



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΘΡΑΥΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΨΑΘΥΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΟΠΗ ΥΠΟ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

ΣΑΡΡΗ ΜΑΡΙΑ

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: ΝΟΜΙΚΟΣ Π.Π.  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2014





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΘΡΑΥΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΨΑΘΥΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΟΠΗ ΥΠΟ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

ΣΑΡΡΗ ΜΑΡΙΑ

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 08/04/2014:

Π. Νομικός, Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)

Α. Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Λουπασάκης, Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Αθήνα 2014**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η θραύση του πετρώματος γύρω από υπόγειες εκσκαφές έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επιστήμη του μηχανικού και ιδιαίτερα στον τομέα της κατασκευής υπόγειων έργων. Όπου κι αν σχηματίζονται οι ρωγμές (υπόγεια λατομεία, σήραγγες, υπόγειες εκσκαφές, κλπ.) η δημιουργία τους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η θραύση μπορεί να είναι διαφορετικού βαθμού σοβαρότητας, από αβλαβείς αποφλοιώσεις στη περίμετρο της εκσκαφής έως βίαιες εκτινάξεις. Παρά το γεγονός ότι τέτοιες αστοχίες είναι συνήθεις, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τη γεωμετρία, τους μηχανισμούς και τις εντατικές καταστάσεις που συμβαίνουν κατά την αστοχία ενός πετρώματος σε μεγάλη κλίμακα. Αντιθέτως σε απλές εργαστηριακές δοκιμές η ανάπτυξη των αστοχιών στα φυσικά μοντέλα με ανοίγματα είναι σχετικά γνωστές.

Οι περισσότερες θεωρίες αστοχίας που εφαρμόζονται στις εργαστηριακές δοκιμές έχουν αναπτυχθεί με βάση ομοιογενή πεδία τάσεων, στην πράξη όμως, το πεδίο των τάσεων είναι εξαιρετικά ανομοιογενές. Παρόλα αυτά οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων στα οποία προβλέπεται η διάνοιξη ενός υπογείου έργου προσδιορίζονται με εργαστηριακές δοκιμές. Ιδιαίτερη προσοχή βέβαια, πρέπει να δοθεί στον παράγοντα της κλίμακας η οποία περιορίζει την εφαρμογή εργαστηριακών αποτελεσμάτων σε πρακτικές εφαρμογές. Μια ακριβής κατανόηση του προβλήματος της θραύσης μπορεί να γίνει με την παρατήρηση της διαφοράς ανάμεσα στη μακροσκοπική και τη μικροσκοπική θεώρηση του προβλήματος.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η παρατήρηση της θραύσης φυσικών μοντέλων με οπές, που προσομοιώνουν την υπόγεια εκσκαφή μέσα στο πέτρωμα και η προσπάθεια προσδιορισμού της τάσης έναρξης των διαφόρων τύπων ρωγμών (εφελκυστικές, διατμητικές) μέσω της ακουστικής εκπομπής. Η θραύση μελετάται θεωρητικά και πρακτικά με πειράματα σε δοκίμια γύψου και τσιμεντοκονιάματος με οπή στο κέντρο που υπόκεινται σε μονοαξονική θλίψη. Η ρωγμάτωση του υλικού που καταπονείται μονοαξονικά (ή τριαξονικά) έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές στο παρελθόν (π.χ. B.J.Carter, E. Z. Lajtai) οι οποίοι έχουν καταλήξει στο ότι η έναρξη των ρωγμών προκαλείται από συγκεντρώσεις τάσεων. Κατά τη διαδικασία της ρωγμάτωσης ενός υλικού, ακολουθείται μια αλληλουχία μικροθραύσεων και η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού και της κατάταξής τους σε μείζονος ή ήσσονος σημασίας στην αστοχία του υλικού. Παράλληλα με τις παραπάνω δοκιμές, γίνεται δοκιμή προσδιορισμού της παραμόρφωσης του υλικού μέσω συσχέτισης ψηφιακών εικόνων. Η μέτρηση και η ανάλυση της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων στα διάφορα υλικά είναι πολύ σημαντική σε έργα μηχανικού, ειδικότερα δε σε προβλήματα συγκέντρωσης των τάσεων. Η ψηφιακή συσχέτιση εικόνων είναι μια οπτική μέθοδος που χρησιμοποιεί την παρακολούθηση και καταγραφή της εικόνας για ακριβείς δισδιάστατες και τρισδιάστατες μετρήσεις σε αλλαγές που συμβαίνουν στην εικόνα. Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να εξακριβωθεί αν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων σε ψαθυρά υλικά χωρίς εξειδικευμένο εξοπλισμό και χωρίς εμπορικό λογισμικό.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

*Η Διπλωματική αυτή εργασία μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα εξαιρετικού ενδιαφέροντος για έναν Πολιτικό Μηχανικό και να εφαρμόσω στην πράξη τις γνώσεις μου τόσο από τη φοίτησή μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. όσο και από την παρακολούθηση του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών.*

*Θεωρώ υποχρέωσή μου να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους ανθρώπους η συμβολή των οποίων ήταν καθοριστική για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.*

*Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Νομικό Παύλο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών που δέχτηκε την εποπτεία της διαθέτοντας το χρόνο του, καθώς και για την πολύτιμη συμβολή, καθοδήγηση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια πραγματοποίησής της.*

*Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παπαντωνόπουλο Γιώργο Δρ. Μηχανικό Μεταλλείων για την πολύτιμη βοήθεια του στη χρήση του εξοπλισμού του εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων καθώς και την παράθεση στοιχείων, οδηγιών και επιστημονικών γνώσεων.*

*Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Σακκά Κωνσταντίνο Διπλ.Μηχανικό Μεταλλείων, για τη συμπαράσταση, την διάθεση των γνώσεών του και την προμήθεια εργαστηριακού υλικού.*

*Η υποδειγματική συνεργασία των παραπάνω ατόμων και η διάθεσή τους να μοιραστούν μαζί μου τις γνώσεις και το χρόνο τους, ήταν καθοριστική στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.*

*Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Μάρρα Ηλία Μηχανικό Ορυκτών Πόρων MSc. και Γιατζίδη Γιώργο Μηχανικό Μεταλλείων MSc., για την βοήθειά τους στις εργαστηριακές δοκιμές και την παράθεση των απόψεών τους σε καίρια ζητήματα της εργασίας.*

*Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την υποστήριξη και ενθάρρυνση καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.*

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>1</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ</b> .....	<b>7</b>
1.1.Γενικά στοιχεία θεωρίας .....	7
1.2.Η θεωρία του Griffith για την ψαθυρή θραύση .....	12
1.3.Μικρομηχανική της ψαθυρής θραύσης.....	13
1.3.1.Η σχέση της έναρξης, επέκτασης και συνένωσης ρωγμών με τη στάθμη φόρτισης .....	13
1.3.2.Προσομοιώματα μικρομηχανικής για την έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών .....	14
1.4.Ανακατανομή τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλικά ανοίγματα .....	18
1.5.Το πρόβλημα της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικά ανοίγματα.....	20
1.6.Η ερμηνεία του φαινομένου από ερευνητές .....	21
1.6.1.Γενικά .....	21
1.6.2.Η ερμηνεία του Carter .....	21
1.6.3.Η ερμηνεία του Lajtai.....	26
1.6.3.Η προσέγγιση των P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers.....	29
1.7.Η επίδραση της πλευρικής πίεσης .....	32
1.8.Τα φαινόμενα κλίμακας και σχέση τους με την τάση ρωγμάτωσης.....	33
1.9.Παράγοντες διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων .....	36
1.10.Το πεδίο των τάσεων και η ενέργεια παραμόρφωσης .....	37
1.11.Η παρατήρηση της ρωγμάτωσης μέσω μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) .....	38

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ** .....

2.1.Τα μηχανικά κύματα .....	41
2.2.Ακουστική εκπομπή .....	43
2.2.1.Ορισμός.....	43
2.2.2.Βασικές αρχές διάδοσης των ελαστικών κυμάτων .....	44
2.2.3.Ιστορική αναδρομή στις μελέτες Ακουστικής Εκπομπής.....	45
2.2.4.Η Λειτουργία της Ακουστικής Εκπομπής.....	50

2.2.5.Παράμετροι γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής .....	52
2.2.6. Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ .....	55
2.2.7.Εργαστηριακή και επι τόπου παρακολούθηση της ΑΕ.....	58
2.2.8.Παράγοντες επιρροής στασιμάτα της ΑΕ.....	60
2.2.9.Εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ.....	60
2.3.Ακουστική εκπομπή σε πετρώματα .....	64
2.3.1.Εργαστηριακά δοκίμια πετρωμάτων.....	64
2.3.2.Πειράματα Insitu.....	69
2.3.2.1.Γενικά .....	69
2.3.2.2.Φαινόμενο Kaiserκαι Φαινόμενο Felicity.....	71
2.3.2.3. Εφαρμογές ΑΕ στο Πεδίο.....	72

---

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΗΓΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΣΩ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ (DIC).....</b>	<b>77</b>
3.1.Εισαγωγή.....	77
3.2. Ψηφιακή συσχέτιση εικόνων (DIC).....	78
3.3.Εφαρμογή .....	82
3.3.1.Η διαδικασία.....	82
3.3.2.Το μοτίβο (pattern) .....	84
3.3.3.Εστιακή Απόσταση και Απόσταση μεταξύ Κάμερας-δοκιμίου.....	86
3.3.4.Ο φωτισμός.....	87
3.3.5.Ο έλεγχος του αλγορίθμου.....	88
3.3.6.Εικόνες μορφής RAW .....	88
3.3.7.Χαρτογράφηση της παραμόρφωσης.....	89
3.3.8.Η εφαρμογή του αλγορίθμου στο MATLAB .....	90

---

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....</b>	<b>91</b>
4.1.Εξοπλισμός δοκιμών.....	91
4.1.1.Μηχανή φόρτισης.....	91
4.1.2.Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής.....	92
4.1.3.Αισθητήρες και προενισχυτές .....	92
4.1.4.Συσκευή υπερήχων.....	94



4.1.5.Λογισμικά.....	95
4.2.Χρησιμοποιούμενα υλικά και χαρακτηρισμός τους .....	97
4.2.1.Γύψος.....	97
4.2.2.Έγχυτο τσιμεντοειδές κονίαμα .....	9
4.2.3.Φωτογραφίες από την προετοιμασία και τις δοκιμές .....	102
4.3.Προκαταρκτικές μετρήσεις ακουστικής εκπομπής.....	108
4.3.1.Επιλογή αισθητήρων και μέσου σύζευξης με το δοκίμιο .....	108
4.3.2 Μετρήσεις ταχύτητας διάδοσης και εξασθένισης σήματος ΑΕ σε δοκίμια γύψου και τσιμεντοκονιάματος .....	108
4.3.3 Εντοπισμός της θέσης της πηγής.....	114
4.3.4.Πείραμα εξακρίβωσης του φαινομένου Kaiser σε δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος.....	115
4.4.Συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στην στέψη της κυκλικής οπής.....	118
4.5.Προεργασία για τη δοκιμή μέτρησης παραμόρφωσης μέσω συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC).....	120

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....121**

5.1.Πειράματα σε γύψινα δοκίμια.....	121
5.2.Πειράματα σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος .....	171
5.3.Πειράματα ψηφιακής συσχέτισης εικόνων (Digital Image Correlation - DIC).....	203

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... 219**

6.1.Το υλικό.....	219
6.2.Πειράματα θλίψης σε δοκίμια γύψου με οπή .....	219
6.3.Πειράματα θλίψης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με οπή .....	223
6.4.Συμπεράσματα της μεθόδου DIC .....	226
6.5.Γενικές παρατηρήσεις.....	227

## **ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ.....230**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....231**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 με θέμα «**Θραύση φυσικών μοντέλων ψαθυρών υλικών με οπή υπό μονοαξονική θλίψη**».

Στην εργασία αυτή, εξετάζεται ο τρόπος θραύσης φυσικών μοντέλων που διαθέτουν κυκλική οπή στο κέντρο και υπόκεινται σε μονοαξονική θλίψη παράλληλα με τη χρήση ακουστικής εκπομπής και μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges). Με τον τρόπο αυτό, γίνεται κατανοητή η αστοχία γύρω από υπόγεια κυκλικά ανοίγματα των ψαθυρών βραχών κάτω από θλιπτικό φορτίο. Παράλληλα, φωτογραφίζοντας το δοκίμιο ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη φόρτισή του, θα δοκιμαστεί ο υπολογισμός της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό μέσω συσχέτισης των ψηφιακών εικόνων και θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα των μετρητών παραμόρφωσης.

Το **πρώτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα θεωρητικά στοιχεία γύρω από τη θραύση, καθώς μελέτες από προηγούμενους ερευνητές. Η αστοχία των πετρωμάτων χαρακτηρίζεται από πολλά διακριτά στάδια παραμόρφωσης που περιλαμβάνουν έναρξη, διάδοση και συνένωση ρωγμών. Στο παρελθόν έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες θεωρητικές, πρακτικές και αριθμητικές για την διαδικασία θραύσης στα πετρώματα.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από την μέθοδο της ακουστικής εκπομπής. Η εκπομπή των υπερήχων από τα πετρώματα όταν αυτά βρίσκονται υπό δυναμική καταπόνηση, έχει διερευνηθεί αρκετά στο παρελθόν για την μελέτη θεμελιωδών μηχανισμών της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων και την πρόβλεψη της θραύσης. Η ακουστική εκπομπή βοηθάει στην επισήμανση μείζονος ή ήσσονος σημασίας γεγονότων καθόλη τη διάρκεια της φόρτισης, η ερμηνεία των οποίων βοηθούν στην αξιολόγηση της θραύσης.

Στο  **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται η μέθοδος συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (Digital Image Correlation) με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων, που θα γίνει σε δεύτερη φάση. Η μέθοδος αυτή, είναι ευρέως γνωστή και έχει αναπτυχθεί περισσότερο τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη των υπολογιστικών προγραμμάτων και των ψηφιακών μηχανών. Αυτό που ουσιαστικά γίνεται είναι η λήψη φωτογραφιών με ψηφιακή μηχανή DSLR του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισής του, αφού πρώτα έχει τοποθετηθεί πάνω σε αυτό ένα διακριτό μοτίβο, και η συσχέτιση των εικόνων αυτών με μια εικόνα αναφοράς πριν την έναρξη της δοκιμής. Στην παρούσα εργασία, για τη συσχέτιση των ψηφιακών εικόνων χρησιμοποιήθηκε

αλγόριθμος κωδικοποιημένος στο πρόγραμμα MATLAB που διατίθεται ελεύθερα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι η μέθοδος αυτή απευθύνεται κυρίως σε όλκιμα υλικά που επιδέχονται μεγάλες παραμορφώσεις. Σε πιο ψαθυρά υλικά, όπως αυτά που θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία, η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζει δυσκολίες εξαιτίας των μικρών παραμορφώσεων που επιδέχονται αυτά μέχρι την αστοχία τους.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και η προετοιμασία των δοκιμών. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχ. Μεταλλείω-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. Πριν την έναρξη των δοκιμών, πρέπει να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά των υλικών όπως η αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, κλπ. Επίσης περιγράφεται η προεργασία της δοκιμής ακουστικής εκπομπής όπως οι δοκιμές εξασθένισης, η επιλογή του μέσου σύζευξης των αισθητήρων με το δοκίμιο.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφονται τα πειράματα και τα αποτελέσματα από κάθε δοκίμιο αναλυτικά με φωτογραφίες και τα κατάλληλα διαγράμματα και σχήματα.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τα πειράματα.

## ABSTRACT

---

This thesis is conducted under the Interdepartmental Postgraduate Program "Design and Construction of Underground Projects" of the National Technical University of Athens. The primary purpose of this study is to examine experimentally and theoretically the fracture initiation and evolution from the tensile and compressive stress concentration at the periphery of circular voids subjected to compressive loading. The major and minor fracture occurrences are being monitored by acoustic emission technique in combination with the use of strain gauges until failure. The fracture process and evaluation of the general condition of the material at each moment of compression, are enlightened by information of the population of the AE signals, as well as specific indices. In addition to the above experiments, the specimens will be sprayed with a pattern in order to calculate in-plane displacement and strain data at points on the surface of the loaded specimen by using Digital Image Correlation technique provided by a freely available Matlab code.

---



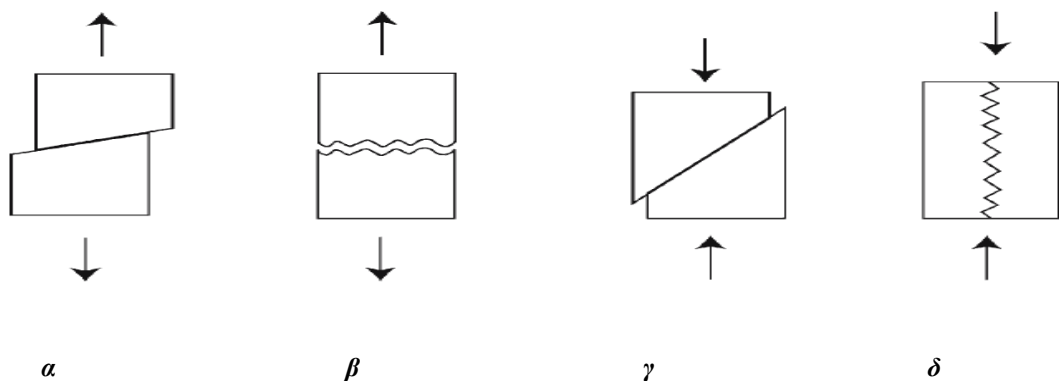
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΡΩΓΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

### 1.1.Γενικά στοιχεία θεωρίας

**Θραύση** (fracture) ονομάζεται ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα μέρη, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η θραύση μπορεί να διακριθεί σε δύο στάδια: την πυρήνωση-έναρξη (initiation) και την προώθηση (propagation) [<http://www.mie.uth.gr>]. Η **ψαθυρή** (brittle) και η **όλκιμη** (ductile) θραύση είναι οι δύο όροι που περιγράφουν τα δύο αντίθετα άκρα του φάσματος της θραύσης. Η ψαθυρή θραύση είναι μια γρήγορη προώθηση των ρωγμών μέσα σε ένα υλικό που βρίσκεται υπό ένταση. Οι ρωγμές αυτές προωθούνται τόσο γρήγορα που καθιστούν αδύνατη την πρόβλεψη της θραύσης. Τα ψαθυρά υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα. Τα κεραμικά υλικά, το γυαλί, η γύψος κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία [<http://www.m3.tuc.gr>]. Ωστόσο, σε μικροσκοπική κλίμακα μπορεί να παρατηρηθεί μερική τοπική πλαστική παραμόρφωση. Σύμφωνα με τον Patterson (2005) διακρίνονται δύο βασικοί τύποι ψαθυρής θραύσης:

1. **Διατμητική ψαθυρή θραύση**, στην οποία η σχετική μετατόπιση είναι παράλληλη στην επιφάνεια της θραύσης η οποία επιφάνεια έχει κλίση μικρότερη των  $45^\circ$  στην μέγιστη θλιπτική τάση
2. **Εφελκυστική ψαθυρή θραύση**, η οποία χαρακτηρίζεται από διαχωρισμό παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης η οποία γενικά είναι παράλληλη στην μικρότερη κύρια τάση (θετική θεωρείται η θλίψη).



Διατμητική θραύση σε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού

Εφελκυστική ψαθυρή θραύση σε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού

Διατμητική θραύση σε δοκιμή σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Εφελκυστική ψαθυρή θραύση σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

**Εικόνα 1**

(Πηγή: Paterson M.S, Wong T, "Experimental Rock Deformation-The Brittle Field", 2005)

Η κύρια μορφή μακροσκοπικής ψαθυρής αστοχίας στην τριαξονική θλίψη, εκτός από τις δοκιμές με χαμηλή πλευρική πίεση, αλλά και στον τριαξονικό εφελκυσμό σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης, είναι η **διατμητική ψαθυρή θραύση**. Γενικά, η θραύση και στις δύο περιπτώσεις συμβαίνει σε μια διακριτή γωνία ως προς τη μέγιστη κύρια θλιπτική τάση, συνήθως 20-30°. Ωστόσο, με αύξηση της πλευρικής πίεσης η παραπάνω γωνία τείνει να αυξάνεται ελαφρά. Επίσης, σε όλες τις δοκιμές εφελκυσμού, έχει δειχθεί ότι υπάρχει μια σταδιακή αλλαγή στον προσανατολισμό της επιφάνειας αστοχίας κατά την μετάβαση από εφελκυστική σε διατμητική θραύση με αυξανόμενη πλευρική πίεση. Με αυξανόμενη πλευρική πίεση, η συμπεριφορά του υλικού τείνει να μεταβαίνει από ψαθυρή σε όλκιμη και η διατμητική αστοχία τείνει να γίνεται μια ζώνη έντονης παραμόρφωσης και μικροθραύσης παρά μια διακριτή επιφάνεια διάτμησης.

Η **εφελκυστική ψαθυρή θραύση** συμβαίνει συνήθως στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού με τη μορφή αποκόλλησης του δοκιμίου κάθετα προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης. Ωστόσο, εφελκυστική θραύση μπορεί να συμβεί και σε θλιπτικό εντατικό πεδίο, ή και σε τριαξονικές δοκιμές εφελκυσμού όταν όλες οι μακροσκοπικές κύριες τάσεις είναι θλιπτικές (π.χ. Handin 1953). Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τελευταίας περίπτωσης είναι η δοκιμή Brazilian στην οποία το δοκίμιο μορφής δίσκου θλίβεται μονοαξονικά αλλά αστοχεί σε εφελκυσμό. Σε δοκιμές θλίψης σε ατμοσφαιρική πίεση ή κοντά σε αυτήν, συμβαίνουν συχνά εφελκυστικές ρωγμές με τη μορφή σχισμού παράλληλα στον άξονα της θλίψης. Το γεγονός ότι η εφελκυστική ψαθυρή θραύση συμβαίνει με την απουσία μακροσκοπικής εφελκυστικής τάσης, αποτελεί ζήτημα προς συζήτηση. Μια άποψη είναι ότι η θραύση συμβαίνει όταν ξεπεραστεί μια συγκεκριμένη κρίσιμη εφελκυστική τροπή (κριτήριο μέγιστης εφελκυστικής τροπής, π.χ. Bridgman 1938). Ωστόσο αυτή η άποψη δεν δίνει ικανοποιητική εξήγηση του φαινομένου. Πιο πιθανή εξήγηση κατά τον Peterson (2005), είναι ότι οι θραύσεις προέρχονται από τοπικές εφελκυστικές τάσεις γύρω από ατέλειες ή ασυνέχειες του υλικού σε μικροσκοπική κλίμακα που σχετίζονται με την αξονική κατάκλαση [**Peterson 2005**]. Η διαδικασία δημιουργίας των εφελκυστικών ρωγμών από τα φυσικά ελαττώματα του υλικού περιγράφεται στην παράγραφο 1.3.

Η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας, με την αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία εγχοπών ή άλλων ασυνεχειών στο υλικό. Η ψαθυρή θραύση, είναι η χειρότερη θραύση γιατί δε μπορεί να γίνει επιδιόρθωση της βλάβης πριν την αστοχία γι αυτό και ο σχεδιασμός των κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της [<http://www.mie.uth.gr>].

#### **Μερικά χαρακτηριστικά της ψαθυρής θραύσης:**

- Δεν υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση του υλικού,
- Η επιφάνεια τείνει να είναι κάθετη στην κύρια εφελκυστική τάση,

- Χαρακτηριστικάστίγματα των πρώτων ρωγμών συχνά δείχνουν το σημείο όπου ξεκίνησε η θραύση,
- Η διαδρομή που ακολουθεί η ρωγμή εξαρτάται από τη δομή του υλικού [**Hochgraf 2004**]).

Αντίθετα με την ψαθυρή, η όλκιμη θραύση συμβαίνει αργά, και χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρωγμών, οι οποίες τελικά επιφέρουν τη θραύση. Η δυσθραυστότητα των όλκιμων υλικών είναι υψηλή και απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την κρούση. Επιπροσθέτως, στη όλκιμη θραύση, η ελάττωση της διατομής στην περιοχή θραύσεως είναι σημαντική λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται, ενώ αντιθέτως, στην ψαθυρή θραύση, η ελάττωση της διατομής είναι από μηδενική έως αμελητέα.

#### **Μερικά χαρακτηριστικά όλκιμης θραύσης:**

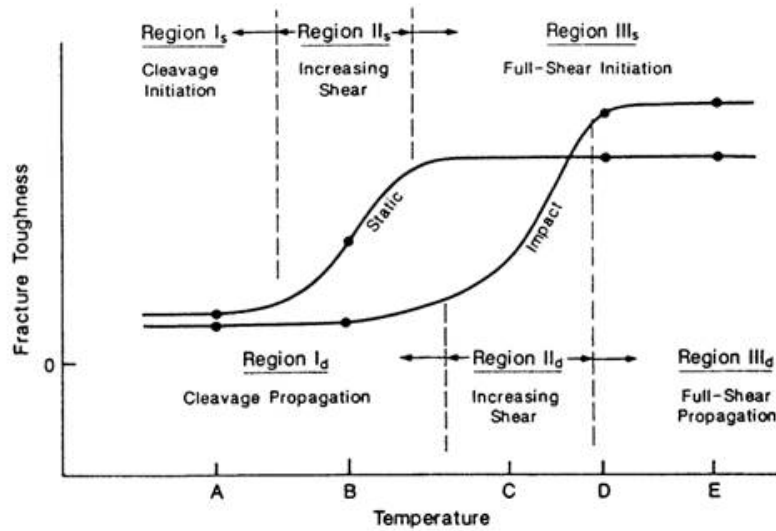
- Υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση στο άκρο της προωθούμενης ρωγμής
- Όπως και με την ψαθυρή θραύση, η επιφάνεια της όλκιμης θραύσης τείνει να είναι κάθετη προς την κύρια εφελκυστική τάση,
- Στην όλκιμη θραύση, σε κρυσταλλικά μέταλλα και κεραμικά μικροσκοπικά έχει δειχθεί ότι διάτμηση είναι αυτή που επεκτείνει την ρωγμή,
- Η επιφάνεια θραύσης είναι θαμπή και ινώδης,
- Πρέπει να υπάρχει μεγάλη διαθέσιμη ενέργεια για την επέκταση της ρωγμής [**Hochgraf 2004**].

Τα ελαττώματα του υλικού είναι η αιτία της πρόωρης αστοχίας των υλικών κυρίως των ψαθυρών. Η ύπαρξη ατελειών στο υλικό, όπως φυσικές ασυνέχειες (ρήγματα, στρώση, διακλάσεις, κλπ) ή και τεχνητές όπως μια εγκοπή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιόμορφης κατανομής των τάσεων κοντά στην περιοχή τους. Οι τάσεις στην περιοχή των ελαττωμάτων έχουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές μακριά τους, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια συγκέντρωση τάσεων γύρω τους. Εάν δεν υπήρχε η ασυνέχεια, η εφαρμοζόμενη τάση στο υλικό θα ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη στην επιφάνεια της διατομής του.

Η θεωρία της θραυστομηχανικής των υλικών έχει βασιστεί σε προτάσεις του Griffith ο οποίος μελετούσε τη θραύση ινών γυαλιού. Μετά από πειράματα, ο Griffith διατύπωσε την ιδέα ότι η αντοχή θραύσης των ψαθυρών υλικών, είναι μικρότερη από τη θεωρητική αντοχή θραύσης τους, λόγω ανομοιογένειάς τους. Ένα ψαθυρό υλικό περιέχει ατέλειες στη δομή του, οι οποίες είναι μεγάλες συγκριτικά με τις ατομικές και μοριακές αποστάσεις, και δημιουργούν τοπικές διαταραχές στις γραμμές της εφαρμοζόμενης τάσης. Με την προσομοίωση του σχήματος της ρωγμής με έλλειψη, έδωσε τη δυνατότητα μαθηματικής επεξεργασίας του πειραματικά επιβεβαιωμένου φαινομένου της συγκέντρωσης των τάσεων, λόγω μονοαξονικού εφελκυσμού [**Σοφιανός & Νομικός 2008**]. Ο Griffith ανέλυσε τις τάσεις με βάση τη θεωρία του Inglis (1913) και διατύπωσε τη βασική αρχή σύμφωνα με την οποία τα



στερεά σώματα (και τα ρευστά) κατέχουν επιφανειακή ενέργεια και για να διαδοθεί μια ρωγμή, η αντίστοιχη επιφανειακή ενέργεια πρέπει να αποδοθεί από την εξωτερικά προσδιδόμενη ενέργεια ή από την εκροή της επιφανειακής ενέργειας του στερεού σώματος [Αντωνογιαννάκη 2004].




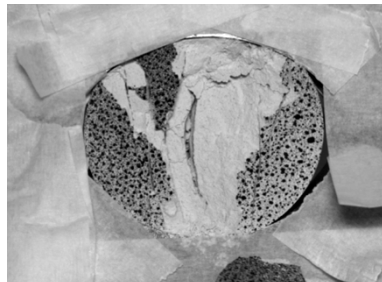
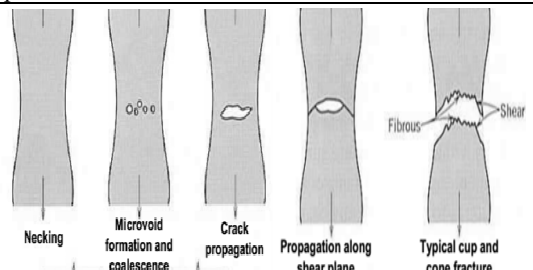


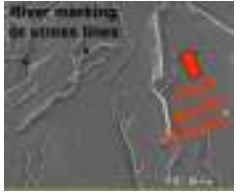
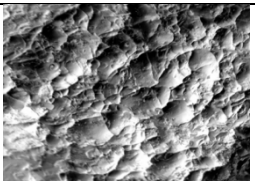


**Διάγραμμα 1**

Οι δυο μορφές θραύσης σε μακροσκοπικό (μικροσκοπικό) επίπεδο παρατήρησης  
(Πηγή: <http://www.metapass.com/>)

Στον Πίνακα που ακολουθεί, φαίνεται συνοπτικά η αναγνώριση του τύπου θραύσης.

