

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**



**Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και κάμψης σε δολομιτικά
μάρμαρα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Συμβουλευτική επιτροπή:

Γ. Ξηρουδάκης, Επίκ. Καθηγητής ΠΚ (επιβλέπων)

Γ. Εξαδάκτυλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Ε. Στειακάκης, Αν. Καθηγητής ΠΚ

ΧΑΝΙΑ
Μάϊος 2024

Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

Πρόλογος

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, είχα τη καθοδήγηση και την αμέριστη βοήθεια από σημαντικά πρόσωπα, στα οποία θα ήθελα να εκφράσω την ευχαρίστηση μου:

- Στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Επ. Καθ. Γ. Ξηρουδάκη για τις πολύτιμες παρατηρήσεις του
- Καθηγητή του ΕΜΠ και πριν του Πολυτεχνείου Κρήτης (και επιβλέποντα αρχικά την εργασία αυτή) κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο για τη βοήθεια, συμβουλές και ενθάρρυνση καθ' όλη τη διαδικασία εκπόνησης της εργασίας.
- Τον Δρ. Λιόλιο Παντελή, ΕΔΙΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συμμετοχή του στην αξιολόγηση της εργασίας μου.
- Τον κ. Μαυριγιαννάκη Στυλιανό, ΕΤΕΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη βοήθεια και τις συμβουλές του στο πρακτικό μέρος της εργασίας και για την συμμετοχή του στην αξιολόγηση της.

Ακόμη, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, στον αδερφό μου και στους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Και ελπίζω να φανώ αντάξιος των κόπων και των θυσιών τους.

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του δολομιτικού μαρμάρου του Φαλακρού (Ν. Δράμας) σε εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και κάμψης τριών σημείων. Τα δοκίμια μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις δοκιμές λήφθηκαν από ενεργό λατομείο την περιοχή Βώλακα πλησίον της πόλης της Δράμας. Γι' αυτό το λόγο διαμορφώθηκαν δοκίμια για τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και κάμψης τριών σημείων στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων των δοκιμών θλίψης στο μάρμαρο υπολογίστηκαν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων, υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας και η αντοχή του. Η σημαντικά χαμηλότερη αντοχή από την πραγματική αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη που υπολογίστηκε μετά από αρκετές δοκιμές βρέθηκε ότι οφείλεται σε παρασιτικές καμπτικές τάσεις. Η διόρθωση των τάσεων αυτών οδηγεί στον υπολογισμό της πραγματικής αντοχής του μαρμάρου που έρχεται σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα δοκιμών που απουσιάζουν οι παρασιτικές καμπτικές τάσεις. Εν συνεχεία από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων των δοκιμών κάμψης στο ίδιο μάρμαρο υπολογίστηκαν οι τάσεις και οι εφελκυστικές παραμορφώσεις, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων, υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας και η εφελκυστική αντοχή του μαρμάρου. Η κρίσιμη εφελκυστική τροπή που βρέθηκε από την κάμψη είναι συγκρίσιμη με την εγκάρσια τροπή μετά την οποία αρχίζει η διάδοση των εφελκυστικών ρωγμών σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης.

Λέξεις-κλειδιά: δολομιτικά μάρμαρα, μονοαξονική θλίψη, κάμψη τριών σημείων

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the experimental study of dolomitic marble of Falakron mountain (East Macedonia) in unconfined compression and indirect tension (3-point bending). For this purpose prismatic and cylindrical specimens were prepared for subsequent testing in uniaxial compression and 3-point bending tests. The dolomitic marble originates from the Falakron mountain (NE Greece) and specifically in the region near the village of Volakas. It was found that the significantly lower uniaxial compressive strength calculated from the tests is due to parasitic bending stresses due to misalignment of the test specimen axis with the machine's loading axis. We have found a method to correct the strength of the rock in compression and we show that the results are repeatable. Also it was found that the critical extensional strain obtained from the bending tests is of the same order of magnitude with the transverse extensional strain in uniaxial compression that corresponds to the change of sign of the volumetric strain. The latter strain is related with the initiation and propagation of tensile cracks.

Key words: dolomite marble, uniaxial compression, three-point bending

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο 2 Το δολομιτικό μάρμαρο Βόλακα Δράμας	8
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Χρήσεις των μαρμάρων	9
2.3 Δολομιτικά μάρμαρα Φαλακρού όρους	11
2.3.1 Γενικά	11
2.3.2 Μάρμαρα Δράμας	12
Κεφάλαιο 3 – Ελαστικότητα και αντοχή του μαρμάρου	17
3.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης	17
3.2 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων	23
Κεφάλαιο 4 – Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και κάμψης	25
4.1 Γενικά	25
4.2 Μονοαξονική θλίψη	26 27
4.3 Κάμψη τριών σημείων	28
4.4 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης	29
4.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης 3 σημείων	42
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα – προτάσεις	48
6. Βιβλιογραφία	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	55

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Στην Ελλάδα η χρήση του μαρμάρου χρονολογείται από την προϊστορική περίοδο. Περισσότερα από χίλια λατομεία έχουν εντοπιστεί στον ελλαδικό χώρο κατά την διάρκεια των προϊστορικών χρόνων μέχρι και το μεσαίωνα (Κοκκορού – Αλευρά κ.α., 2014). Από ελληνικά μάρμαρα φιλοτεχνήθηκαν μοναδικής σπουδαιότητας έργα τέχνης, που κοσμούν τα μουσεία όλου του κόσμου, τόσο αγάλματα όσο και ολόκληρα κτίρια. Από αρχαιοτάτων χρόνων κατανόηση ο άνθρωπος τη χρήση του μαρμάρου και την μεγάλη του αντοχή ως δομικό υλικό.

Τα ελληνικά μάρμαρα απαντώνται σε πλήθος χρωμάτων και διαφορετικών ποικιλιών. Το μάρμαρο που χρησιμοποιείται στη γλυπτική είναι λεπτόκοκκο, λευκό χωρίς έντονες χρωματικές διαφοροποιήσεις, είναι εργάσιμο, δηλαδή λαξεύεται ομαλά και μπορούν να διαμορφωθούν λεπτομέρειες και το πιο σημαντικό είναι διαυγές, φωτεινό. Αυτή η ποικιλία μαρμάρων απαντάται στο όρος Πεντέλη στην Αττική και στην Πάρο στις Κυκλάδες. Μειονέκτημα αυτού του είδους μαρμάρου είναι ότι επηρεάζεται σημαντικά από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Μια σημαντική διαφορά στην ποιότητα του μαρμάρου υπάρχει ανάμεσα στο «καλλιτεχνικό» μάρμαρο και στο κοινό μάρμαρο που χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό. Το συνηθισμένο μάρμαρο είναι πιο χοντρόκοκκο, παρουσιάζει «νερά» διαφόρων χρωμάτων και μερικές φορές έντονες «φλέβες».

Τη σύγχρονη εποχή το μάρμαρο έχει πολλές εφαρμογές και προσφέρει ποικίλες αρχιτεκτονικές λύσεις ως δομικό υλικό σε δάπεδα, προσόψεις κτιρίων, μπάνια κλπ. Επίσης χρησιμοποιείται για την παρασκευή αδρανών υλικών, χημικών προϊόντων, γυαλιού, διαφόρων ειδών χαρτιού, στη βιομηχανία οικοδομικών υλικών όπως μαρμαροενισχυμένο σκυρόδεμα (<https://bit.ly/3WIqjeE>), μαρμαρόσκονη, χρώματα, επιχρίσματα κλπ. (Κουτρούμπη, 2020).

Για αυτό το λόγο, είναι σημαντικό για τον μηχανικό να γνωρίζει, επιστημονικά τεκμηριωμένα, τις μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων μαρμάρων που χρησιμοποιεί για να δομήσει το κτιριακό κέλυφος. Τα πειράματα για τη μελέτη και εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων των μαρμάρων εγγυώνται την ορθή χρήση του υλικού σε όλες τις δυνατές καταπονήσεις με ασφάλεια για τον τελικό χρήστη του έργου. Οι κυριώτερες μηχανικές ιδιότητες ενός δομικού υλικού όπως το μάρμαρο είναι η ελαστικότητα του και η αντοχές σε ανεμπόδιστη θλίψη και σε εφελκυσμό (Πρασιανάκης, 1986).

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη του μαρμάρου σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων. Τα δολομιτικά δοκίμια μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από ενεργό λατομείο στην περιοχή Βόλακα της περιφέρειας Δράμας περιοχή από την οποία παράγεται το 80% της συνολικής παραγωγής μαρμάρων της χώρας. (<https://bit.ly/3WAVOab>). Για την υλοποίηση των πειραμάτων για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, κατασκευάστηκαν δοκίμια και έγιναν τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης και κάμψης στα εργαστήρια του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στο Κεφ. 2 περιγράφεται το δολομιτικό μάρμαρο του Βόλακα. Στο Κεφ. 3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία των δοκιμών θλίψης και κάμψης 3 σημείων Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και η επεξεργασία των μετρήσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Κεφ. 4 ενώ στο Κεφ. 5 παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για τα πρωτόκολλα δοκιμών θλίψης και κάμψης.

Κεφάλαιο 2 – Το δολομιτικό μάρμαρο Βόλακα Δράμας

2.1 Εισαγωγή

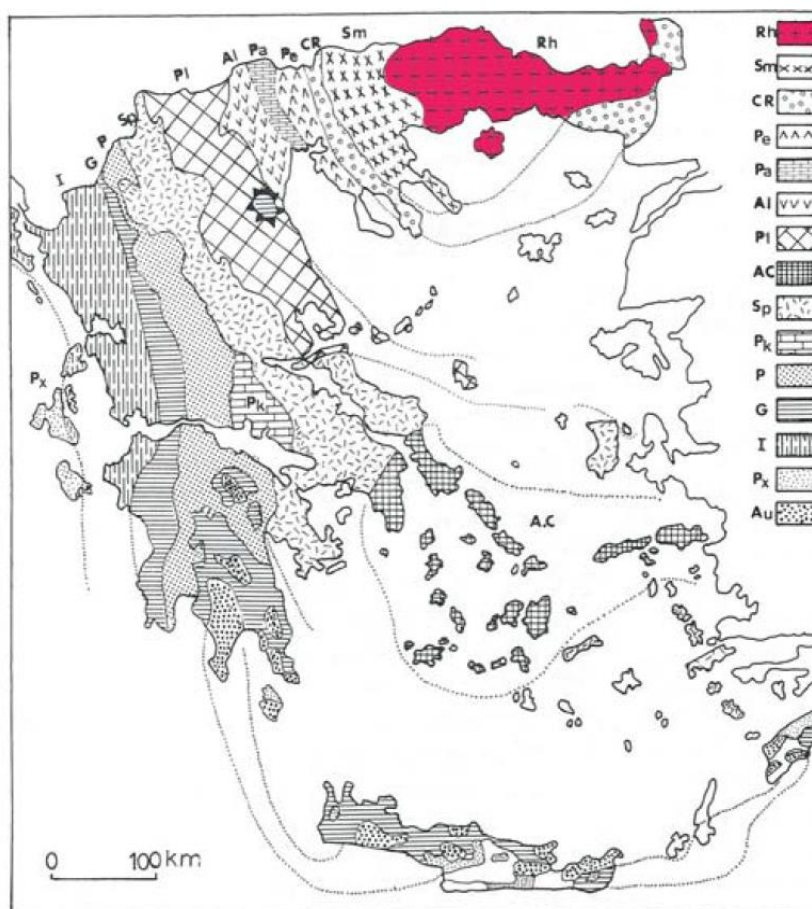
Η βιομηχανία μαρμάρου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εθνική οικονομία. Το ελληνικό μάρμαρο είναι ένα εξόχως εξαγωγίμο προϊόν, καθόσον η χώρα μας είναι ο τέταρτος μεγαλύτερος εξαγωγέας μαρμάρου στον κόσμο. Ειδικότερα, το 76% της εγχώριας παραγωγής μαρμάρου και πλακών εξάγεται σε 120 χώρες, συνεισφέροντας πάνω από 1,5 δισεκατομμύρια δολάρια στο Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν (ΑΕΠ) της χώρας (<https://bit.ly/3Xw50xU>). Η διασπορά των λατομικών κέντρων στη χώρα μας φαίνεται στην Εικ. 2.1.



Εικ. 2.1. Χάρτης κοιτασμάτων μαρμάρου στην Ελλάδα

(Πηγή : ΕΑΓΜΕ)

Ένα από τα σημαντικότερα λατομικά κέντρα είναι αυτό της Ανατολικής Μακεδονίας – Θράκης. Τα δολομιτικά μάρμαρα της περιοχής αυτής ανήκουν στη Μάζα Ροδόπης όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη της Εικ. 2.2. Αυτή η ζώνη διαμορφώνεται από προαλπικά μεταμορφωμένα πετρώματα όπως γνεύσιοι, αμφιβολίτες, σχιστόλιθοι και μάρμαρα (προυπήρχαν της Αλπικής ορογένεσης που συνέβη πριν 65 εκατ. χρόνια) και από μετααλπικά ιζήματα. Γενικά τα μεταμορφωμένα πετρώματα της ζώνης αυτής έχουν ψηλές τιμές αντοχής.



Εικ. 2.2. Γεωτεκτονικές ζώνες του Ελληνικού χώρου.

2.2 Χρήσεις των μαρμάρων

Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα χρησιμοποίησε το μάρμαρο για να οικοδομήσει ναούς, κτίρια και γενικότερα διαφόρου τύπου και είδους οικοδομήματα. Η μεγάλη του αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες, η πολύ μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και μοτίβων, καθώς και η ιδιαίτερη σχέση του μαρμάρου με το ηλιακό φως, του προσδίδει πλεονεκτήματα από αισθητικής πλευράς.

Όπως σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικ. 2.3 συνήθως τα μάρμαρο λατομεύεται υπαίθρια ή υπόγεια και με τη μορφή ογκομαρμάρων μεταφέρεται στο εργοστάσιο επεξεργασίας. Το μάρμαρο είναι υλικό που κόβεται, λειαίνεται και στιλβώνεται. Χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται στην γλυπτική για την κατασκευή αγαλμάτων, στην αρχιτεκτονική ως δομικό υλικό αλλά και ως διακοσμητικό υλικό. Γενικά θεωρείται υλικό που προσδίδει πολυτέλεια και αυξημένη κοινωνικό status (Παπατρέχας, 2011). Μερικές συνήθειες εφαρμογές του μαρμάρου είναι :

- Επενδύσεις σε τοιχοποιίες (ορθομαρμαρώσεις) (Εικ. 2.3). Προσδίδουν ένα πολύ ωραίο αισθητικό αποτέλεσμα, με μεγάλη φυσική ποικιλία χρωμάτων και διαμορφώσεων, μεγάλη αντοχή στο χρόνο και περιορισμένη συντήρηση.
- Εσωτερικές ή και εξωτερικές επιστρώσεις σε δάπεδα διαφόρων ειδών κτιρίων όπως πολυτελείς κατοικίες, εκκλησίες, ξενοδοχεία κλπ. (Εικ. 2.3). Οι επαυξημένες τεχνικές

ιδιότητες του μαρμάρου που είναι η αντοχή σε διάβρωση, η τριβή και η υδατοαπορρόφηση, το καθιστούν ιδανικό δομικό υλικό για αυτή τη χρήση (Παπατρέχας, 2011).

- Επιστρώσεις σε εσωτερικές και εξωτερικές κλίμακες ως σκαλοπάτια (Εικ. 2.3). Εκμεταλλευόμενοι τα σημαντικά πλεονεκτήματα του μαρμάρου που είναι η αντοχή σε διάβρωση, η τριβή και η υδατοαπορρόφηση, το καθιστούν ιδανικό δομικό υλικό για αυτή τη χρήση.
- Σε χώρους υγιεινής όπως μπανιέρες, νεροχύτες κλπ, και στις ποδιές των ανοιγμάτων, εκμεταλλευόμενοι την στιλπνότητα, αντοχή σε τριβή, μικρή υδατοαπορροφητικότητα καθώς και το υψηλής αισθητικής αποτέλεσμα που διαμορφώνεται.
- Διακοσμητικές δημόσιες κατασκευές όπως αγάλματα, σιντριβάνια και άλλα μνημεία (Εικ. 2.3). Η αντοχή στη διάβρωση και στην περιβαλλοντική έκθεση καθιστούν το μάρμαρο ιδανικό δομικό υλικό για αυτές τις χρήσεις καθώς επίσης και το υψηλής αισθητικής αποτέλεσμα.



Εικ. 2.3. «Διαδρομή» του μαρμάρου από το λατομείο στην μοντέρνα κατασκευή αλλά και σε μνημειακές εφαρμογές (αναστυλώσεις μνημείων, γλυπτική κ.λπ).

2.3 Δολομιτικά μάρμαρα Φαλακρού όρους

2.3.1 Γενικά

Τα δολομιτικό μάρμαρο είναι μεταμορφωμένο ανθρακικό πέτρωμα με κυρίαρχο ορυκτό συστατικό το δολομίτη. Ειδικότερα, η κατά βάρος σύσταση τους αποτελείται από οξείδιο του μαγνησίου (MgO) σε ποσοστό 21,9%, οξείδιο του ασβεστίου (CaO) σε ποσοστό 30,4% και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) σε ποσοστό 47,7%. Το χρώμα τους ποικίλει από τεφρό (σταχτή) μέχρι και καστανό. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι τα δολομιτικά μάρμαρα είναι ανθεκτικότερα στην επίδραση διαλύματος οξέως σε σχέση με τους ασβεστόλιθους. (Παπατρέχας, 2011).

Στην γεωγραφική περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας (Δράμα – Καβάλα – Θάσος) τα δολομιτικά μάρμαρα αποτελούν το 4,5% των συνολικών ανθρακικών πετρωμάτων της περιοχής. Στα δολομιτικά μάρμαρα, το ποσοστό του δολομίτη είναι πάρα πολύ υψηλό από 92 έως 99%, ενώ πολύ μικρό ποσοστό ασβεστίτη (1 – 8%) απαντάται με τη μορφή διάσπαρτων κόκκων (Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2005).

Τα δολομιτικά μάρμαρα εμφανίζουν συντελεστή απορροφητικότητας από 0,14% μέχρι και 0,24% ενώ η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι υψηλή γενικά μεγαλύτερη από αυτήν των ασβεστιτικών μαρμάρων και κυμαίνεται από 100 – 174 MPa. Επίσης, τα ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα παρουσιάζουν περίπου την ίδια αντοχή σε κάμψη, σε φθορά από τριβή και σε πρόσκρουση (Βουγιούκας κ.α., 2001).

Στην ευρύτερη περιοχή της Δράμας (Εικ. 2.4) υπάρχουν δύο σημαντικά λατομικά κέντρα, το λατομικό κέντρο της Δράμας και του Κάτω Νευροκοπίου. Από αυτή την περιοχή παράγεται το 80% της συνολικής παραγωγής μαρμάρων της χώρας. (<https://bit.ly/3WAVOab>). Δολομιτικά μάρμαρα εξορύσσονται από τα περισσότερα λατομεία της περιοχής. (Δηλγεράκη, 2014).



Εικ. 2.4. Περιοχές μαρμάρων στην ευρύτερη περιοχή της Δράμας

(Πηγή : : <https://gaia.igme.gr/portal>)

2.3.2 Μάρμαρα Δράμας

Τα δολομιτικά μάρμαρα εμφανίζονται μόνο στο δυτικό τμήμα του Φαλακρού όρους.

Στο λατομικό κέντρο Δράμας περιλαμβάνονται τα λατομεία:

- Ξηροποτάμου
- Βαθύλακκου
- Πύργων

Ενώ στο λατομικό κέντρο Κάτω Νευροκοπίου περιλαμβάνονται τα λατομεία:

- Οχυρό
- Γρανίτης
- Βώλακας

Τα σημαντικότερα λατομεία του λατομικού κέντρου Κάτω Νευροκοπίου είναι τα λατομεία του Γρανίτη και Βώλακα. Συνολικά έχουν εκδοθεί 38 άδειες διενέργειας λατομικών εργασιών στην περιοχή και το ενδιαφέρον είναι έντονο διότι σε αυτές τις περιοχές εξορύσσονται τα άριστης ποιότητας μάρμαρα Άριστον και Λευκό Βώλακα, αντίστοιχα (Ζαραβάτη, 2018).

