ελήφθησαν οι εργαστηριακές καταγραφές για:

- Τη δύναμη (kN), που ασκήθηκε στο δοκίμιο σε κάθε στιγμή,
- τη μετατόπιση του δοκιμίου (mm),
- το εφαπτομενικό ή μέσο μέτρο ελαστικότητας  $E$  του Young:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4)$$

- Τέλος, η καμπύλη που προκύπτει από την αποτύπωση τιμών τάσης παραμόρφωσης σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων, καλείται καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (stress-strain curve) για το κάθε δοκίμιο. Η καμπύλη αυτή αποτελείται, συνήθως από δύο κλάδους. Τον κλάδο μέχρι την διαρροή η θραύση και τον φθίνοντα κλάδο. Έτσι, διακρίνονται οι καμπύλες που περιγράφουν, είτε ελαστική συμπεριφορά είτε πλαστική ή συνδυασμό των παραπάνω.

Η Εικόνα 2.8 παρουσιάζει τυπικές μορφές τέτοιων συναρτήσεων που προκύπτουν από πειράματα σε διάφορα πετρώματα (Αγιουτάντης, 2019).



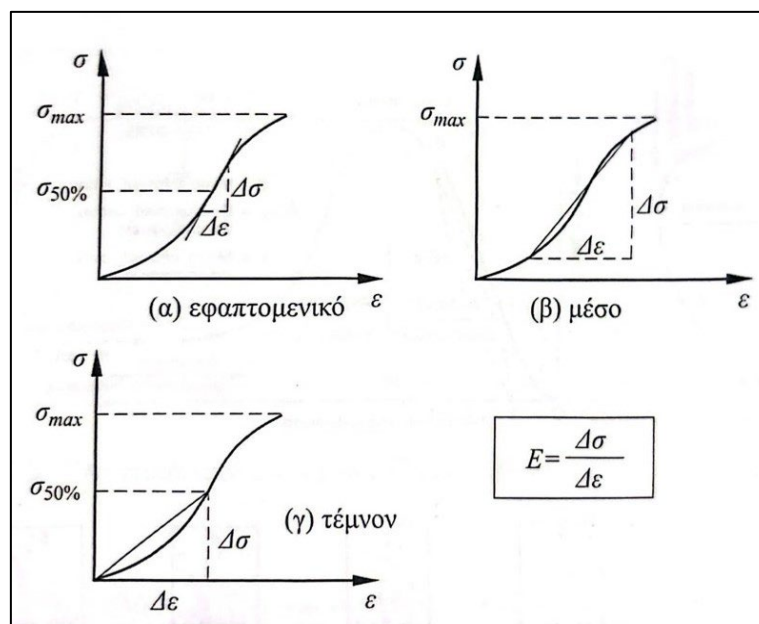
Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικά διαγράμματα Τάσης-Παραμόρφωσης για Πετρώματα (Roberts, 1977).

Τα περισσότερα πετρώματα επιδεικνύουν μια ελαστική συμπεριφορά σε χαμηλές περιοχές τάσεων. Η πλαστική περιοχή ακολουθεί την ελαστική περιοχή, στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης και το εύρος  $T$  της ποικίλει ανάλογα με το υλικό. Το μέγιστο της καμπύλης

τάσης παραμόρφωσης, που αποτελεί το όριο ανάμεσα στην πλαστική και την ψαθυρή περιοχή είναι η χαρακτηριστική παράμετρος του υλικού, που ονομάζεται αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.

Από τις τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, που υπολογίζεται από τον την κλίση της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης, δεν παραμένει σταθερό κατά την διαδικασία φόρτισης του υλικού. Έτσι, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού ενός αντιπροσωπευτικού μέτρου ελαστικότητας, οι οποίοι έχουν ως εξής (Εικόνα 2.9):

- Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, που στην γενική περίπτωση υπολογίζεται από την σχέση  $d\sigma/d\varepsilon$ , αποτελεί την κλίση της καμπύλης σε κάποιο σημείο της καμπύλης, το οποίο δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το υλικό (π.χ. 50%).
- Το μέσο μέτρο ελαστικότητας, που προκύπτει από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης και υπολογίζεται από τη σχέση  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ .
- Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας, που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει τη συμβολή των αξόνων με κάποιο σημείο της καμπύλης. Δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης, που δέχθηκε το υλικό (π.χ. 50%). Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται επίσης, από τη σχέση  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ .

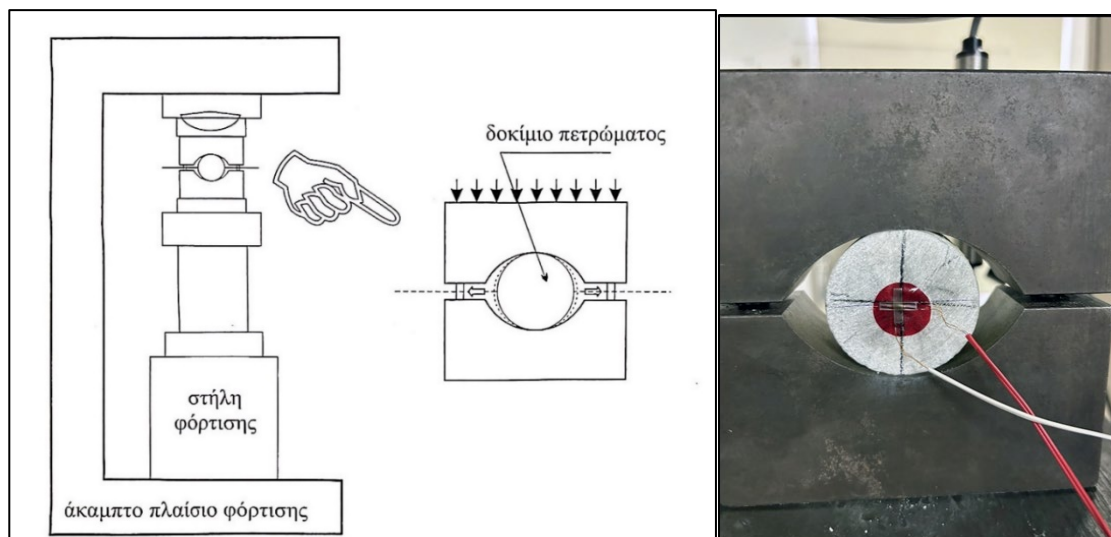


Εικόνα 2.9: Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας του Young από διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (Αγιουντάντης, 2019; Brady & Brown, 1985).

## 2.5 Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσος εφελκυσμός)

Το πείραμα της αντιδιαμετρικής θλίψης (γνωστό και ως δοκιμή του Βραζιλιανού δίσκου – Brazilian Tensile Strength / BTS) χρησιμοποιείται για την έμμεση εκτίμηση της αντοχής σε εφελκυσμό των πετρωμάτων (Εικόνα 2.10), καθότι είναι δύσκολο να διαμορφωθούν και να εκτελεστούν πειράματα άμεσου εφελκυσμού (πχ. Basu et al. 2013). Ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό των πετρωμάτων, που ενδιαφέρει τη μηχανική πετρωμάτων σε θέματα αστοχίας, καθώς τα πετρώματα εμφανίζουν πολύ μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό από ότι σε θλίψη (Αγιουτάντης, 2019). Το σύστημα δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού περιλαμβάνει τα ακόλουθα όργανα (Εικόνα 2.10):

- Συσκευή δοκιμής η οποία επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως έχει την δυνατότητα να καταγράψει το μεταβαλλόμενο φορτίο,
- τις πλάκες φόρτισης, οι οποίες χρησιμεύουν για να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους,
- σιαγόνες φόρτισης, οι οποίες φορτίζουν το δοκίμιο
- και τέλος το καταγραφικό όργανο, από το οποίο γίνεται κατευθείαν η καταγραφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης με δυο εισόδους (X-Y recorder) (Αγιουτάντης, 2019).



Εικόνα 2.10: Η απεικόνιση του έμμεσου εφελκυσμού (Αγιουτάντης, 2019) (βλ. αριστερή εικόνα) και οι σιαγόνες φόρτισης ενός αντιπροσωπευτικού κυλινδρικού δοκιμίου (δεξιά εικόνα).

- Η αντοχή σε εφελκυσμό ( $\sigma_t$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:



$$\sigma_t = \frac{2F_{max}}{\pi Dt} \quad (5)$$

- όπου  $F_{max}$ : το μέγιστο φορτίο που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει.
- $D$  = η διάμετρος του δοκιμίου.
- $t$ : το πλάτος του δοκιμίου.
- Η συγκεκριμένη εξίσωση προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση, με την παραδοχή ότι οι γωνίες επαφής ( $2\alpha < 10^\circ$ ) είναι μικρές:

$$\sigma_t = \frac{2F_{max}}{\pi Dt} \left[ \frac{\sin 2\alpha}{a} - 1 \right] \quad (6)$$

Σύμφωνα με το πρότυπο **ISRM 1981**, ο έμμεσος εφελκυσμός πραγματοποιήθηκε με τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Τα δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιούνται θα πρέπει να έχουν διάμετρο μεγαλύτερη η ίση με NX (περίπου 54 mm) και το πλάτος να είναι περίπου ίσο με την ακτίνα τους.
- Τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν λείες κυλινδρικές επιφάνειες, με ανοχή 0,025 mm και τα άκρα του κυλίνδρου θα πρέπει να είναι επίπεδα, με ανοχή 0,25 mm και παράλληλα, με ανοχή 0,25 mm.

Ο εξοπλισμός, ο οποίος είναι απαραίτητος για την εργαστηριακή μελέτη του εμμέσου εφελκυσμού περιλαμβάνει τη συσκευή δοκιμής με δυνατότητα να μετρήσει και να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο. Η συσκευή αποτελείται από τις πλάκες φόρτισης, οι οποίες χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και από τις σιαγόνες φόρτισης για τη φόρτιση του δοκιμίου σε ακτίνα επαφής μικρότερη των 10 μοιρών.

Η διάμετρος και το πλάτος (ύψος) του δοκιμίου μετρούνται με ακρίβεια 0,01 mm. Το κάθε δοκίμιο επικαλύπτεται με χαρτοταινία στην παράπλευρή του επιφάνεια και τοποθετείτε μέσα στις σιαγόνες φόρτισης με τον επιθυμητό προσανατολισμό και κατά τέτοιο τρόπο ώστε, ο άξονας συμμετρίας του δοκιμίου να ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του συστήματος των σιαγόνων. Για τη μείωση της τριβής είναι αναγκαίο, οι κεφαλές έδρασης να λιπανθούν με ορυκτέλαιο και το φορτίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής, να επιβάλλεται χωρίς διακοπές με ρυθμό φόρτισης 200 N/s.

Συχνά παρατηρείται ότι, μετρά την αρχική αστοχία του δοκιμίου, το τελευταίο δεν χάνει τη φέρουσα ικανότητά του κι εξακολουθεί να παραλαμβάνει φορτία (Αγιουτάντης, 2019). Από το εργαστηριακό πείραμα του έμμεσου εφελκυσμού ελήφθησαν οι παρακάτω καταγραφές:

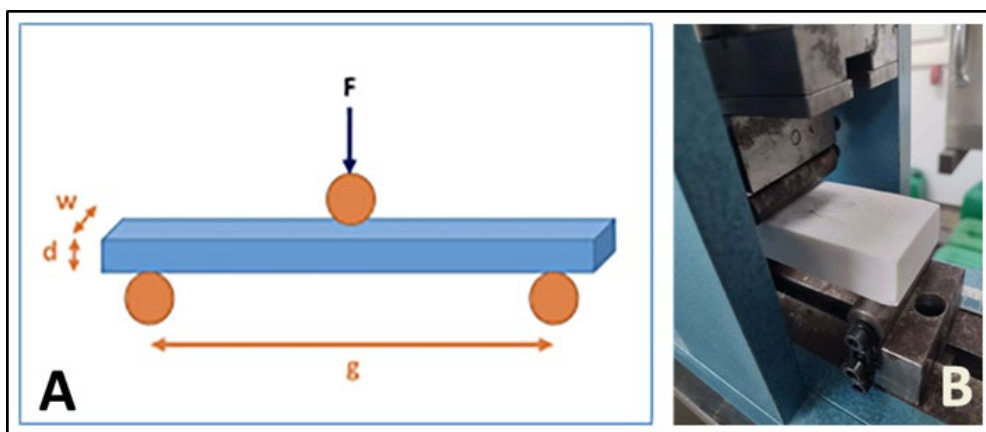
- Η δύναμη σε (kN) που ασκήθηκε στο δοκίμιο, και
- Η μετατόπιση του δοκιμίου σε (mm)

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε η πρώτη τιμή από τη μετατόπιση ώστε να δημιουργηθεί η καμπύλη τάσης μετατόπισης. Στο τέλος, υπολογίστηκε η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_0 = \frac{2F}{\pi Dt} \quad (7)$$

## 2.6 Κάμψη τριών σημείων

Η δοκιμή πρισματικής δοκού έγινε σύμφωνα με το πρότυπο **EN 12372** με την εφαρμογή της κάμψεως τριών σημείων (Εικόνα 2.11). Οι δοκιμές κάμψεως είναι μηχανικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αντίστασης ενός υλικού σε κάμψη. Πρόκειται για μια απλή και οικονομική δοκιμή σε σύγκριση με άλλες, όπως η δοκιμή του έμμεσου εφελκυσμού, και δίδει χρήσιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του υλικού, ιδιαίτερα για τους διακοσμητικούς λίθους όπως το μάρμαρο, το οποίο χρησιμοποιείται και για κοπή λεπτών πλακών.



Εικόνα 2.11: (Α) Η κάμψη τριών σημείων και (Β) η πειραματική διάταξη.

Κατά την πειραματική διαδικασία της κάμψης (bending test) δοκιμάζεται το υλικό, καθώς και η συμπεριφορά του στην καταπόνηση όταν ασκείται η καθαρή κάμψη. Εφελκύστηκες και θλιπτικές τάσεις αναπτύσσονται κατά την καταπόνηση των υλικών σε καμπτικές ροπές και η μέλότη τους γίνεται με τρισδιάστατους δοκούς, συνήθως κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, στις

οποίες ασκείται καταπόνηση υπό σταθερή καμπτική ροπή  $M$ , χωρίς τέμνουσες, αξονικές δυνάμεις ή δυνάμεις στρεπτικής ροπής (καθαρή κάμψη). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Timoshenko & Goodier, 1970), οι καμπτικές τάσεις  $\sigma_f$  υπολογίζονται με βάση την εξίσωση (8α) και οι παραμορφώσεις  $\varepsilon_f$  υπολογίζονται με βάση την εξίσωση (8β), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η διατομή της δοκού  $w \times d$  είναι πάντα μικρότερη σε σύγκριση με το μήκος της (Πρασιανάκης, 1986):

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot g}{2 \cdot w \cdot d^2} \quad (8\alpha)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot d \cdot u}{g^2} \quad (8\beta)$$

όπου:  $F$ : η ασκούμενη δύναμη,

$g$ : η απόσταση έδρασης της δοκού,

$u$ : η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο φόρτισης,

$w, d$ : το πάχος και το ύψος της δοκού, αντίστοιχα

Για να μελετηθούν οι συμπεριφορές των υλικών σε κάμψη εφαρμόζονται οι παρακάτω παραδοχές Bernoulli σύμφωνα με το θεωρία του Bernoulli – Euler (Timoshenko & Goodier, 1970), οι οποίες αντικατοπτρίζουν σε μεγάλο βαθμό την πραγματική συμπεριφορά των καμπτόμενων δοκών (υπό συνθήκες καθαρής κάμψης) ως εξής:

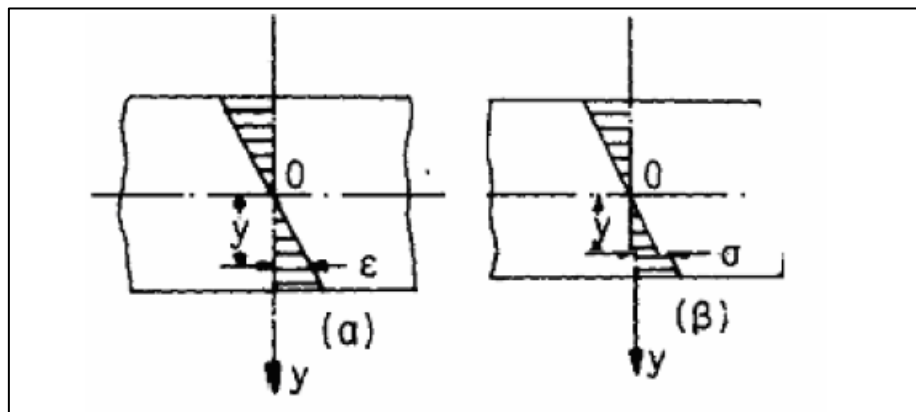
- οι εγκάρσιες διατομές των δοκών που υπόκεινται σε κάμψη διατηρούνται επίπεδες όσο διαρκεί η καμπτική παραμόρφωση.
- Η δοκός παραμορφώνεται σαν να αποτελείται από ένα σύνολο ανεξάρτητων διαμηκών ινών.

Οι παραπάνω παραδοχές φανερώνουν ότι οι διατομές της δοκού στρέφονται υπό την επίδραση του καμπτικού φορτίου ως ανένδοτες επιφάνειες, καθώς η μία περιοχή ινών στο εσωτερικό του δοκιμίου υφίσταται εφελκυσμό, ενώ μια άλλη υφίσταται θλίψη. Η επιφάνεια που διαχωρίζει τη θλίψη από τον εφελκυσμό καλείται ουδέτερη επιφάνεια (βλ. *Εικόνες 2.12 & 2.13*).

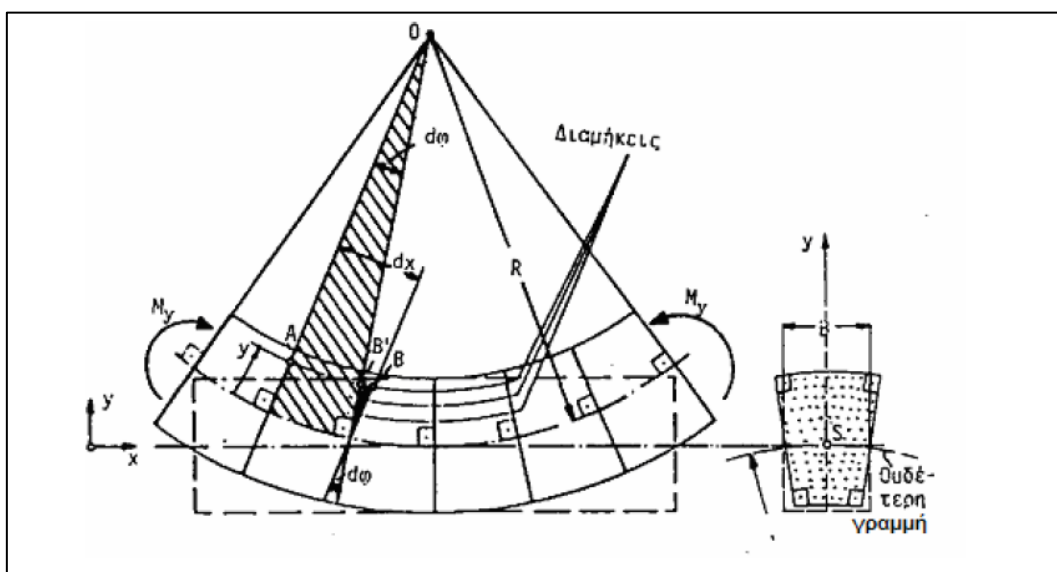
Από αυτή την παραδοχή, γίνεται σαφές ότι η ουδέτερη επιφάνεια είναι το σημείο όπου οι αρχικές (πριν την παραμόρφωση) και οι νέες (μετά την παραμόρφωση) θέσεις των διατομών της ράβδου τέμνονται. Οι τομές αυτές ονομάζονται ουδέτερες γραμμές. Κάθε διαμήκης γραμμή στην ουδέτερη επιφάνεια ονομάζεται ουδέτερος άξονας. Η υπόθεση της επιπεδότητας των εγκάρσιων διατομών υποδηλώνει ότι η παραμόρφωση των ινών της ράβδου εξαρτάται

γραμμικά από την απόστασή τους από τον ουδέτερο άξονα, ωστόσο αυτό ισχύει μόνο στην ελαστική περιοχή (Πρασιανάκης, 1986).

Επειδή η σχέση μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης είναι γραμμική επομένως και η τάση των ινών της ράβδου είναι απαραίτητο να είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασής μεταξύ  $y$  και ουδέτερο άξονα (Εικόνα 2.12). Ωστόσο, όταν η δοκός εισέρχεται στην πλαστική περιοχή, η γραμμικότητα μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης καταργείται. Κατά τη διαδικασία της κάμψης της δοκού οι ίνες της κάτω επιφάνειας της δοκού επιμηκύνονται, ενώ οι ίνες της άνω επιφάνειας βραχύνονται, ταυτόχρονα. Οι εξωτερικές ίνες της δοκού υφίστανται τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε απόλυτη τιμή, ενώ κατά μήκος κάθε ίνας της δοκού η παραμόρφωση παραμένει ομοιόμορφη, υποδεικνύοντας ότι η αρχικά ευθεία δοκός μετατρέπεται σε τόξο κύκλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13.



Εικόνα 2.12: Παραμόρφωση των ινών του ουδέτερου άξονα (Πρασιανάκης, 1985).

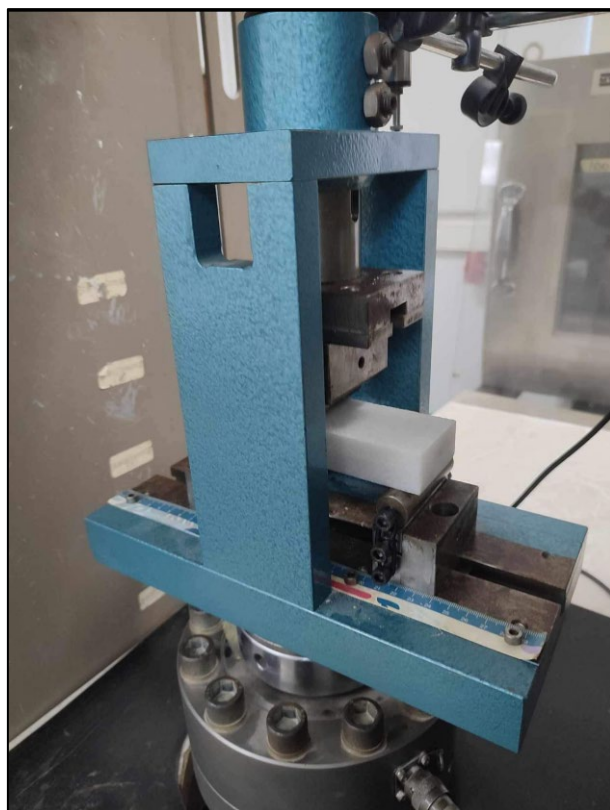


Εικόνα 2.13: Ευθεία δοκός που μετασχηματίζεται σε τόξο κύκλου κατά την κάμψη (Πρασιανάκης, 1985).

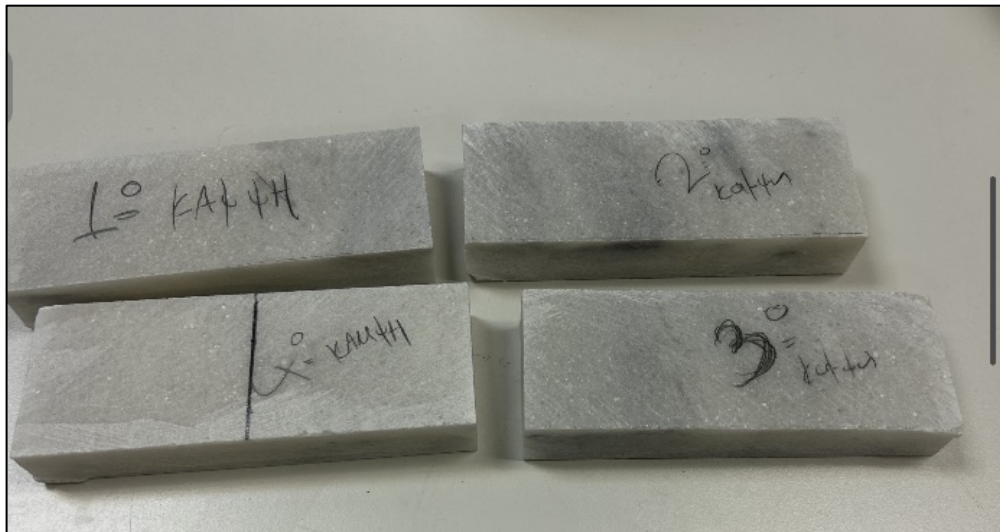
Σύμφωνα με την τεχνική θεωρία του Bernoulli – Euler (Timoshenko & Goodier, 1970) για την κάμψη ράβδου τριών σημείων, η επίδραση του συγκεντρωμένου φορτίου συνήθως παραλείπεται. Ωστόσο, στην κεντρική περιοχή μίας δοκού που υπόκειται σε κάμψη η παρουσία του συγκεντρωμένου φορτίου προκαλεί σημαντική διαταραχή στο πεδίο των τάσεων και παραμορφώσεων.

