



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Διπλωματική Εργασία

«Επίδραση της τριβής στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης»



Παναγιωτόπουλος Σπύρος

Εξεταστική Επιτροπή

Ξηρουδάκης Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής, Πολ. Κρήτης (Επιβλέπων)

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής, University of Kentucky

Λιόλιος Παντελής, Ε.ΔΙ.Π, Πολ. Κρήτης

Χανιά, Οκτώβριος 2025

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην εργασία αυτή αναλύονται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διάφορων πετρωμάτων με συγκεκριμένη έμφαση στο μάρμαρο και πως επηρεάζεται η τριβή αυτών κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας ανέλαβε ο Επίκουρος Καθηγητής Ξηρουδάκης Γεώργιος και την τριμελή εξεταστική επιτροπή αποτέλεσαν ο Καθηγητής Αγιουτάντης Ζαχαρίας του τμήματος Mining and Mineral Resources Engineering από το University of Kentucky καθώς και ο Κ. Λιόλιος Παντελής μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων της διπλωματικής μου Κ. Γεώργιο Ξηρουδάκη για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε στην μηχανική πετρωμάτων καθώς και για την αμέριστη βοήθεια κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον τον Κ. Στυλιανό Μαυριγιαννάκη για τις πολύτιμες συμβουλές, την άποψη συνεργασία και για την υπομονή του. Επίσης τον Κ. Παντελή Λιόλιο για τις πολύτιμες γνώσεις του στην μηχανική πετρωμάτων και στην διάτρηση και ανατίναξη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη που δέχθηκε να συμμετάσχει ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολλούς από τους συμφοιτητές μου: την Χρυσούλα, την Νικολέτα, τον Αντώνη, την Βάλια, τον Νίκο και τον Δημήτρη για την υποστήριξη που μου παρείχαν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ολύμπιο, την Γεωργία και την Κατερίνα για τις καθημερινές γνώσεις που μου παρείχαν καθώς και για τις όμορφες συζητήσεις όλα αυτά τα χρόνια. Επιπλέον, πολλούς παιδικούς φίλους: τον Θανάση, τον Αλέξανδρο, τον Δημήτρη, τον Γιώργο, τον Βαγγέλη και όλα τα μούτρα από την Ελάτεια (Δραχμάνι).

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου, που με στηρίζει σε κάθε μου βήμα.

Χανιά, Οκτώβριος 2025

Σπύρος Παναγιωτόπουλος

Περίληψη

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες και θεμελιώδεις πειραματικές μεθόδους στη μηχανική πετρωμάτων και στη γεωμηχανική, καθώς παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την αντοχή, την παραμορφωσιμότητα και τον μηχανισμό αστοχίας των δειγμάτων υπό αξονική φόρτιση. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές όπως η σχεδίαση υποστηριγμάτων σε υπόγειες κατασκευές, η εκτίμηση της ευστάθειας πρανών, η γεωμηχανική αξιολόγηση υποδομών και η μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας. Παρά την απλότητα της διάταξης, τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης επηρεάζονται σημαντικά από διάφορους παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε συστηματικά σφάλματα ερμηνείας των μετρήσεων.

Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες είναι η τριβή μεταξύ των πλακών φόρτισης και του δείγματος. Η ύπαρξη ή η μεταβολή του συντελεστή τριβής στα όρια του δείγματος περιορίζει τις πλευρικές διαστολές κοντά στα άκρα, προκαλεί μη ομοιόμορφη κατανομή τάσεων κατά μήκος του δείγματος και επιδρά τόσο στην καταγεγραμμένη αντοχή όσο και στη μορφολογία θραύσης (π.χ. barreling). Οι επιδράσεις αυτές είναι εντονότερες για χαμηλούς λόγους ύψους προς διάμετρο (H/D) και μπορούν να προκαλέσουν συστηματική υπερεκτίμηση της αντοχής και του φαινομενικού μέτρου ελαστικότητας, δυσχεραίνοντας τη συγκρισιμότητα μεταξύ εργαστηριακών δοκιμών και τη μεταφορά αποτελεσμάτων σε εφαρμογές πεδίου.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και λόγω της τριβής το σχήμα του δοκιμίου από κυλινδρικό τείνει να παραμορφωθεί σε σχήμα βαρελιού (barreling). Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως στόχο να ερμηνεύσει την επίδραση της τριβής στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και πώς αυτή επηρεάζει τις αντοχές των εν λόγω πετρωμάτων, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και τον λόγο Poisson.

Τα πετρώματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Ασβεστόλιθος Lecce
- Μάρμαρο A & B
- Ψαμμίτης (Καλαθάς Χανίων)

Κατά τον τρόπο αστοχίας των προαναφερθέντων πετρωμάτων παρατηρείται ότι υπερισχύει ο διατμητικός τύπος αστοχίας, καθώς 20 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με αυτόν τον τρόπο, 13 δοκίμια έσπασαν σε αξονική κατάτμηση, ενώ τα υπόλοιπα έσπασαν με την υοειδή αστοχία (Y-shaped failure). Από τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι η χρήση λιπαντικής ουσίας δίδει

μικρότερη αντοχή στο εξεταζόμενο πέτρωμα, σε σχέση με αυτή χωρίς χρήση αντιτριβικών μέσων. Με την προσθήκη βαζελίνης στα άκρα του δοκιμίου παρατηρείται μείωση της γωνίας τριβής σε όλα τα εξεταζόμενα πετρώματα. Η μεγαλύτερη διαφορά γίνεται αντιληπτή στο πέτρωμα του ασβεστόλιθου Lecce. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη της τριβής υπερεκτιμά τις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη που η διαφορά αυτή φτάνει έως και 6.9% για το μάρμαρο B.

Λέξεις Κλειδιά: Αντοχή Μονοαξονικής θλίψης, Επίδραση Τριβής, Πειραματική Διερεύνηση, Υπερεκτίμηση Αντοχών.

Abstract

Uniaxial compression tests are among the most widespread and fundamental experimental methods in rock mechanics and geotechnical engineering, as they provide critical information on the strength, deformability, and failure mechanisms of specimens under axial loading. The results of these tests are extensively used in applications such as the design of supports in underground works, slope stability assessment, geotechnical evaluation of infrastructure, and numerical modelling of rock mass mechanical behaviour. Despite the simplicity of the apparatus, uniaxial compression experiments are significantly influenced by various factors that may lead to systematic errors in the interpretation of measurements.

One of the most critical factors is the friction between the loading platens and the specimen. The presence of, or variations in, the friction coefficient at the specimen boundaries restrict shear stresses near the ends, produce a non-uniform stress distribution along the specimen, and affect both the recorded strength and the fracture morphology (e.g., barreling). These effects are more pronounced for low height-to-diameter ratios (H/D) and may cause a systematic overestimation of strength and apparent elastic modulus, complicating comparability between laboratory tests and the transfer of results to field applications.

Specifically, due to friction the cylindrical specimen shape tends to deform into a barrel-like form during testing (barreling). The objective of the present thesis is to interpret the effect of friction in uniaxial compression tests and to assess how it influences the strength, elastic modulus, and Poisson's ratio of the investigated rocks.

The rock types examined in this thesis are:

- Lecce limestone
- Marble A & B
- Sandstone (Kalathas, Chania)

In terms of failure mode, shear failure predominated: 20 of the 43 specimens failed in this mode, 13 specimens failed by axial splitting, while the remaining specimens failed by Y-shaped failure or rockburst. Lubrication of the specimen–platen interfaces resulted in lower measured uniaxial compressive strengths compared with tests performed without lubrication. The addition of Vaseline to the specimen ends reduced the friction angle for all tested rocks, with the most marked reduction observed for the Lecce limestone. It was further observed that

the presence of friction leads to an overestimation of uniaxial compressive strength, with the difference reaching up to 6.9% for Marble B.

Keywords: Uniaxial Compressive Strength, Friction Effect, Experimental Investigation, Strength Overestimation.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iii
Ευχαριστίες	iii
Περίληψη	iv
Abstract	vi
Περιεχόμενα	viii
Λίστα Πινάκων	x
Λίστα Εξισώσεων	x
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο	1
1.2 Σκοπός	6
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	7
2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	7
2.2 Συμβατικές τριαξονικές δοκιμές	8
2.3 Έμμεσος προσδιορισμός μονοαξονικής αντοχής	9
2.4 Μικρορωγμάτωση και παραμόρφωση του πετρώματος	10
2.5 Παράμετροι που επιδρούν στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή	11
2.5.1 Η γεωμετρία του δοκιμίου	11
2.5.2 Επίδρασης τριβής	13
2.5.3 Επίδραση ανισοτροπίας	13
2.5.4 Τρόπος Φόρτισης	14
2.5.5 Άλλοι παράμετροι	14
Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία	16
3.1 Δειγματοληψία – Προετοιμασία Δειγμάτων	17
3.2 Αντοχή Μονοαξονικής Θλίψης	22
3.3 Διάγραμμα Τάσης – Ανηγμένης Παραμόρφωσης	24
3.4 Ηλεκτρικά μηχανοσκόπετρα (strain gauges)	27
3.5 Γωνία Τριβής	29
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα	30
4.1 Τύποι αστοχίας κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	30
4.2 Αποτελέσματα μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων	33
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – Προτάσεις	42
5.1 Συμπεράσματα	42

5.2 Προτάσεις	44
Βιβλιογραφία	45
Παράρτημα Α.....	52
Α.1. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαλακού Ασβεστόλιθου <i>Lecce</i>	52
Α.2. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου τύπου Α.	59
Α.3. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου τύπου Β.	72
Α.4. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Ψαμμίτη (καλαθάς Χανίων).	91

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Το πείραμα της μονοαξονικής θλίψης: (α) διάταξη δοκιμής, (β) αναπαράσταση στον κύκλο του <i>moir</i> (Νομικός, 2015).	7
Σχήμα 2.2: (α) Συμβατικές τριαξονικές δοκιμές (Walton and Gaines, 2023), (β) προσδιορισμός κριτηρίων θραύσης των πετρωμάτων από τις συμβατικές τριαξονικές δοκιμές (Zeng, et al., 2019).	9
Σχήμα 2.3: Τρόποι αστοχίας για την αξιολόγηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής.	10
Σχήμα 2.4: Τύποι θραύσης σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης: (α) διατμητική θραύση, (β) αξονικός διαχωρισμός του δοκιμίου (Νομικός, 2015).	11
Σχήμα 2.5: Επίδραση του λόγου H/D στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή (Νομικός, 2015).	12
Σχήμα 2.6: (α) πλάκες φόρτισης με ακίδες, (β) επίδραση H/D στις καμπύλες τάσης παραμόρφωσης με την εισαγωγή τάσεων στα άκρα (Νομικός, 2015).	12
Σχήμα 2.7: Παραμόρφωση δοκιμίου σε μορφή βαρελιού.	13
Σχήμα 2.8: (α) Διεύθυνση δειγματοληψίας σε ανισότροπα πετρώματα (Li et al., 2021), (β) επίδραση στην μετρούμενη αντοχή στο μάρμαρο Δράμας (Xiroudakis et al., 2025).	14
Σχήμα 2.9: Δημιουργία καμπτικών ροπών από ύπαρξη ατέλειας σε δείγμα μαρμάρου (Xiroudakis, et al., 2025)	15
Σχήμα 3.1: Όγκος μαρμάρου μετά την δειγματοληψία.	17
Σχήμα 3.2: Εργαστηριακός πυρηνολήπτης.....	19
Σχήμα 3.3: Εργαστηριακό Δισκοπρίονο.	20
Σχήμα 3.4: Εργαστηριακός Λειαντής.	21
Σχήμα 3.5: Τελικά δοκίμια πριν την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Από τα αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται: ο ψαμμίτης, ο μαλακός ασβεστόλιθος <i>Lecce</i> και τα μάρμαρα τύπου Α.	21
Σχήμα 3.6: Παχύμετρο.	22
Σχήμα 3.7: Μηχανή MTS 815 (Material Test Systems).	23
Σχήμα 3.8: Τυπικά διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα πετρώματα (Αγιουτάντης, 2019).	25
Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για πετρώματα (Roberts, 1977).	26
Σχήμα 3.10: Διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης και υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (Νομικός, 2015).	27

Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων τύπου σταυρού (δύο κάθετα) στο δοκίμιο μαρμάρου (Αγιουτάντης, 2019).....	28
Σχήμα 3.12: Υπολογισμός τριβής με χαλύβδινη πλάκα και μοιρογνωμόνιο.	29
Σχήμα 4.1: Αξονική κατάτμηση κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Basu et al., 2013). ...	30
Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση διαφορετικών τρόπων αστοχίας σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Basu et al., 2013).	31
Σχήμα 4.3: (α) Διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου, (β) αξονική κατάτμηση.	32
Σχήμα 4.4: (α) νοειδή θραύση πετρώματος Lecce (Y-shaped failure), (β) νοειδή θραύση πετρώματος Ψαμμίτη (Y-shaped failure), (γ) Αξονική κατάτμηση μαρμάρου B (Axial splitting).	33
Σχήμα 4.5: Αθροιστική κατανομή Μαρμάρου Α με και χωρίς βαζελίνη.....	37
Σχήμα 4.6: Χαρακτηριστική αστοχία του δοκιμίου 11Α λόγω του φαινομένου των άκρων.....	37
Σχήμα 4.7: Αθροιστική κατανομή Μαρμάρου Β με και χωρίς βαζελίνη.	38
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα Αξονικής τάσης - παραμόρφωσης με χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων για το δοκίμιο 19Β.....	39
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα Αξονικής τάσης - παραμόρφωσης με χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων για το δοκίμιο 20Β.....	39

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση πετρωμάτων βάση του τύπου θραύσης και της αντοχής τους.....	31
Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Lecce.	33
Πίνακας 4.3: Μηχανικές ιδιότητες ψαμμίτη από την περιοχή του καλαθά.....	34
Πίνακας 4.4: Μηχανικές Ιδιότητες Μαρμάρου Α.....	34
Πίνακας 4.5: Μάζα δοκιμίων Ασβεστόλιθου Lecce με χρήση βαζελίνης.....	35
Πίνακας 4.6: Μάζα δοκιμίων μαρμάρου Α με χρήση βαζελίνης.	35
Πίνακας 4.7: Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Β.	36

Λίστα Εξισώσεων

Εξίσωση (3.1) Ορισμός τάσης.....	23
Εξίσωση (3.2) Διόρθωση του Obert.....	23
Εξίσωση (3.3) Διόρθωση του Protodyakonov.....	24
Εξίσωση (3.4) Αξονική παραμόρφωση.....	24
Εξίσωση (3.5) Τάση-παραμόρφωση.....	25
Εξίσωση (3.6) Ελαστικότητα.....	25
Εξίσωση (3.7) Παραμορφωσιακή ενέργεια.....	27
Εξίσωση (3.8) Λόγος Poisson.....	29

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες και θεμελιώδεις πειραματικές μεθόδους στη μηχανική πετρωμάτων και στη γεωμηχανική, καθώς παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την αντοχή, την ελαστικότητα και τον μηχανισμό αστοχίας των δειγμάτων υπό αξονική φόρτιση. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές όπως η σχεδίαση υποστηρίγμάτων σε υπόγειες κατασκευές, η εκτίμηση της ευστάθειας πρανών, η γεωμηχανική αξιολόγηση υποδομών και η μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας. Παρά την απλότητα της διάταξης, τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης επηρεάζονται σημαντικά από διάφορους παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε συστηματικά σφάλματα ερμηνείας των μετρήσεων.

Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες είναι η τριβή μεταξύ των πλακών φόρτισης και του δείγματος. Η ύπαρξη ή η μεταβολή του συντελεστή τριβής στα όρια του δείγματος περιορίζει τις πλευρικές διαστολές κοντά στα άκρα, προκαλεί μη ομοιόμορφη κατανομή τάσεων κατά μήκος του δείγματος και επιδρά τόσο στην καταγεγραμμένη αντοχή όσο και στη μορφολογία θραύσης (π.χ. barreling). Οι επιδράσεις αυτές είναι εντονότερες για χαμηλούς λόγους ύψους προς διάμετρο (H/D) και μπορούν να προκαλέσουν συστηματική υπερεκτίμηση της αντοχής και του φαινομενικού μέτρου ελαστικότητας, δυσχεραίνοντας τη συγκρισιμότητα μεταξύ εργαστηριακών δοκιμών και τη μεταφορά αποτελεσμάτων σε εφαρμογές πεδίου.

Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης είναι οι εξής:

- Η επίδραση της τριβής μεταξύ των πλακών φόρτισης και των δοκιμίων
- Η επίδραση της προετοιμασίας των δοκιμίων
- Η επίδραση του μεγέθους των δοκιμίων
- Η επίδραση του ρυθμού φόρτισης

Το πέτρωμα είναι ένα πορώδες υλικό που σχηματίστηκε μέσα από μακρά γεωλογική εξέλιξη. Οι μηχανικές του ιδιότητες είναι περίπλοκες, παρουσιάζοντας έντονη ανισοτροπία, ετερογένεια, μη γραμμικότητα και φαινόμενα που σχετίζονται με το σχήμα. Για τον σχεδιασμό των περισσότερων τεχνικών έργων, οι ιδιότητες του υλικού, όπως η αντοχή και η παραμόρφωση, έχουν καθοριστική σημασία. Συνεπώς, η αξιολόγηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων αποτελεί πάντα βασικό αντικείμενο του σχεδιασμού στη μηχανική πετρωμάτων. Διάφορες μέθοδοι, όπως φυσικές δοκιμές, θεωρητικές αναλύσεις

και αριθμητικές προσομοιώσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της αντοχής των πετρωμάτων (*Amadei 1996; Hudson et al. 1972; Liang 2005; Liang et al. 2013; Tang 1997; Tang et al. 2000a*).

Ανάμεσα στις έρευνες για την αντοχή των πετρωμάτων, πολλοί ερευνητές έχουν διαπιστώσει ότι τα φαινόμενα σχήματος (*shape effect*) και άκρων (*end effect*) παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μέτρηση της αντοχής του πετρώματος (*Mogi 1971, 1977; Qi et al. 2016; Wei & Chau 2009; Xu et al. 2017*). Είναι γενικά αποδεκτό ότι παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής με την αύξηση του μεγέθους του δοκιμίου. Ωστόσο, η επίδραση των άκρων και του σχήματος στην αντοχή του πετρώματος στο εργαστήριο χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Η επίδραση των άκρων είναι πανταχού παρούσα στις εργαστηριακές δοκιμές πετρωμάτων και προκαλείται υπό συμπίεση λόγω της ελαστικής αναντιστοιχίας μεταξύ του δοκιμίου και της πλάκας φόρτισης (*Choi et al. 1996; Hoskins & Horino 1968*). Οι *Bieniawski & Bernede (1979a,b)* επισήμαναν ότι στη μονοαξονική δοκιμή θλίψης, η επίδραση των άκρων επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του δείγματος, ιδίως όταν αυτό έχει μικρό ύψος. Μια πρωτοποριακή μελέτη έγινε από τον *Mogi (1971)*, ο οποίος εξέτασε την επίδραση των άκρων στην αντοχή δοκιμίων πετρωμάτων και πρότεινε μια μέθοδο μείωσης αυτής της επίδρασης. Παράλληλα, ο *Brady (1971)* υποστήριξε ότι ακόμη και με τη χρήση λιπαντικών είναι αδύνατον να εξαλειφθεί πλήρως η επίδραση της τριβής από τη φυσική δοκιμή. Πολλές παρόμοιες πειραματικές μελέτες αναφέρθηκαν αργότερα από άλλους ερευνητές (*Hallbauer et al. 1973; Hudson et al. 1971; Labuz & Bridell 1993; Song et al. 2012; Vardoulakis et al. 199*). Παρ' όλα αυτά, ο συντελεστής τριβής μεταξύ δοκιμίου και πλακών φόρτισης δεν είναι εύκολο να μετρηθεί ή να ελεγχθεί κατά τη δοκιμή. Επιπλέον, τα δημοσιευμένα αποτελέσματα δεν κατέδειξαν με σαφήνεια πώς η εσωτερική τάση και η μετατόπιση επηρεάζονται από την επίδραση των άκρων. Η επίδραση των άκρων παίζει διαφορετικούς ρόλους στην επίδραση της αντοχής του πετρώματος σε διαφορετικές εργαστηριακές δοκιμές.

Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι για τη μελέτη της επίδρασης των άκρων. Οι *Liu και Zeng (2005)* ανέλυσαν αριθμητικά με το ANSYS την τριβή στα δοκίμια πετρωμάτων, καταγράφοντας τις προοδευτικές μεταβολές της πλευρικής μετατόπισης και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης υπό διαφορετικούς συντελεστές τριβής, ωστόσο, δεν ανέλυσαν περαιτέρω την αιτία αυτού του φαινομένου ούτε τη σχέση μεταξύ συντελεστή τριβής και αντοχής. Οι *Wei & Chau (2009)* διερεύνησαν θεωρητικά και αριθμητικά την ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων σε εγκάρσια ισότροπα

κυλινδρικά δοκίμια που περιορίζονται από την τριβή των άκρων υπό μονοαξονική θλίψη, χωρίς όμως να εξετάσουν περαιτέρω την επίδραση των συνθηκών τριβής στις τάσεις και τους τρόπους θραύσης. Οι *Shi και Li (2009)* υποστήριξαν ότι η τριβή των άκρων σε πραγματική τριαξονική δοκιμή μπορεί να προκαλέσει το λεγόμενο ψευδές φαινόμενο ενδιάμεσης κύριας τάσης, το οποίο αυξάνεται με τον συντελεστή τριβής, και τόνισαν τη σημασία της μείωσης της επίδρασης των άκρων σε τέτοιες δοκιμές. Οι *Mai et al. (2013)* επισήμαναν επίσης ότι στη μονοαξονική δοκιμή θλίψης, η επίδραση των άκρων επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και τη μορφολογία θραύσης, ιδίως στα δοκίμια μικρού μήκους.

Τα παραπάνω δείχνουν ότι η επίδραση των άκρων έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων των πετρωμάτων. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη συστηματικών ερευνών για το πώς αυτή επηρεάζει την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονικές δοκιμές.

Όσον αφορά την επίδραση μεγέθους και σχήματος, οι ερευνητές έχουν διατυπώσει διαφορετικές απόψεις. Το φαινόμενο μεγέθους ή κλίμακος αφορά την επίδραση στην αντοχή των πετρωμάτων, το διαφορετικό μέγεθος τους (ίδιος λόγος μήκους/διαμέτρου). Αντίθετα, η επίδραση σχήματος η επίδραση στην αντοχή η χρήση διαφορετικού λόγο μήκους/διαμέτρου (*Pan et al. 2009; Thuro et al. 2001*), αλλά με ίδια διάμετρο ή ύψος. Σημαντικός αριθμός ερευνών έχει ασχοληθεί με την κατανόηση αυτών των φαινομένων στη μηχανική πετρωμάτων. Οι *Hoek και Brown (1980, 1997)* ήταν οι πρώτοι που επιχείρησαν να κατανοήσουν πειραματικά την επίδραση μεγέθους στα πετρώματα, ενώ οι *Bazant & Planas (1998)* προσέφεραν θεωρητική εμβάθυνση. Παρόμοιες μελέτες έγιναν και από άλλους ερευνητές (*Darlington et al. 2011; Gao et al. 2014; Van Mier 1996; Pells 2004; Wei et al. 2017, 2018*). Επιπλέον, η σχέση μεταξύ μεγέθους/σχήματος έχει μελετηθεί από διάφορες πειραματικές μελέτες (*BaŽant 1997; Liu et al. 1998; Masoumi et al. 2015*). Με την εξέλιξη του εξοπλισμού δοκιμών και των αριθμητικών μεθόδων, διερευνήθηκε επίσης η επίδραση του σχήματος, της γεωμετρίας και του ρυθμού παραμόρφωσης στις δυναμικές μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων (*Dai et al. 2016; Feng et al. 2017; Meng et al. 2016; Qi et al. 2016; Zou & Wong 2016*).

Γίνεται σαφές ότι οι μελέτες για το φαινόμενο άκρων και το φαινόμενο σχήματος διεξάγονται σχεδόν ανεξάρτητα. Οι συνδυασμένες επιδράσεις σχήματος και τριβής άκρων σπάνια εξετάζονται στη μηχανική συμπεριφορά του βράχου, όπως στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στα πρότυπα αστοχίας. Στις περισσότερες έρευνες για το φαινόμενο

άκρων, η μορφή αστοχίας, η παραμόρφωση και τα χαρακτηριστικά αντοχής μελετήθηκαν με εσωτερικά πειράματα, χρησιμοποιώντας τραχείες ή λείες επιφάνειες μεταξύ πλακών φόρτισης και δείγματος. Ωστόσο, ήταν δύσκολο να προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής μεταξύ των πλακών και του δείγματος, που αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στις εργαστηριακές δοκιμές πετρωμάτων (*Gaffney 1976*). Παράλληλα, όσον αφορά το φαινόμενο σχήματος, παρότι έχουν προκύψει πολλές εξισώσεις από θεωρητική ανάλυση και πειραματικές μελέτες, λίγες από αυτές λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των άκρων με βάση τα πειραματικά δεδομένα.

Οι *Min Gao et al. (2018)* πρότειναν ότι η επίδραση των άκρων υπάρχει στις μονοαξονικές δοκιμές θλίψης και μπορεί να επηρεάσει τόσο τον τρόπο αστοχίας όσο και την αντοχή του δοκιμίου του πετρώματος. Επιπλέον, το σχήμα και η επίδραση των άκρων ασκούν συνολική (συνδυασμένη) επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Η εισαγωγή πλευρικών τάσεων (confining pressure effect), που προκύπτει από τον περιορισμό των άκρων μεταξύ των πλακών φόρτισης και του δοκιμίου, μπορεί να αυξήσει την αντοχή του πετρώματος στη μονοαξονική δοκιμή θλίψης. Επιπλέον, με την αύξηση του λόγου διαστάσεων του δοκιμίου (aspect ratio), η επίδραση του φαινομένου της συγκρατούσας πίεσης μειώνεται.

Στην συμβατική τριαξονική δοκιμή συμπίεσης, ο *Mogi (2007)* κατέληξε ότι η επίδραση των άκρων στη τριαξονική δοκιμή μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την αύξηση της πλευρικής συγκράτησης. Στις πραγματικές τριαξονικές δοκιμές συμπίεσης χρησιμοποιούνται συστηματικά υλικά μείωσης τριβής για τον περιορισμό των οριακών περιορισμών:

- Ο *Mogi (2007)* χρησιμοποίησε φύλλα τεφλόν (Teflon) και λεπτά χάλκινα παρεμβλήματα (shims) ως λιπαντικά.
- Οι *Takahashi & Koide (1989)* χρησιμοποίησαν λεπτά χάλκινα φύλλα και φύλλα τεφλόν με σιλικονούχο γράσο.
- Οι *Haimson & Chang (2000)* εισήγαγαν λεπτά χάλκινα παρεμβλήματα και στεατικό λιπαντικό στις επαφές δείγματος–πλακών χάλυβα.

Ανάλογα με την κατάσταση των εμπλεκόμενων υλικών, οι καταστάσεις τριβής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως: στερεή τριβή, οριακή (boundary) τριβή, μικτή (mixed) τριβή και ρευστή (fluid) τριβή (*Grote & Antonsson, 2009*). Η στερεή τριβή εμφανίζεται σε άμεσες επαφές όπου οι ζώνες υλικού έχουν στερεές ιδιότητες, η οριακή τριβή αναφέρεται στα οριακά στρώματα στις επαφές, καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα μοριακό φιλμ που προέρχεται από ένα λιπαντικό, η ρευστή τριβή συμβαίνει όταν μεταξύ των επιφανειών τριβής δημιουργείται ένα λιπαντικό φιλμ που μειώνει τη φθορά, η μικτή τριβή είναι ένας συνδυασμός

οριακής και ρευστής τριβής. Σύμφωνα με το *Handbook of Mechanical Engineering* (Grote και Antonsson, 2009), το λιπαινόμενο δείγμα πετρώματος τα εύρη τιμών του μ (για την οριακή και τη μικτή τριβή), είναι 0.1–0.2 και 0.01–0.1, αντίστοιχα.

Για λιπαινόμενες επαφές δείγματος–πλακών χάλυβα αναφέρεται (He et al., 2014) ότι οι μικρότερες τιμές του μ μπορεί να φθάσουν ως το 0.024 και (Rashed & Peng, 2015) μεγαλύτερες τόσο ως το 0.1, που σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις να φθάσουν το 0.39 (Hawkes & Mellor, 1970). Μια τιμή $\mu = 0.05$ αναφέρεται στους Labuz & Bridell (1993), ενώ στο *Handbook on Mechanical Properties of Rocks* από τους Vutukuri et al. (1974) δίνεται εύρος $\mu = 0.04 \pm 0.003$. Συνεπώς, η τριβή στις λιπαινόμενες επαφές δείγμα–πλάκας μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση μικτής τριβής. Κατά συνέπεια, το εύρος $\mu = 0.05$ –0.1 φαίνεται ως κατάλληλη επιλογή για την αναπαράσταση της τριβής σε λιπαινόμενες επαφές δείγματος–πλακών χάλυβα.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι συνθήκες φόρτισης σε δοκιμές ολίσθησης (ή άμεσης διάτμησης) σχεδιασμένες ειδικά για τη μέτρηση του συντελεστή τριβής διαφέρουν από αυτές στις εργαστηριακές δοκιμές αντοχής πετρωμάτων. Διάφορες διατάξεις δοκιμής μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα (Hawkes & Mellor, 1970).