Το λευκό δολομιτικό μάρμαρο Βώλακα εξορύσσεται στις δυτικές πλαγιές του όρους Φαλακρό. Το μάρμαρο πήρε το όνομα του από τη γειτονική κοινότητα του Βώλακα. Η εξόρυξη του μαρμάρου γίνεται τόσο επιφανειακά όσο και υπογείως βλ. Εικ. 2.5 α,β).



Εικ. 2.5α. Επιφανειακή εξόρυξη

(Πηγή : <https://bit.ly/3R7xxaC>)



Εικ. 2.5β. Υπόγεια εξόρυξη

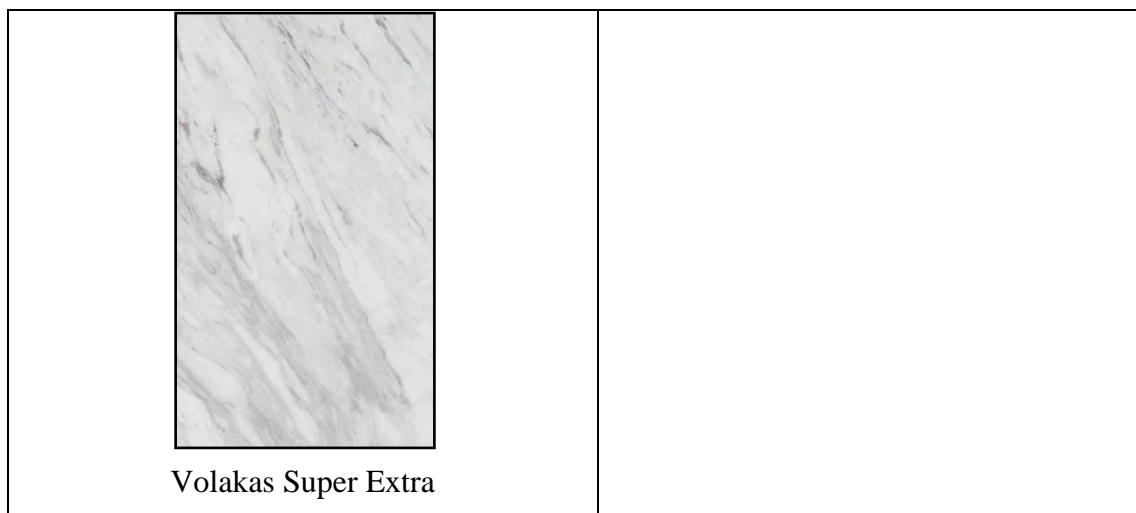
(Πηγή : <https://bit.ly/3R7xxaC>)

Από το λατομείο εξορύσσονται λεπτόκοκκα λευκά δολομιτικά μάρμαρα με λευκό φόντο τα οποία παρουσιάζουν ποικιλία από γκρι ή ερυθρές βένες («νερά») από υπερλεπτόκοκκο δολομίτη και διάσπαρτους κρυστάλλους οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου. (Χατζηπαναγής & Βουγιούκας, 2004). Οι εμπορικές ονομασίες των διαφόρων τύπων μαρμάρων φαίνονται στον Πίν. 2.1.

Πίν. 2.1 : Εικόνα μαρμάρου και εμπορική ονομασία

(Πηγή : <https://bit.ly/3R7xxaC>)

Εικόνα μαρμάρου και εμπορική ονομασία	
	
Volakas Ocean Blue	Volakas Butterfly
	
Volakas NO 11	Volakas Extra
	
Volakas Calacata type	Volakas A



Τα μάρμαρα από το λατομείο Βόλακα είναι κατάλληλα για επενδύσεις τοίχων και δαπέδων και έχουν χρησιμοποιηθεί ως επένδυση σε σταθμούς στο μετρό της Αθήνας και σε άλλα κτίρια στην Ελλάδα και στο εξωτερικό (Εικ. 2.6 και 2.7).



Εικ. 2.6. Ορθομαρμάρωση με μάρμαρο Βόλακα στο σταθμό μετρό Σύνταγμα.

(Πηγή : <https://www.eagme.gr/>)



Εικ. 2.7. Ορθομαρμάρωση με μάρμαρο Βόλακα στην είσοδο του σταθμού μετρό Πανεπιστήμιο.

(Πηγή : <https://www.eagme.gr/>)

Η ορυκτολογική σύσταση των μαρμάρων είναι σε ποσοστό 98 - 99% δολομίτης και 1 – 2 % ασβεστίτης. Επιπρόσθετα, υπάρχουν σε πολύ μικρά ίχνη χαλαζίας, μοσχοβίτης, ιλμενίτης, απατίτης και άλλα αδιαφανή μεταλλικά ορυκτά. Οι κρύσταλλοι του δολομίτη παρουσιάζονται υπιδιόμορφοι, ενώ διάσπαρτα στοιχεία παρουσιάζει ο υπερλεπτόκοκκος ασβεστίτης.

Οι χαρακτηριστικές φυσικομηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Βόλακα φαίνονται στον Πίν. 2.2 .

Πίνακας 2.2 : Φυσικομηχανικές ιδιότητες μαρμάρων λατομείου Βόλακα

(Πηγή : <https://www.eagme.gr/>)

Φυσικομηχανική ιδιότητα	Τιμή
Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	2810 – 2840
Ανοικτό πορώδες (% κ.ο.)	0,6 – 0,7
Υδαταπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση (% wt)	0,2
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa) ¹	178 – 186
Αντοχή σε κάμψη υπό συγκεντρωμένο φορτίο (MPa)	5,5 – 6,3

¹ Σε κυβικά δοκίμια

Συνήθως, οι εμπορικές ονομασίες των μαρμάρων δεν ταυτίζονται απόλυτα με τους ποιοτικούς τύπους των μαρμάρων. Οι εμπορικές ονομασίες δίδονται από τις επιχειρήσεις, καθαρά για λόγους marketing, ενώ οι ποιοτικοί τύποι αποδίδονται βάσει αυστηρών αντικειμενικών επιστημονικών προσδιορισμών. Έτσι, στα [Παράρτηματα Α και Β](#) παρουσιάζονται οι δύο τύποι μαρμάρων που παράγονται από το λατομείο στο Βόλακα Δράμας, (με βάση τα επιστημονικά κριτήρια του ΕΑΓΜΕ, <https://www.eagme.gr/>), που είναι τα:

- Βόλακας Δράμας Λευκό
- Βόλακας Δράμας Ημίλευκο.

Κεφάλαιο 3 – Ελαστικότητα και αντοχή του μαρμάρου

3.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Αυτή η εργαστηριακή δοκιμή έχει ως στόχο την μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Uniaxial Compression Strength, UCS), την ελαστικότητα, την πλαστικότητα και την σταδιακή φθορά των πετρωμάτων λόγω διάδοσης μικρορωγμών, σε μορφή δοκιμίων κυλινδρικής γεωμετρίας δεδομένου λόγου ύψους προς διάμετρο. Ο τύπος αυτής της δοκιμής καλείται «element test (στοιχειώδης δοκιμή)» γιατί (θεωρητικά) επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή τάσεων & παραμορφώσεων εντός ομοιόμορφων δοκιμίων, δηλ. η τάση και η παραμόρφωση είναι η ίδια σε όλα τα σημεία στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου μακριά από τις έδρες επαφής του δοκιμίου με τις πλάκες έδρασης της μηχανής θλίψης.

Η αντοχή πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη χρησιμοποιείται στη Μηχανική Πετρωμάτων στις ακόλουθες περιπτώσεις:

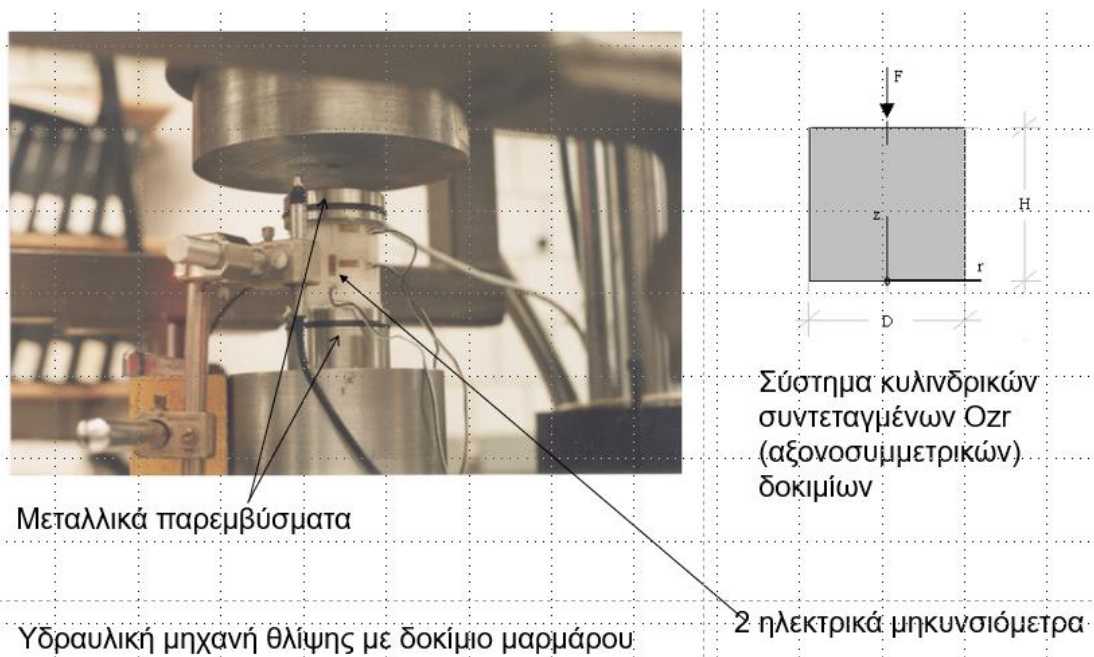
1. Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του πετρώματος με ελεύθερες πλευρικές επιφάνειες υπό την επίδραση κατακόρυφου φορτίου στην πάνω οριζόντια έδρα του προσδιορίζεται από την αντοχή του σε ανεμπόδιστη θλίψη.
2. Για τον υπολογισμό της αντοχής στύλων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις.
3. Επίσης η UCS είναι δείκτης εξορυξιμότητας του πετρώματος εργαλείων με κοπτικά άκρα (πχ αλυσίδα αλυσοπριόνου) ή πέτρες με εμφυτευμένα συνθετικά διαμάντια (συρματοκοπή).
4. Τον υπολογισμό της αντοχής του πετρώματος κοντά στο σύνορο στοάς. Πχ η θλιπτική τάση για να εκκινήσει η αποφλοίωση (spalling) πλευρικού τοιχώματος στοάς είναι περίπου $\frac{1}{2}$ UCS
5. Το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας RMR χρησιμοποιεί την UCS και της δίνει βαθμολογία από 0 – 20. Την ανώτερη βαθμολογία 20 παίρνει η UCS=185 MPa.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης πετρωμάτων επηρεάζονται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Υπαρξη τυχόν ρωγμών ή μικρο-ρωγμών & ετερογένεια
- Ανοχές παραλληλίας εδρών βάσεων και εκκεντρότητα (καθετότητα άξονα στις βάσεις έδρασης)
- Ανισοτροπία του πετρώματος
- Ρυθμός φόρτισης
- Λίπανση των πλακών εδράσεως
- Μέγεθος του δοκιμίου
- Την «λεπτότητα» του δοκιμίου (λόγος ύψους :διάμετρο)

Γι' αυτό το λόγο έχουν προταθεί από την ISRM (International Society of Rock Mechanics) οι προδιαγραφές για την εκτέλεση σωστών δοκιμών λαμβάνοντας υπόψιν του παραπάνω παράγοντες.

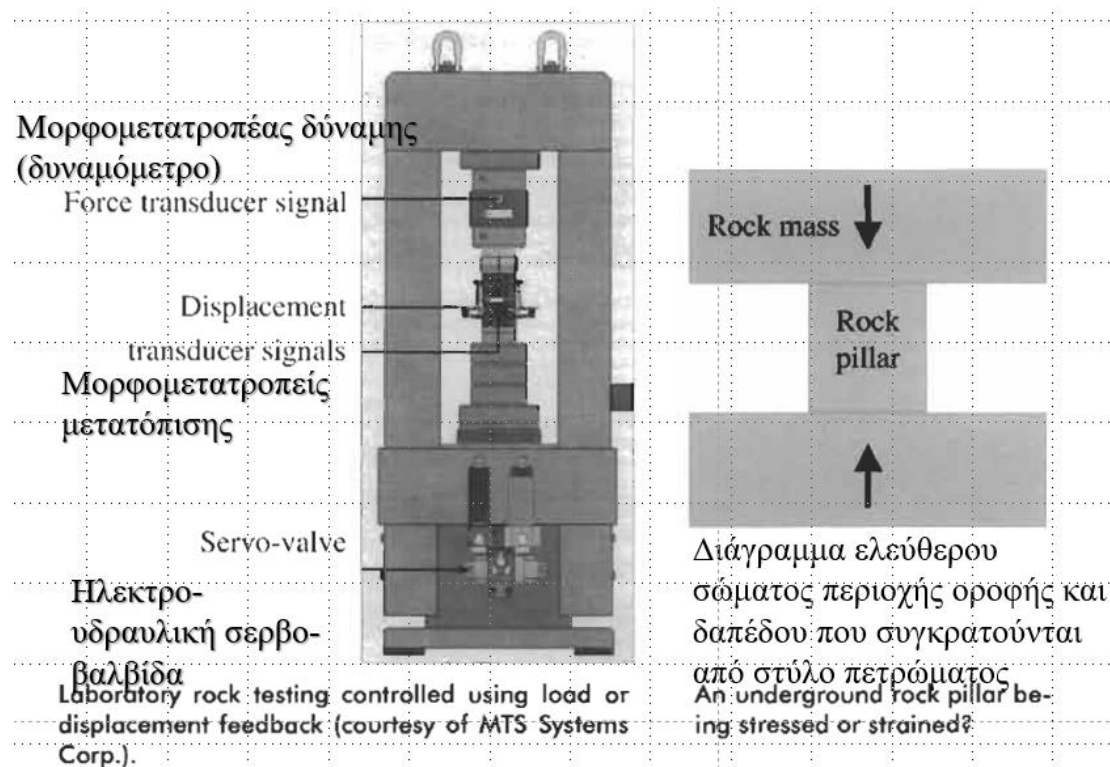
Η πειραματική διάταξη της δοκιμής φαίνεται στην [Εικ. 3.1](#). Φαίνεται το κυλινδρικό δοκίμιο μαρμάρου μεταξύ των 2 πλακών έδρασης που και αυτές βρίσκονται σε επαφή – κατά την έναρξη της δοκιμής – με το άνω μεταλλικό στέλεχος της μηχανής και μεταλλικό παρέμβυσμα και το κάτω μεταλλικό παρέμβυσμα έδρασης που βρίσκεται κάτω από το δοκίμιο σε επαφή με το έμβολο.



Εικ. 3.1. Διάταξη δοκιμής κυλινδρικού δοκιμίου μαρμάρου σε ανεμπόδιστη θλίψη (Εξαδάκτυλος, 2015).

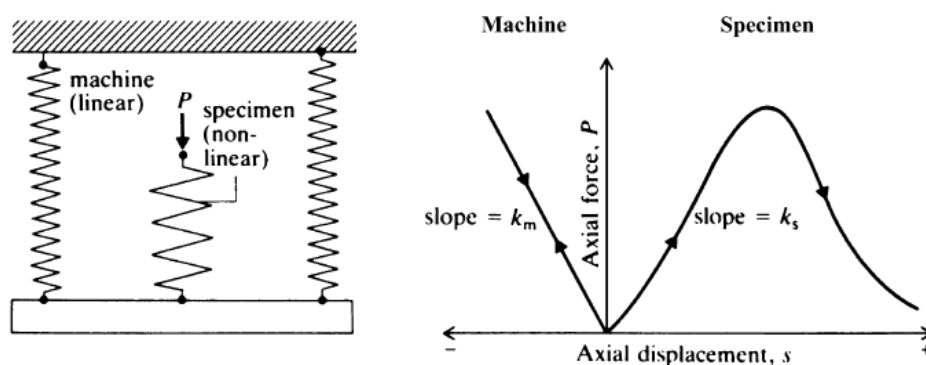
Σε μια σερβο-υδραυλική μηχανή θλίψης τύπου MTS όπως αυτή που χρησιμοποιήσαμε και φαίνεται στην Εικ. 3.2, η αξονική δύναμη που επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω των πλακών έδρασης μετράται εμμέσως μέσω μορφομετατροπέα δύναμης (Linear Variable Differential Transformer, LVDT²) ενώ οι μετατοπίσεις (μεταβολή του ύψους και της διαμέτρου του δοκιμίου) μέσω μορφομετατροπέων μετατόπισης. Η μηχανή διαθέτει ηλεκτρο-υδραυλική βαλβίδα. Η ηλεκτρο-υδραυλική βαλβίδα (**electrohydraulic servo valve (EHSV)**) είναι ηλεκτρική βαλβίδα που ελέγχει πόσο υδραυλικό έλαιο θα σταλεί στον μηχανισμό ενεργοποίησης (actuator). Οι σερβοβαλβίδες χρησιμοποιούνται στον έλεγχο με μικρής ισχύος ηλεκτρικά σήματα των ισχυρών υδραυλικών κυλίνδρων όπως ακριβή έλεγχο της θέσης, ταχύτητας, πίεσης και δύναμης με πολύ καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης. Είναι προφανές το ανάλογο σε μικρή (εργαστηριακή) κλίμακα της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης με τη φόρτιση στύλου από την υπερκείμενη οροφή πετρώματος λόγω της εξόρυξης γύρω από το στύλο.

² https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_variable_differential_transformer



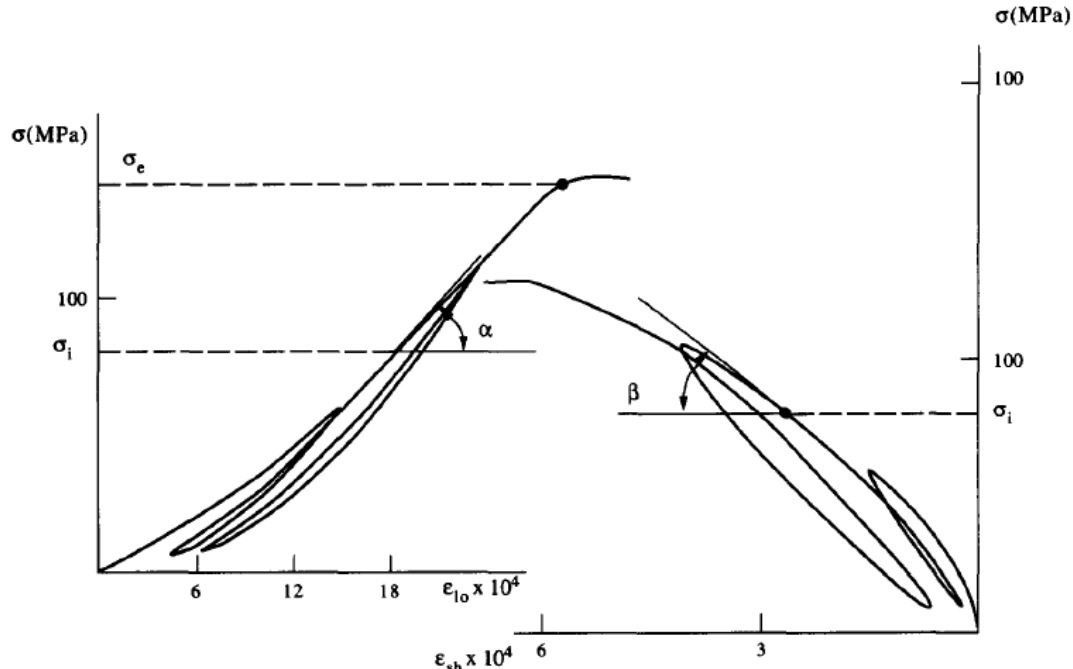
Εικ. 3.2. Σερβο-υδραυλική μηχανή θλίψης (αριστερά) και μηχανικό ανάλογο ανεμπόδιστης θλίψης οροφής-στύλου πετρώματος – δαπέδου (δεξιά) (Εξαδάκτυλος, 2015).

