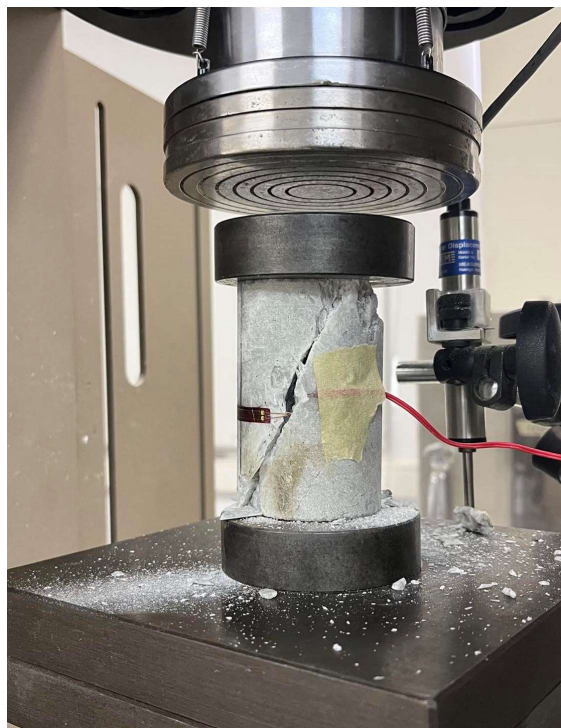




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



**Μελέτη των ελαστοπλαστικών παραμέτρων γνευσίου με δοκιμές ανεμπόδιστης  
θλίψης.**

Διπλωματική Εργασία

Φιλιώ Ανδριάννα Χιόνη

Εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Ξηρουδάκης, Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής

Παντελής Λιόλιος, ΕΔΙΠ

Χανιά

Οκτώβριος, 2023

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο, ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής, τον κύριο Γεώργιο Ξηρουδάκη, επίκουρο καθηγητή και επιβλέποντα και τον κύριο Παντελή Λιόλιο, μέλος ΕΔΙΠ, για τη συνεχή και ουσιαστική του βοήθεια στη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τους ανθρώπους που έκαναν τη διαδρομή μου αυτή πιο ευχάριστη και ιδιαίτερα την παιδική μου φίλη, Μαρίνα, που μου στάθηκε σαν οικογένεια από οποιοδήποτε μέρος της Ελλάδας και αν ήταν.

Τέλος, αφιερώνω όλη μου την προσπάθεια στην οικογένειά μου που με υποστήριξε σε όλους τους τομείς έμπρακτα και με πλήρη κατανόηση.

## Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα

Η προπτυχιακή φοιτήτρια που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός και ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κλπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή τη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

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

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στηρίζεται στην πειραματική ανάλυση της βραχόμαζας εκτελώντας δοκιμές μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης και κατ' επέκταση στον καθοριστικό ρόλο που παίζουν τα αποτελέσματα αυτά στη βαθμονόμηση καταστατικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τα πειράματα αυτά παίρνουμε μετρήσεις για διάφορες παραμέτρους, όπως την αντοχή τους, της παραμόρφωση, τα μέτρα ελαστικότητας και τον λόγο Poisson, που μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για τη συγκεκριμένη βραχόμαζα αν παρατηρηθεί επανάληψη των συγκεκριμένων πορισμάτων και σε μελλοντικές διαδικασίες. Αρχικά, πριν τη μορφοποίηση των δοκιμών για την εκτέλεση των πειραμάτων, τα ύψη των καρότων γεωτρήσεων, οι ασυνέχειες αλλά και η γενικότερη κατάσταση της βραχόμαζας, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό δύο δεικτών ταξινόμησης της βραχόμαζας. Οι δείκτες αυτοί είναι το RQD, που προσδιορίζεται από πυρήνες πετρώματος ή από την καταμέτρηση ασυνεχειών και το RMR που προσδιορίζεται από το άθροισμα των βαθμολογιών μιας σειράς παραμέτρων που αφορούν τις ιδιότητες της ρηγματωμένης βραχομάζας. Στη συνέχεια, τα δείγματα επεξεργάστηκαν με συγκεκριμένα πρότυπα, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές και υποβλήθηκαν στις απαραίτητες πειραματικές δοκιμές όπου σε κάποια δοκίμια έγινε συγκόλληση ηλεκτρικών μηχανισιομέτρων, διαφόρων ειδών, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέλος, από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης, προέκυψε ότι οι μέγιστε τιμές αντοχής κυμαίνονται από 54.7 MPa έως 112.1 MPa και πολύ χαμηλές τιμές ακτινική πλαστική παραμόρφωση  $\epsilon$ .

**Λέξεις Κλειδιά:** Μονοαξονική θλίψη, αντιδιαμετρική θλίψη Brazil, RMR, RQD, μηχανισιόμετρα, LVDT, ελαστικότητα, πλαστικότητα.

## Abstract

The present diploma thesis is based on the experimental analysis of rock mass by performing uniaxial and Brazilian tests, consequently, on the crucial role of these results in the calibration of constitutive models. More specifically, through these experiments we obtain measurements for various parameters, such as their strength, strain, elasticity measures and Poisson's ratio, which can be considered representative of the rock mass if repetition of these findings is observed in future procedures. Initially, before the specimens were shaped to perform the experiments, the heights of the borehole, discontinuities and the general condition of the rock mass were used to calculate two rock mass classification indices. These indices are the RQD, determined from rock cores or by counting discontinuities, and the RMR, determined by the sum of the scores of several parameters related to the properties of the fractured rock mass. The samples were processed in accordance with established standards, following European specifications and subjected to the necessary experimental tests where different types of strain gages attached to the rocks, for better accuracy. Finally, from the uniaxial compression experiments, it was found that the maximum strength values ranged from 54.7 MPa to 112.1 MPa and very low radial plastic strength values were obtained.

**Keywords:** Uniaxial compression, Brazilian test, RMR, RQD, strain gages, LVDT, elasticity, plasticity.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	ii
Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα.....	iii
Περίληψη .....	iv
Abstract.....	v
Κατάλογος Σχημάτων.....	viii
Κατάλογος πινάκων .....	x
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Αντικείμενο .....	1
1.3 Δομή εργασίας.....	1
Κεφάλαιο 2: Χαρακτηριστικά βραχομάζας και δοκιμών .....	2
2.1 Πληροφορίες δείγματος γνευσίου .....	2
2.2 Ταξινόμηση πετρώματος με βάση τον δείκτη RQD .....	2
2.3 Γεωμηχανική ταξινόμηση (RMR).....	4
2.4 Προετοιμασία δοκιμών.....	6
Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία .....	10
3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης .....	10
3.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης .....	11
3.3 Γραμμικό διαφορικό μηκυνσιόμετρο (LVDT) .....	12
3.4 Μηκυνσιόμετρα (strain gauges).....	13
3.5 Θεωρία ελαστικότητας.....	18
3.6 Θεωρία πλαστικότητας .....	21
3.7 Τρόποι αστοχίας .....	23
Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης .....	25
4.1 Σταυρωτό μηκυνσιόμετρο .....	25
4.2 Οριζόντιο μηκυνσιόμετρο .....	32
4.3 Στρογγυλό μηκυνσιόμετρο.....	35
4.4 Μέτρα ελαστικότητας .....	38
4.5 Συγκεντρωτικοί πίνακες .....	40
Κεφάλαιο 5: Πειραματικά αποτελέσματα αντιδιαμετρικής θλίψης .....	43
5.1 Επεξεργασία δεδομένων .....	43
5.2 Μέτρα ελαστικότητας .....	44
5.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες .....	44
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις .....	46

Βιβλιογραφία .....	47
Παραρτήματα Α .....	49

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Θέση μεταλλείου .....	2
Σχήμα 2.2: Δειγματοληψία πετρώματος με τη μορφή γεωτρητικού συνεχομένου πυρήνα.....	3
Σχήμα 2.3: Διαδικασία μέτρησης και χαρακτηρισμού πετρώματος (Deere 1989).....	4
Σχήμα 2.4: Χρόνος αυτοϋποστήριξης σε σχέση με το RMR (Bieniawski 1989) .....	6
Σχήμα 2.5: Διαδικασία λείανσης.....	7
Σχήμα 2.6: Δοκίμια πριν τη λείανση και κοπή .....	7
Σχήμα 2.7: Μετά τη λείανση και κοπή .....	8
Σχήμα 2.8: Ενδεικτικά σημεία μετρήσεων.....	8
Σχήμα 3.1: Διάταξη θλιπτικής δοκιμής .....	10
Σχήμα 3.2: Διάτμηση λόγω ύπαρξης ρωγμών. ....	11
Σχήμα 3.3: Διάταξη αντιδιαμετρικής θλίψης-έμμεσου εφελκυσμού.....	12
Σχήμα 3.4: Διάταξη λειτουργίας του LVDT.....	13
Σχήμα 3.5: Διάταξη ενός μηχανοσυστήματος .....	14
Σχήμα 3.6: Γέφυρα Wheatstone (Ravi Teja, 2021).....	14
Σχήμα 3.7: Δοκίμιο με σταυρωτά μηχανοσυστήματα .....	16
Σχήμα 3.8: Οριζόντια διάταξη μηχανοσυστήματος .....	16
Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση για τη μέτρηση περιμέτρου .....	17
Σχήμα 3.10: Κυκλική διάταξη strain gauge .....	18
Σχήμα 3.11: Μηχανοσυστήμα με κυκλική διάταξη αντιστάσεων .....	18
Σχήμα 3.12: Τάση-παραμόρφωση .....	19
Σχήμα 3.13: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης για πετρώματα (Roberts 1977) .....	20
Σχήμα 3.14: Υπολογισμός των τριών διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (Αγιουτάντης 2002).....	20
Σχήμα 3.15: Τυπικές καμπύλες φόρτισης πειράματος μονοαξονικής θλίψης και μέτρα ελαστικότητας .....	21
Σχήμα 3.16: Τυπική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης .....	22
Σχήμα 3.17: Ενδεικτικοί κύκλοι φόρτισης-αποφόρτισης και ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις .....	22
Σχήμα 3.18: Σχηματική απεικόνιση τρόπων αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη, Basu et al. (2013) and Singh et al. (2016). ....	23
Σχήμα 3.19: Σχηματική απεικόνιση τρόπων αστοχίας σε αντιδιαμετρική θλίψη Rohan Bisai, Sayantan Chakraborty (2019). ....	23
Σχήμα 3.20: Τρόποι αστοχίας δοκιμίων, σε μονοαξονική θλίψη, με τις αντίστοιχες αντοχές τους ....	24
Σχήμα 3.21: Τρόποι αστοχίας δοκιμίων σε Brazil, με τις αντίστοιχες αντοχές τους .....	24
Σχήμα 4.1: Δοκίμιο 2 με μηχανοσυστήματα .....	25
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του δοκιμίου 2 .....	27
Σχήμα 4.3: Τάση-Αξονική παραμόρφωση κύκλων.....	28
Σχήμα 4.4: Τάση-Ακτινική παραμόρφωση κύκλων.....	29
Σχήμα 4.5: Συνολικός πίνακας παραμορφώσεων.....	30
Σχήμα 4.6: Γωνία κλίσης δοκιμίου 2 .....	31
Σχήμα 4.7: Βασική ρωγμή δοκιμίου 2.....	31
Σχήμα 4.8: Δοκίμιο 5 με οριζόντιο μηχανοσυστήμα .....	32
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 5.....	33
Σχήμα 4.10: Αξονική φόρτιση κύκλων .....	34
Σχήμα 4.11: Ακτινική φόρτιση κύκλων .....	34
Σχήμα 4.12: Τελικές εξισώσεις ευθείας αξονικής παραμόρφωσης.....	35

Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμόρφωσης εχ-τάσης .....	37
Σχήμα 4.14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμόρφωσης εγ-τάσης .....	37
Σχήμα 4.15: Βασική ρωγμή δοκιμίου 17.....	38
Σχήμα 4.16: Μέσο μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου 6.....	39
Σχήμα 4.17: Εφαπτομενικό και τέμνον μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου 6.....	39
Σχήμα 4.18: Αξονική Πλαστική Παραμόρφωση-Τάση όλων των δοκιμίων .....	42
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 1.....	43
Σχήμα 5.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου δοκιμίων.....	44
Σχήμα Α.1: Δοκίμιο Νο1 πριν και μετά την εφαρμογή μονοαξονικής θλίψης .....	49

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις συνεχόμενων τμημάτων πυρήνα με μήκος άνω των 10cm και συνολικό μήκος δειγματοληψίας. ....	3
Πίνακας 2.2: Γεωμηχανική ταξινόμηση πετρωμάτων βάση των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989).....	5
Πίνακας 2.3: Ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με τη γεωτεχνική ταξινόμηση κατά RMR .....	5
Πίνακας 2.4: Διαστάσεις δοκιμίων για πείραμα μονοαξονικής θλίψης.....	8
Πίνακας 2.5: Διαστάσεις δοκιμίων για πείραμα Brazil. ....	9
Πίνακας 3.1: Ενδεικτικά όρια κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης (Αγιουτάντης, 2019) .....	11
Πίνακας 4.1: Πειραματικά δεδομένα.....	26
Πίνακας 4.2: Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων.....	27
Πίνακας 4.3: Περαιτέρω επεξεργασία μετρήσεων .....	29
Πίνακας 4.4: Επεξεργασία δεδομένων δοκιμίου 5 .....	32
Πίνακας 4.5: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 17 .....	35
Πίνακας 4.6: Τελικά δεδομένα δοκιμίου 17 .....	36
Πίνακας 4.7: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων μονοαξονικής θλίψης .....	40
Πίνακας 4.8: Συγκεντρωτικό πίνακας τάσης-πλαστικής παραμόρφωσης των κύκλων των δοκιμίων με μηχανισιόμετρα. ....	40
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας .....	45

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση των ελαστικών και πλαστικών παραμέτρων του γνευσίου από το υπόγειο μεταλλείο της Ολυμπιάδας. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία κρίνεται απαραίτητη διότι, οι παράμετροι που υπολογίζονται παίζουν καθοριστικό ρόλο στη βαθμονόμηση ενός καταστατικού μοντέλου. Συγκεκριμένα, η βαθμονόμηση ενός καταστατικού μοντέλου που θα λαμβάνει υπόψη τις ελαστοπλαστικές παραμέτρους του υπό μελέτη πετρώματος χρειάζεται για τον σωστό και ασφαλή σχεδιασμό ενός μεταλλείου.

### 1.2 Αντικείμενο

Το πρόβλημα του σχεδιασμού της μεταλλευτικής διάνοιξης της στοάς θεωρείται καίριο και για αυτόν τον λόγο η επιλογή και βαθμονόμηση ενός κατάλληλου καταστατικού μοντέλου είναι κρίσιμη. Η επιλογή αυτή εξαρτάται από τις διαφορετικές παραμέτρους που περιλαμβάνει κάθε μοντέλο ανάλογα με το έργο και τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Η τελική επιλογή όμως καθορίζεται από την βασικότερη παράμετρο, δηλαδή την ασφάλεια τόσο των εργαζομένων όσο και του έργου. Η λανθασμένη επιλογή καταστατικού μοντέλου, αλλά και η εσφαλμένη πειραματική διαδικασία μπορεί να οδηγήσουν σε ατυχήματα που μπορεί να αποβούν μοιραία. Σύμφωνα με έρευνα του Mine Safety and Health Administration (MSHA) της Αμερικής που έλαβε χώρα μεταξύ 1995 και 2002, κατά ποσοστό 20% τα ατυχήματα που συνέβησαν αφορούσαν πτώση οροφής και την συγκεκριμένη χρονική στιγμή υπήρχε εργατικό δυναμικό υπογείως. Ένας σημαντικός αριθμός των ατυχημάτων αυτών θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί αν είχαν χρησιμοποιηθεί τα σωστά καταστατικά μοντέλα με βάση τα κατάλληλα πειράματα.

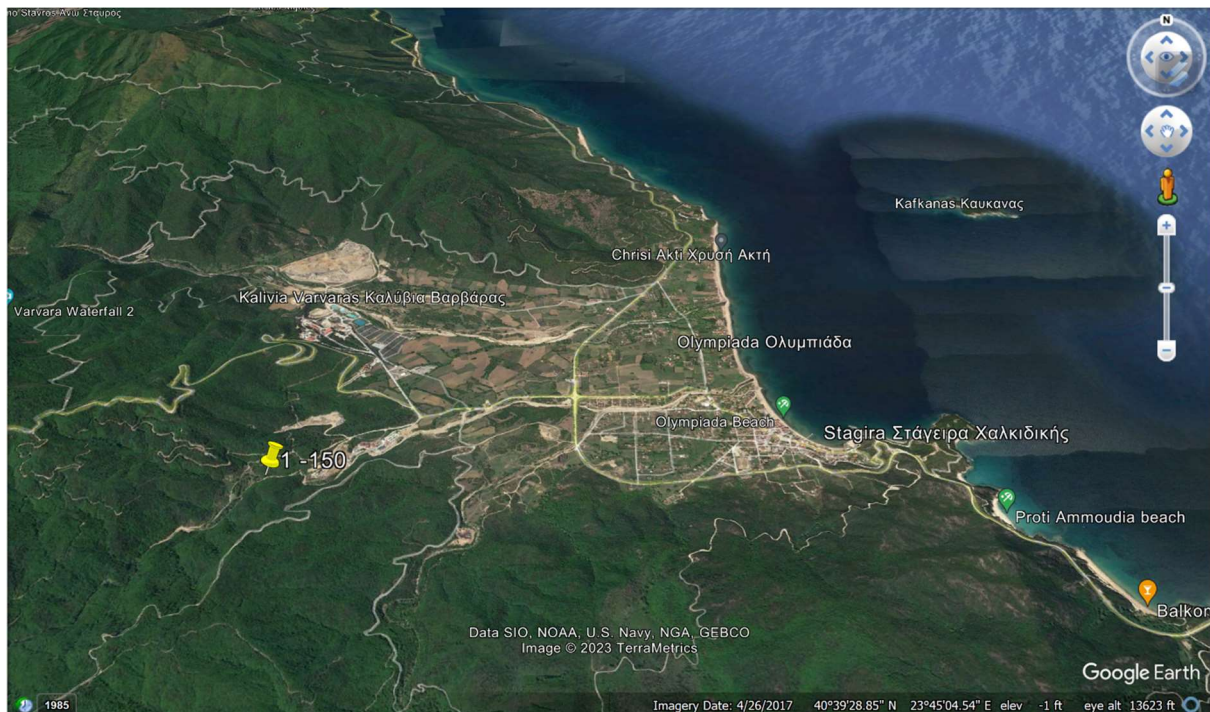
### 1.3 Δομή εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η βραχομάζα από όπου πάρθηκαν τα δοκίμια του γνευσίου καθώς και πληροφορίες για την προετοιμασία τους. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε τόσο για τις μονοαξονικές δοκιμές θλίψης όσο και για τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (δοκιμή Brazil). Στα κεφάλαια 4 και 5 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των ελαστοπλαστικών δοκιμών και τέλος στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων της εργασίας.

## Κεφάλαιο 2: Χαρακτηριστικά βραχομάζας και δοκιμών

### 2.1 Πληροφορίες δείγματος γνευσίου

Στη Χαλκιδική δραστηριοποιείται ο Ελληνικός Χρυσός που λειτουργεί ως θυγατρική της канаδικής πολυεθνικής μεταλλευτικής Eldorado Gold και τα έργα λαμβάνουν χώρα σε τρεις θέσεις, στο Στρατώνι, στις Σκουριές, και στην Ολυμπιάδα. Στις θέσεις αυτές γίνεται κυρίως υπόγεια εκμετάλλευση με εξαίρεση τις Σκουριές όπου γίνεται και υπαίθρια με τα μέταλλα ενδιαφέροντος να είναι χρυσός, μόλυβδος, ψευδάργυρος, χαλκός και άργυρος. Στην παρούσα πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από το υπόγειο μεταλλείο της Ολυμπιάδας, από μια οριζόντια εξόρυξη συνολικού μήκους άνω των 50m, (Σχήμα 2.1). Τα δοκίμια αυτά, προέρχονται από το τελευταίο τμήμα της γεώτρησης στον πυθμένα. Στην Ολυμπιάδα το κοίτασμα είναι χρυσοφόρο πολυμεταλλικό θείουχο μετάλλευμα και προήλθε από την αντικατάσταση ανθρακικών πετρωμάτων, μέσω της διείσδυσης γρανιτοειδών μαγμάτων υψηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.1: Θέση μεταλλείου

### 2.2 Ταξινόμηση πετρώματος με βάση τον δείκτη RQD

Η ταξινόμηση των πετρωμάτων με βάση το πλήθος και τη διάταξη των ασυνεχειών που τα διασχίζουν είναι κρίσιμη γιατί καθορίζει το σχεδιασμό των τεχνικών έργων και βασίζεται τόσο στην εμπειρία όσο και στην παρατήρηση. Τα συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο ποικίλλουν διότι είτε βρίσκουν διαφορετικό πεδίο εφαρμογής είτε διαφοροποιούνται στις κύριες παραμέτρους που χρησιμοποιούν, π.χ. η υφή του πετρώματος, η διάστρωσή τους, η ύπαρξη ασυνεχειών και ο τρόπος παραμόρφωσης τους. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν, εξορύχθηκαν με τη μορφή «καρότου» όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2. Προτού γίνει η οποιαδήποτε επέμβαση με στόχο τη δημιουργία κατάλληλων δοκιμών για να υποβληθούν σε μηχανικές δοκιμές, μετρήθηκαν το πλήθος και οι αποστάσεις των ασυνεχειών με σκοπό την ταξινόμηση-χαρακτηρισμό του πετρώματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος ασυνέχειες (discontinuities) περιλαμβάνει τις ακανόνιστες επιφάνειες διάβρωσης, όπως ρωγμές, διακλάσεις, ασθενή επίπεδα διάστρωσης, μικρορωγματώσεις κλπ. Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD του Deere (1964), με πεδίο εφαρμογής γεωτρήσεις και σήραγγες. Ο δείκτης αυτός, υποδηλώνει το πόσο καλή είναι η ποιότητα του πετρώματος από πυρήνες δειγματοληψίας με συγκεκριμένη διάμετρο και λαμβάνει υπόψη τα τμήματα που έχουν μήκος μεγαλύτερο από 100mm. Σύμφωνα με την εξ. (2.1), ο δείκτης RQD είναι ίσος με το συνολικό μήκος των τμημάτων του πυρήνα με μήκος μεγαλύτερο από 10cm, προς το συνολικό μήκος του πυρήνα. Με βάση τον Πίνακα 2.1, όπου παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τα δείγματα όπου είχαν μήκος μεγαλύτερο των 10cm, την εξ. (2.1) και το Σχήμα 2.3, το RQD υπολογίστηκε ίσο με 87% το οποίο αντιστοιχεί σε καλή κατάσταση πετρώματος.

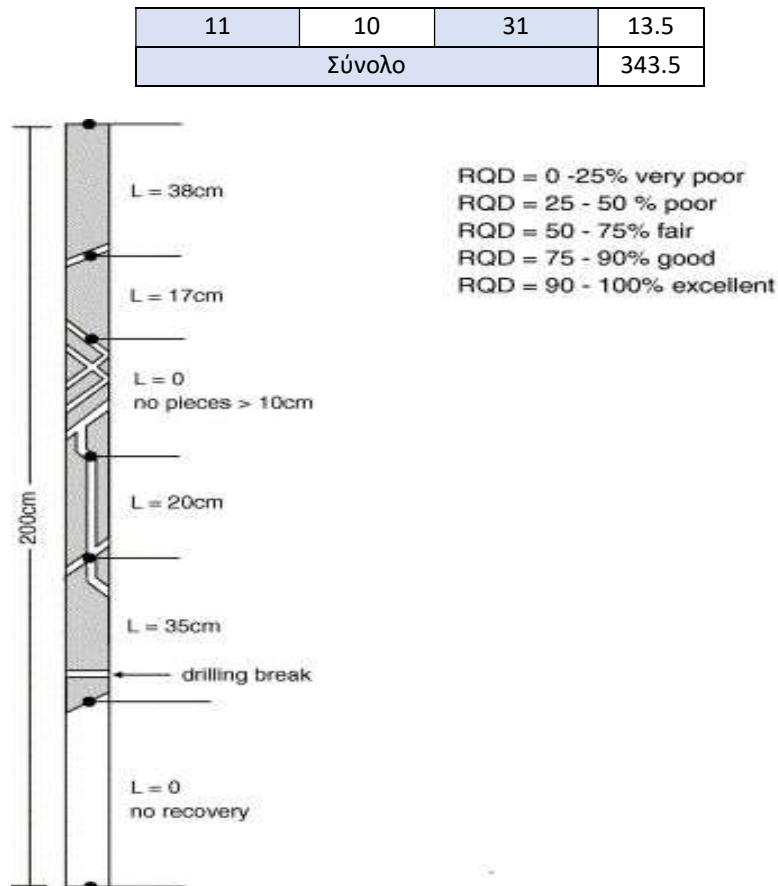


Σχήμα 2.2: Δειγματοληψία πετρώματος με τη μορφή γεωτρητικού συνεχομένου πυρήνα.

$$RQD = \frac{\text{συνολικό μήκος τμημάτων πυρήνα} > 100\text{mm}}{\text{συνολικό μήκος πυρήνα}} * 100 \quad (2.1)$$

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις συνεχόμενων τμημάτων πυρήνα με μήκος άνω των 10cm και συνολικό μήκος δειγματοληψίας.

Αρ.Δοκιμίου	H (cm)	Αρ.Δοκιμίου	H(cm)
1	13.5	13	16.5
2	31	14	16
3	17.5	15	14.5
4	24.5	16	11.5
5	13	18	16.5
6	12	19	40
7	20	20	15.5
8	17	27	12.5
10	11.5	30	17



Σχήμα 2.3: Διαδικασία μέτρησης και χαρακτηρισμού πετρώματος (Deere 1989)

Σχετικά με τον υπολογισμό του RQD έχει αναπτυχθεί μια εναλλακτική θεωρία από τους Priest και Hudson (1976). Βασική θεώρηση της μεθόδου είναι ότι η συχνότητα εμφάνισης των ασυνεχειών κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης ή μιας γεωτρητικής στήλης ακολουθεί αρνητική εκθετική κατανομή. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν την εξ. (2.2), όπου η παράμετρος  $\lambda$  αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης των ασυνεχειών ανά μέτρο γεωτρητικού πυρήνα. Σύμφωνα με τον Αγιουτάντη (2019) οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση με αποτέλεσμα να έχουν άμεση σύνδεση με τις μηχανικές ιδιότητες ενός πετρώματος αποτελώντας έτσι το βασικότερο στοιχείο για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας. Για τον προσδιορισμό του RQD δεν λήφθηκαν υπόψη όλες οι ασυνέχειες, διότι όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, σε κάποια δοκίμια είναι διακριτό ότι σε κάποιες ασυνέχειες η θραύση προήλθε κατά τη διάρκεια της εξόρυξης και δεν είναι φυσική ασυνέχεια.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (2.2)$$

Για την αξιοποίηση της παραπάνω εξίσωσης, υπολογίστηκε ο αριθμός ασυνεχειών σε κάθε μέτρο εξόρυξης και κατ' επέκταση ο μέσος όρος τους. Το RQD που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των Priest και Hudson είναι ίσο με 87.81%.

### 2.3 Γεωμηχανική ταξινόμηση (RMR)

Ένας ακόμα τρόπος γεωμηχανικής ταξινόμησης αναπτύχθηκε από τον Bieniawski το 1973 όπου ακολουθήθηκαν τέσσερις τροποποιήσεις το 1974, 1976, 1979 και το 1989 να λαμβάνει την τελική του μορφή. Ο Bieniawski πρότεινε την ταξινόμηση RMR (Rock Mass Rating), όπου έχει ευρεία εφαρμογή

στα τεχνικά έργα και στηρίζεται σε πέντε βασικές παραμέτρους ταξινόμησης, όπου μπορούν να εφαρμοστούν διορθώσεις αναφορικά με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με τον άξονα ή τη θέση του εκτελούμενου έργου. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, η πρώτη παράμετρος αφορά την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και στη δεύτερη παράμετρο, χρησιμοποιείται ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος RQD. Στην τρίτη και τέταρτη παράμετρο, αναφέρεται η απόσταση των ασυνεχειών και αντίστοιχα περιγράφεται η κατάσταση τους. Τέλος, η πέμπτη παράμετρος δημιουργήθηκε προκειμένου να χαρακτηριστεί η επίδραση της πίεσης ή ροής των υπόγειων νερών. Ο τελικός δείκτης RMR υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών επίδρασης και αναλόγως σε ποιο διάστημα ανήκει (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.2: Γεωμηχανική ταξινόμηση πετρωμάτων βάση των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ		ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ					
1	Αντοχή υγιούς πετρώματος	Αντοχή με τη δοκιμή αιχμής	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Στην περίπτωση του χαμηλού αυτού εύρους τιμών προτιμάται η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη
		Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5-25 MPa 1-5 MPa < 1 MPa
	Βαθμονόμηση		15	12	7	4	2 1 0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%
	Βαθμονόμηση		20	17	13	8	3
3	Απόσταση ασυνεχειών		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm
	Βαθμονόμηση		20	15	10	8	5
4	Κατάσταση ασυνεχειών (βλέπε πίνακα Ε)	Πολύ τραχείες επιφάνειες Not continuous	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1 mm	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1 mm	Λείες επιφάνειες με γραμμώσεις ολίσθησης	Μαλακό υλικό πλήρωσης > 5 mm πάχος	
		Χωρίς άνοιγμα	Τοιχώματα με ελαφρό βαθμό αποσάθρωσης	Τοιχώματα με υψηλό βαθμό αποσάθρωσης	Υλικό πλήρωσης 5mm πάχος	< 5 mm	
		Υγιή τοιχώματα			Συνεχές άνοιγμα 1-5 mm	Συνεχές άνοιγμα > 5 mm	
	Βαθμονόμηση		30	25	20	10	0
5	Υπεδαφικό νερό	Εισροή ανά 10 m μήκους σήραγγας	Καμία	< 10 litres/min	10-25 litres/min	25-125 litres/min	> 125
		Πίεση νερού ασυνεχειών	Η	Η	Η	Η	Η
		Λόγος Μέγιστη κύρια τάση	= 0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
	Γενικές συνθήκες	Η	Ξηρή κατάσταση	Η	Πολύ υγρή κατάσταση	Η	Ροή στάγδην Ροή συνεχής
	Βαθμονόμηση		15	10	7	4	0

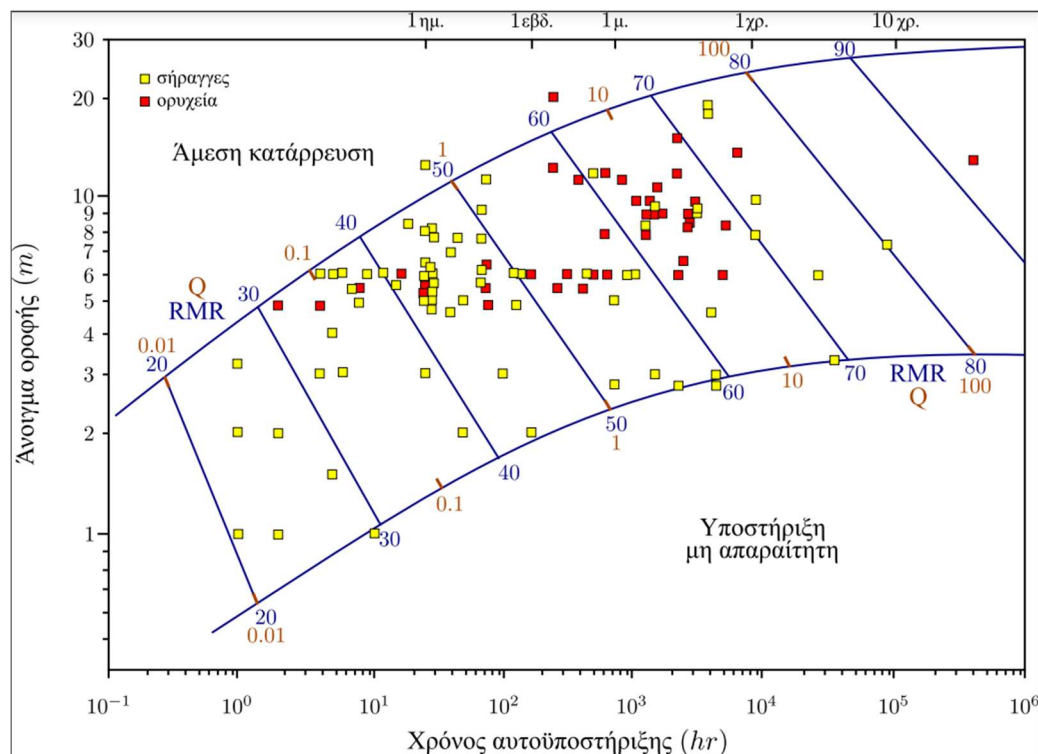
Πίνακας 2.3: Ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με τη γεωτεχνική ταξινόμηση κατά RMR

Τάξη Βραχομάζας	Ποιότητα βραχομάζας	RMR
I	Πολύ Καλή	80-100
II	Καλή	61-80
III	Μέτρια	41-60
IV	Φτωχή	21-40
V	Πολύ φτωχή	0-20

Στην προκειμένη περίπτωση η αντοχή του πετρώματος, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια, ανήκει στο διάστημα 50-100 MPa άρα η βαθμονόμηση είναι 7 και το RQD, αντιστοιχεί στην τιμή 17. Στη συνέχεια, έγινε καταμέτρηση των ασυνεχειών και είχαν κατά μέσο όρο την απόσταση των 0.14m, άρα ισοδυναμεί με τον συντελεστή 8. Επίσης, παρατηρήσαμε ότι οι

ασυνέχειες αντιστοιχούσαν σε ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, με άνοιγμα μικρότερο από 1mm με ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα, άρα ο συντελεστής είναι 25. Τέλος, στη θέση της γεώτρησης επικρατούσαν υγρές συνθήκες, οπότε ο συντελεστής αντιστοιχεί σε 7. Με βάση τα παραπάνω,  $RMR=7+17+8+25+7=64$  και αντιστοιχεί σε καλή ποιότητα βραχομάζας.

Σε συνέχεια της έρευνας του, ο Bieniawski (1989) ανέπτυξε το διάγραμμα του Σχήματος 2.4, που δείχνει τη σχέση μεταξύ του δείκτη RMR και του χρόνου αυτοϋποστήριξης ανυποστήρικτων ανοιγμάτων. Με βάση το διάγραμμα αυτό, για κάποια συγκεκριμένη τιμή του RMR και του πλάτους ανυποστήρικτου ανοίγματος μπορούμε να βρούμε πόσο χρόνο θα χρειαστεί η κατασκευή μέχρι να χρειαστεί επιπλέον υποστήριξη, αν αρκείται στην αυτοϋποστήριξη ή αν θα καταρρεύσει κατευθείαν.



Σχήμα 2.4: Χρόνος αυτοϋποστήριξης σε σχέση με το RMR (Bieniawski 1989)

## 2.4 Προετοιμασία δοκιμών

Η επεξεργασία του δείγματος ξεκίνησε με την παρατήρηση τους με σκοπό την εύρεση και καταγραφή των φυσικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του πετρώματος. Αρχικά, δεδομένου ότι τα δοκίμια θα υποστούν μονοαξονική θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό έγινε κοπή των δειγμάτων στο εργαστηριακό δισκοπρίονο σε συγκεκριμένες διαστάσεις έτσι ώστε να πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια αναφορικά με τις τυποποιημένες διαμέτρους πυρηνοληψίας πετρωμάτων (Q και X ή W) (DCDMA). Προκύπτει ότι, στο πείραμα μονοαξονικής θλίψης τα δοκίμια πρέπει να είναι κυλινδρικά με διάμετρο κατά προτίμηση μεγαλύτερη ή ίση με NX (δηλαδή περίπου 54 mm) και ύψος 2.5-3 φορές τη διάμετρό τους, ενώ στο πείραμα Brazil, η διάμετρος των δοκιμών πρέπει να είναι περίπου 54 mm και το πλάτος τους περίπου ίσο με την ακτίνα τους. Τα δοκίμια που επεξεργαστήκαμε έχουν μικρότερη διάμετρο, 47mm, λόγω της διαμέτρου του πυρηνολήπτη που χρησιμοποιήθηκε (core barrel). Επιπλέον, οι έδρες των δοκιμών πρέπει να είναι λείες και χωρίς ανωμαλίες, αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του εργαστηριακού λειαντή (Σχήμα 2.5). Τα Σχήματα 2.6 και 2.7 απεικονίζουν το αρχικό δοκίμιο πριν και αφού έχει υποστεί τη διαδικασία λείανσης και κοπής.

Επιπλέον, με τη χρήση παχύμετρου έγινε μέτρηση του πλάτους και του ύψους κάθε δοκιμίου, τρεις φορές από διαφορετικά σημεία, για έλεγχο της ομοιομορφίας του δοκιμίου. Στο Σχήμα 2.8, παρουσιάζονται τα σημεία που επιλέχθηκαν σε όλα τα δοκίμια για τη μέτρηση των διαστάσεων και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, Πίνακας 2.4-Πίνακας 2.5.



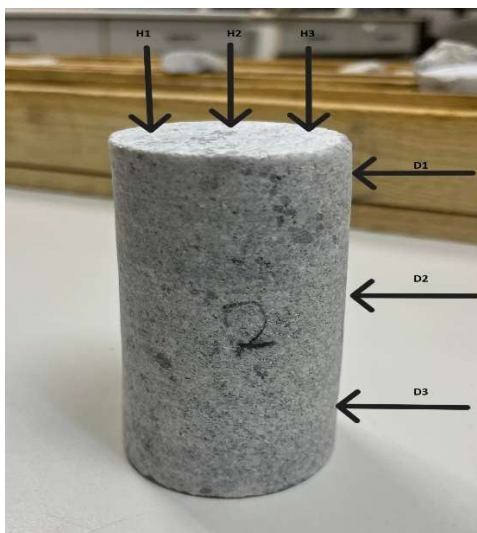
Σχήμα 2.5: Διαδικασία λείανσης



Σχήμα 2.6: Δοκίμια πριν τη λείανση και κοπή



Σχήμα 2.7: Μετά τη λείανση και κοπή



Σχήμα 2.8: Ενδεικτικά σημεία μετρήσεων

Πίνακας 2.4: Διαστάσεις δοκιμών για πείραμα μονοαξονικής θλίψης.

Αρ.Δοκιμίου	H1(cm)	H2	H3	M.O.	D1(cm)	D2	D3	M.O.
1	9.28	9.29	9.29	<b>9.29</b>	4.75	4.75	4.76	<b>4.75</b>
2	8.77	8.78	8.77	<b>8.77</b>	4.75	4.75	4.76	<b>4.75</b>
3	8.92	8.86	8.88	<b>8.88</b>	4.73	4.73	4.73	<b>4.73</b>
4	6.75	6.75	6.75	<b>6.75</b>	4.72	4.72	4.72	<b>4.72</b>
5	8.93	8.90	8.94	<b>8.92</b>	4.75	4.76	4.76	<b>4.76</b>
6	7.96	7.94	7.96	<b>7.95</b>	4.77	4.77	4.77	<b>4.77</b>
7	8.91	8.90	8.91	<b>8.90</b>	4.76	4.76	4.76	<b>4.76</b>
8	9.02	9.02	9.01	<b>9.02</b>	4.76	4.75	4.75	<b>4.75</b>
9	8.47	8.48	8.48	<b>8.47</b>	4.75	4.74	4.74	<b>4.74</b>
10	9.44	9.44	9.45	<b>9.44</b>	4.74	4.75	4.74	<b>4.74</b>
11	9.60	9.60	9.60	<b>9.60</b>	4.74	4.74	4.73	<b>4.73</b>
12	9.68	9.68	9.68	<b>9.68</b>	4.75	4.74	4.75	<b>4.75</b>
13	10.20	10.20	10.19	<b>10.19</b>	4.74	4.74	4.74	<b>4.74</b>
14	8.94	8.94	8.94	<b>8.94</b>	4.75	4.75	4.76	<b>4.75</b>

15	8.32	8.32	8.32	<b>8.32</b>	4.75	4.75	4.75	<b>4.75</b>
16	10.57	10.58	10.58	<b>10.57</b>	4.75	4.75	4.75	<b>4.75</b>
17	10.32	10.32	10.32	<b>10.32</b>	4.75	4.75	4.75	<b>4.75</b>
18	8.02	8.02	8.02	<b>8.02</b>	4.75	4.75	4.75	<b>4.75</b>
19	9.00	9.00	8.99	<b>8.99</b>	4.76	4.75	4.75	<b>4.75</b>
20	9.08	9.10	9.09	<b>9.09</b>	4.75	4.75	4.75	<b>4.75</b>

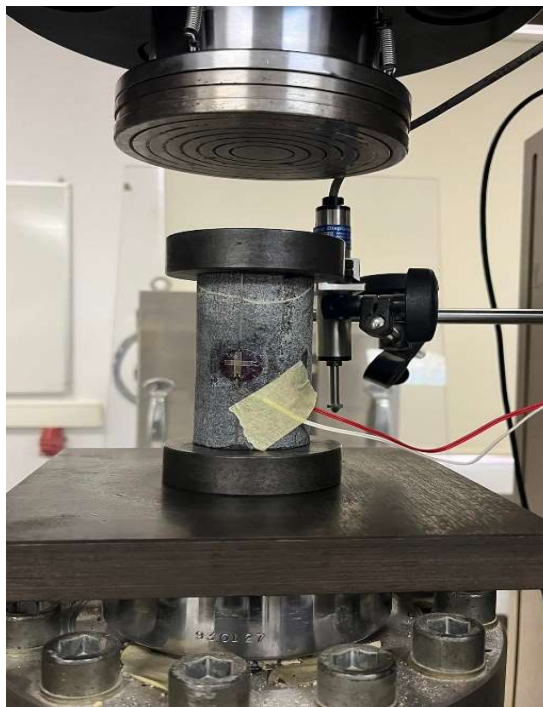
Πίνακας 2.5: Διαστάσεις δοκιμών για πείραμα Brazil.

Αρ.Δοκιμίου	H1(cm)	H2	H3	M.O.	D1(cm)	D2	D3	M.O.
1	2.95	2.91	2.93	<b>2.93</b>	4.74	4.75	4.75	<b>4.75</b>
2	2.49	2.48	2.48	<b>2.48</b>	4.72	4.73	4.74	<b>4.73</b>
3	2.98	2.97	2.97	<b>2.97</b>	4.76	4.77	4.75	<b>4.76</b>
4	2.73	2.73	2.72	<b>2.72</b>	4.72	4.73	4.72	<b>4.72</b>
5	2.59	2.58	2.58	<b>2.58</b>	4.77	4.77	4.77	<b>4.77</b>

## Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

### 3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (uniaxial compression test) αποτελεί την πιο συνηθισμένη εργαστηριακή δοκιμή στα πετρώματα και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής ή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (uniaxial compressive strength, UCS), του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson του άρρηκτου πετρώματος. Κατά την εκτέλεση του πειράματος, ένας ορθός κύλινδρος πετρώματος συμπιέζεται μεταξύ δύο παράλληλων χαλύβδινων πλακών, *Σχήμα 3.1*. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση, ενώ ο οριζόντιος μετράει τη διαμετρική παραμόρφωση. Αφού τοποθετηθεί το δείγμα σε κατάλληλη θέση, φορτίζεται είτε με έλεγχο του φορτίου (load control) είτε με έλεγχο της μετατόπισης (displacement control) κατά τον διαμήκη άξονά του και συγχρόνως καταγράφεται η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση που υφίστανται. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο πρώτος τρόπος φόρτισης, όπου είναι σταθερός και ίσος με το 0.125% του μέγιστου φορτίου που μπορεί να επιβάλλει η μηχανή ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή 1600KN. Στο *Σχήμα 3.2*, παρουσιάζεται η διαδικασία της αστοχίας ενός δοκιμίου, όταν περιορίζεται η διάδοση της ρωγμής κατά μήκος της μέγιστης κύριας τάσης, λόγω της υπάρχουσας μικροδομής όπου η συνένωση γειτονικών ρωγμών λαμβάνει χώρα και δημιουργείται η διατμητική θραύση.

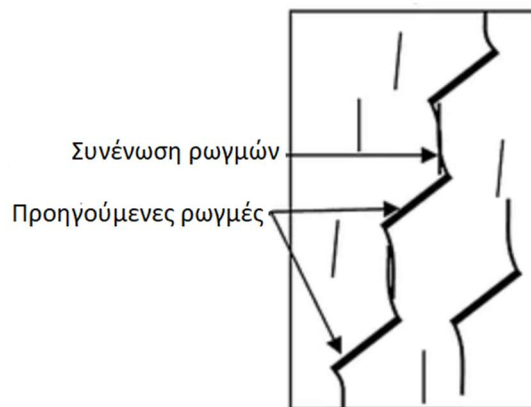


*Σχήμα 3.1: Διάταξη θλιπτικής δοκιμής*

Σε όλα τα δοκίμια, εφαρμόστηκαν κύκλοι φόρτισης-αποφόρτισης με σκοπό τη μελέτη των ελαστοπλαστικών παραμέτρων του δοκιμίου. Ο κάθε κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης επιτυγχάνει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή φορτίου από τον προηγούμενο στη διαδοχή. Για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου στο οποίο θα εκτελεστεί ο κύκλος, όταν είναι γνωστή η τάξη μεγέθους της αναμενόμενης αντοχής ή υπάρχει καλή εκτίμηση, χρησιμοποιείται ο *Πίνακας 3.1*.