Στο *Handbook of Mechanical Engineering* αναφέρεται ότι η τριβή δεν αποτελεί σταθερή ιδιότητα ενός υλικού αλλά εξαρτάται από μεταβλητές, π.χ. το φορτίο και τα στοιχεία που εμπλέκονται στη διαδικασία τριβής. Η εφαρμοζόμενη ορθή τάση σε μια δοκιμή ολίσθησης δεν είναι υψηλή, συνήθως ισοδυναμεί ή είναι λίγο υψηλότερη από την πίεση που προκαλείται από το βάρος του κινούμενου σώματος. Στις εργαστηριακές δοκιμές αντοχής πετρωμάτων, η εφαρμοζόμενη ορθή τάση στις λιπαινόμενες επαφές είναι συνήθως πολύ υψηλότερη από εκείνη που χρησιμοποιείται στις δοκιμές ολίσθησης. Επομένως, οι τιμές μ για τις λιπαινόμενες επαφές υπό υψηλές κάθετες τάσεις μπορεί να διαφέρουν από αυτές που αποκαλύπτονται από τις δοκιμές ολίσθησης, και η αποτελεσματικότητα της χρήσης λιπαντικών στη μείωση της επίδρασης των άκρων απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

Η αύξηση του ρυθμού φόρτισης οδηγεί σε υψηλότερες τιμές αντοχής για το δοκίμιο. Σε εξαιρετικά υψηλούς ή πολύ χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται στην καμπύλη τάσης–παραμόρφωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα έντονες. Παρ’ όλα αυτά, η μεταβολή του ρυθμού φόρτισης από $10^{-8}/s$ έως $10^2/s$ έχει ως αποτέλεσμα απλώς τον διπλασιασμό της μετρούμενης αντοχής. Οι Walton & Gaines, (2023) παρατήρησαν ότι με βάση τη σύγκριση μεταξύ πρότυπων δοκιμών υπό έλεγχο φόρτισης και υπό έλεγχο

παραμόρφωσης, κατέληξαν στο ότι οι δοκιμές υπό έλεγχο παραμόρφωσης αποδίδουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές μέγιστης αντοχής, ακόμη και αν στις δύο περιπτώσεις τηρούνται οι αντίστοιχες προτεινόμενες μέθοδοι ISRM και πρότυπα ASTM. Επιπλέον, οι διαφορετικοί τρόποι ελέγχου παράγουν διαφορετικές αποκρίσεις ογκομετρικής παραμόρφωσης μέχρι το σημείο της μέγιστης αντοχής. Κατά την πρότυπη διαδικασία της ISRM (1979) επιτρέπεται μόνο η μηχανική κατεργασία των άκρων των δοκιμίων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για να ερμηνευτεί η επίδραση της τριβής πραγματοποιήθηκε χρήση λιπαντικών μέσων.

Ο συντελεστής τριβής (μ) στις επαφές δείγματος – πλακών χάλυβα αποτελεί σημαντική παράμετρο που καθορίζει την επίδραση των άκρων στις εργαστηριακές δοκιμές πετρωμάτων (Gaffney, 1976). Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών προσδιορισμού της κλίσης για τον προσδιορισμό ενός ρεαλιστικού εύρους τιμών του μ για τις επαφές δείγματος–πλακών χάλυβα. Για επαφή δείγματος–πλάκας χάλυβα που είναι γυαλισμένη, λεία και ξηρή χωρίς λιπαντικά, η μέση γωνία κλίσης είναι περίπου 15-25°, που αντιστοιχεί σε στατικό συντελεστή τριβής $\mu \approx 0.27-0.47$. Για την μείωση της τριβής χρησιμοποιήθηκε η βαζελίνη, ενώ εναλλακτικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ορυκτέλαιο, γράσο ή τεφλόν.

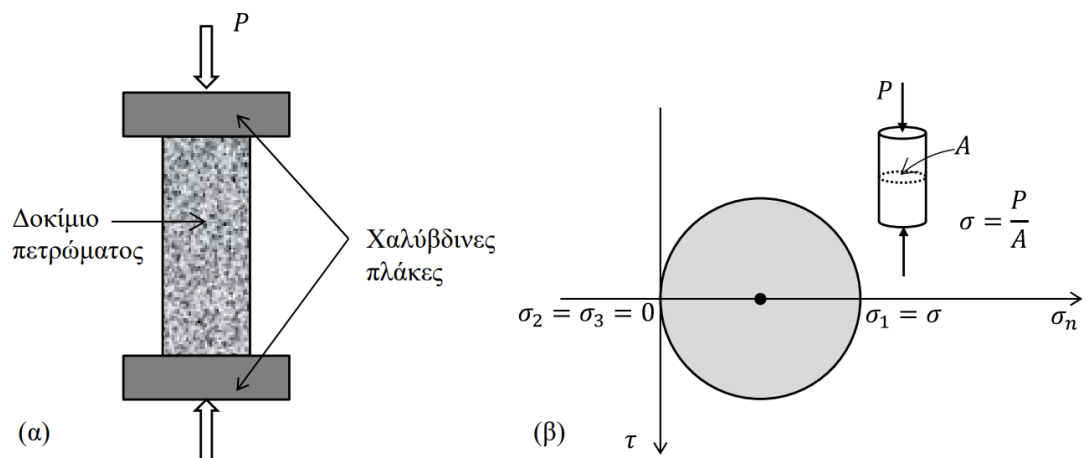
1.2 Σκοπός

Όπως προαναφέρθηκε η ύπαρξη της τριβής στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης επηρεάζει αισθητά την αντοχή του εκάστοτε πετρώματος, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και τον λόγο Poisson. Πιο συγκεκριμένα, με την ύπαρξη αυτής καταγράφονται ψευδείς τιμές στην αντοχή των πετρωμάτων κατά την διάρκεια της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη, διότι δημιουργούνται διατμητικές τάσεις στα σημεία επαφής του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης, γι' αυτό τον λόγο αναφέρονται ως «ψευτοαντοχές». Επιπλέον, κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και λόγω της τριβής το σχήμα του δοκιμίου από κυλινδρικό τείνει να παραμορφωθεί σε σχήμα βαρελιού (barreling). Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως στόχο να ερμηνεύσει την επίδραση της τριβής στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και πως αυτή επηρεάζει τις αντοχές των εν λόγω πετρωμάτων, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και τον λόγο Poisson. Όπως προαναφέρθηκε, είναι πολύ δύσκολη η ερμηνεία/εξάλειψη αυτής σε εργαστηριακές δοκιμές καθώς παρόλο που με την χρήση αντιτριβικών μέσων (π.χ. λιπαντικά) δεν μπορεί να εξαλειφθεί. Έτσι, η παρούσα διπλωματική εργασία καλείται να λύσει το προαναφερθέν πρόβλημα και να προτείνει περεταίρω τρόπους για την σωστή μέτρηση της τριβής σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compression Test, UCS) ανήκει στις παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες εργαστηριακές διαδικασίες για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ένα κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος τοποθετείται ανάμεσα σε δύο παράλληλες χαλύβδινες πλάκες και υποβάλλεται σε αξονική θλίψη (Σχήμα 2.1α). Κύριος σκοπός της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας (Young's modulus) και του λόγου Poisson (Poisson's ratio) του δοκιμίου.



Σχήμα 2.1: Το πείραμα της μονοαξονικής θλίψης: (α) διάταξη δοκιμής, (β) αναπαράσταση στον κύκλο του mohr (Νομικός, 2015).

Η ιδανική εντατική κατάσταση που επιδιώκεται να επιβληθεί στο δοκίμιο είναι μονοαξονική, όπου μόνο η κύρια τάση σ_1 είναι μη μηδενική ($\sigma_1 = \sigma$), ενώ οι άλλες δύο κύριες τάσεις είναι μηδενικές ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), όπως φαίνεται και στον κύκλο Mohr του Σχήματος 2.1β. Η φόρτιση εφαρμόζεται σταδιακά και με σταθερό ρυθμό, παράλληλα προς τον άξονα του δοκιμίου, μέχρι την αστοχία του. Η αξονική τάση θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη και υπολογίζεται ως το πηλίκο του ασκούμενου φορτίου προς την αρχική διατομή του δοκιμίου. Η μέγιστη τάση του δοκιμίου την στιγμή της αστοχίας ορίζεται ως αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Νομικός, 2015 και βιβλιογραφίες εντός).

Το πλεονέκτημα αυτής της δοκιμής έγκειται στην απλότητα της αρχής της και στον ελάχιστο πολύπλοκο εξοπλισμό που απαιτεί. Επιπλέον, διευκολύνει τη λήψη πρόσθετων μετρήσεων, όπως των αξονικών και πλευρικών παραμορφώσεων, της ταχύτητας διάδοσης ελαστικών κυμάτων και της ακουστικής εκπομπής. Ωστόσο, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μπορεί να είναι πολύπλοκη, καθώς αυτά επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες

εκτέλεσης της δοκιμής. Όπως επισημαίνουν οι *Brady & Brown (2006)*, η απόκριση ενός πετρώματος εξαρτάται τόσο από τη φύση και την ορυκτολογική σύστασή του, όσο και από την κατάσταση του ίδιου του δοκιμίου. Για πετρώματα παρόμοιας σύστασης, η μετρούμενη αντοχή τείνει να μειώνεται με την αύξηση του πορώδους, του βαθμού αποσάθρωσης, της προϋπάρχουσας μικρορωγμάτωσης και της περιεκτικότητας σε υγρασία (*Νομικός, 2015 και βιβλιογραφίες εντός*).

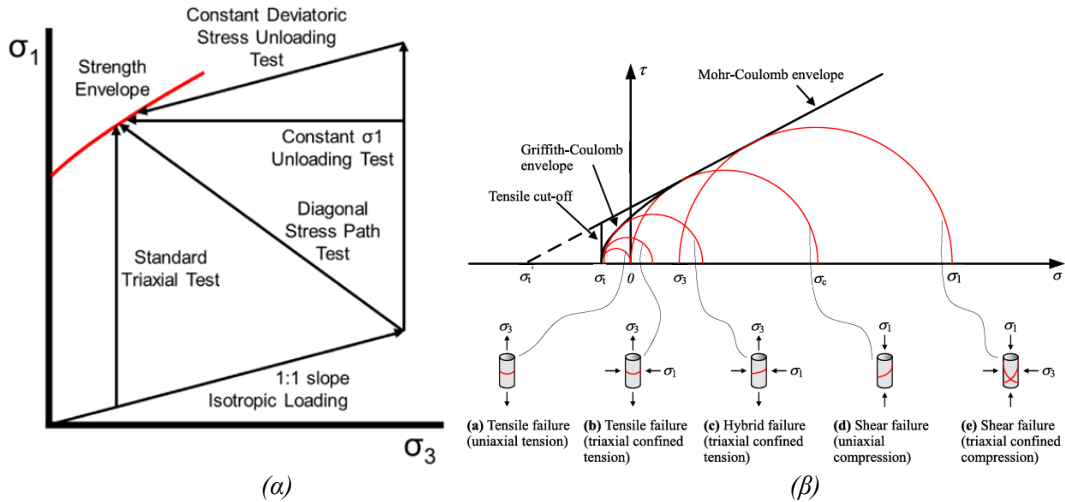
2.2 Συμβατικές τριαξονικές δοκιμές

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης αποτελεί μέλος μιας ομάδας δοκιμών σε κυλινδρικά δοκίμια, των συμβατικών τριαξονικών δοκιμών. Οι συμβατικές τριαξονικές δοκιμές για την εκτίμηση της αντοχής άθικτου πετρώματος πραγματοποιούνται με την ύπαρξη πλευρικών υποστηρικτικών τάσεων όπου εφαρμόζεται σταθερή ελάχιστη κύρια τάση ($\sigma_2 = \sigma_3$) στο δοκίμιο και ακολουθεί μονοτονική αύξηση της μέγιστης κύριας τάσης (σ_1) κατά την αξονική διεύθυνση. Ωστόσο, αυτή η διαδρομή τάσεων δεν αντανακλά τη διαδρομή που πραγματικά υφίσταται το πέτρωμα στο πλαίσιο των περισσότερων τεχνικών εφαρμογών, όπου η υποστηρικτικές τάσεις συνήθως μειώνονται (λόγω των εκσκαφών) ενώ η μέγιστη κύρια τάση (βάρος) παραμένει σταθερή σε σχέση με την αρχική επιτόπου (*in-situ*) κατάσταση. Για το σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί μια σειρά διαδρομών με σταδιακή μείωσης των πλευρικών τάσεων που παρουσιάζονται στο [Σχήμα 2.2α](#). Αυτές περιλαμβάνουν τις εξής βασικές διαμορφώσεις:

1. **Στάνταρ (συμβατικές) τριαξονικές δοκιμές**, όπου το αξονικό φορτίο αυξάνεται υπό σταθερή πλευρική πίεση
2. **Δοκιμές με διαγώνια διαδρομή τάσεων**, όπου η πλευρική πίεση και το αξονικό φορτίο μειώνονται ταυτοχρόνως με προκαθορισμένους ρυθμούς
3. **Δοκιμές αποφόρτισης με σταθερή σ_1** , όπου το αξονικό φορτίο διατηρείται σταθερό και η πλευρική πίεση αποφορτίζεται
4. **Δοκιμές αποφόρτισης με σταθερή αποκλίνουσα (deviatoric) τάση**, όπου το αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση μειώνονται με ισοδύναμο ρυθμό ώστε να διατηρείται σταθερή η αποκλίνουσα τάση.

Εκτός από τις παραπάνω δοκιμές υπάρχει και μια σειρά δοκιμών στις οποίες η αξονική τάση δεν είναι η μέγιστη κύρια τάση ($\sigma_\alpha = \sigma_3$, $\sigma_r = \sigma_1 = \sigma_2$). Αυτά τα πειράματα καλούνται τριαξονικά πειράματα επέκτασης (*extension tests*) που ειδική περίπτωση αποτελεί το πείραμα

του έμμεσου εφελκυσμού. Όλες αυτές οι δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του κριτηρίου αστοχίας του υπό εξέταση υλικού (Σχήμα 2.2β), βέβαια σε αυτές δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης (σ_2) που μπορεί να προσδιορισθεί μόνο με την εφαρμογή πραγματικών τριαξονικών δοκιμών (Mogi K., 1971).

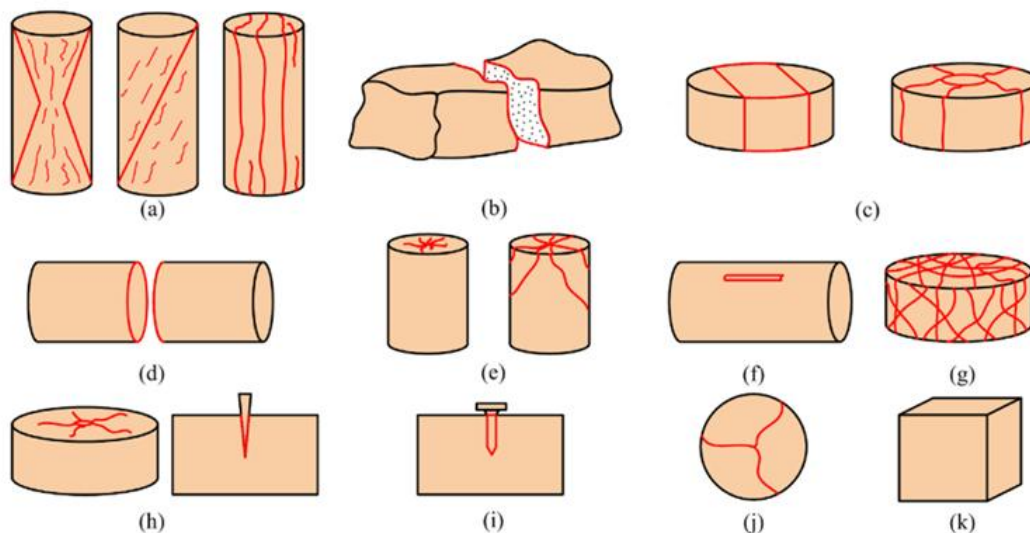


Σχήμα 2.2: (α) Συμβατικές τριαξονικές δοκιμές (Walton and Gaines, 2023), (β) προσδιορισμός κριτηρίων θραύσης των πετρωμάτων από τις συμβατικές τριαξονικές δοκιμές (Zeng, et al., 2019).

2.3 Έμμεσος προσδιορισμός μονοαξονικής αντοχής

Η μονοαξονική αντοχή όπως προαναφέρθηκε είναι μια βασική παράμετρος του πετρώματος και συσχετίζεται άμεσα με τα ευρήματα σε πολλά πειράματα της μηχανικής πετρωμάτων. Η συσχέτιση που υπάρχει με αυτά τα πειράματα μπορεί να βοηθήσει στον έμμεσο υπολογισμό της μονοαξονικής αντοχής. Στο άρθρο ανασκόπησης των Xie et al. (2025) παρουσιάζουν διάφορες έρευνες που έχουν χρησιμοποιήσει σύγχρονες τεχνικές, όπως νευρωνικά δίκτυα και γενετικούς αλγορίθμους, για την εκτίμηση των μονοαξονικής αντοχής από πειράματα όπως (Σχήμα 2.3):

- Πείραμα σημειακής φόρτισης (Point load test).
- Δοκιμές πρόσκρουσης.
- Δοκιμές σε στρέψη.
- Δοκιμές διεισδύσεως.
- Δοκιμές χάραξης (Scratch test) ή απόξεσης Cerchar abrasivity.
- Μη καταστροφικές δοκιμές όπως το σφυρί ανάκρουσης Schmidt, μέτρηση ταχυτήτων ηχητικών κυμάτων κ.α



Σχήμα 2.3: Τρόποι αστοχίας για την αξιολόγηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής.

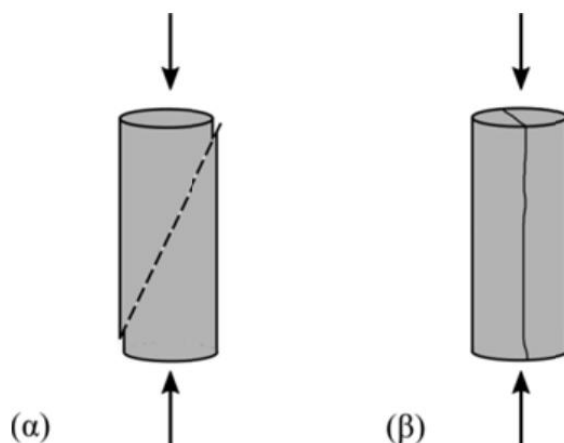
2.4 Μικρορωγμάτωση και παραμόρφωση του πετρώματος

Στη μονοαξονική θλίψη, τα περισσότερα πετρώματα εμφανίζουν κυρίως ψαθυρή συμπεριφορά. Η ψαθυρή θραύση μπορεί να θεωρηθεί ως μια φάση της καταστροφής του πετρώματος, κατά την οποία παρατηρείται αστοχία χωρίς προηγούμενη σημαντική παραμόρφωση ή προειδοποιητικά σημάδια. Πρόκειται για μια απλουστευμένη προσέγγιση, αφού δεν εξηγεί πλήρως τους φυσικούς μηχανισμούς που οδηγούν στη θραύση. Ωστόσο, από φαινομενολογική σκοπιά, η θεώρηση αυτή αρκεί, ιδιαίτερα όταν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μορφή θραύσης και στη μέγιστη αντοχή του πετρώματος, η οποία αποτελεί βασικό στοιχείο για τον σχεδιασμό μεταλλευτικών και τεχνικών έργων (Νομικός, 2015 και βιβλιογραφίες εντός).

Σε εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης αναγνωρίζονται κυρίως δύο τύποι ψαθυρής θραύσης: πρώτον, η διατμητική θραύση (Σχήμα 2.4α), όπου η επιφάνεια θραύσης σχηματίζεται με γωνία μικρότερη των 45° ως προς την αξονική τάση, με τις κινήσεις των τμημάτων του δοκιμίου να γίνονται παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης. Δεύτερον, η εφελκυστική θραύση (Σχήμα 2.4β), που χαρακτηρίζεται από διαχωρισμό κάθετο στην επιφάνεια θραύσης.

Η διατμητική θραύση αποτελεί τον συνηθέστερο τύπο μακροσκοπικής θραύσης στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης, αν και παρατηρείται επίσης σε μονοαξονικές δοκιμές. Η γωνία της θραύσης σε σχέση με την αξονική τάση σχετίζεται συχνά με τη γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος, αλλά τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η σχέση αυτή δεν είναι απόλυτη. Υποστηρίζεται επίσης ότι η κλίση της επιφάνειας θραύσης καθορίζεται από την τάση της να διατρέξει διαγώνια το δοκίμιο, επηρεαζόμενη από την ετερογένεια του εντατικού πεδίου που

προκαλείται από την ανάσχεση της διαμετρικής παραμόρφωσης στα άκρα λόγω τριβής (Νομικός, 2015 και βιβλιογραφίες εντός). Το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο σε δοκίμια με μικρό λόγο ύψους προς διάμετρο.



Σχήμα 2.4: Τύποι θραύσης σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης: (α) διαμητική θραύση, (β) αξονικός διαχωρισμός του δοκιμίου (Νομικός, 2015).

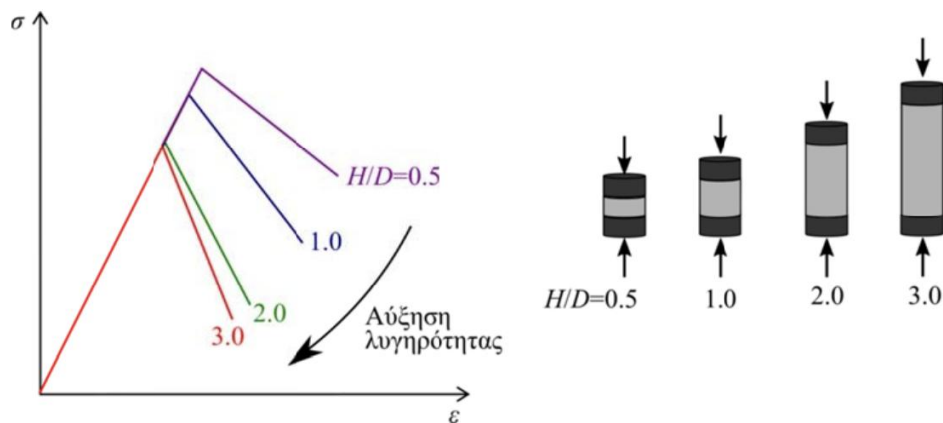
2.5 Παράμετροι που επιδρούν στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή

2.5.1 Η γεωμετρία του δοκιμίου

Σε περίπτωση που η εντατική κατάσταση ενός κυλινδρικού δοκιμίου είναι ομοιόμορφη και μονοαξονική το δοκίμιο αναμένεται να παρουσιάζει ομοιόμορφη πλευρική διαστολή σε όλο το ύψος του, σύμφωνα με το φαινόμενο Poisson. Ωστόσο, στην πρακτική διάταξη των δοκιμών, η διαφορά στις ελαστικές ιδιότητες μεταξύ πετρώματος και χάλυβα, καθώς και η τριβή στη διεπιφάνεια φόρτισης, προκαλούν ανάπτυξη διαμητικών τάσεων, οι οποίες κατευθύνονται προς το εσωτερικό και περιορίζουν την πλευρική διαστολή στα άκρα του δοκιμίου. Σύμφωνα με τον Mogi (2006), ο περιορισμός της πλευρικής διαστολής στα άκρα τείνει να αυξήσει την μετρούμενη αντοχή του δοκιμίου. Επιπλέον, η απότομη αλλαγή της διαμητικής τάσης στη διεπιφάνεια χάλυβα–πετρώματος δημιουργεί συγκέντρωση τάσης, η οποία επίσης συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής.

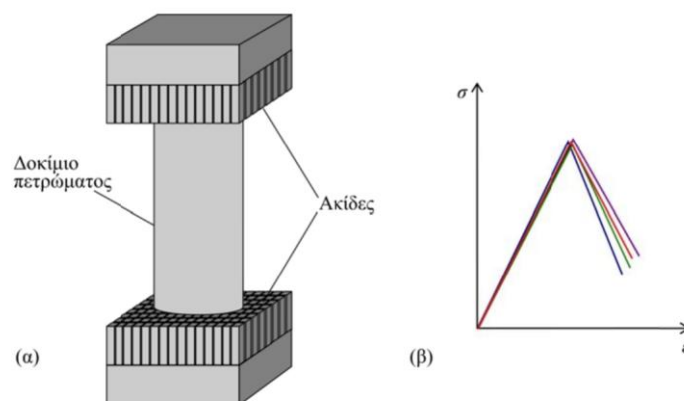
Ο περιορισμός των άκρων των δοκιμίων οδηγεί σε αυξημένη μετρούμενη αντοχή για δοκίμια μικρής λυγηρότητας (λόγος H/D). Καθώς η λυγηρότητα H/D αυξάνεται, ένα μεγαλύτερο τμήμα του όγκου του δοκιμίου υφίσταται περίπου ομοιόμορφη μονοαξονική εντατική κατάσταση. Ως αποτέλεσμα, η επίδραση της πλευρικής ανάσχεσης μειώνεται σταδιακά, και πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο λυγηρότητας η μετρούμενη αντοχή σταθεροποιείται, αντιπροσωπεύοντας την πραγματική αντοχή υπό ομοιόμορφη μονοαξονική θλίψη. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ποιοτικά η μείωση της αντοχής σε δοκίμια πετρωμάτων

με αύξηση της λυγηρότητας. Επιπλέον, πειραματικά δεδομένα για γρανίτη, δολομίτη και τραχείτη (Mogi, 2006) δείχνουν ότι η αντοχή τείνει να σταθεροποιηθεί για τιμές λυγηρότητας $H/D > 2.5$ (Σχήμα 2.6). Σύμφωνα με τις συστάσεις της ISRM (1979), για εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης προτιμάται η χρήση δοκιμίων με λυγηρότητα μεταξύ 2.5 και 3.0. Επίσης το μέγεθος του δοκιμίου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την εκτιμώμενη αντοχή (size effect) για τον λόγο αυτό τα περισσότερα πρότυπα έχουν καθορίσει τυποποιημένες διαμέτρους δοκίμια της τάξεως μεγέθους των 50mm.



Σχήμα 2.5: Επίδραση του λόγου H/D στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή (Νομικός, 2015).

Ο περιορισμός των διατμητικών τάσεων στα άκρα του δοκιμίου συμβάλλει στη διατήρηση μιας πιο ομοιόμορφης εντατικής κατανομής κατά το μήκος του. Στο Σχήμα 2.11 απεικονίζεται η περιορισμένη επίδραση της λυγηρότητας στη συμπεριφορά του δοκιμίου υπό θλίψη, όταν η φόρτιση εφαρμόζεται μέσω πλακών με ακίδες (Brady & Brown, 2006).



Σχήμα 2.6: (α) πλάκες φόρτισης με ακίδες, (β) επίδραση H/D στις καμπύλες τάσης παραμόρφωσης με την εισαγωγή τάσεων στα άκρα (Νομικός, 2015).

2.5.2 Επίδρασης τριβής

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα η ύπαρξη της τριβής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις μετρούμενες τιμές της θλιπτικής αντοχής καθώς μεταβάλλει το εντατικό πεδίο του δοκιμίου οδηγώντας το στην παραμόρφωσή του σε μορφή βαρελιού όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο [Σχήμα 2.7](#):



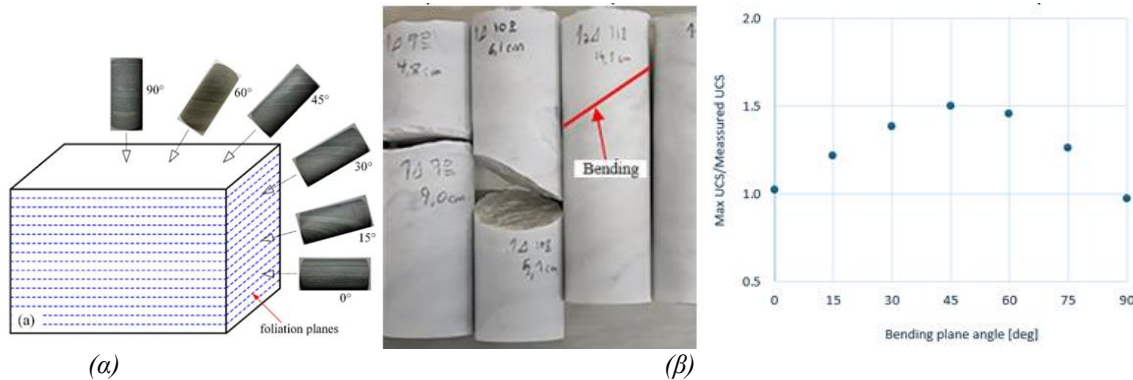
[Σχήμα 2.7: Παραμόρφωση δοκιμίου σε μορφή βαρελιού.](#)

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του δοκιμίου και της χαλύβδινης πλάκας μπορεί να μειωθεί με διάφορους τρόπους, όπως η εφαρμογή λιπαντικών (π.χ. διθειούχο μολυβδαίνιο, μίγματα στεατικού οξέος και βαζελίνης) ή η παρεμβολή λεπτών φύλλων τεφλόν ή μολύβδου, με το τεφλόν να παρουσιάζει συντελεστή τριβής περίπου 0.1. Τέτοιες τεχνικές έχουν περιγραφεί από τους *Labuz & Bridell (1993)*. Παρά τη θεωρητική αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων, παρατηρείται συχνά η δημιουργία κατακόρυφων ρωγμών στα άκρα των δοκιμίων. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται σε πλευρικές εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται κοντά στα άκρα, είτε λόγω διεύθυνσης του λιπαντικού στις ατέλειες του δοκιμίου (*Brady & Brown, 2006; Mogi, 2006*), είτε λόγω παραμόρφωσης ή εξώθησης του μαλακού ενθέματος (*Hawkes & Mellor, 1970*). Επιπλέον, σύμφωνα με τη διαδικασία της ISRM (1979), η χρήση λιπαντικών περιορίζεται, και επιτρέπεται μόνο η μηχανική κατεργασία των άκρων του δοκιμίου.

2.5.3 Επίδραση ανισοτροπίας

Πολλά πετρώματα, μεταξύ αυτών και τα μάρμαρα, χαρακτηρίζονται από ένα επίπεδο αδυναμίας με διαφορετική μηχανική συμπεριφορά (ορθοτροπικό υλικό). Τα αποτελέσματα της μονοαξονικής αντοχής μπορεί να μεταβληθούν έντονα ανάλογα με την διεύθυνση της

δειγματοληψίας σε σχέση με την στρώση (Σχήμα 2.8α). Η έρευνα των *Xiroudakis et al.* (2025) με την χρήση των εξισώσεων ελαστικότητας για ορθότροπο υλικό έδειξε ότι η αντοχή του μαρμάρου της Δράμας υποεκτιμάτε σημαντικά ανάλογα με την κλίση της στρώσης του υλικού (Σχήμα 2.8β).



Σχήμα 2.8: (α) Διεύθυνση δειγματοληψίας σε ανισότροπα πετρώματα (*Li et al.*, 2021), (β) επίδραση στην μετρούμενη αντοχή στο μάρμαρο Δράμας (*Xiroudakis et al.*, 2025).

Σημειώνεται ότι στις παρούσες δοκιμές, η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κάθετα προς αυτό το επίπεδο αυτό (όσο ήταν δυνατό) ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη αντοχή.

