



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΨΑΘΥΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΡΩΓΜΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΥΤΙΛΗΝΑΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
Επιβλέπων Καθηγητής : Παύλος Νομικός

ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΨΑΘΥΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΡΩΓΜΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή/...../2018

Νομικός Παύλος, Αν. Καθηγητής(Υπογραφή)

Μπενάρδος Ανδρέας, Αν. Καθηγητής(Υπογραφή)

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής (Υπογραφή)

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια προπτυχιακών σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 με θέμα «Διάδοση της θραύσης σε φυσικά μοντέλα ψαθυρών υλικών με ρωγμές». Το πειραματικό μέρος διεξήχθη στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων. Για την ομαλή διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κύριο Π. Νομικό , Αν. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών για την συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου, και ειδικότερα τον κύριο Γεώργιο Παπαντωνόπουλο και τους Υποψήφιους Διδάκτορες Μ. Λοτίδη ,Δ. Κοτσάνη για τη βοήθεια και την υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής Εργασίας μου και για όλες τις συμβουλές τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένειά μου για την κατανόηση και τη βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση του τρόπου αστοχίας ψαθυρών υλικών με ρωγμές. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται οι ορισμοί που χρησιμοποιούνται στη διπλωματική εργασία καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί ως σήμερα για τη μελέτη της συμπεριφοράς της βραχομάζας με ασυνέχειες.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθείται μία σειρά δοκιμών για το χαρακτηρισμό του υλικού.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια με τεχνητές ασυνέχειες.

Τέλος , στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τις δοκιμές.

Abstract

This thesis investigates the failure modes of jointed rock mass models.

The first chapter is the introduction, where all the relevant terms are defined.

In the second chapter, there is a bibliographic review of the experiments that have been carried out so far to study the behavior of jointed rock mass. The purpose of these experiments was to define the parameters that affect the jointed rock strength and to observe the failure mechanisms.

In the third chapter different tests were carried out for the characterization of the material that we used.

In the fourth and fifth chapters uniaxial compressive tests are performed in gypsum specimens with preexisting cracks.

Finally, the 6th chapter presents the conclusions that we reached during the tests.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	13
Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	15
1.1 Εισαγωγή.....	16
1.2 Μονοαξονική Θλίψη.....	20
1.2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	20
1.2.2 Συμπεριφορά δοκιμίου κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	23
1.2.3 Τύποι καταστροφής στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	24
1.3 Θεωρίες θραυστομηχανικής και δυσθραυστότητα.....	26
1.3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο θραυστομηχανικής.....	26
1.3.2 Δοκιμή Δυσθραυστότητας.....	33
1.4 Ακουστική Εκπομπή.....	38
1.5 Κατηγοριοποίηση των ρωγμών.....	43
1.5.1 Martinez (1999).....	43
1.5.2 Einstein n Wong (2008).....	44
Κεφάλαιο 2 Ανασκόπηση Προγενέστερων Πειραμάτων	47
2.1 Εισαγωγή.....	48
2.2 Μονοαξονικές δοκιμές.....	49
2.2.1 Δοκιμές των Goldstein et al. (1966).....	49
2.2.2 Δοκιμές του Lama (1974).....	49
2.2.3 Δοκιμές των Singh et al. (2002).....	51
2.2.4 Πείραμα των Chen Xin, Liao Zhihong και Peng Xi (2012).....	53
2.2.5 Δοκιμές των Guansheng Han, Hongwen Jing, Yujing Jiang, Richeng Liu, Haijian Su και Jiangyu Wu (2018).	56
2.3 Διαξονικές και τριαξονικές δοκιμές.....	59
2.3.1 Δοκιμές των Brown (1970), Brown and Trollope (1970) και Brown and	

Hudson (1972)	59
2.3.2 Δοκιμές των Einstein et al. (1970) και Einstein and Hirschfield (1973)	62
2.3.3 Δοκιμές των Ladanyi and Archambault (1972, 1980)	63
2.3.4 Δοκιμές των Bandis et al. (1981) και Bandis (1990)	65
2.3.5 Δοκιμές των Szymakowski et al. (2003)	66
2.3.6 Δοκιμές των Meyers and Priest (1992)	66
2.3.7 Δοκιμές των Kulatikale et al. (2001)	67
2.3.8 Δοκιμές των Sint Jan and Prudencio (2003).....	68
2.3.9 Δοκιμές των Yaji (1984) and Arora (1987).....	68
2.3.10 Δοκιμές των Reik and Zacas (1978).....	69
Κεφάλαιο 3 Χαρακτηρισμός του υλικού και προετοιμασία δοκιμών	71
3.1 Προετοιμασία δοκιμών	72
3.2 Πειραματικές διατάξεις και όργανα	72
3.3 Εφελκυστική Αντοχή	76
3.4 Ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος	78
3.5 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή	78
3.5.1 Κυλινδρικά Δοκίμια.....	78
3.5.2 Πρισματικά Δοκίμια.....	80
3.6 Δοκιμή Δυσθραυστότητας	81
Κεφάλαιο 4 Δοκίμια με συνεπίπεδες ασυνέχειες	84
4.1 Δοκίμια με μία ασυνέχεια	85
4.1.1 Δοκίμιο P11	86
4.1.2 Δοκίμιο P12	90
4.1.3 Δοκίμιο P13	94
4.2 Δοκίμια με δύο ασυνέχειες	98
4.2.1 Δοκίμιο S1	98
4.2.2 Δοκίμιο S2	102
4.2.3 Δοκίμιο 2S2	108
Κεφάλαιο 5 Δοκίμια με μη συνεπίπεδες ασυνέχειες	116
5.1 Δοκίμια με 2 ασυνέχειες	117
5.1.1 Δοκίμιο N1	117
5.1.2 Δοκίμιο N2	121
5.2 Δοκίμια με τρεις τεχνητές ασυνέχειες	126
5.2.1 Δοκίμιο 3N1	126
5.2.2 Δοκίμιο 3N2	132

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Απεικόνιση γεωμετρικών παραμέτρων των ασυνεχειών (Σοφιανός & Νομικός, 2008)....	18
Σχήμα 2: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής, αξονικής τάσης-διαμετρικής τροπής (Νομικός 2015).....	21
Σχήμα 3: Στάδια μικρορωγμάτωσης και παραμόρφωσης δοκιμίου κατά τη μονοαξονική θλίψη (Νομικός 2015).	23
Σχήμα 4: Τρόποι καταστροφής πετρώματος σύμφωνα με την απόκρισή του (Σοφιανός & Νομικός, 2008).....	24
Σχήμα 5: ελλειπτική ρωγμή μήκους 2α σε μια άπειρη επιφάνεια υφιστάμενη εφελκυστικό εντατικό πεδίο (Anderson 2005)	26
Σχήμα 6: Τύποι φόρτισης των άκρων μίας μικρορωγμής (Anderson 2005)	28
Σχήμα 7: Προσδιορισμός της αρχής των συντεταγμένων στα άκρα μίας ρωγμής (Anderson 2005)	30
Σχήμα 8: Ρωγμή μήκους 2α μέσα σε πλάκα ημιαπείρων διαστάσεων για την γενική περίπτωση όπου η κύρια τάση δεν είναι κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής (Anderson, 2005).....	31
Σχήμα 9: Έναρξη και διάδοση πλευρικών μικρορωγμών στα άκρα μίας προϋπάρχουσας ολισθαίνουσας μικρορωγμής (Σοφιανός & Νομικός 2008).....	32
Σχήμα 10: Η γεωμετρία του Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή chevron – CCNBD (Fowell et al, 2006).	33
Σχήμα 11: Γεωμετρία εγκοπής σε CCNBD δοκίμιο (K.Kaklis et al 2017)	34
Σχήμα 12 : Απεικόνιση των διαστάσεων των δύο δοκιμίων (K.Kaklis et al 2017).....	36
Σχήμα 13: Αδιάστατος συντελεστής έντασης τάσεων για CCNBD,CSTBD δοκίμια(K.Kaklis et al 2017)	38
Σχήμα 14 : Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης ΑΕ (Κατσικογιάννη κ.ά., 2007).....	39
Σχήμα 15 : Τυπική μορφή α) κρουστικού κύματος και β) συνεχούς κύματος (Σοφιανός & Νομικός, 2008).....	40
Σχήμα 16 : Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Σοφιανός & Νομικός, 2008).....	40
Σχήμα 17 :Σχέση αντοχής βραχομάζας – αντοχής άρρηκτου υλικού (Goldstein et al. 1966).....	49
Σχήμα 18: Φυσικά ομοιώματα για την διεξαγωγή δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (Lama, 1974)	50
Σχήμα 19 : Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμίων (Lama, 1974)	50

Σχήμα 20 : Επίδραση της κλίσης και της εμμόνης των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμίων (Lama,1974).....	51
Σχήμα 21: Φυσικά δοκίμια ρωγματωμένης βραχομάζας (M. Singh et al., 2002).....	52
Σχήμα 22: Συσχέτιση βαθμού αλληλεμπλοκής με την αντοχή των δοκιμίων (M. Singh et al., 2002)	53
Σχήμα 23:Απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών (Chen Xi,2012).....	53
Σχήμα 24: Διάγραμμα του λόγου της παραμένουσας προς τη μέγιστη αντοχή με το συντελεστή εμμόνης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Chen Xi,2012).....	54
Σχήμα25: Διάγραμμα παραμόρφωσης πρώτης κορυφής με το συντελεστή εμμόνης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Chen Xi,2012).....	55
Σχήμα 26: Απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου σε (a) μονοαξονική,(b) διαξονική δοκιμή (Guansheng Han et al 2018).....	56
Σχήμα 27: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής για διαφορετικές γωνίες κλίσης στη μονοαξονική (Guansheng Han et al 2018).....	57
Σχήμα 28:Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής για διαφορετικές γωνίες κλίσης στη διαξονική δοκιμή (Guansheng Han et al 2018).....	58
Σχήμα 29:Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής και χτύποι ακουστικής εκπομπής. (Guansheng Han et al 2018).....	58
Σχήμα 30 : Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (1970).....	60
Σχήμα 31 : Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμίων (Brown and Trollope, 1970).....	61
Σχήμα 32 : Εξεταζόμενα δοκίμια (Einstein and Hirschfield ,1973)	62
Σχήμα 33 : Αποτελέσματα δοκιμών σε ρωγματωμένα δοκίμια (Meyers and Priest , 1992)	67
Σχήμα 34 : Χαρακτηριστικός τρόπος αστοχίας δοκιμίου (Sint Jan and Prudencio 2003)	68
Σχήμα 35 : Αντοχή σε σχέση με την γωνία κλίσης της ασυνέχειας και την τιμή της πλευρικής πίεσης (Aroga, 1987)	69
Σχήμα 36 : Επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή (Reik and Zacas, 1978)	70
Σχήμα 37 : (α) αισθητήρας, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Σοφιανός & Νομικός, 2008).	73
Σχήμα 38: Μονάδα επεξεργασίας ηλεκτρικών σημάτων	74
Σχήμα 39: κάρτα οχτώ καναλιών PCI – 8	74
Σχήμα 40: Καμπύλη τάσης – χρόνου στη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	77
Σχήμα 41: Καμπύλη αξονικής τάσης – χρόνου.....	79
Σχήμα 42: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής , αξονικής τάσης – διαμετρικής τροπής ..	79
Σχήμα 43:Διάγραμμα αξονικής τάσης –χρόνου των δύο δοκιμίων	81

Σχήμα 44: Διάγραμμα τάσης-χρόνου με απεικόνιση τη στιγμή δημιουργίας των εφελκυστικών ρωγμών.....	89
Σχήμα 45: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής.....	89
Σχήμα 46: Διάγραμμα τάσης-χρόνου με απεικόνιση τη στιγμή δημιουργίας των εφελκυστικών ρωγμών.....	91
Σχήμα 47: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής δοκιμίου PI2	92
Σχήμα 48: Διάγραμμα ΑΕ του δοκιμίου PL2	92
Σχήμα 49: Διάγραμμα αξονική τάση-χρόνος	95
Σχήμα 50: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής δοκιμίου PI3	95
Σχήμα 51: Διάγραμμα ΑΕ του δοκιμίου PL3	96
Σχήμα 52: Διάγραμμα αξονική τάση – χρόνος του αρρηκτου υλικού και των δοκιμίων PI1,PI2,PI3	97
Σχήμα 53: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου δοκιμίου S1	101
Σχήμα 54: Διάγραμμα αξονικής τάσης – τροπής δοκιμίου S1	101
Σχήμα 55: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου δοκιμίου S2	107
Σχήμα 56: Διάγραμμα αξονικής τάσης – τροπής δοκιμίου S2	107
Σχήμα 57: Απεικόνιση σημάτων κατά τη μονοαξονική δοκιμή δοκιμίου S2	107
Σχήμα 58: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου δοκιμίου 2S2.....	113
Σχήμα 59: Διάγραμμα αξονικής τάσης – τροπής δοκιμίου 2S2.....	113
Σχήμα 60: Απεικόνιση σημάτων κατά τη μονοαξονική δοκιμή δοκιμίου 2S2	114
Σχήμα 61: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δοκιμίων S1,S2,2S2	115
Σχήμα 62: Διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου.	120
Σχήμα 63: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής	121
Σχήμα 64: Διάγραμμα παραμετρικό-χτύποι	121
Σχήμα 65: Διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου	123
Σχήμα 66: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής	124
Σχήμα 67 : Απεικόνιση Αποτελεσμάτων δοκιμίων N1,N2	125
Σχήμα 68: Διάγραμμα αξονικής τάσης –χρόνου με τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου.	130
Σχήμα 69: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής	130
Σχήμα 70: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου 3N1	131
Σχήμα 71: Διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου με τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου.	134
Σχήμα 72: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής	134
Σχήμα 73: Διάγραμμα ακουστικών εκπομπών	135
Σχήμα 74: Αποτελέσματα δοκιμών για τα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες 3N1,3N2	136

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακα 1: Προτεινόμενοι γεωμετρικοί παράμετροι από την ISRM (Fowell et al, 1995).....	34
Πίνακας 2: Προσδιορισμός συνετελεστών u,v . (Fowell et al, 1995).....	37
Πίνακας 3: Τύποι συνένωσης προϋπάρχουσων ασυνεχειών σε δοκίμια γρανίτη και μαρμάρου (Martinez 1999)	43
Πίνακας 4 : Ανάπτυξη μικρορωγμών στα άκρα προϋπάρχουσας ασυνέχειας (Einstein & Wong (2008))	44
Πίνακας 5 :Κατηγορίες συνένωσης (Einstein & Wong (2008))	46
Πίνακας 6: Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.....	57
Πίνακας 7: Αποτελέσματα δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης	76
Πίνακας 8:Ταχύτητα διάδοσης κυλινδρικών δοκιμίων	78
Πίνακας 9: Προσδιορισμός πυκνότητας δοκιμίων	80
Πίνακας 10 : Αποτελέσματα δοκιμής σε CSTBD δοκίμια	82
Πίνακας 11: Πυκνότητα δοκιμίων με μία ασυνέχεια	85
Πίνακας 12: Πυκνότητα δοκιμίων S1,S2	98
Πίνακας 13: Απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμίων S1,S2,2S2	114
Πίνακας 14: Απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμίων P11,P12,P13	115
Πίνακας 15:Οι πυκνότητες των πρισματικών δοκιμίων N1,N2	117
Πίνακας 16:Παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμίων N1.N2	124
Πίνακας 17 :Πυκνότητες δοκιμίων 3N,3N2	126
Πίνακας 18: Αποτελέσματα δοκιμών για τα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες 3N1,3N2	136

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Βραχομάζα και ακέραιο πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2002).....	17
Εικόνα 2: Απεικόνιση κατολίσθησης στον ταμιευτήρα του φράγματος Vajont(British Dam Society).....	19
Εικόνα 3:Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης(Νομικός 2015).....	21
Εικόνα 4: Εκτασιόμετρο τύπου αλυσίδας(Νομικός 2015).....	22
Εικόνα 5 : Παρατήρηση αστοχίας δοκιμίου. (Chen Xi,2012).....	55
Εικόνα 6: α)σχισμός,β)διάτμηση, γ)διάτμηση, δ)επίπεδη ολίσθηση, (Guansheng Han et al 2018)..	59
Εικόνα 7: Τρόποι αστοχίας των δοκιμίων (Brown, 1970)	61
Εικόνα 8:Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμίων (Ladanyi and Archambault, 1972)	63
Εικόνα 9: Προοδευτική δημιουργία ζωνών περιστροφικής παραμόρφωσης (Bandis et. al., 1981) .	65
Εικόνα 10: Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμίων (Kulatilake et al., 2001).....	67
Εικόνα 11:Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	77
Εικόνα 12: Ρωγμές παράλληλες με τον άξονα φόρτισης κατά την αστοχία του δοκιμίου	77
Εικόνα 13: Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	80
Εικόνα 14: Διάταξη πρισματικού δοκιμίου για τη δοκιμή μοσαξονικής θλίψης.....	81
Εικόνα 15 : Αισθητήρες Pico (αριστερά)και R15(δεξιά).....	82
Εικόνα 16 : Δοκίμιο κατά τη δοκιμή.	83
Εικόνα 17: Αστοχία δοκιμίου και δημιουργία ρωγμών με τον άξονα φόρτισης.	83
Εικόνα 18:Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	86
Εικόνα 19: α)δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών (wing cracks), β) διάδοση των ρωγμών, γ) αστοχία του δοκιμίου.	87
Εικόνα 20: Δοκίμιο P12 πριν την έναρξη της δοκιμής	90
Εικόνα 21: α)έναρξη τη δοκιμής, β) διάδοση των εφελκυστικών ρωγμών από τα άκρα της ασυνέχειας.	91
Εικόνα 22:Αστοχία του δοκιμίου P13	94
Εικόνα 23:(α)δημιουργία και διάδοση των εφελκυστικών ρωγμών (wing cracks) (b) δημιουργία δευτερευόντων ρωγμών	94
Εικόνα 24:Διάταξη δοκιμίου S1	98
Εικόνα 25:Στάδια ρωγμάτωσης δοκιμίου	99
Εικόνα 26:Δοκίμιο S2 κατά την αστοχία του.	102
Εικόνα 27:Ρωγμάτωση δοκιμίου S2	103
Εικόνα 28:θράυση του δοκιμίου 2S2	108

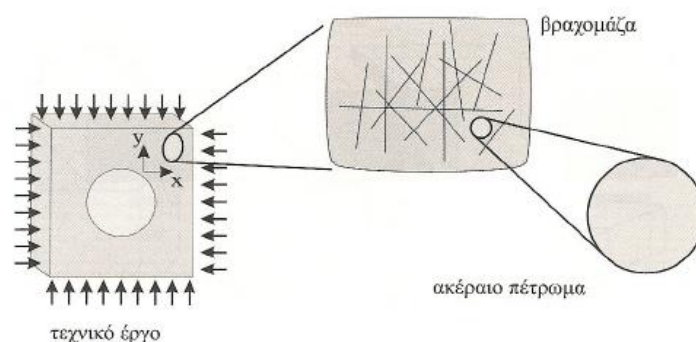
Εικόνα 29: Ρωγμάτωση του δοκιμίου 2S2	109
Εικόνα 30: Δοκίμιο N1	118
Εικόνα 31: Στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου	119
Εικόνα 32: Διάταξη δοκιμίου N2 για τη μονοαξονική δοκιμή	122
Εικόνα 33: Το δοκίμιο N2 σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	122
Εικόνα 34: Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	126
Εικόνα 35: Δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών	127
Εικόνα 36: α) διάδοση διατμητικών ρωγμών β) συνένωση διατμητικών	128
Εικόνα 37: αστοχία σε διάτμηση	129
Εικόνα 38: Δοκίμιο 3N2 πριν την έναρξη της δοκιμής	132
Εικόνα 39: Στάδια θραύσης δοκιμίου 3N2	133
Εικόνα 40: Δημιουργία διατμητικών ρωγμών στο δοκίμιο 3N2	135
Εικόνα 41: Τρόποι θραύσης δοκιμίων	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός τεχνικού έργου σε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς προϋποθέτει τη διερεύνηση όλων των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν άμεσα τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος. Η ακριβής γνώση των παραγόντων αυτών και το εύρος της πιθανής διακύμανσης τους μπορεί να καθορίσει το πλαίσιο της αναμενόμενης μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος και επομένως να οριοθετήσει τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του τεχνικού έργου.

Η μάζα των πετρωμάτων σπάνια είναι ομοιογενής, ισότροπη και συνεχής. Συνήθως διασχίζεται από ποικίλες επιφάνειες αδυναμίας, είναι ανομοιομορφα καταπονημένη ή αποσαθρωμένη και η απόκριση της σε καταναγκασμούς εξαρτάται από τη διεύθυνση καταπόνησης. Επομένως η απόκριση του πετρώματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων, δηλαδή των άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος και των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Η πολύπλοκη και γενικά τυχαία κατανομή των παραπάνω ιδιοτήτων καθιστά πρακτικά αδύνατη την προσδιοριστική εκτίμηση της απόκρισης του πετρώματος στις καταπονήσεις με βάση την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων. Αντί αυτού, η εκτίμηση της συμπεριφοράς του πετρώματος δύναται να γίνει με τη θεώρησή του ως σύνθετου ομοιογενούς υλικού, με χαρακτηριστικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του στέρεου σώματος. Οι ιδιότητες του σύνθετου αυτού υλικού καθορίζονται από την ταξινόμηση του πετρώματος, που προκειμένου να διακρίνεται από το άρρηκτο πέτρωμα, ονομάζεται βραχομάζα. Τέτοια συστήματα ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί πολλά, επικρατέστερα των οποίων είναι τα συστήματα RMR (Bieniawski, 1989), Q, και GSI. Η δομή του πετρώματος και η ποιότητα της επαφής των ασυνεχειών αποτελούν κύρια χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται η ταξινόμηση και από τα τρία συστήματα.[1]



Εικόνα 1: Βραχομάζα και ακέραιο πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2002).

Ο όρος ασυνέχεια (discontinuity), χαρακτηρίζει κάθε επιφάνεια διαχωρισμού του πετρώματος η οποία έχει πρακτικά μηδενική εφελκυστική αντοχή. Ο όρος είναι γενικός δίχως να συναρτάται με τον τρόπο δημιουργίας της ασυνέχειας, εμπεριέχει δε συγγεντικές και επιγενετικές δομές. Συγγεντικές δομές είναι τα ασθενή επίπεδα διάστρωσης, οι ρωγμές αποξηράνσης και οι λεπποστρώσεις, στα ιζηματογενή πετρώματα, οι διακλάσεις ψύξης στα εκρηξιγενή και τα ασθενή επίπεδα σχιστότητας στα μεταμορφωμένα πετρώματα. Επιγενετικές δομές είναι οι ζώνες εξαλλοίωσης, οι ασθενείς ζώνες, τα ρήγματα (μεταπτώσεις), οι επαφές, οι ολισθηρές επιφάνειες (slickensides) και οι διακλάσεις (ή κατακλάσεις) συνεπεία ορογενετικών κινήσεων ή αποτόνωσης.

Η Διεθνής Εταιρεία Βραχομηχανικής έχει επιλέξει δέκα παραμέτρους (Brown, 1981) για το χαρακτηρισμό των ασυνεχειών και της δομής της βραχομάζας (βλέπε επίσης: Roberts, 1977; Τσουτρέλης, 1985; Hudson, 1989). Αυτές είναι οι εξής :

1. Προσανατολισμός
2. Απόσταση ορθή
3. Εμμονή (ή επιμονή ή ανάπτυξη ή συνέχεια)
4. Αριθμός συνόλων
5. Μέγεθος τεμάχους
6. Τραχύτητα
7. Αντοχή τοιχώματος
8. Άνοιγμα
9. Πλήρωση
10. Διήθηση

Στο σχήμα 1 απεικονίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών.



Σχήμα 1: Απεικόνιση γεωμετρικών παραμέτρων των ασυνεχειών (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Η σωστή εκτίμηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη βραχομάζα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των τεχνικών έργων. Παραδείγματα αστοχιών λόγω

λάθους εκτίμησης της συμπεριφοράς της βραχομάζας υπάρχουν πολλά στη διεθνή βιβλιογραφία όπως η αστοχία της θεμελίωσης του τοξωτού φράγματος Malpasset στη Γαλλία τον (Δεκέμβριο του 1959), η οποία προκάλεσε πλημμύρα στα κατάντη και είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 450 ανθρώπων. Τον Οκτώβριο του 1963, περίπου 2500 άνθρωποι σκοτώθηκαν εξαιτίας μιας κατολίσθησης στον ταμιευτήρα του φράγματος Vajont στην Ιταλία. Τέλος, το 1960, κατάρρευση σύλων σε ανθρακωρυχείο στη Νότια Αφρική είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 432 ατόμων.[1,17]



Εικόνα 2: Απεικόνιση κατολίσθησης στον ταμιευτήρα του φράγματος Vajont (British Dam Society)

1.2 Μονοαξονική θλίψη

1.2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

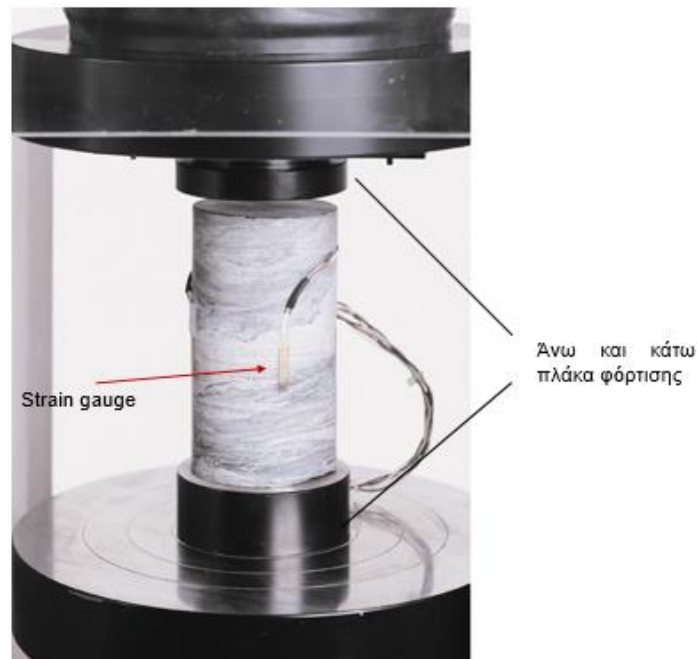
Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι η συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό της αντοχής του πετρώματος, δηλαδή τη μέγιστη τάση στην οποία δύναται να αντέξει ένα πέτρωμα.

Σύμφωνα, με την Επιτροπή προτυποποίησης εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών της ISRM(1979) ,την προδιαγραφή D7012-2010 της ASTM(2010) καθώς και την ελληνική τεχνική προδιαγραφή Ε103-84 για την επίτευξη της δοκιμής τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν σχήμα ορθού κυκλικού κυλίνδρου. Ο λόγος ύψους H προς διάμετρο D πρέπει να είναι μεταξύ 2.5 και 3.0, ενώ η διάμετρος τουλάχιστον ίση με το μέγεθος πυρήνα NX (περίπου 54mm). Οπωσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι 10πλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών, που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου πρέπει να είναι λεία και επίπεδα με μέγιστη απόκλιση 0.02mm και να κόπτονται παράλληλα μεταξύ τους, ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0.001rad.

Η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να μετριέται με ακρίβεια 0.1mm, με τη λήψη του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου, σε ορθή γωνία μεταξύ τους, στο μέσον του δοκιμίου καθώς και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Ο μέσος όρος των έξι αυτών μετρήσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου. Το ύψος του δοκιμίου μετριέται με ακρίβεια 1.0mm.

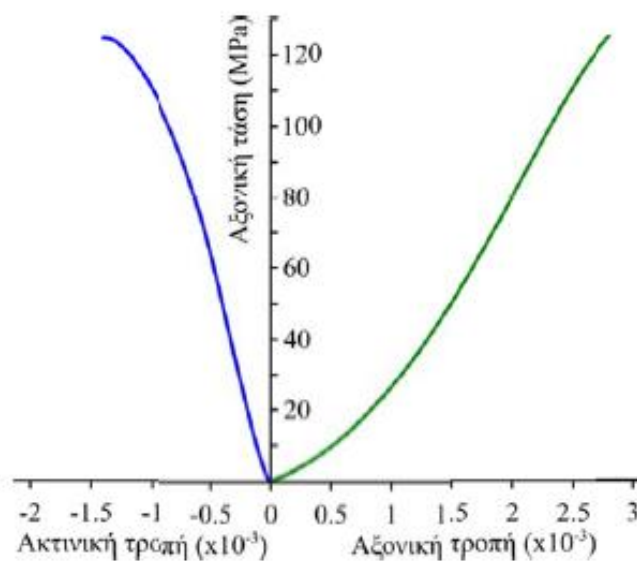
Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές επιτόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν, όμως, οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή τα δοκίμια να είναι σε ξηρά κατάσταση, οπότε οι συνθήκες αυτές της δοκιμής θα πρέπει να αναφέρονται στο δελτίο αποτελεσμάτων. Τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρά κατάσταση πρέπει να τοποθετούνται σε φούρνο σε θερμοκρασία $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ για 24 ώρες.

Στα άκρα του δοκιμίου πρέπει να προσαρμόζονται δυο χαλύβδινες πλάκες κυκλικού σχήματος και σκληρότητας κατά Rockwell όχι μικρότερης από HRC 58. Η μία από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη (Εικόνα 1). Οι πλάκες αυτές θα πρέπει να έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15mm και οι επιφάνειες τους δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0.005mm. Το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση θα πρέπει να είναι κεντραρισμένα σε σχέση με τον άξονα της φόρτισης.[1]



Εικόνα 3: Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Νομικός 2015)..

Από τη δοκιμή προκύπτει διάγραμμα ενεργών τάσεων – τροπών από το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του υλικού. Σε περίπτωση που δεν υφίσταται πίεση του νερού των πόρων, η ενεργή τάση ταυτίζεται με τη δρώσα αξονική δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου. Συνήθως, η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται με τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που επικολλώνται με χρήση ειδικής κόλλας. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση, ενώ ο οριζόντιος μετράει την διαμετρική παραμόρφωση. Ο ρυθμός φόρτισης πρέπει να είναι σταθερός και επιλέγεται έτσι ώστε η θραύση να επιτυγχάνεται σε 5 με 10 λεπτά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.

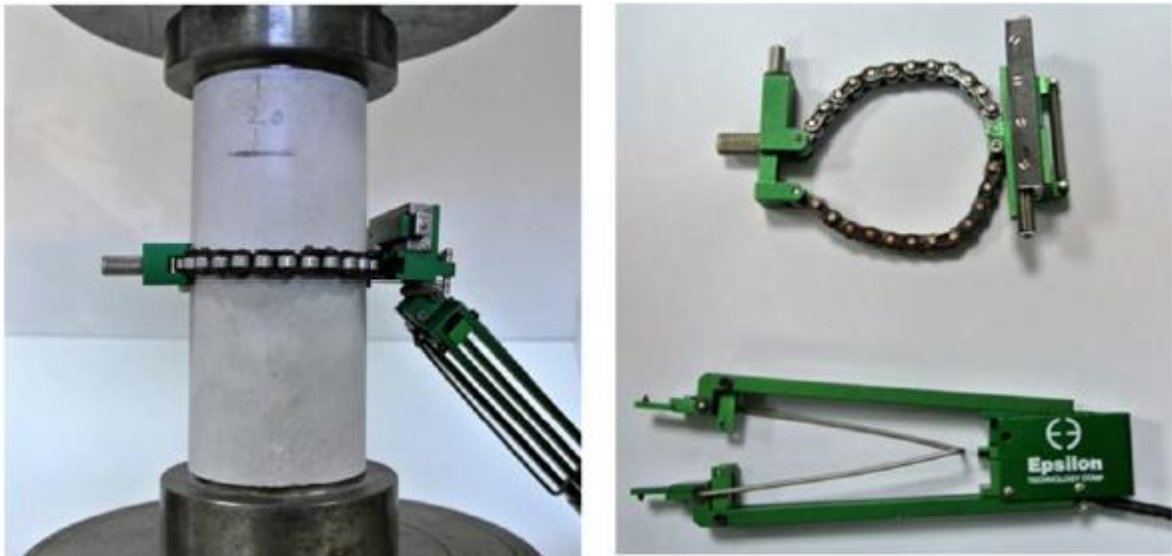


Σχήμα 2: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής, αξονικής τάσης-διαμετρικής τροπής. (Νομικός 2015)

Από την καμπύλη τάσης – τροπής υπολογίζεται το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t , ως η κλίση

της ευθείας που εφάπτεται στην καμπύλη αξονικής τάσης – τροπής στο 50% της μέγιστης τιμής της τάσης. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας $E_{\text{μεσ}}$ υπολογίζεται από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της καμπύλης. Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_T υπολογίζεται ως η κλίση της ευθείας για τιμές τάσης 0 έως 50% της μέγιστης τιμής της τάσης. Τέλος, ο λόγος Poisson υπολογίζεται ως ο λόγος της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης – αξονικής τροπής προς το λόγο της καμπύλης αξονικής τάσης – διαμετρικής τροπής.

Η πραγματοποίηση της δοκιμής με σταθερό ρυθμό φόρτισης οδηγεί σε ανεξέλεγκτη θραύση του δοκιμίου μετά την επίτευξη της μέγιστης τάσης του, καθώς η μηχανή φόρτισης προσπαθεί να επιβάλει μεγαλύτερο φορτίο από αυτό που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο. Με τον έλεγχο της αξονικής βράχυνσης ή της διαμετρικής έκτασης του δοκιμίου είναι δυνατή η περαιτέρω παραμόρφωση του πετρώματος ,με σταδιακά μειούμενο φορτίο, λαμβάνοντας έτσι το πλήρες διάγραμμα φορτίου-βράχυνσης του πετρώματος. Για το λόγο αυτό συχνά χρησιμοποιείται εκτασιόμετρο τύπου αλυσίδας προσαρμοσμένο στο δοκίμιο για τον έλεγχο της αύξησης της περιμέτρου του. Ένα τέτοιου είδους εκτασιόμετρο παρουσιάζεται στην εικόνα 4. [1]



Εικόνα 4: Εκτασιόμετρο τύπου αλυσίδας(Νομικός 2015).

1.2.2 Συμπεριφορά δοκιμίου κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Στα πετρώματα υπάρχουν προϋπάρχουσες ρωγμές, οι οποίες κατά τη φόρτιση ενός δοκιμίου διαδίδονται με αποτέλεσμα τη τελική θλίψη του. Με τη βοήθεια της τεχνικής ακουστικής εκπομπής

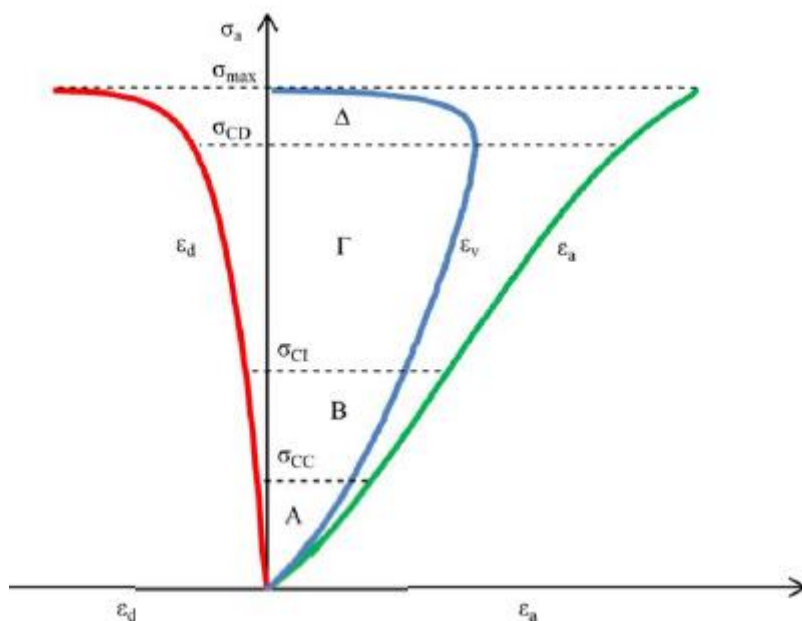
στα διαγράμματα αξονικής τάσης – τροπής παρατηρούνται τέσσερα στάδια ανάπτυξης και διάδοσης μικρορωγμών. Η συνολική διαδρομή φόρτισης διακρίνεται σε τρία μεγάλα επιμέρους στάδια, τα Α, Β, C και ένα πολύ μικρό D. Το τέταρτο αναφέρεται στην αστοχία.

Το πρώτο επιμέρους στάδιο Α αναφέρεται στην άρρηκτη φάση του πετρώματος, όπου το πέρασ αυτού του σταδίου αντιστοιχεί στην τάση κλεισίματος μικρορωγμών.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το στάδιο Β κατά το οποίο παρατηρείται γραμμική σχέση τάσης – τροπής, όπου συμβαίνει κυρίως συμπίεση των κόκκων και των κρυστάλλων του πετρώματος. Τα στάδια Α και Β αποτελούν την άρρηκτη φάση του πετρώματος και είναι συνήθως το 30 έως 70 % της διαδρομής της φόρτισης.

Το τέλος του σταδίου Β αντιστοιχεί στην τάση έναρξης ρωγμάτωσης που σηματοδοτεί την έναρξη της κατακλαστικής ευσταθούς φάσης (περιοχή Γ). Η ανάπτυξη της μικρορωγμάτωσης στο στάδιο αυτό θεωρείται ευσταθής, εφόσον οποιαδήποτε επέκταση ή δημιουργία νέας ρωγμής απαιτεί την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης.

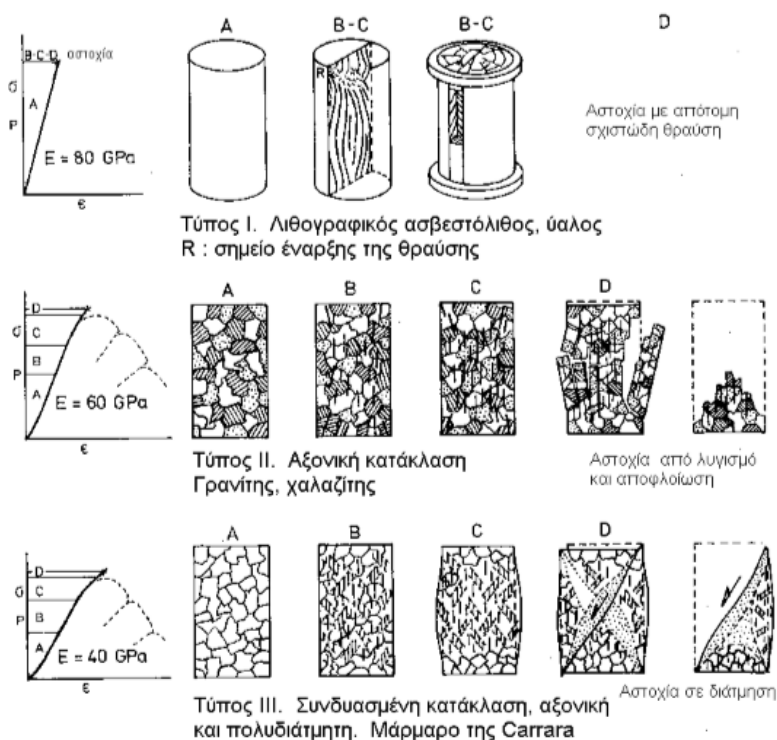
Το σημείο, όπου παρατηρείται μείωση της ογκομετρικής τροπής σηματοδοτεί την έναρξη της κατακλαστικής ασταθούς φάσης (περιοχή Δ στο σχήμα 2) σε τάση σ_{CD} , η οποία καλείται συχνά ως όριο ζημίας ρωγμάτωσης (crack damage threshold). Η παρατηρούμενη αύξηση του όγκου του δοκιμίου, λόγω της ρωγμάτωσης, αναφέρεται ως διασταλτικότητα του πετρώματος. Φόρτιση του πετρώματος πέραν της σ_{CD} προκαλεί χρονικά εξαρτώμενη αύξηση της ζημίας στο πέτρωμα, και οδηγεί το δοκίμιο σε αστοχία ακόμη και υπό σταθερή φόρτιση. [1]



Σχήμα 3: Στάδια μικρορωγμάτωσης και παραμόρφωσης δοκιμίου κατά τη μονοαξονική θλίψη. (Νομικός 2015)

1.2.3 Τύποι καταστροφής στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Σύμφωνα με τον Gramberg (1989) κατά την μονοαξονική θλίψη η διαδικασία καταστροφής του πετρώματος διακρίνεται σε έξι διαφορετικούς τύπους ανάλογα με την απόκρισή του. Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται τρεις τύποι καταστροφής.



Σχήμα 4: Τρόποι καταστροφής πετρώματος σύμφωνα με την απόκρισή του (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Στον τύπο καταστροφής I, το υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν ελαστικά, και στο τέλος αστοχεί εκρηκτικά κατακερματιζόμενο. Με ειδική συσκευή φόρτισης παρατηρούνται τα πρωτογενή φαινόμενα θραύσης όπου φαίνεται ξεκάθαρα ο αξονικός σχισμός που προκαλείται από επαγωγή.

Στον τύπο καταστροφής II, οι υπάρχουσες ρωγματώσεις προκαλούν τις αξονικές ρωγμές που δημιουργούν την κατάκλαση. Η αστοχία εμφανίζεται συχνά με τη διαμόρφωση κώνων που δημιουργούνται με αποφλοιώση, και ακολουθούνται από δευτερογενή διάτμηση του υπολειπόμενου τμήματος.

Ο τύπος καταστροφής III αποτελεί μία μετάβαση προς τη συμβατική έννοια της διάτμησης. Τα πρωτογενή φαινόμενα που εμπριέχουν πολλαπλές διατμήσεις, και τα δευτερογενή τη διατμητική αστοχία μετά από εσωτερικό θρυμματισμό, είναι μορφές του διατμητικού μηχανισμού και ταιριάζουν στη θεωρία των Mohr-Coulomb.

Ο τύπος καταστροφής IV αφορά ψαμμίτες συγκολλημένους με σχετικά ισχυρό υλικό. Ως εκ τούτου, δεν θραύονται οι κόκκοι παρά μόνο κατ' εξαίρεση. Αρχικά, δημιουργούνται ζώνες πολλαπλής διάτμησης και το υλικό συμπεριφέρεται περίπου σαν τον τύπο III. Επί τούτου εν τούτοις παρατηρείται συχνά θραύση αξονικού σχισμού με τη μορφή παράλληλων διακλάσεων, κάτι που φανερώνει την επίδραση της κλίμακας.

Ο τύπος καταστροφής V αφορά ψαμμίτες με πολύ ασθενές συνδετικό υλικό. Κατά τη δοκιμή υφίστανται διάτμηση πολύ γρήγορα.

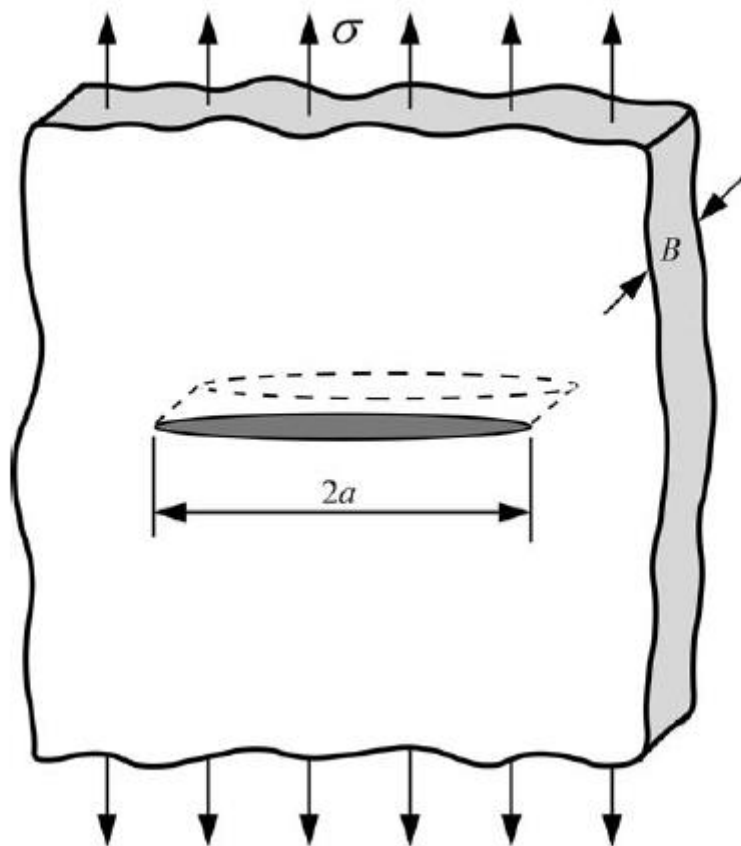
Ο τύπος καταστροφής VI αφορά αργιλικά λεπιωμένα ασφαλτικά ιζήματα. Σε ζώνες ιδιαίτερης έντασης του δοκιμίου, τα κυλινδρικά δοκίμια θλιβόμενα κάθετα στη λεπίωση, δημιουργούν μικρές διατμήσεις μέσα στις λεπίδες της λεπίωσης. Οι λεπίδες διαχωρίζονται σε διακριτά στοιχεία με σχήμα ρόμβου και διαστέλλονται πλευρικά. Γειτονικά τμήματα εξαναγκάζονται έμμεσα σε αξονική θραύση. Στη ζώνη αυτή, το επίπεδο θραύσης εμφανίζει τυπική πριονωτή δομή, που χαρακτηρίζει άμεσο εφελκυσμό. Το υπόλοιπο τμήμα της αξονικής θραύσης δίνει την εικόνα ψαθυρής έμμεσης εφελκυστικής θραύσης. Ο τύπος αυτός της πριονωτής επιφάνειας θραύσης παρατηρείται στα υπόγεια μεταλλεία και δύναται να επηρεάσει τη θραύση τοπικά. [2]

1.3 Θεωρίες θραυστομηχανικής και δυσθραυστότητα

Η μελέτη της μικρομηχανικής των ψαθυρών υλικών για τον προσδιορισμό της τοπικής έναρξης μικρορωγμών, επέκτασης, αλλά και αύξησης του πλήθους τους ξεκίνησε σαν μια προσπάθεια επίλυσης πρακτικών προβλημάτων μηχανικής καθώς και για την καλύτερη κατανόηση της θραύσης των υλικών.