Στην απλή μέθοδο την μονοαξονικής θλίψης, είναι κρίσιμη η ακριβής μέτρηση του φορτίου και της μετατόπισης και για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι μέτρησης. Για τη μέτρηση του φορτίου χρησιμοποιείται ένα κελί φορτίου ακριβώς κάτω από το σημείο επιβολής της δύναμης στο δοκίμιο με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω παραμορφώσεων και τριβών στη μηχανή φόρτισης. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν:

- α) LVDT για τη μέτρηση της σύγκλισης των πλακών μέσω των οποίων εφαρμόζεται η θλιπτική τάση στο δοκίμιο και
- β) Ηλεκτρικά μηχανοσκόμια (electrical strain gauges) κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου. Οι μέθοδοι αυτοί λειτουργούν μετρώντας τις παραμορφώσεις που προκύπτουν μετά από μετρήσεις διαστολής ή και συστολής των υλικών. Σύμφωνα με τους Isah *et al* (2020), οι παράμετροι που επηρεάζονται περισσότερο από τη συμβατική μέθοδο είναι το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus  $E$ ) και ο αριθμός poisson ( $\nu$ ). Έτσι, στην πειραματική διαδικασία αυτή επιλέχθηκαν κάποια δοκίμια όπου ενσωματώθηκαν ηλεκτρικά μηχανοσκόμια σε 3 διαφορετικές διατάξεις.



Σχήμα 3.2: Διάτμηση λόγω ύπαρξης ρωγμών.

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικά όρια κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης (Αγιουτάντης, 2019)

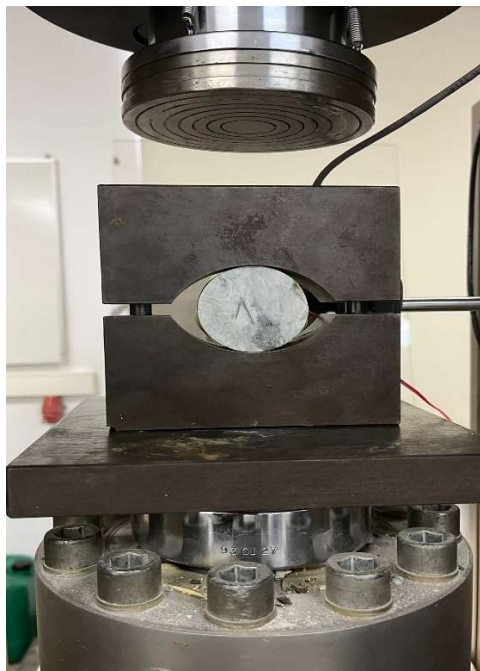
A/A	Μέγιστο	Ελάχιστο
1	20% αντοχής	10% αντοχής
2	40% αντοχής	10% αντοχής
3	60% αντοχής	10% αντοχής
4	80% αντοχής	10% αντοχής

### 3.2 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

Η μέθοδος Brazil (ή δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης ή δοκιμή φόρτισης κατά γενέτειρα) βασίζεται στην πειραματική παρατήρηση σύμφωνα με την οποία τα περισσότερα πετρώματα που βρίσκονται σε δισδιάστατα εντατικά πεδία αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση είναι θλιπτική με τιμή μικρότερη από το τριπλάσιο της εφελκυστικής τάσης, Timoshenko και Goodier (1970)<sup>1</sup>. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 για τη δοκιμή Brazil πρέπει το πλάτος των δοκιμίων να είναι περίπου ίσο με την ακτίνα τους, οπότε έγινε εκ νέου κοπή των δοκιμίων.

<sup>1</sup>Η αναλογία αυτή, 3:1, προκύπτει από τη λύση της αντιδιαμετρικής φόρτισης κυκλικού δίσκου που περιγράφεται αναλυτικά από τον Timoshenko.

Κατά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, το δοκίμιο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο χαλύβδινους σιαγόνους έτσι ώστε οι σιαγόνες και το δοκίμιο να βρίσκονται σε επαφή κατά τόξο  $10^\circ$  τη στιγμή της αστοχίας, όπου σύμφωνα με τον Hondros (1959) για τόξο  $10^\circ$  το εφελκυστικό πεδίο δεν υφίσταται μεγάλες αλλαγές. Επιπλέον, η πάνω σιαγόνα πρέπει να δέχεται το θλιπτικό φορτίο μέσω σφαιρικής κεφαλής έδρασης και η κεφαλή πρέπει να λιπανθεί με ελαφρό ορυκτέλαιο ή βαζελίνη όπως χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Ο υπόλοιπος μηχανισμός είναι ίδιος με της μονοαξονικής θλίψης και η δοκιμή γίνεται με έλεγχο φορτίου όπως και η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, με ρυθμό 200N/S. Για μεγαλύτερη ακρίβεια ενσωματώσαμε strain gauges κατά τον άξονα χ. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η διάταξη και η θέση του δοκιμίου. Τέλος, το δοκίμιο φορτίζεται με θλιπτικό πεδίο αντιδιαμετρικά και δημιουργείται ένα σχεδόν ομοιόμορφο εφελκυστικό πεδίο εγκάρσια στον άξονα φόρτισης.



Σχήμα 3.3: Διάταξη αντιδιαμετρικής θλίψης-έμμεσου εφελκυσμού

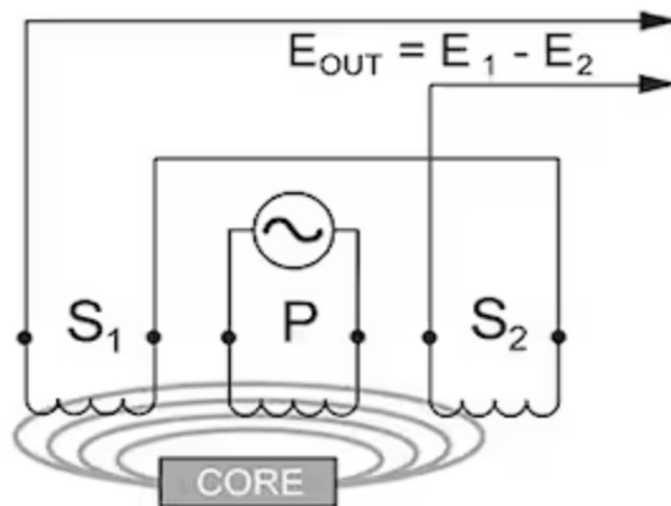
### 3.3 Γραμμικό διαφορικό μηκυνσιόμετρο (LVDT)

Τόσο στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης όσο και στη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, στη διάταξη τους περιλαμβάνεται ένα σύστημα μέτρησης αξονικής μετατόπισης, LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Το LVDT είναι διαφορικός μετασχηματιστής γραμμικής μεταβλητής, δηλαδή είναι ένας επαγωγικός μετατροπέας που καλύπτει τη γραμμική κίνηση στο ηλεκτρικό σήμα. Η λειτουργία του βασίζεται στο νόμο του Faraday, εξ. (3.1), όπου η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σε ένα κύκλωμα είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει το κύκλωμα και η μαγνητική ροή του πηνίου που είναι τυλιγμένο με σύρματα μπορεί να αλλάξει με την κίνηση ενός ραβδόμορφου μαγνήτη μέσα στο πηνίο. Ως εκ τούτου, η επαγόμενη  $E_{\text{επ}}$  στα δευτερεύοντα τυλίγματα θα είναι μεγαλύτερη εάν η τιμή του "dt" είναι χαμηλή και η χαμηλή τιμή του "dt" συνεπάγεται ότι ο πυρήνας μαλακού σιδήρου που υπάρχει στο εσωτερικό του LVDT κινείται ταχύτερα. Έτσι, θα προκληθεί ηλεκτρεγερτική τάση μεγάλου μεγέθους στα δευτερεύοντα τυλίγματα S1 και S2 εάν η κίνηση του πυρήνα είναι ταχύτερη στο εσωτερικό του LVDT. Αναλυτικότερα, το πρωτεύον τύλιγμα του LVDT, P, τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερού πλάτους. Η μαγνητική ροή που αναπτύσσεται με αυτόν τον τρόπο συνδέεται

μέσω του πυρήνα με τα γειτονικά δευτερεύοντα τυλίγματα,  $S_1$  και  $S_2$ . Έτσι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, η διαφορική έξοδος είναι:  $E_{out}=E_1-E_2$ . Εάν ο πυρήνας βρίσκεται στη μέση μεταξύ των  $S_1$  και  $S_2$ , ίση ροή συνδέεται σε κάθε δευτερεύον, οπότε οι τάσεις,  $E_1$  και  $E_2$ , που επάγονται στα τυλίγματα  $S_1$  και  $S_2$  αντίστοιχα, είναι ίσες. Σε αυτή τη μέση θέση αναφοράς του πυρήνα, γνωστή ως σημείο μηδενισμού, η διαφορική τάση εξόδου,  $(E_1 - E_2)$ , είναι μηδέν. Στην περίπτωση που ο πυρήνας μετακινηθεί πιο κοντά στο  $S_1$  παρά στο  $S_2$ , μεταφέρεται περισσότερη ροή στο  $S_1$  και λιγότερη στο  $S_2$ , οπότε η επαγόμενη τάση  $E_1$  αυξάνεται ενώ η  $E_2$  μειώνεται, με αποτέλεσμα τη διαφορική τάση  $(E_1-E_2)$ . Αντίθετα, αν ο πυρήνας μετακινηθεί πιο κοντά στο  $S_2$ , περισσότερη ροή συνδέεται στο  $S_2$  και λιγότερη στο  $S_1$ , οπότε η  $E_2$  αυξάνεται καθώς η  $E_1$  μειώνεται, με αποτέλεσμα τη διαφορική τάση  $(E_2 - E_1)$ .

$$E_{EΠ} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} (V) \quad (3.1)$$

Όπου  $\Delta\Phi$  είναι η μεταβολή της μαγνητικής ροής,  $\Delta t$  ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο,  $E_{EΠ}$  η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται στο πλαίσιο και V Volt.



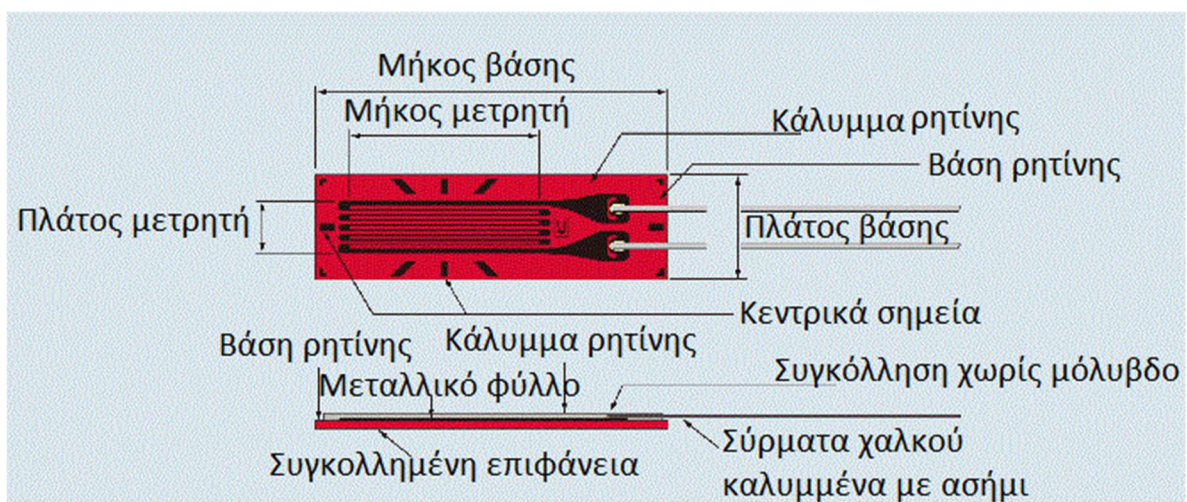
Σχήμα 3.4: Διάταξη λειτουργίας του LVDT

### 3.4 Μηκυνσιόμετρα (strain gauges)

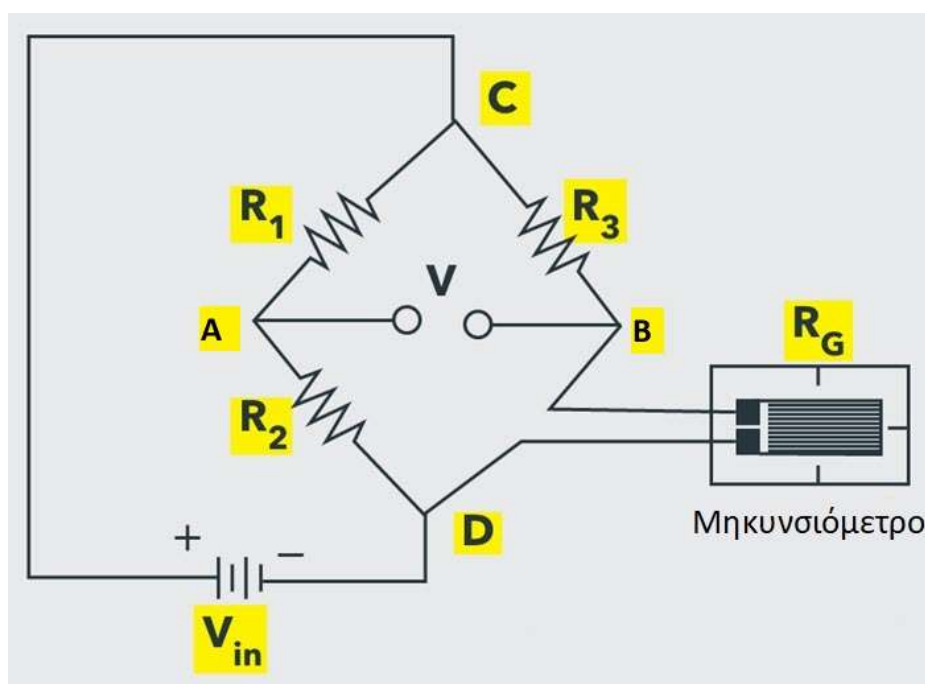
Στο υποκεφάλαιο 3.1 αναφέρθηκε η χρησιμότητα των strain gauges σαν μέθοδος μέτρησης παραμόρφωσης. Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλυθούν εις βάθος, τόσο τα χαρακτηριστικά τους όσο και τα είδη που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, τα μηκυνσιόμετρα εφευρέθηκαν από τους Edward Simmons και Ruge το 1938, με τον πιο κοινό τύπο, να αποτελείται από ένα μονωτικό εύκαμπτο υπόστρωμα που υποστηρίζει ένα σχέδιο μεταλλικού φύλλου, (Σχήμα 3.5).

Το μηκυνσιόμετρο είναι ένας αισθητήρας που μετατρέπει την ασκούμενη παραμόρφωση σε ηλεκτρική αντίσταση η οποία μπορεί να μετρηθεί. Για να υπολογιστεί η αντίσταση αυτή, είναι απαραίτητη η σύνδεση του με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα γέφυρας που έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται με ακρίβεια στις πολύ μικρές αλλαγές της ηλεκτρικής αντίστασης που συνδέονται με την τάση. Η γέφυρα αυτή ονομάζεται γέφυρα Wheatstone. Οποιαδήποτε παραμόρφωση, μικρής τάξης, στο υλικό κάτω από το μηκυνσιόμετρο έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της αντίστασης του μετρητή τάσης, καθώς παραμορφώνεται μαζί με το υλικό. Όσον αφορά τη διάταξη της γέφυρας Wheatstone, (Σχήμα 3.6), στα σημεία C, D εφαρμόζεται σταθερή διαφορά δυναμικού συνεχούς

ρεύματος. Ταυτόχρονα στα σημεία A, B μετράτε η διαφορά δυναμικού. Οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  και του μηκυνσιομέτρου  $R_g$  είναι όλες ίσες μεταξύ τους. Συνεπώς, όταν δεν υπάρχει παραμόρφωση τα ρεύματα που διατρέχουν τους κλάδους CAD και CBD είναι ίσα μεταξύ τους και η διαφορά δυναμικού μεταξύ A και B είναι μηδέν. Σε αυτή την κατάσταση θεωρείται ότι η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία. Αν το υλικό κάτω από το μηκυνσιόμετρο παραμορφωθεί, τότε παραμορφώνεται ταυτόχρονα και το μηκυνσιόμετρο και αλλάζει το μήκος της αντίστασης του. Η αλλαγή του μήκος σε έναν αγωγό, συνεπάγει την αλλαγή της αντίστασης του σύμφωνα με την εξ. (3.2), όπου  $\rho$  είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του αγωγού,  $l$  το μήκος και  $s$  η διατομή του. Για μικρές παραμορφώσεις θεωρείται ότι η διατομή παραμένει σταθερή. Η αλλαγή του μήκους του μηκυνσιομέτρου, λοιπόν, είναι γραμμικά ανάλογη με την αλλαγή της ηλεκτρικής του αντίστασης. Όταν αλλάξει το  $R_g$  τότε η γέφυρα Wheatstone χάνει την ισορροπία της και μεταξύ των σημείων A,B αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού. Αυτή η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται μετά από κατάλληλη ενίσχυση του σήματος και αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του δοκιμίου.



Σχήμα 3.5: Διάταξη ενός μηκυνσιομέτρου



Σχήμα 3.6: Γέφυρα Wheatstone (Ravi Teja, 2021)

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (3.2)$$

Επιπλέον, το μηκυνσιόμετρο συνδέεται στο πέτρωμα με ειδική κόλλα όπου πρέπει να είναι συμβατή με το υλικό μέτρησης και τις συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία. Στα πρώτα δύο δοκίμια τοποθετήθηκαν δύο μηκυνσιόμετρα 1cm σε σχήμα σταυρού, (Σχήμα 3.7), προκειμένου να μετράει τόσο την αξονική παραμόρφωση όσο και την πλευρική, δίνοντας έτσι μέτρηση για την αξονική παραμόρφωση με μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτή του LVDT όπου είναι ευδιάκριτο στην δεξιά πλευρά της εικόνας του ίδιου σχήματος. Σε επτά δοκίμια ενσωματώθηκε strain gauge 3cm οριζόντια, μετρώντας μόνο την αξονική παραμόρφωση, (Σχήμα 3.8), όπου μετράει τη διαφορά σε περίμετρο. Προκειμένου να βρεθεί αν θα χρειαστεί κάποια διόρθωση για τις μετρήσεις αυτές έγινε η παρακάτω διερεύνηση καταλήγοντας τελικά, στο ότι η μεταβολή της περιμέτρου είναι γραμμικά ανάλογη της μεταβολής της διαμέτρου ή/και της αντίστοιχης χορδής. Συνεπώς, δεν απαιτείται διόρθωση. Στο Σχήμα 3.9, το τόξο L υποδηλώνει την απόσταση που μετράει το stain gauge και η πλευρά ΑΓ, τη ζητούμενη απόσταση. Έστω,  $\varepsilon_{sg}$  η μέτρηση που δίνεται,  $\theta$  η γωνία του τόξου που σχηματίζεται και ΑΓ η πλευρά τριγώνου που δημιουργείται.

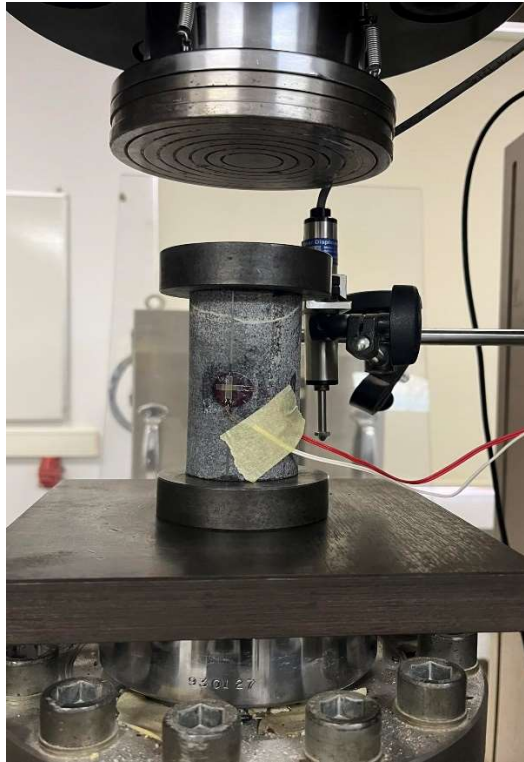
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.3)$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta L}{R} \quad (3.4)$$

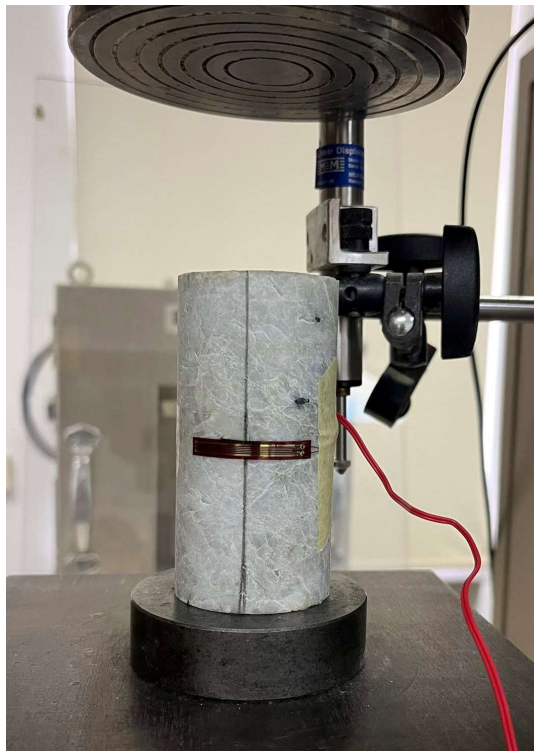
$$AG = 2 * R * \sin \frac{\Delta \theta}{2} \quad (3.5)$$

Άρα, η εξ. (3.3) μέσω των εξ. (3.4) παίρνει την τελική μορφή της εξ. (3.6).

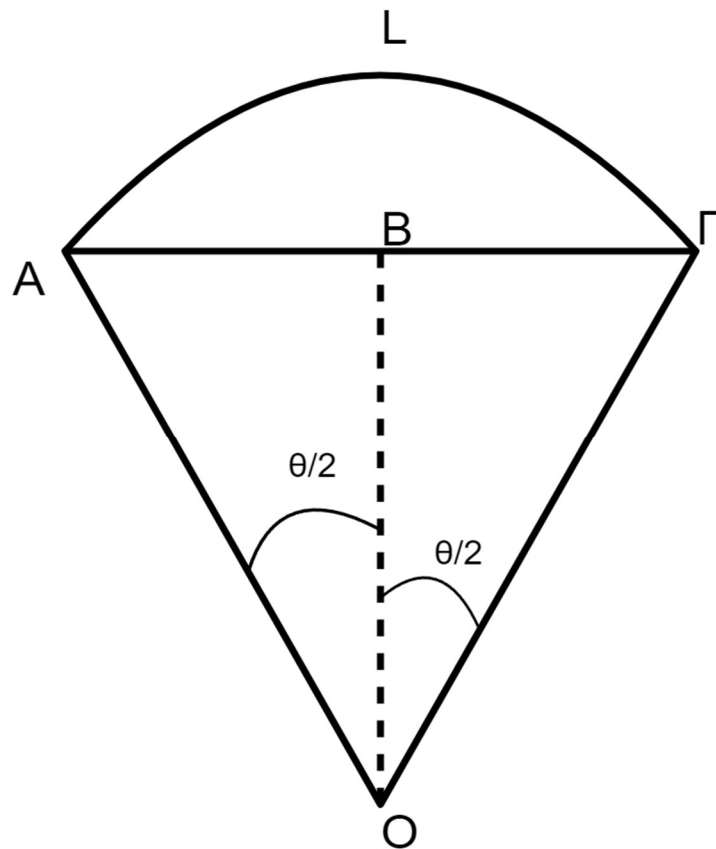
$$\varepsilon_{AG} = \frac{\Delta(AG)}{AG} = \frac{2R * \sin \frac{\Delta \theta}{2}}{2R * \sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\frac{\Delta L}{R}}{\frac{L}{R}} = \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon_{sg} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.7: Δοκίμιο με σταυρωτά μηχανισιόμετρα

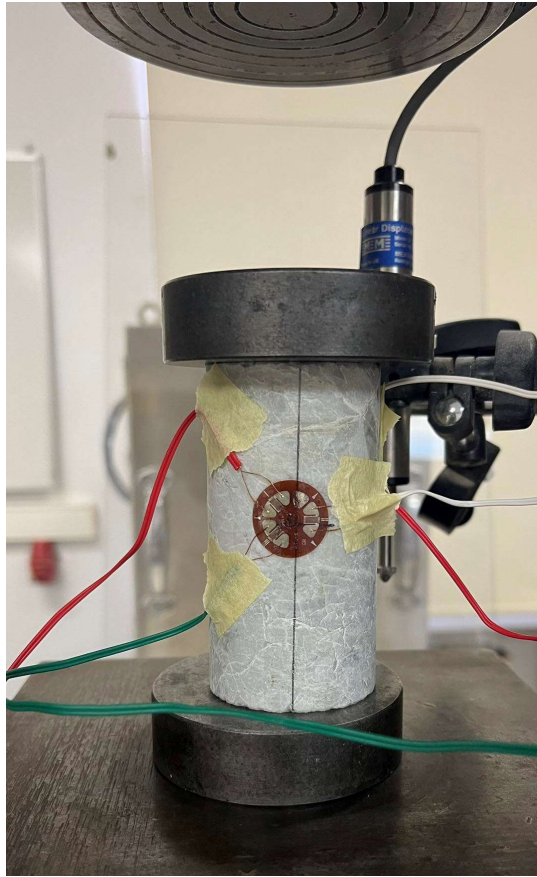


Σχήμα 3.8: Οριζόντια διάταξη μηχανισιομέτρου

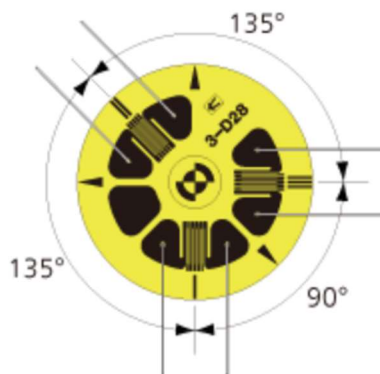


Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση για τη μέτρηση περιμέτρου

Τέλος, σε δυο δοκίμια το strain gage κολλήθηκε έτσι ώστε η μια αντίσταση να μετράει την οριζόντια παραμόρφωση και οι άλλες δυο να μετράνε σε διαγώνιες διευθύνσεις  $45^\circ$ , Σχήμα 3.10, όπου οι γωνίες μεταξύ των καλωδίων δίνονται στο Σχήμα 3.11. Λόγω των γωνιών αυτών χρειάστηκε να γίνει η κατάλληλη στροφή στο επίπεδο με τους απαραίτητους μετασχηματισμούς ημιτόνων και συνημιτόνων.



Σχήμα 3.10: Κυκλική διάταξη strain gauge



Σχήμα 3.11: Μηκυνσιόμετρο με κυκλική διάταξη αντιστάσεων

### 3.5 Θεωρία ελαστικότητας

Ο γενικευμένος νόμος του Hooke συνδέει τη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης, εξ. (3.7). Η εξ. (3.7), αποτελεί ένα καταστατικό μοντέλο όπου αν στον τανυστή  $C_{ijkl}$  υπάρχουν ελαστικές σταθερές τότε είναι ελαστικό μοντέλο αν περιλαμβάνονται και πλαστικές παραμέτρους είναι ελαστοπλαστικό. Στην ελαστική περίπτωση, ο τανυστής  $C_{ijkl}$  είναι το μητρώο των ελαστικών παραμέτρων που περιλαμβάνει 81 όρους με τους 36 να είναι διαφορετικοί λόγω των συμμετρικών σταθερών  $\sigma_{ij}$  και  $\epsilon_{kl}$ . Στην περίπτωση του γραμμικού ελαστικού σώματος και της

μονοδιάστατης φόρτισης όπου η τάση είναι  $\sigma$ , η παραμόρφωση  $\varepsilon$  και το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young  $E$ , ο νόμος του Hooke αποκτά τη μορφή της εξ. (3.8). Το μέτρο ελαστικότητας του Young αποτελεί τη σύνδεση παραμόρφωσης και τάσης στην ελαστική περιοχή.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} \quad (3.7)$$

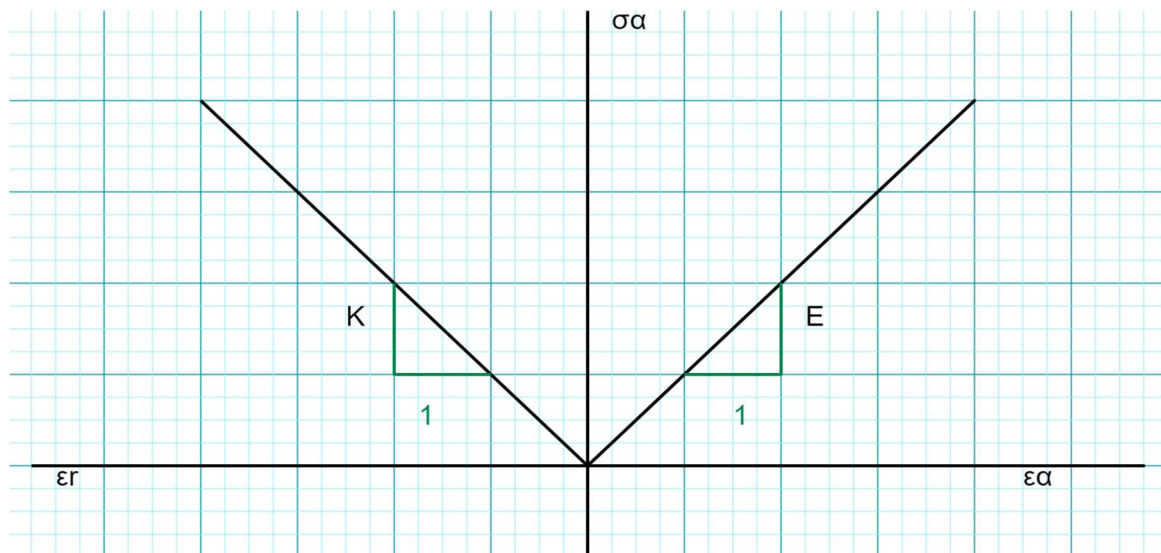
$$\sigma = E * \varepsilon \quad (3.8)$$

Εάν αποτυπωθεί σε ένα διάγραμμα η τάση έναντι της παραμόρφωσης, για μικρές παραμορφώσεις, το γράφημα αυτό θα είναι γραμμικό και η κλίση της γραμμής αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας του Young, που είναι ιδιότητα του υλικού (Σχήμα 3.12). Αντίστοιχα στον άξονα των  $-y$ ,  $x$ , που αφορά την πλευρική παραμόρφωση συναρτήσει της αξονικής τάσης, αποτυπώνεται η αντίστοιχη ευθεία, ορίζοντας έτσι μια σταθερά  $K$ , εξ (3.10), που με τη βοήθεια του λόγου Poisson, εξ. (3.9) και το νόμο του Hooke, εξ. (3.8), αποκτά την τελική μορφή, εξ. (3.11). Ο λόγος Poisson, περιγράφει τα δυο φαινόμενα που συμβαίνουν ταυτόχρονα στον εφελκυσμό και στη θλίψη, δηλαδή μεταβολή του μήκος και της διατομής.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (3.9)$$

$$K = \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_r} \quad (3.10)$$

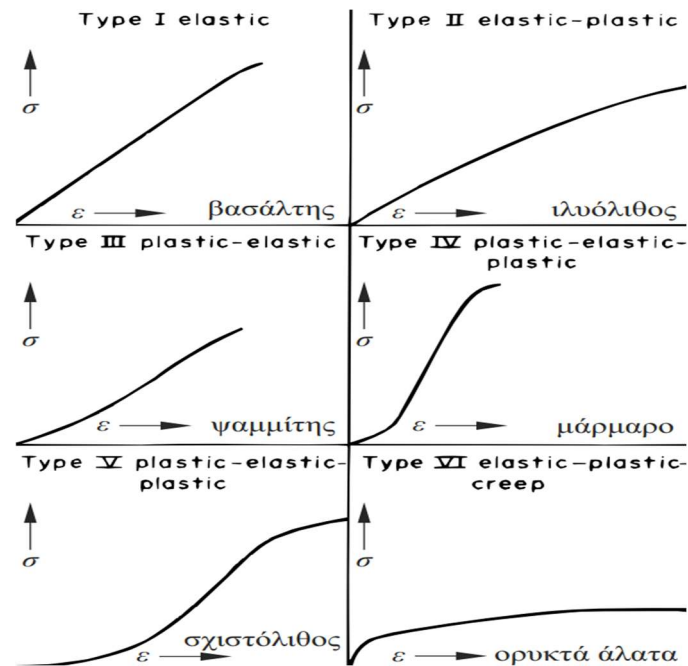
$$K = -\frac{E}{\nu} \quad (3.11)$$



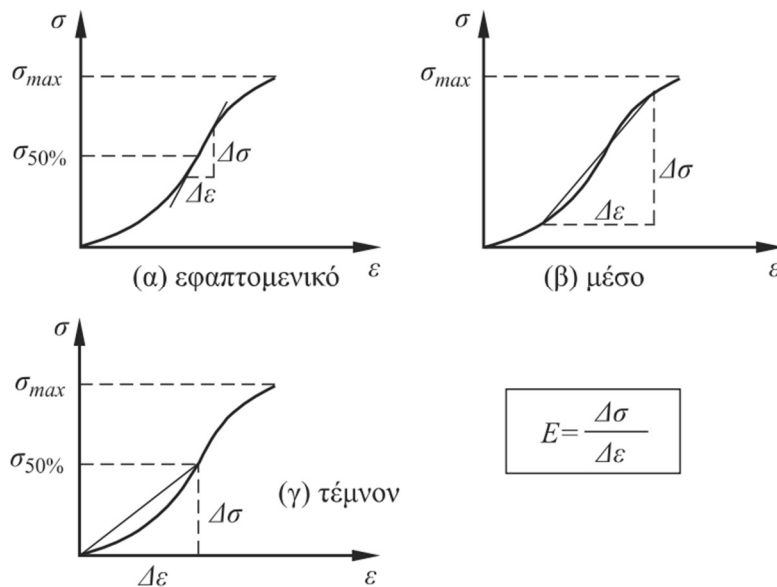
Σχήμα 3.12: Τάση-παραμόρφωση

Όπως έχει προαναφερθεί, το μέτρο ελαστικότητας αποτελεί μια από τις πιο βασικές μηχανικές ιδιότητες για τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας όπου υπολογίζεται από τις παραπάνω πειραματικές διαδικασίες και συγκεκριμένα από την κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 3.13, παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα παραμόρφωσης πετρωμάτων, από τον Roberts (1977), κατά τη διάρκεια μονοαξονικής θλίψης. Παρατηρείται από τα διαγράμματα αυτά ότι η κλίση δεν παραμένει πάντα σταθερή, για τον λόγο αυτό, σύμφωνα με τον ISRM

(International Society for Rock Mechanics), μπορούν να υπολογιστούν ακόμα τρία διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, το εφαπτομενικό, το μέσο και το τέμνον. Τα μέτρα αυτά παρουσιάζονται γραφικά, (Σχήμα 3.14), και υπολογίζονται στην γενική περίπτωση με τον τύπο που αναγράφεται στα διαγράμματα.



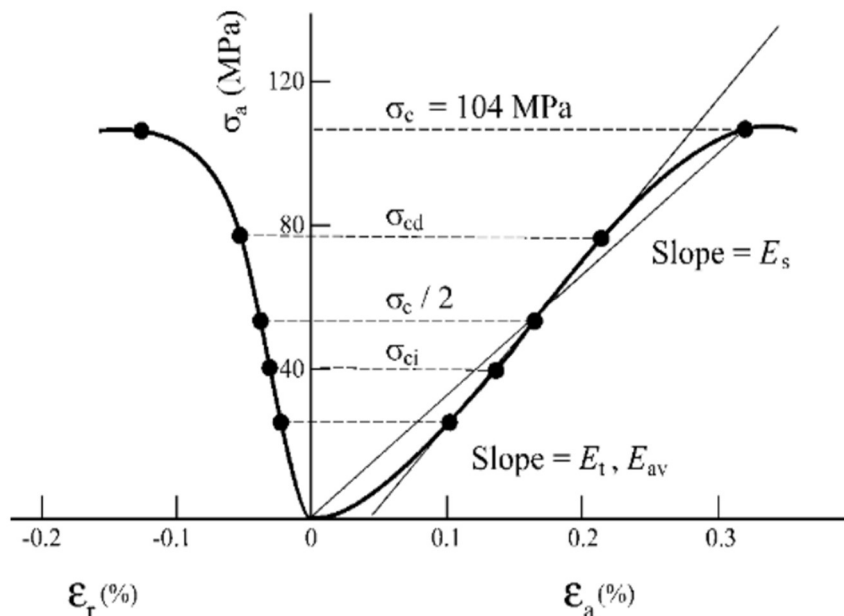
Σχήμα 3.13: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης για πετρώματα (Roberts 1977)



Σχήμα 3.14: Υπολογισμός των τριών διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (Αγιουτάντης 2002)

Οι Brady *et al* (2004), παραθέτουν ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15, για τον υπολογισμό του προαναφερθέν μέτρου ελαστικότητας όπου  $E_t=51$  GPa,  $E_{av}=51$  GPa και  $E_s=32.1$  GPa και υπολογίστηκαν ως εξής:

- Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (tangent modulus)  $E_t$  είναι η κλίση της καμπύλης σε κάποιο σημείο με σταθερό ποσοστό, συνήθως 50%.
- Το μέσο μέτρο ελαστικότητας (average modulus)  $E_{av}$  προκύπτει από τη μέση κλίση του ευθυγραμμου τμήματος.
- Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (secant modulus)  $E_s$  υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας από την αρχή των αξόνων (0, 0) έως κάποιο σταθερό ποσοστό τελικής αντοχής, (π.χ. 100%)



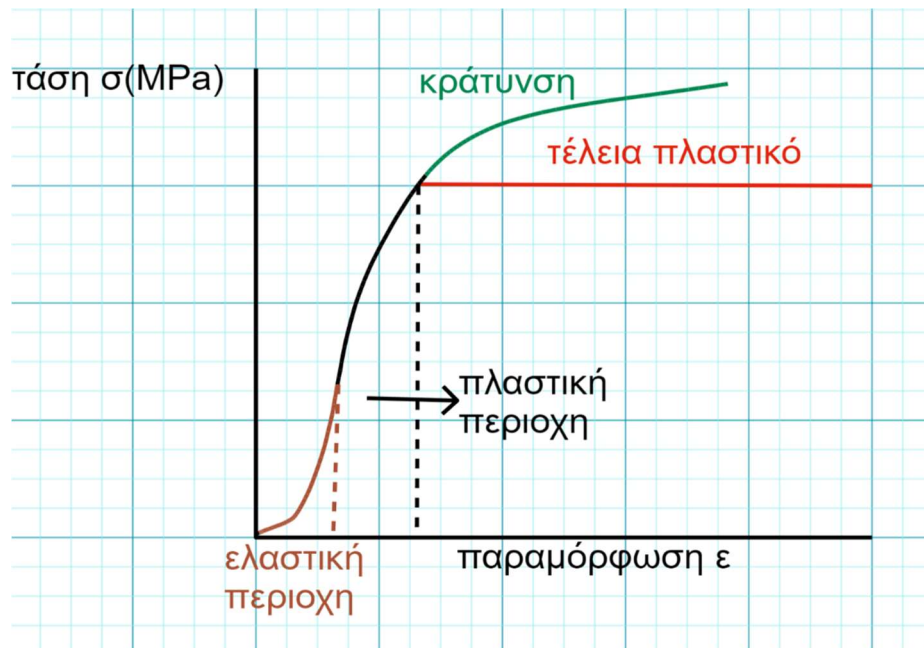
Σχήμα 3.15: Τυπικές καμπύλες φόρτισης πειράματος μονοαξονικής θλίψης και μέτρα ελαστικότητας

### 3.6 Θεωρία πλαστικότητας

Η θεωρία της πλαστικότητας μακρομηχανικά, ή αλλιώς μαθηματικά, περιγράφει φαινομενολογικά τις πλαστικές παραμορφώσεις και συσχετίζει τις μακροσκοπικές μηχανικές ιδιότητες (τάση, παραμόρφωση). Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα της πλαστικότητας στη φύση παρατηρείται σε στάδια, όπου η τελική παραμόρφωση του στερεού είναι ισοδύναμη με το άθροισμα των σταδιακών παραμορφώσεων ακολουθώντας τη διαδρομή της παραμόρφωσης.

Στην απλούστερη περίπτωση της θεωρίας πλαστικότητας που εξετάζονται ιδανικά υλικά τα οποία θεωρούνται ελαστικά-τέλεια πλαστικά, όταν η φόρτιση φτάσει στο σημείο που ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση, το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο διαρροής. Στην περίπτωση των τέλεια πλαστικών υλικών, το όριο διαρροής ταυτίζεται με το όριο αστοχίας και κανένα τμήμα του δεν εξελίσσεται κατά την παραμόρφωση. Η πλαστική παραμόρφωση είναι η μόνιμη παραμόρφωση που συμβαίνει όταν ένα υλικό υποβάλλεται σε τάσεις, που υπερβαίνουν την αντοχή διαρροής του και προκαλούν επιμήκυνση ή συμπίεση Pfeifer (2009).

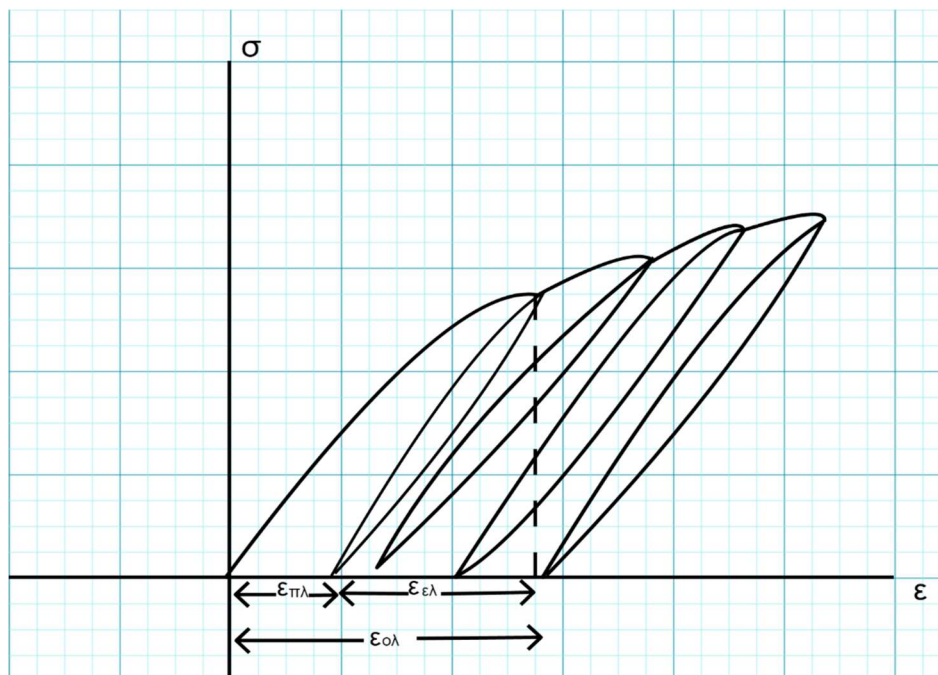
Τα περισσότερα υλικά στη φύση δε συμπεριφέρονται ιδανικά, αλλά όταν η τάση φόρτισης φθάσει το όριο διαρροής και το ξεπεράσει θα προκληθούν πλαστικές αλλά και ελαστικές παραμορφώσεις ωστόσο να επιτευχθεί η τάση αστοχίας. Τα υλικά που παρουσιάζουν αυτήν την συμπεριφορά, δηλαδή αύξηση της αντοχής με την επιβολή πλαστικής παραμόρφωσης ονομάζονται πλαστικά υλικά με κράτυνση, Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: Τυπική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης

Με τη βοήθεια των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.1, κρίνεται απαραίτητη η αποτύπωση τους σε ένα διάγραμμα τάσης  $\sigma$ -παραμόρφωσης  $\varepsilon$  με σκοπό τη γεωμετρική ερμηνεία της ελαστικής, πλαστικής και συνολικής παραμόρφωσης, Σχήμα 3.17. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι, ο κάθε κύκλος αντιστοιχεί στην πλαστική παραμόρφωση και από το τέλος του κύκλου μέχρι την προβολή του μέγιστου σημείου του κύκλου στον άξονα  $\chi$  υπάρχει η ελαστική παραμόρφωση, όπου το άθροισμα τους είναι η συνολική παραμόρφωση, εξ (3.12)

$$\varepsilon_{ολ} = \varepsilon_{ελ} + \varepsilon_{πλ} \quad (3.12)$$

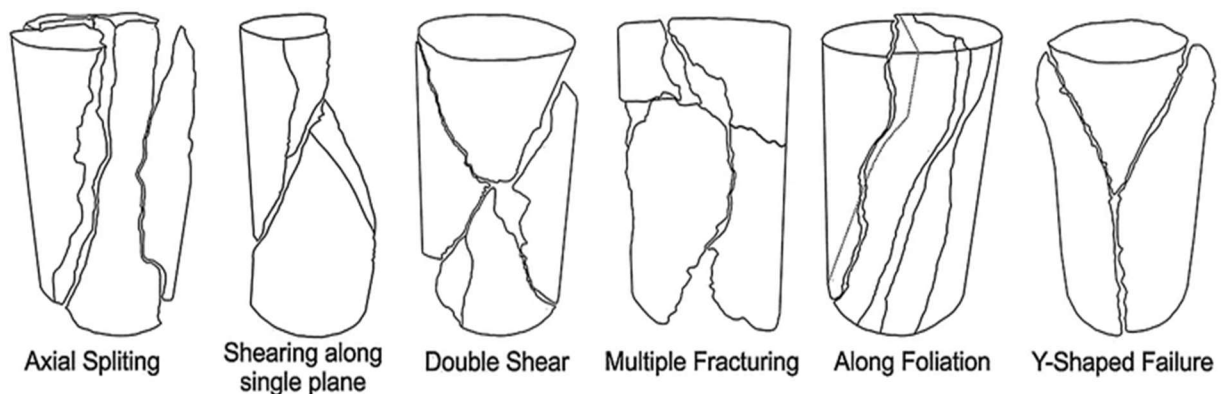


Σχήμα 3.17: Ενδεικτικοί κύκλοι φόρτισης-αποφόρτισης και ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις

### 3.7 Τρόποι αστοχίας

Ο τρόπος αστοχίας κάθε βραχομάζας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που αφορούν τόσο τη μικροδομή της, όπως είναι η θέση, η κατεύθυνση και το μέγεθος των μικρό-ασυνεχειών, όσο και τη διαδικασία άσκησης φορτίου. Αναφορικά με τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης οι τρόποι αστοχίας είναι οι εξής, (Σχήμα 3.18):

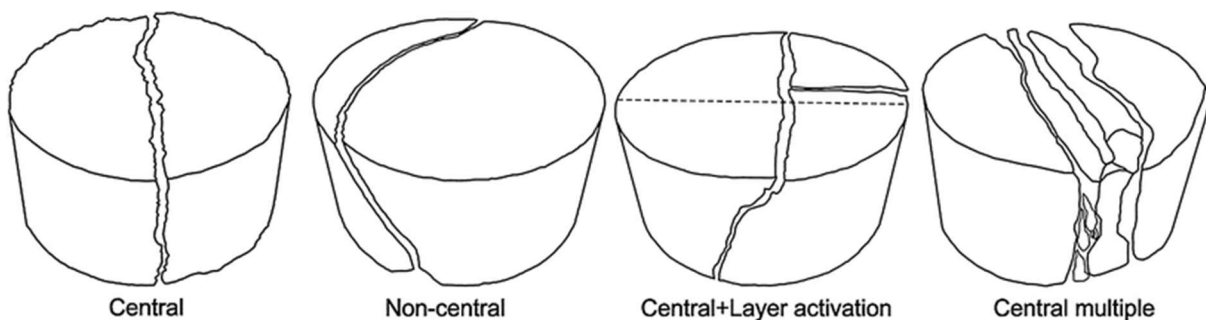
1. Αξονικά.
2. Διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου.
3. Διπλή διάτμηση.
4. Πολλαπλή θραύση.
5. Κατά μήκος της στρώσης.
6. Υοειδής θραύση.