2.5.4 Τρόπος Φόρτισης

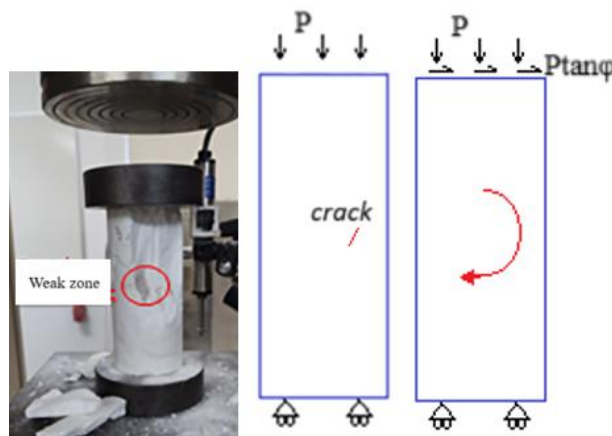
Η αντοχή του πετρώματος μπορεί να επηρεαστεί και από τον τρόπο φόρτισης. Δύο είναι οι δυνατότητες φόρτισης και περιλαμβάνει των έλεγχο φορτίου και τον έλεγχο μετατόπισης, ο δεύτερος τρόπος συνήθως προτιμάτε στα πετρώματα καθώς μπορεί να μελετηθεί η καμπύλη τάσης μετατόπισης και μετά την θραύση του υλικού σε αντίθεση με τον έλεγχο φορτίου που η επιπλέον ενέργεια που προσφέρεται από την αύξηση του οδηγεί στην καθολική απότομη θραύση του. Επίσης ο ρυθμός φόρτισης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο (*He et al.*, 2024) καθώς υψηλοί ρυθμοί φόρτισης μπορούν να οδηγήσουν σε υπερεκτίμηση της αντοχής από την εισαγωγή δυνάμεων αδρανείας, για το λόγω αυτό τα πειράματα μηχανικής πετρωμάτων γίνονται με την χρήση μικρών ρυθμών φόρτισης (πχ 0.5 MPa/s).

2.5.5 Άλλοι παράμετροι

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την μετρούμενη αντοχή μπορεί να είναι:

- Η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει τις μετρούμενες αντοχές (*Chen et al.*, 2020).

- Η μικροδομή και η ύπαρξη μικροεγκοίλων ή μικρορωγμών στο πέτρωμα μπορεί να δημιουργήσει καμπτικές ροπές (Σχήμα 2.9) μειώνοντας έτσι τις μετρούμενες αντοχές του πετρώματος.
- Η μηχανική επεξεργασία (κοπή, διάτρηση, λείανση) χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των δειγμάτων και, εάν δεν γίνει προσεκτικά ή αν ο εξοπλισμός δεν είναι καλά συντηρημένος, μπορεί να δημιουργήσει μικρορωγμές στο πέτρωμα και να μειώσει τις ιδιότητες του.
- Λανθασμένος ευθυγραμμισμός του άξονα του δοκιμίου: Η μη ευθυγράμμιση του άξονα του δείγματος με τον άξονα της μηχανής δοκιμών ή η ατελής παραλληλία των επιφανειών επαφής του δοκιμίου προκαλεί ροπές κάμψης, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση της εκτίμησης της θλιπτικής αντοχής. Η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη όταν υπάρχουν ρωγμές στη μικροδομή του υλικού, οι οποίες μπορούν να διαδοθούν και να οδηγήσουν σε αξονική θραύση των δειγμάτων.



Σχήμα 2.9: Δημιουργία καμπτικών ροπών από ύπαρξη ατέλειας σε δείγμα μαρμάρου (Xiroudakis, et al., 2025)

Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αξιολογήθηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τριών διαφορετικών πετρωμάτων. Τα πετρώματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Ασβεστόλιθος Lecce
- Μάρμαρο A & B
- Ψαμμίτης (Καλαθάς Χανίων)

Ασβεστόλιθος Lecce ή *pietra leccese*, είναι ένας μαλακός, ανοιχτόχρωμος κίτρινος, πλούσιος σε απολιθώματα ασβεστόλιθος από την περιοχή Σαλέντο της Νότιας Ιταλίας, διάσημος για τον ρόλο του στην αρχιτεκτονική. Σχηματισμένο από αρχαία θαλάσσια ιζήματα κατά την εποχή του Μειόκαινου, η μοναδική του ολκιμότητα και η λεπτή υφή του επιτρέπουν το περίπλοκο σκάλισμα σε γλυπτά, διακοσμητικές προσόψεις και αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, σκληραίνοντας με την πάροδο του χρόνου για να δημιουργήσει ανθεκτικές κατασκευές. Το πέτρωμα χρονολογείται από την εποχή του Μειόκαινου, σχηματισμένο από συμπιεσμένη θαλάσσια λάσπη και υδάτινες αποθέσεις πριν από εκατομμύρια χρόνια. Αποτελείται κυρίως από ανθρακικό ασβέστιο και είναι πλούσιο σε διάφορα ορυκτά και θαλάσσια απολιθώματα, τα οποία είναι συχνά ορατά με γυμνό μάτι.

Το μάρμαρο (από "μαρμαίρω" που σημαίνει "λάμπω") είναι ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα αποτελούμενο από ασβεστίτη (CaCO_3) ή και από το συνδυασμό με δολομίτη ($(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$) και άλλα ορυκτά. Έχει δημιουργηθεί από την μεταμόρφωση ασβεστόλιθων, παρουσιάζοντας μεγαλύτερες αντοχές από αυτόν.

Ο ψαμμίτης είναι ένα κλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από κόκκους άμμου (μεταξύ 0.0625 mm και 2 mm), όπως χαλαζία και άστριο, οι οποίοι έχουν συμπιεστεί μαζί με την πάροδο του χρόνου από ορυκτά όπως πυρίτιο, ασβεστίτη ή οξείδια σιδήρου. Σχηματίζεται σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως ερήμους, ποτάμια και παραλίες, και μπορεί να βρεθεί σε πολλά χρώματα λόγω της παρουσίας ακαθαρσιών. Ο ψαμμίτης είναι γνωστός για το πορώδες και τη διαπερατότητά του, γεγονός που τον καθιστά πολύτιμη πηγή για υπόγεια ύδατα και δεξαμενές πετρελαίου, και χρησιμοποιείται ευρέως ως δομικό υλικό για την κατεργασιμότητα και την αισθητική του.

Η κύρια διαφορά μεταξύ ασβεστόλιθου και μαρμάρου είναι ότι ο ασβεστόλιθος είναι ιζηματογενές πέτρωμα, που συνήθως αποτελείται από απολιθώματα ανθρακικού ασβεστίου, και το μάρμαρο είναι μεταμορφωμένο πέτρωμα. Ο ασβεστόλιθος σχηματίζεται όταν κελύφη,

άμμος και λάσπη εναποτίθενται στον πυθμένα των ωκεανών και των λιμνών και με την πάροδο του χρόνου στερεοποιούνται σε πέτρωμα. Το μάρμαρο σχηματίζεται όταν ο ιζηματογενής ασβεστόλιθος θερμαίνεται και συμπιέζεται από φυσικές διεργασίες σχηματισμού πετρωμάτων, έτσι ώστε οι κόκκοι να ανακρυσταλλώνονται.

Για την υλοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών εφαρμόστηκε μια σειρά από διάφορες τεχνικές, τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο. Αρχικά, τα εν λόγω πετρώματα εστάλησαν στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων σε μορφή ογκοτεμαχίων (blocks) (Σχήμα 3.1) και επεξεργάστηκαν ώστε να έχουν το επιθυμητό μέγεθος για να τοποθετηθούν στον πυρηνολήπτη απ' όπου και θα προέκυπταν τα κυλινδρικά δοκίμια για περαιτέρω ανάλυση. Τα δείγματα ογκομαρμάρων επειδή προήλθαν από διαφορετική περιοχή εξόρυξης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά γράμματα της αλφαβήτου (A & B) ώστε να γίνεται εύκολα αντιληπτή η εν λόγω διαφορά τους. Έτσι κατά την επεξεργασία, τα νούμερα που εμφανίζονται χωρίς τόνο (λ.χ. 5A) αποσκοπούν στο A δείγμα ογκομαρμάρου ενώ τα νούμερα με τόνο (λ.χ. 5B) δείχνουν ότι προήλθαν από διαφορετική τοποθεσία εξόρυξης (τοποθεσία B).



Σχήμα 3.1: Όγκος μαρμάρου μετά την δειγματοληψία.

3.1 Δειγματοληψία – Προετοιμασία Δειγμάτων

Η εξόρυξη μαρμάρου περιλαμβάνει μια σειρά βασικών βημάτων προκειμένου να αποκολληθεί ο όγκος από το μητρικό πέτρωμα. Στις εργασίες αυτές χρησιμοποιούνται

εξοπλισμός όπως διατρητικά, μηχανές συρματοκοπής, φορτωτές και μεταφορικά οχήματα. Όλες οι εργασίες πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργίας που ορίζει ο αρμόδιος δημόσιος φορέας, ιδίως όπως αυτές αποτυπώνονται στον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (Κ.Μ.Λ.Ε.).

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης βασίζεται στις οδηγίες της Επιτροπής Προτυποποίησης Εργαστηριακών και Επιτόπιων Δοκιμών της ISRM (1979) και στην προδιαγραφή ASTM D7012-2010 (2010). Συμβατότητα υπάρχει και με την ελληνική τεχνική προδιαγραφή Ε103-84 (ΦΕΚ 70, τ. Β, 8-2-1985) για τον προσδιορισμό της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίων πετρώματος.

Σύμφωνα με την Ε103-84, η γεωμετρία των τα δοκιμίων είναι κυλινδρική, με λόγο ύψους προς διάμετρο H/D 2.5–3.0 και με ελάχιστη διάμετρο τουλάχιστον ίση με το μέγεθος πυρήνα NX (περίπου 54 mm). Επιπλέον, η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές όσο το μέγιστο μέγεθος κόκκου των συμμετεχόντων ορυκτών. Τα άκρα πρέπει να είναι επίπεδα και λεία, με μέγιστη απόκλιση 0.02 mm, κομμένα έτσι ώστε να είναι παράλληλα με απόκλιση από το κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου το πολύ 0.001 rad.

Η μέτρηση της διαμέτρου πρέπει να γίνεται με ακρίβεια 0.1 mm. Λαμβάνονται τρεις μετρήσεις, στο μέσον του δοκιμίου καθώς και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Ο μέσος όρος των μετρήσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής. Το ύψος μετράτε σε τρία σημεία με ακρίβεια τουλάχιστον 1.0 mm.

Οι συνθήκες υγρασίας των δοκιμίων κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές επιτόπιες συνθήκες. Αν τα δοκίμια εξετάζονται σε ξηρή κατάσταση, αυτό πρέπει να αναφέρεται στο δελτίο αποτελεσμάτων. Για ξήρανση, τα δείγματα τοποθετούνται σε φούρνο στους 105 ± 5 °C για 24 ώρες.

Στα άκρα κάθε δοκιμίου προσαρμόζονται δύο κυκλικές χαλύβδινες πλάκες με σκληρότητα Rockwell τουλάχιστον HRC 58. Μία πλάκα πρέπει να διαθέτει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη. Το πάχος των πλακών πρέπει να υπερβαίνει τα 15 mm και οι επιφάνειές τους να αποκλίνουν από το επίπεδο περισσότερο από 0.005 mm. Δοκίμιο, πλάκες και σφαιρική έδραση πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένα με τον άξονα φόρτισης.

Το φορτίο εφαρμόζεται συνεχώς και αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, έτσι ώστε η αστοχία να επέλθει σε χρονικό διάστημα περίπου 5–10 min, εναλλακτικά, συνιστάται ρυθμός φόρτισης 0.5–1.0 MPa/s. Το μέγιστο επιβεβλημένο φορτίο καταχωρείται σε N (ή kN, MN) με ακρίβεια

1%. Ο απαραίτητος αριθμός δοκιμών εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος και τον διαθέσιμο όγκο δείγματος. Γενικά προτείνεται να εξετάζονται τουλάχιστον πέντε δοκίμια ανά δείγμα.

Η αντιπροσωπευτικότητα της δειγματοληψίας είναι κρίσιμη για την έγκυρη εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Το δείγμα πρέπει να αντιπροσωπεύει πραγματικά το πέτρωμα προέλευσής του και όχι να επιλέγονται ενστικτωδώς μόνο τα πιο συνεκτικά τμήματα. Η αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη την θέση και τον προσανατολισμό στο φυσικό περιβάλλον (Αγιουτάντης, 2019). Με βάση τα παραπάνω, τα αρχικά ογκοτεμάχια (μάρμαρο, μαλακός ασβεστόλιθος Lecce και ψαμμίτης) υποβλήθηκαν σε πυρηνολήπτη (Σχήμα 3.2) για την παραγωγή κυλινδρικών δοκιμών.



Σχήμα 3.2: Εργαστηριακός πυρηνολήπτης.

Συγκεκριμένα κόπηκαν 13 κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου τύπου Α, 19 κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου τύπου Β, 7 κυλινδρικά δοκίμια μαλακού ασβεστόλιθου Lecce και 4 κυλινδρικά δοκίμια Ψαμμίτη από την περιοχή του Καλαθά Χανίων. Έπειτα, τα προαναφερθέν δοκίμια μετά το πέρας της δειγματοληψίας, τοποθετήθηκαν στο εργαστηριακό δισκοπρίονο (Σχήμα 3.3), ώστε να μειωθεί το μέγεθος των εκάστοτε κυλινδρικών δοκιμών για περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 3.3: Εργαστηριακό Δισκοπρίονο.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε λείανση δια μέσου του εργαστηριακού λειαντή (Σχήμα 3.4). Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η λείανση των βάσεων διότι με την χρήση του δίσκου κοπής δημιουργήθηκαν ανομοιομορφίες στο ύψος του εκάστοτε δοκιμίου, πράγμα που θα επηρέαζε τις μελλοντικές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης καθώς οι πλάκες φόρτισης δεν θα εφάπτονταν σωστά στα δοκίμια με αποτέλεσμα συνεχών σφαλμάτων στις καταγραφές.



Σχήμα 3.4: Εργαστηριακός Λειαντής.

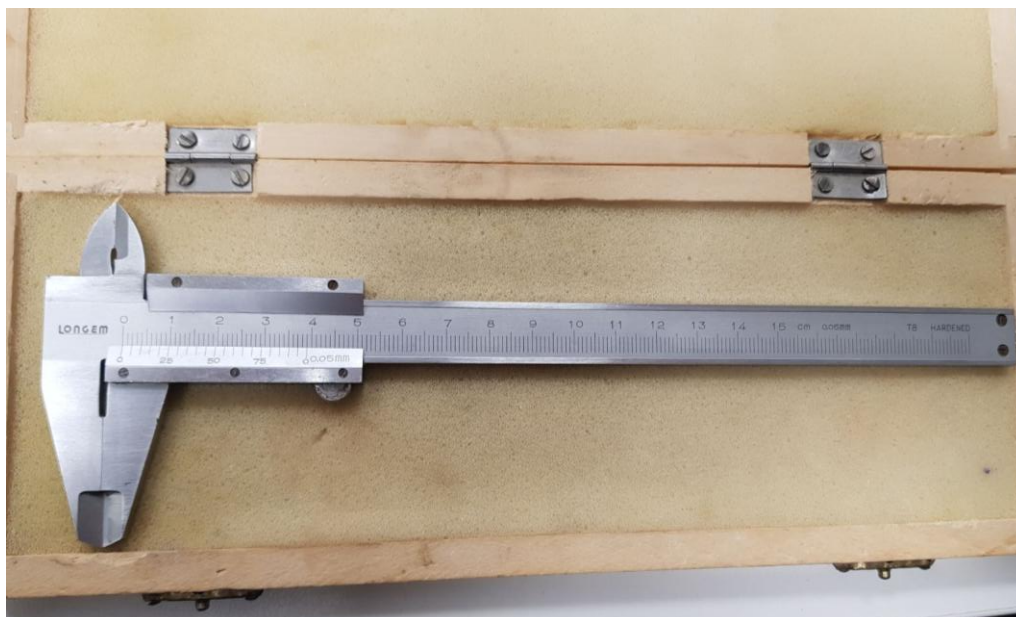
Μετά το πέρας των προαναφερθέντων εργασιών τα εν λόγω δοκίμια απέκτησαν το κατάλληλο μέγεθος και αφέθηκαν στο εργαστήριο για τουλάχιστον 48 ώρες πριν την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Τελικά δοκίμια πριν την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Από τα αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται: ο ψαμμίτης, ο μαλακός ασβεστόλιθος Lecce και τα μάρμαρα τύπου Α.

Εφόσον τα δοκίμια αφέθηκαν για τουλάχιστον 2 ημέρες (ώστε να εξαλειφθεί η υγρασία έπειτα από την διαδικασία κοπής) μετρήθηκε η διάμετρος και το ύψος του εκάστοτε δοκιμίου. Με το παχύμετρο (Σχήμα 3.6) μετρήθηκε η διάμετρος του δοκιμίου συνολικά 3 φορές με

ακρίβεια 0.05 mm και εύρος μέτρησης από 0 έως 150 mm έπειτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος. Η μέση διάμετρος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του εμβαδού της επιφάνειας φόρτισης. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο μετρήθηκε και το ύψος του κάθε δοκιμίου.



Σχήμα 3.6: Παχύμετρο.

Πριν από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας ενός δεκαδικού ψηφίου δηλαδή με ακρίβεια 0.1 γραμμαρίου. Έπειτα τοποθετήθηκε στις δύο άκρες αυτών είτε βαζελίνη, είτε γλάσο, είτε φύλλα τεφλόν και ξαναζυγίστηκαν. Όμως σε αρκετά δοκίμια δεν προστέθηκε κανένα λιπαντικό ή φύλλα τεφλόν ώστε να γίνει μελλοντική σύγκριση ως προς τους συντελεστές τριβών τους, την αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας Young καθώς και του λόγου Poisson.

3.2 Αντοχή Μονοαξονικής Θλίψης

Η πρώτη εργαστηριακή μέθοδος που πραγματοποιήθηκε ήταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που εκτελέστηκε σε άκαμπτη μηχανή MTS-815 (Σχήμα 3.7) με δυνατότητα άσκησης φορτίων έως 1600 kN. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο μετατόπισης 0.0108 mm/sec. Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργαστηριακής μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της αντοχής του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη, στο οποίο ασκείται αξονική πίεση δια μέσω των πλακών φόρτισης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινοι δίσκοι οι οποίοι τοποθετήθηκαν ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο ώστε να ελαττωθεί η υπερβολική πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για την πραγματοποίηση της κάθε δοκιμής ο λόγος H/D (ύψους/πλάτους) του κάθε δοκιμίου ήταν τουλάχιστον 2.



Σχήμα 3.7: Μηχανή MTS 815 (Material Test Systems).

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή, σ_c , υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο F_{max} τη στιγμή της αστοχίας του δοκιμίου διαιρεμένο με την αρχική διατομή του $A = \pi D^2/4$, που μετρείται κάθετα προς την διεύθυνση της δύναμης και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Αγιουτάντης, 2019 και βιβλιογραφίες εντός):

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.1)$$

Τα δοκίμια που προέρχονται από την ίδια πυρηνοληψία έχουν την ίδια διάμετρο αλλά το ύψος μπορεί να διαφέρει δίδοντας έτσι πειράματα με διαφορετικούς λόγου H/D . Επομένως, για να προκύπτουν συγκρίσιμα αποτελέσματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, χρειάζεται να γίνει αναγωγή των τιμών αυτών στο σταθερό λόγο $\frac{H}{D}$ του εκάστοτε προτύπου (Αγιουτάντης, 2019). Οι Obert et al (1946) πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση αναγωγής:

$$C_1 = \frac{\sigma_c}{0.778 + \frac{0.222}{\frac{H}{D}}} \quad (3.2)$$

Όπου:

- σ_c : Η αντοχή που υπολογίζεται για δοκίμιο με λόγο $\frac{H}{D} > 1$ και
- C_1 : Η ανηγμένη τιμή για λόγο $\frac{H}{D} = 1$.

Ο Protodyakonov πρότεινε την ακόλουθη σχέση αναγωγής (*Protodyakonov, 1969*):

$$C_2 = \frac{\sigma_c}{\frac{7}{8} + \frac{2H}{8D}} \quad (3.3)$$

Όπου:

- σ_c : Η αντοχή που υπολογίζεται για δοκίμιο με λόγο $\frac{H}{D} > 1$ και
- C_2 : Η ανηγμένη τιμή για λόγο $\frac{H}{D} = 2$.

Γενικώς, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η αντοχή ενός δοκιμίου μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του.

Τέλος, υπολογίστηκε και η αξονική ανηγμένη παραμόρφωση για κάθε στάδιο φόρτισης από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (3.4)$$

Όπου:

- Δl η βράχυνση
- l_o το αρχικό μήκος του δοκιμίου

3.3 Διάγραμμα Τάσης – Ανηγμένης Παραμόρφωσης

Η γραφική απεικόνιση των τιμών τάσης σε συνάρτηση με την ανηγμένη παραμόρφωση σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων ορίζει την καμπύλη τάσης–ανηγμένης παραμόρφωσης (stress–strain curve) για το εκάστοτε δοκίμιο και, κατ’ επέκταση, για το πέτρωμα από το οποίο προέρχεται. Τέτοιες καμπύλες προκύπτουν τόσο από δοκιμές θλίψης όσο και από δοκιμές εφελκυσμού και αναφέρονται σε μεγέθη που ενεργούν στον ίδιο άξονα φόρτισης. Μια τυπική καμπύλη διακρίνεται συνήθως σε δύο κύρια τμήματα: τον κλάδο έως τη διαρροή ή τη θραύση και τον φθίνοντα κλάδο που ακολουθεί μετά τη διαρροή/θραύση. Ανάλογα με τη μορφή τους, οι καμπύλες περιγράφουν ελαστική συμπεριφορά (γραμμική ή μη γραμμική), πλαστική συμπεριφορά (γραμμική ή μη γραμμική) ή συνδυασμό αυτών των μορφών.

Όταν ένα υλικό επανέρχεται πλήρως στην αρχική του κατάσταση μετά την αφαίρεση του εξωτερικού φορτίου, χωρίς να εμφανίζει μόνιμες παραμορφώσεις, χαρακτηρίζεται ως ελαστικό. Σε αυτή την περίπτωση, από το σχήμα της καμπύλης τάσης–ανηγμένων

παραμορφώσεων είναι δυνατόν να ταξινομηθεί και να περιγραφεί το υλικό με έναν από τους τρόπους που αποτυπώνονται στο [Σχήμα 3.8](#).

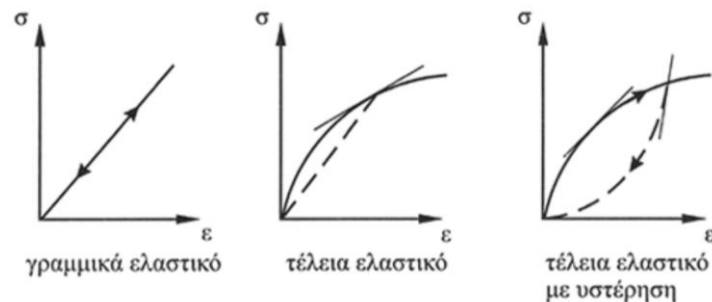
- Ως γραμμικά ελαστικό, όταν η σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης είναι της μορφής:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.5)$$

- Ως τέλεια ελαστικό, όταν η σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης είναι της μορφής:

$$\sigma = E \cdot f(\varepsilon) \quad (3.6)$$

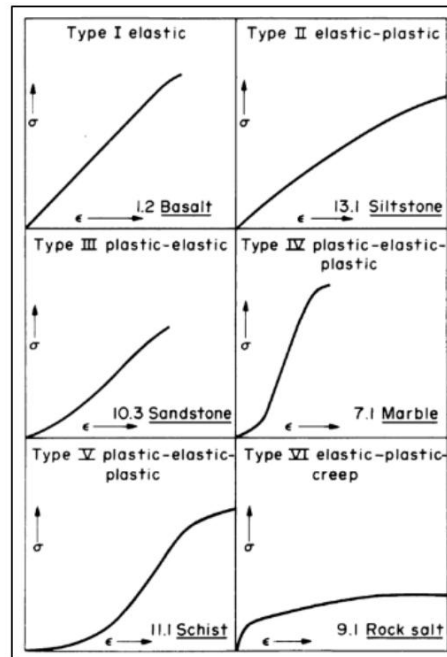
- Ως τέλεια ελαστικό υλικό με υστέρηση (ο χαρακτηρισμός οφείλεται στο ότι κατά την αποφόρτιση του ακολουθείται διαφορετική τροχιά στο διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων).



Σχήμα 3.8: Τυπικά διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα πετρώματα (Αγιουτάντης, 2019).

Ένα υλικό χαρακτηρίζεται πλαστικό όταν εμφανίσει μόνιμες παραμορφώσεις ενώ διατηρεί την ικανότητά του να φέρει φορτίο. Ο όρος «όλκιμο» χρησιμοποιείται κυρίως για μέταλλα. Τα περισσότερα πετρώματα παρουσιάζουν κυρίως ελαστική συμπεριφορά σε χαμηλά επίπεδα τάσεων. Στο διάγραμμα τάσης–παραμόρφωσης, η πλαστική περιοχή εμφανίζεται μετά την ελαστική και το εύρος της διαφέρει ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού.

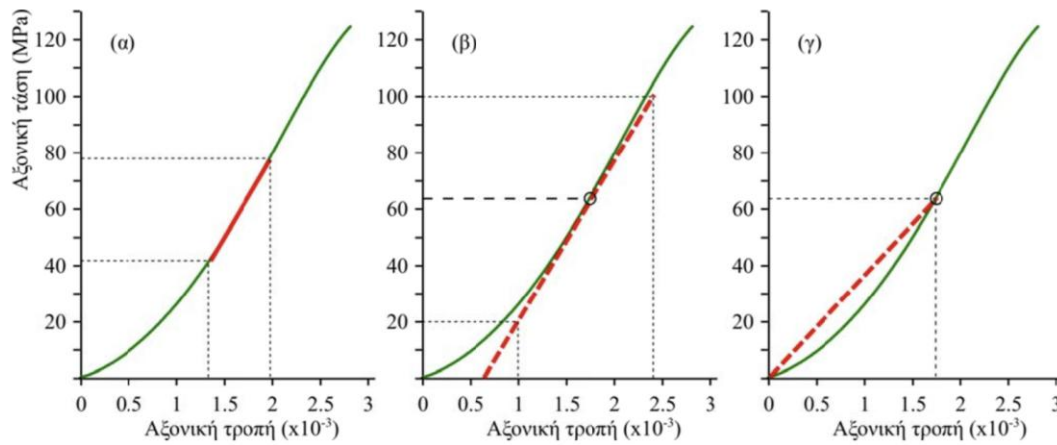
Το παρακάτω σχήμα ([Σχήμα 3.9](#)) παρουσιάζει τυπικές μορφές τέτοιων συναρτήσεων που προκύπτουν από πειράματα θλίψης σε διάφορα πετρώματα (Αγιουτάντης, 2019). Η πλαστική μορφή καμπύλης που παρουσιάζεται στο ανωτέρω σχήμα, η οποία προηγείται του ελαστικού τμήματος οφείλεται συνήθως στο κλείσιμο των πόρων του υλικού. Ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως ψαθυρό, όταν η πλαστική περιοχή η οποία ακολουθεί την ελαστική περιοχή έχει πολύ μικρό ή ακόμη και μηδενικό εύρος. Ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη φόρτιση με θλιπτικές τάσεις εμφανίζουν οι γρανίτες και τα μάρμαρα.



Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για πετρώματα (Roberts, 1977).

Το μέγιστο της καμπύλης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης είναι μία χαρακτηριστική παράμετρος του υλικού, η οποία (στην περίπτωση θλιπτικών δοκιμών) ονομάζεται αντοχή σε θλίψη. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται σε συγκεκριμένες πλευρικές τάσεις που εφαρμόζονται στο υλικό ή σε ένα δοκίμιο. Όταν οι πλευρικές τάσεις είναι μηδενικές, τότε το υλικό θεωρείται ότι φορτίζεται κατά έναν άξονα μόνο και η δοκιμή ονομάζεται δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική καταπόνηση. Στις περιπτώσεις θλιπτικών φορτίσεων η παράμετρος ονομάζεται αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και συνήθως συμβολίζεται με σ_c ενώ παλιότερα με C_o (Αγιουτάντης, 2019).

Από τις τυπικές καμπύλες τάσης–ανηγμένης παραμόρφωσης προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας, όπως υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης, δεν παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της φόρτισης κάθε υλικού. Για τον λόγο αυτό, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό ενός αντιπροσωπευτικού μέτρου ελαστικότητας (Σχήμα 3.10), οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια:



Σχήμα 3.10: Διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης και υπολογισμός μέτρουελαστικότητας (Νομικός, 2015).

- Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται γενικά από τη σχέση $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$ και αντιστοιχεί στην κλίση της καμπύλης τάσης–παραμόρφωσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Το σημείο αυτό συχνά ορίζεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που αντέχει το υλικό, για παράδειγμα στο 50% της μέγιστης τιμής.
- Το μέσο μέτρο ελαστικότητας, προκύπτει την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης στην ελαστική περιοχή και υπολογίζεται από τη μέση $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$.
- Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας καθορίζεται από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με ένα σημείο της καμπύλης τάσης–παραμόρφωσης, το οποίο συνήθως ορίζεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που αντέχει το υλικό, για παράδειγμα 50%, $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$.

Τέλος στην περίπτωση που το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό σε όλη την ελαστική περιοχή (Αγιουτάντης, 2019).

Έπειτα από τον υπολογισμό όλων των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, υπολογίστηκε και η ενέργεια παραμόρφωσης, δηλαδή η ενέργεια που καταναλώθηκε μέχρι την στιγμή της αστοχίας. Υπολογίστηκε με την εξής εξίσωση:

$$E = \frac{1}{2} (\sigma_n + \sigma_{n+1}) \cdot (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \frac{MJ}{m^3} \quad (3.7)$$

3.4 Ηλεκτρικά μηχανοσκόπια (strain gauges)

Η καταγραφή του παραμορφωσιακού πεδίου σε ένα σώμα ή δοκίμιο μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών μηχανοσκόπων, καθώς και

μέσω συμπλεγμάτων μηχανοσυστημάτων (Σχήμα 3.11). Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις μπορούν να αναλυθούν ώστε να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις σε συγκεκριμένους άξονες ή ακόμα και οι κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων τύπου σταυρού (δύο κάθετα) στο δοκίμιο μαρμάρου (Αγιουτάντης, 2019).

Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα μονοαξονικής θλίψης με χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων. Τα εν λόγω μάρμαρα που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται ως μάρμαρο 19B και 20B καθώς τα δοκίμια προέρχονται από το μάρμαρο B. Για την προετοιμασία των συγκεκριμένων δειγμάτων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που αναλύθηκε στην υποενότητα 2.1. Αρχικά, τα ηλεκτρικά μηχανοσυστήματα κολλήθηκαν στα δοκίμια με ειδική κόλλα και τοποθετήθηκαν στο κέντρο του δοκιμίου, δηλαδή σε απόσταση $H/2$. Κατά την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας, το καταγραφικό όργανο με δύο εισόδους (X – Y recorder) κατέγραψε την παραμόρφωση του δοκιμίου καθώς και την στιγμιαία δύναμη. Από τις ενδείξεις των ενισχυτών σήματος ελήφθησαν τα μεγέθη ε_x & ε_y . Όπου, ε_x η εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση και ε_y η αξονική ανηγμένη παραμόρφωση. Στη συνέχεια, όλα τα δεδομένα επεξεργάστηκαν στα φύλλα εργασίας του excel και υπολογίστηκαν τα παρακάτω κρίσιμα μεγέθη α) το μέτρο ελαστικότητας (E) του Young, β) ο λόγος του Poisson (ν), γ) η αντοχή και δ) η ενέργεια θραύσης για το εκάστοτε δοκίμιο.

Ο λόγος Poisson ορίζεται από τον λόγο της εγκάρσιας ($-\varepsilon_x$) προς την αξονική ($+\varepsilon_y$) ανηγμένη παραμόρφωση σε μονοαξονική καταπόνηση:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (3.8)$$

Ο λόγος του Poisson κυμαίνεται στα πετρώματα από 0.15 έως 0.25 με θεωρητικό εύρος $0 \leq \nu \leq 0.5$. Στα πετρώματα ασθενών μηχανικών ιδιοτήτων ο λόγος Poisson μπορεί να πλησιάζει στο μηδέν, ενώ σε περιπτώσεις μη συνεκτικών υλικών (π.χ. άμμος), όπου το μέτρο διάτμησης τείνει στο μηδέν, τείνει στο 0.5 (Αγιουτάντης, 2019).

Ο λόγος Poisson προσδιορίζεται με βάση την [εξ. 3.8](#) ως ο λόγος της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης–αξονικής παραμόρφωσης προς την κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης–πλευρικής παραμόρφωσης. Η κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης–πλευρικής παραμόρφωσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας. (Αγιουτάντης, 2019).

3.5 Γωνία Τριβής

Μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης υπολογίστηκε η γωνία τριβής για κάθε ένα πέτρωμα. Χρησιμοποιήθηκε χαλύβδινη πλάκα στην οποία τοποθετήθηκαν τα δοκίμια με και χωρίς βαζελίνη και με την βοήθεια του μοιρογνωμονίου υπολογίστηκε η γωνία τριβής ([Σχήμα 3.12](#)).



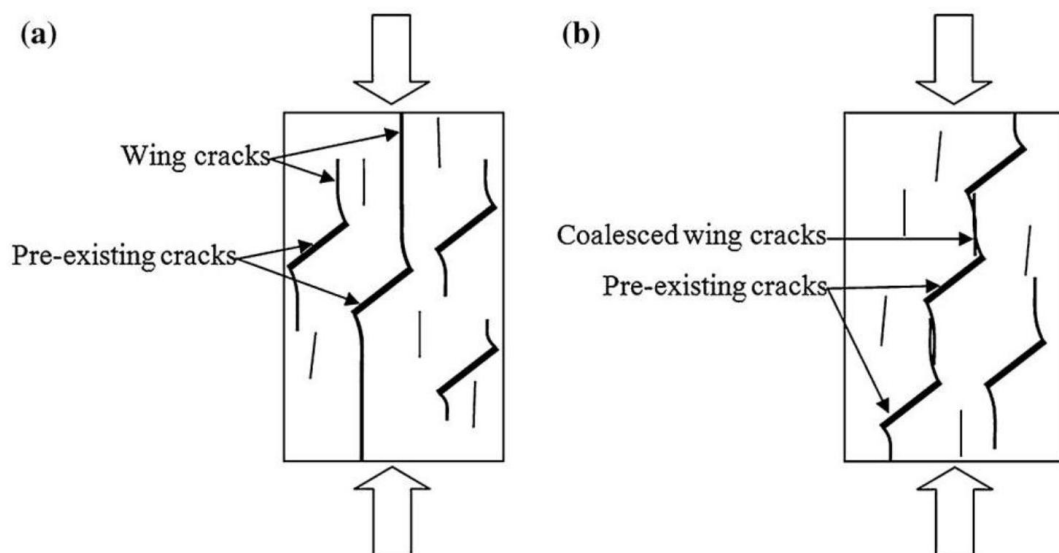
Σχήμα 3.12: Υπολογισμός τριβής με χαλύβδινη πλάκα και μοιρογνώμονιο.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

4.1 Τύποι αστοχίας κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων, οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας Young, καθώς και οι τρόποι αστοχίας των δοκιμίων παρατίθενται στους πίνακες του **Παραρτήματος Α**.

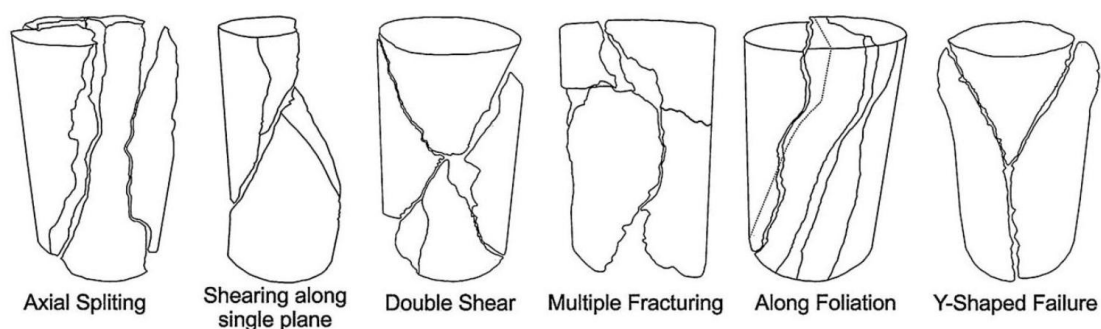
Κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έχουν παρατηρηθεί δύο χαρακτηριστικές αστοχίες. Η πρώτη αφορά την τυπική θραύση σε ένα κεκλιμένο επίπεδο από την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής και η δεύτερη που αφορά την αξονική κατάτμηση (κατακόρυφη θραύση) η οποία μπορεί να αιτιολογηθεί από την ύπαρξη μικρορωγμών οι οποίες μπορούν να διαδοθούν δημιουργώντας «φτερά» γύρω από την αρχική ρωγμή (*Σχήμα 4.1a*) ή λόγω συνένωσης μικρορωγμών σε πολύ κοντινές αποστάσεις (*Σχήμα 4.1b*) οδηγούν στην κατάτμηση του δοκιμίου (*Basu et al., 2013*).



Σχήμα 4.1: Αξονική κατάτμηση κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Basu et al., 2013).

Υποστηρίζεται ότι κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έχουν παρατηρηθεί 6 διαφορετικοί τρόποι αστοχίας (*Σχήμα 4.2*). Συγκεκριμένα:

1. Αξονική Κατάτμηση (Axial Splitting)
2. Διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου (Shearing along single plane)
3. Διπλή Διάτμηση (Double Shear)
4. Πολλαπλή Θραύση (Multiple Fracturing)
5. Κατά μήκος της στρώσης (Along Foliation)
6. Θραύση σχήματος Y (Y-shaped Failure)



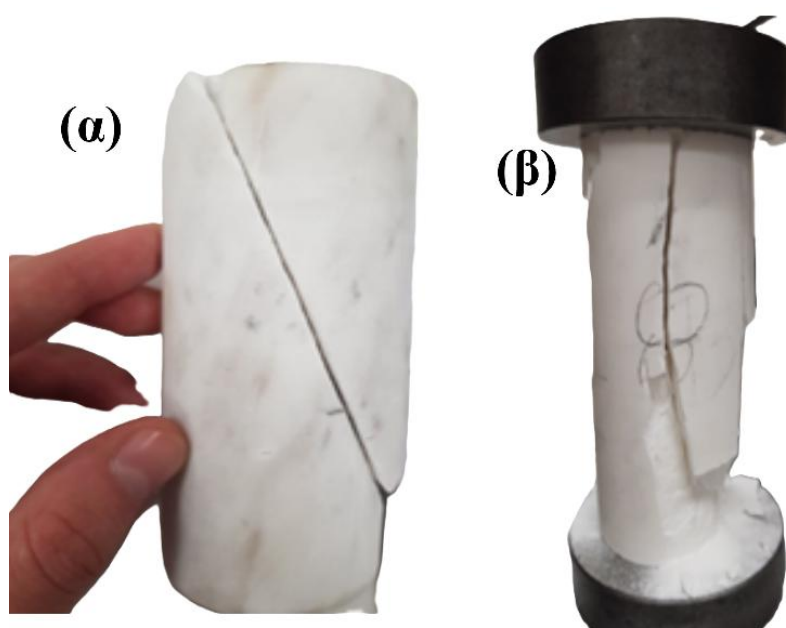
Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση διαφορετικών τρόπων αστοχίας σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Basu et al., 2013).

Σύμφωνα με τους παραπάνω 6 πιθανούς τρόπους θραύσης των δοκιμίων κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, έχουν χαρακτηριστεί και τα τελικά δοκίμια τα οποία αναφέρονται στους πίνακες του **Παρενθέματος Α**.

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση πετρωμάτων βάσει του τύπου θραύσης και της αντοχής τους.

Αριθμός Δοκιμίου	Τύπος αστοχίας	Τύπος Πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Μpa)	λιπαντικό
1	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Leece 1	9.3	βαζελίνη
2	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Leece 2	7.5	Γράσο
3	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Leece 3	9.8	Φύλλα τεφλόν
4	Διπλή Λιάτμηση	Leece 4	13.0	Βαζελίνη
5	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Leece 5	12.3	Βαζελίνη
6	Θραύση σχήματος Y	Leece 6	13.9	Χωρίς
7	Θραύση σχήματος Y	Leece 7	15.1	Χωρίς
1	Θραύση σχήματος Y	Ψαμμίτης Καλαθός 1	11.9	Χωρίς
2	Θραύση σχήματος Y	Ψαμμίτης Καλαθός 2	5.2	Χωρίς
3	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Ψαμμίτης Καλαθός 3	7.4	Βαζελίνη
4	Πολλαπλή Θραύση	Ψαμμίτης Καλαθός 4	7.5	βαζελίνη
1A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	157.6	Χωρίς
2A	Θραύση σχήματος Y	Μάρμαρο A	153.1	Χωρίς
10A	Θραύση σχήματος Y	Μάρμαρο A	158.9	Χωρίς
11A	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο A	125.4	Χωρίς
12A	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο A	148.6	Χωρίς
13A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	145.8	Χωρίς
3A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	150.7	Βαζελίνη
4A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	151.9	Βαζελίνη
5A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	150.9	Βαζελίνη
6A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	158.6	Βαζελίνη
7A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	153.3	Βαζελίνη
8A	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο A	151.8	Βαζελίνη
9A	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο A	149.4	Βαζελίνη
1B	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο B	139.7	Βαζελίνη
3B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	120.3	Βαζελίνη
4B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	128.0	Βαζελίνη
5B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	126.7	Βαζελίνη
6B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	134.1	Βαζελίνη
12B	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο B	129.4	Βαζελίνη
13B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	156.6	Βαζελίνη
14B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	118.7	Βαζελίνη
15B	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο B	140.5	Βαζελίνη
7B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	138.9	Χωρίς
8B	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο B	137.1	Χωρίς
9B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	152.2	Χωρίς
10B	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο B	148.7	Χωρίς
11B	Λιάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου	Μάρμαρο B	139.6	Χωρίς
16B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	152.5	Χωρίς
17B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	134.9	Χωρίς
18B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	130.4	Χωρίς
19B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	91.2	Χωρίς SG
20B	Αξονική Κατάτμηση	Μάρμαρο B	114.7	Βαζελίνη SG

Σχετικά με τον παραπάνω [Πίνακα 4.1](#) παρατηρείται ότι στα τέσσερα διαφορετικά είδη πετρωμάτων υπερिशύει ο τύπος αστοχίας με διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου καθώς 20 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με αυτόν τον τρόπο. Ακολουθεί ο τύπος αστοχίας με αξονική κατάτμηση καθώς 15 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με τον εν λόγω τρόπο. Επιπλέον, 6 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με θραύση σχήματος Υ. Τέλος, η διπλή διάτμηση και η πολλαπλή θραύση εμφανίστηκαν σε 1 μόνο δοκίμιο αντίστοιχα. Οι δύο πιο συχνά παρατηρούμενοι τρόποι αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη παρουσιάζονται για την περίπτωση του μαρμάρου Α στο [Σχήμα 4.3](#) που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3: (α) Διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου, (β) αξονική κατάτμηση.

Όσον αφορά το πέτρωμα του ασβεστόλιθου Lecce, παρατηρείται ότι κατά την χρήση αντιτριβικών μέσων (Βαζελίνη, Φύλλα τεφλόν, Γράσο) υπερिशύει ο τύπος θραύσης με διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου, ενώ χωρίς την χρήση αυτών παρατηρείται θραύση σχήματος Υ ([Σχήμα 4.4α](#)). Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο γίνεται αντιληπτό χωρίς χρήση λιπαντικών στο πέτρωμα του ψαμμίτη καθώς τα εν λόγω πετρώματα αστοχούν σε σχήμα Υ ([Σχήμα 4.4β](#)). Επιπλέον, στο μάρμαρο τύπου Α με χρήση βαζελίνης υπερिशύει η θραύση σε διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου. Τέλος στο μάρμαρο τύπου Β, ο πιο συνηθισμένος τύπος αστοχίας με ή χωρίς χρήση βαζελίνης είναι ο τύπος με αξονική κατάτμηση ([Σχήμα 4.4γ](#)).



Σχήμα 4.4: (α) υοειδή θραύση πετρώματος Lecce (Y-shaped failure), (β) υοειδή θραύση πετρώματος Φαμμίτη (Y-shaped failure), (γ) Αξονική κατάτμηση μαρμάρου B (Axial splitting).

4.2 Αποτελέσματα μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων

Στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί αναγράφονται τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων ου ασβεστόλιθου Lecce. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, οι διορθωμένες αντοχές, το μέσο μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος ύψους - διαμέτρου καθώς και η ενέργεια παραμόρφωσης έως την στιγμή της αστοχίας.

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Lecce.

Δοκίμιο	Λιπαντικό	σc MPa	C2 MPa	E _{Μέσο} GPa	H/D	Ενέργεια Παραμόρφωσης kJ/m ³
1	Βαζελίνη	9.3	9.3	5.3	2.018	9.4
2	Γράσο	7.5	7.5	5.9	2.030	6.1
3	Τεφλόν	9.8	9.8	6.2	1.994	9.9
4	Βαζελίνη	13.0	13.1	8.3	2.064	13.4
5	Βαζελίνη	12.3	12.4	8.8	2.136	12.3
6	Χωρίς	13.9	14.0	8.4	2.136	17.1
7	Χωρίς	15.1	15.2	9.2	2.028	15.3
	Μέσο με λιπαντικό	10.4	10.4	6.9	2.048	10.2
	Μέσο χωρίς λιπαντικό	14.5	14.6	8.8	2.082	16.2
	STD με λιπαντικό	2.0	2.1	1.4	0.049	2.5
	STD χωρίς λιπαντικό	0.6	0.6	0.4	0.054	0.9

Γίνεται αντιληπτό (Πίνακας 4.2) ότι με την ύπαρξη αντιτριβικών μέσων (Βαζελίνη, Γράσο και φύλλα τεφλόν) η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι μικρότερη από την αντοχή χωρίς την ύπαρξη αυτών. Αυτή η αισθητή διαφορά της αντοχής, σχετίζεται με την ύπαρξη σημαντικής τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των πλακών φόρτισης και της επιφάνειας επαφής για τα δοκίμια που δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο λιπαντικό. Επίσης, ακριβώς για τον ίδιο λόγο το μέσο μέτρο ελαστικότητας με την χρήση αντιτριβικών μέσων είναι μικρότερο καθώς στην

καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης παρουσιάζονται μικρότερες τιμές έως την αστοχία του δοκιμίου, άρα μικρότερο μέτρο ελαστικότητας.

Τα αποτελέσματα για τον ψαμμίτη από τον Καλαθά χρειάζονται παραπάνω διερεύνηση, καθώς τα πρότυπα ορίζουν ότι πρέπει να πραγματοποιηθούν τουλάχιστον 6 δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Παρόλα αυτά στα αποτελέσματα του [Πίνακα 4.3](#) παρατηρείται το ίδιο ακριβώς φαινόμενο με αυτό του ασβεστόλιθου Lecce, δηλαδή μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας με την χρήση βαζελίνης.

Πίνακας 4.3: Μηχανικές ιδιότητες ψαμμίτη από την περιοχή του καλαθά.

Δοκίμιο	Λιπαντικό	σc MPa	C2 MPa	E _{Μέσο} GPa	H/D	Ενέργεια Παραμόρφωσης kJ/m ³
1	Χωρίς	11.9	11.8	11.9	1.899	8.3
2	Χωρίς	5.2	5.2	8.3	2.061	3.2
3	Βαζελίνη	7.4	7.4	12.4	2.016	3.4
4	Βαζελίνη	7.5	7.5	2.6	1.949	8.1
	Μέσο με λιπαντικό	7.4	7.4	7.5	1.982	5.7
	Μέσο χωρίς λιπαντικό	8.6	8.5	10.1	1.980	5.8
	STD με λιπαντικό	0.0	0.0	4.9	0.033	2.3
	STD χωρίς λιπαντικό	3.3	3.3	1.8	0.081	2.6

Από τον παρακάτω [Πίνακα 4.4](#) ισχύει ακριβώς το αντίθετο φαινόμενο από τα προηγούμενα δύο εξεταζόμενα πετρώματα. Συγκεκριμένα, η αντοχή με χρήση βαζελίνης είναι μεγαλύτερη από την αντοχή χωρίς την χρήση αυτής. Το ίδιο ισχύει και για το μέτρο ελαστικότητάς. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι το δείγμα παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα που μπορεί να οφείλεται σε έντονη ανομοιομορφία του υλικού. Στους πίνακες που ακολουθούν ([Πίνακες 4.5-4.6](#)) απεικονίζεται η μάζα των δοκιμίων μαρμάρου Α και ασβεστόλιθου Lecce με χρήση βαζελίνης.

Πίνακας 4.4: Μηχανικές Ιδιότητες Μαρμάρου Α.

Δοκίμιο	Λιπαντικό	σc MPa	C2 MPa	E _{Μέσο} GPa	H/D	Ενέργεια Παραμόρφωσης kJ/m ³
1A	Χωρίς	157.6	161.3	82.9	2.451	226.9
2A	Χωρίς	153.1	156.3	81.4	2.394	164.3
10A	Χωρίς	158.9	162.3	85.5	2.414	180.7
11A	Χωρίς	125.4	128.1	69.9	2.410	175.6
12A	Χωρίς	148.6	151.6	79.2	2.376	160.2

13A	Χωρίς	145.8	148.6	84.2	2.363	138.0
3A	Βαζελίνη	150.7	153.6	80.1	2.345	157.7
4A	Βαζελίνη	151.9	154.8	81.7	2.345	160.6
5A	Βαζελίνη	150.9	154.2	81.6	2.413	150.5
6A	Βαζελίνη	158.6	161.3	80.1	2.315	198.5
7A	Βαζελίνη	153.3	156.8	76.3	2.447	217.4
8A	Βαζελίνη	151.8	154.8	81.2	2.371	247.5
9A	Βαζελίνη	149.4	152.6	85.5	2.407	307.6
	Μέσο με λιπαντικό	152.4	155.4	80.9	2.377	205.8
	Μέσο χωρίς λιπαντικό	148.2	151.4	80.5	2.401	174.3
	STD με λιπαντικό	2.8	2.7	2.5	0.043	53.0
	STD χωρίς λιπαντικό	5.0	11.5	5.2	0.028	27.2

Πίνακας 4.5: Μάζα δοκιμών Ασβεστόλιθου *Lecce* με χρήση βαζελίνης

Δοκίμιο	Αρχική μάζα δοκιμίου χωρίς βαζελίνη (g)	Τελική μάζα Δοκιμίου με Βαζελίνη (g)	Διαφορά (g)
1	310.2	310.8	0.6
2	312.3	312.7	0.4
4	300.4	300.6	0.2
5	311.3	311.6	0.3
Μέση τιμή (g)			0.4

Πίνακας 4.6: Μάζα δοκιμών μαρμάρου *A* με χρήση βαζελίνης.

Δοκίμιο	Αρχική μάζα δοκιμίου χωρίς βαζελίνη (g)	Τελική μάζα δοκιμίου με βαζελίνη (g)	Διαφορά (g)
3	655.3	655.5	0.2
4	675.1	675.2	0.1
5	673.1	673.4	0.3
6	646.5	646.8	0.3
7	682.8	682.9	0.1
8	662.6	662.8	0.2
9	671.3	671.6	0.3
Μέση τιμή (g)			0.2

Τέλος, από τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης μαρμάρου Β ([Πίνακας 4.7](#)) προκύπτει ότι με την χρήση λιπαντικού οι τιμές των αντοχών και των μέτρων ελαστικότητας μειώνονται σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν δίχως την χρήση βαζελίνης. Όσον αφορά την ενέργεια παραμόρφωσης δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα με την

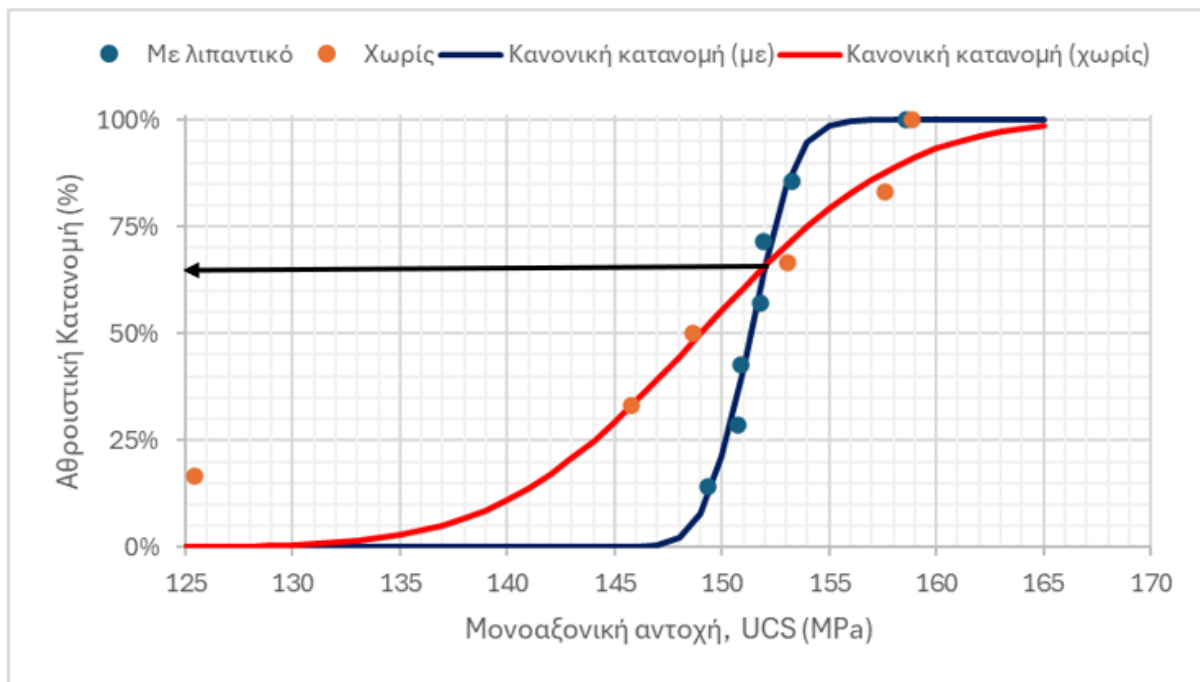
χρήση ή χωρίς λιπαντικού, καθώς για τα δοκίμια ασβεστόλιθου Lecce η παραμορφωσιακή ενέργεια χωρίς την χρήση βαζελίνης είναι μεγαλύτερη από αυτή με την χρήση λιπαντικών. Το αντίθετο ισχύει για τα δοκίμια μαρμάρου A & B, ενώ η ενέργεια παραμόρφωσης του ψαμμίτη προκύπτει η ίδια με ή χωρίς χρήση βαζελίνης.

Πίνακας 4.7: Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου B.

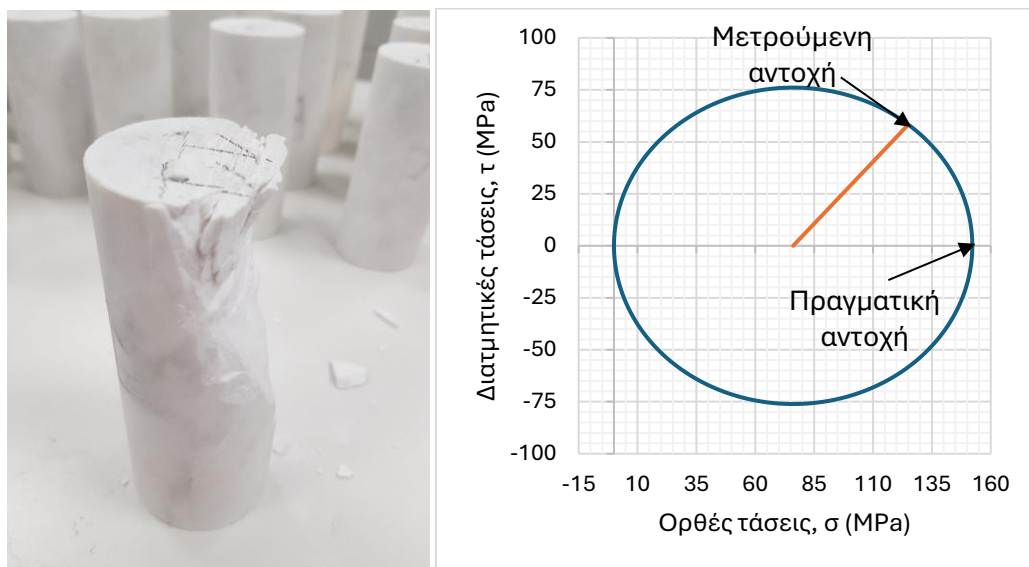
Δοκίμιο	Λιπαντικό	σ_c MPa	C2 MPa	$E_{\text{Μέσο}}$ GPa	H/D	Ενέργεια Παραμόρφωσης kJ/m ³
1B	Βαζελίνη	139.7	142.1	70.7	2.304	194.8
3B	Βαζελίνη	120.3	122.8	59.5	2.387	158.1
4B	Βαζελίνη	128.0	130.0	64.1	2.283	185.0
5B	Βαζελίνη	126.7	129.3	74.3	2.377	168.1
6B	Βαζελίνη	134.1	136.7	66.5	2.368	188.3
12B	Βαζελίνη	129.4	131.9	67.9	2.368	201.5
13B	Βαζελίνη	156.6	160.1	71.0	2.424	206.7
14B	Βαζελίνη	118.7	121.2	73.9	2.388	161.6
15B	Βαζελίνη	140.5	143.7	68.8	2.432	159.1
7B	Χωρίς	138.9	141.7	69.0	2.386	186.2
8B	Χωρίς	137.1	140.1	71.5	2.412	181.3
9B	Χωρίς	152.2	155.6	75.8	2.419	204.0
10B	Χωρίς	148.7	151.8	75.4	2.388	197.2
11B	Χωρίς	139.6	142.4	72.5	2.375	176.2
16B	Χωρίς	152.5	156.0	75.6	2.429	204.4
17B	Χωρίς	134.9	138.1	93.4	2.458	138.7
18B	Χωρίς	130.4	132.6	87.1	2.296	0.137
	Μέσο με λιπαντικό	132.7	135.3	68.5	2.370	0.180
	Μέσο χωρίς λιπαντικό	141.8	144.8	77.5	2.395	0.178
	STD με λιπαντικό	11.1	11.4	4.5	0.047	0.018
	STD χωρίς λιπαντικό	7.8	8.1	7.8	0.045	0.025

Σύμφωνα με το [Σχήμα 4.5](#) για το μάρμαρο Α παρατηρείται ότι η μπλε καμπύλη η οποία αντιστοιχεί στην κανονική κατανομή είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά και είναι πολύ πιο απότομη (μικρή διασπορά) σε σχέση με την πορτοκαλί καμπύλη που δηλώνει την κανονική κατανομή χωρίς την χρήση βαζελίνης. Αντίθετα η πορτοκαλί καμπύλη, που αφορά τις δοκιμές χωρίς λιπαντικό, έχει μεγαλύτερη διασπορά και το μεγαλύτερο ποσοστό των πειραμάτων (67%) έδειξε μικρότερη αντοχή από αυτά με λιπαντικό σε αντίθεση με όλα τα άλλα υλικά που εξετάστηκαν. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο φαινόμενο των άκρων λόγω υψηλών τριβών (28°) ([Σχήμα 4.6](#)) ή στην ανομοιομορφία του υλικού πράγμα που αποδεικνύεται και από την

πολύ χαμηλή αντοχή μακριά από τον κύριο πληθυσμό του δείγματος 11 που έδωσε αντοχή 125 MPa.