Στα υλικά που εμφανίζουν ανισοτροπία οι ελαστικές ιδιότητες διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση. Στα ανισότροπα υλικά στις κατευθύνσεις κατά τις οποίες οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού είναι ίδιες ονομάζονται ελαστικά ισοδύναμες ενώ σε ένα ισότροπο υλικό όλες οι κατευθύνσεις είναι ελαστικά ισοδύναμες, καθώς οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην περίπτωση ανισότροπου υλικού, κάθε συνιστώσα της παραμόρφωσης είναι γραμμική συνάρτηση των έξι συνιστωσών της τάσης. Όταν εξετάζεται ένα ομογενές ανισότροπο σώμα στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης περιγράφονται από το γενικευμένο νόμο του Hooke (Πρασιανάκης, 1986; Brady & Brown, 1985).

Στη δοκιμή κάμψης τριών σημείων ελέγχεται το μαρμάρινο δοκίμιο μέχρι τη θραύση του εργαστηριακά με το μηχάνημα της (Εικόνας 2.14). Η μετατόπιση των σημείων, η καμπτική τάση και οι διαφορετικές μορφές θραύσης του δοκιμίου είναι οι βασικές παράμετροι, που μελετώνται και εξετάζονται. Τα δοκίμια πριν ξεκινήσει η διαδικασία του πειράματος μετρήθηκαν, ώστε να είναι γνωστά τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, όπως το πλάτος, το πάχος του δοκιμίου και το μήκος μεταξύ των εδράσεων (Εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.14: Μηχάνημα καταπόνησης κάμψης τριών σημείων.

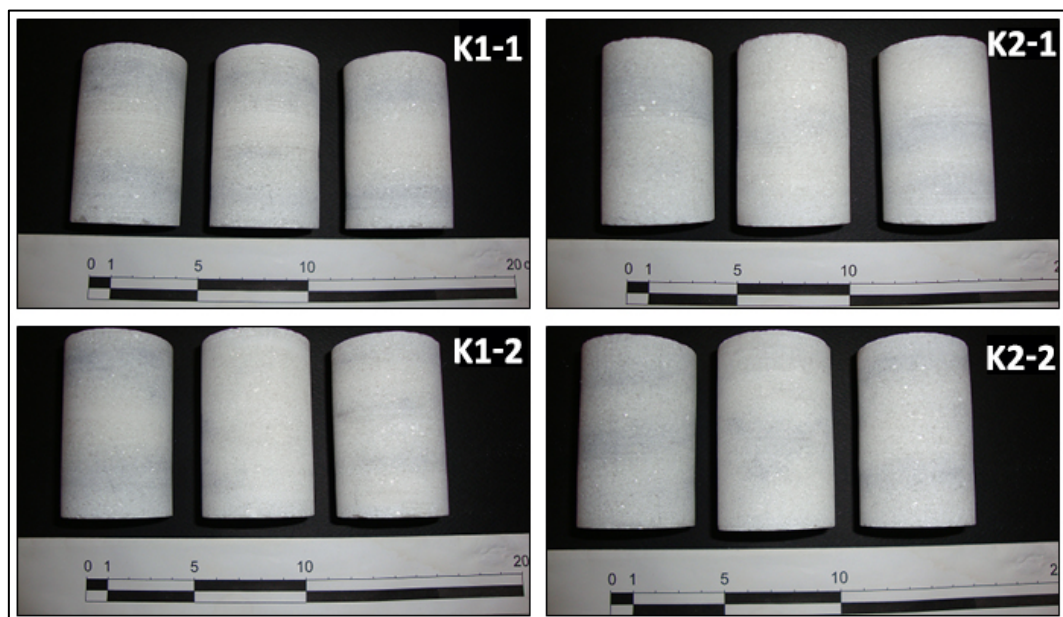


Εικόνα 2.15: Τα δοκίμια μαρμάρου πριν από την δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων.

### 3 Αποτελέσματα

#### 3.1 Μακροσκοπική & Μικροσκοπική Εξέταση

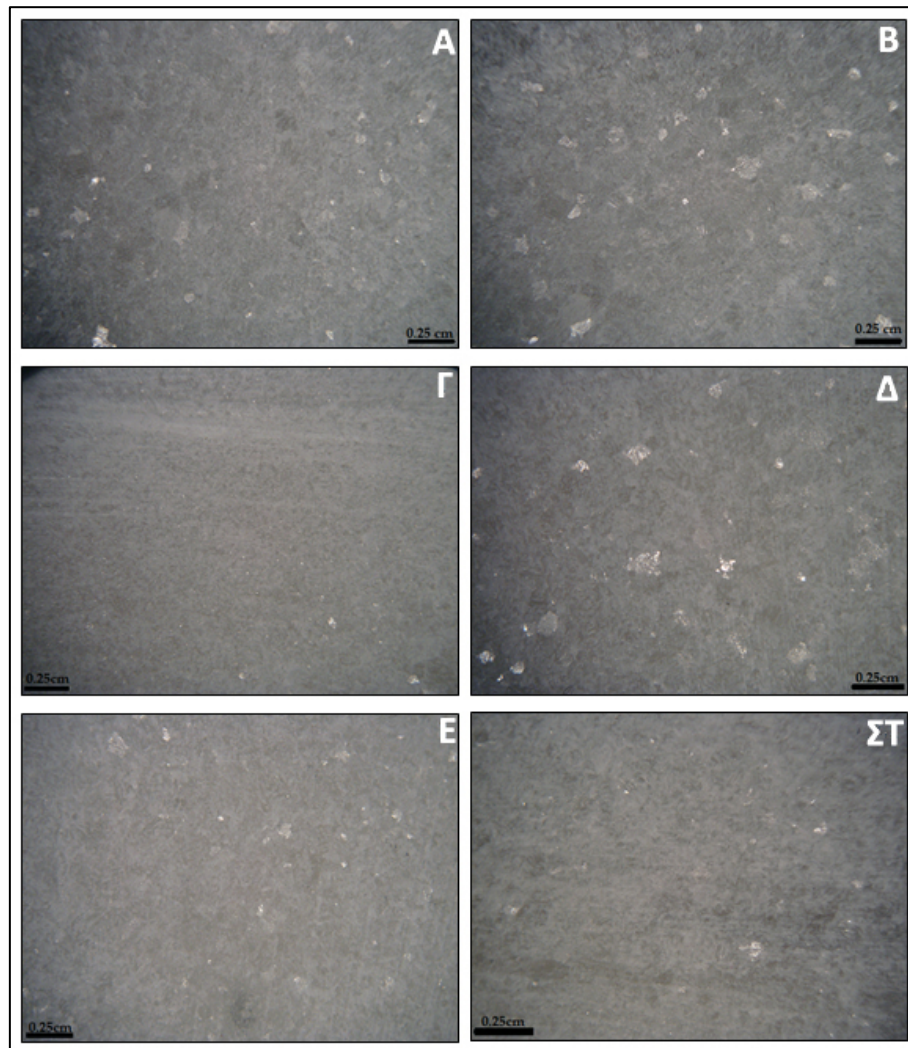
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πετρογραφικής εξέτασης (μέσω της μακρο-/μικρο-σκοπικής εξέτασής τους) από αντιπροσωπευτικά ογκοτεμάχια μαρμάρου από ενεργό λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας. Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες της *Εικόνας 3.1* (και σε συνδυασμό με την ορυκτολογική σύσταση και τη χημική ανάλυση που παρατίθενται παρακάτω), τα ογκοτεμάχια K1 και K2 είναι μάρμαρα με ημίλευκη χρωματική απόχρωση, πυκνή και συμπαγή υφή και απουσία ορατών -με γυμνό μάτι- μικροδιακλάσεων στη μακροσκοπική τους παρατήρηση στο στερεομικροσκόπιο (*Εικόνα 3.2*). Επίσης, δεν παρατηρούνται πόροι στην κύρια μάζα των μαρμάρων. Από μακροσκοπικής απόψεως (παρατήρηση με γυμνό μάτι), η υγεία των υπό μελέτη ογκοτεμαχίων είναι καλή, διότι κανένα ορατό σημάδι αποσάθρωσης ή/και αποικοδόμησης δεν παρατηρείται στα προς μελέτη δοκίμια, αλλά ούτε στους όγκους μαρμάρων -που απεστάλησαν προς εξέταση- παρατηρήθηκαν ελαττώματα όπως, ρωγμές, κοιλότητες ή/και ασταθείς φλέβες. Από την άλλη πλευρά, η μακροσκοπική παρατήρηση φανέρωσε την παρουσία ανοιχτότεφρων ταινιώσεων στην κύρια μάζα των δοκιμίων, το πάχος των οποίων ποικίλει (από 0.5 έως και 3 cm). Μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης αυτών παρουσιάζεται στα δοκίμια εκείνα που έχουν προέλευση το πρώτο ογκοτεμάχιο K1 (φωτογραφίες K1-1 & K1-2 της *Εικόνας 3.1*).



*Εικόνα 3.1. Φωτογραφίες από τη μακροσκοπική παρατήρηση αντιπροσωπευτικών δοκιμίων από τα δυο ογκοτεμάχια K1 και K2 αντιστοίχως, που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.*



Η ύπαρξη ταινιώσεων διαφορετικών αποχρώσεων που επηρεάζουν τα αισθητικά χαρακτηριστικά τους, έχει παρατηρηθεί σε πολλούς τύπου ανθρακικών πετρωμάτων με προέλευση την περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας και αποδίδεται κυριότερα σε συγκεντρώσεις λεπτόκοκκου ασβεστιτικού ή/και δολομιτικού υλικού (Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός).



Εικόνα 3.2. Φωτογραφίες (Α έως και ΣΤ) αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από τα δοκίμια μαρμάρου με προέλευση το λατομείο Καβάλας, μετά την παρατήρησή τους στο στερεομικροσκόπιο.

Η πιο λεπτομερής παρατήρηση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων στο στερεομικροσκόπιο (Εικόνα 3.2), πιστοποίησε πως αυτά αποτελούνται από κρυσταλλική μάζα ημίλευκου χρώματος, με ευμεγέθεις κρυστάλλους ασβεστίτη να είναι ορατοί κατά θέσεις στη συμπαγή μάζα των μαρμάρων (Εικόνες 3.2 Β, Δ).

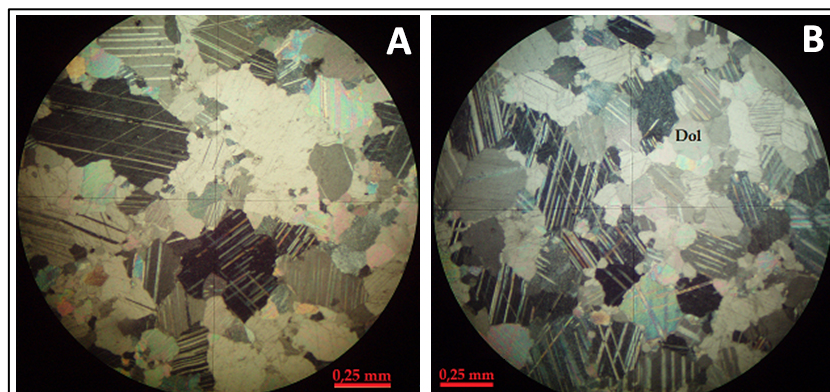
Οι ανοιχτότεφρες ταινιώσεις, που παρατηρήθηκαν στο στερεομικροσκόπιο, παρουσιάζουν επιμήκη ανάπτυξη-προσανατολισμό και η παρουσία τους οφείλεται, κατά κύριο



λόγο στην κοκκομετρική διαφοροποίηση του ασβεστιτικού υλικού από το οποίο αποτελούνται τα δείγματα των μαρμάρων (ζώνες πληρωμένες με περισσότερο λεπτόκοκκους κρυστάλλους ασβεστίτη) και στην επιμήκυνση των κρυστάλλων αυτών (*Εικόνες 3.2 Γ, ΣΤ*).

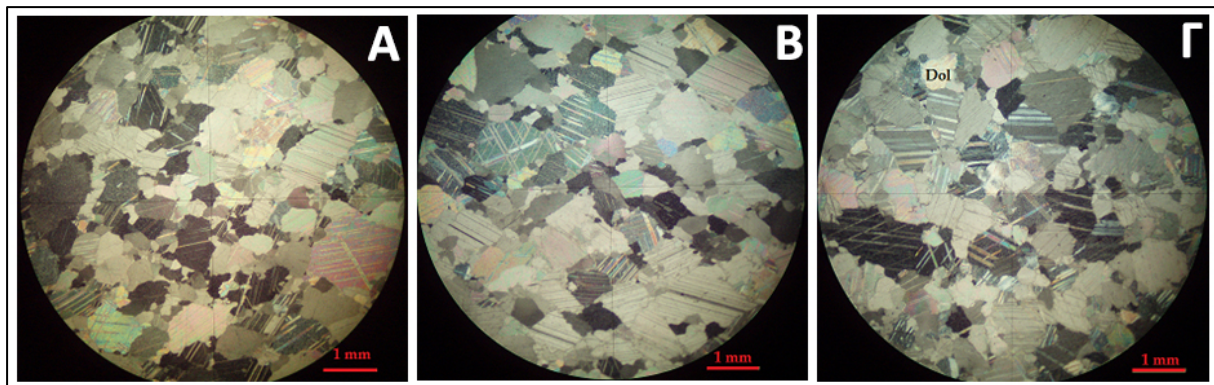
Στις *Εικόνες 3.3* και *3.4* παρουσιάζονται μικροφωτογραφίες, από την παρατήρηση λεπτών τομών των προς εξέταση μαρμάρων με χρήση πολωτικού μικροσκοπίου διερχομένου φωτός. Με βάση τη μικροσκοπική παρατήρηση παρατηρείται ότι στην κύρια μάζα των υπό μελέτη ογκοτεμαχίων κυριαρχούν κρύσταλλοι ασβεστίτη (*Εικόνες 3.3* και *3.4*), με τον ιστό τους να είναι κυρίως “γρανοβλαστικού” και κατά θέσεις “πορφυροβλαστικού” τύπου. Ο ιστός χαρακτηρίζεται και ως ελαφρώς ετεροκοκκώδης, μιας και η κοκκομετρική κατανομή των κρυστάλλων του ασβεστίτη καλύπτει ένα εύρος μεγέθους από 0,05 έως 1,4 mm.

Δεν παρατηρούνται φαινόμενα εξαλλοίωσης (alteration) ή αποσύνθεσης (decomposition) στη δομή των κρυστάλλων του ασβεστίτη, οι οποίοι εμφανίζονται υπιδιόμορφοι και κατά τόπους αλλοτριόμορφοι. Μεμονωμένοι αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι δολομίτη, αναγνωρίστηκαν κατά τόπους σε σημεία των λεπτών τομών που εξετάστηκαν στο μικροσκόπιο διερχομένου φωτός (*Εικόνες 3.3B* και *3.4Γ*).



*Εικόνα 3.3: Μικροφωτογραφίες Α και Β στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Καβάλας, όπου διακρίνονται ευμεγέθεις κρύσταλλοι ασβεστίτη με χαρακτηριστικές τεκτονικές πολυδιδυμίες, που παρουσιάζουν πολύ υψηλά χρώματα πόλωσης (Nicols J, μεγέθυνση x100).*

Οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη παρουσιάζουν κυματοειδή κατάσβεση και τεκτονικές διδυμίες, στοιχεία που υποδηλώνουν ότι το πέτρωμα έχει υποστεί τεκτονική καταπόνηση. Είναι υποβλαστικοί, κατά κύριο ποσοστό ισομετρικοί και ο τρόπος σύνδεσης είναι τύπου “τριπλά σημεία επαφής” και “λοβοειδής”. Δεν παρατηρούνται ασυνέχειες, μικροδιακλάσεις ή σημεία όπου να υπάρχει σημαντικές ατέλειες στην επαφή των κρυστάλλων, γεγονός που δικαιολογεί την απουσία πόρων στην κύρια μάζα του πετρώματος.



Εικόνα 3.4: Μικροφωτογραφίες A, B και Γ στο πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός λεπτών τομών των μαρμάρων από την περιοχή της Καβάλας, όπου διακρίνεται ο γρανοβλαστικός και κατά θέσεις πορφυροβλαστικός ιστός του πετρώματος (Nicols L, μεγέθυνση x25).

Ως προς την κοκκομετρία τους τα δείγματα των μαρμάρων από το λατομείο «Καβάλας» χαρακτηρίζονται ως μεσόκοκκα, μιας και η κατανομή μεγέθους των κρυστάλλων ασβεστίτη, που απαρτίζουν την πλειονότητα της μάζας του πετρώματος (περίπου το 70% αυτών), έχει μέγεθος κόκκων που κυμαίνεται από 0,2 έως 0,8 mm (με επικρατέστερο μέσο μέγεθος κόκκων ασβεστίτη τα 0,55 mm). Οι πορφυροβλάστες του ασβεστίτη έχουν μέγεθος κρυστάλλων που κυμαίνεται από 0,8 έως 1,4 mm, το μέσο μέγεθος των οποίων υπολογίζεται σε 1 mm.

Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις της πετρογραφικής εξέτασης συμπεραίνουμε ότι τα εξεταζόμενα δείγματα μαρμάρου ως προς την ταξινόμηση του πετρώματος κατά EN 12407, προέρχονται από εμφάνιση που χαρακτηρίζεται ως **μεσόκοκκο ημίλευκο ασβεστιτικό μάρμαρο**, με ταινιώσεις τεφρής απόχρωσης (“γκρίζα νερά”).

### 3.2 Προσδιορισμός των χρωματικών παραμέτρων

Οι χρωματικές παράμετροι που υπολογίστηκαν σύμφωνα με το σύστημα μέτρησης CIE και το μοντέλο CIE-Lab ήταν οι εξής:  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  και την παράμετρο  $\Delta E^*_{ab}$  η οποία που καθορίζει τη διαφορά-απόκλιση από το “τέλειο” λευκό. Στον Πίνακα 3.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για αντιπροσωπευτικά μακροσκοπικά δείγματα από τους δυο όγκους μαρμάρων με προέλευση το λατομείο της Καβάλας (K1 & K2, αντίστοιχα).

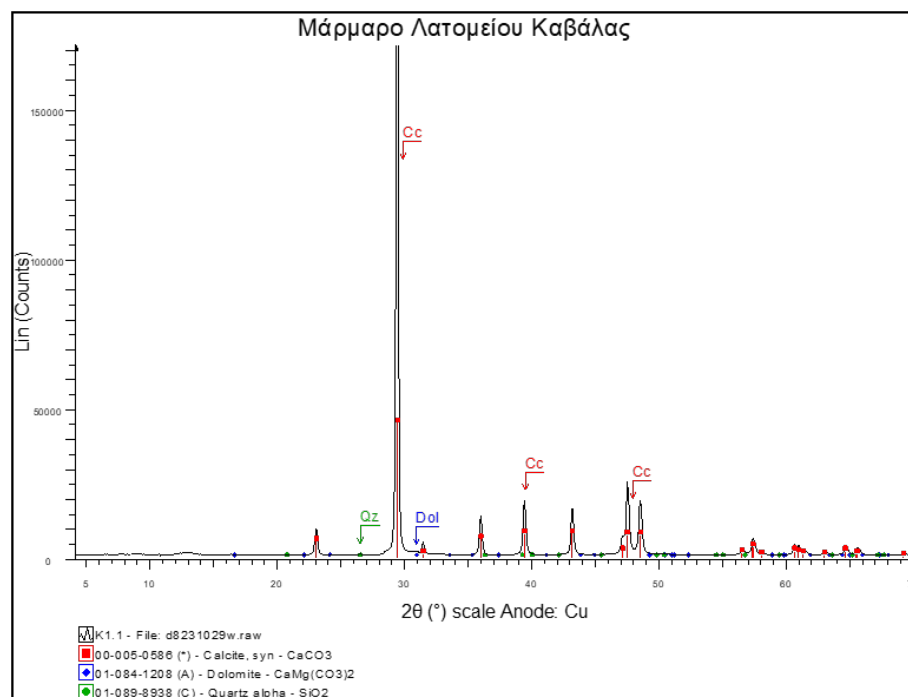
Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα από την μελέτη προσδιορισμού των χρωματικών παραμέτρων δειγμάτων μαρμάρων, από το λατομείο Καβάλας (Π.Ε. Καβάλας).

Δείγμα	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$\Delta E^*_{ab}$
K1-1	-0.29	0.57	79.53	20.48
K1-2	-0.19	0.64	79.22	20.79
K2-1	-0.38	0.72	80.33	19.69
K2-2	-0.30	0.76	80.58	19.43

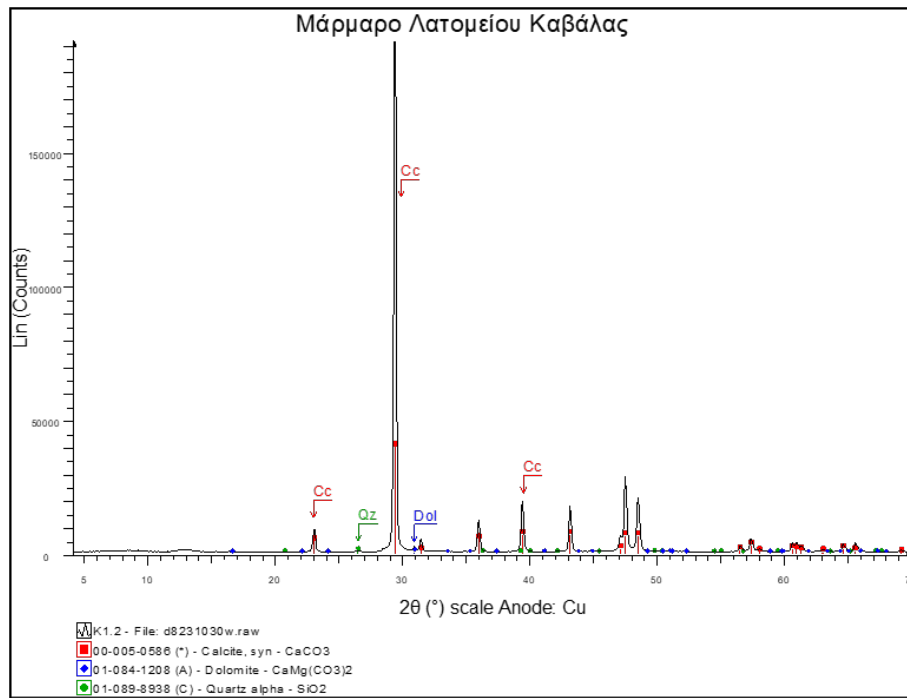
Οι τιμές που προσδιορίστηκαν είναι χαρακτηριστικές του **ημίλευκου χρώματος** των δειγμάτων μαρμάρου, που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη, με ποσοστό απόκλισης από το “τέλειο” λευκό η μέση τιμή του οποίου υπολογίστηκε σε  $\Delta E^*ab$  20,10 % και ικανοποιητικές τιμές φωτεινότητας (μέση τιμή  $L^* \approx 80$  σε όλα τα δείγματα). Οι ανωτέρω τιμές σχετίζεται άμεσα με την «καθαρότητα» του πετρώματος, δηλαδή την κυριαρχία ενός κύριου ορυκτολογικού συστατικού (στην προκειμένη περίπτωση είναι ο ασβεστίτης) και την απουσία σημαντικού ποσοστού περιεχομένου σε μη ανθρακικά ορυκτά. Είναι δε χαρακτηριστικό, πως τα δείγματα που είχαν προέλευση το δεύτερο ογκοτεμάχιο και τα οποία αφενός περιέχουν μικρότερα ποσοστά δολομίτη στη σύστασή τους και αφετέρου κατά την μακροσκοπική τους παρατήρηση φάνηκε να παρουσιάζουν λιγότερες τεφρόφαιες ταινιώσεις, εν συγκρίσει με εκείνα του πρώτου ογκοτεμαχίου, εμφανίζουν ελαφρά υψηλότερες τιμές φωτεινότητας και ελαφρά μειωμένες τιμές διαφοράς από το “τέλειο” λευκό.