Σχήμα 3.18: Σχηματική απεικόνιση τρόπων αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη, Basu et al. (2013) and Singh et al. (2016).

Όσον αφορά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil), σύμφωνα με τους Tavallali and Vervoort (2010), υπάρχουν τέσσερις τύποι αστοχίας, Σχήμα 3.19.

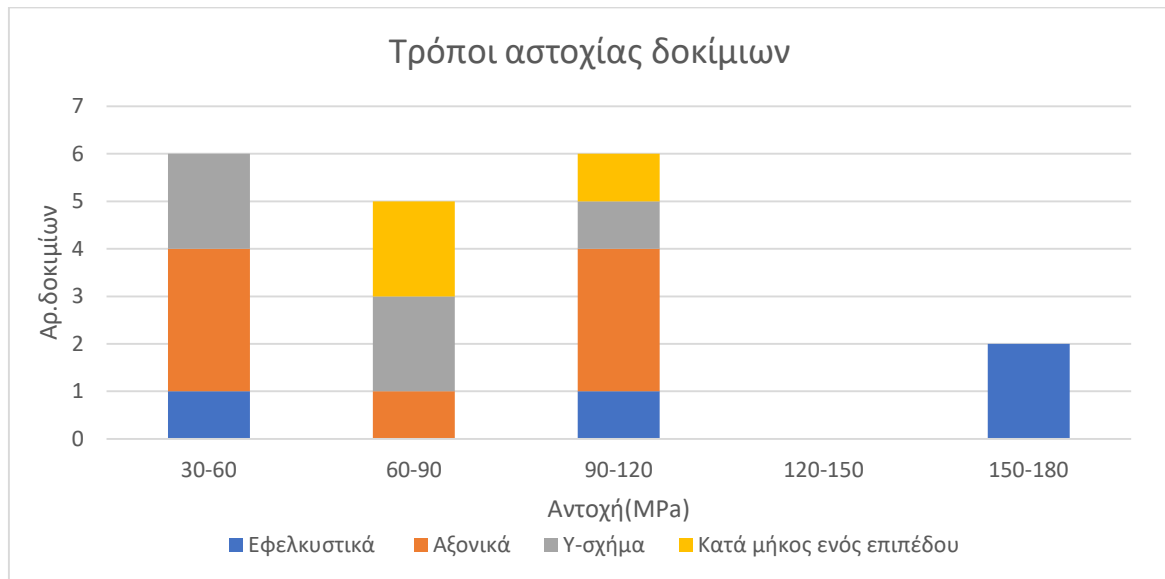
1. Κεντρική θραύση
2. Μη κεντρική θραύση
3. Θραύση παράλληλη προς το επίπεδο της ασυνέχειας.
4. Πολλαπλές κεντρικές θραύσεις



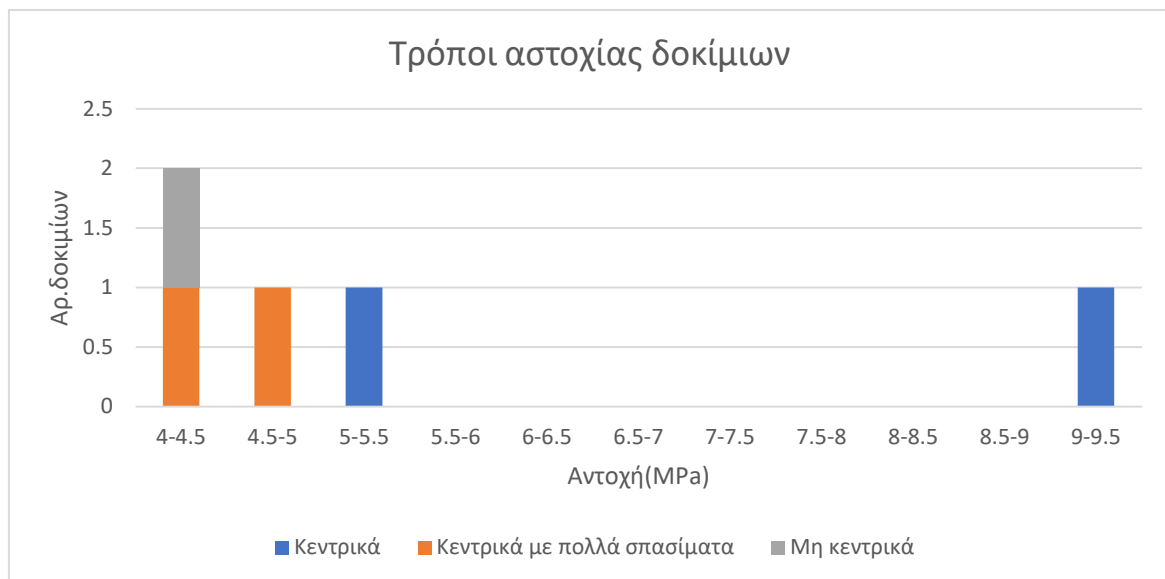
Σχήμα 3.19: Σχηματική απεικόνιση τρόπων αστοχίας σε αντιδιαμετρική θλίψη Rohan Bisai, Sayantan Chakraborty (2019).

Στα πειράματα μονοαξονικής θλίψης που διεξήχθησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προέκυψαν μόνο η αξονική αστοχία, το σχήμα Y και διάτμηση κατά μήκος ενός επιπέδου. Υπήρξαν όμως και τρία δοκίμια που έσπασαν με τέτοιο τρόπο ώστε το επίπεδο να μην είναι ευδιάκριτο οπότε δε μπορούσε να γίνει κάποια περαιτέρω ανάλυση αναφορικά με τη γωνία τριβής τους. Αντίστοιχα,

στην αντιδιαμετρική θλίψη συναντήσαμε κεντρική θραύση, κεντρική με πολλά σπασίματα, όπου θεωρήθηκε υπο-περίπτωση της πρώτης κατηγορίας αστοχίας, και μη κεντρική. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στα Σχήμα 3.20-Σχήμα 3.21, μαζί με τις αντοχές τους στη δοκιμή αυτή.



Σχήμα 3.20: Τρόποι αστοχίας δοκίμων, σε μονοαξονική θλίψη, με τις αντίστοιχες αντοχές τους

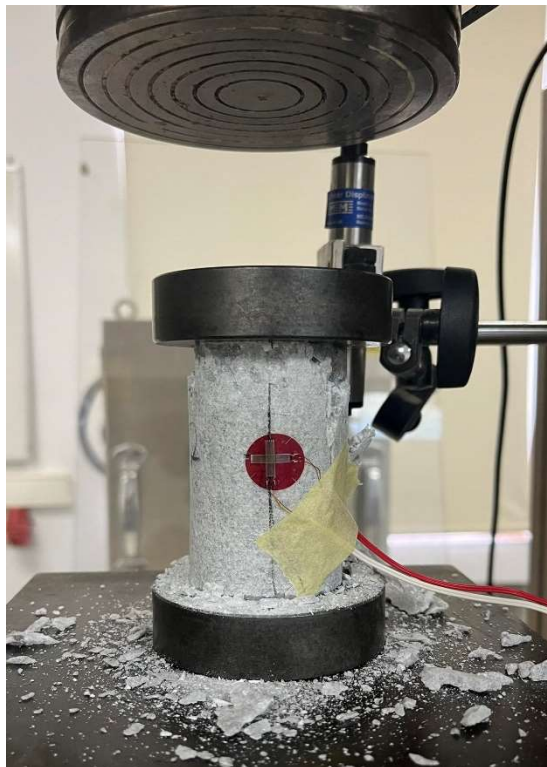


Σχήμα 3.21: Τρόποι αστοχίας δοκίμων σε Brazil, με τις αντίστοιχες αντοχές τους

## Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης

### 4.1 Σταυρωτό μηκυνσιόμετρο

Όπως προαναφέρθηκε στο υπο-κεφάλαιο 3.1., για την πλήρη μελέτη της συμπεριφοράς ενός υλικού μέσω των δοκιμών θλίψης, είναι απαραίτητο το δοκίμιο να υποβληθεί σε κύκλους φόρτισης – αποφόρτιση. Στην προκειμένη περίπτωση οι κύκλοι αυτοί είναι τέσσερις και η τάση τους αυξάνεται με βήμα 15MPa. Το πρώτο δοκίμιο που θα αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το δοκίμιο με τον αριθμό 2, *Παραρτήματα Α*, όπου έχουν συγκολληθεί μηκυνσιόμετρα σε σχηματισμό σταυρού, με αποτέλεσμα να γίνει επεξεργασία της παραμόρφωσης και στους δύο άξονες  $x$ ,  $y$ .



Σχήμα 4.1: Δοκίμιο 2 με μηκυνσιόμετρα

Στους παρακάτω Πίνακες 4.1-4.2, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι πρώτες δεκατέσσερις τιμές, για το δοκίμιο Νο 2, που δίνονται από το μηχάνημα αλλά και η επεξεργασία των μετρήσεων. Αρχικά, έγιναν οι κατάλληλες μετατροπές ώστε να υπάρχουν ίδιες μονάδες μέτρησης, δηλαδή  $\text{MPa} = 10^3 \cdot \text{kN/m}^2$ ,  $\text{m/m} = \text{mm} \cdot 10^{-3} / \text{cm} \cdot 10^{-2} \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$  και υπολογίστηκε το εμβαδό  $A$ , εφόσον όλα τα δοκίμια είναι κυλινδρικά:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.1)$$

Στη συνέχεια, παραθέτονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τους πρωταρχικούς υπολογισμούς, όπου η Αξονική παραμόρφωση από strain gauge (Axial strain gauge) αντιστοιχεί στο  $\epsilon_y$  (mm) με διόρθωση offset και η ακτινική παραμόρφωση από strain gauge (Radial strain gauge) αντιστοιχεί στο διορθωμένο  $\epsilon_x$  (m/m). Η διόρθωση offset κρίθηκε απαραίτητη σε κάποια δοκίμια

όπου η μηχανή, λόγω σφάλματος, δε ξεκίνησε τους υπολογισμούς από τον αριθμό 0 και έτσι χρειάστηκε διόρθωση αφαιρώντας από όλες τις τιμές την αρχική.

Αξονική τάση (Axial Stress), όπου  $F \rightarrow$  μετρούμενο φορτίο (δύναμη) και  $A \rightarrow$  αρχική επιφάνεια διατομής κυλίνδρου:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (4.2)$$

Αξονική παραμόρφωση από το LVDT (Axial LVDT strain), όπου  $\Delta l \rightarrow$  βράχυνση,  $l_0 \rightarrow$  αρχικό μήκος δοκιμίου:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ (mm)} \quad (4.3)$$

Με βάση τις τιμές που προέκυψαν από τις παραπάνω εξισώσεις, έγινε δημιουργία του διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης, Σχήμα 4.2, όπου είναι ευδιάκριτοι οι κύκλοι φόρτισης τόσο για το LVDT, όσο και για το strain gauge αξονικά και ακτινικά.

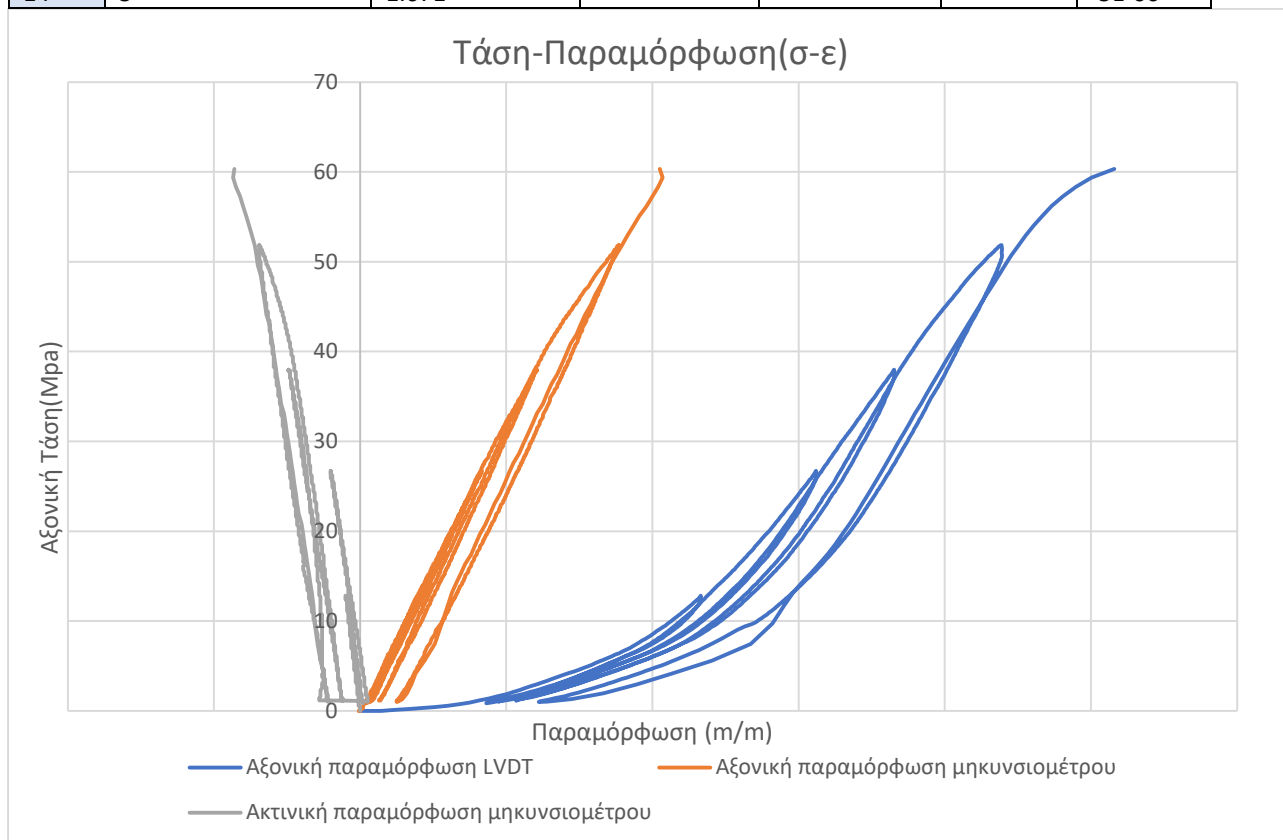
Πίνακας 4.1: Πειραματικά δεδομένα

ID No.	PCD-300B		Χαρακτηριστικά		
Title			Διάμετρος	4.752	cm
Test Date	3/6/2023		Ύψος	8.77	cm
MEAS CHs	14		Εμβαδό	0.001773547	m <sup>2</sup>
Digital Input	OFF				
Sampling Rate(Hz)	1				
Data Nos/CH	1520				
MEAS Time(sec)	1520			<b>εγ</b>	<b>εκ</b>
CH Name	Displacement MTS	Load Cell MTS	LVDT 25	Strain Chanel 1	Strain Chanel 2
CH No.	CH01	CH03	CH04	CH09	CH10
Range	10	10	10	10000	10000
Calibration Coefficient	5	50	2.5	1	1
Offset	0.033	-0.02	0.003	0	0
Unit	mm	kN	mm	μm/m	μm/m
0	0.125	0.330	4.372	-5	3565
1	0.156	0.330	4.376	-5	3565
2	0.155	0.330	4.376	0	3565
3	0.155	0.331	4.376	-5	3565
4	0.156	0.331	4.376	-5	3565
5	0.157	0.330	4.377	-5	3565
6	0.162	0.342	4.378	-5	3565
7	0.169	0.435	4.381	-5	3565
8	0.179	0.562	4.383	-10	3565
9	0.190	0.692	4.387	-10	3565
10	0.202	0.871	4.390	-15	3565
11	0.215	1.067	4.394	-15	3565
12	0.229	1.324	4.398	-15	3570

13	0.242	1.649	4.402	-20	3570
14	0.255	2.000	4.405	-25	3570

Πίνακας 4.2: Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

	ε <sub>x</sub> (διορθωμένο)	Load Cell(offset)	Axial stress	Axial LVDT strain	Axial strain gauge	Radial strain gauge
Unit	μm/m	kN	MPa	m/m	m/m	m/m
0	0	0.000	0	0	0	0
1	0	0.001	3.10E-04	5.00E-05	0.00E+00	0
2	0	0.000	2.80E-04	5.00E-05	-5.00E-06	0
3	0	0.001	7.20E-04	5.00E-05	0.00E+00	0
4	0	0.001	6.50E-04	5.00E-05	0.00E+00	0
5	0	0.000	2.10E-04	5.00E-05	0.00E+00	0
6	0	0.013	7.05E-03	7.00E-05	0.00E+00	0
7	0	0.106	5.95E-02	1.00E-04	0.00E+00	0
8	0	0.233	1.31E-01	1.30E-04	5.00E-06	0
9	0	0.363	2.04E-01	1.70E-04	5.00E-06	0
10	0	0.542	3.05E-01	2.10E-04	1.00E-05	0
11	0	0.737	4.16E-01	2.60E-04	1.00E-05	0
12	5	0.995	5.61E-01	3.00E-04	1.00E-05	-5E-06
13	5	1.319	7.44E-01	3.40E-04	1.50E-05	-5E-06
14	5	1.671	9.42E-01	3.80E-04	2.00E-05	-5E-06

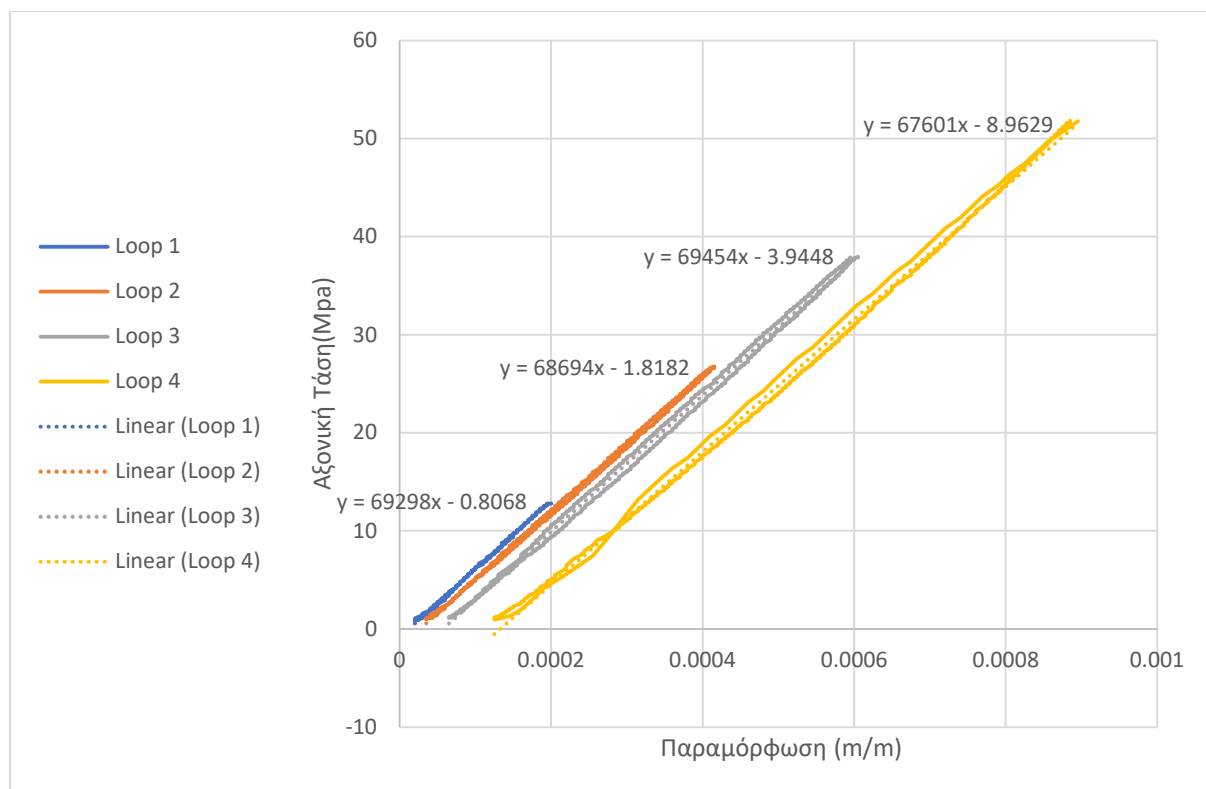


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του δοκιμίου 2

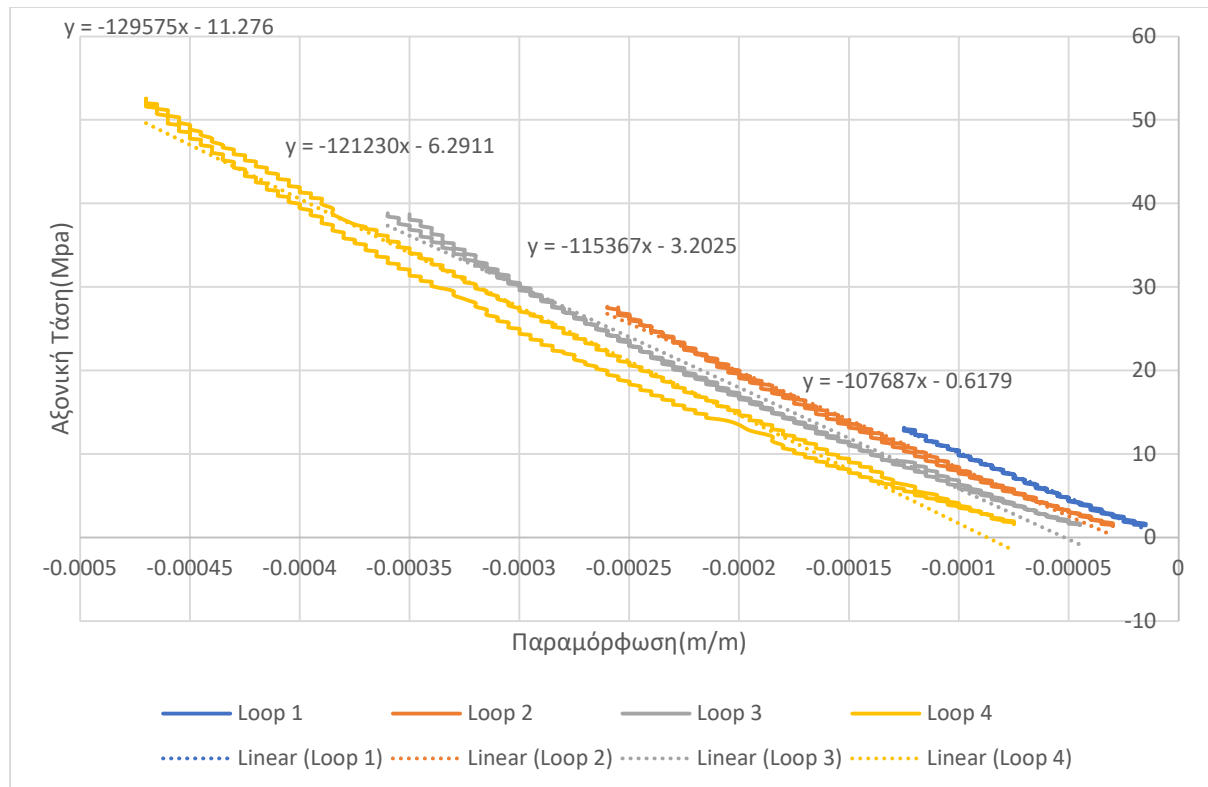
Σε συνέχεια της επεξεργασίας, έγινε διαχωρισμός των τεσσάρων κύκλων από την κύρια καμπύλη φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, όταν υπάρξει η πρώτη μέγιστη τιμή πριν την μείωση των

τιμών, ξεκινάει ένα κύκλος και ολοκληρώνεται όταν βρεθεί κάποια κοντινή τιμή της αρχικής. Οι υπόλοιπες τιμές αποτελούν την κύρια φόρτιση (Primary loading), όπου υπολογίζονται επτά παραμορφώσεις όπως θα αναλυθούν και στη συνέχεια. Αναφορικά με τους κύκλους, δημιουργήθηκαν δύο νέα διαγράμματα, Σχήμα 4.3 και Σχήμα 4.4, που παρουσιάζουν της αξονική και ακτινική παραμόρφωση του κάθε κύκλου με τις αντίστοιχες εξισώσεις τους. Για την περαιτέρω επεξεργασία δημιουργήθηκε ο Πίνακας 4.3: Περαιτέρω επεξεργασία μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες τιμές κάθε κύκλου, το μέτρο ελαστικότητας Young  $E$  και το λόγο Poisson  $\nu$ . Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  υπολογίζεται ως η μέση κλίση των κύκλων φόρτισης - αποφόρτισης του διαγράμματος, Σχήμα 4.3, της αξονικής τάσης  $\sigma_a$  ως προς την αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$ . Αντίστοιχα, ο λόγος του Poisson υπολογίζεται ως η μέση κλίση των κύκλων φόρτισης - αποφόρτισης του διαγράμματος της ακτινικής  $\epsilon_r$  ως προς την αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$ , Σχήμα 4.4, Λιόλιος (2013). Η αξονική και ακτινική πλαστική παραμόρφωση προκύπτουν από τις εξισώσεις κάθε κύκλου, διάγραμμα στο Σχήμα 4.3-Σχήμα 4.4 αντίστοιχα, λύνοντας ως προς  $x$  με  $y=0$ . Άρα για το δεύτερο δοκίμιο, 1<sup>ο</sup> κύκλο οι τιμές του Πίνακας 4.3, προκύπτουν ως εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας του Young  $E=69.2$  GPa
- Λόγος του Poisson  $\nu=69.2/230.4$  GPa
- Αξονική πλαστική παραμόρφωση  $\epsilon_a$ :  $y=69298x-0.8068 \Rightarrow 0=69298\sigma_a-0.8068 \Rightarrow \epsilon_a=0.8068/69298$  (m/m)
- Ακτινική πλαστική παραμόρφωση  $\epsilon_r$ :  $y=-230453x+2.8231 \Rightarrow 0=-230453\epsilon_r+2.8231 \Rightarrow \epsilon_r=2.8231/230453$  (m/m)



Σχήμα 4.3: Τάση-Αξονική παραμόρφωση κύκλων



Σχήμα 4.4: Τάση-Ακτινική παραμόρφωση κύκλων

Πίνακας 4.3: Περαιτέρω επεξεργασία μετρήσεων

Loop Data	Max Axial stress	Young's modulus E	Poisson's ratio	Axial plastic strain	Radial plastic strain
	Mpa	Gpa		m/m	m/m
Loop 1	12.8	69.2	0.30035	0.00001	0.00001
Loop 2	26.7	68.7	0.32284	0.00003	-0.00005
Loop 3	37.9	69.5	0.33301	0.00006	-0.00005
Loop 4	51.8	67.6	0.31210	0.00013	-2.65133

Συνεχίζοντας την ανάλυση με το στάδιο του Primary Loading (κύρια φόρτιση) οι εξισώσεις που υπολογίζονται οι προαναφερόμενες επτά εξισώσεις είναι οι εξής:

- Ογκομετρική παραμόρφωση (Volumetric Strain)

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{\alpha, str.g} + 2\varepsilon_{r, str.g} \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)} \quad (4.4)$$

- Αξονική ελαστική παραμόρφωση (Axial Strain Elastic)

$$\sigma = E * \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\alpha, el} = \frac{\sigma}{E} \text{ (m/m)} \quad (4.5)$$

- Ακτινική ελαστική παραμόρφωση (Radial Strain Elastic)

$$\varepsilon_{r, el} = \frac{\varepsilon * \nu}{E} \text{ (m/m)} \quad (4.6)$$

- Ογκομετρική ελαστική παραμόρφωση (Volumetric Strain Elastic)

$$\varepsilon_{vol, el} = \varepsilon_{\alpha, el} + 2\varepsilon_{r, el} \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)} \quad (4.7)$$

- Αξονική πλαστική παραμόρφωση (Axial Plastic Strain)

$$\varepsilon_{a, str.g} = \varepsilon_{a, el} + \varepsilon_{a, pl} \rightarrow \varepsilon_{a, pl} = \varepsilon_{str.g} - \varepsilon_{a, el} \text{ (m/m)} \quad (4.8)$$

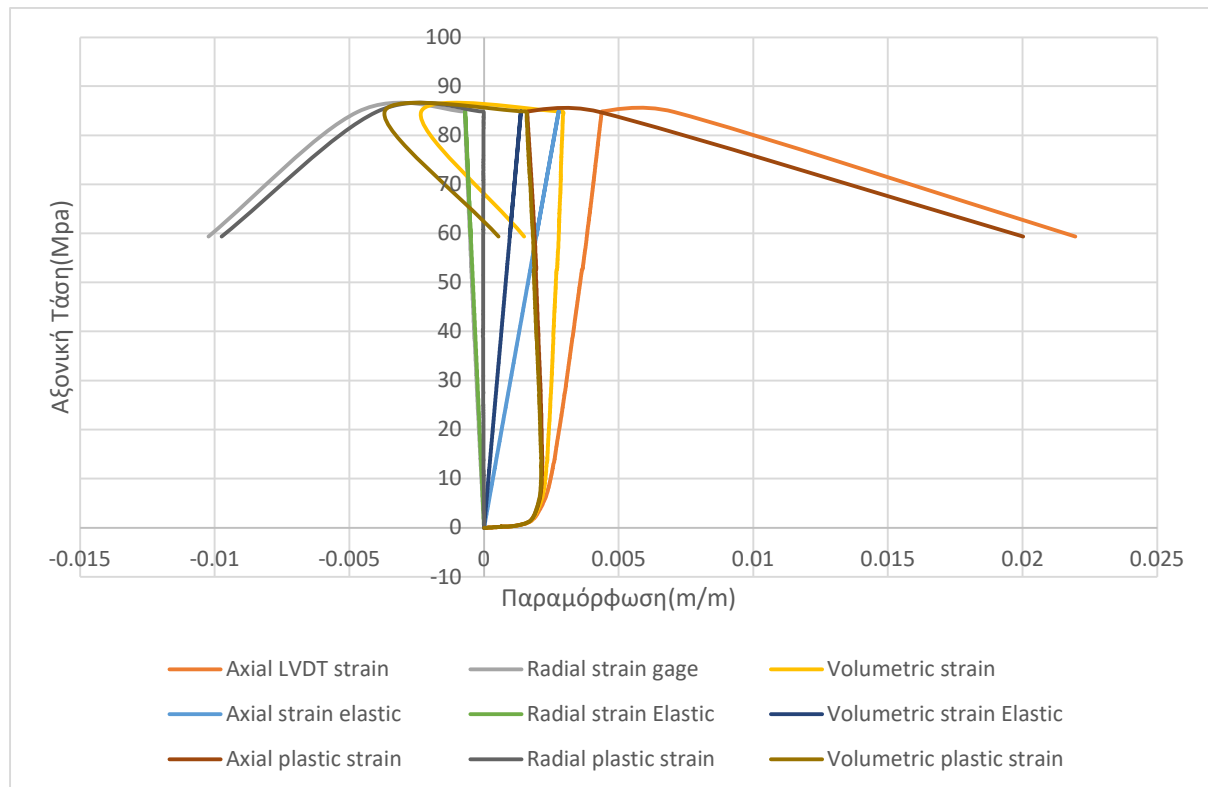
- Ακτινική πλαστική παραμόρφωση (Radial Plastic Strain)

$$\varepsilon_{r, str.g} = \varepsilon_{r, el} + \varepsilon_{r, pl} \rightarrow \varepsilon_{r, pl} = \varepsilon_{r, str.g} - \varepsilon_{r, el} \text{ (m/m)} \quad (4.9)$$

- Ογκομετρική πλαστική παραμόρφωση (Volumetric Plastic Strain)

$$\varepsilon_{vol, pl} = \varepsilon_{a, pl} + 2\varepsilon_{r, pl} \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} \quad (4.10)$$

Στο Σχήμα 4.5, παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα βήματα συναρτήσει της αξονικής τάσης. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, η ελαστική παραμόρφωση προβλέπει μόνο μείωση του όγκου, λόγω όμως της ύπαρξη πλαστικής παραμόρφωσης και μικρο-ρωγμών συνυπάρχει και διαστολή όγκου. Αυτό παρατηρείται και από το διάγραμμα που ξεκινάει από τον θετικό άξονα  $x$  αλλά καταλήγει στον αρνητικό.



Σχήμα 4.5: Συνολικός πίνακας παραμορφώσεων

Ως τελευταίο βήμα της επεξεργασίας αυτής, κρίθηκε απαραίτητη μια τυπική ανάλυση της ρωγμής του κάθε δοκιμίου. Πιο αναλυτικά, μετρήθηκε με μοιρογνωμόνιο η γωνία κλίσης που δημιουργήθηκε με το κάθετο επίπεδο, Σχήμα 4.6, υπολογίστηκε η εσωτερική γωνία τριβής  $\phi$  που θα πρέπει να έχει μικρή απόκλιση από την υπολογιζόμενη πειραματική, και η συνοχή  $c$  που χαρακτηρίζει τη συνεκτικότητα των κόκκων του υλικού. Οι παρακάτω εξισώσεις ισχύουν αν θεωρηθεί ότι το δοκίμιο αστοχεί σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb.

$$\beta = \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4} \rightarrow \phi = 2 * (\beta - \frac{\pi}{4}) (^{\circ}) \quad (4.11)$$

$$UCS = \frac{2*c*cos\phi}{1-sin\phi} \rightarrow c = \frac{UCS*(1-sin\phi)}{2*cos\phi} \text{ (Mpa)} \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.6: Γωνία κλίσης δοκιμίου 2



Σχήμα 4.7: Βασική ρωγμή δοκιμίου 2

## 4.2 Οριζόντιο μηκυνσιόμετρο

Το οριζόντιο strain gauge που εφαρμόστηκε σε κάποια από τα δοκίμια έχει την δυνατότητα υπολογισμού της παραμόρφωσης μόνο κατά τον άξονα που εφαρμόζεται, δηλαδή στον  $\chi$ . Οι παρακάτω μετρήσεις παράχθηκαν από το δοκίμιο 5, Παραρτήματα Α, όπου η επεξεργασία τους ήταν παρόμοια με αυτή του υπο-κεφάλαιου 4.1. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά σε συγκεκριμένα στάδια της επεξεργασίας που διαφοροποιούνται από την παραπάνω διαδικασία. Στον Πίνακα 4.4, αναγράφονται οι τιμές που δίνονται από το μηχάνημα αλλά και η επεξεργασία τους όπου το  $\epsilon_{\chi}$  αντιστοιχεί στην ακτινική παραμόρφωση (Radial strain gauge) σε μονάδες SI (m/m), το  $\epsilon_{\mu}$  το εμβαδό Α, η αξονική τάση και παραμόρφωση υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξ. (4.1)/(4.3). Στο Σχήμα 4.9, παρατηρούμε του κύκλους των μετρήσεων τόσο από το LVDT αξονικά, όσο και ακτινικά. από το μηκυνσιόμετρο.

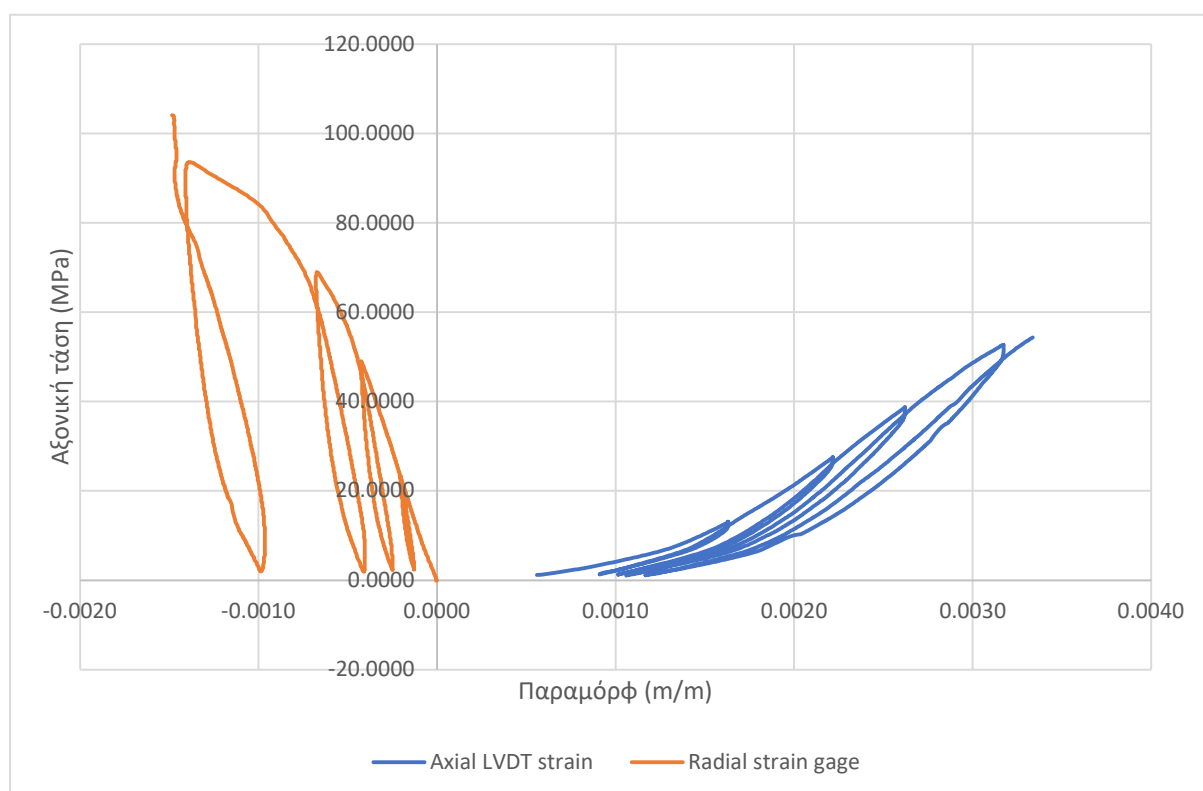


Σχήμα 4.8: Δοκίμιο 5 με οριζόντιο μηκυνσιόμετρο

Πίνακας 4.4: Επεξεργασία δεδομένων δοκίμιου 5

Χαρακτηριστικά								
Διάμετρος	4.756	cm						
Ύψος	8.92	cm						
Εμβαδό	0.0017765	m <sup>2</sup>		$\epsilon_{\chi}$				
CH Name	Displacement MTS	Load Cell MTS	LVDT 25	Strain Chanel 1				
CH No.	CH01	CH03	CH04	CH09				
Range	10	10	10	10000				
Calibration Coefficient	5	50	2.5	1				
Offset	0.033	-0.02	0.003	0	Load Cell(offset)	Axial stress	Axial LVDT strain	Radial strain gage
Unit	mm	kN	mm	$\mu\text{m/m}$	kN	Mpa	m/m	m/m
0	-1.253	0.420	8.006	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0E+00

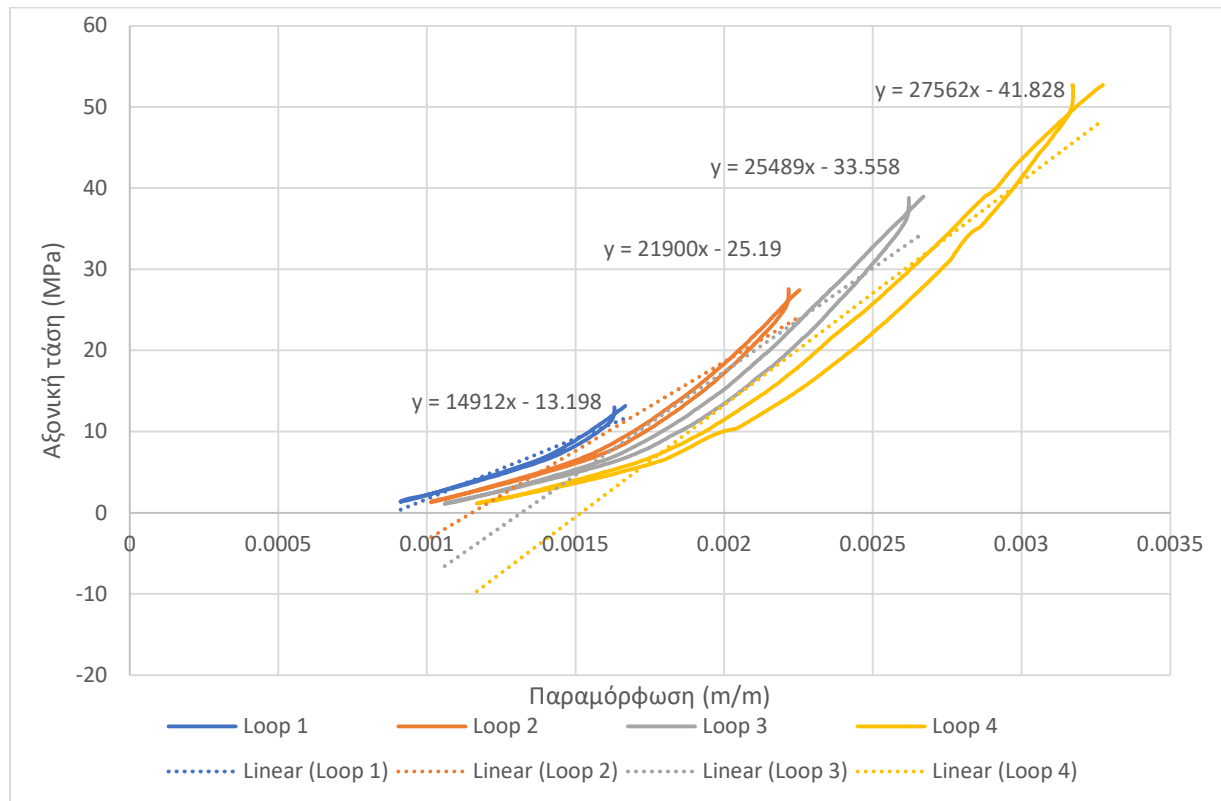
1	-1.253	0.371	8.006	5	-0.049	-0.0275	0.0000	-5.0E-06
2	-1.252	0.382	8.006	5	-0.038	-0.0211	0.0000	-5.0E-06
3	-1.250	0.433	8.007	5	0.013	0.0076	0.0000	-5.0E-06
4	-1.244	0.470	8.009	5	0.050	0.0284	0.0000	-5.0E-06
5	-1.235	0.534	8.013	5	0.114	0.0644	0.0001	-5.0E-06
6	-1.223	0.615	8.018	5	0.195	0.1098	0.0001	-5.0E-06
7	-1.209	0.726	8.024	5	0.306	0.1724	0.0002	-5.0E-06
8	-1.195	0.935	8.031	5	0.515	0.2901	0.0003	-5.0E-06
9	-1.181	1.172	8.037	10	0.752	0.4233	0.0004	-1.0E-05
10	-1.166	1.417	8.043	10	0.997	0.5613	0.0004	-1.0E-05
11	-1.152	1.749	8.048	15	1.329	0.7481	0.0005	-1.5E-05
12	-1.139	2.102	8.052	20	1.682	0.9468	0.0005	-2.0E-05
13	-1.127	2.508	8.056	20	2.088	1.1751	0.0006	-2.0E-05
14	-1.115	2.857	8.060	25	2.437	1.3716	0.0006	-2.5E-05