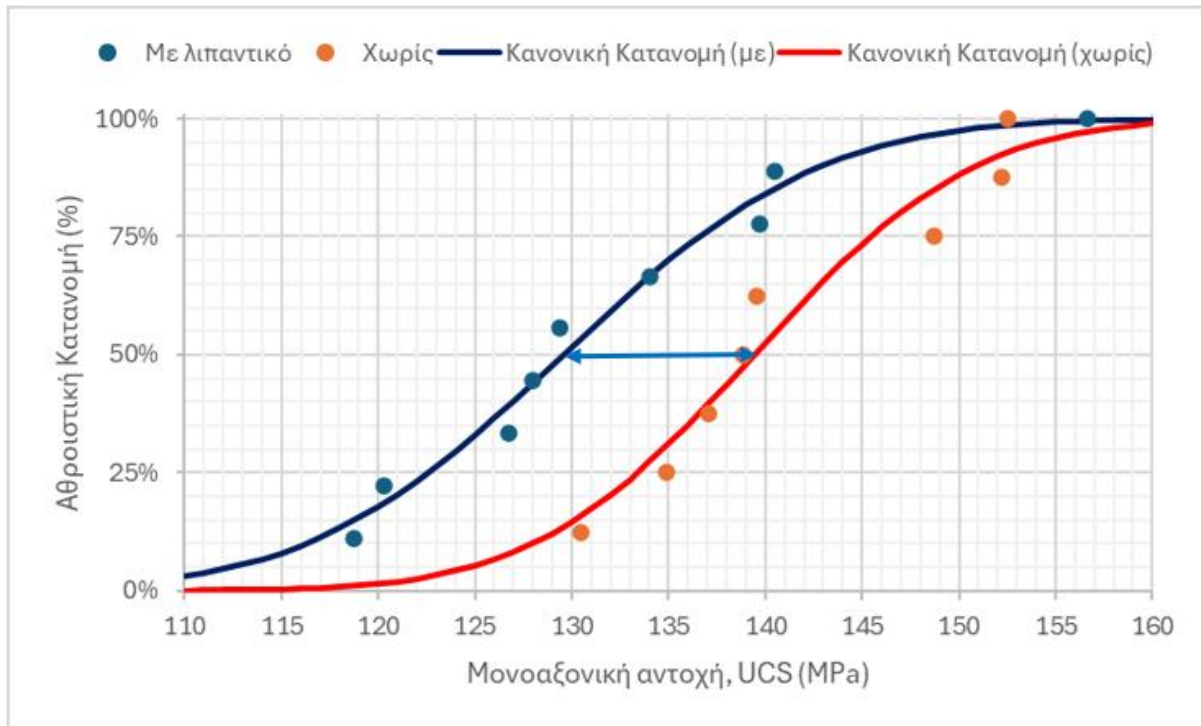
Σχήμα 4.5: Αθροιστική κατανομή Μαρμάρου Α με και χωρίς βαζελίνη.



Σχήμα 4.6: Χαρακτηριστική αστοχία του δοκιμίου ΙΙΑ λόγω του φαινομένου των άκρων.

Στο Σχήμα 4.7 η μπλε καμπύλη υποδηλώνει την κανονική κατανομή με χρήση λιπαντικού όπου παρατηρήθηκε ότι είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά σε σχέση με την πορτοκαλί καμπύλη η οποία εκφράζει την κανονική κατανομή χωρίς χρήση λιπαντικού. Οι δοκιμές χωρίς λιπαντικό εμφανίζουν υψηλότερη μέση αντοχή, ενώ και οι δύο κατανομές εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τις καμπύλες του μαρμάρου Α, αλλά είναι σαφές ότι οι αντοχές με λιπαντικό είναι εμφανώς μικρότερες κατά 6.9% καθώς επίσης η

πιθανότητα να ισχύει για το συγκεκριμένο υλικό είναι 100% εφόσον οι δύο καμπύλες δεν τέμνονται σε σημεία εκτός των ακραίων τιμών. Αυτό το φαινόμενο είναι αναμενόμενο καθώς ένα ποσοστό της ενέργειας πάει στις τριβές με αποτέλεσμα η μετρούμενη τιμή να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική.

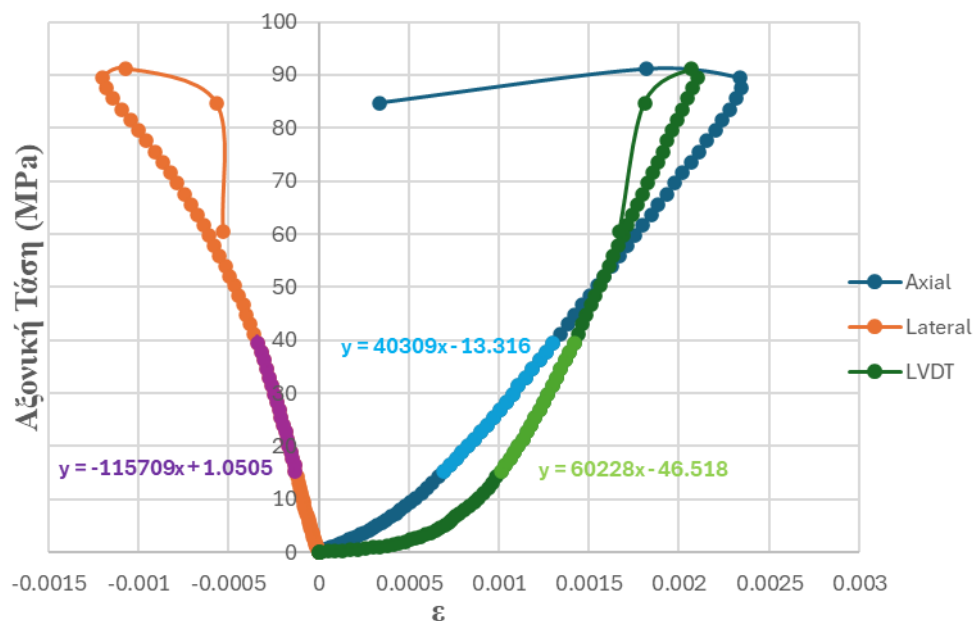


Σχήμα 4.7: Αθροιστική κατανομή Μαρμάρου Β με και χωρίς βαζελίνη.

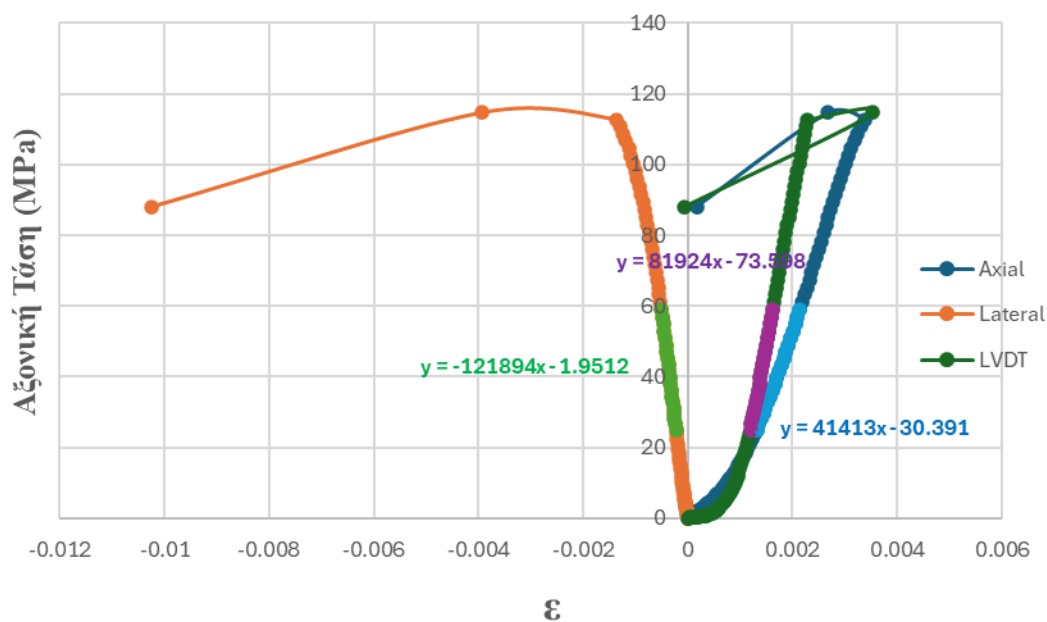
Συγκεντρωτικά για το Σχήμα 4.5 με χρήση βαζελίνης η μέση τιμή (mean) ισούται με 152.36 MPa, η διάμεσος (median) με 151.80 MPa και η τυπική απόκλιση (STD) με 2.99 MPa, ενώ χωρίς χρήση αυτής η μέση τιμή είναι 152.36 MPa, η διάμεσος 150.85 MPa και η τυπική απόκλιση 12.26 MPa. Για το Σχήμα 4.7 με την χρήση βαζελίνης η μέση τιμή υπολογίζεται στα 132.67 MPa, η διάμεσος στα 129.36 MPa και η τυπική απόκλιση στα 11.75 MPa, εντούτοις χωρίς την χρήση αυτής η μέση τιμή ισούται με 141.79 MPa, η διάμεσος με 139.22 MPa και η τυπική απόκλιση στα 8.31 MPa.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων οι μεγαλύτερες διαφορές στις αντοχές και στα μέτρα ελαστικότητας των πετρωμάτων παρατηρήθηκαν στα δοκίμια μαρμάρου Β, γι' αυτόν τον λόγο έγινε χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων στα δοκίμια αυτά ώστε να υπολογιστούν τα μέτρα ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Ο τρόπος θραύσης αυτών των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

Όπως προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.4 πραγματοποιήθηκαν 2 δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων. Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για το δοκίμιο 20B πραγματοποιήθηκε με χρήση βαζελίνης, ενώ στο δοκίμιο 19B δεν προστέθηκε βαζελίνη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.8 και Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα Αξονικής τάσης - παραμόρφωσης με χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων για το δοκίμιο 19B.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα Αξονικής τάσης - παραμόρφωσης με χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων για το δοκίμιο 20B.

Στα παραπάνω [Σχήματα 4.8-4.9](#) απεικονίζονται η αξονική (axial strain) και η πλευρική-εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση (lateral strain). Από την αξονική παραμόρφωση υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Συγκεκριμένα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για το δοκίμιο 19B υπολογίστηκε από την τιμή του ηλεκτρικού μηχανοσιόμετρου στα 41.4 GPa, ενώ η τιμή από το LVDT (Linear Variable Differential Transformer) υπολογίστηκε στα 60.2 GPa. Παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών, με την πιο αξιόπιστη μέτρηση να είναι αυτή από το LVDT. Τέλος, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για το ίδιο δοκίμιο ισούται με 91.2 MPa. Όσον αφορά το δοκίμιο 20B (σχήμα 4.6) το μέτρο ελαστικότητας από το LVDT υπολογίστηκε στα 81.9 GPa, ενώ η αντίστοιχη τιμή από το ηλεκτρικό μηχανοσίμετρο ισούται με 41.4 GPa. Στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται αντιληπτή ακόμη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας, αλλά και εδώ η πιο αξιόπιστη μέτρηση είναι αυτή που προκύπτει από το LVDT. Η αντοχή του δοκιμίου 20B υπολογίστηκε στα 114.7 MPa.

Ο λόγος Poisson των εν λόγω δοκιμίων υπολογίστηκε ως ο λόγος της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης - αξονικής παραμόρφωσης προς την κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης-πλευρικής παραμόρφωσης. Η κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης – πλευρικής παραμόρφωσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας. Για το δοκίμιο 19B ο λόγος Poisson ισοδυναμεί με 0.35 ενώ για το δοκίμιο 20B ισούται με 0.34. Όπως παρατηρείται τα αποτελέσματα του λόγου Poisson στα δύο δοκίμια παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες τιμές. Βάση θεωρητικής υπόστασης ο λόγος Poisson στο δοκίμιο με χρήση βαζελίνης αναμενόταν να παρουσιάσει μεγαλύτερο λόγο από το δοκίμιο χωρίς την χρήση λιπαντικού. Όμως, στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό δεν παρατηρήθηκε. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η δοκιμή εξαρτάται και από τον λόγο H/D των δοκιμίων καθώς και από την ποσότητα βαζελίνης που χρησιμοποιήθηκε στο ένα από τα δύο δοκίμια. Για να εξαχθεί μια πιο εμπειριστατωμένη άποψη όσον αφορά τον λόγο Poisson ανάμεσα σε δοκίμια με χρήση ή όχι λιπαντικού θα έπρεπε να εφαρμοστούν περισσότερες δοκιμές με ηλεκτρικά μηχανοσιόμετρα (τουλάχιστον 6). Τέλος, οι υπολογισμός του λόγου Poisson δεν πραγματοποιήθηκε στο 50% καθώς λόγω της αξονικής κατάτμησης εμφανίστηκαν μεγάλες παραμορφώσεις. Ακόμη και οι υπολογισμένοι λόγοι Poisson που προέκυψαν είναι μεγάλοι για τα μάρμαρα.

Όπως προαναφέρθηκε στο *υποκεφάλαιο 2.5* υπολογίστηκε η γωνία τριβής για κάθε ένα δοκίμιο με χρήση ή όχι βαζελίνης. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν εξήχθησαν από τον υπολογισμό των μέσων τιμών των γωνιών τριβής. Συγκεκριμένα, για τον ασβεστόλιθο Lecce

η γωνία τριβής χωρίς χρήση βαζελίνης υπολογίστηκε σε 30° ενώ με χρήση αυτής σε 19° . Η τιμή της γωνίας τριβής για τον ψαμμίτη από την περιοχή του καλαθά χωρίς χρήση λιπαντικού ισούται με 36° ενώ με χρήση αυτού 18° . Επιπλέον, για το μάρμαρο Α και Β με την χρήση βαζελίνης οι τιμές των γωνιών τριβής ανέρχονται σε 20° και 19° αντίστοιχα, ενώ χωρίς την χρήση αυτής το μάρμαρο Α ισούται με 28° και το μάρμαρο Β με 30° . Με την προσθήκη βαζελίνης στα άκρα του δοκιμίου παρατηρείται μείωση της γωνίας τριβής σε όλα τα εξεταζόμενα πετρώματα. Η μεγαλύτερη διαφορά γίνεται αντιληπτή στο πέτρωμα του ασβεστόλιθου Lecce. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι γωνίες τριβής που υπολογίστηκαν με την χρήση λιπαντικού είναι υπερεκτιμημένες καθώς δημιουργούνται δυνάμεις συνάφειας (συνοχής) μεταξύ πλάκας φόρτισης και δοκιμίου.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της τριβής σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 43 δοκιμές σε 3 διαφορετικά είδη πετρωμάτων (Ασβεστόλιθος Lecce, Ψαμμίτης από την περιοχή του Καλαθά Χανίων, και δύο διαφορετικά μάρμαρα) με την χρήση ή χωρίς αντιτριβικών μέσων. Αναλύθηκαν αποτελέσματα σχετικά με το πώς η τριβή επηρεάζει τις αντοχές των πετρωμάτων, το μέτρο ελαστικότητας του Young, τον λόγο Poisson, τον τρόπο αστοχίας των εν λόγω πετρωμάτων καθώς υπολογίστηκε και η γωνία τριβής αυτών. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμών είναι τα εξής:

- Κατά τον τρόπο αστοχίας των προαναφερθέντων πετρωμάτων παρατηρείται ότι υπερिσχύει ο τύπος αστοχίας σε διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου καθώς 20 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με αυτόν τον τρόπο. Ακολουθεί ο τύπος αστοχίας με αξονική διάσπαση καθώς 15 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με τον εν λόγω τρόπο. Επιπλέον, 6 από τα 43 δοκίμια αστόχησαν με θραύση σχήματος Y. Τέλος, η διπλή διάτμηση και η πολλαπλή θραύση εμφανίστηκαν σε 1 μόνο δοκίμιο (43 δοκίμια διότι προστέθηκαν και οι 2 δοκιμές με την χρήση ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων, βλέπε **Παράρτημα Α**).
- Κατά την χρήση λιπαντικής ουσίας αποδείχθηκε ότι η αντοχή των πετρωμάτων μειώνεται σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε χωρίς χρήση αντιτριβικών μέσων. Εξαίρεση του φαινομένου αυτού παρατηρήθηκε στο Μάρμαρο Α, καθώς οι αντοχές των περισσότερων δοκιμών που προέκυψαν χωρίς την χρήση λιπαντικού ήταν μεγαλύτερες από αυτές με την χρήση βαζελίνης. Το φαινόμενο αυτό, για το Μάρμαρο Α μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία εγκοίλων ή ασυνεχειών στην δομή τους καθώς και στο φαινόμενο των άκρων λόγω υψηλών τριβών.
- Όσον αφορά την ενέργεια παραμόρφωσης δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα με την χρήση ή χωρίς λιπαντικού, καθώς για τα δοκίμια ασβεστόλιθου Lecce η παραμορφωσιακή ενέργεια χωρίς την χρήση βαζελίνης είναι μεγαλύτερη από αυτή με την χρήση λιπαντικών. Το αντίθετο ισχύει για τα δοκίμια μαρμάρου Α & Β, ενώ η ενέργεια παραμόρφωσης του ψαμμίτη προκύπτει η ίδια με ή χωρίς χρήση βαζελίνης. Αυτό το γεγονός μπορεί να οφείλεται στο ότι αν η μείωση της τριβής επιτρέψει στο δοκίμιο να φτάσει σε

μεγαλύτερη συνολική πλαστική παραμόρφωση (περισσότερη ομοιόμορφη παραμόρφωση πριν την αστοχία), τότε η συνολική ενέργεια που απορροφάται μέχρι την στιγμή της αστοχίας μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να αυξηθεί, όχι λόγω τριβής, αλλά επειδή το δοκίμιο παραμορφώθηκε περισσότερο.

- Όπως παρατηρήθηκε τα αποτελέσματα του λόγου Poisson στα δύο δοκίμια (19B και 20B) παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες τιμές. Βάσει θεωρητικής ερμηνείας, η ύπαρξη τριβών θα αναμενόταν να εμποδίζει την παραμόρφωση του δοκιμίου στην ακτινική διεύθυνση δίνοντας μικρότερους λόγους Poisson, πράγμα που δεν επιβεβαιώθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η τριβή προκαλεί διόγκωση στο μέσο του δοκιμίου άρα μπορεί να εμφανίσει μεγαλύτερη τοπική διαστολή στο μέσο του δοκιμίου απ' ότι στην περίπτωση με λίπανση. Επιπλέον, το αποτέλεσμα της δοκιμής εξαρτάται από τον λόγο H/D των δοκιμίων καθώς και από την ποσότητα βαζελίνης που χρησιμοποιήθηκε στο ένα από τα δύο δοκίμια. Τέλος, για να εξαχθεί μια πιο εμπειριστατωμένη άποψη όσον αφορά τον λόγο Poisson ανάμεσα σε δοκίμια με χρήση ή όχι λιπαντικού θα έπρεπε να εφαρμοστούν περισσότερες δοκιμές με ηλεκτρικά μηχανοσυστήματα (τουλάχιστον 6).
- Με την προσθήκη βαζελίνης στα άκρα του δοκιμίου παρατηρείται μείωση της γωνίας τριβής σε όλα τα εξεταζόμενα πετρώματα. Η μεγαλύτερη διαφορά γίνεται αντιληπτή στο πέτρωμα του ψαμμίτη. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη της τριβής υπερεκτιμά τις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη που η διαφορά αυτή φτάνει έως και 6.9% για το μάρμαρο B.
- Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που εξήχθησαν, παρουσιάζουν αποκλίσεις γιατί το LVDT μετράει τις καθολικές κατακόρυφες παραμορφώσεις ενώ τα ηλεκτρικά μηχανοσυστήματα μετρούν τοπικά στο σημείο εφαρμογής, οπότε στην περίπτωση που υπάρχουν τριβές αυτές οι δύο τιμές μπορούν να διαφοροποιούνται γιατί μεταβάλλεται το εντατικό πεδίο. Επιπλέον στα κυλινδρικά δοκίμια υπάρχει μια δυσκολία της καλής προσαρμογής ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος μετρήσεις.
- Για το μάρμαρο A, υπάρχει η πιθανότητα να βρεθούν μεγαλύτερες αντοχές με την χρήση λιπαντικού (67.5%), ενώ μικρότερο ποσοστό (23%) να προκύψουν μεγαλύτερες αντοχές χωρίς χρήση βαζελίνης. Εντούτοις, για το μάρμαρο B,

παρατηρείται ότι υπάρχει πιθανότητα 100% να γίνει υπερεκτίμηση της αντοχής χωρίς την χρήση βαζελίνης.

5.2 Προτάσεις

Για την περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης παρατίθενται οι εξής προτάσεις:

- Χρήση διαφορετικού αντιτριβικού μέσου κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (π.χ. ορυκτέλαιο).
- Η εισαγωγή υψηλών τριβών με την χρήση τραχέος υλικού, πχ γυαλόχαρτο, για να τονιστεί η επίδραση της τριβής στο πείραμα της μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης.
- Εφαρμογή κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης ώστε να εξαχθούν καλύτερα αποτελέσματα για την επίδραση της τριβής. Με τον κύκλο φορτίσεων – αποφορτίσεων επιτυγχάνεται κλείσιμο των πόρων του εκάστοτε πετρώματος.
- Χρησιμοποίηση δοκιμών με μεγαλύτερο λόγο H/D και σύγκριση με δοκίμια με μικρότερο λόγο.
- Χρήση “κλισιομέτρου” (Inclined plane instrument device) για την πιο άμεση και πιο σωστή μέτρηση της γωνίας τριβής.
- Στην παρούσα εργασία, η χρήση ισόποσης τοποθέτησης λιπαντικού επιτεύχθηκε με την ζύγιση του δείγματος πριν και μετά τη λίπανση. Η διαδικασία αυτή δεν εξασφαλίζει πάντα το σταθερό πάχος λιπαντικής ουσίας και θα χρειαζόταν η χρήση μιας τυποποιημένης διαδικασίας εξασφάλισης της απαιτούμενης ποσότητας για κάθε είδος πετρώματος.
- Ο σχεδιασμός του πειράματος να γίνεται όσο το δυνατόν βάσει της διαδικασίας των πρότυπων δοκιμών.

Βιβλιογραφία

- Van Mier Jan G. M. (1996). *Fracture process of concrete*. Boca Raton: CRC Press. Ανάκτηση από [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=A1-rUuTYcTEC&oi=fnd&pg=IA4&dq=Van+Mier+J+\(1996\)+Fracture+process+of+concrete.+CRC+Press,+Boca+Raton&ots=e2h3ZBMfLR&sig=DEm_gwMulRs7B6qySaHYZWGqbQY&redir_esc=y#v=onepage&q=Van%20Mier%20J%20\(1996\)%20Fracture%20proc](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=A1-rUuTYcTEC&oi=fnd&pg=IA4&dq=Van+Mier+J+(1996)+Fracture+process+of+concrete.+CRC+Press,+Boca+Raton&ots=e2h3ZBMfLR&sig=DEm_gwMulRs7B6qySaHYZWGqbQY&redir_esc=y#v=onepage&q=Van%20Mier%20J%20(1996)%20Fracture%20proc)
- Amadei B. (1996). Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(3), 293-325. doi:10.1016/0148-9062(95)00062-3
- Bažant Z.P. (1997). Scaling of quasibrittle fracture: hypotheses of invasive and lacunar fractality, their critique and Weibull connection. *International Journal of Fracture*, 83, 41-65. doi:10.1023/A:1007335506684
- Bieniawski Z.T., Bernede M.J. (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(2), 137. doi:10.1016/0148-9062(79)91450-5
- Bieniawski Z.T., Bernede M.J. (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 2. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(2), 138-140. doi:10.1016/0148-9062(79)91451-7
- Brady B.T. (1971). Effects of inserts on the elastic behavior of cylindrical materials loaded between rough end-plates. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8(4), 357-369. doi:10.1016/0148-9062(71)90047-7
- Brady, B., & Brown, E. (2006). *Rock mechanics for underground mining* (3rd Edition εκδ.). Springer. Ανάκτηση από <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-2116-9>
- Chakraborty S., Bisai R., Palaniappan S.K. (2019). Failure Modes of Rocks under Uniaxial Compression Tests: An Experimental Approach. *Journal of Advances in Geotechnical Engineering*, 2(3), 1-8. doi:10.5281/zenodo.3461773
- Chen, L., Mao, X., & Wu, P. (2020). Effect of High Temperature and Inclination Angle on Mechanical Properties and Fracture Behavior of Granite at Low Strain Rate. *Sustainability*, 12(3). doi:10.3390/su12031255
- Choi S, Thienel K.-C., Shah S.P. (1996). Strain softening of concrete in compression under different end constraints. *Magazine of Concrete Research*, σσ. (175):103-115. doi:10.1680/macr.1996.48.175.103

- Dai F, Xu Y, Zhao T, Xu NW, Liu Y. (2016). Loading-rate-dependent progressive fracturing of cracked chevron-notched Brazilian disc specimens in split Hopkinson pressure bar tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88(2), 49-60. doi:10.1016/j.ijrmms.2016.07.003
- Darlington W.J., Ranjith P.G., Choi S.K. (2011). The Effect of Specimen Size on Strength and Other Properties in Laboratory Testing of Rock and Rock-Like Cementitious Brittle Materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(5), 513-529. doi:10.1007/s00603-011-0161-6
- Feng P, Ayatollahi M.R., Dai F, Xu N.W., Wei M.D. (2017). DEM investigation on fracture mechanism of the CCNSCB specimen under intermediate dynamic loading. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(2), 48. doi:10.1007/s12517-017-2834-2
- Gaffney E. (1976). *Measurements of dynamic friction between rock and steel*. California: Defense Nuclear Agency, Washington. Ανάκτηση από <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA043708.pdf>
- Gao F.Q., Stead D., Kang H.P. (2014). Numerical investigation of the scale effect and anisotropy in the strength and deformability of coal. *International Journal of Coal Geology*, 136, 25-37. doi:10.1016/j.coal.2014.10.003
- Gao M., Liang Z., Li Y., Wu X., Zhang M. (2018). End and shape effects of brittle rock under uniaxial compression. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), 1-13. doi:10.1007/s12517-018-3957-9
- Grote K-H., Antonsson E.K. (2009). *Springer handbook of mechanical engineering*. New York: Springer Science & Business Media. Ανάκτηση από https://www.academia.edu/36968135/Springer_Handbook_of_Mechanical_Engineering
- Haimson, B., Chang, C. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1-2), 285-296. doi:10.1016/S1365-1609(99)00106-9
- Hallbauer D.K., Wagner H., Cook N.G.W. (1973). Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 10(6), 713-726. doi:10.1016/0148-9062(73)90015-6
- Hawkes I., Mellor M. (1970). Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. *Engineering Geology*, 4(3), 179-285. doi:10.1016/0013-7952(70)90034-7
- He, Z., Wu, G., & Zhu, J. (2024). Mechanical properties of rock under uniaxial compression tests of different control modes and loading rates. *Scientific Reports*, 14(1). doi:10.1038/s41598-024-52631-1

- Hoek E., Brown E.T. (1980). *Underground excavations in rock* (1st Edition εκδ.). London: CRC Press. doi:10.1201/9781482288926
- Hoek E., Brown E.T. (1996). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. doi:10.1016/S1365-1609(97)80069-X
- Hoskins J.R., Horino F.G. (1968). *Effect of end conditions on determining compressive strength of rock samples*. California Institute of Technology. California: [Washington, D.C.] : U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines. Ανάκτηση από <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015078537936&seq=13>
- Hudson J.A., Brown E.T., Fairhurst C. (1971). Shape of the complete stress-strain curve for rock In: Proceeding of 13th symposium rock mechanics. University of Illinois, Urbana. 773-795.
- Hudson J.A., Brown E.T., Fairhurst C. (1972). Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure. *Engineering Geology*, 6(3), 155-189. doi:10.1016/0013-7952(72)90001-4
- Labuz J.F., Bridell J.M. (1993). Reducing frictional constraint in compression testing through lubrication. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(4), 451-455. doi:10.1016/0148-9062(93)91726-Y
- Li, K.; Yin, Z.Y.; Han, D.; Fan, X.; Cao, R.; Lin, H. (2021). Size Effect and Anisotropy in a Transversely Isotropic Rock Under Compressive Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(9), pp. 4639–4662. doi:10.1007/s00603-021-02558-0
- Liang Z.Z. (2005). *Three-dimensional failure process analysis of rock and associated numerical tests*. Ph.D Thesis, Northeastern University, Shenyang, China. Ανάκτηση από <https://isrm.net/download/media.file.b96c8ce2cc92a2f0.313139323632313934327a68656e677a68616f2d73756d6d6172792e706466.pdf>
- Liang Z.Z., Zhang Y.B., Tang S.B., Li L.C., Tang C.A. (2013). Size effect of rock masses and associated representative element properties. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(6), 1157-1166. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/289959284_Size_effect_of_rock_masses_and_associated_representative_element_properties
- Liu B.C., Zhang J.S., Du Q.Z., Tu J.F. (1998). Size effect of rock compressive strength. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 17:611-614.
- Liu J.G., Zeng Y.W. (2005). Numerical simulation of the end frictional effect of rock specimens. *Journal of Engineering Geology*, 13(2), 247-251. Ανάκτηση από <http://www.gcdz.org/en/article/id/9214>

- Mai G., Tang Z.P., Tang X.W. (2013). Numerical simulation of rock's end constraint effect under uniaxial compression (in Chinese). *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 68-71.
- Masoumi H., Saydam S., Hagan P.C. (2015). Unified Size-Effect Law for Intact Rock. *International Journal of Geomechanics*, 16(2). doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000543
- Mogi K. (1971). Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone. *Tectonophysics*, 11(2), 111-127. doi:10.1016/0040-1951(71)90059-X
- Mogi K. (2006). *Experimental Rock Mechanics* (1st Edition εκδ.). London: CRC Press. doi:10.1201/9780203964446
- Mogi, K. (1977). Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with special reference to earthquake precursors. *Journal of Physics of the Earth*, pp. 203-217. doi:10.1007/978-94-009-9911-4_18
- Pan P.Z., Feng X.T., Hudson J.A. (2009). Study of failure and scale effects in rocks under uniaxial compression using 3D cellular automata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4), 674-685. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.11.001
- Paterson M.S., Wong T.F. (2005). *Experimental Rock Deformation – The Brittle Field* (2nd εκδ.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. doi:10.1007/b137431
- Pells P.J.N. (2004). On the absence of size effects for substance strength of Hawkesbury sandstone. *Australian Geomechanics*, 39(1), 79-83. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/290483834_On_the_absence_of_size_effects_for_substance_strength_of_Hawkesbury_sandstone#fullTextFileContent
- Qi C.Z., Wang M.Y., Bai J.P., Wei X.K., Wang H.S. (2016). Investigation into size and strain rate effects on the strength of rock-like materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 86, 132-140. doi:10.1016/j.ijrmms.2016.04.008
- Rashed G., Peng S.S. (2015). Change of the mode of failure by interface friction and width-to-height ratio of coal specimens. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(3), 256-265. doi:10.1016/j.jrmge.2015.03.009
- Roberts A. (2014). *Geotechnology: An Introductory Text for Students and Engineers*. Pergamon Press. Ανάκτηση από https://books.google.gr/books/about/Geotechnology.html?id=6JeJBQAAQBAJ&redir_esc=y
- Shi L., Li X.-C. (2009). Analysis of end friction effect in true triaxial test. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 30(4), 1159-1164. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/287175681_Analysis_of_end_friction_effect_in_true_triaxial_test