1.3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο θραυστομηχανικής

Πρώτος ο a. Griffith το 1920 (με πειράματα σε υάλινα δοκίμια) προσπάθησε να εξηγήσει την απόκλιση, ανάμεσα στην θεωρητική και στην πειραματικά παρατηρούμενη αντοχή των υλικών σε θραύση. Η θεωρία αυτή βασίζεται στην υπόθεση του Griffith (1921) ότι η θραύση του υλικού οφείλεται σε συγκέντρωση τάσεων στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών (ρωγμές Griffith), με συνέπεια να προκαλείται επέκταση των ρωγμών αυτών (για συγκεκριμένη τιμή τάσης με αντίστοιχο προσανατολισμό ρωγμής), η οποία οδηγεί στην αστοχία του υλικού. Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, ο Griffith πρότεινε μια θεωρία ισοζυγίου ενέργειας για να εκφράσει την σχέση μεταξύ της αντοχής και του μεγέθους της ρωγμής σε δοκίμια γυαλιού. [2,3,5]



Σχήμα 5: ελλειπτική ρωγμή μήκους $2a$ σε μια άπειρη επιφάνεια υφιστάμενη εφελκυστικό εντατικό πεδίο (Anderson 2005)

Εξετάζοντας μία πλάκα που υπόκεινται σε σταθερή τάση σ που περιέχει μία ρωγμή μήκους $2a$ (σχήμα 5), με βάση το ισοζύγιο ενέργειας ο Griffith κατέληξε στην εξίσωση

$$\text{ενέργειας: } \sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (1.1)$$

Όπου

E : ολική ενέργεια

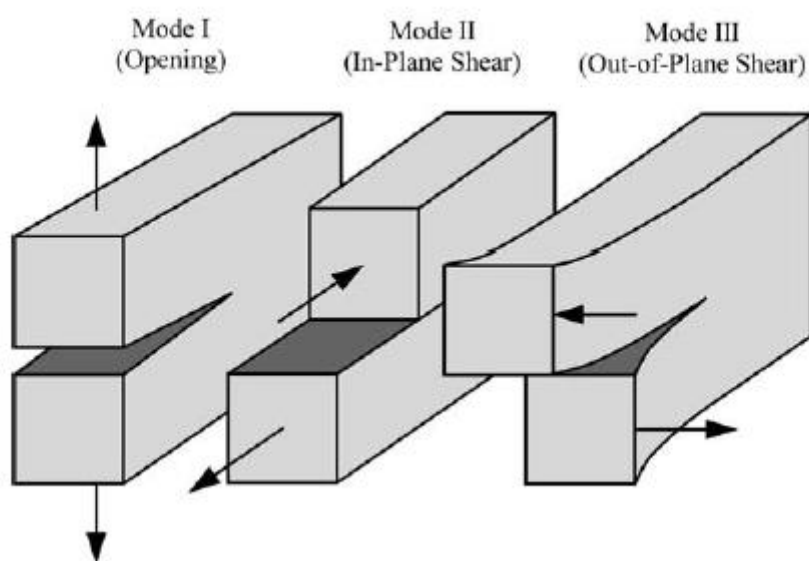
γ_s : επιφανειακή ενέργεια του υλικού

Η εξίσωση προβλέπει ότι η αντοχή του υλικού έναντι θραύσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του μήκους μιας ρωγμής απειροελάχιστου πάχους.

Στη συνέχεια ο Irwin (1959) επέκτεινε το ισοζύγιο ενέργειας του Griffith με βάση του τύπους φόρτισης μίας ρωγμής.

Υπάρχουν τρεις τύποι φόρτισης στους οποίους μπορεί να υποβληθεί μια ρωγμή. Ο τύπος I (Mode I), όπου η κύρια φόρτιση εφαρμόζεται κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής και η ρωγμή τείνει να ανοίξει, ο τύπος II (Mode II) που αντιστοιχεί σε διατμητική φόρτιση και με τον οποίο οι επιφάνειες της ρωγμής τείνουν να "γλιστρήσουν" προς αντίθετες κατευθύνσεις και ο τύπος III (Mode III) με τον οποίο εφαρμόζεται διατμητική τάση κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής. Ένα σώμα μπορεί να φορτιστεί με κάθε έναν από αυτούς τους τύπους, ή και με συνδυασμό δύο ή τριών τύπων φόρτισης (Anderson, 1995).

Οι ρωγμές συνήθως υποδιαιρούνται στους τρεις βασικούς τύπους (I, II ,III) από μια κυρίως μαθηματική άποψη (Irwin, 1958). Η διαίρεση βασίζεται στην μετατόπιση της επιφάνειας της ρωγμής (Lawn, 1993) ή στη φόρτιση του άκρου της (Engelder, 1987, Whittaker et al., 1992).[4,5]



Σχήμα 6: Τύποι φόρτισης των άκρων μίας μικρορωγμής (Anderson 2005)

Το 1956, ο Irwin πρότεινε μια ενεργειακή προσέγγιση για τη θραύση που ισοδυναμεί με το μοντέλο του Griffith με τη διαφορά ότι η προσέγγιση του Irwin είναι σε μια μορφή πιο βολική για την επίλυση των προβλημάτων της μηχανικής. Ο Irwin καθόρισε ένα ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας G , το οποίο είναι ένα μέτρο της διαθέσιμης ενέργειας για τη διάδοση της ρωγμής. Σε μία πλάκα που υπόκεινται σε σταθερή τάση σ που περιέχει μία ασυνέχεια μήκους $2a$ (σχήμα) ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας G είναι:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (1.2)$$

Έτσι η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται όταν το G ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή.

$$G_c = \frac{dW_s}{dA} = 2w_f \quad (1.3)$$

Όπου W_s : το απαιτούμενο έργο για την παραγωγή νέων επιφανειών

w_f : η ενέργεια θραύσης

A: επιφάνεια ασυνέχειας

Ο Irwin (1950) έδειξε ότι οι τάσεις σ στην περιοχή μιας ρωγμής έχουν τη μορφή:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_k}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \quad i,j=x,y,z \quad \text{και} \quad k = I,II,III \quad (1.4)$$

όπου

σ_{ij} : ο τανυστής της τάσης

f_{ij} : αδιάστατη συνάρτηση του θ .

r και θ : είναι οι κυλινδρικές πολικές συντεταγμένες του σημείου ως προς την αιχμή της ρωγμής

K_k : ο συντελεστής έντασης τάσης για τον κάθε τύπο φόρτισης.

Ο Irwin έδειξε επίσης ότι η διάδοση της ρωγμής εξαρτάται από την επίτευξη μιας κρίσιμης τιμής για τον Συντελεστή Έντασης Τάσεων, την K_{IC} η οποία ονομάζεται δυσθραυστότητα.

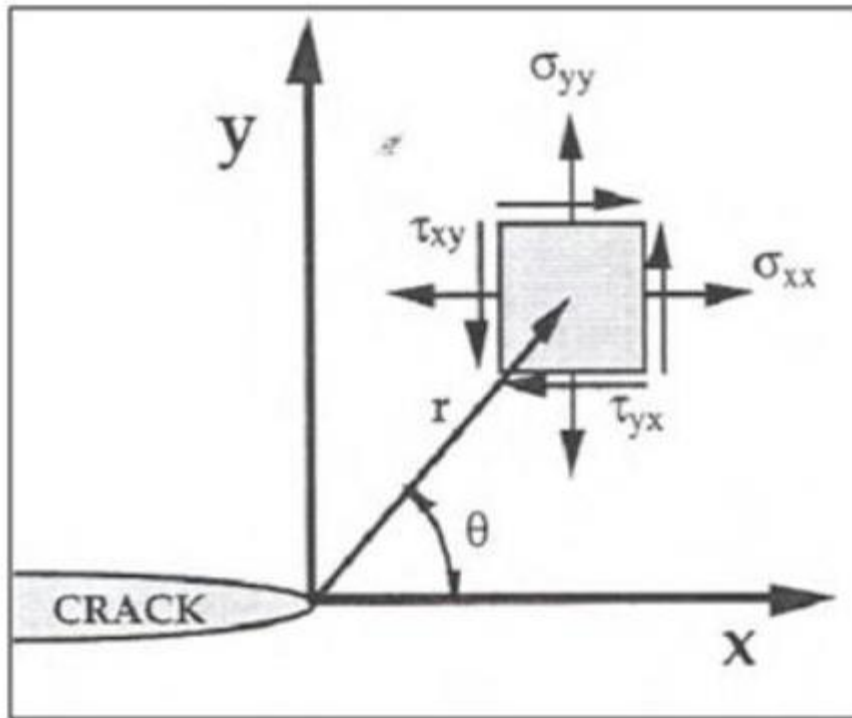
Αν προσδιοριστεί ένα σύστημα αξόνων πολικών συντεταγμένων με αρχή των αξόνων στην άκρη (κορυφή) της ρωγμής (Σχήμα 7), το πεδίο τάσεων για κάθε γραμμικά ελαστικό σώμα δίνεται από την παρακάτω σχέση (Anderson, 1995):

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}}\right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^m(\theta) \quad (1.5)$$

Η λύση περιέχει έναν πρωτεύοντα όρο που είναι ανάλογος του $\frac{1}{\sqrt{r}}$. Καθώς $r \rightarrow 0$, ο πρωτεύον όρος προσεγγίζει το άπειρο, άλλα οι υπόλοιποι όροι παραμένουν πεπερασμένοι ή πλησιάζουν στο μηδέν.

Γι αυτό το λόγο η τάση κοντά στην κορυφή της ρωγμής μεταβάλλεται με το $\frac{1}{\sqrt{r}}$, ανεξάρτητα από τη μορφή του σώματος. Μπορεί επίσης να αποδειχθεί ότι η μετατόπιση κοντά στην κορυφή της ρωγμής

μεταβάλλεται συναρτήσει του \sqrt{r} . Η παραπάνω σχέση περιγράφει μια "ιδιομορφία" της τάσης, όταν είναι ασυμπτωτική στο $r=0$. [3]



Σχήμα 7: Προσδιορισμός της αρχής των συντεταγμένων στα άκρα μιας ρωγμής (Anderson 2005)

Κάθε τύπος φόρτισης παράγει την "ιδιομορφία" $\frac{1}{\sqrt{r}}$ στην κορυφή της ρωγμής, αλλά η σταθερά k και το f_{ij} εξαρτώνται από τον τύπο φόρτισης. Η σταθερά k συνδέεται με τον συντελεστή έντασης της τάσης (Stress Intensity Factor, SIF) K με την ακόλουθη σχέση:

$$K = k\sqrt{2\pi a} \quad (1.8)$$

Με τον συντελεστή έντασης της τάσης δίνεται συνήθως σαν δείκτης και ο τύπος φόρτισης, δηλαδή, K_I , K_{II} , K_{III} . Γι' αυτό, τα πεδία τάσης μπροστά από την κορυφή μιας ρωγμής σε ένα ισότροπο γραμμικά ελαστικό υλικό δίνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \\ \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \\ \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Σε ένα σύνθετο πρόβλημα φόρτισης ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ij}^{(ολικό)} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \quad (1.10)$$

Ο συντελεστής έντασης της τάσης καθορίζει το πλάτος (amplitude) της ιδιομορφίας στην κορυφή της ρωγμής. Αυτό είναι οι τάσεις κοντά στην κορυφή της ρωγμής που αυξάνονται σε αναλογία με το K . Επιπλέον, ο συντελεστής έντασης της τάσης καθορίζει πλήρως τις συνθήκες στην κορυφή της

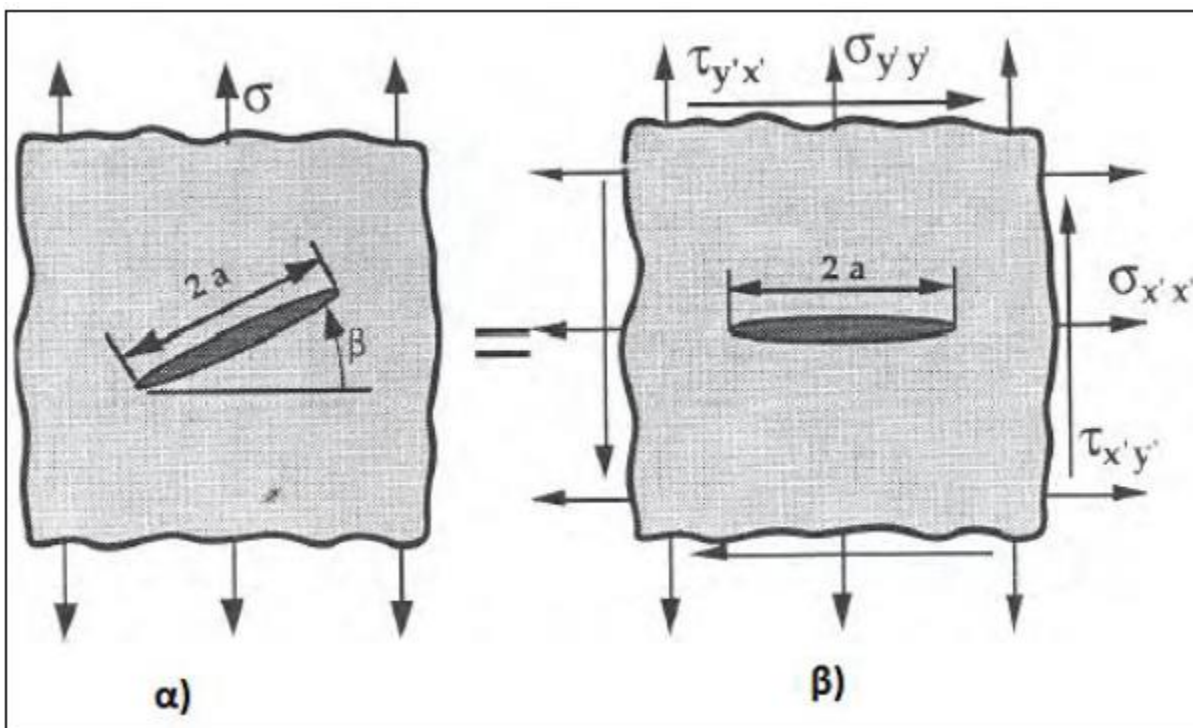
ρωγμής. Άρα ο συντελεστής τάσης προσδιορίζει το βαθμό συγκέντρωσης των τάσεων στην άκρη μιας ρωγμής μήκους a σε μια δεδομένη στιγμή φόρτισης.

$$K_k = \sigma_A \sqrt{\pi \cdot a} = \sigma_{ij} \sqrt{2\pi \cdot r}, \theta=0 \quad (1.11)$$

Όταν ο τύπος φόρτισης της ασυνέχειας είναι τύπου I η σχέση μεταξύ K_I και των συνολικών συνθηκών (global conditions) είναι η εξής:

$$K_I = \sigma_A \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1.12)$$

Στην συνέχεια αν θεωρήσουμε την κάθετο στο επίπεδο της ρωγμής, μέσα στην πλάκα ημισφαιρών διαστάσεων, να είναι προσανατολισμένη κατά μια γωνία β με τον άξονα φόρτισης (Σχήμα) και $\beta \neq 0$, η ρωγμή δέχεται φόρτιση των τύπων I και II.



Σχήμα 8: Ρωγμή μήκους $2a$ μέσα σε πλάκα ημισφαιρών διαστάσεων για την γενική περίπτωση όπου η κύρια τάση δεν είναι κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής (Anderson, 2005).

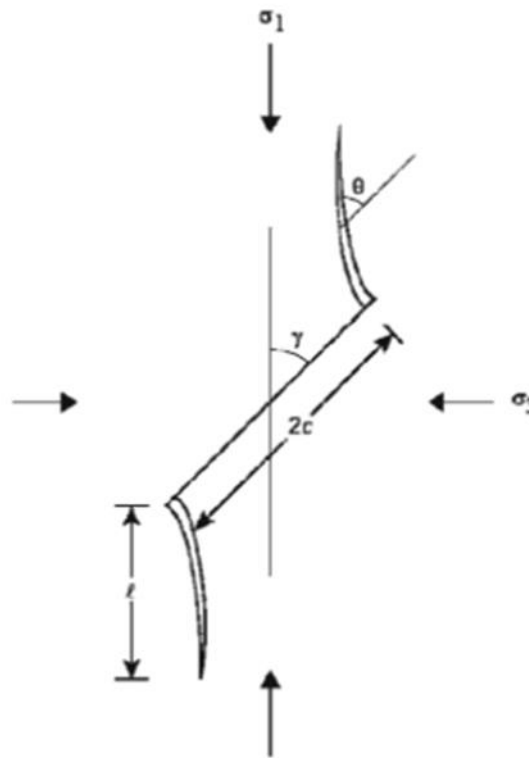
Οι συντελεστές τάσεων K_I και K_{II} υπολογίζονται από τις ακόλουθους τύπους (Anderson, 2005):

$$K_I = \sigma_{y'y'} \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1.13)$$

$$K_{II} = \tau_{x'y'} \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1.14)$$

Όταν ο συντελεστής έντασης τάσεων φθάσει μία κρίσιμη τιμή K_{IC} η ρωγμή αρχίζει να διαδίδεται. Η κρίσιμη τιμή K_{IC} ονομάζεται δυσθραυστότητα και θεωρείται από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός

υλικού καθώς μας δίνει πληροφορίες για τη διάδοση των μικρορωγμών που υπάρχουν σε αυτό. [2,3,4,5]



Σχήμα 9: Έναρξη και διάδοση πλευρικών μικρορωγμών στα άκρα μίας προϋπάρχουσας ολισθαίνουσας μικρορωγμής (Σοφιανός & Νομικός 2008).

Τέλος οι Cotterell και Rice (1980) έδειξαν ότι στην περίπτωση υψηλής συγκέντρωσης ε-φελκυστικών τάσεων στα άκρα μιας ασυνέχειας θα δημιουργηθούν πλάγιες ρωγμές όταν ικανοποιείται η σχέση :

$$\sigma_1 = \frac{\sin 2\gamma + \mu(1 + \cos 2\gamma)}{\sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)} \sigma_3 + \frac{\sqrt{3}}{\sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}} \quad (1.15)$$

για γωνία σχηματισμού πλάγιων ρωγμών $\theta=70.7^\circ$. Όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής της προϋπάρχουσας ρωγμής, η γωνία γ ορίζεται στο σχήμα. [2]

1.3.2 Δοκιμή Δυσθραυστότητας

Σύμφωνα με την ISRM υπάρχουν τρεις προτεινόμενες μέθοδοι για τη δοκιμή της δυσθραυστότητας για τύπο φόρτισης ρωγμής 1. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται δοκίμια με μία chevron εγκοπή κάθετη στον κύριο άξονα του δοκιμίου (chevron bend specimens). Στη συνέχεια το δοκίμιο υπόκειται σε δοκιμή κάμψης κατά την οποία επέρχεται θραύση του δοκιμίου σε δύο κομμάτια με τη

διάδοση της ρωγμής. Στη δεύτερη δοκιμή χρησιμοποιείται δοκίμιο του οποίου η chevron εγκοπή είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα του (short rod specimens). Έπειτα το δοκίμιο υπόκειται σε εφελκυστικό φορτίο όπου οι δύο άκρες της εγκοπής ανοίγουν προκαλώντας ανάπτυξη ρωγμής και τελικά τη θραύση του δοκιμίου. Στην τελευταία μέθοδο χρησιμοποιούνται βραζιλιανοί δίσκοι με μία εγκοπή chevron (CCNBD) ή ευθεία (CSTBD). Το δοκίμιο θραύεται με τη δημιουργία ρωγμών παράλληλων στον άξονα φόρτισης οι οποίες ξεκινούν από τα άκρα της εγκοπής. Η τελευταία μέθοδος προτείνεται για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας για φόρτισης 1 αλλά και για μικτό τύπο 1-2. [8,9,10]

Στο σχήμα παρουσιάζεται η γεωμετρία του δοκιμίου με εγκοπή chevron (CCNBD) όπως προτάθηκε από την Επιτροπή προτυποποίησης εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών της ISRM. Όλες οι διαστάσεις της γεωμετρίας θα πρέπει να μετατρέπονται σε ανοιγμένες παραμέτρους με την ακτίνα R και διάμετρο D του δοκιμίου σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (Fowell et al, 1995):

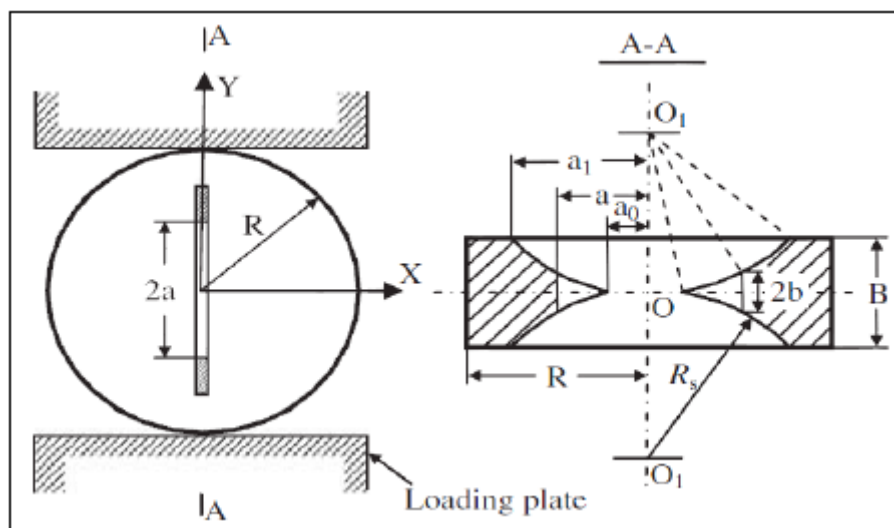
$$\alpha_o = a_o/R \quad (1.16)$$

$$\alpha_B = B/R \quad (1.17)$$

$$\alpha_1 = a_1/R \quad (1.18)$$

$$\alpha_s = D_s/D \quad (1.19)$$

Οι διαστάσεις αυτές φαίνονται χαρακτηριστικά στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Η γεωμετρία του Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή chevron – CCNBD (Fowell et al, 2006).

Σύμφωνα με την ISRM οι προτεινόμενες διαστάσεις για τους βραζιλιανούς δίσκους με εγκοπή απεικονίζονται στον πίνακα 1

Μέγεθος	Τιμές	Αδιάστατη σχέση
Διάμετρος D (mm)	75.0	
Πάχος B (mm)	30.0	$\alpha_B = B/R = 0.80$
Αρχικό μήκος εγκοπής α_0 (mm)	9.89	$\alpha_0 = \alpha_0/R = 0.2637$
Τελικό μήκος εγκοπής α_1 (mm)	24.37	$\alpha_1 = \alpha_1/R = 0.65$
Διάμετρο κοπτικού D_s (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/D = 0.6933$
Πάχος κοπής h_c (mm)	26.97	
Y_{min}^* (αδιάσταστο)	0.84	
a_m (mm)	19.31	$\alpha_m = \alpha_m/R = 0.5149$

Πίνακα 1: Προτεινόμενοι γεωμετρικοί παράμετροι από την ISRM (Fowell et al, 1995).

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών διαστάσεων αλλά σύμφωνα με τους εξής περιορισμούς: $0,4 \leq \alpha_1 \leq 0,8$ και $\alpha_B \leq 1,04$. Το αρχικό μήκος της ρωγμής α_0 θα πρέπει να καθορισθεί μεταξύ του $(0,20-0,30) \cdot R$. Τα $\alpha_0(\alpha_0)$, $\alpha_1(\alpha_1)$ και $\alpha_B(B)$ είναι τρεις βασικές γεωμετρικές παράμετροι για τα δοκίμια με εγκοπή CCNBD. Όταν είναι γνωστές οι άλλες γεωμετρικές παράμετροι (Σχήμα 10) μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις (Fowell et al, 1995):

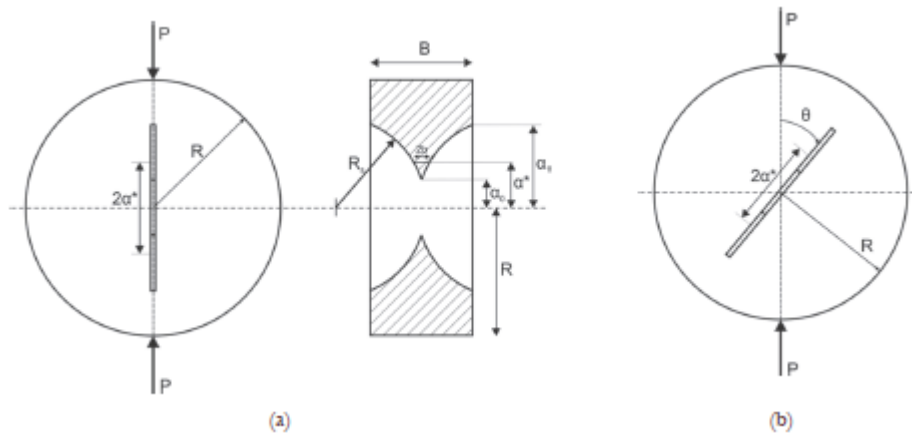
$$\alpha_s = R_s/R = \sqrt{\alpha_0^2 + \left(\alpha_1^2 - \alpha_0^2 + \frac{\alpha_B^2}{4}\right)^2} \div \alpha_B^2 \quad (1.20)$$

$$h_c = \left(\alpha_s - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2}\right) \cdot R = \left(\alpha_s - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2}\right) \cdot R + B/2 \quad (1.21)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\alpha_s^2 - \left(\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2} + \alpha_B/2\right)^2} \quad (1.22)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_s^2 - \left(\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} - \alpha_B/2\right)^2} \quad (1.23)$$

$$\alpha_B = 2 \cdot \left(\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2}\right) \quad (1.24)$$



Σχήμα 11: Γεωμετρία εγκοπής σε CCNBD δοκίμιο (Κ.Κακλίδης et al 2017)

Η εγκοπή κατασκευάζεται με τη βοήθεια κυκλικού κοπτικού δίσκου με διαμάντια. Οι πλευρές της εγκοπής θα πρέπει να είναι ευθείες γι' αυτό και το κοπτικό απαιτείται να είναι γραμμικής κίνησης κοπής. Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι εγκοπές θα κατασκευαστούν στο κέντρο του δίσκου και οι γεωμετρικές διαστάσεις σύμφωνα με τις δεδομένες ανοχές. [8,10]

Υπολογισμός του συντελεστή έντασης τάσεων

Οι συντελεστές έντασης τάσεων K_I και K_{II} για βραζιλιανό δίσκο με ευθεία εγκοπή (CSTBD) μπορούν να υπολογιστούν από τους παρακάτω τύπους:

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot \sqrt{a} \cdot N_I \quad \text{ή} \quad K_I = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot Y_I \quad (1.25)$$

όπου

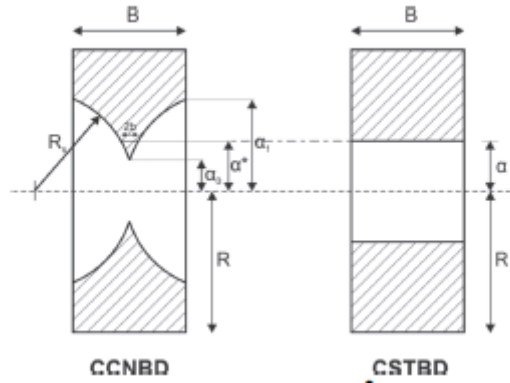
$$Y_I = \sqrt{a} \cdot N_I \quad (1.26)$$

(1.27)

$$K_{II} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot \sqrt{a} \cdot N_{II} \quad \text{ορ} \quad K_{II} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot Y_{II} \quad (1.28)$$

$$Y_{II} = \sqrt{a} \cdot N_{II}$$

Όπου P το φορτίο στη θραύση, $a = a/R$ και N_I , N_{II} , είναι αδιάστατοι συντελεστές που δίνονται συναρτήσει της γωνίας κλίσης της εγκοπής, θ , σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης όπως φαίνεται στο σχήμα. Y_I και Y_{II} είναι οι συντελεστές έντασης τάσης του δοκιμίου CSTBD.



Σχήμα 12 : Απεικόνιση των διαστάσεων των δύο δοκιμίων (K.Kaklis et al 2017)

Εφαρμόζοντας τους τύπους για ευθεία εγκοπή σε ένα βραζιλιανό δίσκο με chevron εγκοπή οι εξισώσεις τροποποιούνται ως εξής:

$$K_{I} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot \sqrt{\alpha^-} \cdot \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{\alpha^- - a_0}} \cdot N_{I} \quad \text{ή} \quad K_{I} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot Y_{I}^* \quad (1.29)$$

όπου

$$Y_{I}^* = \sqrt{\alpha^-} \cdot \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{\alpha^- - a_0}} \cdot N_{I} \quad (1.30)$$

$$K_{II} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot \sqrt{\alpha^-} \cdot \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{\alpha^- - a_0}} \cdot N_{II} \quad \text{ή} \quad K_{II} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot B}} \cdot Y_{II}^* \quad (1.31)$$

όπου

$$Y_{II}^* = \sqrt{\alpha^-} \cdot \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{\alpha^- - a_0}} \cdot N_{II} \quad (1.32)$$

όπου Y_{I}^* και Y_{II}^* είναι οι αδιάστατοι συντελεστές έντασης τάσης για chevron εγκοπή.

Οι αδιάστατοι συντελεστές των δυο δοκιμίων συνδέονται με τη σχέση:

$$Y^* = \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{\alpha^- - a_0}} \cdot Y \quad (1.33)$$

Στη δοκιμή της ISRM η δυσθραυστότητα για βραζιλιανό δίσκο με εγκοπή chevron υπολογίζεται από τον τύπο:

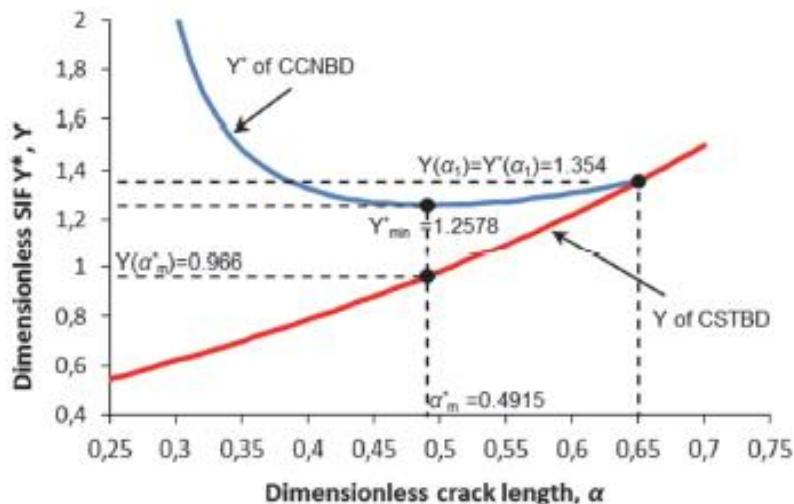
$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (1.34)$$

όπου, P_{max} το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου και Y^*_{min} κρίσιμη αδιάστατη τιμή του συντελεστή έντασης των τάσεων η οποία καθορίζεται από στις διαστάσεις του δοκιμίου α_0 , α_1 και α_B μόνο. Το Y^*_{min} υπολογίζεται από την εξίσωση: $Y^*_{min} = u \cdot e^{v \cdot \alpha_1}$. Όπου u και v είναι παράμετροι που προσδιορίζονται από α_0 και α_B όπου η ISRM είχε δώσει στις σχετικούς πίνακες, αν ταιριάζουν με αυτές, για τον υπολογισμό τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2. Σε διαφορετική περίπτωση γίνεται χρήση της γραμμικής παρεμβολής για να υπολογιστούν (Fowell et al, 1995).

α_0	0.100	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450
U														
0.440	0.2747	0.2774	0.2791	0.2808	0.2825	0.2844	0.2865	0.2883	0.2914	0.2943	0.2979	0.3024	0.3069	0.3120
0.480	0.2727	0.2752	0.2765	0.2782	0.2795	0.2812	0.2833	0.2856	0.2882	0.2918	0.2954	0.2994	0.3039	0.3090
0.520	0.2708	0.2727	0.2740	0.2757	0.2771	0.2788	0.2806	0.2828	0.2857	0.2887	0.2925	0.2968	0.3013	0.3060
0.560	0.2689	0.2705	0.2716	0.2733	0.2744	0.2763	0.2781	0.2805	0.2831	0.2867	0.2901	0.2943	0.2989	0.3039
0.600	0.2667	0.2684	0.2696	0.2709	0.2721	0.2739	0.2757	0.2782	0.2812	0.2844	0.2882	0.2921	0.2967	0.3015
0.640	0.2649	0.2665	0.2674	0.2685	0.2701	0.2719	0.2738	0.2764	0.2791	0.2825	0.2863	0.2905	0.2947	0.2992
0.680	0.2632	0.2646	0.2655	0.2667	0.2682	0.2704	0.2718	0.2744	0.2774	0.2807	0.2848	0.2888	0.2930	0.2971
0.720	0.2611	0.2628	0.2637	0.2650	0.2667	0.2683	0.2705	0.2727	0.2763	0.2794	0.2831	0.2871	0.2916	0.2954
0.760	0.2598	0.2612	0.2625	0.2637	0.2650	0.2668	0.2693	0.2719	0.2744	0.2781	0.2819	0.2860	0.2895	0.2934
0.800	0.2582	0.2602	0.2611	0.2625	0.2641	0.2657	0.2680	0.2706	0.2736	0.2772	0.2811	0.2845	0.2878	0.2916
0.840	0.2572	0.2586	0.2599	0.2612	0.2628	0.2649	0.2672	0.2699	0.2727	0.2763	0.2801	0.2831	0.2867	0.2891
0.880	0.2562	0.2578	0.2593	0.2602	0.2621	0.2642	0.2668	0.2691	0.2723	0.2754	0.2793	0.2816	0.2853	0.2867
0.920	0.2553	0.2572	0.2582	0.2598	0.2613	0.2634	0.2658	0.2684	0.2716	0.2747	0.2782	0.2811	0.2831	0.2856
0.960	0.2549	0.2566	0.2578	0.2593	0.2612	0.2633	0.2655	0.2685	0.2710	0.2746	0.2767	0.2799	0.2811	0.2825
1.000	0.2547	0.2564	0.2576	0.2591	0.2610	0.2630	0.2653	0.2679	0.2709	0.2738	0.2768	0.2786	0.2794	0.2794
1.040	0.2544	0.2565	0.2576	0.2593	0.2608	0.2627	0.2653	0.2678	0.2708	0.2727	0.2747	0.2769	0.2769	0.2765
V														
0.440	1.7813	1.7820	1.7820	1.7833	1.7863	1.7893	1.7923	1.7967	1.7966	1.7977	1.7973	1.7932	1.7901	1.7850
0.480	1.7748	1.7763	1.7787	1.7800	1.7843	1.7881	1.7907	1.7934	1.7952	1.7929	1.7923	1.7901	1.7866	1.7811
0.520	1.7694	1.7734	1.7758	1.7769	1.7808	1.7845	1.7884	1.7907	1.7911	1.7920	1.7897	1.7860	1.7823	1.7784
0.560	1.7644	1.7701	1.7732	1.7748	1.7794	1.7822	1.7856	1.7877	1.7885	1.7864	1.7857	1.7820	1.7779	1.7725
0.600	1.7620	1.7668	1.7692	1.7727	1.7770	1.7792	1.7826	1.7835	1.7833	1.7831	1.7805	1.7782	1.7733	1.7689
0.640	1.7580	1.7631	1.7671	1.7707	1.7732	1.7757	1.7788	1.7794	1.7795	1.7779	1.7753	1.7716	1.7686	1.7652
0.680	1.7550	1.7602	1.7640	1.7676	1.7707	1.7711	1.7757	1.7759	1.7754	1.7741	1.7700	1.7666	1.7630	1.7612
0.720	1.7536	1.7580	1.7616	1.7647	1.7661	1.7698	1.7708	1.7722	1.7693	1.7683	1.7652	1.7617	1.7574	1.7562
0.760	1.7497	1.7553	1.7568	1.7600	1.7635	1.7656	1.7649	1.7652	1.7662	1.7624	1.7593	1.7554	1.7548	1.7528
0.800	1.7474	1.7506	1.7538	1.7557	1.7581	1.7611	1.7613	1.7603	1.7596	1.7561	1.7525	1.7512	1.7509	1.7494
0.840	1.7430	1.7487	1.7500	1.7522	1.7545	1.7547	1.7551	1.7548	1.7535	1.7499	1.7469	1.7473	1.7448	1.7497
0.880	1.7392	1.7438	1.7446	1.7487	1.7490	1.7492	1.7478	1.7487	1.7463	1.7452	1.7403	1.7434	1.7414	1.7493
0.920	1.7357	1.7390	1.7413	1.7423	1.7440	1.7446	1.7443	1.7432	1.7411	1.7389	1.7360	1.7363	1.7417	1.7448
0.960	1.7299	1.7337	1.7358	1.7370	1.7372	1.7373	1.7372	1.7346	1.7344	1.7309	1.7343	1.7331	1.7414	1.7483
1.000	1.7243	1.7279	1.7300	1.7308	1.7310	1.7307	1.7306	1.7297	1.7273	1.7270	1.7258	1.7302	1.7394	1.7525
1.040	1.7196	1.7213	1.7231	1.7232	1.7246	1.7256	1.7237	1.7231	1.7204	1.7238	1.7272	1.7293	1.7423	1.7569

Πίνακας 2: Προσδιορισμός συντελεστών u, v . (Fowell et al, 1995)

Από τις εξισώσεις προκύπτει το διάγραμμα για διάφορες τιμές του μήκους της εγκοπής. Η πρώτη καμπύλη απεικονίζει τις τιμές που μπορεί να πάρει ο αδιάστατος συντελεστής έντασης τάσεων σε βραζιλιανούς δίσκους με εγκοπή chevron. Η δεύτερη καμπύλη προσδιορίζει τις αντίστοιχες τιμές για βραζιλιανούς δίσκους με ευθεία εγκοπή. [7,8,10]



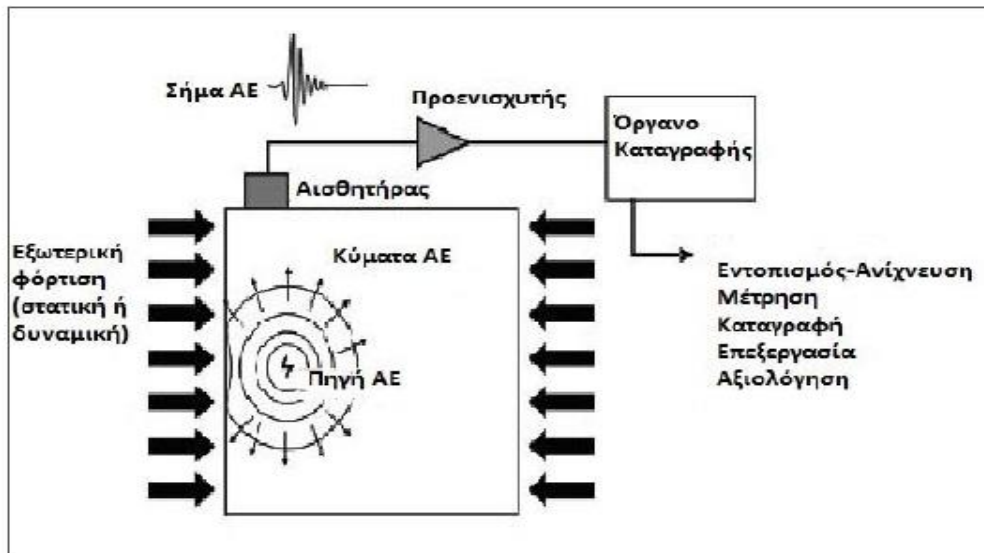
Σχήμα 13: Αδιάστατος συντελεστής έντασης τάσεων για CCNBD, CSTBD δοκίμια (K. Kaklis et al 2017)

1.4 Ακουστική Εκπομπή

Σύμφωνα, με τον ορισμό της ISRM ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού, είτε λόγω έναρξης της αστοχίας και διάδοσης προϋπάρχουσας βλάβης σε αυτό είτε λόγω αλλαγής φάσεως. Η προέλευση της AE στα πετρώματα σχετίζεται με την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με την έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα, ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή. [18,5]

Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες AE, συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, που βρίσκονται σε επαφή με αυτό. Οι αισθητήρες μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με την σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα, για το σκοπό αυτό, συστήματα AE. Η τεχνική αυτή, είναι διεθνώς διαδεδομένη και είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique). Τα σήματα της Ακουστικής Εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15KHz έως μερικά MHz, δηλαδή σε συχνότητες υπερήχων.[2]

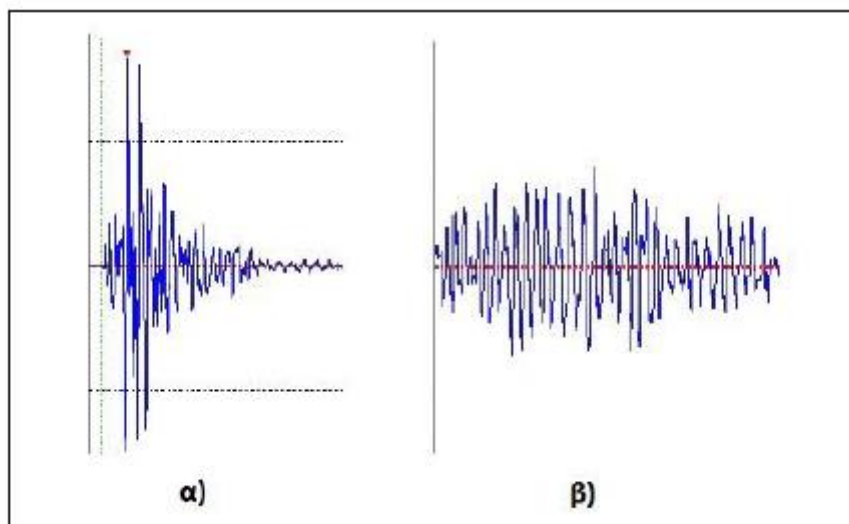
Λόγω επιβολής φορτίου απελευθερώνεται ενέργεια, η οποία με τη μορφή ελαστικού κύματος μεταδίδεται στο πέτρωμα. Ο Αισθητήρας AE ανιχνεύει το ελαστικό κύμα στα όρια του σώματος και μετατρέπει τις επιφανειακές μετακινήσεις που προκαλούνται από αυτό σε ηλεκτρικό σήμα. Τελικά, το ηλεκτρικό σήμα μεταφέρεται σε προ ενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 14 : Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης ΑΕ (Κατσιογιάννη κ.ά., 2007).

Τα εκπεμπόμενα σήματα περιέχουν όλη την πληροφορία από την πηγή, το μέσο διάδοσης και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα ανίχνευσης, καθιστώντας περίπλοκη τη μορφή τους. Εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

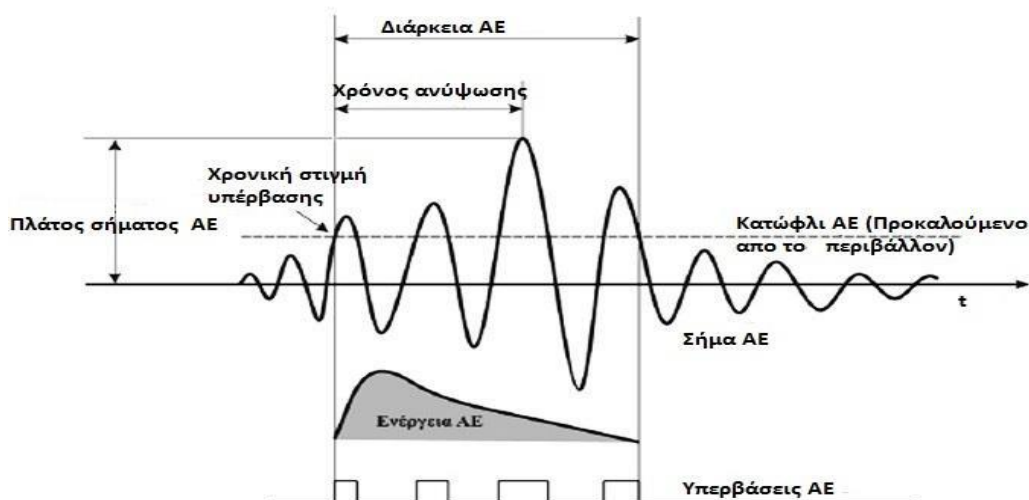
Κάθε ΑΕ έχει μία κυματομορφή. Τα δύο κύρια σήματα που ανιχνεύονται και επεξεργάζονται από ένα σύστημα παρακολούθησης ακουστικών εκπομπών είναι τα κρουστικά και τα συνεχή. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι μεγάλος τα σήματα τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται, ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής.



Σχήμα 15 : Τυπική μορφή α) κρουστικού κύματος και β) συνεχούς κύματος (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα πλάτους

URMS. Για τα κρουστικά σήματα θα πρέπει να γίνει καθορισμός μιας τάσης κατωφλιού (threshold) πάνω από τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Η τάση του κατωφλιού καθορίζεται, επίσης, από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ και το επιθυμητό μέγεθος καταγραφόμενων δεδομένων. Όταν ένα σήμα υπερβεί το κατώφλι σημειώνεται ένας κτύπος και καταγράφεται ως γεγονός ΑΕ (Κατσικογιάννη κ.ά., 2007). Σε μία τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή χιλιάδες σήματα, καθιστώντας την επεξεργασία και την αξιολόγηση ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Για το λόγο αυτό, από κάθε κυματομορφή εξάγονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι, που καλούνται παράμετροι ΑΕ. Αυτές διευκολύνουν την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ των λαμβανομένων σημάτων.