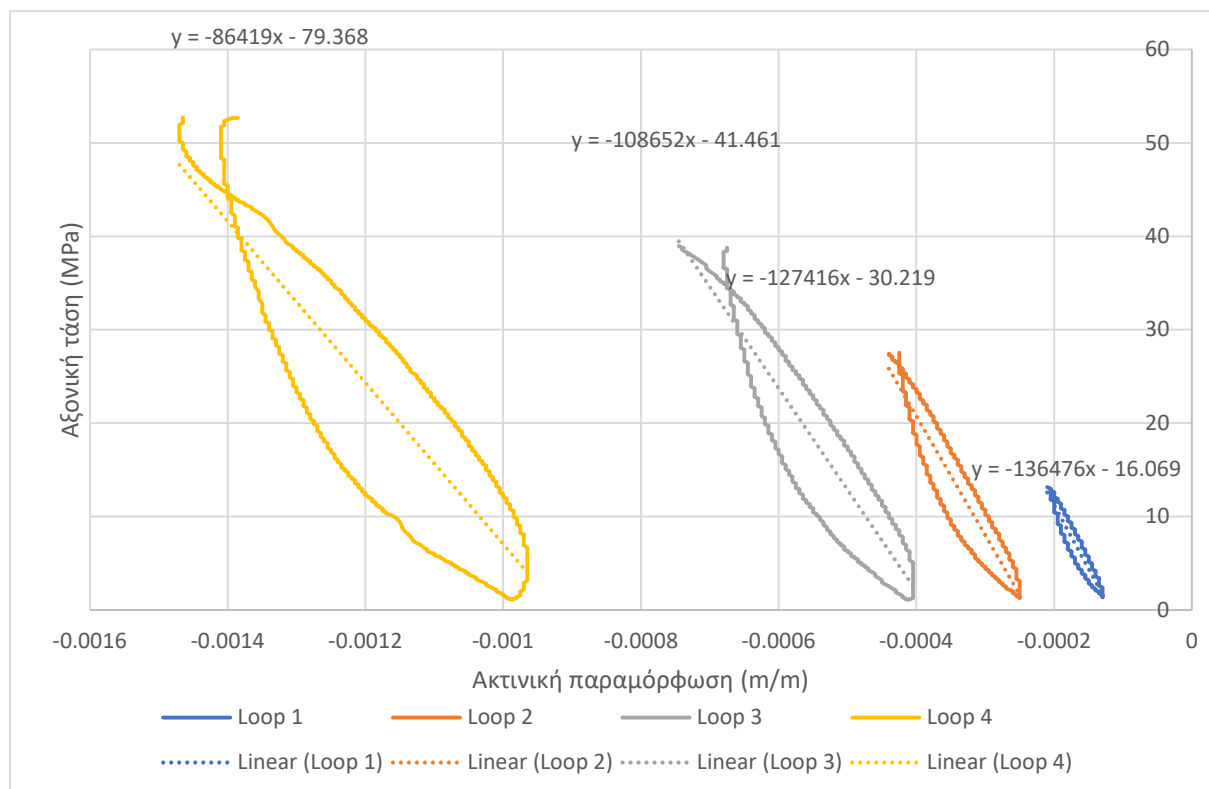
Σχήμα 4.9:Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 5

Μετά το βήμα του διαχωρισμού των τεσσάρων κύκλων δημιουργήθηκαν δύο νέα διαγράμματα, που απεικονίζουν αξονικά και ακτινικά τη φόρτιση, απομονωμένη, κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου με τις αντίστοιχες εξισώσεις τους, Σχήμα 4.10-Σχήμα 4.11 αντίστοιχα. Αξίζει να

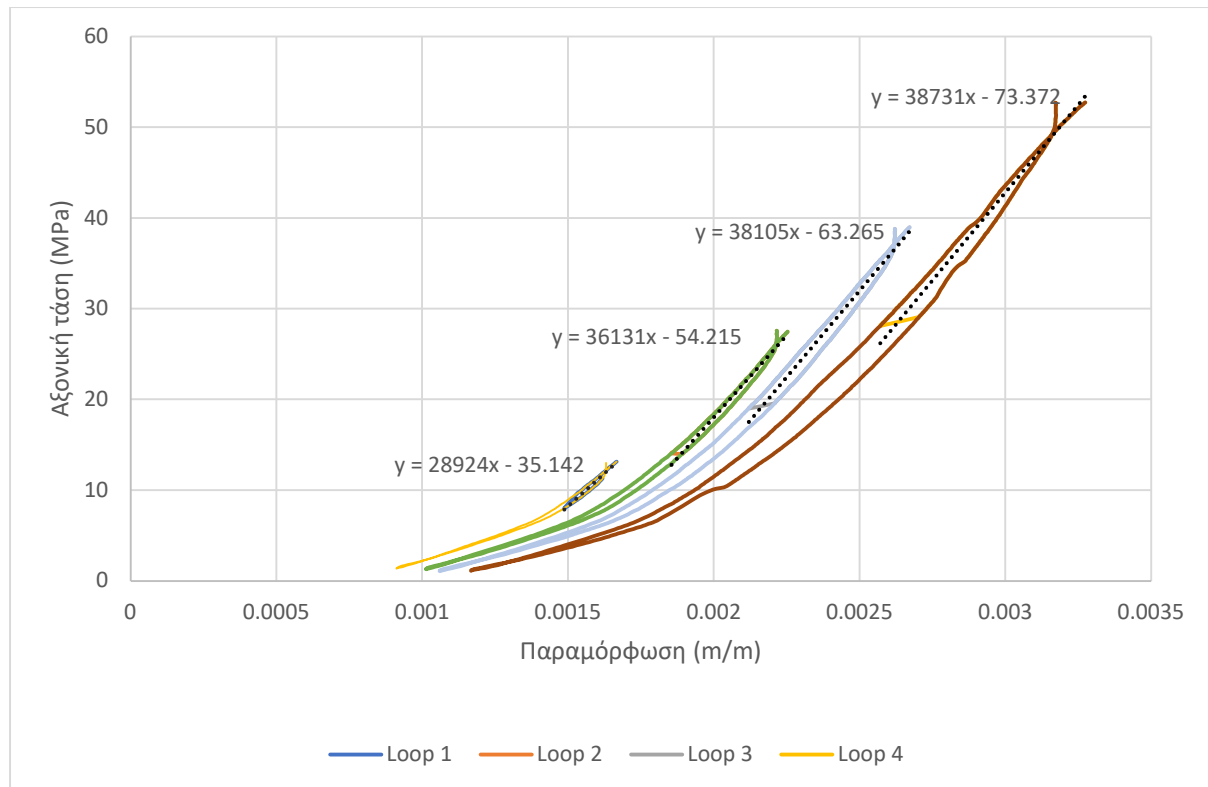
σημειωθεί ότι η εξίσωση ενδιαφέροντος στην αξονική φόρτιση είναι αυτή που βρίσκεται μέσα στον κύκλο φόρτισης, οπότε δημιουργήθηκε ένα νέο διάγραμμα, που έχουν απομονωθεί τα δεδομένα προκειμένου η εξίσωση της ευθείας να είναι η κατάλληλη, *Σχήμα 4.12*.



Σχήμα 4.10: Αξονική φόρτιση κύκλων



Σχήμα 4.11: Ακτινική φόρτιση κύκλων



Σχήμα 4.12: Τελικές εξισώσεις ευθείας αξονικής παραμόρφωσης

### 4.3 Στρογγυλό μηκυνσιόμετρο

Στην παρακάτω ανάλυση θα γίνει αναφορά στο δοκίμιο 17, *Παραρτήματα Α*, και συγκεκριμένα μόνο στις διαφοροποιήσεις της επεξεργασίας από τα προηγούμενα δοκίμια. Αρχικά, απαιτείται η κατάλληλη μετατροπή των αρχικών δεδομένων, Πίνακας 4.5, με τη βοήθεια της αντίστοιχης γωνίας, Σχήμα 3.11, δηλαδή οι παραμορφώσεις του άξονα  $\gamma$  θα πολλαπλασιαστούν με το  $\sin 45^\circ$  ενώ στον άξονα  $x$  με  $\cos 45^\circ$ , Πίνακας 4.6. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα συγκεντρωτικό Σχήμα 4.13, με την παραμόρφωση  $\epsilon$  στον άξονα  $x$  που δίνει το μηχάνημα, με τις τελικές παραμορφώσεις ύστερα από την προαναφερόμενη επεξεργασία και αντίστοιχα για την παραμόρφωση στον άξονα  $\gamma$ , Σχήμα 4.14. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε την απόκλιση των πειραματικών μετρήσεων  $\epsilon_x$  με τις υπολογιζόμενες  $\epsilon_x(+135^\circ)$  και  $\epsilon_x(+225^\circ)$  όπου η απόκλιση είναι μικρότερη, όπως και με τις παραμορφώσεις  $\epsilon_\gamma$  αντίστοιχα.

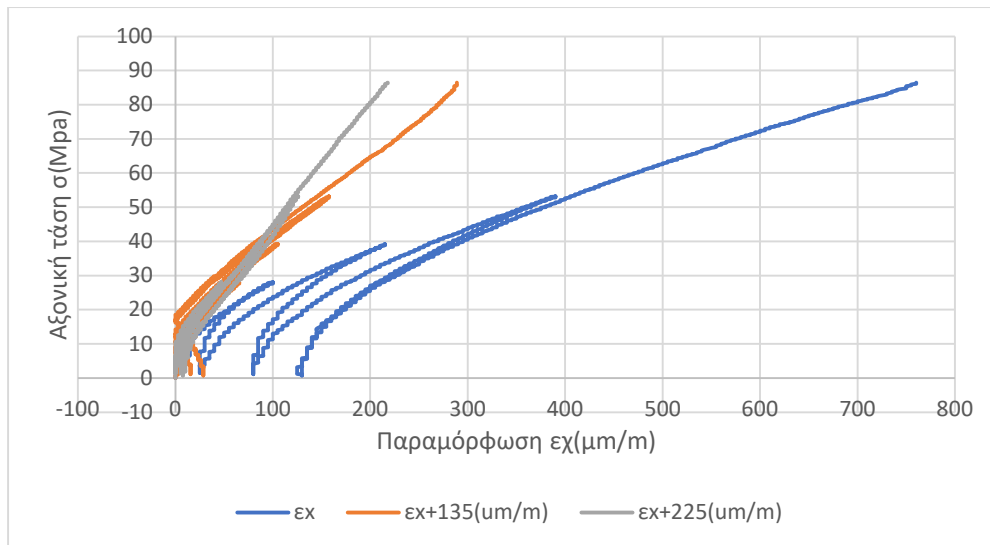
Πίνακας 4.5: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 17

Χαρακτηριστικά							
Διάμετρος	4.74	cm					
Ύψος	10.31	cm					
Εμβαδό	0.001764601	m <sup>2</sup>					
				$\epsilon_x$	$\epsilon_\gamma$	$\epsilon_x+135$	$\epsilon_x+225$
CH Name	Displacement MTS	Load Cell MTS	LVDT 25	Strain Chanel 1	Strain Chanel 2	Strain Chanel 3	Strain Chanel 4
CH No.	CH01	CH03	CH04	CH09	CH10	CH11	CH12
Range	10	10	10	10000	10000	10000	10000

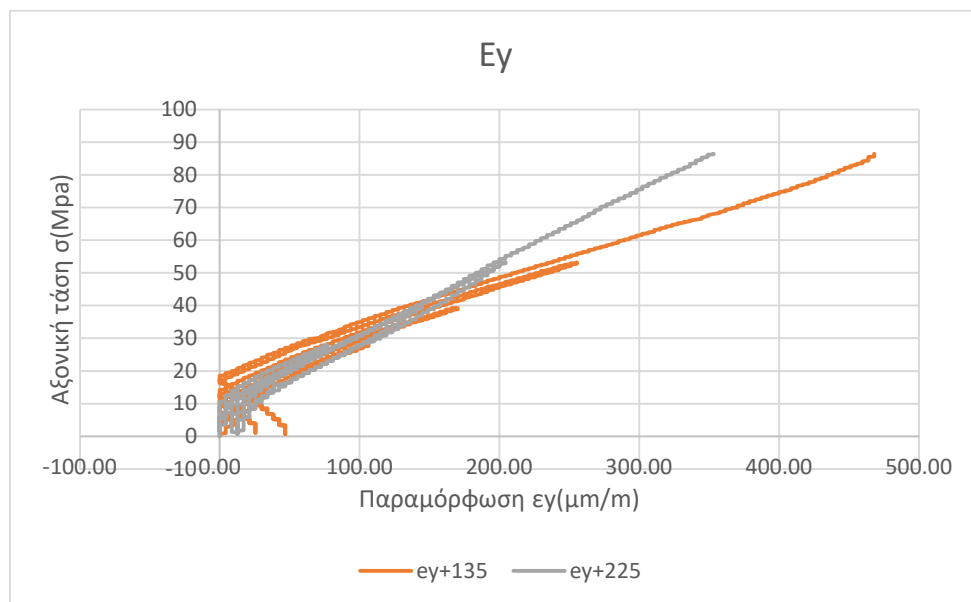
Calibration Coefficient	5	50	2.5	1	1	1	1
Offset	0.033	-0.02	0.003	0	0	0	0
Unit	mm	kN	mm	μm/m	μm/m	μm/m	μm/m
0	-13.925	1.045	3.241	0	-15	0	0
1	-13.924	1.047	3.241	0	-15	0	0
2	-13.924	1.046	3.241	0	-15	0	0
3	-13.923	1.046	3.241	0	-15	0	0
4	-13.921	1.050	3.242	0	-15	0	0
5	-13.917	1.128	3.243	0	-15	0	0
6	-13.910	1.234	3.245	0	-15	0	0
7	-13.902	1.426	3.248	0	-15	0	0
8	-13.894	1.651	3.250	0	-15	0	0
9	-13.886	1.934	3.253	0	-15	0	0
10	-13.877	2.185	3.255	5	-15	0	0
11	-13.868	2.515	3.257	5	-15	0	0
12	-13.860	2.842	3.260	5	-15	-5	0
13	-13.852	3.187	3.262	5	-15	-5	0
14	-13.843	3.543	3.264	10	-15	-5	0

Πίνακας 4.6: Τελικά δεδομένα δοκιμίου 17

		Axial	Radial	Στρογγυλό				
Load Cell(offset )	Axial stress	LVDT strain	strain gage	εx	εx+135(μm/m)		εx+225(μm/m)	
kN	Mpa	m/m	m/m	μm/m	ey	ex	ey	ex
0.000	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.002	1.00E-03	5.77E-06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.001	8.29E-04	6.09E-06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.001	5.87E-04	6.80E-06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.005	2.59E-03	1.26E-05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.083	4.71E-02	2.72E-05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.189	1.07E-01	4.75E-05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.381	2.16E-01	6.98E-05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.606	3.43E-01	9.34E-05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.889	5.04E-01	1.17E-04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.14	6.46E-01	1.42E-04	-5.00E-06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.47	8.33E-01	1.64E-04	-5.00E-06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.797	1.02E+00	1.85E-04	-5.00E-06	0.00	4.25	2.63	0.00	0.00
2.142	1.21E+00	2.05E-04	-5.00E-06	0.00	4.25	2.63	0.00	0.00
2.498	1.42E+00	2.23E-04	-1.00E-05	0.00	4.25	2.63	0.00	0.00



Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμόρφωσης εχ-τάσης



Σχήμα 4.14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμόρφωσης εγ-τάσης

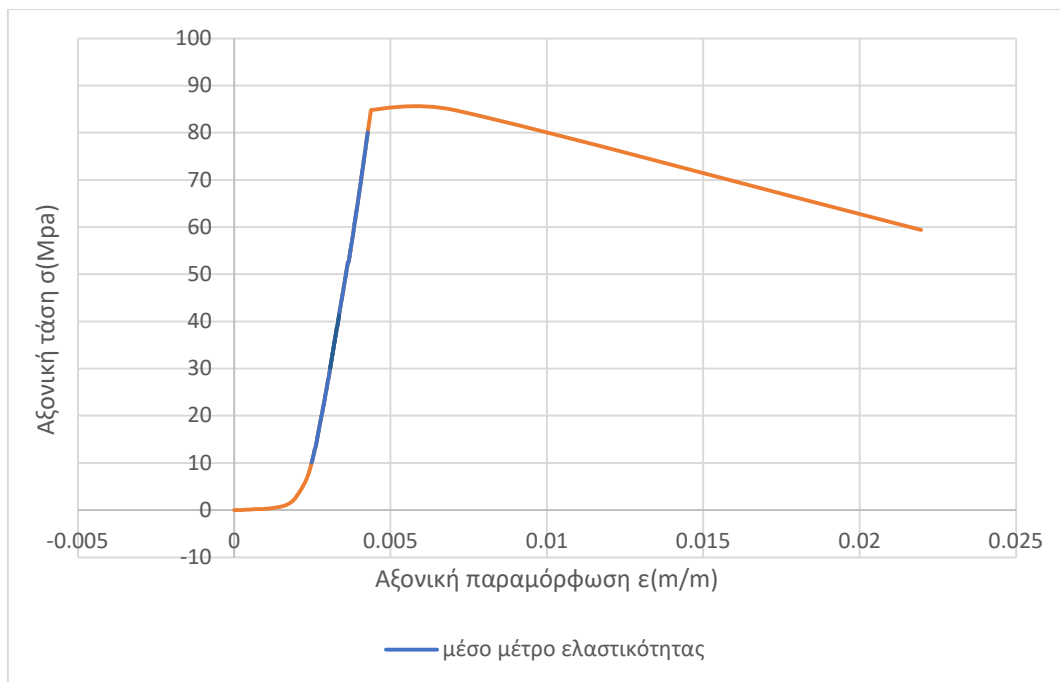
Τέλος, το δοκίμιο αυτό έσπασε με γωνία που μετρήθηκε πειραματικά ίση με  $105^\circ$ , ισχύει ότι  $180^\circ - 105^\circ = 75^\circ$ , Σχήμα 4.15. Σύμφωνα με τις εξ. (4.11)/(4.12) η γωνία τριβής υπολογίστηκε ίση με  $40^\circ$ , και η συνοχή ίση με 11.58 MPa.



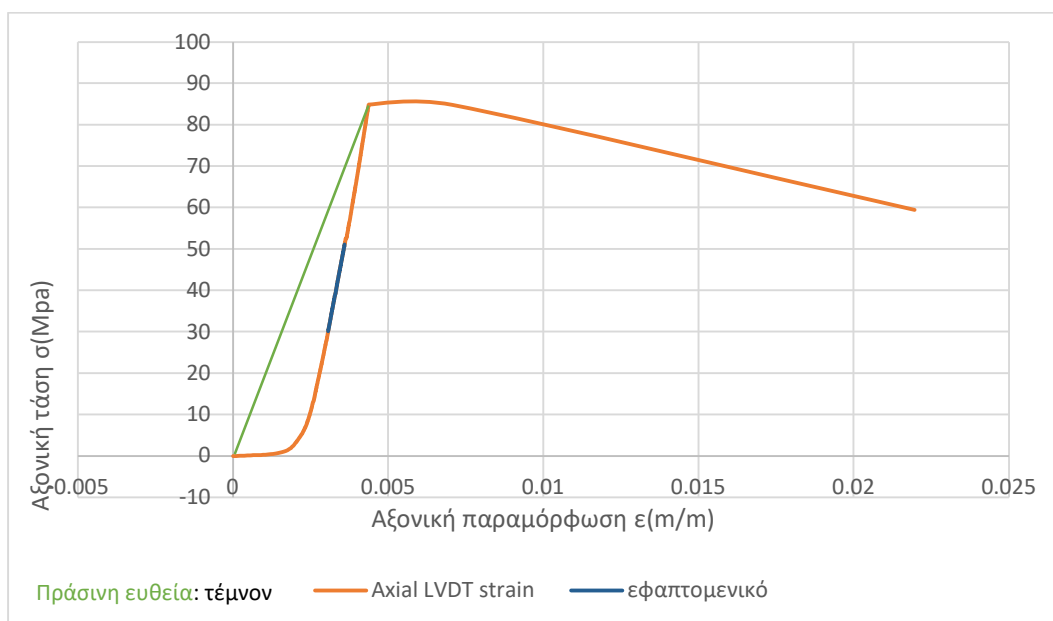
Σχήμα 4.15: Βασική ρωγμή δοκιμίου 17

#### 4.4 Μέτρα ελαστικότητας

Στη συνέχεια της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός των τριών μέτρων ελαστικότητας όπως αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.3 και με τη βοήθεια του τύπου  $E = \sigma / \epsilon$ . Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα κύριας φόρτισης, δηλαδή χωρίς τους κύκλους, Σχήμα 4.16, Αξονικής τάσης-Παραμόρφωσης και υπολογίστηκαν γραφικά τα μέτρα ελαστικότητας με την κάθε ευθεία να αντιστοιχεί σε κάποιο μέτρο ελαστικότητας. Αναλυτικότερα, το μέσο μέτρο θα είναι η ευθεία που περνάει από τις τιμές μεταξύ 10 και 80MPa, το εφαπτομενικό μέτρο στο 50% θα είναι η εφαπτομένη κοντά στα 45 MPa και το τέμνον είναι η ευθεία από την αρχή των αξόνων μέχρι το σημείο αστοχίας στα 84.8MPa, Σχήμα 4.17. Άρα, το μέσο μέτρο ελαστικότητας για το δοκίμιο 6, Παραρτήματα Α,  $E_1 = 39\text{GPa}$ , το εφαπτομενικό,  $E_2 = 39.6\text{GPa}$  και το τέμνον  $E_3 = 19.4\text{GPa}$



Σχήμα 4.16: Μέσο μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου 6



Σχήμα 4.17: Εφαπτομενικό και τέμνον μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου 6

#### 4.5 Συγκεντρωτικοί πίνακες

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι όλων των δοκιμών, που υπολογίστηκαν όπως αναλύθηκε για την κάθε μια ξεχωριστά σε προηγούμενα κεφάλαια.

Πίνακας 4.7: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων μονοαξονικής θλίψης

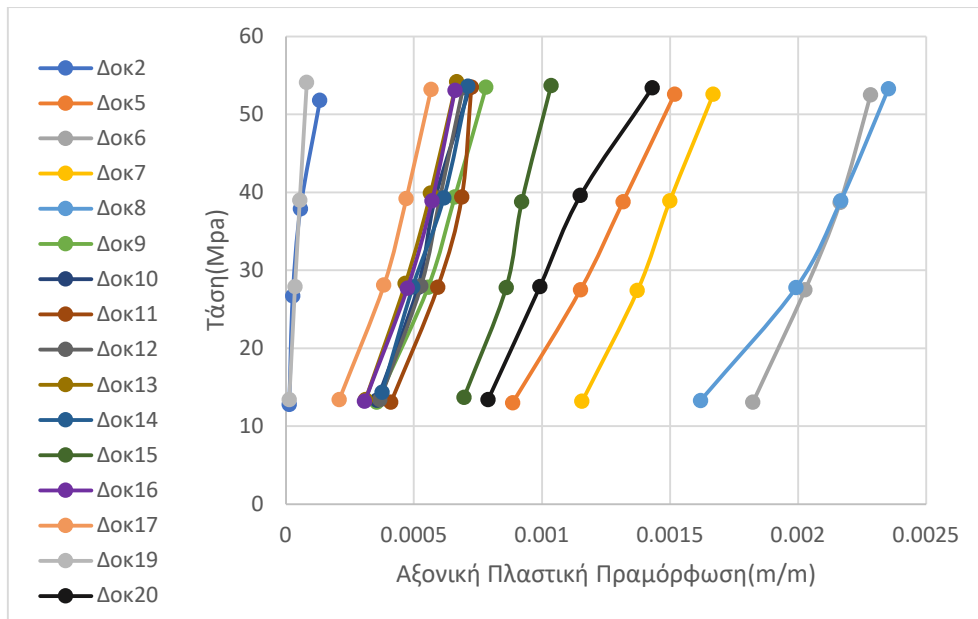
Αρ.δοκ	Τάση $\sigma$ (MPa)	Young's modulus E(GPa)	Λόγος Poisson $\nu$	Ακτινική πλαστική παραμόρφωση $\epsilon$ (m/m)	Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi$ (°)	Συνοχή $c$ (MPa)
2	61.0	68.8	0.32	0.67	50	11.1
5	58.6	35.5	0.32	4.14E-04	50	10.7
6	84.9	30.7	0.25	4.31E-05	40	19.8
7	68.3	26.0	0.13	1.85E-05	30	19.7
8	112.1	25.5	0.07	Ξεκόλλησε το strain gage	50	20.4
9	99.7	26.3	0.05	1.24E-05	70	8.8
10	54.7	29.6	0.09	5.50E-06	60	7.3
11	103.1	33.1	Δεν είχαν strain gage		60	13.8
12	72.1	31.7			20	25.2
13	73.4	27.8			10	30.8
14	94.7	26.0			60	12.7
15	82.1	24.1			80	3.6
16	116.8	31.3			70	10.3
17	86.5	25.4	0.20	4.82E-05	60	11.6
19	109.1	84.0	0.27	2.96E-05	Δεν ήταν ευδιάκριτο το επίπεδο	
20	57.9	51.0	Δεν είχε strain gage		70	5.1

Στη συνέχεια, παρατίθεται η αξονική πλαστική παραμόρφωση, Πίνακας 4.8, όπου παρατηρείται ότι σε όλα τα δοκίμια όσο αυξάνεται η τάση τόσο αυξάνεται η αξονική πλαστική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, οι τάσεις που λήφθηκαν υπόψη στο διάγραμμα είναι οι πρώτες τιμές από τους 4 κύκλους φόρτισης, όπως φαίνεται και στον Πίνακας 4.8, οι οποίες είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους για όλα τα δοκίμια, Σχήμα 4.18. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι υπάρχει μια διασπορά στην πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή για την ίδια τιμή τάσης οι παραμορφώσεις ποικίλλουν που πιθανόν οφείλεται στην ανομοιογένεια του υλικού.

Πίνακας 4.8: Συγκεντρωτικό πίνακας τάσης-πλαστικής παραμόρφωσης των κύκλων των δοκιμών με μηχανοσίμετρα.

Κύκλοι	Αρ.δοκ/Τάση $\sigma$ (MPa)	Αξονική πλαστική παραμόρφωση $\epsilon$ (m/m)	Αρ.δοκ/Τάση $\sigma$ (MPa)	Αξονική πλαστική παραμόρφωση $\epsilon$ (m/m)
	1		12	
1	12.8	1.28E-05	13.4	3.67E-04
2	26.7	2.65E-05	28	5.27E-04
3	37.9	5.68E-05	39.3	6.02E-04
4	51.8	1.33E-04	53.4	6.91E-04
	5		13	
1	13	8.85E-04	13.4	3.11E-04
2	27.5	1.15E-03	28.3	4.66E-04
3	38.8	1.32E-03	39.9	5.65E-04

4	52.6	1.52E-03	54.2	6.67E-04
	6		14	
1	13.1	1.82E-03	14.36	3.75E-04
2	27.5	2.03E-03	27.87	4.95E-04
3	38.7	2.16E-03	39.3	6.17E-04
4	52.5	2.28E-03	53.6	7.11E-04
	7		15	
1	13.2	1.16E-03	13.7	6.95E-04
2	27.4	1.37E-03	27.8	8.60E-04
3	38.9	1.50E-03	38.8	9.21E-04
4	52.6	1.67E-03	53.7	1.04E-03
	8		16	
1	13.3	1.62E-03	13.2	3.07E-04
2	27.8	1.99E-03	27.7	4.74E-04
3	38.9	2.17E-03	38.9	5.70E-04
4	53.3	2.35E-03	53.1	6.60E-04
	9		17	
1	13.1	3.55E-04	13.4	2.08E-04
2	27.84	5.55E-04	28.1	3.83E-04
3	39.4	6.59E-04	39.2	4.70E-04
4	53.5	7.81E-04	53.2	5.67E-04
	10		19	
1	13.32	3.55E-04	13.4	1.32E-05
2	27.8	5.15E-04	27.9	3.57E-05
3	39.4	5.83E-04	39	5.43E-05
4	53.47	7.19E-04	54.1	8.12E-05
	11		20	
1	13.1	4.10E-04	13.4	7.89E-04
2	27.84	5.93E-04	27.9	9.91E-04
3	39.4	6.87E-04	39.6	1.15E-03
4	53.5	7.24E-04	53.4	1.43E-03



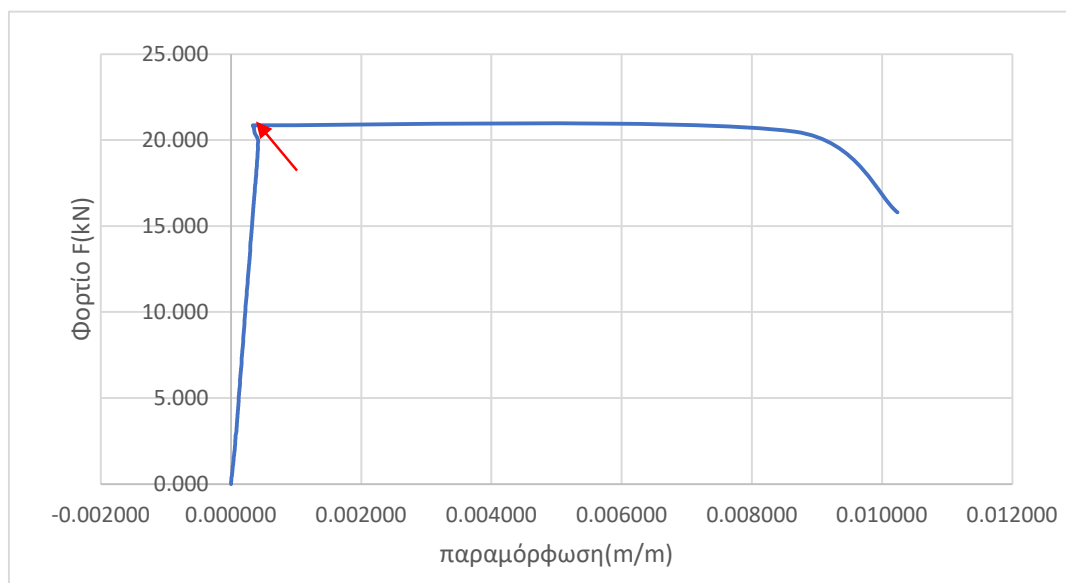
Σχήμα 4.18: Αξονική Πλαστική Παραμόρφωση-Τάση όλων των δοκιμίων

## Κεφάλαιο 5: Πειραματικά αποτελέσματα αντιδιαμετρικής θλίψης

### 5.1 Επεξεργασία δεδομένων

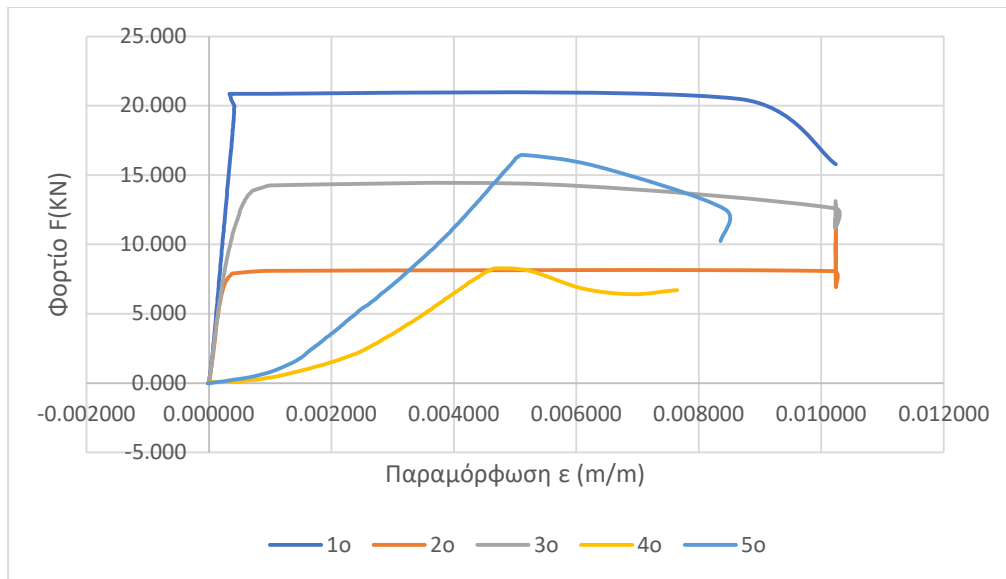
Το πείραμα αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazil) παράγει την ακτινική παραμόρφωση  $\epsilon_x$  από το μυκηνοσκόπιο και από το LVDT. Ο τρόπος που θα σπάσει το δοκίμιο με τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης είναι αναμενόμενος και για τον λόγο αυτό δεν αναλύεται όπως στη μονοαξονική θλίψη. Πιο συγκεκριμένα, η ρωγμή θα είναι παράλληλη με τον άξονα φόρτισης και πάνω στη διάμετρο επιβολής του φορτίου λόγω του ότι η αστοχία εμφανίζεται στο σημείο της μέγιστης εφελκυστικής τάσης, δηλαδή στο κέντρο του δοκιμίου. Μετά την αντίστοιχη επεξεργασία που ακολουθήθηκε και στο πείραμα μονοαξονικής θλίψης δημιουργήθηκε το παρακάτω Σχήμα 5.1, που απεικονίζει το φορτίο με την παραμόρφωση με το βελάκι να αντιστοιχεί στην αστοχία του δοκιμίου. Με τη βοήθεια του σημείου αυτού,  $F_{max}$ , υπολογίζεται η αντοχή σε εφελκυσμό, εξ.(5.1), όπου το  $D$  είναι η διάμετρος και  $t$  το πλάτος του δοκιμίου. Στο δοκίμιο 1, Παραρτήματα Α, η αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίστηκε  $\sigma_t = 9.35 \text{ MPa}$ .

$$\sigma_t = \frac{2 * F_{max}}{\pi * D * t} \text{ (MPa)} \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 1

Στο παρακάτω Σχήμα 5.2, παρουσιάζονται τα πέντε δοκίμια και παρατηρούμε το μέγιστο σημείο της κάθε καμπύλης όπου ισοδυναμεί με το σημείο αστοχίας. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο ότι στα δοκίμια 1, 2 και 3 η αστοχία στις διαφορετικές τιμές του φορτίου  $F$  παρατηρήθηκε σε παρόμοιες τιμές παραμόρφωσης  $\epsilon$ , αντίστοιχα και στα δοκίμια 4 και 5.



Σχήμα 5.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμόρφωσης-φορτίου δοκιμίων

## 5.2 Μέτρα ελαστικότητας

Στη μέθοδο αντιδιαμετρικής θλίψης, για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας γίνεται χρήση των παρακάτω εξ., (5.2), (5.3) και (5.4) που ισχύουν για την άσκηση φορτίου στο κέντρο του δοκιμίου. Στην προκειμένη περίπτωση, τα μέτρα ελαστικότητας μπορούν να υπολογιστούν μόνο για τρία εκ των πέντε δοκιμίων εφόσον σε αυτά τοποθετήθηκαν μηχανοσκόπια. Άρα, σύμφωνα με τα παραπάνω και γνωρίζοντας ότι  $\sigma_{zz}=0$  προκύπτουν οι εξ.(5.5), (5.6). Τέλος, λύνοντας τις δύο προαναφερόμενες εξισώσεις, αναφορικά με το δοκίμιο 1, προκύπτει ότι ο λόγος Poisson  $\nu=0.43$  και το μέτρο ελαστικότητας  $E=4.88$  GPa.

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} * [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] \text{ (m/m)} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} * [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \text{ (m/m)} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{yy} = -3\sigma_{xx} \text{ (MPa)} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{(1 + 3\nu)}{E} \sigma_{xx} \text{ (m/m)} \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{yy} = -\frac{(3 + \nu)}{E} \sigma_{xx} \text{ (m/m)} \quad (5.6)$$

## 5.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων που υπολογίστηκαν από τα πειράματα αντιδιαμετρικής θλίψης.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας

Αρ.δοκιμίου	Φορτίο F(Kn)	Τάση $\sigma$ (MPa)	Young's modulus E(GPa)	Λόγος Poisson $\nu$
1	20.4	9.4	4.88	0.43
2	8.1	4.4	0.54	0.4
3	12.2	5.5	4.48	0.7
4	8.1	4.0	Δεν είχαν strain gage	
5	16.5	4.7		

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

Ανακεφαλαιώνοντας, αρχικά έγινε μια μελέτη των καρότων της γεώτρησης με σκοπό την ταξινόμησή τους με τον δείκτη RQD και RMR όπου προέκυψε και από τους δύο δείκτες ότι έχουμε καλή κατάσταση πετρώματος. Στη συνέχεια, επεξεργάστηκαν 20 δείγματα με τη μέθοδο μονοαξονικής θλίψης, όπου στα 11 επικολλήθηκαν διαφορετικά ήδη μηχανοσυστοιχών και ακόμα 5 δείγματα με τη μέθοδο της αντιδιαμετρικής θλίψης με τα 3 από αυτά να έχουν κολλημένο ένα οριζόντιο μηχανοσυστοιχόμετρο. Σε όλα τα δοκίμια μονοαξονικής θλίψης ακολουθήθηκε η ίδια πειραματική επεξεργασία υπολογίζοντας έτσι διάφορες παραμέτρους όπως τον λόγο Poisson που μπορούσαμε να επαληθεύσουμε την ορθότητα του αποτελέσματος από το εύρος του δείκτη αυτού που είναι για τα περισσότερα πετρώματα μεταξύ του 0.25 και 0.3. Επίσης, κάποιες βασικές παράμετροι που υπολογίστηκαν είναι η πλαστική παραμόρφωση και τα μέτρα ελαστικότητας. Η πλαστική παραμόρφωση υπολογίστηκε αξονικά και ακτινικά με τη βοήθεια των διαγραμμάτων τάσης και αξονικής-ακτινικής παραμόρφωσής, αντίστοιχά, από τους πέντε κύκλους φόρτισης. Ακόμη, κρίθηκε αναγκαία η μέτρηση της γωνίας του επιπέδου που δημιουργήθηκε κατά το σπάσιμο κάθε δοκιμίου, προκειμένου να υπολογιστεί η εσωτερική γωνία τριβής  $\phi$  και η συνοχή  $c$ , όπου επίσης επαληθεύεται από άλλα πειράματα με το εύρος της να είναι  $10\text{MPa} < c < 20\text{MPa}$ . Επιπλέον, στα δοκίμια αντιδιαμετρικής θλίψης υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και ο λόγος Poisson όπου σε ένα δοκίμιο ήταν πάνω από τα συνήθη όρια. Τέλος, υπολογίστηκαν οι τάσεις  $\sigma$  από το διάγραμμα φορτίου  $F$ -παραμόρφωσης στο σημείο που παρατηρείται η αστοχία, δηλαδή εκεί που ξεκινάει η καμπύλη να γίνεται ευθεία.

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής, προτείνεται η χρήση των αποτελεσμάτων για τη βαθμονόμηση καταστατικών μοντέλων. Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν, αφορούν τόσο τη μονοαξονική θλίψη όσο και την αντιδιαμετρική, παίρνοντας έτσι μεγάλη ποικιλία πληροφοριών για τον γνεύσιο που συναντάται στη Χαλκιδική.

## Βιβλιογραφία

### Ξένα Βιβλιογραφία

Basu A., Mishra D. A. & Roychowdhury K.(2013). Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests Bulletin of Engineering Geology and the Environment volume 72, pages 457–475.

Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 15, 335-344.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, New York.

Bisai R.& Chakraborty, S. (2019). Different Failure Modes of Sandstone and Shale under Brazilian Tensile Tests. 2. 8. 10.5281/zenodo.3362989.

Borja, R. I. (2013a). *Plasticity*. Springer Science & Business Media.

Brady B.H.G, Brown E.T. (2004). Rock Mechanics For Underground Mining, Springer.

Brown, E. T. (1981). Rock Characterisation, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods (211 p). Oxford: Pergamon Press.

Deere D.U. (1963). Technical Description of Rock Cores for Engineering Purpose. Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol. 1, No. 1, pp. 16-22.

Ding K. and Ye L. (2006) . Theory of Elasticity Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Pages 47-72, Laser Shock Peening.

Exadaktylos G, Liolios P. & Barakos G. (2007). Some new developments on the representation and standardization of rock mechanics data: From the laboratory to the full scale project. 11th ISRM Congress,Lisbon.

Gercek H (2007). Poisson's ratio values for rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume 44, Issue 1, Pages 1-13. Department of Mining Engineering, Zonguldak Karaelmas University, Zonguldak, Turkey.

Hondros, G. (1959). The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. Australian Journal of Applied Science 10: 243-268.

Isah, Balarabe & Mohamad, Hisham & Ahmad, N & Harahap, Indra & Al-Bared, Mohammed. (2020). Uniaxial compression test of rocks: Review of strain measuring instruments. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 476. 012039. 10.1088/1755-1315/476/1/012039. T.Huaizi Tang, H.Jinyuan , G. Zhiqiang , L. Jianxiong , Wen Hua & Shiming Dong. Tensile strength and elastic modulus determined in the Brazilian test: Theory and experiment Meccanica volume 57, pages 2533–2552.

Li D., Akiyama M. (2014). Features of Unloading and Re-loading Processes of Medium Carbon Steel after Uniaxial Plastic Strain, Procedia Engineering, Volume 81, Pages 1294-1299,ISSN 1877-7058.

Malowski P., Ostrowski L. (2017). The Methodology for the Young Modulus Derivation for Rocks and Its Value Procedia Engineering. Volume 191, Pages 134-141, ELSEVIER.

Palmstrom A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology pages 362-377.

- Pfeifer M. (2009). Degradation and Reliability of Materials. 10.1016/B978-0-7506-8287-9.00006-9.
- Priest S. D., & Hudson J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 13(5), 135–148.
- Roberts A. (1977). “Geotechnology - An introductory text for students and engineers”, Pergamon Press.
- Rusinko A., Rusinko K. (2011). Plasticity and Creep of Metals Authors. Springer.
- Smith K. M., Holroyd P. (1968). CHAPTER 15 - Indicating Instrument. The Commonwealth and International Library: Electrical Engineering Division, Engineering Principles for Electrical Technicians Pergamon. Pages 263-282, ISBN 9780080129853.
- Tavallali A. & Vervoort A. (2013). Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: Layer orientation and shape effects. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 5. 366–377. 10.1016/j.jrmge.2013.01.004.
- Timoshenko S. P., Goodier J. N. (1970). Theory of elasticity. McGraw-Hill College. Third edition.
- Zhao J., Li H. B., Wu M. B., Li T. J. (1999). Dynamic uniaxial compression tests on a granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Volume 36, Issue 2, Pages 273-277, ISSN 1365-1609.

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγιουτάντης Ζ. (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα, ISBN: 960-411-213-9.
- Αγιουτάντης Ζ. (2019). Στοιχεία γεωμηχανικής. Μηχανική πετρωμάτων. Εκδόσεις Ίων.
- Ανδριανόπουλος Ν. σε συνεργασία με Ηλιόπουλος Ν. (2006). Μηχανική των θραύσεων. Εκδόσεις Συμεών.
- Βαρδουλάκης Ι. (2008). Στοιχεία μαθηματικής θεωρίας ιδεατής πλαστικότητας. Έκδοση Συμμετρία.
- Γαλιάτσος Ν., Λιναρδάτος Γ., Λιναρδάτος Δ. (2016). Κεφάλαιο 2: Τυποποιημένες δοκιμές αντοχή υλικών ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ. Β΄ έκδοση.
- Λίολιος Π. (2013). Υπερβολικό μοντέλο αστοχίας με συνοχή και εσωτερική τριβή. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείου Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Νομικός Π. (2015). Μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος. Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
- Τσουτρέλης Χ. (1977). Στοιχεία μηχανικής των πετρωμάτων Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.