Πίνακας 1

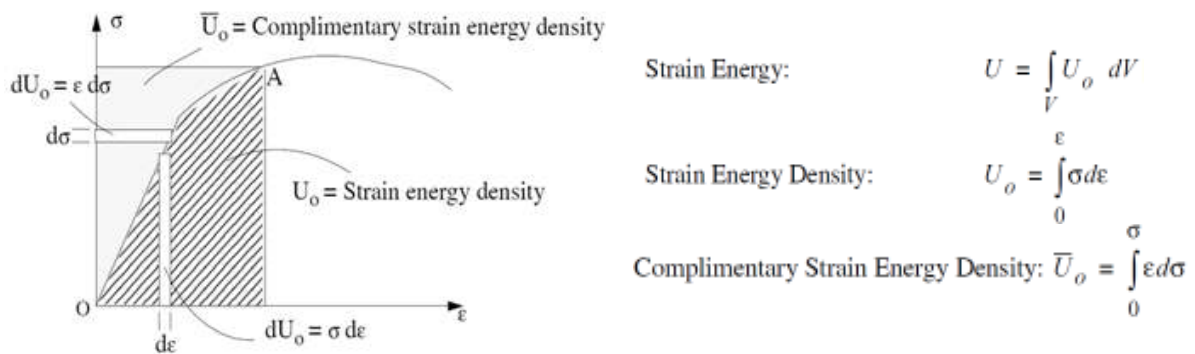
	Ψαθυρή θραύση	Όλκιμη θραύση	
<b>Η γενική μορφή</b>   <i>Ψαθυρή θραύση ψυχρών μετάλλων, κεραμικών υλικών</i>	<i>Πηγή: <a href="http://www.intechopen.com/">http://www.intechopen.com/</a></i>	 <i>Πολύ όλκιμο</i>	 <i>Μέτρια όλκιμο</i>
		<b>Η εξέλιξη</b>   <i>Η θραύση γίνεται απότομα χωρίς προειδοποίηση μέσω επέκτασης ασυνεχειών του υλικού ή/και δημιουργίας νέων</i>	 <i>Η ύπαρξη δευτερογενών φάσεων ή εγκλεισμάτων λειτουργεί καταλυτικά στη δημιουργία μικροκενών από τα οποία ξεκινά η θραύση</i>
<b>Η επιφάνεια</b>   <i>Ψαθυρή θραύση που φαίνεται η προέλευση και η διαδρομή της ρωγμής</i>	<i>Πηγή: <a href="http://www.sv.vt.edu/">http://www.sv.vt.edu/</a></i>	 <i>Τραχείες και ακανόνιστες επιφάνειες θραύσης. Οι δύο επιφάνειες θραύσης είναι σαν κύπελο και κώνος</i>	<i>Πηγή: <a href="http://pwatlas.mt.umist.ac.uk">http://pwatlas.mt.umist.ac.uk</a></i>
		<b>Η αναγνώριση</b>   <i>Οι γραμμές τάσης βρίσκονται μεταξύ των ρωγμών σε παράλληλα επίπεδα και πάντα συγκλίνουν προς την κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής. Αυτές οι γραμμές είναι χαρακτηριστικό ψαθυρής θραύσης όπως και οι πιο λείες επιφάνειες.</i>	 <i>Η επιφάνεια έχει κοίλες εσοχές που προκύπτουν από τα κενά που δημιουργούνται από τις όλκιμες πτυχώσεις λόγω ένασης των μικροσκοπικών κενών. Οι τραχείες άκρες των πτυχώσεων είναι εκεί που το τελευταίο κομμάτι που έμεινε να αστοχήσει, τραβήχτηκε προς τα πάνω μέχρι να αστοχήσει.</i>
	<i>Πηγή: <a href="http://www.sut.ac.th/">http://www.sut.ac.th/</a></i>	<i>Πηγή: <a href="http://oregonstate.edu/">http://oregonstate.edu/</a></i>	

## 1.2. Η θεωρία του Griffith για την ψαθυρή θραύση

Για την ερμηνεία και την ποσοτικοποίηση των φαινομένων κατά τη θραύση των πετρωμάτων, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες θεωρίες από τις οποίες αυτή που ξεχωρίζει είναι η θεωρία Griffith ή θεωρία του έργου θραύσης. Ο Griffith το 1920 σε πειράματα σε γυαλί, προσπάθησε να εξηγήσει τη διαφορά ανάμεσα στην θεωρητική και στην πειραματικά παρατηρούμενη αντοχή των υλικών σε θραύση. Σύμφωνα με την θεωρία που ανέπτυξε, κάθε ψαθυρό υλικό περιέχει ένα πλήθος λεπτών ατελειών ή μικρορωγμών, το σχήμα των οποίων προσομοίωσε με έλλειψη και στις οποίες αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις κατά διεύθυνση κάθετη προς το διαμήκη άξονα των ρωγμών αυτών. Επίσης, στις περιοχές των μικρορωγμών, δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις κοντά σε αυτές να ξεπερνούν την θεωρητική αντοχή του υλικού σε θραύση, ενώ μακριά από αυτές οι τάσεις μπορεί να έχουν χαμηλότερες τιμές. Όταν οποιαδήποτε από τις μικρορωγμές προωθείται μέσα στο υλικό, τότε δημιουργούνται δύο νέες ελεύθερες επιφάνειες.

Κάθε ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ένα ποσό ενέργειας που καλείται **επιφανειακή ενέργεια** (surface energy), η φυσική προέλευση της οποίας οφείλεται στο γεγονός ότι τα άτομα στις ελεύθερες επιφάνειες έχουν σπασμένους χημικούς δεσμούς και είναι πιο ευκίνητα απ' ό,τι τα άτομα στο εσωτερικό του υλικού. Συνεπώς, με την προώθηση και τη συνεπαγόμενη αύξηση της ελεύθερης επιφανείας της μικρορωγμής, η συνολική ενέργεια του συστήματος αυξάνεται όσο η επιφανειακή ενέργεια των νέων αυτών ελεύθερων επιφανειών. Κάθε φυσικό σύστημα τείνει αυθόρμητα προς καταστάσεις όπου ελαχιστοποιείται η συνολική του ενέργεια. Έτσι λοιπόν θα αναμέναμε το υλικό μας να μην βοηθάει στην προώθηση των μικρορωγμών.

Το σπάσιμο των χημικών δεσμών που γίνεται κατά την προώθηση της μικρορωγμής, προκαλεί μείωση της **ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης** (elastic strain energy) του υλικού [<http://www.mie.uth.gr>]. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σώμα λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται από την φόρτιση, ονομάζεται ενέργεια παραμόρφωσης. Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου ονομάζεται πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης και είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2 που ακολουθεί [V. Madhukar]. Είναι προφανές ότι όταν δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία, η ενέργεια αυτή μηδενίζεται. Κατά τον διαχωρισμό του υλικού που προκαλείται από τις μικρορωγμές, τα τμήματα που δημιουργούνται παύουν να καταπονούνται με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης που βρισκόταν αποθηκευμένη εκεί.



**Διάγραμμα 2**  
 Η ενέργεια παραμόρφωσης και η πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης  
 (Πηγή: <http://www.mtu.edu/mechanical>)

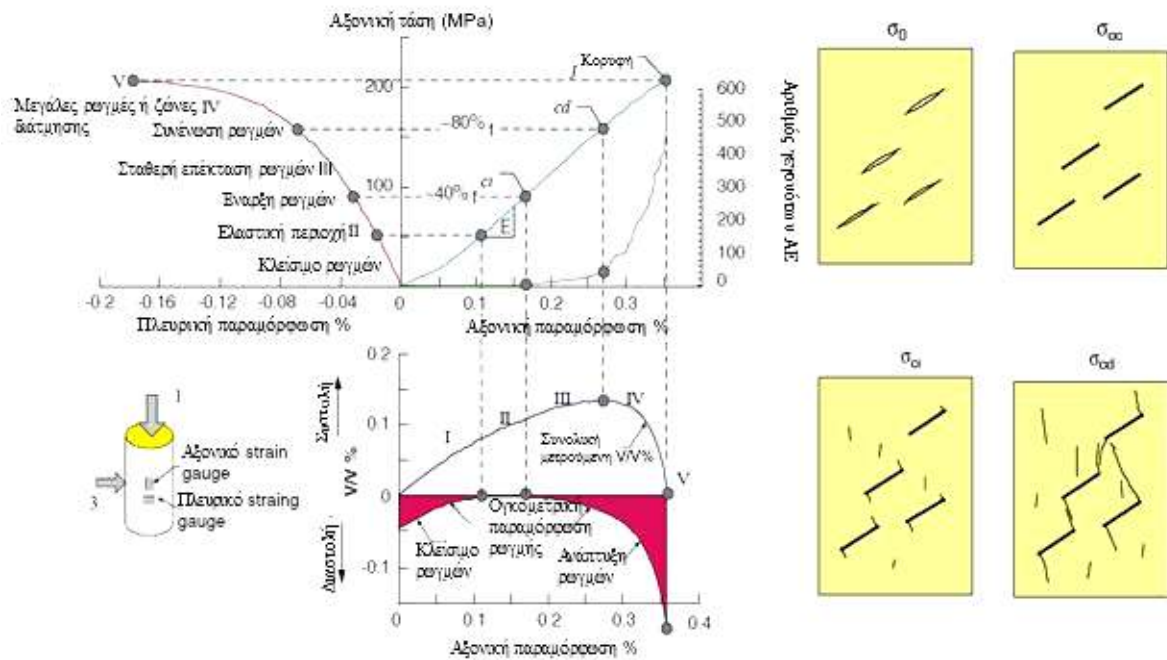
### 1.3.Μικρομηχανική της ψαθυρής θραύσης

#### 1.3.1.Η σχέση της έναρξης, επέκτασης και συνένωσης ρωγμών με τη στάθμη φόρτισης

Η αστοχία του πετρώματος, χαρακτηρίζεται από διάφορα διακριτά στάδια παραμόρφωσης που περιλαμβάνουν έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών και είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τα επίπεδα φόρτισης που σχετίζονται με το κάθε στάδιο για το σχεδιασμό και την πράξη έργων μηχανικού. Οι **Cai et al. (2004)** πρότειναν όρια έναρξης ρωγμάτωσης και όρια αστοχίας των πετρωμάτων. Το όριο έναρξης της ρωγμάτωσης ορίζεται από τη σχέση  $\sigma_1 - \sigma_3 = \mathbf{A} * \sigma_{cm}$  ενώ το όριο θραύσης ορίζεται ως  $\sigma_1 - \sigma_3 = \mathbf{B} * \sigma_{cm}$  για ρωγματωμένες βραχώμαζες, όπου A, B είναι σταθερές του υλικού και  $\sigma_{cm}$  η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχώμαζας. Μετά από πειράματα κατέληξαν στο ότι οι μεταβλητές A, B κυμαίνονται μεταξύ 0,4-0,5 και 0,8-0,9 αντίστοιχα για μέτρια έως καθόλου ρωγματωμένες βραχώμαζες, ενώ για μέτρια έως πολύ ρωγματωμένες βραχώμαζες κυμαίνονται μεταξύ 0,5-0,6 και 0,9-1,0 αντίστοιχα.

Οι βράχοι έχουν αναπόφευκτα πόρους, ελαττώματα και μικρορωγμές. Για παράδειγμα, ασθενώς συνδεδεμένοι κόκκοι μπορεί να θεωρηθούν σαν θέσεις έναρξης μιας μικρορωγμής. Η μικρορωγμή αυτή θα επεκταθεί όταν το πέτρωμα φορτισθεί πέρα από κάποιο όριο. Από πειράματα έχουν βρεθεί αρκετά επίπεδα φόρτισης τα οποία βοηθούν στην κατανόηση της αστοχίας των ψαθυρών βραχών. Στο διάγραμμα 3 που ακολουθεί, φαίνονται τα επίπεδα αυτά της τάσης, όπου  $\sigma_{cc}$  (cc-crack closure) είναι η τάση κλεισίματος των ρωγμών,  $\sigma_{ci}$  (ci- crackinitiation) είναι η τάση έναρξης των ρωγμών και  $\sigma_{cd}$  (cd-crack damage) είναι η τάση ζημίας η οποία αντιστοιχεί στην μακροπρόθεσμη αντοχή του πετρώματος. Η ακουστική εκπομπή ξεκινάει στο επίπεδο τάσης  $\sigma_{ci}$  και αυξάνεται απότομα στο επίπεδο  $\sigma_{cd}$  όπου καταγράφονται και τα περισσότερα σήματα AE. Τα χαρακτηριστικά στάδια ως την αστοχία είναι 4:

1. Έναρξη ρωγμών και γεγονότων AE σε επίπεδο 0,3-0,5 της  $\sigma_{cd}$
2. Σχηματισμός και επέκταση μικρορωγμών σε διεύθυνση παράλληλη της μέγιστης θλιπτικής τάσης
3. Έναρξη της συνένωσης σε επίπεδα φορτίου 0,7-0,8 του φορτίου αντοχής
4. Μεγάλες ρωγμές ή ζώνες διάτμησης ακλουθούν μετά την μέγιστη αντοχή (Cai et al.2004).



**Διάγραμμα 3**

Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης που δείχνει τα στάδια εξέλιξης των ρωγμών (Martinet al.) και σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών επιπέδων τάσης έναρξης, επέκτασης και συνένωσης των ρωγμών  
(Πηγή: Cai et al.2004)

### 1.3.2. Προσομοιώματα μικρομηχανικής για την έναρξη, επέκταση και συνένωση ρωγμών

Τα προσομοιώματα μικρομηχανικής της ψαθυρής αστοχίας ενός πετρώματος ερευνούν την τοπική έναρξη, επέκταση, πολλαπλασιασμό και αλληλεπίδραση των μικρορωγμών μεταξύ τους με την αύξηση της φόρτισης. Θεωρητικά, η έναρξη της μικρορωγμάτωσης στα συμπαγή πολυκρυσταλλικά πετρώματα συμβαίνει σε προϋπάρχουσες μικρορωγμές (π.χ. όρια των κόκκων).

Το πιο γνωστό μικρομηχανικό μοντέλο για την έναρξη της μικρορωγμάτωσης είναι αυτό της «ολισθαίνουσας ρωγμής» (sliding crack model) σύμφωνα με το οποίο, μία μικρορωγμή μήκους  $2c$  σχηματίζει γωνία  $\gamma$  με τη μέγιστη θλιπτική τάση  $\sigma_1$ . Η ρωγμή κλείνει υπό την επίδραση των θλιπτικών φορτίων και ολισθαίνει υπό την

επίδραση των διατμητικών τάσεων στο επίπεδο της. Στα άκρα της ρωγμής συγκεντρώνονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις που κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις προκαλούν την έναρξη πλάγιων ρωγμών [Σοφιανός& Νομικός 2008]. Σχηματικά παρουσιάζεται στην εικόνα 2.

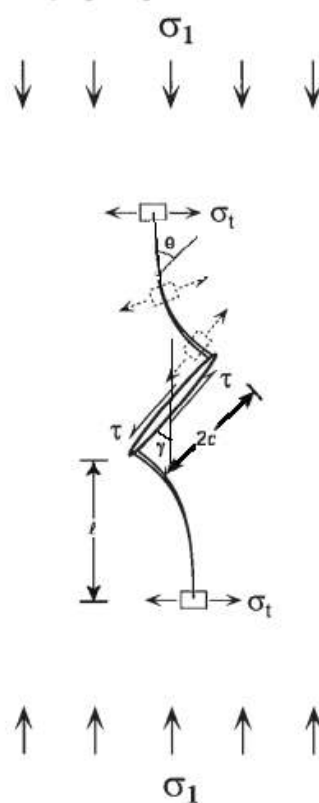
Σύμφωνα με τη θεωρία των **Cottrell και Rice (1980)** οι πλάγιες ρωγμές ξεκινάνε σχηματίζοντας γωνία  $\theta=70.5^\circ$  με την προϋπάρχουσα ρωγμή και δημιουργούνται όταν οι τάσεις  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  ικανοποιούν τη σχέση:

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

Όπου

$K_{IC}$  η δυσθραυστότητα (fracture toughness) η οποία μπορεί να μετρηθεί πειραματικά (ISRM 1998), έχει μονάδες  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  και εκφράζει την ικανότητα του πετρώματος που περιέχει μια ρωγμή να αντιστέκεται στην θραύση

$\mu$  ο συντελεστής τριβής της προϋπάρχουσας ρωγμής  
 $\gamma, \theta$  οι γωνίες που φαίνονται στην εικόνα 1.1



**Εικόνα 2**

*Έναρξη και διάδοση πλευρικών μικρορωγμών στα άκρα μίας προϋπάρχουσας ολισθαίνουσας μικρορωγμής (Πηγή: E. Eberhardt et.al 1998)*

Κατά την αύξηση της φόρτισης, το μήκος  $l$  των πλευρικών ρωγμών αυξάνει ενώ η γωνία  $\theta$  τείνει να γίνει ίση με την γωνία  $\gamma$ , δηλαδή οι πλευρικές ρωγμές τείνουν να

γίνουν παράλληλες με τη  $\sigma_1$ . Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης  $K_I$  στα άκρα των πλευρικών ρωγμών μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση των **Horii και Nemat-Nasser (1985)**:

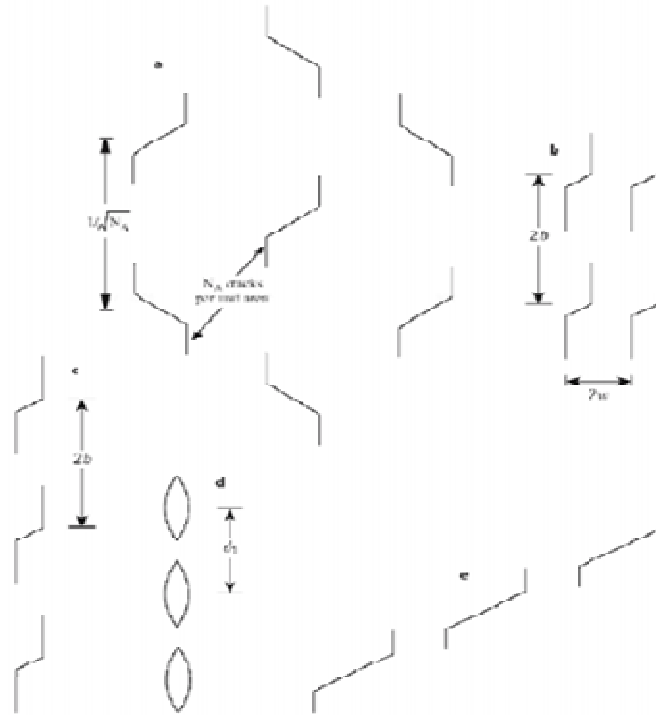
$$\frac{K_I}{\sqrt{\pi c}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)\sqrt{1 + \mu^2} - (\sigma_1 + \sigma_3)\mu}{\pi\sqrt{L/c}} \sin\theta - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\ell}{c}}(\sigma_1 + \sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2(\theta - \gamma))$$

όπου  $L = l + 8c/3\pi^2$  το ενεργό μήκος των πλευρικών ρωγμών. Η γωνία με την οποία διαδίδονται οι πλευρικές ρωγμές προκύπτει με μεγιστοποίηση του  $K_I$  ως προς  $\theta$ .

Σύμφωνα με τον **Broek (1988)** ως συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων  $K_I$ , μπορεί να οριστεί ο λόγος της τοπικά ασκούμενης τάσης στα άκρα μίας ρωγμής προς την «ονομαστική τάση», που μπορεί να είναι η μέση τάση σε μία διατομή του πετρώματος ή η μέση τάση μακριά από τη ρωγμή ή η κύρια τάση του εντατικού πεδίου μακριά από τη ρωγμή.

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω εξίσωση ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στα άκρα της ρωγμής μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος της. Η μείωση αυτή οφείλεται αφενός στην απομάκρυνση του άκρου της πλευρικής ρωγμής από τη θέση δημιουργίας εφελκυστικών τάσεων στα άκρα της προϋπάρχουσας μικρορωγμής και αφετέρου στην επίδραση της ορθής δύναμης που δρα στο επίπεδο της πλευρικής ρωγμής και τείνει να εμποδίσει την επέκτασή της.

Η αύξηση του μήκους και του αριθμού των επεκτεινόμενων πλευρικών ρωγμών που προκαλείται από την αύξηση της φόρτισης, έχει ως αποτέλεσμα το εντατικό πεδίο στο περιβάλλον μίας μικρορωγμής να αλληλοεπιδρά με το εντατικό πεδίο των γειτονικών μικρορωγμών. Η αστοχία του πετρώματος θεωρείται ότι επέρχεται λόγω της αλληλεπίδρασης και της συγχώνευσης πολλών πλευρικών μικρορωγμών που ξεκίνησαν από τα άκρα προϋπάρχουσων μικρορωγμών. Το πολύπλοκο αυτό πρόβλημα αντιμετωπίζεται συχνά από τους ερευνητές (π.χ. Ashby και Sammis 1990) μέσω της θεωρίας της μηχανικής της βλάβης των υλικών (damage mechanics). Η βλάβη του πετρώματος αναπαρίσταται από μία παράμετρο που χαρακτηρίζει την πυκνότητα και τη γεωμετρία των μικρορωγμών και των πόρων του ψαθυρού πετρώματος [**Σοφιανός & Νομικός 2008**].



**Εικόνα 3**

*Διάφορα εξιδανικευμένα μοντέλα για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των μικρορωγμών στο πέτρωμα  
(Πηγή: Σοφιανός & Νομικός 2008)*

Με την έναρξη των πλευρικών μικρορωγμών, μπορούμε να συσχετίσουμε την έναρξη της διόγκωσης του δοκιμίου σε μία δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Αν υποθέσουμε ότι το πέτρωμα περιέχει τυχαία προσανατολισμένες προϋπάρχουσες μικρορωγμές, τότε η έναρξη των πλευρικών μικρορωγμών θα συμβεί πρώτα στα άκρα εκείνων με γωνία  $\gamma = (1/2)\tan^{-1}(1/\mu)$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{1+\mu^2} + \mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \sigma_3 + \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$$

Η έναρξη μικρορωγμών μπορεί να εντοπισθεί πειραματικά με διάφορους τρόπους:

- από την έναρξη καταγραφής της ακουστικής δραστηριότητας,
- από το σημείο που το διάγραμμα τάσης-τροπής γίνεται μη γραμμικό,
- από την αύξηση του όγκου του δοκιμίου.



#### 1.4.Ανακατανομή τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλικά ανοίγματα

Προ της εκσκαφής ενός υπόγειου ανοίγματος, η εντατική κατάσταση ενός τυχαίου σημείου στην εν λόγω περιοχή σε ένα βάθος  $z$  από τη φυσική επιφάνεια του εδάφους, δίνεται από τις κύριες τάσεις, κατακόρυφες και οριζόντιες ως εξής:

$$p_z = \gamma \cdot z, \quad p_x = k \cdot p_z = k \cdot \gamma \cdot z$$

Όπου  $\gamma$  το μοναδιαίο βάρος και  $k$  ο συντελεστής πλευρικών τάσεων. Κατά την εκσκαφή ενός ανοίγματος, η εντατική κατάσταση μεταβάλλεται με κύριο χαρακτηριστικό τη σημαντική μεταβολή των κυρίων τάσεων. Η αλλαγή της εντατικής κατάστασης θα μπορούσε να περιγραφεί από τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων δηλαδή το λόγο της νέας τάσης προς την τάση προ της εκσκαφής, όμως αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- Τη μορφή του ανοίγματος
- Τη σχέση των διαστάσεων της διατομής
- Την αρχική εντατική κατάσταση (κυρίως ο συντελεστής  $k$ )
- Τη θέση του σημείου
- Τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού/βραχώμαζας
- Τους γεωλογικούς παράγοντες και την κατανομή τους (π.χ. ασυνέχειες) κλπ.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού, προϋποθέτει κατάλληλη διατύπωση των παρακάτω βημάτων:

- Των συνοριακών συνθηκών
- Των διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας
- Της καταστατικής εξίσωσης συμπεριφοράς της βραχώμαζας
- Των εξισώσεων συμβατού των παραμορφώσεων.

Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και προγραμμάτων Η/Υ (π.χ. με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων), γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των τάσεων ακόμα και στις πιο σύνθετες διατομές, τις πιο περίπλοκες συνοριακές συνθήκες και την πιο σύνθετη γεωτεχνική συμπεριφορά της βραχώμαζας.

Η παρουσία μιας γεωμετρική ασυνέχειας, όπως π.χ. ενός κυκλικού ανοίγματος, όπως προαναφέρθηκε, επιφέρει ανομοιόμορφη κατανομή της εφαπτομενικής τάσης, η οποία ακριβώς στα όρια της οπής εμφανίζει ένα μέγιστο  $\sigma_{\max}$  και καθώς απομακρυνόμαστε από την οπή μειώνεται σταδιακά, μέχρις ότου φτάσει στην τιμή  $\sigma_{\text{ομοιόμορφη}}$ . Εκτός του ότι μία ασυνέχεια δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων κοντά της, μεταβάλλει τοπικά και την εντατική κατάσταση του υλικού. Ακόμη δηλαδή και αν γενικά στο υλικό η εντατική κατάσταση είναι απλός μονοαξονικός εφελκυσμός, κοντά στην ασυνέχεια η εντατική κατάσταση γίνεται σύνθετη (διαξονική ή

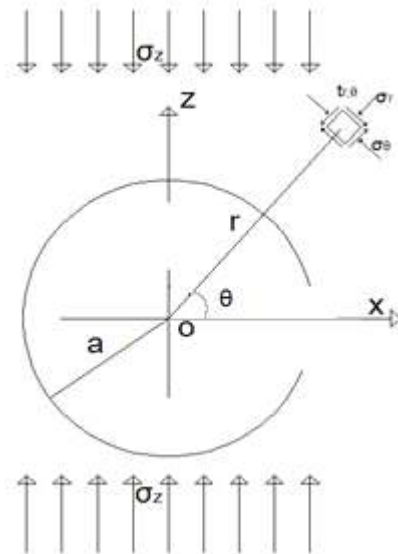
τριαξονική). Η πρώτη βασική επίλυση του προβλήματος έγινε από τον Kirsch (1898) και σε αυτήν βασίστηκαν πολλοί μεταγενέστεροι ερευνητές. Ο Kirsch έλυσε το πρόβλημα της μονοαξονικής φόρτισης της διατομής κατά τον άξονα z (κατακόρυφα) με φόρτιση  $p_z$ , στη συνέχεια με  $p_x$  (οριζόντια) και κατόπιν αυτών προέκυψε η τελική εντατική κατάσταση δια της επαλληλίας των επιμέρους επιλύσεων (επαλληλία που είναι αποδεκτή ως απολύτως ακριβής σε προβλήματα γραμμικής ελαστικότητας). Οι βασικές προϋποθέσεις της επίλυσης εντάσσονται στις παραδοχές της θεωρίας γραμμικού ελαστικού ομοιογενούς και ισότροπου μέσου (ως μέσο νοείται το υλικό στο οποίο διανοίγεται η οπή) καθώς και η υπόθεση της απειρίοστης δυνατότητας μετάδοσης θλιπτικών, εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων. Το εξωτερικό πεδίο των αρχικών τάσεων δίνεται από τις τάσεις  $p_z$  και  $p_x$ , οι δε εξ ανακατανομής τάσεις σε σύστημα πολικών συντεταγμένων  $(r, \theta)$  είναι  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  και  $\tau_{r,\theta}$ , ενώ οι μετατοπίσεις (απόλυτες παραμορφώσεις) κατά την ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση είναι  $u_r$ ,  $u_\theta$  αντίστοιχα [Παπαδόπουλος 2007].

Για τις τάσεις

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[ (1+K) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-K) \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[ (1+K) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-K) \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

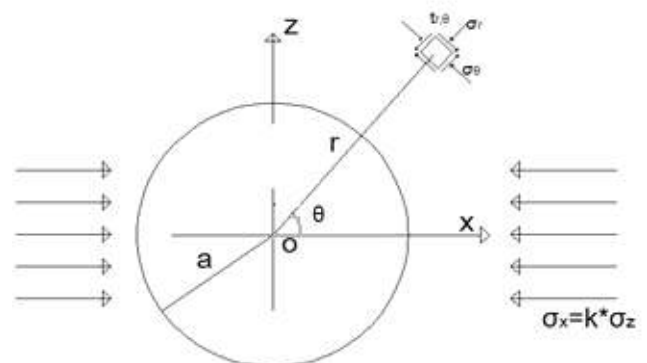
$$\tau_{r,\theta} = \frac{p}{2} \left[ (1-K) \left( 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$



Για τις μετατοπίσεις

$$u_r = -\frac{p a^2}{4 G r} \left[ (1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]$$

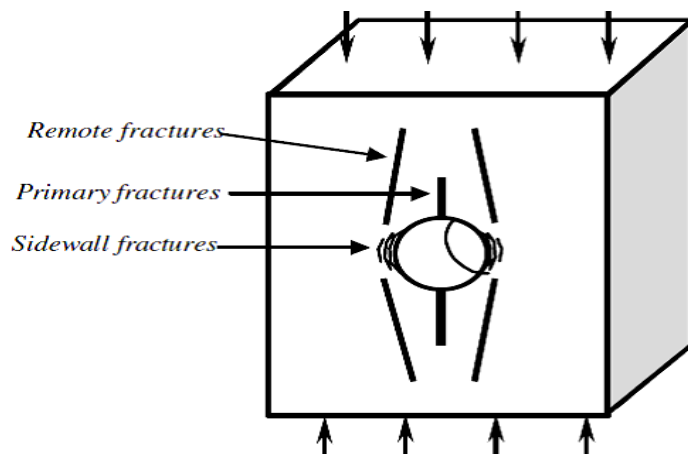
$$u_\theta = -\frac{p a^2}{4 G r} \left[ (1-K) \left\{ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right]$$



## 1.5. Το πρόβλημα της ρωγμάτωσης γύρω από κυκλικά ανοίγματα

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, το κύριο χαρακτηριστικό της ρωγμάτωσης είναι η θραύση των ατομικών δεσμών του στερεού υλικού. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, ως ρωγμάτωση μπορεί να χαρακτηριστεί η θραύση ενός υλικού σε τμήματα, λόγω προώθησης των ρωγμών σε αυτό. Η θραύση του πετρώματος γύρω από υπόγειες εκσκαφές έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μηχανική των πετρωμάτων. Όπου κι αν σχηματίζονται οι ρωγμές (υπόγεια λατομεία, σήραγγες, υπόγειες εκσκαφές, εκσκαφές απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων, κλπ) η δημιουργία τους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η θραύση μπορεί να είναι διαφορετικού βαθμού σοβαρότητας, από αβλαβείς αποφλοιώσεις στη περίμετρο της εκσκαφής έως βίαιες εκτινάξεις πετρώματος γνωστές ως **rockbursts**. Γενικά, παρά το γεγονός ότι τέτοιες αστοχίες είναι συνήθεις, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τη γεωμετρία, τους μηχανισμούς και τις εντατικές καταστάσεις που συμβαίνουν κατά την αστοχία ενός πετρώματος σε μεγάλη κλίμακα. Αντιθέτως σε απλές εργαστηριακές δοκιμές η ανάπτυξη των αστοχιών στα φυσικά μοντέλα με ανοίγματα είναι σχετικά γνωστές. Η ανάπτυξη των ρωγμών γύρω από μία οπή εξετάζεται μέσω φυσικών και αριθμητικών μοντέλων [Carter 1991, 1992]. Κατά τη μονοαξονική θλίψη ή την αξονική θλίψη με σχετικά χαμηλή πλευρική πίεση ένα φυσικό μοντέλο με κυκλικό άνοιγμα θα παρουσιάσει γενικά θραύσεις, που εμφανίζονται σταδιακά, και περιλαμβάνουν [Carter 1991]:

1. Αρχικές- Πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές (Primary fractures, P).
2. Δευτερογενείς ρωγμές ή ρωγμές σε απομονωμένα τμήματα (Remote fractures, R).
3. Αποφλοιώσεις στη θλιβόμενη ζώνη (Slabbing, S)



*Εικόνα 4*

*Οι θραύσεις που αναπτύσσονται γύρω από μία κυκλική οπή σε φυσικό μοντέλο πετρώματος κατά την μονοαξονική θλίψη (Πηγή: Klerck et al. 2004)*

## **1.6.Η ερμηνεία του φαινομένου από ερευνητές**

### **1.6.1.Γενικά**

Η έναρξη των ρωγμών από τη συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων και η επέκτασή τους σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης, μπορεί να περιγραφεί σαν κάθετη διατμητική ρωγή. Η έναρξη και η επέκταση των κάθετων διατμητικών ρωγμών συμβαίνουν κάτω από την επήρεια μιας ετερογενούς διάδοσης τάσεων.