Χρησιμοποιώντας το μηχανικό ανάλογο του ελατηρίου τότε το σύστημα δοκίμιο και κολώνες της μηχανής θλίψης μπορεί να παρουσιασθεί με το μοντέλο του 2 παράλληλων κατακόρυφων ελατηρίων που αντιστοιχούν στις κολώνες της μηχανής και ελατηρίου στο μέσον που υποβάλλεται σε συγκεντρωμένο φορτίο που αντιστοιχεί στο φορτιζόμενο δοκίμιο πετρώματος (Εικ. 3.3). Η επιβολή της συγκεντρωμένης δύναμης P στο δοκίμιο μεταβιβάζεται στις κολώνες ως εφελκυστικό φορτίο. Τα ελατήρια της μηχανής ανάλογα με την ακαμψίας της χαρακτηρίζονται από μια σταθερά ελατηρίου μικρότερη ή μεγαλύτερη από την σταθερά ελατηρίου του πετρώματος. Στην δεύτερη περίπτωση μιλάμε για άκαμπτη μηχανή θλίψης που σε συνθήκες ελεγχόμενης μετατόπισης ή τροπής μας επιτρέπει να καταγράψουμε όλη την καμπύλη μετατόπισης – δύναμης ακόμα και μετά τη θραύση του δοκιμίου (Εικ. 3.3 δεξιά).



Εικ. 3.3. Μηχανικό ανάλογο (μοντέλο) με ελατήρια (αριστερά) της αλληλεπίδρασης της μηχανής θλίψης με το δοκίμιο. Όταν το δοκίμιο θλίβεται, οι κολώνες της μηχανής εφελκύνονται (θλιπτικές δυνάμεις είναι θετικές ποσότητες) (Εξαδάκτυλος, 2015).

Σε συνθήκες ελεγχόμενης τάσης σε άκαμπτη μηχανή θλίψης ή σε μη-άκαμπτη μηχανή η καταγραφή της δύναμης από την μηχανή και των τροπών από ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα μας επιτρέπει την κατασκευή διαγραμμάτων αξονικής τροπής – αξονικής τάσης και ακτινικής τροπής – αξονικής τάσης όπως φαίνεται στην [Εικ. 3.4](#).



Εικ. 3.4. Τυπικά διαγράμματα αξονικής τροπής – αξονικής τάσης (αριστερά) και ακτινικής τροπής – αξονικής τάσης (δεξιά) σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης ([Εξαδάκτυλος, 2015](#)).

Οι τύποι που συνδέουν την αξονική τάση με τη δύναμη που επιβάλλεται από τη μηχανή και τις τροπές με τις μεταβολές του ύψους και της διαμέτρου του δοκιμίου είναι οι εξής

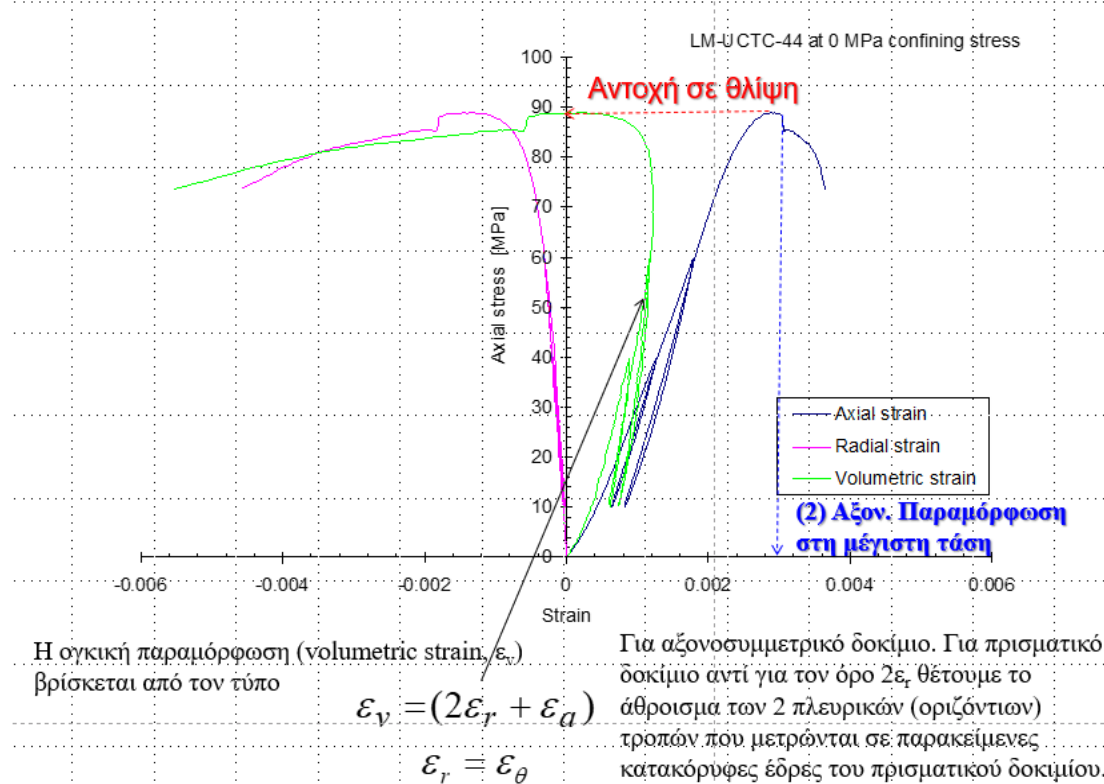
<p>sig-a(sig-z): αξονική τάση σε MPa</p> $\sigma_a = \frac{F}{\pi D^2 / 4} \quad \sigma_z = -\sigma_a$ <p>sig-c (sig-r): παράπλευρη τάση</p> $\sigma_c = 0 \quad \sigma_r = \sigma_\theta = -\sigma_c$ <p>eps-l (): τεχνική πλευρική (lateral) παραμόρφωση</p> $\varepsilon_l = -\Delta\varepsilon_r = -\frac{\Delta D}{D_0} \quad \Delta D = D - D_0 > 0$ <p>eps-a (): τεχνική αξονική (axial) παραμόρφωση</p> $\varepsilon_a = -\Delta\varepsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_0} \quad \Delta H = H - H_0 < 0$	<p>Εξ. (3.1)</p>
--	------------------

όπου D = διάμετρος δοκιμίου κατά τη φόρτιση, D_0 = αρχική διάμετρος, H =ύψος δοκιμίου κατά τη φόρτιση και H_0 = αρχικό ύψος δοκιμίου. Η ογκική τροπή σε συνάρτηση με την αξονική τάση υπολογίζεται από τις μετρήσεις της αξονικής και ακτινικής τροπής, σύμφωνα με τον τύπο

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r : \text{για κυλινδρικό δοκίμιο} \quad (3.2\alpha)$$

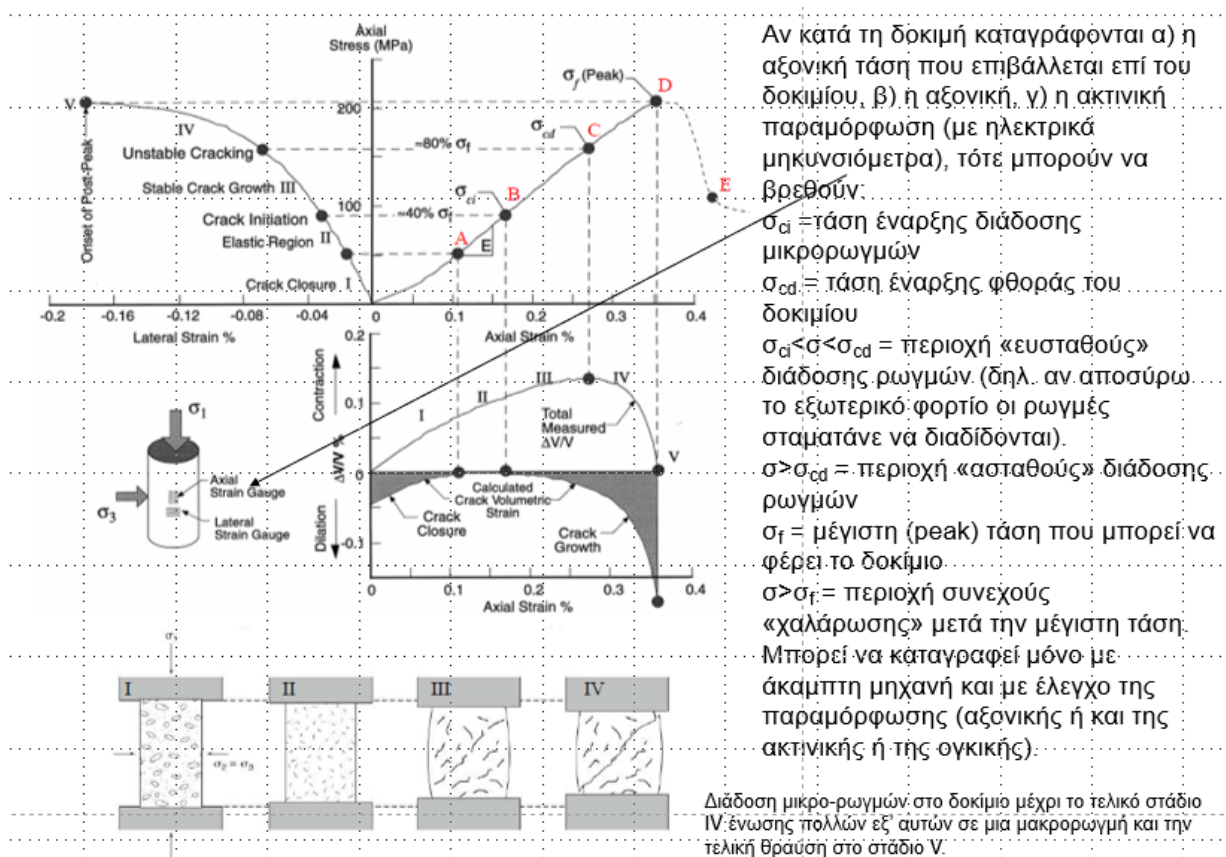
$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_l : \text{για πρισματικό δοκίμιο} \quad (3.2\beta)$$

Η καμπύλη της ογκικής τροπής φαίνεται παρακάτω στην [Εικ. 3.5](#) μαζί με τυπικά διαγράμματα τάσης – τροπής σε δοκίμιο μαρμάρου που έχει υποβληθεί σε μονοαξονική θλίψη.



Εικ. 3.5. Τυπικές καμπύλες τροπών με αξονική τάση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης ([Εξαδάκτυλος, 2015](#)).

Τα 5 στάδια επίδρασης της τάσης πάνω στην μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου επεξηγούνται παρακάτω στην [Εικ. 3.6](#).



Εικ. 3.6. Οι 4 χαρακτηριστικές τάσεις που σχετίζονται με τη διάδοση μικρορωγμών σε δοκίμιο πετρώματος που υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη (Εξαδάκτυλος, 2015).

Σε κάθε στάδιο αντιστοιχεί μια αξονική τάση: (i) η τάση κατά την οποία έχουν κλείσει όλες οι μικρορωγμές και το πορώδες του πετρώματος με συνέπεια να έχει το πέτρωμα το μεγαλύτερο δυνατό μέτρο ελαστικότητας. Αντιστοιχεί στο σημείο A του διαγράμματος τάσης-τροπής. (ii) Η τάση έναρξης διάδοσης μικρορωγμών σ_{ci} που αντιστοιχεί στο σημείο B του διαγράμματος τάσης-τροπής και βρίσκεται από τον μηδενισμό της «ανελαστικής» ογκικής τροπής που είναι η συνολική μείον την ελαστική ογκική τροπή. Αυτή η τάση αντιστοιχεί στο 40% περίπου της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. (iii) Η τάση φθοράς σ_{cd} κατά την οποία η ογκική τροπή αρχίζει και φθίνει αφού έχει φθάσει την μέγιστη τιμή της. Στην περιοχή $\sigma_{cd} < \sigma < \sigma_f$ οι μικρορωγμές αν και έχουν ευσταθή διάδοση έχουν ήδη συνενωθεί με παρακείμενες έτσι ώστε να εμφανίζονται ορατές ρωγμές. Αυτή η τάση φθοράς είναι περίπου το 80% της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος. iv) Η μέγιστη τάση ή τάση αιχμής σ_f ή αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που μπορεί να φέρει το δοκίμιο και (v) η παραμένουσα τάση μετά την τάση αιχμής. Τα παραπάνω φαίνονται και στο διάγραμμα μεταβολής όγκου $\Delta V/V$ με την αξονική τροπή. Στο 1^ο στάδιο οι ρωγμές κλείνουν και η ογκική τροπή έχει θετικές τιμές (συστολή (+) και διαστολή (-)) έως ότου κλείσουν όλες οι ρωγμές. Η διαφορά της συνολικής ογκικής τροπής με την ελαστική λαμβάνει σε εκείνο το σημείο την τιμή μηδέν όπως περιγράφεται και από την εξίσωση παρακάτω της διαφορικής ογκικής τροπής (=συνολική μείον ελαστική)

$$\varepsilon_{v,diff} = \frac{\Delta v}{v} - \left(\frac{\Delta v}{v} \right)_{el} \quad (3.3)$$

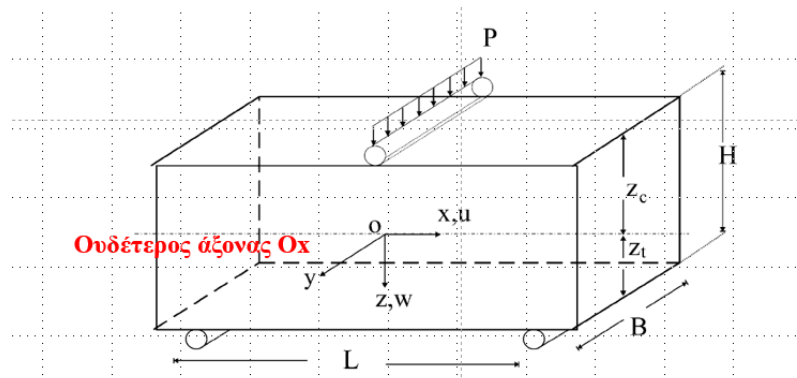
Κατόπιν σε 2^ο στάδιο η συμπεριφορά του δοκιμίου παραμένει ελαστική και η παραπάνω διαφορά διατηρεί τη μηδενική της τιμή. Σε 3^ο στάδιο μετά την τάση σ_{cd} οι ρωγμές ανοίγουν

και ενώ η συνολική ογκική τροπή μειώνεται η διαφορική τροπή αλλάζει πρόσημο και γίνεται θετική (διαστολή) με αύξοντα ρυθμό. Μετά το 3^ο στάδιο ο ρυθμός αύξησης της συνολικής ογκικής τροπής μειώνεται μέχρι να μηδενισθεί στη τάση σ_{cf} και μετά να πάρει φθίνουσα μορφή στο 4^ο στάδιο της φόρτισης έως ότου τη θραύση του δοκιμίου στην τάση σ_f . Από αυτήν την ανάλυση προκύπτουν οι 4 χαρακτηριστικές τάσεις κατά την ανεμπόδιστη θλίψη ήτοι η σ_{cd} που αντιστοιχεί στο 40% της αντοχής, η σ_{cf} που αντιστοιχεί στο 80% της αντοχής, η τάση αιχμής σ_f και η υπολειμματική ή παραμένουσα τάση.

3.2 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων

Η δοκιμή κάμψης πρισματικών δοκιμίων είναι κατάλληλη για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας κατασκευών που μέλη τους φέρουν τάσεις λόγω κάμψης. Αυτή είναι η περίπτωση της οροφής υπογείων θαλάμων κατά την υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου με τη μέθοδο των Θαλάμων και Στύλων. Ενώ η διαστασιολόγηση του στύλου γίνεται με βάση τον συντελεστή ασφαλείας που εμπεριέχει ως αριθμητή την αντοχή σε θλίψη, η διαστασιολόγηση του πλάτους των θαλάμων γίνεται με βάση την αντοχή σε κάμψη.

Εργαστηριακά η δοκιμή κάμψης μπορεί να γίνει με φόρτιση στο μέσον απλά στηριγμένης δοκού ορθογωνικής διατομής όπως φαίνεται στην [Εικ. 3.7](#) ή με συμμετρική φόρτιση 4 σημείων που επιτυγχάνονται συνθήκες καθαρής κάμψης στην περιοχή του δοκιμίου μεταξύ των περιοχών επιβολής δύο (αντί για ένα) συγκεντρωμένων φορτίων. Συνήθως η διατομή της δοκού είναι τετραγωνική με $B=H$.



Εικ. 3.7. Γεωμετρία πρισματικού δοκιμίου πετρώματος ορθογωνικής διατομής με απλή αμφιέριστη στήριξη και επιβαλλόμενο φορτίο στο μέσον της δοκού. Το σύστημα αξόνων είναι τοποθετημένο στο μέσον του μήκους L και πάνω στον ουδέτερο άξονα ($z_c=z_t=H/2$) ([Εξαδάκτυλος, 2015](#)).

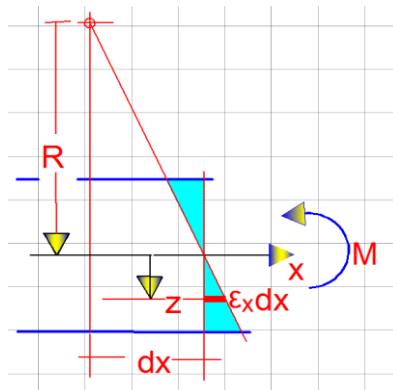
Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής κάμψης 3 σημείων εφαρμόζεται η θεωρία των Bernoulli-Euler στις περιπτώσεις που ο λόγος L/H (με B περίπου ίδιο με H) είναι μεγαλύτερος του 5. Σ' αυτήν την περίπτωση η ορθή καμπτική τάση προκύπτει από τον νόμο του Hooke

$$\sigma_x(z) = E\varepsilon_x = Ez\kappa(x) \quad (3.4)$$

αφού η οριζόντια τροπή δίνεται ως

$$\varepsilon_x = \kappa(x) z \quad (3.5)$$

όπου z είναι η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής και κ συμβολίζει την καμπυλότητα της δοκού κατά την κάμψη που είναι ίση με το λόγο $1/R$ όπου R η ακτίνα καμπυλότητας (Εικ. 3.8).



Εικ. 3.8. Ακτίνα καμπυλότητας R σε διατομή στη θέση x με γραμμική μεταβολή της οριζόντιας μετατόπισης και καμπτική ροπή M (Εξαδάκτυλος, 2015).