### Διαδικτυακοί ιστότοποι

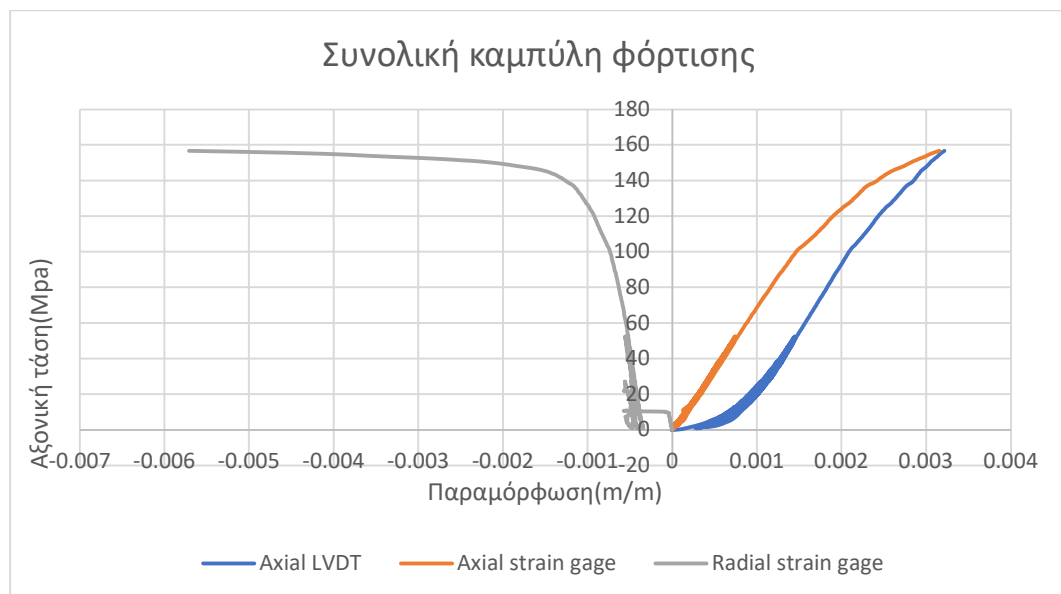
- <https://www.geoengineer.org/education/laboratory-testing/unconfined-compression-test#laboratory-procedure>
- <https://www.kyowa-ei.com/eng/index.html>
- <https://www.eldoradogold.com/assets/operations-and-projects/Overview/default.aspx>

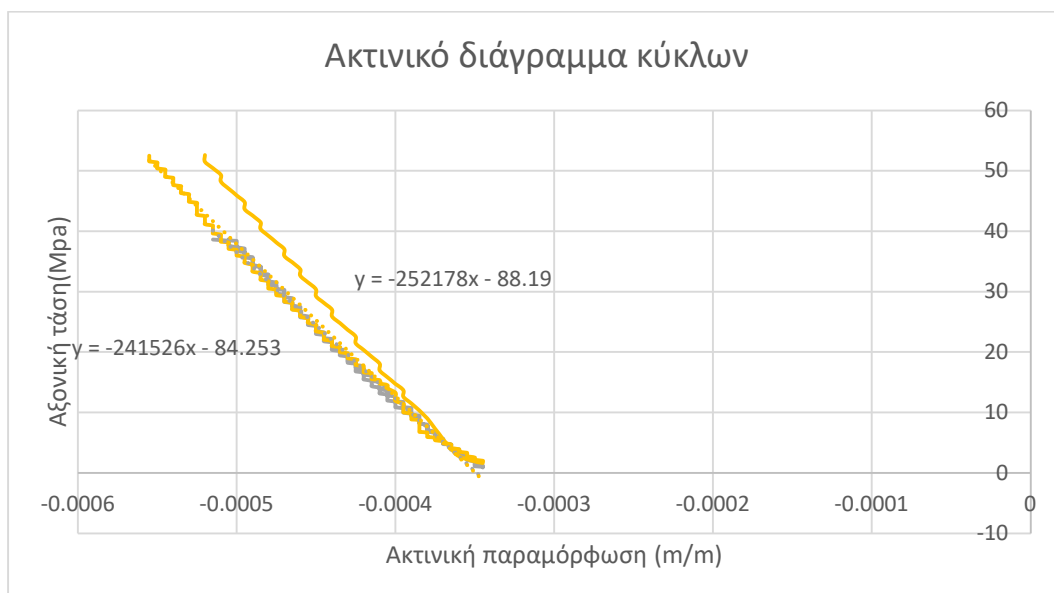
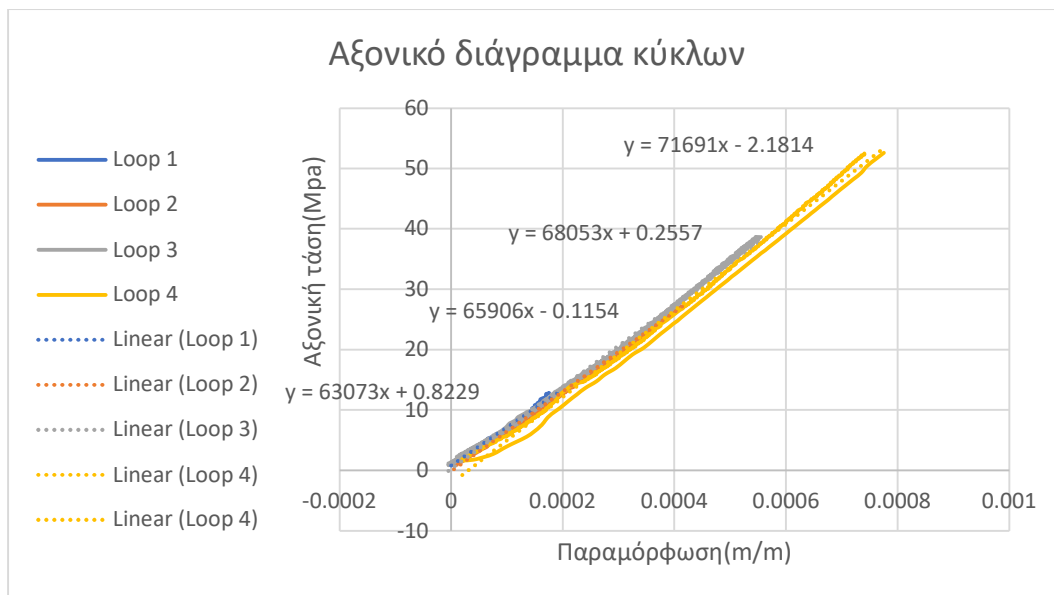
## Παραρτήματα Α

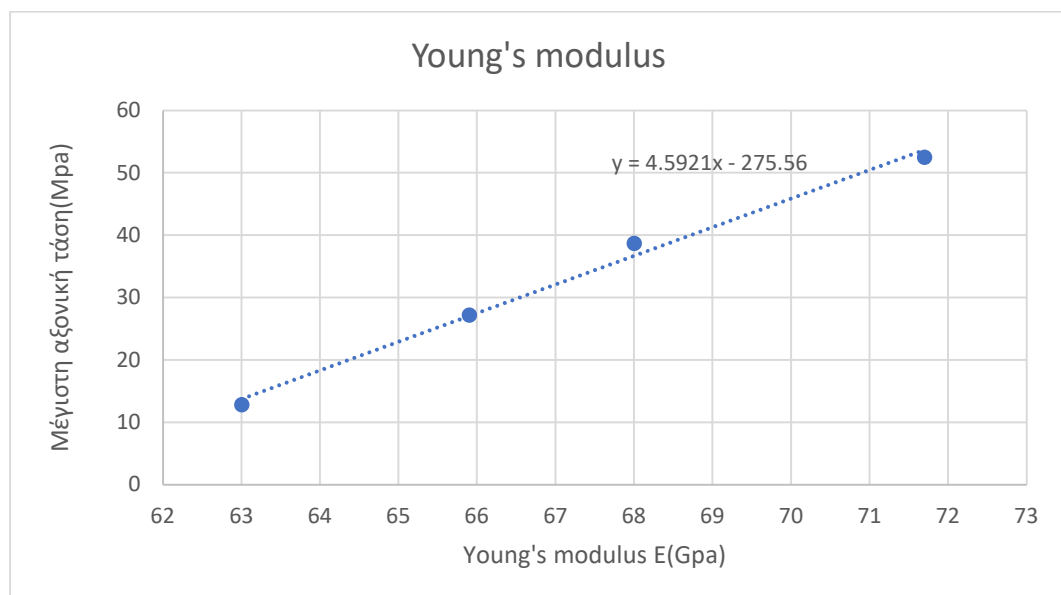
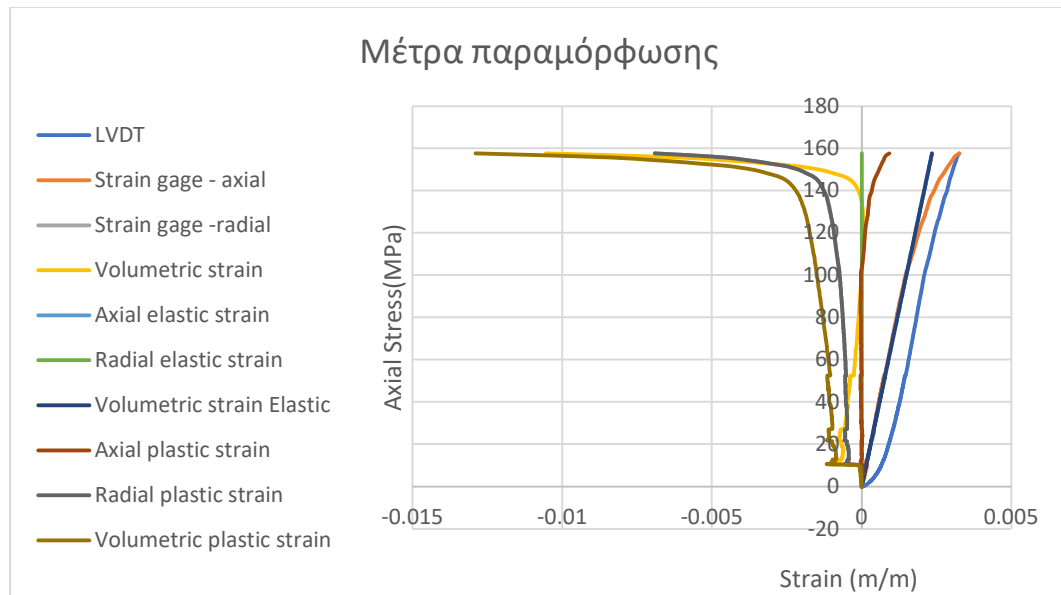
Αριθμός Δοκιμίου	1
Ύψος (cm)	9.29
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	157.70



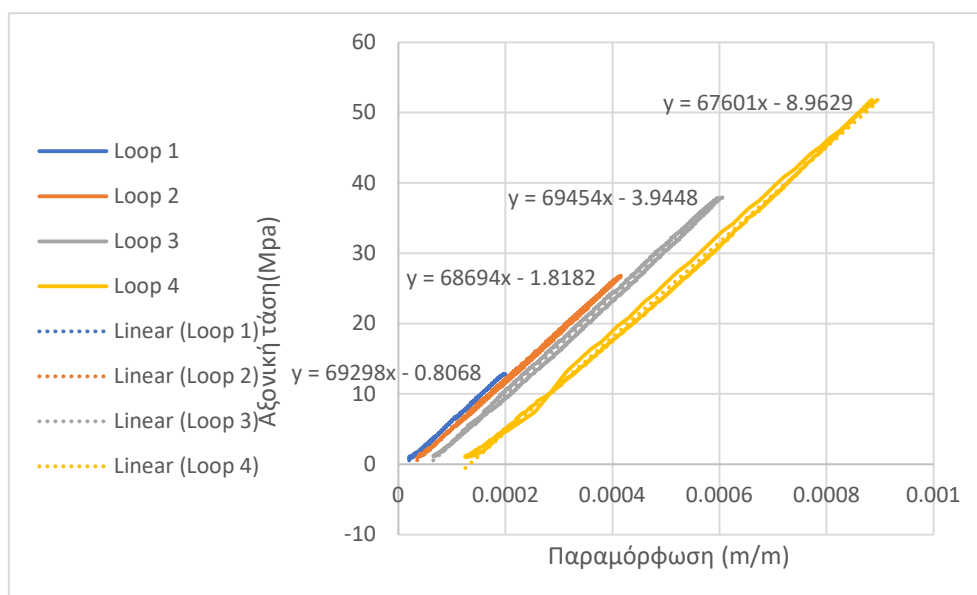
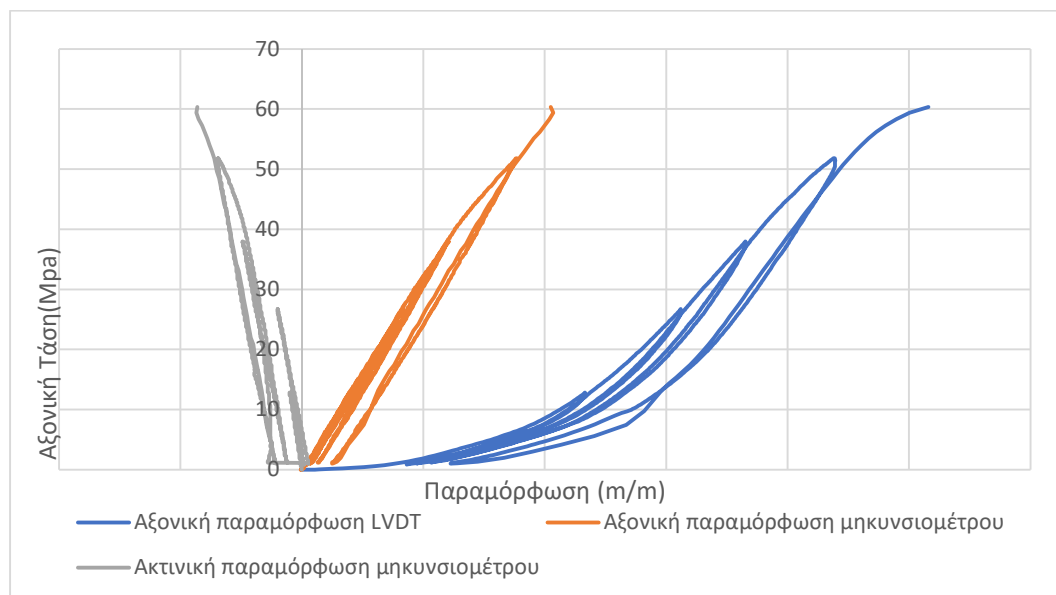
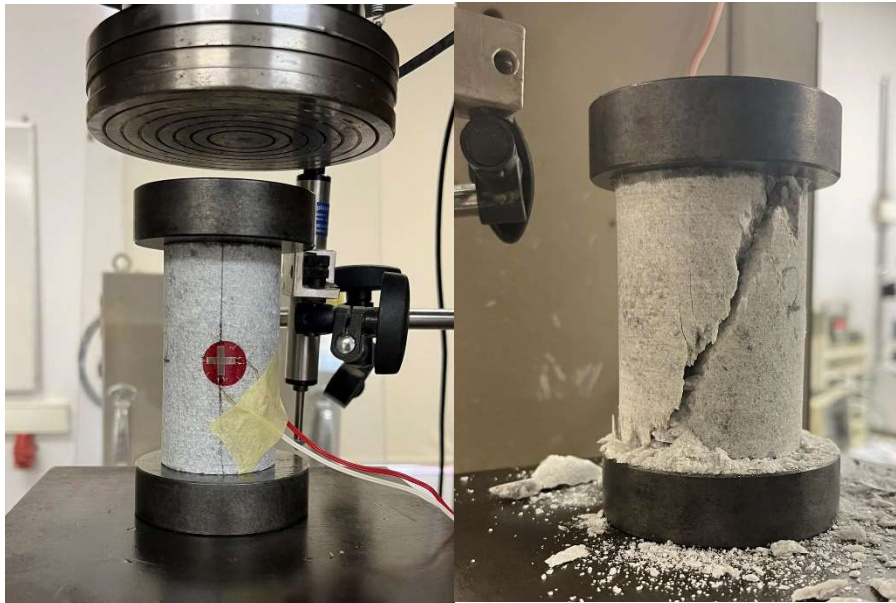
Σχήμα Α.1: Δοκίμιο Νο1 πριν και μετά την εφαρμογή μονοαξονικής θλίψης

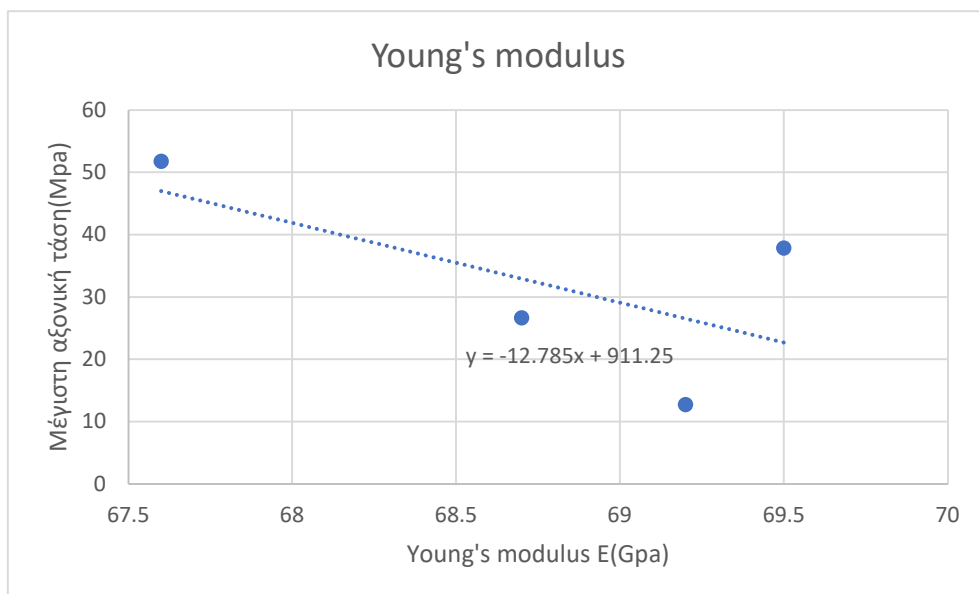
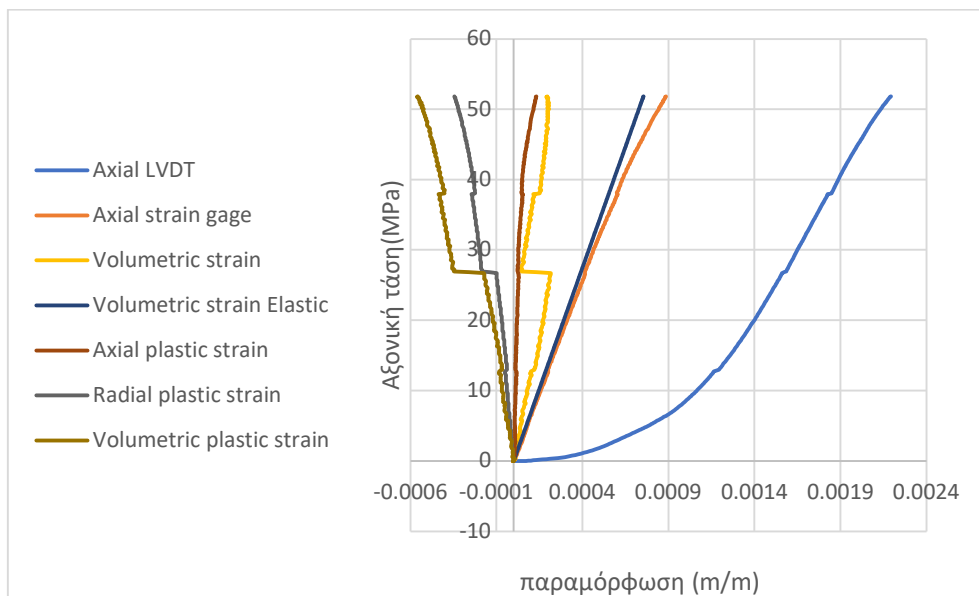
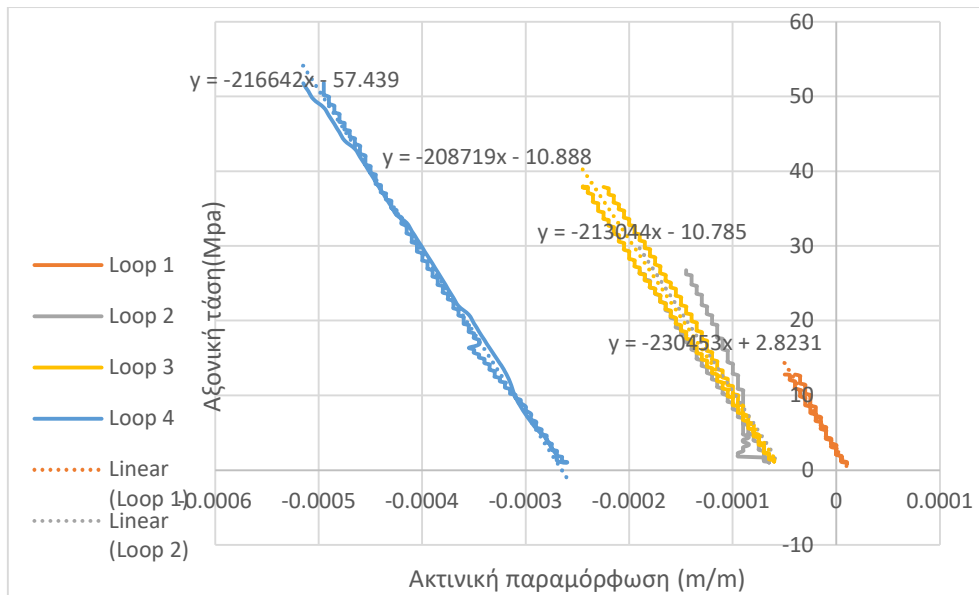


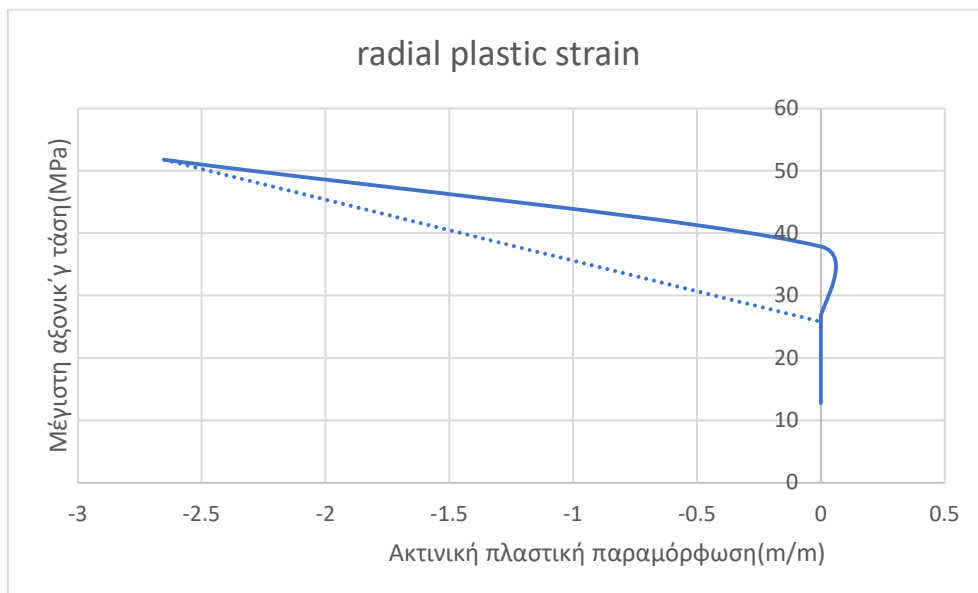
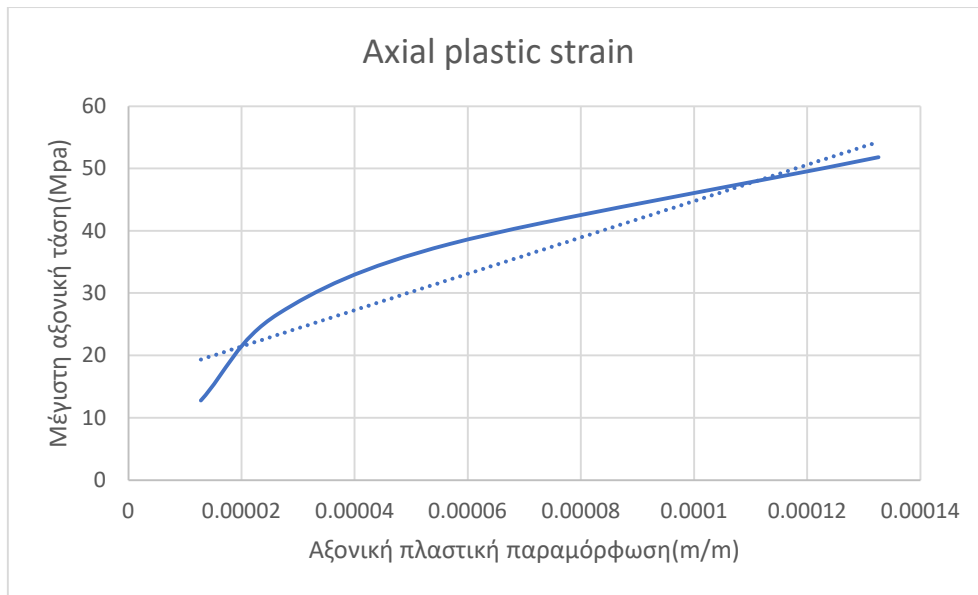




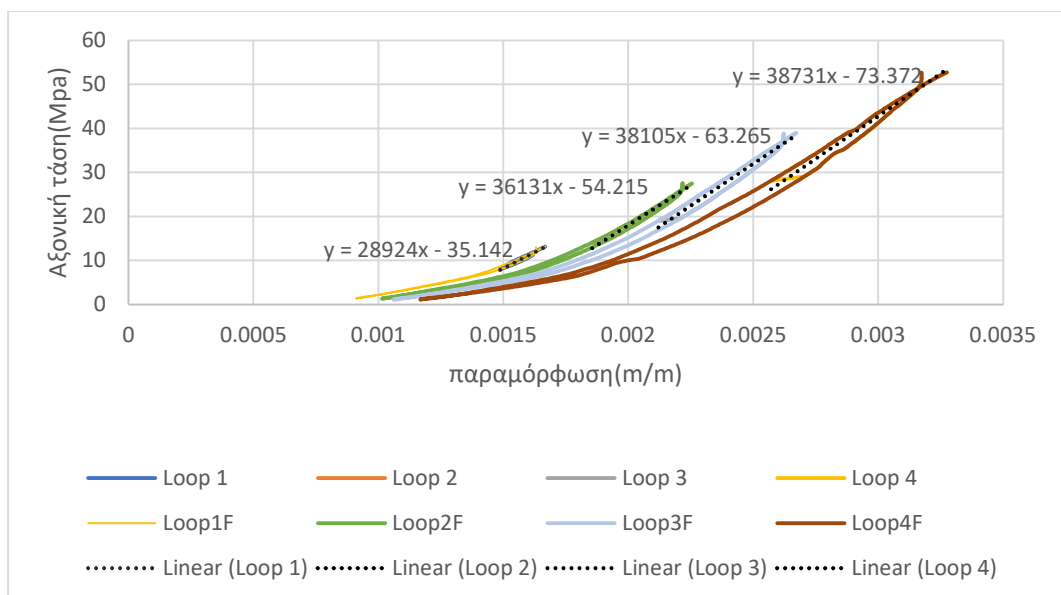
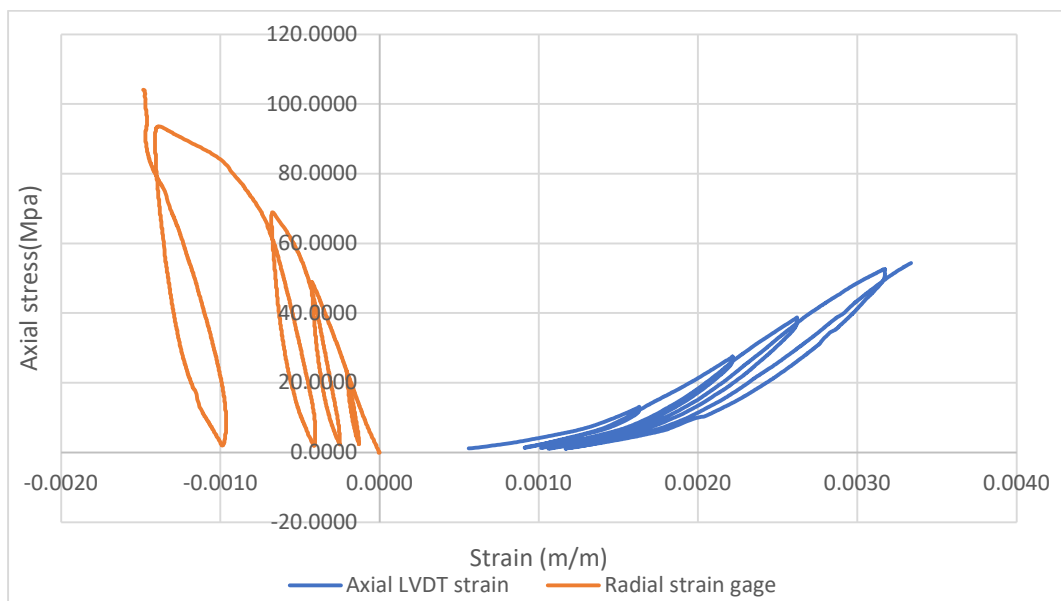
Αριθμός Δοκιμίου	2
Ύψος (cm)	8.77
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	61

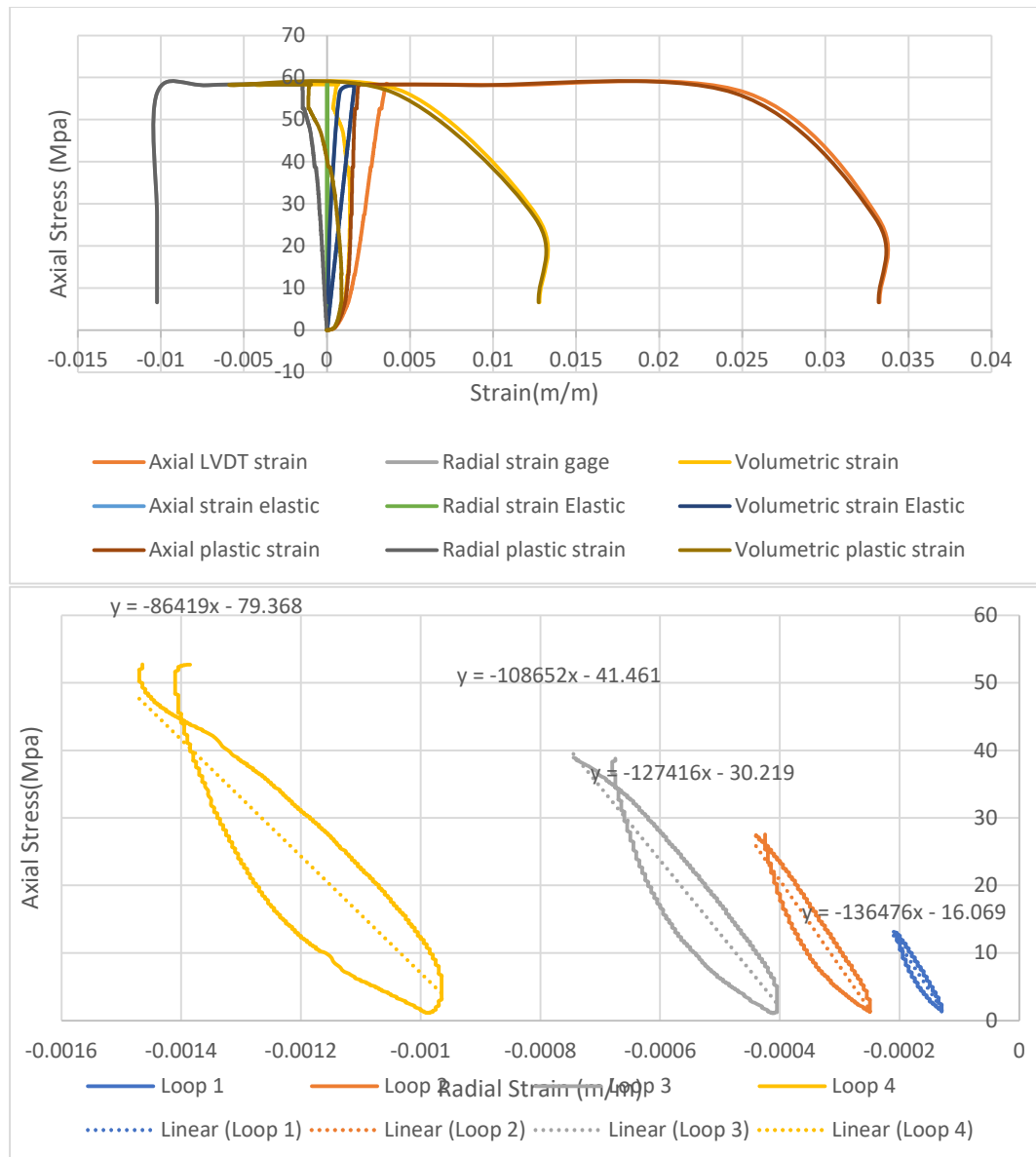


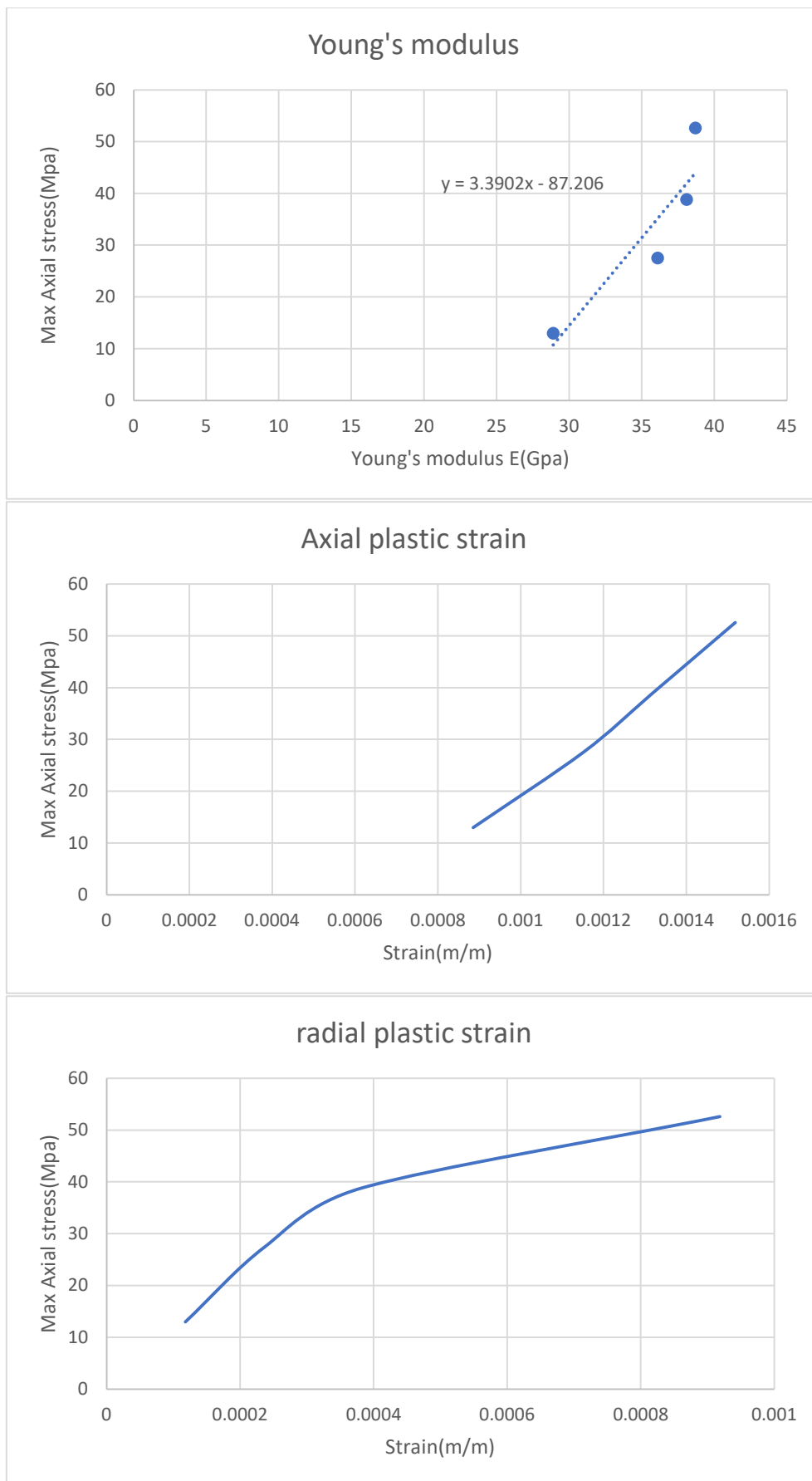




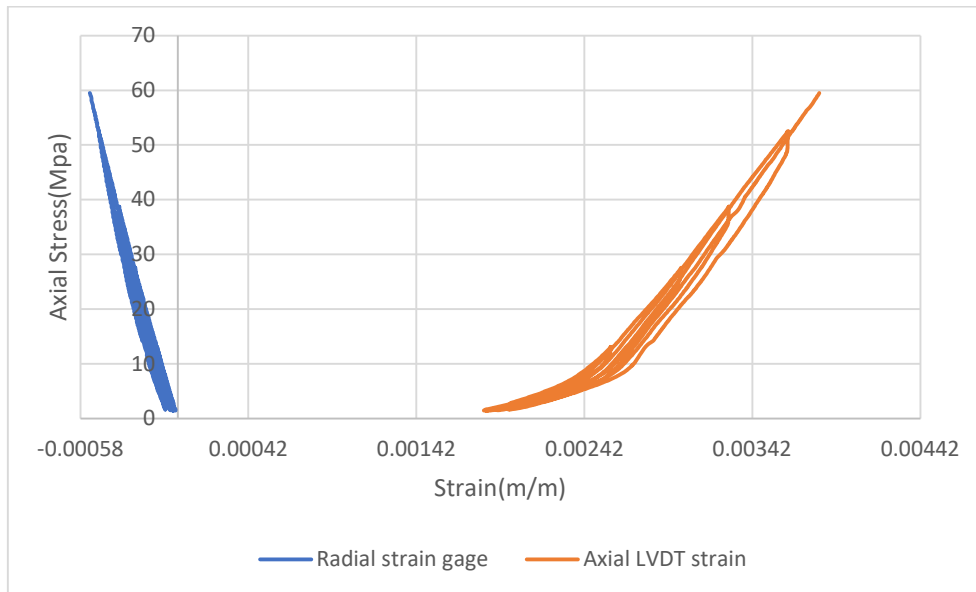
Αριθμός Δοκιμίου	5
Ύψος (cm)	8.92
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDΤ και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	58.61

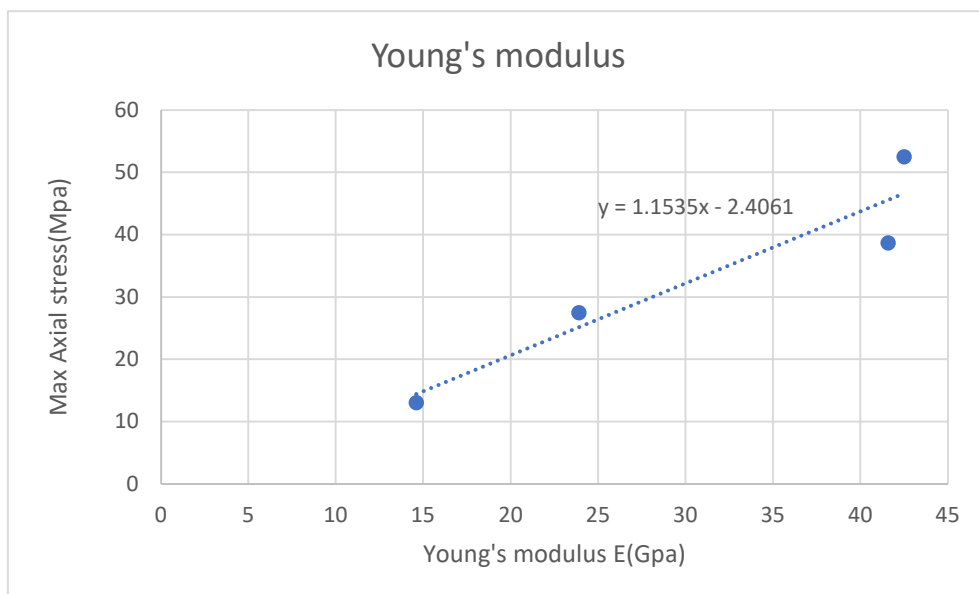
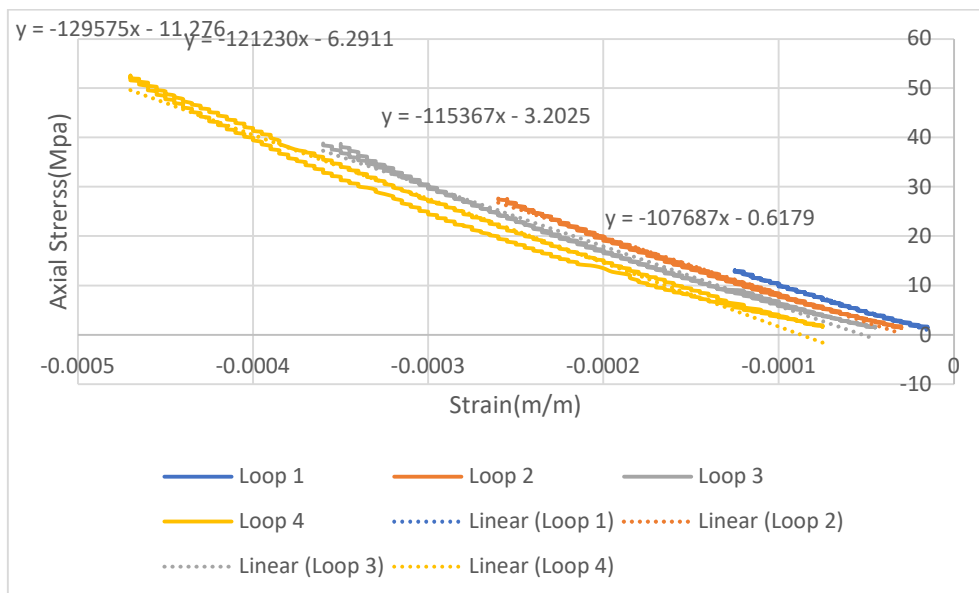
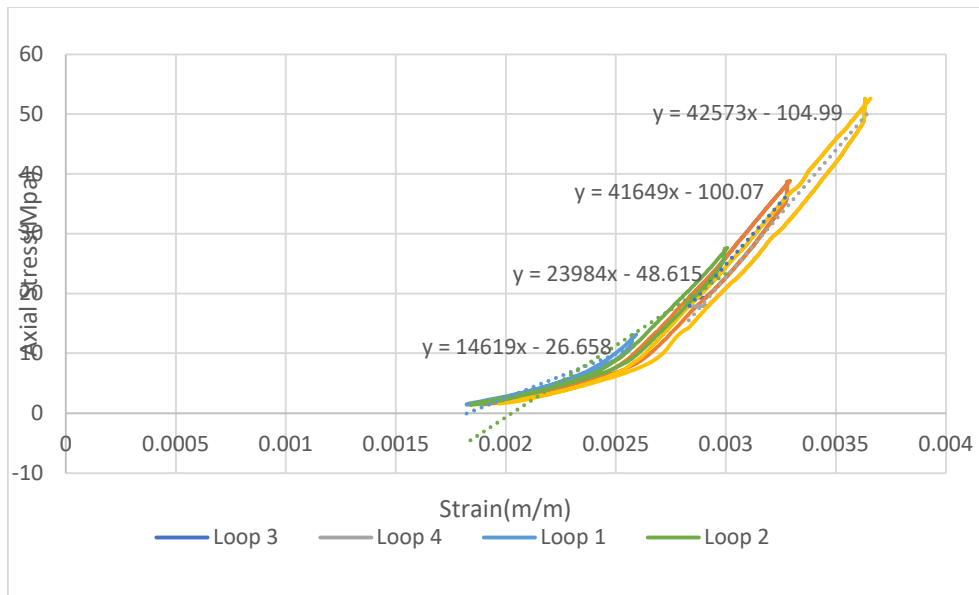


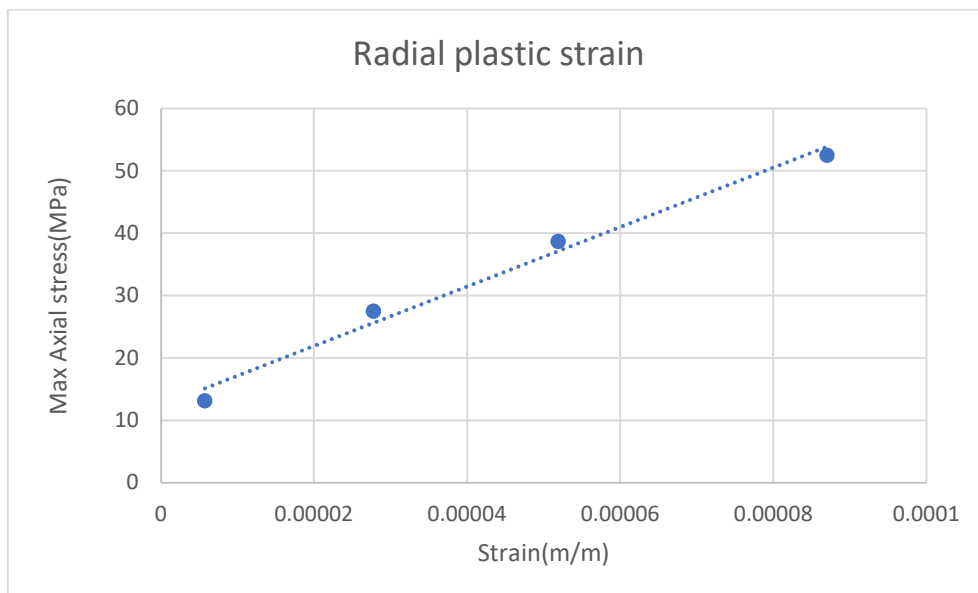
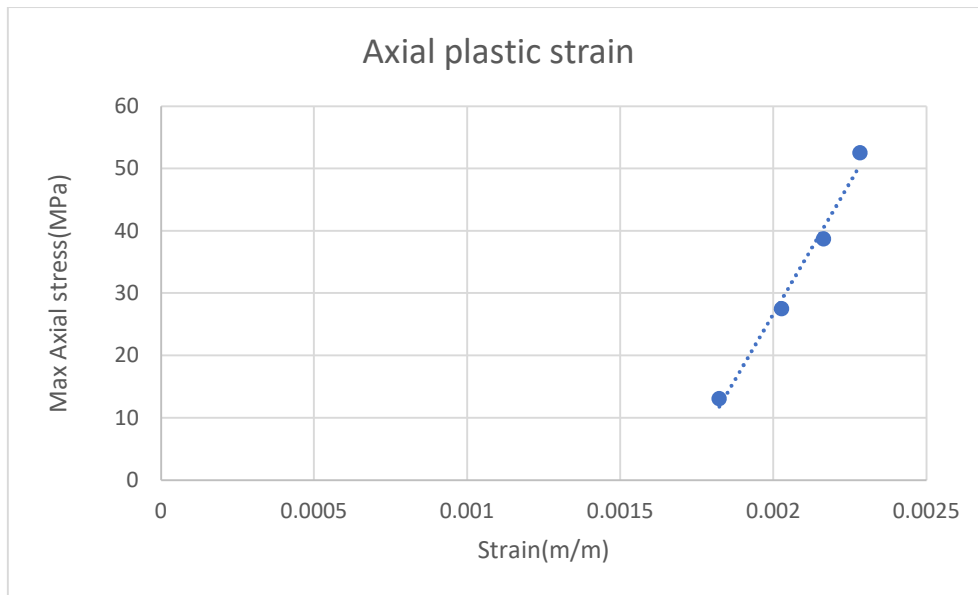