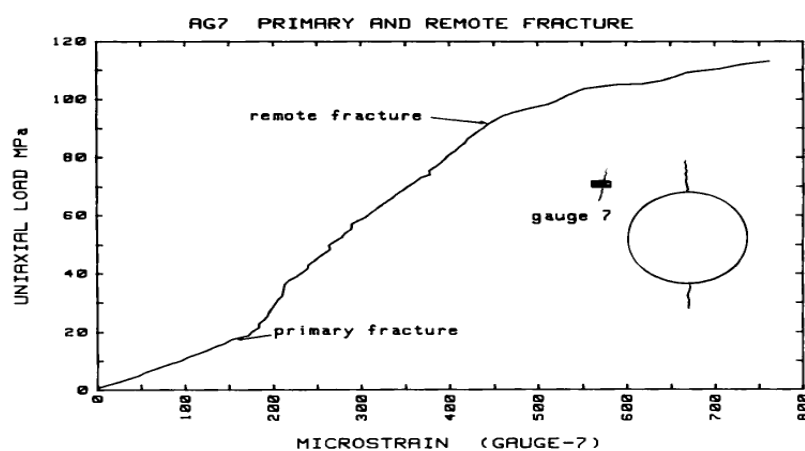
Μιας και τα περισσότερα πετρώματα έχουν στοιχεία ψαθυρούς θραύσης, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να περιγραφεί και να ερμηνευτεί ο μηχανισμός της δημιουργίας της. Οι ρωγμές έχουν ερμηνευτεί με διάφορες θεωρίες αστοχίας οι οποίες είναι εμπειρικές και βασίζονται στην εμπειρία που αποκομίζεται κατά τις εργαστηριακές δοκιμές και τις δοκιμές πεδίου. Οι θεωρίες αυτές είναι όλες βασισμένες σε μια ιδέα του Griffith για μικροσκοπικό έλεγχο ρωγμών. Οι θεωρίες του Griffith έχουν βασιστεί σε κάποιες θεμελιώδεις θεωρίες:

1. Η θραύση ξεκινάει από ασυνέχειες-ελαττώματα και η διαδικασία της θραύσης ελέγχεται από το πεδίο των τάσεων γύρω της
2. Το υλικό που περιβάλλει τα ελαττώματα μπορεί να θεωρηθεί σαν συνεχές, δηλαδή η ατομική δομή του υλικού μπορεί να αγνοηθεί
3. Οι μεμονωμένες ατέλειες απέχουν αρκετά μεταξύ τους έτσι ώστε οι ανωμαλίες των τάσεων που σχετίζονται με αυτές να μην επικαλύπτονται.

### **1.6.2.Η ερμηνεία του Carter**

Κατά την μονοαξονική θλίψη, η θραύση εξελίσσεται από αρχικές εφελκυστικές ρωγμές (primary fractures), σε ρωγμές σε τμήματα του φυσικού μοντέλου μακριά από την οπή (remote fractures), και στην αποφλοιώση των τοιχωμάτων της οπής στη θλιβόμενη ζώνη (slabbing). Υπάρχει ένα ευρύ διάστημα κατά το οποίο το μόνο γεγονός που συμβαίνει είναι μία σταθερή διάδοση της αρχικής ρωγμής η οποία ξεκινάει από την οπή και επεκτείνεται σχεδόν κάθετα στην μέγιστη θλιπτική τάση. Η άποψη αυτή υποστηρίζεται από εργαστηριακά πειράματα και από αρκετές θεωρητικές γραμμικώς ελαστικές λύσεις θραυστομηχανικής (π.χ. Ashby και Sammis 1986). Καθώς το άνοιγμα γίνεται μεγαλύτερο, η επέκταση των αρχικών ρωγμών χρειάζεται μεγαλύτερο φορτίο για να επεκτείνει την ρωγή στον ίδιο βαθμό. Επίσης, καθώς το άνοιγμα γίνεται μεγαλύτερο, οι ρωγμές εμφανίζονται σε χαμηλότερο φορτίο. Όταν το μήκος της αρχικής ρωγμής γίνει περίπου ίσο με τη διάμετρο της οπής, η κρίσιμη εντατική κατάσταση μετατοπίζεται εκατέρωθεν της αρχικής ρωγμής, προκαλώντας έτσι την ανάπτυξη των απομονωμένων ρωγμών (διάγραμμα 4). Σχεδόν ταυτόχρονα ακολουθεί η θλιπτική αστοχία με αποφλοιώση [Carter 1991]. Με την αύξηση της έντασης, οι ρωγμές της απομονωμένης περιοχής αναπτύσσονται κατά μήκος του

εντατικού πεδίου και τελικά ενώνονται με τη θλιβόμενη ζώνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εμφανίζεται καμία διατμητική μετατόπιση μέχρι λίγο πριν αστοχήσει.



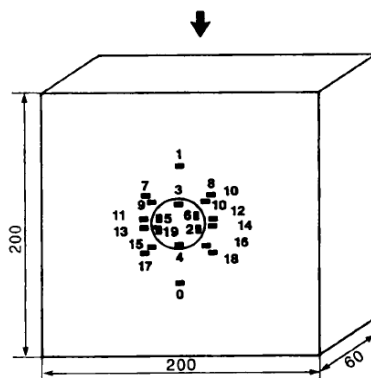
*Διάγραμμα 4*

*Διάγραμμα αξονικού φορτίου-παραμόρφωσης. Η επιτάχυνση της επέκτασης της παραμόρφωσης, σηματοδοτεί την έναρξη των απομονωμένων ρωγμών. Η εκτροπή στο σημείο της αρχικής παραμόρφωσης υποδηλώνει ανακούφιση τάσεων και παραμορφώσεων (Πηγή: Carter 1991)*

Όσον αφορά την προέλευση των ρωγμών, οι αρχικές ρωγμές είναι αναμενόμενες λόγω προβλεπόμενης εφελκυστικής τάσης. Εμφανίζονται λόγω εφελκυσμού κάτω από υψηλό θλιπτικό φορτίο, προωθούνται πολύ γρήγορα μόλις δημιουργηθούν αλλά τελικά σταθεροποιούνται καθώς επεκτείνονται μακριά από την οπή και τις υψηλές τάσεις που συγκεντρώνονται γύρω από αυτήν. Ομοίως η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη στην περίμετρο της οπής αναμένεται λόγω υψηλής συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Οι θλιπτικές ρωγμές είναι επεκτεινόμενες και η δημιουργία τους ακολουθείται από μια περίπλοκη διαδικασία κλιμακωτής απόσπασης του υλικού στα άκρα της οπής που ονομάζεται αλλιώς και αποφλοιώση. Αντίθετα, η προέλευση των απομονωμένων ρωγμών δεν είναι τόσο εμφανής. Επειδή αυτές εμφανίζονται μακριά από το άνοιγμα, δε μπορούν να γίνουν αντιληπτές κατά την υπόγεια εκσκαφή. Η ύπαρξή τους έχει γίνει γνωστή από δοκιμές φυσικών μοντέλων από τους Hoek, Lajtai, Gay και Ingraffea. Ο Hoek, χρησιμοποιώντας στις δοκιμές του μια επικάλυψη με φωτοελαστικό υλικό (photoelastic coating technique), εξήγησε την προέλευση των απομακρυσμένων ρωγμών στην συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων που δημιουργούνται μακριά από το άνοιγμα καθώς μεγαλώνει το μήκος των αρχικών εφελκυστικών ρωγμών. Η εφελκυστική τάση στην απομακρυσμένη ζώνη μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη ώστε να δημιουργήσει και έπειτα να επεκτείνει μια εφελκυστική ρωγή με σταθερό ελεγχόμενο τρόπο. Ο Ingraffea ανέλυσε τα αποτελέσματα του Hoek χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία και απέδειξε ότι η ένταση που εμφανίζεται στις απομακρυσμένες περιοχές, οδηγεί σε ανάπτυξη ρωγμών. Χρησιμοποιώντας γύψινα δοκίμια, ο Lajtai έδειξε ότι οι απομακρυσμένες ρωγμές συνδέονται με αυτές της θλιβόμενης ζώνης και προκαλούν αστοχία του ανοίγματος

[Lajtai 1975]. Σύμφωνα με τον Carter (1992), οι απομακρυσμένες ρωγμές, **εμφανίζονται κάτω από το συνδυασμό εφελκυσμού και θλίψης**, παρά το γεγονός ότι μπορούν να εμφανιστούν και μόνο σε θλιπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη των ρωγμών αυτών, γίνεται παράλληλα στην μέγιστη θλιπτική τάση, ενώ το δοκίμιο υπόκειται σε σχετικά χαμηλές βαθμίδες έντασης [Carter et al., 1991 a].

Η θεωρία σχετικά με τη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα που βρίσκονται σε θλίψη είναι γνωστή γι' αυτό και ο Carter (1991) σχεδίασε τα πειράματά του με σκοπό την ποσοτική συλλογή δεδομένων κατά την εξέλιξη των αρχικών, των απομονωμένων και των ρωγμών στη θλιβόμενη ζώνη. Έτσι, έκοψε δοκίμια από γρανίτη διαστάσεων 200x200x60mm με διάμετρο κυκλικού ανοίγματος 36mm στο κέντρο. Στη συνέχεια τοποθέτησε 19 τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges), με μήκος ενεργού στοιχείου μέτρησης 5mm, στην επιφάνεια του δοκιμίου στις θέσεις που αναμενόταν, σύμφωνα με προηγούμενες δοκιμές, η δημιουργία των παραπάνω ρωγμών. Με τα strain gauges συνδεδεμένα με καταγραφικό σύστημα, το φυσικό μοντέλο τοποθετήθηκε σε πλαίσιο δυναμικότητας 2500 kN (600,000lb) με σκοπό να φορτιστεί στα 157 MPa. Η θλιπτική αντοχή του άρρηκτου γρανίτη Lac du Bonne που χρησιμοποίησε υπολογίστηκε στα 226 MPa. Η διαδικασία φόρτισης διακόπηκε πριν την αστοχία αφού στα 157 MPa είχαν σχηματιστεί και τα 3 είδη ρωγμών οπότε έκρινε απαραίτητο να σταματήσει τη δοκιμή για να εξετάσει οπτικά το δοκίμιο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το δοκίμιο του γρανίτη με τα strain gauges Τοποθετημένα στις αναμενόμενες θέσεις ρωγμάτωσης.



**Εικόνα 5**

*Το δοκίμιο γρανίτη με τις θέσεις εγκατάστασης των strain gauges. Αυτά που φαίνονται μέσα στην οπή τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της τοίχου (Πηγή: Carter 1991)*

Η θραύση ακολούθησε ένα αναμενόμενο μοτίβο. Οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές σχηματίστηκαν στα 16 MPa, τάση που είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του γρανίτη όπως προκύπτει από δοκιμές Brazilian (μέση τιμή 14MPa με τυπική απόκλιση 1-2MPa). Χρησιμοποιώντας τη λύση του Kirsch και το κριτήριο μέγιστης τάσης, θα έπρεπε να εμφανιστούν στα 14 MPa. Η κατά 2 MPa μεγαλύτερη τάση που χρειάστηκε για να σχηματιστούν οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές, υποδεικνύει την επιρροή της βάρθρωσης της τάσης στη δοκιμή. Στα 135 MPa

οι αρχικές ρωγμές διαδόθηκαν περίπου κατά 43 mm, ενώ επεκτάθηκαν κατά 4 mm ακόμη μέχρι το τέλος του πειράματος (157 MPa). Οι δευτερογενείς ή αλλιώς απομονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν στα 119 MPa και επεκτάθηκαν μακριά και προς την οπή. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των απομονωμένων ρωγμών είναι το γεγονός ότι δεν είναι ενιαίες ρωγμές, αλλά αποτελούν μία ζώνη ρωγμάτωσης με ένα σύνολο παράλληλων ρωγμών. Συγκεκριμένα, μοιάζουν αρκετά με την αξονική κατάκλαση που παρατηρείται στα απλά κυλινδρικά δοκίμια κάτω από τυπική μονοαξονική θλίψη. Η αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη εμφανίστηκε με μορφή αποφλοιώσεων στα 126 MPa. Μιας και υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στα τρία παραπάνω σημεία, θα ήταν αναμενόμενο να ξεκινήσει η αστοχία στο 1/3 της θλιπτικής αντοχής, δηλαδή μεταξύ 70-80 MPa. Από το παραπάνω πείραμα παρατηρήθηκε ότι στο τελευταίο στάδιο ανάμεσα στα 140–157 MPa οι απομονωμένες ρωγμές ενώθηκαν με τις ρωγμές της θλιβόμενης ζώνης. Επίσης παρατηρήθηκαν κάποιες παράξενες οριζόντιες ρωγμές μεταξύ της οπής και των απομονωμένων που αποτελούν δομικές αστοχίες του υλικού.

Σε επόμενα πειράματα ο **Carter (1992)**, χρησιμοποίησε δοκίμια δολομιτικού ασβεστολίθου μεγέθους έως και 750\*500\*100 mm για τη μελέτη της επίδρασης του **μεγέθους** και της **εντατικής βαθμίδας** στη θραύση γύρω από κυκλικά ανοίγματα. Η πειραματική παρατήρηση της επίδρασής τους έχει αναφερθεί από ερευνητές στο παρελθόν (π.χ. Hodgson and Cook 1970, Einstein et al.1970, Lajtai 1972), όπως η θεωρητική τους εξήγηση αποτελεί θέμα αντιπαράθεσης. Η πιο γνωστή θεωρία είναι αυτή του **Weibull (1939)** που βασίζεται στην στατιστική κατανομή των μεγεθών των ατελειών στη βραχώμαζα, ενώ υπάρχουν θεωρίες που συσχετίζουν την επίδραση του μεγέθους με τη βάρμωση της τάσης (stress gradients) όπως των **Durelli και Parks (1962)**, ενεργειακές θεωρίες θραύσης όπως των **Gonano και Brown (1975)**.

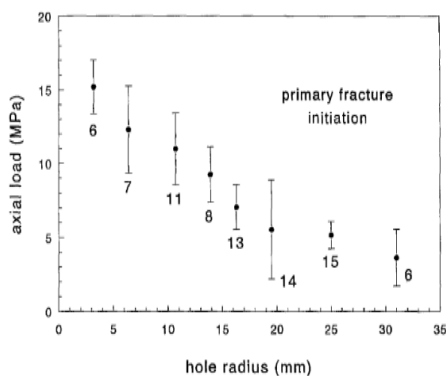
Τα παραπάνω πειράματα έγιναν σε 25 φυσικά μοντέλα με 9 διαφορετικές διαμέτρους οπών από 3,2mm έως 62 mm. Τα δοκίμια είχαν παραλληλόγραμμο σχήμα και κυκλικό άνοιγμα, ενώ το μέγεθός τους μεταβαλλόταν έτσι ώστε το **πλάτος του να είναι τουλάχιστον 5 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του**. Το πάχος των δοκιμίων ήταν από 84 έως 89 mm, διάσταση αρκετή ώστε να αποτρέψει το λυγισμό και την επίδραση των άκρων. Ξανά σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν strain gauges (εκτός του μικρότερου με διάμετρο 3,2 mm) με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν 80 μετρήσεις για τις αρχικές, 81 για τις δευτερογενείς και 38 για τις ρωγμές της θλιβόμενης ζώνης. Η μονοαξονική δοκιμή έγινε σε πλαίσιο δυναμικότητας 5000 kN, ενώ ο ρυθμός φόρτισης μεταβαλλόταν ώστε να γίνεται οπτική εξέταση των φαινομένων.

Και σε αυτά τα πειράματα, η έναρξη και εξέλιξη της θραύσης ακολούθησε το αναμενόμενο μοτίβο σύμφωνα με τα προηγούμενα πειράματά του (1991). Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν το ίδιο μοτίβο θραύσης ανεξάρτητα από **το μέγεθος της οπής**, το οποίο όμως όπως φάνηκε, επηρέασε **την τάση έναρξης της ρωγμάτωσης**. Παρά το γεγονός ότι οι 3 τύποι ρωγμών είναι σχετικά όμοιοι, εμφανίζονται κάτω από

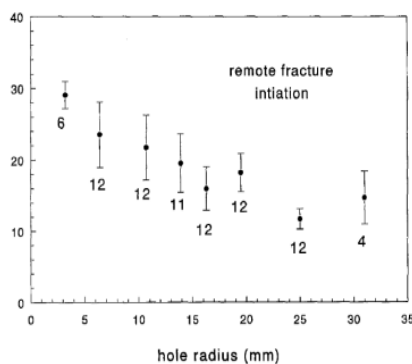
διαφορετικές μακροσκοπικά εντατικές βαθμίδες. Οι τέσσερις απομονωμένες ρωγμές δεν εμφανίστηκαν όλες στο ίδιο φορτίο και γενικά υπήρξαν περιπτώσεις που δεν εμφανίστηκαν και οι τέσσερις. Οι ρωγμές αυτές αναπτύσσονται κατευθυνόμενες προς την οπή όπου εμφανίζονται οι θλιπτικές ρωγμές, με τις οποίες ενώνονται συχνά προκαλώντας τη θραύση του δοκιμίου. Όλες οι ρωγμές είναι εφελκυστικές και δεν συμβαίνει καμία διάτμηση μέχρι λίγο πριν αστοχήσει το δοκίμιο [Carter 1992].

Η έναρξη των ρωγμών φάνηκε από τις καμπύλες τάσης-τροπής των strain gauges που είχαν τοποθετηθεί στις περιοχές που αναμενόταν να εμφανιστούν οι ρωγμές. Η έναρξη επιβεβαιώθηκε και οπτικά με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Στα δοκίμια με τις μικρές διαμέτρους που δεν μπορούσαν να μπουν strain gauges, δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί η τάση έναρξης της ρωγμάτωσης. Αντίθετα, στα μεγαλύτερα ανοίγματα όπου μπορούσαν να τοποθετηθούν strain gauges εσωτερικά, αποκαλύπτουν το σημείο έναρξης από την εκτροπή της καμπύλης τάσης-τροπής από την ευθυγραμμία. Λόγω της γραμμικά ελαστικής συμπεριφορά του πετρώματος σε αυτό το εύρος τάσεων, η εκτροπή της καμπύλης θα μπορούσε να προκαλείται μόνο από την ρωγμάτωση του. Γενικά, όλα τα strain gauges που βρίσκονται κοντά στη περιοχή της έναρξης θα δώσουν σημάδια διαταραχής. Όσον αφορά το δοκίμιο οπτικά, μοιάζει με δοκίμιο που έχει αστοχήσει υπό θλιπτική μονοαξονική καταπόνηση με πολλαπλές αξονικές ρωγμές σε όλη την επιφάνειά του.

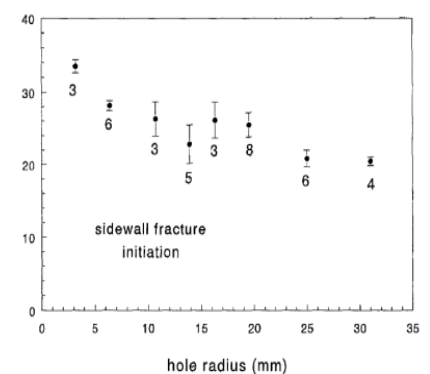
Η τάση έναρξης της ρωγμάτωσης για όλους τους τύπους ρωγμών (αρχικές, δευτερογενείς και θλιπτικές) παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία όσο το μέγεθος της οπής αυξάνεται. Στα διαγράμματα που ακολουθούν (5.1, 5.2, 5.3) φαίνονται τα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του μεγέθους της οπής στις αρχικές, τις απομονωμένες και τις θλιπτικές ρωγμές κατά τη διάρκεια της θλίψης δοκιμίου. Τα σημεία στα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές, οι ράβδοι σφάλματος μια τυπική απόκλιση και τα νούμερα κάτω από τις ράβδους δείχνουν τον αριθμό των μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που παρείχαν τα στοιχεία ρωγμάτωσης [Carter 1992].



Διάγραμμα 5.1  
Αρχικές



Διάγραμμα 5.2  
Απομονωμένες  
(Πηγή: Carter 1992)



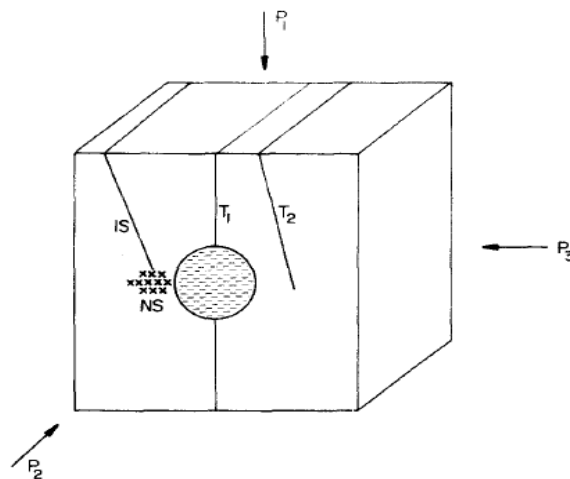
Διάγραμμα 5.3  
Θλιπτικές



### 1.6.3. Η ερμηνεία του Lajtai

Ο Lajtai, πραγματοποίησε πειράματα πολυαξονικής θλίψης σε δοκίμια, με σκοπό να παρατηρήσει την σειρά των γεγονότων θραύσης που οδηγούν στην αστοχία του δοκιμίου. Αυτή η σειρά μπορεί να περιλαμβάνει αρχικές εφελκυστικές, κάθετες διατμητικές, δευτερογενείς εφελκυστικές και πλάγιες διατμητικές ρωγμές. Με χαμηλή πλευρική πίεση, κυριαρχούν οι εφελκυστικές ρωγμές με την αστοχία να εξελίσσεται ως απότομη εμφάνιση δευτερεύοντων εφελκυστικών ρωγμών που επιφέρουν αστοχία στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Με υψηλή πλευρική πίεση, ο εφελκυσμός περιορίζεται και η αστοχία γίνεται μετά από μεγάλη παραμόρφωση που περιλαμβάνει προοδευτική κατάκλαση στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Αυτό μπορεί να γίνει χωρίς την ανάπτυξη εμφανούς επιφάνειας αστοχίας μέχρις ότου η οπή κλείσει εντελώς (πολύ υψηλή πλευρική πίεση). Συχνά εμφανίζεται μια μορφή αστάθειας που περιλαμβάνει επιφάνειες διάτμησης κατά μήκος των οποίων γίνεται ολίσθηση των τμημάτων του υλικού προς την οπή.

Τα δοκίμια που χρησιμοποίησε ήταν γύψινα με μέγεθος κυρίως 7,5x15x15 cm και ανοίγματα 1,5 ή 2,5 cm αλλά και 25x25x7,5 cm για τον έλεγχο επιρροής της κλίμακας. Η δοκιμή έγινε με τη βοήθεια τριών ορθογωνικά διατεταγμένων υδραυλικών πρεσσών για την πολυαξονική πίεση των δοκιμίων. Η τεχνική φόρτισης που ακολούθησε ήταν να αυξήσει την πίεση των πρεσών σε μια χαμηλή σχετικά τιμή P3, μετά να την αυξήσει σε μια ενδιάμεση τιμή P2 και στη συνέχεια σε μια μέγιστη τιμή φόρτισης P1 έως την αστοχία του δοκιμίου. Η γενική μορφή θραύσης που παρατήρησε, είναι αυτή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



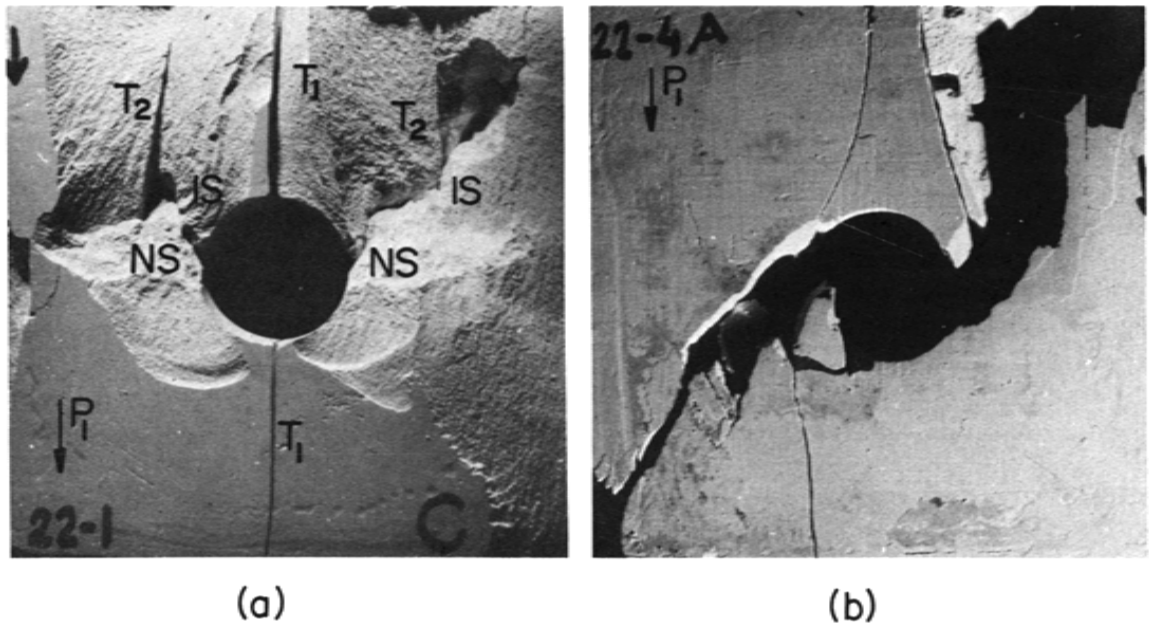
**Εικόνα 6**

*Μορφές θραύσης, T1: Πρωτογενείς ρωγμές, NS: κάθετες διατμητικές ρωγμές, IS: Ρωγμές διάτμησης με κλίση, T2: δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές  
(Πηγή: Lajtai 1975)*

Οι 2 πρώτες (T1 και NS) εμφανίζονται σε σημεία συγκέντρωσης εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που υπάρχουν γύρω από το άνοιγμα στην άρρηκτη μορφή του. Οι αρχικές εφελκυστικές, είναι επίπεδες επιφάνειες ρωγμάτωσης που σχηματίζονται

παράλληλα με τη διεύθυνση της μέγιστης θλιπτικής τάσης. Η κάθετη ρωγμή διάτμησης δεν είναι επίπεδη αλλά αποτελείται από μια ζώνη ρωγμάτωσης με διακριτό πλάτος. Θεωρείται σαν επιφάνεια αστοχίας που σχηματίζεται σε περιοχές όπου η τοπική θλιπτική τάση υπερβαίνει την αντοχή του υλικού σε θλίψη. Αρχικά η επιφάνεια αυτή εξαπλώνεται σε μια στενή περιοχή σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης θλίψης και στη συνέχεια επεκτείνεται σε πλάτος ώστε να δημιουργήσει μεγαλύτερο όγκο θρυμματισμένου υλικού. Οι πλάγιες ρωγμές διάτμησης και οι δευτερογενείς εφελκυστικές συνδυάζονται ώστε να προκαλέσουν την αστοχία του ανοίγματος. Και οι δύο τύποι ρωγμάτωσης σχετίζονται με την επέκταση της ζώνης κατάκλασης προς την περιοχή συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων. Οι πλάγιες ρωγμές σχηματίζονται μέσα σε αυτή τη ζώνη αστοχίας και μοιάζουν με την επιφάνεια διάτμησης που παρατηρείται κατά την αστοχία άμμου στην κλασική τριαξονική δοκιμή φόρτισης της εδαφομηχανικής. Οι δευτερογενείς εφελκυστικές, σχηματίζονται κατά μήκος του άρρηκτου υλικού δίπλα στην ζώνη κατάκλασης και ακολουθούν την τροχιά της αρχικής ρωγμάτωσης της μέγιστης τάσης. Η εξέλιξη της θραύσης πέρα από το στάδιο εμφάνισης των αρχικών εφελκυστικών και των κάθετων διατμητικών ρωγμών, είναι υπεύθυνη για την αστοχία του ανοίγματος σε ψαθυρά υλικά.

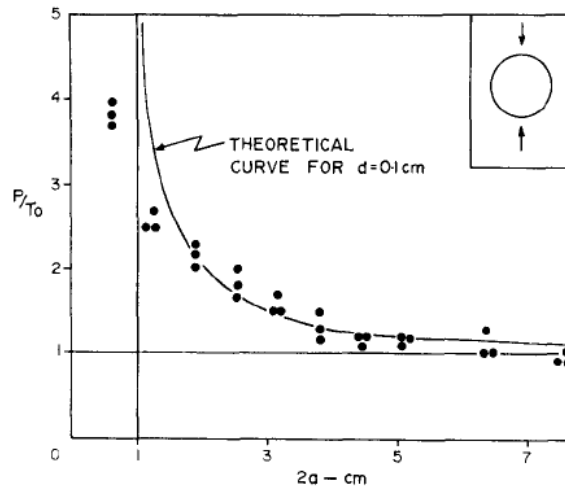
Στα πειράματα σε γύψο, οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές ενώνονται είτε με τις κάθετες είτε με τις επικλινείς ρωγμές διάτμησης. Είναι ακόμα κατανοητό ότι η ανάπτυξη ενός ζεύγους δευτερευόντων εφελκυστικών ρωγμών και ο επακόλουθος λυγισμός των τεμαχίων του υλικού μεταξύ τους, μπορεί να γίνει χωρίς την ανάπτυξη μηχανισμού διάτμησης. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της θραύσης κάτω από χαμηλή πλευρική πίεση, φαίνεται να είναι ο έλεγχός της από τις δευτερογενείς αυτές εφελκυστικές ρωγμές. Η εμφάνιση αυτού του γεγονότος συνοδεύεται πάντα από έκλυση μεγάλης ποσότητας ενέργειας που σηματοδοτείται από ισχυρά ακουστικά και σεισμικά σήματα. Αντίθετα, η θραύση κάτω από υψηλή πλευρική πίεση, ελέγχεται από τις επικλινείς ρωγμές διάτμησης, χωρίς όμως να εξαλείφεται τελείως ο ρόλος των δευτερογενών εφελκυστικών. Στην περίπτωση αυτή, ο ρόλος των αρχικών εφελκυστικών περιορίζεται ή εμφανίζεται αργότερα μαζί σχεδόν με τις δευτερογενείς και ο μηχανισμός αστοχίας είναι η κατάκλαση. Η επιφάνεια αστοχίας κατά μήκος της οποίας το δοκίμιο αστοχεί, ποικίλει σε θέση και κλίση ανάλογα με εξωτερικές επιδράσεις. Δύο από αυτές τις επιδράσεις είναι το σχήμα της οπής και τη σύστημα των πλακών φόρτισης. Το σχήμα της οπής επηρεάζει το μοτίβο της αστοχίας και μπορεί να διευκολύνει την πτώση τεμαχίων του υλικού που οριοθετείται από τις δευτερογενείς εφελκυστικές και τις πλάγιες διατμητικές ρωγμές [Lajtai 1975].



**Εικόνα 7**

*α) Ρωγμάτωση πριν τη θραύση γύψινου δοκιμίου με χαμηλή πλευρική πίεση όπου οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές έχουν ενωθεί με τις πλάγιες διαμητικές β) Δοκίμιο γύψου που έχει αστοχήσει σε θλίψη με μικρή πλευρική πίεση και χωρίς την ανάπτυξη πλάγιων διαμητικών ρωγμών (Πηγή: Lajtai 1975)*

Σε παλαιότερα πειράματά του (1972), ο Lajtai επισήμανε την επιρροή της βάρθρωσης της τάσης σε προβλήματα θραυστομηχανικής, καθώς οι περισσότερες θεωρίες θραύσης βασίζονται σε ομοιογενή πεδία τάσεων όμως στην πραγματικότητα το πεδίο είναι ανομοιογενές. Αφού οι ασυνέχειες του υλικού (θεωρία Griffith) δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, η έναρξη ρωγμών από αυτές τις περιοχές μπορεί να ελέγχεται από τη βάρθρωση της τάσης (stress gradient). Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποίησε, ήταν αυτό που χρησιμοποιείται σε όλες τις θεωρίες που βασίζονται στον Griffith και περιλαμβάνει ένα μόνο ελάττωμα, την οπή στο κέντρο. Μιας όμως που το υλικό (γύψος) έχει από μόνο του φυσικά ελαττώματα (μικροκενά), τα οποία θα αλληλεπιδρούν με το τεχνητό ελάττωμα (την οπή), η θεωρία θα δώσει λανθασμένες τιμές αντοχής στην ρωγμάτωση. Αν το μέγεθος της οπής είναι σχετικά μεγάλο, τότε θα περιοριστεί η επιρροή των φυσικών ελαττωμάτων του υλικού. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια με κυκλικές οπές όπου επιβεβαιώνεται η υπερεκτίμηση της τάσης ρωγμάτωσης σε μικρά ανοίγματα, λόγω του ότι στην θεωρία δεν λαμβάνονται υπόψη τα φυσικά ελαττώματα του υλικού.