Από την κατανομή της καμπτικής ροπής M κατά μήκος της δοκού που εξάγεται από τις εξισώσεις ισορροπίας της δοκού, προκύπτει ότι η κρίσιμη διατομή της δοκού εκεί όπου η καμπτική ροπή γίνεται μέγιστη είναι στο μέσον της ($x=0$) και έχει τιμή

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3.6)$$

Επίσης από την έκφραση της συνισταμένης καμπτικής ροπής σε μια διατομή από τις οριζόντιες δυνάμεις, και της παραπάνω σχέσης της τροπής συναρτήσει της καμπυλότητας και της συντεταγμένης x , προκύπτει η καταστατική σχέση που συνδέει την καμπτική ροπή με την καμπυλότητα κ της δοκού λόγω κάμψης και τη ροπή αδρανείας I_y ,

$$M = \iint_A \sigma z dA = E \kappa \iint_A z^2 dA = E \kappa I_y, \quad I_y = \iint_A z^2 dA \Rightarrow M = (EI) \kappa \quad (3.7)$$

Η ροπή αδράνειας ορθογωνικής διατομής δίνεται από τον τύπο

$$I_y = \frac{BH^3}{12} \quad (3.8)$$

Η μέγιστη εφελκυστική καμπτική τάση που εξασκείται στην κάτω «ίνα» της δοκού δίνεται συναρτήσει του συγκεντρωμένου φορτίου P που μετράται κατά τη διάρκεια της δοκιμής με μορφομετατροπέα δύναμης (LVDT) και των διαστάσεων της δοκού από τη σχέση

$$\sigma_{3PB} = E \varepsilon_f = E \frac{H}{2} \kappa(0) = \frac{P_f LH}{8I} = \frac{3}{2} \frac{P_f L}{BH^2} \quad (3.9)$$

Ο υπολογισμός της εφελκυστικής τροπής της κάτω ίνας της δοκού από μέτρηση του βέλους κάμψης w που γίνεται με γραμμικό μορφομετατροπέα μετατόπισης (LVDT) προκύπτει από τη σχέση

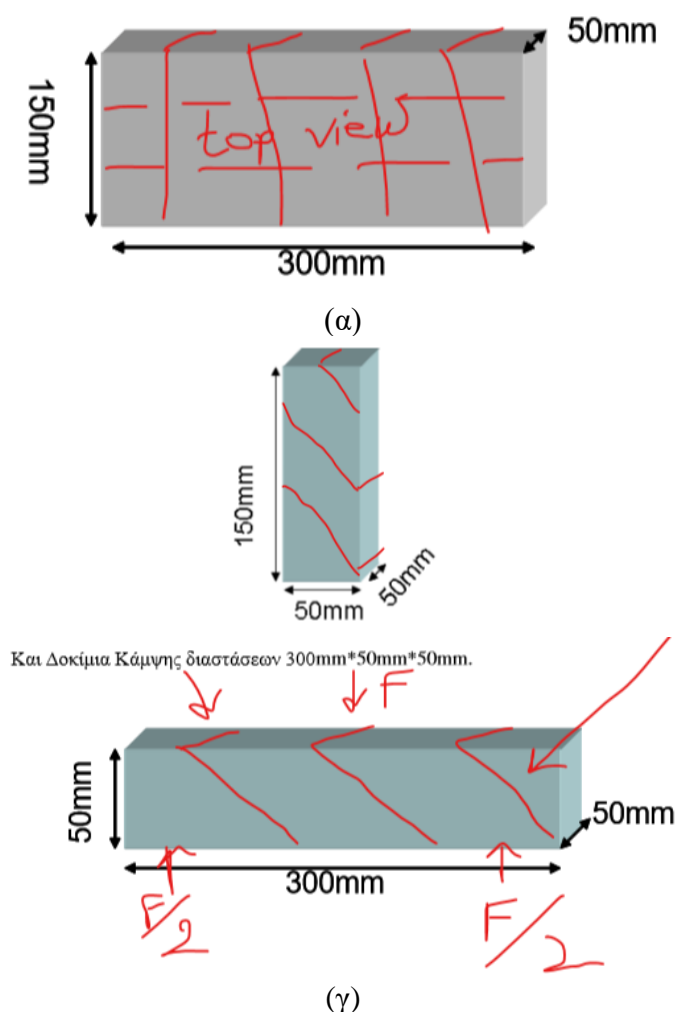
$$\varepsilon_x = \frac{12w}{L^2} \cdot \frac{H}{2} = \frac{6wH}{L^2} \quad (3.10)$$

Κεφάλαιο 4 – Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και κάμψης

4.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε δοκίμια δολομιτικού μαρμάρου Βόλακα που καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων.

Τα πρισματικά δοκίμια και των 2 τύπων δοκιμών διαμορφώθηκαν από πρισματικά ογκάκια μαρμάρου όπως φαίνεται στην Εικ. 4.1 α. Οι διαστάσεις των δοκιμών των 2 τύπων δοκιμής φαίνονται στην Εικ. 4.1β.



Εικ. 4.1. (α) αρχικό ογκάκι για διαμόρφωση πρισματικών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και κάμψης, και (β,γ) προσανατολισμός και διαστάσεις δοκιμών θλίψης και κάμψης
Εξαδάκτυλος, 2015.

Συγκεκριμένα η 1^η σειρά δοκιμών έγινε σε έξι (6) δοκίμια δολομιτικού μαρμάρου σε ανεμπόδιστη θλίψη όπου η παραμόρφωση μετρήθηκε με ένα (1) LVDT παράλληλα με τον άξονα του δοκιμίου για την καταγραφή των αξονικών τροπών. Αν και η ISRM προτείνει τη χρήση κυλινδρικών δοκιμών εν τούτοις χρησιμοποιήσαμε πρισματικά δοκίμια σχεδόν τετραγωνικής διατομής με ύψος σημαντικά μεγαλύτερο από το πλάτος τους για να αποφύγουμε

παρασιτικές τάσεις λόγω τριβής στην επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες έδρασης. **Γι' αυτό το λόγο και στη συνέχεια οι δοκιμές αυτές δεν αναφέρονται ως μονοαξονικές δοκιμές αλλά ως δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης.** Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, υπολογίστηκαν οι τάσεις και οι τροπές κατά τη διάρκεια της δοκιμής, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα αξονικής τάσης – τροπών (αξονικής και πλευρικής) υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας, η τάση εκκίνησης ρωγμών από την καμπύλη αξονικής τάσης και ογκικής τροπής και η μέγιστη τάση θραύσης των δοκιμών. Στην περίπτωση – που είναι και αυτή των περισσότερων δοκιμών – που δεν χρησιμοποιήθηκαν strain gages τότε παρουσιάζεται μόνο το διάγραμμα αξονικής τάσης και αξονικής τροπής. Στη συνέχεια έγινε 2^η σειρά 3 δοκιμών που αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκαν 2 LVDT's σε αντιδιαμετρικές κατακόρυφες έδρες και στις 2 τελευταίες και ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα τύπου σταυρού για την μέτρηση και των εγκάρσιων τροπών. Ο λόγος που έγιναν αυτές οι δοκιμές ήταν για να εξετάσουμε την επίδραση τυχόν παρασιτικών καμπτικών τάσεων στην αντοχή του μαρμάρου και επίσης να δούμε τη διαφορά των τοπικά μετρούμενων παραμορφώσεων με τα strain gages με την μέση παραμόρφωση που καταγράφεται από τα LVDT's σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Τέλος, στην 3^η σειρά δοκιμών έγινε και μια πλήρης δοκιμή με strain gages σε κυλινδρικό δοκίμιο για να δούμε τη διαφορά της αντοχής των πρισματικών από κυλινδρικά δοκίμια που προτείνει η ISRM. Σε όλες τις δοκιμές η αξονική τάση δεν αυξανότανε μονοτονικά με το χρόνο της δοκιμής μέχρι τη θραύση αλλά σε 4-5 τάσεις μικρότερες από την τάση θραύσης γινότανε πλήρης αποφόρτιση και επαναφόρτιση του δοκιμίου για τον υπολογισμό του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας.

Στη συνέχεια εκτελέστηκε μια σειρά πλήρως εξοπλισμένων δοκιμών σημειακής κάμψης σε τρία (3) πρισματικά δοκίμια μαρμάρου με λόγο μήκους προς ύψος περίπου ίσο με 5. Από την επεξεργασία των πειραματικών δοκιμών κάμψης 3 σημείων, υπολογίστηκαν η εφελκυστική τάση και τροπή στην κάτω (εφελκυσόμενη) έδρα του δοκιμίου, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσης – τροπής και υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας η μέγιστη τάση καθώς και η *κρίσιμη τροπή εφελκυστικής θραύσης*.

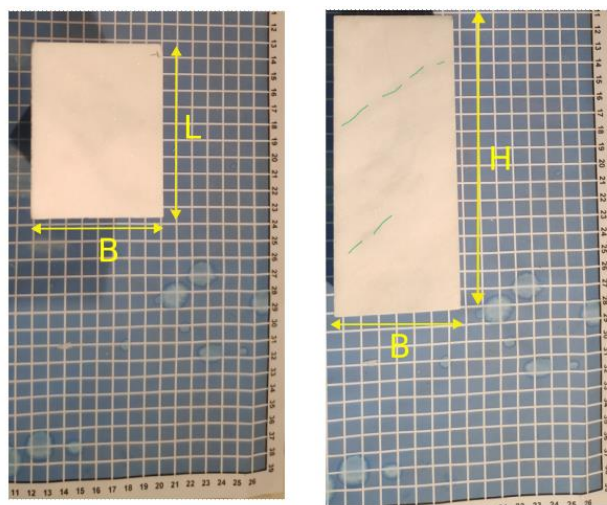
Τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης 3 σημείων που αναφέρεται και ως έμμεση δοκιμή εφελκυσμού είναι σημαντικά διότι η εφελκυστική αντοχή ενός πετρώματος μπορεί να συσχετισθεί με τη συμπεριφορά δοκιμίου από το ίδιο πέτρωμα σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και ειδικότερα με την θλιπτική τάση έναρξης ρωγμών (σ_{cd}) εφόσον μετά από αυτήν οι ρωγμές διαδίδονται κυρίως λόγω εφελκυστικών τάσεων που είναι ίσες ή μεγαλύτερες από την εφελκυστική αντοχή ή την μέγιστη εφελκυστική τροπή.

4.2 Μονοαξονική θλίψη

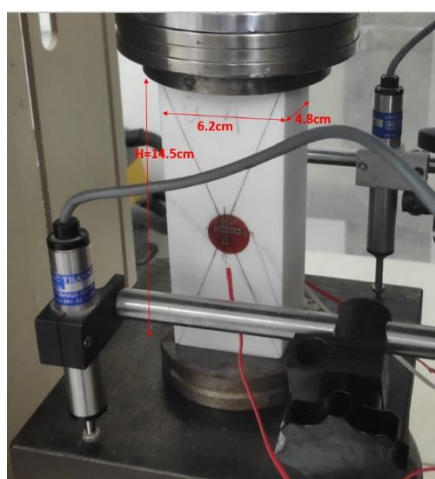
Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε υψίκορμα πρισματικά δοκίμια όπως στις [Εικ. 4.1](#) και [4.2](#). Για την καταγραφή των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε δυναμοκυψέλη (load cell). Η καταγραφή της αξονικής τροπής στις 6 πρώτες δοκιμές έγινε 1 LVDT, στην 7^η με 2 LVDT's και στις 2 τελευταίες με LVDT και ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gages) 2-στοιχείων με γωνία 90°. Οι τυπικές διαστάσεις των δοκιμών φαίνονται στον [Πίν. 4.1](#).

Πίν. 4.1 : Κωδικός αριθμός και διαστάσεις δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε ανεμπόδιστη (ή μονοαξονική) θλίψη.

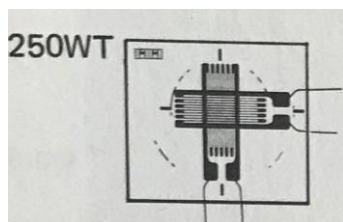
A/A	Κωδικός αριθμός δοκιμίου	Ύψος H (cm)	Πλάτος B (cm)	Μήκος L (cm)	Διάμετρος (cm)	Μορφή διατομής
1	A1A(1)	13.60	4.75	5.80	-	Ορθογωνική
2	A1A(2)	14.40	4.90	5.85	-	Ορθογωνική
3	B2B(1)	15.10	4.90	5.80	-	Ορθογωνική
4	B2B(2)	12.60	4.80	5.80	-	Ορθογωνική
5	Γ1B(1)	13.75	4.95	5.80	-	Ορθογωνική
6	Γ1B(2)	14.60	4.80	5.85	-	Ορθογωνική
7	UN_U1_Volakas	14.95	4.86	6.23	-	Ορθογωνική
8	UN_str_U4_Volakas	14.43	4.83	5.91	-	Ορθογωνική
9	Un_str_Volakas_1_1 5 12 2019 Volakas 1	11.43	-	-	5.02	Κυκλική



Εικ. 4.1 (α) οριζόντια διατομή (πλάτοςxμήκος) και (β) πρόσοψη (ύψοςxπλάτος) υψίκορμου πρισματικού δοκιμίου.



(α)



(β)

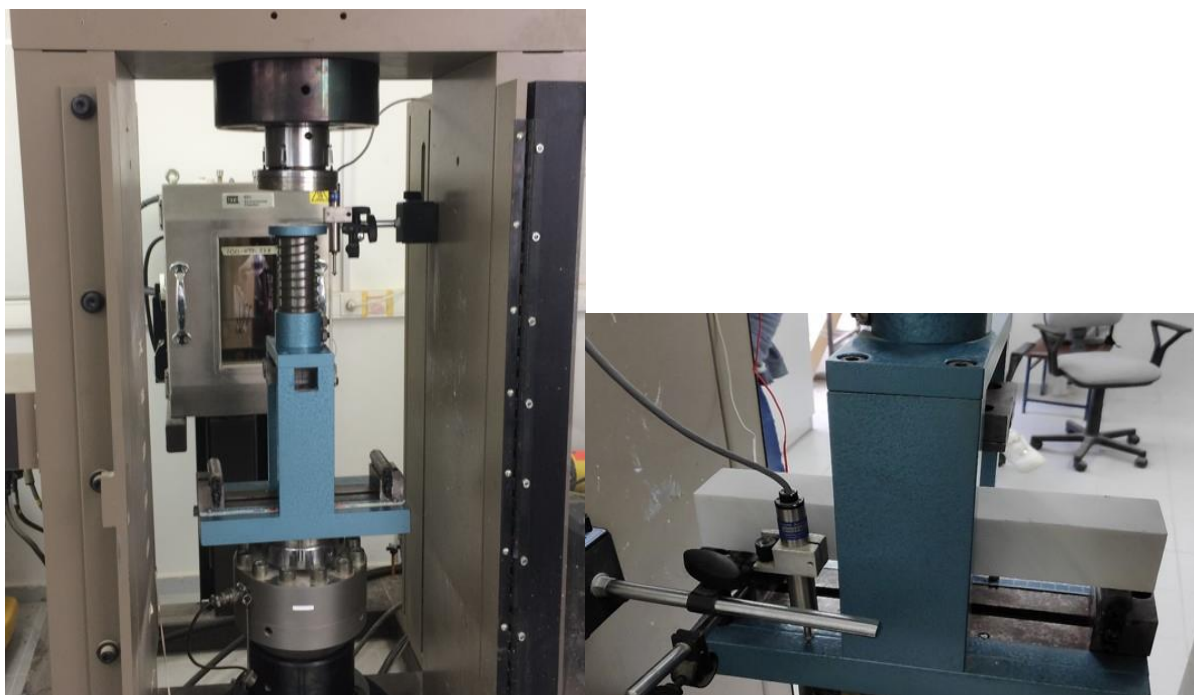
Εικ. 4.2. Διάταξη δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης σε πρισματικό δοκίμιο με ροζέττα 2 στοιχείων με γωνία 90° στο κέντρο βάρους της κατακόρυφης έδρας του δοκιμίου.

4.3 Κάμψη τριών σημείων

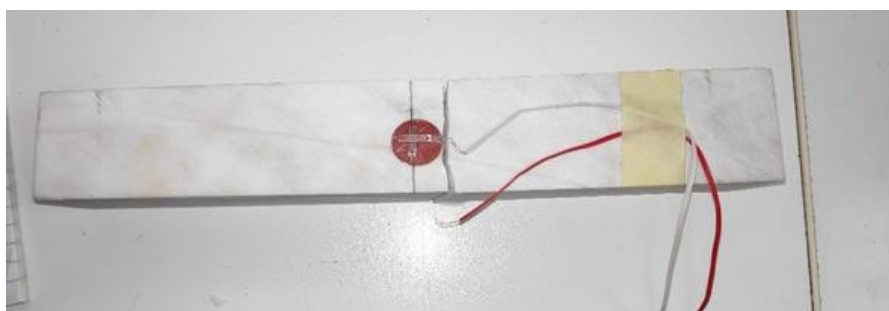
Η διάταξη της δοκιμής κάμψης 3 σημείων φαίνεται στην [Εικ. 3.7](#) ενώ στον [Πιν. 4.2](#) παρουσιάζονται οι τυπικές διαστάσεις των δοκιμίων κάμψης. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στην σερβουδραυλική μηχανή θλίψης αφού οι πλάκες έδρασης αντικαταστάθηκαν με την παρεμβολή ειδικής διάταξης κάμψης (bending rig) όπως φαίνεται στην [Εικ. 4.3α](#). Κατά την διάρκεια των δοκιμών μετρήθηκαν (1) η δύναμη φόρτισης P στο μέσον της πάνω έδρας των πρισματικών δοκιμίων που μετράται από την δυναμοκυψέλη της μηχανής, (2) το βέλος κάμψης από LVDT στο μέσον της κάτω έδρας, και (3) η οριζόντια τροπή (strain) στο μέσον της κάτω έδρας του δοκιμίου με ροζέττα 2 στοιχείων (βλ. [Εικ. 4.3β](#)).

Πίν. 4.2 : Κωδικός αριθμός και διαστάσεις δοκιμίων που μελετήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων.

Κωδικός αριθμός δοκιμίου	Μήκος L (cm)	Πλάτος B (cm)	Ύψος H (cm)
Bending_strain_Volakas_A_4 19 4 2019	25	4.905	5.1
Bending_strain_Volakas_Γ_1 19 4 2019	25	5.086	5.255
Bending_strain_Γ2 19 4 2019	25	5.086	4.976



(α)

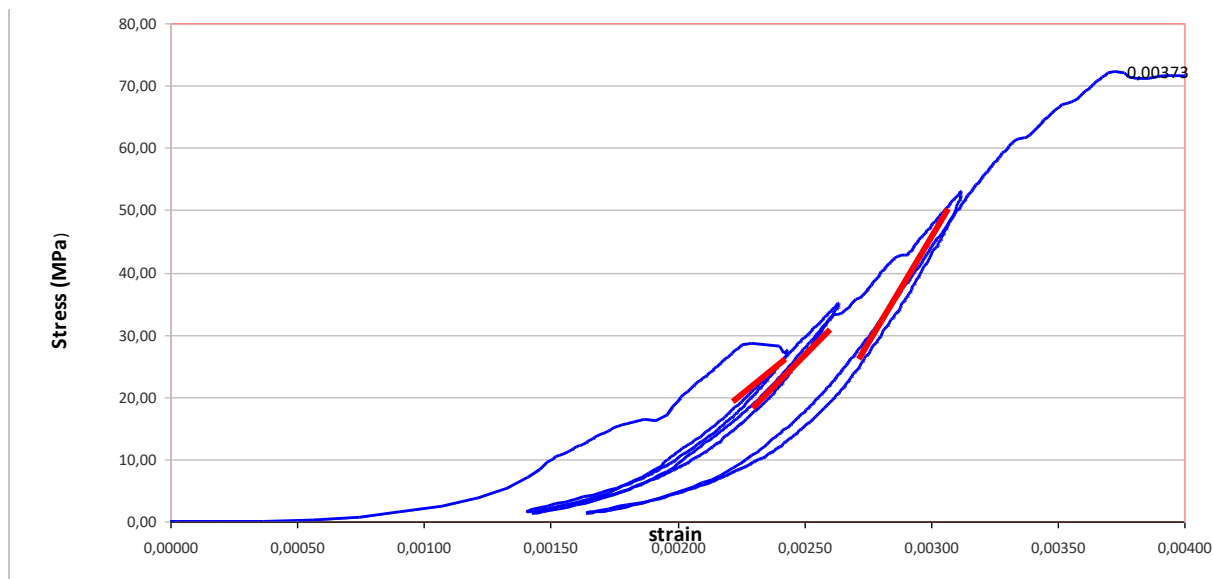


(β)

Εικ. 4.3. (α) Πειραματική διάταξη κάμψης 3 σημείων (αριστερά) και μέτρηση βέλους κάμψης του δοκιμίου με LVDT. (β) δοκίμιο μετά την κάμψη (φαίνεται η ροζέττα ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων τύπου 2 στοιχείων με γωνία 90° κολλημένο στο γεωμετρικό κέντρο της κάτω έδρας του δοκιμίου.

4.4 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Τα πρισματικά δοκίμια δολομιτικού μαρμάρου που υποβλήθηκαν σε ανεμπόδιση θλίψη στην 1^η σειρά δοκιμών ήταν έξι και ο κωδικός της αριθμός και οι διαστάσεις της παρατίθενται στον Πίν. 4.1. Τυπικό διάγραμμα αξονικής τάσης (stress) και αξονικής τροπής (strain) που κατασκευάστηκε μετά την πρώτη δοκιμή φαίνεται στην Εικ. 4.4. Σ' αυτή τη δοκιμή η αξονική τροπή υπολογίστηκε από LVDT και τα μέτρα ελαστικότητας κατά τη δοκιμή υπολογίστηκαν από τις καμπύλες αποφόρτισης – επαναφόρτισης ως η κλίση της καλύτερα προσαρμοζόμενης ευθείας όπως φαίνεται στην Εικ. 4.4.



Εικ. 4.4. Διάγραμμα αξονικής τροπής – αξονικής τάσης της δοκιμής A1A(1).

Στον παρακάτω Πίν. 4.3 φαίνονται η ελάχιστη και μέγιστη τάση και τροπή κάθε κύκλου φόρτισης και ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E.