### 3.3 Ορυκτολογική Ανάλυση

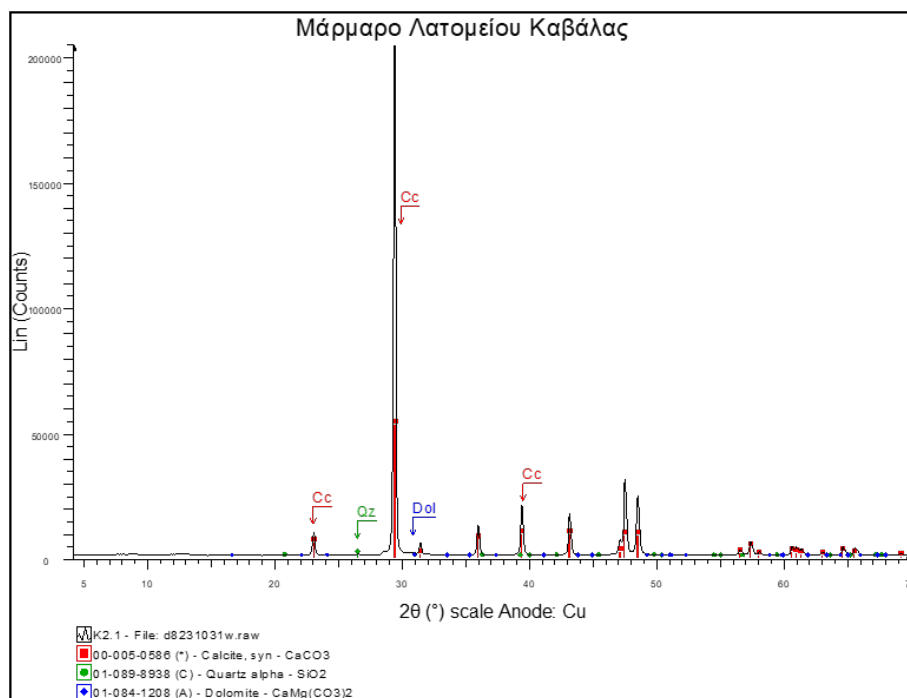
Τα αποτελέσματα της ποιοτικής ορυκτολογικής ανάλυσης των υπό μελέτη δειγμάτων παρουσιάζονται στα παρακάτω ακτινοδιαγράμματα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-χ (powder x-ray diffraction / PXRD, βλ. *Εικόνες 3.5-3.8*).



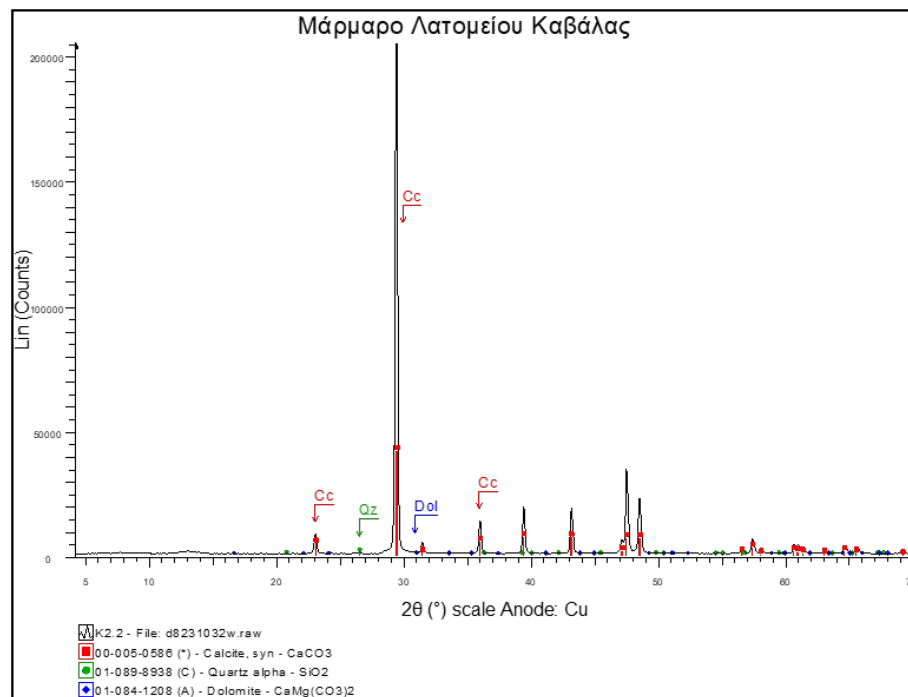
*Εικόνα 3.5: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-χ (PXRD) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο Καβάλας (1<sup>ο</sup> μισό / K1-1). Συντομογραφίες ορυκτών κατά (Whitney & Evans, 2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.*



Εικόνα 3.6: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων- $x$  (PXRD) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο Καβάλας ( $2^\circ$  μισό / K1-2). Συντομογραφίες ορυκτών κατά Whitney & Evans (2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.



Εικόνα 3.7: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων- $x$  (PXRD) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο Καβάλας ( $1^\circ$  μισό / K2-1). Συντομογραφίες ορυκτών κατά (Whitney & Evans, 2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζίας.



Εικόνα 3.8: Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας κόνεως ακτίνων-x (PXRD) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο Καβάλας ( $2^\circ$  μισό / K2-2). Συντομογραφίες ορυκτών κατά (Whitney & Evans, 2010): Cc: ασβεστίτης, Dol: δολομίτης & Qz: χαλαζία.

Όπως φαίνεται σε αυτά σε όλα τα δείγματα κυριαρχεί η παρουσία της ορυκτής φάσης του ασβεστίτη (PDF: 00-005-0586), ενώ είναι ορατές σε μικρότερη ένταση και οι ανακλάσεις των ορυκτών φάσεων του δολομίτη (PDF: 01-084-1208) και χαλαζία (PDF: 01-089-8938). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ποσοτικής ορυκτολογικής ανάλυσης των τεσσάρων (4) δειγμάτων (πρώτο & δεύτερο μέρος του K1: K1-1 & K1-2 και πρώτο & δεύτερο μέρος του K2: K2-1 & K2-2), που εξετάστηκαν εργαστηριακά (Πίνακας 3.2), το ποσοστό του ασβεστίτη σε αυτά κυμαίνεται από 96,96 έως 98,87 %, εκείνο του δολομίτη από 0,84 έως 2,82 %, ενώ του χαλαζία από 0,22 έως 0,29%. Περισσότερο εμπλουτισμένο σε ασβεστίτη είναι το δεύτερο ογκοτεμάχιο, ενώ οι περισσότερες προσμίξεις ποσοστιαία απαντώνται συγκριτικά στο πρώτο ογκοτεμάχιο, το οποίο φαίνεται να περιέχει μεγαλύτερα ποσοστά δολομίτη στη σύστασή του (2,01 και 2,82 % στα δείγματα K1-1 και K1-2, αντίστοιχα). Οι διακυμάνσεις των ποσοστών συμμετοχής της ορυκτής φάσης του χαλαζία στα δείγματα, δεν είναι παρουσιάζουν αξιοσημείωτη μεταβολή.

Πίνακας 3.2: Ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων μαρμάρων από το λατομείο στην περιοχή της Καβάλας. Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε ορυκτής φάσης, στη σύσταση των προς εξέταση δειγμάτων.

Δείγματα	Ορυκτές φάσεις (%)		
	Ασβεστίτης $\text{CaCO}_3$	Δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Χαλαζίας $\text{SiO}_2$
K1-1	97.73	2.01	0.26
K1-2	96.96	2.82	0.22
K2-1	98.85	0.88	0.27
K2-2	98.87	0.84	0.29

Σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της μικροσκοπικής παρατήρησης που παρουσιάστηκαν προηγούμενα, τα δείγματα μαρμάρου από το λατομείο Καβάλας (Π.Ε. Καβάλας) που εξετάστηκαν εργαστηριακά, είναι πολύ υψηλής καθαρότητας ως προς την περιεκτικότητά τους σε ασβεστίτη και η ταξινόμησή τους τα κατατάσσει κατά **EN 12407** στον τύπο πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως Ασβεστιτικά Μάρμαρα.

### 3.4 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των προς εξέτασης δειγμάτων (πρώτο & δεύτερο μέρος του K1: K1-1 & K1-2, πρώτο & δεύτερο μέρος του K2: K2-1 & K2-2), η οποία πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ED-XRF. Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των δειγμάτων, βρίσκονται σε καλή συσχέτιση με εκείνα της ορυκτολογικής σύστασης που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Πίνακας 3.3: Χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων (% κ.β.) των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο της Καβάλας, που εξετάστηκαν με τη μέθοδο φασματομετρίας ακτίνων-χ φθορισμού (ED-XRF).

Δείγματα	Χημική σύσταση (% κ.β.) των δειγμάτων που αναλύθηκαν									Απόλυτη πύρωση
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	
K1-1	55,47	0,58	0,24	0,12	0,07	0,03	0,01	0,04	<0,01	43,31
K1-2	55,29	0,76	0,20	0,13	0,08	0,03	0,01	0,05	<0,01	43,23
K2-1	55,76	0,29	0,25	0,08	0,05	0,02	<0,01	0,02	<0,01	43,43
K2-2	55,75	0,28	0,28	0,07	0,05	0,02	<0,01	0,02	<0,01	43,45

Όπως προκύπτει από τις αναλύσεις στα δείγματα που μελετήθηκαν εργαστηριακά, το κύριο οξείδιο που απαντάται σε αφθονία είναι εκείνο το ασβεστίου (CaO), με τα ποσοστά του να κυμαίνονται από 55,29 έως 55,76 % κ.β.). Το οξείδιο του μαγνησίου (MgO) που σχετίζεται

με την παρουσία δολομίτη στα δείγματα κυμαίνεται από 0.28 έως 0.76 % κ.β. Τα ποσοστά διοξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>), που συνδέονται με την παρουσία μικρής ποσότητας χαλαζία στα προς ανάλυση δείγματα, κυμαίνονται από 0,20 έως 0,28 % κ.β. Τα υπόλοιπα χημικά κύρια στοιχεία συμμετέχουν σε σαφώς μικρότερα ποσοστά στη χημική σύσταση των δειγμάτων και οφείλονται σε προσμίξεις (π.χ. οξείδια σιδήρου κ.α.), η ποσοστιαία αναλογία συμμετοχής των οποίων στη σύσταση των δειγμάτων μέσω της παρουσίας κάποιων επουσιωδών κρυσταλλικών φάσεων, βρίσκεται κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Πρόκειται για τυπικές 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.

### 3.5 Φυσικές ιδιότητες

#### 3.5.1 Υδατοαπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση

Ο υπολογισμός της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση (Εικόνα 3.9), πραγματοποιήθηκε με βάση όσα ορίζει το πρότυπο **EN 13755** και τον ακόλουθο τύπο:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (9)$$

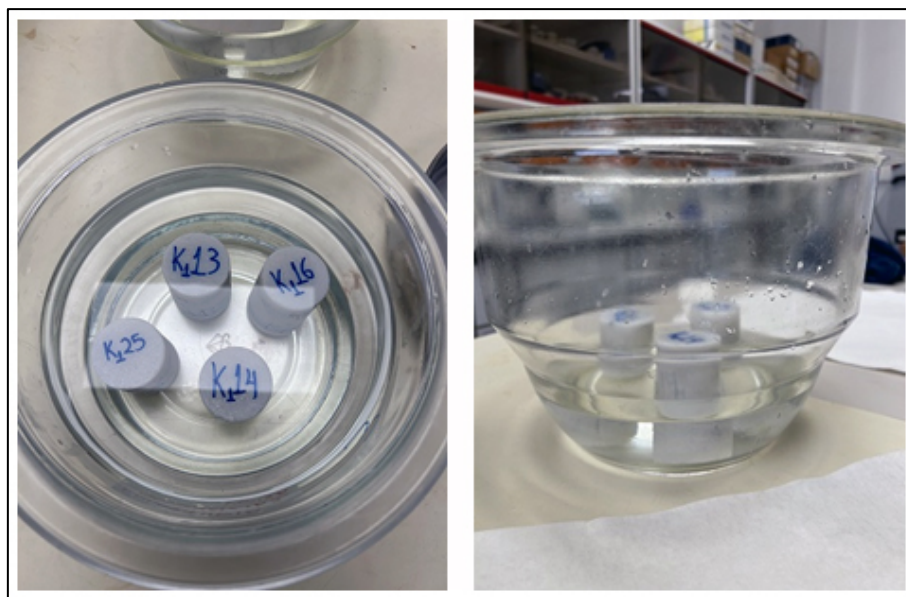
όπου:  $A_b$ : η υδατοαπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση (% κ.β.),

$m_d$ : βάρος στον αέρα του δοκιμίου που έχει υποστεί ξήρανση,

$m_s$ : βάρος στον αέρα του κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού δοκιμίου, έως ότου επιτευχθεί σταθερή τιμή μέτρησης. Στην παρούσα δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η τιμή βάρους μετά από το πέρας έξι (6) ημερών διεξαγωγής του πειράματος, για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν εργαστηριακά.







Στους Πίνακες 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα δοκίμια των δυο ογκοτεμαχίων K1 και K2, αντίστοιχα. Οι τιμές υδατοαπορρόφησης που προσδιορίστηκαν εργαστηριακά για τα δοκίμια του Ασβεστιτικού μαρμάρου από το λατομείο «Καβάλας» κυμαίνονται από 0,08 έως 0,10 % κ.β., ενώ η μέση τιμή υδατοαπορρόφησης του προς εξέταση πετρώματος είναι  $A_b = 0,1$  % κ.β.











Εικόνα 3.9: Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο της Π.Ε. Καβάλας.

Πίνακας 3.4: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση σε 3 δοκίμια (K1-1α, K1-1β, K1-1γ) από το πρώτο μέρος (K1-1) και σε 3 δοκίμια (K1-2α, K1-2β, K1-2γ) από το δεύτερο μέρος (Δ1-2) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο «Καβάλας».

Δοκίμια από το πρώτο ογκοτεμάχιο με κωδικό K1							Βάρη δοκιμών (g)					Υδατοαπορρόφηση
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Υψος (cm)	Μέσο Υψος (cm)	Μέσος όγκος (cm <sup>3</sup> )	Photo	m <sub>d</sub>	m <sub>48</sub>	m <sub>72</sub>	m <sub>96</sub>	m <sub>144</sub>	(% κ.β.)
K1-1α	4.510	4.512	7.175	7.187	114.915		309.12	309.36	309.36	309.39	309.39	0.09
	4.510		7.185									
	4.515		7.200									
K1-1β	4.520	4.512	7.075	7.073	113.092		303.21	303.44	303.44	303.44	303.45	0.08
	4.515		7.075									
	4.500		7.070									
K1-1γ	4.515	4.515	7.100	7.100	113.675		305.11	305.37	305.39	305.39	305.39	0.09
	4.515		7.100									
	4.515		7.100									
K1-2α	4.515	4.513	7.075	7.075	113.174		304.33	304.60	304.61	304.61	304.61	0.09
	4.505		7.075									
	4.520		7.075									
K1-2β	4.520	4.518	6.970	6.958	111.549		302.67	302.91	302.92	302.92	302.92	0.08
	4.520		6.940									
	4.515		6.965									
K1-2γ	4.015	4.013	7.050	7.033	88.955		298.98	299.25	299.25	299.26	299.26	0.09
	4.015		7.050									
	4.010		7.000									
											M.O.	0.09
m <sub>d</sub> : Αρχικό βάρος m <sub>48</sub> : Βάρος στις 48 ώρες και ούτω καθ' εξής											0.1 % κ.β.	



Πίνακας 3.5: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση σε 3 δοκίμια (K2-1α, K2-1β, K2-1γ) από το πρώτο μέρος (K2-1) και σε 3 δοκίμια (K2-2α, K2-2β, K2-2γ) από το δεύτερο μέρος (Δ2-2) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο «Καβάλας».

Δοκίμια από το πρώτο ογκοτεμάχιο με κωδικό K2							Βάρη δοκιμίων (g)					Υδατοαπορρόφηση
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Υψος (cm)	Μέσο Υψος (cm)	Μέσος όγκος (cm <sup>3</sup> )	Photo	m <sub>d</sub>	m <sub>48</sub>	m <sub>72</sub>	m <sub>96</sub>	m <sub>144</sub>	(% κ.β.)
K2-1α	4.520	4.517	6.940	6.977	111.804		301.45	301.75	301.76	301.76	301.76	0.10
	4.515		7.000									
	4.515		6.990									
K2-1β	4.515	4.518	6.975	6.975	111.822		300.21	300.47	300.47	300.48	300.48	0.09
	4.515		6.975									
	4.525		6.975									
K2-1γ	4.520	4.518	6.965	6.955	111.501		299.32	299.61	299.61	299.63	299.63	0.10
	4.515		6.950									
	4.520		6.950									
K2-2α	4.510	4.512	7.090	7.083	113.252		304.41	304.69	304.69	304.7	304.7	0.10
	4.510		7.085									
	4.515		7.075									
K2-2β	4.515	4.515	7.060	7.068	113.162		304.32	304.57	304.58	304.58	304.58	0.09
	4.515		7.075									
	4.515		7.070									
K2-2γ	4.525	4.523	6.970	6.965	111.909		299.35	299.61	299.62	299.62	299.62	0.09
	4.520		6.950									
	4.525		6.975									
											M.O.	0.10
m <sub>d</sub> : Αρχικό βάρος m <sub>48</sub> : Βάρος στις 48 ώρες και ούτω καθ' εξής												0.1 % κ.β.

### 3.5.2 Φαινόμενη πυκνότητα και ανοιχτό πορώδες

Η φαινόμενη πυκνότητα  $\rho_b$  εκφράζεται σε kg/m<sup>3</sup> και είναι ο λόγος της μάζας του δοκιμίου προς τον φαινόμενο όγκο του. Το ανοιχτό πορώδες  $p_o$  εκφράζεται σε ποσοστό % κ.ο. και είναι ο όγκος των ανοικτών πόρων του δοκιμίου, ως ποσοστό % του φαινόμενου όγκου του (Εικόνα 3.10). Ο υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας πραγματοποιήθηκε με βάση όσα ορίζει το πρότυπο **EN 1936** και τον ακόλουθο τύπο:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (10)$$

όπου:  $\rho_{rh}$ : πυκνότητα του νερού σε kg/m<sup>3</sup>,

$m_d$ : βάρος στον αέρα του δοκιμίου που έχει υποστεί ξήρανση,

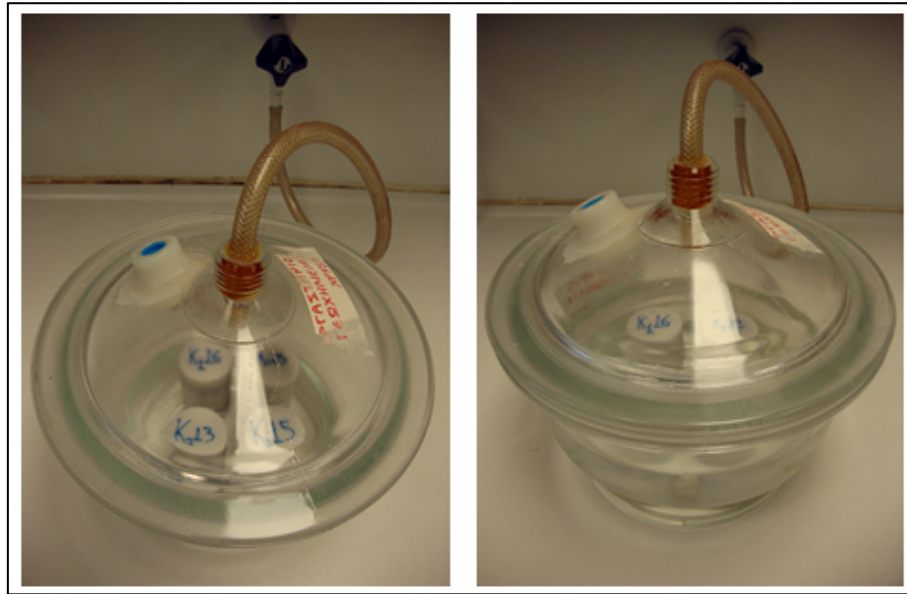
$m_s$ : βάρος στον αέρα του κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού δοκιμίου, μετά την πάροδο  $24 \pm 2$  ωρών διεξαγωγής της εργαστηριακής δοκιμής,

$m_h$ : βάρος δοκιμίου βυθισμένο μέσα στο καλάθι που περιέχει νερό.

Ο τύπος με τον οποίο το πρότυπο **EN 1936** καθορίζει τον υπολογισμό του επί τοις εκατό ποσοστού του ανοικτού πορώδους φυσικών δομικών λίθων και διακοσμητικών πετρωμάτων είναι ο ακόλουθος:

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (11)$$

όπου:  $m_d$ : βάρος στον αέρα του δοκιμίου που έχει υποστεί ξήρανση,  
 $m_s$ : βάρος στον αέρα του κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού δοκιμίου, μετά την πάροδο  $24 \pm 2$  ωρών διεξαγωγής της εργαστηριακής δοκιμής,  
 $m_h$ : βάρος δοκιμίου βυθισμένο μέσα στο καλάθι που περιέχει νερό.









Εικόνα 3.10: Φωτογραφίες από διάφορα στάδια της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους των δειγμάτων μαρμάρου από το λατομείο της Π.Ε. Καβάλας.







Στους Πίνακες 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους, για τα δοκίμια των δύο ογκοτεμαχίων μαρμάρου K1 και K2, αντίστοιχα. Τα δοκίμια που προέρχονται από το πρώτο προς εξέταση ογκοτεμάχιο μαρμάρου (K1), έδωσαν μέση τιμή φαινόμενης πυκνότητας  $2711 \text{ kg/m}^3$  και αντίστοιχη ανοικτού πορώδους  $0,28 \%$  κ.ο. Τα δοκίμια που είχαν προέλευση από το δεύτερο ογκοτεμάχιο μαρμάρου (K2), παρουσίασαν μέσες τιμές φαινόμενης πυκνότητάς και ανοικτού πορώδους αρκετά παρόμοιες με εκείνων του Δ1 ( $\rho_b = 2710 \text{ kg/m}^3$  και  $p_o = 0,28 \%$  κ.ο.).

Η μικρή διαφοροποίηση που παρατηρείται στην τιμή της φαινόμενης πυκνότητας μεταξύ των δειγμάτων των δυο ογκοτεμαχίων, αποδίδεται στην ορυκτολογική τους σύσταση και πιο συγκεκριμένα στο γεγονός πως υψηλότερα συγκριτικά ποσοστά δολομίτη ανιχνεύτηκαν στα δείγματα του ογκοτεμαχίου K1, επηρεάζοντας έτσι τις τιμές φαινόμενης πυκνότητας που υπολογίστηκαν στα δοκίμια από το δείγμα αυτό.

Πίνακας 3.6: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους σε 3 δοκίμια (K1-1α, K1-1β, K1-1γ) από το πρώτο μέρος (K1-1) και σε 3 δοκίμια (K1-2α, K1-2β, K1-2γ) από το δεύτερο μέρος (K1-2) του πρώτου ογκοτεμαχίου K1 από το λατομείο «Καβάλας».

Δοκίμια από το πρώτο ογκοτεμάχιο με κωδικό K1							Βάρη δοκιμών (g)			Φαινόμενη πυκνότητα	Ανοικτό πορώδες
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Μέσο Ύψος (cm)	Μέσος όγκος (cm <sup>3</sup> )	Photo	m <sub>d</sub>	m <sub>s</sub>	m <sub>h</sub>	(Kg/m <sup>3</sup> )	(% κ.ο.)
K1-1α	4.510	4.512	7.175	7.187	114.915		309.12	309.44	195.43	2711	0.28
	4.510		7.185								
	4.515		7.200								
K1-1β	4.520	4.512	7.075	7.073	113.092		303.21	303.51	191.68	2711	0.27
	4.515		7.075								
	4.500		7.070								
K1-1γ	4.515	4.515	7.100	7.100	113.675		305.11	305.43	192.83	2710	0.28
	4.515		7.100								
	4.515		7.100								
K1-2α	4.515	4.513	7.075	7.075	113.174		304.33	304.64	192.42	2712	0.28
	4.505		7.075								
	4.520		7.075								
K1-2β	4.520	4.518	6.970	6.958	111.549		302.67	302.97	191.37	2712	0.27
	4.515		6.940								
	4.520		6.965								
K1-2γ	4.015	4.013	7.050	7.033	88.955		298.98	299.30	189.01	2711	0.29
	4.015		7.050								
	4.010		7.000								
									M.O.	2711 Kg/m <sup>3</sup>	0.28 % κ.ο.

Πίνακας 3.7: Συνολικά αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους σε 3 δοκίμια (K2-1α, K2-1β, K2-1γ) από το πρώτο μέρος (K2-1) και σε 3 δοκίμια (K2-2α, K2-2β, K2-2γ) από το δεύτερο μέρος (K2-2) του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 από το λατομείο «Καβάλας».