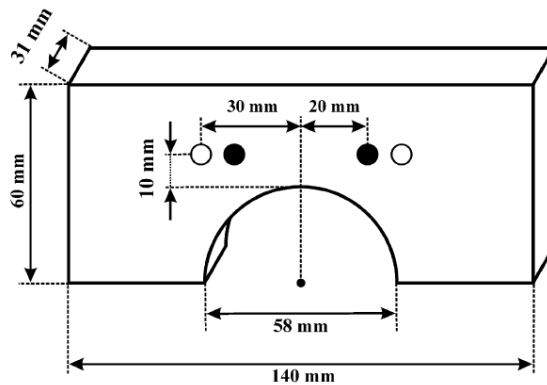


**Διάγραμμα 6**

Πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητική καμπύλη φορτίου-διαμέτρου σε δοκίμια με κυκλικά ανοίγματα κάτω από μονοαξονική θλίψη (Πηγή: **Lajtai, 1971**)

### 1.6.3. Η προσέγγιση των P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers

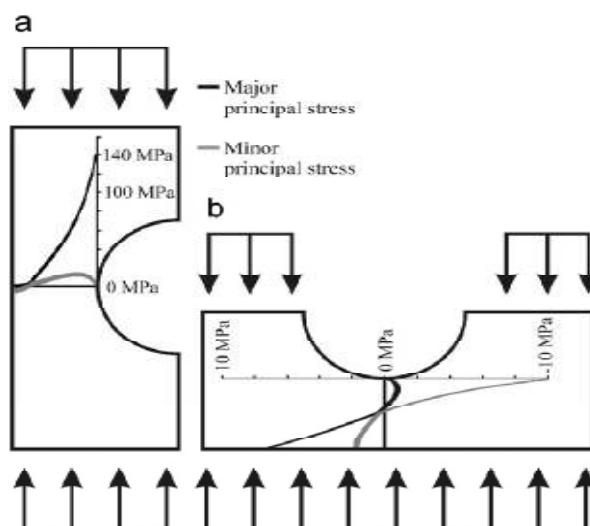
Άλλη μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος προέρχεται από τους ερευνητές P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers (2006), οι οποίοι περιέγραψαν τις φάσεις αστοχίας δοκιμίων ασβεστολίθου σύμφωνα με την καταγραφείσα αθροιστική ενέργεια (cumulative energy) ακουστικής εκπομπής. Η μεθολογία τους χρησιμοποιείται για την περιγραφή και έλεγχο της αστοχίας δοκιμίων κάτω από θλιπτικές τάσεις αλλά και κάτω από εφελκυστικές τάσεις (σε μια διεύθυνση). Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, τα δοκίμια ήταν ορθογωνικά, διαστάσεων 31x60x140 mm με οπή διαμέτρου 58 mm στο κέντρο, ενώ καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής, δύο ευρυζωνικοί αισθητήρες με εύρος συχνοτήτων 50kHz – 2MHz, κατέγραφαν τα γεγονότα ακουστικής εκπομπής.



**Εικόνα 8**

Γεωμετρία δοκιμίων και θέση τοποθέτησης των αισθητήρων (Πηγή: **P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006**)

Η διεύθυνση φόρτισης των δοκιμίων καθορίζει τη διανομή των τάσεων. Αν το εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται στις μικρές πλευρές του ορθογωνίου (60x31mm), έχουμε συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων δίπλα στην οπή, ενώ αν το φορτίο εφαρμόζεται στις μεγάλες πλευρές (140x60mm), οι τάσεις που συγκεντρώνονται στην οπή (ακτινικές και εφαπτομενικές) είναι εφελκυστικές.



**Εικόνα 9**

Οι δυο διευθύνσεις φόρτισης των δοκιμίων  
(Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

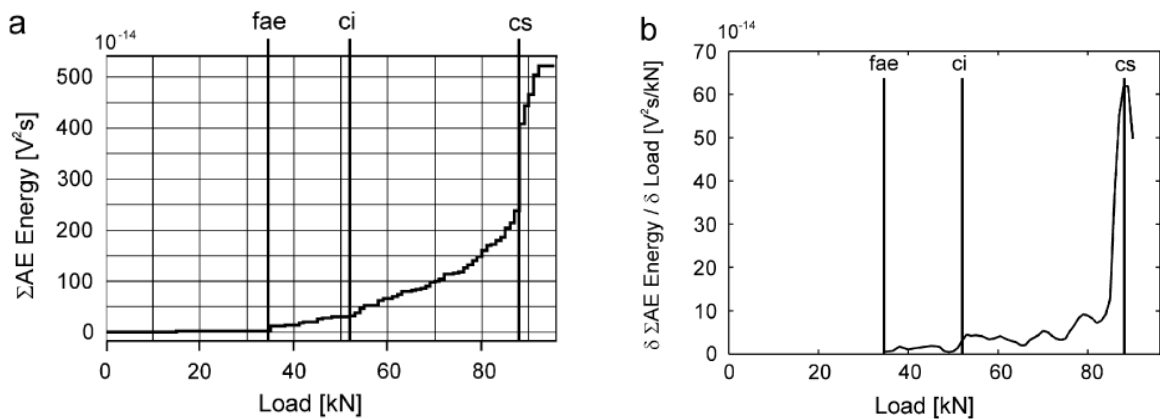
Μεταξύ μηχανής φόρτισης και δοκιμίου τοποθετήθηκε φύλλο τεφλόν για τον περιορισμό των δυνάμεων τριβής. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με ταινία τεφλόν και εξασφαλίστηκε η σύζευξη τους με το υλικό, μέσω γράσου (vacuum grease). Η προενίσχυση ορίστηκε στα 49dB ενώ το κατώφλι στα 16dB. Η ταχύτητα του διαμήκους ελαστικού κύματος υπολογίστηκε στα 5700m/s. Όλα τα γεγονότα με πλάτη μικρότερα των 22dB παραλείπονται για τη διατήρηση της ακρίβειας του εντοπισμού. Η ενέργεια ενός γεγονότος υπολογίζεται ως ολοκλήρωμα του πλάτους στο τετράγωνο προς το χρόνο (του πρώτου Hit από κάθε event).

Η προέλευση των ρωγμών μπορεί να είναι:

1. Φυσική (προυπάρχουσες ρωγμές)
2. Προερχόμενη από τη φόρτιση ή
3. Προερχόμενη από την προετοιμασία του δείγματος

#### Αστοχία στη διάταξη θλίψης του δοκιμίου

Βασιζόμενοι στην εξέλιξη της καταγραφόμενης ενέργειας ΑΕ, εντοπίστηκαν 4 φάσεις κατά τη θλίψη:



**Διάγραμμα 7**

Διαγράμματα **a)** αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο και **b)** παραγωγού αθροιστικής ενέργειας προς το φορτίο σε συνάρτηση με το φορτίο  
**fae**=πρώτο σήμα AE, **ci**=Αρχή συστηματικής εξέλιξης ρωγμών, **cs**=Αλληλεπίδραση και συνένωση ρωγμών

(Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

**1ο στάδιο - «Κανένα σήμα»:** Σε αυτό το στάδιο, δεν καταγράφεται κανένα σήμα AE. Γίνεται λοιπόν η υπόθεση πως δεν δημιουργείται καμία νέα ρωγμή ούτε μεγαλώνει κάποια ήδη υπάρχουσα. Αυτό φυσικά δεν είναι απόλυτο, καθώς υπάρχουν και ρωγμές που δεν απελευθερώνουν ενέργεια που να μπορεί να καταγραφεί.

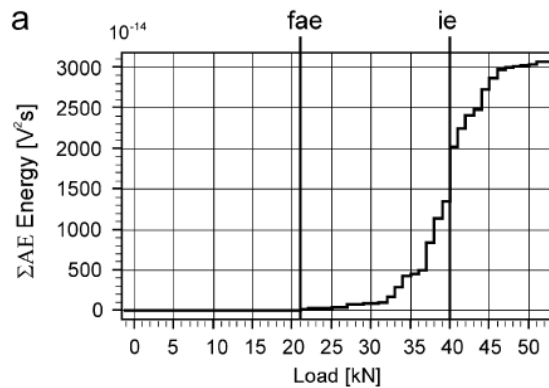
**2ο στάδιο – «Γραμμική αύξηση»:** Μετά το πρώτο σήμα AE (fae) η αθροιστική ενέργεια AE αυξάνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Το στάδιο αυτό ξεκινά περίπου στο 23-37% της τάσης αστοχίας. Σύμφωνα με τους μελετητές (P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers), το στάδιο αυτό εξαρτάται από τις ρυθμίσεις, τη θέση, το εύρος συχνοτήτων και το υλικό σύζευξης των αισθητήρων.

**3ο στάδιο– «Συστηματική δημιουργία και προώθηση των ρωγμών»:** Στο στάδιο αυτό παρατηρούμε ότι αυξάνει η κλίση της αθροιστικής ενέργειας AE σε συνάρτηση με το φορτίο. Η αρχή του σταδίου αυτού υπολογίζεται στο 56-62% του φορτίου αστοχίας. Οι Cai et al.(2004) παρατήρησαν ότι το στάδιο αυτό ξεκινάει σε φορτίο 40-60% του φορτίου αστοχίας ανάλογα με το είδος του υλικού, ενώ άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η αύξηση της ρωγμάτωσης μπορεί να παρατηρηθεί σε φορτίο μεγαλύτερο του 60% του φορτίου αστοχίας.

**4ο στάδιο – «Αλληλεπίδραση και συνένωση ρωγμών»:** Στο στάδιο αυτό συμβαίνει μια δεύτερη αύξηση της κλίσης της αθροιστικής ενέργειας AE σε συνάρτηση με το φορτίο, σε στάθμη φορτίο 86-90% του φορτίου αστοχίας. Οι Cai et al. (2004) συσχέτισαν τη στάθμη του φορτίου με την έναρξη συνένωσης των ρωγμών στους διάφορους τύπους βράχου και κατέληξαν στο ότι αυτή συμβαίνει στο 70-90% του φορτίου αστοχίας.

## ✚ Αστοχία στη διάταξη εφελκυσμού του δοκιμίου

Βασιζόμενοι στην εξέλιξη της καταγραφόμενης ενέργειας ΑΕ, εντοπίστηκαν 3 φάσεις κατά τη θλίψη του δοκιμίου στην άλλη διεύθυνση όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι εφελκυστικές:



**Διάγραμμα 8**

Διάγραμμα αθροιστικής ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο  
(Πηγή: P. Ganne, A. Vervoort και M. Wevers 2006)

**1<sup>ο</sup> στάδιο-«Κανένα σήμα»:** Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, υπάρχει και εδώ το στάδιο στο οποίο δεν καταγράφεται κανένα σήμα ΑΕ.

**2<sup>ο</sup> στάδιο-«Αύξηση των γεγονότων»:** Μετά το fae, η αθροιστική ενέργεια ΑΕ αυξάνεται σε συνάρτηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Το στάδιο αυτό ξεκινά στο 50-70% της δύναμης στην οποία ξεκινάει το επόμενο στάδιο, ie.

**3<sup>ο</sup> στάδιο- «Συστηματική δημιουργία και προώθηση των ρωγμών»:** Το στάδιο αυτό έχει σαν χαρακτηριστικό γνώρισμα μια ενδοκρυσταλλική ρωγμή (intergranular crack). Η ρωγμή αυτή έχει κλίση 0° και εξελίσσεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων αλλά και κατά μήκος των επιπέδων διάσπασης των κρυστάλλων. Εάν το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται, συμβαίνει και μια δεύτερη αύξομείωση της αθροιστικής ενέργειας κατά την οποία η παραπάνω ρωγμή επεκτείνεται και σταματάει μετά.

## 1.7.Η επίδραση της πλευρικής πίεσης

Όπως γνωρίζουμε από τις εργαστηριακές δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, η συμπεριφορά του δοκιμίου μεταβάλλεται με την επιβολή πλευρικής πίεσης. Υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης, μπορούν να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά ενός ψαθυρού υλικού σε όλκιμο. Έτσι λοιπόν υποψιαζόμαστε ότι με την ύπαρξη κάποιας περίσφιξης, το ρωγματωμένο δοκίμιο θα έχει διαφορετική συμπεριφορά στην έναρξη

της ρωγμάτωσης. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πλευρικής πίεσης (confining) προκαλεί μείωση του μεσοδιαστήματος κατά το οποίο η μόνη διαδικασία είναι η ανάπτυξη της αρχικής ρωγμής και τη μεταφέρει την αστοχία στην απομονωμένη και στην θλιβόμενη ζώνη. Το μονοαξονικό φορτίο που χρειάζεται για να δημιουργηθούν οι απομακρυσμένες ρωγμές μεγαλώνει γραμμικά με την πλευρική πίεση. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι, όχι μόνο η παραμόρφωση, αλλά και η θέση των ρωγμών αυτών μεταβάλλεται με την επιβολή περίσφιξης. Όσο μεγαλώνει η πλευρική πίεση, το σημείο της δημιουργίας των ρωγμών πλησιάζει το άνοιγμα, ξεκινώντας από 1,4\*ακτίνα χωρίς πλευρική πίεση και φτάνει το 0.2\*ακτίνα στα 110 MPa πλευρική [Carter 1991].

Ο Lajtai (1975) σε πειράματά του, εξέτασε και την επιρροή της πλευρικής πίεσης στον έλεγχο της ρωγμάτωσης και κατέληξε στο ότι:

1. Σε μηδενική πλευρική, οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές παίζουν ρόλο στην αστοχία
2. Σε χαμηλή πλευρική πίεση  $P1/P3 > 10$  ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από τις δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές,
3. Σε μέτρια πλευρική  $3 < P1/P3 < 10$  ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από τις πλάγιες ρωγμές διάτμησης και
4. Σε υψηλή πλευρική πίεση  $P1/P3 < 3$  ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από κλείσιμο μέσω κατάκλασης.

Σε υψηλή πλευρική πίεση, η αστοχία του ανοίγματος συνήθως συμβαίνει με ένα φαινομενικά όλκιμο τρόπο με σταδιακό κλείσιμο χωρίς μεγάλης έκτασης ρωγμές. Γενικά ο Lajtai, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η πλευρική πίεση ελέγχει τον μηχανισμό αστοχίας με τον εφελκυσμό να κυριαρχεί στις χαμηλές πλευρικές πιέσεις και τον μηχανισμό διατμητικής αστοχίας να κυριαρχεί σε υψηλές πλευρικές πιέσεις [Lajtai 1975].

## **1.8. Τα φαινόμενα κλίμακας και σχέση τους με την τάση ρωγμάτωσης**

Με τον όρο φαινόμενα κλίμακας υποδηλώνεται η εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού από το μέγεθος του δοκιμίου για γεωμετρικά όμοια δοκίμια. Σε εργαστηριακές δοκιμές, οι αποκλίσεις στην αντοχή των υλικών σε σχέση με την επί τόπου (in-situ) αντοχή μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες. Η αντοχή όμως επηρεάζεται και από την ύπαρξη ατελειών στο υλικό των οποίων η κλίμακα παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο.

Υπάρχουν αρκετά θεωρητικά μοντέλα που εξηγούν την επίδραση του μεγέθους και τη συνεπαγόμενη μεταβολή στην αντοχή των υλικών. Αυτά περιλαμβάνουν γραμμικές και μη-γραμμικές ελαστικές θεωρίες θραύσης (π.χ. Ingraffea, 1987), το ρυθμό απελευθέρωσης την κρίσιμης ενέργειας παραμόρφωσης (π.χ. Gonano, 1974),



μεθόδους εξισορρόπησης της τάσης (π.χ. Nestova και Lajtai 1973) καθώς και μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη το εξαρτώμενο από την πίεση μέτρο ελαστικότητας (π.χ. Santarelli et.al. 1986). Σε δοκίμια με οπή στο κέντρο, οι αρχικές ρωγμές έχουν ερμηνευθεί με θεωρίες της θραυστομηχανικής(π.χ. Sammis και Ashby 1986) και προτείνεται κλειστή λύση της τάσης έναρξης της ρωγμής σε συνάρτηση του μεγέθους της οπής και της δυσθραυστότητας.

Η επιρροή των οπών στην αντοχή των υλικών έχει εξεταστεί από πολλούς ερευνητές και η δημιουργία των ρωγμών εξηγείται με 2 θεωρίες:

1. Στην ψαθυρή εφελκυστική θραύση, τα φυσικά κενά του υλικού, σε μικροσκοπική κλίμακα, θεωρείται ότι αποτελούν εστίες συγκέντρωσης τάσεων από όπου μπορούν να ξεκινήσουν μικροθραύσεις,
2. Σε υπόγεια μεταλλεία ή σήραγγες τα ίδια τα ανοίγματα αποτελούν ασυνέχεια της βραχόμαζας η οποία με τη σειρά της μπορεί να περιέχει (μακροσκοπική κλίμακα), ασυνέχειες όπως ρήγματα, στρώση, πτύχωση, έγκοιλα κατά την ψύξη του μάγματος, κοιλότητες από τη διάλυση υλικού κλπ.

Στην ψαθυρή θραύση, οι περισσότεροι ερευνητές αγνοούν την αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη της οπής και λίγοι αναγνωρίζουν τη συνεισφορά των απομονωμένων ρωγμών. Αντίθετα, στα υπόγεια ανοίγματα οι ερευνητές δίνουν περισσότερο σημασία στην αστοχία της θλιβόμενης ζώνης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αρχικές εφελκυστικές ρωγμές είναι σπάνιες αφού η πλευρική πίεση είναι αρκετά υψηλή ώστε να περιορίζει την συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στα τοιχώματα της κοιλότητας. Επίσης, οι απομονωμένες ρωγμές δεν παίζουν ρόλο αφού πολύ σπάνια φτάνουν στην περίμετρο του ανοίγματος [Carter 1991].

Σε εφαρμογές μηχανικού, ο πιο κοινός τύπος φόρτισης είναι με εφαρμογή εφελκυστικής δύναμης. Η θλιπτική συνιστώσα της έντασης δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Κατά τη φόρτιση, η αστοχία ενός ανοίγματος είναι φαινόμενο ενός σταδίου. Η πρώτη ρωγμή που εμφανίζεται είναι και η τελευταία, καθώς η έναρξη της ρωγμής και η αστοχία του υλικού συμβαίνουν μαζί στο ίδιο φορτίο (ασταθής ανάπτυξη ρωγμής). Το πρόβλημα της αστοχίας μπορεί να αντιμετωπιστεί εξετάζοντας την συγκέντρωση των τάσεων γύρω από την κοιλότητα πριν την αστοχία. Έχει αποδειχθεί πειραματικά, ότι υπάρχει ποιοτική σχέση μεταξύ του πεδίου των τάσεων πριν τη ρωγμάτωση και της αστοχίας των ανοιγμάτων υπό ένταση και αυτό μπορεί να αποτελέσει βάση σχηματισμού των κριτηρίων ρωγμάτωσης. Αντίθετα, σε εφαρμογές βραχομηχανικής, η εφελκυστική συνιστώσα της έντασης είναι αυτή που δεν παίζει σημαντικό ρόλο. [Lajtai 1975].

Μια ακριβής κατανόηση του προβλήματος της θραύσης μπορεί να γίνει με την παρατήρηση της διαφοράς ανάμεσα στη μακροσκοπική και τη μικροσκοπική θεώρηση του προβλήματος. Παρά το γεγονός ότι οι δύο αυτές προσεγγίσεις μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές, είναι σημαντική η εύρεση μιας σχέσης μεταξύ τους και όταν

οι δύο θεωρήσεις εφαρμοσθούν στο ίδιο σύστημα να δίνουν ένα κοινό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, πρέπει να προβλέπουν το ίδιο φορτίο αστοχίας που βασίζεται σε κάποιο κοινό κριτήριο αστοχίας. Σύμφωνα με τον G.C. Sih (1973), το κριτήριο της μέγιστης εφελκυστικής τάσης που εφαρμόζεται συχνά στη βιβλιογραφία, δε θα πρέπει να αποτελεί το συνδυαστικό κριτήριο μεταξύ των δυο θεωρήσεων [Sih 1973].

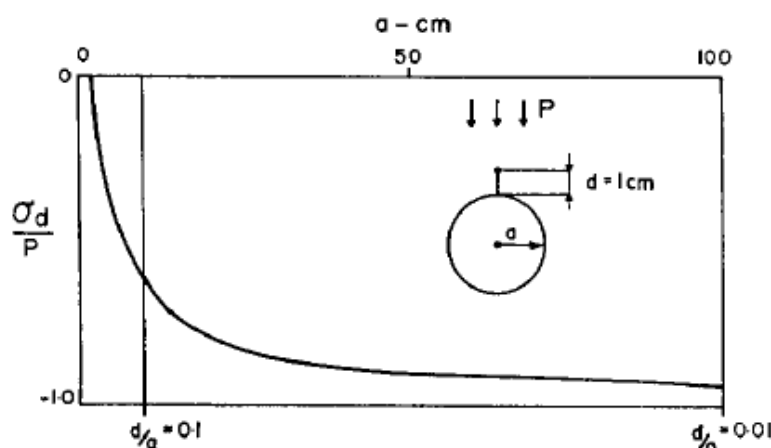
Εργαστηριακά, δοκιμάζοντας διάφορες διαμέτρους οπών στα δοκίμια, είναι δυνατή η διάκριση την επιρροή του μεγέθους της οπής στη ρωγμάτωση και κατ' επέκταση στην αστοχία του υλικού. Σύμφωνα με πειράματα του Carter (1992) σε ασβεστόλιθο, το γενικό μοτίβο της θραύσης είναι ίδιο και ανεξάρτητο από το μέγεθος της οπής. Όμως το μέγεθος της οπής επηρεάζει την τάση έναρξης της ρωγμάτωσης (Παράγραφος 1.8). Έτσι μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα, τόσο χαμηλότερη τάση απαιτείται για το σχηματισμό των ρωγμών [Carter 1992].

Η θεωρία του Griffith οι επακόλουθές της (Murrel) και οι τροποποιήσεις (Mc Clintoc-Walsh) βασίζονται στη απλή θεώρηση ότι η ρωγμή ξεκινάει όταν η συγκέντρωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης στα όρια μιας ασυνέχειας φτάσει την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Αυτή η υπόθεση θέτει σαν αίτημα την ισοδυναμία του ομοιογενούς πεδίου τάσεων της δοκιμής με τις εξαιρετικά ανομοιογενείς συνθήκες που επικρατούν στην περιφέρεια της ρωγμής. Σύμφωνα με τον Lajtai (1972), η παραπάνω υπόθεση είναι μια απαραίτητη αλλά όχι μοναδική προϋπόθεση για την έναρξη των ρωγμών. Μια πιο ολοκληρωμένη άποψη, θα ήταν να συμπεριληφθεί τη βάρυνση της τάσης κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας θραύσης. Ο πιο απλός τρόπος να το πετύχουμε αυτό, είναι να υποθέσουμε ότι η ρωγμή θα δημιουργηθεί όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση σε μια απόσταση  $d$  πέρα από την περιφέρεια, αλλά κατά μήκος της διαδρομής της ρωγμής, φτάσει την μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του υλικού. Η υπόθεση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί ως εξής: Η μαθηματική θεωρία της ελαστικότητας προβλέπει πολύ υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων που δεν συμβαίνουν στην πραγματικότητα. Αυτό που είναι πιο πιθανό, είναι ότι ακόμα και τα ψαθυρά υλικά θα αναδιανείμουν τις συγκεντρώσεις των τάσεων σε μια περιοχή, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την “ψαθυρότητα” του υλικού. Αυτό όπως είναι γνωστό, είναι χαρακτηριστικό των “όλκιμων” υλικών. Η ένταση της αναδιανομής, και σε μεγάλο βαθμό εξισορρόπησης του πεδίου των τάσεων, θα είναι μικρότερη από τη μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων στα όρια του υλικού. Η αναδιανομή των τάσεων σχεδόν για κάθε σχήμα ρωγμής είναι σχεδόν γραμμική για μια μικρή απόσταση και η μέση ένταση της τάσης καθώς και η κατάσταση της ρωγμής μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_d = \frac{\sigma_m + \sigma_{2d}}{2} = T_0$$

Όπου  $\sigma_d$  η μέση ένταση της τάσης για το πεδίο των τάσεων που αναδιανέμεται ομοιόμορφα σε μια απόσταση  $2d$ , ενώ η συγκέντρωση των τάσεων σε απόσταση  $d$  υπολογίζεται με τη μαθηματική θεωρία της ελαστικότητας [Lajtai 1972].

Στα πειράματα του Lajtai (1971), η κρίσιμη απόσταση  $d$  θεωρείται σταθερά του υλικού. Σε αντίθεση με τη μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων  $\sigma_m$ , η ένταση του πεδίου των τάσεων σε δεδομένη απόσταση  $d$  είναι συνάρτηση του μεγέθους της οπής όπως φαίνεται στο διάγραμμα 9. Η επίδραση του μεγέθους είναι πιο σαφής σε μικρά μεγέθη οπών, δείχνοντας έτσι ότι οι ρωγμές για μεγάλα ανοίγματα ελέγχονται από τη μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων. Η πραγματική τιμή της απόστασης  $d$  μπορεί να αποτελέσει δείκτη της σχετικής ψαθυρότητας του υλικού. Τα πολύ ψαθυρά υλικά μπορούν να διατηρήσουν υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων και ως εκ τούτου, η κρίσιμη τάση  $\sigma_d$  θα είναι πολύ κοντά στα όρια. Αντίθετα, τα πιο όλκιμα υλικά μπορούν να αναδιανεύουν τις συγκεντρώσεις των τάσεων σε μεγαλύτερη περιοχή κάνοντας έτσι μεγαλύτερη και την απόσταση  $d$ . Είναι προφανές ότι η απόσταση  $d$  δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το μήκος τη εφελκόμενης ζώνης κατά μήκος της διαδρομής της ρωγμής. Πράγματι, αναμένεται μόνο μια ρωγμή σε αυτήν την απόσταση [Σοφιανός & Νομικός 2008].



Διάγραμμα 9

Σχέση τάσης έναρξης της ρωγμάτωσης και λόγου απόστασης  $d$  προς μέγεθος οπής (Πηγή: Lajtai 1971)

## 1.9. Παράγοντες διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων

Όπως είναι γνωστό από τις εργαστηριακές δοκιμές, ο πλήρης καταναγκασμός της διαστολής στα άκρα, η λυγηρότητα, ο όγκος, η ταχύτητα της δοκιμής και η συμπεριφορά μετά τη μέγιστη αντοχή αποτελούν παράγοντες διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων. Έτσι και εδώ, για τον περιορισμό της επιρροής των παραγόντων αυτών θα πρέπει το πλάτος του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον 5 φορές τη διάμετρο της οπής για τη μείωση της επιρροής των άκρων και το πάχος αρκετό ώστε να

αποτρέψει το λυγισμό. Οι E.J.Dzik και E.Z.Lajtai (1996) χρησιμοποίησαν διάφορες συνοριακές συνθήκες στα πειράματά τους. Ενώ σε ένα τυπικό πείραμα οι χαλύβδινες πλάκες της μηχανής βρίσκονται σε απευθείας επαφή με το δοκίμιο, οι E.J.Dzik και E.Z.Lajtai έκαναν δοκιμές με τεφλόν μεταξύ πλάκας και δοκιμίου, με απευθείας επαφή και με την προσκόλληση πλάκας γρανίτη με κόλλα στο δοκίμιο ώστε να μην υπάρχει απευθείας επαφή με τις πλάκες της μηχανής. Σε όλες τις περιπτώσεις οι πρώτες ρωγμές διαδόθηκαν στο δοκίμιο σε παρόμοιες τάσεις με ασταθή ρυθμό. Έτσι κατέληξαν στο ότι η επίδραση των συνοριακών συνθηκών είναι περιορισμένη και οι συνέπειες που φαίνονται από τη διάδοση της ρωγμής μπορούν να αποδοθούν στην επίδραση του μεγέθους (**Dzik και Lajtai 1996**).

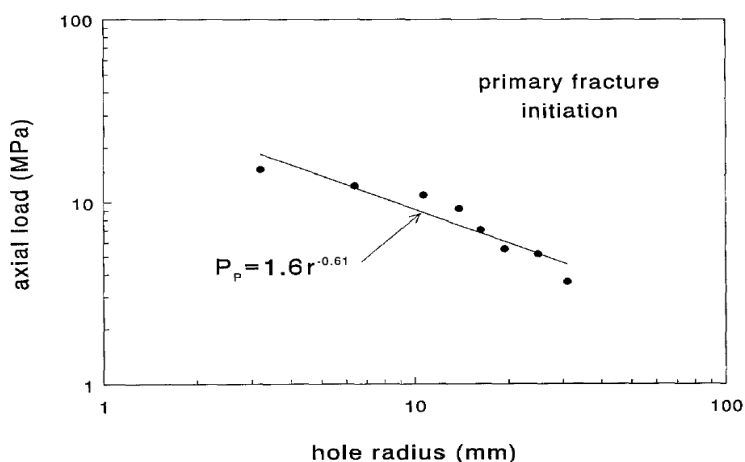
### **1.10. Το πεδίο των τάσεων και η ενέργεια παραμόρφωσης**

Οι περισσότερες θεωρίες αστοχίας βασίζονται σε ομοιογενή κατάσταση τάσεων, όμως στην πράξη τα περισσότερα πεδία τάσεων είναι ανομοιογενή. Ένα ομοιογενές πεδίο τάσεων αποτελεί μια θεωρία συμβατή με ομοιογενή και ισότροπα υλικά στα οποία ισχύουν οι νόμοι της μηχανικής του συνεχούς μέσου. Από τότε που η θεωρία του Griffith, σύμφωνα με την οποία οι ρωγμές ξεκινάνε στα όρια των ασυνεχειών του υλικού, έγινε παγκοσμίως αποδεκτή, όλες οι προσπάθειες ανάλυσης της ψαθυρής θραύσης έχουν ξεκινήσει με τη θεώρηση της μη συνέχειας. Αφού οι ασυνέχειες του υλικού δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων, η έναρξη ρωγμών από αυτές τις περιοχές μπορεί να ελέγχεται από τη βάρθρωση των τάσεων (stress gradients). Σε πολλές περιπτώσεις, η δημιουργία των ρωγμών ερμηνεύεται με την συγκέντρωση τάσεων. Η μέγιστη συγκέντρωση όπως περιγράφεται από τη θεωρία της ελαστικότητας δεν εξαρτάται από το απόλυτο μέγεθος των ασυνεχειών. Έτσι, η ρωγμάτωση σε ένα μεγάλο υπόγειο σπήλαιο θα ξεκινάει στην ίδια τάση με μια μικροσκοπική ασυνέχεια ίδιου σχήματος. Στη θραυστομηχανική, δουλεύοντας κυρίως με εφελκυστική φόρτιση, η **θεωρία συγκέντρωσης των τάσεων** χρησιμοποιείται μαζί με μια **ενεργειακή θεωρία**. Το ενεργειακό κριτήριο δεν έχει επεκταθεί ώστε να καλύψει τη θραύση ψαθυρών υλικών υπό θλιπτικό φορτίο γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην έλλειψη πληροφοριών όσον αφορά τις λεπτομέρειες του ενεργειακού ισοζυγίου κατά τη διάρκεια της ψαθυρής θραύσης. Στο ενεργειακό κριτήριο του Griffith λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις, η ενέργεια παραμόρφωσης και η επιφανειακή ενέργεια των ρωγμών [**Lajtai 1971**]. Ο Bieniawski έχει προτείνει κι άλλους τρόπους ανάλυσης ενέργειας που σε κάθε περίπτωση δεν περιλαμβάνουν την ενέργεια που διαχέεται κατά τα ακουστικά και σεισμικά φαινόμενα της ψαθυρής θραύσης [**Bieniawski 1968**].