- Song L., Liu W.Q., Jin C.J. (2012). Scale constitutive model of statistical damage for coal samples with effect of interfacial friction. *Engineering Mechanics*, 29(11), 344-349. doi:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.03.0163
- Takahashi M., Koide H. (1989). Effect of the Intermediate Principal Stress On Strength And Deformation Behavior of Sedimentary Rocks At the Depth Shallower Than 2000 M. (σσ. 19-26). Pau, France: International Symposium on Rock at Great Depth. Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/publication/264296525_Effect_of_the_intermediate_principal_stress_on_strength_and_deformation_behavior_of_sedimentary_rocks_at_the_depth_shallower_than_200m
- Tang C.A. (1997). Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(2), 249-261. doi:10.1016/S0148-9062(96)00039-3
- Tang C.A., Liu H., Lee P.K.K., Tusi Y., Tham L.G. (2000). Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression — Part I: effect of heterogeneity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), 555-569. doi:10.1016/S1365-1609(99)00121-5
- Tang C.A., Tham L.G., Lee P.K.K., Tusi Y., Liu H. (2000). Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression — Part II: constraint, slenderness and size effect. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), 571-583. doi:10.1016/S1365-1609(99)00122-7
- Thuro K., Plinninger R.J., Zäh S., Schütz S. (2001). Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test. *ISRM regional symposium EUROCK 2001: rock mechanics a challenge for society* (σσ. 169-174). Espoo, Finland: Helsinki University of Technology Finnish National Group of ISRM. Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/publication/285976879_Scale_effects_in_rock_strength_properties_Part_1_Unconfined_compressive_test_and_Brazilian_test
- Van Vliet M. R. A., Van Mier J. G. M. (1996). Experimental investigation of concrete fracture under uniaxial compression. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1(1), 115-127. doi:10.1002/(SICI)1099-1484(199601)1:1%3C115::AID-CFM6%3E3.0.CO;2-U
- Vardoulakis I., Labuz J.F., Papamichos E., Tronvoll J. (1998). Continuum fracture mechanics of uniaxial compression on brittle materials. *International Journal of Solids and Structures*, 35(31-32), 4313-4335. doi:10.1016/S0020-7683(97)00318-1
- Vutukuri V. S., Lama R. D., Saluja S. S. (1974). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks: Testing Techniques and Results* (481 εκδ., Τόμ. 2). Trans Tech Publications. Ανάκτηση από
https://books.google.gr/books/about/Handbook_on_Mechanical_Properties_of_Roc.html?id=93hGAAAAYAAJ&redir_esc=y



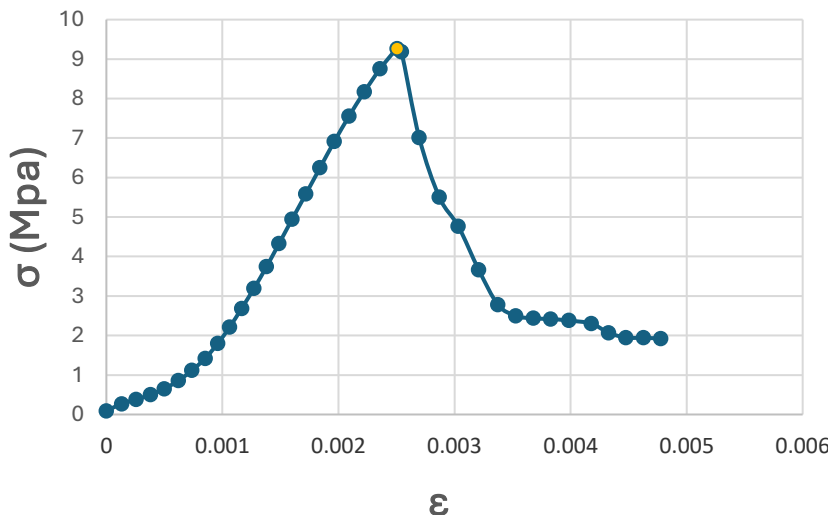
- Walton G., Gaines S. (2023). Evaluation of stress path and load rate effects on rock strength using compression testing data for Stanstead Granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 169, 1-13. doi:10.1016/j.ijrmms.2023.105455
- Walton, G., & Gaines, S. (2023). Evaluation of stress path and load rate effects on rock strength using compression testing data for Stanstead Granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 169. doi:10.1016/j.ijrmms.2023.105455
- Wei M.D., Dai F., Xu N.W., Zhao T., Liu Y. (2017). An experimental and theoretical assessment of semi-circular bend specimens with chevron and straight-through notches for mode I fracture toughness testing of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 99, 28-38. doi:10.1016/j.ijrmms.2017.09.004
- Wei X.X., Chau K.T. (2009). Finite and transversely isotropic elastic cylinders under compression with end constraint induced by friction. *International Journal of Solids and Structures*, 46(9), 1953-1965. doi:10.1016/j.ijsolstr.2009.01.007
- Xie, W., Liu, X., Zhang, X., Liu, Q., & Wang, E. (2025). A review of test methods for uniaxial compressive strength of rocks: Theory, apparatus and data processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(3), pp. 1889–1905. doi:10.1016/j.jrmge.2024.05.003
- Xiroudakis, G., Gamaletsos, P., Triantafyllou, G., Mavrigiannakis, S., Liolios, P., & Petrakis, E. (2025). Examining Uniaxial Compression Strength for Greek Marbles. *8th Global Stone Congress, June 16-20*. Drama, Greece.
- Xu Y.H., Cai M., Zhang X.W., Feng X.T. (2017). Influence of end effect on rock strength in true triaxial compression test. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(6), 862–880. doi:10.1139/cgj-2016-0393
- Zdenek P. Bazant, Jaime Planas. (1998). *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. New York: Routledge. doi:10.1201/9780203756799
- Zeng, B., Huang, D., Ye, S., Chen, F., Zhu, T., & Tu, Y. (2019). Triaxial extension tests on sandstone using a simple auxiliary apparatus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 120. doi:10.1016/j.ijrmms.2019.06.006
- Zou C.J., Wong L.N.Y. (2015). Size and Geometry Effects on the Mechanical Properties of Carrara Marble Under Dynamic Loadings. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 1695–1708. doi:10.1007/s00603-015-0899-3
- Αγιουτάντης Ζ. Γ., Μερτίκας Σ. Π. (2003). *Ένας Πρακτικός Οδηγός για τη Συγγραφή Τεχνικών Κειμένων*. Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων. Ανάκτηση από <https://www.iwn.gr/product.asp?catid=12876>
- Αγιουτάντης, Ζ. Γ. (2019). *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων* (2η εκδ.). Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων. Ανάκτηση από <https://www.iwn.gr/product.asp?catid=17636>



Νομικός Π. (2015). *Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. doi:10.57713/kallipos-615

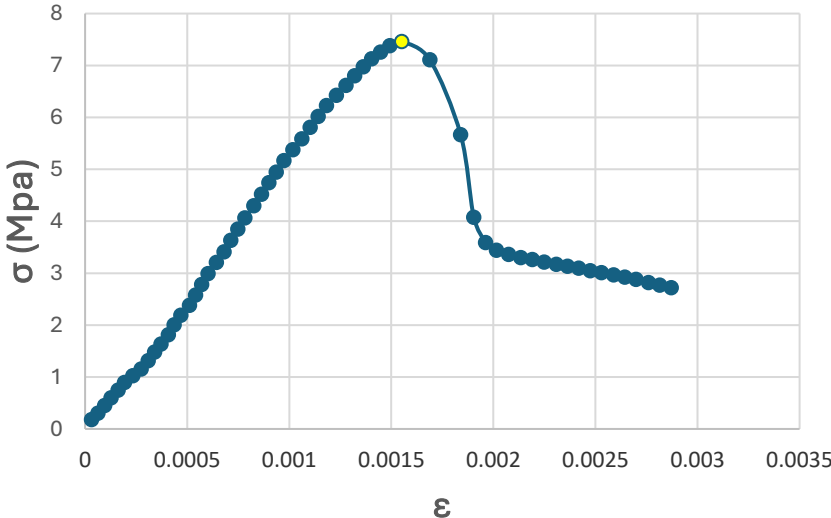
ISRM (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Int J Rock Mech Min Sci 16(2):137-140.


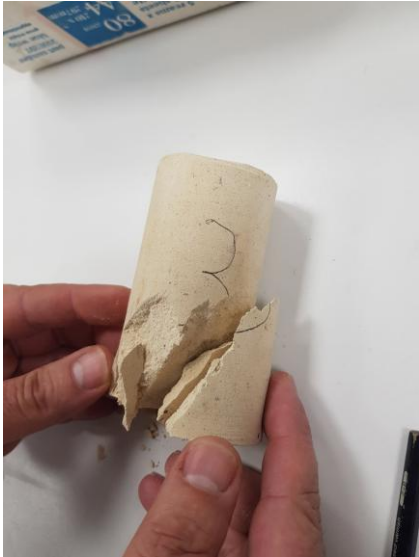
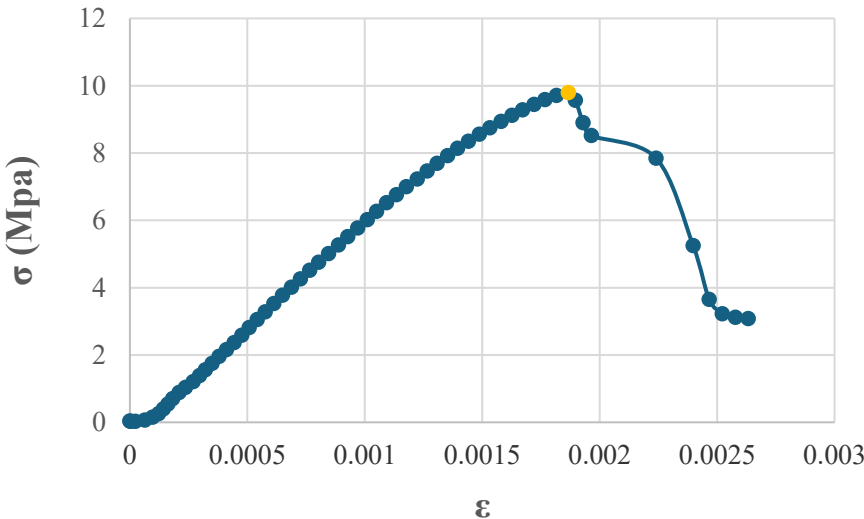
Παράρτημα Α

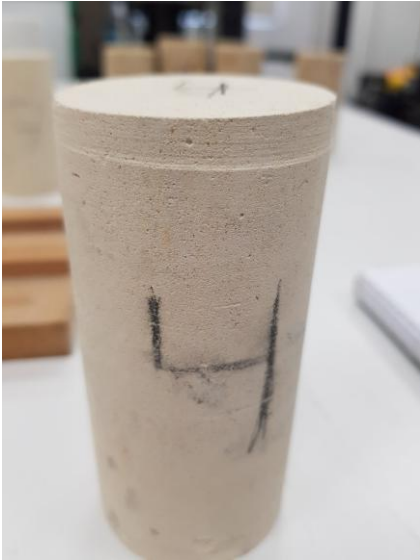

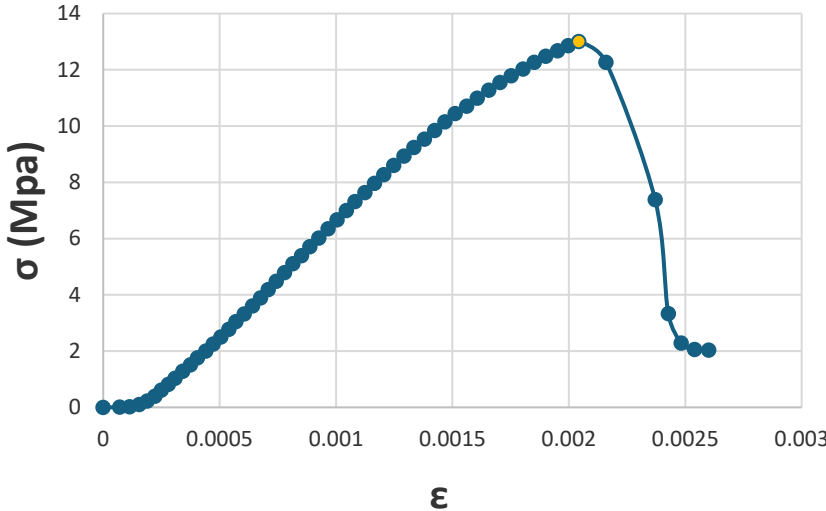
Α.1. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαλακού Ασβεστόλιθου Lecce

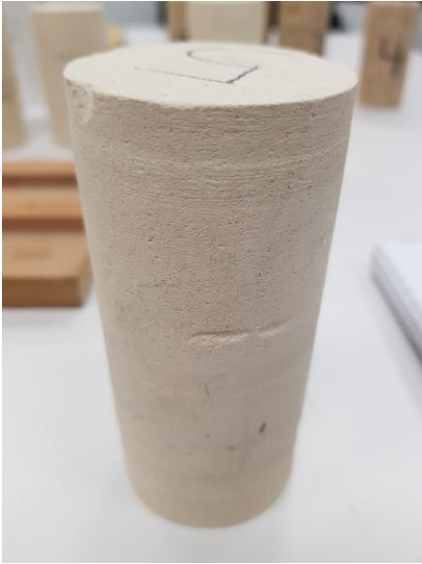

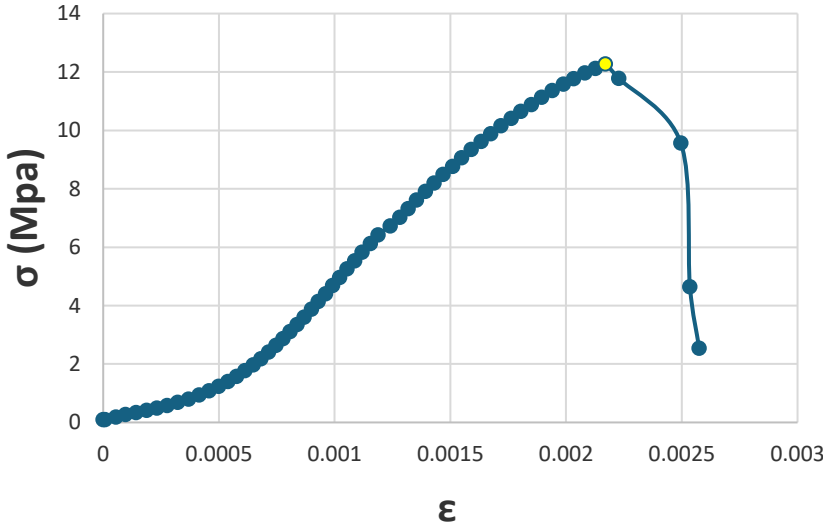
Δοκίμιο 1 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.023
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	4.967
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.018
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.374
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	9.3
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	5.3

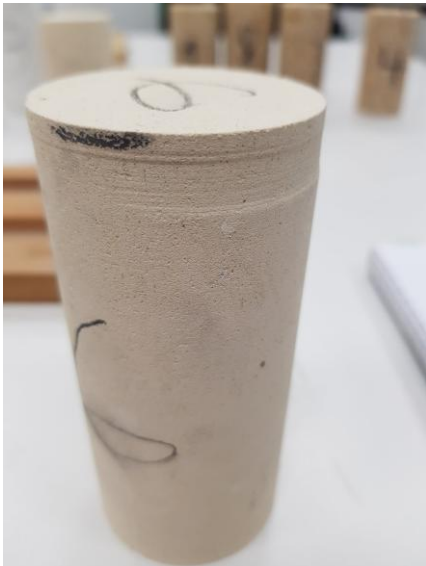

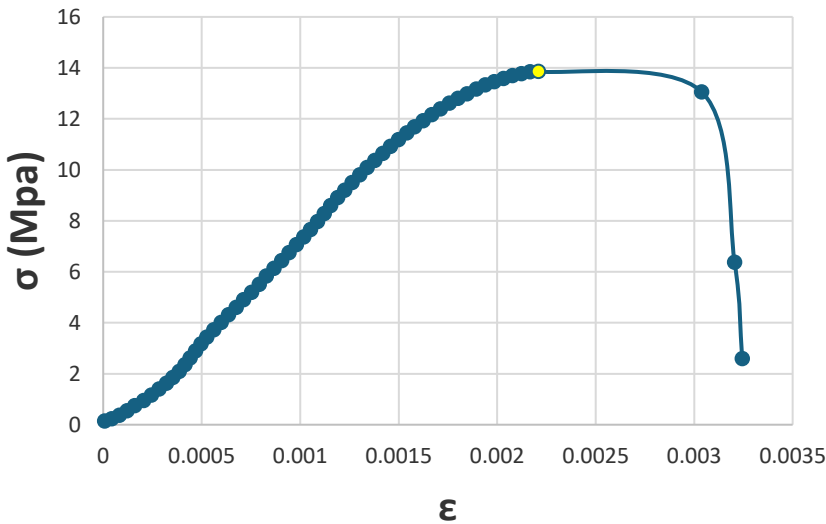
Δοκίμιο 2 με χρήση Γράσου		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.125
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	4.988
		Λόγος Ύψους/Διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.030
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.543
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	7.5
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	5.9



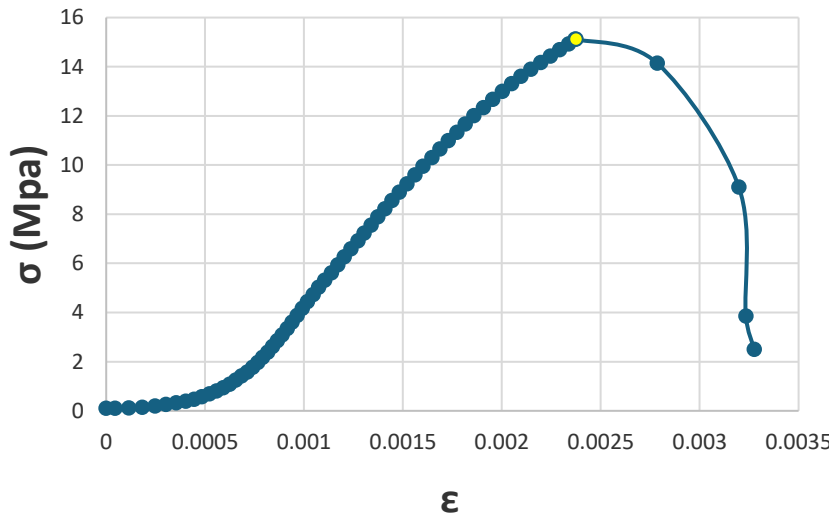

--

Δοκίμιο 3 με χρήση φύλλων τεφλόν		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	9.975
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.003
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	1.994
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.661
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	9.8
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	6.2



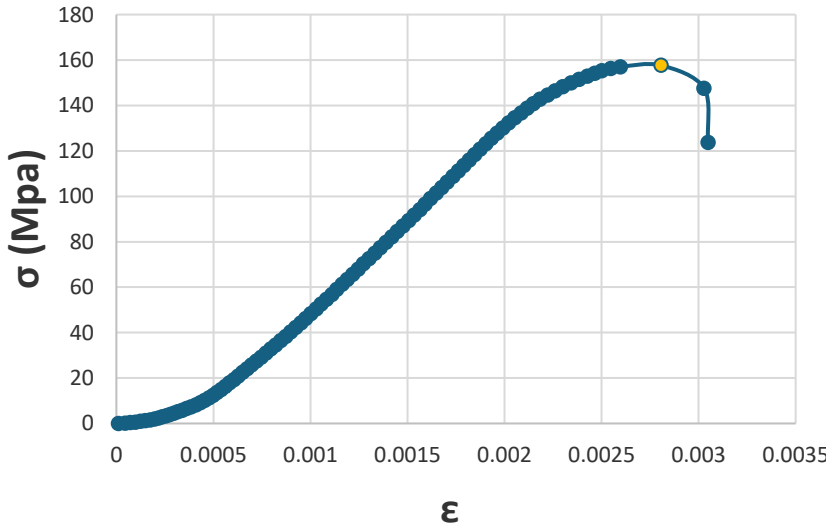
Δοκίμιο 4 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.332
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.005
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.064
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.674
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	3
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	13.0
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	8.3


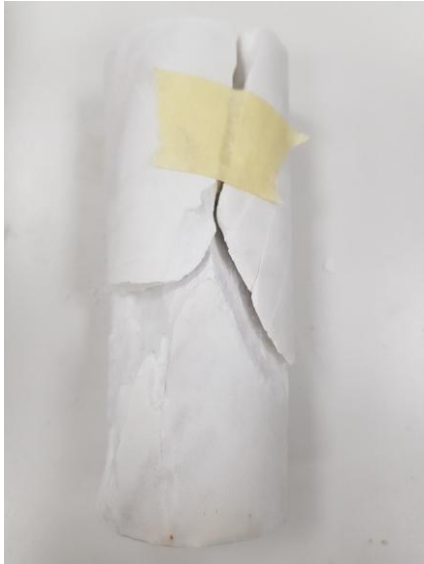
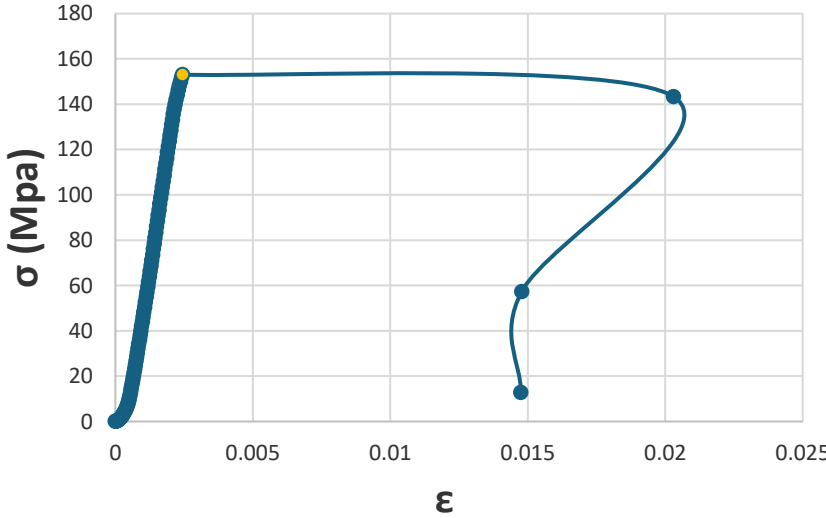
Δοκίμιο 5 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.635
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	4.978
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.136
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.465
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	12.3
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	8.8



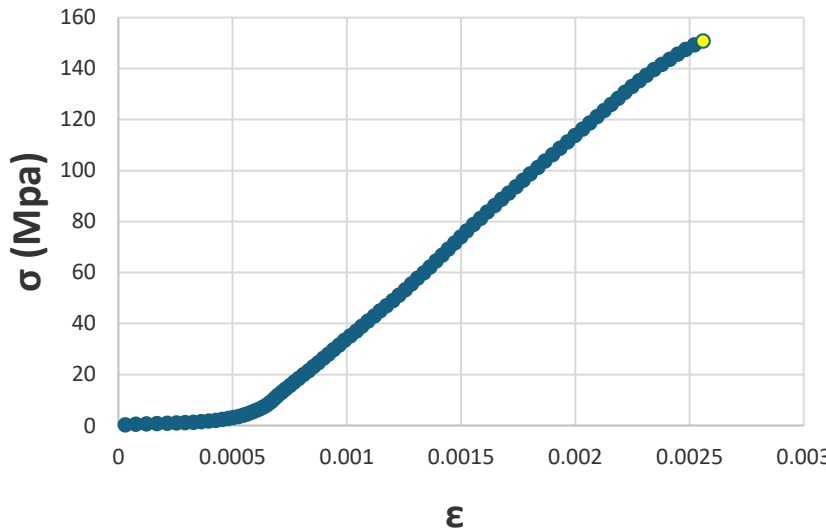
Δοκίμιο 6 χωρίς χρήση λιπαντικού		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.692
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.005
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.136
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.674
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	6
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	13.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	8.4


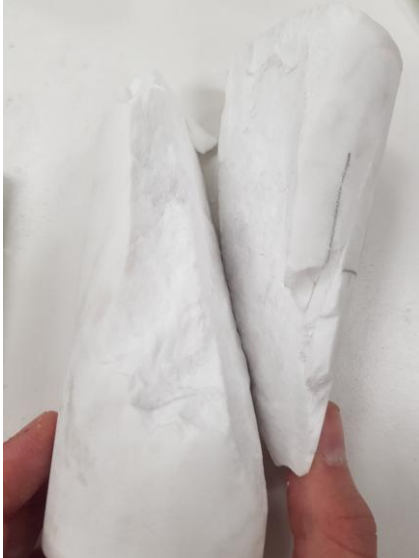
Δοκίμιο 7 χωρίς χρήση λιπαντικού		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	9.529
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	4.698
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.028
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	17.337
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	6
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	15.1
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	9.2

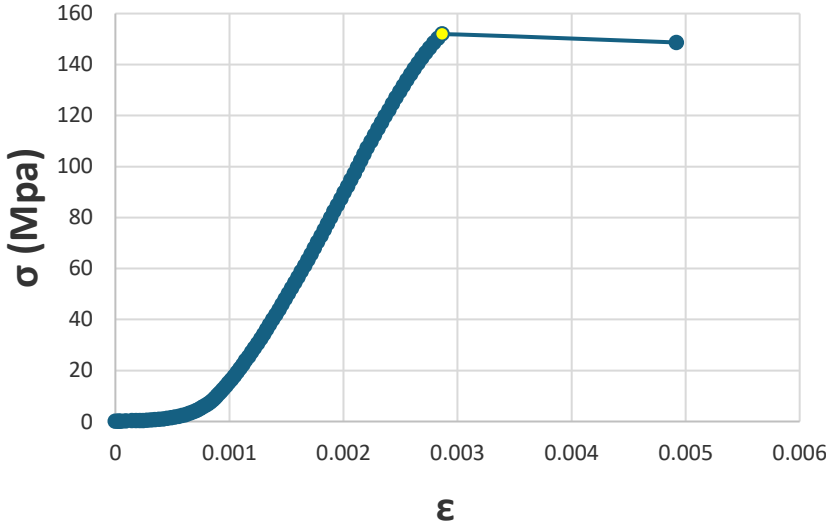
Α.2. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου τύπου Α.