Δοκίμια από το δεύτερο ογκοτεμάχιο με κωδικό K2							Βάρη δοκιμίων (g)			Φαινόμενη πυκνότητα	Ανοικτό πορώδες
Κωδικός	Διάμετρος (cm)	Μέση Διάμετρος (cm)	Υψος (cm)	Μέσο Υψος (cm)	Μέσος όγκος (cm <sup>3</sup> )	Photo	m <sub>d</sub>	m <sub>s</sub>	m <sub>h</sub>	(Kg/m <sup>3</sup> )	(% κ.ο.)
K2-1α	4.520	4.517	6.940	6.977	111.804		301.45	301.77	190.54	2710	0.29
	4.515		7.000								
	4.515		6.990								
K2-1β	4.515	4.518	6.975	6.975	111.822		300.21	300.52	189.74	2710	0.28
	4.515		6.975								
	4.525		6.975								
K2-1γ	4.520	4.518	6.965	6.955	111.501		299.32	299.64	189.15	2709	0.29
	4.515		6.950								
	4.520		6.950								
K2-2α	4.510	4.512	7.090	7.083	113.252		304.41	304.74	192.42	2710	0.29
	4.510		7.085								
	4.515		7.075								
K2-2β	4.515	4.515	7.060	7.068	113.162		304.32	304.63	192.33	2710	0.28
	4.515		7.075								
	4.515		7.070								
K2-2γ	4.525	4.523	6.970	6.965	111.909		299.35	299.66	189.18	2710	0.28
	4.520		6.950								
	4.525		6.975								
									M.O.	2710 Kg/m <sup>3</sup>	0.28 % κ.ο.

### 3.6 Μηχανικές Ιδιότητες

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτελέσθηκαν εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής για το χαρακτηρισμό της παραμορφωσιμότητας και της αντοχής της βραχομάζας με βάση τα δύο (2) ογκοτεμάχια μαρμάρου διαστάσεων  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  (Εικόνες 2.1 & 2.2). Συνολικά 26 κυλινδρικά δοκίμια ελήφθησαν από τα αρχικά ογκοτεμάχια, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για τις παρακάτω δοκιμές (Εικόνα 3.11):

- ✓ Δώδεκα (12) δοκιμές μονοαξονικής (ανεμπόδιστης) θλίψης για τον υπολογισμό της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη και μέτρου ελαστικότητας του Young. Στις δύο δοκιμές εξ' αυτών χρησιμοποιήθηκαν και ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) για τον υπολογισμό του λόγου Poisson.
- ✓ Δώδεκα (12) δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Test) για τον υπολογισμό της αντοχής του μαρμάρου σε έμμεσο εφελκυσμό. Στις δύο δοκιμές εξ' αυτών χρησιμοποιήθηκαν και ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) για τον υπολογισμό του λόγου Poisson και του μέτρου ελαστικότητας του Young.
- ✓ Τέσσερις (4) δοκιμές κάμψεως τριών σημείων για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής των υπό μελέτη μαρμάρων.

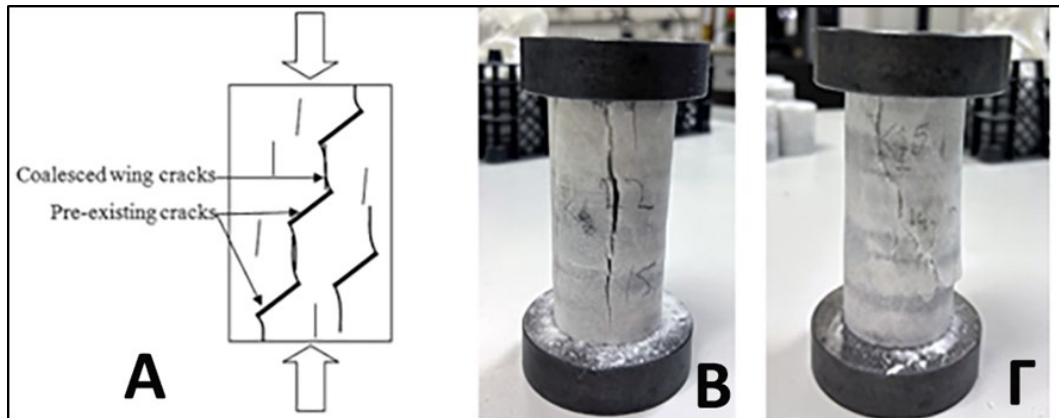


Εικόνα 3.11: Κυλινδρικά δοκίμια από τα υπό μελέτη ογκοτεμάχια K1 και K2 από το λατομείο της Π.Ε. Καβάλας.

#### 3.6.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Τα αποτελέσματα, τα διαγράμματα και η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές που αφορούν στις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Καβάλας παρατίθενται στους πίνακες του **Παραρτήματος Α**. Μια χαρακτηριστική απεικόνιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων πριν και

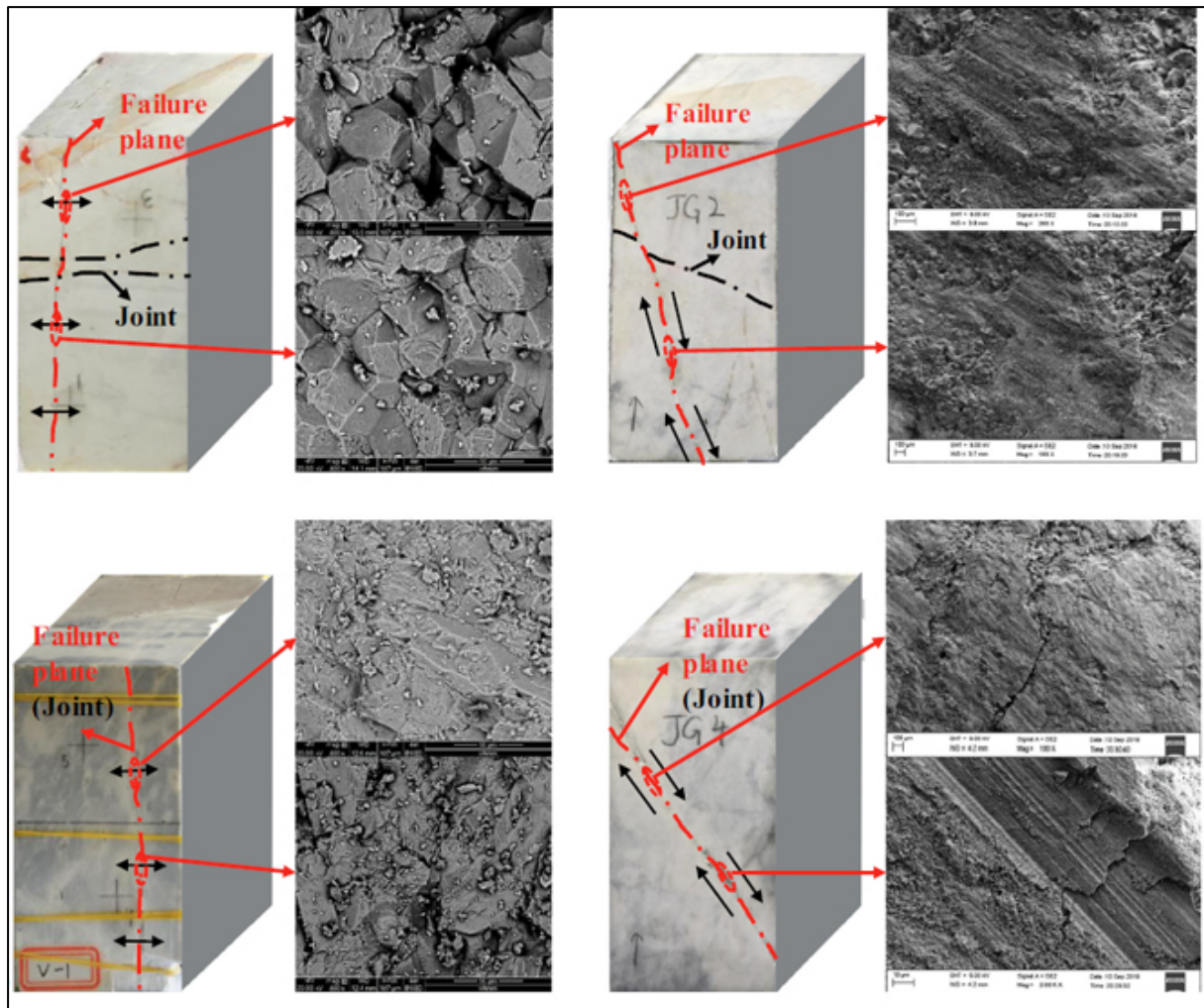
μετά την εργαστηριακή δοκιμή αποτυπώνεται στον Πίνακα Α.1 του **Παραρτήματος Α**. Στην *Εικόνα 3.12* απεικονίζονται δύο χαρακτηριστικές αστοχίες που παρουσιάστηκαν στο συγκεκριμένο μάρμαρο, ήτοι η εφελκυστική αστοχία (βλ. *Εικόνα 3.12Β*) που μπορεί να οφείλεται στη συνένωση μικρορωγμών (Basu et al., 2013) όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο σχήμα Α της *Εικόνας 3.12* ή/και η διατμητική αστοχία που χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο δοκίμιο K1-1.5 του υπό μελέτη ογκομαρμάρου (βλ. *Εικόνα 3.12Γ*).



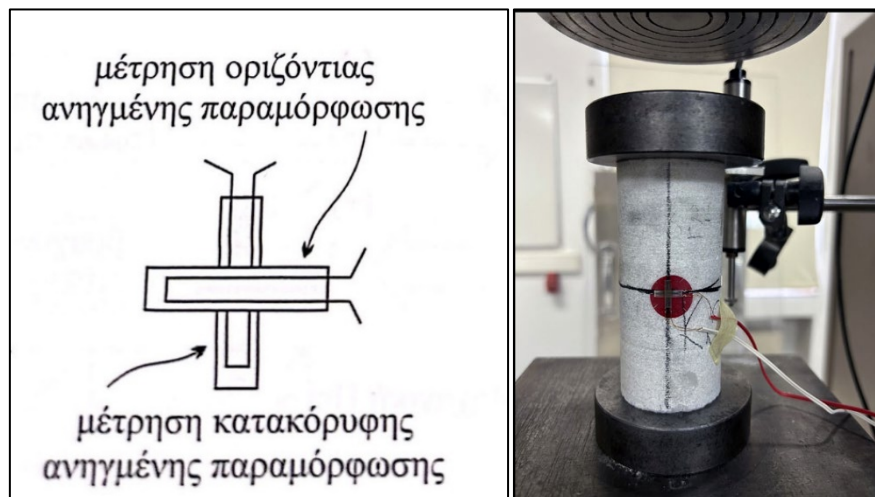
*Εικόνα 3.12: Η δοκιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, δοκίμιο πριν και μετά το πείραμα. (Α) Αξονική κατάτμηση δοκιμίων από την ύπαρξη και συνένωση μικρορωγμών (Basu et al., 2013) (Β) αξονική κατάτμηση δοκιμίου K2-2.2 (Γ) διατμητική αστοχία σε ένα επίπεδο του δοκιμίου K1-1.5.*

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Gao et al., 2020), έχουν παρατηρηθεί τέσσερις διακριτές μορφές αστοχίας μαρμάρου όταν υποβάλλονται σε θλιπτικές τάσεις, ήτοι (α) αξονική κατάτμηση / splitting (βλ. άνω αριστερό σκαρίφημα της *Εικόνας 3.13*), (β) διατμητική αστοχία / shearing (βλ. άνω δεξί σκαρίφημα της *Εικόνας 3.13*), (γ) άνοιγμα προϋπαρχόντων ασυνεχειών / opening (βλ. κάτω αριστερό σκαρίφημα της *Εικόνας 3.13*) και, τέλος, (δ) ολίσθηση σε προϋπάρχον επίπεδο αδυναμίας / sliding (βλ. κάτω δεξί σκαρίφημα της *Εικόνας 3.13*). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πλειοψηφία των δοκιμών μονοαξονικής θλίψεως που αντιστοιχούν στα ογκοτεμάχια που μελετήθηκαν παρουσίασαν θραύση σε αξονική κατάτμηση (βλ. άνω αριστερό σκαρίφημα της *Εικόνας 3.13*). Πιο συγκεκριμένα τα 7 από τα 12 δοκίμια έσπασαν κατ' αυτόν το τρόπο (βλ. *Εικόνα 3.12Β*), ενώ τα υπόλοιπα 5 έσπασαν δημιουργώντας τη διατμητική επιφάνεια (βλ. *Εικόνα 3.12Γ*), όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο άνω δεξί σκαρίφημα της *Εικόνας 3.13*. Σε δύο από τις δώδεκα δοκιμές έγινε η χρήση μηχανισιόμετρου τύπου σταυρού για τη μέτρηση των ακτινικών παραμορφώσεων (*Εικόνες 3.14*).





Εικόνα 3.13: Χαρακτηριστικοί τρόποι αστοχίας μαρμάρου (Gao et al., 2020).

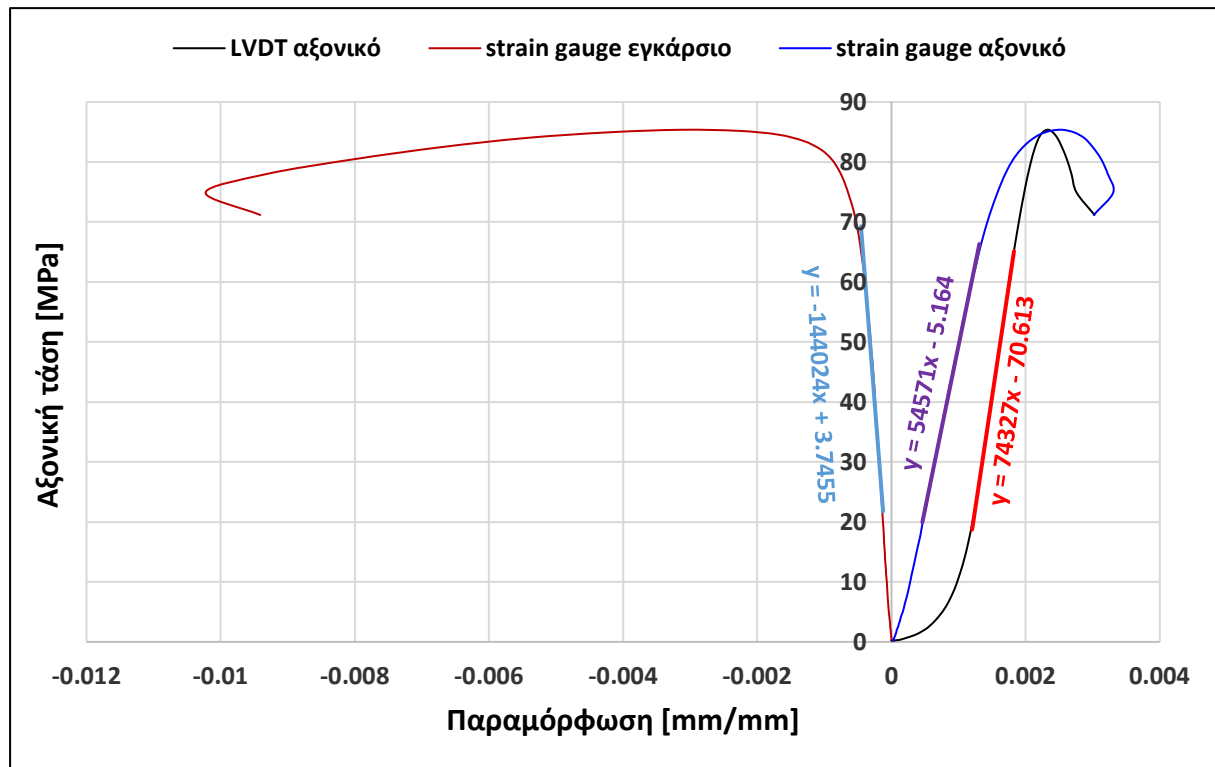


Εικόνα 3.14: Διάταξη ηλεκτρικών μηχανομετρητών (Αγιουτάντης, 2019) και η πειραματική διάταξη της δοκιμής μονοαξονικής (ανεμπόδιστης) θλίψης που έλαβε χώρα.

Για τη σωστή πειραματική διαδικασία τα δοκίμια μετρήθηκαν έξι φορές με ακρίβεια 0,1 mm και υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών των τιμών. Επιπλέον, έγινε λείανση των εδρών των δοκιμίων, ώστε να μειωθεί όσο γίνεται το φαινόμενο της τριβής. Αφού η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε, το καταγραφικό όργανο με δύο εισόδους (X-Y recorder) κατέγραψε όλες τις αναγκαίες πληροφορίες, όπως τη μετατόπιση του δοκιμίου και τη στιγμιαία δύναμη που ασκούσαν οι πλάκες φόρτισης στο δοκίμιο, από τις ενδείξεις των ενισχυτών σήματος ελήφθησαν τα μεγέθη  $\varepsilon_x$  &  $\varepsilon_y$ . Στη συνέχεια, όλα τα δεδομένα μεταφέρθηκαν στα υπολογιστικά φύλλα excel και υπολογίστηκαν τα κρίσιμα μεγέθη ήτοι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας (E) του Young και ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ) για το εκάστοτε δοκίμιο.

Η τυπική συμπεριφορά των δοκιμίων των ογκοτεμαχίων μαρμάρου από το λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας, και συγκεκριμένα του δοκιμίου K1-2.1, αποτυπώνονται στην *Εικόνα 3.15*. Στις μικρές τιμές ασκούμενων τάσεων η κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης είναι πολύ μικρές οφειλόμενες στην ύπαρξη του μικροπορώδους του υλικού. Σε μεγαλύτερες ασκούμενες τάσεις τα κενά αυτά κλείνουν με συνέπεια η κλίση της καμπύλης να αυξηθεί. Σε αυτή την γραμμική περιοχή της καμπύλης εκτιμήθηκε το μέσο μέτρο ελαστικότητας (E) του Young από το καταγραφικό του μηχανήματος LVDT (*Εικόνα 2.7*) και στην περίπτωση που το πείραμα πραγματοποιήθηκε και με τη χρήση μηχανοσκόπου, μπορεί να υπολογισθεί και ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ) από την αντίστοιχη κλίση για τις ακτινικές παραμορφώσεις  $\varepsilon_x$  (*Εικόνα 3.15*). Με βάση το μέσο ορισμό (βλ. σχήμα β της *Εικόνας 2.9*) για το δοκίμιο K1-2.1 υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας (E) του Young με τιμή 54,6 GPa από LVDT που διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη τιμή του μηχανοσκόπου (74,3 GPa), με την πιο αξιόπιστη μέτρηση να τη δίνει η πρώτη προσέγγιση. Επίσης, από το διάγραμμα της *Εικόνας 3.15* υπολογίστηκε ο λόγος του Poisson:  $\nu = 0.38$  για το ίδιο δοκίμιο. Η τιμή του  $\nu$  είναι σχετικά μεγάλη, αλλά εντός των προβλεπόμενων ορίων για τα μάρμαρα (*Λόγο & Vásárhelyi, 2019*). Επιπλέον, στο δεύτερο δοκίμιο (K2-2.3) που εφαρμόστηκαν τα μηχανοσκόπια, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson βρέθηκαν 56,1 GPa και 0,31, αντίστοιχα.





Εικόνα 3.15: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο KI-2.1.

Στο επόμενο στάδιο υπολογίστηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ( $C_o$ ) μέσω του τύπου  $F_{max}/A$ , όπου  $F_{max}$  είναι το μέγιστο φορτίο (δύναμη) που δέχθηκε το συγκεκριμένο δοκίμιο (βλ. Εικόνα 3.15) μέχρι να αστοχήσει και  $A$  είναι η επιφάνεια που υπολογίζεται από τη μέση διάμετρο ( $d = 4.5$  cm) του εν λόγω κυλινδρικού δοκιμίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ( $C_o = 86,3$  MPa). Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια τόσο του πρώτου (K1) όσο και του δεύτερου ογκοτεμαχίου (K2), αντίστοιχα. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων του δεύτερου ογκοτεμαχίου K1 κυμαίνεται μεταξύ 86,3-90,4 MPa, ενώ του δεύτερου ογκοτεμαχίου K2 κυμαίνεται μεταξύ 80,4-89,4 MPa με μέτρο ελαστικότητας από 65,9-85,7 GPa για το K1 και 63,3-72,5 GPa για το K2 (βλ. Πίνακα 3.8), δηλαδή παρουσιάζουν μεγάλες τιμές στην αντοχή σε μονοαξονική καταπόνηση και καλές τιμές στο μέτρο ελαστικότητας τους σύμφωνα με τα πρότυπα EN 1926, χωρίς να παρουσιάζεται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο υπό μελέτη ογκοτεμαχίων.

Πίνακας 3.8: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης / UCS ( $C_o$ ) των δοκιμίων από τα ογκοτεμάχια K1 και K2 από το λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας.

Κωδικός	Ύψος [cm]	Διάμετρος [cm]	Διόρθωση	$C_o^{*1}$ [MPa]	E [GPa]		ν	Τύπος Θραύσης <sup>*2</sup>
					LVDT	Strain gauge	Strain Gauge	
K1-1.5	10,0	4,5	1,014	88,0	81,6	-	-	(B)
K1-2.1	9,9	4,5	1,011	86,3	74,3	54,6	0,38	(B)
K1-2.2	9,8	4,5	1,010	90,4	85,7	-	-	(A)
K1-2.3	10,0	4,5	1,013	85,7	65,9	-	-	(B)
K1-2.4	9,9	4,5	1,011	87,1	83,6	-	-	(B)
K1-2.6	9,8	4,5	1,010	88,6	67,7	-	-	(A)
K2-2.1	9,9	4,5	1,011	86,5	71,4	-	-	(A)
K2-2.2	9,8	4,5	1,009	89,4	64,0	-	-	(A)
K2-2.3	9,7	4,5	1,009	84,6	71,0	56,1	0,31	(B)
K2-2.4	9,8	4,5	1,010	84,2	71,6	-	-	(A)
K2-2.5	9,8	4,5	1,009	85,5	72,5	-	-	(A)
K2-2.6	9,8	4,5	1,010	80,4	63,3	-	-	(A)
Μέση τιμή				86,4	72,7	55,4	0,34	
Τυπική απόκλιση				2,7	7,4	1,1	0,05	
<sup>*1</sup> Με την εφαρμογή της διόρθωσης της εξίσωσης (3).								
<sup>*2</sup> Με βάση την Εικόνα 3.13, όπου (A): άνω αριστερό σκαρίφημα και (B): άνω δεξί σκαρίφημα.								

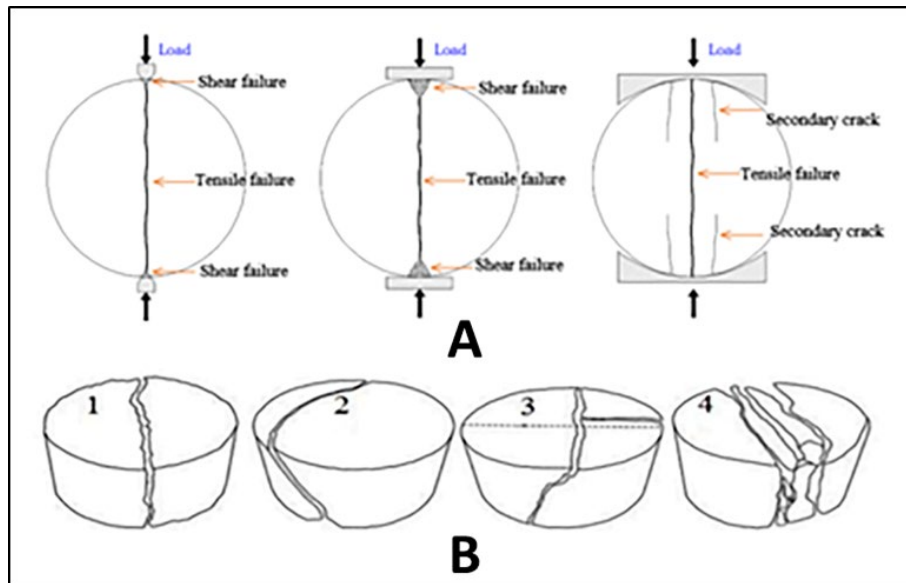
### 3.6.2 Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (έμμεσος εφελκυσμός)

Η δοκιμή της αντοχής των ογκοτεμαχίων μαρμάρου K1 και K2 σε έμμεσο εφελκυσμό BTS (γνωστή και ως πείραμα της αντιδιαμετρικής θλίψης ή ως δοκιμή του Βραζιλιανού δίσκου) εκτελέστηκε με τη χρήση της διάταξης της Εικόνας 2.10 και τόξο επαφής  $\sim 10^\circ$ . Η εργαστηριακή δοκιμή του έμμεσου εφελκυσμού χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τιμής της αντοχής σε άμεσο εφελκυσμό, καθότι έχει παρατηρηθεί ότι οι δύο τιμές είναι σε μεγάλο βαθμό συγκρίσιμες, λαμβάνοντας υπόψιν ότι στα πετρώματα είναι εξαιρετικά δύσκολος ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό με άμεσο τρόπο. Ο υπολογισμός της αντοχής σε εφελκυσμό ( $\sigma_t$ ) με έμμεσο τρόπο, ήτοι έμμεσος εφελκυσμός, έγινε σύμφωνα με την εξίσωση (5). Για την πραγματοποίηση της δοκιμής σε αντιδιαμετρική θλίψη κόπηκαν 12 δοκίμια με διάμετρο  $\sim 54$  mm (και πλάτος σχεδόν ίσο με την ακτίνα τους) και μετρήθηκαν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά με ακρίβεια 0,1 mm. Έπειτα, τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με χαρτοταινία στην παράπλευρη επιφάνεια και τοποθετήθηκαν μέσα στις σιαγόνες φόρτισης, ώστε ο άξονας συμμετρίας των δοκιμίων και των σιαγόνων να ταυτίζονται (βλ. Εικόνα 2.10).