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2., η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σώμα λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται από την φόρτιση, ονομάζεται ενέργεια παραμόρφωσης. Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου ονομάζεται πυκνότητα της

ενέργειας παραμόρφωσης και είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2 της παραγράφου 1.2.

Μια εναλλακτική προσέγγιση της θραυστομηχανικής, είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης [Gonano 1974]. Η μέθοδος αυτή σχετίζεται με την προσέγγιση της γραμμικά ελαστικής μηχανικής της θραύσης (LEFM) καθώς ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας σχετίζεται άμεσα με τη δυσθραυστότητα (Fracture toughness). Η μέθοδος αυτή έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την εξήγηση της επιρροής του μεγέθους στην αντοχή των τυπικών εργαστηριακών δοκιμών θλίψης [Baecher and Einstein 1981]. Βασική προϋπόθεση της παραπάνω μεθόδου είναι ότι η αρχή της ρωγμάτωσης συμβαίνει όταν ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης σε ένα κρίσιμο όγκο, τον όγκο του δοκιμίου στο 90% της μέγιστης τάσης τουλάχιστον, φτάσει μία κρίσιμη τιμή. Κατά συνέπεια, για τις ρωγμές των δοκιμίων, η εξάρτηση του μεγέθους ελέγχεται πρωτίστως από την κλίση της τροπής, τον κρίσιμο όγκο και την κρίσιμη επιφάνεια. Παρά το γεγονός ότι οι τρεις αυτές παράμετροι δεν είναι αυστηρώς ανάλογες με το μέγεθος της οπής, η σχέση της τάσης έναρξης ρωγμάτωσης γύρω από την οπή με το μέγεθος της οπής σε λογαριθμικό διάγραμμα φαίνεται ως ευθεία γραμμή [Gonano 1974].



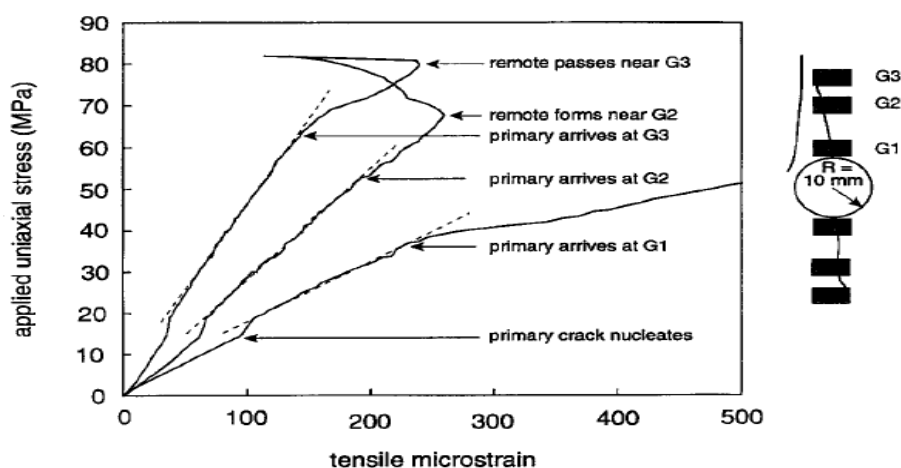
**Διάγραμμα 10**

Η θεωρία του ρυθμού απελευθέρωσης της κρίσιμης ενέργειας παραμόρφωσης προβλέπει γραμμική σχέση μεταξύ τάσης ρωγμάτωσης και μεγέθους της οπής σε λογαριθμικό διάγραμμα (Πηγή: Carter 1992)

### **1.11.Η παρατήρηση της ρωγμάτωσης μέσω μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges)**

Η έναρξη των ρωγμών φαίνεται από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης που λαμβάνονται από τα strain gauges. Οι E.J.Dzik και E.Z.Lajtai με πειράματά τους το

1996, παρατήρησαν ότι ο σχηματισμός της πρώτης ρωγμής υποδεικνύεται από τα αποτελέσματα των strain gauges που τοποθετούνται στις περιοχές που αναμένουμε τη δημιουργία τους σύμφωνα με τη θεωρία του Carter. Για τις αρχικές και τις θλιπτικές, η ρωγή ξεκίνησε στην περίμετρο του ανοίγματος. Για μεγαλύτερες διαμέτρους οπών, μπορούσε να τοποθετηθεί strain gauge εσωτερικά της κυρτής επιφάνειας της κοιλότητας. Για τις μικρότερες διαμέτρους, το σημείο της δημιουργίας φάνηκε από το πρώτο strain gauge ακριβώς πάνω από την περίμετρο. Στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που ακολουθεί, φαίνεται η τοποθέτηση των strain gauges πάνω και κάτω από την κυκλική οπή των δοκιμίων των E.J.Dzik και E.Z.Lajtai (1996), το φορτίο στο οποίο δημιουργήθηκε η πρώτη ρωγή, τα φορτία στα οποία η ρωγή καταγράφηκε από τα υπερκείμενα strain gauges, καθώς και το φορτίο στο οποίο δημιουργήθηκε η πρώτη απομονωμένη (δευτερογενή) εφελκυστική ρωγή.

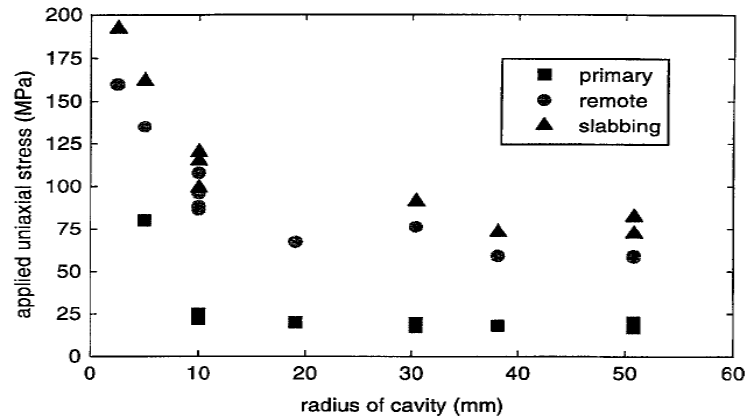


**Διάγραμμα 11**

Οι καταγραφές των strain gauges κατά τη θλίψη δοκιμίου γρανίτη διαστάσεων 750 x 500 x 100mm με οπή 10mm (Πηγή: *Dzik και Lajtai 1996*)

Η αξιολόγηση των στοιχείων των strain gauges περιλαμβάνει την προσωπική κρίση και την οπτική παρατήρηση του ερευνητή όσον αφορά την επισήμανση του σημείου έναρξης της ρωγμής. Για μεγάλα ανοίγματα, τα εσωτερικά strain gauges δείχνουν καθαρά το σημείο έναρξης που είναι το σημείο διαρροής ή εκτροπής του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης. Η αξιολόγηση των στοιχείων των εξωτερικών strain gauges είναι πιο περίπλοκη. Γενικά όλα τα τροπόμετρα γειτονικά του σημείου έναρξης πρέπει να δείξουν κάποια σημάδια διαταραχής. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο Young) που υπολογίζεται από τα τροπόμετρα στα σημεία συγκέντρωσης των εφελκυστικών τάσεων, δεν αντανακλά τις ιδιότητες του βράχου όπως κάνουν άλλα τροπόμετρα πιο μακριά από το άνοιγμα. Όπως είναι αναμενόμενο και από τη θεωρία, η τάση δημιουργίας των ρωγμών για όλους τους τρεις τύπους ρωγμών εξαρτάται από το μέγεθος των οπών με τις μικρές διαμέτρους να είναι πιο ευαίσθητες (όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος τόσο μεγαλύτερη τάση

απαιτείται για να εμφανιστεί η ρωγμή) [Dzik και Lajtai 1996]. Το παραπάνω συμπέρασμα φαίνεται στο διάγραμμα 12 που ακολουθεί.



**Διάγραμμα 12**

Σημείο έναρξης των αρχικών, απομονωμένων και θλιπτικών ρωγμών σε συνάρτηση με την διάμετρο της οπής (Πηγή: Dzik και Lajtai 1996)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

---

#### 2.1. Τα μηχανικά κύματα

Ο ήχος είναι η αίσθηση του προκαλείται λόγω της διέγερσης των αισθητηρίων οργάνων της ακοής από μεταβολές πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτές οι μεταβολές διαδίδονται με τη μορφή ηχητικών κυμάτων. Το μηχανικό κύμα είναι ο μηχανισμός διάδοσης μιας ταλάντωσης και γενικότερα μιας διαταραχής σε ένα υλικό μέσο. Με το κύμα μεταφέρεται ενέργεια από την πηγή παραγωγής του αλλά όχι μάζα. Ανάλογα με το μηχανισμό διάδοσης, τα μηχανικά κύματα διακρίνονται σε εγκάρσια και διαμήκη. Το μέσο διάδοσης των κυμάτων μπορεί να είναι οποιοδήποτε στερεό, υγρό, αέριο. Τα χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη με τα οποία περιγράφουμε το κύμα και τα κυματικά φαινόμενα είναι η περίοδος ( $T$ ), η συχνότητα ( $f$ ) και το μήκος κύματος ( $\lambda$ ). Η σχέση που συνδέει τα μεγέθη αυτά ονομάζεται εξίσωση του κύματος:

$$c = \lambda f$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος

Τα κύματα που διαδίδονται στο χώρο με ορισμένη ταχύτητα λέγονται τρέχονται ή οδεύοντα ή διαδιδόμενα κύματα σε αντίθεση προς τα στάσιμα κύματα, τα οποία είναι παγιδευμένα σε συγκεκριμένο τμήμα του ελαστικού μέσου (συμβολή δύο κυμάτων ίδιας συχνότητας, ταχύτητας, πλάτους, ίδιας διεύθυνσης διάδοσης αλλά με αντίθετες φορές). Ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζουν η διεύθυνση της ταλάντωσης με τη διεύθυνση διάδοσης της ταλαντώσεως έχουμε τα εγκάρσια και τα διαμήκη κύματα. Στα πρώτα η εν λόγω γωνία είναι  $90^\circ$ , ενώ στα δεύτερα είναι  $0^\circ$ . Τα εγκάρσια διαθέτουν "όρη" και "κοιλιάδες", δηλαδή περιοδική μεταβολή του σχήματος του φορέως του κύματος (του ελαστικού μέσου δια του οποίου διαδίδεται το κύμα). Αντίθετα τα διαμήκη διαθέτουν "πυκνώματα" και "αραιώματα", δηλαδή περιοδική μεταβολή της πυκνότητας του φορέως του κύματος. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο δια μέσου των στερεών σωμάτων. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται δια μέσου όλων των στερεών, υγρών και αερίων σωμάτων.

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων διαμέσου ενός ελαστικού μέσου εξαρτάται κυρίως από το αν είναι εγκάρσιο ή διαμήκες και από τις ιδιότητες του ελαστικού μέσου, διότι η ενέργεια μεταβιβάζεται από το ένα μόριο στο άλλο, εξ αιτίας της σύζευξης που υπάρχει ανάμεσα τους. Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους τύπους:



$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}}$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)}, G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$$

**όπου,**  
 $V_p$  η ταχύτητα διάδοσης διαμήκους  
 $V_{ση}$  ταχύτητα διάδοσης διατμητικού  
(εγκάρσιου)  
 $E$  το μέτρο ελαστικότητας,  
 $\nu$  ο λόγος Poisson  
 $K$  το μέτρο ελαστικής συστολής  
 $G$  το μέτρο διάτμησης.

Κάθε πέτρωμα διαθέτει τη χαρακτηριστική του ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και έτσι είναι δυνατή μια έμμεση εκτίμηση για τις μηχανικές του ιδιότητες. Έχοντας ως μέσο διάδοσης το πέτρωμα, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εξαρτάται από την πυκνότητα του πετρώματος και τις ελαστικές του ιδιότητες. Τα μηχανικά κύματα κατά τη διάδοσή τους, ανακλώνται σε μικροσκοπικές επιφάνειες με συνέπεια τη μεταβολή της ταχύτητάς τους. Στα πετρώματα οι μέθοδοι που αξιοποιούν τη διάδοση των μηχανικών κυμάτων καταγράφουν υπερήχους. Αφού το μηχανικό κύμα έχει την ανακλαστική ιδιότητα, οι ασυνέχειες της δομής του πετρώματος (γεωλογικά ή τεκτονικά χαρακτηριστικά, κλπ) θα το επηρεάζουν και άρα θα υπάρχει διαφορά ταχύτητας ανάμεσα σε δυο καταστάσεις του πετρώματος, δηλαδή την αρρήκτη και τηνρωγματωμένη. Τα δομικά χαρακτηριστικά στα πετρώματα είναι πολύ περισσότερα και σε μεγαλύτερη κλίμακα από αυτά που παρατηρούμε στις εργαστηριακές δοκιμές και αυτό έχει σημαντική επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της μάζας του πετρώματος [Μπακογιάννης Σ. 2011]. Από την πλευρά της βραχομηχανικής, οι ασυνέχειες και τα ρήγματα έχουν πολύ μεγάλη σημασία καθώς δημιουργούν συνεχείς, συχνές και σχεδόν λείες επιφάνειες διαχωρισμού, οι οποίες διαχωρίζουν τα άρρηκτα τεμάχια του βράχου που μπορούν να ολισθήσουν το ένα πάνω στο άλλο. Μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή του πετρώματος προσδιορίζεται εξ ολοκλήρου από τις ιδιότητες των ασυνεχειών και αυτή η κατάσταση οδηγεί στη διάκριση ανάμεσα στη συμπεριφορά του "πετρώματος" και της "μάζας του πετρώματος" [Jaeger and Cook 2007].

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τη φόρτιση ενός ψαθυρού υλικού επέρχεται σπάσιμο των δεσμών και δημιουργία νέων επιφανειών που λειτουργούν σαν συγκεντρωτές τάσεων μέχρις ότου η διάδοσή τους να οδηγήσει στη θραύση. Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων υπερβεί μια οριακή τιμή, τότε απελευθερώνεται απότομα η συσσωρευμένη ενέργεια η οποία διαδίδεται μέσα στο υλικό με τη μορφή ελαστικών κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως **Ακουστική Εκπομπή**. Ακουστική Εκπομπή από πέτρωμα που φορτίζεται κοντά στο σημείο αντοχής μπορεί να γίνει αντιληπτή με την ανθρώπινη ακοή (20-20000 Hz) σε σκληρά πετρώματα όπως γρανίτες, αλλά το πεδίο των συχνοτήτων μπορεί να διευρυνθεί με τη βοήθεια ενισχυτών. Το γενικότερο πεδίο μελέτης έγκειται στην "μικροσεισμική δραστηριότητα" των πετρωμάτων [Μπακογιάννης Σ. 2011]

## **2.2.Ακουστική εκπομπή**

### **2.2.1.Ορισμός**

Με βάση τον ορισμό της **ASTM**, η **Ακουστική Εκπομπή** (Acoustic Emission AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή των κυμάτων αυτών μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση, ή η έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Πηγές ακουστικής εκπομπής μπορεί να δημιουργηθούν και κατά την τήξη του υλικού και την αλλαγή φάσεως, λόγω θερμικών τάσεων.

Η AE των πετρωμάτων εντοπίζεται μέσω αισθητήρων στην επιφάνεια ενός υλικού, οι οποίοι διεγείρονται από την ταλάντωση των σωματιδίων του υλικού και μετατρέπουν την διέγερση αυτή σε διαφορά δυναμικού μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και είναι ικανοί να εντοπίσουν δομικές ατέλειες σε πολύ πρώιμο στάδιο οι οποίες όμως είναι ενεργές και πιθανώς κρίσιμες σε συγκεκριμένα φορτία. Η τεχνική της AE δε δίνει πληροφορίες για το μήκος και το βάθος των ατελειών και δεν προσδιορίζει άμεσα βασικές μηχανικές παραμέτρους όπως η τάση ή η παραμόρφωση, αλλά κατατάσσει τη δραστηριότητα και κρισιμότητα σε κατηγορίες καθορίζοντας έτσι τη μηχανική ευστάθεια μιας δομής ή ενός δείγματος όταν αυτό υποβάλλεται σε τάση ή παραμόρφωση [**Κυπριωτάκη 2012**].

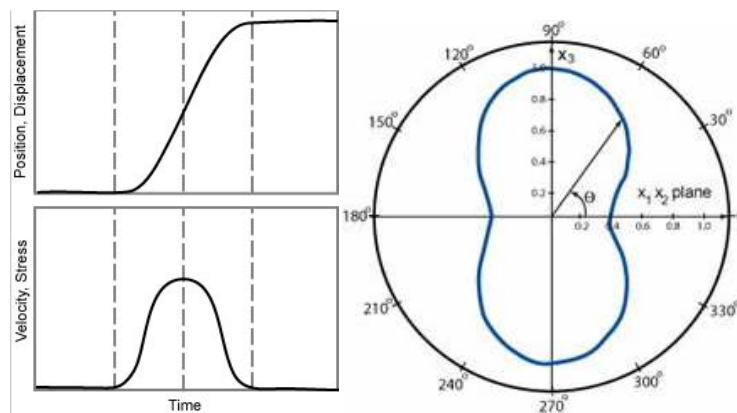
Η Ακουστική Εκπομπή, ως μέθοδος **Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ)** βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων αυτών σε ηλεκτρικά σήματα με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που διεγείρονται σε συχνότητες υπερήχων από 25 ως 1200 kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατασκευής, ενώ στο σημείο επαφής τους με την κατασκευή τοποθετείται συνήθως κάποιο παχύρρευστο υγρό (couplant). Το ηλεκτρικό σήμα κάθε αισθητήρα ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία από κατάλληλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Ο Μη-Καταστροφικός Έλεγχος με Ακουστική Εκπομπή αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επιθεώρηση υλικών, τη μελέτη μηχανισμών πλαστικής παραμόρφωσης, θραύσης και διάβρωσης που παρέχει άμεσες πληροφορίες σχετικές με την απόκριση και τη συμπεριφορά ενός υλικού υπό τάση, που σχετίζονται με την αντοχή του, τη συσσώρευση βλάβης και την έναρξη αστοχίας του. Η Ακουστική Εκπομπή βρίσκει εφαρμογή και στην παρακολούθηση χημικών αντιδράσεων όπως για παράδειγμα τη διαδικασία διάβρωσης ή τους μετασχηματισμούς φάσης. Η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής πλεονεκτεί έναντι των συμβατικών μεθόδων ΜΚΕ, στους ακόλουθους τομείς:

- ✓ Μεγαλύτερη ευαισθησία.
- ✓ Έγκαιρη και ταχεία διάγνωση ατελειών.
- ✓ Έλεγχος σε πραγματικό χρόνο.
- ✓ Μείωση κόστους.
- ✓ Εντοπισμός περιοχής βλάβης.

- ✓ Μείωση του χρόνου ελέγχου, καθώς δεν απαιτείται σάρωση της επιφάνειας, ούτε πολλαπλές δοκιμές από διαφορετικές θέσεις ελέγχου.
- ✓ Ελάχιστη καταστροφή εξωτερικής μόνωσης.
- ✓ Τεχνητή Νοημοσύνη / Βάσεις Δεδομένων: οι σύγχρονες μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης έχουν καταστήσει δυνατή τη συσσώρευση εμπειρίας πολλαπλών δοκιμών σε έμπειρα συστήματα για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών [<http://www.envirocoustics.gr/>].

### 2.2.2. Βασικές αρχές διάδοσης των ελαστικών κυμάτων

Ένα πρωτογενές κύμα που απελευθερώνεται από την πηγή ΑΕ φαίνεται στο διάγραμμα θέσης-χρόνου που ακολουθεί. Η κυματομορφή της μετατόπισης είναι μια συνάρτηση βήματος (step function) που αντιστοιχεί στην μόνιμη δομική αλλαγή του υλικού που σχετίζεται με τις διεργασίες στην πηγή. Οι κυματομορφές της ταχύτητας και της τάσης έχουν τη μορφή συναρτήσεων παλμών. Το πλάτος και το ύψος του παλμού εξαρτάται από τη δυναμική της πηγής. Πηγές όπως μικροσκοπικές ρωγμές, ολοκληρώνονται σε χρόνο της τάξης των μερικών μς γι' αυτό και ο παλμός είναι μικρός σε διάρκεια. Το πλάτος και η ενέργεια του παλμού ποικίλουν ανάλογα με το είδος της πηγής (π.χ. από μικροσκοπικές εκτοπίσεις έως μετακινήσεις έως διάδοση ρωγμών).



**Εικόνα 1**

Το κύμα στην πηγή ως ένας εντατικός παλμός τάσης που αντιστοιχεί σε μία μόνιμη ζημία του υλικού

Γωνιακή εξάρτηση της ΑΕ που εκπέμπεται από μια επεκτεινόμενη μικρορωγμή. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κατευθύνεται στις 90° και 270°, κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής

(Πηγή: [http://www.ndt-ed.org/index\\_flash.htm](http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm))

Τα κύματα ξεκινάνε από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις έχοντας συχνά μια ισχυρή κατευθυντικότητα ανάλογη της φύσης της πηγής όπως φαίνεται στην επάνω δεξιά εικόνα 1. Η ταχεία κίνηση είναι απαραίτητη για την εμφάνιση ενός αρκετά μεγάλου ποσοστού ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την παραμόρφωση ως ακουστική εκπομπή. Καθώς το πρωτογενές κύμα διαδίδεται εντός

του υλικού η μορφή τους μεταβάλλεται σημαντικά. Θεωρίες πηγής και κίνησης των ελαστικών κυμάτων διερευνώνται για την εξακρίβωση της πολύπλοκης σχέσης μεταξύ του παλμού στην πηγή ΑΕ και της συνοδευόμενης κίνησης στη θέση ανίχνευσης.

Το σήμα που ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα είναι συνδυασμός πολλών τμημάτων της αρχικής κυματομορφής. Όπως η ΑΕ φεύγει από την πηγή, το κύμα διαδίδεται σφαιρικά και ανακλάται από τα όρια του αντικειμένου. Τα σήματα που είναι σε φάση μεταξύ τους όπως φτάνουν τον αισθητήρα προκαλούν συμβολή και σε αυτά οφείλεται συνήθως το μεγάλο πλάτος των κυματομορφών που ανιχνεύονται. Η αλληλεπίδραση των κυμάτων με φυσικές και τεχνητές ασυνέχειες στο υλικό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση, τη διασκόρπιση, τη σκέδαση και τις πολλαπλές διαδρομές, η γνώση των οποίων είναι πολύ σημαντική στην αναγνώριση και κατανόηση των κυματομορφών [<http://www.ndt-ed.org/>]. Στη συνέχεια, αναλύεται η έννοια της εξασθένησης η οποία θα προσδιοριστεί και στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

#### **Εξασθένηση (attenuation)**

Η ένταση ενός σήματος ΑΕ που ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα εξαρτάται από την απόσταση του αισθητήρα από την πηγή. Όσο πιο κοντά είναι στην πηγή ο αισθητήρας, τόσο υψηλότερη ένταση ανιχνεύει. Αυτό οφείλεται στην εξασθένηση. Υπάρχουν τρεις βασικές αιτίες εξασθένησης. Η πρώτη είναι η **γεωμετρική εξασθένηση** σύμφωνα με την οποία, καθώς ένα κύμα ΑΕ φεύγει από την πηγή, το πλάτος του μειώνεται καθώς μεγαλώνει η απόστασή του από αυτήν. Η εξήγηση είναι απλή και οφείλεται στην διατήρηση της ενέργειας. Η δεύτερη αιτία είναι η **απόσβεση λόγω του μέσου διάδοσης** σύμφωνα με την οποία το πλάτος μειώνεται εκθετικά με την απόσταση. Καθώς το κύμα ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό, η ελαστική και η κινητική του ενέργεια απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω της παραμόρφωσης του μέσου διάδοσης. Η τρίτη αιτία είναι η **σκέδαση των κυμάτων** σύμφωνα με την οποία οι γεωμετρικές ατέλειες (π.χ. όρια των κόκκων) και τα κατασκευαστικά όρια του υλικού, ανακλούν μερική από την ενέργεια του κύματος. Η εξασθένηση στα υλικά μπορεί να μετρηθεί με μια πολύ απλή διαδικασία γνωστή ως **μέθοδος Hsu-Nielsen** η οποία αναλύεται στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο της προετοιμασίας των δοκιμίων [<http://www.ndt-ed.org/>]

### **2.2.3. Ιστορική αναδρομή στις μελέτες Ακουστικής Εκπομπής**

Η εκπομπή των υπερήχων από τα πετρώματα όταν αυτά βρίσκονται υπό δυναμική καταπόνηση, έχει διερευνηθεί αρκετά στο παρελθόν έτσι ώστε να φανεί αν μπορεί να προσφέρει κάτι στην μελέτη θεμελιωδών μηχανισμών της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων και κατά πόσο είναι ικανή να προβλέψει τη θραύση αλλά και το είδος της σε εφαρμογές μηχανικού.

Η παλαιότερη και πρώτη εργασία πάνω στο αντικείμενο έγινε από τον **F. Kishinoue το 1933** στο Ινστιτούτο Σεισμικών Ερευνών του Τόκιο. Αφορούσε την ύπαρξη δυναμικών φαινομένων φόρτισης σε δοκίμια ξύλου κάτω από καμπτική φόρτιση. Ο Kishinoue τοποθέτησε τη βελόνα φωνογράφου στην πλευρά που βρισκόταν υπό φόρτιση καθώς επέβαλε το ξύλο σε κάμψη.

Πρώιμες μελέτες επίσης έγιναν στη Γερμανία από τον **F. Forster, 1936**. Με αντικείμενο τις εκπομπές Ακουστικής Εκπομπής λόγω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού σε σιδηρο-νικελιούχο δοκίμιο. Η μικροσεισμική μέθοδος ανακαλύφθηκε σχεδόν τυχαία από τον **Obert [1938]** (US Bureau of Mines) όταν διεξήγαγε πειράματα για τη συσχέτιση ταχύτητας σεισμικών κυμάτων με το φορτίο που επιβαλλόταν στους στύλους πετρώματος, σε μεταλλείο μολύβδου-ψευδαργύρου. Στις μετρήσεις του συχνά παρεμβάλλονταν σήματα που όλα έδειχναν ότι εκέμπονταν από το στύλο. Τα επόμενα χρόνια οι **Obert** και **Duvall** έδειξαν σε εργαστηριακά και *insitu* πειράματα ότι η εμφάνιση τέτοιων σημάτων αυξανόταν με την αύξηση του φορτίου. Τις δεκαετίες **1950** και **1960** άρχισε η ανάπτυξη μεθόδων ΑΕ σε μεταλλεία στον Καναδά, Ευρώπη, Νότιο Αφρική με σκοπό τη μελέτη της ευστάθειας των μεταλλείων και πιο συγκεκριμένα η πρόβλεψη εκτινάξεων βράχου (rockburst), η ευστάθεια της οροφής και ο προσδιορισμός υψηλά φορτισμένων περιοχών. Αξιοσημείωτη είναι η δουλειά του **Cook (1963)** ο οποίος ανέπτυξε ένα σύστημα καταγραφής από έως και 8 γεώφωνα σε μαγνητική ταινία για χρονική περίοδο μιας συνεχόμενης ημέρας και κατάφερε να προσδιορίσει με σημαντική ακρίβεια τη θέση της πηγής χωρίς ψηφιακά καταγραφικά. Οι **Iannacchione et al. (2000, 2005)** αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστολίθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Οι **Choudhury et al. (2004)** αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού. Ο **Mukhopadhyay (2001)** συσχέτισε την ποιότητας της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης. Άλλες εφαρμογές της ΑΕ *insitu* έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρηνή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser (**Paterson and Wong 2005**). Από την δουλειά των **Obert και Duvall (1942, 1945)**, έχουν γίνει πολλές πειραματικές μελέτες που συσχετίζουν τον αριθμό των ακουστικών γεγονότων ανά μονάδα τάσης όταν το φορτίο τείνει αυξανόμενο προς τη μακροσκοπική τάση θραύσης. Αυτές οι διαπιστώσεις γίνονται σε φόρτιση μονοαξονική, τριαξονική καθώς και σε διάτμηση ή και κάμψη. Δεν είναι πάντα εύκολος ο προσδιορισμός ενός κατωφλιού τάσης, δηλαδή πότε θεωρούμε ότι ξεκινά η μικροαστοχία του πετρώματος και άρα η ακουστική εκπομπή που λαμβάνεται είναι απόρροια της. Ωστόσο, γίνεται πάντοτε αντιληπτή κατά τις ανώτερες τιμές φόρτισης. Ο **Mogi (1967, 1969)** πρότεινε ότι σε ομοιογενή πετρώματα αυτό το στάδιο δεν

εκδηλώνεται παρά μόνο πολύ κοντά στην μακροσκοπική τάση θραύσης, γενικά όμως εκδηλώνεται κατά την έναρξη της μικρορωγμάτωσης ενός πετρώματος. Η Ακουστική εκπομπή σε δοκιμές κυκλικής φόρτισης έχει επίσης ερευνηθεί εκτενώς (αρχή **Goodman 1963**). Σε μερικές από αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι αρχίζει από μεγαλύτερη τάση που επιτεύχθηκε στον προηγούμενο κύκλο, γεγονός γνωστό ως "**φαινόμενο Kaiser**". Ωστόσο στα πετρώματα το φαινόμενο δεν μπορεί να διακριθεί εύκολα, ειδικότερα σε υψηλές τάσεις κοντά στο όριο θραύσης (**Lockner 1993**). Μέχρι εδώ οι δοκιμές αφορούσαν τη καταμέτρηση των ακουστικών γεγονότων, χωρίς αναφορά στη φύση τους. Σχεδόν όλη η πρώιμη έρευνα επικεντρωνόταν μόνο σε αυτό και αυτό εξακολουθεί να παραμένει μέχρι σήμεριδιαίτερου ενδιαφέροντος. Ωστόσο, ένας αριθμός προσπαθειών έχουν γίνει για τον περαιτέρω χαρακτηρισμό της ακουστικής εκπομπής βάση πλάτους συχνοτήτων και της ενέργειας των ακουστικών παλμών. Πειραματικά αυτή η προσπάθεια είναι δύσκολη καθώς οι παρατηρήσεις επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού καταγραφής, από τις ακουστικές ιδιότητες του δοκιμίου και από τη συσκευή φόρτισης.

Η χρήση επίπεδης επιφάνειας μορφοτροπέων και ευρύτερου ηχητικού φάσματος ενισχυτών έδειξε ότι η κυρίαρχη συχνότητα στην οποία εκπέμπονται τα γεγονότα βρίσκεται προς το τέλος του υπερηχητικού φάσματος (π.χ. **Suzuki et al. 1964**), παρόλο που δεν είναι πάντοτε αυτή η περίπτωση (π.χ. **Chugh, Hardy and Stefanko 1972**). Ποσοτικές έρευνες έχουν γίνει γύρω από το πλάτος συχνότητας των ακουστικών γεγονότων, από τις οποίες μπορούμε να λάβουμε την κατανομή ενέργειας (π.χ. **Hardy, Stefanko, Chugh 1972 κλπ**). Διαφορετική προσέγγιση, ανάλογη με αυτή της σεισμολογίας, είναι η μελέτη του μεγέθους του ενεργειακού περιεχομένου των ακουστικών γεγονότων ως συνάρτηση της σχετικής τους συχνότητας εμφάνισης. Έτσι, έχει αποδειχθεί ότι είναι εφαρμόσιμη η συνήθης σχέση της σεισμολογίας σύμφωνα με την οποία η συχνότητα εμφάνισης ενός γεγονότος μειώνεται όσο το μέγεθος του αυξάνεται. Ειδικότερα η σχέση **Gutenberg – Richter** για τη στατιστική σεισμολογία δίνεται από τη σχέση:

$$\log N(M) = a - bM$$

όπου  
N είναι ο αριθμός σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο από M,  
a, b σταθερές.