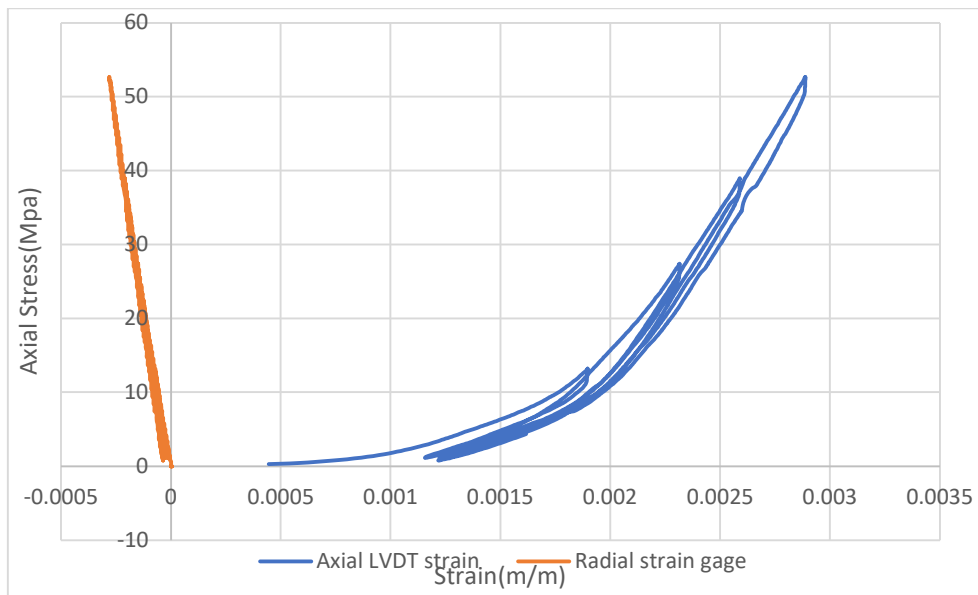
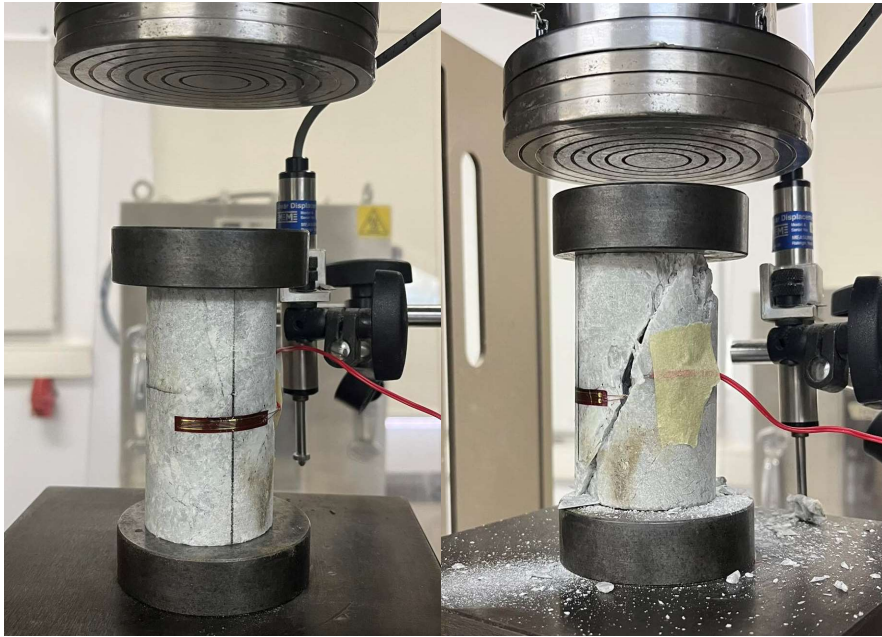
Αριθμός Δοκιμίου	6
Ύψος (cm)	7.95
Διάμετρος (cm)	4.77
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	84.88

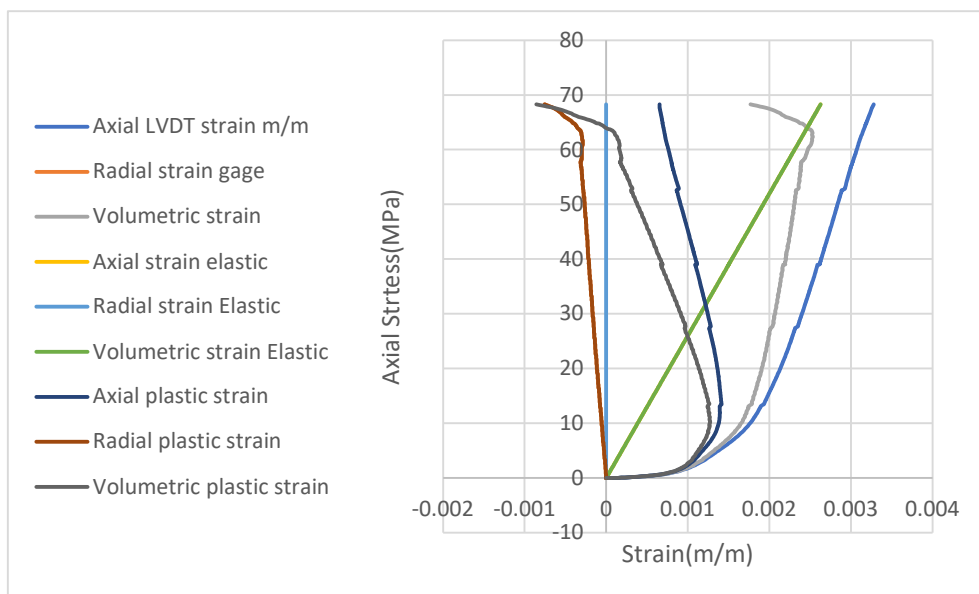
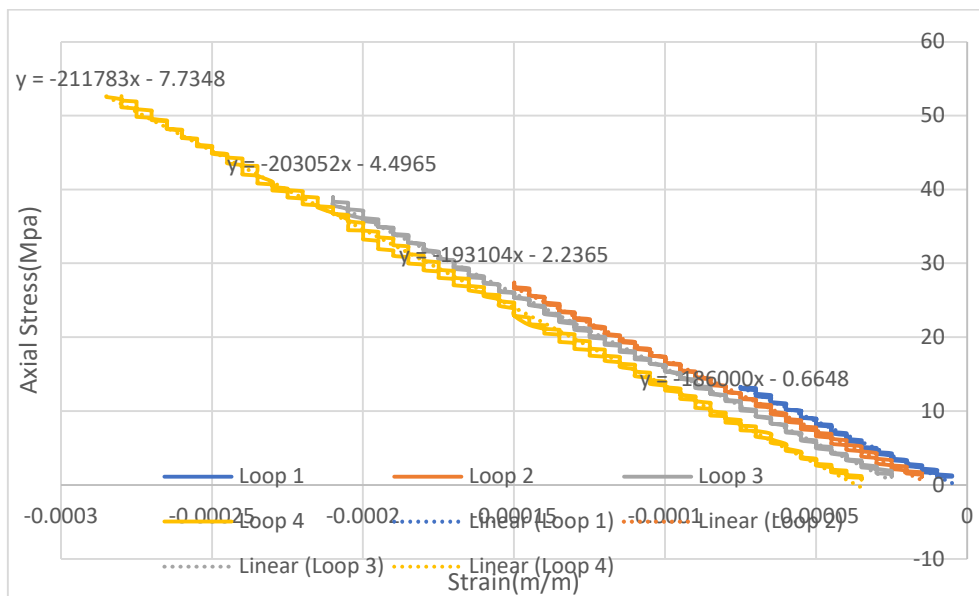
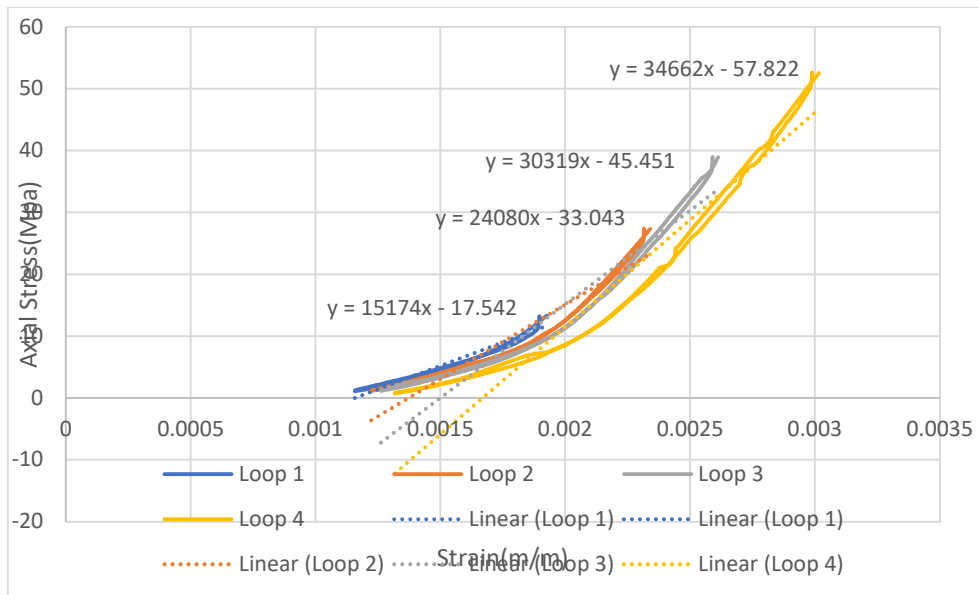


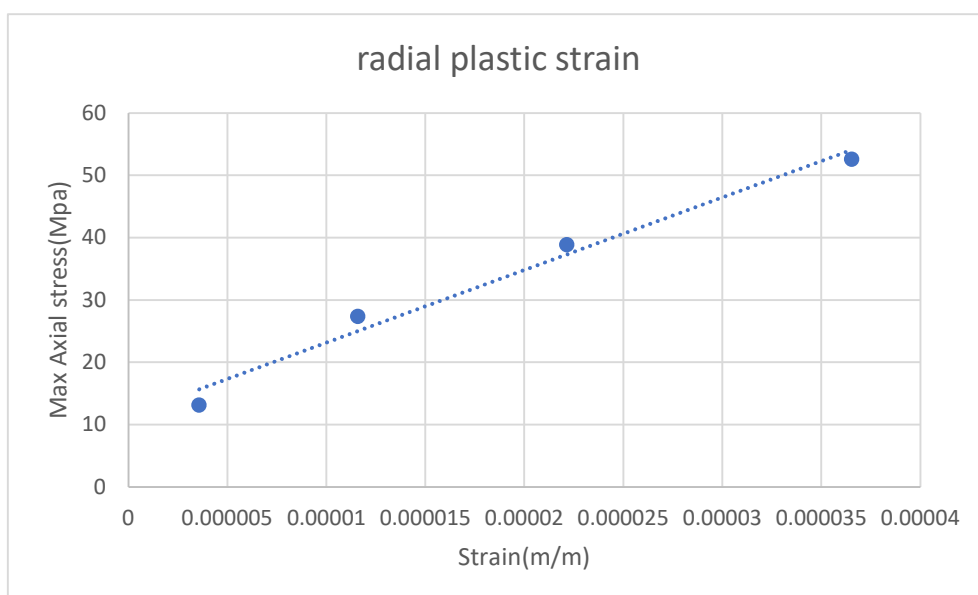
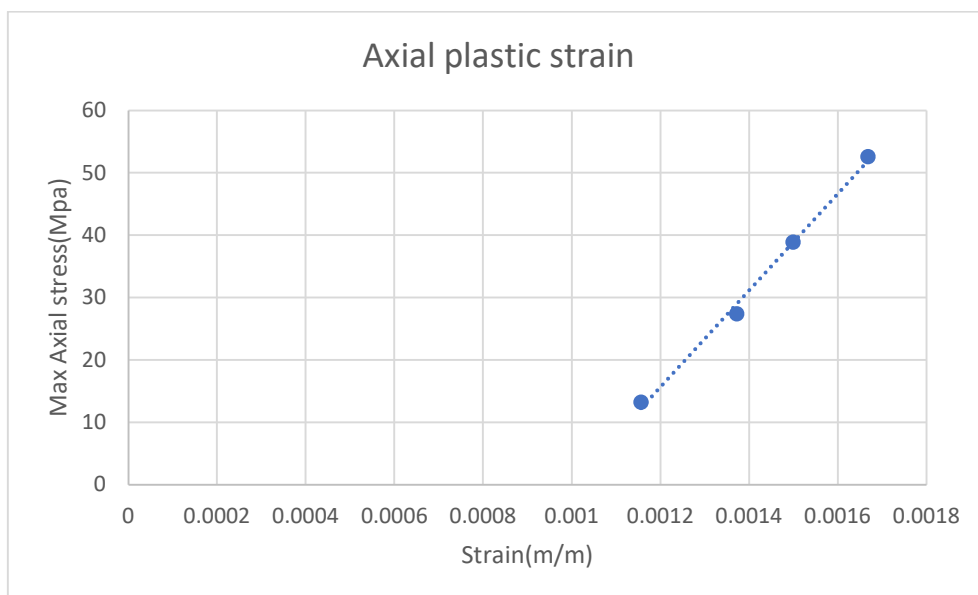
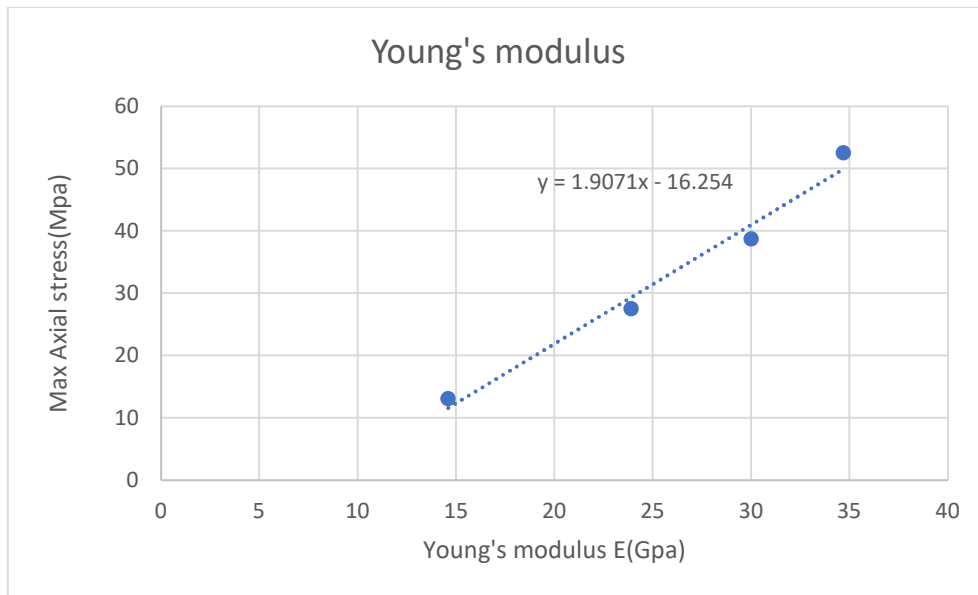




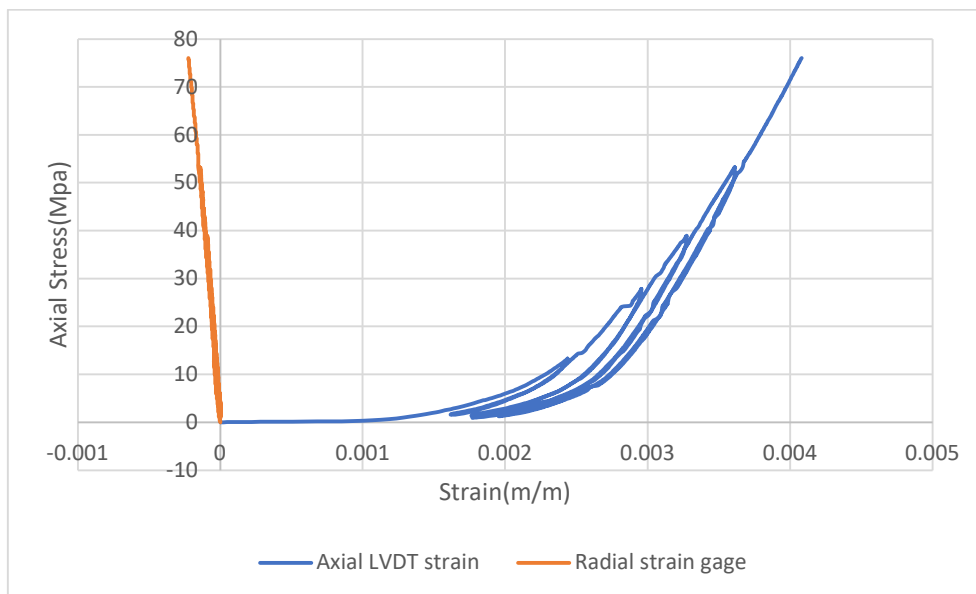
Αριθμός Δοκιμίου	7
Ύψος (cm)	8.9
Διάμετρος (cm)	4.76
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDΤ και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	68.3

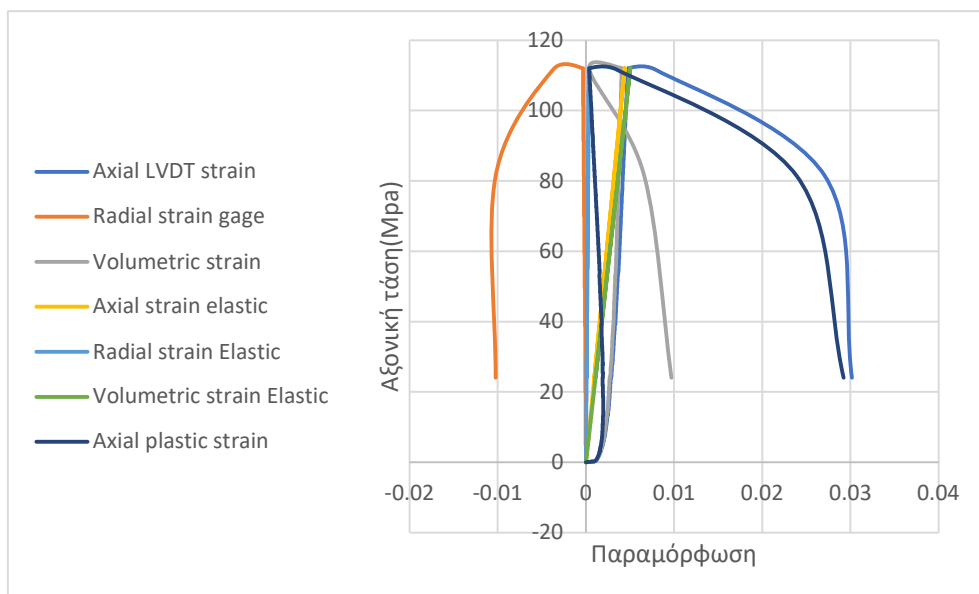
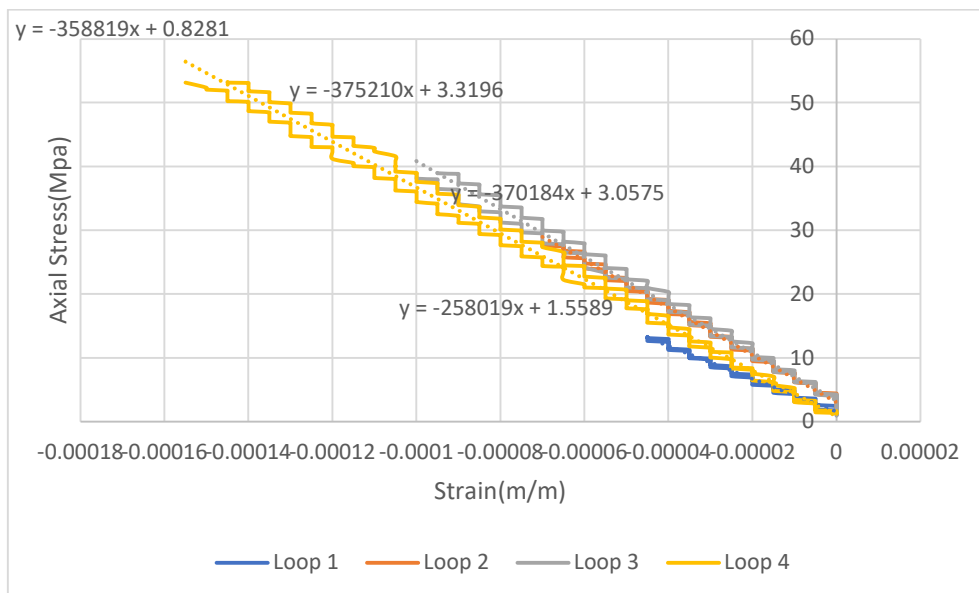
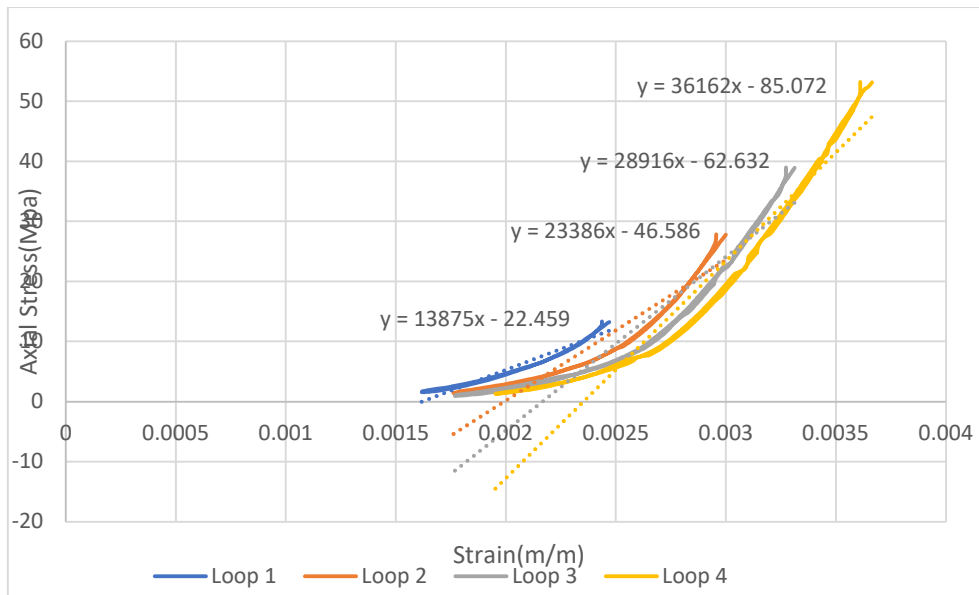


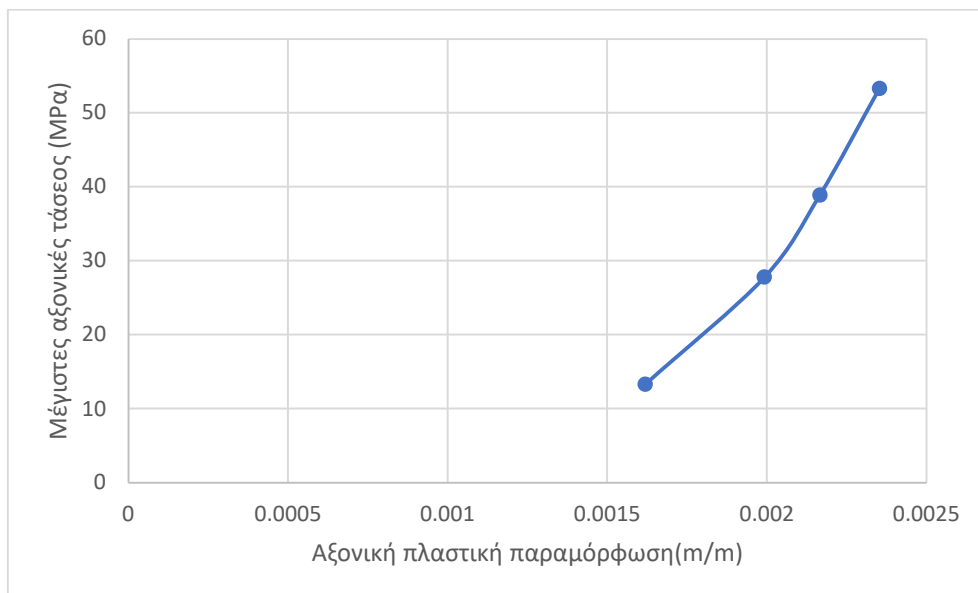
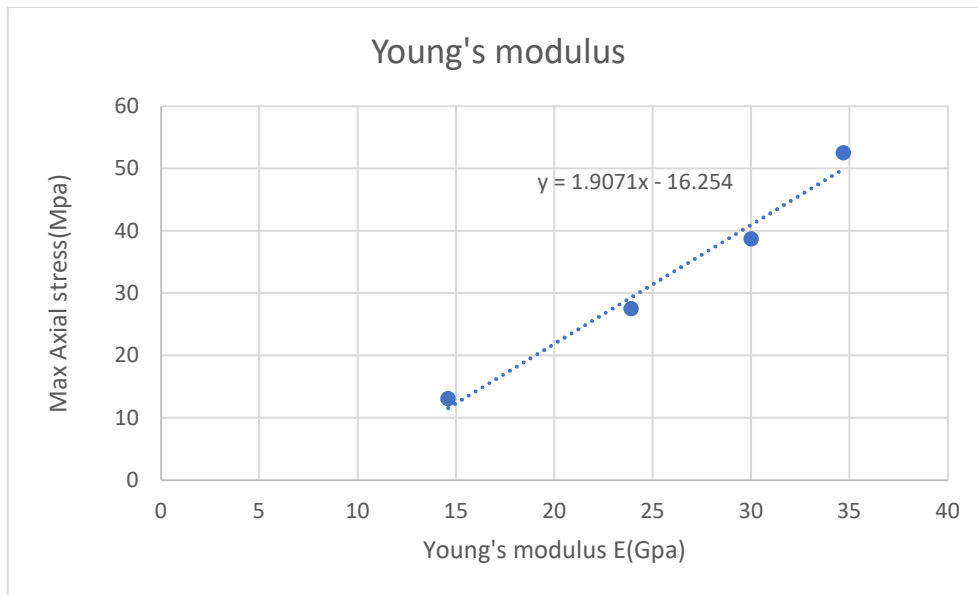




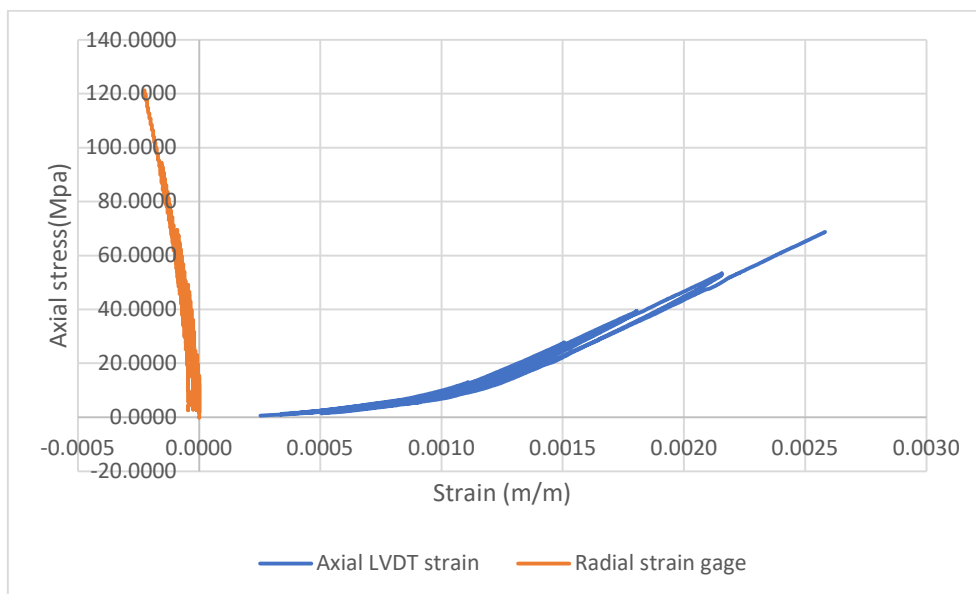
Αριθμός Δοκιμίου	8
Ύψος (cm)	9.02
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	112.08

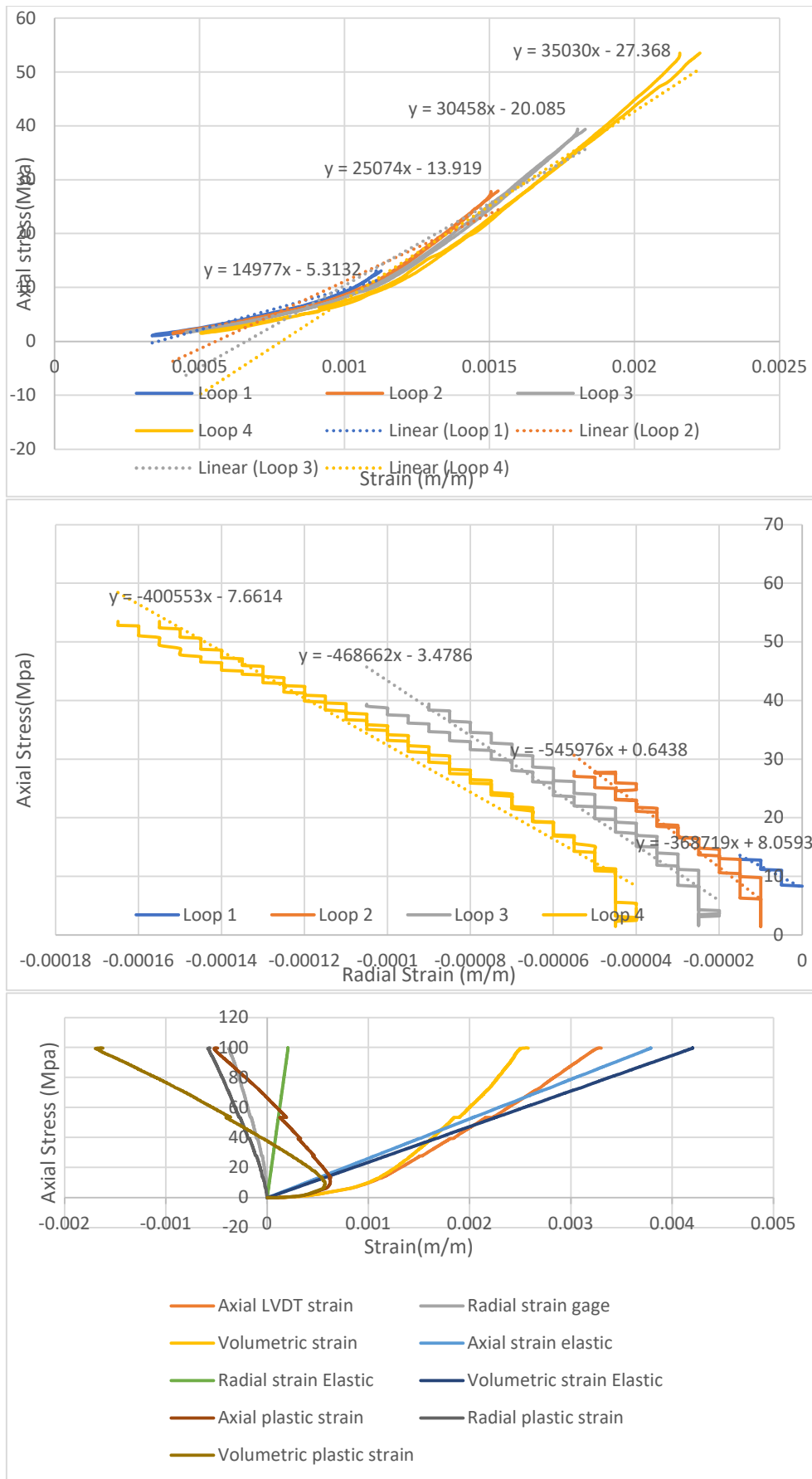


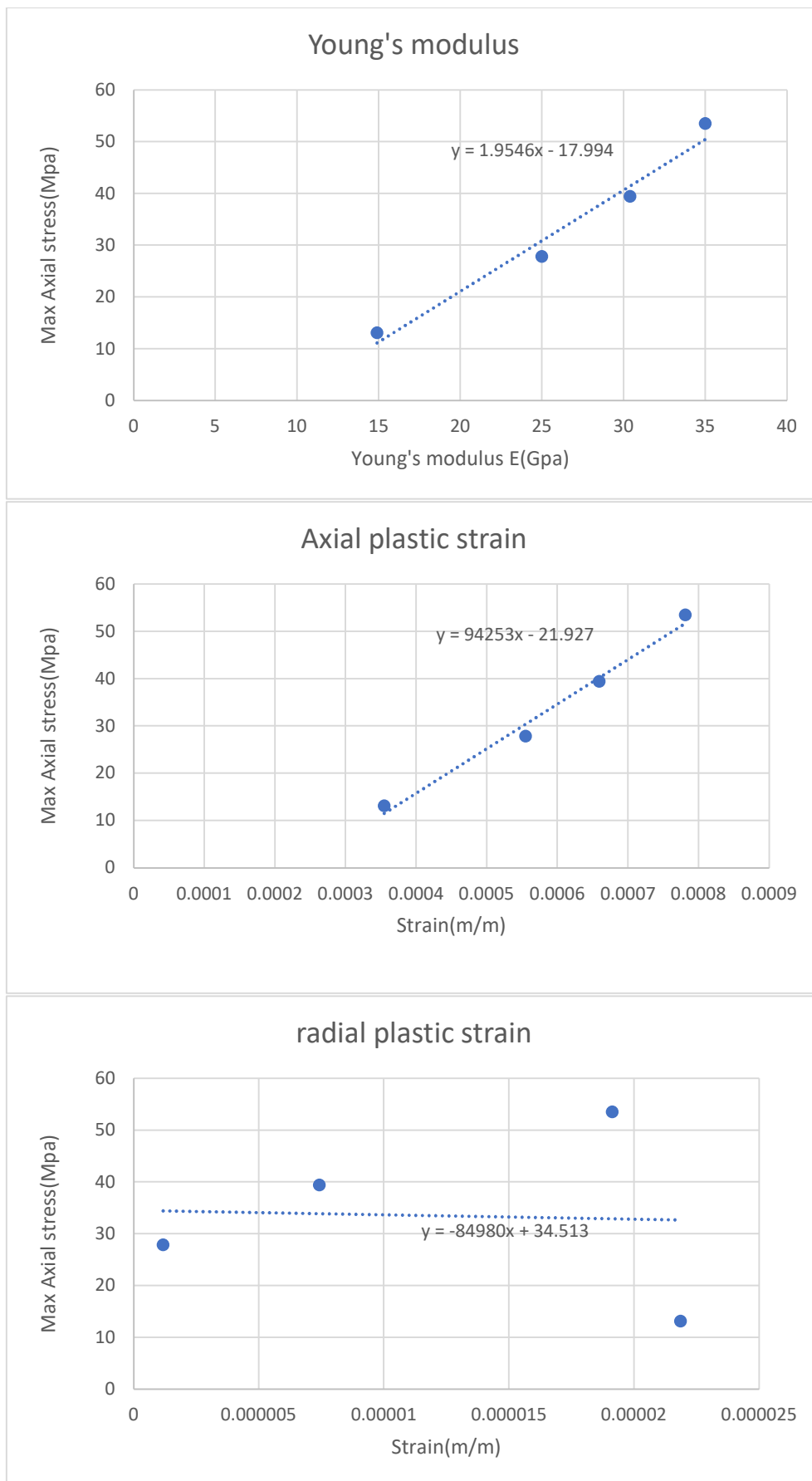




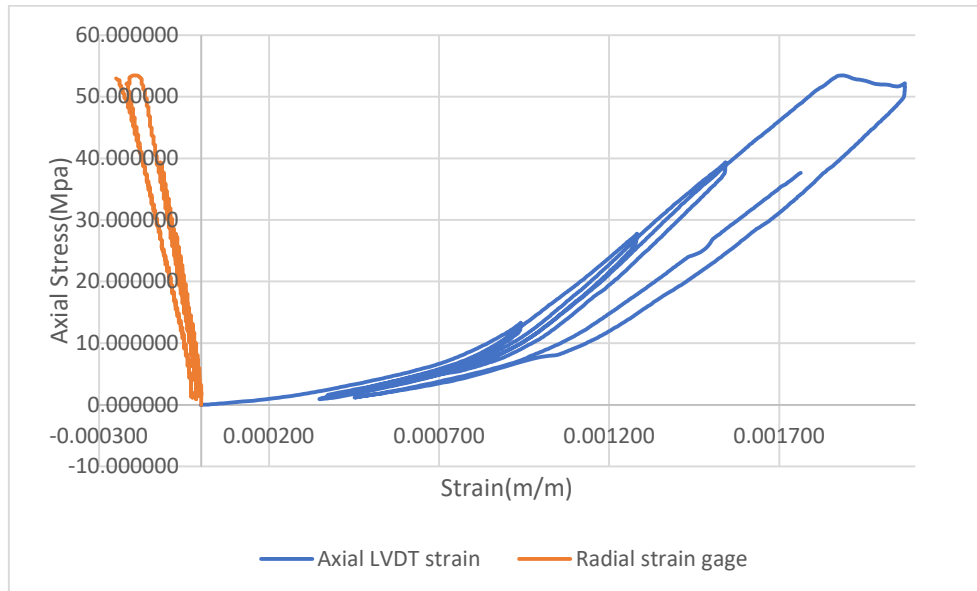
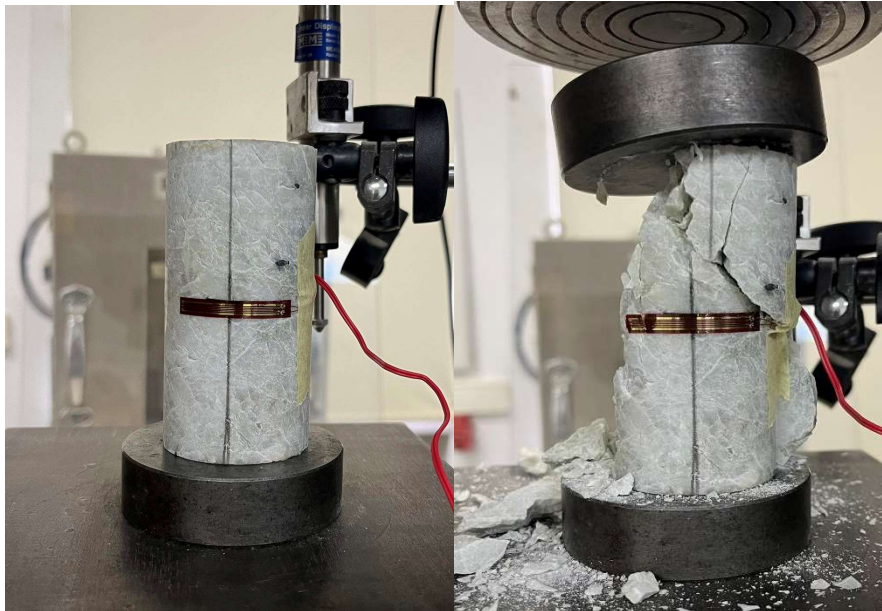
Αριθμός Δοκιμίου	9
Ύψος (cm)	8.47
Διάμετρος (cm)	4.74
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDΤ και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	99.74

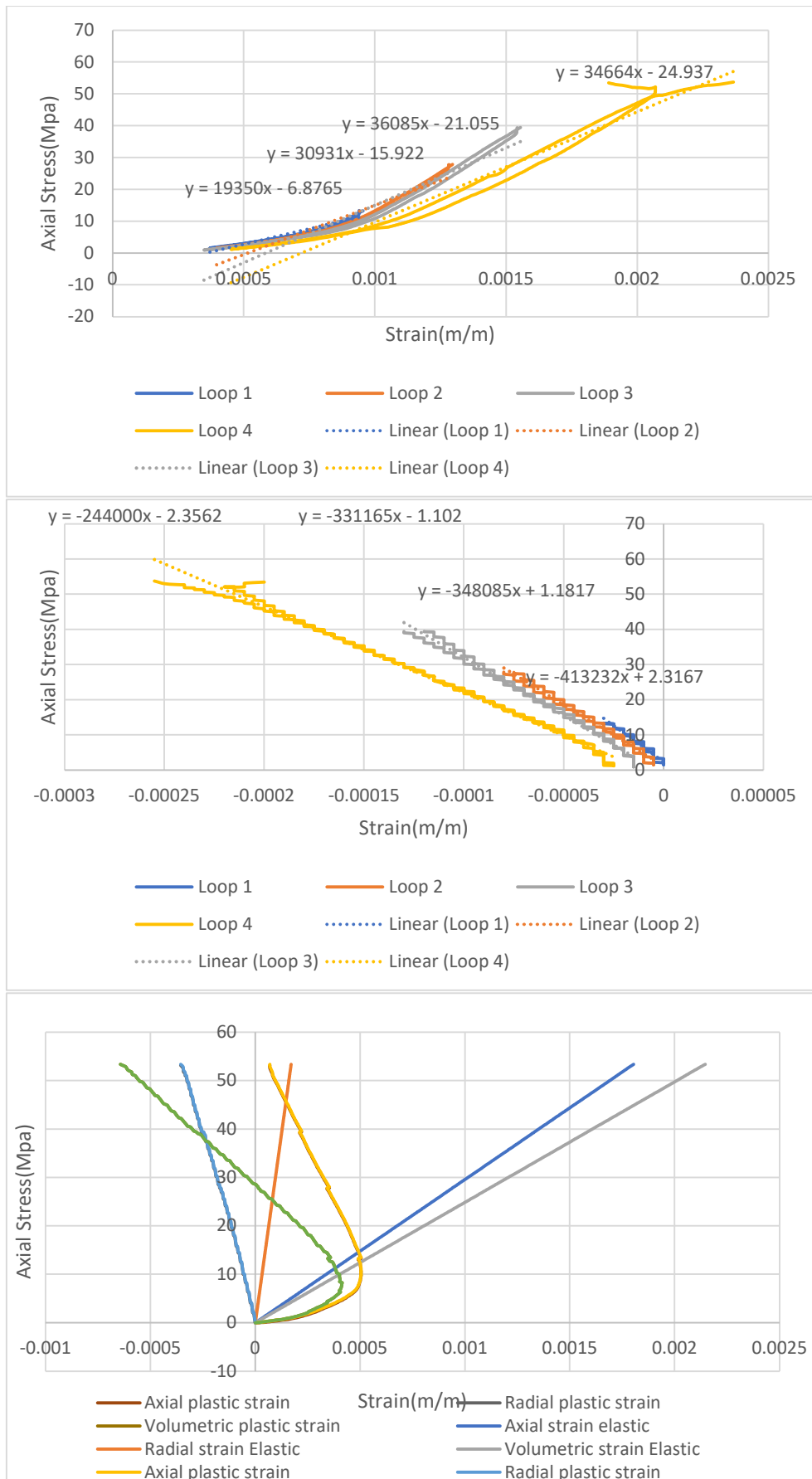


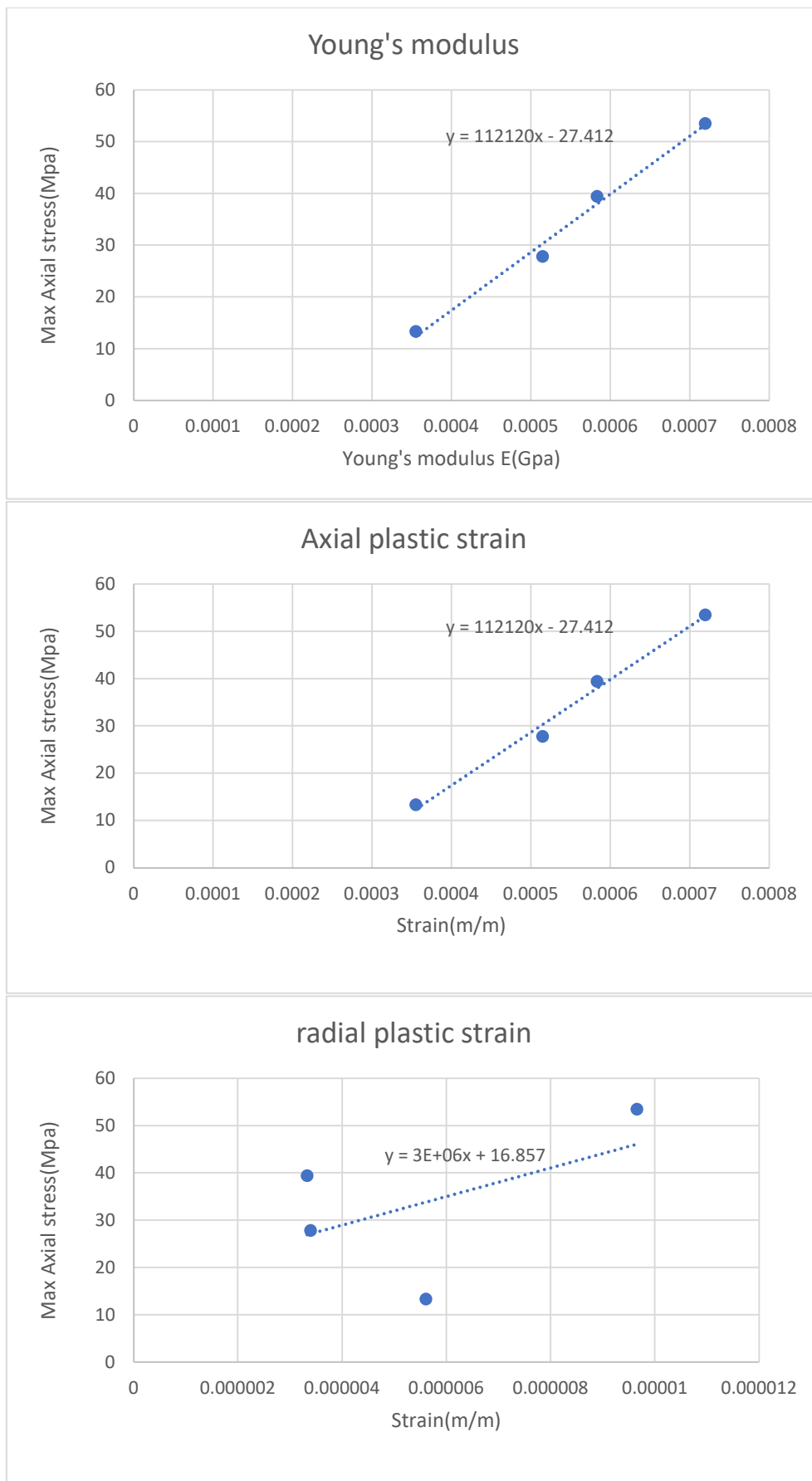




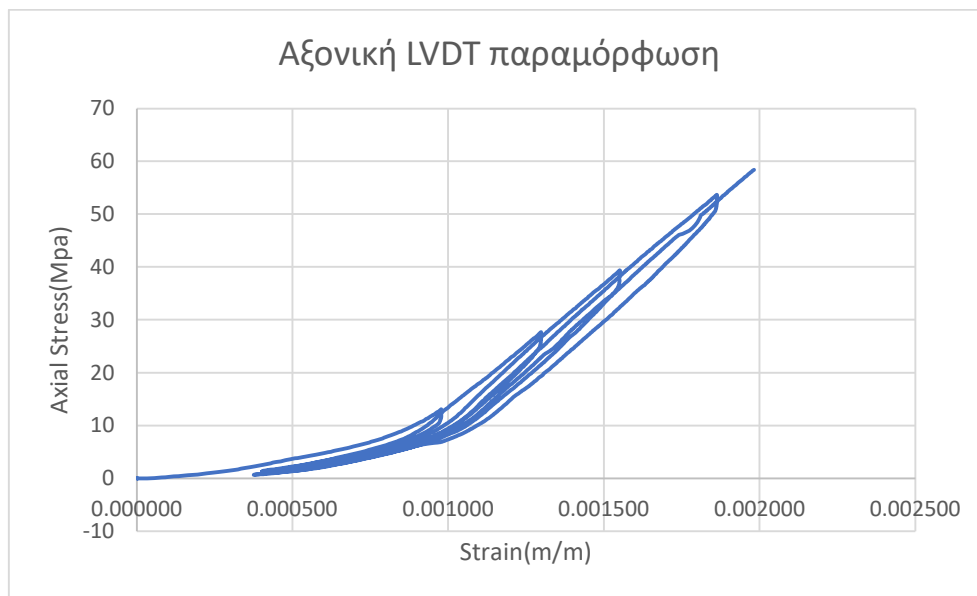
Αριθμός Δοκιμίου	10
Ύψος (cm)	9.44
Διάμετρος (cm)	4.74
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	54.71