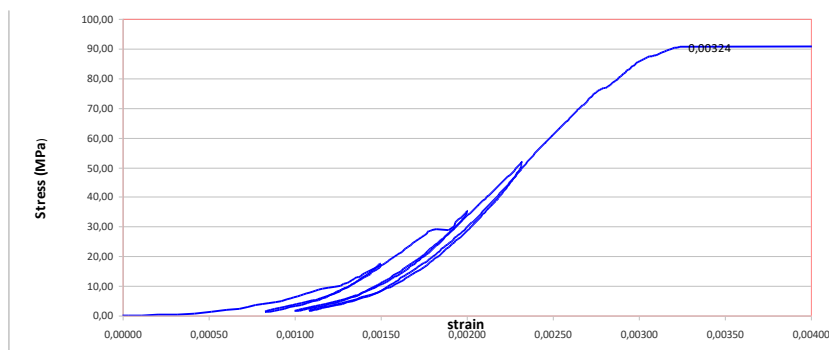
Πίν. 4.3. Ελάχιστη και μέγιστη αξονική τάση και αξονική τροπή στους κύκλους αποφόρτισης-επαναφόρτισης, μέτρο παραμορφωσιμότητας και μέγιστη τάση πριν την θραύση της δοκιμής A1A(1).

Κύκλος φόρτισης	Αξονική Τάση (MPa)	Αξονική Τροπή (x1/1000)	E – αποφόρτισης (GPa)
1	0.01	0.00	
	28.60	2.29	8.35
2	1.57	1.41	
	35.12	2.63	29.97
3	1.34	1.43	
	53.07	3.12	38.25
4 Φόρτιση (έως τη θραύση)	1.31	1.64	
	72.25	3.73	41.62

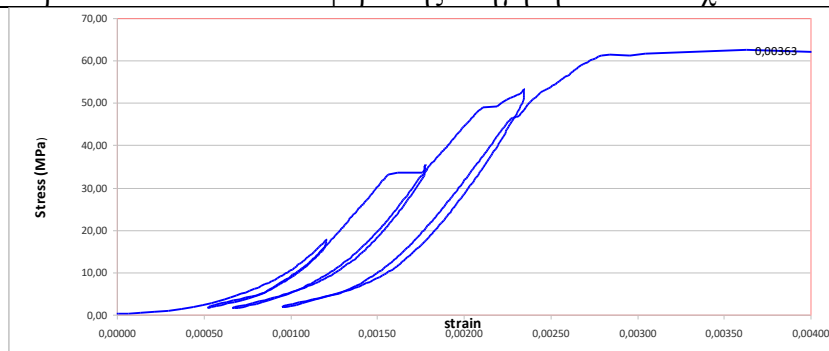
Τα διαγράμματα αξονικής τάσης και τροπής για τα υπόλοιπα δοκίμια που η συστολή του ύψους του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετρήθηκε με LVDT παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη μορφή πίνακα.

Πίν. 4.4. Διαγράμματα αξονικής τροπής – αξονικής τάσης στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

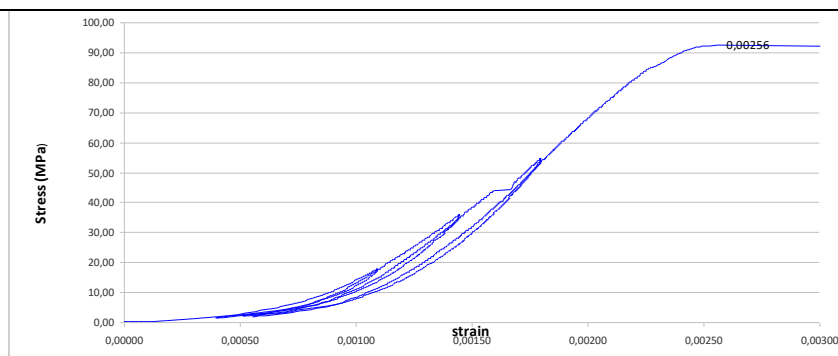
Τάση, τροπή και μέτρο παραμορφωσιμότητας στους διαδοχικούς κύκλους αποφόρτισης - επαναφόρτισης



A1A(2) Το δοκίμιο αρχικά καταπονήθηκε και μελετήθηκε σε 4 κύκλους φόρτισης όπως φαίνονται στον πίνακα 4.5. Κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου φόρτισης οδηγήθηκε σε αστοχία.



B2B(1) Το δοκίμιο αρχικά καταπονήθηκε και μελετήθηκε σε 4 κύκλους φόρτισης όπως φαίνονται στον πίνακα 4.8. Κατά τη διάρκεια του 4^{ου} κύκλου φόρτισης οδηγήθηκε σε αστοχία.



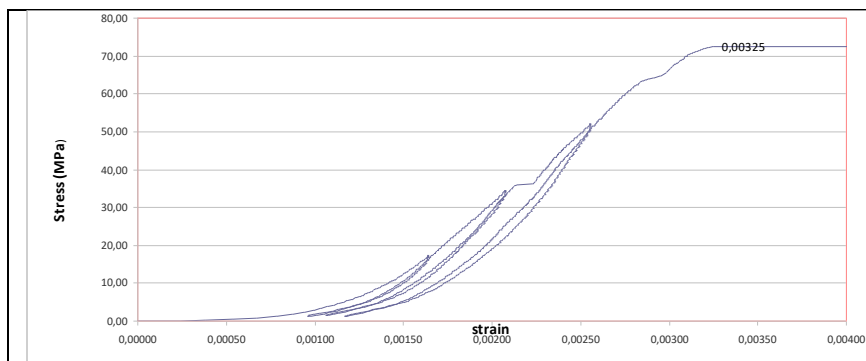
B2B(2) Κύκλοι φόρτισης δοκιμίου B2B(2) και αντίστοιχα φορτία, τάσεις και ανοιγμένες παραμορφώσεις.

Κύκλος φόρτισης	Τάση (MPa)	Τροπή (x1/1000)	E – αποφόρτισης (GPa)
1	0.03	0.00	11.48
	17.47	1.5	
2	1.29	0.84	32.23
	35.21	2.0	
3	1.52	1.01	43.59
	51.79	2.32	
4 Φόρτιση (έως τη θραύση)	1.66	1.09	44.05
	90.92	5.96	

Κύκλος φόρτισης	Τάση (MPa)	Τροπή (x1/1000)	E – αποφόρτισης (GPa)
1	0.12	0.00	13.89
	17.78	1.20	
2	1.68	0.53	32.60
	35.37	1.78	
3	1.48	0.67	38.24
	53.31	2.35	
4 Φόρτιση (έως τη θραύση)	1.73	0.95	37.60
	62.42	3.63	

Κύκλος φόρτισης	Τάση (MPa)	Τροπή (x1/1000)	E – αποφόρτισης (GPa)
1	0.23	0.00	17.15
	17.93	1.09	
2	1.46	0.39	37.44
	36.05	1.44	
3	2.14	0.51	47.62
	54.84	1.79	
4 Φόρτιση (έως τη θραύση)	2.03	0.56	58.63
	92.46	2.56	

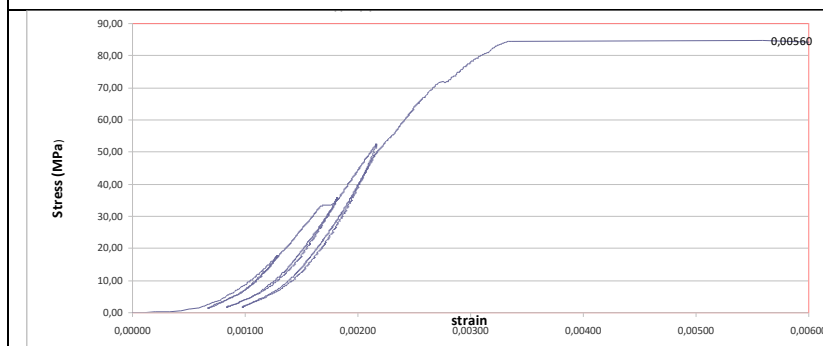
Κύκλος φόρτισης	Τάση (MPa)	Τροπή (x1/1000)	E – αποφόρτισης (GPa)
-----------------	------------	-----------------	-----------------------



Γ1B(1)

Διάγραμμα τάσεων – ανοιγμένων παραμορφώσεων δοκιμίου Γ1B(1)
Κύκλοι φόρτισης δοκιμίου Γ1B(1) και αντίστοιχα φορτία, τάσεις και ανοιγμένες παραμορφώσεις.

1	0.04	0.00	
	17.3 3	1.64	10.63
2	1.23	0.96	
	34.3 7	2.07	34.12
3	1.46	1.06	
	52.0 1	2.55	38.39
4 Φόρτιση (έως τη θραύση)	1.28	1.17	
	72.4 1	3.25	42.44



Γ1B(2)

Διάγραμμα τάσεων – ανοιγμένων παραμορφώσεων δοκιμίου Γ1B(2)

Κύκλος φόρτισης	Τάση (MPa)	Τροπή (x1/1000)	E – αποφόρτισης (GPa)
1	0.06	0.00	
	17.88	1.28	14.56
2	1.37	0.67	
	35.91	1.81	34.36
3	1.63	0.84	
	52.47	2.16	42.69
4 Φόρτιση (έως τη θραύση)	1.76	0.97	
	84.69	5.60	37.59

Από την 1^η αυτή σειρά δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Σε όλες τις δοκιμές το μάρμαρο παρουσιάζει μη-γραμμική καμπύλη τάσης – τροπής και πλαστικότητα που εκδηλώνεται με παραμένουσα τροπή κατά την πλήρη αποφόρτιση του σε κάθε κύκλο αποφόρτισης-επαναφόρτισης.

(β) Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη κυμαίνεται μεταξύ $\sigma_f = 62$ με 92 MPa παρουσιάζοντας μεγάλη διακύμανση γύρω από τη μέση τιμή 80.6 MPa, και η μέγιστη θλιπτική τροπή κατά τη θραύση παρουσιάζει και αυτή διακύμανση γύρω από τη μέση τιμή 4.2/1000 strains.

(γ) Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει με την πλαστική τροπή σε όλες τις δοκιμές και παρουσιάζει μια μέση τιμή 44 GPa.

(δ) Οι αξονική τροπή που είναι και η μόνη που μετρήθηκε (η οριζόντια ή εγκάρσια δεν μετρήθηκε στις παραπάνω δοκιμές) είναι μια μέση τροπή σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Εφόσον δεν μετρήθηκαν εγκάρσιες τροπές δεν μπορεί να υπολογισθεί ο λόγος Poisson του μαρμάρου αλλά μόνο το μέτρο ελαστικότητας.

(ε) **Εφόσον δεν έγινε μέτρηση και από ένα ακόμα LVDT αντιδιαμετρικά του πρώτου δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα για την απόλυτη ευθυγράμμιση του άξονα του δοκιμίου** με τον άξονα της φόρτισης και η επίδραση της μη παραλληλίας των εδρών που εδράζεται το δοκίμιο στις πλάκες της μηχανής. Οι αποκλίσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση παρασιτικών καμπτικών τάσεων που μειώνουν την πραγματική αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη από αυτήν που υπολογίστηκε στις παραπάνω δοκιμές.

Για να διερευνήσουμε περαιτέρω τα σημεία (δ) και (ε) έγιναν 2 δοκιμές ακόμα σε πρισματικά δοκίμια, όμως αυτή τη φορά είτε με 2 LVDT's σε αντιδιαμετρικές κατακόρυφες έδρες είτε με ηλεκτρικά μηχανοστάσια τύπου ορθογωνικής ροζέτας εκτός του LVDT για να μετρηθούν οι τροπές κατά την αξονική και εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου σε 2 αντιδιαμετρικές έδρες όπως προαναφέρθηκε.

Καταρχάς μπορούμε να κάνουμε κάποιους υπολογισμούς των παρασιτικών καμπτικών τροπών που προκαλούνται κατά τη δοκιμή πρισματικών δοκιμίων λόγω μη καλής ευθυγράμμισης του άξονα του δοκιμίου με τον άξονα της φόρτισης. Η συνολική αξονική τροπή που μετράται από κάθε LVDT θα είναι το άθροισμα της πραγματικής αξονικής τροπής λόγω θλίψης, ε_0 , και μιας παρασιτικής καμπτικής τροπής που θα έχει γραμμική μεταβολή κατά την έννοια του πάχους του δοκιμίου σύμφωνα με τη θεωρία και θα λαμβάνει μέγιστη τιμή ε_1 για $x=B/2$ (δηλ. στην ακρότατη ίνα του δοκιμίου). Καταγράφοντας 2 τροπές αξονικά του δοκιμίου με τα LVDT's $\varepsilon_{zz}^{(1)}$ και $\varepsilon_{zz}^{(2)}$, τότε προκύπτει ότι η μέση τιμή των 2 καταγραφών δίνει την πραγματική αξονική τροπή λόγω θλίψης ε_0 , ενώ η μέση τιμή της διαφοράς ε_1 δίνει την παρασιτική καμπτική τροπή,

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_0 + \frac{x}{(B/2)} \varepsilon_1 \quad (4.1)$$

Αν σε μια δοκιμή καταγραφούν 2 αξονικές τροπές (1) και (2) με LVDT's ή με strain gages τότε

$$\varepsilon_{zz}^{(1)} = \varepsilon_0 + \varepsilon_1^{(1)}, \varepsilon_{zz}^{(2)} = \varepsilon_0 + \varepsilon_1^{(2)}, \quad (4.2)$$

όπου

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{zz}^{(1)} + \varepsilon_{zz}^{(2)}}{2}, \varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{zz}^{(1)} - \varepsilon_{zz}^{(2)}}{2} \quad (4.3)$$

Δηλαδή η μέση τιμή των 2 καταγραφών θα δώσει την πραγματική αξονική τροπή και η διαφορά τους δια 2 θα δώσει την παρασιτική τροπή λόγω κάμψης.

Η 1^η τέτοια δοκιμή με 2 αντιδιαμετρικά LVDT's – χωρίς strain gages – για να μετρηθεί και η καμπτική παρασιτική θλιπτική τάση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα δοκιμής.

Πίνακας 4.5

Κωδικός δοκιμίου: UN_U1_Volakas .xls

Δείγμα: από δοκαράκι λευκού δολομιτικού μαρμάρου

Τοποθεσία: Βόλακας, Ν. Δράμας

Τύπος δοκιμής: Ανεμπόδιστη θλίψη με αποφορτίσεις-επαναφορτίσεις πριν την τελική φόρτιση μέχρι τη θραύση

Υψος δοκιμίου H [mm]: 149.5

Μήκος L [mm]: 62.3

Πλάτος B, [mm]: 48.65

Λόγος H/B: 3.07

Τρόπος φόρτισης: Έλεγχος φορτίου

Ρυθμός φόρτισης [kN/sec]: 0.5

Λίπανση εδρών: Οχι

Συσκευές μέτρησης: Μηκυσιόμετρο και κυψέλη φορτίου MTS, 2 LVDT's 25mm τοποθετημένα παράλληλα με 2 αντιθετικές κατακόρυφες έδρες του δοκιμίου.

Παρατηρήσεις δοκιμής: (i) στη 2^η αποφόρτιση (32 MPa) εκδηλώθηκε αποφλοΐωση στην μια πλευρά του δοκιμίου, (ii) επίσης στην 3^η αποφόρτιση (48 MPa) παρατηρήθηκε νέα αποφλοΐωση, (iii) η θραύση έγινε στα 62.2 MPa, και (iv) διαπιστώθηκε προυπάρχουσα ρωγμή στο δοκίμιο. Τελικά θραύση δοκιμίου με αποφλοΐωση και διατμητική κατάτμηση.

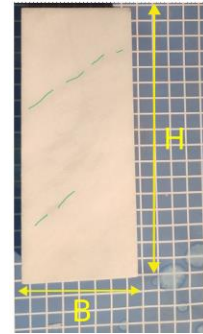
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ή μέγιστη καταγραφείσα αξονική τάση [MPa]: 62.2

Διορθωμένη αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη = $62 + 55 = 117$ MPa

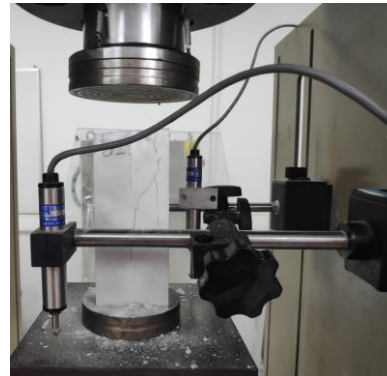
Μέγιστη μέση αξονική τροπή ϵ_f [-] (μέση ανηγμένη στο ύψος του δοκιμίου): **4.83e-3**

Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]: 35

Λόγος Poisson: -



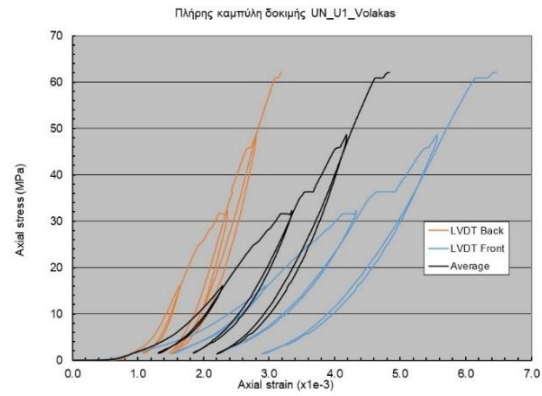
(α)



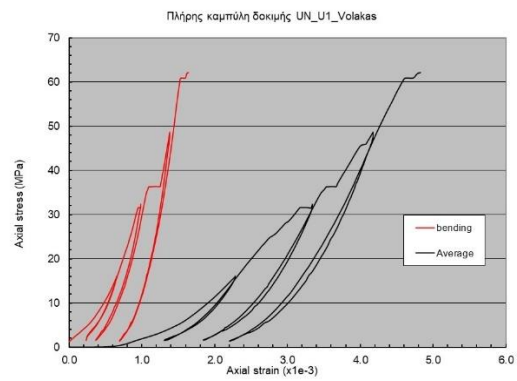
(β)



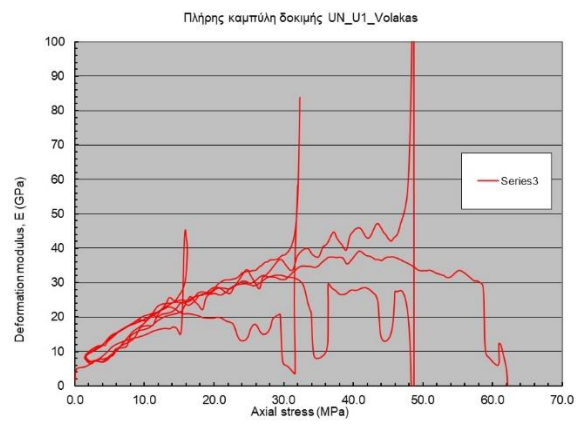
(γ)



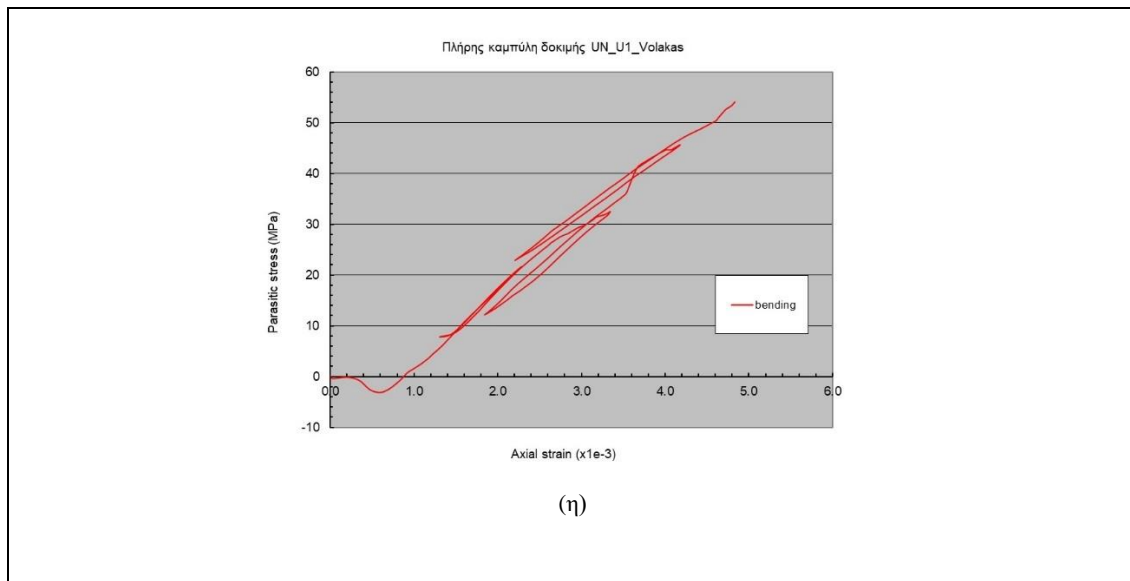
(δ)



(ε)



(ζ)



Το διάγραμμα (δ) του παραπάνω πίνακα δοκιμής δείχνει την απόκλιση μετρήσεων των 2 αντιδιαμετρικά τοποθετημένων LVDT's και το διάγραμμα της τάσης και της πραγματικής αξονικής τροπής ϵ_0 που υπολογίσαμε παραπάνω. Οι 2 καμπύλες της πραγματικής αξονικής τροπής και της καμπτικής φαίνονται στο διάγραμμα (ε). Στο διάγραμμα (ζ) φαίνεται το διάγραμμα του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της αξονικής τάσης (υπολογίσθηκε από την αξονική τροπή),

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon_0} \quad (4.4)$$

Στο διάγραμμα (η) φαίνεται η καμπτική τάση σ_b που υπολογίσθηκε από τον τύπο της ελαστικότητας θεωρώντας μέτρο ελαστικότητας $E=33$ GPa συναρτήσει της μέσης αξονικής τροπής

$$\sigma_b = E \epsilon_1 \quad (4.5)$$

Από αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι στο τέλος της δοκιμής κατά τη θραύση του δοκιμίου η καμπτική τάση είναι της τάξης των 55 MPa που αν προστεθεί στην αξονική τάση μας δίνει πραγματική αντοχή του μαρμάρου σε ανεμπόδιση θλίψη $62 + 55 = 117$ MPa. Απ' την αντιδιαμετρική πλευρά η καμπτική τάση θα είναι εφελκυστική με κατά προσέγγιση τιμή - 55 MPa που κατά την αστοχία του δοκιμίου θα δώσει $62 - 55 = 7$ MPa.