Για γεγονότα ακουστικής εκπομπής το μέγεθος του γεγονότος συνήθως υποτίθεται ανάλογο με το μέγιστο πλάτος του κύματος που καταγράφεται από τον αισθητήρα και ο παραπάνω ενεργειακός νόμος φαίνεται ότι ισχύει και για ακουστικές εκπομπές σε ψαθυρά πετρώματα (π.χ. **Weeks, Lockner, Byerlee 1978, Meredith, Main, Jones 1990**). Σε μια περαιτέρω αναλογία με τη σεισμολογία, ο **Mogi** και ο **Scholz** επεσήμαναν την ομοιότητα μεταξύ μετασεισμικών ακολουθιών και της παρατηρούμενης ακουστικής εκπομπής που έπεται της αστοχίας σε εργαστηριακά δοκίμια (π.χ. **Scholz 1968b, Lockner 1993**). Η σχέση μεταξύ ακουστικής δραστηριότητας και μικροαστοχίας έχει παρατηρηθεί άμεσα στον πάγο και στο γυαλί. Επίσης οι **Hardy** και **Hardling (1972)**, έχουν δείξει ότι σε γρανίτη που υπόκειται σε

σταθερή θλιπτική μονοαξονική τάση τα πιο σημαντικά ακουστικά γεγονότα σχετίζονται άμεσα με μικρά άλματα στην παραμόρφωση. Είναι πλέον αποδεκτό ότι η ακουστική εκπομπή είναι ένας ικανός δείκτης της ύπαρξης μικροαστοχιών σε δείγματα πετρωμάτων. Η ακουστική εκπομπή είναι επίσης χρονικά εξαρτημένη καθώς παρατηρείται να συνεχίζει σε μια δεδομένη τιμή φόρτισης ακόμη και όταν το φορτίο παραμένει σταθερό. Αυτό το φαινόμενο γίνεται καλύτερα κατανοητό σε πειράματα ερπυσμού σε θερμοκρασία δωματίου. Εξίσου σημαντικό ρόλο παρουσιάζει η παρουσία νερού λόγω της διαβρωτικής επίδρασης στις επιφάνειες. Διάφορες αναλύσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών των σημάτων γίνονται επικεντρωμένες στην ενέργεια που μεταφέρει η κυματομορφή. Μεγέθη όπως το RMS (**Root Mean Square, Volts**), ανάλογο του μεγέθους της ενέργειας που απελευθερώνεται, και το ASL (**Average Signal Level, dB**) ανάλογο του “μέσου” διαρκώς μεταβαλλόμενου πλάτους της κυματομορφής. Και τα δυο αυτά μεγέθη συσχετίζονται με τη φόρτιση και δείχνουν αύξουσα συμπεριφορά μέχρι, περίπου, το 95% της φόρτισης οπότε και αυξάνονται απότομα έως τη θραύση. Βάση του ορισμού ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος εμφάνισης ενός γεγονότος τόσο μικραίνει η συχνότητά του, ο συντελεστής  $b$  αυξάνεται έως κάποιο ποσοστό του μέγιστου φορτίου (~ 95%-96%) και ακολούθως φθίνει απότομα. Τούτο είναι εύλογο γιατί πλέον η ρωγμάτωση στο εσωτερικό του δοκιμίου έχει αναπτυχθεί και παράγει σήματα πλάτους συχνοτήτων στο εύρος των 100dB [Μπακογιάννης 2011]. Η ακουστική εκπομπή έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα πειραμάτων από ερευνητές όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί:

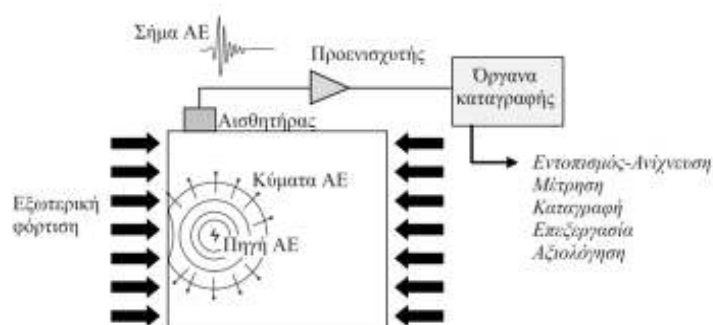
Πίνακας 1 (Πηγή: Hardy, 2003)

Χρονολογία / Ερευνητής	Περιοχή μελέτης
<b>Early Studies</b>	
1939 Obert and Duvall (USA)	Hardrock mines
1940 <sup>2</sup> USA/Canada/USSR	Various field applications
1953 Buchheim (Germany)	Coal and salt mine studies
1955 Crandel (USA)	Tunnel safety
1959 Vinogradov (USSR)	Mine studies
1962 Beard (USA)	Tunnel safety
<b>Transitional Studies</b>	
1963 Cook (South Africa)	Rock bursts
1964 Susuki et al. (Japan)	Mine studies
1965 Neyman et al. (Poland)	Coal mine safety
1966 Scholz (USA) Mogi (Japan)	Source location techniques
1967 Goodman and Blake (USA)	Slope stability
1969 Duvall, Blake and Leighton (USA)	Rock bursts
1970 Stas et al. (Czechoslovakia)	Rock bursts
1970 Baule et al. (Germany)	Rock bursts
<b>Recent Studies</b>	
1971 Hardy (US A)	Coal mine safety Storage reservoir stability
1972 Koerner et al. (USA)	Soil studies
1975 Leighton (USA)	Coal mine safety
1976 Hayashi (Japan)	In-situ stress evaluation
1976 Albright (USA)	Hydraulic fracturing of geothermal reservoirs
1978 Will (Germany)	Coal mine safety
1978 McKavanagh and Enever (Australia)	Coal outbursts
1978 Van Zyl Brink (South Africa)	Rock bursts
1981 Flach and Hente (Germany)	Radioactive waste repository stability
1981 Albright and Pearson (USA) Gehl and Thoms	Salt cavern stability
1981 Frantti (USA)	Mine subsidence
1982 Olitsu (Japan)	Concrete
1982 Niitsuma (Japan)	Hydraulic fracturing of geothermal reservoirs
1983 Holcomb (USA) Hardy and Zhang (USA)	Kaiser Effect
1983 Baria et al. (UK)	Hydraulic fracturing of geothermal reservoirs
1984 Hardy (USA)	Sinkhole Monitoring Rock Slope Stability
1984 Young (Canada)	Rock bursts
1984 Wood and Harris (Australia)	Massive structures
1985 Carabelli (Italy)	Gravity dam stability
1985 Armstrong (USA)	Earthquake prediction
1985 Ge and Hardy (USA)	Transducer array geometry
1988 Taioli and Hardy	Acoustic waveguides
1990 Ge (Canada)	Source location optimization
1990 Niitsuma et al. (Japan)	Source location using spectral matrix analysis
1993 Niitsuma et al. (Japan)	Crack waves Triaxial doublet analysis
1995 Itakura et al. (Japan)	Fractural analysis



## 2.2.4.Η Λειτουργία της Ακουστικής Εκπομπής

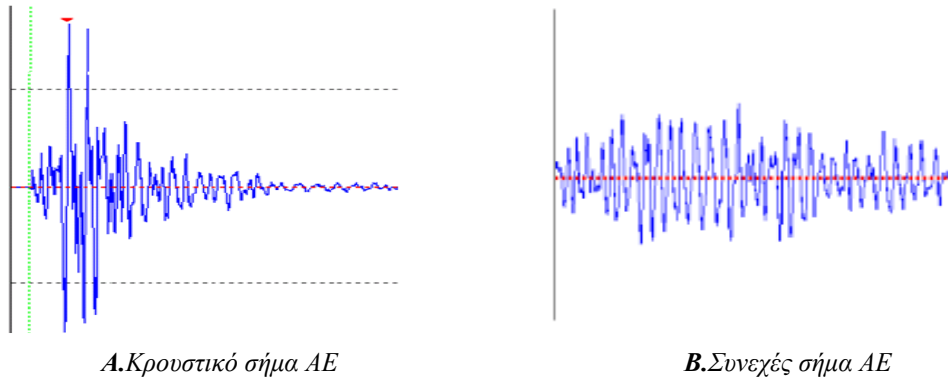
Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ.



**Εικόνα 2**

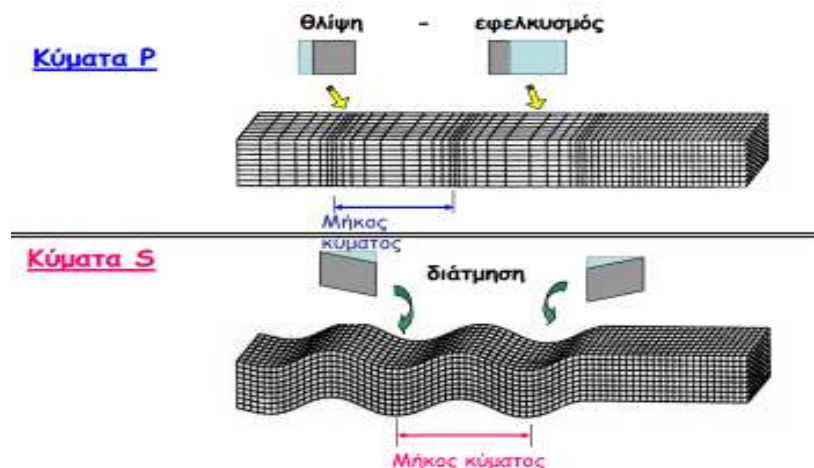
*Τρόπος λειτουργίας του συστήματος ακουστικής εκπομπής  
(Πηγή: Σοφιανός & Νομικός 2008)*

Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας. Το κύμα ΑΕ στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz έως μερικά MHz. Γενικά, το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή. Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, μπορούν να διακριθούν σε συνεχούς και κρουστικού τύπου ενώ τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ (hit driven data). Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ως προερχόμενο από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι μεγάλος τα σήματα τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα κρουστικό και ένα συνεχές κύμα [Σοφιανός & Νομικός 2008].



**Εικόνα 3.**  
 Δύο μορφές σήματος ΑΕ  
 (Πηγή: Σοφιανός & Νομικός 2008)

Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι τα περισσότερα σήματα ΑΕ/MS περιέχουν συνιστώσες κυμάτων χώρου, δηλαδή κυμάτων P και S. Συνοπτικά αναφέρουμε ότι τα P είναι διαμήκη κύματα που φτάνουν πρώτα από τον παλμό της ενέργειας στην πηγή και τα S είναι εγκάρσια κύματα που φτάνουν μετά τα P, είναι πιο αργά αλλά πιο καταστροφικά. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια σύντομη περιγραφή τους.



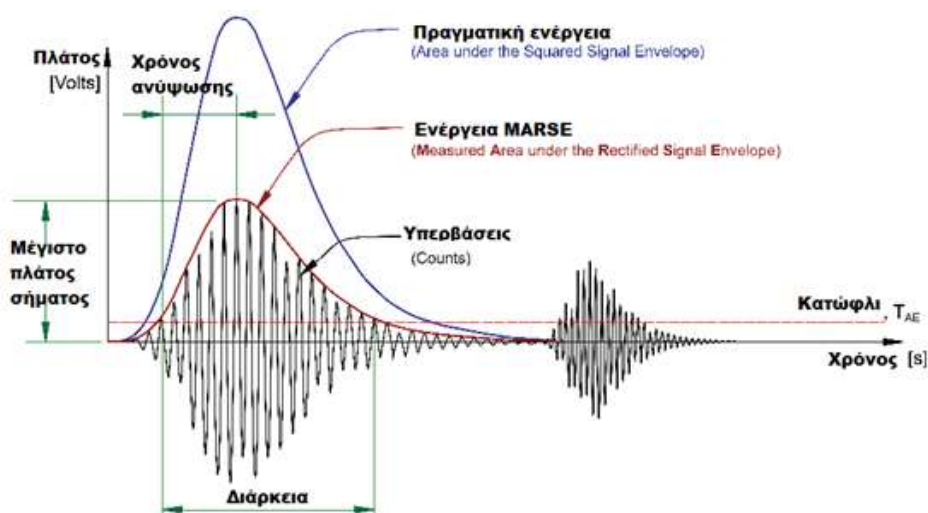
**Εικόνα 4.**  
 Τα P και S κύματα (Πηγή: Μπουκουβάλας 2011)

Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους URMS του καταγραφόμενου σήματος. Για το χαρακτηρισμό ενός κρουστικού τύπου σήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός μίας τάσης κατώφλιου (threshold) πάνω από το θόρυβο του περιβάλλοντος. Το κατώφλι καθορίζεται μεταξύ άλλων και από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ και το επιθυμητό μέγεθος καταγραφόμενων δεδομένων. Όταν το σήμα ΑΕ υπερβεί το κατώφλι τότε καταγράφεται ένας κτύπος (hit). Σε μία τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή χιλιάδες σήματα καθιστώντας την επεξεργασία και την αξιολόγηση ιδιαίτερα χρονοβόρα. 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 [Κατσικογιάννη 2006].

### 2.2.5. Παράμετροι γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής

Οι κύριες παράμετροι, που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου, είναι το **πλάτος** του σήματος (amplitude), ο **χρόνος ανύψωσης** (risetime) και η **διάρκεια του σήματος** (duration). Η παράμετρος “**απαριθμήσεις**” (counts) προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το **κατώφλι**, ενώ το πλάτος είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ΑΕ και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος. Το διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται **χρόνος ανύψωσης** (risetime). Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται γραφικά οι παραπάνω παράμετροι.



**Εικόνα 5**  
Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και οι βασικοί της παράμετροι  
(Πηγή: Unnhörsson 2013)

Το κατώφλι της ΑΕ στις δοκιμές το ορίζουμε συνήθως ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες και την ένταση του σήματος που αναμένουμε να καταγράψουμε. Μπορούμε επίσης να επιλέξουμε αν το θέλουμε σταθερό (fixed) σε μια τιμή της επιλογής μας, ή κυμαινόμενο (floating) σε περιπτώσεις υψηλού εξωτερικού θορύβου. Όταν ένα σήμα περάσει το κατώφλι, ανοίγει ένα κύκλωμα το οποίο πρέπει να κλείσει μόλις τελειώσει το σήμα και να ανοίξει ξανά μόλις ένα νέο σήμα περάσει το κατώφλι. Για να εξασφαλιστεί αυτό, το πρόγραμμα της ΑΕ μας επιτρέπει τη ρύθμιση κάποιων χρονικών παραμέτρων που είναι:

- ✓ **Hit Definition Time (HDT)** - Ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος έτσι ώστε να αποφευχθούν τις ανακλάσεις του

- ✓ **Hit Lockout Time (HLT)** - Ο χρόνος αναμονής του συστήματος ώσπου να ξεκινήσει νέα καταγραφή
- ✓ **Peak Definition Time (PDT)** - Ο μέγιστος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος.

Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι πρέπει να ισχύει  $HLT > HDT > 2 * PDT$ . Το πρόγραμμα **AEWin** της AE που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία προτείνει:

PDT	HDT	HLT
20-50	100-200	300

Αν το HDT είναι πολύ χαμηλό, τότε το σύστημα μπορεί να μην πιάσει τον κτύπο στο σύνολό του και πιθανόν να δείξει τον ένα κτύπο σαν πολλαπλούς. Αν η παράμετρος HLT είναι πολύ υψηλή, τότε το σύστημα μπορεί να μην καταγράψει το επόμενο σήμα AE, ενώ αν είναι πολύ χαμηλό τότε μπορεί να καταγράψει ανακλάσεις και αργές συνιστώσες των κτύπων που είναι ανεπιθύμητες. Αν το PDT είναι υψηλό, τότε είναι πιθανόν να καταγραφούν λανθασμένες τιμές του χρόνου ανύψωσης. Γενικά προτείνεται το PDT να είναι όσο πιο χαμηλό γίνεται αλλά πάλι όχι τόσο ώστε να μην αναγνωρίζεται η πραγματική κορυφή (**Unnhórssson 2013**).

Παρακάτω παραθέεται το «λεξικό» της μεθόδου AE, με όλους τους όρους και τις παραμέτρους που πρέπει να γνωρίσουμε για την κατανόηση του φαινομένου:

- **Δοκιμή [NDT]** : Δοκιμές οι οποίες δεν βλάπτουν τη μελλοντική χρησιμότητα και λειτουργικότητα προκειμένου να ανιχνεύσουν, εντοπίσουν, μετρήσουν και εκτιμήσουν ατέλειες για την αξιολόγηση της ακεραιότητας, ιδιοτήτων και σύνθεσης; και για τη μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
- **Ακουστική Εκπομπή (AE) [Acoustic Emission]** : Ελαστικά κύματα παραγόμενα από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από πηγές εντός ενός υλικού
- **Πηγή** : Η φυσική προέλευση ενός ή περισσοτέρων γεγονότων AE.
- **Συμβάν [Event]** : Τοπική αλλαγή εντός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- **Ενέργεια Πηγής [Source energy]** : Η ολική ενέργεια (όλων των μορφών) που διαχέεται από τις διεργασίες της πηγής.
- **Ενεργοποίηση (AE) [Activation]** : Η εκδήλωση AE λόγω εφαρμογής αιτίου (stimulus) όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λ.π.
- **Δραστηριότητα (AE) [Activity]** : Μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας, των γεγονότων.
- **Ανίχνευση (AE)** : Αναγνώριση της παρουσίας σήματος (πρακτικώς/τυπικώς επιτυγχάνεται όταν το σήμα διασχίζει το όριο ανίχνευσης).
- **Αισθητήρας : Μορφοτροπέας** που μετατρέπει τα κινούμενα κύματα AE σε ηλεκτρική τάση
- **Κανάλι [Channel]** : Ένας αισθητήρας AE και ο συναφής εξοπλισμός για ανίχνευση και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτόν.

- **Σήμα (AE)** : Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας)
- **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.
- **GuardSensors** : Αισθητήρες των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η εξάλειψη εξωτερικού θορύβου βασιζόμενοι στις διαφορές χρόνου άφιξης.
- **Χτύπος [Hit]** : Η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος AE σε ένα κανάλι.
- **Περιγραφή Σήματος [Signal Description]** : Το αποτέλεσμα της διαδικασίας: μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή του σήματος AE και/ή του περιβαλλοντικού του πλαισίου.
- **Χαρακτηριστικά Σήματος [Signal Features]** : Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος AE, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος AE, διάρκεια, counts και χρόνος ανύψωσης.
- **Hit Data Set**: Το σύνολο των χαρακτηριστικών ενός σήματος
- **Χρόνος Ανύψωσης [Risetime]** : Ο χρόνος στον οποίο ένα σήμα AE φτάνει στο μέγιστο του, αφότου διασχίσει για πρώτη φορά το όριο ανίχνευσης.
- **Πλάτος (AE) [Amplitude]** : Η μεγαλύτερη τιμή ηλεκτρικής τάσης στην κυματομορφή AE; συνήθως εκφρασμένη σε decibels.
- **Κατανομή Πλάτους [Amplitude Distribution]** : Αναπαράσταση του αριθμού των σημάτων AE συγκεκριμένου πλάτους, σχεδιασμένη ως συνάρτηση του πλάτους.
- **Απόσβεση [Attenuation]** : Απώλεια πλάτους με την απόσταση που διανύει το κύμα καθώς ταξιδεύει στην υπό δοκιμή δομή.
- **Counts** : Το πόσες φορές το σήμα AE διασχίζει το όριο ανίχνευσης. Επίσης γνωστό ως "ringdown counts", "threshold crossing counts"
- **Ενέργεια γεγονότος [Event Energy]** : Η ολική ελαστική ενέργεια (στην κυματομορφή) που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής.
- **Συχνότητα [Frequency]** : Για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στη μονάδα του χρόνου.
- **Ένταση [Intensity]** : Μέτρο του μεγέθους των ανιχνευθέντων σημάτων εκπομπής (π.χ. μέσο πλάτος, μέση ενέργεια AE ή μέσος όρος υπερβάσεων).
- **Ισχύς Σήματος [Signal Strength]**: Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος AE. Επίσης γνωστό ως "σχετική ενέργεια" (relative energy), "MARSE" και "ισχύς σήματος".
- **Parametric Inputs** : Περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. φορτίο, πίεση, θερμοκρασία) που μπορούν να μετρηθούν και αποθηκευτούν ως μέρος της περιγραφής των σημάτων AE.
- **Θέση πηγής [Location]**: Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων AE για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων των πηγών ακουστικής εκπομπής.
- **(Κύρια) Ζώνη [Primary Zone]** : Η περιοχή που περιβάλλει έναν αισθητήρα, από τον οποίο μπορεί να ανιχνευθεί AE, και από όπου η AE θα χτυπήσει τον αισθητήρα πριν χτυπήσει σε οποιοδήποτε άλλο αισθητήρα.
- **Συνεχής εκπομπή [Continuous emission]** : Ποιοτική περιγραφή του συνεχούς σήματος παραγόμενου από ταχέως εκδηλωνόμενα συνεχόμενα γεγονότα ακουστικής εκπομπής.
- **Φαινόμενο Felicity** (Το αντίστροφο του φαινομένου Kaiser) : Η παρουσία AE σε επίπεδα φόρτισης κάτω από την προηγούμενη μέγιστη.

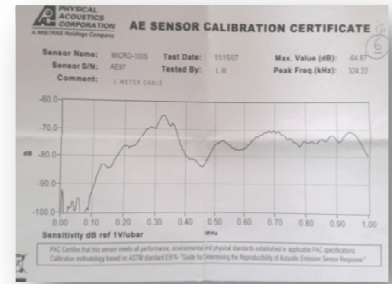
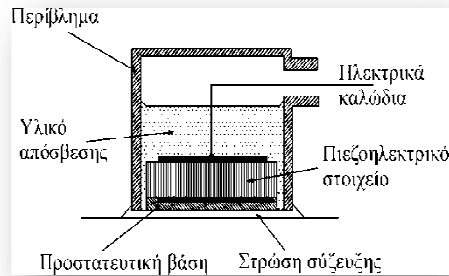
- **Φαινόμενο Kaiser :** Η απουσία ανιχνεύσιμης ακουστικής εκπομπής σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, έως ότου υπερβούμε τα προηγούμενα εφαρμοσθέντα επίπεδα φόρτισης.
- **kHz:** μονάδα μέτρησης (SI) της συχνότητας, 1000 κύκλοι ανά δευτερόλεπτο

Μετρώντας τις αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό γένεσης των σημάτων ΑΕ. Όμως αυτά τα συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή καθότι η κυματομορφή των σημάτων επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως η φύση του υλικού, η διαδρομή που ακολουθεί μέχρι την ανίχνευση του, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το καταγραφικό σύστημα. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί, ότι η συσσωρευμένη δραστηριότητα (N) και ο ρυθμός γεγονότων (NR) εξαρτώνται από την ευαισθησία του συστήματος παρακολούθησης και από το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (SNR). Οι παράμετροι πλάτος (A), ενέργεια (E), συσσωρευμένη ενέργεια (ΣΕ) και ρυθμός ενέργειας (ER) εξαρτώνται από τους προαναφερθέντες παράγοντες και επίσης από την απόκριση συχνότητας του γενικού συστήματος παρακολούθησης [Σοφιανός & Νομικός 2008].

## 2.2.6. Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ

### Αισθητήρες και προενισχυτές

Για την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα πρέπει να γνωρίσουμε την ευαισθησία του και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες είναι αυτοί του **πιεζοηλεκτρικού στοιχείου**. Αφορά ένα ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και **μορφοτροπείς** (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας-μορφοτροπέας φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 6**

2.1. Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC

2.2. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου

2.3. Πιστοποιητικό βαθμονόμησης αισθητήρων MICRO 100S, PAC (Πηγή: Εργαστήριο τεχνολογίας σηράγγων ΕΜΠ)

(Πηγή: Hardy, 2003)

Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ, οι αισθητήρες, τα καλώδια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα κτλ. περιλαμβάνουν θωράκιση για προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον. Σχετικά με τα ηλεκτρονικά τους κυκλώματα οι αισθητήρες μπορεί να είναι απλοί ή διαφορικοί. Ένας απλός αισθητήρας περιέχει ένα κρύσταλλο και είναι γενικά ευάλωτος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Αντίθετα, ο διαφορικός αισθητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να εξαλείφεται ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος. Συνίσταται από δύο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας και συνεπώς το ανιχνευόμενο κύμα ΑΕ παράγει δύο ηλεκτρικά σήματα αντίθετης πολικότητας. Τα σήματα μεταβαίνουν στη συνέχεια σε ένα διαφορικό προενισχυτή όπου ενισχύεται η διαφορά μεταξύ των σημάτων. Λόγω της αντίθετης πολικότητας των σημάτων η διαφορά τους είναι το διπλάσιο της εξόδου ενός μονού κρυστάλλου. Αντίθετα, οι EMI των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παράγουν σήματα της ίδιας πολικότητας και συνεπώς λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τη διαφορά των δύο σημάτων εξουδετερώνονται στον προενισχυτή. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα δείχνεται συνήθως σε διάγραμμα απόκρισης συναρτήσεως της συχνότητας (τάση εξόδου σε σχέση με τη συχνότητα).

Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Η ενίσχυση του πλάτους του σήματος ΑΕ είναι λογαριθμική σύμφωνα με τη σχέση (PhysicalAcousticsCorporation PAC, 2005):

$$dB = 20 * \log(V_{max} / 1 \mu\text{Volt}) - (\text{Ενίσχυση σήματος από τον ενισχυτή σε dB})$$

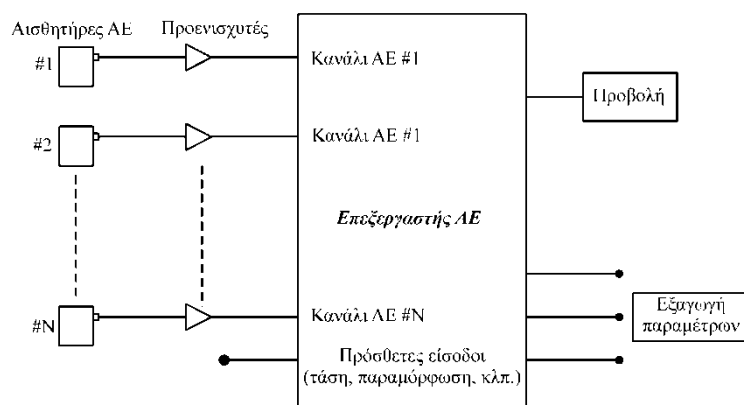
Γενικά, είναι προτιμότερο ο προενισχυτής να τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι EMI. Ορισμένες φορές είναι ενσωματωμένος στο περίβλημα του αισθητήρα και τότε περιέχει ένα φίλτρο συχνοτήτων για την απόρριψη του ανεπιθύμητου θορύβου. Εν τούτοις παράγουν και

αυτοί θόρυβο που σε συνδυασμό με το θόρυβο του αισθητήρα καθορίζει την ακρίβεια λήψης ενός σήματος ΑΕ.

Στα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης ΑΕ το ελάχιστο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί (πάνω από τον ηλεκτρονικό θόρυβο), είναι της τάξης των 4  $\mu\text{V}$  στην έξοδο ενός τυπικού μορφοτροπέα. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται συνήθως σε dB, όπου 1  $\mu\text{V}$  αντιστοιχεί σε 0 dB και 100 mV σε 40dB [Σοφιανός & Νομικός 2008].

### Μονάδα επεξεργασίας

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος (Αναστασόπουλος, 1998). Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



**Εικόνα 7**

*Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ  
(Πηγή: Σοφιανός & Νομικός 2008)*

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 (risetime), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.



Στην εικόνα 8 παρουσιάζεται μία κάρτα οχτώ καναλιών PCI - 8 καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustics Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα 8 κανάλια ΑΕ είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 Mega Bytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις καταφλιού, συνολικές υπερβάσεις καταφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κλπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα 8 κανάλια ΑΕ το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές εισοδοί) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές εισοδοί, που καταγράφουν ταυτόχρονα με την καταγραφή των δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωσή του [Σοφιανός & Νομικός 2008].



**Εικόνα 8**

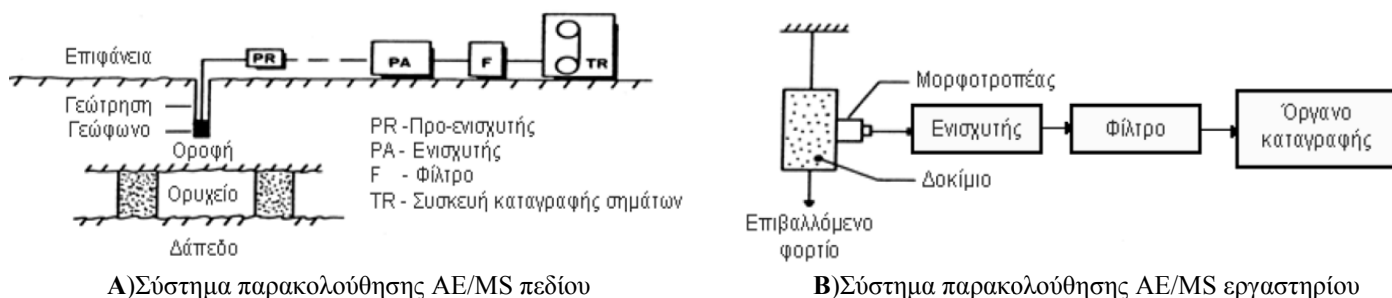
*Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων*

### **2.2.7.Εργαστηριακή και επι τόπου παρακολούθηση της ΑΕ**

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο είναι ουσιαστικά οι ίδιες. Όμως η κλίμακα και κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά συχνότητας του συστήματος παρακολούθησης, είναι διαφορετικά.

Το γενικό σύστημα παρακολούθησης περιλαμβάνει ένα μορφοτροπέα (transducer) ή μία συστοιχία μορφοτροπέων οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύσουν οποιαδήποτε δραστηριότητα εντός της υπό μελέτη κατασκευής, έναν ενισχυτή (amplifier), ένα σύστημα φιλτραρίσματος (filtering system) καθώς και ένα όργανο καταγραφής (recorder). Στην εικόνα 9 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό σύστημα παρακολούθησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει τη δραστηριότητα ΑΕ/MS α) σε ένα αβαθές ορυχείο και β) σε ένα εργαστηριακό δείγμα. Στην πρώτη περίπτωση ο μορφοτροπέας μπορεί να είναι ένα γεώφωνο (μετρητής ταχύτητας ταλάντωσης) τοποθετημένο σε κατάλληλη γεώτρηση

βάθους 8-30 m, το οποίο θα παρακολουθεί τις μεταβολές στην επίγεια ταχύτητα που προκαλούνται από την παρουσία της ακουστικής/μικροσεισμικής δραστηριότητας. Επειδή η έξοδος (output) του μορφοτροπέα είναι της τάξης των microvolts, κρίνεται απαραίτητη η χρήση προ-ενισχυτή προκειμένου να καταγραφεί. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας ενδιάμεσος προ-ενισχυτής και ένα φίλτρο συχνοτήτων (band-pass filter) προκειμένου να εξαλειφθούν τα ανεπιθύμητα σήματα χαμηλής και υψηλής συχνότητας (π.χ. θόρυβος βάθους). Οι μονάδες παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται εργαστηριακά είναι συνήθως πιο περίπλοκες από εκείνες που χρησιμοποιούνται στο πεδίο. Πολλά από τα εργαστηριακά συστήματα επεξεργάζονται τα σήματα AE/MS και παρέχουν παραμέτρους όπως η συνολική απαρίθμηση γεγονότων, ο ρυθμός γεγονότων, κλπ. Τέτοιες παράμετροι μπορούν να καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών μαζί με στοιχεία όπως το εφαρμοσμένο φορτίο, η παραμόρφωση των δειγμάτων, κλπ.