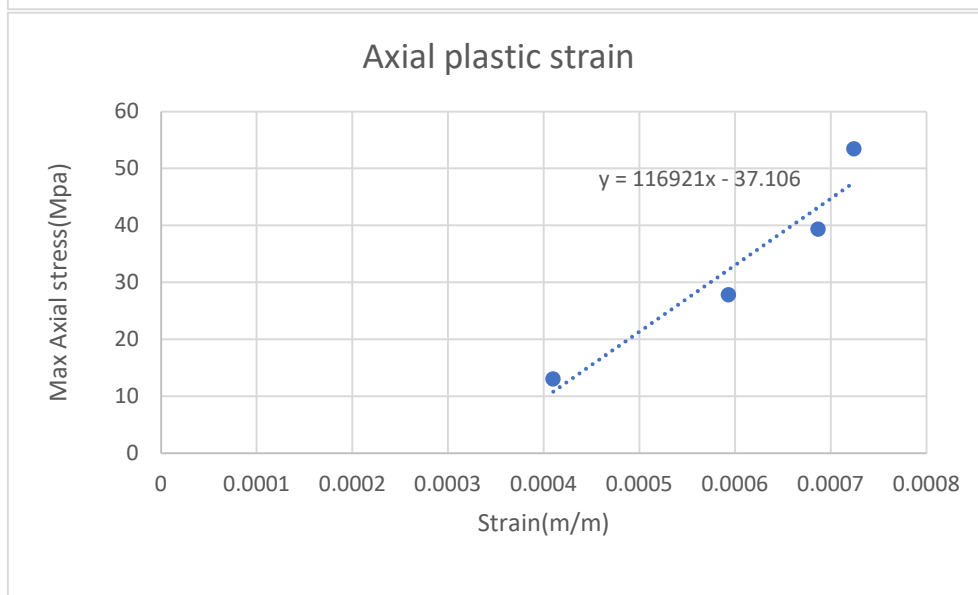
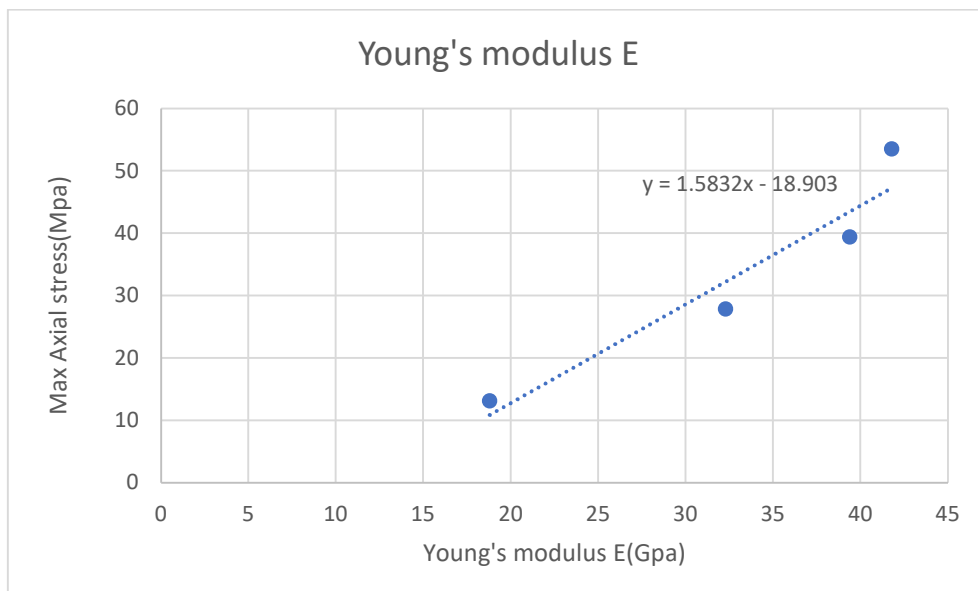
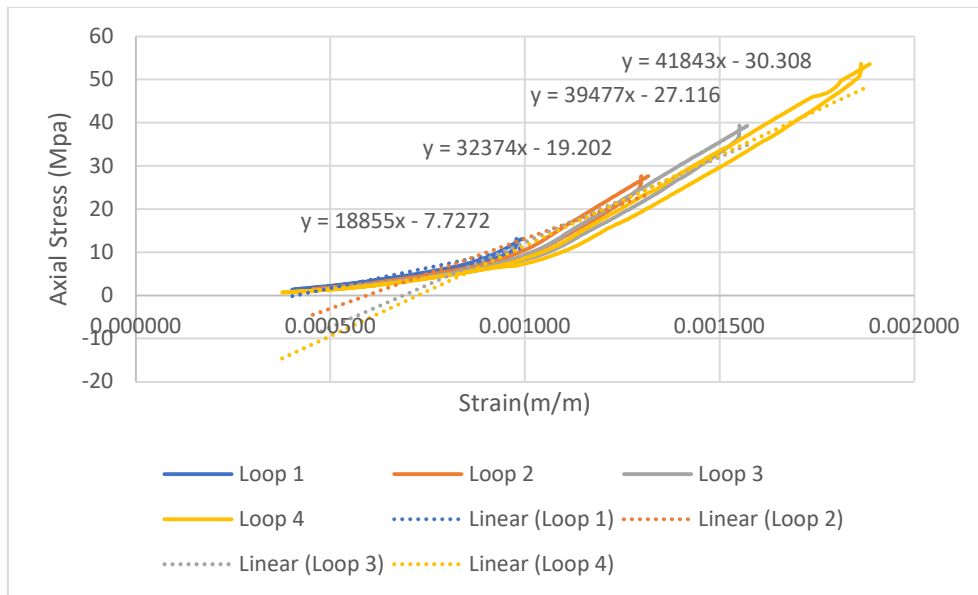




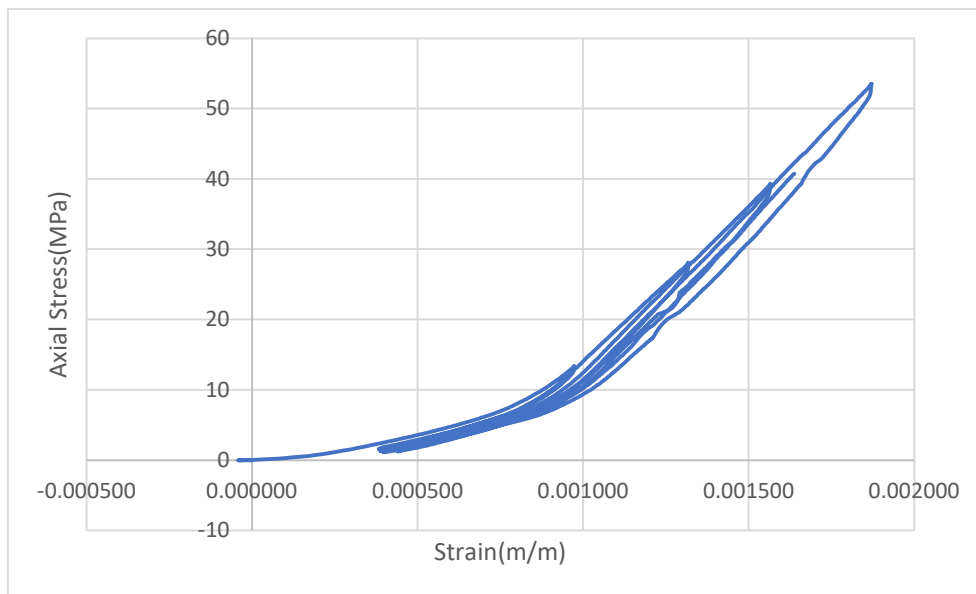


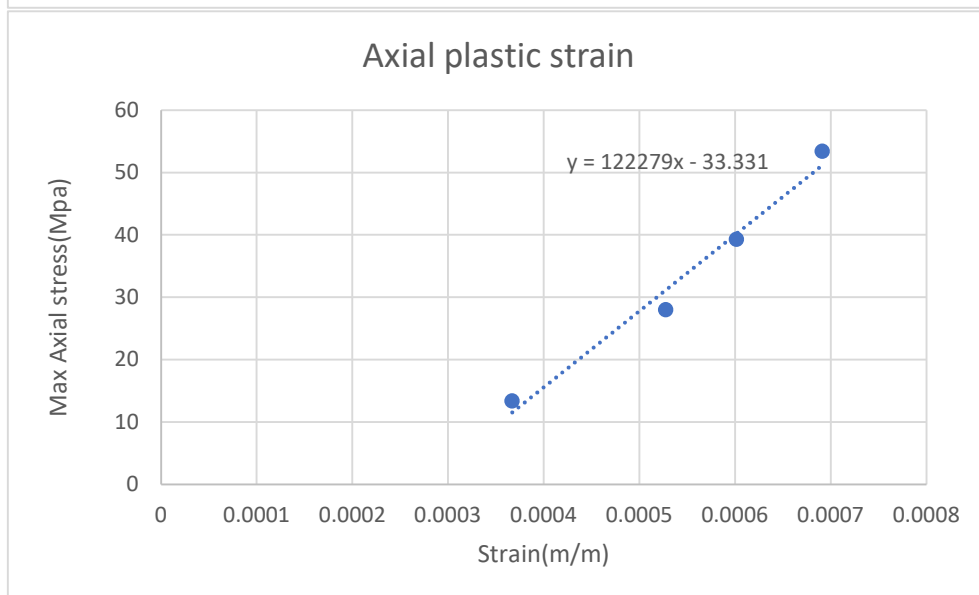
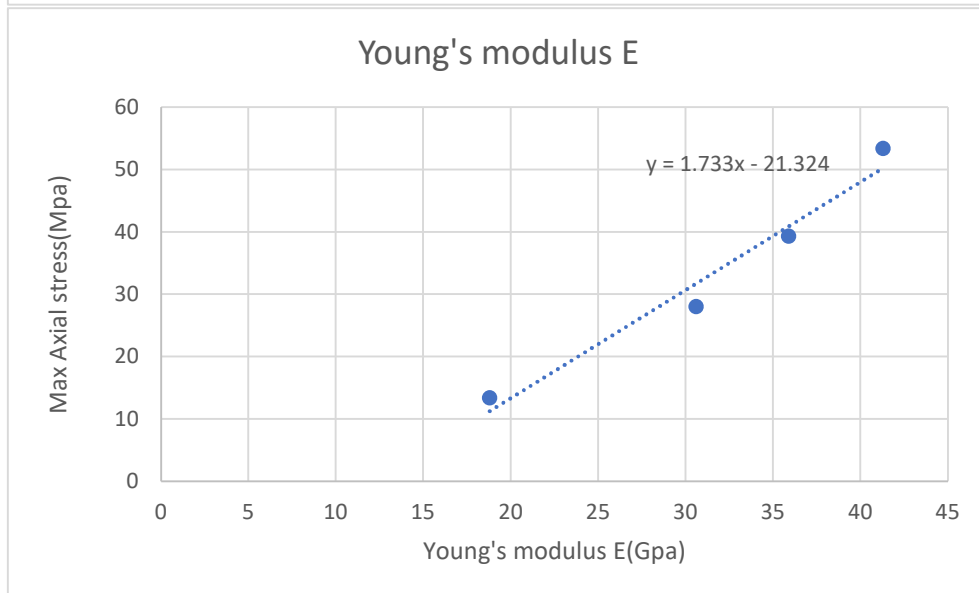
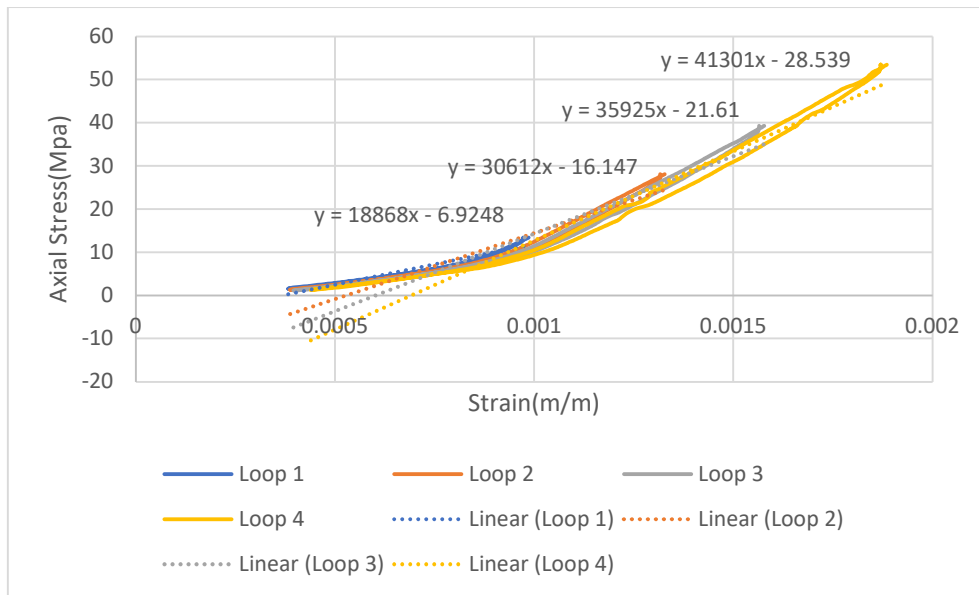
Αριθμός Δοκιμίου	11
Ύψος (cm)	9.60
Διάμετρος (cm)	4.73
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	103.06



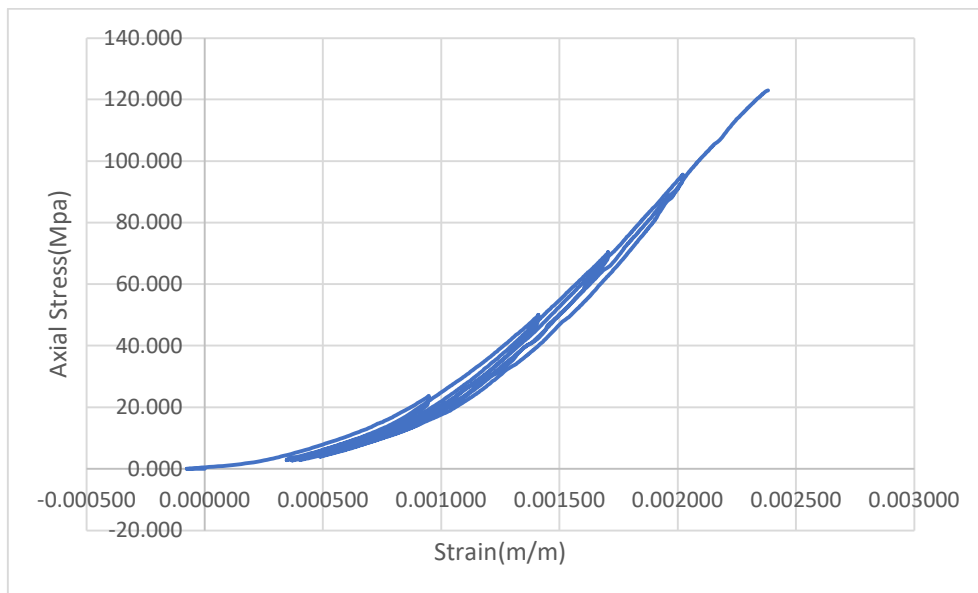


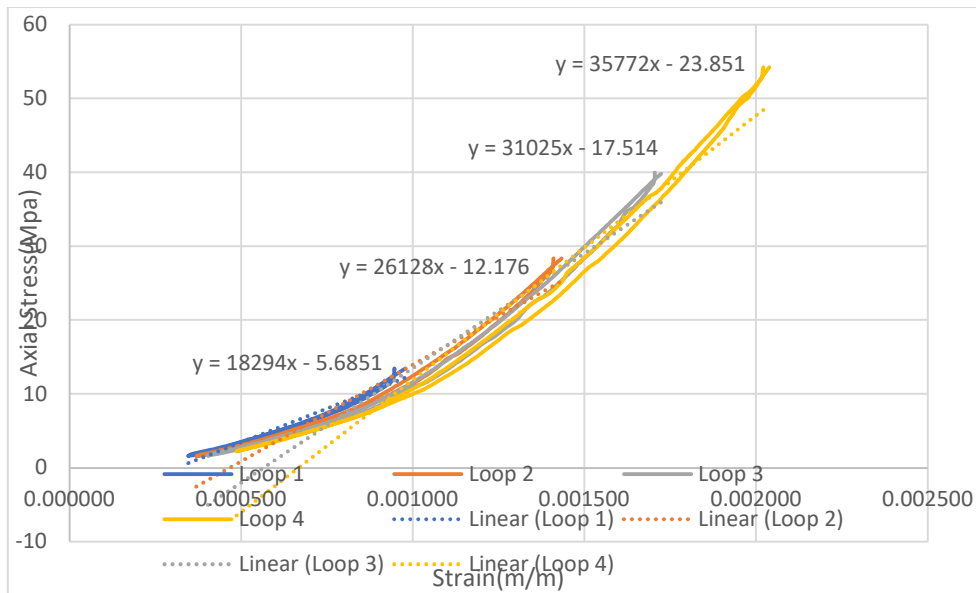
Αριθμός Δοκιμίου	12
Ύψος (cm)	9.68
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	72.07



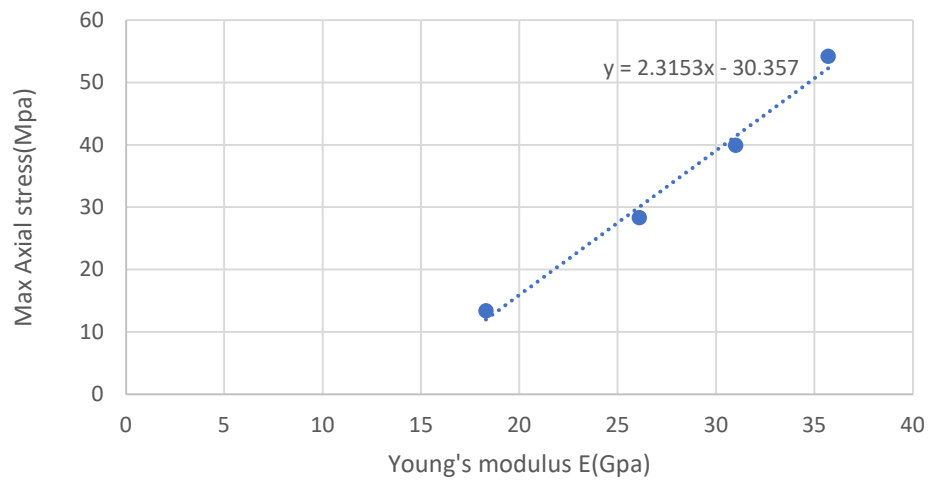


Αριθμός Δοκιμίου	13
Ύψος (cm)	10.19
Διάμετρος (cm)	4.74
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	73.38

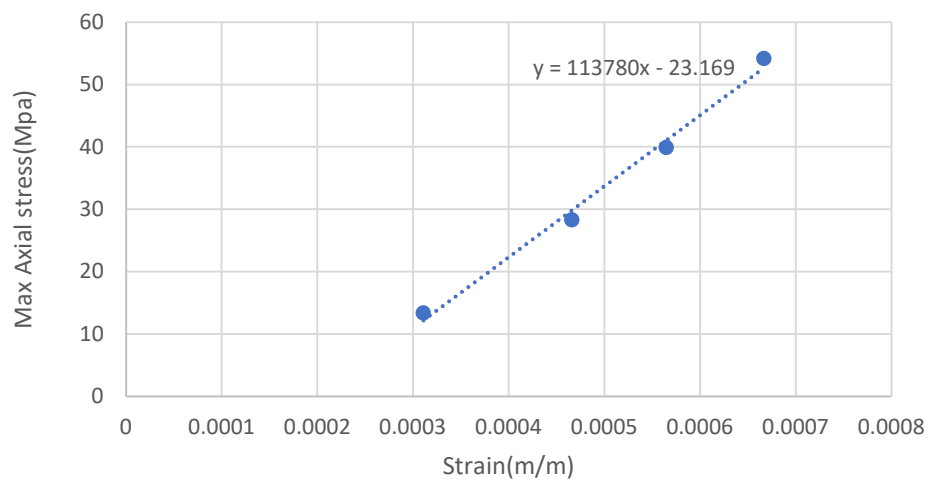




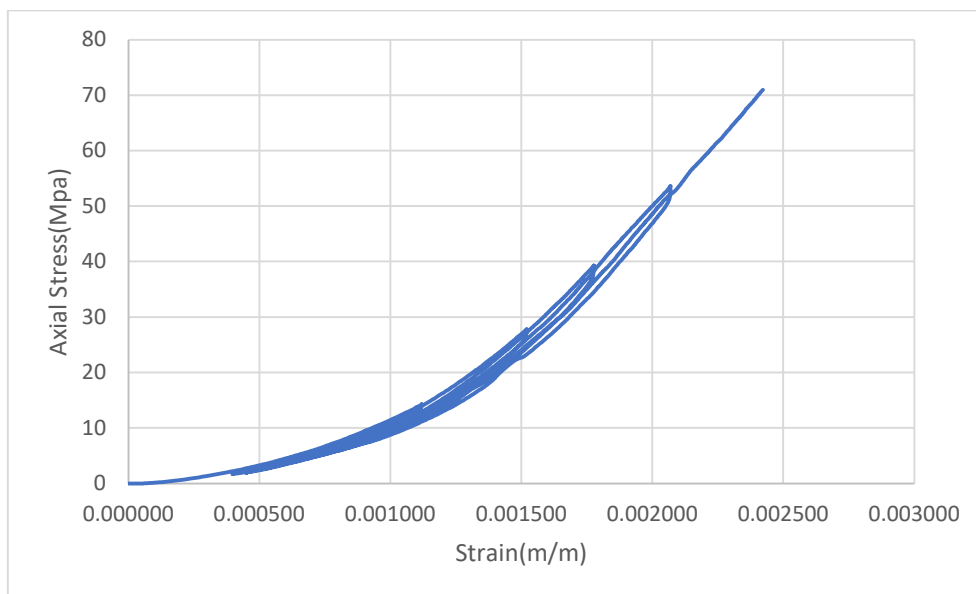
Young's modulus E

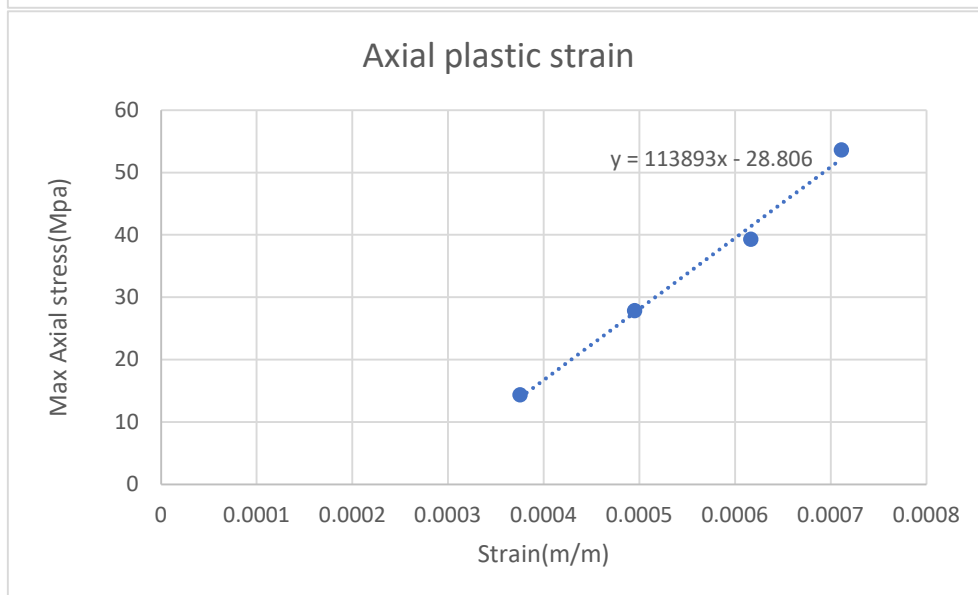
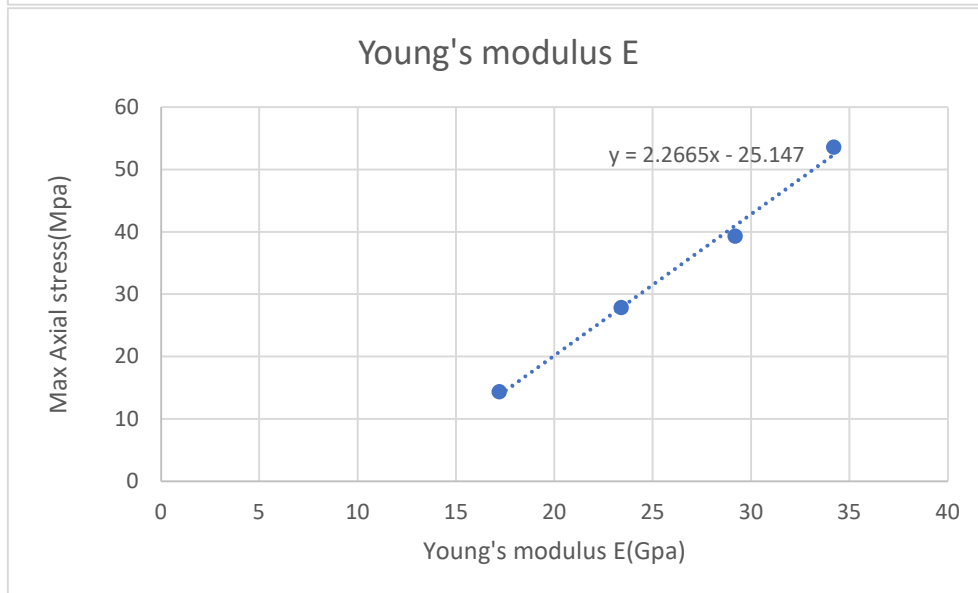
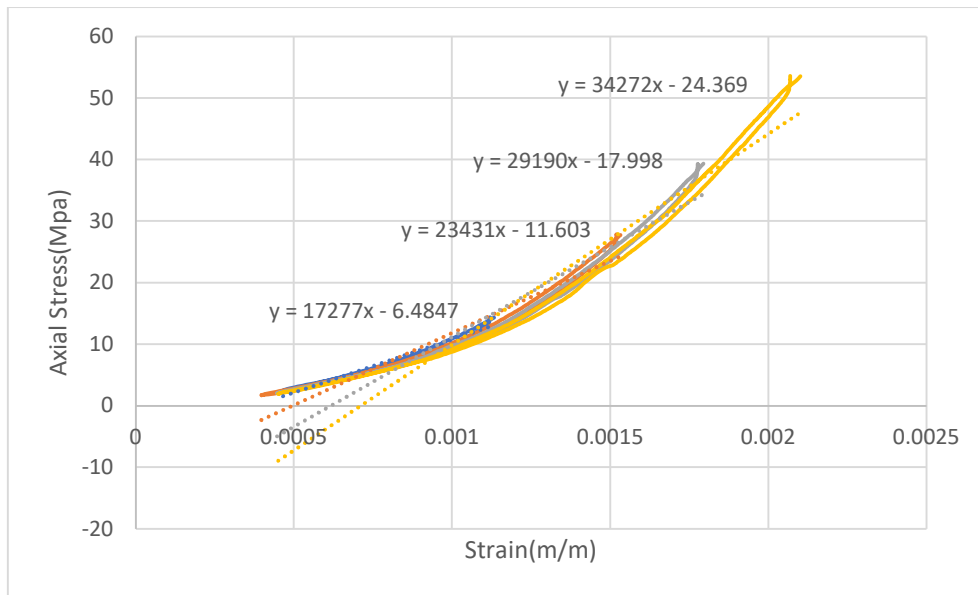


Axial plastic strain

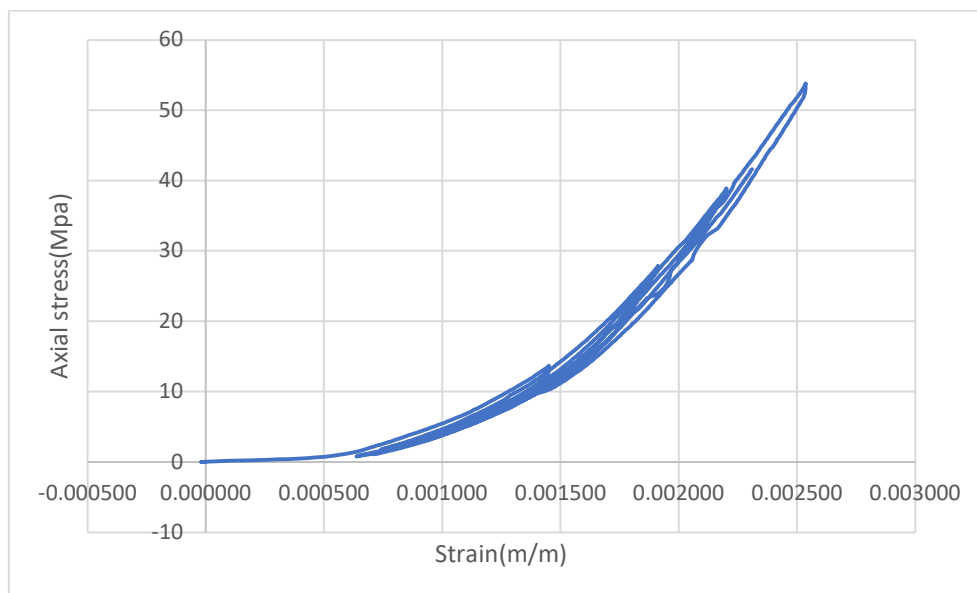


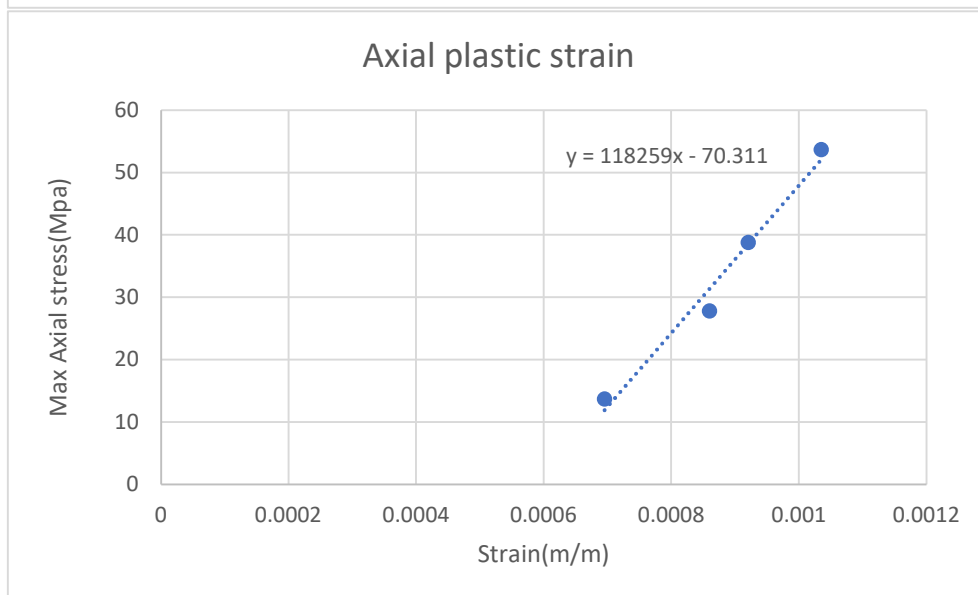
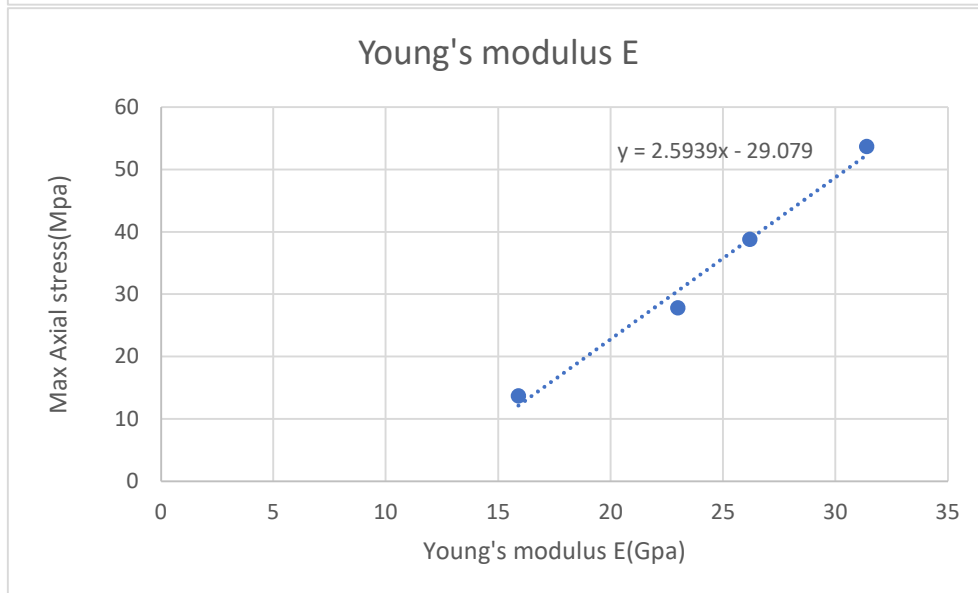
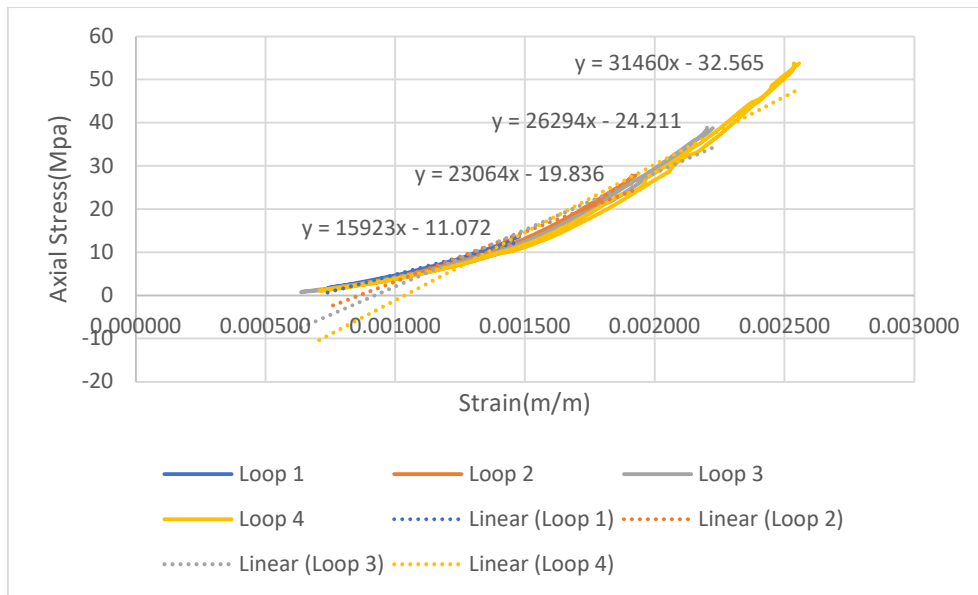
Αριθμός Δοκιμίου	14
Ύψος (cm)	8.94
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	94.71



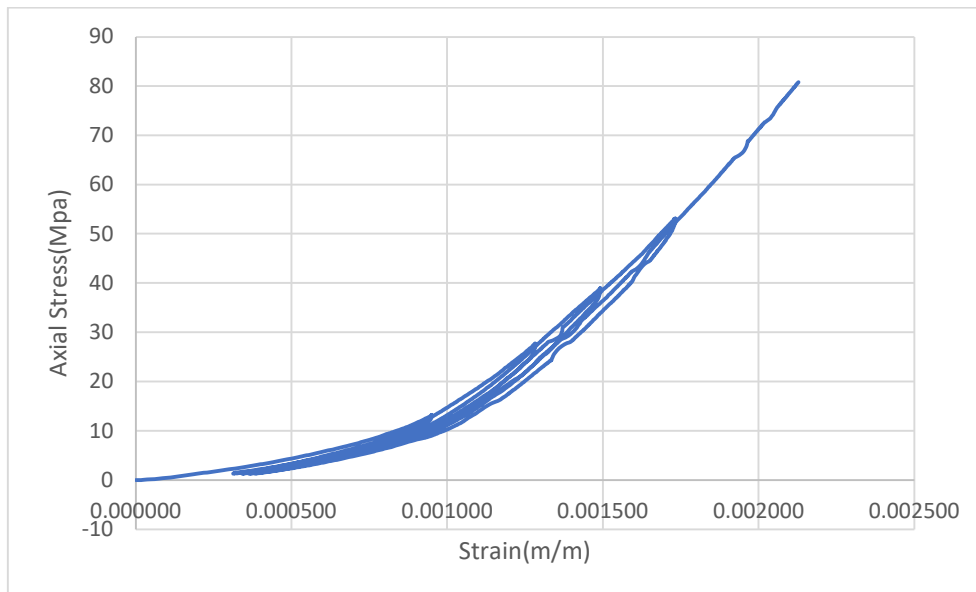


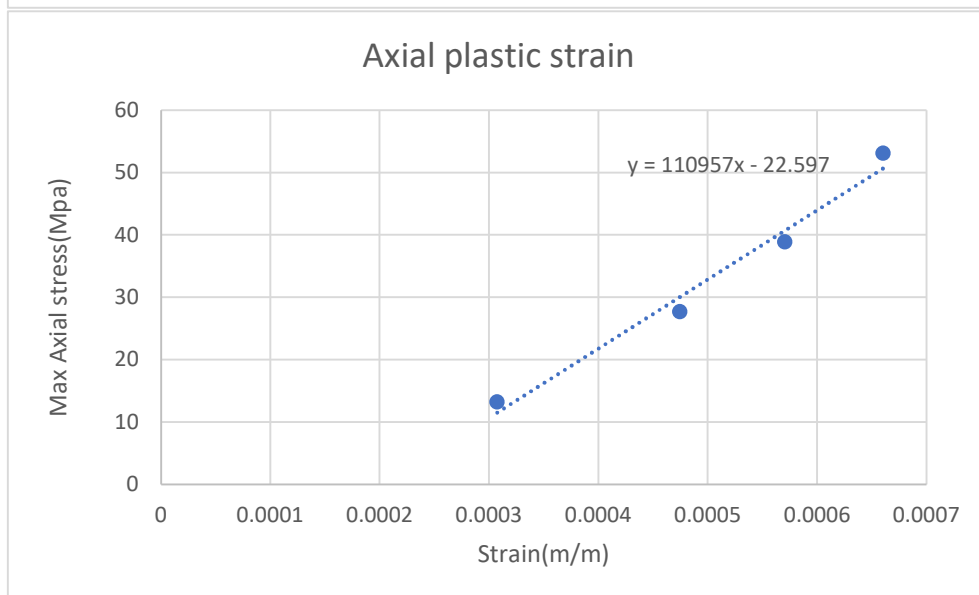
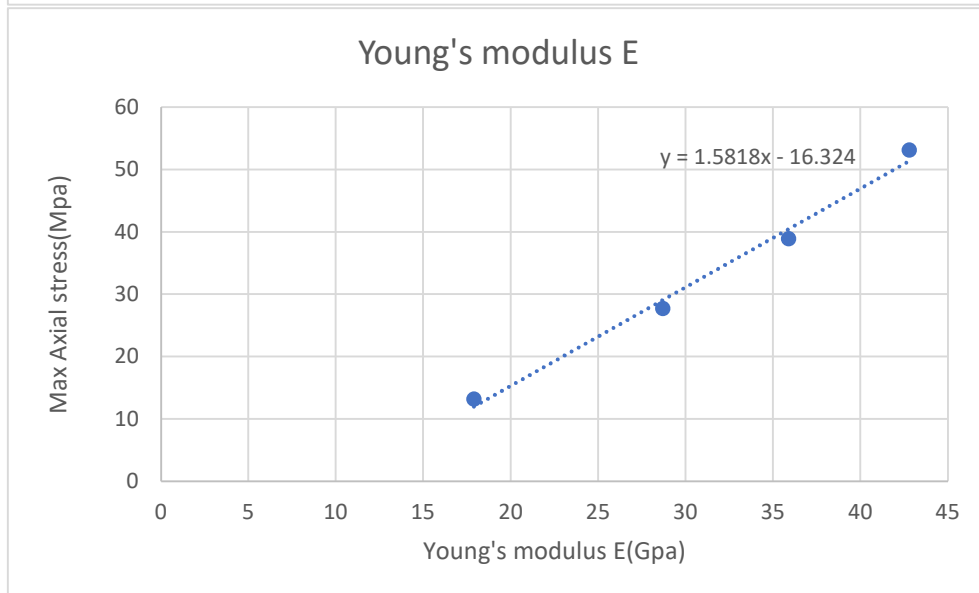
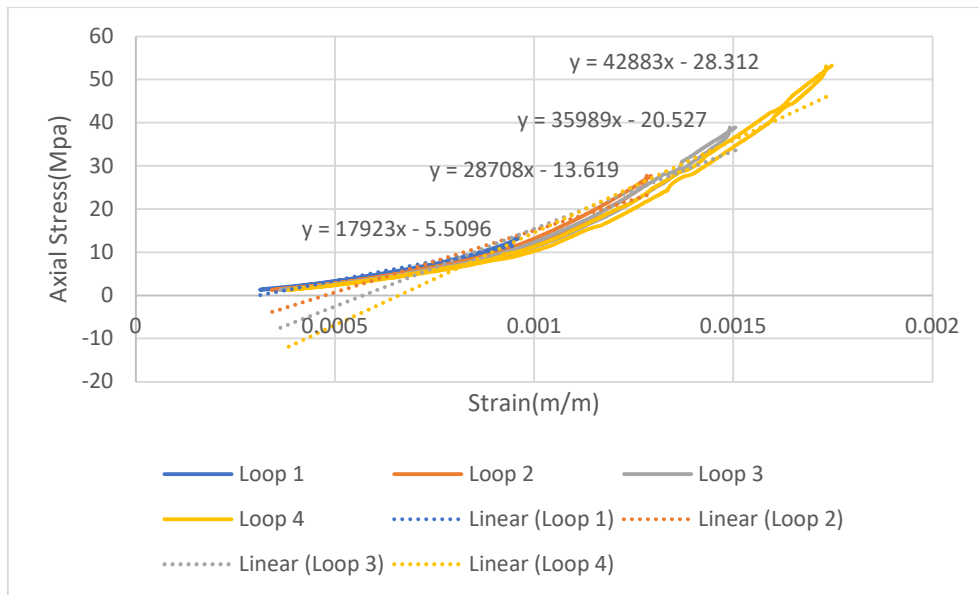
Αριθμός Δοκιμίου	15
Ύψος (cm)	8.32
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	82.1