Σχήμα 16 : Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Σύμφωνα με τους Grosse & Ohtsu (2008), η ερμηνεία των σημαντικότερων παραμέτρων μιας ακουστικής εκπομπής είναι:

- Κατώφλι (Threshold): το όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα.
- Συμβάν (Event): τοπική αλλαγή ενός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- Κτύπος (Hit): όταν το σήμα γεγονός ΑΕ υπερβεί το κατώφλι και προκαλεί σε ένα σύστημα καναλιών να καταγράψει ένα κτύπο, μια κυματομορφή.
- Απαριθμήσεις (Counts): ο αριθμός των φορών που καταγράφεται μια υπέρβαση του κατωφλιού κατά τη διάρκεια ενός σήματος, κτύπου.
- Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (Counts to peak): ο αριθμός των απαριθμήσεων σε ένα κτύπο μέχρι να καταγραφεί το μέγιστο πλάτος.
- Πλάτος σήματος ΑΕ (Amplitude): η μέγιστη τιμή (peak) κάθε καταγεγραμμένου γεγονότος εκφρασμένη σε decibel (dB).
- Διάρκεια (Duration): ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που προκλήθηκε ένα σήμα ΑΕ και του χρόνου εξαφάνισής του. Η διάρκεια εκφράζεται σε μικροδευτερόλεπτα (μs), η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής και το φιλτράρισμα του θορύβου.
- Χρόνος ανύψωσης (Rise Time): ο χρόνος μεταξύ της στιγμής, όπου το σήμα υπερβαίνει για

πρώτη φορά το κατώφλι ως την χρονική στιγμή μεγίστου πλάτους.

- Ενέργεια AE (Energy): γενικά ορίζεται ως το τετράγωνο του πλάτους του γεγονότος.

Η ενέργεια προτιμάται για να ερμηνεύσει το μέγεθος της εκδήλωσης πηγής, διότι είναι στενά συνδεδεμένη με το πλάτος και τη διάρκεια και εξαρτάται λιγότερο από την τάση του κατωφλιού και τις συχνότητες λειτουργίας.

Άλλοι παράμετροι που πρέπει να σημειωθούν είναι:

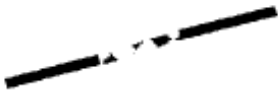


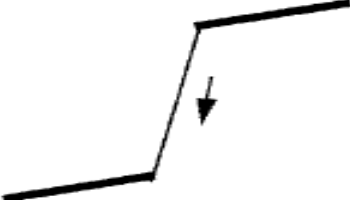

- Συσσωρευμένη ενέργεια: το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.
- Ρυθμός Ενέργειας (ER): το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται ανά μονάδα χρόνου.
- Ενεργοποίηση AE (Activation): η εκδήλωση AE λόγω εφαρμογής αιτίου, όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κλπ.
- Δραστηριότητα AE (Activity): μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας των γεγονότων.
- Event Data Set: η συλλογή αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός γεγονότος, σύμφωνα με την επεξεργασία δεδομένων που αναγνωρίζει ότι ένα ξεχωριστό γεγονός μπορεί να παράγει περισσότερους από ένα κτύπους.
- Hit Data Set: η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος AE σε ένα κανάλι.
- Hit Definition Time (HDT): ορίζεται ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων του.
- Hit Lockout Time (HLT): είναι ο χρόνος που θα πρέπει να αναμένει το σύστημα μέχρι να ξεκινήσει την καινούρια καταγραφή.
- Peak Definition Time (PDT): καθορίζει το μέγιστο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος.
- Συχνότητα (Frequency): για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στην μονάδα του χρόνου.
- Μέση συχνότητα (Average frequency): μετρούμενο μέγεθος από τον λόγο των απαριθμήσεων προς την διάρκεια και χρησιμοποιείται όταν το σήμα της κυματομορφής είναι πρακτικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί.
- Θόρυβος (Noise): μη σχετικές ενδείξεις, σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές τις AE, ή από πηγές AE που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- Σήμα AE (Signal): το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας).
- Περιγραφή σήματος (Signal description): το αποτέλεσμα της διαδικασίας: μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή του σήματος AE και/ή του περιβαλλοντικού πλαισίου.
- Χαρακτηριστικά σήματος (Signal features): μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος AE, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος AE, διάρκεια, απαριθμήσεις και χρόνος ανύψωσης.
- Ισχύς σήματος (Signal strength): η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος AE. Είναι γνωστό και ως-σχετική ενέργεια (relative energy). [2,5,6]

1.5 Κατηγοριοποίηση των ρωγμών

Η κατηγοριοποίηση των ρωγμών πραγματοποιήθηκε από τον Martinez (1999) και, στη συνέχεια, από τους Wong & Einstein (2008) με βασικά κριτήρια τη γεωμετρία και τον τρόπο συνένωσής τους.

1.5.1 Martinez (1999)

Πιο συγκεκριμένα, ο Martinez, βασιζόμενος στη μελέτη του Bobet (1997) για την ανάπτυξη και συνένωση των ρωγμών στη βραχομάζα, εκπόνησε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου και γρανίτη με μη εμμένουσες ασυνέχειες διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Για την αποτελεσματικότερη καταγραφή των φαινομένων χρησιμοποιήθηκε κάμερα υψηλής ταχύτητας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, για τη δημιουργία των ασυνεχειών χρησιμοποιήθηκε ειδικό κοπτικό μέσο με νερό υψηλής πίεσης (40,000-60,000 psi). Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τύποι συνένωσης των ασυνεχειών που προέκυψαν από τις δοκιμές σε δοκίμια γρανίτη και μαρμάρου. [11]

Τύπος I		Συμβαίνει είτε με τη συνένωση δύο, είτε με τη διάδοση μιας εσωτερικής διατμητικής ρωγμής (shear crack). Παρατηρείται σε δείγματα με ομοεπίπεδες ασυνέχειες (flaw).
Τύπος II		Παράγεται από τη συνένωση δύο διατμητικών ρωγμών με μια εφελκυστική ρωγμή (tension crack), η οποία είναι σχεδόν κάθετη και επομένως παράλληλη με την κύρια τάση.
Τύπος III		Αναπτύσσεται όταν μια διατμητική ρωγμή φτάνει στην εφελκυστική ρωγμή που προέρχεται από την άλλη ασυνέχεια.
Τύπος IV		Συμβαίνει με τη διάδοση μίας εφελκυστικής ρωγμής που ξεκινάει από τη μία ασυνέχεια και καταλήγει στην άλλη.
Τύπος IVB		Συμβαίνει με τη συνένωση δύο εφελκυστικών ρωγμών (wing crack) που διαδίδονται μέχρι να ενωθούν.

Πίνακας 3: Τύποι συνένωσης προϋπάρχουσων ασυνεχειών σε δοκίμια γρανίτη και μαρμάρου (Martinez 1999)

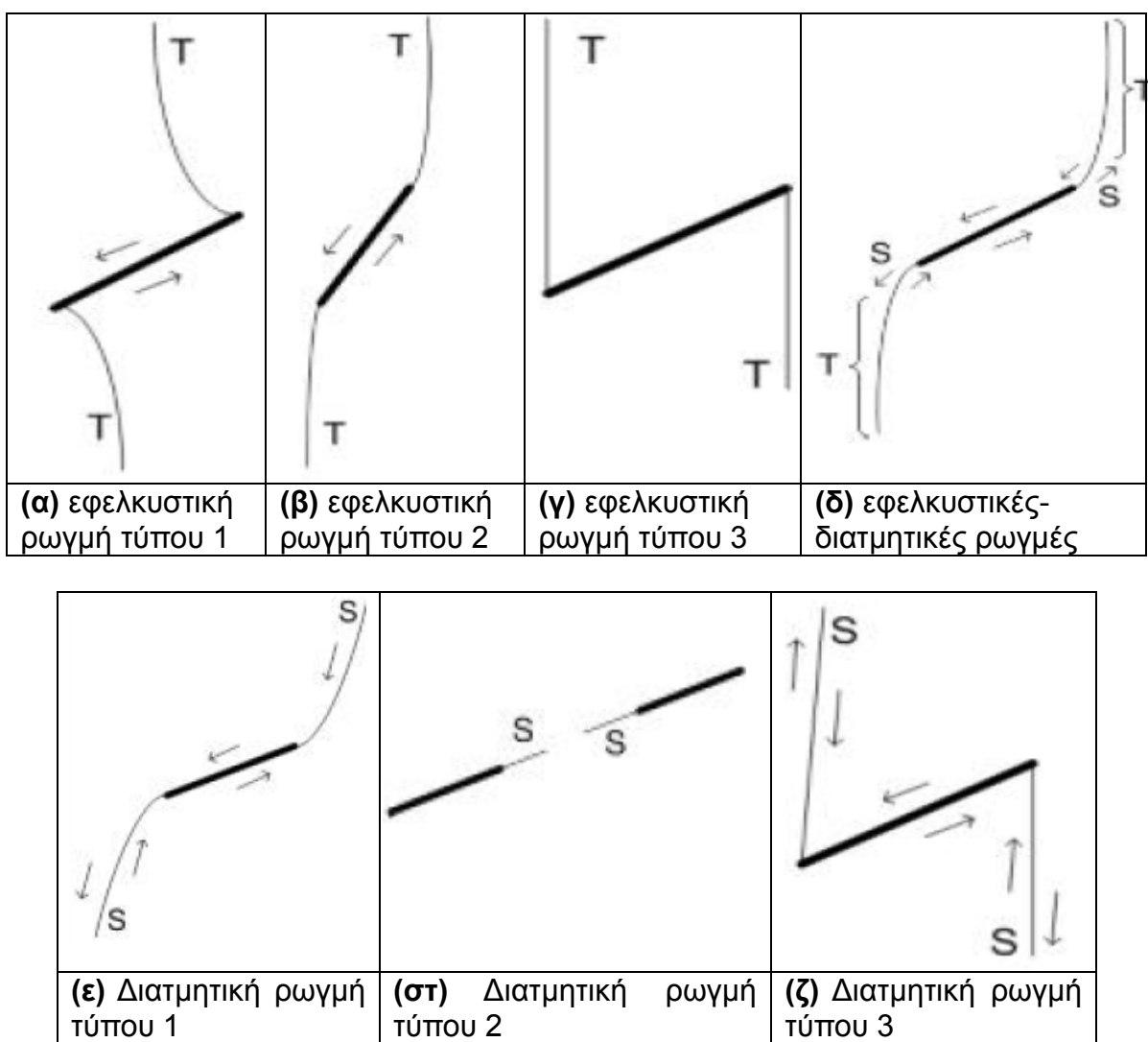
◆◆◆◆◆ διατμητική ρωγμή

- εφελκυστική ρωγμή (wing crack)
- εφελκυστική ρωγμή
- ασυνέχεια

1.5.2 Einstein & Wong (2008)


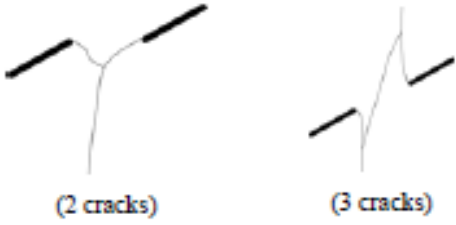


Ο Wong πραγματοποίησε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε πρισματικά δοκίμια από γύψο και μάρμαρο διαστάσεων 152mm x 76mm x 32mm. Στα δοκίμια δημιουργήθηκαν μη εμμένουσες ασυνέχειες μήκους 1.3mm και πλάτους 12.5mm.


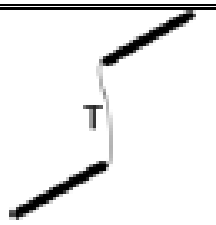
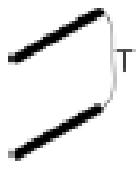
Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, με τη βοήθεια κάμερας υψηλής ταχύτητας και βιντεοκάμερας, παρατηρήθηκε η δημιουργία ρωγμών από τις άκρες των προϋπάρχουσων ασυνεχειών. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τύποι ρωγμών που καταγράφηκαν. [12]



Πίνακας 4 : Ανάπτυξη μικρορωγμών στα άκρα προϋπάρχουσας ασυνέχειας
Einstein & Wong (2008)

Στη συνέχεια, παρατηρήθηκαν 9 διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των προϋπάρχουσων ασυνεχειών, οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 3. [12]

Κατηγορία	Τρόποι συνένωσης	Παρατηρούμενοι τύποι ρωγμών
1		<p>Ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών οι οποίες δε συνενώνονται.</p>
2		<p>Έμμεση συνένωση δύο ή πολλαπλών ρωγμών (οι τύποι ρωγμών ποικίλλουν)</p>
3		<p>Διατμητική ρωγμή τύπου 2</p>
4		<p>Διατμητική ρωγμή τύπου 1</p>

Κατηγορία	Τρόποι συνένωσης	Παρατηρούμενοι τύποι ρωγμών
5		Μία ή περισσότερες ρωγμές τύπου 2 διατμητικές και τύπου 2 εφελκυστικές
6		Εφελκυστική ρωγμή τύπου 2. Υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης και διατμητικών ρωγμών κατά μήκος της διεύθυνσης συνένωσης
7		Εφελκυστική ρωγμή τύπου 1
8		Δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών στα άκρα της κάθε ασυνέχειας στην ίδια πλευρά.
9		Εφελκυστικές ρωγμές τύπου 3 που συνδέουν το δεξί άκρο της μίας ασυνέχειας με το αριστερό άκρο της άλλης. Μπορεί να υπάρξει εμφάνιση διατμητικής ρωγμής.

Πίνακας 5 :Κατηγορίες συνένωσης
Einstein & Wong (2008)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται προγενέστερες έρευνες σχετικά με τον χαρακτηρισμό της κερματισμένης βραχομάζας τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Ο ποσοτικός χαρακτήρας αναφέρεται στον υπολογισμό της αντοχής της βραχομάζας μέσω της διατύπωσης ενός εμπειρικού κριτηρίου σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών. Ο ποιοτικός χαρακτήρας αναφέρεται στην κατανόηση της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στην αντοχή της βραχομάζας αλλά και στην παρατήρηση των μηχανισμών αστοχίας. Τα πειραματικά δεδομένα αναφέρονται σε δοκιμές σε φυσικά ομοιώματα βραχομάζας, σε επιτόπου δοκιμές και σε εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια πετρώματος μεγέθους τέτοιου έτσι ώστε να περιλαμβάνεται αντιπροσωπευτικός αριθμός ασυνεχειών. Σκοπός των μονοαξονικών δοκιμών σε φυσικά ομοιώματα βραχομάζας είναι ο υπολογισμός της αντοχής τους σε θλίψη καθώς και η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη μηχανική τους συμπεριφορά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δοκιμές διαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε φυσικά δοκίμια. Στις δοκιμές αυτές μελετήθηκε η επίδραση της πλευρικής πίεσης στην αντοχή και στους μηχανισμούς αστοχίας των ομοιωμάτων.

2.2 Μονοαξονικές δοκιμές

2.2.1 Δοκιμές των Goldstein et al. (1966)

Οι Goldstein et al. πραγματοποίησαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια από γύψο, στα οποία είχαν δημιουργηθεί επιφάνειες αστοχίας. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η μείωση του μεγέθους του άρρηκτου υλικού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του δοκιμίου, μέχρι ενός ορισμένου ορίου (σχήμα 17). Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών κατέληξαν στον εμπειρικό τύπο (2.1) [13]

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ce}} = a + b \left(\frac{L}{\ell}\right)^e \quad (2.1)$$

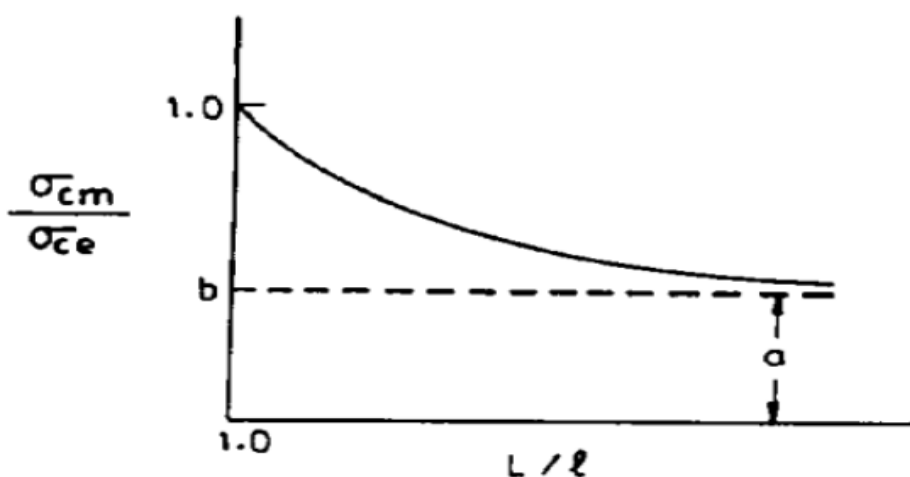
όπου $e < 1$, $b = (1 - a)$

L = μήκος του δείγματος

ℓ = απόσταση των ασυνεχειών

σ_{cm} = αντοχή σε θλίψη της μάζας του υλικού



















σ_{ce} = αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου υλικού



Σχήμα 17 :Σχέση αντοχής βραχομάζας – αντοχής άρρηκτου υλικού (Goldstein et al. 1966)

2.2.2 Δοκιμές του Lama (1974)

Ο Lama (1974) πραγματοποίησε δοκιμές με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των ασυνεχειών στην αντοχή και την παραμόρφωση των δοκιμίων σε διάφορες τιμές αντοχής. Συγκεκριμένα, πραγματοποίησε δοκιμές σε τρεις ομάδες δοκιμίων, μια αποτελούμενη από οριζόντιες ασυνέχειες, μια από κατακόρυφες ασυνέχειες και μια αποτελούμενη από μεταβλητό αριθμό ασυνεχειών (σχήμα 18). [13]

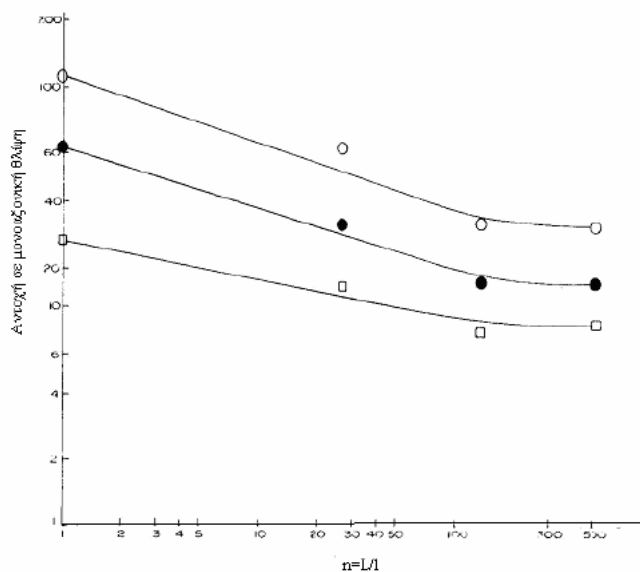
horizontal joints	model type							
	number of elements	1	2	3	4	6	8	
vertical joints	model type							
	number of elements	2	3	4	6	8		
orthogonal joints	model type							
	number of elements	1	4	16	27	49	128	512

Σχήμα 18: Φυσικά ομοιώματα για την διεξαγωγή δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (Lama, 1974)

Από τις δοκιμές προέκυψε ότι η αντοχή μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών έως και 30% σε σχέση με αυτήν του άρρηκτου υλικού. Όσον αφορά τον μηχανισμό αστοχίας, παρατηρήθηκε ότι για τα δοκίμια με τις οριζόντιες ασυνέχειες δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές στο μέσο των δοκιμών, ενώ για τα δοκίμια με τις κατακόρυφες ασυνέχειες δημιουργείται αποκόλληση των δημιουργούμενων από τις ασυνέχειες στηλών άρρηκτου υλικού.

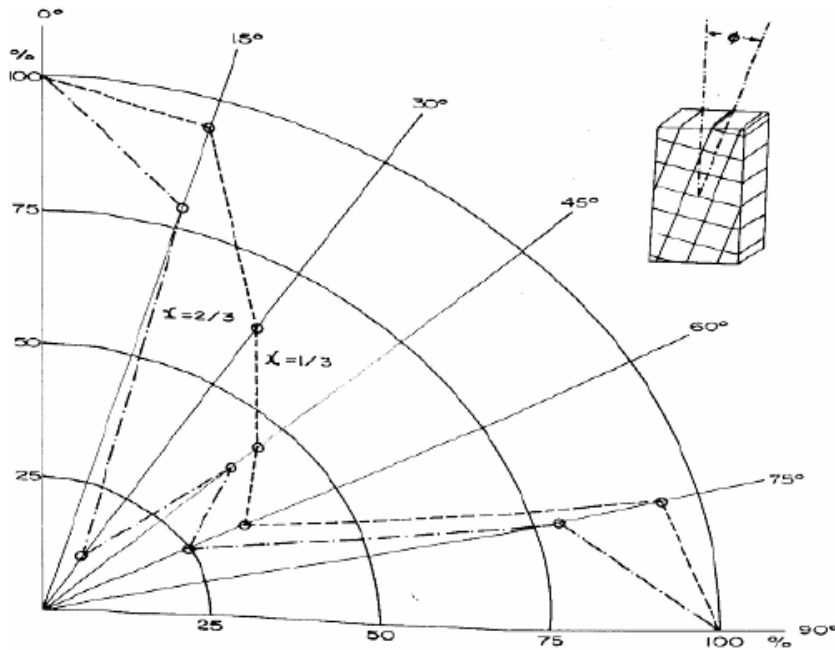
Από την τρίτη ομάδα ομοιωμάτων παρατηρείται ότι η αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής των φυσικών ομοιωμάτων, η οποία σταθεροποιείται σε ένα αριθμό 150 περίπου τεμαχών άρρηκτου υλικού. Στο σχήμα 19 παρουσιάζεται η αντοχή τριών φυσικών ομοιωμάτων, τα οποία διαφέρουν ως προς την αντοχή του άρρηκτου υλικού.

Σχήμα 19 : Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμών (Lama, 1974)



Στη συνέχεια ο Lama πραγματοποίησε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε φυσικά δοκίμια με κεκλιμένες ασυνέχειες. Τα ομοιώματα αποτελούνταν από δυο συστήματα ασυνεχειών, κάθετα

μεταξύ τους, με κλίση 15°, 30°, 45° και 60° ως προς την διεύθυνση φόρτισης και εμμονή $\chi=2/3$ και $1/3$. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάστηκε για κλίση 30° και εμμονή $2/3$ (σχήμα 20). [13]



Σχήμα 20 : Επίδραση της κλίσης και της εμμονής των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμών (Lama, 1974)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τον οδήγησαν στην εμπειρική σχέση (2.2)

$$\sigma_c = K + \left(\frac{L}{l}\right)^u \quad (2.2)$$

, όπου σ_c η αντοχή,

K η αντοχή δοκιμίου που περιέχει πάνω από 150 ασυνέχειες,

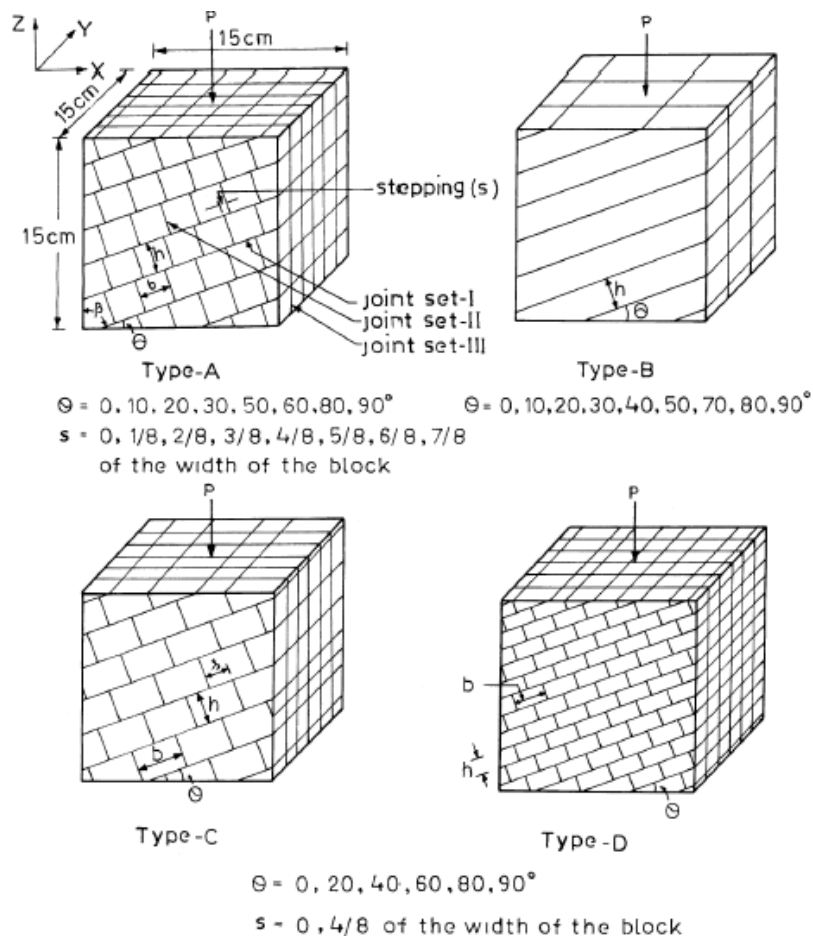
u σταθερά,

L και l το μήκος της βραχομάζας και του άρρηκτου υλικού αντίστοιχα.

2.2.3 Δοκιμές των Singh et al. (2002)

Οι M. Singh et al. (2002) παρουσίασαν αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης με επιβολή σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης, ώστε η δοκιμή να διαρκέσει περίπου 20 λεπτά. Οι περισσότερες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για δοκίμιο τύπου A (σχήμα 21), το οποίο αποτελείται από κυβικά τεμάχια άρρηκτου υλικού. Οι διαστάσεις των δοκιμών είναι 15 x 15 x 15cm και αποτελούνται κατά μέσο όρο από 260 κύβους πλευράς 2.5cm. Στα δοκίμια τύπου A υπάρχουν τρία συστήματα ασυνεχειών.

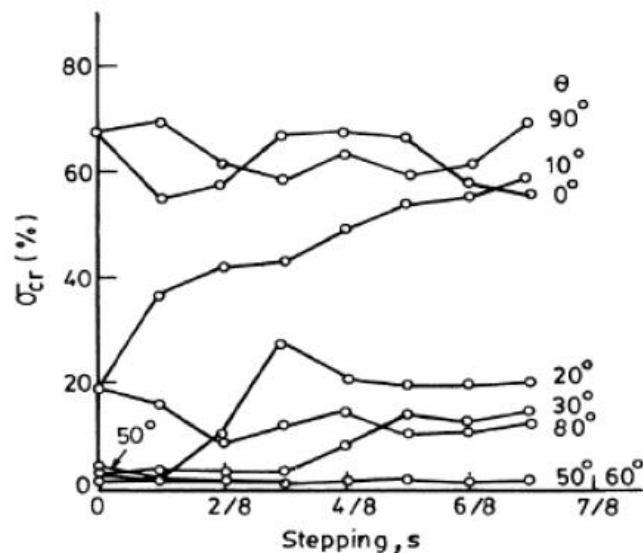
Οι ασυνέχειες του συστήματος I είναι εμμένουσες και έχουν γωνία κλίσης θ ως προς την οριζόντιο. Οι ασυνέχειες του συστήματος II είναι κάθετες στις αντίστοιχες του συστήματος I και έχουν βήμα s στην απόσταση κατά την κλίση τους, ενώ οι ασυνέχειες του συστήματος III παραμένουν πάντα κατακόρυφες και κάθετες.



Σχήμα 21: Φυσικά δοκίμια ρωγματωμένης βραχομάζας (M. Singh et al., 2002)

Τα πειράματα έδειξαν διάφορους μηχανισμούς αστοχίας, όπως αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού, διατμητική αστοχία του άρρηκτου υλικού, περιστροφή των τεμαχών και ολισθήσεις κατά μήκος των ασυνεχειών.

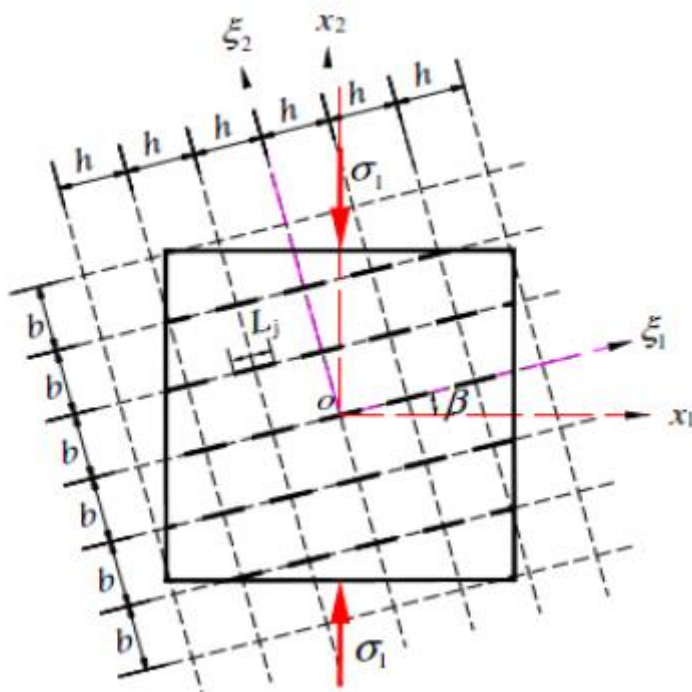
Επίσης, διαπιστώθηκε η σημαντική επίδραση της αλληλεμπλοκής των τεμαχών στον μηχανισμό αστοχίας των δοκιμών καθώς και στην αντοχή, με αύξηση της για γωνίες θ μεταξύ 0° και 30° . Αυτό συμβαίνει διότι, σε αυτές τις γωνίες ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, με τον βαθμό αλληλοκλειδώματος των τεμαχών να έχει σημαντικό ρόλο. [13]



Σχήμα 22: Συσχέτιση βαθμού αλληλεμπλοκής με την αντοχή των δοκιμών (M. Singh et al., 2002)

2.2.4 Πείραμα των Chen Xin, Liao Zhihong και Peng Xi (2012)

Οι ερευνητές πραγματοποίησαν δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με ρυθμό επιβολής μετατόπισης της πλάκας φόρτισης 0.0025 mm/s. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από γύψο με αναλογία γύψου/νερό 1:0.6 κατά όγκο και διαστάσεων 15x15x5 cm. Ένα σύνολο παράλληλων διακοπτόμενων ανοιχτών ρωγμών δημιουργήθηκε με ίση απόσταση (spacing) b και ύψους h στα 5mm, με τη βοήθεια μεταλλικών ελασμάτων όπως φαίνεται και στο σχήμα :



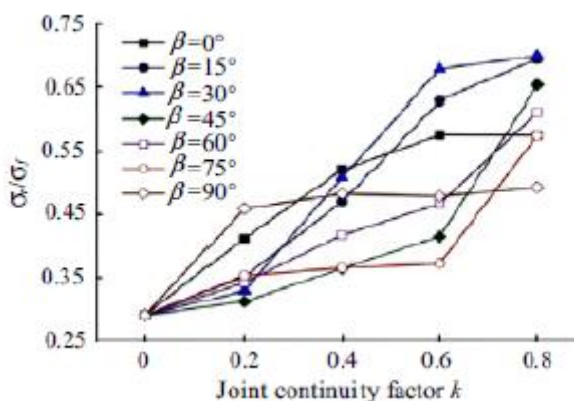
Σχήμα 23: Απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών (Chen Xi, 2012).

Ορίστηκε ως συντελεστής εμμονής των ασυνεχειών η αναλογία του συνόλου με τα επίπεδα των ασυνεχειών. Πήρε τιμές 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 με μήκος ρωγμών 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 cm. Η γωνία κλίσης

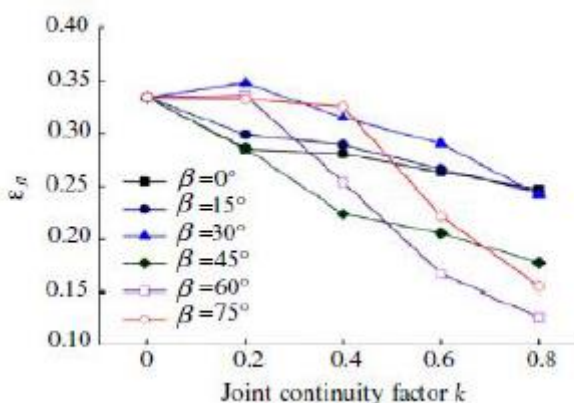
των ασυνεχειών ορίστηκε από 0ο έως 90ο ανά 15ο κάθε φορά.

Το δείγμα φτιάχτηκε από μίγμα με αναλογία γύψου/νερό 1:0.6 κατά όγκο. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές χαρακτηρισμού του υλικού όπου προέκυψαν οι παρακάτω ιδιότητες: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_c=8.51$ MPa. Αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_t=1.44$ MPa. Μέτρο ελαστικότητας $E=2.56$ GPa. Λόγος Poisson $\nu=0.11$. Συνοχή $c=2.2$ MPa. Γωνία εσωτερική τριβής του υλικού $\varphi=38^\circ$ και γωνία εσωτερικής τριβής της ασυνέχειας $\varphi_j=37^\circ$.

Σε αυτή τη μελέτη ο λόγος της παραμένουσας αντοχής με αυτή της μέγιστης (σ_r/σ_j) υιοθετήθηκε ως ένα μέτρο ποσοτικοποίησης της ολκιμότητας των δοκιμών. Επίσης αξιολογήθηκαν ως βοηθητικοί παράγοντες οι παραμορφώσεις κατά την πρώτη και την τελευταία κορυφή της καμπύλης. Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν για την ίδια κλίση το λόγο της παραμένουσας προς τη μέγιστη αντοχή με την αύξηση του συντελεστή εμμόνης των ασυνεχειών k καθώς και τη μεταβολή της παραμόρφωσης της πρώτης και τελευταίας κορυφής με το k .

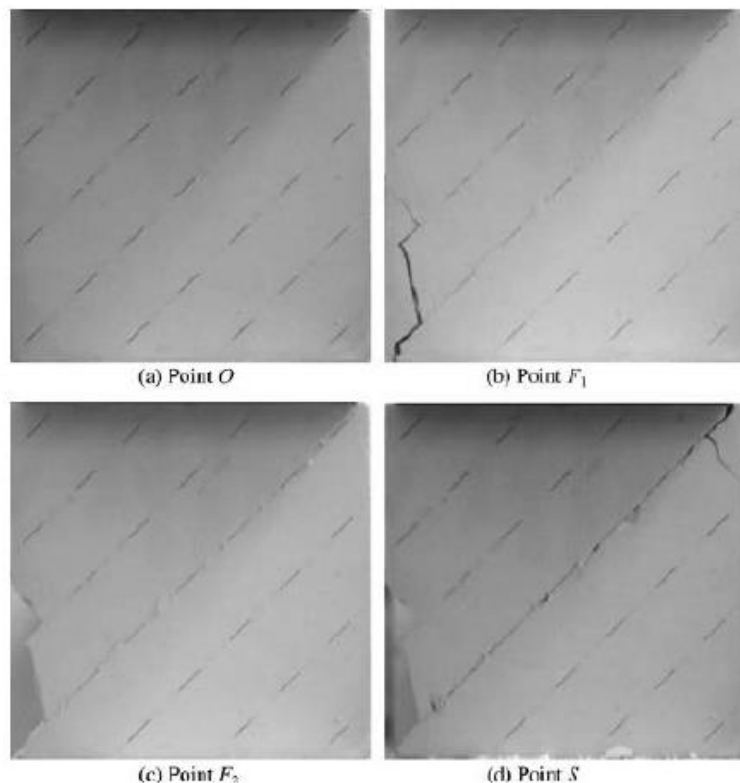


Σχήμα 24: Διάγραμμα του λόγου της παραμένουσας προς τη μέγιστη αντοχή με το συντελεστή εμμόνης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Chen Xi,2012).



Σχήμα25: Διάγραμμα παραμόρφωσης πρώτης κορυφής με το συντελεστή εμμόνης για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Chen Xi,2012).

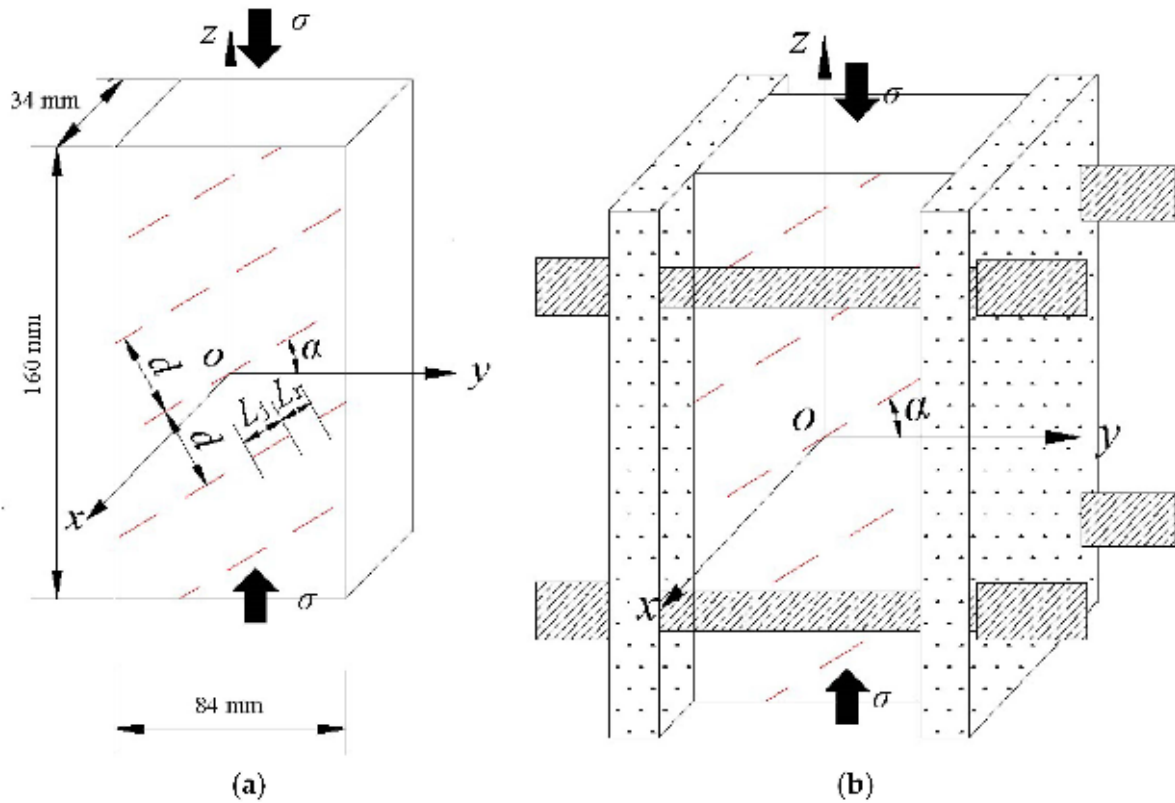
Τέλος ακολουθούν φωτογραφίες από δοκίμιο τύπου με $k=0.6$ και γωνία κλίσης 45° . Φαίνεται η διατμητική αστοχία επέρχεται σε διαγώνια επίπεδα του δείγματος. Τα δόντια που δημιουργούνται στα επίπεδα ασυνεχειών προκαλούν αύξηση της αντίστασης σε διάτμηση έως τη στιγμή που καταστρέφονται και επέρχεται η παραμένουσα αντοχή του δοκιμίου. [14 ,15]



Εικόνα 5 : Παρατήρηση αστοχίας δοκιμίου. (Chen Xi,2012).

2.2.5 Δοκιμές των Guansheng Han, Hongwen Jing, Yujing Jiang, Richeng Liu, Haijian Su και Jiangyu Wu (2018).

Οι ερευνητές πραγματοποίησαν μονοαξονικές και διαξονικές δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων $160 \text{ mm} \times 84 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από τσιμέντο με αναλογία τσιμέντο : νερό 0.6 κατά όγκο. Στα δοκίμια δημιουργήθηκαν μη εμμένουσες, πληρωμένες ασυνέχειες με ρητίνη. Σκοπός των δοκιμών ήταν η επίδραση της διαφορετικής γωνίας κλίσης των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Έτσι, δημιουργήθηκαν επτά διαφορετικά επίπεδα με γωνίες κλίσης $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ και 90° . Στο σχήμα φαίνονται οι διαστάσεις του δοκιμίου, το μήκος των ασυνεχειών (L_i), οι μεταξύ τους αποστάσεις (d, L_r) και η γωνία κλίσης α .



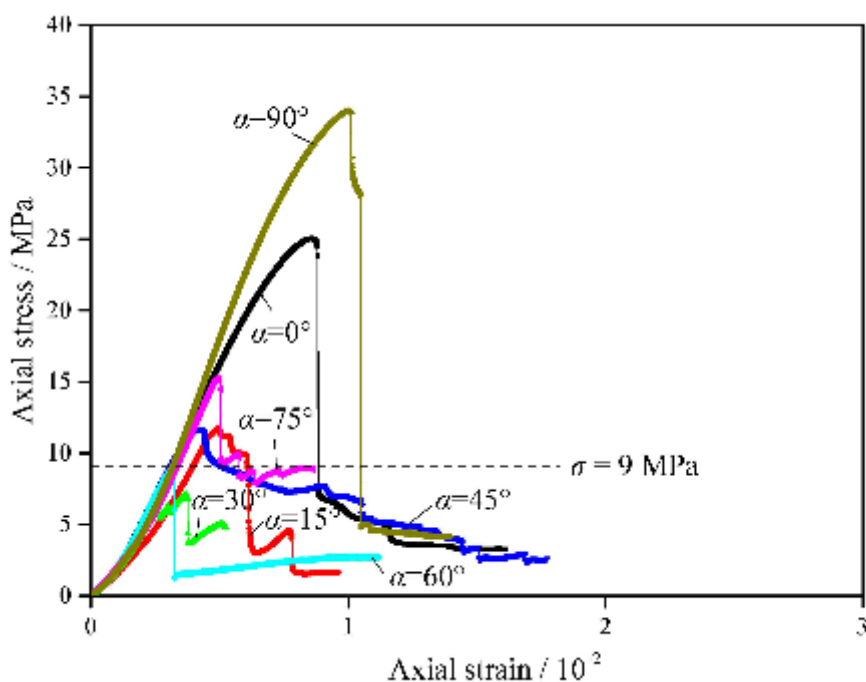
Σχήμα 26: Απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου σε (a) μονοαξονική,(b) διαξονική δοκιμή (Guansheng Han et al 2018) .

Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου υλικού και των δοκιμών στη μονοαξονική και διαξονική δοκιμή.

Number	α ($^{\circ}$)	L_j (mm)	L_r (mm)	d (mm)	σ_c (MPa)	E (GPa)	Remarks
I01	-	-	-	-	34.05	4.86	Intact specimens
I02	-	-	-	-	33.60	4.83	
U01	0	16	12	30	25.04	3.76	Uniaxial compression test
U02	15	16	12	30	11.78	3.47	
U03	30	16	12	30	7.14	3.26	
U04	45	16	12	30	11.71	3.62	
U05	60	16	12	30	9.01	3.47	
U06	75	16	12	30	15.26	4.10	
U07	90	16	12	30	33.99	4.83	
B01	0	16	12	30	30.01	3.93	Biaxial compression test
B02	15	16	12	30	26.75	3.74	
B03	30	16	12	30	24.28	3.67	
B04	45	16	12	30	22.65	3.61	
B05	60	16	12	30	18.69	3.51	
B06	75	16	12	30	28.37	4.17	
B07	90	16	12	30	37.46	5.02	

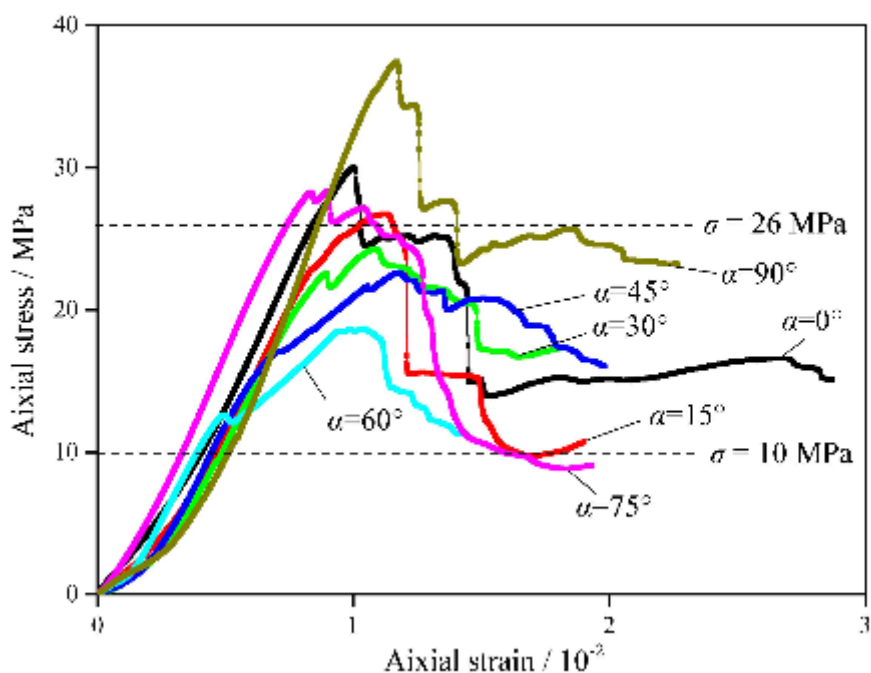
Πίνακας 6: Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών.