**Εικόνα 9**  
 Συστήματα παρακολούθησης AE/MS  
 (Πηγή: Hardy, 2003)

Και στις δύο περιπτώσεις, η μέτρηση της AE παρουσιάζει πολλές τεχνικές δυσκολίες. Στο εργαστήριο, η σχεδίαση κατάλληλων εγκαταστάσεων φόρτισης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Οι μονάδες φόρτισης δεν πρέπει να παραγάγουν μηχανικό θόρυβο που θα μπορούσε να ανιχνευθεί από το σύστημα ελέγχου και να ερμηνευθεί ως AE και εάν επιδιώκεται να αξιολογηθεί το συχνοτικό φάσμα της παρατηρηθείσας δραστηριότητας είναι απαραίτητο οι εγκαταστάσεις φόρτισης να παρουσιάζουν σταθερή απόκριση σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Στη μελέτη της AE στο πεδίο, οι ανθρώπινες και οι βιομηχανικές πηγές παράγουν θόρυβο χαμηλής σχετικά συχνότητας (100 Hz έως 20 kHz) που περιπλέκει τη διαδικασία καταγραφής. Επίσης, σημαντική επιρροή δέχεται η καταγραφή των σημάτων από την εξασθένιση των κυμάτων τάσης και τη δυσκολία καθορισμού της θέσης της πηγής λόγω της περιπλοκότητας των δομών και των άγνωστων παραγόντων που επιδρούν στην ταχύτητα διάδοσης των σημάτων [Hardy, 2003].

### 2.2.8. Παράγοντες επιρροής σταθμάτα της ΑΕ

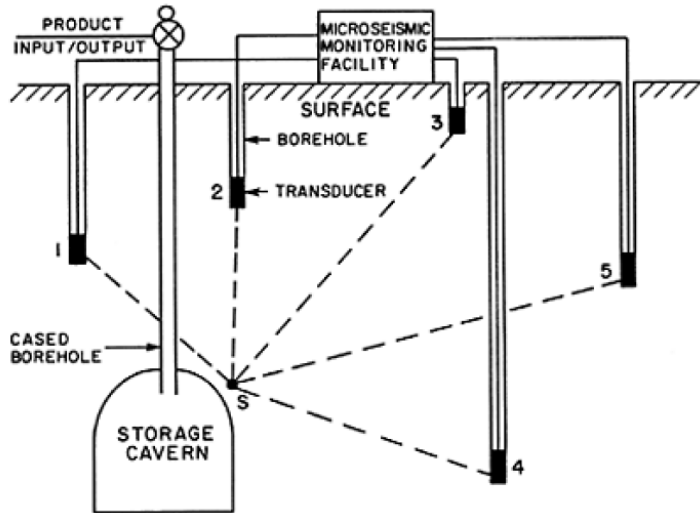
Η δυνατότητα ανίχνευσης ενός σήματος ΑΕ καθορίζεται κυρίως από την ευαισθησία του εξοπλισμού και το πλάτος των ελαστικών κυμάτων που εκπέμπονται από την πηγή. Επιπλέον, η ανιχνευσιμότητα ενός σήματος εξαρτάται από την **εξασθένιση** του κύματος κατά τη διάδοσή του και από το **θόρυβο** στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του εξοπλισμού.

*Η εξασθένιση* αναφέρεται στην μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοσή του. Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την εξασθένιση είναι η γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο, οι απώλειες ενέργειας και η απόσβεση στο μέσο διάδοσης. Λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης το πλάτος φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης. Αντίστοιχα λόγω απώλειας ενέργειας το πλάτος φθίνει εκθετικά με την απόσταση από την πηγή. Στις εργαστηριακές δοκιμές η εξασθένιση λόγω απόσβεσης και γεωμετρικής εξάπλωσης δεν περιορίζει σημαντικά την ανιχνευσιμότητα των σημάτων ΑΕ λόγω των περιορισμένων διαστάσεων των δοκιμίων.

Οι πηγές του **θορύβου** εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, ηλεκτρικές και μηχανικές. Οι πηγές αυτές πρέπει να εξετάζονται, ώστε να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ θορύβου και σημάτων ΑΕ. Σημαντική πηγή θορύβου στις μελέτες ΑΕ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference EMI), που δημιουργούνται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ λόγω ακτινοβολίας ή ηλεκτρικής επαγωγής. Πηγές EMI είναι οι μετασχηματιστές, ισχυρές λάμπες, ηλεκτρικές μηχανές κλπ. Οι πηγές μηχανικού θορύβου προκαλούν κρουστικού τύπου σήματα. Κάθε κίνηση ενός μηχανικού μέρους σε επαφή με το δοκίμιο αποτελεί μία πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου. Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100 kHz [Σοφιανός & Νομικός 2008].

### 2.2.9. Εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ

Ένα από τα πλεονεκτήματα της ΑΕ σε σχέση με άλλα γεωτεχνικά συστήματα παρακολούθησης, είναι η ικανότητα εντοπισμού και οριοθέτησης της ασταθούς περιοχής σε ένα υλικό. Ο ακριβής εντοπισμός της θέσης της πηγής σε ένα υλικό ή κατασκευή είναι εξαιρετικής σημασίας αφού αν δεν εντοπιστεί σωστά είναι αδύνατο να εκτιμήσουμε το πραγματικό πλάτος ενός γεγονότος ΑΕ. Μια σειρά από μικρά γεγονότα μπορεί να οφείλεται σε αδύναμη πηγή πολύ κοντά στον αισθητήρα ή σε μια ισχυρή πηγή πολύ μακριά από αυτόν. Γενικά, η χρήση πολλών αισθητήρων τοποθετημένων σε διάφορα σημεία πάνω στο υλικό και η ανάλυση των στοιχείων που λαμβάνονται, επιτρέπει τον εντοπισμό της θέσης της πηγής [Hardy 2003].



**Εικόνα 10**

Εντοπισμός της θέσης της πηγής με τη χρήση συστοιχίας αισθητήρων για την μελέτη της ευστάθειας υπόγειας στοάς και τον εντοπισμό της πηγής αστάθειας  
(Πηγή: Hardy 2003)

Γενικά για τον εντοπισμό της θέσης, οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, εφαρμόζουν την επαναληπτική τεχνική των ελαχίστων τετραγώνων σύμφωνα με την οποία αναζητείται η καλύτερη μέση λύση από ένα σύνολο εξισώσεων που περιέχουν τις συντεταγμένες των μορφοτροπέων ως  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ , τους χρόνους άφιξης ως  $t_i$  και τις ταχύτητες διάδοσης ως  $v_i$ :

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = v_i^2 * (t_i - T_s)^2 \quad i=1,2,3,\dots,n$$

Όπου  $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$ , οι πραγματικές συντεταγμένες της πηγής,  $T_s$  ο πραγματικός χρόνος γένεσης του σήματος, που αποτελούν και τους τέσσερις αγνώστους της εξίσωσης. Ωστόσο, λόγω εγγενών πειραματικών σφαλμάτων που σχετίζονται με κάθε μια από τις εξισώσεις (όπως π.χ. από λάθη στις θέσεις των μορφοτροπέων ή την επιλογή του χρόνου άφιξης και των ταχυτήτων) θα πρέπει να βρεθούν τουλάχιστον πέντε εξισώσεις για τη λύση του συστήματος, δηλαδή να έχουμε δεδομένα από πέντε μορφοτροπέις. Αυτό επιτρέπει στο πρόγραμμα του υπολογιστή να ελαχιστοποιήσει τέτοια λάθη και να καταλήξει σε μια καλύτερη προσαρμογή ή μέση λύση για τις παραπάνω εξισώσεις. Όπως είναι λογικό, οι περισσότερες εξισώσεις (>5) θα δώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέση λύση. Γενικά, η βασική αρχή του εντοπισμού της θέσης της ΑΕ, βασίζεται στην γεωμετρία και τους κινηματικούς νόμους [Hardy 2003].

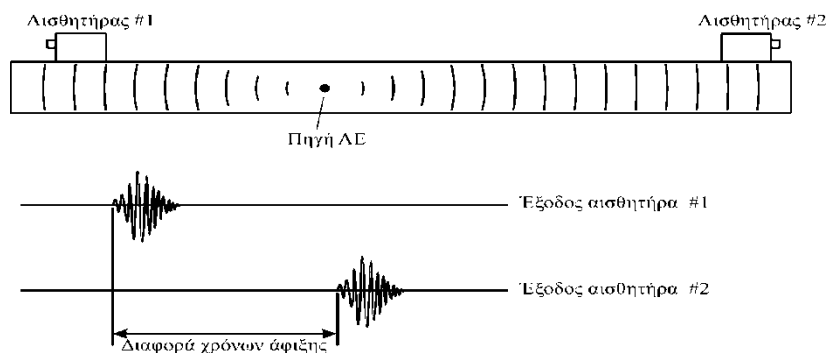
Σε δομές με σημαντικά μεγαλύτερη τη μία διάσταση σε σχέση με τις άλλες, ο εντοπισμός της πηγής γίνεται εύκολα με **γραμμικό μονοδιάστατο εντοπισμό**. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε εργαστηριακές δοκιμές ΑΕ στον τομέα της επιστήμης των υλικών και λιγότερο στον γεωτεχνικό τομέα. Ουσιαστικά μετρώνται οι ταχύτητες του ακουστικού κύματος και οι χρόνοι άφιξης σε 2 διαφορετικούς αισθητήρες. Έτσι, απαιτούνται δύο αισθητήρες σε θέσεις  $x_1$  και  $x_2$  αντίστοιχα. Έστω

$x_s$  η ζητούμενη θέση της πηγής και  $t_s$  ο χρόνος γένεσης του σήματος ΑΕ στην πηγή. Εάν θεωρηθεί ότι το κύμα διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε η διαφορά στους χρόνους άφιξης κάθε αισθητήρα είναι ανάλογη προς την απόσταση του από την πηγή [Hardy 2003]:

$$(t_i - t_s) = (x_i - x_s) / V$$

Όπου  
 $t_i$  ο χρόνος άφιξης του σήματος στον αισθητήρα  $i$   
 $(i=1,2)$  και  
 $V$  η ταχύτητα του ακουστικού κύματος

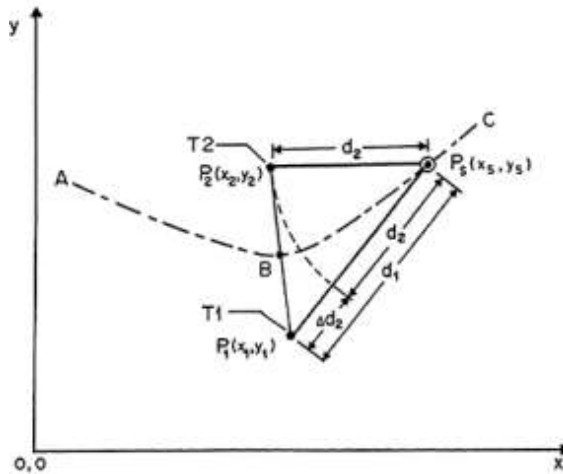
Προκύπτουν έτσι δύο εξισώσεις από τις οποίες μπορούν να υπολογισθούν ο χρόνος γένεσης και η θέση της πηγής του σήματος ΑΕ.



**Εικόνα 11**

Γραμμικός εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ (Πηγή: Κατσικογιάννη 2006)

Στον τομέα της γεωτεχνικής, χρησιμοποιείται κυρίως ο **δισδιάστατος ή επίπεδος εντοπισμός**. Ο τρόπος αυτός εντοπισμού της πηγής έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες σε δοκούς, πλάκες αλλά και άλλες πολλές περιπτώσεις όπου το δείγμα έχει μία από τις διαστάσεις του μικρή (π.χ. στη δοκιμή Brazilian). Σε μελέτες πεδίου, έχει χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό θέσης γεγονότων που συμβαίνουν σε ένα στρώμα (π.χ. μετάλλευμα) αλλά και σε επίπεδες επιφάνειες κατασκευών. Η διαδικασία αυτή του εντοπισμού, απαιτεί δύο μορφοτροπείς  $T_1$  και  $T_2$  πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και μια πηγή ΑΕ στη θέση  $P_s (x_s, y_s)$ .



**Διάγραμμα 1**

*Η γεωμετρία που δείχνει τη βασική ιδέα του διδιάστατου εντοπισμού της πηγής  
(Πηγή: Hardy 2003)*

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι:

$$\Delta d = (t_1 - t_2) \cdot V = V \cdot \Delta t$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, στην περίπτωση που η πηγή βρίσκεται σε ένα σημείο στο επίπεδο, η διαφορά που έχει διανυθεί από το κύμα της τάσης σε ένα ζεύγος αισθητήρων μπορεί να μετρηθεί από τη διαφορά των χρόνων άφιξης. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι σε ένα επίπεδο, υπάρχουν σημεία όπου ισχύει η παραπάνω εξίσωση και η θέση των σημείων αυτών καθορίζει την καμπύλη ABC που φαίνεται στο διάγραμμα 1. Η καμπύλη αυτή είναι υπερβολή και ορίζει «τη θέση ενός σημείου που κινείται έτσι ώστε η διαφορά των αποστάσεων από δύο σημεία του επιπέδου (εστίες) να είναι ίση με μια σταθερά». Στην περίπτωσή μας, τα δύο αυτά σημεία είναι οι μοροτροπείς και με αυτούς συνδέεται μια οικογένεια υπερβολών ανάλογα με την τιμή της  $V \cdot \Delta t$  της παραπάνω εξίσωσης. Γενικά για τον επίπεδο εντοπισμό απαιτούνται δύο ζεύγη αισθητήρων για την δημιουργία δύο υπερβολών όπως η ABC, το σημείο τομής των οποίων αποτελεί τη θέση της πηγής.

Ο εντοπισμός της θέσης στο χώρο ή **χωρικός εντοπισμός**, χρησιμοποιείται στους τομείς της σεισμολογίας, της μεταλλευτικής μηχανικής και της βραχομηχανικής. Ο χωρικός εντοπισμός απαιτεί ανάπτυξη αλγορίθμων, απαιτεί τη χρήση πέντε αισθητήρων και γενικά ακολουθεί την ίδια γενική προσέγγιση με τον επίπεδο εντοπισμό.

Όπως κάθε εργαστηριακή δοκιμή, έτσι κι εδώ προβλέπονται σφάλματα κατά την διαδικασία του εντοπισμού μερικά από τα οποία είναι [Hardy 2003]:

- Η ακρίβεια του μοντέλου της ταχύτητας
- Η ικανότητα αναγνώρισης των χρόνων άφιξης
- Η γεωμετρία διάταξης των αισθητήρων
- Το μέγεθος της διάταξης

- Λάθη στις συντεταγμένες των αισθητήρων
- Η θέση της πηγής σε σχέση με την τοποθέτηση των αισθητήρων

Η πρακτική αξία του εντοπισμού θέσης εξαρτάται από την **ακρίβεια προσδιορισμού** και από την **κλίμακα της δοκιμής**. Η ακρίβεια του προσδιορισμού επηρεάζεται από μικροδιαφορές της ευαισθησίας των αισθητήρων, από αβεβαιότητες στο χρόνο άφιξης και από την παραδοχή ότι το κύμα ΑΕ οδεύει προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα [Κατσοιογιάννη 2006].

## **2.3.Ακουστική εκπομπή σε πετρώματα**

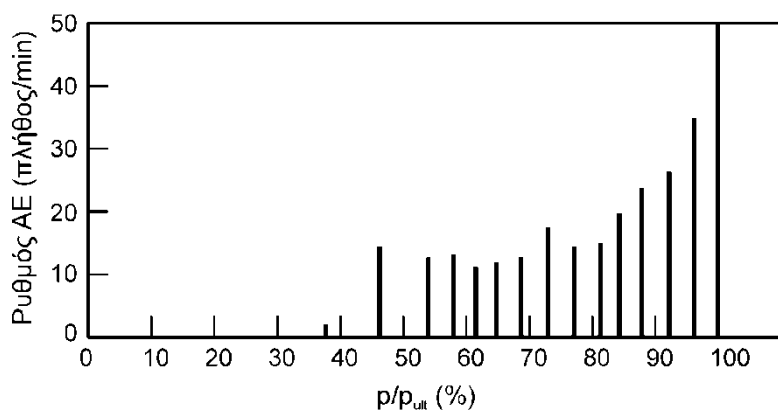
### **2.3.1.Εργαστηριακά δοκίμια πετρωμάτων**

Η ακουστική εκπομπή, είναι σεισμικά σήματα υψηλής συχνότητας από μερικάkHz έως αρκετά MHz. Σε εργαστηριακά πειράματα σε δοκίμια πετρώματος, επειδή η ΑΕ συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών, αποτελεί μία ιδανική μέθοδο για τη μελέτη της αστοχίας τους. Με την ΑΕ, μπορούν εύκολα να εντοπιστούν αδύναμα σημεία και σημεία επικείμενης αστοχίας του πετρώματος. Απλές έρευνες του τύπου της πηγής των σημάτων, μπορούν να γίνουν με τη χαρτογράφηση της χωρικής κατανομής της κίνησης των P κυμάτων σε μια συστοιχία αισθητήρων.

Στη **μηχανική των πετρωμάτων** το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της αστοχίας και της παραμόρφωσης των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση, συνδέοντας τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με παραμέτρους της ΑΕ όπως το πλήθος, το πλάτος, η ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ΑΕ, η θέση της πηγής και το συχνοτικότερο περιεχόμενο των σημάτων ΑΕ. Η τεχνική της ΑΕ έχει εφαρμοσθεί σε δύο κυρίως πεδία: α) στη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των πετρωμάτων, με την ανάλυση των παραμέτρων ΑΕ και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής της, και β) στη μελέτη της εντατικής κατάστασης του επί τόπου πετρώματος με χρήση του φαινομένου Kaiser, το οποίο εξετάζεται παρακάτω.

Από τις πρώτες κιόλας μελέτες της ΑΕ στα υλικά, οι ερευνητές προσπάθησαν να βρουν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της ΑΕ και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Μελέτες του Hardy (1981) αλλά και των Obert και Duval (1945) έδειξαν ότι ο ρυθμός της ΑΕ αυξάνεται με την αύξηση της θλιπτικής φόρτισης τόσο στο εργαστήριο όσο και σε δοκιμές πεδίου. Οι Obert και Duval, μελέτησαν την συμπεριφορά διαφόρων τύπων πετρωμάτων (ασβεστόλιθο, γρανίτη, κερατόλιθο, σχιστόλιθο, ψαμμίτη, επιδοτίτη και δολομίτη) σε μονοαξονική θλίψη και απέδειξαν

ότι μετά από μια δομική αστοχία, μειώνεται η ακουστική δραστηριότητα, δηλαδή αποτελεί ένδειξη του βαθμού ευστάθειας [Κατσιογιάννη 2006]. Στο διάγραμμα 2 που ακολουθεί, φαίνεται η μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου  $p$  ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας  $p_{ult}$  σε χονδρόκοκκο γρανίτη.



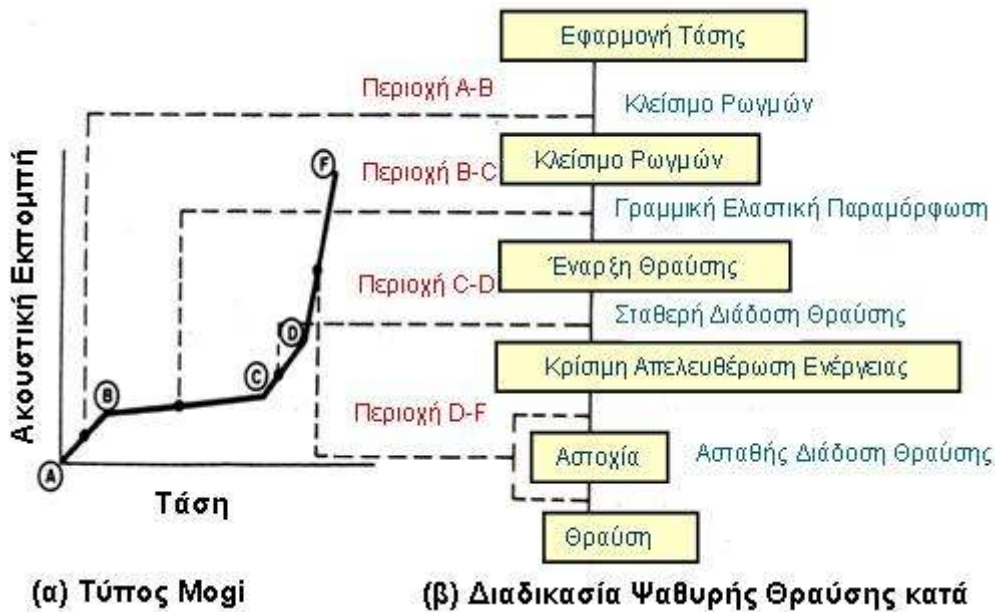
**Διάγραμμα 2**  
Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει με  $p/p_{ult}$   
(Πηγή: Obert και Duvall 1945)

Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από το **Mogi (1962)**, ο οποίος δίνει το διάγραμμα 3 που ακολουθεί, ως γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Το διάγραμμα αποτελείται από τέσσερις χαρακτηριστικές περιοχές A-B, B-C, C-D, D-F που συνδυάζονται με τις φυσικές διαδικασίες θραύσης από τη **θεωρία του Bieniawski**. Σύμφωνα με αυτόν, κατά τη διαδικασία καταστροφής των δοκιμών στη δοκιμή θλίψης, το κλείσιμο των ρωγμών μπορεί να συσχετιστεί με τη ζώνη A-B του διαγράμματος του Mogi, η γραμμική ελαστική παραμόρφωση με τη ζώνη B-C, η κατακλαστική ευσταθής φάση με τη ζώνη C-D και η κατακλαστική ασταθής φάση με τη ζώνη D-F. Με βάση τα αποτελέσματα από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, οι **Boyce et al.** κατέληξαν στο ότι η τεχνική της ΑΕ μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των πετρωμάτων και ότι η θεωρούμενη από το Mogi σχέση τάσης-ΑΕ είναι ένας γενικός αλλά όχι καθολικός τύπος συμπεριφοράς. Διάφορες παραλλαγές αυτής της γενικευμένης σχέσης παρατηρούνται στα πετρώματα με σημαντικότερους τύπους απόκρισης τους ακόλουθους:

- Τύπος Mogi (I) (Mogi Type I): Χαρακτηρίζεται από το κλείσιμο των ρωγμών, από ελαστική, σταθερή θραύση και από ασταθείς περιοχές θραύσης
- Ασταθής Τύπος (II) (Unstable Type II): Χαρακτηρίζεται από το κλείσιμο των ρωγμών, από ελαστικές και ασταθείς περιοχές θραύσης
- Τύπος Πυκνής Δομής (III) (Dense Type III): Χαρακτηρίζεται από ελαστική, σταθερή θραύση και από ασταθείς περιοχές θραύσης



- Ασταθής Τύπος-Πυκνής Δομής (IV) (Dense, Unstable Type IV): Χαρακτηρίζεται από ελαστικές και ασταθείς περιοχές θραύσης.



**Διάγραμμα 3**

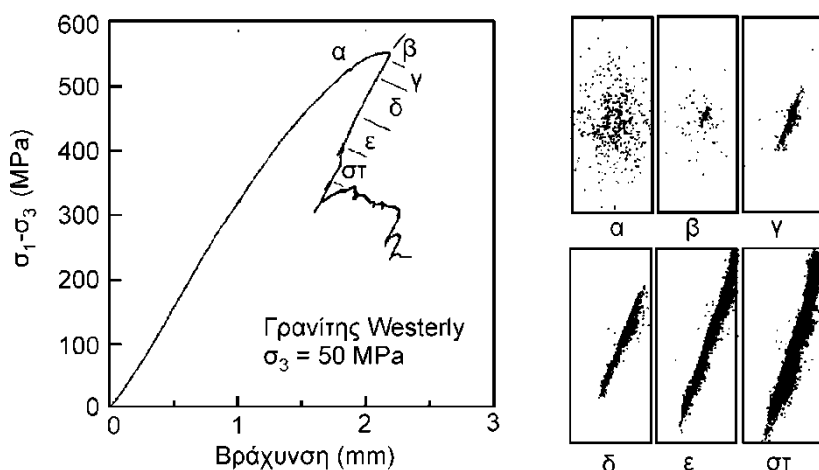
Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ και συσχετίσή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης  
(Πηγή: Boyce et al, 1981 και Κατσιοκογιάννη 2006)

Παρόλο που αυτοί οι τύποι απόκρισης αντιπροσωπεύουν μονοσήμαντα τη συμπεριφορά κάθε πετρώματος, είναι εμφανές ότι μία ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης (ζώνη B-C) είναι πάντοτε παρούσα. Νεώτερες έρευνες (π.χ. Eberhart 1998, Eberhartetal. 1999, Rudajevetal. 2000 κλπ.) επιβεβαιώνουν τις παραπάνω παρατηρήσεις.

Εντοπισμός των γεγονότων ΑΕ κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης δοκιμών πετρωμάτων από τα πρώτα στάδια της φόρτισης έως την αστοχία αναφέρεται σε σημαντικό αριθμό δημοσιεύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία [Lockner 1993]. Τα πρώτα πειράματα στα τέλη της δεκαετίας του 1960 περιελάμβαναν την επιλεκτική καταγραφή και επεξεργασία σημάτων για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Ο σύγχρονος εξοπλισμός καταγραφής και επεξεργασίας ΑΕ επιτρέπει τον εντοπισμό μεγάλου πλήθους γεγονότων ΑΕ σε ρυθμούς από 100 έως 1000 γεγονότα ανά δευτερόλεπτο.

Η ψαθυρή θραύση των κρυσταλλικών πετρωμάτων συνοδεύεται από απότομη απώλεια της αντοχής τους, με αποτέλεσμα σε εύκαμπτες συσκευές φόρτισης να παρατηρείται ασταθής και βίαιη θραύση. Έτσι, ο ρυθμός της ΑΕ στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου είναι τόσο υψηλός, ώστε είναι σχεδόν αδύνατη η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων ΑΕ. Για την

παρακολούθηση της αστοχίας στη φάση αυτή είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός **ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης** στο οποίο ο ρυθμός της ΑΕ να διατηρείται σταθερός κατά τη φόρτιση [Lockner 1993]. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευθεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά τη φόρτιση και να συσχετισθεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Σχετικά πειράματα του Lockner (1993) έδωσαν το διάγραμμα:



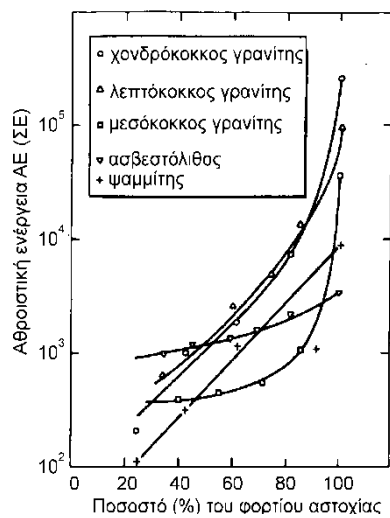
**Διάγραμμα 4**

Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76.2 mm υπό τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση  $\sigma_3 = 50$  MPa και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ΑΕ  
(Πηγή: Lockner, 1993)

Οι **Zietlow και Labuz (1998)**, αναφέρουν πειράματα κάμψης σε δοκίμια γρανίτη, ψαμμίτη και χαλαζίτη, όπου εφαρμόστηκε εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ για τον προσδιορισμό των περιοχών μικρορωγμάτωσης κατά τη δοκιμή. Τα γεγονότα ΑΕ εντοπίστηκαν σε ποσοστό του φορτίου αστοχίας μεγαλύτερου του 50 % (ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος), ενώ η συγκέντρωση των γεγονότων ΑΕ σε ακραία φορτία ήταν ενδεικτική της αστοχίας.

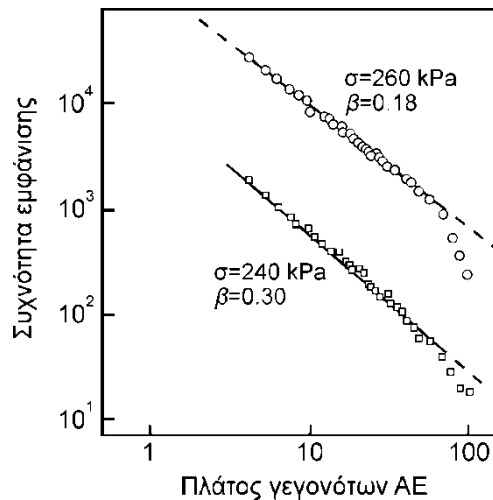
Δυο συσχετίσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και έχουν ερευνηθεί από πολλούς μελετητές, είναι η σχέση της εκλυόμενης ενέργειας ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας και η σχέση του πλάτους των σημάτων με τη συχνότητα εμφάνισης των γεγονότων. Ο Hardy αναφέρεται σε πειράματα του **Goodman (1963)** που εξετάζουν την επίδραση των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης στην ΑΕ, σύμφωνα με τα οποία με την αύξηση του φορτίου πέρα από ένα σημείο, αναφερόμενο ως σημείο “επιταχυνόμενης ακουστικής δραστηριότητας” (“accelerated rock noise activity”), τα γεγονότα ΑΕ που ανιχνεύονται αυξάνονται κατά τη διάρκεια των επόμενων κύκλων φόρτισης. Σύμφωνα, εξάλλου, με πειράματα των **Brown και Singh το 1966**, που επίσης αναφέρονται από τον Hardy (2003), υπό συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού προέκυψε το διάγραμμα 5.α για την εκλυόμενη ενέργεια ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας.

Όσον αφορά τη σχέση του πλάτους με τη συχνότητα εμφάνισης, πειράματα ερευνητών έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μία ευθεία σε λογαριθμικούς άξονες πλάτους ΑΕ-συχνότητας εμφάνισης (διάγραμμα 5.β). Γεγονότα ΑΕ ακραίου πλάτους δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στην ευθεία αυτή, ενώ για τιμές του φορτίου κοντά στο φορτίο αστοχίας, η σταθερά  $\beta$ , που εκφράζει την κλίση της ευθείας αυτής, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο και συνεπώς με την αύξηση του φορτίου περισσότερα γεγονότα ΑΕ έχουν μεγαλύτερο πλάτος [Hardy 2003].



**Διάγραμμα 5.α**  
Αθροιστική εκλύομενη ενέργεια ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοσμένου φορτίου για διάφορα πετρώματα

(Πηγή διαγραμμάτων Hardy, 2003)



**Διάγραμμα 5.β**  
Σχέση συχνότητας εμφάνισης συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly που υπόκειται σε μονοαξονική θλίψη

Πιο πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι υπό μονοαξονική και τριαξονική θλίψη η ΑΕ αυξάνεται ραγδαία καθώς επέρχεται αστοχία σε θλίψη και μάλιστα μετά το 70% περίπου του φορτίου αστοχίας παρατηρείται απότομη αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας. Πολλοί ερευνητές επίσης, έχουν επισημάνει ότι παρατηρείται υψηλός αλλά ομαλός ρυθμός ακουστικής δραστηριότητας ακόμη και σε χαμηλές τιμές της τάσης, γεγονός που οφείλεται στο κλείσιμο των πόρων και των μικρορωγμών του πετρώματος. Η δραστηριότητα ΑΕ έχει επίσης συσχετισθεί με τη χρονικά μεταβαλλόμενη ανελαστική παραμόρφωση (ερπυσμό) του πετρώματος [Hardy 2003], όπου διαπιστώθηκε μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της ερπυστικής παραμόρφωσης και της ΑΕ [Σοφιανός & Νομικός 2008].