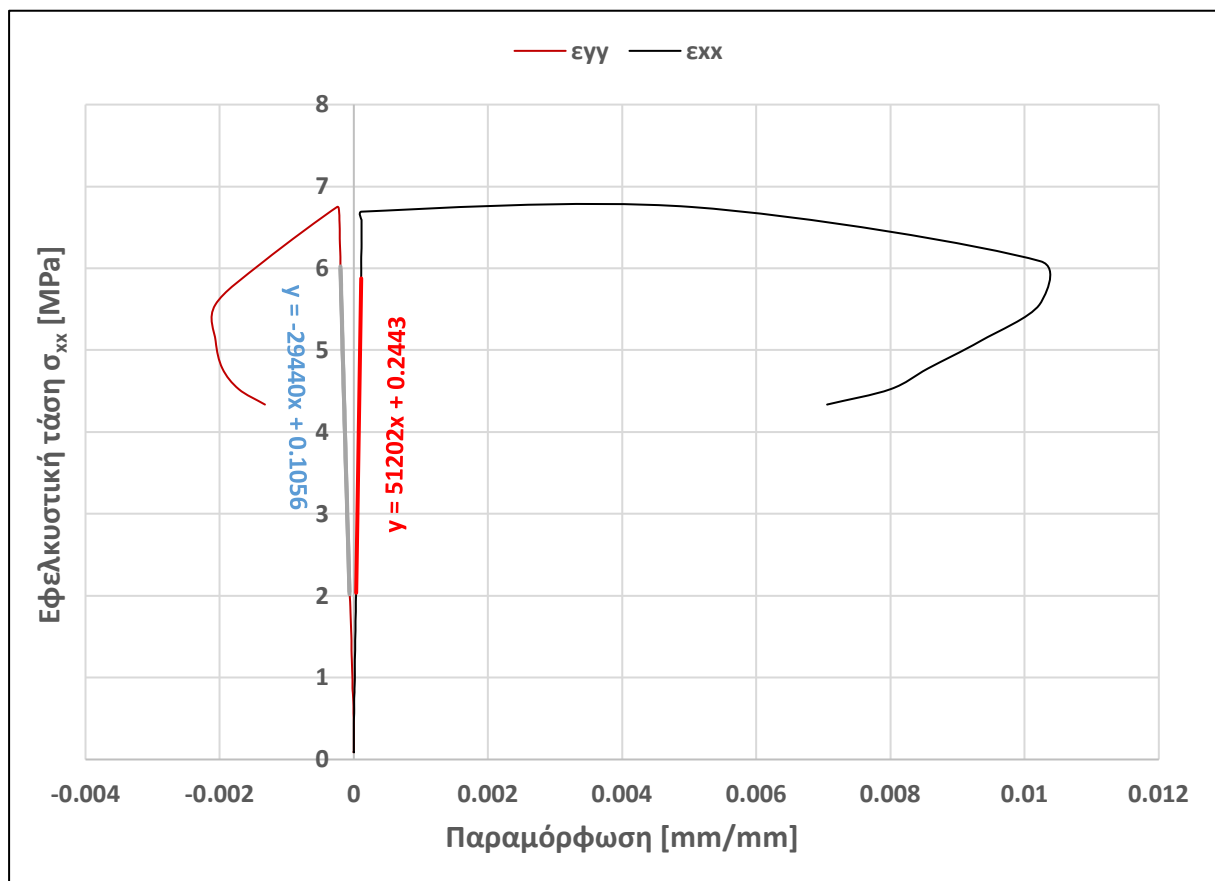
Η πρωτότυπη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού εκτελείτε με άσκηση αντιδιαμετρικής σημειακής φόρτισης όπως παρουσιάζεται στο αριστερό σκαρίφημα της Εικόνας 3.16Α, η οποία έχει υποστεί τροποποιήσεις για την ευκολότερη εφαρμογή της με τη χρήση είτε επίπεδων πλακών (βλ. κεντρικό σκαρίφημα της Εικόνας 3.16Α) είτε με τη χρήση σιαγόνων (βλ. δεξί

σκαρίφημα της *Εικόνας 3.16Α*). Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, 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 εφαρμογή της εξίσωσης (5). Σημειώνεται ότι σε αυτήν τη δοκιμή, εκτός από τη μία κεντρική θραύση (βλ. περίπτωση 1 στην *Εικόνα 3.16Β*), μπορεί να προκύψουν και πολλαπλές κεντρικές, όπως φαίνεται στην περίπτωση 4 (βλ. *Εικόνα 3.16Β*), ενώ στην περίπτωση έντονης ανισοτροπίας του υλικού μπορεί να προκύψουν και μη κεντρικές θραύσεις ανάλογα με την κλίση του επιπέδου αδυναμίας ως προς τον άξονα του εφελκυσμού (περιπτώσεις 2 και 3, βλ. *Εικόνα 3.16Β*).

Με την ολοκλήρωση του πειράματος και αφού το καταγραφικό όργανο, συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, είχε συλλέξει όλα τα δεδομένα για την στιγμιαία δύναμη που ασκούσαν οι πλάκες φόρτισης στο δοκίμιο και την μετατόπιση του δοκιμίου, σχηματίστηκε η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης. Στην *Εικόνα 3.17* που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά μια τυπική καμπύλη εφελκυστικών τάσεων στο κέντρο του δοκιμίου K1-1.6 με τις παραμορφώσεις που καταγράφει το ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο (strain gauge) βάσει της οποίας έγινε η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας ( $E$ ) του Young και του λόγου Poisson ( $\nu$ ). Σύμφωνα με τη παρακάτω καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (*Εικόνα 3.17*) υπολογίστηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας ( $E = 97,0 \text{ GPa}$ ) και του λόγου Poisson ( $\nu = 0,30$ ) με τη χρήση μηκυνσιόμετρου. Συνακόλουθα, στο δεύτερο δοκίμιο (K2-2.5) που εφαρμόστηκαν τα μηκυνσιόμετρα, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson βρέθηκαν  $36,5 \text{ GPa}$  και  $0,17$  αντιστοίχως. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω τιμές επαληθεύουν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψεως.



Εικόνα 3.16: (Α) Μέθοδος εφαρμογής αντιδιαμετρικής σημειακής φόρτισης (Xiao et al., 2022) και (Β) Τυπικοί τρόποι αστοχίας σε αντιδιαμετρική θλιπτική φόρτιση (Basu et al., 2013).



Εικόνα 3.17: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο K1-1.6 στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια τόσο του πρώτου (K1) όσο και του δεύτερου ογκοτεμαχίου (K2). Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό BTS των δοκιμίων

του πρώτου ογκοτεμαχίου (K1) κυμαίνεται μεταξύ 4,27-6,59 MPa ενώ του K2 κυμαίνεται από 4,81 έως 8,29 MPa, με το δεύτερο να παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή συγκριτικά με το K1 (βλ. Πίνακα 3.9). Σημειώνεται ότι η ελάχιστη τιμή παρατηρήθηκε στο δοκίμιο K1-2.3 (4,27 MPa), ενώ η μέγιστη τιμή στο δοκίμιο K2-2.6 (8,29 MPa).

Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα αντιδιαμετρικής θλίψης BTS (έμμεσου εφελκυσμού) των δοκιμίων από τα ογκοτεμάχια K1 και K2 από το λατομείο στην Π.Ε. Καβάλας.

Κωδικός	Ύψος [cm]	Διάμετρος [cm]	BTS [MPa]	Σχόλια
K1-1.1	2,4	4,5	4,59	
K1-1.2	2,8	4,5	6,01	
K1-1.4	2,7	4,5	5,69	
K1-1.6	2,7	4,4	6,59	Χρήση μηχανοσκόπευτρο (σταυρός): E = 97 GPa, ν = 0,30
K1-2.3	2,6	4,5	4,27	
K1-2.5	2,5	4,5	5,65	
K2-2.1	2,7	4,0	4,81	
K2-2.2	3,0	4,0	6,69	
K2-2.3	2,4	4,0	6,64	
K2-2.4	2,5	4,0	6,56	
K2-2.5	2,8	4,0	6,51	Χρήση μηχανοσκόπευτρο (σταυρός): E = 36,5 GPa, ν = 0,17
K2-2.6	2,1	4,5	8,29	
Μέση τιμή			6,02	
Τυπική απόκλιση			1,11	

### 3.6.3 Κάμψη τριών σημείων

Σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων τα δοκίμια κόπηκαν σε πλάκες και έγινε η μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους (Πίνακας 3.10). Ταυτόχρονα, ένα καταγραφικό όργανο (συνδεδεμένο με H/Y) κατέγραψε τη δύναμη που δεχόταν το εκάστοτε δοκίμιο από το άνω στέλεχος ανά μονάδα χρόνου, ενώ την ίδια στιγμή γινόταν η καταγραφή του χρόνου διεξαγωγής του πειράματος και η μετατόπιση του μαρμάρου. Τα πειράματα κάμψεως εκτελέστηκαν με έλεγχο μετατόπισης με την απόσταση των ράβδων έδρασης  $g = 12,5 \text{ cm}$  (βλ. Εικόνα 2.11). Στην Εικόνα 3.18Α παρουσιάζονται τέσσερα πρισματικά δοκίμια (EN 12372), από τα δύο ογκοτεμάχια K1 και K2, αντιστοίχως. Στα τέσσερα πειράματα της κάμψης (K1-1, K1-2, K2-1 και K2-2), διαπιστώθηκε η αναμενόμενη κεντρική θραύση σε όλα τα δοκίμια, με μία μικρή απόκλιση στο δεύτερο δοκίμιο, όπου η θραύση να μην έγινε κεντρικά, εν τούτοις σχημάτισε μια μικρή γωνιά περίπου  $3-5^\circ$  (Εικόνα 3.18B).



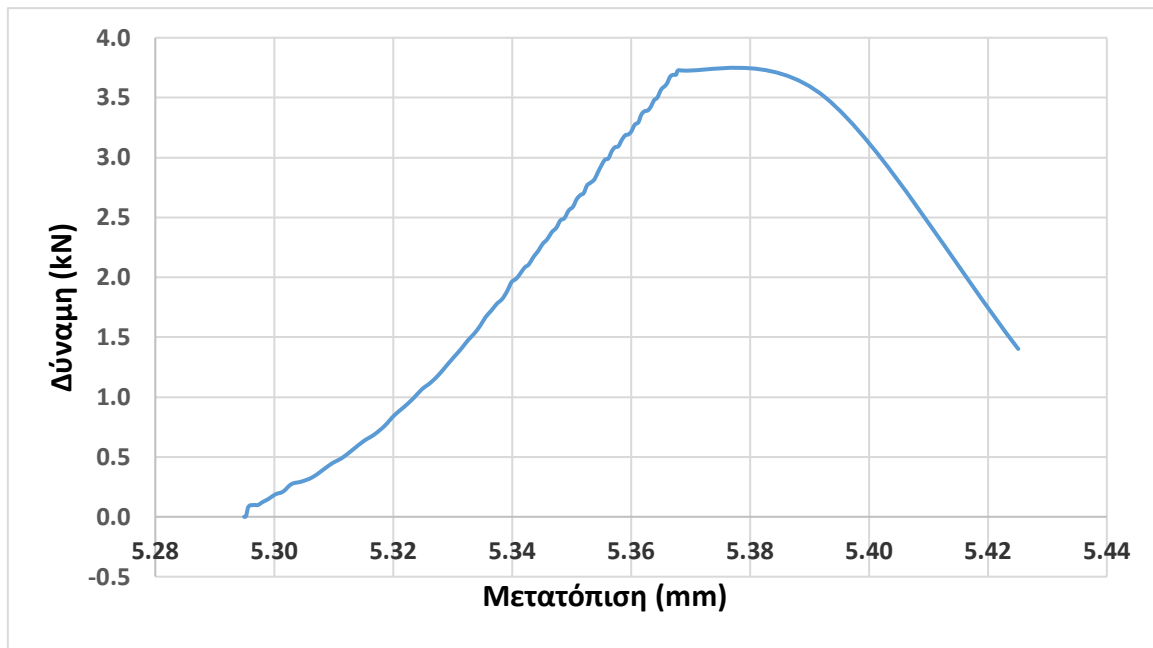
Εικόνα 3.18: (Α) Τα δείγματα κάμψεως πριν τη θραύση τους (ενδεικτικά με μπλε γραμμή συμβολίζεται ο άξονας φόρτισης) και (Β) η θραύση με ελαφριά κλίση του δοκιμίου K1-2.

Μετάπειτα, από τα πειράματα κάμψεως τριών σημείων και με εφαρμογή των εξισώσεων (8α) και (8β) υπολογίστηκε τόσο η καμπτική αντοχή ( $\sigma_f$ ) και η καμπτική παραμόρφωση ( $\epsilon_f$ ), όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.10. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει μέση καμπτική αντοχή  $\sigma_f = 21,1$  MPa, η οποία είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τη μέση τιμή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό BTS (6,02 MPa). Αναλυτικά αποτελέσματα από τα πειράματα παρουσιάζονται στους αντίστοιχους πίνακες του Παραρτήματος Α.

Πίνακας 3.10: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών κάμψεως δοκών μαρμάρου.

Κωδικός	Ύψος d [cm]	Πλάτος w [cm]	Καμπτική αντοχή $\sigma_f$ [MPa]	Καμπτική παραμόρφωση $\epsilon_f$ [μm/mm]
K1-1	24,5	50,5	19,2	0,57
K1-2	25,2	51,2	23,1	0,70
K2-1	23,8	51,4	15,7	0,53
K2-2	22,6	55,4	26,4	1,49
Μέση τιμή			21,1	0,82
Τυπική απόκλιση			4,6	0,45

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας αποδείχθηκε ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν σε συμφωνία μεταξύ τους. Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα του δοκιμίου K1-1 παρουσιάζονται παρακάτω στο διάγραμμα των καταγραφών φορτίου-μετατόπισης (Εικόνα 3.19).



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης του δοκιμίου K1-1 σε κάμψη τριών σημείων.

Με βάση το διάγραμμα της Εικόνας 3.19, η αντοχή στην κάμψη τριών σημείων για το δοκίμιο K1-1 υπολογίστηκε σε 19,2 MPa τιμή. Οι τιμές του μαρμάρου για την κάμψη αντοχή σε κάμψη τριών σημείων κυμαίνονται από 15,7 έως 26,4 MPa και η αντοχή του συγκεκριμένου μαρμάρου σε κάμψη τριών σημείων μπορεί να θεωρηθεί καλή σύμφωνα με τα πρότυπα **EN 12372**.

Οι τιμές που μετρήθηκαν πειραματικά για τις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Οι αιτίες για τις διαφορές αυτές, θα μπορούσαν να είναι είτε οι μικρές διαφορές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων ή οι διαφορές στις συνθήκες φόρτισης της μηχανής. Στην περίπτωση μεταξύ των ογκοτεμαχίων K1 και K2 οι διαφορές μπορεί να οφείλονται στον προσανατολισμό των ασυνεχειών ή σε κάποια μικρά σπασίματα, που μπορεί να είχαν τα δοκίμια. Επιπλέον, παρατίθενται στο **Παράρτημα Α** οι μετρήσεις για όλα τα δοκίμια των ογκοτεμαχίων K1 και K2 για τα πειράματα της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό και της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων.



## 4 Αξιολόγηση 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 (Χριστόπουλος, 2016).

Σε αυτήν την περίπτωση, για να μη μελετηθεί ένα προς ένα ξεχωριστά το κάθε δοκίμιο και να προκύψουν σωστά συμπεράσματα, θα μελετηθεί μια ομάδα δειγμάτων. Αυτό γίνεται ώστε να προκύψει ένα συμπέρασμα για τον πληθυσμό από τα αποτελέσματα των δειγμάτων. 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 τις ορυκτολογικές ιδιότητες των δειγμάτων μαρμάρου (Χριστόπουλος, 2016):

- **Πληθυσμός:** Τα δεδομένα (μετρήσεις, παρατηρήσεις) θεωρούνται πως περιγράφουν μία από τις δυνατές καταστάσεις ενός συνόλου (ensemble) πιθανών καταστάσεων. Το σύνολο των καταστάσεων ονομάζεται επίσης πληθυσμός και χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση κατανομής πιθανότητας ανάμεσα στις πιθανές καταστάσεις. Η συνάρτηση αυτή προσδιορίζει τη συχνότητα εμφάνισης καθεμίας εκ των καταστάσεων. Ο όρος δειγματικός χώρος χρησιμοποιείται επίσης για να δηλώσει το σύνολο των πιθανών καταστάσεων.
- **Δείγμα:** Όλες οι μετρήσεις που υπάρχουν για μια μεταβλητή αποτελούν το δείγμα (sample) της συγκεκριμένης μεταβλητής. Βάσει του δείγματος είναι δυνατό να υπολογιστούν στατιστικές ιδιότητες του πληθυσμού από τον οποίο προέρχεται το δείγμα. Αυτός είναι ο ρόλος της στατιστικής. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι σημειακές ή να αφορούν την εξάρτηση μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων. Το μέγεθος του δείγματος είναι ίσο με τον αριθμό των μετρήσεων που υπάρχουν για τη μεταβλητή.
- **Δεδομένα:** Τα δεδομένα (data) αποτελούν τις διαθέσιμες πληροφορίες για τις μεταβλητές ενός προβλήματος. Χωρίζονται εν γένει σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη είναι τα σκληρά δεδομένα (hard data), τα οποία αντιστοιχούν σε ποσοτικές μετρήσεις (που μπορεί να εμπεριέχουν σφάλματα μέτρησης). Η δεύτερη κατηγορία δεδομένων είναι τα μαλακά δεδομένα (soft data), τα οποία αντιστοιχούν σε αβέβαιες πληροφορίες (πχ., πληροφορίες που εκφράζονται με τη βοήθεια μίας συνάρτησης κατανομής, η οποία μπορεί να είναι εμπειρικής προέλευσης ή να βασίζεται σε θεωρητικές εκτιμήσεις).

Για να είναι εφικτή η λήψη ενός αποτελέσματος, το οποίο να είναι κατατοπιστικό, θα πρέπει να οριστεί ένας δειγματοχώρος  $S$ . Αν ο  $S$  είναι συνεχής και σε κάθε γεγονός  $A$  αντιστοιχεί  $P(A)$ , τότε η  $P$  είναι μια πραγματική συνάρτηση που καλείται συνάρτηση πιθανότητας και η τιμή  $P(A)$  καλείται πιθανότητα.

Έστω ότι σε κάθε σημείο ενός δειγματοχώρου  $S$  αντιστοιχεί ένας αριθμός, τότε προκύπτει μια συνάρτηση ορισμένη στο δειγματοχώρο και καλείται τυχαία μεταβλητή.

Οι ποσότητες που υπολογίστηκαν, καθώς και οι αντίστοιχοι ορισμοί τους, είναι οι παρακάτω:

Αν  $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$  οι τιμές από ένα δείγμα μεγέθους  $n$  καλείται **δειγματική μέση τιμή η μέση τιμή δείγματος**.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (12)$$

- **Διάμεσος (median)  $X_{med}$  ή  $X_{0.5}$ :** είναι η τιμή εκείνη που χωρίζει την κατανομή σε δύο μέρη, έκαστο εκ των οποίων περιέχει το 50% της συνολικής πιθανότητας.
- **Διάμεσος δείγματος:** Στην περίπτωση δειγμάτων, αν οι τιμές τους ταξινομηθούν σε αύξουσα σειρά, ο διάμεσος αντιστοιχεί στο κέντρο της κατανομής. Αν το πλήθος καταστάσεων του δείγματος είναι πεπερασμένο ο διάμεσος υπολογίζεται ως εξής:

$$X_{0.5} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( x \left[ \frac{M}{2} \right] + x \left[ \frac{M}{2} + 1 \right] \right) & \text{για } M = 2m \\ \frac{x[M+1]}{2} & \text{για } M = 2m + 1 \end{cases} \quad (13)$$

- **Τυπική απόκλιση (standard deviation)  $\sigma_x$ :** είναι η τετραγωνική ρίζα της διασποράς και προσδιορίζει ποσοτικά την απόκλιση της κατανομής από τη μέση τιμή της. Ποιοτικά μπορεί κανείς να πει ότι το εύρος της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, τουλάχιστον για συμμετρικές κατανομές, είναι ανάλογο προς την τυπική απόκλιση. Η τυπική απόκλιση είναι το στατιστικό μέγεθος, που χρησιμοποιείται για να εκφραστεί το πιθανό σφάλμα πειραματικών μετρήσεων και το σφάλμα εκτίμησης των παραμέτρων μιας κατανομής πιθανότητας από ένα πεπερασμένο δείγμα.

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

- **Συντελεστής ασυμμετρίας ή συντελεστής λοξότητας:** Συχνά μια κατανομή δεν είναι συμμετρική, δηλαδή δεν υπάρχει τιμή της τυχαίας μεταβλητής, ως προς την οποία η συνάρτηση πιθανότητας να είναι συμμετρική. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κατανομή παρουσιάζει συχνά μια «ουρά» προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά. Μια ποσότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο της ασυμμετρίας, το οποίο καλείται συντελεστής ασυμμετρίας ή συντελεστής λοξότητας, ως:

$$\alpha_3 = \frac{(X_1 - \bar{X})^3 + (X_2 - \bar{X})^3 + \dots + (X_n - \bar{X})^3}{\sigma^3} \quad (15)$$

Η θετική συμμετρία υποδηλώνει μια κατανομή με μια ασύμμετρη ουρά, που επεκτείνεται προς τις πιο θετικές τιμές. Αρνητική ασυμμετρία υποδηλώνει μια κατανομή με μια ασύμμετρη «ουρά», που επεκτείνεται προς τις πιο αρνητικές τιμές. Αν υπάρχει συμμετρική κατανομή  $\alpha_3=0$ .