Πίνακας δοκιμής 4.6

Κωδικός δοκιμίου: UN_str_U4_Volakas.xls

Δείγμα: από δοκαράκι λευκού δολομιτικού μαρμάρου

Τοποθεσία: Βόλακας, Ν. Δράμας

Τύπος δοκιμής: Ανεμπόδιστη θλίψη με αποφορτίσεις-επαναφορτίσεις πριν την τελική φόρτιση μέχρι τη θραύση

Υψος δοκιμίου H [mm]: 144.26

Πλάτος L [mm]: 59.06

Πάχος B, [mm]: 48.31

Λόγος H/B: 2.98

Τρόπος φόρτισης: Έλεγχος φορτίου

Ρυθμός φόρτισης [kN/sec]: 0.5

Λίπανση εδρών: Οχι

Συσκευές μέτρησης: Μηκυσιόμετρο και κυψέλη φορτίου MTS, 2 LVDT's 25mm τοποθετημένα παράλληλα με 2 αντιθετικές έδρες του δοκιμίου και 2 strain gages τύπου σταυρού για μέτρηση αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης, κολλημένων στο κέντρο του δοκιμίου και αντιδιαμετρικά.

Παρατηρήσεις δοκιμής: (i) στην 3^η φόρτιση παρατηρήθηκε αποφλοιώση του δοκιμίου στα 43.96 MPa που εκδηλώθηκε με «άλμα» στην αξονική τροπή που καταγράφηκε από το ένα strain gage (channel 11) και μια άλλη στα 70 MPa στο τελικό στάδιο της φόρτισης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (γ). Θραύση δοκιμίου με αποφλοιώση και διατμητική κατάτμηση που ξεκίνησε στα 68 MPa και ολοκληρώθηκε στα 83.43 MPa.

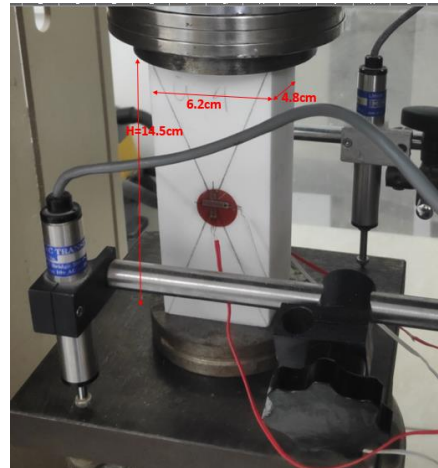
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ή μέγιστη καταγραφείσα αξονική τάση [MPa]: 83.43

Διορθωμένη αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη = $83 + 34 = 117$ MPa

Μέγιστη μέση αξονική τροπή ϵ_f [-]: 2.36/1000

Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]: 44

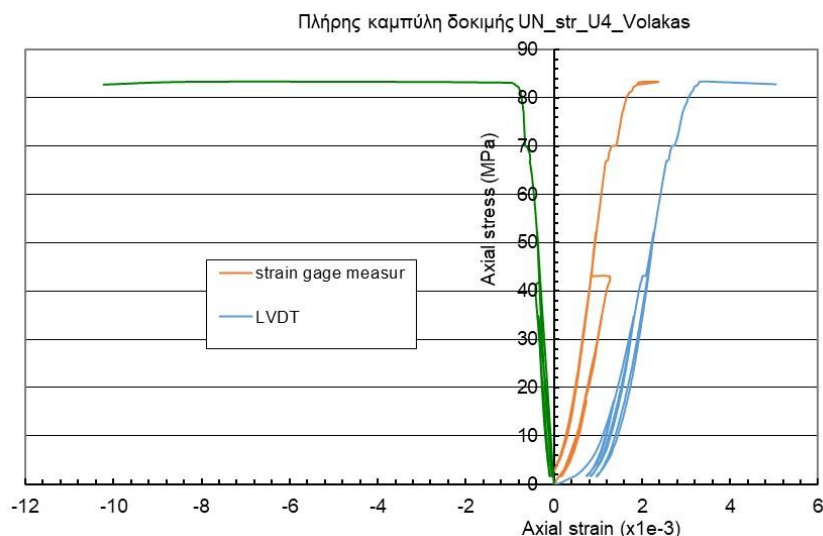
Λόγος Poisson: 0.24



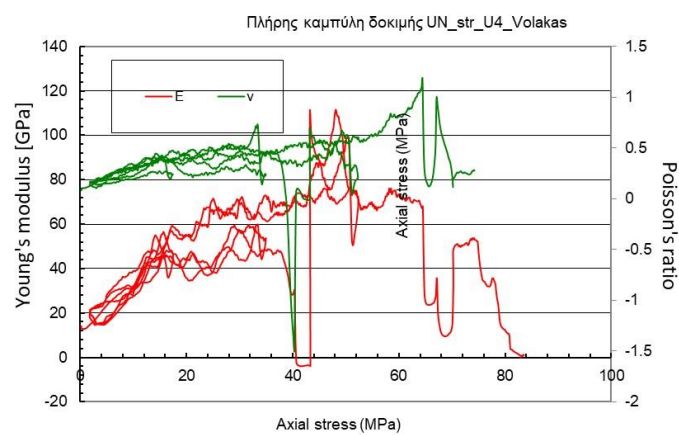
(α)



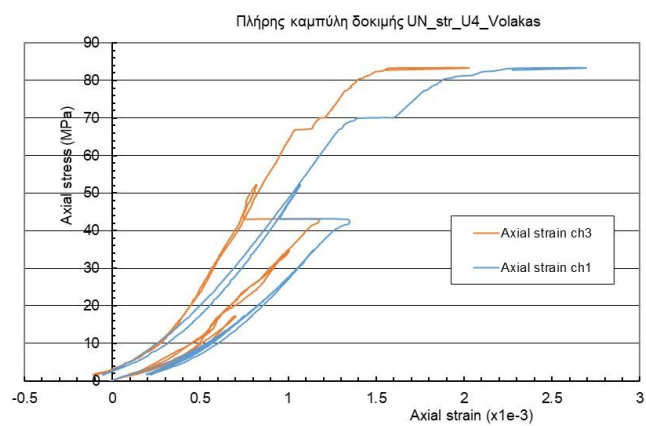
(β)



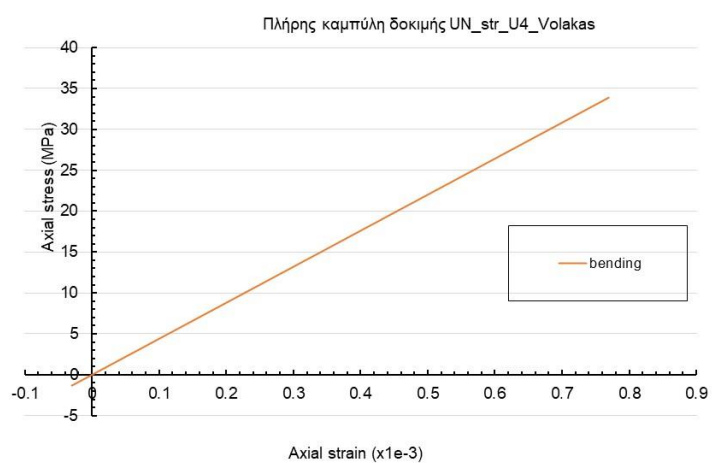
(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)

Στο διάγραμμα (ε) φαίνεται η απόκλιση των καταγραφών των 2 αξονικών stain gages. Στο διάγραμμα (ζ) φαίνεται η καμπτική τάση σ_b συναρτήσει της αξονικής τροπής που υπολογίστηκε από τον τύπο της ελαστικότητας θεωρώντας $E=44 \text{ GPa}$. Από αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι στο τέλος της δοκιμής κατά τη θραύση του δοκιμίου η καμπτική τάση είναι της τάξης των 34 MPa που αν προστεθεί στην αξονική τάση αιχμής 83 MPa μας δίνει πραγματική αντοχή του μαρμάρου σε ανεμπόδιστη θλίψη $83 + 34 = 117 \text{ MPa}$. Απ' την αντιδιαμετρική πλευρά η καμπτική τάση θα είναι εφελκυστική με κατά προσέγγιση τιμή -34 MPa που κατά την αστοχία του δοκιμίου θα δώσει $83 - 34 = 47 \text{ MPa}$.

Πίνακας δοκιμής 4.7

Κωδικός δοκιμίου: **Un_str_Volakas_1_1 5 12 2019**
Volakas 1.xls

Δείγμα: από δοκαράκι λευκού δολομιτικού μαρμάρου

Τοποθεσία: Βόλακας, Ν. Δράμας

Τύπος δοκιμής: Μονοαξονική θλίψη με αποφορτίσεις-επαναφορτίσεις πριν την τελική φόρτιση μέχρι τη θραύση

Υψος δοκιμίου H [mm]: 114.30

Διάμετρος D, [mm]: 5.016

Λόγος H/D: 2.28

Τρόπος φόρτισης: Έλεγχος φορτίου

Ρυθμός φόρτισης [kN/sec]: 0.5

Λίπανση εδρών: Οχι

Συσκευές μέτρησης: Μηκυνσιόμετρο και κυψέλη φορτίου MTS, 2 LVDT's 25mm τοποθετημένα παράλληλα με 2 αντιθετικές έδρες του δοκιμίου και 2 strain gages τύπου σταυρού για μέτρηση αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης, κολλημένων στο κέντρο του δοκιμίου και αντιδιαμετρικά.

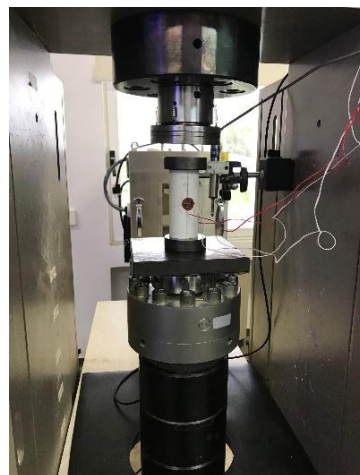
Παρατηρήσεις δοκιμής: Θραύση δοκιμίου με αποφλοίωση και διατμητική κατάτμηση.

Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ή μέγιστη καταγραφείσα αξονική τάση [MPa]: 120.5

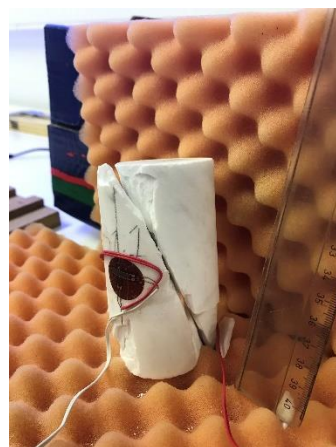
Μέγιστη μέση αξονική τροπή ϵ_f [-]: **1.765e-3**

Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]: 57

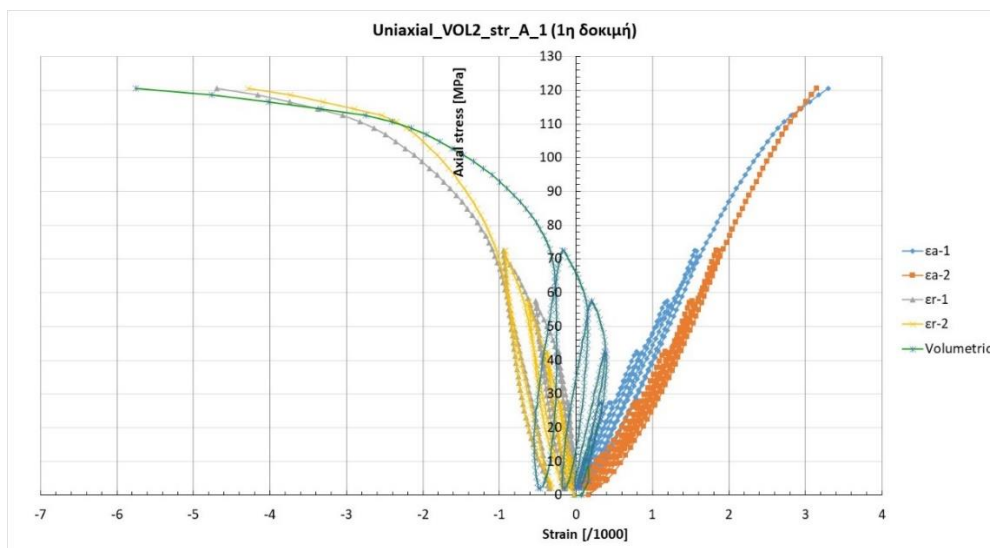
Λόγος Poisson: 0.27



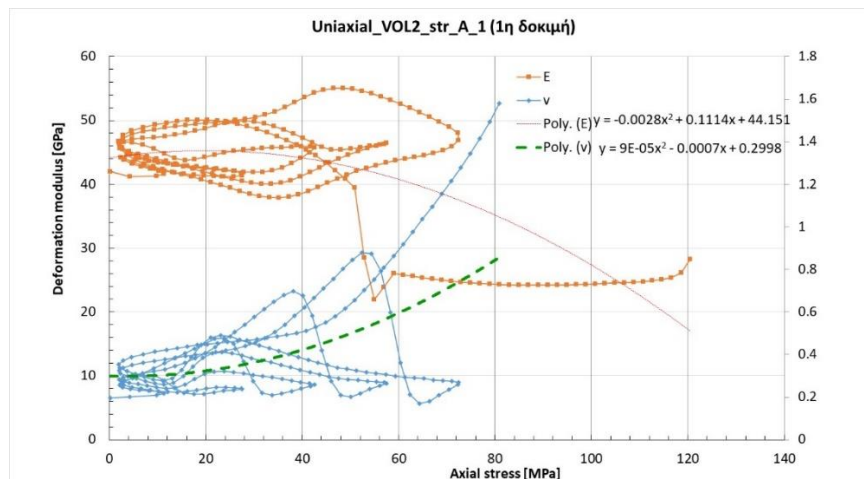
(α)



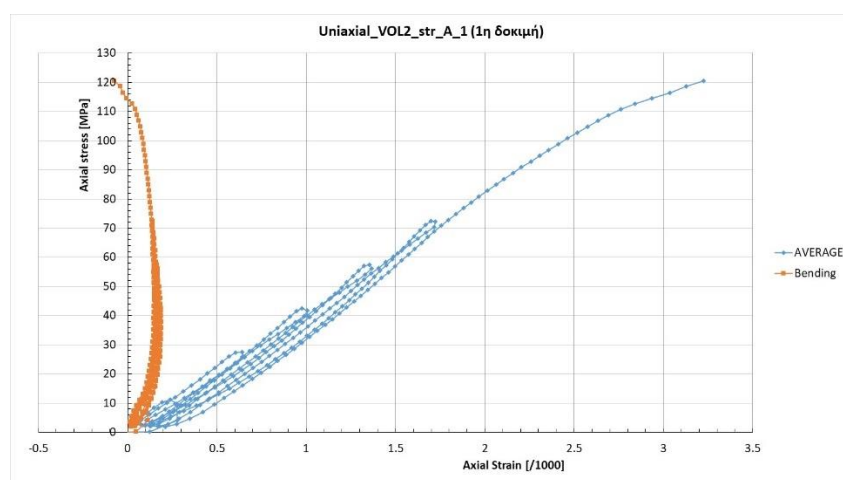
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Στο διάγραμμα (γ) φαίνεται η απόκλιση των καταγραφών των 2 αξονικών μηκυνσιομέτρων αλλά και των 2 οριζόντιων εγκάρσιων). Στο διάγραμμα (δ) φαίνεται η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson από την αξονική τάση. Στο διάγραμμα (ε) φαίνεται η καμπύλη της καμπτικής τάσης και της πραγματικής τάσης που έχει υπολογισθεί από τη μέση τιμή των τροπών των 2 αξονικών μηκυνσιομέτρων. **Από αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι στο τέλος της δοκιμής η καμπτική τάση θα είναι περίπου μηδενική εφόσον η μέση τιμή της διαφοράς των τροπών των 2 μηκυνσιομέτρων έχει πολύ μικρή τιμή.**

4.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης 3 σημείων

Τα δοκίμια δολομιτικού μαρμάρου που υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων ήταν τρία (3). Ο κωδικός τους αριθμός και οι διαστάσεις τους παρατίθενται στον Πίν. 4.8 – 4.10. Τα επεξεργασμένα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται παρακάτω στους ίδιους Πίνακες. Το μέτρο του Young υπολογίστηκε με βάση την εξ. (4.4).

Από τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών μπορούν να προκύψουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- (i) Η αντοχή σε εφελκυσμό του μαρμάρου έχει μέση τιμή 8 MPa με μικρή διακύμανση γύρω από αυτή την τιμή. Αν η πραγματική τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του μαρμάρου όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 120 MPa τότε ο λόγος αντοχής σε μονοαξονική θλίψη προς εφελκυστική αντοχή είναι περίπου 15. Στην πραγματικότητα ο λόγος αυτός θα είναι λίγο μεγαλύτερος εφόσον η αντοχή σε κάμψη είναι πάντα λίγο μεγαλύτερη από την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό εξαιτίας της μη-ομοιόμορφης κατανομής της τάσης κατά την έννοια του ύψους της δοκού.
- (ii) Το μέτρο ελαστικότητας είναι γραμμική φθίνουσα συνάρτηση της εφελκυστικής τροπής

$$E = E_0 - a\varepsilon \quad (4.6)$$

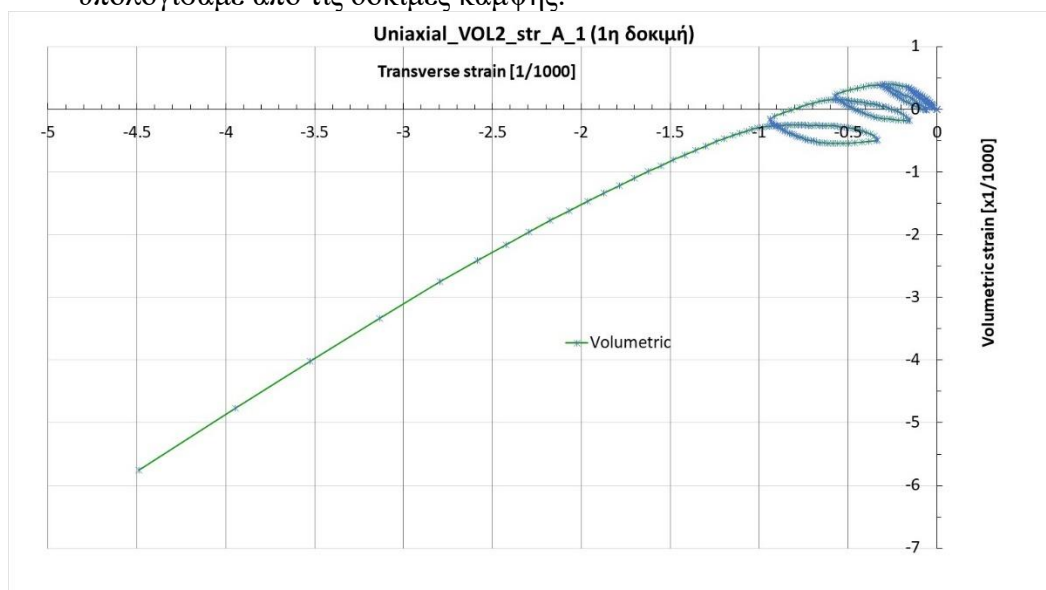
όπου E_0 = το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας του μαρμάρου, E το φαινόμενο που μειώνεται με την εφελκυστική τροπή λόγω εκκίνησης και διάδοσης μικρορωγμών και a ένας σταθερός συντελεστής φθοράς (damage). Στην περίπτωση που ισχύει η εμπειρική σχέση (4.6) τότε η εφελκυστική τάση θα είναι παραβολικής μορφής όπως μπορεί να δειχθεί ολοκληρώνοντας,

$$\sigma = \int E d\varepsilon = E_0\varepsilon \left(1 - \frac{a\varepsilon}{2}\right) \quad (4.7)$$

Το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό είναι συγκρίσιμο με αυτό που βρέθηκε από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης ήτοι γύρω στα 30 GPa.