Κατά την πραγματοποίηση της μονοαξονικής δοκιμής, τα δοκίμια με γωνίες κλίσης 0 και 90 έχουν τις μεγαλύτερες τιμές σε μέγιστη τάση ενώ δοκίμια με γωνία κλίσης 30 τη μικρότερη. Στο σχήμα απεικονίζεται διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής για τις διαφορετικές γωνίες κλίσης στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



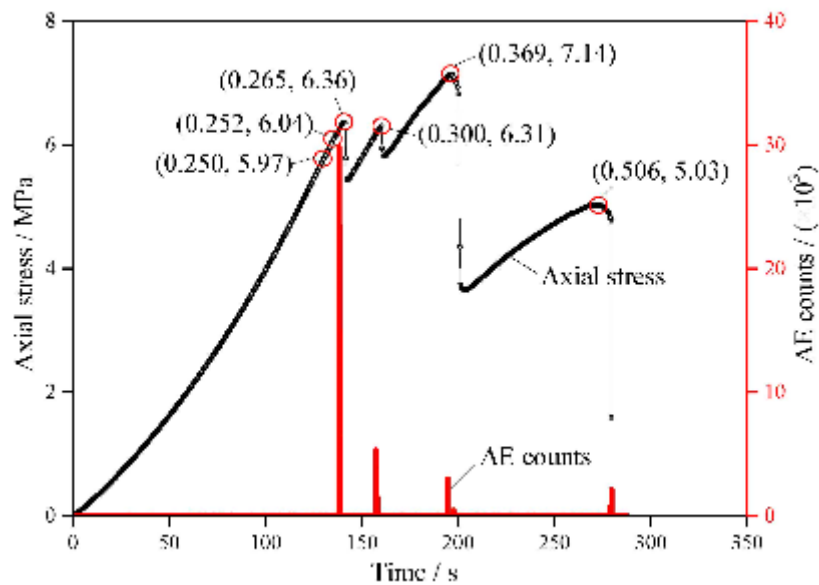
Σχήμα 27: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής για διαφορετικές γωνίες κλίσης στη μονοαξονική (Guansheng Han et al 2018)

Αντίστοιχες παρατηρήσεις προκύπτουν από τις διαξονικές δοκιμές. Στις διαξονικές δοκιμές για γωνία κλίσης 60 παρουσιάζεται η χαμηλότερη τιμή της τάσης.



Σχήμα 28: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής για διαφορετικές γωνίες κλίσης στη διαξονική δοκιμή (Guansheng Han et

Κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική της ακουστικής εκπομπής. Κατά τη δοκιμή δεν παρατηρήθηκαν αρκετά σήματα μόνο τις στιγμές της διάδοσης των προϋπαρχουσών ασυνεχειών.



Σχήμα 29: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπή και χτύποι ακουστικής εκπομπής. (Guansheng Han et al 2018)

Τα δοκίμια εμφανίζουν τρεις τρόπους αστοχίας. Κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης παρατηρήθηκε αξονικός σχισμός (splitting), διάτμηση (step-path crack) και ολίσθηση σε επίπεδα (planar crack). Τέλος στη διαξονική δοκιμή παρατηρήθηκε σχισμός και επίπεδη ολίσθηση. Στην εικόνα παρουσιάζονται οι τρόποι αστοχίας. [16]



Εικόνα 6: α) σχισμός, β) διάτμηση, γ) διάτμηση, δ) επίπεδη ολίσθηση.

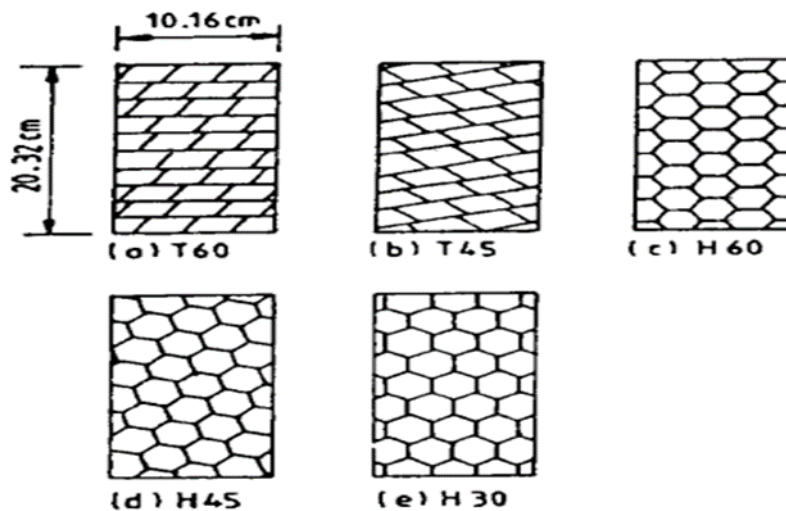
(Guansheng Han et al 2018).

2.3 Διαξονικές και τριαξονικές δοκιμές

2.3.1 Δοκιμές των Brown (1970), Brown and Trollope (1970) και Brown and

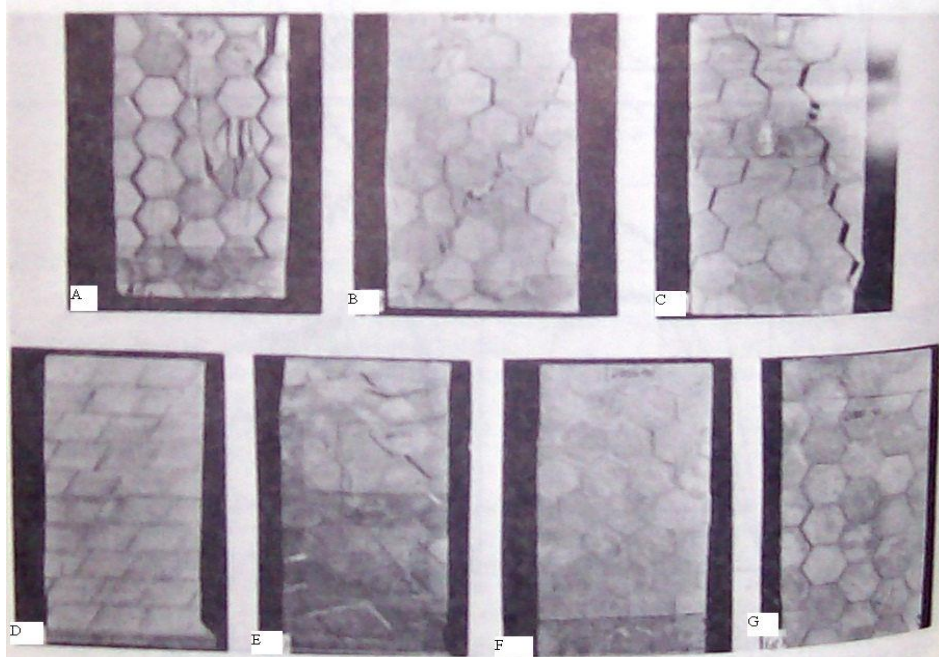
Hudson (1972)

Ο Brown (1970) πραγματοποίησε τριαξονικές δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια γύψου διαστάσεων 4in x 4in x 8in, φτιαγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται διάφορα συστήματα ασυνεχειών. Σύμφωνα με τον Brown (1970) οι δομές αυτές δεν αντιπροσωπεύουν αναγκαστικά δομές βραχομάζας που απαντώνται στη φύση, ωστόσο είναι σκόπιμη η εξέταση τους για την παρατήρηση της συμπεριφοράς ρωγματωμένου υλικού και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του. Οι δοκιμές έγιναν για τιμές πλευρικής πίεσης, 0, 1.2, 3, 6 και 12MPa.



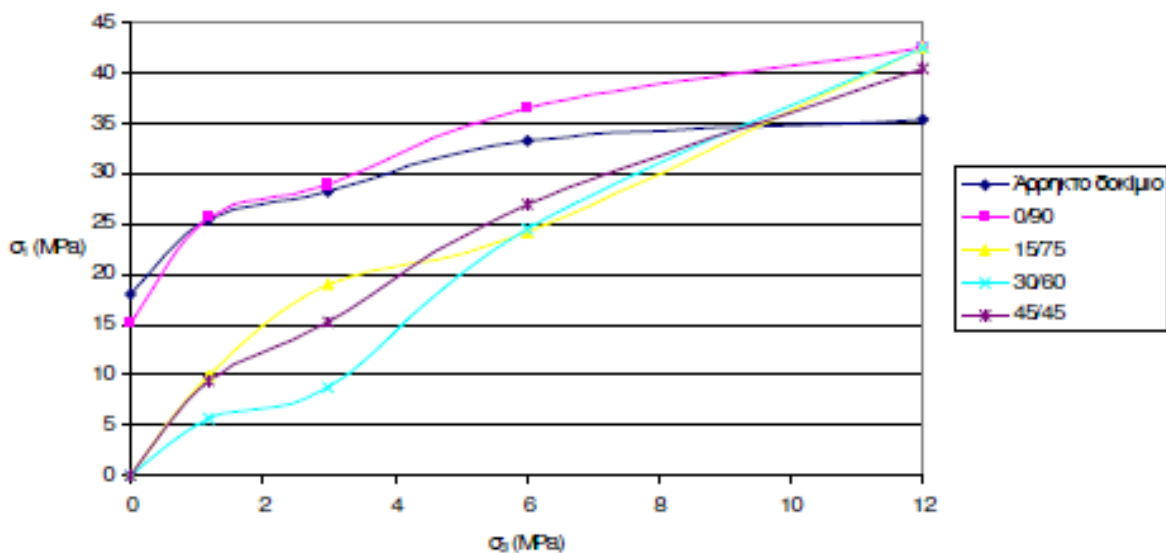
Σχήμα 30 : Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)

Αξίζει να αναφερθεί ότι, για την πλευρική πίεση των 12MPa η αντοχή όλων των δοκιμίων ήταν υψηλότερη από αυτήν του άρρηκτου δοκιμίου. Ο Brown θεώρησε ότι ένας πιθανός λόγος που συνέβη αυτό είναι η επίδραση της κλίμακας. Η συμπεριφορά των δοκιμίων για υψηλές τιμές πλευρικής τάσης ήταν όλκιμη, με τις ασυνέχειες να έχουν πολύ μικρή επίδραση στην αντοχή των ομοιωμάτων. Η αντοχή του άρρηκτου υλικού, που τελικά καθόριζε την αντοχή των δοκιμίων, αναφερόταν σε διαστάσεις των μπλοκ, τα οποία είχαν πλευρά περίπου 1in. Αντίθετα, το δοκίμιο που δεν περιείχε ασυνέχειες ήταν διαστάσεων 4in x 4in x 8in, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μπλοκ άρρηκτου υλικού στα κερματισμένα δοκίμια. Η διαφορά αυτή στην κλίμακα του άρρηκτου υλικού πιθανόν να είναι η αιτία που τα κερματισμένα δοκίμια παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή από την αντίστοιχη του συμπαγούς δοκιμίου, για υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης.



Εικόνα 7: Τρόποι αστοχίας των δοκιμών (Brown, 1970)

Οι Brown and Trollope (1970), διεξήγαγαν ίδιες δοκιμές, αλλά για δοκίμια με 3 κάθετες μεταξύ τους οικογένειες ασυνεχειών, με το τρίτο επίπεδο ασυνεχειών να διατηρείται πάντα κάθετο. Στο παρακάτω διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση, στην τιμή πλευρικής πίεσης 12MPa η αντοχή των δοκιμών προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν του δοκιμίου που αποτελούνταν μόνο από υλικό.



Σχήμα 31 : Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμών (Brown and Trollope, 1970)

Οι μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα παραπάνω πειράματα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 7, είναι αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού, διατμητική θραύση και ολίσθηση υπό το βάρος του δοκιμίου.

Οι Brown and Trollope (1970) από τα αποτελέσματα των δοκιμών κατέληξαν στον παρακάτω εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής της βραχομάζας:

$$\frac{\tau - \tau_0}{\sigma_c} = Z \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^\zeta \quad (2-3)$$

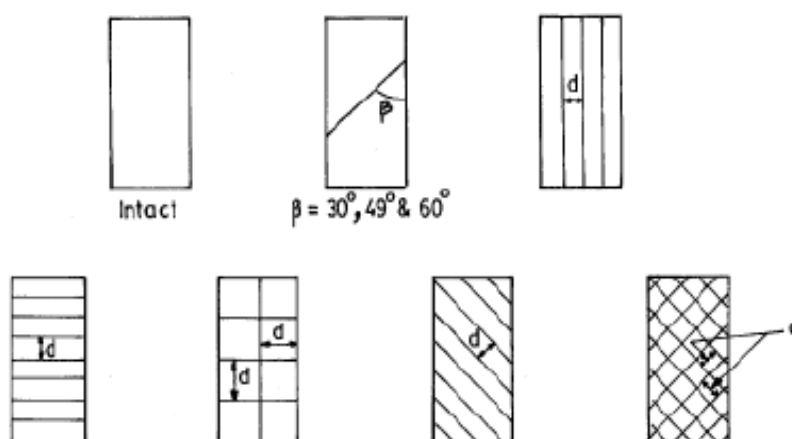
,όπου τ: η διατμητική αντοχή του δοκιμίου
 τ_0 : η συνοχή του άρρηκτου υλικού
 Ζ, ζ: σταθερές της διατμητικής αντοχής του υλικού

Οι Brown and Hudson (1972) εξέτασαν την προοδευτική αστοχία κερματισμένου γύψινου δοκιμίου αποτελούμενο από 40 μπλοκ συμπαγούς υλικού, το οποίο υποβλήθηκε σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε το συμπέρασμα ότι η αντοχή του δοκιμίου είναι συνάρτηση του αριθμού των ασυνεχειών και του σχήματος των μπλοκ.

2.3.2 Δοκιμές των Einstein et al. (1970) και Einstein and Hirschfield (1973)

Οι ερευνητές πραγματοποίησαν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια γύψου με ασυνέχειες. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν 2in x 4in x 8in. Παρατηρήθηκε ότι σε χαμηλές πλευρικές πιέσεις τα δοκίμια είχαν ψαθυρή συμπεριφορά ενώ σε υψηλές πιέσεις είχαν όλκιμη.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή του υλικού εξαρτάται από την κλίση των ασυνεχειών, εκτός από την περίπτωση επιβολής πολύ υψηλής τιμής πλευρικής πίεσης, όπου η αντοχή του διακλασμένου υλικού έφτανε αυτήν του άρρηκτου, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό και την απόσταση των επιπέδων αδυναμίας. [13,14]

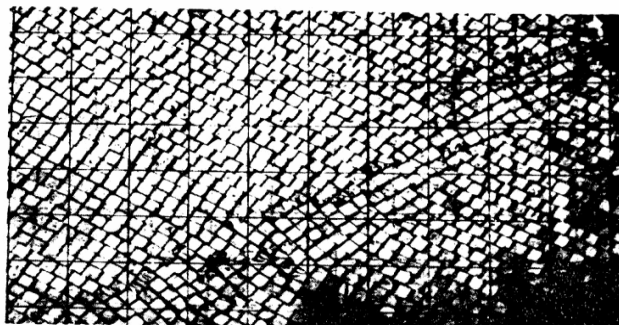


Σχήμα 32 : Εξεταζόμενα δοκίμια (Einstein and Hirschfield ,1973)

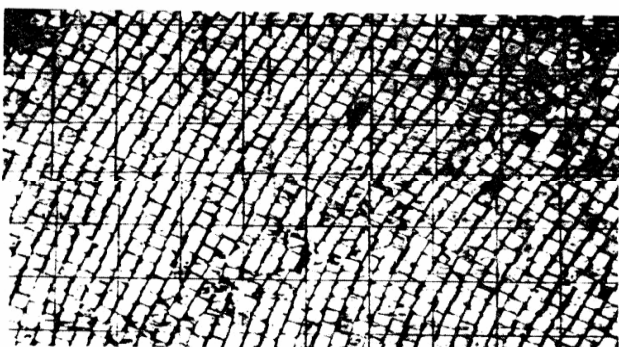
2.3.3 Δοκιμές των Ladanyi and Archambault (1972, 1980)

Οι Ladanyi and Archambault (1972) χρησιμοποίησαν δοκίμια από τσιμέντο με εμμένουσες και μη εμμένουσες ασυνέχειες διαστάσεων 50x100x15cm. Οι μηχανισμοί αστοχίας ήταν συναρτησεί της κλίσης των συστημάτων ασυνεχειών, όπου παρατηρήθηκαν ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης και ζώνες διαμητικής αστοχίας.

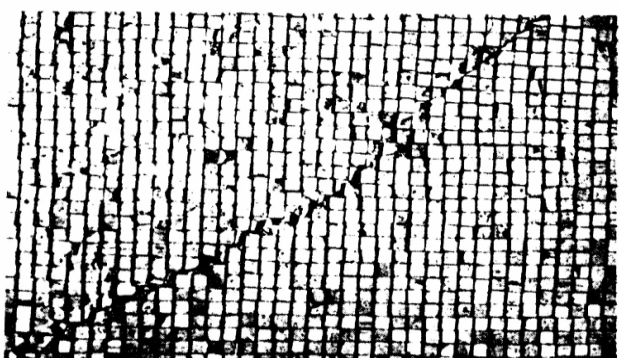
Οι μηχανισμοί παρουσιάζονται στην εικόνα 4.



α. Kink band



β. Διαμητική αστοχία σε ζώνη



γ. Διαμητική αστοχία σε επίπεδο

Εικόνα 8:Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμίων (Ladanyi and Archambault, 1972)

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από τις δοκιμές αυτές είναι ότι ο βαθμός αλληλεμπλοκής των τεμαχών του πετρώματος επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του, καθώς αυτός είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την δυνατότητα περιστροφής των τεμαχών. Ο βαθμός αυτός αλληλεμπλοκής των μπλοκ εξαρτάται από το σχήμα τους και από τον βαθμό διαταραχής στον οποίο έχει υποβληθεί η βραχομάζα.

Το 1980 οι ίδιοι πραγματοποίησαν διαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια με δυο μη εμμένουσες ασυνέχειες ίδιων διαστάσεων. Οι δοκιμές έγιναν για τρεις διαφορετικές τιμές πλευρικής πίεσης για δοκίμια με τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς κλίσεων των μη επίμονων ασυνεχειών (15°/75°, 30°/60°, 38°/52°).

Η σύγκριση με το προηγούμενο πείραμα των ίδιων ερευνητών έδειξε ότι η αντοχή για τις δυο περιπτώσεις δοκιμών συμπίπτουν μόνο για γωνίες θ μεταξύ 0° και 30° . Σε όλες τις υπόλοιπες γωνίες, η αντοχή του δοκιμίου με τις εμμένουσες ασυνέχειες είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη του προσομοιώματος με τις μη εμμένουσες ασυνέχειες. Αυτό, σύμφωνα με τους Ladanyi and Archambault (1980) οφείλεται στους διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας των δυο δοκιμών.

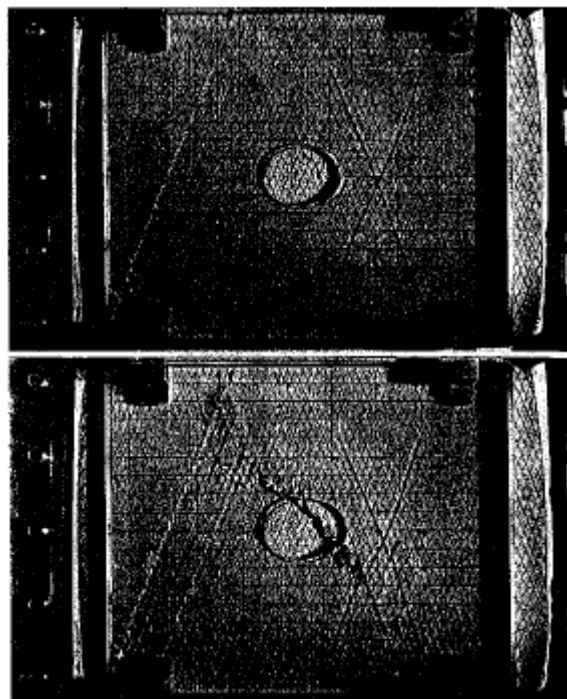
Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός αστοχίας και η αντοχή της κερματισμένης βραχομάζας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ομοιομορφία των μπλοκ του συμπαγούς υλικού καθώς και από την εμμονή των ασυνεχειών. Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι η αστοχία στα δοκίμια με τις μη εμμένουσες ασυνέχειες ήταν προοδευτική. [13,14]

2.3.4 Δοκιμές των Bandis et al. (1981) και Bandis (1990)

Οι Bandis et al. (1981) πραγματοποίησαν διαξονικές δοκιμές θλίψης σε συνθήκες επίπεδης τάσης σε δοκίμια από ψαθυρό υλικό, στα οποία δημιουργήθηκαν δυο συστήματα ασυνεχειών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για τρία δοκίμια, η μόνη διαφορά των οποίων ήταν η απόσταση των ασυνεχειών. Έτσι, το δοκίμιο 1 αποτελούνταν από 4,000 τεμάχια άρρηκτου υλικού, το δοκίμιο 2 από 1,000 και το δοκίμιο 3 από 250.

Η διεξαγωγή των δοκιμών έδειξε ότι μεγαλύτερη αντοχή παρουσίασε το δοκίμιο με τα περισσότερα τεμάχια, δηλαδή το 1. Συγκεκριμένα, η αντοχή του δοκιμίου με τα 4,000 τεμάχια ήταν κατά 30% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου με τα 250 τεμάχια. Τα δοκίμια 2 και 3 αστόχησαν με διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών, ενώ στο δοκίμιο 1 η αστοχία οφειλόταν σε ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης.

Από τις δοκιμές αυτές φάνηκε ότι όταν ο αριθμός των τεμαχίων του άρρηκτου υλικού αυξηθεί σημαντικά, τότε συμβαίνει μεταβολή στην συμπεριφορά του δοκιμίου. Οι περιστροφές των τεμαχίων ενεργοποιούν μηχανισμούς περιστροφικής διάτμησης με αποτέλεσμα το καλύτερο αλληλοκλείδωμα των τεμαχίων και κατά συνέπεια, αύξηση της αντοχής του δοκιμίου.



Εικόνα 9: Προοδευτική δημιουργία ζωνών περιστροφικής παραμόρφωσης (Bandis et. al., 1981)

Αντίστοιχες δοκιμές πραγματοποίησε ο Bandis (1990) σε δυο δοκίμια με διαφορετικό μέγεθος τεμαχίου άρρηκτου υλικού. Στο ένα δοκίμιο (A), η απόσταση των ασυνεχειών ήταν 0.3m, ενώ στο δεύτερο (B) 3m. Το δοκίμιο με τα περισσότερα τεμάχια (A) εμφάνισε μεγαλύτερη αντοχή από αυτό με τα λιγότερα (B). Συγκεκριμένα, για το δοκίμιο A η τάση διαρροής ήταν 6.5MPa και η τάση αστοχίας 9.5MPa, ενώ για το δοκίμιο B η τάση διαρροής υπολογίστηκε στα 5MPa και η τάση αστοχίας 6.5MPa.

Η αστοχία στο έντονα κερματισμένο δοκίμιο οφειλόταν σε περιστροφές των τεμαχίων, ενώ η αστοχία στο άλλο δοκίμιο σε διατμητικές ολισθήσεις ασυνεχειών.

Σύμφωνα με τον Bandis (1990) η παραπάνω συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της κλίμακας, όταν τα τεμάχια του άρρηκτου υλικού έχουν την δυνατότητα να κινηθούν ανεξάρτητα και να έχουν επαφή με όλες τις κλίμακες της τραχύτητας. Οι απαιτούμενοι βαθμοί ελευθερίας των τεμαχίων για να συμβεί αυτό, δύνανται να υπάρχουν σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένης βραχομάζας που βρίσκεται επιφανειακά ή σε μικρό βάθος, ή με άλλα λόγια για μικρές τιμές ορθής τάσης. [13,14]

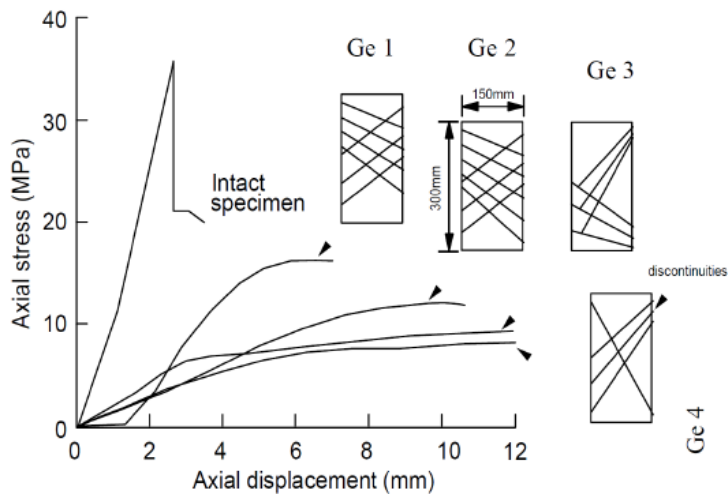
2.3.5 Δοκιμές των Szymakowski et al. (2003)

Οι Szymakowski et al. (2003) διενέργησαν διατμητικές δοκιμές σε κερματισμένα φυσικά δοκίμια διαστάσεων 390mm x 280mm x 270mm. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δοκιμίων που εξετάστηκαν ήταν η απόσταση των ασυνεχειών.

Από τις δοκιμές προέκυψε ότι η αντοχή των δοκιμίων με την μεγάλη απόσταση ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης των δοκιμίων με την μικρή απόσταση ασυνεχειών. Επίσης προέκυψε ότι βραχομάζες με μεγάλα τεμάχια άρρηκτου υλικού παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από αντίστοιχες με μικρότερα τεμάχια άρρηκτου πετρώματος. [13,14]

2.3.6 Δοκιμές των Meyers and Priest (1992)

Οι Meyers and Priest (1992) διεξήγαγαν τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια από γύψο 300mm ύψος και 150mm πλάτος και η πλευρική πίεση που εφαρμόστηκε ήταν ίση με 1Μρα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν μείωση της αντοχής των κερματισμένων δοκιμίων σε σχέση με αυτήν του άρρηκτου υλικού. Η συμπεριφορά και η αντοχή των κερματισμένων δοκιμίων ήταν συνάρτηση της κλίσης των ασυνεχειών και της αντοχής του άρρηκτου υλικού. [13,14]



Σχήμα 33 : Αποτελέσματα δοκιμών σε ρωγματωμένα δοκίμια (Meyers and Priest , 1992)

2.3.7 Δοκιμές των Kulatikale et al. (2001)

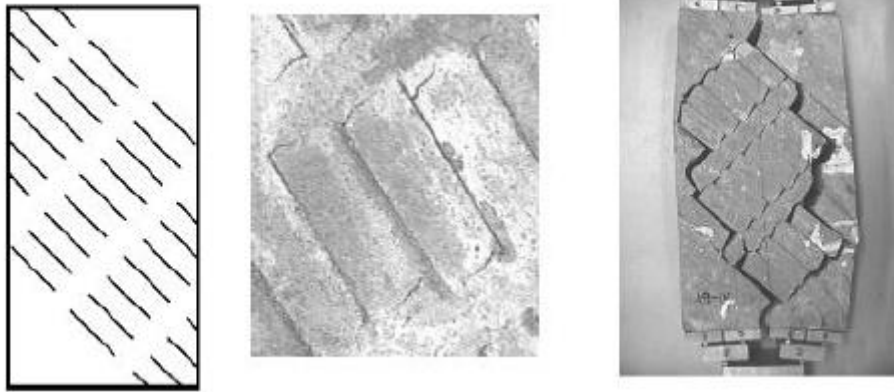
Οι Kulatilake et al. (2001) διεξήγαγαν διαξονικές και μονοαξονικές δοκιμές σε δοκίμια με δύο συστήματα ασυνεχειών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με άσκηση σταθερής πίεσης στις πλευρές και άσκηση φορτίου στο άνω όριο των δοκιμών, διαστάσεων 35,6 x 17.8x 2.5cm. Οι δοκιμές υπέδειξαν τρεις μηχανισμούς αστοχίας, την αξονική κατάκλαση (εφελκυστική αστοχία) του άρρηκτου υλικού, την ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών και τον συνδυασμό των δυο αυτών μηχανισμών. [13,14]

α. Αξονική κατάκλαση άρρηκτου υλικού	β. Ολίσθηση ασυνεχειών	γ. Συνδυασμός των δυο προηγούμενων

Εικόνα 10: Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμών (Kulatilake et al., 2001)

2.3.8 Δοκιμές των Sint Jan and Prudencio (2003)

Οι Sint Jan and Prudencio (2003) πραγματοποίησαν πειράματα σε δοκίμια διαστάσεων 30 x 15 x 5cm με ένα ή δυο συστήματα ασυνεχειών, εκ των οποίων το ένα ήταν με μη εμμένουσες ασυνέχειες. Σε όλα τα πειράματα κυριαρχούν οι μηχανισμοί αστοχίας με περιστροφές των τεμαχίων ενώ σε υψηλές πλευρικές πιέσεις αστοχούσε το άρρηκτο υλικό. [13,14]

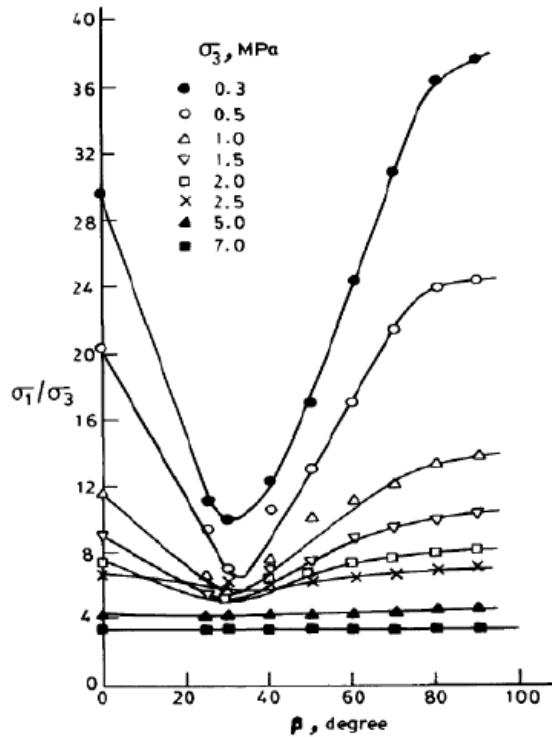


Σχήμα 34 : Χαρακτηριστικός τρόπος αστοχίας δοκιμίου (Sint Jan and Prudencio 2003)

2.3.9 Δοκιμές των Yaji (1984) and Arora (1987)

Ο Yaji (1984) πραγματοποίησε δοκιμές τριαξονικής θλίψης, για διάφορες τιμές πλευρικής πίεσης, σε δοκίμια από γύψο, ψαμμίτη και γρανίτη, με σκοπό τη διερεύνηση της αντοχής κερματισμένης βραχομάζας. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός αστοχίας εξαρτάται από την πλευρική πίεση και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.

Ο Arora (1987) πραγματοποιώντας αντίστοιχες δοκιμές σε συμπαγή και κερματισμένα δοκίμια γύψου και ψαμμίτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντοχή των δοκιμίων είναι συνάρτηση της συχνότητας, του προσανατολισμού και της αντοχής των ασυνεχειών. [13,14]

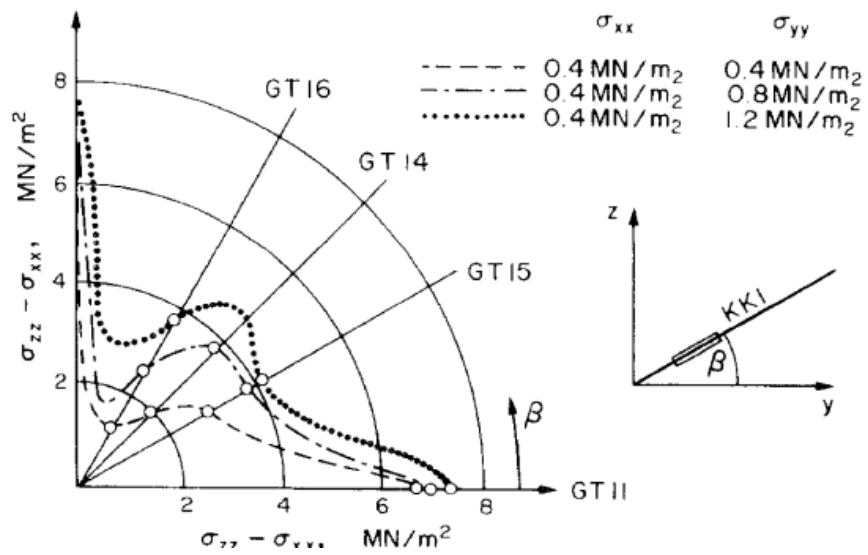


Σχήμα 35 : Αντοχή σε σχέση με την γωνία κλίσης της ασυνέχειας και την τιμή της πλευρικής πίεσης (Arora, 1987)

2.3.10 Δοκιμές των Reik and Zacas (1978)

Οι Reik and Zacas (1978) με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της ενδιάμεσης κύριας τάσης πραγματοποίησαν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια διαστάσεων 60cm x 60cm x 130cm με τρία συστήματα ασυνεχειών κάθετα μεταξύ τους.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών στην περίπτωση, όπου το κύριο σύστημα ασυνεχειών είναι παράλληλο στην ενδιάμεση κύρια τάση η επιρροή της είναι μικρή, ενώ αντίθετα στις υπόλοιπες διευθύνσεις είναι πολύ σημαντική. Με βάση τα συμπεράσματα αυτά, οι Reik and Zacas (1978) έκριναν ότι τα κριτήρια αστοχίας ρωγματωμένης βραχομάζας που δεν λαμβάνουν υπόψη τους την ενδιάμεση κύρια τάση, δεν μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την αντοχή της. [13,14]



Σχήμα 36 : Επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης στην αντοχή (Reik and Zacas, 1978)

Κεφάλαιο 3

Χαρακτηρισμός του υλικού και προετοιμασία δοκιμίων

3.1 Προετοιμασία δοκιμίων

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε οικοδομικός γύψος της εταιρίας Βιογυψ Καρβέλης Α.Ε. με σταθερή αναλογία γύψου / νερού κατά βάρος 1.5. Η ανάμειξη γινόταν για 2 λεπτά,

καθώς στη συνέχεια το μίγμα στερεοποιούταν. Το μίγμα τοποθετήθηκε σε καλούπι και ύστερα σε φούρνο στους 40°C, όπου και παρέμεινε για μία ώρα. Στη συνέχεια, το καλούπι αφαιρέθηκε και το δοκίμιο παρέμεινε στο φούρνο για τέσσερις μέρες, για την απομάκρυνση της υγρασίας.

Για το χαρακτηρισμό του υλικού διεξήχθησαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, εφελκυστικής αντοχής, προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των P κυμάτων και δοκιμές δυσθραυστότητας. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν μια σειρά δοκιμών σε καλούπι με διαστάσεις 15 cm × 15 cm × 5cm.

3.2 Πειραματικές διατάξεις και όργανα

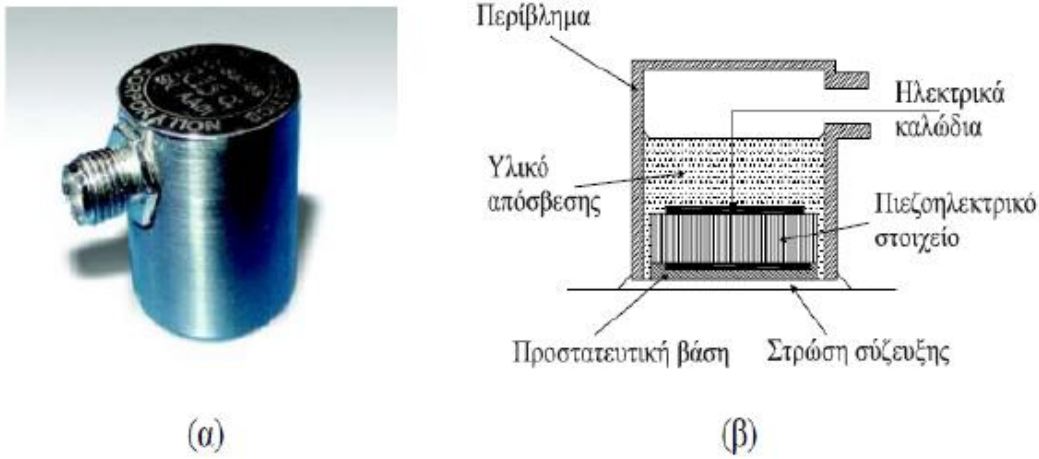
Μηχανή φόρτισης

Η Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης δοκιμών έχει την δυνατότητα ελέγχου τεσσάρων πλαισίων φόρτισης με ηλεκτρονική επιλογή του ενεργού πλαισίου και περιλαμβάνει τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- Πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας τουλάχιστον 5,000kN για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε υψηλής αντοχής πετρώματα και σκυρόδεμα.
- Πλαίσιο θλίψης με δύο έμβολα δυναμικότητας 15 και 250kN αντίστοιχα, για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χαμηλής αντοχής πετρώματα, δοκιμών κάμψης σε μικρών διαστάσεων δοκούς πετρώματος, δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού.
- Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150kN για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης σε δοκούς σκυροδέματος και δυσθραυστότητας σε μικρές πλάκες εκτοξευομένου σκυροδέματος.
- Αυτόματη μονάδα εφαρμογής και ελέγχου πλευρικής πίεσης σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης.
- Αισθητήρες/μορφοτροπίες για την μέτρηση της απόκρισης πετρωμάτων και σκυροδέματος κατά τις δοκιμές.
- Βοηθητικός εξοπλισμός, συσκευές και εξαρτήματα για την προετοιμασία και εκτέλεση των απαιτούμενων δοκιμών και την απόληψη των μετρήσεων.

Αισθητήρες και προενισχυτές

Για την τεχνική ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Αποτελείται από ένα ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titanate) το οποίο είναι και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μεταβάλλει το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μετατρέποντας το σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπίες (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας-μορφοτροπέας δίνεται στο σχήμα 20. Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία.

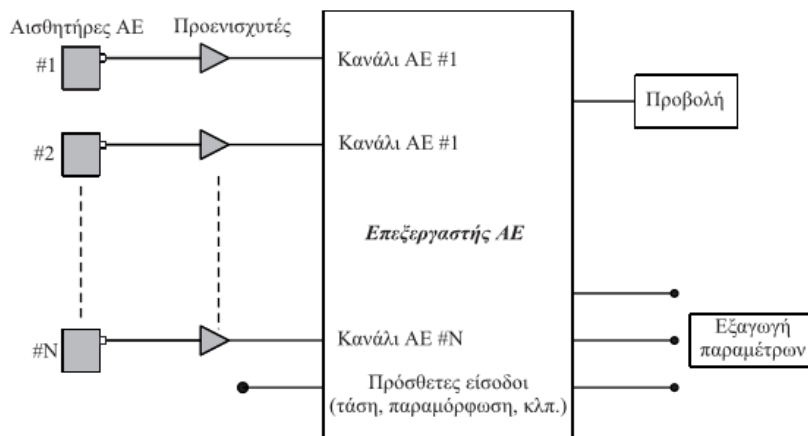


Σχήμα 37 : (α) αισθητήρας, (β) σκαρίφημα του εσωτερικού ενός αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Το εργαστήριο διαθέτει δύο τύπους μικρού μεγέθους αισθητήρων ΑΕ, τον τύπο MICRO-100S και τον τύπο R15 της εταιρίας PAC. Οι MICRO100S είναι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας 200-950kHz, ενώ οι R15 έχουν εύρος συχνοτήτων λειτουργίας 50-200kHz.

Μονάδα Επεξεργασίας

Το ηλεκτρικό σήμα του μορφοτροπέα ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος. Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα ΑΕ περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude - dB), τον αριθμό των απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.



Σχήμα 38: Μονάδα επεξεργασίας ηλεκτρικών σημάτων

Το εργαστήριο διαθέτει 2 συστήματα ακουστικής εκπομπής: το PCI-2 και το PCI-8 της εταιρείας PAC (Physical Acoustic Corporation). Στο σχήμα απεικονίζεται μια κάρτα οχτώ καναλιών PCI – 8 της εταιρείας.



Σχήμα 39: κάρτα οχτώ καναλιών PCI – 8

Το PCI-8 είναι ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα που λειτουργεί βάση του προγράμματος AE Win for Windows και ενσωματώνει μία κάρτα οχτώ καναλιών της ομώνυμης εταιρείας PAC. Η κάρτα αυτή αποτελεί ένα πλήρες σύστημα AE (AE System on a Board) και τα χαρακτηριστικά του είναι, συνοπτικά, τα παρακάτω:

- Ψηφιακή κάρτα (Digital Signal Processing) υψηλής απόδοσης.
- Σύνθετη αντίσταση (impedance) 50Ω.
- Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ελέγχου των αισθητήρων AST (Auto Sensor Test).
- Απόκριση συχνότητας 1kHz – 400kHz.
- Όταν η ενίσχυση (gain) της κύριας μονάδας ρυθμίζεται στα 0dB, 6dB, 12dB τότε η ελάχιστη τάση κατωφλιού επιλέγεται αντίστοιχα στα 26dB, 20dB, 16dB.
- Μέγιστο πλάτος καταγεγραμμένου σήματος 100dB.
- Οχτώ (8) κανάλια AE υψηλής ταχύτητας ανάκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 3 MSPS) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανόδου, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κτλ.), προβολή παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο.
- Τέσσερα (4) φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass) (1kHz, 5 Hz, 20kHz, 100kHz) και 4 φίλτρα διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) (10kHz, 40kHz, 100kHz, 400kHz) για κάθε κανάλι, ελεγχόμενα από το software.
- Μετατροπέας A/D 16bit (Digital Analog Converter – DAC), με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 1 MSPS ανά κανάλι.
- Έως δύο (2) αναλογικά παραμετρικά κανάλια, τα οποία μπορούν να αξιολογήσουν επιπλέον παραμετρικά στοιχεία, όπως η παραμόρφωση, το φορτίο, η θερμοκρασία κτλ.

Λογισμικά AE

Το AE win είναι ένα πρόγραμμα (32-bit windows) συλλογής δεδομένων και ανάγνωσης και επεξεργασίας σημάτων AE που συνεργάζεται με τα πολυκάναλα συστήματα της PAC (DiSP, SAMOS, PCI-2, MISTRAS και SPARTAN). Αξιοποιώντας πλήρως τους πόρους των Windows , συμπεριλαμβάνει ρύθμιση των Windows για διαθέσιμες αναλύσεις οθόνης, εκτύπωση , δικτύωση , multi-tasking , multi-threading, κ.λ.π. Το πρόγραμμα τρέχει σε λειτουργικά συστήματα WINDOWS 98/2000/ME/XP. Ωστόσο η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση WINDOWS 2000/XP. Το AEwin είναι πλήρως συμβατό με αρχεία AE. Το AEwin είναι εύκολο στη χρήση και τη λειτουργία. Το λογισμικό έχει όλες τις δυνατότητες επεξεργασίας , γραφημάτων και ανάλυσης δεδομένων καθώς και πολλά άλλα νέα και βελτιωμένα χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την ανάλυση των και την οπτικοποίηση των δεδομένων. Ακόμα μπορεί επίσης να τρέξει πολλαπλά αντίγραφα AEwin ταυτόχρονα.

Noesis

Το Noesis είναι λογισμικό που αναπτύχθηκε από την Envirocoustics SA για την οπτικοποίηση (π.χ. μέσω πολλών διαγραμμάτων) και τον χειρισμό δεδομένων ακουστικής εκπομπής. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μη κατασρεπτικές δοκιμές ακουστικής εκπομπής (AE). Επιπλέον, το Noesis μπορεί να πραγματοποιήσει ταξινόμηση και επεξεργασία δεδομένων κατά τη διάρκεια της απόκτησης (σε πραγματικό χρόνο, Live-SPR). Εκτός από την προβολή και την επεξεργασία , το πρόγραμμα μπορεί να πραγματοποιήσει Αναγνώριση Προτύπων (Pattern recognition) μέσω πολύ ισχυρών αλγορίθμων διάκρισης των δεδομένων (ουσιαστικά χωρίζει τα παρόμοια δεδομένα σε ομάδες). Το λογισμικό περιλαμβάνει επίσης δυνατότητες επεξεργασίας κυματομορφής (FFT, Power Spectrum, εξαγωγή χαρακτηριστικών, κλπ.) καθώς και άλλα χαρακτηριστικά.

3.3 Εφελκυστική Αντοχή

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (brazilian test). Η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) γίνεται με τη συμπίεση μέσω διαμετρικά αντίθετων συγκεντρωμένων φορτίων ενός δοκιμίου που έχει τη μορφή δίσκου, πάχους 25mm και διαμέτρου 55mm. Υπό τις συνθήκες αυτές φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

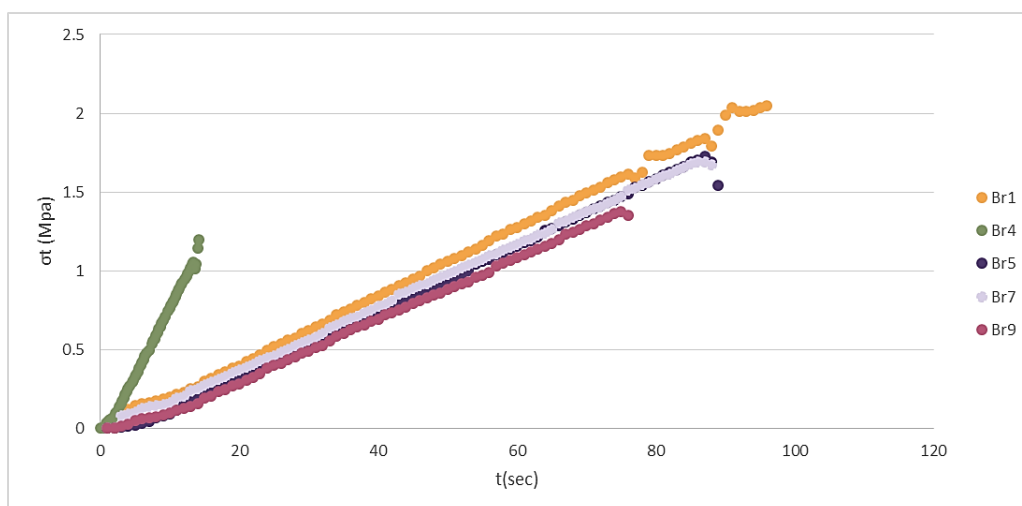
Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφ' όσον το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης.

Στον πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής και η μέση εφελκυστική αντοχή των δοκιμών η οποία υπολογίστηκε 1.6 MPa.