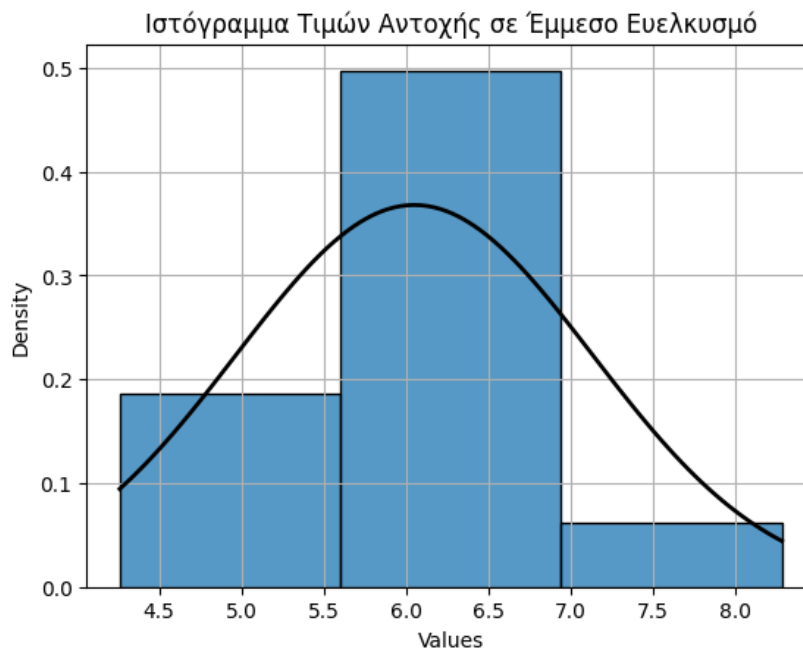
- **Ο συντελεστής κύρτωσης (kurtosis coefficient):** ορίζεται με τη βοήθεια της κεντρικής ροπής τέταρτης τάξης. Πιο συγκεκριμένα, για τις περιπτώσεις συνεχών και διακριτών κατανομών ο συντελεστής κύρτωσης ορίζεται ως εξής:

$$\alpha_4 = \frac{(X_1 - \bar{X})^4 + (X_2 - \bar{X})^4 + \dots + (X_n - \bar{X})^4}{\sigma^4} \quad (16)$$

Ο συντελεστής κύρτωσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές στα άκρα της κατανομής. Ας σημειωθεί, πως τα τμήματα της κατανομής, τόσο στα αριστερά όσο και στα δεξιά της μέσης τιμής, συνεισφέρουν με το ίδιο πρόσημο λόγω της τέταρτης δύναμης της διαφοράς. Ο συντελεστής κύρτωσης της κανονικής κατανομής είναι ίσος με τρία. Κατανομές με συντελεστή κυρτότητας μεγαλύτερο του τρία ονομάζονται λεπτοκυρτικές. Αυτές οι κατανομές έχουν μεγαλύτερο βάρος στις ουρές από την κανονική κατανομή. Αντίθετα, κατανομές με συντελεστή κύρτωσης μικρότερο του τρία ονομάζονται πλατυκυρτικές. Σε αυτές τις κατανομές, οι τιμές είναι περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από το κέντρο, από ότι στην κανονική κατανομή. Σε μερικές περιπτώσεις, ο όρος κύρτωση αναφέρεται στον υπερβατικό συντελεστή κύρτωσης (excess kurtosis), ο οποίος ορίζεται ως η διαφορά του πραγματικού συντελεστή κύρτωσης από την κανονική τιμή, δηλαδή το τρία. Με αυτό τον ορισμό, οι λεπτοκυρτικές κατανομές έχουν θετικό συντελεστή κύρτωσης και οι πλατυκυρτικές

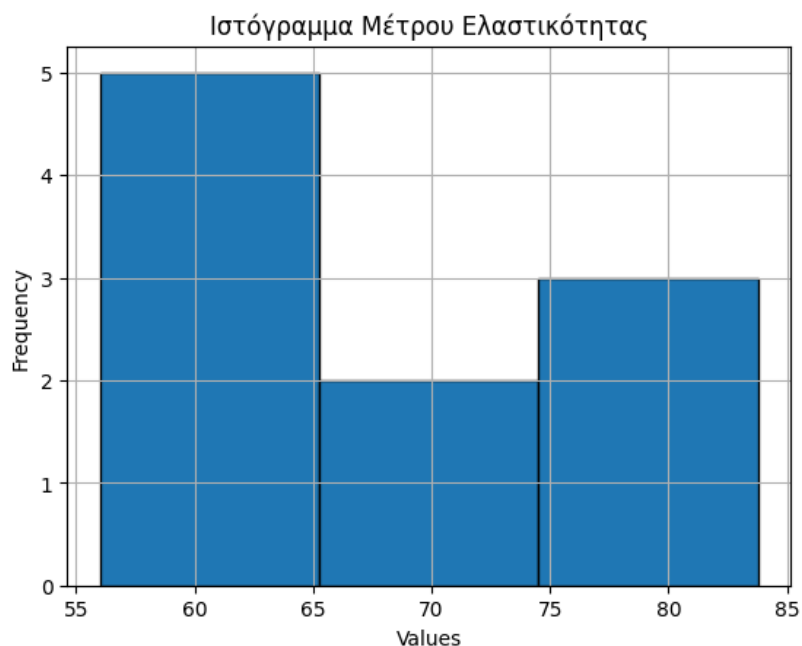
αρνητικό συντελεστή κύρτωσης. Είναι δυνατό να ελεγχθεί αν μια κατανομή είναι λεπτοκυρτική ή πλατυκυρτική χρησιμοποιώντας το κανονικό γράφημα πιθανότητας (Χριστόπουλος, 2016).

Με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python υπολογίστηκαν τα παρακάτω ιστογράμματα (Εικόνα 4.1):



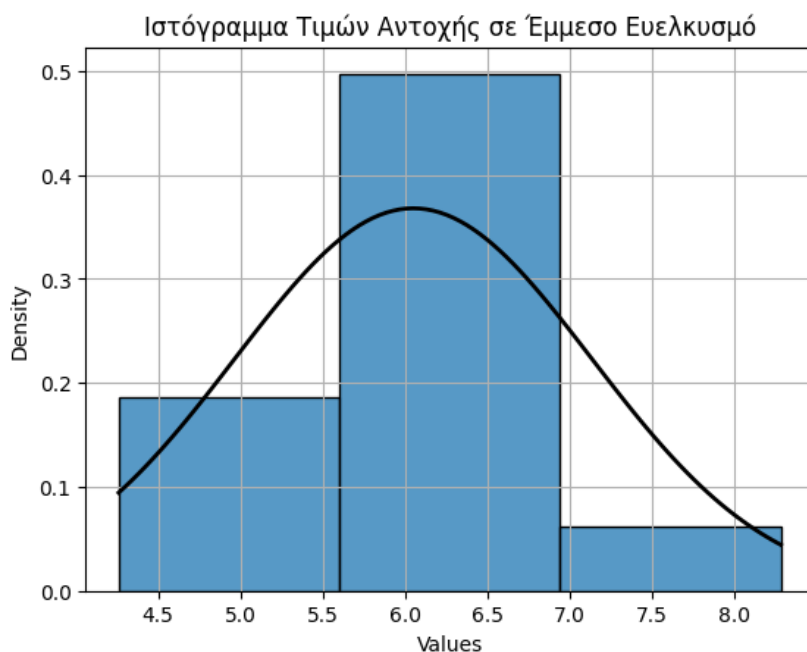
Εικόνα 4.1: Ιστόγραμμα τιμών αντοχής των δοκιμίων

Οι τιμές της μονοαξονικής αντοχής ακολουθούν αρκετά την κανονική κατανομή γεγονός που αποδεικνύει ότι οι τιμές των αντοχών κατανέμονται σχεδόν συμμετρικά γύρω από την μέση τιμή τους και τα περισσότερα δεδομένα βρίσκονται κοντά στην μέση τιμή. Για το μέτρο ελαστικότητας το ιστόγραμμα (Εικόνα 4.2) δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή, γεγονός που αποδεικνύεται από την αρνητική κύρτωση που παρουσιάζουν οι τιμές της στατικής ανάλυσης.



Εικόνα 4.2: Ιστόγραμμα Μέτρου ελαστικότητας

Το ιστόγραμμα των τιμών της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (Εικόνα 4.3) όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.3: Ιστόγραμμα τιμών αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό.

Οι τιμές της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό ακολουθούν αρκετά την κανονική κατανομή, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι τιμές των αντοχών κατανέμονται σχεδόν συμμετρικά γύρω από τη μέση τιμή τους και τα περισσότερα δεδομένα βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή (Πίνακας

4.1). Με την χρήση των ιστογραμμάτων μπορούν να βρεθούν χρήσιμες πληροφορίες για τα δεδομένα όπως η κατανομή τους στο χώρο καθώς και την διασπορά τους, τη κύρτωσης ή την ασυμμετρίας που παρουσιάζουν τα δεδομένα και τέλος μπορεί να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων με την κανονική κατανομή και πόσο τα αποτελέσματα αποκλίνουν από αυτήν.

Πίνακας 4.1: Στατιστική επεξεργασία των μηχανικών ιδιοτήτων του μαρμάρου Καβάλας.

	<b>C<sub>o</sub> [MPa] Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη</b>	<b>E [GPa] Μέτρο ελαστικότητας</b>	<b>BTS [MPa] Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό</b>
<b>Πλήθος δοκιμίων</b>	12	12	12
<b>Μέση τιμή</b>	86,4	72,7	6,0
<b>Τυπική απόκλιση</b>	2.7	7.5	1.1
<b>Διάμεσος</b>	86.4	71.5	6.3
<b>Μέγιστη τιμή</b>	90.4	85.7	8.3
<b>Ελάχιστη τιμή</b>	80.4	63.3	4.3
<b>Κύρτωση</b>	1.24	-0.70	0.34
<b>Ασυμμετρία</b>	-0.72	0.59	0.19

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2 απεικονίζεται ο βαθμός σπουδαιότητας των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των διακοσμητικών πετρωμάτων ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται (Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός). Στο αριστερό μέρος του πίνακα απεικονίζονται οι φυσικομηχανικές ιδιότητες όπως ο πετρογραφικός προσδιορισμός, το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, το φαινόμενο βάρος η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και άλλα. Στις μεσαίες στήλες του πίνακα παρουσιάζονται τα ακατέργαστα και τα ημικατεργασμένα προϊόντα και στη δεξιά μεριά του πίνακα υπάρχουν 4 στήλες, οι οποίες σχετίζονται με τη χρήση που προορίζονται τα τελικά προϊόντα διακοσμητικών πετρωμάτων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός), η σπουδαιότητα των συγκεκριμένων ιδιοτήτων για κάθε χρήση συμβολίζεται με τους αστερίσκους στα κενά διαστήματα, δηλαδή:

- ✓ Με έναν (1) αστερίσκο (\*): μικρός βαθμός σπουδαιότητας.
- ✓ Με δύο (2) αστερίσκους (\*\*): μέτριος βαθμός σπουδαιότητας.
- ✓ Με τρεις (3) αστερίσκους (\*\*\*): μεγάλος βαθμός σπουδαιότητας.

Ο συγκεκριμένος πίνακας είναι πολύ χρήσιμος, καθώς δεν έχουν όλες οι ιδιότητες την ίδια σπουδαιότητα για όλες τις χρήσεις, όπως για παράδειγμα η αντοχή σε θλίψη ή η αντοχή σε κάμψη δεν έχουν σημαντικό ρόλο για ένα πέτρωμα που χρησιμοποιείται για εσωτερικές επενδύσεις, αλλά έχουν μεγάλο βαθμό σπουδαιότητας για πετρώματα που θα χρησιμοποιηθούν σε σκάλες.

Πίνακας 4.2: Βαθμός σπουδαιότητας των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των διακοσμητικών πετρωμάτων, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται (Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός).

	Ακατέργαστα προϊόντα	Ημικατεργασμένα προϊόντα	Τελικά προϊόντα για τις ακόλουθες χρήσεις:					
			1		2		3	4
			α	β	α	β		
Πετρογραφικός προσδιορισμός	***	***	***	***	***	***	***	***
Μέγεθος και σχήμα κόκκων	***	***	***	***	***	***	***	***
Φαινόμενο ειδικό βάρος	***	***	***	***	***	***	***	***
Αντοχή στη θλίψη	***	**	**	*	**	**	***	*
Αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη	***	***	***	*	**	**	***	***
Μέτρο ελαστικότητας	***	**	***	*	**	*	***	*
Αντοχή στην πρόσκρουση	***	***	**	**	***	***	***	***
Μικροσκληρότητα Κnoop	***	**	*	*	***	***	**	*
Συντελεστής εμποτισμού	***	***	***	**	***	**	**	***
Συντελεστής θερμικής διαστολής	**	**	***	*	**	**	**	**
Αντοχή στον παγετό	***	**	***	*	***	*	**	***
Αντοχή στην τριβή	***	***	**	**	***	***	***	*
Αντοχή στη διάβρωση	***	***	***	*	***	*	***	***

1α. επενδύσεις εξωτερικές, 1β. επενδύσεις εσωτερικές,

2α. δαπεδοστρώσεις εξωτερικές, 2β. δαπεδοστρώσεις εσωτερικές,

3. σκάλες, 4. στέγες.

\*μικρός βαθμός σπουδαιότητας, \*\*μέτριος βαθμός σπουδαιότητας, \*\*\* μεγάλος βαθμός σπουδαιότητας.

Για την εν λόγω διπλωματική εργασία, τα εργαστηριακά πειράματα που διεξήχθησαν, έγιναν με βάση τα πρότυπα που περιγράφονται στη συνέχεια, έτσι ώστε να βρεθούν οι ιδιότητες του μαρμάρου και να συγκριθούν οι τιμές. Η πετρογραφική ανάλυση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο **EN 12407**. Το πρότυπο αυτό περιγράφει την πετρογραφική εξέταση, η οποία μαζί με τη χημική ανάλυση ταξινομεί το πέτρωμα και προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά του. Οι παρατηρήσεις σε λεπτές τομές δειγμάτων καθορίζουν τα ορυκτολογικά και πετρογραφικά χαρακτηριστικά, που είναι κρίσιμα για το χαρακτηρισμό του πετρώματος. Η μελέτη των φυσικών δοκιμών έγινε με τη χρήση **EN 1936**, το οποίο περιγράφει τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους. Το πρότυπο που ακολουθήθηκε για τη εργαστηριακή δοκιμή της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση, ήταν το **EN 13755**, το



οποίο εκφράζεται σε ποσοστό % κατά βάρος (% κ.β.) και είναι η μάζα του νερού που συγκρατεί το κορεσμένο δοκίμιο ως ποσοστό % της μάζας του. Για τις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου, η εργαστηριακή δοκιμή του προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη έγινε με βάση το πρότυπο **EN 1926**, ενώ για τον έμμεσο εφελκυσμό χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο **ISRM 1981**. Η εργαστηριακή μελέτη του μαρμάρου για αντοχή σε κάμψη έγινε σύμφωνα με το πρότυπο **EN 12372**. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.3 που περιέχει πρότυπα για τις ιδιότητες μαρμάρων.

Πίνακας 4.3: Πρότυπα για τις ιδιότητες των μαρμάρων (πχ. Παπατρέχας, 2011 και βιβλιογραφίες εντός).

α/α	Δοκιμή	Σχετικά Πρότυπα
1.	Φαινόμενη ειδική πυκνότητα	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ASTM C-97- 96</li> <li>● DIN 52102</li> <li>● EN 1936</li> </ul>
2.	Ανοικτό πορώδες	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ASTM C-97-96</li> <li>● DIN 52102</li> <li>● EN 1936</li> </ul>
3.	Υδαταπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ASTM C-97-96</li> <li>● DIN 52103</li> <li>● EN 13755</li> </ul>
4.	Ορυκτολογική – πετρογραφική μελέτη	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EN 12407</li> <li>● DIN 52100-2</li> </ul>
5.	Καθορισμός της μικροσκληρότητας κατά Knoop	<ul style="list-style-type: none"> <li>● UNI 9724 Μέρος 6<sup>α</sup></li> <li>● EN 14205</li> </ul>
6.	Αντοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EN ISO 10545-9</li> <li>● DIN 52204</li> </ul>
7.	Αντοχή στη θλίψη	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ASTM C-170-90</li> <li>● DIN 52105</li> <li>● EN 1926</li> </ul>
8.	Αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη (3 & 4 σημείων)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ASTM C-99-87</li> <li>● ASTM C-880-96</li> <li>● DIN 52112</li> <li>● EN 12372</li> </ul>
9.	Αντίσταση στην πρόσκρουση ή προσδιορισμός της ενέργειας θραύσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>● UNI U 32.07.248.0</li> <li>● prEN 14158</li> </ul>
10.	Προσδιορισμός του συντελεστή ευθύγραμμης θερμικής διαστολής	<ul style="list-style-type: none"> <li>● DIN 18155</li> <li>● DIN EN ISO 10545-8</li> </ul>
11.	Αντοχή στην φθορά από τριβή κατά Boehme	<ul style="list-style-type: none"> <li>● DIN 52108</li> </ul>
12.	Προσδιορισμός της ολισθηρότητας με τη βοήθεια συσκευής δοκιμής με εκκρεμές	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EN 14231</li> </ul>
13.	Αντίσταση στον παγετό μετά από εφαρμογή κύκλων ψύξης – απόψυξης	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ASTM C-666-97</li> <li>● DIN 52104 Μέρος 1</li> <li>● EN 12371</li> </ul>
14.	Αντίσταση στη γήρανση λόγω αλατονέφωσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>● prEN 14147</li> </ul>
15.	Μέτρηση ανωμαλιών επιφανείας	<ul style="list-style-type: none"> <li>● DIN 4768</li> <li>● DIN 4771</li> <li>● ISO 468</li> </ul>
16.	Αντίσταση στη γήρανση με θερμικό αιφνιδιασμό	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EN 14066</li> </ul>

## 5 Συμπεράσματα

Στην προκειμένη εργασία, έγινε προσπάθεια να μελετηθούν οι ορυκτολογικές και πετρογραφικές συμπεριλαμβανόμενου του προσδιορισμού των χρωματικών παραμέτρων, καθώς και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες (υδατοαπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση, φαινόμενη πυκνότητα, ανοιχτό πορώδες, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη και αντοχή στην κάμψη τριών σημείων) δειγμάτων μαρμάρου από ενεργό λατομείο στην περιοχή της Περιφερειακής Ενότητας της Καβάλας. Στόχος ήταν η ανάλυση των παραπάνω ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών του πετρώματος, ώστε να χαρακτηριστεί με βάση τις προαναφερθέντες ιδιότητες του και στη συνέχεια να μελετηθεί η καταλληλότητα και η ποιότητα του.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα ευρήματα της ορυκτολογικής και πετρογραφικής εξέτασης το υπό μελέτη πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως μεσόκοκκο ημίλευκο ασβεστίτικο μάρμαρο, με ταινιώσεις τεφρώς απόχρωσης:

- ❖ Τα εξεταζόμενα δείγματα μαρμάρου έχουν ορυκτολογική σύσταση κατά κύριο λόγο ασβεστίτική από ~97 έως ~99 %. Η χημική ανάλυση των κύριων στοιχείων με χρήση ED-XRF φανέρωσε πως τα δείγματα δεν περιέχουν οξείδια σε ποσοστό να προκαλέσουν ελαττώματα στη μάζα τους, ενώ η απώλεια πύρωσης υπολογίστηκε στο ~43%, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για τυπικές συστάσεις μαρμάρων, που χαρακτηρίζονται ως ασβεστίτικά.
- ❖ Οι τιμές χρωματικών παραμέτρων είναι χαρακτηριστικές του ημίλευκου χρώματος των δειγμάτων μαρμάρου με ποσοστό απόκλισης από το «τέλειο» λευκό, η μέση τιμή του οποίου υπολογίστηκε σε  $\Delta E^*ab$  20,10 % και ικανοποιητικές τιμές φωτεινότητας (μέση τιμή  $L^* \approx 80$  σε όλα τα δείγματα). Οι ανωτέρω τιμές σχετίζεται άμεσα με την «καθαρότητα» του υπό μελέτη πετρώματος, δηλαδή την κυριαρχία ενός κύριου ορυκτολογικού συστατικού (στην προκειμένη περίπτωση είναι ο ασβεστίτης) και την απουσία σημαντικού ποσοστού περιεχομένου σε μη ανθρακικά ορυκτά.
- ❖ Μακροσκοπικά η υγεία των υπό μελέτη δοκιμίων ήταν καλή, διότι κανένα ορατό σημάδι αποσάθρωσης ή/και αποικοδόμησης, δεν παρατηρήθηκε στα προς μελέτη δοκίμια, αλλά ούτε στους εξεταζόμενους όγκους μαρμάρων δεν παρατηρήθηκαν ελαττώματα όπως (πχ. ρωγμές ή ασταθείς φλέβες, κλπ.). Από την άλλη πλευρά, πιο λεπτομερής μακροσκοπική παρατήρηση φανέρωσε την παρουσία ανοιχτότεφρων ταινιώσεων στην κύρια μάζα των δοκιμίων. Η ύπαρξη ταινιώσεων διαφορετικών

αποχρώσεων αποδίδεται κυριότερα σε συγκεντρώσεις λεπτόκοκκου ασβεστιτικού ή/και δολομιτικού υλικού.

- ❖ Με βάση τη μικροσκοπική παρατήρηση στην κύρια μάζα κυριαρχούν υπιδιόμορφοι και κατά τόπους αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι ασβεστίτη, χωρίς εμφανή φαινόμενα εξαλλοίωσης ή αποσύνθεσης, με μέγεθος κόκκων να κυμαίνεται από 0,2 έως 0,8 mm και με μέγεθος πορφυροβλαστών μεταξύ 0,8-1,4 mm. Ο ιστός τους είναι κυρίως γρανοβλαστικού και κατά θέσεις πορφυροβλαστικού τύπου, ενώ χαρακτηρίζεται και ως ελαφρώς ετεροκοκκώδης. Μεμονωμένοι αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι δολομίτη αναγνωρίστηκαν κατά τόπους. Βάσει της κατανομής μεγέθους των κρυστάλλων ασβεστίτη, τα δείγματα των μαρμάρων χαρακτηρίζονται ως μεσόκοκκα.

Περαιτέρω μελέτη των δειγμάτων μαρμάρου για τον προσδιορισμό των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους κατέδειξε τα δοκίμια παρουσίασαν αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, έμμεσο εφελκυσμό και μέτρο ελαστικότητας, πιθανώς κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν ως φυσικό διακοσμητικό υλικό και σε εξωτερικές επενδύσεις για εξωτερικές επενδύσεις και εσωτερικές δαπεδοστρώσεις, σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ:

- ❖ Οι τιμές της υδατοαπορρόφησης σε ατμοσφαιρική πίεση που προσδιορίστηκαν εργαστηριακά για τα δοκίμια του ασβεστιτικού μαρμάρου κυμαίνονται από 0,08 έως 0,10 % κ.β., ενώ η μέση τιμή υδατοαπορρόφησης είναι  $A_b = 0.1$  % κ.β.. Η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας στα εξεταζόμενα δοκίμια εμφανίζει μικρή διακύμανση που κυμαίνεται από 2711 έως 2710 kg/m<sup>3</sup>, ενώ το ανοικτό πορώδες έχει μέση τιμή 0.3 % κ.ο.. Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές για τύπους πετρωμάτων όπως τα συγκεκριμένα ασβεστιτικά μάρμαρα και, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της δοκιμής υπολογισμού της υδατοαπορρόφησης, φανερώνουν πως τα δείγματα έχουν μια συμπαγή και ομοιόμορφη υφή.
- ❖ Η εκτέλεση της δοκιμής σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (μέση τιμή  $C_o = 86,4$  MPa) φανέρωσε ότι η πλειοψηφία των δοκιμών αστόχησε σε αξονική κατάτμηση, ενδεχομένως οφειλόμενη σε συνένωση μικρορωγμών/μικροδιακλάσεων ή περιοχές ανομοιογένειας στη μικροκλίμακα, ενώ η μειοψηφία τους παρουσίασε την αναμενόμενη θραύση σε ένα επίπεδο (διατμητικά). Η δοκιμή της αντοχής των ογκοτεμαχίων μαρμάρου σε έμμεσο εφελκυσμό BTS (μέση τιμή: 6,02 MPa) κατέδειξε ότι η θραύση τους ήταν εκρηκτική με τη δημιουργία μιας κεντρικής ρωγμής. Από τις παραπάνω δοκιμές προκύπτει ότι το υπό μελέτη διακοσμητικό μάρμαρο παρουσιάζει παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας τόσο στη διεύθυνση του άξονα του κυλινδρικού

δείγματος (μέση τιμή  $E = 72,7 \text{ GPa}$ ) όσο και σε επίπεδο κάθετο σε αυτήν (μέση τιμή  $E = 66,7 \text{ GPa}$ ).

- ❖ Ο προσδιορισμός της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων στα υπό μελέτη δοκίμια φανέρωσε ότι η καμπτική αντοχή  $\sigma_f$  (μέση τιμή:  $21,1 \text{ MPa}$ ;) είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.