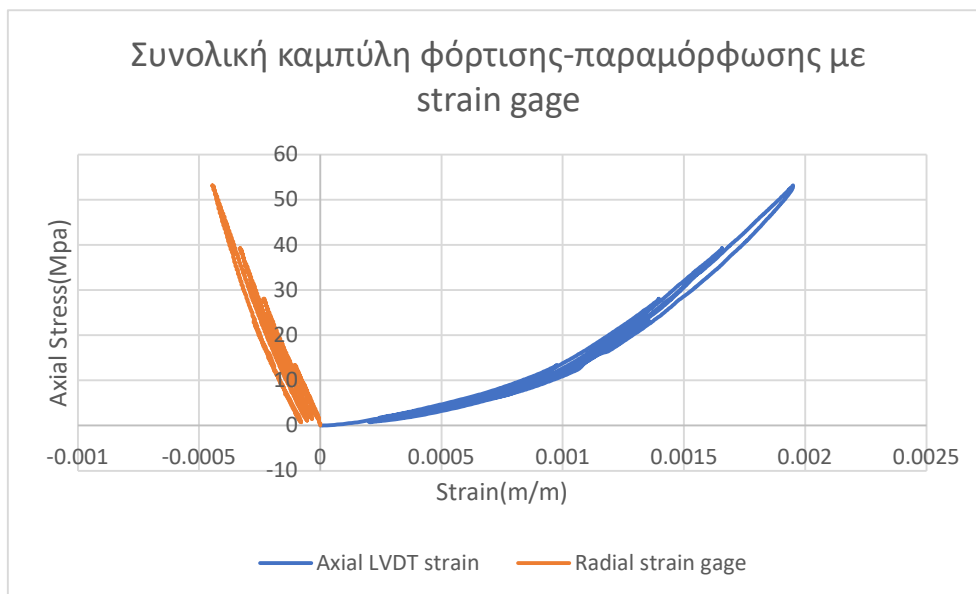
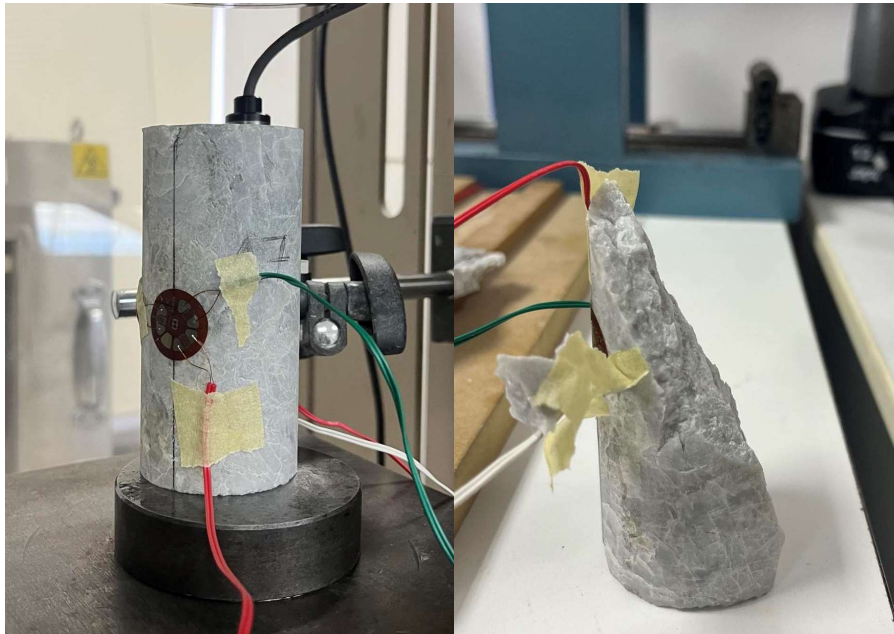


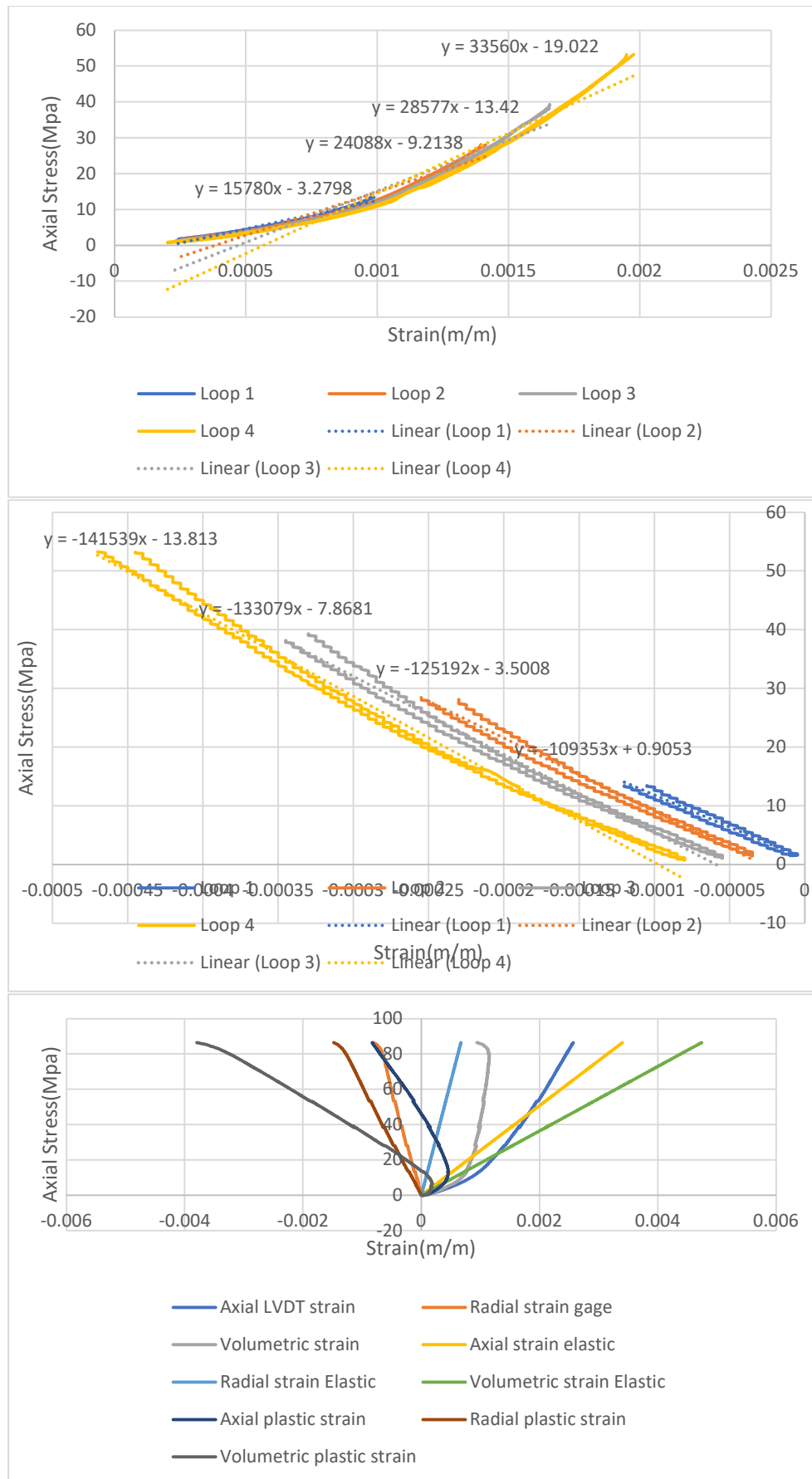
Αριθμός Δοκιμίου	16
Ύψος (cm)	10.57
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	116.83

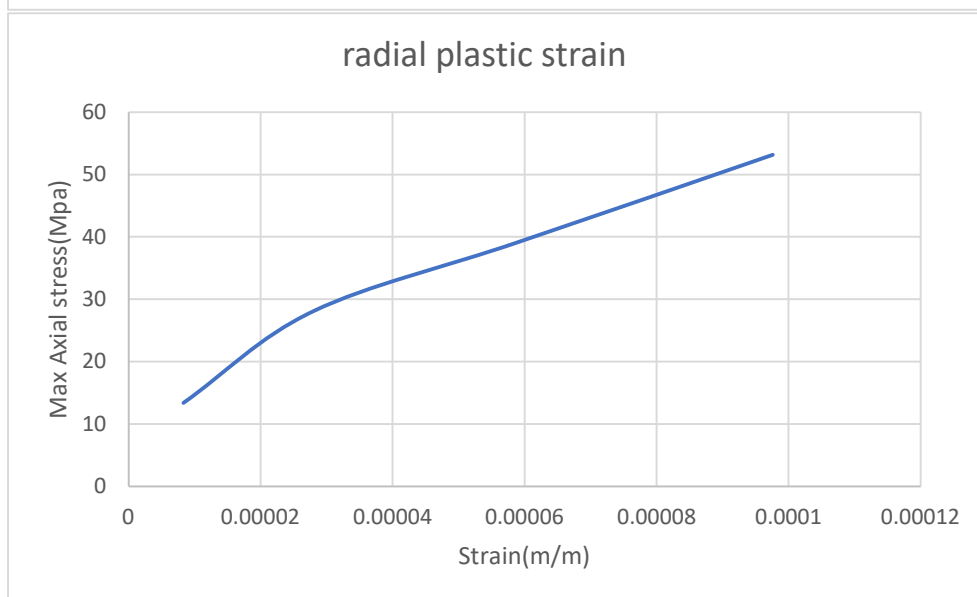
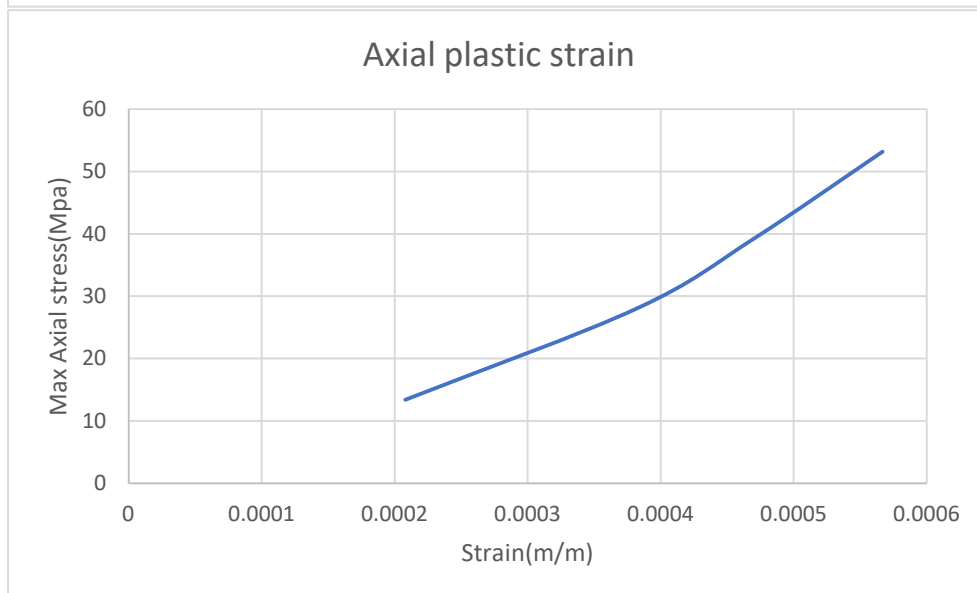
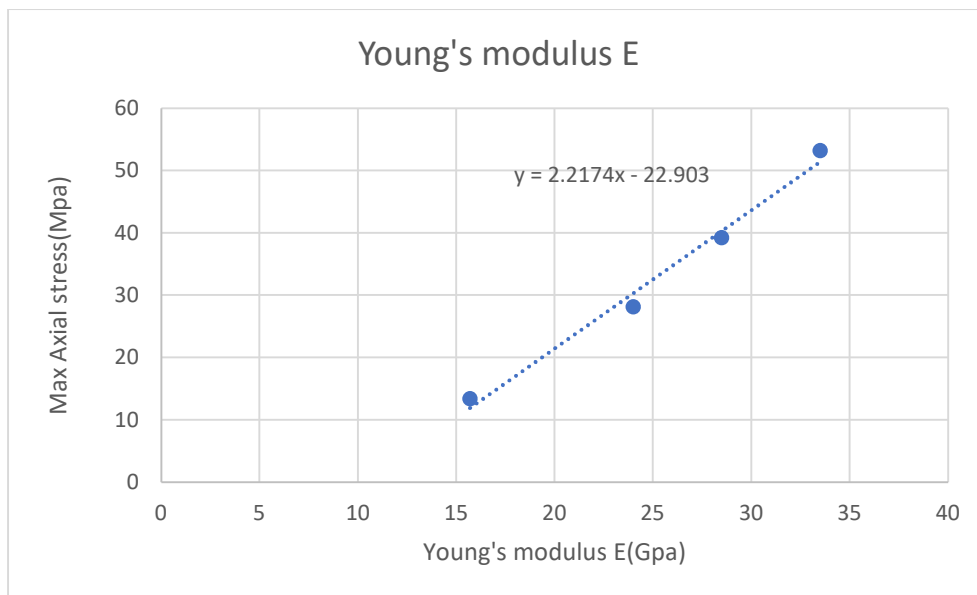




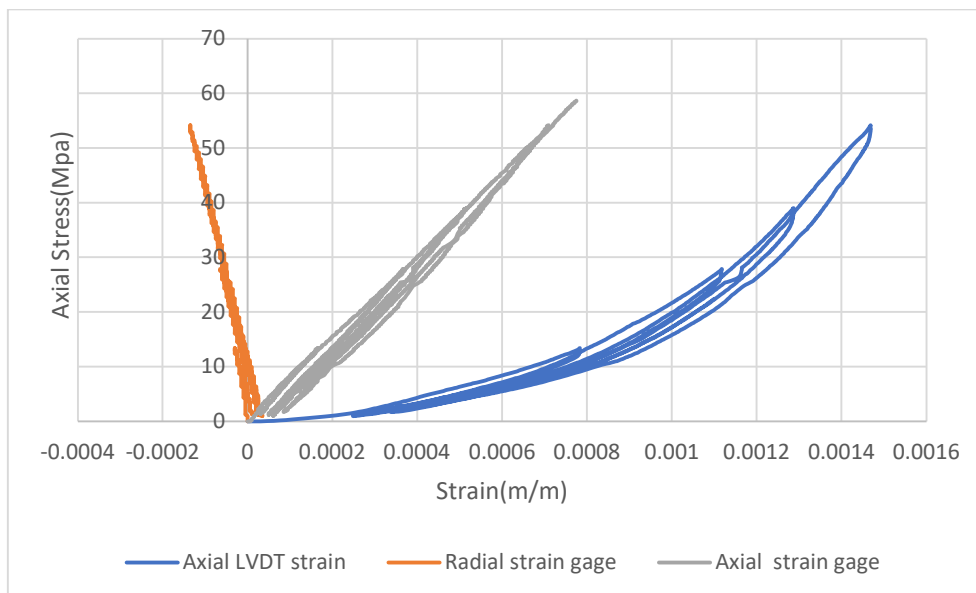
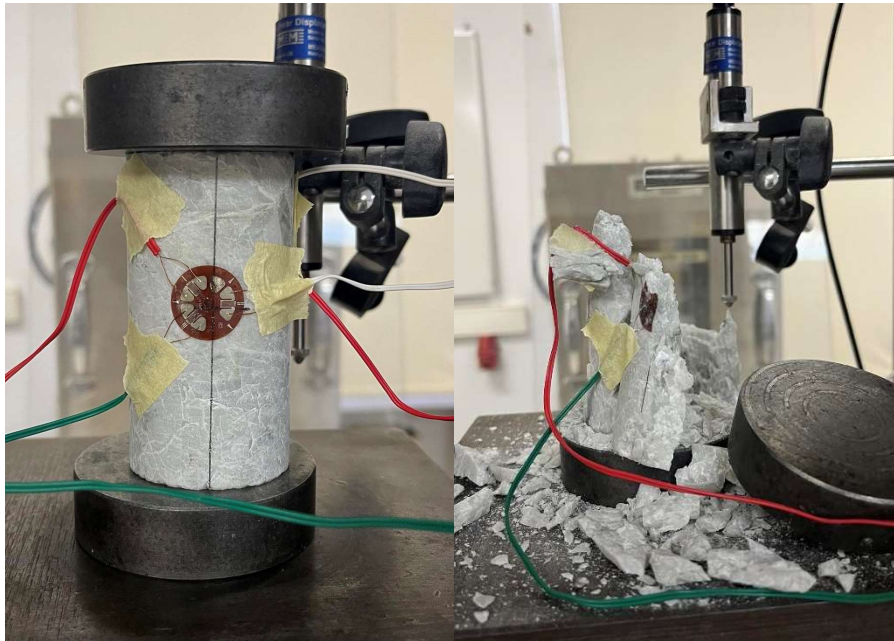
Αριθμός Δοκιμίου	17
Ύψος (cm)	10.32
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	86.49

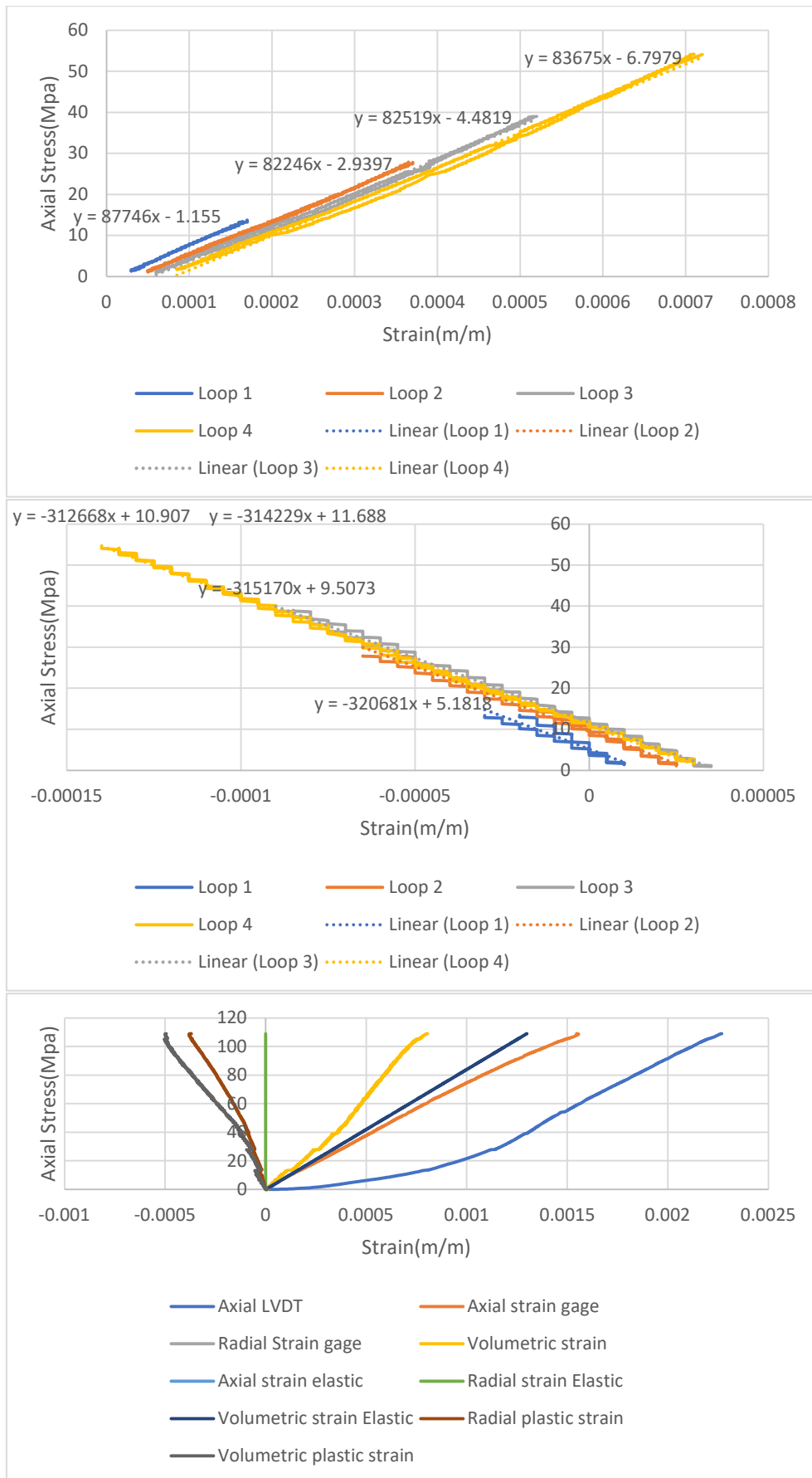


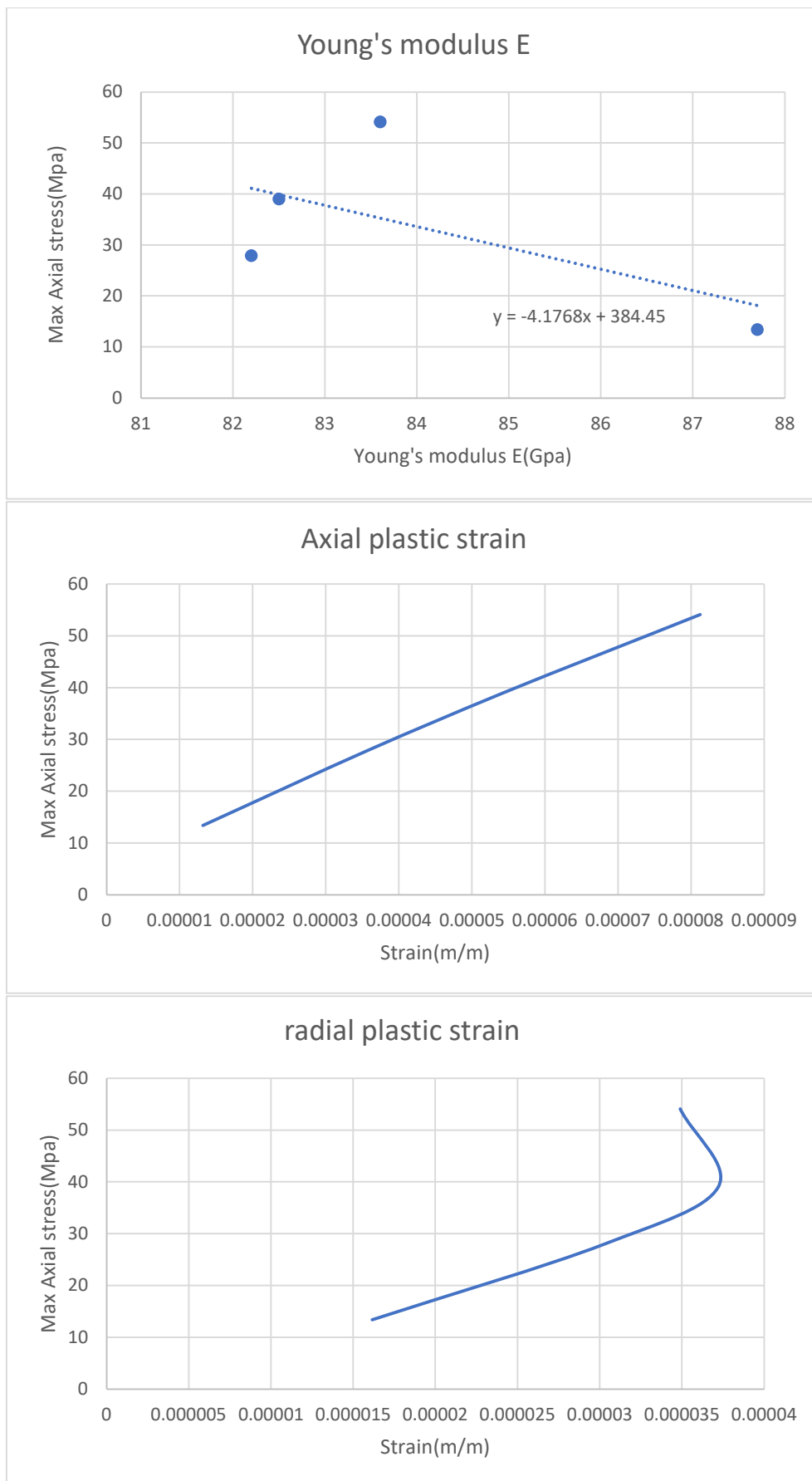




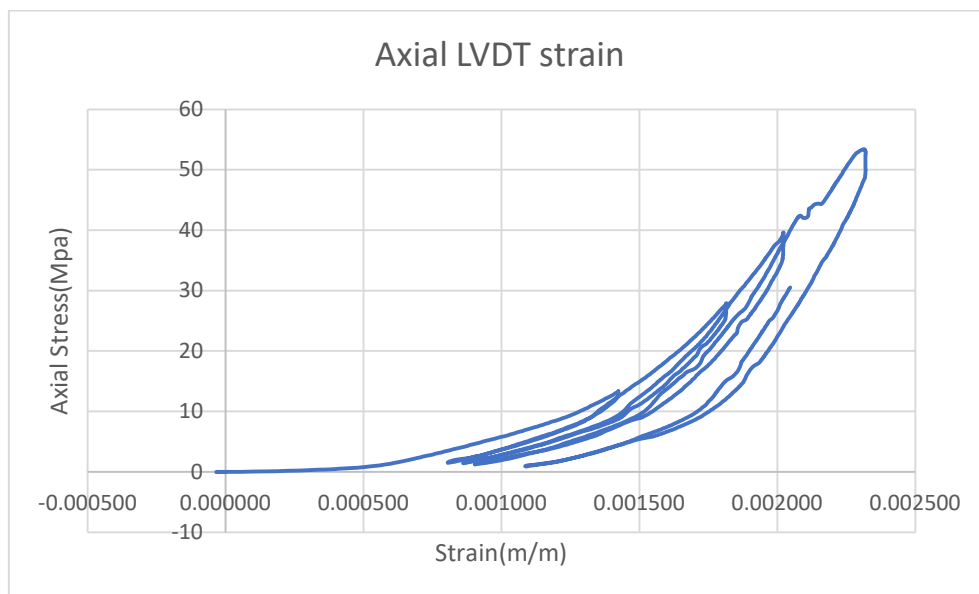
Αριθμός Δοκιμίου	19
Ύψος (cm)	8.99
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	109.9

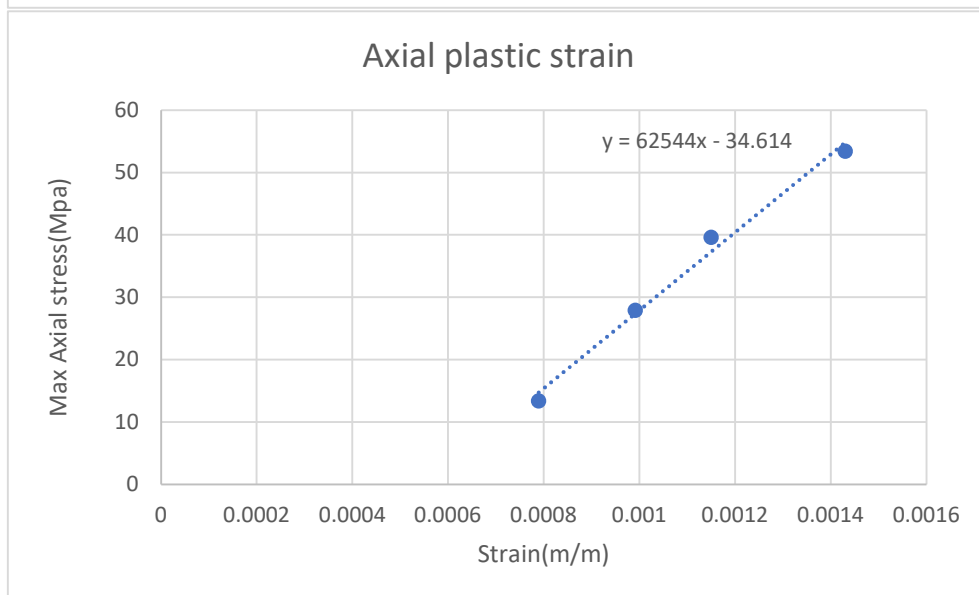
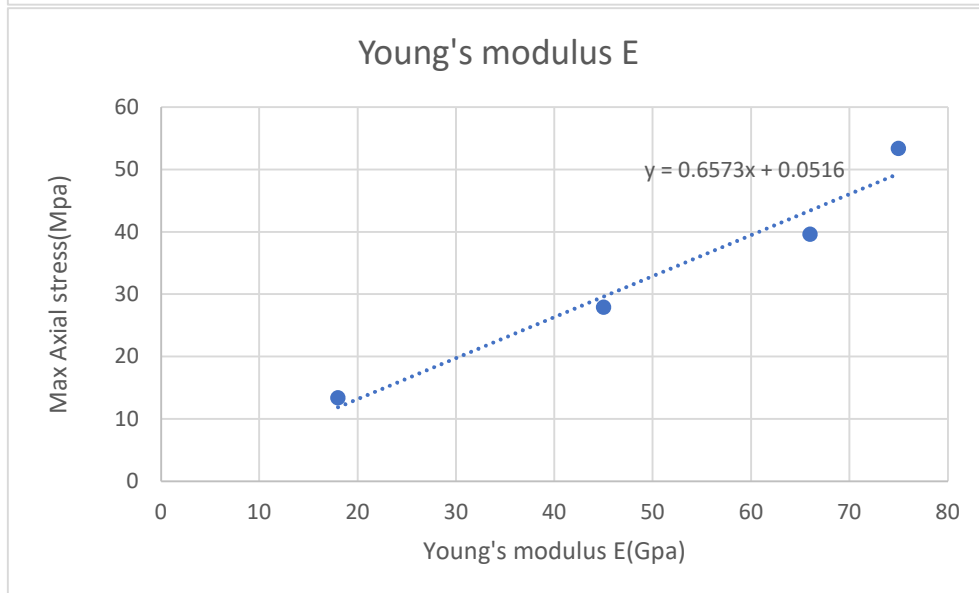
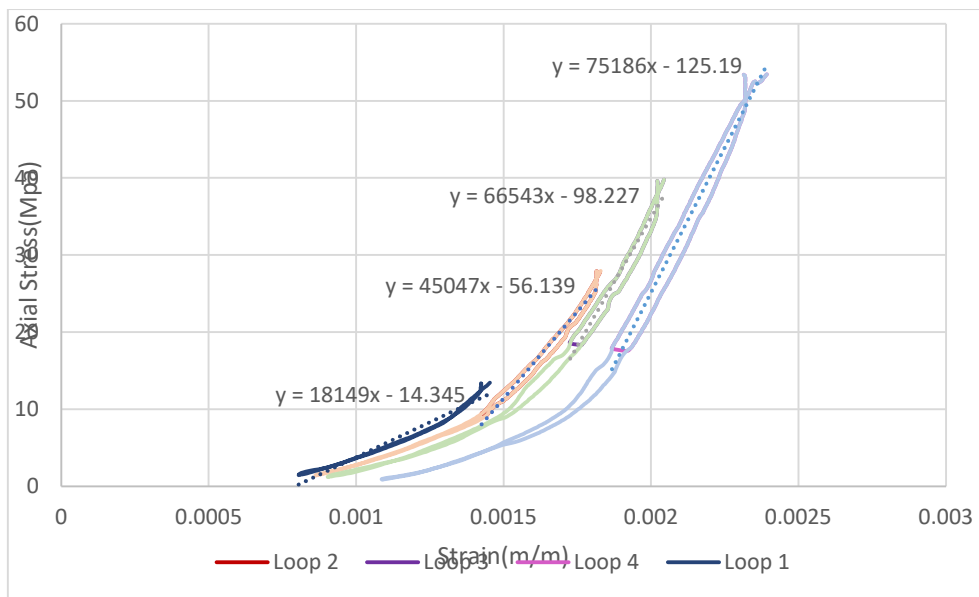




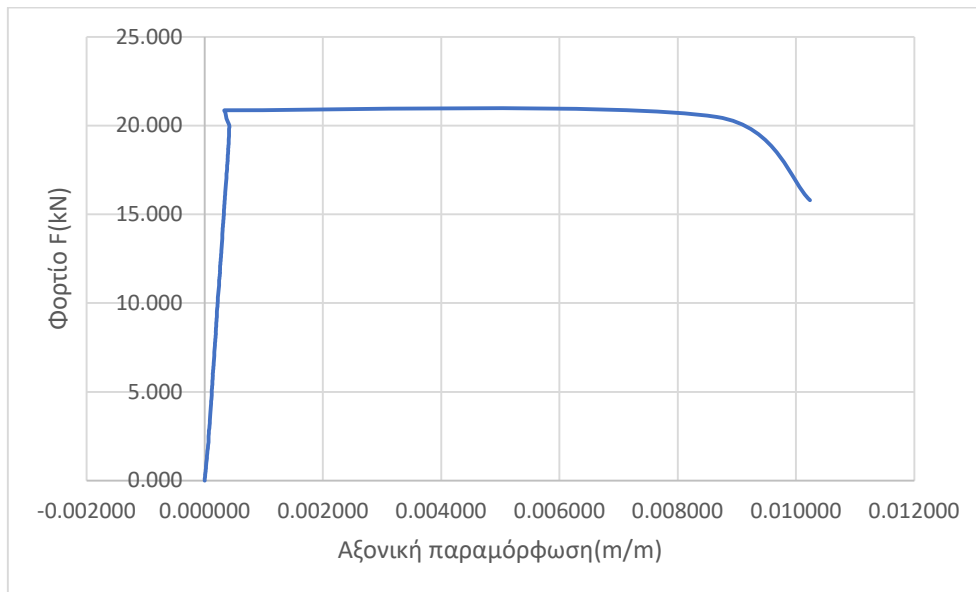
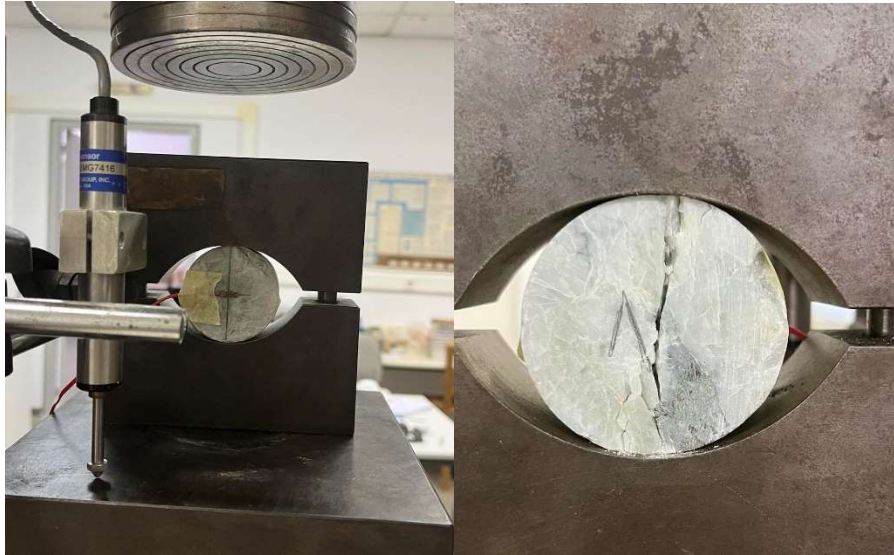


Αριθμός Δοκιμίου	20
Ύψος (cm)	9.09
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Μονοαξονική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	57.90

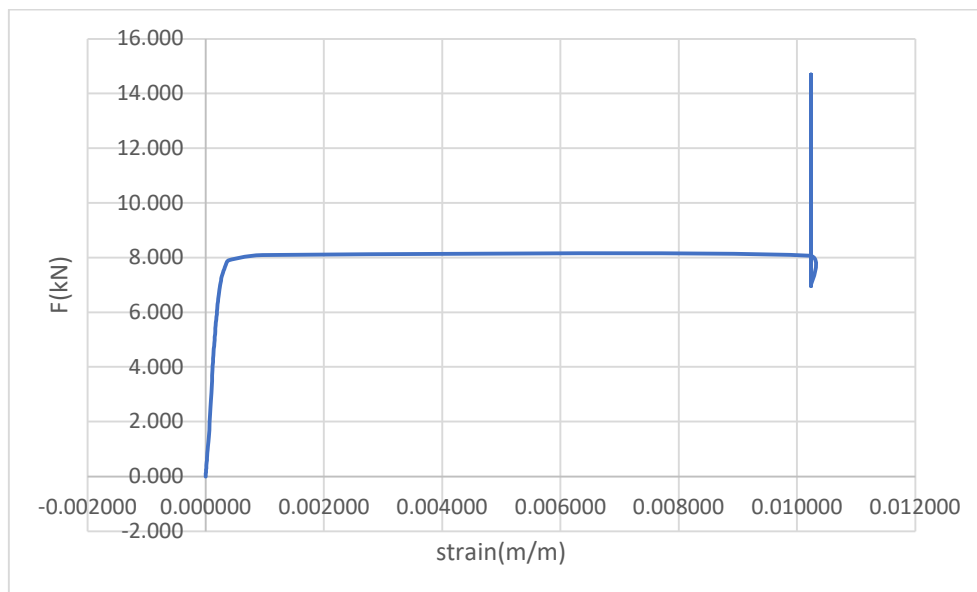
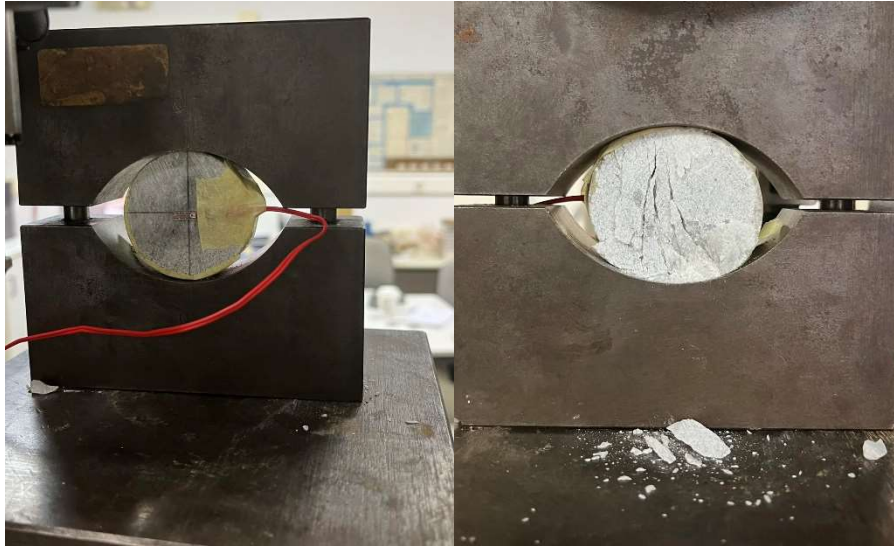




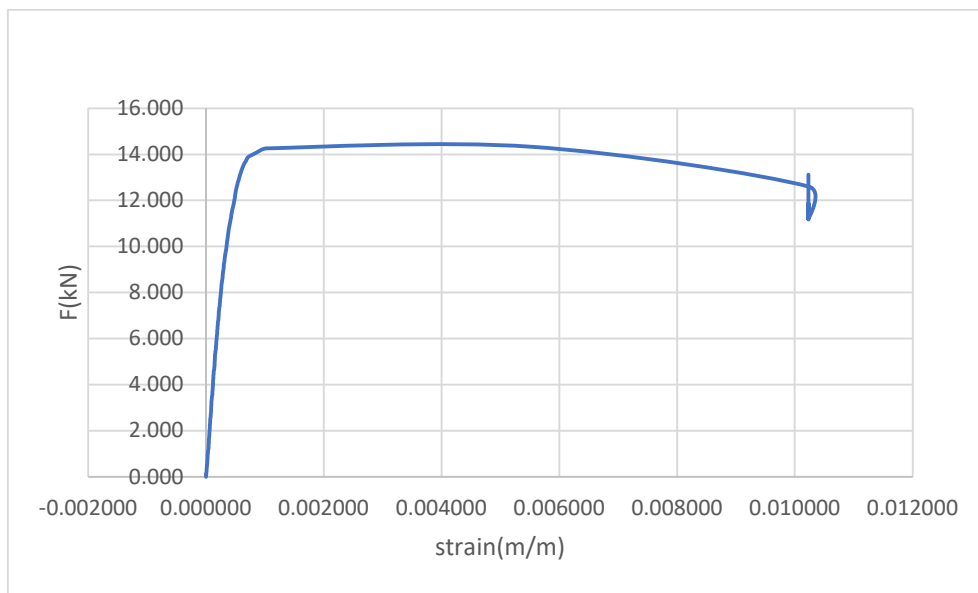
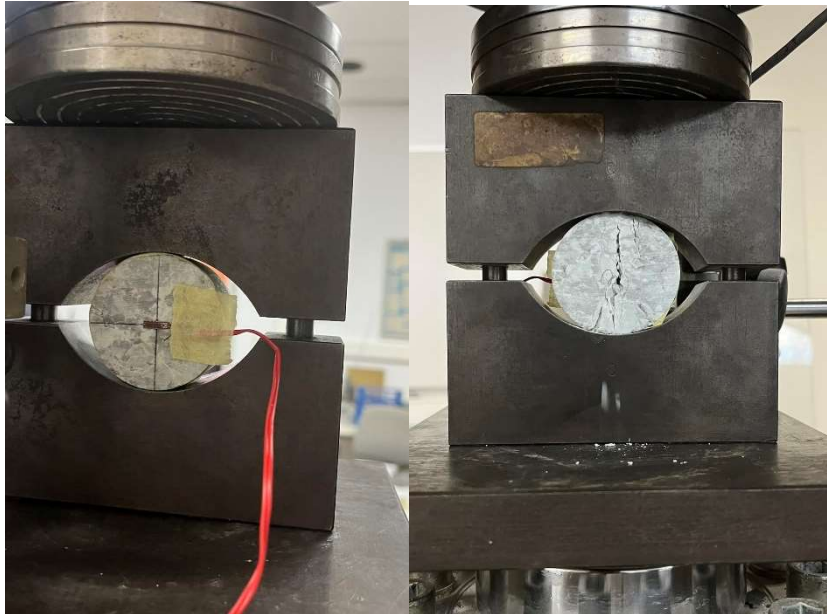
Αριθμός Δοκιμίου	1
Ύψος (cm)	2.93
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Ανδισιαμετρική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	9.35



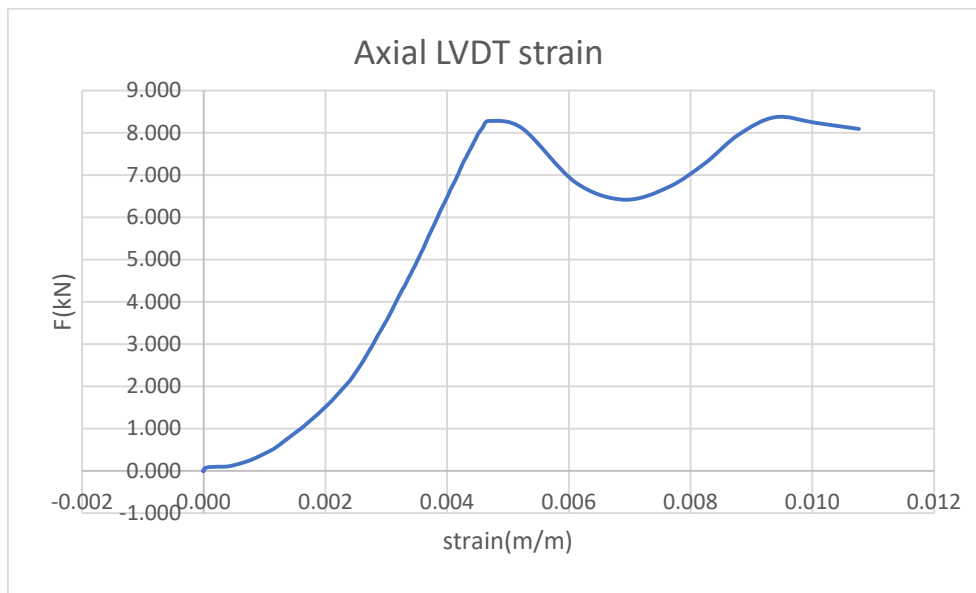
Αριθμός Δοκιμίου	2
Ύψος (cm)	2.48
Διάμετρος (cm)	4.73
Είδος δοκιμής	Ανδριαμετρική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	4.40



Αριθμός Δοκιμίου	3
Ύψος (cm)	2.97
Διάμετρος (cm)	4.75
Είδος δοκιμής	Ανδριαμετρική θλίψη
Μετρητικά	LVDT και strain gage
Μέγιστη τάση (MPa)	5.46



Αριθμός Δοκιμίου	4
Ύψος (cm)	2.72
Διάμετρος (cm)	4.72
Είδος δοκιμής	Ανδριαμετρική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (Mpa)	4.03



Αριθμός Δοκιμίου	5
Ύψος (cm)	2.58
Διάμετρος (cm)	4.77
Είδος δοκιμής	Ανδριαμετρική θλίψη
Μετρητικά	LVDT
Μέγιστη τάση (MPa)	4.71