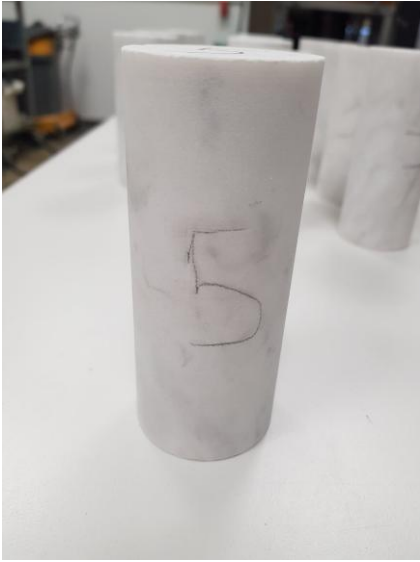

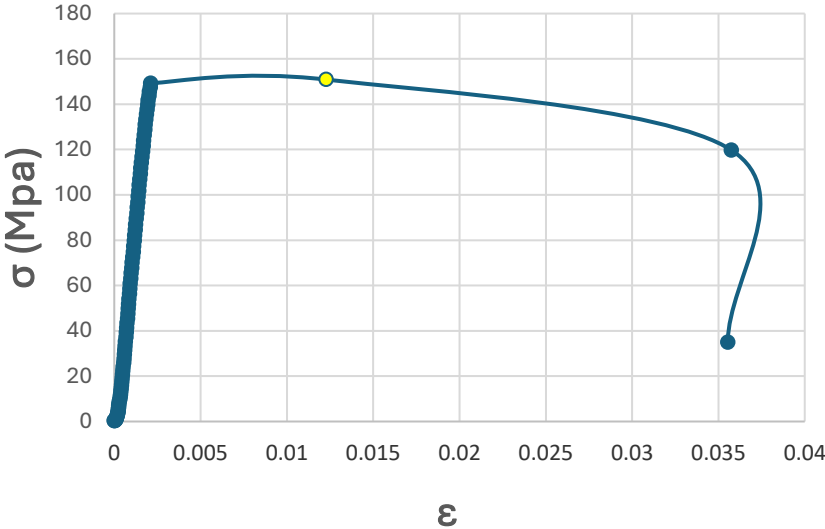
Δοκίμιο 1 χωρίς χρήση λιπαντικού		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.302
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.020
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.451
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.792
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	157.6
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	82.9



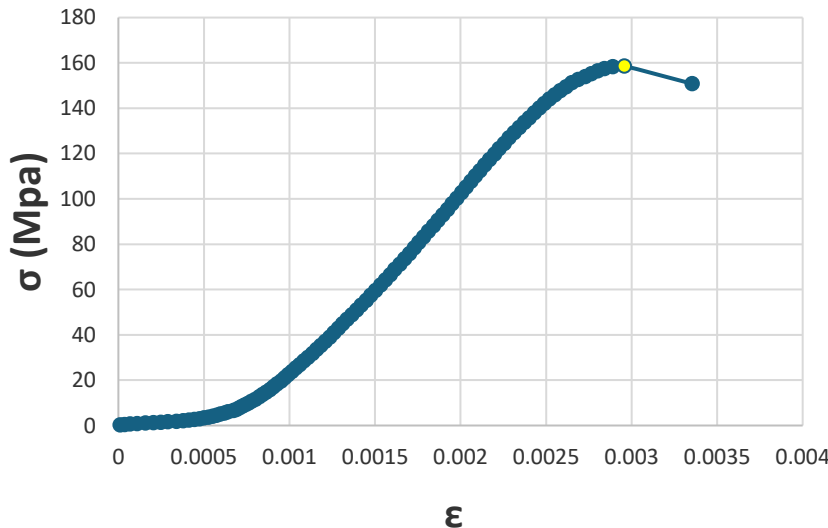
Δοκίμιο 2 χωρίς χρήση λιπαντικού		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.005
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.394
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	6
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	153.1
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	81.4

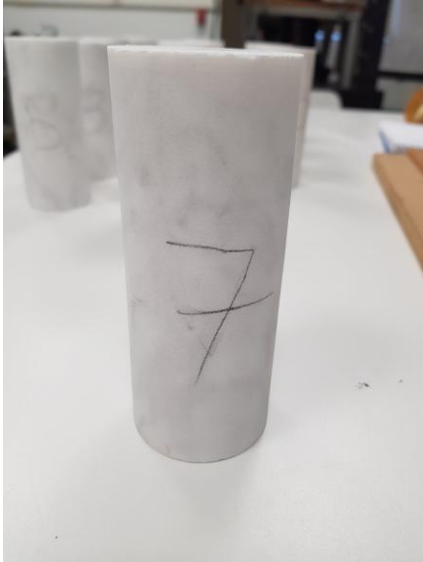
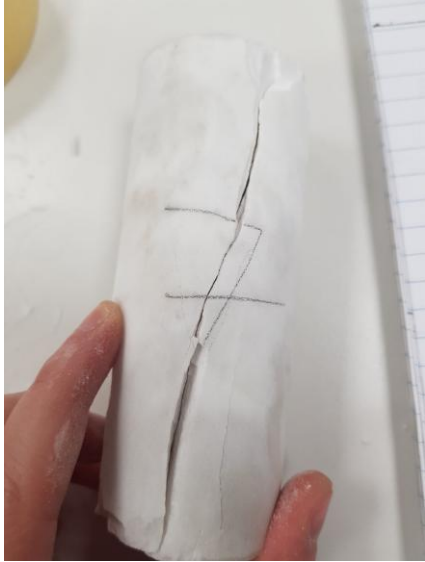
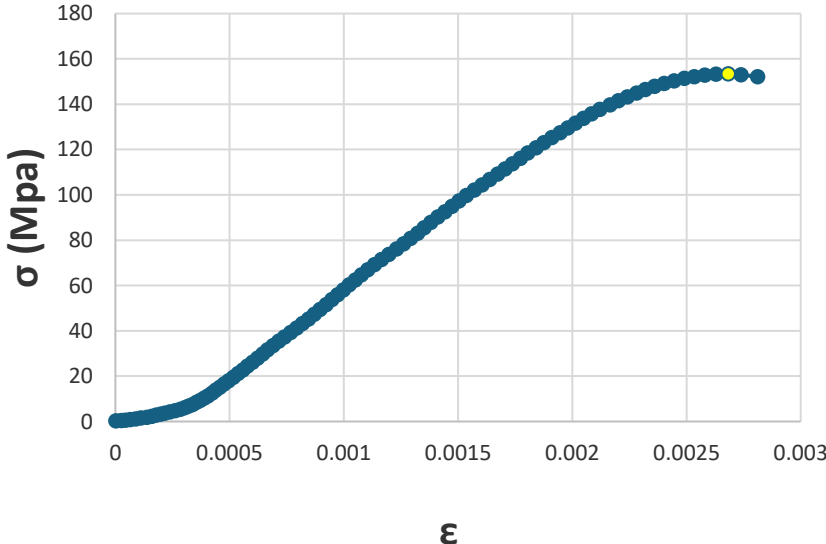
Δοκίμιο 3 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.773
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.022
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.345
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.805
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	150.7
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	80.1



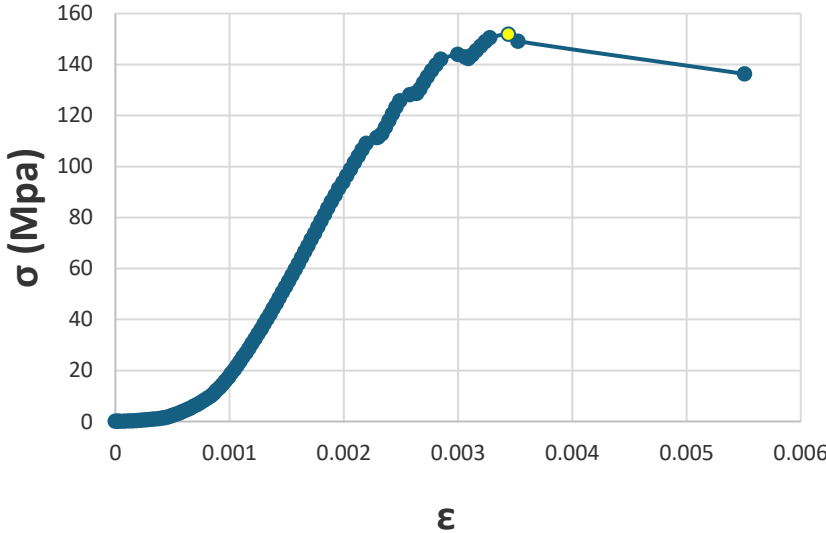
Δοκίμιο 4 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.773
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.022
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.345
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.805
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	151.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	81.7


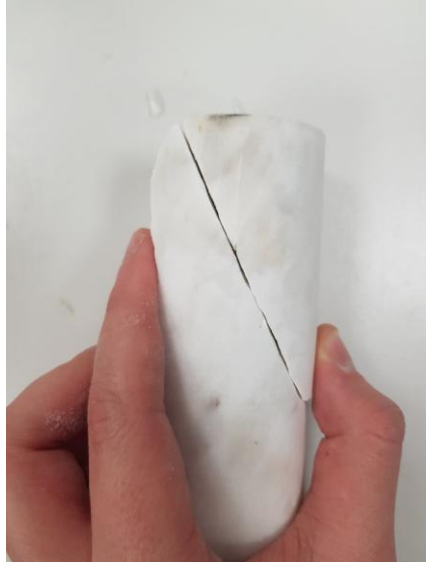
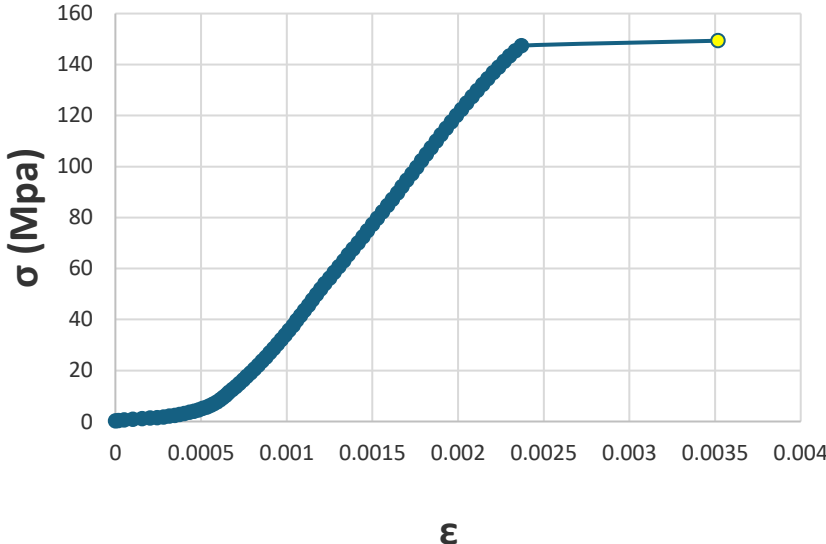

--



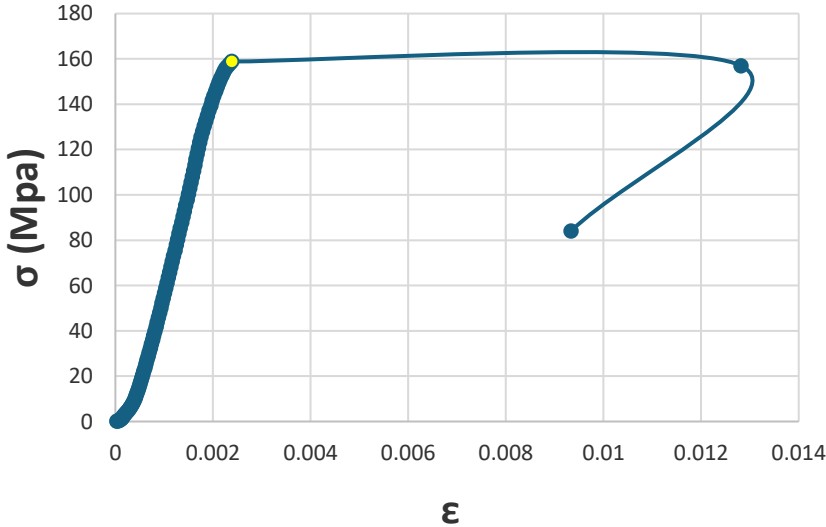
Δοκίμιο 5 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.093
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.012
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.413
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.727
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	150.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	81.6

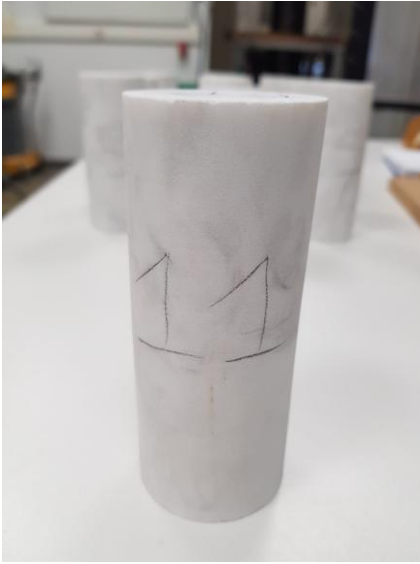

Δοκίμιο 6 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.602
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.012
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.315
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.727
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	158.6
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	80.1

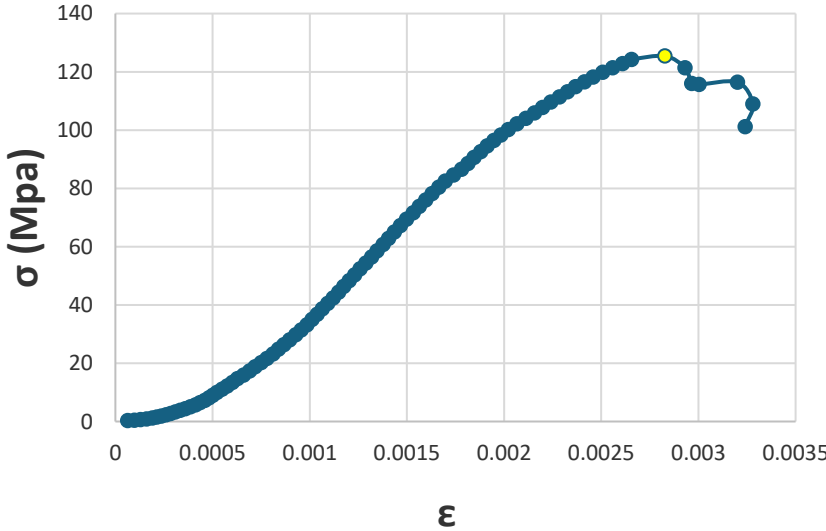
Δοκίμιο 7 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.273
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.447
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	153.3
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	76.3

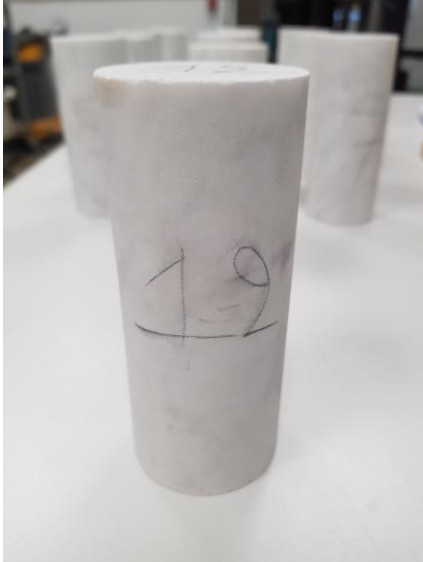
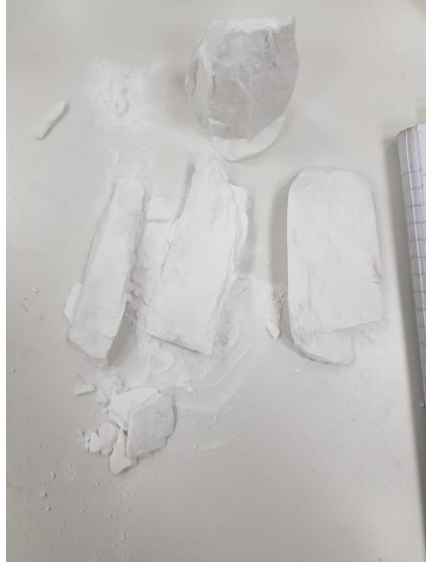
Δοκίμιο 8 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.887
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.013
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.371
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.740
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	151.8
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	81.2

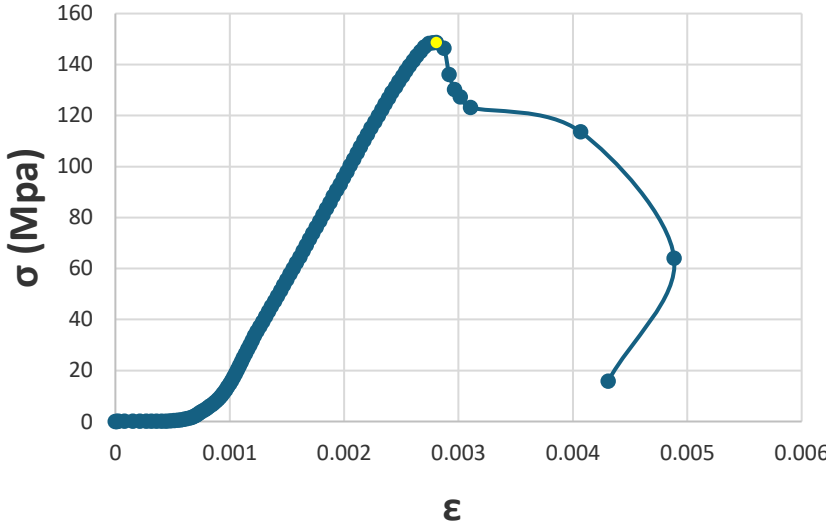
Δοκίμιο 9 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.072
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.407
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	149.4
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	85.5

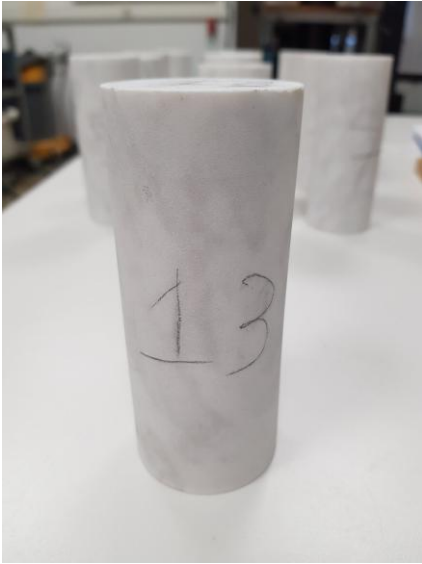

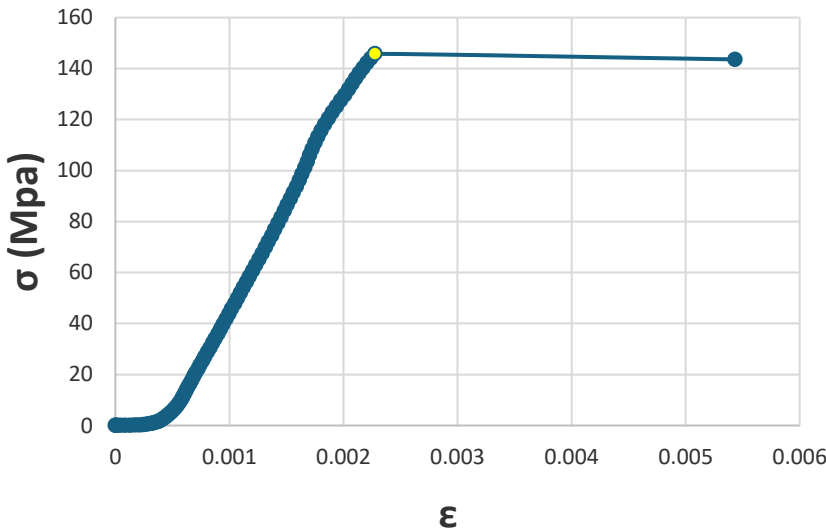
Δοκίμιο 10 χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.108
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.414
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.766
		Τύπος Δοκιμής	
<div>Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης</div> 		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	6
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	158.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	85.5

Δοκίμιο 11 χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.088
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.410
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	125.4
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	69.9

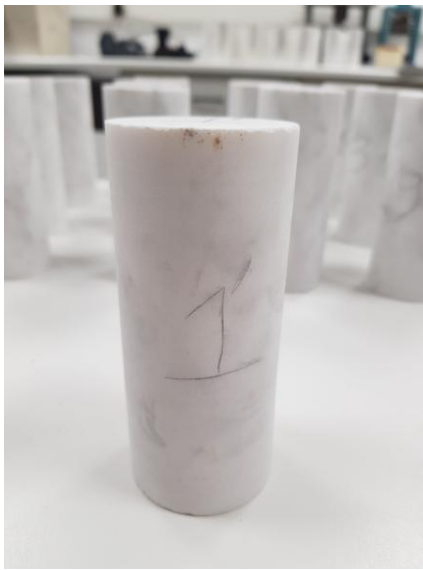


--

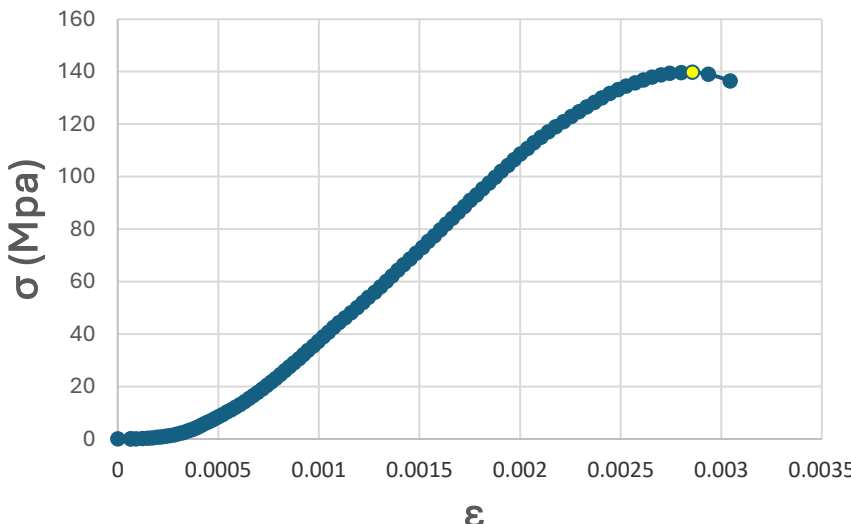
Δοκίμιο 12 χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.907
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.012
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.376
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.727
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	148.6
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	79.2



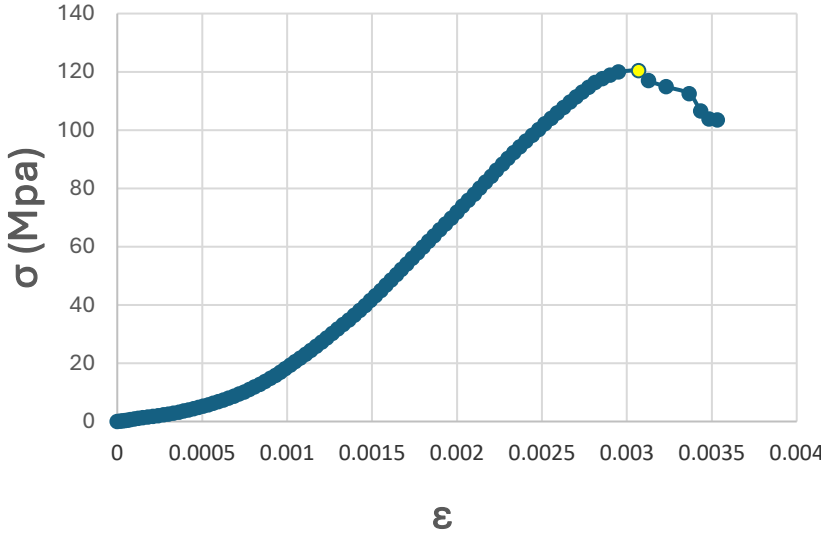

--



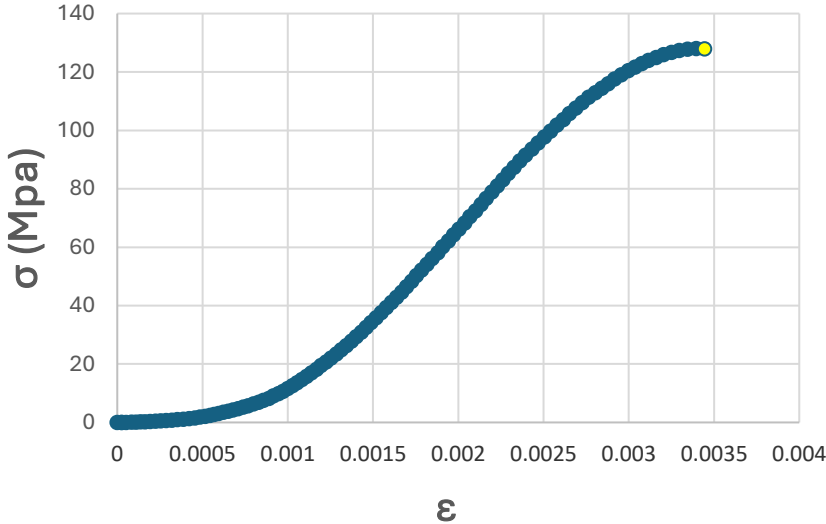
Δοκίμιο 13 χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.857
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.363
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.766
		Τύπος Δοκιμής	
<div>Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης</div> 		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	145.8
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	84.2



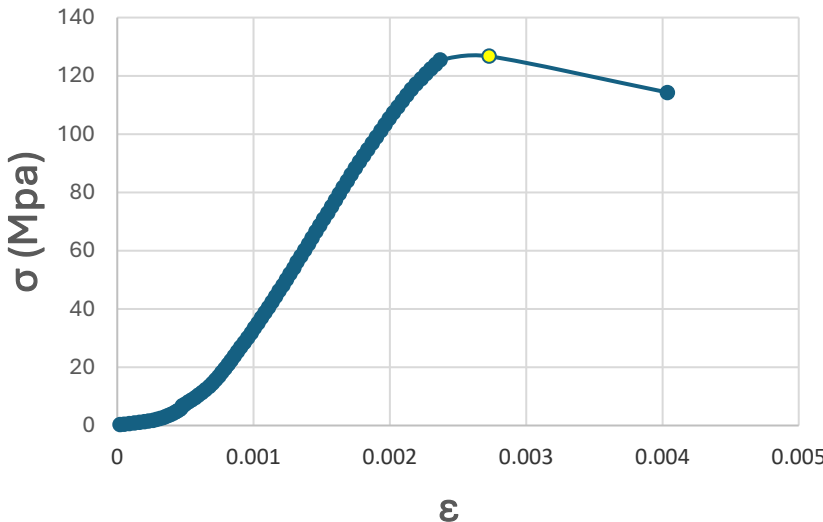
Α.3. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Μαρμάρου τύπου Β.



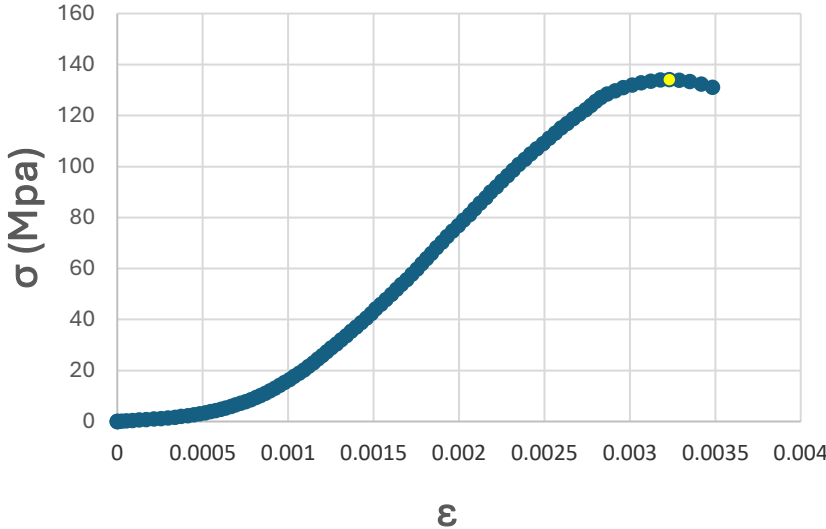
Δοκίμιο 1B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.558
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.304
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.766
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	139.7
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	70.7



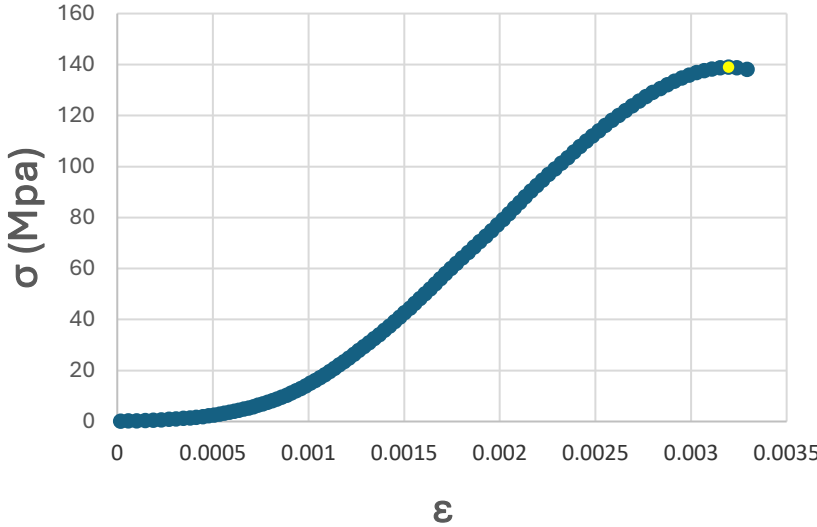

--



Δοκίμιο 3B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.982
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.020
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.387
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.792
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	120.3
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	59.5

Δοκίμιο 4B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.455
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.018
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.283
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.779
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	128.0
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	64.1

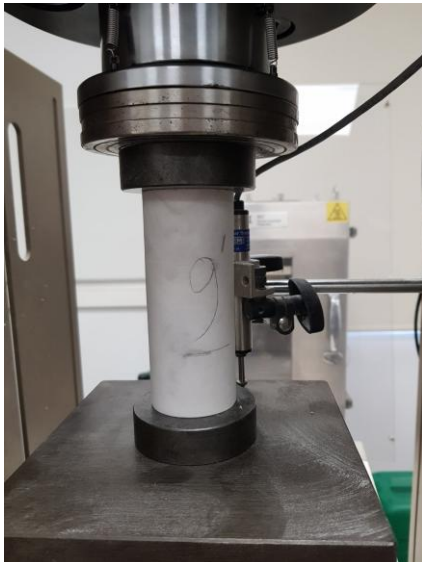

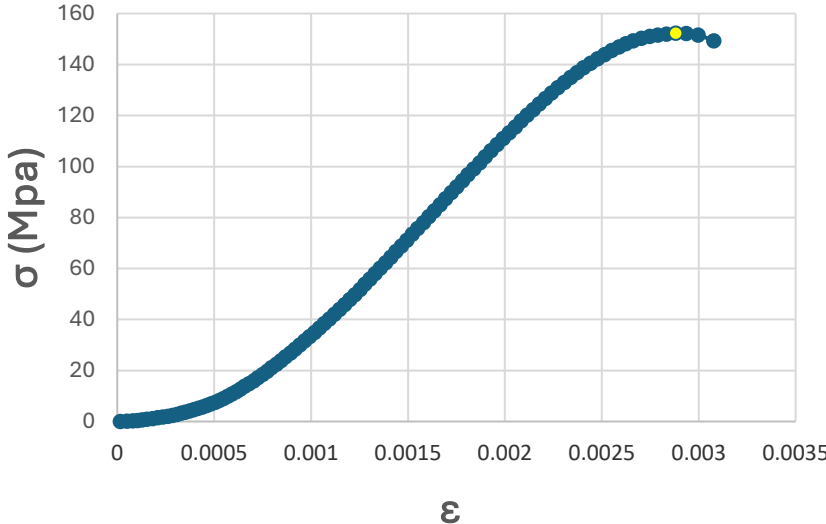
Δοκίμιο 5B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.922
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.377
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	126.7
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	74.3

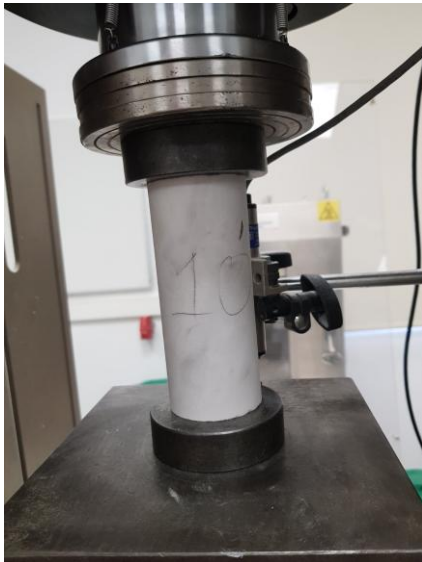

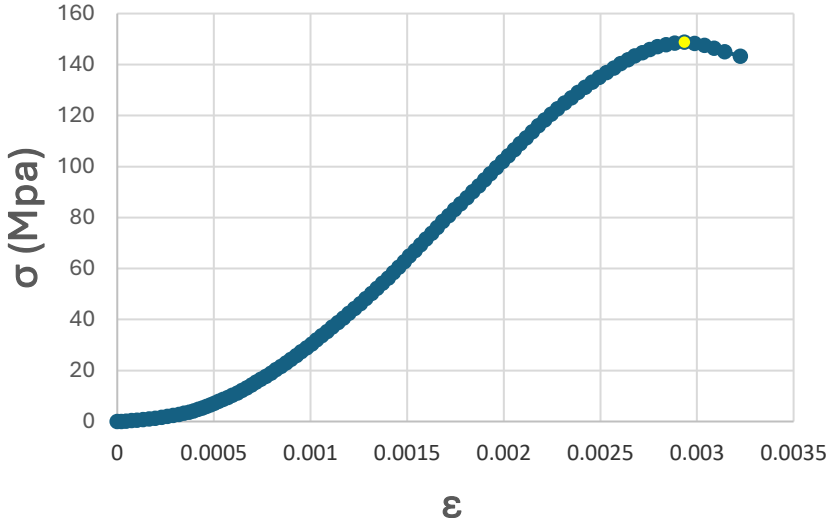
Δοκίμιο 6B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.880
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.368
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.766
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	134.1
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	66.5