- (iii) Στις 2 από τις 3 περιπτώσεις οι καμπύλες που λήφθησαν λαμβάνοντας υπόψιν τις τοπικές καταγραφές των strain gages είναι ίδιες με αυτές που καταγράφηκαν από το LVDT και το βέλος κάμψης. Αυτό αναμενόταν διότι σε αντίθεση με τις δοκιμές θλίψης που τα LVDT's μετράνε μεταβολές του ύψους του δοκιμίου στις δοκιμές κάμψης τα LVDT's μετράνε βέλος κάμψης. Η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής τροπής κατά τη θραύση κυμαίνεται σε ευρέα όρια όπως αναμενόταν για ψαθυρό πέτρωμα από 0.5/1000 έως 1/1000 (στην πραγματικότητα η μικρότερη τιμή είναι 0.2/1000 που καταγράφηκε από strain gage κατά την 1^η δοκιμή). Έχοντας μια προσεγγιστική τιμή της κρίσιμης εφελκυστικής τροπής του μαρμάρου της τάξης των 0.7/1000 μπορούμε να δούμε την σχέση της τροπής αυτής με την εφελκυστική τροπή σε εγκάρσια διεύθυνση που μετράται στην μονοαξονική θλίψη σε συνδυασμό με την ογκική τροπή της ίδιας δοκιμής. Πράγματι, στην Εικ. 4.5 φαίνεται η μεταβολή της ογκικής τροπής με την εγκάρσια εφελκυστική τροπή που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικό δοκίμιο Un_str_Volakas_1_1 5 12 2019 Volakas 1 και παρουσιάστηκε παραπάνω. Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να δούμε ότι η εγκάρσια τροπή κατά την οποία

αρχίζει η διαστολή του δοκιμίου που σημαίνει διάδοση εφελκυστικών ρωγμών είναι 0.8/1000 που είναι συγκρίσιμη με την κρίσιμη εφελκυστική τροπή που υπολογίσαμε από τις δοκιμές κάμψης.



Εικ. 4.5. Μεταβολή της ογκικής τροπής με την εφελκυστική εγκάρσια ή ακτινική τροπή του κυλινδρικού δοκιμίου υποβαλλόμενου σε μονοαξονική θλίψη.

Πίνακας δοκιμής 4.8

Κωδικός δοκιμίου. αρχείου:.

[Bending_strain_Volakas_A_4 19 4 2019.xls](#)

Τοποθεσία: : Βόλακας, Ν. Δράμας

Τύπος δοκιμής: Κάμψη 3 σημείων

Μήκος δοκιμίου L [cm]: 29.6

Απόσταση σημείων στήριξης L [cm]: 25

Υψος δοκιμίου H [cm]: 5.1

Πλάτος δοκιμίου B [cm]: 4.905

Τρόπος φόρτισης: Έλεγχος τάσης

Συχνότητα λήψης δεδομένων: 1 Hz

Ρυθμός φόρτισης [kN/sec]: 0.5

Συσκευής προσαρμογής δοκιμίου: Ναι

Συσκευές μέτρησης: Μετατόπιση και φορτίο MTS, ένα LVDT 25mm, και 1 strain gage τύπου σταυρού για μέτρηση αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης, κολλημένων στο κέντρο της κάτω έδρας του δοκιμίου.

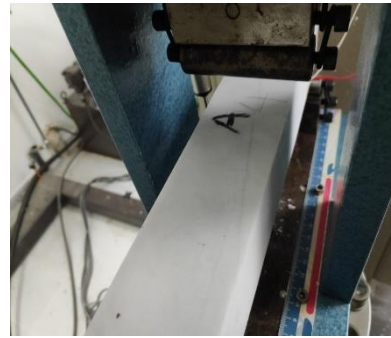
Παρατηρήσεις δοκιμής: Εφελκυστική ρωγμή που ξεκίνησε σχεδόν στο κέντρο της δοκού όπως αναφέρει η θεωρία.

Μέγιστη εφελκυστική τάση (οριζόντια) [MPa]: 7.26

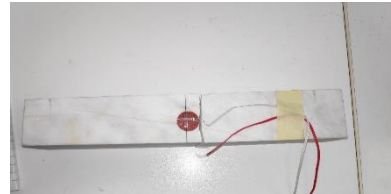
Μέγιστη τοπική εφελκυστική τροπή ϵ_f [-]: $0.215e-3$

Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]: 36.5 (maximum τιμή από το διάγραμμα E - σ)

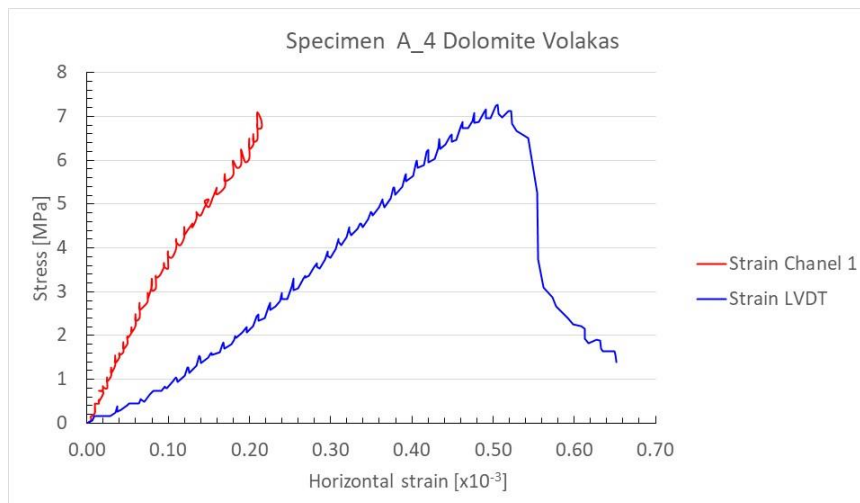
Λόγος Poisson: -



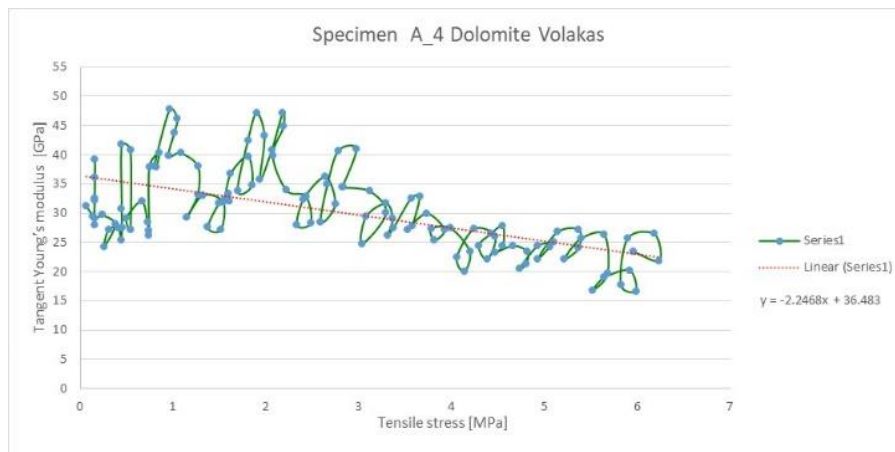
(α) Πριν τη θραύση



(β) Κάτω έδρα πρισματικού δοκιμίου μετά την κάμψη



(γ)



(δ)

Πίνακας δοκιμής 4.9

Κωδικός δοκιμίου. αρχείου: [Bending_strain_Volakas_Γ_1 19 4 2019.xls](#)

Τοποθεσία: Βόλακας, Ν. Δράμας

Τύπος δοκιμής: Κάμψη 3 σημείων

Μήκος δοκιμίου l [cm]: 29.6

Απόσταση σημείων στήριξης L [cm]: 25

Υψος δοκιμίου H [cm]: 5.255

Πλάτος δοκιμίου B [cm]: 5.086

Τρόπος φόρτισης: Έλεγχος τάσης

Συχνότητα λήψης δεδομένων: 1 Hz

Ρυθμός φόρτισης [kN/sec]: 0.5

Συσκευής προσαρμογής δοκιμίου: Ναι

Συσκευές μέτρησης: Μετατόπιση και φορτίο MTS, ένα LVDT 25mm, και 1 strain gage τύπου σταυρού για μέτρηση αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης, κολλημένων στο κέντρο της κάτω έδρας του δοκιμίου.

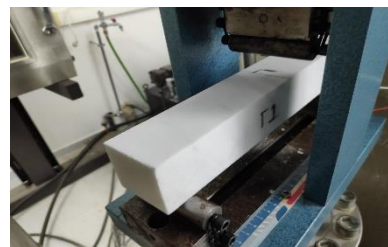
Παρατηρήσεις δοκιμής: Εφελκυστική ρωγμή που ξεκίνησε σχεδόν στο κέντρο της δοκού όπως αναφέρει η θεωρία.

Μέγιστη εφελκυστική τάση (οριζόντια) [MPa]: 8.459

Μέγιστη εφελκυστική τοπική τροπή ϵ_f [-]: 1.005×10^{-3}

Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]: 25 (maximum τιμή από το διάγραμμα E-σ)

Λόγος Poisson: -



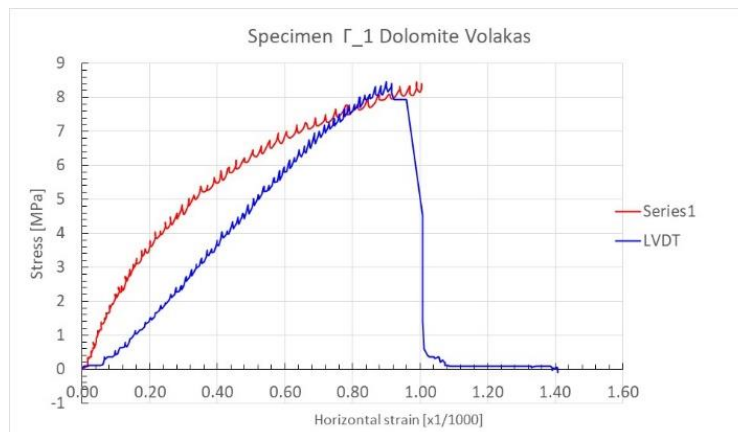
(α) Πριν τη θραύση



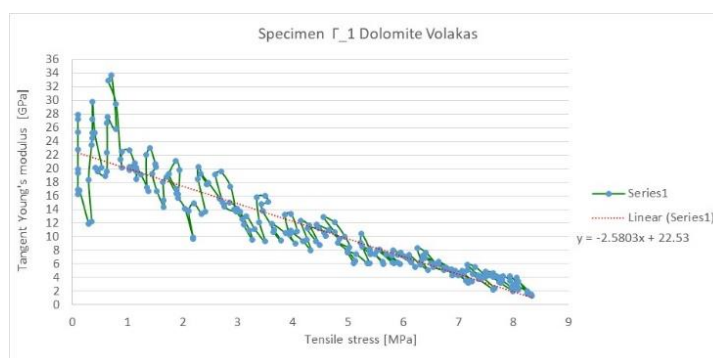
(β) Πριν τη θραύση



(γ) Κάτω έδρα πρισματικού δοκιμίου μετά την κάμψη



(δ)



(ε)

Πίνακας δοκιμής 4.10

Κωδικός δοκιμίου. αρχείο [Bending_strain_Γ2 19 4 2019.xls](#)

Τοποθεσία: : Βόλακας, Ν. Δράμας

Τύπος δοκιμής: Κάμψη 3 σημείων

Μήκος δοκιμίου l [cm]: 29.6

Απόσταση σημείων στήριξης L [cm]: 25

Υψος δοκιμίου H [cm]: 4.976

Πλάτος δοκιμίου B [cm]: 5.086

Τρόπος φόρτισης: Έλεγχος τάσης

Συχνότητα λήψης δεδομένων: 1 Hz

Ρυθμός φόρτισης [kN/sec]: 0.5

Συσκευής προσαρμογής δοκιμίου: Ναι

Συσκευές μέτρησης: Μετατόπιση και φορτίο MTS, ένα LVDT 25mm, και 1 strain gage τύπου σταυρού για μέτρηση αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης, κολλημένων στο κέντρο της κάτω έδρας του δοκιμίου.

Παρατηρήσεις δοκιμής: Εμφανιστική ρωγμή που ξεκίνησε σχεδόν στο κέντρο της δοκού όπως αναφέρει η θεωρία.

Μέγιστη εφελκυστική τάση (οριζόντια) [MPa]: 9.359

Μέγιστη εφελκυστική τοπική τροπή ϵ_f [-]: 0.590×10^{-3}

Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]: 30 (maximum τιμή από



Πριν τη θραύση

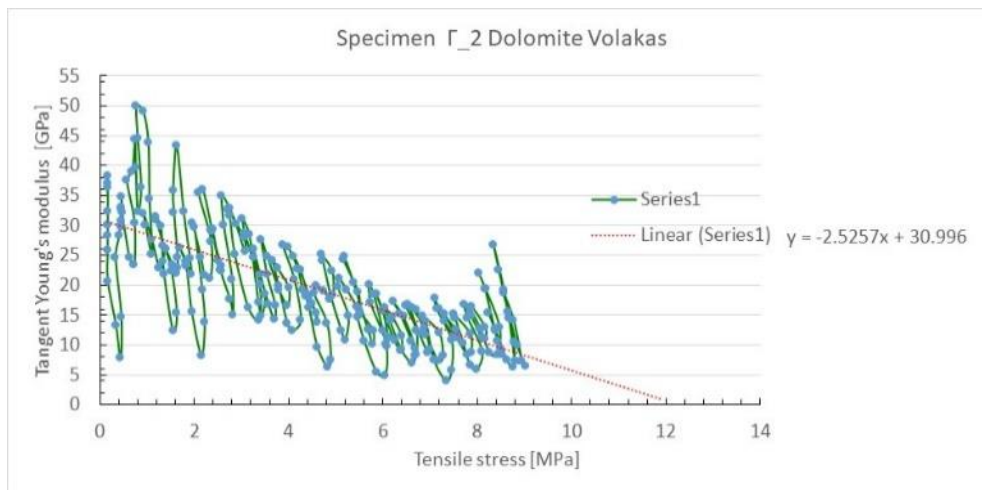
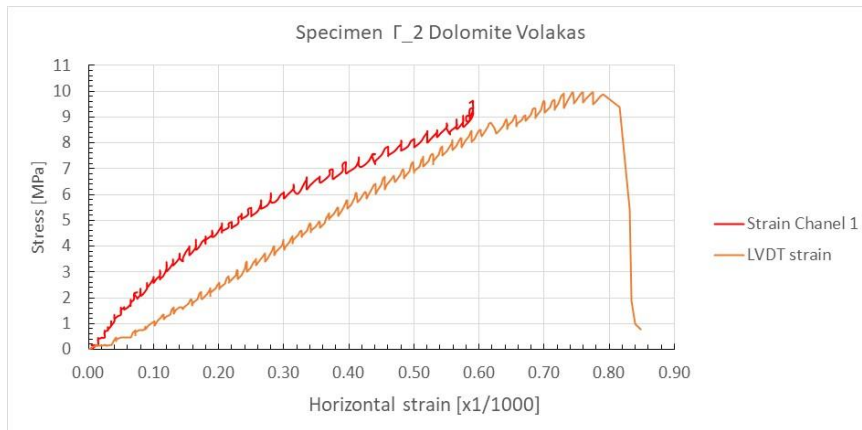


Πριν τη θραύση

το διάγραμμα E-σ)
Λόγος Poisson:



Κάτω έδρα πρισματικού δοκιμίου μετά την κάμψη



Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα – προτάσεις

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα πειραματική μελέτη είναι τα εξής:

- (i) Η αντοχή σε ανεμπόδιστη ή μονοαξονική θλίψη του μαρμάρου επηρεάζεται από την καλή ευθυγράμμιση του άξονα του δοκιμίου με τον άξονα της φόρτισης αλλά και από την παραλληλία της κάτω με την πάνω έδρα του δοκιμίου. Η επίδραση της μη-ομοαξονικότητας (μη-κεντρική φόρτιση) προκαλεί παρασιτικές καμπτικές τάσεις που απομειώνουν σημαντικά την αντοχή του δοκιμίου μαρμάρου.
- (ii) Αν διορθωθεί η τάση λαμβάνοντας υπόψιν και την ύπαρξη καμπτικής τάσης τότε η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη πρισματικών υψίκορμων δοκιμίων σε της της δοκιμές είναι 120 MPa που είναι ίση με την αντοχή που προέκυψε από δοκιμή σε κυλινδρικό δοκίμιο που ήταν απολύτως ευθυγραμμισμένο με τον άξονα της φόρτισης.
- (iii) Προκειμένου για υψίκορμα πρισματικά δοκίμια δεν φαίνεται να υπάρχει διαφορά της αντοχής με αυτήν που υπολογίζεται από δοκιμές θλίψης σε υψίκορμα κυλινδρικά δοκίμια.
- (iv) Οι τροπές που υπολογίζονται από την παραμόρφωση όλου του ύψους του δοκιμίου όταν χρησιμοποιούμε LVDT's είναι σημαντικά μεγαλύτερες από της αντίστοιχες τροπές που μετρώνται τοπικά με strain gages. Αυτό οφείλεται στην σημαντική παραμόρφωση των εδρών του δοκιμίου μέχρι να παραλληλισθούν σε κάποια αρχική φάση της δοκιμής (bedding effect).
- (v) Ο λόγος της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη της την αντοχή σε εφελκυσμό που βρέθηκε από της δοκιμές είναι της τάξης του 15 και μάλλον λίγο περισσότερο.
- (vi) Το μέτρο ελαστικότητας που πρέπει να μετράται από βρόχους αποφόρτισης-επαναφόρτισης στις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης παρουσιάζει εξάρτηση από την πλαστική τροπή. Αντίθετα το μέτρο ελαστικότητας στην έμμεση δοκιμή εφελκυσμού παρουσιάζει φθίνουσα γραμμική συμπεριφορά με την εφελκυστική τροπή.
- (vii) Η εγκάρσια εφελκυστική τροπή που μετράται στην ανεμπόδιστη θλίψη που αντιστοιχεί σε μηδενισμό της ογκικής τροπής και σχετίζεται με την θλιπτική τάση έναρξης ρωγμών είναι περίπου ίση με την κρίσιμη εφελκυστική τροπή που μετράται κατά τη διάρκεια δοκιμής εφελκυσμού.

Επειδή της γίνεται φανερό είναι σημαντικός ο ακριβής υπολογισμός της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και η σωστή ερμηνεία και ανάλυση των δοκιμών της ανεμπόδιστης θλίψης μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες προτάσεις για βελτίωση των εργαστηριακών αυτών δοκιμών:

- (I) Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μόνο με LVDT's πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον 2 τοποθετημένα σε αντιθετικές έδρες έτσι ώστε να μπορεί να υπολογισθεί η αξονική τροπή και η καμπτική τροπή.
- (II) Αν είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται και strain gages με ορθογωνικά στοιχεία τοποθετημένα αντιδιαμετρικά του δοκιμίου που προορίζεται για δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης για την εκτίμηση της τοπικής τροπής και της μέσης και αποκλίνουσας τροπής σε όλο το ύψος του δοκιμίου.