Δοκίμια	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Br1	2,05
Br4	1,19
Br5	1,72
Br7	1,69
Br9	1,37
Μέσος όρος	1,6

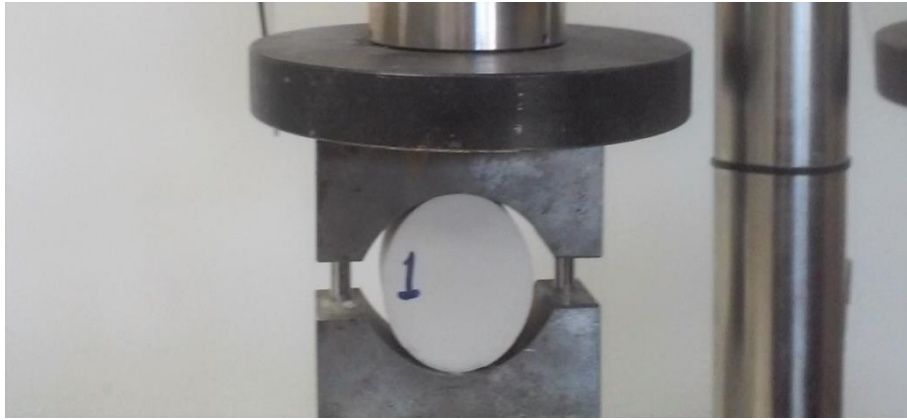
Πίνακας 7: Αποτελέσματα δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης

Στο σχήμα 40 απεικονίζεται η τάση συναρτήσεως του χρόνου μέχρι την αστοχία των δοκιμών. Να σημειωθεί ότι ο ρυθμός φόρτισης κρατήθηκε σταθερός 50 N/sec.



Σχήμα 40: Καμπύλη τάσης – χρόνου στη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες κατά την έναρξη της δοκιμής και αστοχίας του δοκιμίου.



Εικόνα 11: Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης



Εικόνα 12: Ρωγμές παράλληλες με τον άξονα φόρτισης κατά την αστοχία του δοκιμίου

3.4 Ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε μέτρηση του χρόνου διάδοσης διαμήκους κύματος (t_p) στο εργαστήριο με τη κεντρική μονάδα Pundit 7. Για την καλή επαφή των μορφοτροπέων στις λείες και επίπεδες επιφάνειες των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ειδικό gel υπερήχων. Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 55mm και μήκους d . Η ταχύτητα διάδοσης υπολογίστηκε από τον τύπο $V_p = d \cdot t_p^{-1}$.

Από τις μετρήσεις προέκυψε ταχύτητα διάδοσης του υλικού 2329 m/s.

Δοκίμια	Μήκος Δοκιμίου (m)	Χρόνος (ms)	Ταχύτητα διάδοσης (m/sec)
4	0,119	49,5	2422
6	0,125	57,5	2188
2	0,120	50,7	2368
7	0,119	54,4	2195
3	0,125	50,6	2471

Πίνακας 8: Ταχύτητα διάδοσης κυλινδρικών δοκιμίων

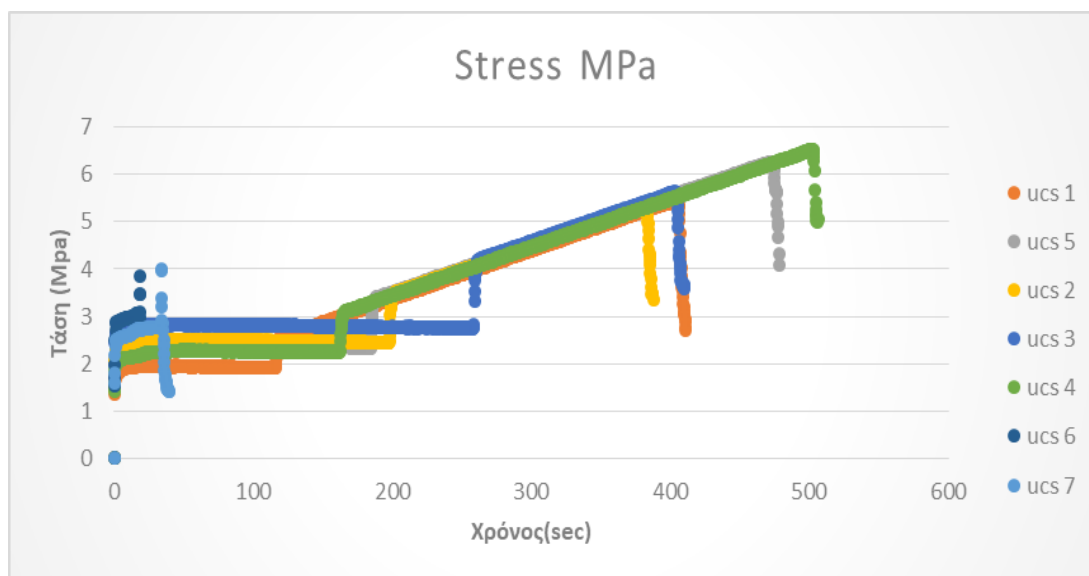
3.5 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή

3.5.1 Κυλινδρικά Δοκίμια

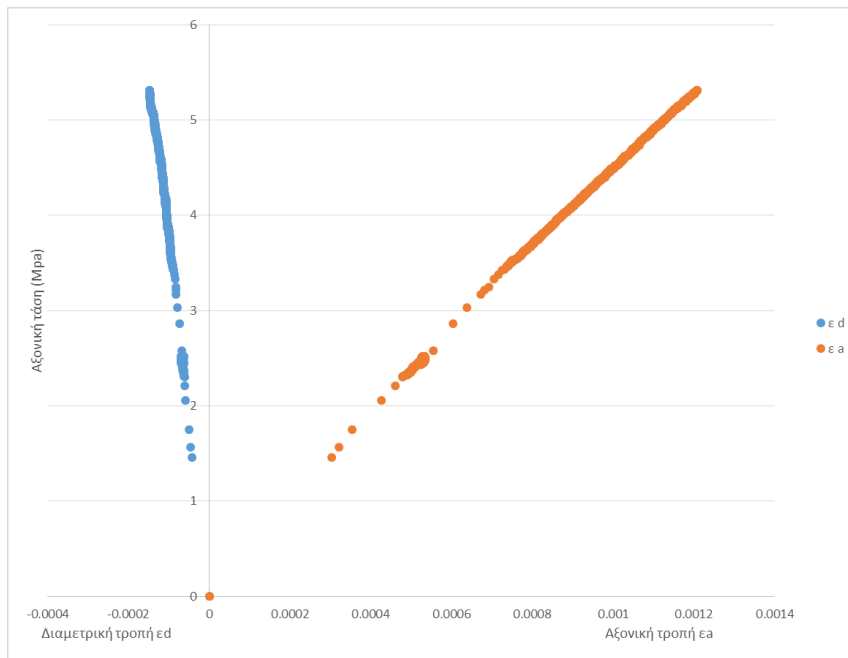
Το πείραμα της μονοαξονικής θλίψεως (compression test) αποτελεί μια δοκιμή κατά την οποία το δοκίμιο συμπιέζεται μεταξύ δυο χαλύβδινων πλακών.

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής ή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson του άρρηκτου πετρώματος. Με τη χρήση ειδικής διάταξης η παραμόρφωση μετρήθηκε από βελόμετρα της εταιρίας CONTROLS και μπόρεσαν να κατασκευαστούν καμπύλες αξονικής τάσης – αξονικής τροπής και αξονικής τάσης – διαμετρικής τροπής, από τις οποίες παρατηρείται ότι το υλικό μας συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό μέχρι την αστοχία, δηλαδή ψαθυρό που σημαίνει ότι δεν αναμένουμε προειδοποίηση μέχρι την αστοχία του. Τα δοκίμια είναι κυλινδρικά με διάμετρο 54mm, αλλά λόγω του ότι οι βάσεις έδρασης του δοκιμίου στην πρέσα δεν ήταν αρκετά επίπεδες, υπήρξε ανομοιόμορφη κατανομή φορτίου. Να σημειωθεί ότι ο ρυθμός φόρτισης των δοκιμίων ήταν 25N /sec.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 5.265MPa. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις δοκιμές.



Σχήμα 41: Καμπύλη αξονικής τάσης – χρόνου.



Σχήμα 42: Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής , αξονικής τάσης – διαμετρικής τροπής.

Από το σχήμα προκύπτει εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας 3.2 GPa και ο λόγος Poisson υπολογίστηκε 0.15.



Εικόνα 13: Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

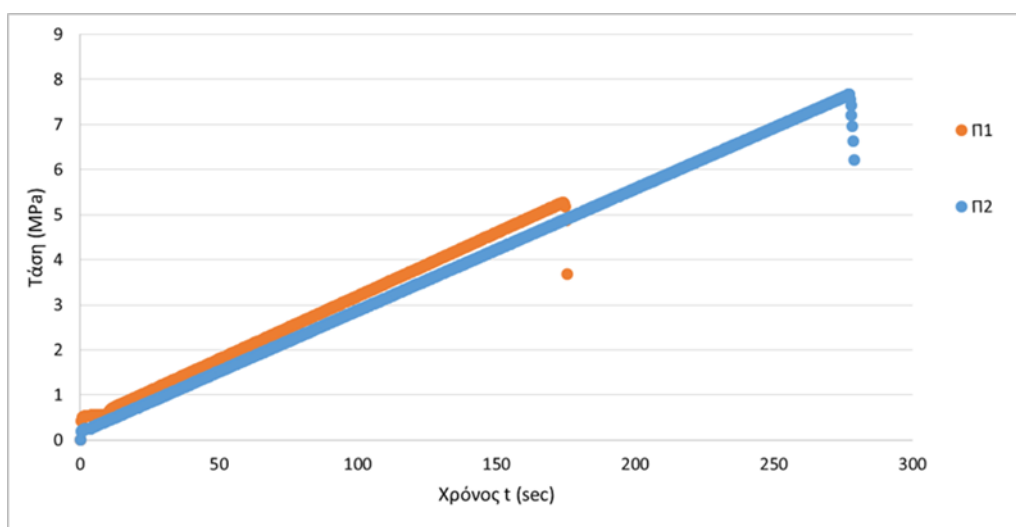
3.5.2 Πρισματικά Δοκίμια

Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν δυο δοκίμια (Π1, Π2), τα οποία πρώτα ζυγίστηκαν για τον προσδιορισμό της πυκνότητάς τους, η οποία φαίνεται στον πίνακα.

Δοκίμια	Πυκνότητα (gr/cm^3)
Π1	0.92
Π2	0.97

Πίνακας 9: Προσδιορισμός πυκνότητας δοκιμίων

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ρυθμό φόρτισης 200N/s. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 6.5MPa. Στη συνέχεια, παρατίθεται το διάγραμμα τάσης – χρόνου των δύο δοκιμών



Σχήμα 43: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου των δύο δοκιμών

Για την παρατήρηση του φαινομένου της ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν ο αισθητήρας Pico και ο R15.



Εικόνα 14: Διάταξη πρισματικού δοκιμίου για τη δοκιμή μοσαξονικής θλίψης.

Με τη βοήθεια κάμερας η δοκιμή βιντεοσκοπήθηκε και παρατηρήθηκε η δημιουργία ρωγμών

παράλληλων με τον άξονα φόρτισης.



Εικόνα

15 : Αισθητήρες Pico (αριστερά)και R15(δεξιά)

3.6 Δοκιμή Δυσθραυστότητας

Για τη δοκιμή της δυσθραυστότητας χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης σε βραζιλιανούς δίσκους με μία ευθεία εγκοπή πάχους 0.2cm και μήκους 2.4cm. Η εγκοπή κατασκευάστηκε με λάμα αλουμινίου στο κέντρο του δοκιμίου. Η λάμα τοποθετήθηκε στο καλούπι μαζί με το γύψο και παρέμεινε μέχρι τη στερεοποίηση του δοκιμίου.

Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε στη σερβουδραυλική μηχανή, έτσι ώστε η εγκοπή να είναι παράλληλη με τον άξονα φόρτισης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας για τύπο I. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε, όπως η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης με σταθερό ρυθμό φόρτισης 150N/sec. Για την ασφαλή διεξαγωγή των αποτελεσμάτων και τον ακριβή προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα.

Η δυσθραυστότητα τύπου I, σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή της ISRM, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} \gamma_{min}$$

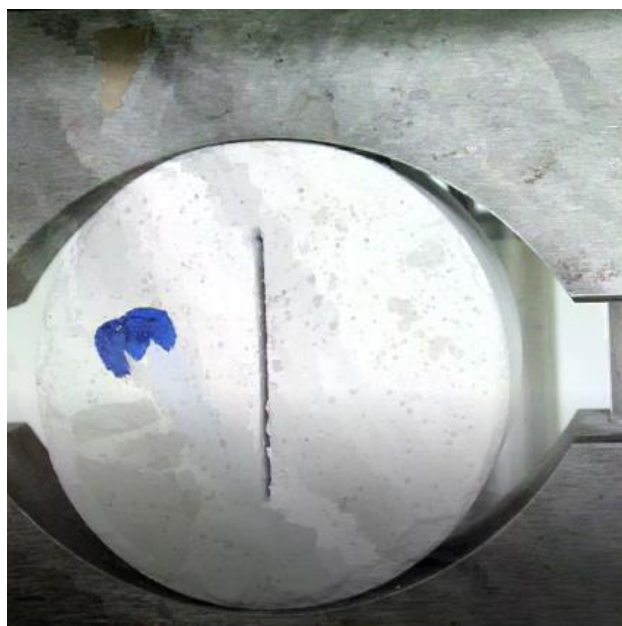
Στον πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Δοκίμιο	Πάχος B(cm)	Διάμετρος D(cm)	P_{max} (kN)	γ_{min}	K_{IC} (MPa·m ^{1/2})
FT1	3.616	5.5585	1.281	0.85	0.111
FT2	3.597	5.589	0.923	0.85	0.092

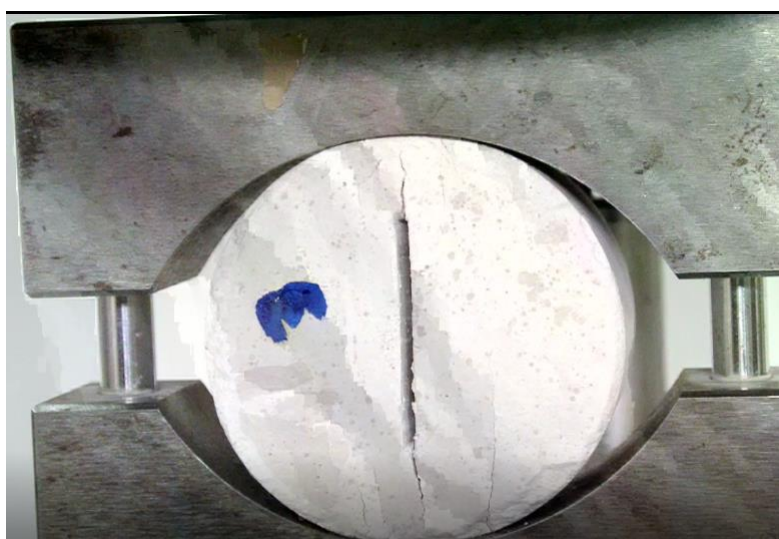
FT3	2.802	5.59	1.439	0.85	0.185
FT4	3.058	5.581	1.304	0.85	0.153
FT5	3.333	5.565	1.054	0.85	0.114
Μέσος όρος			1.2	0.85	0.131

Πίνακας 10 : Αποτελέσματα δοκιμής σε CSTBD δοκίμια

Κατά την αστοχία του δοκιμίου δημιουργούνται ρωγμές παράλληλες με τον άξονα φόρτισης, οι οποίες ξεκινάνε από τα άκρα της εγκοπής.



Εικόνα 16 : Δοκίμιο κατά τη δοκιμή



Εικόνα 17: Αστοχία δοκιμίου και δημιουργία ρωγμών με τον άξονα φόρτισης.

Κεφάλαιο 4

Δοκίμια με συνεπίπεδες ασυνέχειες

Μετά το χαρακτηρισμό του υλικού κατασκευάστηκαν δοκίμια με τεχνητές ασυνέχειες κλίσης 45°. Οι ασυνέχειες ήταν μη εμμένουσες, δηλαδή δεν εκτείνονταν σε όλο το πλάτος του δοκιμίου και συνεπίπεδες. Οι ασυνέχειες κατασκευάζονταν με έλασμα αλουμινίου με κατάλληλη διάταξη για το σωστό προσανατολισμό και τη μεταξύ τους απόσταση.

Πριν την έναρξη των πειραμάτων, στα δοκίμια τοποθετήθηκαν αισθητήρες πιεζοηλεκτρικού υλικού για την παρατήρηση του φαινομένου της ακουστικής εκπομπής. Επιπλέον τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο αστοχίας τους. Τέλος, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ρυθμό φόρτισης 200N/s.

4.1 Δοκίμια με μία ασυνέχεια

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια (PI1,PI2,PI3) με μία τεχνητή ασυνέχεια κλίσης 45°,πάχους 2mm και μήκους 24mm. Αρχικά, τα δοκίμια ζυγίζονται και μετρούνται οι διαστάσεις τους με παχύμετρο για τη σωστή διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στον πίνακα παρατίθενται η πυκνότητα του καθενός

Δοκίμια	Πυκνότητα (gr/cm^3)
PI1	0.92
PI2	0.92
PI3	0.9

Πίνακας 11: Πυκνότητα δοκιμίων με μία ασυνέχεια

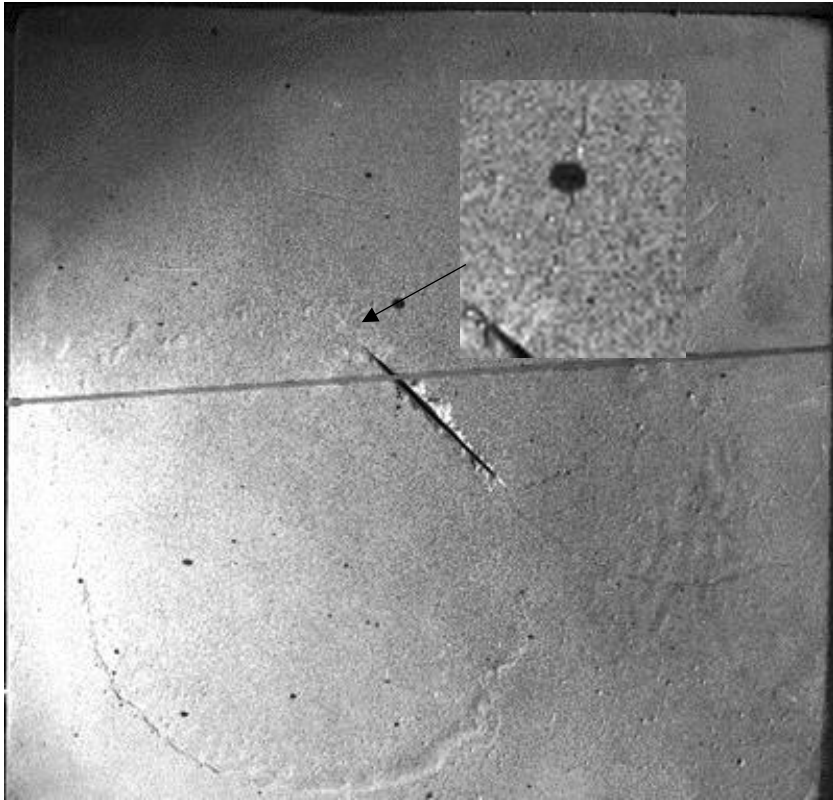
4.1.1 Δοκίμιο P11

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

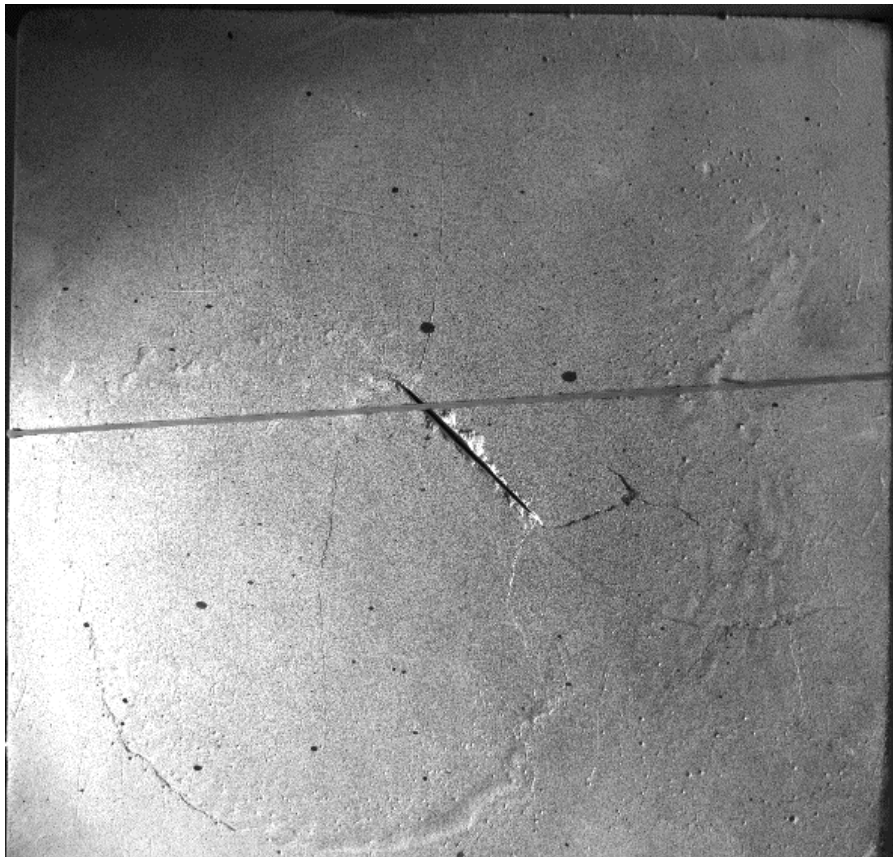


Εικόνα 18: Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Από τη φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται να δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές από τα άκρα της ασυνέχειας (wing cracks) από το 46ο δευτερόλεπτο και να αρχίζουν να διαδίδονται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες φάσεις διάδοσης των ρωγμών.



(a)



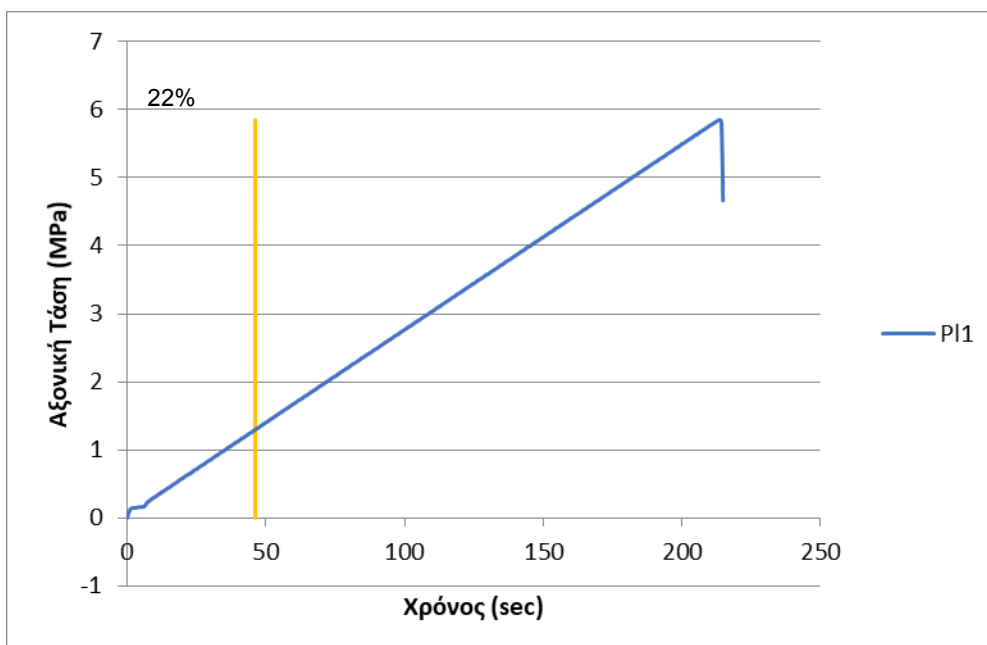
(b)



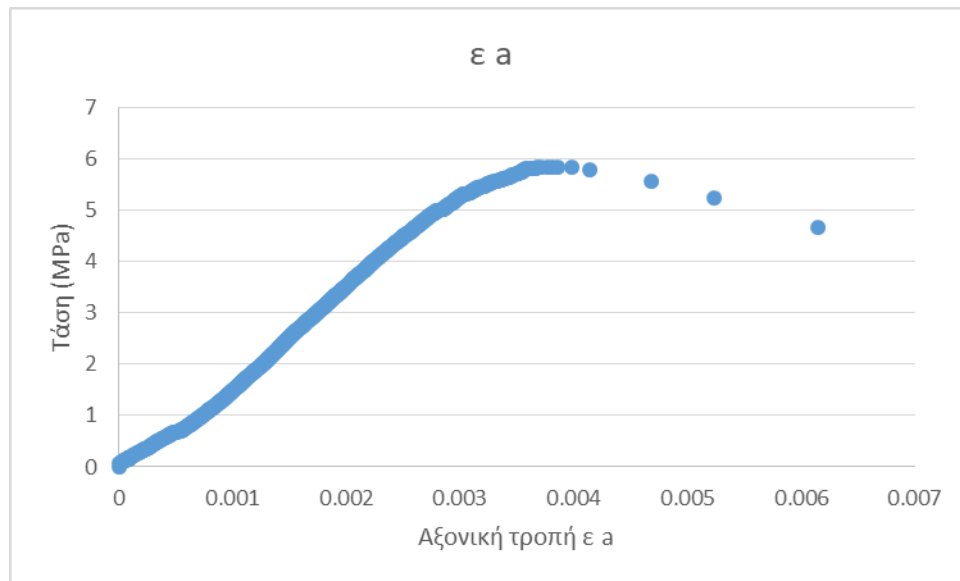
(γ)

Εικόνα 19: α) δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών (wing cracks), β) διάδοση των ρωγμών
γ) αστοχία του δοκιμίου.

Από τα διαγράμματα τάσης-τροπής και τάσης-χρόνου δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο ρωγμάτωσης.



Σχήμα 44: Διάγραμμα τάσης-χρόνου με απεικόνιση της στιγμής δημιουργίας των εφελκυστικών ρωγμών



Σχήμα 45: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής

Η αντοχή του δοκιμίου υπολογίστηκε 5.85 MPa, δηλαδή κατά 10% μικρότερη σε σχέση με την αντοχή του υλικού. Οι εφελκυστικές ρωγμές παρατηρούνται για τάση 1.3 MPa, δηλαδή στο 22% της αντοχής του.

Δυσθραυστότητα

Σύμφωνα με τον τύπο των Cotterell and Rice η δυσθραυστότητα του δοκιμίου P11 αφού υποθέσουμε ότι $\mu=0$ θα είναι: $0,15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Η γωνία γ ισούται με 45° ενώ το μισό του μήκους της τεχνητής ασυνέχειας ισούται με 0,012 m. Η σ_1 τη στιγμή που εμφανίζονται τα wing cracks είναι ίση με 1.3 MPa.

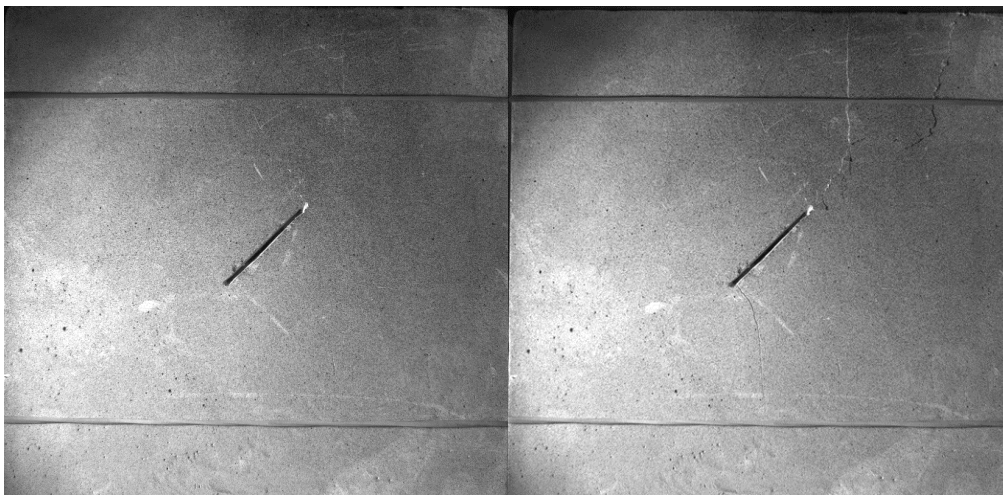
4.1.2 Δοκίμιο P12

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης του δοκιμίου.



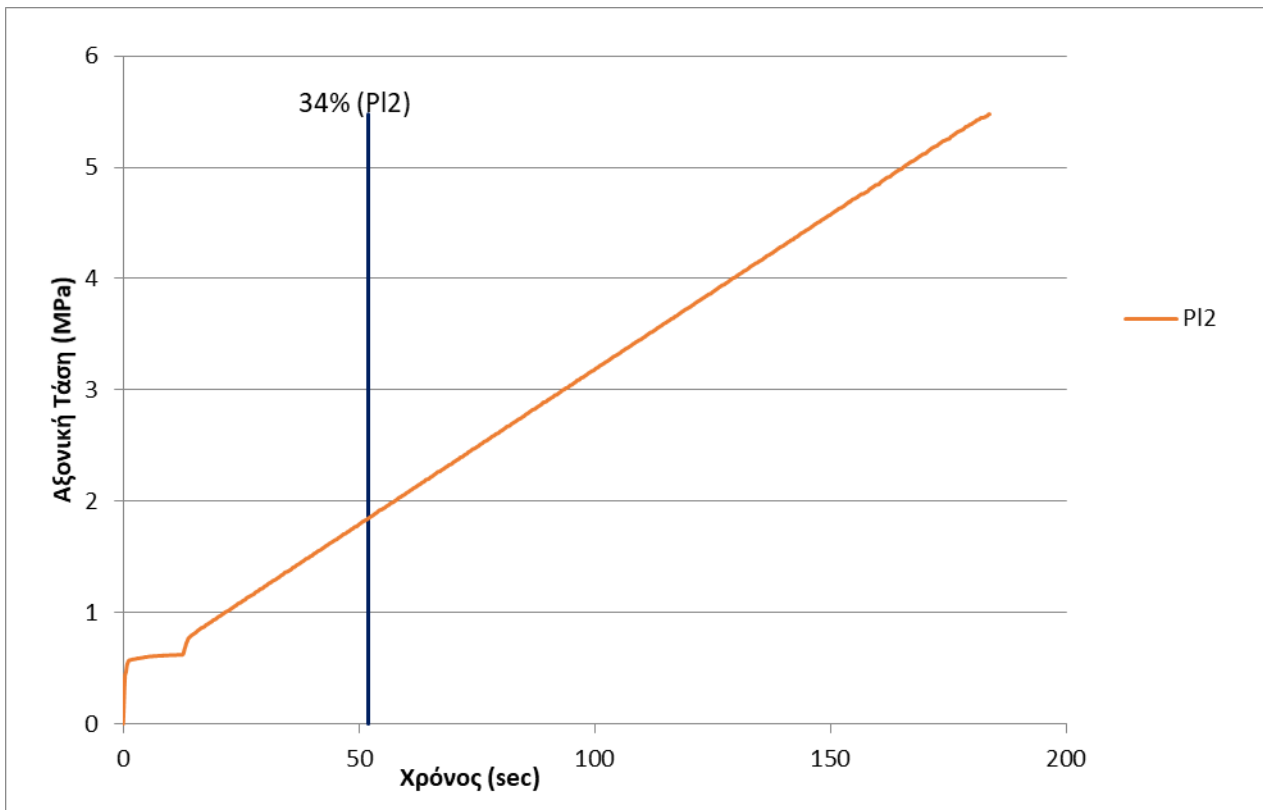
Εικόνα 20: Δοκίμιο PI2 πριν την έναρξη της δοκιμής

Από τη φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται να δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές από τα άκρα της ασυνέχειας (wing cracks). Έπειτα αρχίζουν να διαδίδονται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Στην εικόνα παρουσιάζονται διάφορες φάσεις διάδοσης των ρωγμών.

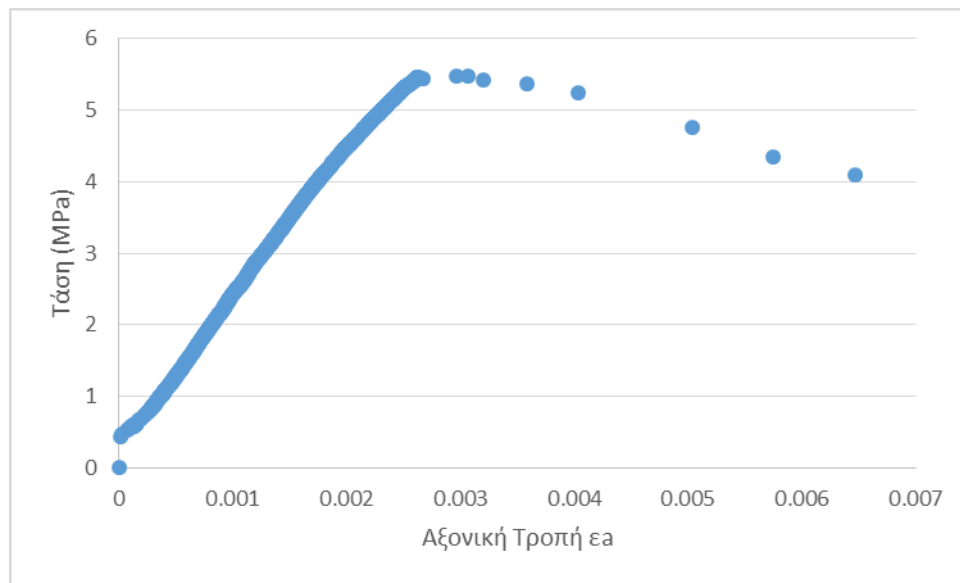


Εικόνα 21: α) έναρξη τη δοκιμής, β) διάδοση των εφελκυστικών ρωγμών από τα άκρα της ασυνέχειας.

Από τα διαγράμματα τάσης-τροπής και τάσης-χρόνου δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο ρωγμάτωσης.



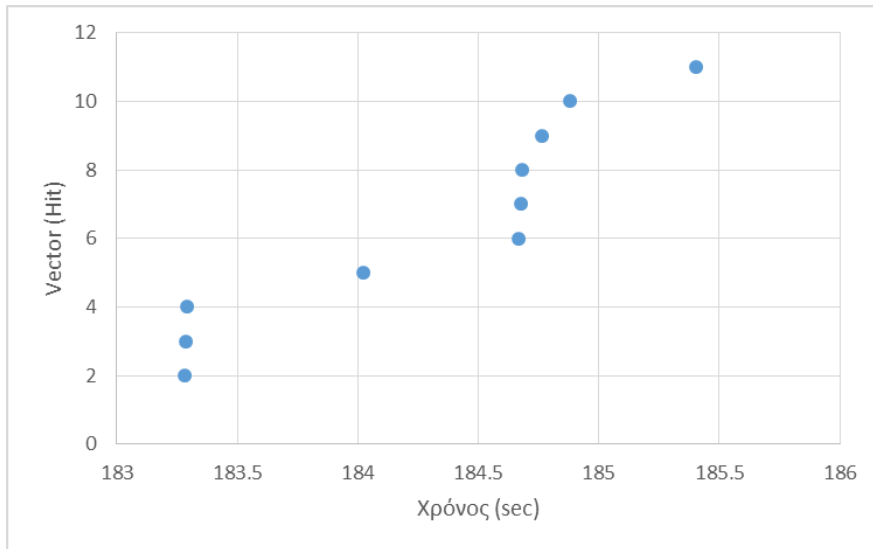
Σχήμα 46: Διάγραμμα τάσης-χρόνου με απεικόνιση της στιγμής δημιουργίας των εφελκυστικών ρωγμών



Σχήμα 47: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής δοκιμίου PI2

Η αντοχή του δοκιμίου υπολογίστηκε 5.48 MPa, δηλαδή κατά 16% μικρότερη σε σχέση με την αντοχή του υλικού. Οι εφελκυστικές ρωγμές παρατηρούνται για τάση 1.85 MPa, δηλαδή στο 34% της αντοχής του.

Τέλος κατά τη μελέτη της ακουστικής εκπομπής σήματα παρατηρούνται κατά την ενάρξη και λήξη της δοκιμής.



Σχήμα 48: Διάγραμμα ΑΕ του δοκιμίου PL2

Δυσθραυστότητα

Σύμφωνα με τον τύπο των Cotterell and Rice η δυσθραυστότητα του δοκιμίου PL2 αφού υποθέσουμε ότι $\mu=0$ θα είναι: $0,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

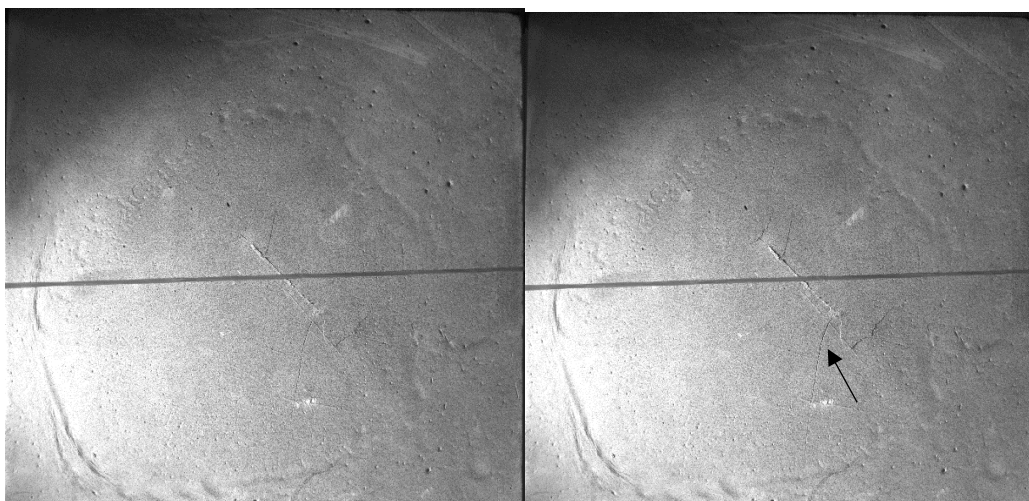
Η γωνία γ ισούται με 45° ενώ το μισό του μήκους της τεχνητής ασυνέχειας ισούται με $0,012 \text{ m}$. Η σ_1 τη στιγμή που εμφανίζονται τα wing cracks είναι ίση με 1.8 MPa .

4.1.3 Δοκίμιο P13

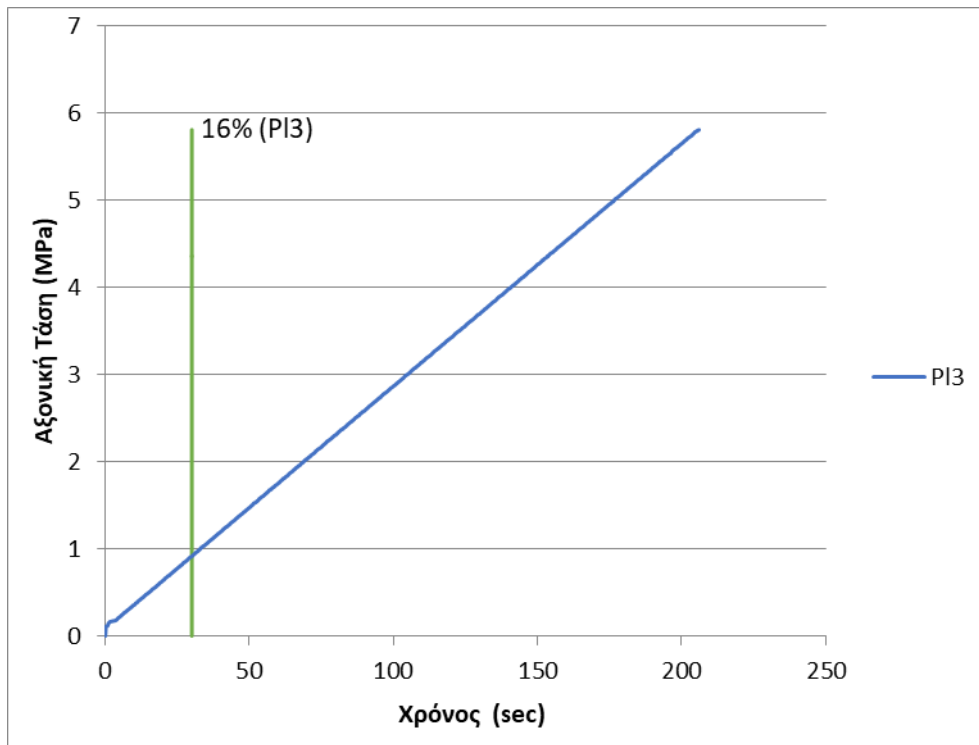


Εικόνα 22: Αστοχία του δοκιμίου P13

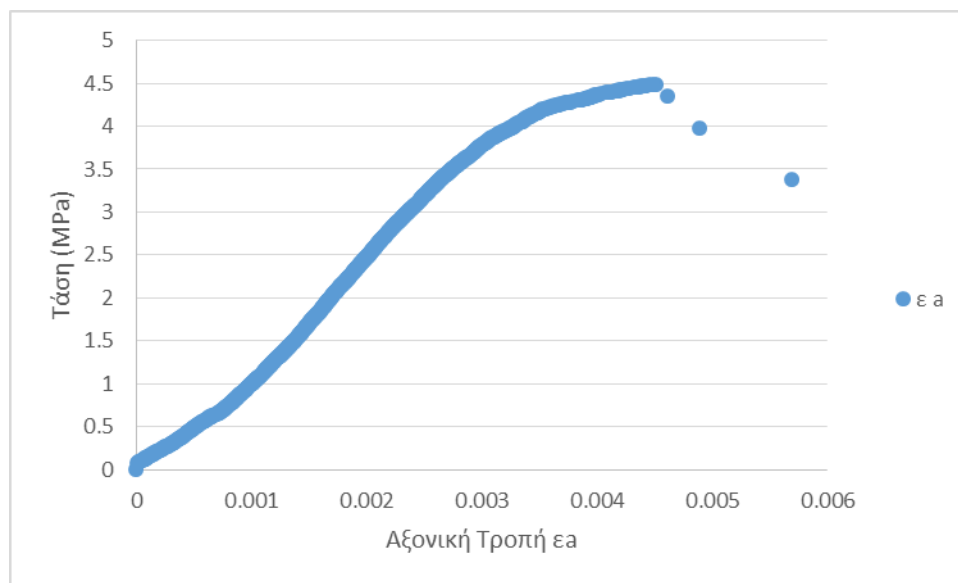
Από τη φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται να δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές από τα άκρα της ασυνέχειας (wing cracks) στο 29ο δευτερόλεπτο όπου αρχίζουν να διαδίδονται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Στην εικόνα παρουσιάζονται διάφορες φάσεις διάδοσης των ρωγμών.



Εικόνα 23:(α) δημιουργία και διάδοση των εφελκυστικών ρωγμών (wing cracks) (b) δημιουργία δευτερευόντων ρωγμών
Από τα διαγράμματα τάσης-τροπής και τάσης-χρόνου δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο ρωγμάτωσης.

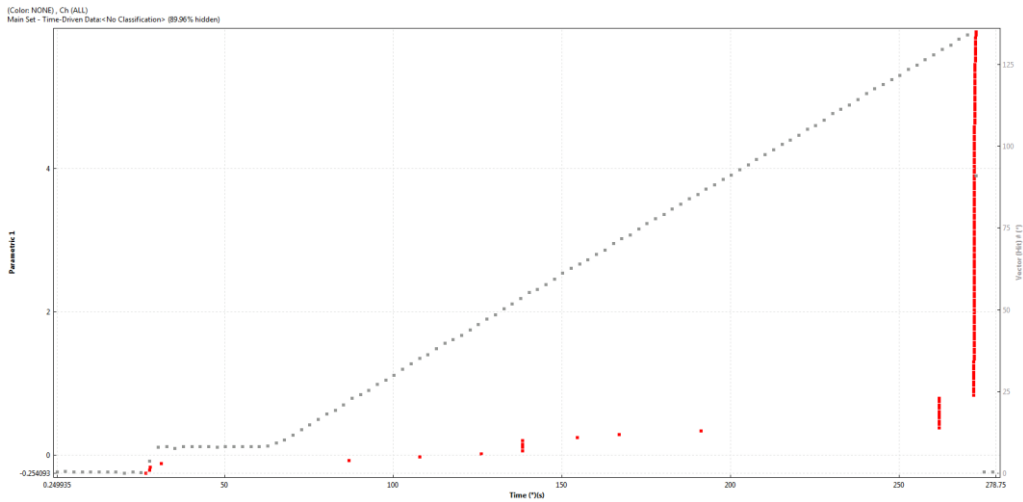


Σχήμα 49: Διάγραμμα αξονική τάση-χρόνος



Σχήμα 50: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής δοκιμίου PI3

Η αντοχή του δοκιμίου υπολογίστηκε 5.8MPa, δηλαδή κατά 11% μικρότερη σε σχέση με την αντοχή του υλικού. Οι εφελκυστικές ρωγμές παρατηρούνται για τάση 0.9MPa, δηλαδή στο 16% της αντοχής του. Τέλος κατά τη μελέτη της ακουστικής εκπομπής σήματα παρατηρούνται κατά την ενάρξη και λήξη της δοκιμής.