Το μάρμαρο αποτελεί ένα σημαντικό πόρο για την Ελληνική οικονομία, καθώς η εξόρυξη και η επεξεργασία του αποτελούν σημαντικό τμήμα του κλάδου της βιομηχανίας. Η εξαγωγή μαρμάρου παρέχει οικονομική ανάπτυξη και δημιουργεί θέσεις εργασίας σε πολλές περιοχές της χώρας, ενώ η εξαγωγή του συμβάλλει στην ανάπτυξη της Ελλάδας ως σημαντικού παραγωγού ποιοτικού μαρμάρου. Παρόλο που ο κλάδος του μαρμάρου αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω της δυσμενούς οικονομικής κατάστασης που επικρατεί στην Ελληνική βιομηχανία τις τελευταίες δεκαετίες, υπάρχουν εταιρείες στην Ελλάδα που πρωταγωνιστούν στην παγκόσμια αγορά μαρμάρου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Basu, A., Mishra, D. A., & Roychowdhury, K. (2013). Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72, 457-475.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining*. London: George Allen & Unwin.
- Chararas, B. (1990). Mechanical behavior of marbles from the Rhodope Massif. Example from Pan-gaio mountain and Thassos island. *Geologica Rhodopica*, 2, pp. 141-148.
- Dermitzakis Marbles. (χ.χ.). Ανάκτηση 2024, από <https://dermitzakis.com/>
- Gao, Y., Feng, X.-T., Wang, Z., & Zhang, X. (2020). Strength and failure characteristics of jointed marble under true triaxial compression. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 891-905.
- Lógó, B. A., & Vásárhelyi, B. (2019). Estimation of the Poisson's Rate of the Intact Rock in the. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(4), 1030-1037.
- Matthews, J. (1994). What is quality in dimension stone? *Trade International*.
- Obert, L., Windes, S., & Duvall, I. (1946). *Standardized Tests for Determining the Physical Properties of Mine Rock*. University of Michigan Library .
- Protodyakonov, M. (1969). Method of determining the strength of rocks under uniaxial compression. Στο M. M. Protodyakonov, & M. I. Koifman, *Mechanical Properties of Rocks* (σσ. 1-8). Jerusalem: Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations.
- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P., & Hatzipanagiotou, K. (2011). Microcracks in ultrabasic rocks under uniaxial compressive stress. *Engineering Geology*, 117(1-2), σσ. 104-113.
- Roberts, A. (1977). *Geotechnology-An introduction Text for Students and Engineers*. Oxford: Pergamon.
- Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1970). *Theory of elasticity*. New York: McGraw-Hill.
- Triantafyllou et al. (2010). Mineralogical and Microstructure Characterization of a Neogene Natural Building Limestone from Western Crete. *XIX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association* (pp. 397-398). Thessaloniki, Greece: Geologica Balcanica.
- Whitney, D. L., & Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Winter, J. (2001). *Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice-Hall.
- Xiao, P., Zhao, G., & Liu, H. (2022). Failure Transition and Validity of Brazilian Disc Test under Different Loading Configurations: A Numerical Study. *Mathematics*, 10(15).
- Αγιουτάντης, Ζ. Ι. (2019). *Στοιχεία Γεωμηχανικής- Μηχανική Πετρωμάτων* (2η έκδοση εκδ.). Αθήνα: ΙΩΝ.
- Αποστολίδης, Ν. (1991). *Εκμετάλλευση Μαρμάρων*. ΑΘΗΝΑ: Σημειώσεις ΕΜΠ.
- Γκαμαλέτσος, Π. Ν. (2024). Σημειώσεις μαθήματος "Μεθόδοι Χαρακτηρισμού Ορυκτών και Πετρωμάτων".
- Λασκαρίδης, Κ., & Πατρώνης, Μ. (2005). Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των φυσικών διακοσμητικών και η χρήση τους κατά την απόδοση σήμανσης. (σσ. 179-187). Θεσσαλονίκη: Συν. Επιτρ. Οικ. Γεωλ. Ορυκτ. Γεωχ. (Ε.Γ.Ε.).
- Παπατρέχας. (2011). *Συσχέτιση Φυσικομηχανικών Ιδιοτήτων με το Κοκκομετρικό Μέγεθος και την Ορυκτολογική Σύσταση των Ανθρακικών Πετρωμάτων της Ανατολικής Μακεδονίας*. ΕΚΠΑ.
- Πρασιανάκης. (1985). *Μηχανική II : Κινηματική και Δυναμική του*.
- Πρασιανάκης. (1986). *Μηχανική III : μηχανική παραμορφωσίμων*.
- Τσιραμπίδης. (1996). *Τα Ελληνικά Μάρμαρα και Άλλα Διακοσμητικά Πετρώματα*. Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS.
- Τσιραμπίδης, Α. (2001). *Σύσταση, ποιότητα και επιλογή Μαρμάρων και άλλων διακοσμητικών πετρωμάτων*. Σημειώσεις ΑΠΘ.

Χριστόπουλος, Δ. Θ. (2016). “Εισαγωγή στις πιθανότητες και τη στατιστική για μηχανικούς”.

## ΠΡΟΤΥΠΑ

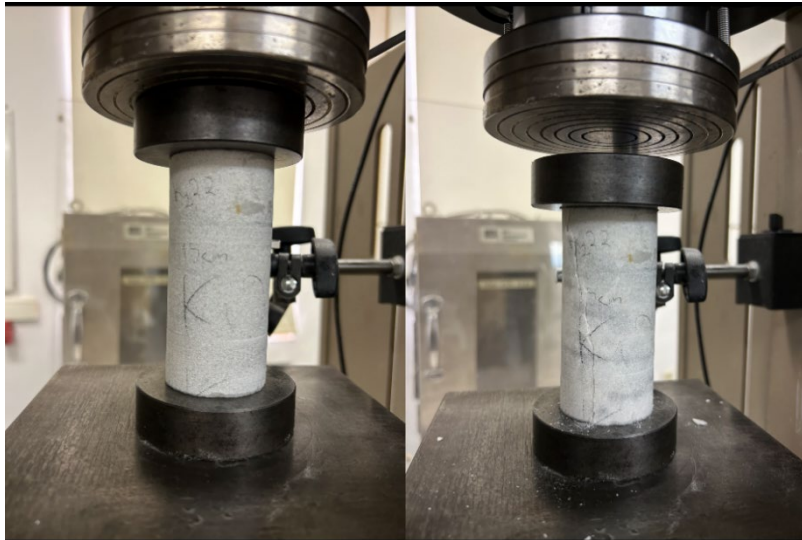
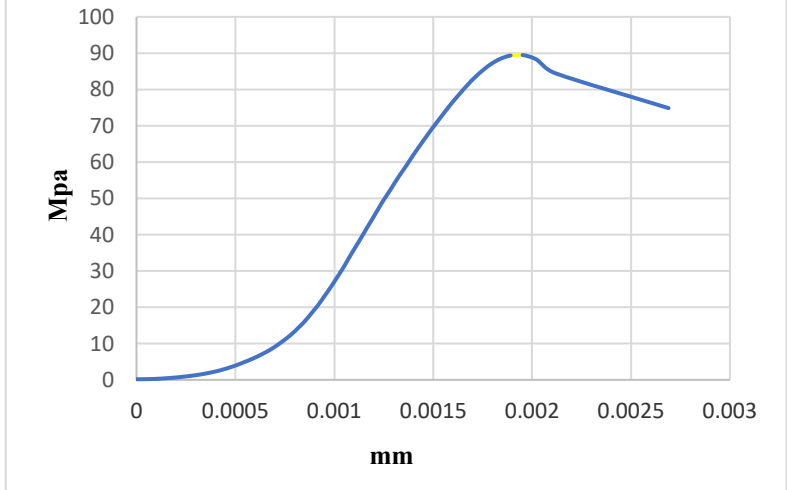
- EN 1926:2006. Natural stone test methods – Determination of uniaxial compressive strength.
- EN 1936:2006. Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.
- EN 12372:1999. Natural stone test methods - Determination of flexural strength under concentrated load.
- EN 12407:2007. Natural stone test methods - Petrographic examination.
- EN 13755:2008. Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure.
- ISRM 1981. Suggested Methods. Rock Characterization Testing and Monitoring, suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Pergamon Press, Oxford. pp.119-121




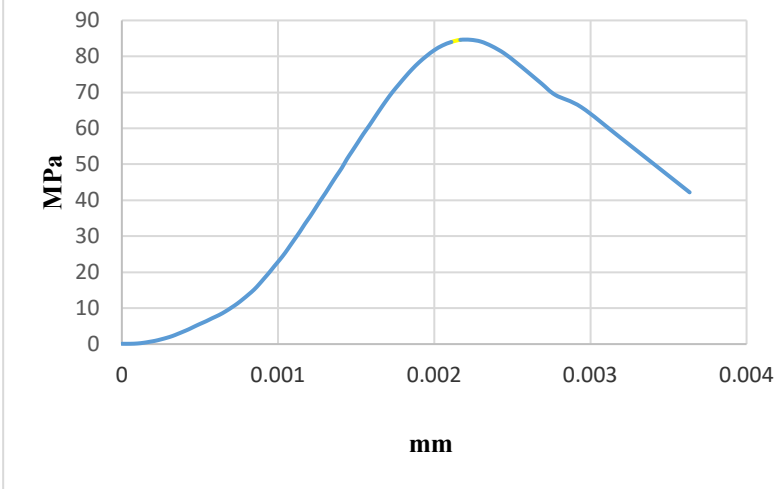
## Παράρτημα Α

### Α1. Πίνακες ογκοτεμαχίου K1 μονοαξονικής θλίψης

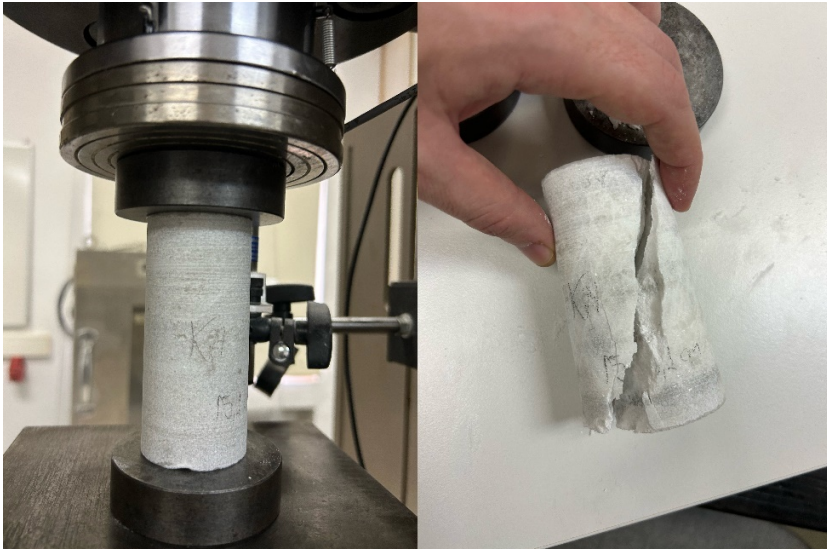
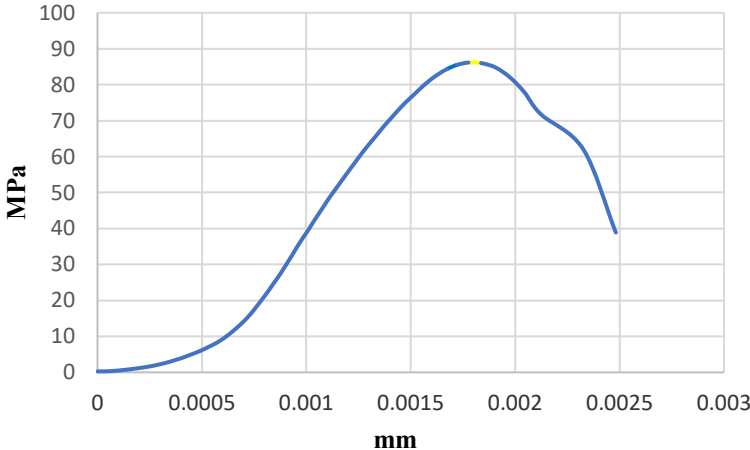
Πίνακας Α.1: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο K1-2.2.

ΔΟΚΙΜΙΟ K1-2.2		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	97,77
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,05	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,17	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm²):	15,97	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	142,557	
	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (Pa):	89,480	
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY E (GPa):	83,408 (50%)
Παρατηρήσεις			

Πίνακας Α2: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο Κ1-2.3.


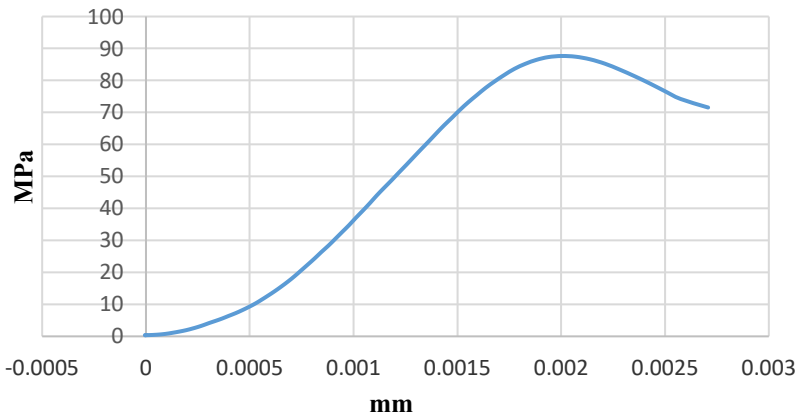
ΔΟΚΙΜΙΟ Κ1-2.3		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	100,4
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,15	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETE R RATIO (H/D):	2,22	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	16,00	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	135,405	
	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	84,615	
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY OF (GPa):	60,95 (50%)

Πίνακας Α3: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο K1-2.4.

ΔΟΚΙΜΙΟ K1-2.4		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	98,73
 	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,18	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,18	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	16,026	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	138,07 2	
	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	86,155	
	ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY E (GPa):	83,77 (50%)	

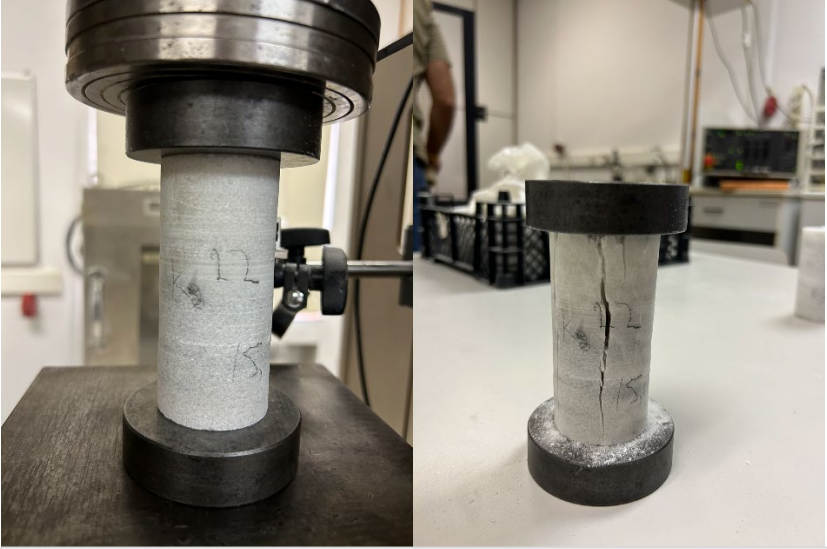
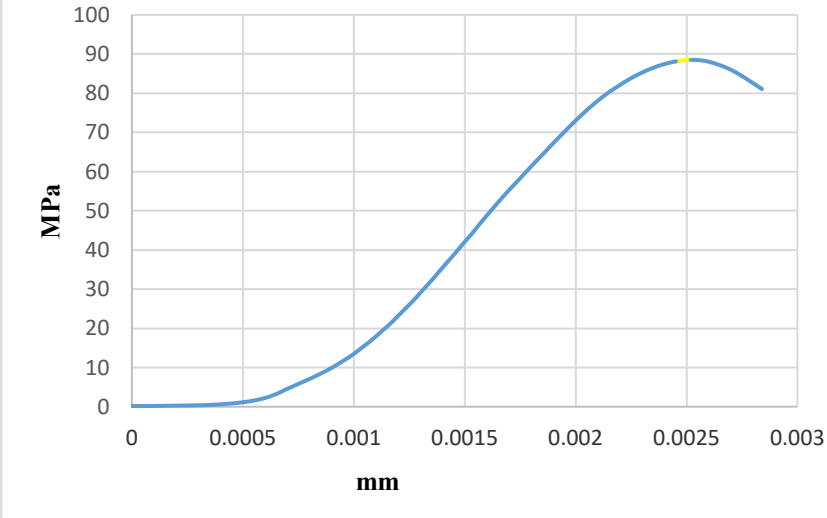
Παρατηρήσεις:

Πίνακας Α4: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο K1-2.6.

<b>ΔΟΚΙΜΙΟ K1-2.6</b>	ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	98,35
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,15
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,17
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	16,024
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	140,275
	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	87,658
	ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY OF E (GPa):	56,006 (50%)

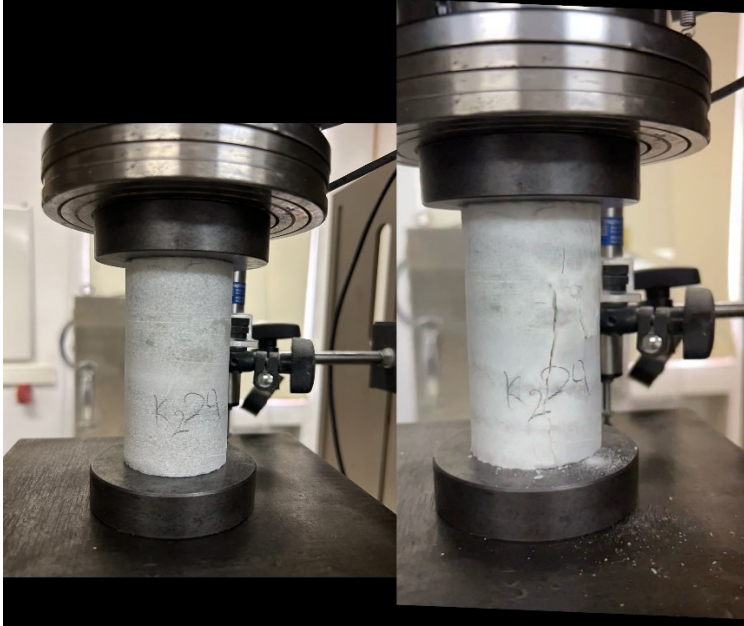
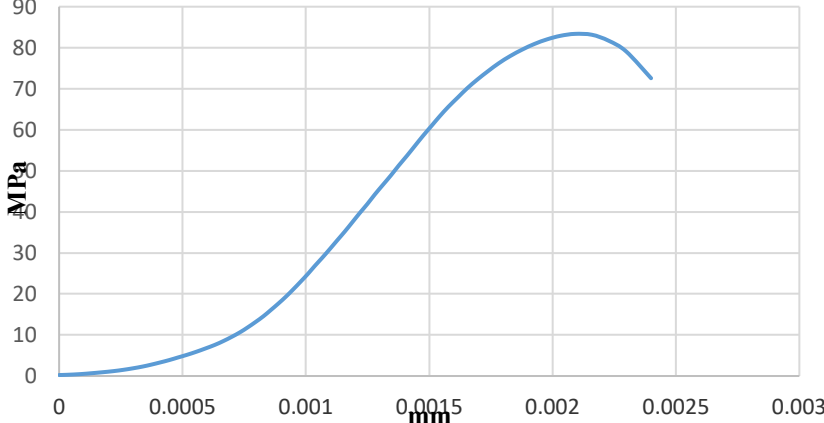
## A2. Πίνακες ογκοτεμαχίου K2 μονοαξονικής θλίψης

Πίνακας A5: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο K2-2.2.

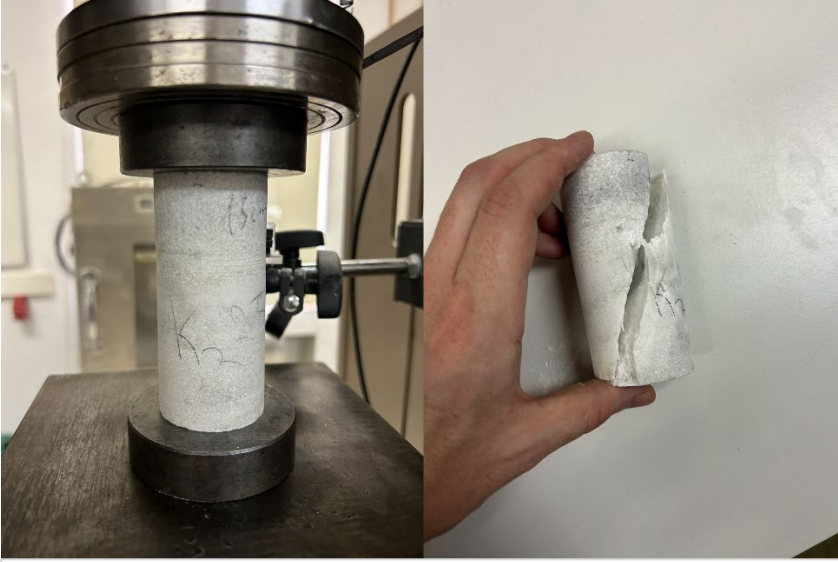
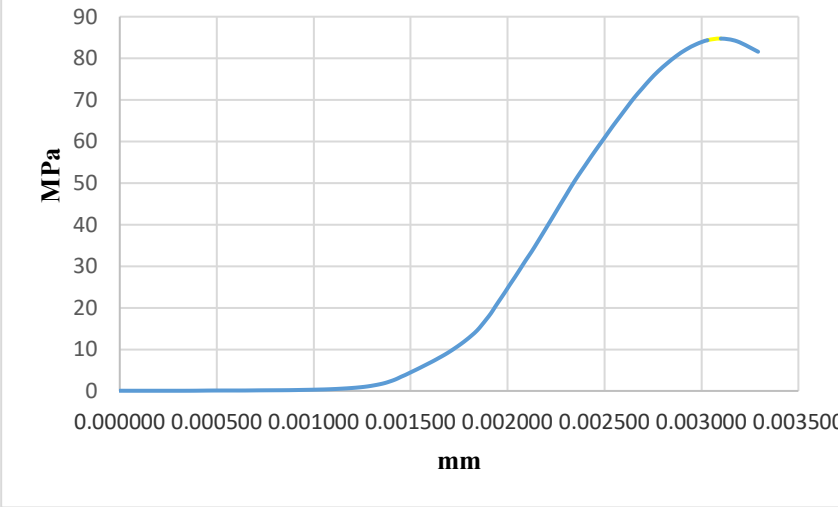
<b>ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.2</b>		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	97,52
		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,10
		ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,16
		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	15,976
		ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic , hydraulic machine with 1600 kN capacity.
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	141,35
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	88,52
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY (GPa):	63,74 (50%)
παρατηρήσεις			



Πίνακας Α6: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο K2-2.4.

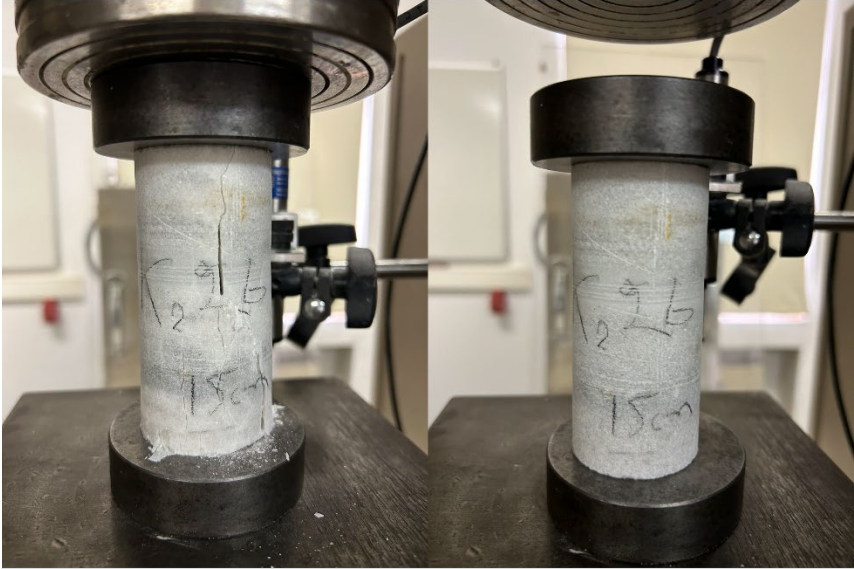
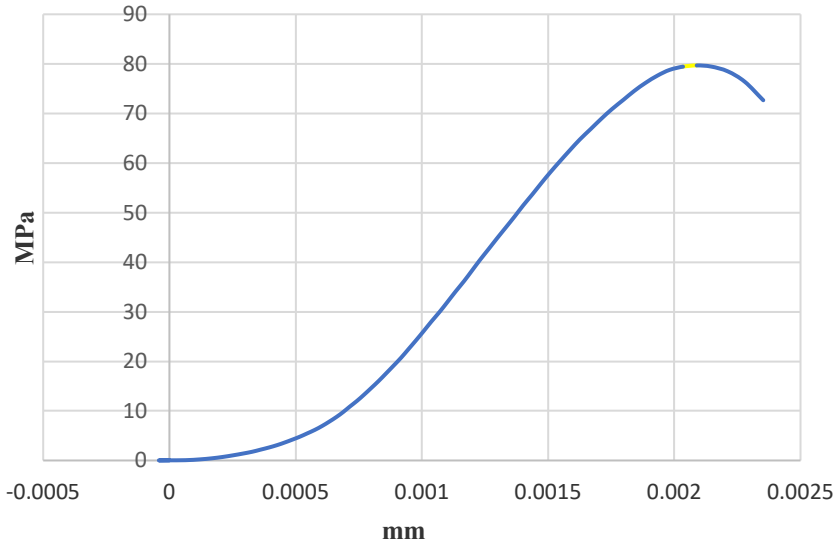
ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.4		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	98,58
		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,17
		ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,18
		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	16,014
		ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	133,514
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	83,373
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY OF (GPa):	65,023

Πίνακας Α7: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο Κ2-2.5.