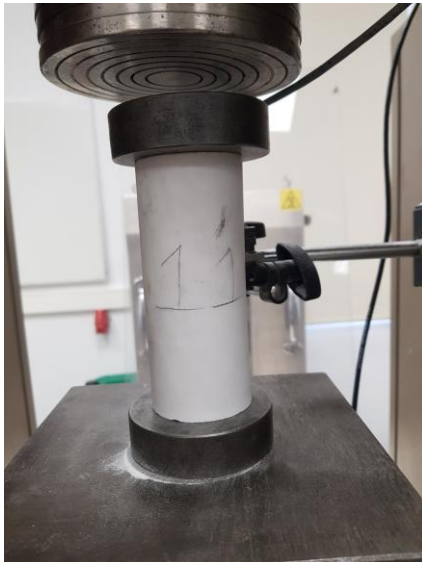

Δοκίμιο 7B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.968
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.386
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.766
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	138.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	69.0

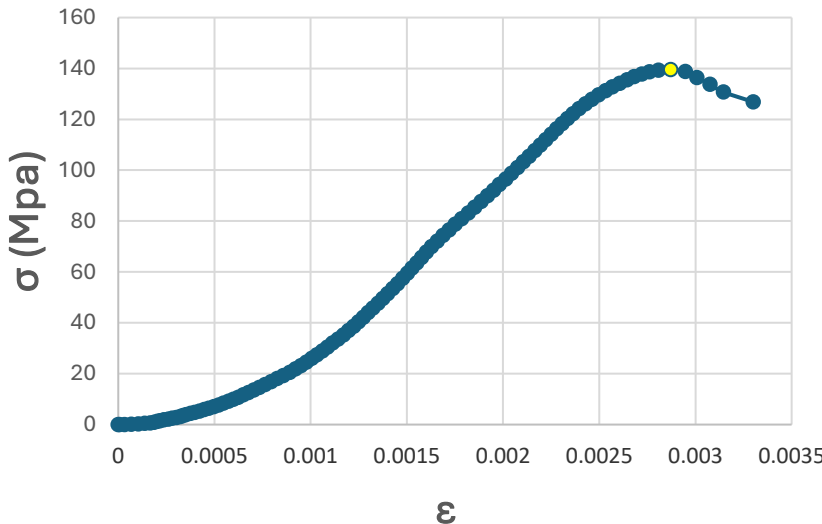
Δοκίμιο 8B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.090
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.012
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.412
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.727
		Τύπος Δοκιμής	
		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	137.1
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	71.5

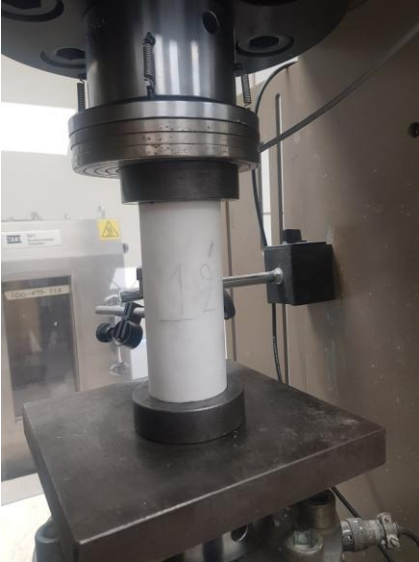
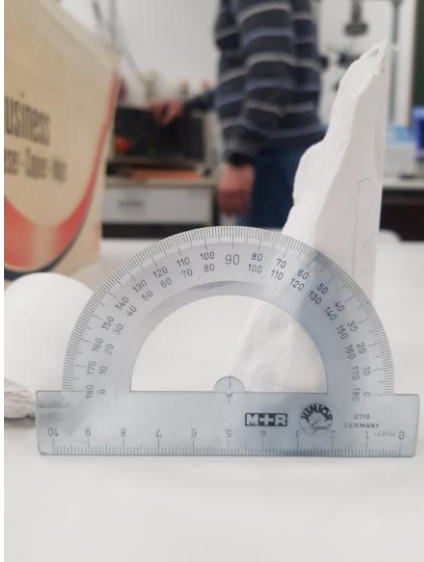
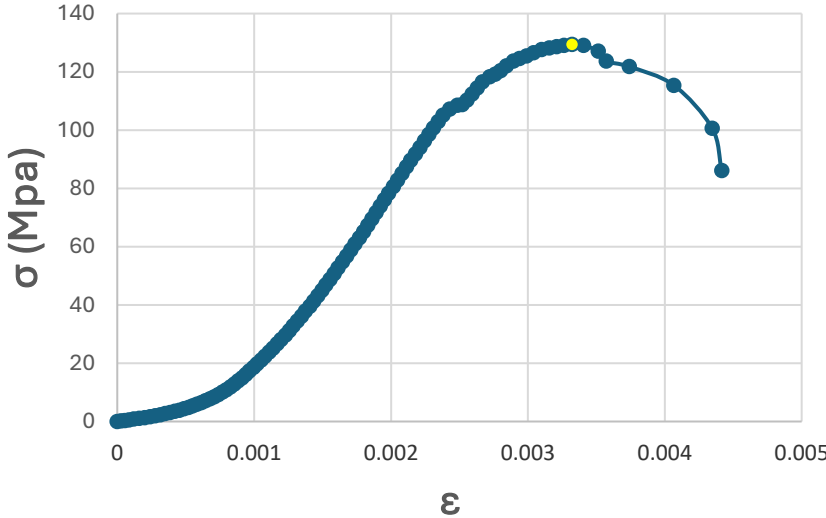
| Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης | |
| | |



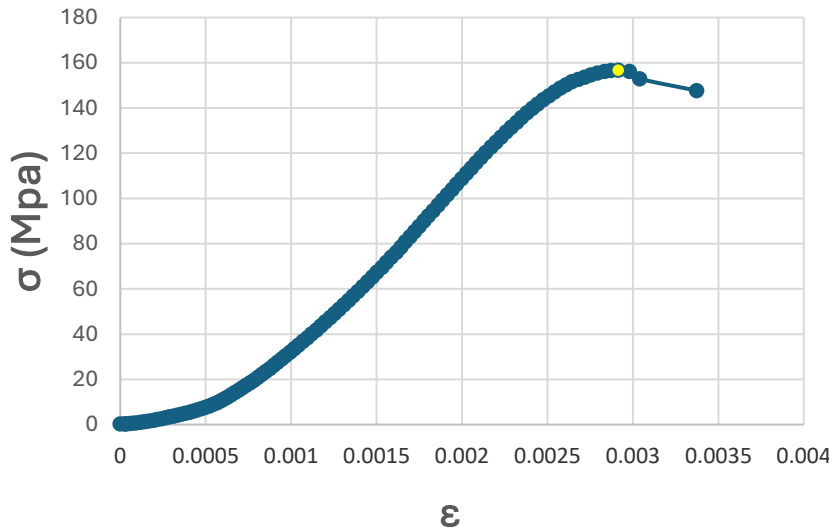
Δοκίμιο 9B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.140
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.018
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.419
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.779
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	152.2
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	75.8

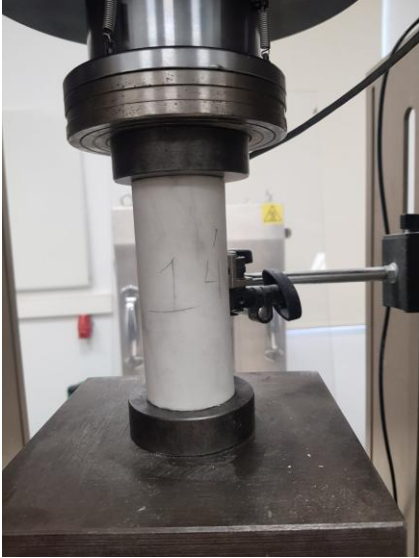

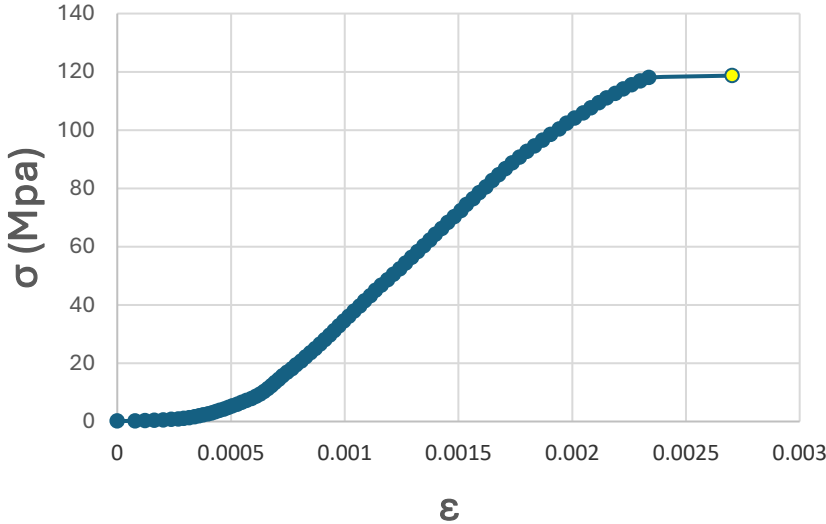
Δοκίμιο 10B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.983
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.018
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.388
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.779
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	148.7
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	75.4

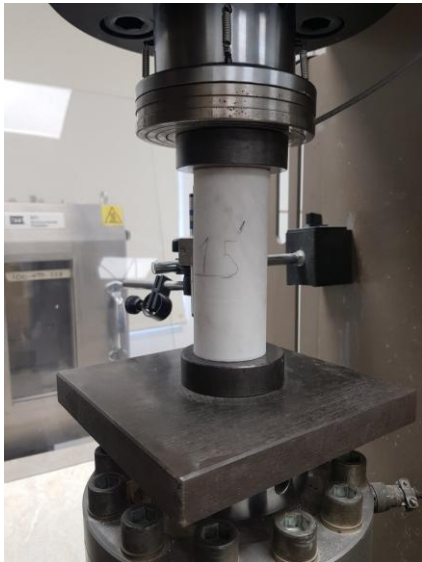
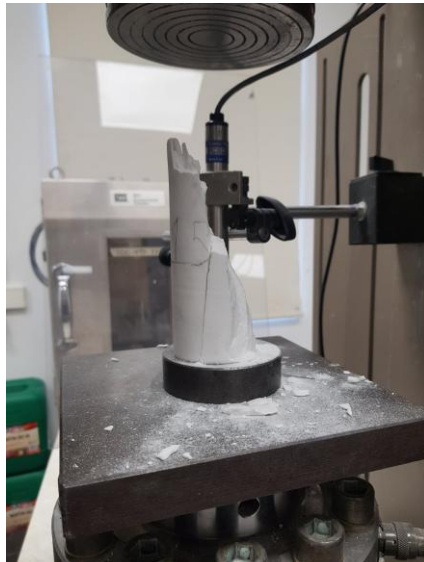
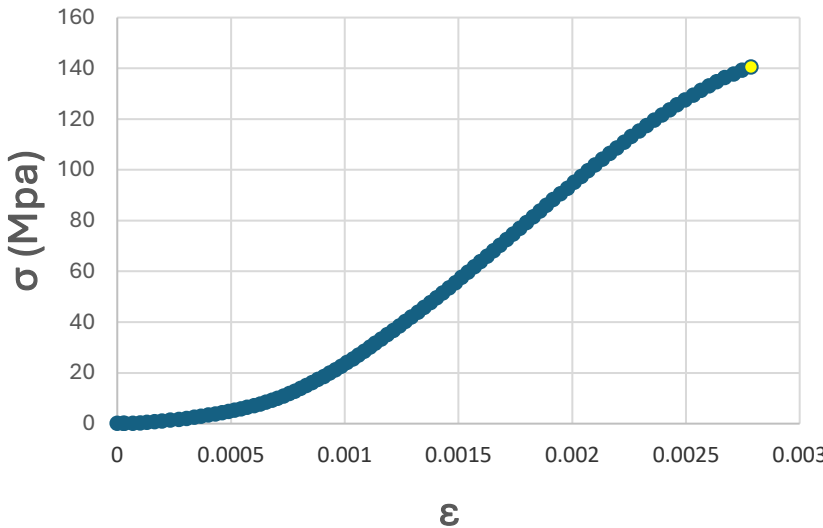
Δοκίμιο 11B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.912
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.375
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	139.6
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	72.5



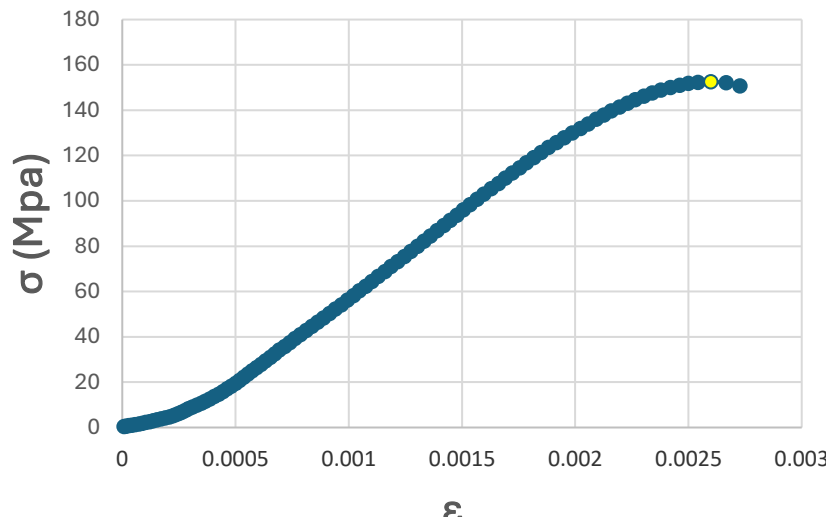


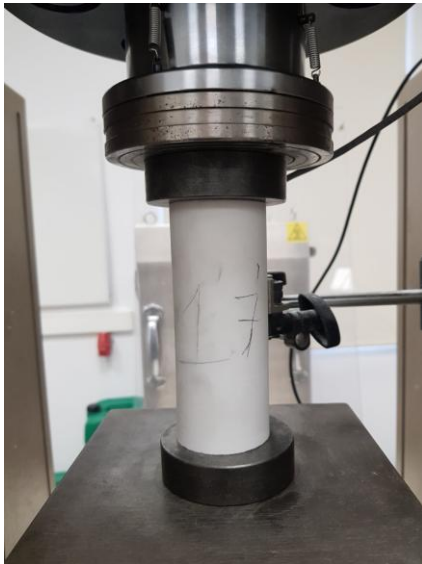

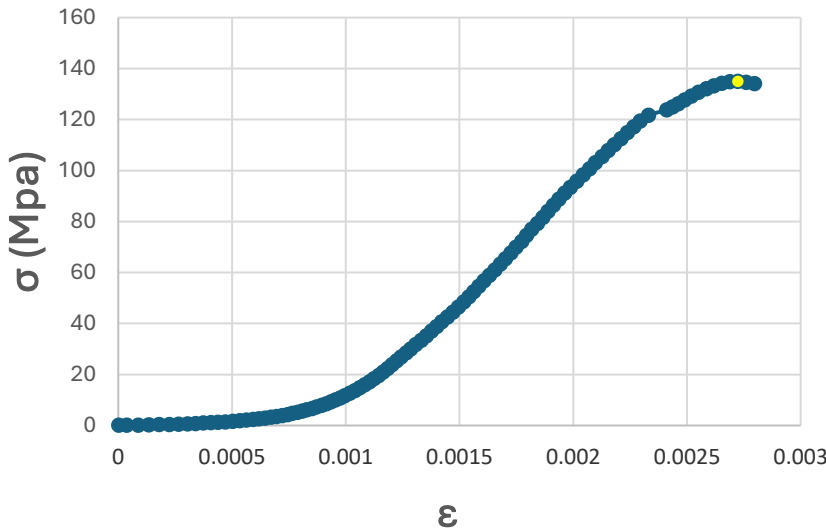
Δοκίμιο 12B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.885
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.020
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.368
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.792
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	129.4
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	67.9

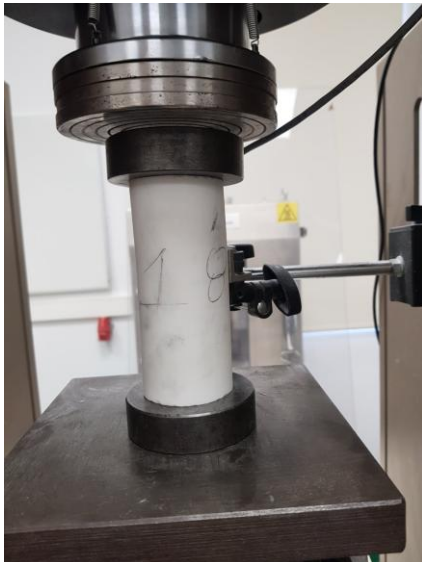

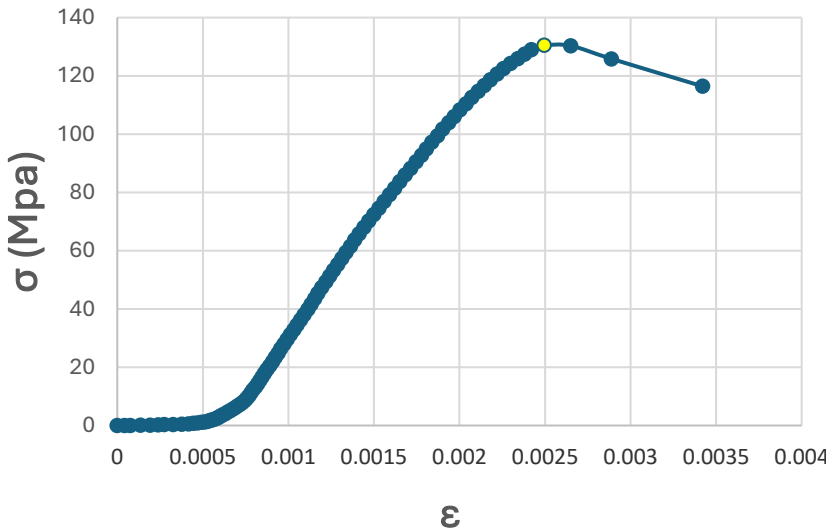
Δοκίμιο 13B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.167
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.018
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.424
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.779
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	156.6
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	71.0



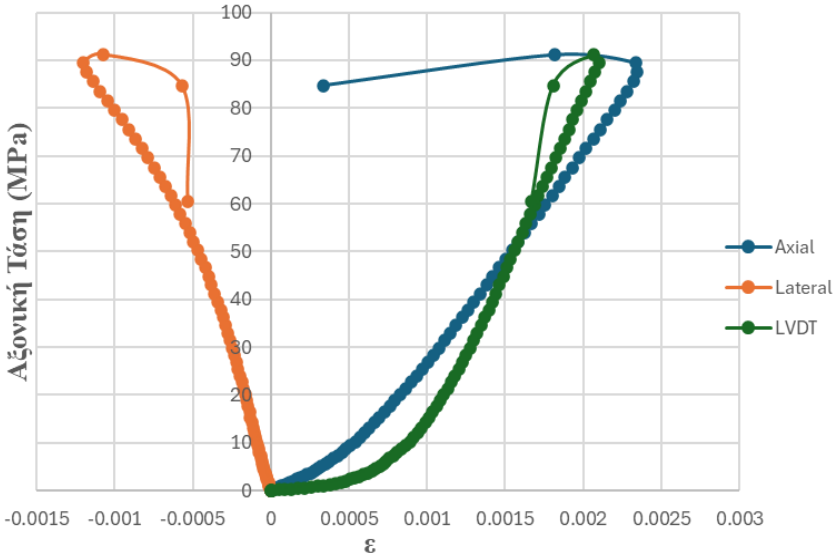
Δοκίμιο 14B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.977
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.388
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	118.7
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	73.9

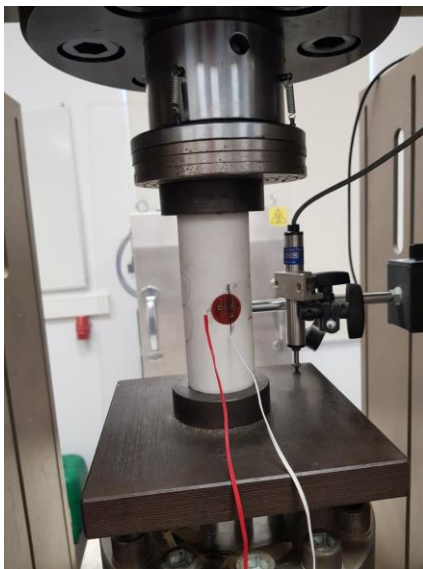
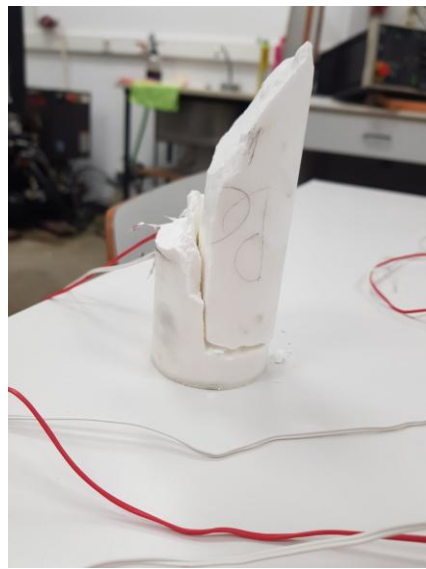
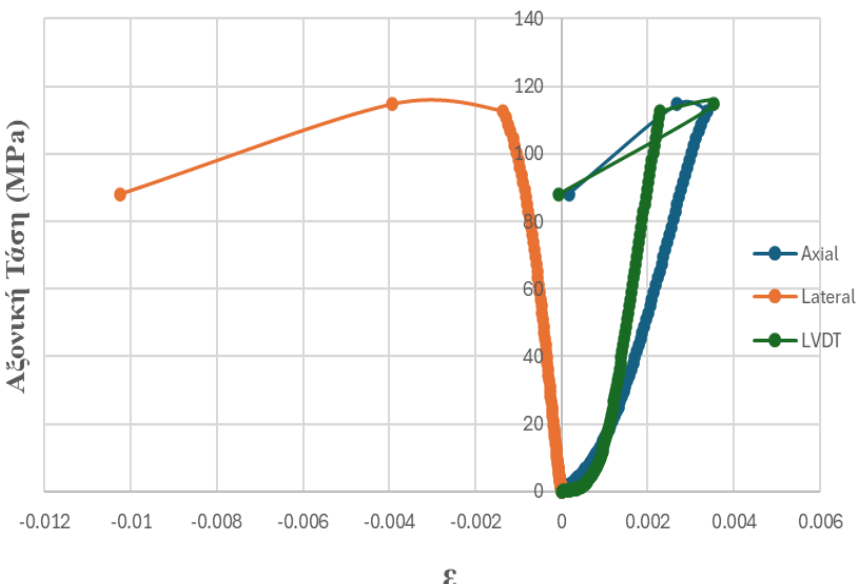
Δοκίμιο 15B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.202
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.432
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.766
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	140.5
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	68.8

Δοκίμιο 16B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.195
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.020
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.429
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.792
		Τύπος Δοκιμής	
<div>Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης</div> 		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	152.5
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	75.6



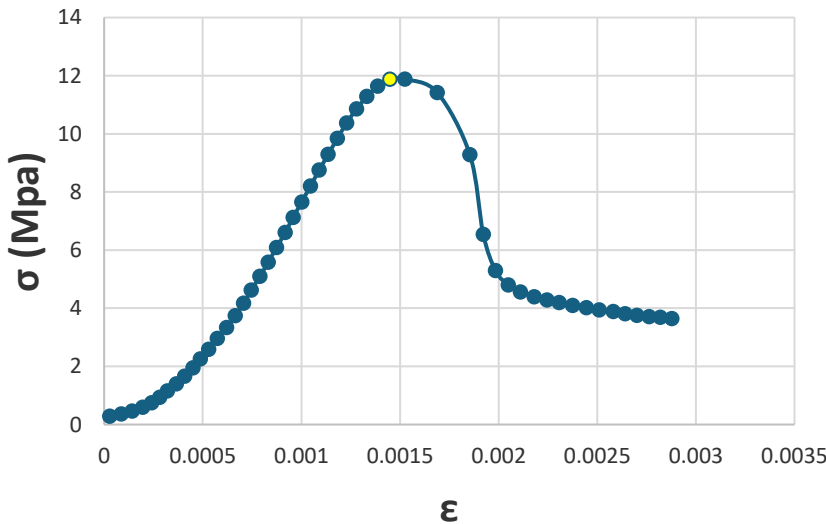
Δοκίμιο 17B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.333
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.018
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.458
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.779
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	134.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	93.4



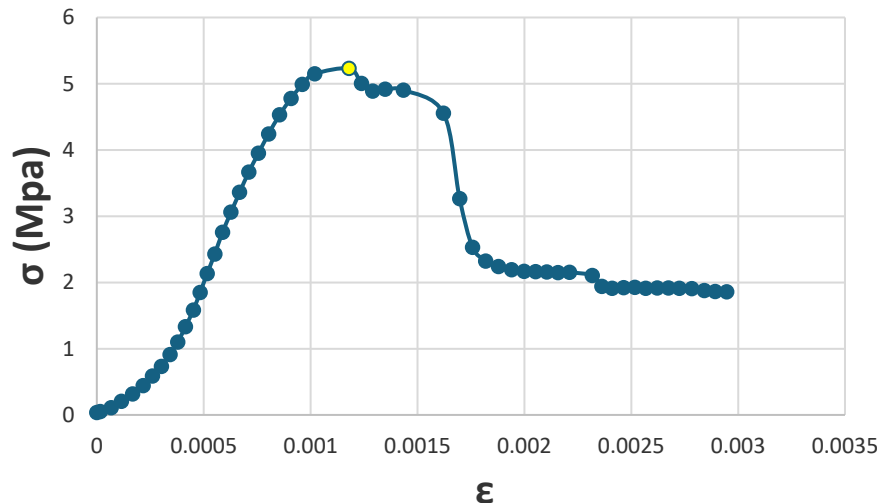
Δοκίμιο 18B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	11.517
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.015
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.296
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.753
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	130.4
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	87.1



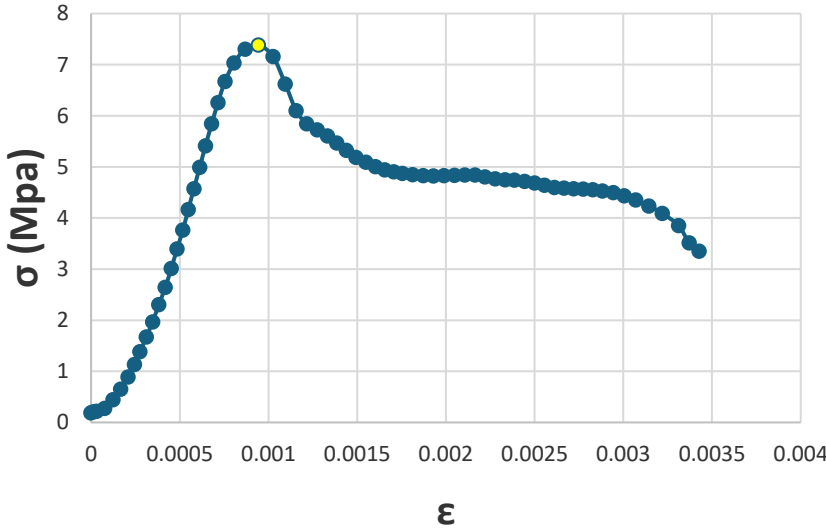
Δοκίμιο 19B χωρίς χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.340
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.018
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.459
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.779
		Τύπος Δοκιμής	
		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	1
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	91.2
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	40.3



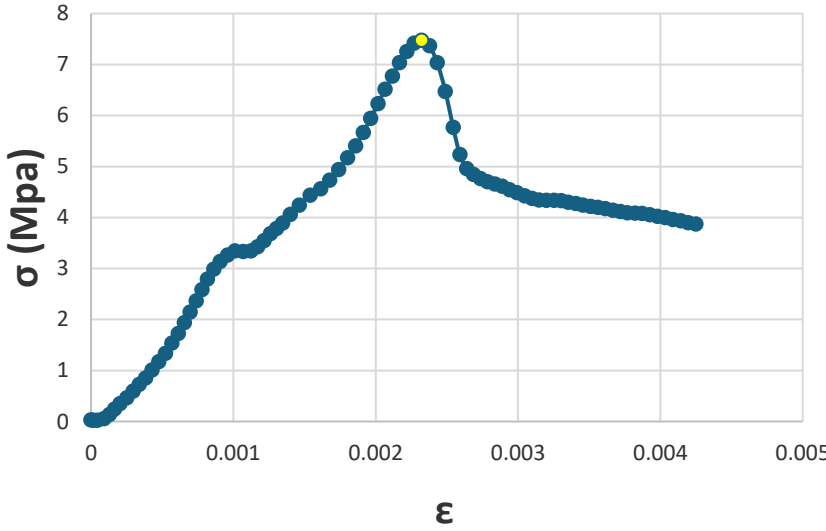
Δοκίμιο 20B με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	12.277
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.017
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.447
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.766
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Τύπος Δοκιμής	
		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	114.6
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	41.4

Α.4. Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων Ψαμμίτη (καλαθάς Χανίων).

Δοκίμιο 1 χωρίς χρήση λιπαντικού		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	9.445
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	4.973
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	1.899
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.426
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	6
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	11.9
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	11.9

Δοκίμιο 2 χωρίς χρήση λιπαντικού		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.327
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.010
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.061
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.714
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	6
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	5.2
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	8.3

Δοκίμιο 3 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	10.072
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	4.997
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	2.016
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm ²)	19.609
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	2
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	7.4
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	12.4

Δοκίμιο 4 με χρήση βαζελίνης		Παράμετροι	
Πριν	Μετά	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	
		Ύψος δοκιμίου, Specimen height (cm)	9.763
		Διάμετρος δοκιμίου, Specimen diameter (cm)	5.010
		Λόγος Ύψους/διαμέτρου, Height/Diameter ratio (H/D)	1.949
		Επιφάνεια δοκιμίου, Specimen area (cm²)	19.714
		Τύπος Δοκιμής	
Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης		Έλεγχος Μετατόπισης, Displacement Control (mm/sec)	0.0108
		Μηχανικές Ιδιότητες	
		Τύπος θραύσης, Failure mode	4
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Uniaxial compressive strength (MPa)	7.5
		Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Average modulus of elasticity, E (GPa)	2.6