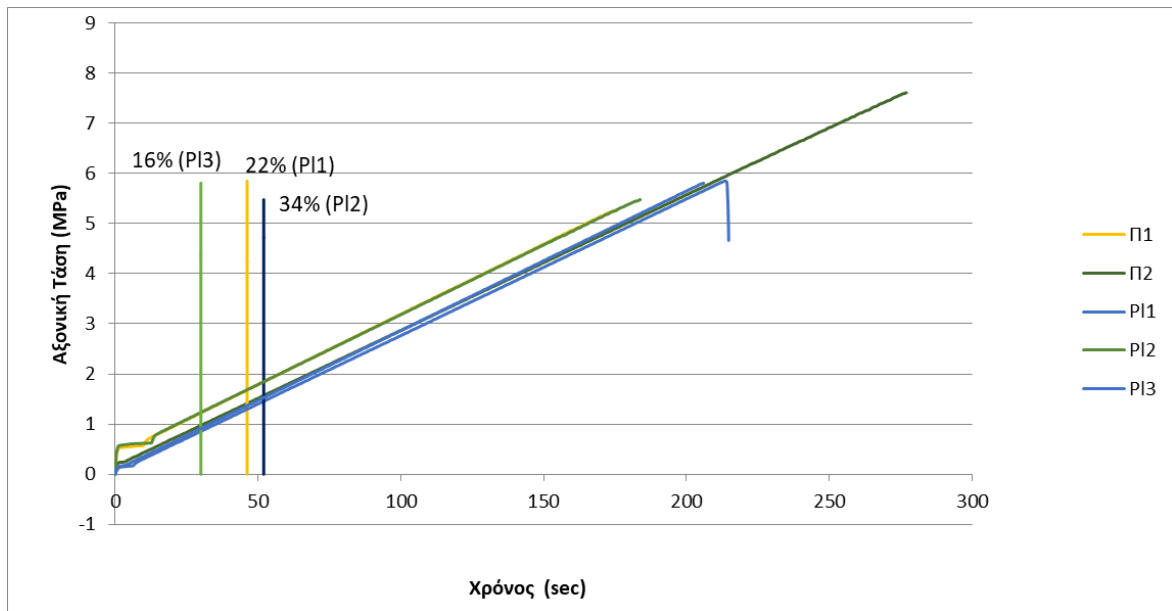
Σχήμα 51: Διάγραμμα AE του δοκιμίου PL3

Δυσθραυστότητα

Σύμφωνα με τον τύπο των Cotterell and Rice η δυσθραυστότητα του δοκιμίου P13 αφού υποθέσουμε ότι $\mu=0$ θα είναι: $0,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Η γωνία γ ισούται με 45° ενώ το μισό του μήκους της τεχνητής ασυνέχειας ισούται με $0,012 \text{ m}$. Η σ_1 τη στιγμή που εμφανίζονται τα wing cracks είναι ίση με 0.9 MPa .

Επομένως από τις δοκιμές των τριών δοκιμών συμπεραίνεται ότι η αντοχή των δοκιμών με μία ασυνέχεια μειώνεται κατά $10\%-20\%$ σε σχέση με την αντοχή του υλικού. Επίσης, από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι οι εφελκυστικές ρωγμές σχηματίζονται περίπου στο $10\% - 30\%$ της μέγιστης αντοχής των δοκιμών. Τέλος μέσω της σχέσης των Cotterell and Rice υπολογίστηκε η τιμή της δυσθραυστότητας $0.15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Τα αποτελέσματα που βρίσκουμε είναι παρόμοια με αυτά της δοκιμής δυσθραυστότητας της ISRM. Στο σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου των τριών δοκιμών και του άρρηκτου υλικού.



Σχήμα 52: Διάγραμμα αξονική τάση – χρόνος του άρρηκτου υλικού και των δοκιμίων P1, P2, P3

4.2 Δοκίμια με δύο ασυνέχειες

Για τη δεύτερη σειρά πειραμάτων δημιουργήθηκαν δύο δοκίμια (S1,S2) με δύο τεχνητές ασυνέχειες κλίσης 45°, πάχους 0.2cm και μήκους 2.4 cm με μεταξύ τους απόσταση 2.4cm. Η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα.

Δοκίμιο	Πυκνότητα (gr/cm ³)
S1	0,93
S2	0,92

Πίνακας 12: Πυκνότητα δοκιμίων S1,S2

4.2.1 Δοκίμιο S1

Στην εικόνα φαίνεται η διάταξη του δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής όπως και προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε ένα βελόμετρο για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου, ένας αισθητήρας R16 και η μηχανή για την καταγραφή των φαινομένων ρωγμάτωσης.

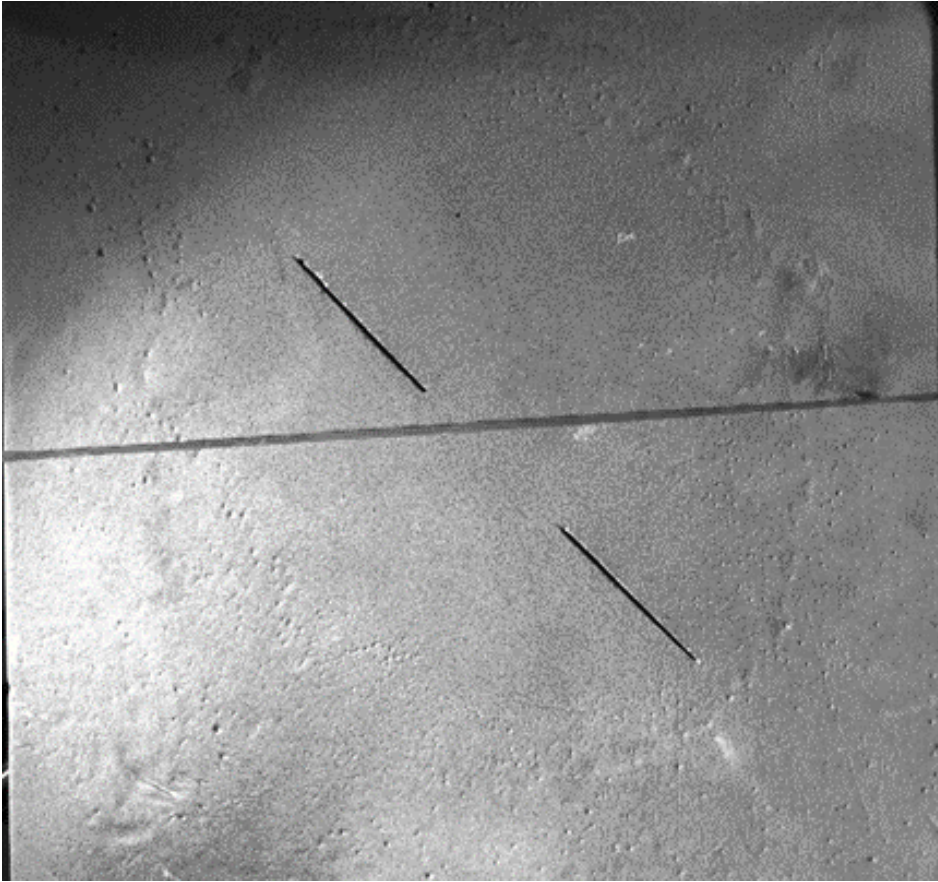


Εικόνα 24:Διάταξη δοκιμίου S1

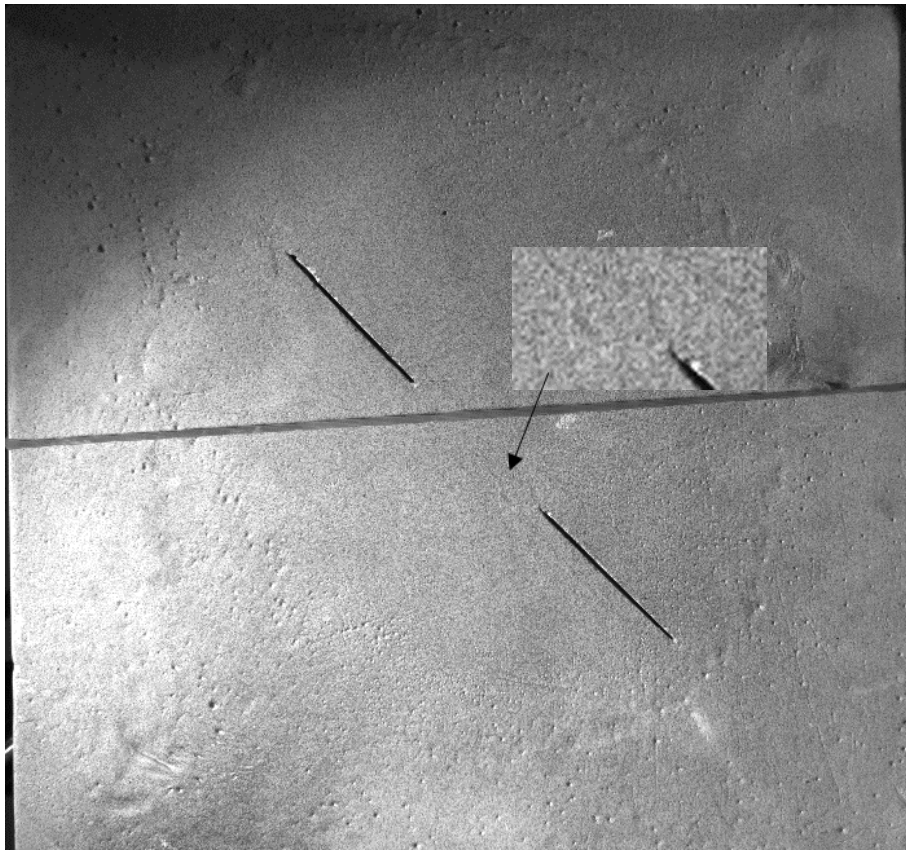
Το δοκίμιο αστοχεί σε τάση 4.75 MPa, όπου είναι κατά 27% μειωμένη σε σχέση με την αντοχή του υλικού. Από την παρατήρηση της δοκιμής, μέσω της μηχανής, αρχικά, εμφανίζονται εφελκυστικές ρωγμές στα άκρα των ασυνεχειών (wing cracks) και στη συνέχεια παρατηρείται συνένωση τους με διατμητικές ρωγμές, οι οποίες ξεκινάνε και από τις δύο ασυνέχειες.

Μακροσκοπικά, οι εφελκυστικές ρωγμές φαίνεται να δημιουργούνται σε τάση 1.48 MPa, η οποία

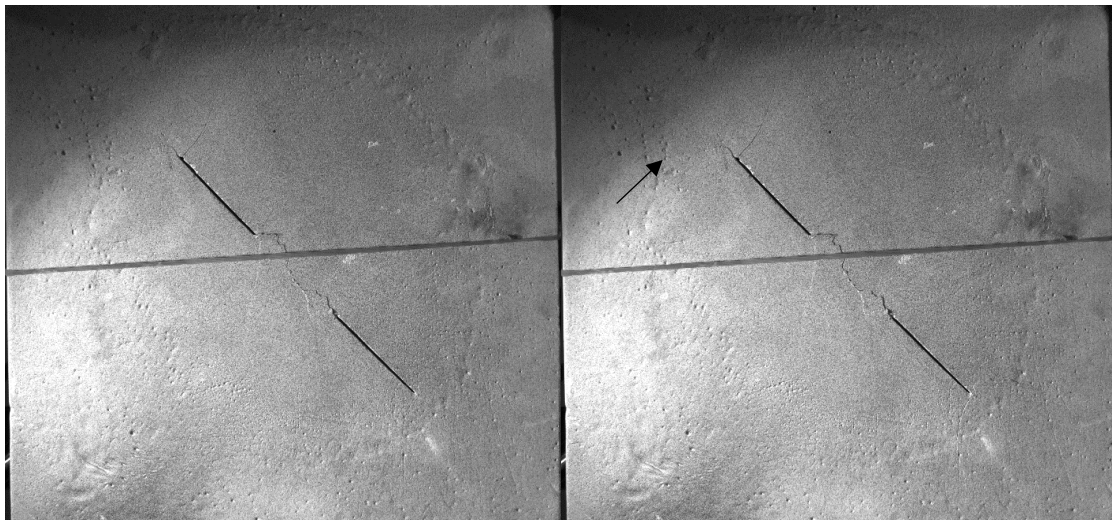
αποτελεί το 31% της μέγιστης. Σε τάση 3.9MPa έχουν δημιουργηθεί οι διαμητικές ρωγμές και συνενώνονται, όπου η τάση καλύπτει το 82% της συνολικής φόρτισης. Στην εικόνα φαίνεται η πορεία των μικρορωγμών, διάδοση και συνένωσή τους.



(α)δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών



(β) δημιουργία διατμητικών ρωγμών

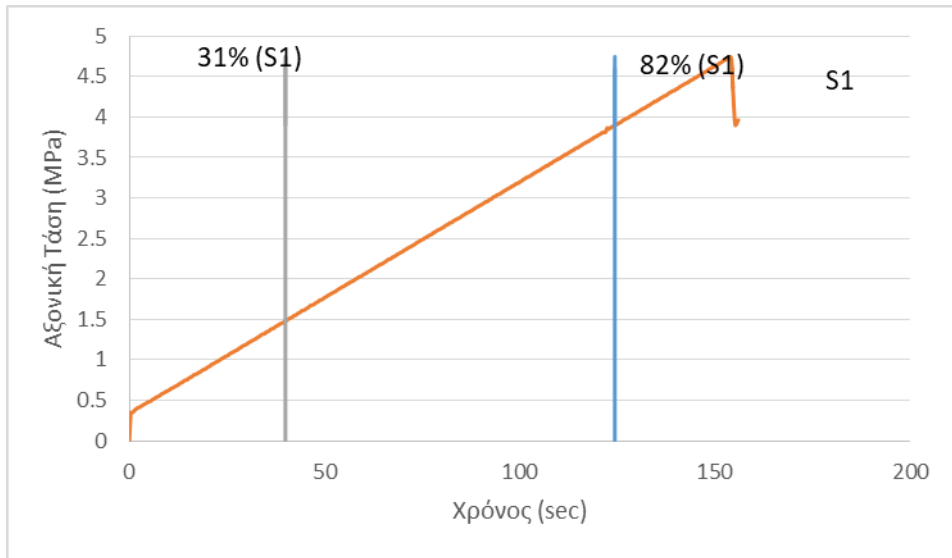


(γ) συνένωση διατμητικών

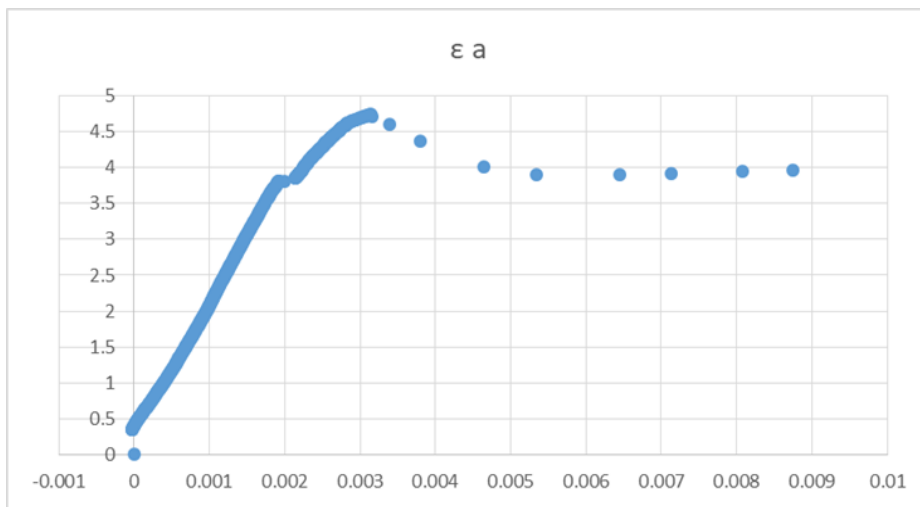
(δ) δημιουργία δευτερευουσών ρωγμών και
αστοχία δοκιμίου

Εικόνα 25: Στάδια ρωγμάτωσης δοκιμίου.

Στα διαγράμματα τάσης- τροπής και τάσης-χρόνου παρατηρούνται μεταβολές οι οποίες συμπίπτουν με το χρόνο συνένωσης των διατμητικών ρωγμών.



Σχήμα 53: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου δοκιμίου S1



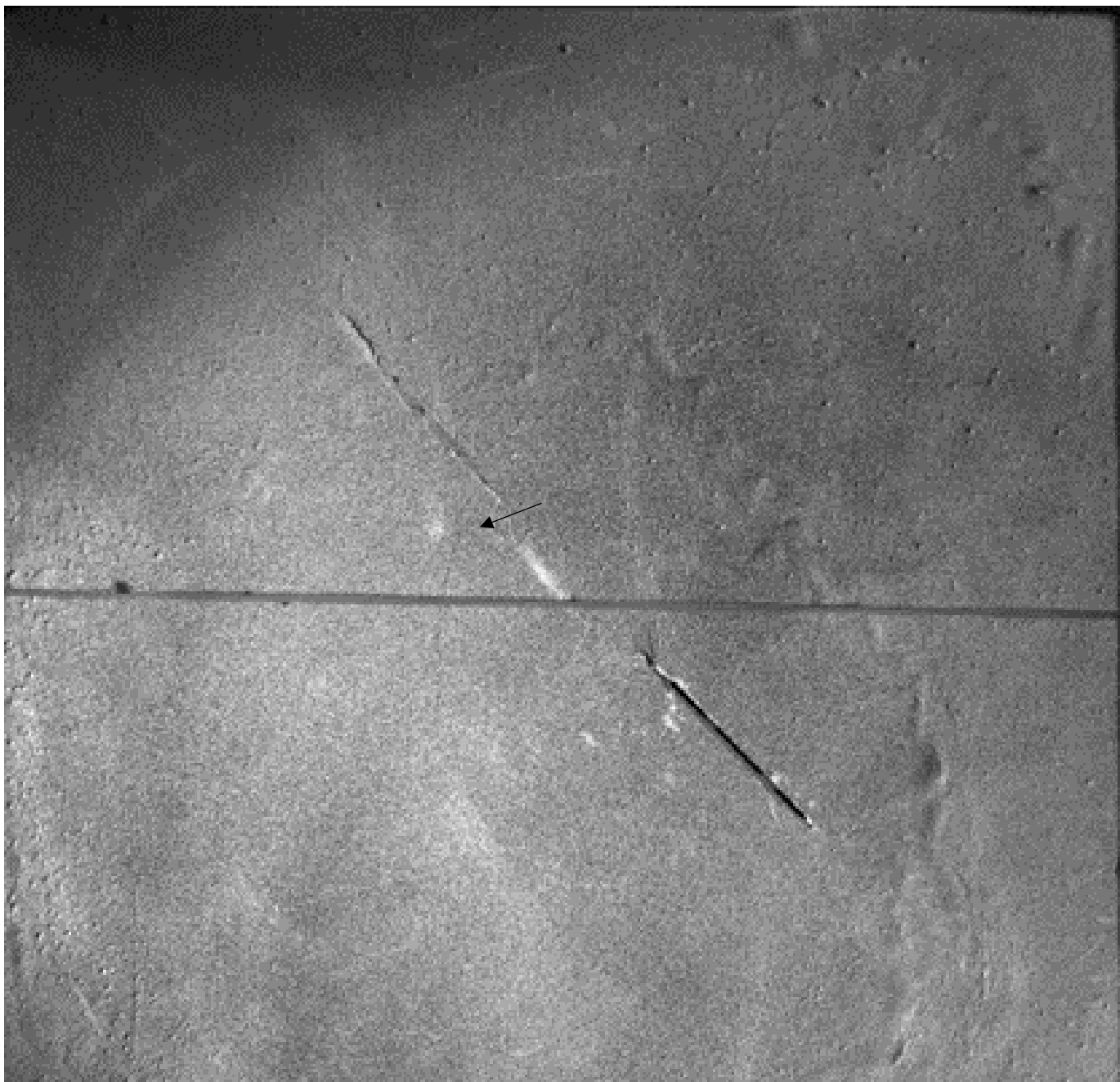
Σχήμα 54: Διάγραμμα αξονικής τάσης – τροπής δοκιμίου S1

4.2.2 Δοκίμιο S2

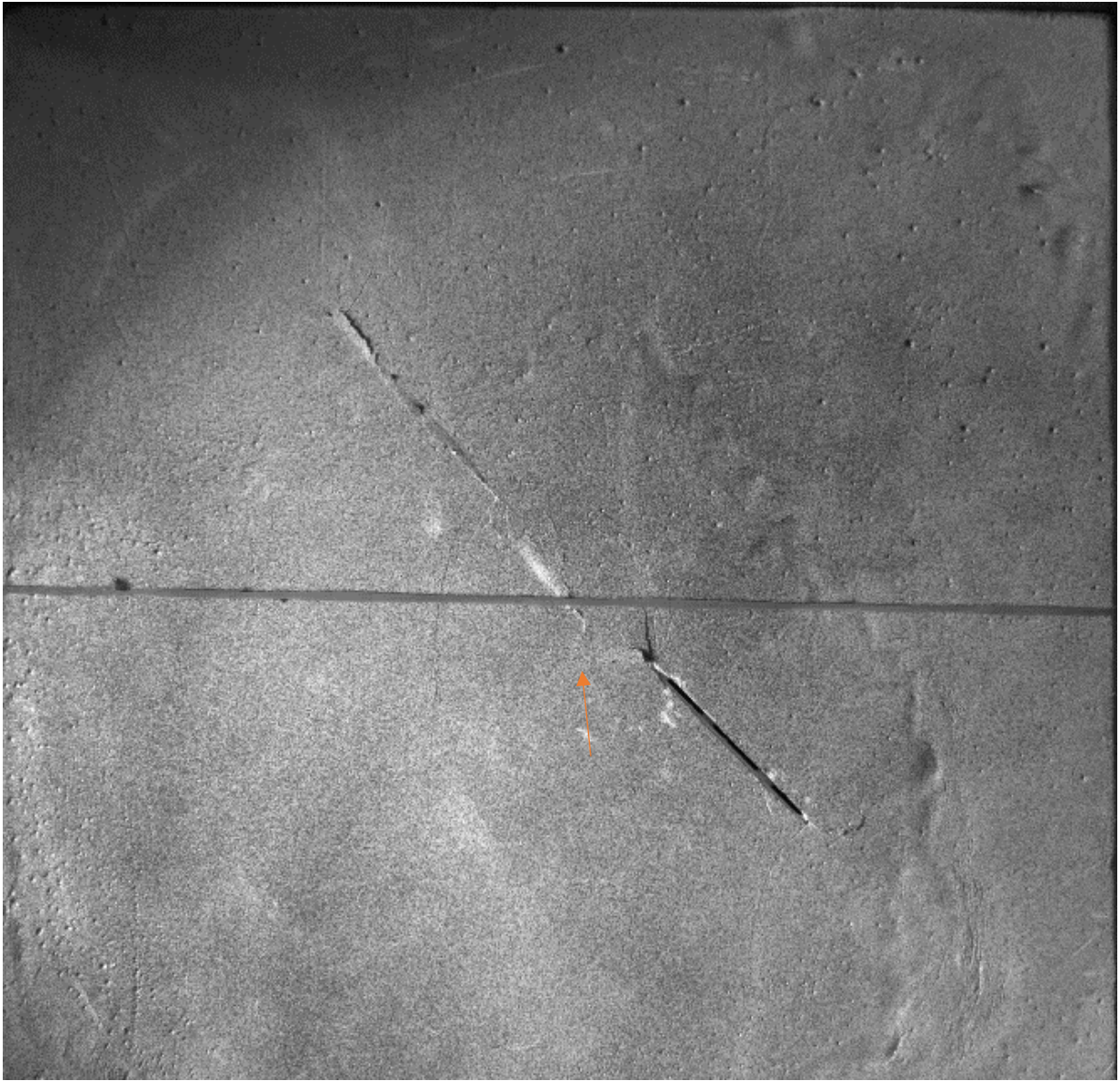


Εικόνα 26: Δοκίμιο S2 κατά την αστοχία του.

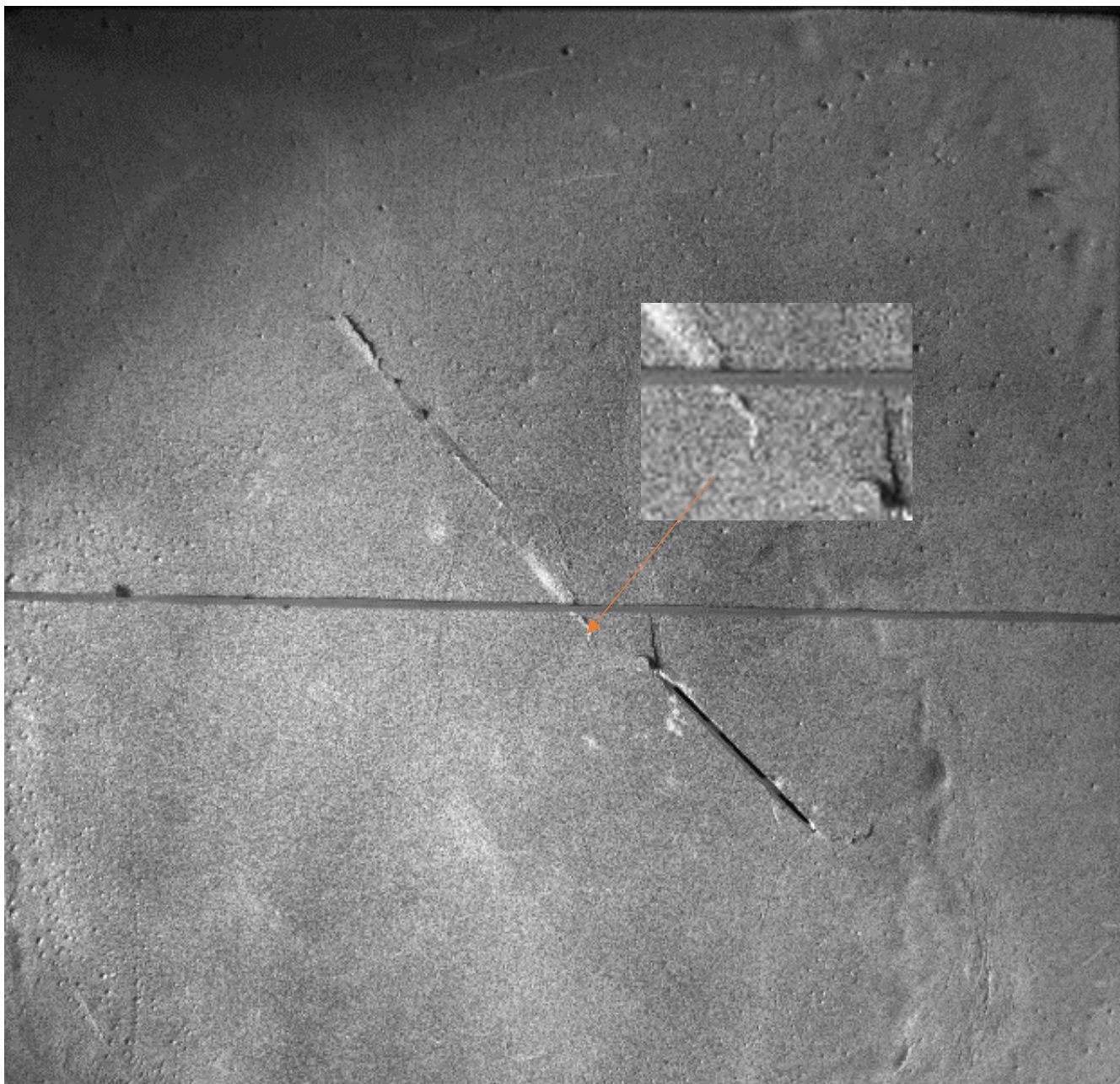
Το δοκίμιο αστοχεί σε τάση 4.2 MPa δηλαδή κατά 35% μειωμένη από την αντοχή του άρρηκτου υλικού. Ο τρόπος δημιουργίας μικρορωγμών και συνένωσης του είναι πανομοιότυπος με το δοκίμιο S1. Αρχικά, παρατηρούνται εφελκυστικές μικρορωγμές στις άκρες των ασυνεχειών. Καθώς αυτές διαδίδονται από τις ασυνέχειες προς τις βάσεις του δοκιμίου παράλληλα με τον άξονα φόρτισης παρατηρείται η δημιουργία διατμητικών ασυνεχειών από τις άκρες των ασυνεχειών και η συνένωσή τους.



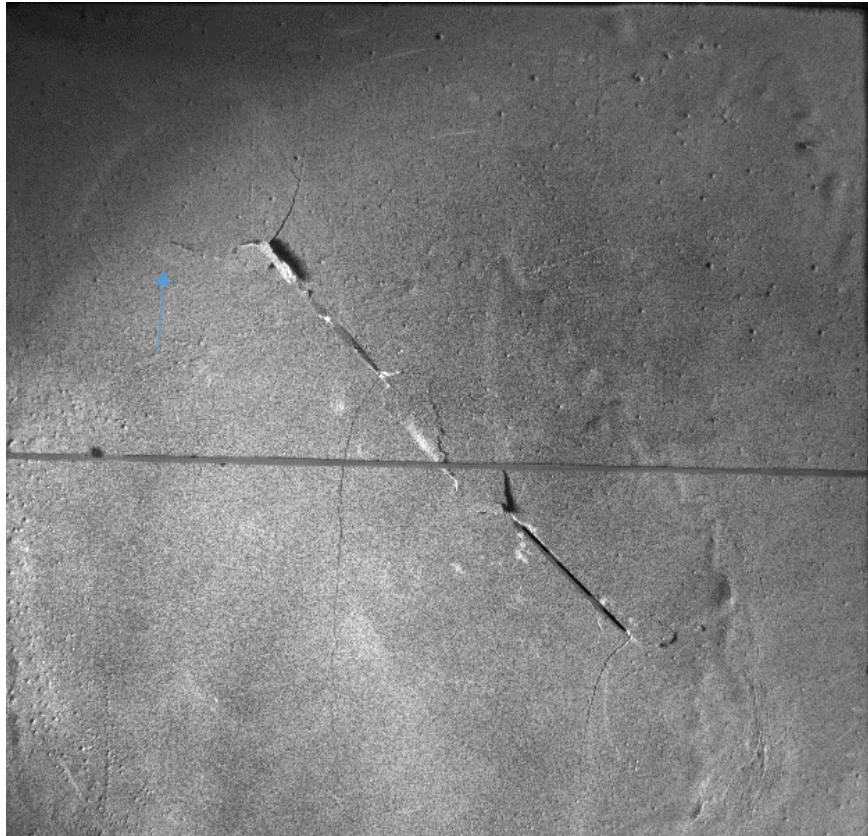
(a)ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών



(b) δημιουργία διατμητικών ρωγμών

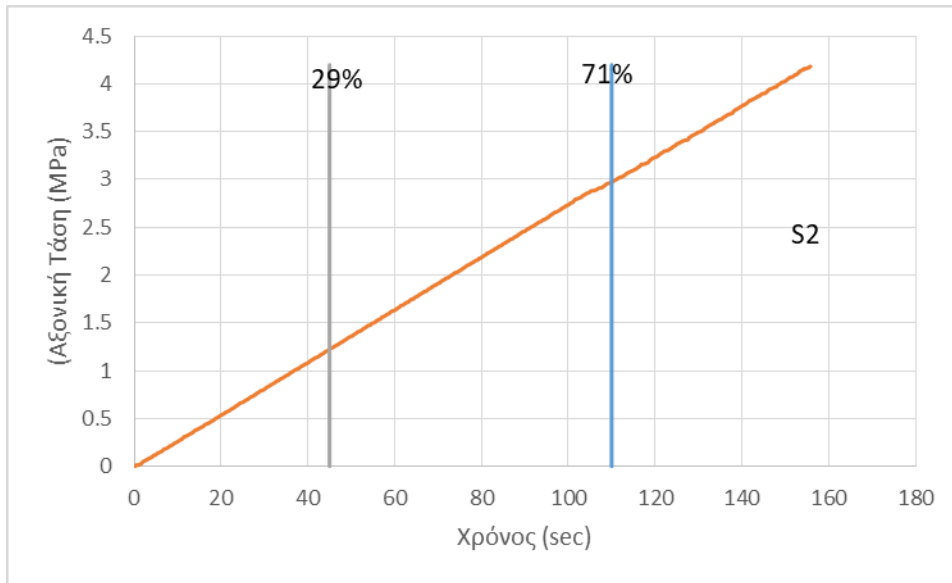


(γ) συνένωση διατμητικών

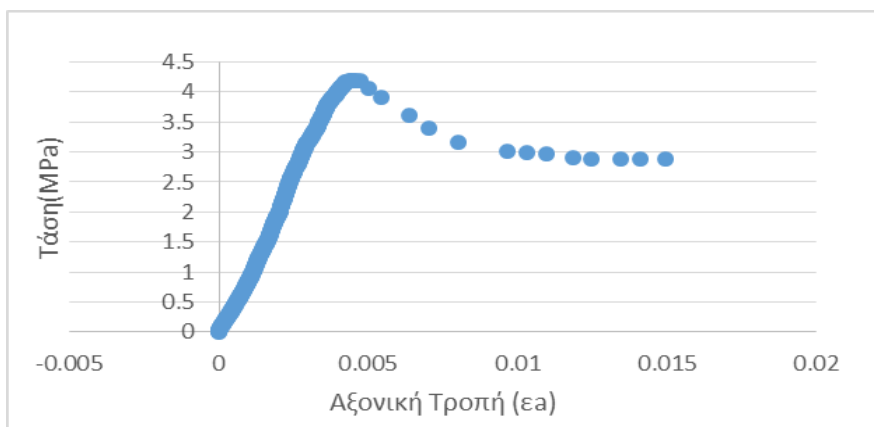


(δ) δημιουργία δευτερευουσών ρωγμών και
αστοχία δοκιμίου
Εικόνα 27: Ρωγμάτωση δοκιμίου S2

Παρόλη την ομοιότητα της διαδικασίας θραύσης των δύο δοκιμίων στα διαγράμματα του δοκιμίου S2 δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο. Οι εφελκυστικές ρωγμές φαίνεται να δημιουργούνται σε τάση 1.2 MPa, η οποία αποτελεί το 29% της μέγιστης. Σε τάση 3MPa έχουν δημιουργηθεί οι διατμητικές ρωγμές και συνενώνονται, όπου η τάση καλύπτει το 71% της συνολικής φόρτισης

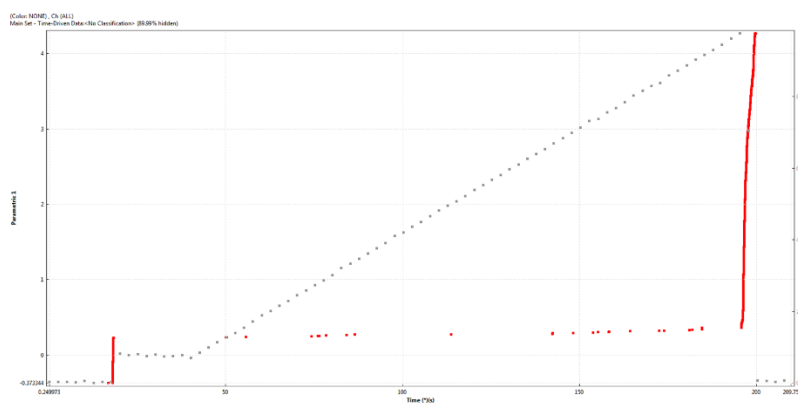


Σχήμα 55: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου δοκιμίου S2



Σχήμα 56: Διάγραμμα αξονικής τάσης – τροπής δοκιμίου S2

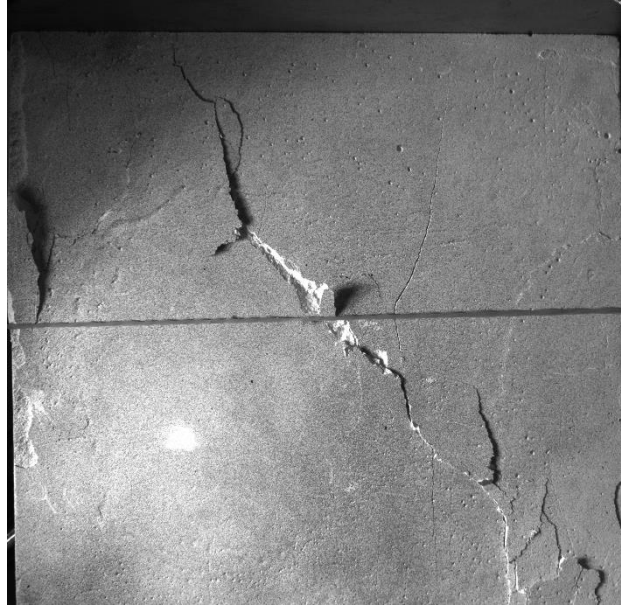
Τέλος κατά τη μελέτη της ακουστικής εκπομπής σήματα παρατηρούνται κατά την έναρξη και λήξη της δοκιμής.



Σχήμα 57: Απεικόνιση σημάτων κατά τη μονοαξονική δοκιμή δοκιμίου S2

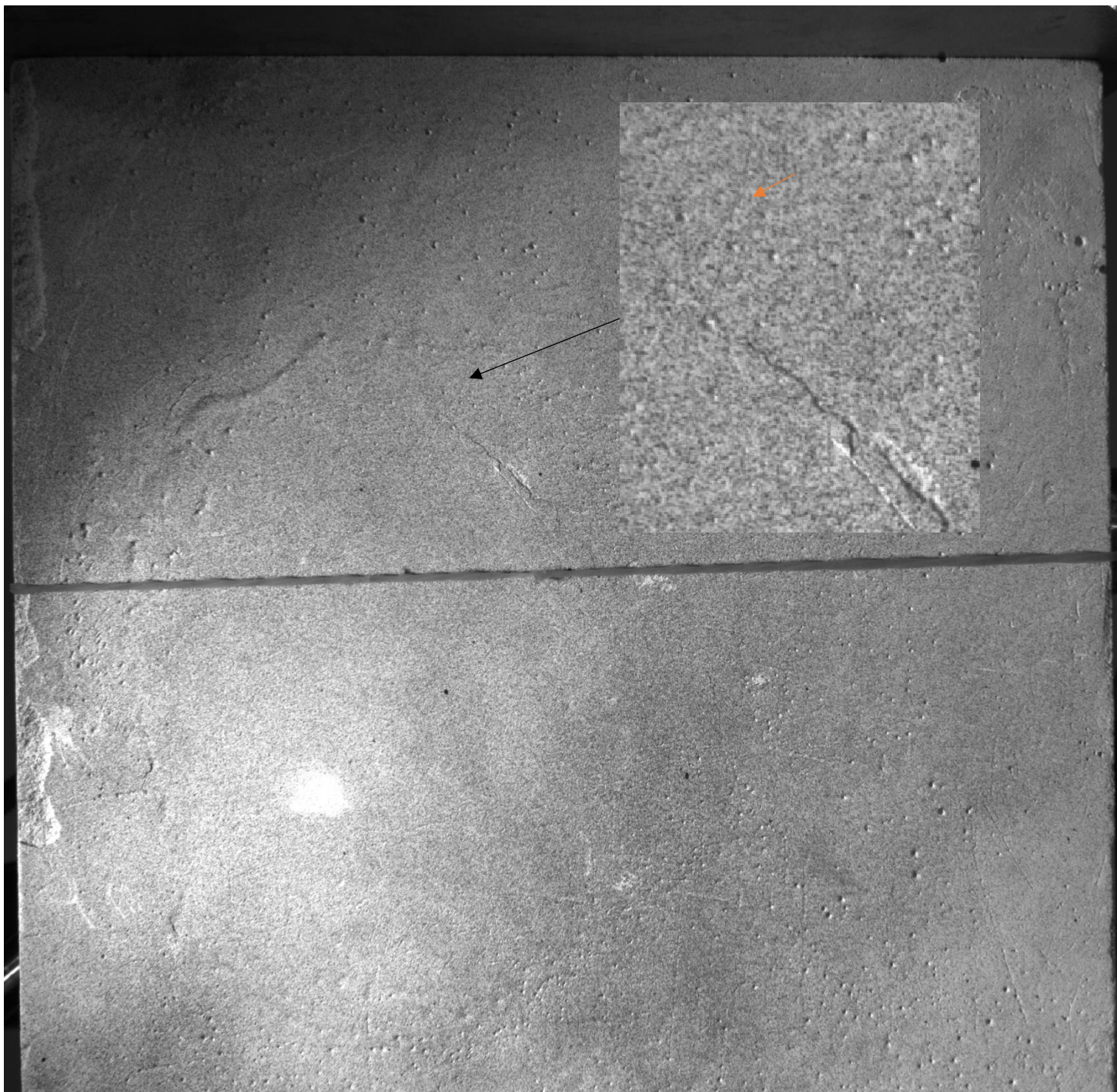
4.2.3 Δοκίμιο 2S2

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια με δύο μη εμμένουσες και συνεπίπεδες ασυνέχειες, με μεταξύ τους απόσταση 1.2cm. Τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών παρέμειναν ίδια. Η πυκνότητα του δοκιμίου ,αφού πρώτα είχε ζυγιστεί, υπολογίστηκε 0.91 gr/cm^3

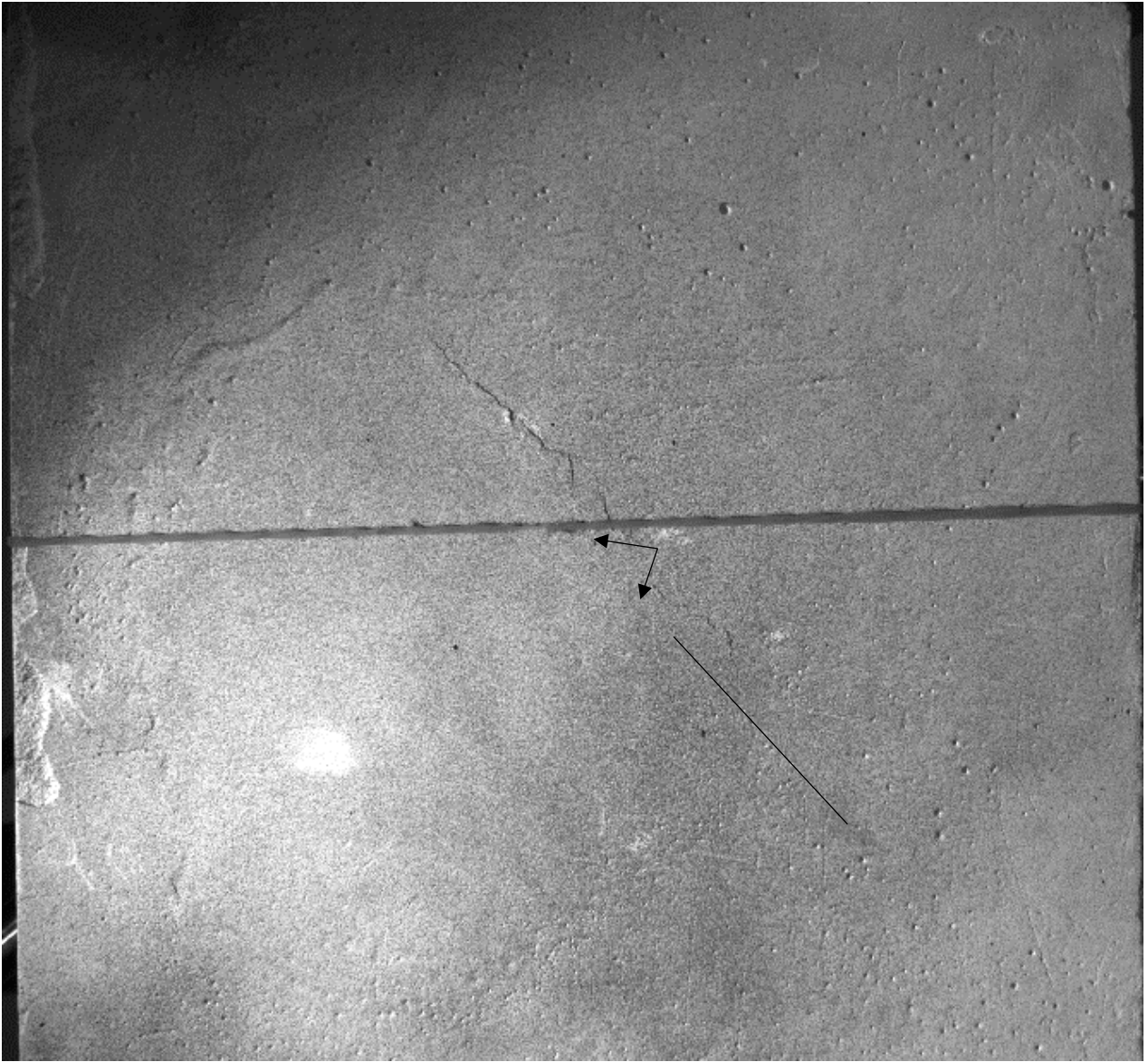


Εικόνα 28:θράυση του δοκιμίου 2S2

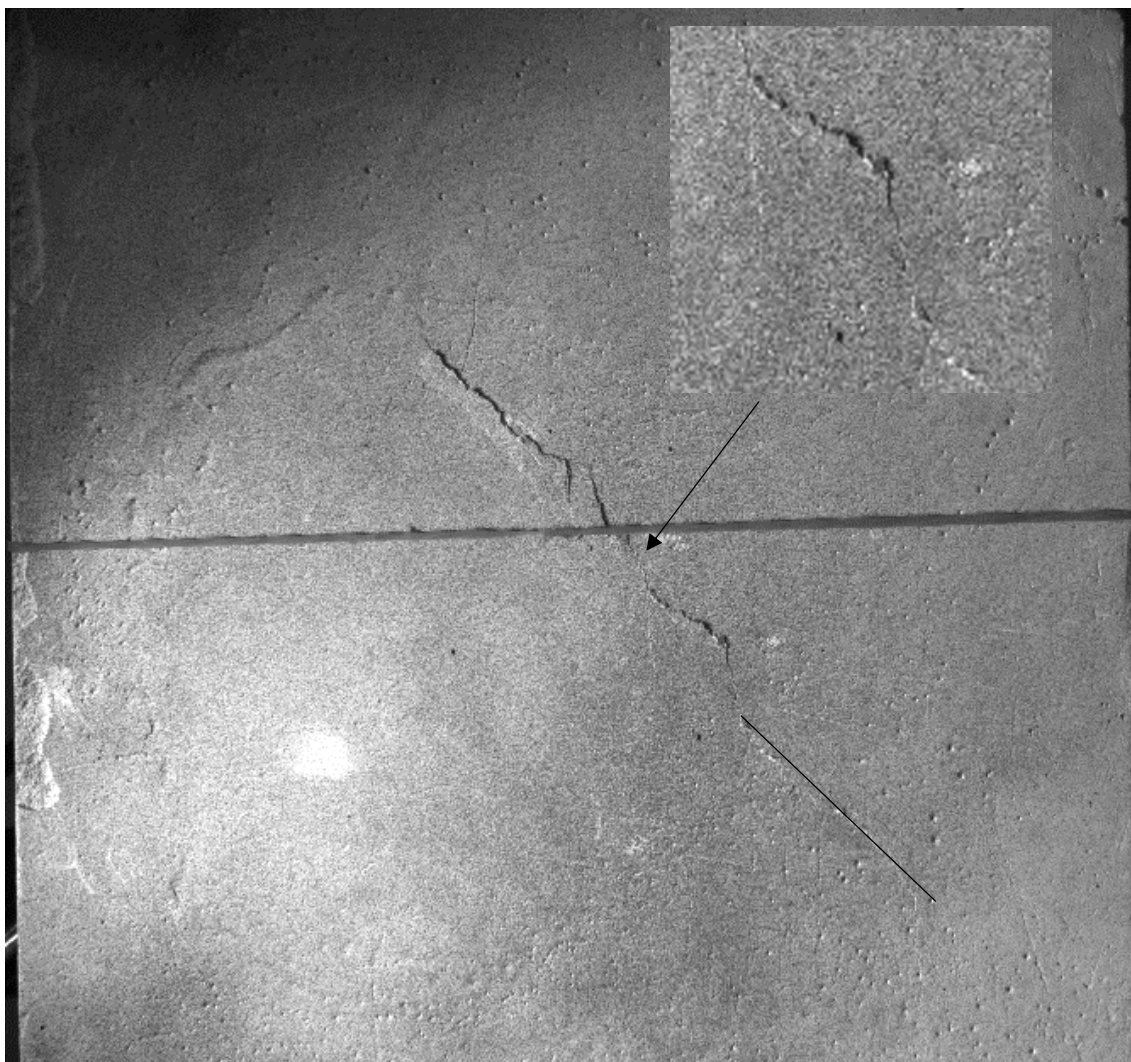
Η αντοχή του δοκιμίου είναι 4.03 MPa , αρκετά μικρότερη από αυτήν των δοκιμίων χωρίς ασυνέχειες (μειωμένη κατά 38%). Οι τρόποι ρωγμάτωσης παραμένουν ίδιοι. Αρχικά παρατηρούμε δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών για τάση 1.6, δηλαδή στο 40% της αντοχής του. Έπειτα επέρχεται η διάδοσή τους και ταυτόχρονα η δημιουργία διατμητικών αντοχών στα άκρα των ασυνεχειών. Σε τάση 1.9 MPa έχουν δημιουργηθεί οι διατμητικές ρωγμές και συνενώνονται, όπου η τάση καλύπτει το 47% της συνολικής φόρτισης. Στην εικόνα φαίνεται η πορεία των μικρορωγμών, η διάδοση και συνένωσή τους.