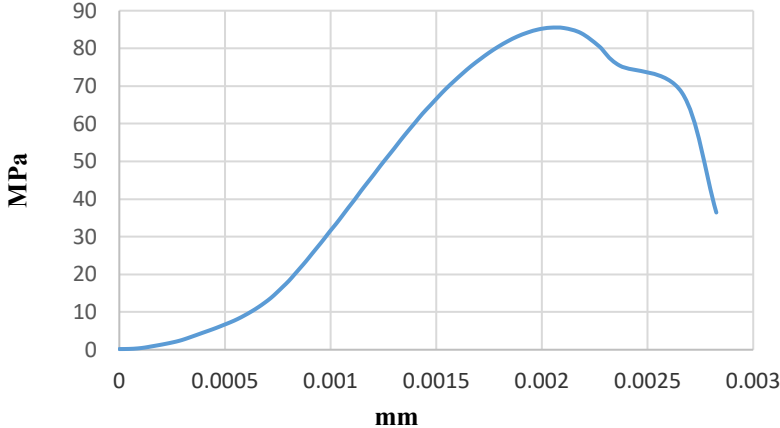
<b>ΔΟΚΙΜΙΟ Κ2-2.5</b>		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	97,65
		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,18
		ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,16
		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	16,026
		ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic , hydraulic machine with 1600 kN capacity.
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ LOAD RATE (MPa/sec):	0,035
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	135,79 7
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	84,73
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY E (GPa):	60,762 (50%)



Πίνακας Α8: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο Κ2-2.6.

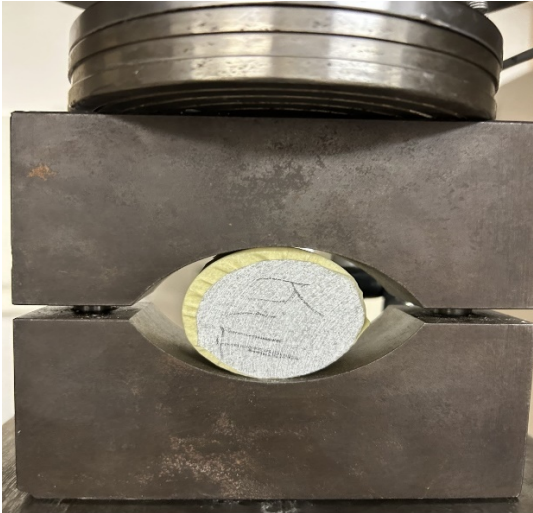
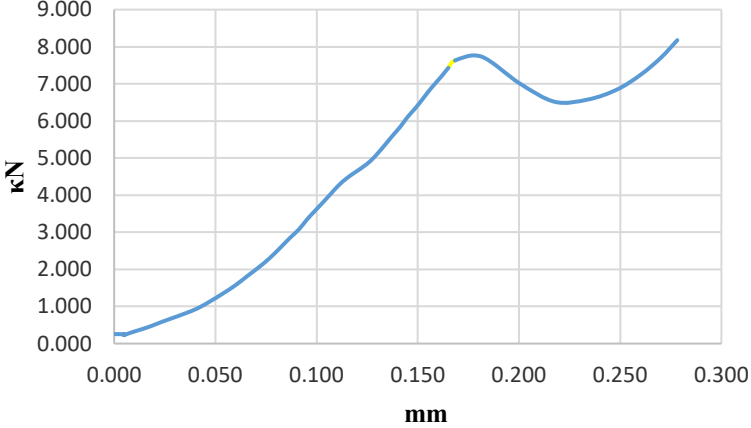
ΔΟΚΙΜΙΟ Κ2-2.6		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	9,783
		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	4,518
		ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,16
		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	16,026
		ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ LOAD RATE (MPa/sec):	0,035
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	127,706
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	79,686
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY (GPa):	59,793

Πίνακας Α9: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο K2-2.1.

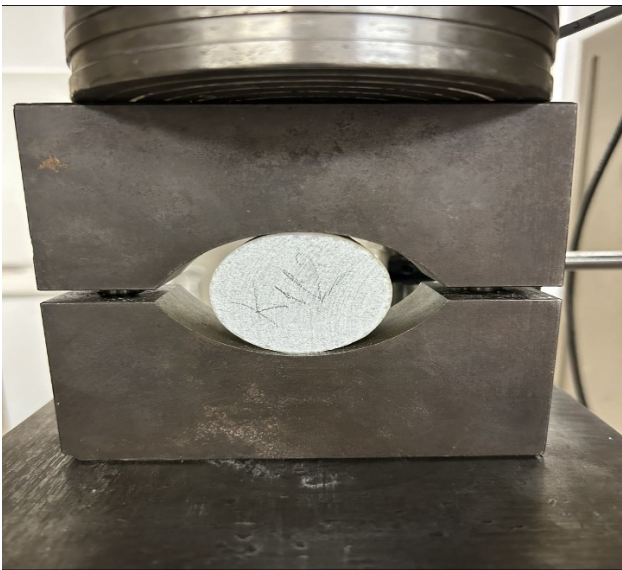
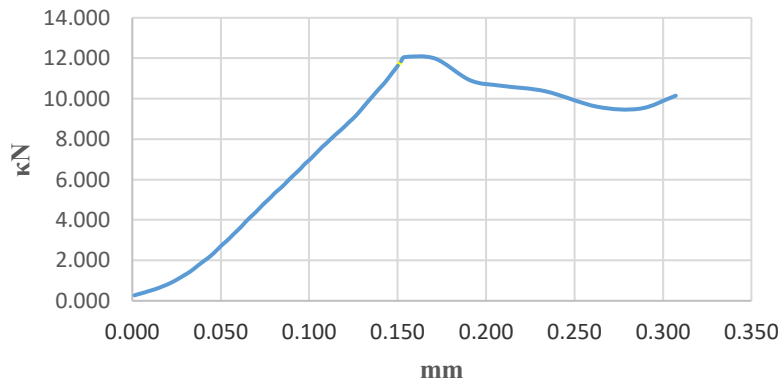
<b>ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.1</b>		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	99,22
		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,12
		ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	2,19
		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> ):	15,979
		ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	136,592
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH (MPa):	85,482
		ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ TANGENTIAL MODULUS OF ELASTICITY (E) (GPa):	69,798 (50%)

### Α3. Αποτελέσματα έμμεσου εφελκυσμού BTS – Δοκίμια ογκοτεμαχίου K1


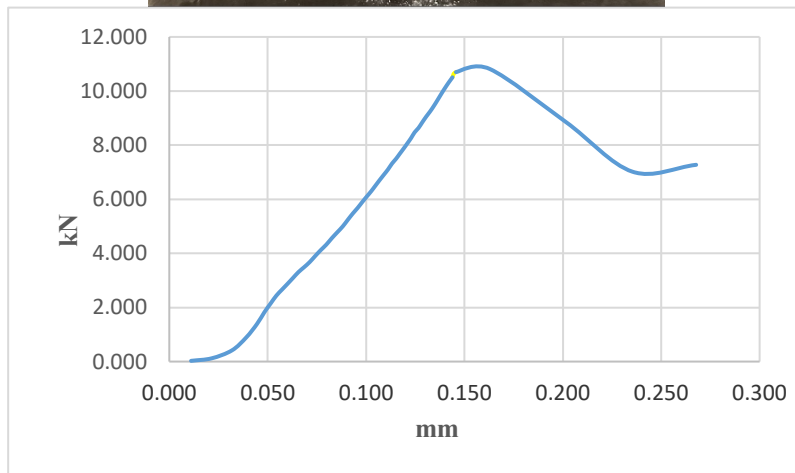
Πίνακας Α10: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K1-1.1.

<b>BRAZILIAN TEST</b> <b>ΔΟΚΙΜΙΟ K1-1.1</b>	ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	23,77
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,13
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,526
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1599,63 4
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	7,731
	ANTOXH ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 4,588


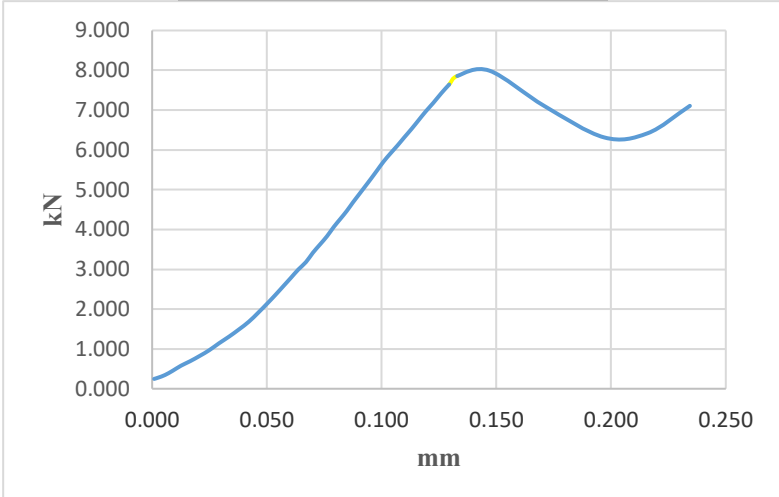
Πίνακας Α11: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K1-1.2.

BRAZILIAN TEST ΔΟΚΙΜΙΟ K1-1.2		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	28,28
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,16	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,62	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1601,76	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	12,055	
		ΑΝΤΟΧΗ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 6,007

Πίνακας Α12: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K1-1.4.


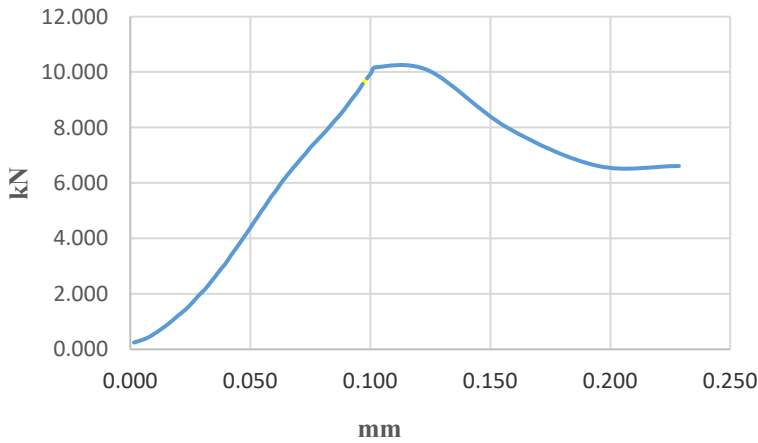
BRAZILIAN TEST ΔΟΚΙΜΙΟ K1-1.4		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	26,83
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,15	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,594	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm²):	1601,05 2	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	10,816	
		ΑΝΤΟΧΗ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 5,684

Πίνακας Α13: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K1-2.3.

BRAZILIAN TEST ΔΟΚΙΜΙΟ K1-2.3		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	26,45
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,06	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,58	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm²):	1594,675	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	7,991	
		ΑΝΤΟΧΗ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 4,268




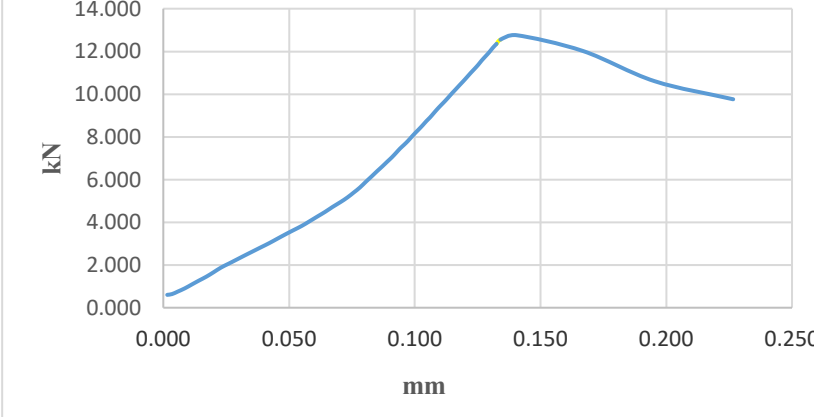
Πίνακας Α14: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K1-2.5.

BRAZILIAN TEST ΔΟΚΙΜΙΟ K1-2.5		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	25,41
		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,16
		ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,56
		ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1601,76 1
		ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	10,176
		ANTOXH EMMEΣO ΕΦΕΛΚΥΣΜO BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 5,645


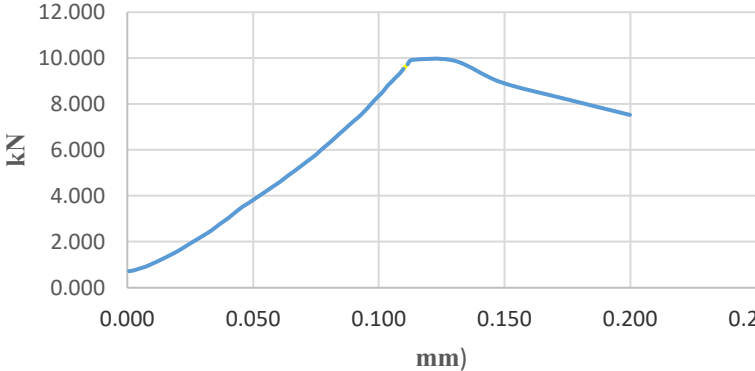


## Α4. Αποτελέσματα έμμεσου εφελκυσμού BTS – Δοκίμια ογκοτεμαχίου K2

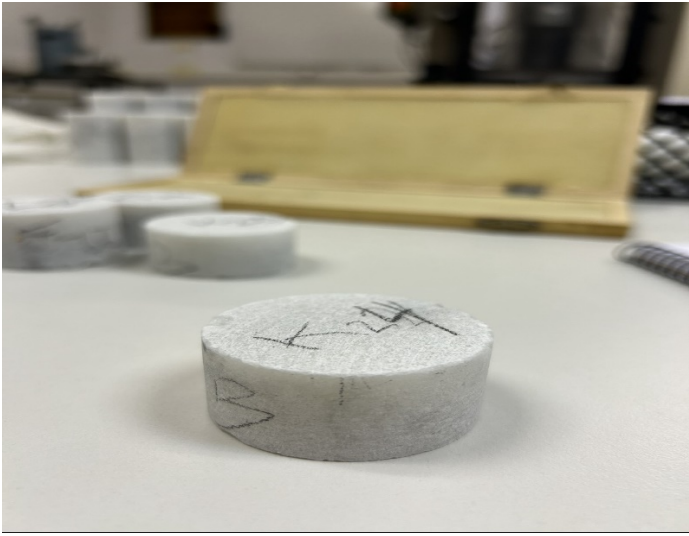
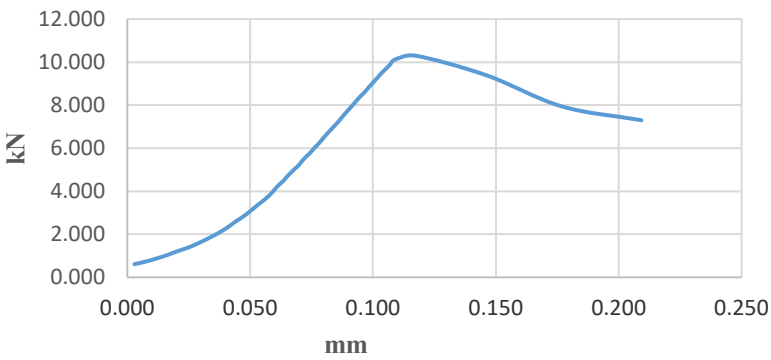
Πίνακας Α15: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K2-2.2.

<b>BRAZILIAN TEST</b> <b>ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.2</b>	ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	30,25
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	40,15
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Y HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,75
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1266,0 8
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	12,758
	ANTOXH ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 6,687


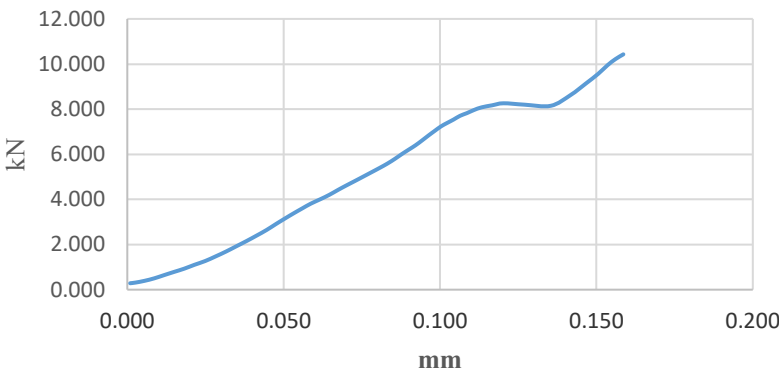
Πίνακας Α16: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K2-2.3.

<b>BRAZILIAN TEST</b> <b>ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.3</b>	ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	23,68
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	40,17
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETE R RATIO (H/D):	0,58
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1267,34 1
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
<p>καμπύλη φορτίου-μετατόπισης</p> 	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	9,921
	ANTOXH ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 6,639

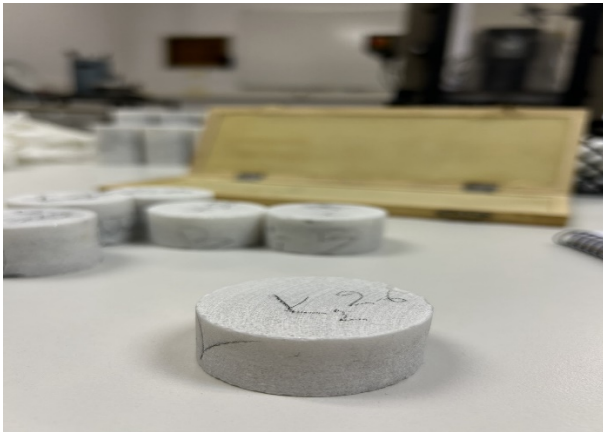
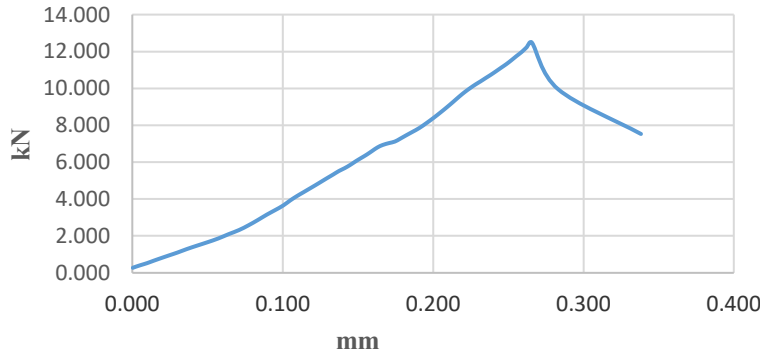
Πίνακας A17 : Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K2-2.4.

<b>BRAZILIAN TEST</b> <b>ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.4</b>	ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	24,90
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	40,13
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Y HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,62
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1264,81 8
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
<p>καμπύλη φορτίου μετατόπισης</p> 	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	10,296
	ΑΝΤΟΧΗ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 6,559

Πίνακας Α18: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K2-2.1.

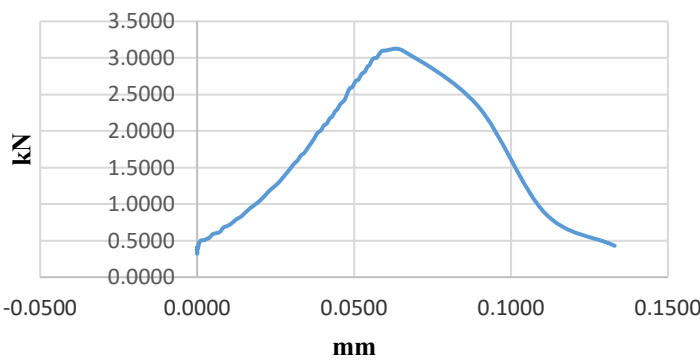
<b>BRAZILIAN TEST</b> <b>ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.1</b>	ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	27,35
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	39,97
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Y HEIGHT/DIAMETE R RATIO (H/D):	0,684
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm <sup>2</sup> ):	1254,75 3
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
<p>καμπύλη φορτίου-μετατόπισης</p> 	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	8,260
	ANTOXH ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 4,81

Πίνακας Α19: Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού BTS για το δοκίμιο K2-2.6.

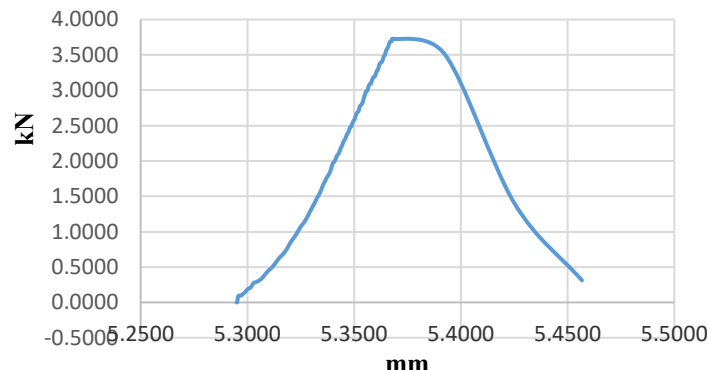
BRAZILIAN TEST ΔΟΚΙΜΙΟ K2-2.6		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	21,23
	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN DIAMETER (mm):	45,17	
	ΛΟΓΟΣ ΥΨΟΥΣ/ΔΙΑΜΕΤΡΟ Υ HEIGHT/DIAMETER RATIO (H/D):	0,47	
	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN AREA (mm²):	1602,47 1	
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	12,482	
<div>καμπύλη φορτίου-μετατόπισης</div> 		ΑΝΤΟΧΗ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ BRAZILIAN TEST(MPa):	ΣΕ - 8,285

## A5. Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη τριών σημείων

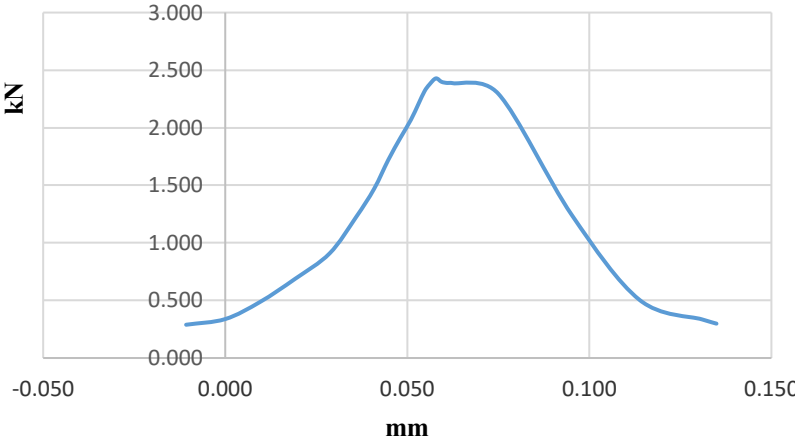
Πίνακας A20: Δοκιμή κάμψης τριών σημείων για το δοκίμιο K1-1.

1 <sup>ο</sup> ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΜΨΗΣ		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	24,5
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	3,101	
	ANTOX ΣΕ ΚΑΜΨΗ – BENDING (MPa):	19,169	

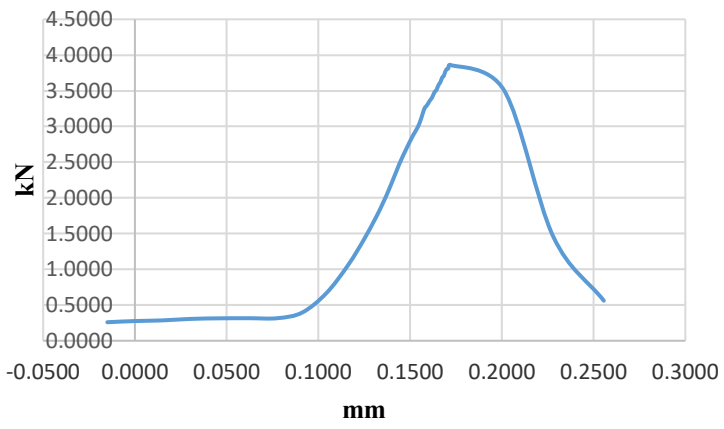
Πίνακας A22: 2<sup>ο</sup> Δοκιμή κάμψης τριών σημείων για το δοκίμιο K1-2.

2 <sup>ο</sup> ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΜΨΗΣ		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	25,25
	ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:	Automatic, hydraulic machine with 1600 kN capacity.	
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20	
	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	4,020	
	ANTOXH ΣΕ ΚΑΜΨΗ – BENDING (MPa):	23,130	

Πίνακας Α22: Δοκιμή κάμψης τριών σημείων για το δοκίμιο K2-1.

3 <sup>ο</sup> ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΜΨΗΣ		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	23,75
	<p>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:</p>	ΑΥΤΟΜΑΤΗ, υδραυλική μηχανή με χωρητικότητα 1600 kN.	
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	2,428
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ BENDING (MPa):	15,698

Πίνακας Α23: Δοκιμή κάμψης τριών σημείων για το δοκίμιο K2-2.

4 <sup>ο</sup> ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΜΨΗΣ		ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ SPECIMEN HEIGHT (mm):	22,65
	<p>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ TYPE OF LOAD MACHINE:</p>	ΑΥΤΟΜΑΤΗ, υδραυλική μηχανή με χωρητικότητα 1600 kN.	
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ TEST TEMPERATURE (°C):	20
		ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD (kN):	3,86
		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ BENDING (MPa):	26,45