- (III) Στις δοκιμές κάμψης πρέπει να καταγράφεται εκτός από την δύναμη και η εφελκυστική τροπή στην κάτω ίνα του δοκιμίου ή το βέλος κάμψης ή και οι 2 αυτές ποσότητες παραμόρφωσης εφόσον η κρίσιμη εφελκυστική τροπή αντιστοιχεί στην θλιπτική τάση έναρξης διάδοσης των μικρορωγμών στο δοκίμιο που είναι περίπου το 40% - 50% της αντοχής του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη.

6. Βιβλιογραφία

A) Ελληνική

- Βακούλης, Θ., (2000). *«Λατομεία μαρμάρου στην αρχαία Μακεδονία και προσδιορισμός προέλευσης μαρμαρίνων έργων»*. Διδακτορική Διατριβή. Φιλοσοφική Σχολή, Τμήμα Ιστορίας και Αρχαιολογίας, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
- Βουγιούκας, Δ. & Χατζηπαναγής Ι.,(2001). *«Πληροφοριακά στοιχεία λειτουργούντων λατομείων και εργοστασίων επεξεργασίας μαρμάρων στην Αν. Μακεδονία και Θράκη»*, Έκθεση ΙΓΜΕ, Ξάνθη.
- Βουγιούκας, Δ., Χατζηπαναγής, Ι., Λασκαρίδης, Κ., Παπαϊωάννου, Ν., Παπατρέχας, Χ. & Χρίστου, Γ. (2001). *Ατλαντας Μαρμάρων*. ΙΓΜΕ, Ξάνθη.
- Δηλγεράκη, Ζ. (2014). *Μελέτη πετρογραφικών και φυσικομηχανικών ιδιοτήτων μαρμαροφόρων κοιτασμάτων από περιοχές των νομών Δράμας και Σερρών*. Πάτρα.
- Εξαδάκτυλος, Ε. Γ. (2006). *Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων*, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Εξαδάκτυλος, Ε. Γ. (2015). *Μηχανική Πετρωμάτων – Ελαστικότητα και Αντοχή*, Σημειώσεις Διδασκαλίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Ζαραβάτη, Κ., (2018). *Διαχείριση εξορυκτικών αποβλήτων από λατομεία μαρμάρου και αξιοποίηση τους. Μελέτη περίπτωσης στα ενεργά λατομεία μαρμάρων στην Περιφερειακή Ενότητα Δράμας*, Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Κομοτηνή.
- Θεοδωράτος, Δ. Κ. (1997). *Μια συλλογή από ελληνικά ορυκτά πετρώματα και μεταλλεύματα*. Εκδόσεις Χ. Κατωμέρης, Αθήνα.
- Ιστάντσο, Π. Χ., (2008). *Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς σε Κάμψη Μαρμάρου Διονύσου*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

- Κακλής Κ., Σ Μαυριγιαννάκης, Ζ. Αγιουτάντης και Γ. Μπαζδάνης (2010). *Διερεύνηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου Κομνηνών Νέστου*, Τιμητικός Τόμος στη Μνήμη του Καθ. Κωνσταντίνου Καβουρίδη, Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
- Καπετάνιος, Κ., Α., (2002). *Εκτίμηση του κύκλου ζωής του μαρμάρου και η συσχέτισή του με την ποιότητα περιβάλλοντος*. Μεταπτυχιακή εργασία στο Ευρωπαϊκό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα στη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας. Τμήμα Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων. Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- Κατερινόπουλος, Α. & Σταματάκης, Μ. (1995). *Εφαρμοσμένη Ορυκτολογία – Πετρολογία. Τα βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα και οι χρήσεις τους*. Τμήμα Γεωλογίας ΕΚΠΑ, Αθήνα
- Κοκκορού-Αλευρά, Γ., Πουπάκη, Ε., Ευσταθόπουλος, Α., Χατζηκωνσταντίνου, Α. (2014). *Corpus Αρχαίων Λατομείων: Λατομεία του ελλαδικού χώρου από τους προϊστορικούς έως τους μεσαιωνικούς χρόνους*. Έκδοση Τμήματος Αρχαιολογίας και Ιστορίας της Τέχνης, Φιλοσοφική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Κουτρούμπη, Δ., (2020). *Αξιοποίηση αποβλήτων κοπής μαρμάρου στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων*, Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- Νομικός, Π., (2015). *Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων*. Ελληνικά ακαδημαϊκά ηλεκτρονικά συγγράμματα και βοηθήματα.
- Παπατρέχας, Χ., (2011). *«Συσχέτιση φυσικομηχανικών ιδιοτήτων με το κοκκομετρικό μέγεθος και την ορυκτολογική σύσταση των ανθρακικών πετρωμάτων της Ανατολικής Μακεδονίας»*. Διδακτορική Διατριβή Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
- Πρασιανάκης Ι.Ν. (1985). *Μηχανική II : Κινηματική και Δυναμική του νυλικού σημείου και του απόλυτα στερεού σώματος*, Αθήνα 1985.
- Πρασιανάκης Ι.Ν. (1986). *Μηχανική III : μηχανική παραμορφωσίμων σωμάτων αντοχή των υλικών*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1986.
- Πρασιανάκης Ι.Ν., Μηλιός Ι.Γ. (1987). *Εργαστήρια πειραματικής αντοχής των υλικών*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1987
- Πρασιανάκης Ι.Ν., Μηλιός Ι.Γ. (1987). *Σημειώσεις πειραματική αντοχή των υλικών*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1987.
- Πρασιανάκης Ι.Ν., Μηλιός Ι.Γ., Κωνσταντέλλος Β. (1988). *Πειραματική αντοχή των υλικών*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1988.

- Σβουράκης, Κ. (2021). *Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του πετρώματος*. Διπλωματική εργασία Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Τσιραμπίδης, Α. (1996). *Τα ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα*. Εκδόσεις Επιστημονικών Βιβλίων και Περιοδικών, Θεσσαλονίκη, 193 – 206.
- Τσιραμπίδης, Α. (2000). *Πετρογραφικά χαρακτηριστικά, ορυκτολογική και χημική σύσταση και τύποι ελληνικών μαρμάρων*. Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου «Το Ελληνικό Μάρμαρο», Θεσσαλονίκη, 63-78.
- Χατζηπαναγής, Ι. & Βουγιούκας, Δ. (2005). *Τα μάρμαρα της ανατολικής Μακεδονίας. Βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν την εμπορικότητα τους σαν διακοσμητικά πετρώματα. Ποιότητες – Παραγωγή – Τιμές – Αποθέματα*. Πρακτικά 2^{ου} συνεδρίου της επιτροπής οικονομικής γεωλογίας, ορυκτολογίας & γεωχημείας, Σελ. 387 – 396. Θεσσαλονίκη.
- Χατζηπαναγιώτου, Κ., Γ. (1999). *Πετρογραφία*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

B) Αγγλική

- ASTM, “*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)*”, designation C 78-02
- ASTM, “*Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens,*” designation C215-02
- Carpinteri A.(1989), “*Decrease of apparent tensile and Bending Strength with specimen size*”, International Journal of Solids and Structures
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Gunay, E., Marsoglu, M. (2012). “*Use of waste marble powder in brick industry*”. Construction and Building Materials, 29, 449 – 457.
- Carpinteri A.(1989). “*Decrease of apparent tensile and Bending Strength with specimen size*”, International Journal of Solids and Structures
- Černý, Martin, “*Measurement of elasticity of composite materials reinforced by long fibres or fabric*” Institute of Rock Structure and Mechanics, ASCR, V Holešovičkách 41, 189 09 Prague 8, Czech Republic
- Exadaktylos, G.E. and Kourkoulis, S.K., (2002). “*Three-Point Bending of Transversely Isotropic Rock-Type Materials: An Analytical, Numerical and Experimental Study*”, 4th GRACM, Patra, Hellas.
- Gere, J.M. and Timoshenko, S.P., (1997). “*Mechanics of Materials*”, 4th Edition, PWS Publishing Company, Boston, USA.
- Kourkoulis, S.K., Exadaktylos, G.E. and Vardoulakis, I., (1999). “*U-Notched Dionysos-Pentelicon Marble Beams in Three Point Bending: The Effect of Nonlinearity, Anisotropy and Microstructure*”, International Journal of Fracture 98:
- Lama R.D & Vutukuri V.S., (1974) “*Handbook on Mechanical Properties of Rocks*”, Testing Techniques and Results
- ONAL, “*Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete*”, designation C 1399-04
- Timoshenko, S., (1986). “*Strength of Materials: Part 1, Elementary Theory and Problems*”, 3rd Edition, CBS Publishers and Distributors, Delhi, India.
- Timoshenko, S., (1986). “*Strength of Materials: Part 2, Advanced Theory and Problems*”, 3rd Edition, CBS Publishers and Distributors, Delhi, India.

- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., (1970). *“Theory of Elasticity”*, 3rd Edition, McGraw-Hill International Editions.
- Vardoulakis, I., Exadaktylos, G.E., Kourkoulis, S.K., (2001). *“Size Effect on Failure Load of Marble Beams Under Three Point Bending”*, 6th Congress of Mechanics, Vol. II (Aifantis & Kounadis Eds.), Thessaloniki, July 19-21, pp.140-148.

Γ) Ιστοσελίδες

<http://www.alexandrosae.gr/marmarotsimento>), (Προσπελάστηκε 24 Ιαν 2023).

<https://www.naftemporiki.gr/finance/1207938/othisi-sti-viomichania-marmarou-meso-tis-ypogeias-exoryxis-sta-koitasmata-tou-volaka/>, (Προσπελάστηκε 24 Ιαν 2023)

<https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/epixeiriseis/chaida-sto-cgtn-i-viomichania-marmarou-stin-ellada-ine-poli-simantiki-gia-tin-ikonomia-tis-choras/>,
(Προσπελάστηκε 24 Ιαν 2023).

<https://www.eagme.gr/> (Ελληνική Αρχή Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών)
(Προσπελάστηκε 25 Ιαν 2023)

<https://gaia.igme.gr/portal/apps/opsdashboard/index.html#/de18c9f57cf54843831a0c594bf3ae7c> (Ελληνικός Άτλαντας Μαρμάρων), (Προσπελάστηκε 25 Ιαν 2023)

<https://marbleguide.com/?s=Greece&cat=2> (Προσπελάστηκε 29 Ιαν 2023).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

«Α» Χαρακτηριστικά μαρμάρου Βώλακα Δράμας Λευκό

(Πηγή : <https://www.eagme.gr/>)

Βώλακα Δράμας Λευκό



Σύντομη περιγραφή: Αποτελείται από κρυσταλλική μάζα λευκού χρώματος, με τεφρά συσσωματώματα τα οποία κατά τόπους εξελίσσονται και σε ταινίες. Στα τεφρά συσσωματώματα υπάρχει συσσώρευση ασβεστίτη και μαρμαρυγία. Η κοκκομετρική ανάλυση έδειξε ότι πρόκειται για λεπτόκοκκο πέτρωμα.

Λιθολογία	Χρώμα	Περιφέρεια	Δήμος-Κοινότητα	Περιοχή
Δολομιτικό μάρμαρο	Λευκό	Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	Δράμα	Βώλακας

Γεωλογικά στοιχεία



Γεωλογία: Ανθρακικά και δολομιτικά μάρμαρα, λευκά συμπαγή, εν μέρει δολομιτωμένα και ως επί το πλείστον βιτουμενιούχα. Μέσα σε αυτά παρατηρούνται κρυσταλλικές δολομιτικές ενστρώσεις και φακοί από βαθύτεφρο μάρμαρο.

(Πηγή: Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας 1:50000, Φύλλο Ποταμοί).

Γεωλογική ηλικία: Μεσοζωικό

Γεωλογική ενότητα: Ζώνη Ροδόπης - Κατώτερη ενότητα – Ανθρακικά και δολομιτικά μάρμαρα

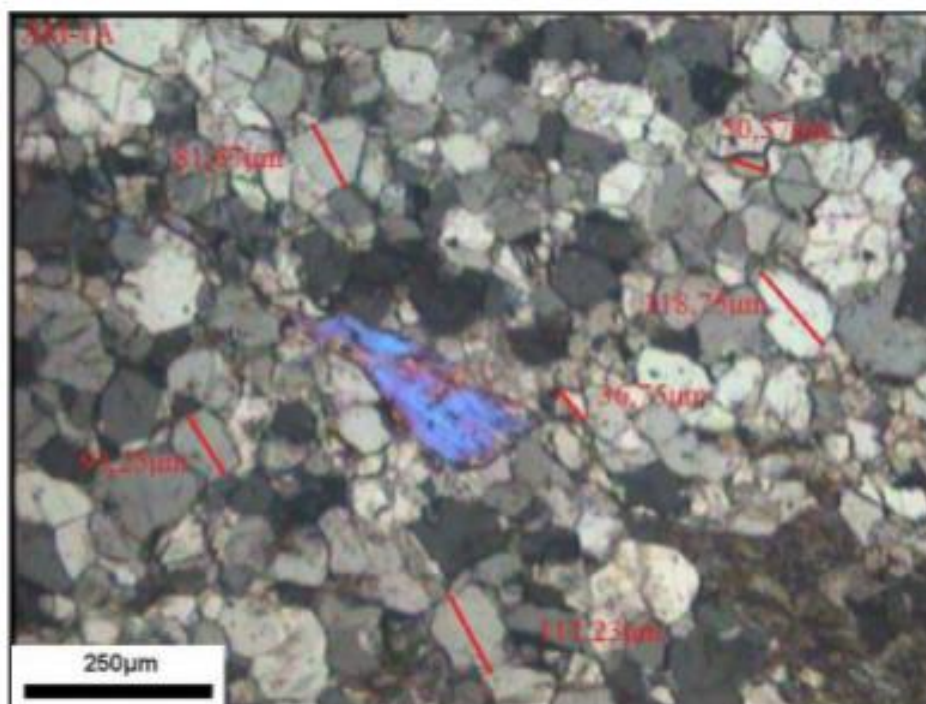
Εφαρμογές- χρήσεις

Περιγραφή: Το μάρμαρο Βώλακα εξορύσσεται στις πλαγιές του βουνού Φαλακρό και έχει πάρει το όνομά του από το κοντινό χωριό. Έχει λευκό χρώμα με γκρι και καφέ φλέβες. Η εξόρυξή του γίνεται είτε με επιφανειακή εκμετάλλευση ή υπογείως μέσω εκσκαφής σήραγγας. Είναι κατάλληλο για ποικίλες εφαρμογές, όπως επενδύσεις τοίχων και δαπέδων, κ.α.



Σύνταγμα – Σταθμός Μετρό: Ορθομαρμάρωση με μάρμαρο Βώλακα.

Πετρογραφία



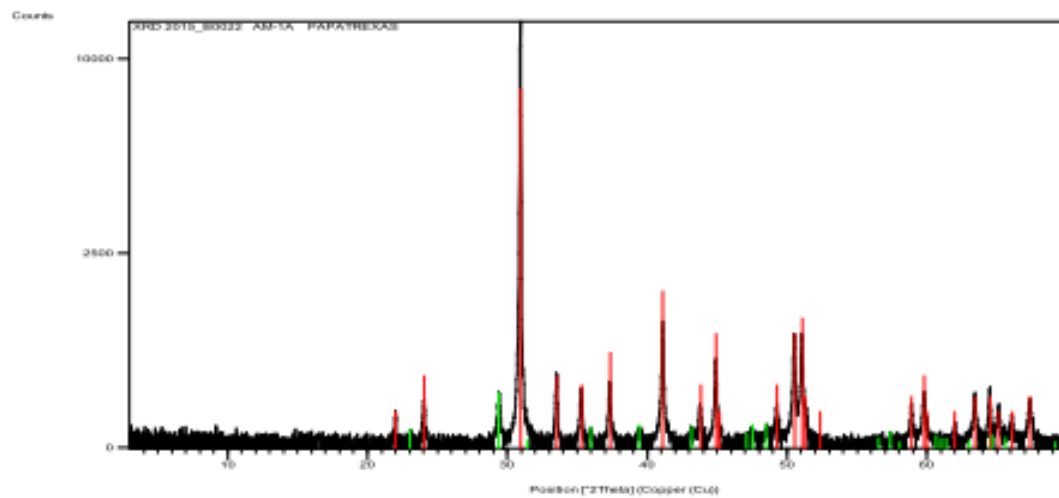
Περιγραφή: Η κύρια ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από δολομίτη σε ποσοστό 98%, και ασβεσίτη 2%. Ως επουσιώδη συμμετέχουν ο μοσχοβίτης, ο ιμμενίτης, ο απατίτης και το πλαγιόκλαστο. Οι κρύσταλλοι δολομίτη εμφανίζονται υπιδιόμορφοι, ενώ ο ασβεσίτης εντοπίζεται σε φλεβίδια και συσσωματώματα.

Ορυκτολογική σύσταση

Όπου δεν αναγράφεται ποσοστό %:

κ.ο. = κύρια ορυκτά, δ.ο. = δευτερεύοντα ορυκτά, ε.ο. = επουσιώδη ορυκτά

Δολομίτης (%)	Ασβεστίτης (%)	Μοσχοβίτης (%)	Πλαγιόκλαστο (%)	Ιλμενίτης (%)	Απατίτης (%)	
98	2	ε.ο.	ε.ο.	ε.ο.	ε.ο.	



Φυσικομηχανικές Ιδιότητες

Φαινόμενη πυκνότητα (EN 1936) kg/m ³	Ανοικτό πορώδες (EN 1936) % κ.ο.	Υδαταπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση (EN 13755) % wt	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (EN 1926) MPa	Αντοχή σε κάμψη υπό συγκεντρωμένο φορτίο (EN 12372) MPa
2810	0,6	0,2	178	5,5

Αντίσταση σε παγετό (EN 12371)			
Αντοχή σε κάμψη (EN 12372) μετά από αντίσταση σε παγετό, MPa	Αριθμός κύκλων	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (EN 1926) μετά από αντίσταση σε παγετό, MPa	Αριθμός κύκλων
5,3	48	-	-

Αντίσταση σε τριβή (EN 14157)		Φορτίο θραύσης στην οπή αγκύρωσης (EN 13364)	
Μέθοδος A, mm	Μέθοδος B - Böhme Τριβή Test, cm ³ / 50cm ²	Φορτίο θραύσης, N	Πάχος δοκιμών, mm
-	22	950	3

Αντίσταση σε ολισθηρότητα με χρήση εκκρεμούς (EN 14231)			Ενέργεια θραύσης (EN 14158), Joule	Θερμική αγωγιμότητα (EN 1745), W/m-K
Επιφάνεια δοκιμίου	Ολισθηρότητα — SRV			
	Ξηρή κατάσταση	Υγρή κατάσταση		
-	-	-	6	-

Χημική ανάλυση

Κύρια στοιχεία

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	LOI (%)
<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	19,45	31,20	1,29	0,11	<0,05	-	-	46,13

Ιχνοστοιχεία

V (ppm)	Cr (ppm)	Mn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)
2,0	25	5,0	1,3	7,0	2,5	18	0,9
Sr (ppm)	Cd (ppm)	Ba (ppm)	Pb (ppm)	Be (ppm)	Rb (ppm)	Bi (ppm)	U (ppm)
35	0,8	7,0	4,0	1,0	0,3	<0,1	0,1
Sc (ppm)	Y (ppm)	Th (ppm)	Sb (ppm)	Ta (ppm)	Nb (ppm)	Zr (ppm)	Sn (ppm)
3,4	0,7	0,2	0,2	0,7	0,4		
Ag (ppm)	B (ppm)	Mo (ppm)	W (ppm)	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Se (ppm)	Cs (ppm)
Tl (ppm)							

«Β» Χαρακτηριστικά μαρμάρου Βώλακα Δράμας Ημίλευκο

(Πηγή : <https://www.eagme.gr/>)

Βώλακα Δράμας Ημίλευκο



Σύντομη περιγραφή: Αποτελείται από κρυσταλλική μάζα λευκού χρώματος με τεφρόφαια συσσωματώματα. Τα γκρι συσσωματώματα φαίνεται να αποτελούνται από κρυστάλλους δολομίτη μικρότερης κοκκομετρίας από την ανακρυστάλλωση μικρότερων. Η κοκκομετρική ανάλυση έδειξε ότι πρόκειται για λεπτόκοκκο πέτρωμα.

Λιθολογία	Χρώμα	Περιφέρεια	Δήμος-Κοινότητα	Περιοχή
Δολομιτικό μάρμαρο	Ημίλευκο	Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	Δράμα	Βώλακας