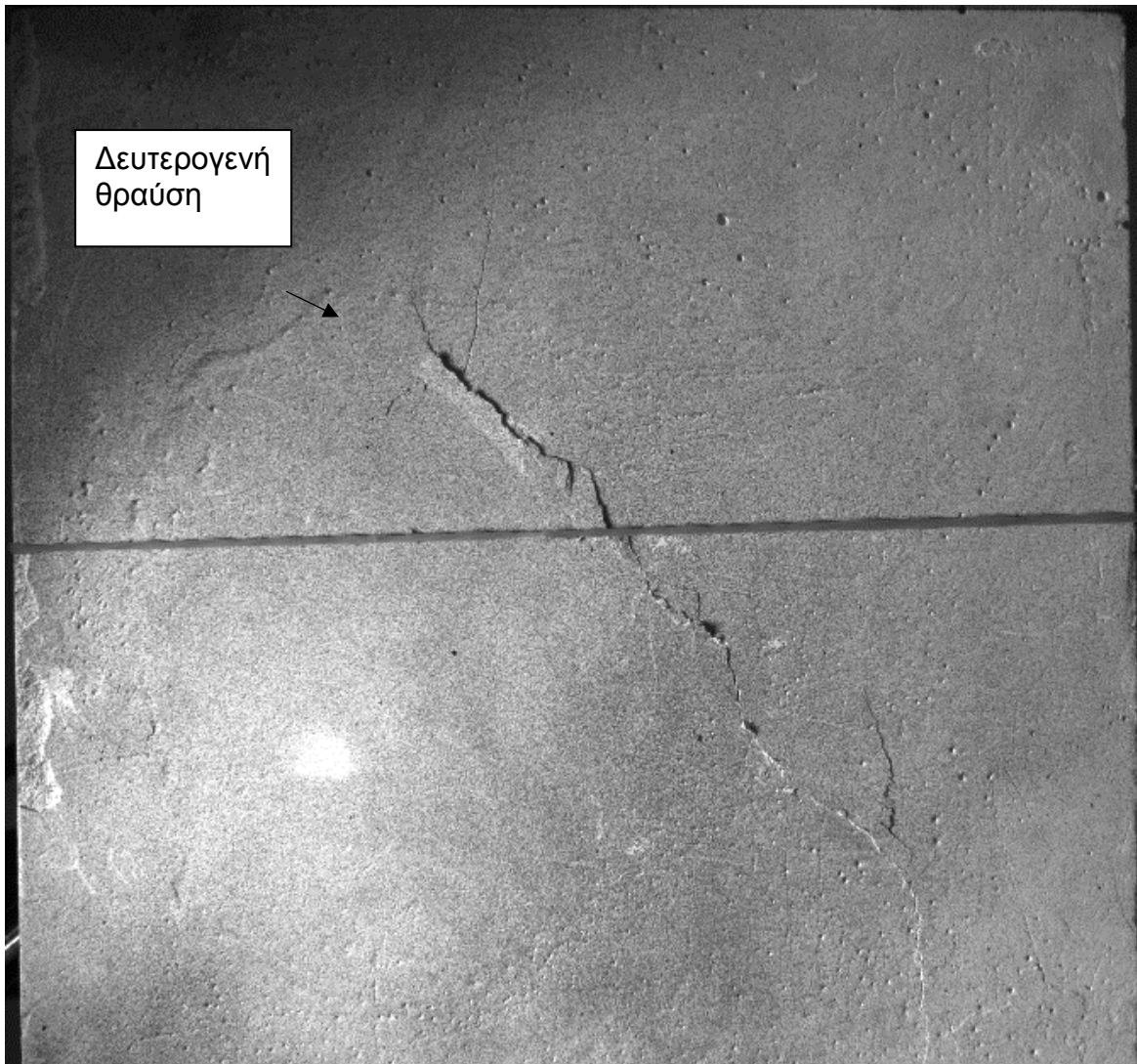
(α) δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής



(β) ανάπτυξη διατμητικών ρωγμών

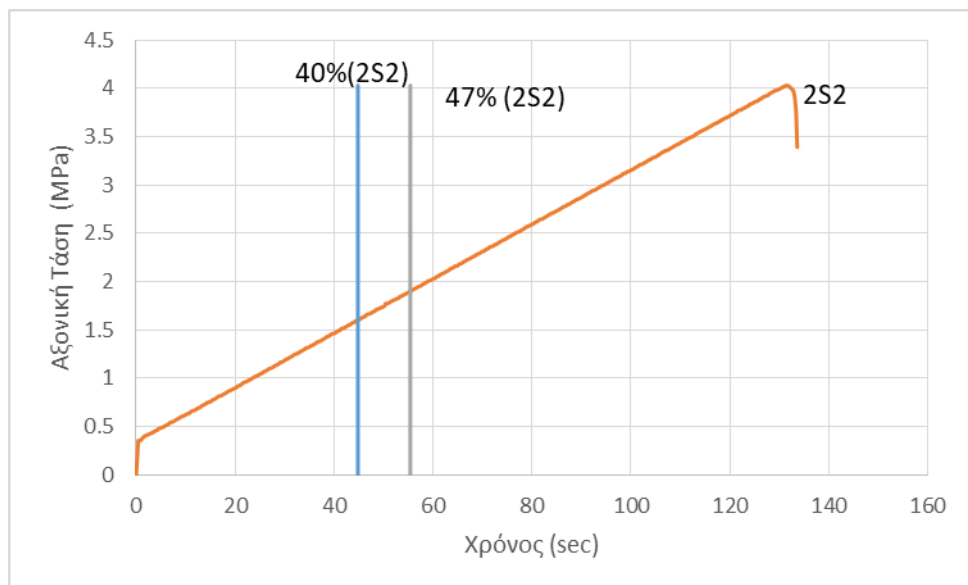


(γ) συνένωση διατμητικών

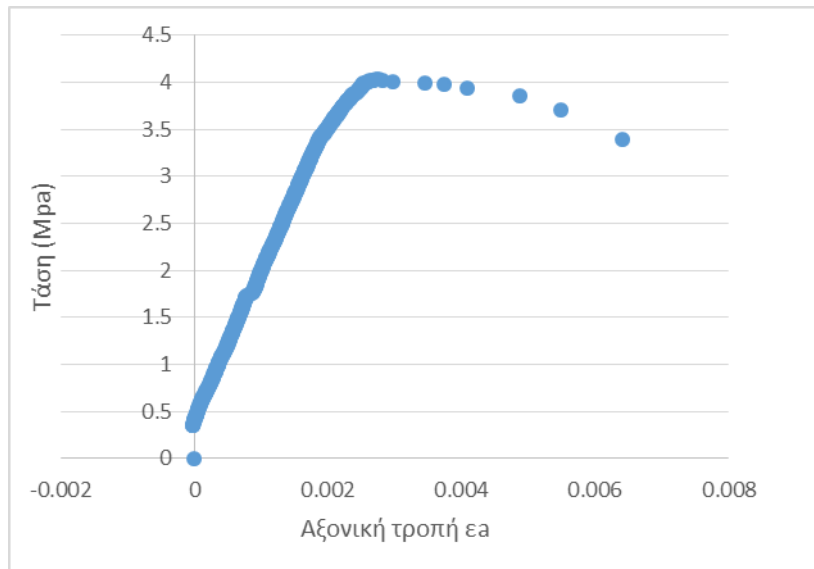


(δ) δημιουργία δευτερογενών ρωγμών εφελκυστικών.
Εικόνα 29: Ρωγμάτωση του δοκιμίου 2S2

Στο διάγραμμα τάσης χρόνου δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο ενώ στην καμπύλη τάσης αξονικής τροπής υπάρχει μεταβολή που αντιστοιχεί στην τάση συνένωσης των διατμητικών ρωγμών.

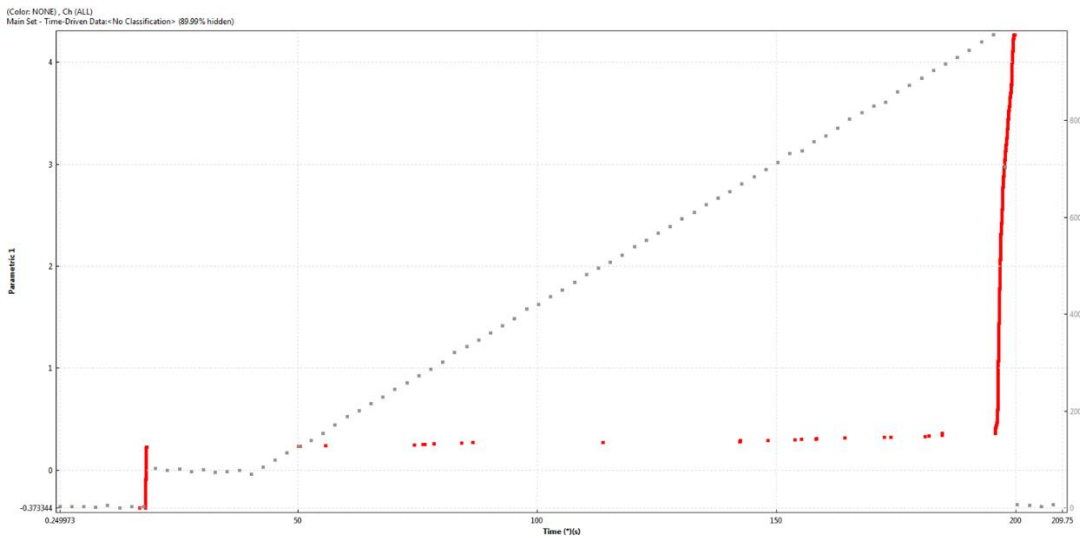


Σχήμα 58: Διάγραμμα αξονικής τάσης – χρόνου δοκιμίου 2S2



Σχήμα 59: Διάγραμμα αξονικής τάσης – τροπής δοκιμίου 2S2

Τέλος κατά τη μελέτη της ακουστικής εκπομπής σήματα παρατηρούνται κυρίως κατά την έναρξη και λήξη της δοκιμής.



Σχήμα 60: Απεικόνιση σημάτων κατά τη μονοαξονική δοκιμή δοκιμίου 2S2

Στα δοκίμια με δύο ασυνέχειες με μεταξύ τους απόσταση 2.4 cm παρατηρείται μείωση της αντοχής κατά 20%-40% σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου υλικού ενώ στο τελευταίο δοκίμιο με μικρότερη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών παρατηρείται μείωση της αντοχής του κατά 38%. Η δημιουργία των εφελκυστικών ρωγμών στα δοκίμια S1,S2 παρατηρείται στο 30% της συνολικής τους φόρτισης. Στο δοκίμιο 2S2 παρατηρείται η δημιουργία τους στο 40% της συνολικής τους φόρτισης. Τέλος οι διατμητικές στα δοκίμια S1,S2 παρατηρούνται στο 70%-80% της συνολικής τους φόρτισης ενώ στο δοκίμιο 2s2 η συνένωση των διατμητικών εμφανίζεται στο 47% της συνολικής τους φόρτισης. Στον

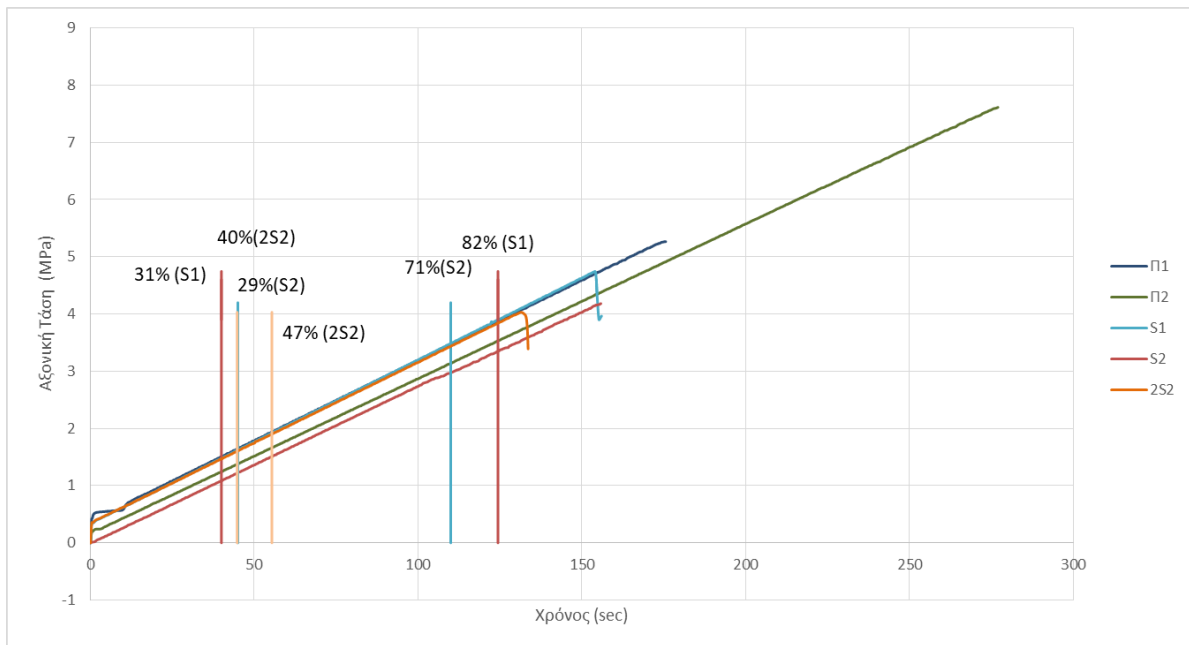
πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών με δύο ασυνέχειες αλλά και των δοκιμών με μία ασυνέχεια.

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση(MPa)	Τάση εμφάνισης εφελκυστικών ρωγμών (MPa)	Τάση εμφάνισης και συνένωσης διατμητικών (MPa)	Απόσταση προϋπαρχουσών ασυνεχειών (cm)
S1	4.75	1.48	3.9	2.4
S2	4.2	1.2	3	2.4
2S2	4.03	1.6	1.9	1.2

Πίνακας 13: Απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμών S1,S2,2S2

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση(MPa)	Τάση εμφάνισης εφελκυστικών ρωγμών (MPa)	Μήκος προϋπαρχουσών ασυνεχειών (cm)
PI1	5.85	1.3	2.4
PI2	5.48	1.85	2.4
PI3	5.8	0.9	2.4

Πίνακας 14: Απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμών PI1,PI2,PI3



Σχήμα 61:Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών S1,S2,2S2

Κεφάλαιο 5

Δοκίμια με μη συνεπίπεδες ασυνέχειες

Στο δεύτερο μέρος των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια με μη συνεπίπεδες ασυνέχειες κλίσης 45° . Οι τεχνητές ασυνέχειες έχουν μήκος 2.4 cm και πάχος 0.2 cm. Οι ασυνέχειες κατασκευάζονταν με έλασμα αλουμινίου με κατάλληλη διάταξη για το σωστό προσανατολισμό και τη μεταξύ τους απόσταση. Τα δοκίμια είναι πρισματικά με διαστάσεις 15 cm x 15 cm x 5 cm.

Πριν την έναρξη των πειραμάτων, στα δοκίμια τοποθετήθηκαν αισθητήρες πιεζοηλεκτρικού υλικού για την παρατήρηση του φαινομένου της ακουστικής εκπομπής. Επιπλέον τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο αστοχίας τους. Τέλος, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ρυθμό φόρτισης 200N/s.

5.1 Δοκίμια με 2 ασυνέχειες

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια (N1,N2) με μη συνεπίπεδες ασυνέχειες. Οι τεχνητές ασυνέχειες έχουν μεταξύ τους απόσταση στον άξονα x και y 1.2 cm. Οι πυκνότητες των δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα.

Δοκίμιο	Πυκνότητα(gr/cm ³)
N1	1.1
N2	1.08

Πίνακας 15:Οι πυκνότητες των πρισματικών δοκιμίων N1,N2

5.1.1 Δοκίμιο N1

Στην εικόνα φαίνεται η διάταξη του δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής όπως και προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε ένα βελόμετρο για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου, ένας αισθητήρας R16 και η μηχανή για την καταγραφή των φαινομένων ρωγμάτωσης.



Εικόνα 30:Δοκίμιο N1

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρατηρείται η δημιουργία εφελκυστικών και διατμητικών ρωγμών οι οποίες διαδίδονται μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου. Το δοκίμιο αστοχεί σε τάση 5.1 MPa , μειωμένη κατά 22% σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.

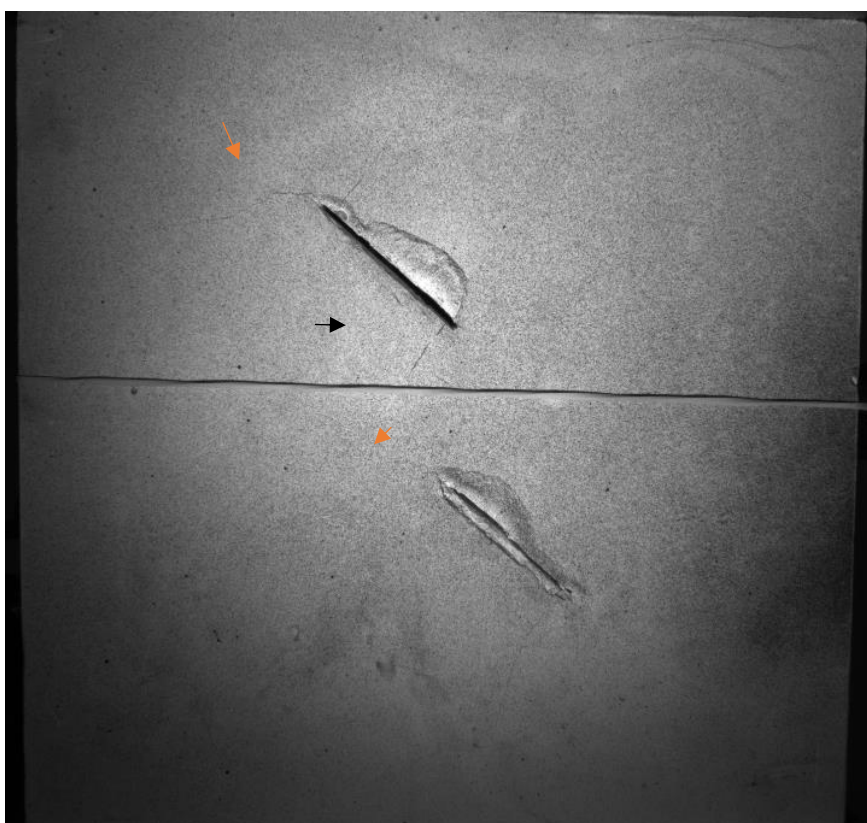
Με τη βοήθεια της κάμερας κατέστη δυνατό να παρατηρηθεί μακροσκοπικά η δημιουργία και συνένωση των ρωγμών και να προσδιοριστεί ο χρόνος και η τάση στην οποία λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα αυτά.

Οι εφελκυστικές ρωγμές εμφανίζονται για τάση 2 MPa δηλαδή στο 39% της συνολικής φόρτισης του δοκιμίου. Ενώ η δημιουργία των διατμητικών παρατηρείται αρκετά καθυστερημένα σε τάση 3.2 MPa

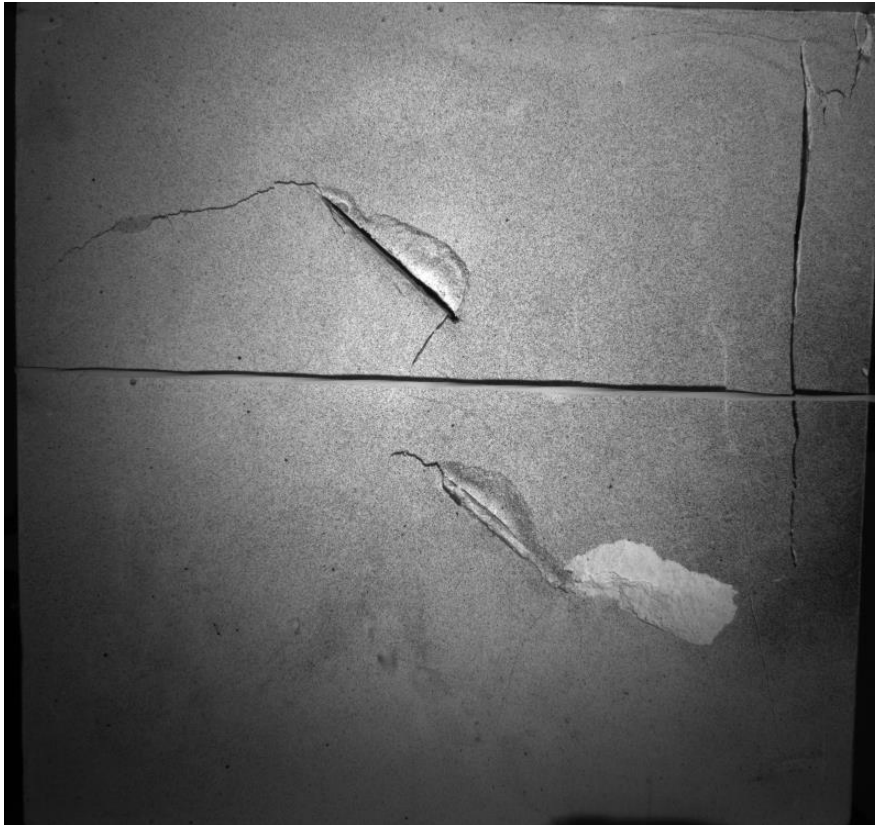
που αντιστοιχεί στο 63% της συνολικής φόρτισής του. Τέλος παρατηρείται η συνένωση μίας εφελκυστικής και μίας διατμητικής σε τάση 4.3 που αντιστοιχεί στο 84% της συνολικής φόρτισης. Στην εικόνα απεικονίζονται τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου.



α)το δοκίμιο κατά την έναρξη της δοκιμής.



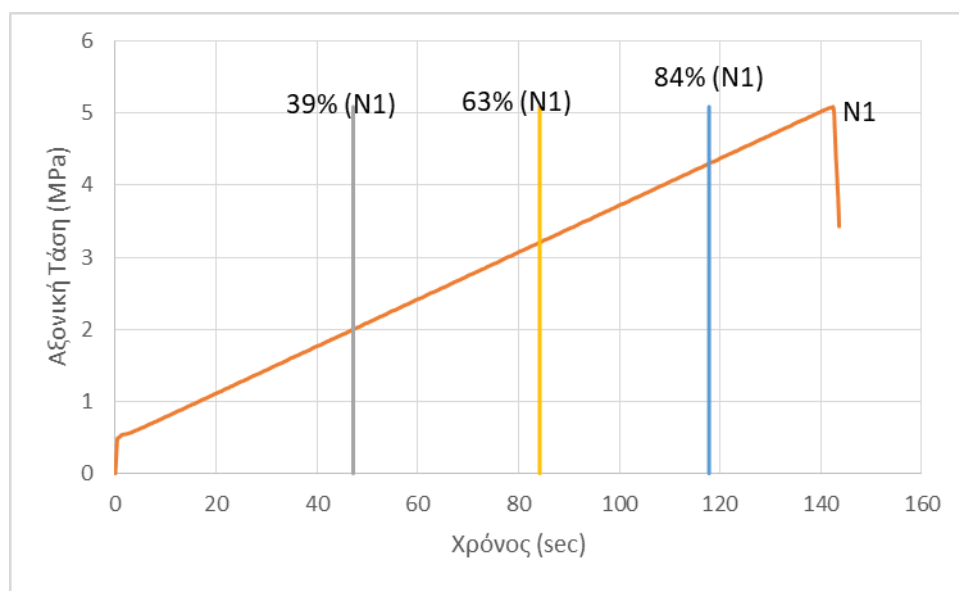
β)διάδοση εφελκυστικών(μαύρο βέλος) και δημιουργία διατμητικών (πορτοκαλί βέλος)



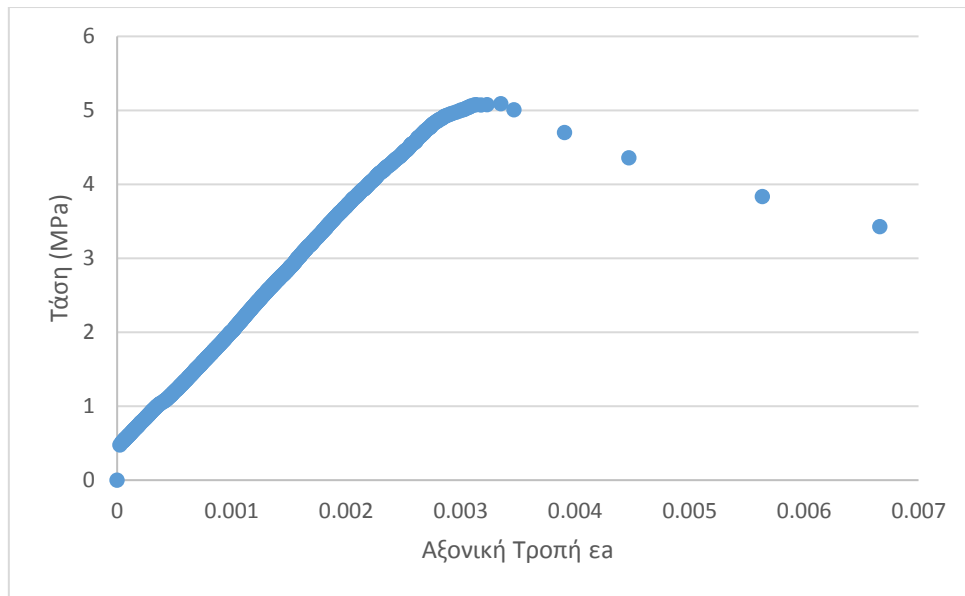
Γ)συνένωση διατμητικών, δευτερογενή φαινόμενα θραύσης και αστοχία του δοκιμίου.

Εικόνα 31:Στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου .

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής, από τα διαγράμματα αξονική τάσης – τροπής και αξονική τάσης χρόνου δεν παρατηρούνται τα φαινόμενα ρωγμάτωσης (σχήμα 61).

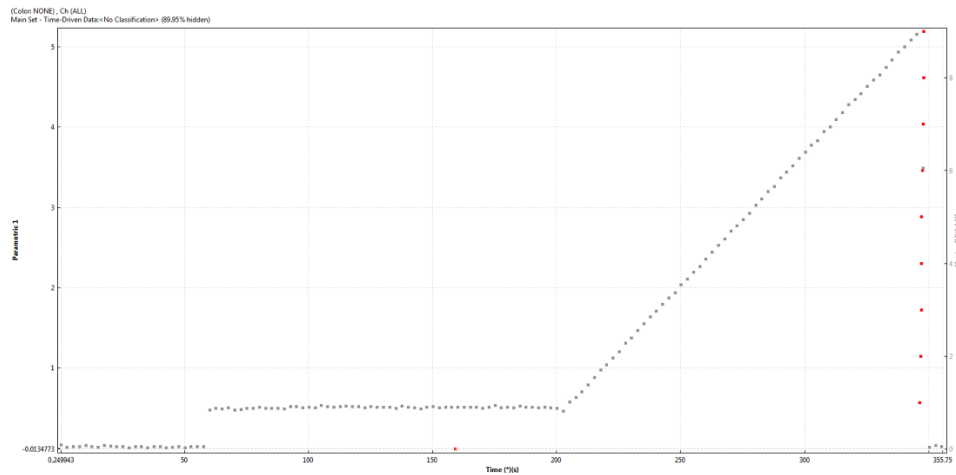


Σχήμα 62:Διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου.



Σχήμα 63:Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής.

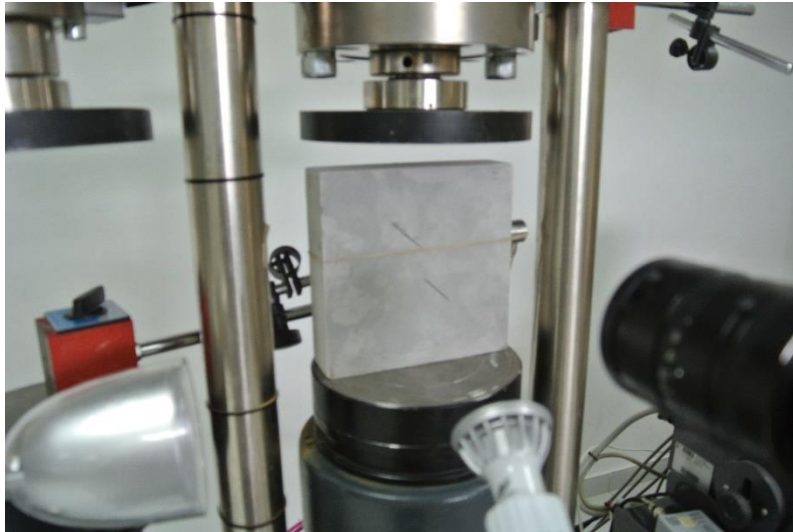
Τέλος με την τεχνική της ακουστικής εκπομπής σήματα λαμβάνονται μόνο κατά την έναρξη και λήξη της δοκιμής(σχήμα 64).



Σχήμα 64:Διάγραμμα παραμετρικό-χτύποι.

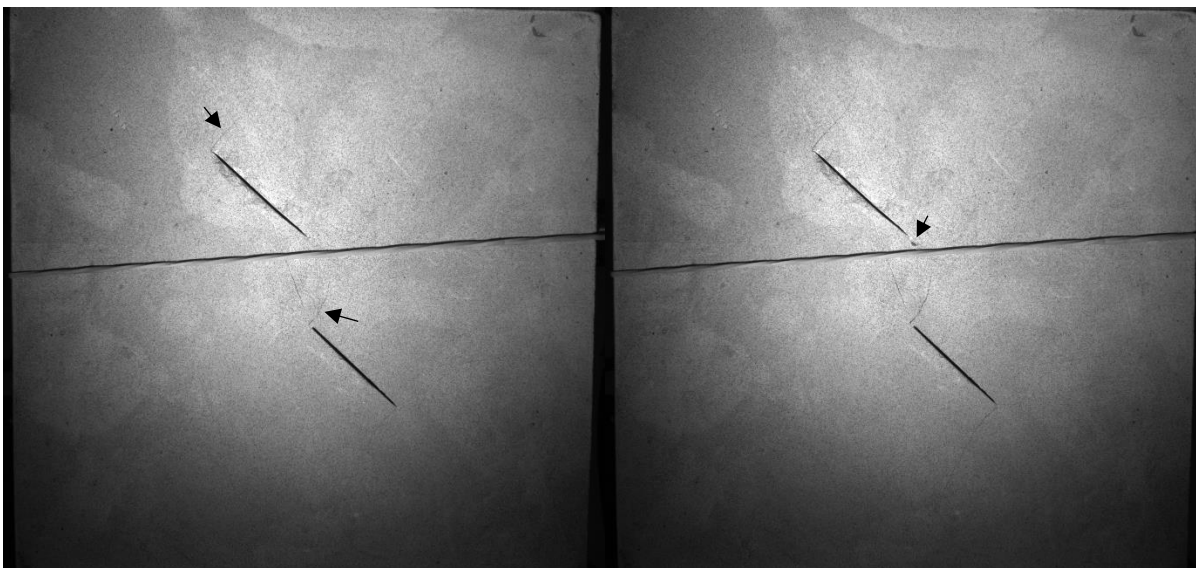
5.1.2 Δοκίμιο N2

Στο δοκίμιο N2 παρατηρήθηκε η συνένωση των δύο προϋπαρχουσών ρωγμών με τη διάδοση μίας εφελκυστικής και μίας διατμητικής ρωγμής. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής στη μία ασυνέχεια δημιουργείται εφελκυστική ρωγμή η οποία ενώνεται με τη διατμητική ρωγμή που έχει δημιουργηθεί από την άκρη της άλλης ασυνέχειας. Η διάταξη του δοκιμίου είναι η ίδια με του N1 όπως απεικονίζεται στην εικόνα.



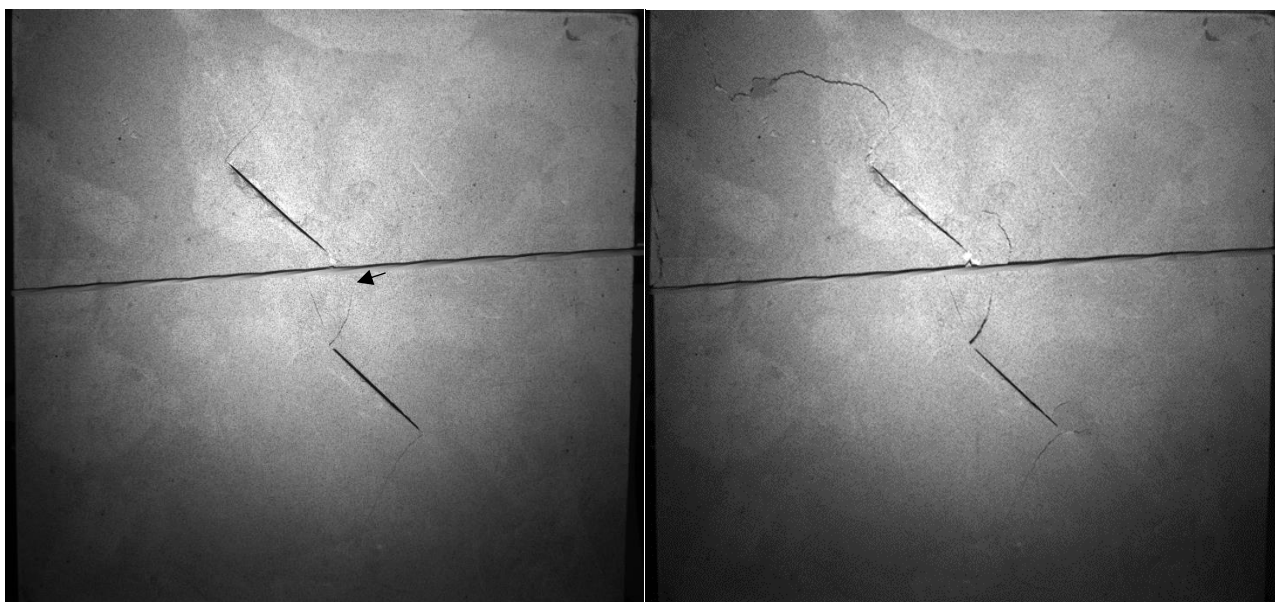
Εικόνα 32: Διάταξη δοκιμίου N2 για τη μονοαξονική δοκιμή

Με την καταγραφή της δοκιμής με κάμερα παρατηρείται η διατμητική θραύση του δοκιμίου σε τάση 4.77 MPa. Η μέγιστη τάση είναι κατά 27% μειωμένη σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου ομοιώματος. Αρχικά εμφανίζονται εφελκυστικές ρωγμές στα άκρα των ασυνεχειών σε τάση 1.4 MPa που αντιστοιχεί στο 29% της συνολικής φόρτισης του. Καθώς διαδίδονται οι εφελκυστικές ρωγμές δημιουργείται και διατμητική ρωγμή στο άκρο της δεύτερης ασυνέχειας σε τάση 2 MPa. Το δοκίμιο κατά τη δημιουργία της διατμητικής ρωγμής έχει καλύψει το 42% της συνολικής του φόρτισης. Τέλος παρατηρείται η συνένωση της εφελκυστικής και διατμητικής ρωγμής στο 86% της συνολικής φόρτισης για τάση 4.1 MPa.



α) δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών

β) δημιουργία διατμητικής ρωγμής

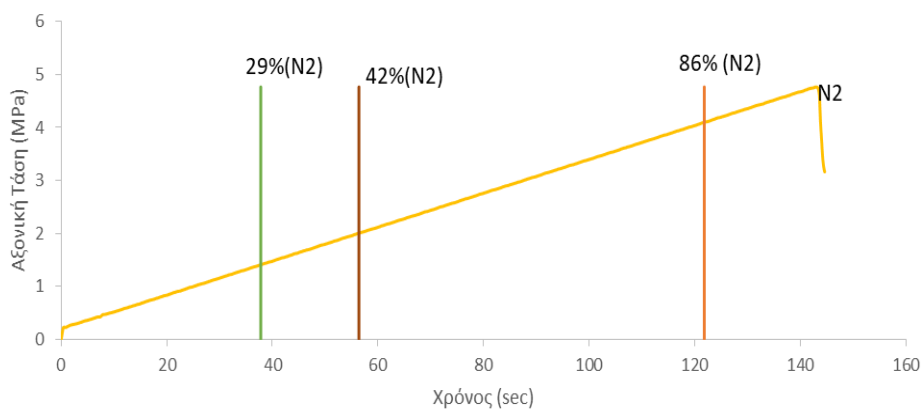


γ) συνένωση ασυνεχειών

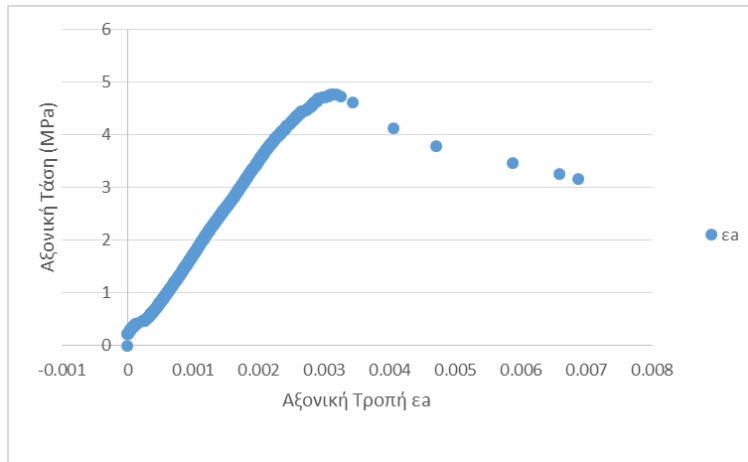
δ) αστοχία δοκιμίου

Εικόνα 33: Το δοκίμιο N2 σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Από τα διαγράμματα αξονικής τάσης χρόνου και αξονικής τάσης-τροπής δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο ρωγμάτωσης.



Σχήμα 65: Διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου

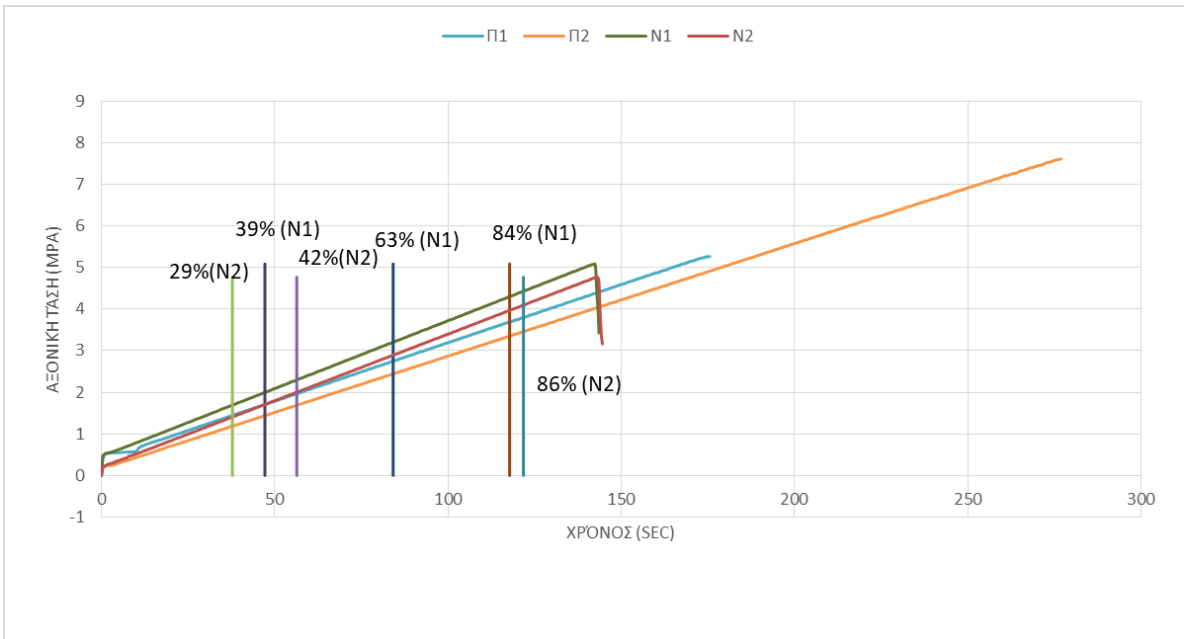


Σχήμα 66:Διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής

Τέλος τα δοκίμια N1,N2 αστοχούν σε τάση μειωμένη κατά μέσο όρο 24% σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου υλικού. Η συνένωση των διατμητικών εμφανίζεται σε τάση που αντιστοιχεί στο 85% της συνολικής τους φόρτισης. Στον πίνακα 15 και στο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Δοκίμιο	Μέγιστη τάση (MPa)	Τάση συνένωσης διατμητικών ρωγμών(MPa)	Μήκος ασυνέχειας cm
N1	5.09	4.3	2.4
N2	4.77	4.1	2.4

Πίνακας 16:Παρουσίαση αποτελεσμάτων δοκιμών N1.N2



Σχήμα 67 : Απεικόνιση Αποτελεσμάτων δοκιμών N1,N2

5.2 Δοκίμια με τρείς τεχνητές ασυνέχειες

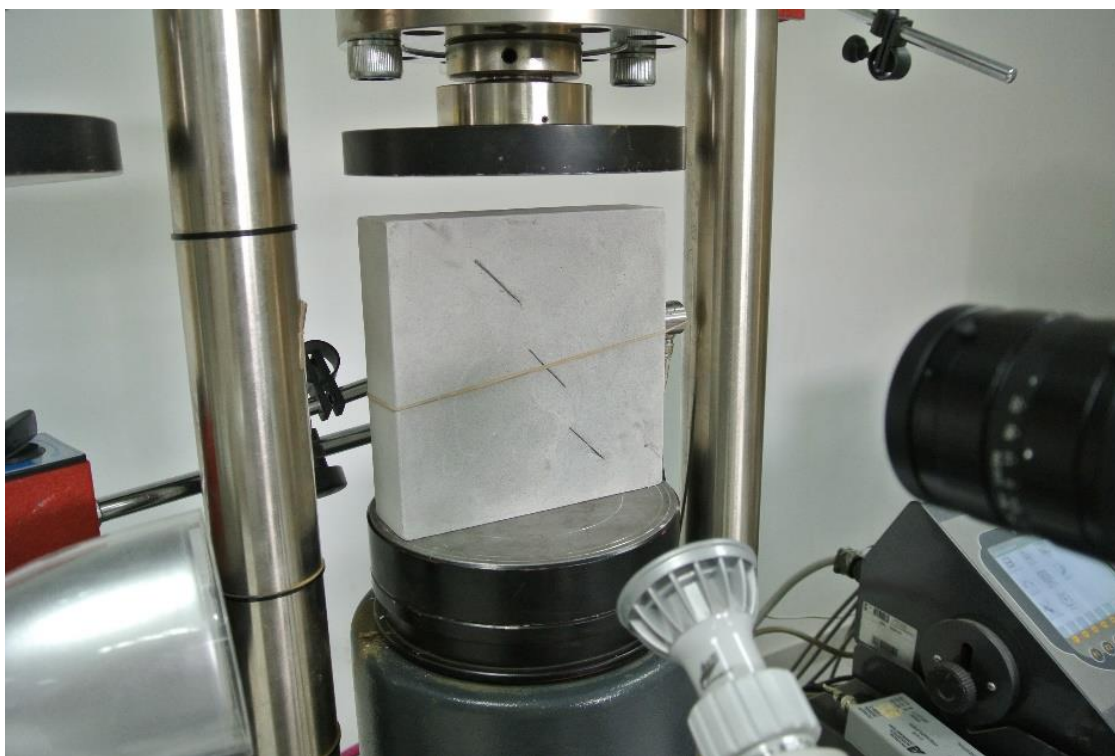
Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων κατασκευάστηκαν δοκίμια με τρείς τεχνητές μη συνεπίπεδες ασυνέχειες.

Δοκίμιο	Πυκνότητα (gr/cm ³)
3N1	1.09
3N2	1.08

Πίνακας 17 :Πυκνότητες δοκιμών 3N1,3N2

5.2.1 Δοκίμιο 3N1

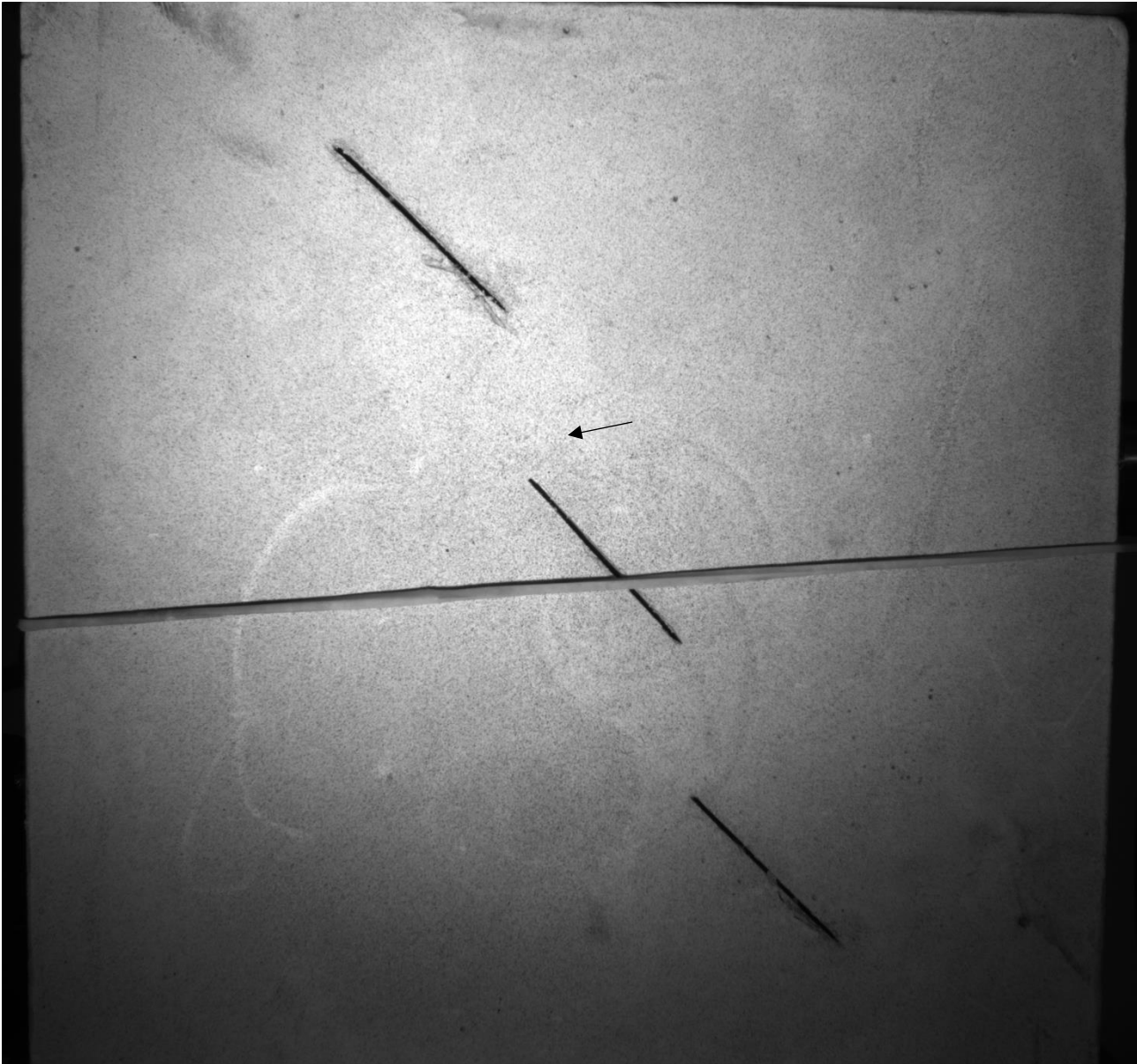
Με κατάλληλη διάταξη δημιουργήθηκαν ασυνέχειες μήκους 2.3 cm και μεταξύ τους απόσταση στους δύο άξονες 1.2 cm. Στην εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη του δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



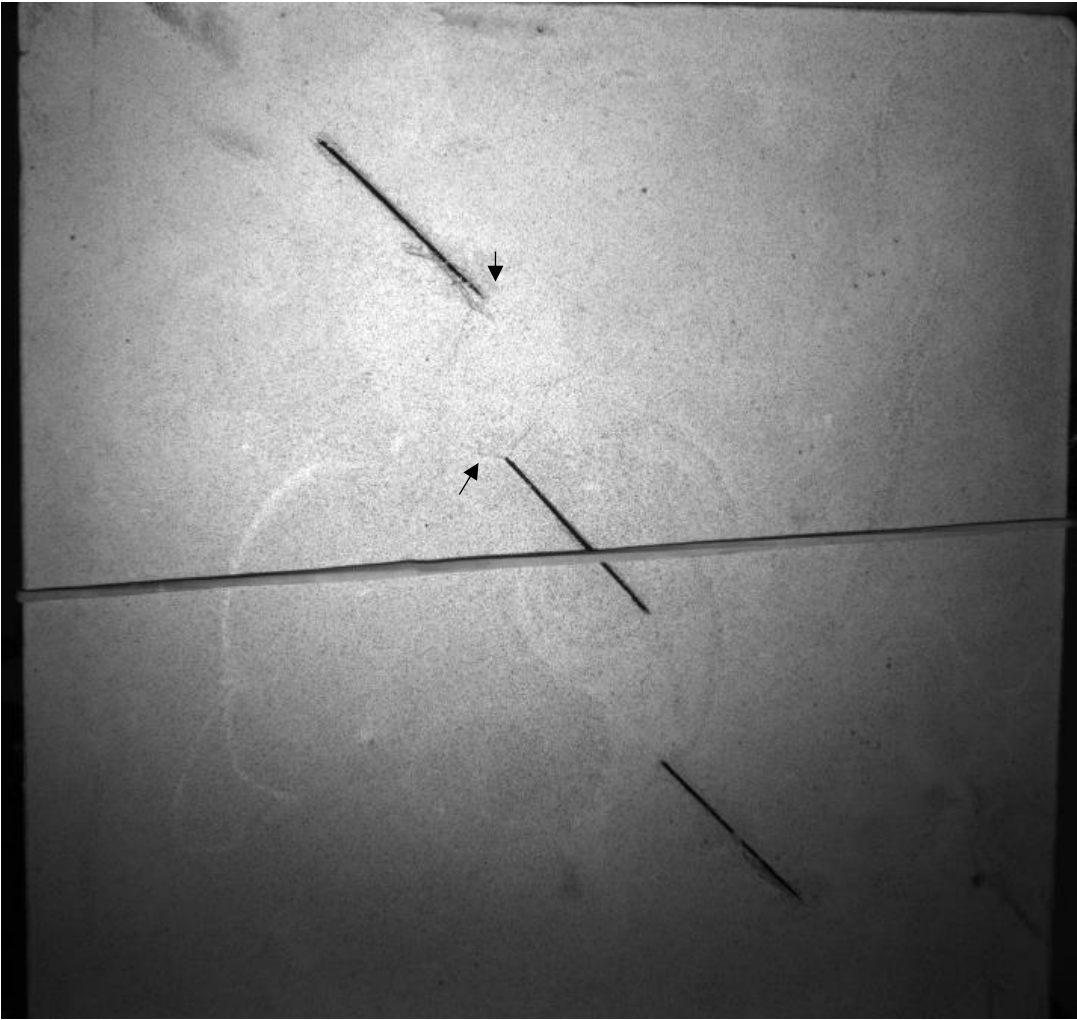
Εικόνα 34:Διάταξη δοκιμίου για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Κατά τη δοκιμή η θραύση πραγματοποιείται διαμηθικά με τη συνένωση διαμηθικών ρωγμών μεταξύ των ασυνεχειών. Αρχικά εμφανίζονται εφελκυστικές ρωγμές σε τάση 1.54 MPa που αντιστοιχεί στο 41% της συνολικής φόρτισης. Οι διαμηθικές αρχίζουν να παρατηρούνται σε τάση 3,265 MPa που αντιστοιχεί στο 87% της συνολικής φόρτισης ενώ η συνένωση έχει αρχίσει ήδη σε τάση 3.66 MPa

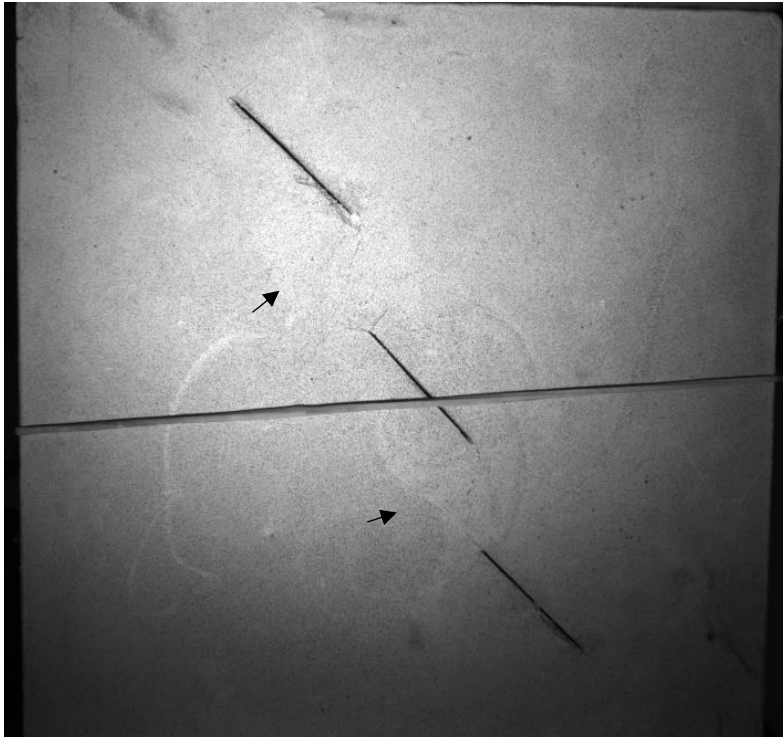
που αντιχτοιχεί στο 97% της συνολικής φόρτισης. Το δοκίμιο αστοχεί σε διάτμηση σε τάση 3.77 MPa και δημιουργείται κλιμακωτό επίπεδο ολίσθησης. Στην εικόνα και στο διάγραμμα αξονικής τάσης απεικονίζονται τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου.



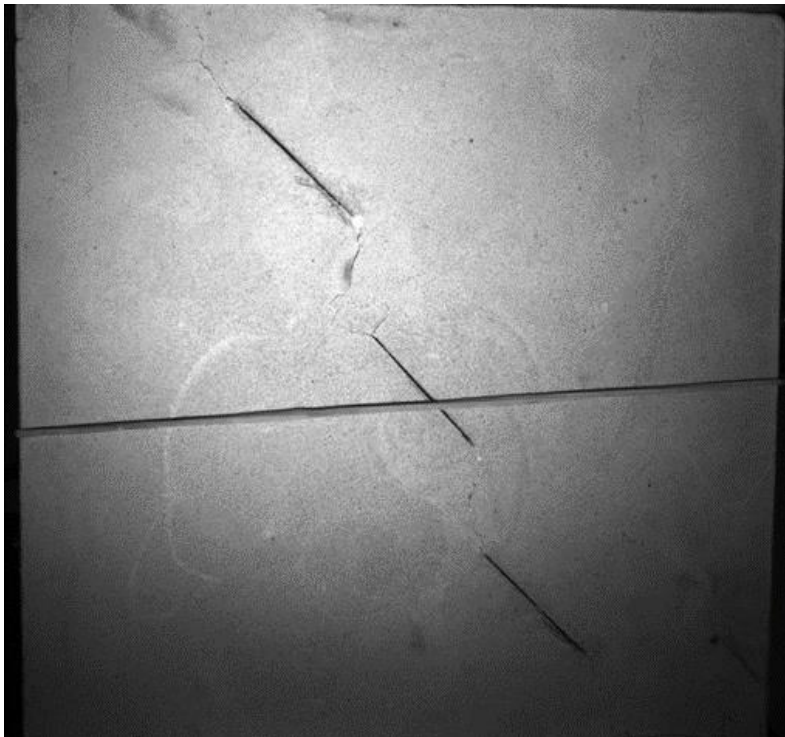
Εικόνα 35: Δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών



Εικόνα 36:α)διάδοση διαμητικών ρωγμών

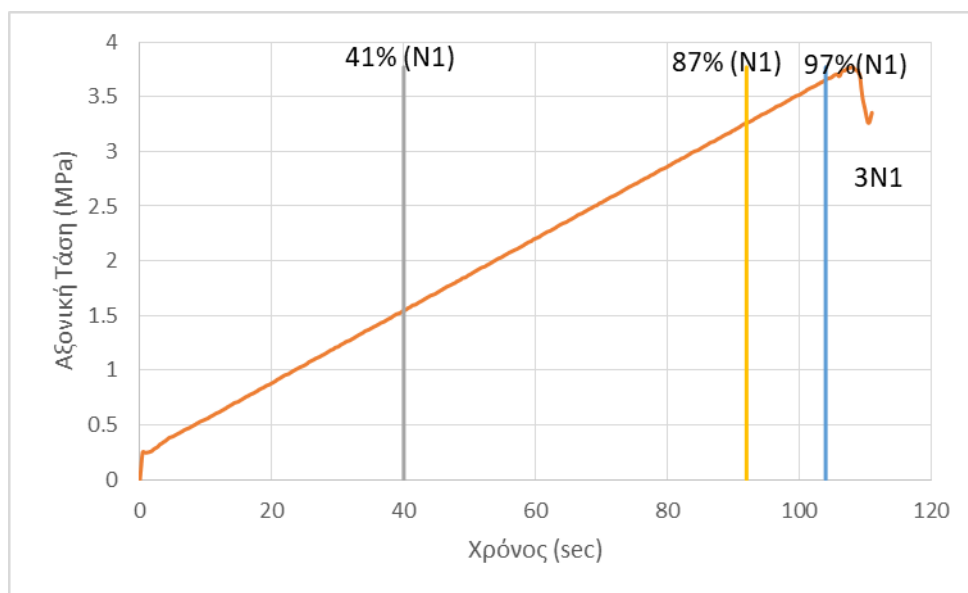


Εικόνα 36: β)συνένωση διατμητικών.

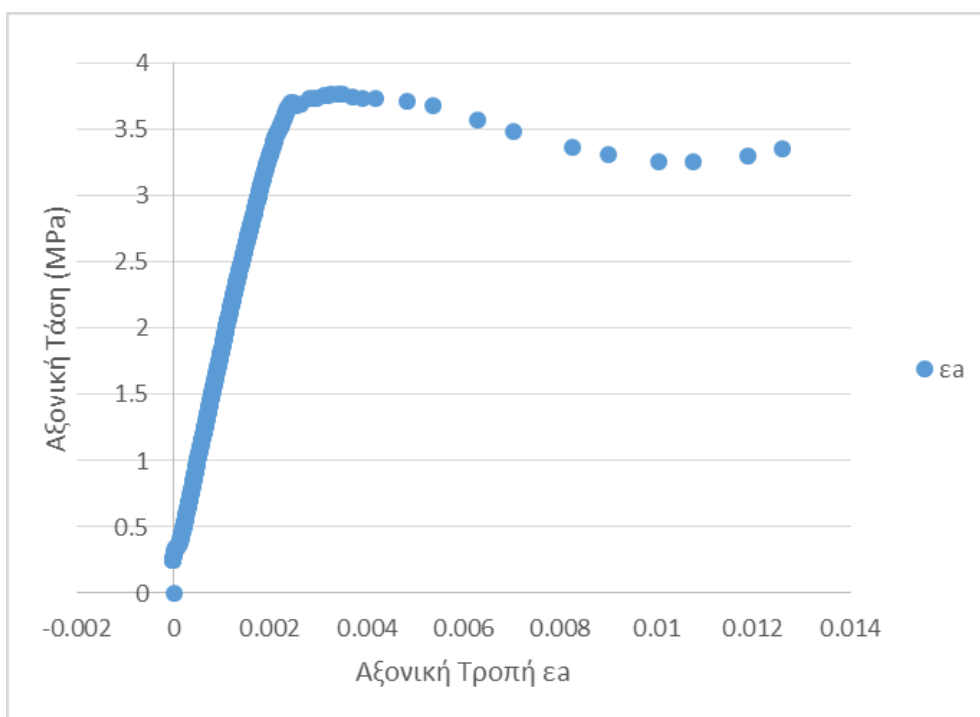


Εικόνα 37: αστοχία σε διάτμηση

Στα διαγράμματα αξονικής τάσης – τροπής και αξονικής τάσης – χρόνου δεν παρατηρούμαι κάποιο φαινόμενο ρωγμάτωσης.

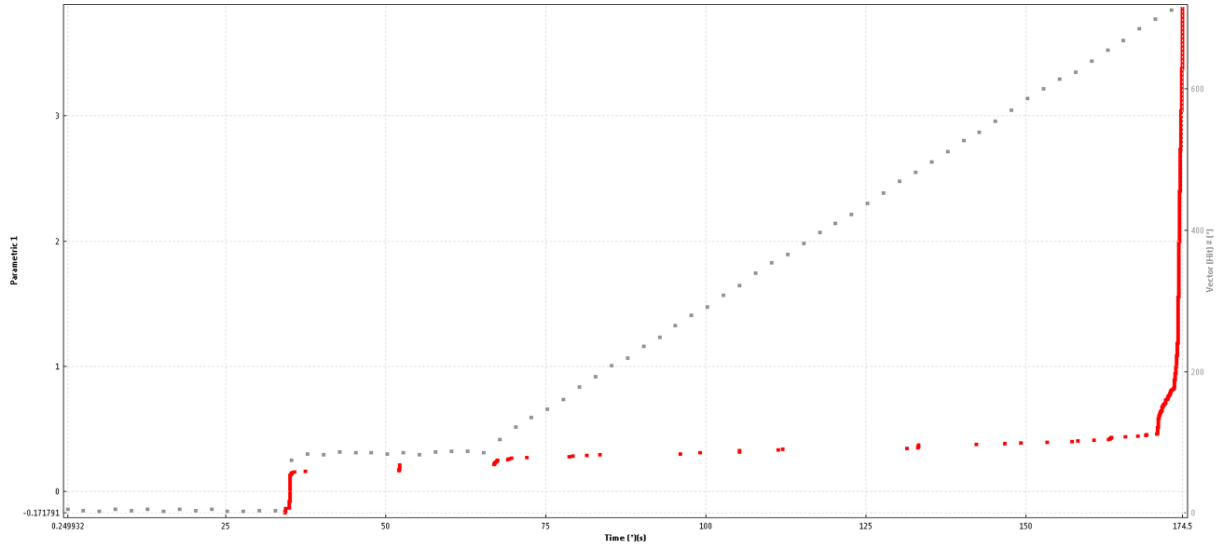


Σχήμα 68: Διάγραμμα αξονικής τάσης –χρόνου με τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου.



Σχήμα 69: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής.

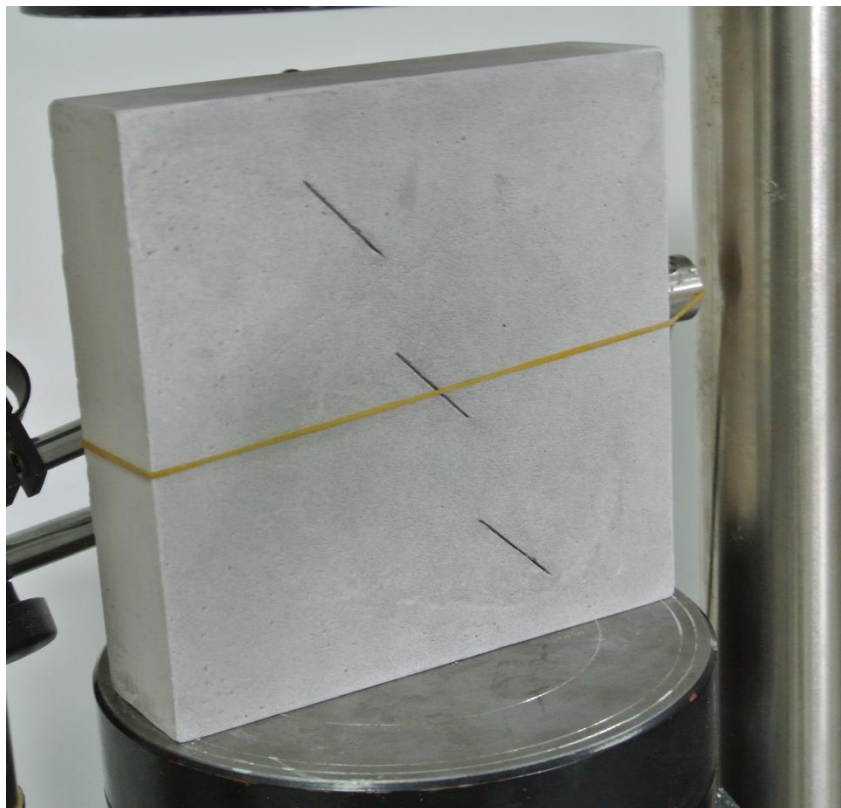
(Color: NONE, Ch: ALL)
Main Set - Time-Driven Data <No Classification> (89.97% hidden)



Σχήμα 70: Διάγραμμα ΑΕ δοκιμίου 3N1

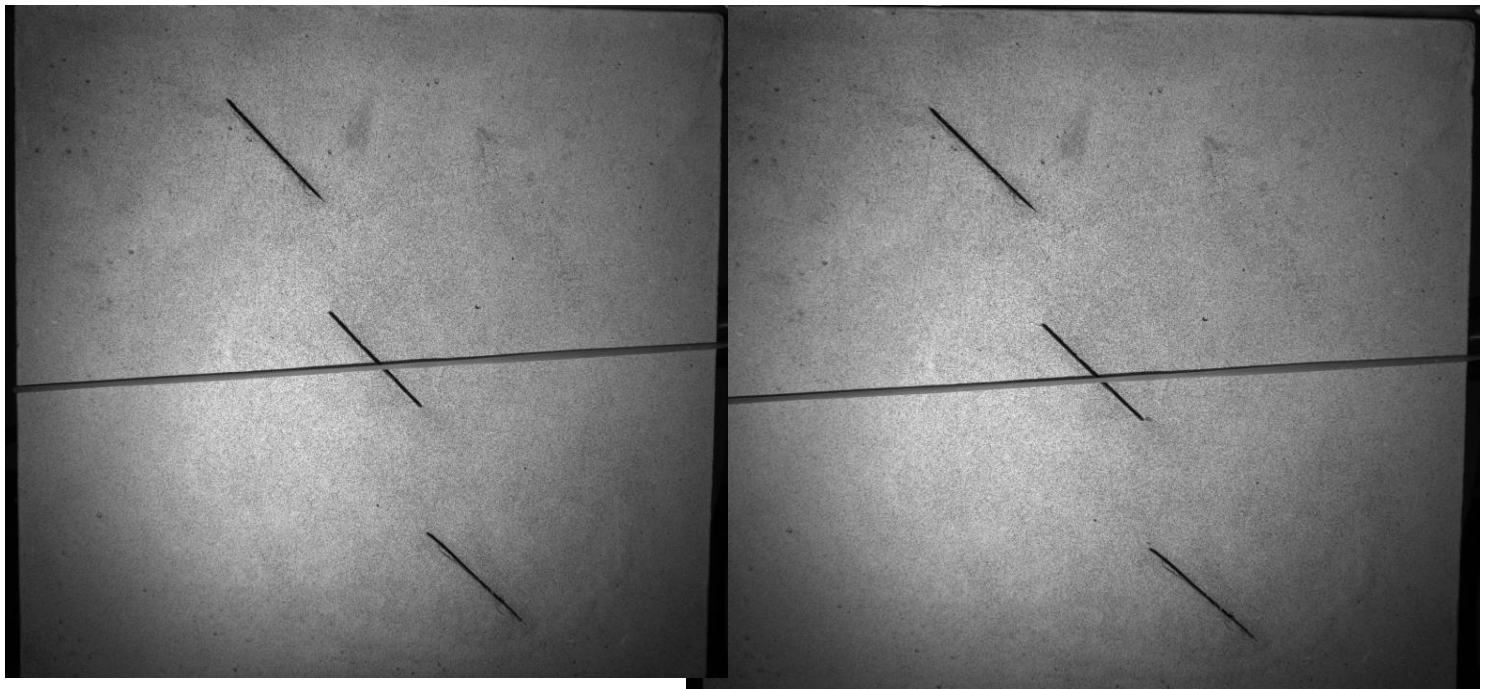
5.2.2 Δοκίμιο 3N2

Στο δοκίμιο 3N2 παρατηρείται αστοχία σε διάτμηση με τη συνένωση των τεχνητών ασυνεχειών μέσω διατμητικών ρωγμών. Μακροσκοπικά η ανάλυση των σταδίων ρωγμάτωσης ήταν δύσκολη καθώς η έναρξη των ρωγματώσεων είναι δυσδιάκριτη.



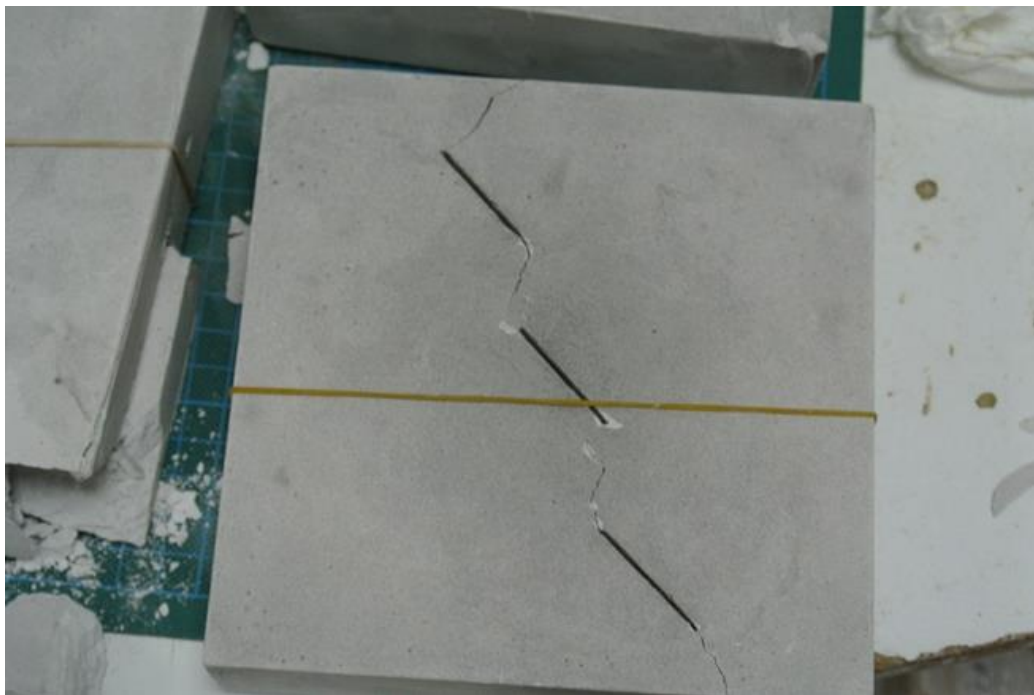
Εικόνα 38: Δοκίμιο 3N2 πριν την έναρξη της δοκιμής

Από την ανάλυση των φωτογραφιών παρατηρείται η δημιουργία και συνένωση διατμητικών ρωγμών σε τάσεις 2.8 MPa και 3.5 MPa αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται η δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής από το ένα άκρο της ασυνέχειας. Η εικόνα απεικονίζει τα στάδια θραύσης του δοκιμίου.



α) έναρξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

β)συνένωση διαμηθικών ρωγμών

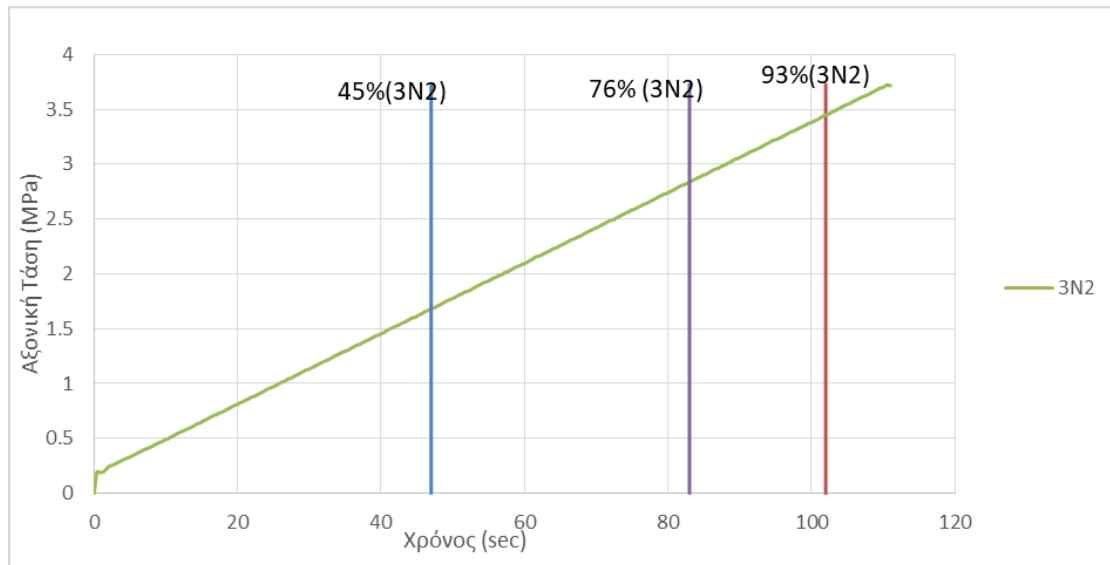


γ)αστοχία δοκιμίου σε διάτμηση

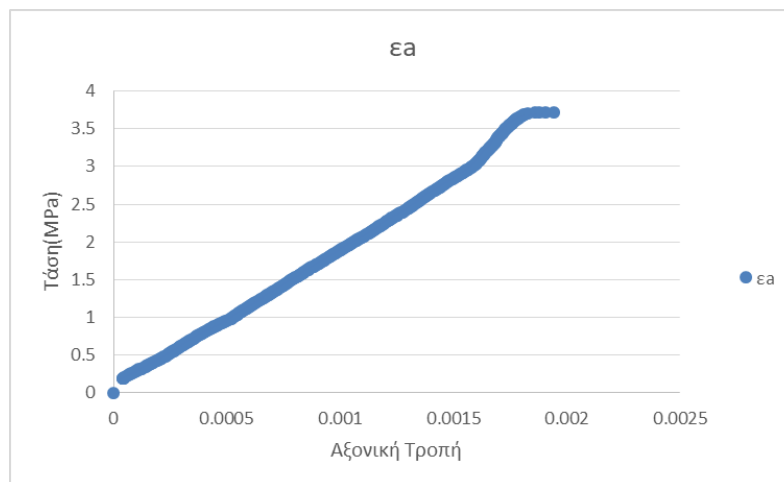
Εικόνα 39:Στάδια θραύσης δοκιμίου 3N2

Το δοκίμιο αστοχεί σε τάση 3.72 MPa ,κατά 43% μειωμένη σε σχέση με το άρρηκτο πέτρωμα. Οι εφελκυστικές εμφανίζονται σε τάση 1.7 MPa όπου το δοκίμιο καλύπτει το 46% της συνολικής του φόρτισης.

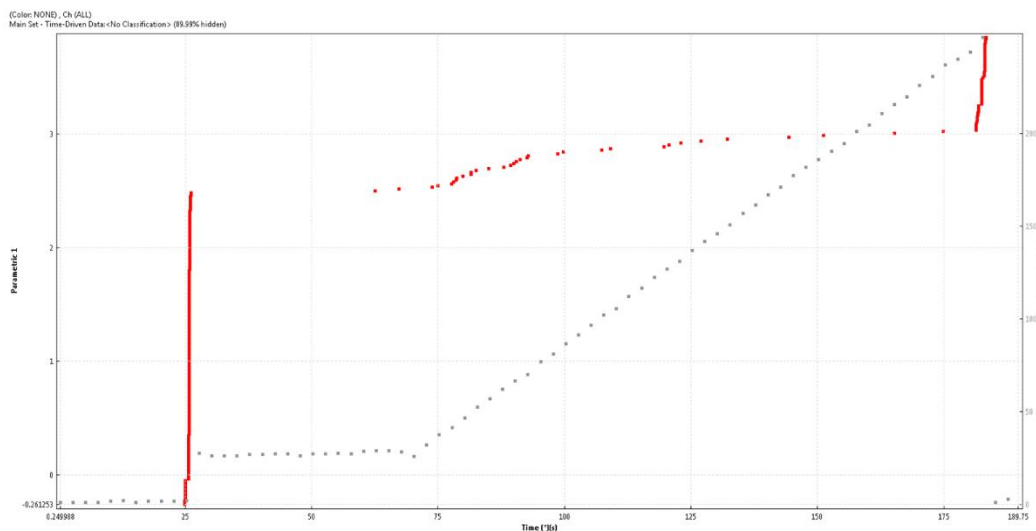
Οι διατμητικές ρωγμές εμφανίζονται σε τάση που αντιστοιχεί στο 76% της συνολικής φόρτισης του δοκιμίου ενώ η συνένωσή τους στο 93%. Από τα διαγράμματα αξονικής τάσης-χρόνου , δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο ενώ στο διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής υπάρχει μία μεταβολή λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου. Στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής λαμβάνονται αρκετά σήματα, με τα περισσότερα από αυτά στο χρόνο συνένωσης των διατμητικών όπως παρατηρείται από τη μηχανή.



Σχήμα 71: Διάγραμμα αξονικής τάσης-χρόνου με τα στάδια ρωγμάτωσης του δοκιμίου.

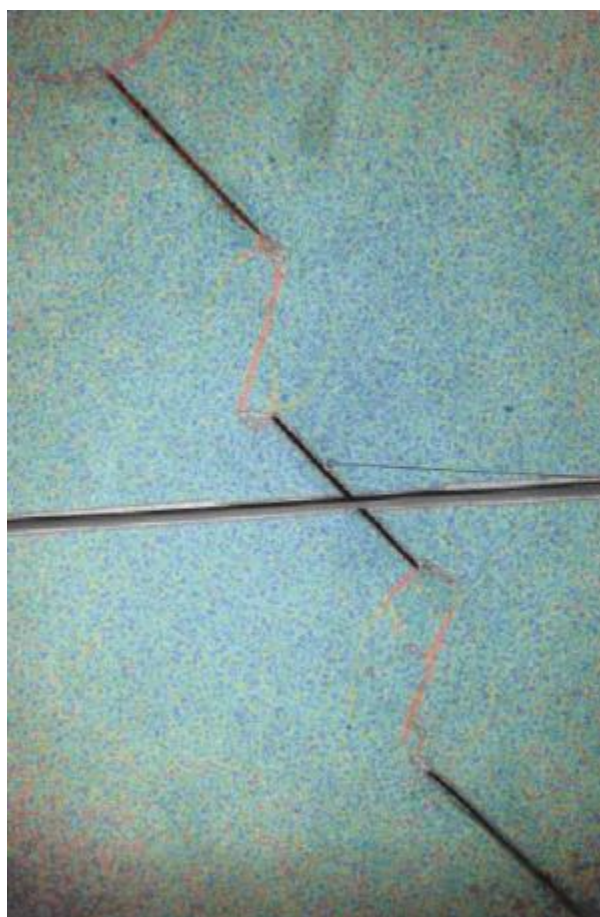


Σχήμα 72: Διάγραμμα αξονικής τάσης-τροπής



Σχήμα 73: Διάγραμμα ακουστικών εκπομπών

Στο δοκίμιο 3N2 μέσω του προγράμματος GOM CORRELATOR, παρατηρήθηκε η δημιουργία διατμητικών ρωγμών μεταξύ των ασυνεχειών οι οποίες στη συνέχεια ενώθηκαν με τις διατμητικές ρωγμές που υπήρχαν στα άκρα των ρωγμών.



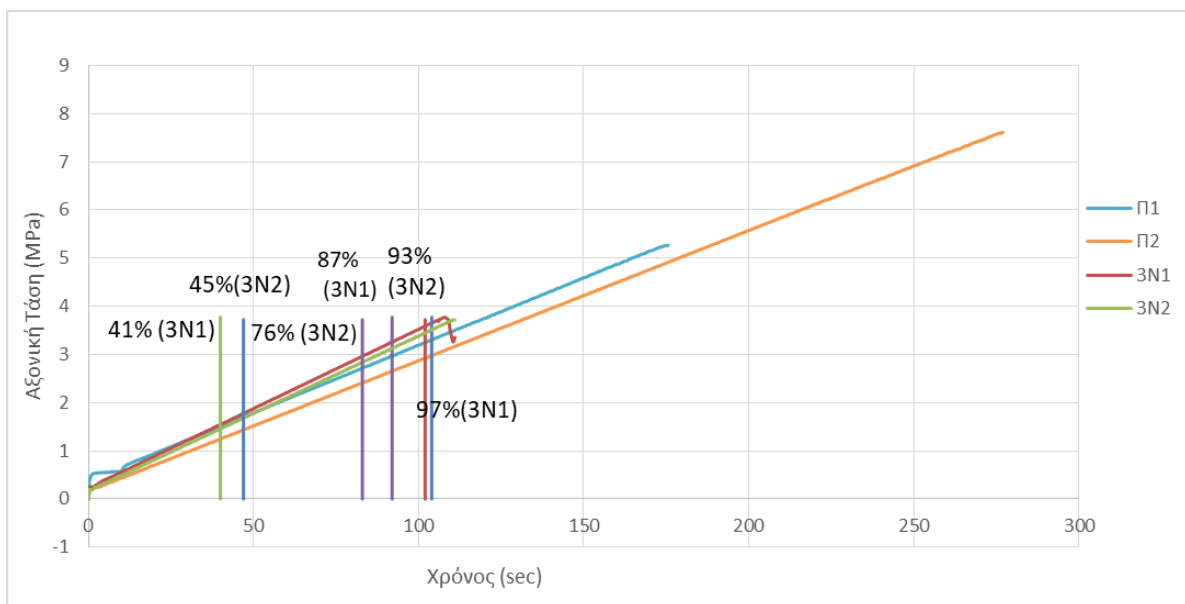
Εικόνα 40: Δημιουργία διατμητικών ρωγμών στο δοκίμιο 3N2

Συνεπώς, από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης των δοκιμίων με τις τρεις μη συνεπίπεδες

ασυνέχειες , παρατηρείται η δημιουργία διατμητικών ρωγμών για τάση που αντιστοιχεί στο 70-90% της συνολικής φόρτισης ενώ η συνένωσή τους παρατηρείται μετά το 90%. Στον πίνακα 18 παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης του κάθε δοκιμίου για τα διάφορα στάδια θραύσης του, ενώ στο σχήμα 74 παρουσιάζονται οι τάσεις του κάθε σταδίου ρωγμάτωσης σε σύγκριση με την τελική τους φόρτιση καθώς και με την αντοχή του άρρηκτου υλικού.

Δοκίμιο	Μέγιστη Αντοχή(MPa)	Τάση εμφάνισης εφελκυστικών ρωγμών(MPa)	Τάση εμφάνισης διατμητικών ρωγμών(MPa)	Τάση συνένωσης ρωγμών(MPa)
3N1	3.8	1.54	3.26	3.66
3N2	3.7	1.7	2.84	3.5

Πίνακας 18: Αποτελέσματα δοκιμών για τα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες 3N1,3N2



Σχήμα 74: Αποτελέσματα δοκιμών για τα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες 3N1,3N2

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Από την πρώτη σειρά πειραμάτων διαπιστώνεται ότι τη μεγαλύτερη αντοχή την παρουσιάζει το άρρηκτο δοκίμιο ενώ τη μικρότερη τα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες. Τα δοκίμια με μία ασυνέχεια παρουσιάζουν μια μεγάλη αντοχή με μέσο όρο 5,7 MPa. Τα δοκίμια με δυο συνεπίπεδες ασυνέχειες παρουσιάζουν αντοχή με μέσο όρο 4.33 ενώ στα δοκίμια με δυο μη συνεπίπεδες ασυνέχειες ο μέσος όρος της μέγιστης τάσης είναι 4.93 MPa. Τέλος τα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες παρουσιάζουν μέσο όρο 3.75 MPa , κατά 42% μειωμένη από την τάση του άρρηκτου υλικού.

Οι τρόποι αστοχίας που παρατηρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης είναι η διάτμηση , ο αξονικός σχισμός καθώς και η αποφλοίσωση. Επίσης κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης παρατηρήθηκε ο τρόπος αστοχίας II σύμφωνα με τον Gramberg.



Εικόνα 41: Τρόποι θραύσης δοκιμίων.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών στα πρισματικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η ακουστική εκπομπή. Η ανάλυση των σημάτων έδειξε ότι δε λαμβάνονται πολλά σήματα. Κατά κύριο λόγο σήματα εμφανίζονται στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής και μερικές φορές κατά τη συνένωση των διατμητικών.

Από την αξιολόγηση των βίντεο παρατηρείται ομοιότητα στο τρόπο θραύσης των δοκιμίων. Σε όλα τα δοκίμια έχουμε το σχηματισμό εφελκυστικών ρωγμών εκατέρωθεν του επιπέδου ασυνέχειας με προσανατολισμό κάθετες σε αυτό το επίπεδο και στη συνέχεια τείνουν να γίνουν παράλληλες με τη

διεύθυνση φόρτισης του δοκιμίου. Η συνένωση των ασυνεχειών γίνεται με διάτμηση ενώ παρατηρήθηκε και η συνένωση μιας διατμητικής και μιας εφελκυστικής ρωγμής. Τα δοκίμια με μία ασυνέχεια δημιουργούσαν μόνο εφελκυστικές ρωγμές, ενώ τα δοκίμια με δύο και τρεις ασυνέχειες δημιουργούσαν εφελκυστικές και διατμητικές. Στα δοκίμια με τρεις ασυνέχειες παρατηρήθηκε κατά κύριο λόγο διάτμηση.

Η αντοχή των δοκιμίων με μία ασυνέχεια μειώνεται κατά 10%-20% σε σχέση με την αντοχή του υλικού. Επίσης, από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι οι εφελκυστικές ρωγμές σχηματίζονται στο 10%-30% της μέγιστης αντοχής των δοκιμίων.

Στα δοκίμια με δύο ασυνέχειες με μεταξύ τους απόσταση 2.4 cm παρατηρείται μείωση της αντοχής κατά μέσο όρο 31% σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου υλικού ενώ στο τελευταίο δοκίμιο με μικρότερη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών παρατηρείται μείωση της αντοχής του κατά 40%. Η δημιουργία των εφελκυστικών ρωγμών στα δοκίμια S1,S2 παρατηρείται στο 30% της συνολικής τους φόρτισης. Στο δοκίμιο 2S2 παρατηρείται η δημιουργία τους στο 40% της συνολικής του φόρτισης. Τέλος οι διατμητικές στα δοκίμια S1,S2 παρατηρούνται στο 70%-80% της συνολικής τους φόρτισης ενώ στο δοκίμιο 2s2 η συνένωση των διατμητικών εμφανίζεται στο 47% της συνολικής του φόρτισης. Τα δοκίμια N1,N2 αστοχούν σε τάση μειωμένη κατά 20% - 30% σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου υλικού. Η συνένωση των διατμητικών εμφανίζεται σε τάση που αντιστοιχεί στο 85% της συνολικής τους φόρτισης, ενώ η δημιουργία εφελκυστικών εμφανίζεται στο 30%-40% της συνολικής τους φόρτισης. Τα δοκίμια 3N1,3N2 παρουσιάζουν συνένωση των διατμητικών στο 70% της συνολικής τους φόρτισης ενώ η αντοχή τους είναι μειωμένη κατά 42% μειωμένη.

Τέλος τα αποτελέσματα της δοκιμής δυσθραυστότητας συμπίπτουν με τα αποτελέσματα από τα δοκίμια με μία ασυνέχεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Νομικός Π. (2015), "Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων"
2. Σοφιανός Α.Ι. και Νομικός Π.Π. (2008), "Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ / Σ.Κ.Υ.Ε., Οκτώβριος 2008.
3. Anderson T.L. (2005), "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications", 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
4. Backers T. (2004), "Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading", University of Potsdam, Germany.
5. Δασκαλάκη Α. (2015), "Αξιολόγηση ακουστικών εκπομπών κατά τη δοκιμή Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή 'chevron' σε δοκίμια μαρμάρου", Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2015.
6. Κατσικογιάννη Π., Νομικός Π.Π. και Σοφιανός Α.Ι. (2007), "Ακουστική Εκπομπή στην μηχανική πετρωμάτων", Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 145/ 2007.
7. Atkinson C., Smelser R.E., Sanchez J. (1982), "Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test", International of Fracture, Vol.18, No. 4.
8. ISRM Commission on Testing Methods (1995), "Suggested method for determining Mode I fracture toughness using cracked Chevron-notched Brazilian disc (CCNBD) specimens", R.J. Fowell (coordinator), Int. J. Rock Mech. And Min. Sci., Vol. 32, No. 1, pp. 57-64.
9. ISRM Commission on Testing Methods (1988), "Suggested methods for determining the fracture toughness of rock", F. Ouchterlony (coordinator), Int. J. Rock Mech. And Min. Sci., Vol. 25, No. 2, pp. 71-96.
10. K. Kaklis et al (2017), "Using acoustic emissions to enhance fracture toughness calculations for CCNBD marble specimens", Frattura ed Integrità Strutturale, 40.
11. Martinez A.R., (1999), "Fracture coalescence in natural rock", MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
12. Wong N.Y., 2008, "Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble", Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
13. Χαλακατεβάκης Ν. (2010), "Αναλυτικός υπολογισμός αντοχής κερματισμένης βραχομάζας", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
14. Μάρρας Η. (2014), "Πειραματική διερεύνηση της αντοχής και του τρόπου αστοχίας ρωγματωμένων δοκιμίων τεχνητών πετρωμάτων", Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
15. C. Xin, L. Zhihong, P. Xi, (2012), "Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression", March 2012, International Journal of Mining Science and Technology 22(2):213–221.

16. Guansheng Han, Hongwen Jing, Yujing Jiang, Richeng Liu, Haijian Su, Jiangyu Wu (2018) “The Effect of Joint Dip Angle on the Mechanical Behavior of Infilled Jointed Rock Masses under Uniaxial and Biaxial Compressions”. Processes 2018, 6, 49.

17. Λουπασάκης Κ. (2015) , “Τεχνική Γεωλογία Ι” , Σημειώσεις μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

18. ISRM (2002), Commission on Application of Geophysics to Rock Engineering. “Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the Acoustic Emission technique.”, 5th Int Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, pp.61-66.