## 2.3.2. Πειράματα *In situ*

### 2.3.2.1. Γενικά

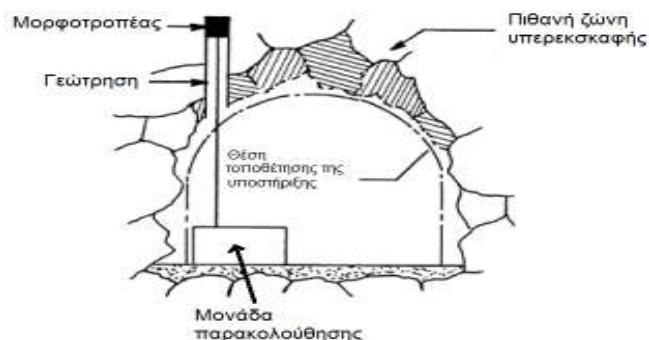
Σε γεωτεχνικά έργα (σήραγγες, ευστάθεια πρανών, στήριξη οροφής ορυχείων κλπ), σε κάθε στάδιο της κατασκευής, είναι πολύ σημαντική η εκτίμηση της ευστάθειας, της ποιότητας της βραχομάζας, η πρόβλεψη μίας επικείμενης αστοχίας, ο εντοπισμός ιδιαίτερα φορτισμένων περιοχών και η μελέτη των εκτινάξεων βράχων (rockbursts) σε βαθιά μεταλλεία και σήραγγες. Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία, υπάρχει η διαρκής ανάγκη της πρόβλεψης ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής έτσι ώστε η έκθεση των εργαζομένων και του εξοπλισμού στον κίνδυνο να ελαχιστοποιείται. Η μέθοδος της ακουστική εκπομπής φαίνεται να αποτελεί λύση στην παροχή στοιχείων ευστάθειας σε πραγματικό χρόνο. Επίσης έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς του πετρώματος, με πιο συνήθη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής. Η εφαρμογή της ΑΕ ως μέσου πρόβλεψης καταπτώσεων της οροφής των υπογείων μεταλλευτικών εκσκαφών ερευνάται σήμερα με ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Οι **Iannacchione et al. (2000, 2005)** αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστολίθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας (προοδευτική ή επεισοδιακή) και τον εάν δίνει πρόδρομα φαινόμενα ή όχι. Οι **Choudhury et al. (2004)** αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού. Ο **Mukhopadhyay (2001)** συσχέτισε την ποιότητας της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης [**Σοφιανός & Νομικός 2008**]. Ο τυπικός τρόπος παρατήρησης της ΑΕ σύμφωνα με τον **Hardy (2003)**, περιλαμβάνει μια σειρά από αισθητήρες τοποθετημένους σε διάφορα σημεία στην επιφάνεια ενδιαφέροντος. Η επίδραση της υποβάθμισης της βραχομάζας στην ικανότητα παρατήρησης της ΑΕ μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση μηχανικών κυματοδηγών. Ένας χαλύβδινος κυματοδηγός εγκατεστημένος σε γεώτρηση και πακτωμένος σε σταθερή θέση και με κατάλληλο μορφοτροπέα εγκατεστημένο στο άκρο του, φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Πριν την υποβάθμιση της βραχομάζας, η ακουστική ενέργεια που σχετίζεται με τις πηγές ΑΕ, ανιχνεύεται από τους μορφοτροπέες. Όταν συμβαίνει η υποβάθμιση μέσω ρωγμάτωσης του πετρώματος, οι αρχικές διαδρομές, μπλοκάρονται από τις ανοιχτές ρωγμές μεταξύ των τεμαχών 2-3 και 3-4, ωστόσο οι ίδιες πηγές εξακολουθούν να βρίσκουν διαδρομές διάδοσης διαθέσιμες στον κυματοδηγό και συνεπώς τον εγκατεστημένο μορφοτροπέα. Σαν αποτέλεσμα, τα στοιχεία από τον μορφοτροπέα Α μπορούν να αναλυθούν ώστε να παρέχουν πληροφορίες για το γενικό ποσοστό της δραστηριότητας της ΑΕ που συμβαίνουν στην βραχομάζα.

Χωρίς κυματοδηγό	<p>Μορφοτροπέας Πηγή</p>	
	<p>Πριν τη ρωγμάτωση φαίνονται οι άμεσες διαδρομές των σημάτων ΑΕ μεταξύ της πηγής και των αισθητήρων</p>	<p>Με την έναρξη της ρωγμάτωσης χάνονται αυτές οι άμεσες διαδρομές</p>
Με κυματοδηγό	<p>Μορφοτροπέας S1 S2</p>	<p>Ρωγμές</p>
	<p>Άμεσες διαδρομές του σήματος μεταξύ δύο πηγών S1, S2 και οριζόντιου κυματοδηγού</p>	<p>Μετά την έναρξη της ρωγμάτωσης, φαίνεται η αλλαγή πορείας των σημάτων μεταξύ δύο πηγών ΑΕ</p>

**Εικόνα 12**  
Λήψη σημάτων ΑΕ πριν και μετά τη ρωγμάτωση  
(Πηγή: Hardy 2003)

Ο σκοπός του γενικού συστήματος παρακολούθησης ΑΕ επί τόπου (insitu), είναι να διαπιστωθεί αν η δραστηριότητα της ΑΕ γίνεται στην ευρύτερη περιοχή της υπό έρευνα κατασκευής και να εξακριβωθεί αν η δραστηριότητα αυτή συνδέεται με αλλαγές παραμέτρων πεδίου όπως τη φόρτιση των στύλων σε μεταλλεία θαλάμων και στύλων, το ποσοστό προχώρησης της σήραγγας, κλπ. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης με ένα μορφοτροπέα πεδίου σε ένα υπόγειο άνοιγμα, για την εκτίμηση του βαθμού υπερεκσκαφής που συμβαίνει πριν την εγκατάσταση της μόνιμης επένδυσης. Είναι λογικό ότι αφού υπάρχει μόνο ένας μορφοτροπέας, δεν θα έχουμε επαρκή δεδομένα άφιξης για τον ακριβή προσδιορισμό της πηγής ΑΕ και δεν είναι δυνατό να αντλήσουμε αξιόπιστες πληροφορίες από το πλάτος των γεγονότων, αφού μικρά γεγονότα κοντά ή μεγαλύτερα γεγονότα μακριά από την πηγή μπορεί να έχουν παρόμοια πλάτη [Hardy 2003].

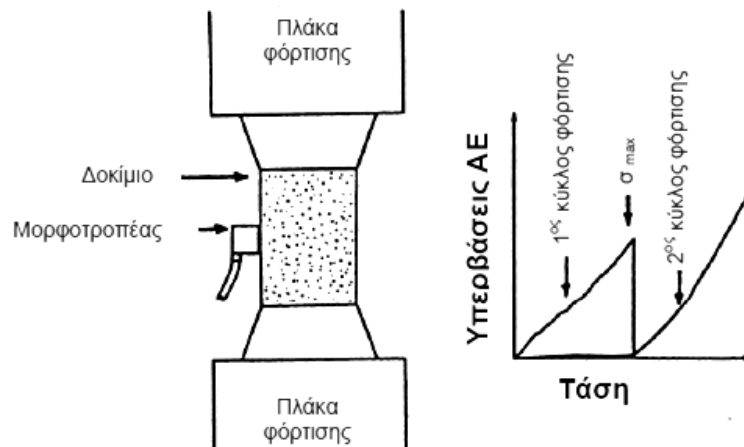


**Εικόνα 13**  
Εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης με ένα μορφοτροπέα πεδίου σε ένα υπόγειο άνοιγμα για την εκτίμηση του βαθμού υπερεκσκαφής (Πηγή: Hardy 2003)

### 2.3.2.2. Φαινόμενο Kaiser και Φαινόμενο Felicity

Άλλες εφαρμογές της AE insitu έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρηνή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser.

Στο σχήμα που ακολουθεί, ένα δοκίμιο πετρώματος υποβάλλεται σε δύο κύκλους φόρτισης. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης η τάση εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μια τιμή  $\sigma_{\max}$  και στη συνέχεια μηδενίζεται. Στον δεύτερο κύκλο, η τάση αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό μέχρι μία τιμή  $\sigma'_{\max}$  μεγαλύτερη από τη  $\sigma_{\max}$  ( $\sigma'_{\max} > \sigma_{\max}$ ). Κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου, παρακολουθείται η δραστηριότητα AE και καταγράφονται οι υπερβάσεις (ή τα γεγονότα) συναρτήσει της εφαρμοσμένης τάσης. Σε όλη τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης, καταγράφεται δραστηριότητα AE, όμως κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου φόρτισης δεν παρατηρείται καμία δραστηριότητα έως ότου το επιβαλλόμενο φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη τάση ( $\sigma_{\max}$ ) του πρώτου κύκλου φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **Φαινόμενο Kaiser** και μπορεί να οριστεί ως η απουσία ανιχνεύσιμης AE μέχρι την υπέρβαση του μέγιστου εντατικού επιπέδου της προηγούμενης διαδρομής φόρτισης του υλικού [Σοφιανός & Νομικός 2008].

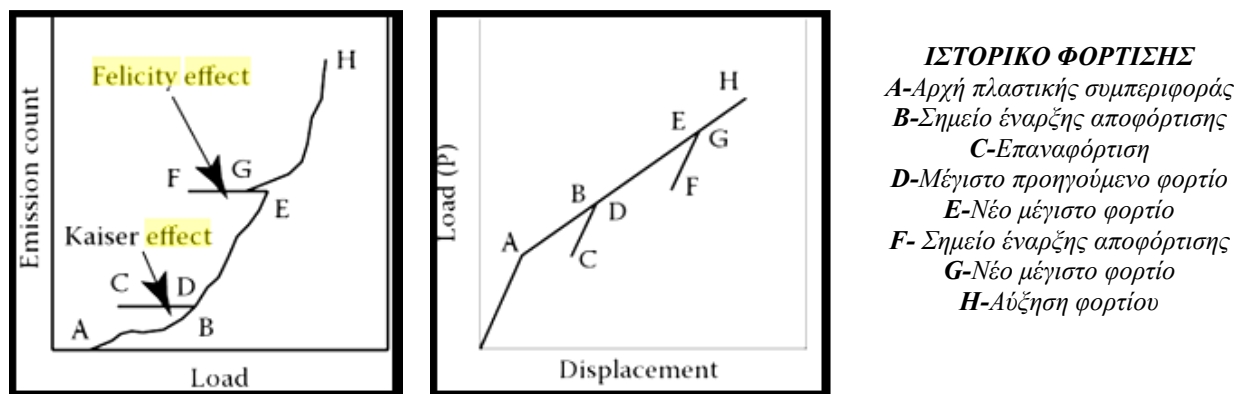


Εικόνα 14

Απλοποιημένη εργαστηριακή διάταξη και χαρακτηριστικά αποτελέσματα του φαινομένου Kaiser  
(Πηγή: Hardy 2003)

Σε υψηλότερες τιμές φορτίου, το φαινόμενο Kaiser δεν λειτουργεί. Στις περιπτώσεις αυτές, δραστηριότητα AE μπορεί να συμβεί σε επίπεδα φορτίου χαμηλότερα από το μέγιστο που έχει εφαρμοστεί στο πέτρωμα στο παρελθόν. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ότι αν σε υψηλότερα επίπεδα φορτίου στο σημείο E, το φορτίο μειωθεί στο F, η δραστηριότητα της AE μένει ίδια. Όταν το φορτίο αυξηθεί προς το G, η AE παραμένει πάλι ίδια. Στο σημείο G που είναι μικρότερο από το προηγούμενο (E) η AE αρχίζει να αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται

Φαινόμενο Felicity. Για τον υπολογισμό της έντασης αυτού του φαινομένου χρησιμοποιούμε το FelicityRatio που ισοδυναμεί με  $P_R/P_M$  όπου  $P_R$  το επίπεδο του φορτίου που η ΑΕ αρχίζει να αυξάνεται ξανά (G) και  $P_M$  το μέγιστο προηγούμενο φορτίο (E) [Ettouney 2012].



**Εικόνα 15**  
 Σχηματική απεικόνιση φαινομένων Kaiser και Felicity  
 (Πηγή: Ettouney 2012)

### 2.3.2.3. Εφαρμογές ΑΕ στο Πεδίο

#### 🚧 Υπόγεια Μεταλλεία

Από το τέλος του 1930 με αρχές του 1940, οι κυβερνήσεις των Η.Π.Α. και του Καναδά άρχισαν να ερευνούν τα υπόγεια μεταλλεία και τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν αυτές οι κατασκευές καθώς αυξάνεται το βάθος ή απλά καθώς πλησιάζουν υψηλά φορτισμένες ζώνες. Το βασικό πρόβλημα προς διερεύνηση είναι ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των πετρωμάτων (rockburst). Σε αυτό το πρόβλημα εστιάστηκαν και οι πρώτες έρευνες των Obert και Duvall. Ο Obert, μελέτησε τα χαρακτηριστικά της συχνότητας των συμβάντων κατά τη βίαιη εκτίναξη πετρωμάτων και κατέληξε στο ότι ο ρυθμός της ακουστικής εκπομπής αυξάνεται πριν την εκτίναξη. Αρχές του 1960, χρησιμοποιήθηκαν πιο περίπλοκες τεχνικές καταγραφής της ΑΕ για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής. Για να προσδιορίσουμε τη θέση μιας πηγής ΑΕ σε ένα υπόγειο έργο, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ταχύτητα της διάδοσης του ακουστικού κύματος στο υλικό. Ο Cook, πυροδότησε 1-1,5Kg εκρηκτικά που τοποθέτησε σε γνωστές θέσεις και παρατήρησε την άφιξη των τασικών κυμάτων στους μοροτροπείς [Vahaviolos 1999].

Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η διαρκής ανάγκη της πρόβλεψης ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής έτσι ώστε η έκθεση των εργαζομένων και του εξοπλισμού στον κίνδυνο να ελαχιστοποιείται. Για το σκοπό αυτό έχουν

υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς της βραχομάζας, με πιο συνήθη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής (Cook, 1963). Η εφαρμογή της ΑΕ ως μέσου πρόβλεψης καταπτώσεων της οροφής των υπογείων μεταλλευτικών εκσκαφών ερευνάται σήμερα με ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον

#### Ευστάθεια Πρανών

Η έρευνα των τελευταίων ετών στον τομέα της ευστάθειας πρανών σεκατασκευές ανοικτού ορύγματος και σε διάφορα έργα πολιτικού μηχανικού (π.χ. πρανή αυτοκινητοδρόμων) έχει αυξηθεί ραγδαία. Οι τεχνικές της ΑΕ παρέχουν ένα χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της ευστάθειας των πρανών. Για τέτοιες περιπτώσεις, έχουν δημιουργηθεί μακράς διάρκειας αυτόματα συστήματα παρακολούθησης. Ο **Cadman (1967)**, παρουσίασε στις έρευνές του ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης ΑΕ για τη μελέτη των κατολισθήσεων, ενώ οι **Broadbent και Armstrong (1969)** περιέγραψαν το σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός συστήματος παρακολούθησης για τη μελέτη της ευστάθειας των πρανών. Οι **Paulsen et al. (1967)** χρησιμοποίησαν τις τεχνικές ΑΕ για να μελετήσουν την ευστάθεια των πρανών σε ορυχείο στην περιοχή Boron της Καλιφόρνια και επισήμαναν ότι το διάγραμμα της ΑΕ με το χρόνο, παρέχει μια πρώτη εικόνα της κατάστασης που επικρατεί στο ανοικτό όρυγμα. Επίσης παρατήρησαν ότι η αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας πέραν του κανονικού, υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα στην ευστάθεια των πρανών του ορύγματος. Μια βραδεία αύξηση στην ακουστική δραστηριότητα υποδηλώνει σταθεροποίηση, ενώ μια επιταχυνόμενη υποδηλώνει ότι πλησιάζει στην αστοχία [**Vahaviolos 1999**].

#### Πετρέλαιο και Φυσικό Αέριο

Η εφαρμογή της τεχνικής ΑΕ στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι ευρεία και μεγάλης σπουδαιότητας. Η μελέτη της υδραυλικής θραύσης (hydrofracturing) έχει μεγάλη σημασία σε τέτοιου είδους έργα. Η υδραυλική θραύση αποτελεί μία διαδικασία που πραγματοποιείται στα 600 έως 3000 m κάτω από την επιφάνεια, σύμφωνα με την οποία εισπνέζεται ρευστό υπό πίεση σε στρώματα χαμηλής διαπερατότητας με σκοπό τη θραύση αυτών και την αύξηση της διαπερατότητας και του πορώδους τους. Τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται συνήθως για τη βελτίωση της παραγωγικότητας μιας πτωχής γεώτρησης πετρελαίου ή αερίου ή για την αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας ενός υπογείου χώρου. Παραδείγματος χάριν, οι **Overbey και Pasini (1975)** ανέπτυξαν τεχνικές για τον εντοπισμό της θέσης και του προσανατολισμού των ρωγμών που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της υδραυλικής θραύσης.

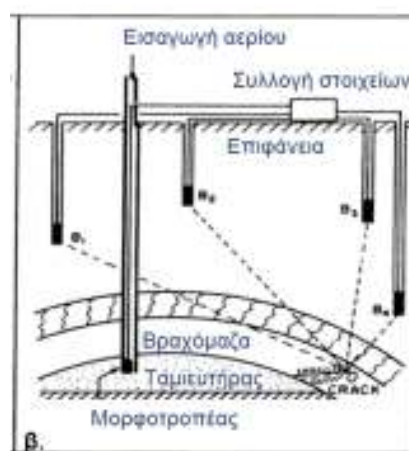
Το πρόγραμμα SUR (Stability of Underground Gas Storage Reservoirs 1972) υποστηρίζεται από την Pipeline Research Committee της Αμερικανικής Ένωσης



αερίου, είχε ως στόχο τη χρήση των τεχνικών ΑΕ για τη μελέτη της ευστάθειας των υπόγειων ταμιευτήρων αερίου. Με το πρόγραμμα αυτό, μελετήθηκε ο βαθμός ευστάθειας των ταμιευτήρων, η πίεση στην οποία η δεξαμενή παρουσίασε τηναρχική αστάθεια, η θέση της αρχικής αστάθειας, η κατεύθυνση και ο ρυθμόςδιάδοσης θραύσεων στο βράχο ή σε παρακείμενα στρώματα. Κατά την πρώτη φάση του προγράμματος SUR, ένας μορφοτροπέας (A) τοποθετήθηκε στην επιφάνεια (ή εναλλακτικά εντός της γεώτρησης), όπως φαίνεται στην εικόνα 16.α. που ακολουθεί. Το σύστημα παρακολούθησης ήταν ικανό να ανιχνεύει τη γενική ΑΕ στην περιοχή τουταμιευτήρα, χωρίς όμως να μπορεί να εντοπίσει την πηγή οποιασδήποτε αστάθειαςλόγω ελλιπών δεδομένων. Η εγκατάσταση αυτή, είναι επίσης ικανή να προσδιορίσει πως τα διάφορα στάδια της αποθήκευσης αερίου επηρεάζουντην γενική ακουστική δραστηριότητα. Στη δεύτερη φάση του προγράμματος, έγιναν προσπάθειες για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης της αστάθειας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία από τουλάχιστον τέσσερις μορφοτροπείς (B1-B4), όπως φαίνεται στην εικόνα 16.β, καθένας εκ των οποίων διέθετε το δικό τουσύστημα παρακολούθησης πολλών καναλιών. Γνωρίζοντας τη θέση κάθεμορφοτροπέα και τη διαφορά στους χρόνους άφιξης των σημάτων ΑΕ, ήτανδυνατός ο ακριβής εντοπισμός της θέσης της αστάθειας (π.χ. μία ρωγμή που ανιχνεύθηκε στο σημείο 0) [Vahaviolos, 1999].



**Εικόνα 16.α.**  
Παρακολούθηση της γενικής ευστάθειας



**Εικόνα 16.β.**  
Παρακολούθηση της ευστάθειας και εντοπισμός της θέσης της ασταθούς περιοχής

**Εικόνα 16**  
Εφαρμογή της τεχνικής ΑΕ στη βιομηχανία φυσικού αερίου σε δύο έρευνες πεδίου σχετικά με την αποθήκευση φυσικού αερίου  
(Πηγή: Hardy, 1981)

### ✚ Άλλες Εφαρμογές

Οι τεχνικές ΑΕ παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή σε διάφορα έργα πεδίου. Οι Crandell και Beard (1962) υιοθέτησαν την ΑΕ ως ασφαλή μέθοδο παρακολούθησης σηράγγων. Οι γεωφυσικοί έχουν εφαρμόσει τις αρχές της υποηχητικής ακουστικής εκπομπής στη σεισμολογία και στη σεισμική μηχανική, δεδομένου ότι η γένεση των ακουστικών κυμάτων είναι αντίστοιχη με τη γένεση των σεισμών σε διαφορετική κλίμακα. Τόσο η σεισμοί όσο και η ΑΕ παράγουν κύματα λόγω συσσώρευσης ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης στην πηγή, τα οποία και στις δύο περιπτώσεις διαδίδονται μέσα στο υλικό [Vahaviolos, 1999].



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΗΓΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΣΩ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ (DIC)

---

### 3.1.Εισαγωγή

Η μέτρηση και η ανάλυση της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων (κυρίως των ανηγμένων παραμορφώσεων) στα διάφορα υλικά είναι πολύ σημαντική σε έργα μηχανικού, ειδικότερα δε σε προβλήματα συγκέντρωσης των τάσεων.

**Ανηγμένη παραμόρφωση** ή τροπή (strain) ενός υλικού στη μία διάσταση σημαίνει παραμόρφωση διά το αρχικό μήκος και αποτελεί, όπως είναι προφανές,αδιάστατο μέγεθος.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad \epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

*Ανηγμένη  
παραμόρφωση*                      *τροπή*

Σύμφωνα με τις αρχές της μηχανικής, οι τροπές στο επίπεδο μπορούν να προσδιοριστούν από τις εξισώσεις:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right]$$
$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right]$$
$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right]$$

Η γνώση των ανηγμένων παραμορφώσεων απαιτείται για τον προσδιορισμό πολλών ιδιοτήτων και παραμέτρων των υλικών όπως το Μέτρο Ελαστικότητας Young και ο λόγος Poisson.

Η κλασική μέθοδος υπολογισμού των παραμορφώσεων μπορεί να χωριστεί σε 2 τύπους:

1. Μέτρηση της σχετικής μετατόπισης δυο σημείων. Στη συνέχεια είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης παραμόρφωσης μεταξύ των δύο αυτών σημείων μέσω της σχετικής μετατόπισης. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι ότι η κατανομή της παραμόρφωσης μεταξύ αυτών των σημείων δεν μπορεί να προσδιοριστεί.
2. Ένας κανάβος μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στο δοκίμιο πριν την παραμόρφωση. Στη συνέχεια, αφού έχει φορτιστεί και παραμορφωθεί, είναι δυνατή η μέτρηση της μετατόπισης του κανάβου και κατα συνέπεια ο προσδιορισμός της κατανομής των παραμορφώσεων.

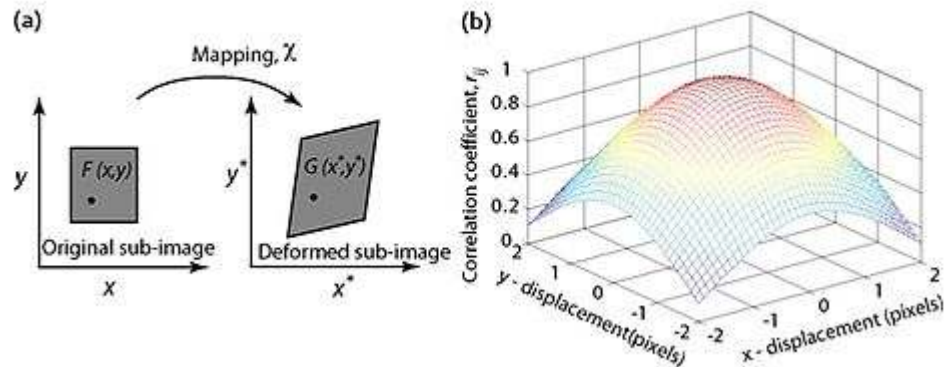
Μέτρηση της επιφανειακής κατανομήζτων παραμορφώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια της χαμηλού κόστους τεχνικής της ψηφιακής συσχέτισης εικόνων [Tung et al. 2005].

### **3.2. Ψηφιακή συσχέτιση εικόνων (DIC)**

Η ψηφιακή συσχέτιση εικόνων (Digital Image Correlation) είναι μια οπτική μέθοδος που χρησιμοποιεί την παρακολούθηση και καταγραφή της εικόνας για ακριβείς δισδιάστατες και τρισδιάστατες μετρήσεις σε αλλαγές που συμβαίνουν στην εικόνα. Ουσιαστικά, λαμβάνονται εικόνες ενός αντικειμένου, αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή και αναλύονται με σκοπό τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης, μετατόπισης, οπτικής ροής ή άλλες εφαρμογές στους τομείς της επιστήμης και της μηχανικής. Η χρήση και η εφαρμογή της είναι εύκολη και σε συνδυασμό με την εξέλιξη στην τεχνολογία των υπολογιστών και των ψηφιακών μηχανών, έχουν οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή της σε μηχανικές εφαρμογές μικρο και νάνο κλίμακας [Wikipedia].

Η λογική της συσχέτισης για την μέτρηση μετακίνησης, είναι γνωστή πολλά χρόνια τώρα και εφαρμόστηκε σε ψηφιακές εικόνες σχεδόν από το 1975 [Pohl et.al. 1975]. Σήμερα, οι εφαρμογές της είναι αμέτρητες και συμπεριλαμβάνουν ανάλυση εικόνων, συμπίεση εικόνων, ταχυμετρία, μέτρηση παραμορφώσεων, κλπ. Στην πειραματική μηχανική, η μέθοδος DIC αναπτύχθηκε από ερευνητές στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνας τη δεκαετία του 1980 [Bruck et.al. 1989] και οπτικοποιήθηκε και βελτιώθηκε τα τελευταία χρόνια. Η μεθοδος DIC χρησιμοποιείται ευρέως στην πειραματική μηχανική σαν ένας τρόπος μέτρησης της παραμόρφωσης. Πρώτα χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει χαμηλές παραμορφώσεις το 1982 από τους Peters και Branson [Peters 1982]. Από τότε έχει αναπτυχθεί σαν ένας τρόπος μέτρησης παραμορφώσεων όπου η μεγάλη ευαισθησία του και η μη επαφή με τη φύση αποτελούν πλεονεκτήματα. Η νεώτερη ιστορία των μετρήσεων βασισμένων σε εικόνες, φαίνεται να έγκειται στον τομέα της φωτογραμμετρίας.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μεγιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης που υπολογίζεται από την εξέταση της έντασης των pixel μιας σειράς υποσυνόλων της εικόνας σε δύο ή περισσότερες εικόνες και ο υπολογισμός του χάρτη της παραμόρφωσης που σχετίζει τις εικόνες αυτές, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

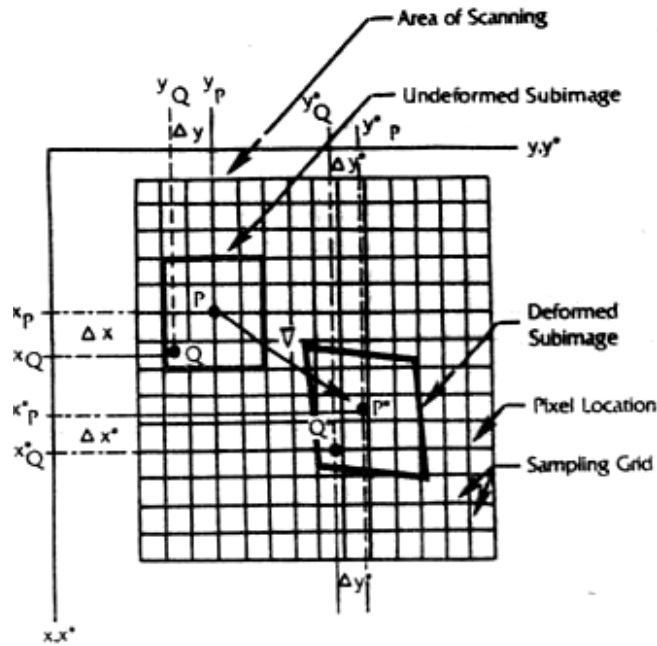


**Εικόνα 1**  
*Βασική ιδέα του DIC (Πηγή: wikipedia)*

Κάθε ψηφιακή εικόνα είναι ένας πίνακας από εικονοστοιχεία (pixels) που ονομάζεται **Bitmap**. Κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία αυτά, γνωστά ως **pixels**, αντιπροσωπεύει την απόχρωση σε ένα σημείο της εικόνας κι έτσι ένα pixel είναι μια μικροσκοπική τελεία ενός συγκεκριμένου χρώματος. Αν πρόκειται για ασπρόμαυρες εικόνες το pixel αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο του γκρι. Έχοντας ένα μεγάλο αριθμό pixel και μετρώντας το χρώμα μιας εικόνας στο μεγάλο αριθμό σημείων της, μπορεί να δημιουργηθεί μια ψηφιακή προσέγγιση της. Η πυκνότητα των pixels σε μια εικόνα είναι γνωστή ως resolution (ανάλυση). Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση τόσο περισσότερη πληροφορία περιέχει η εικόνα. Με διατήρηση του μεγέθους της εικόνας και ταυτόχρονη αύξηση της ανάλυσης, η εικόνα γίνεται εντονότερη και λεπτομερέστερη.

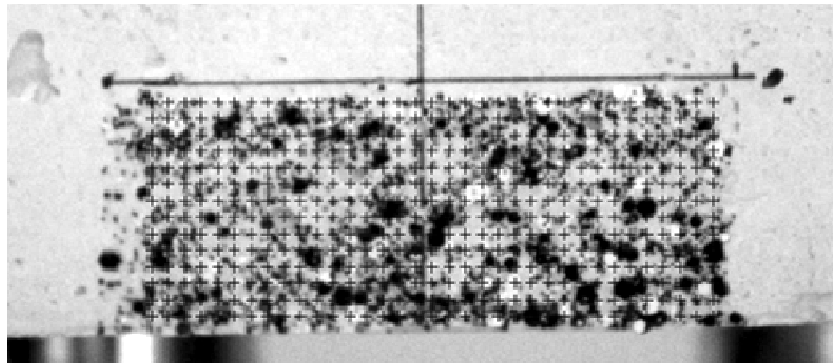
Η τεχνική DIC είναι ουσιαστικά μια λειτουργία εντοπισμού θέσης. Στην παρακάτω εικόνα, το κεντρικό σημείο πριν την παραμόρφωση είναι το σημείο P. Η νέα θέση του μετά την παραμόρφωση είναι το σημείο P\*. Η σχέση μεταξύ των δύο θέσεων είναι:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad \text{και} \quad \mathbf{y}^* = \mathbf{y} + \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$



**Εικόνα 2**  
*Σχετική θέση των υποεικόνων πριν και μετά την παραμόρφωση*  
*(Chu et al 1985)*

Η εικόνα πριν την παραμόρφωση μπορεί να χωριστεί σε διακριτές υποεικόνες με τη λογική της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.



**Εικόνα 3**  
*Διακριτοποίηση της εικόνας*

Η άθροιση της κλίμακας του γκρι (για ασπρόμαυρες εικόνες) στις σχετικές υποεικόνες είναι ίδια πριν και μετά την παραμόρφωση. Έστω ότι η υποεικόνα πριν την παραμόρφωση είναι η A και μετά την παραμόρφωση η B. Μια λειτουργία γραμμικής συσχέτισης εικόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξακρίβωση της ομοιότητας των 2 αυτών υποεικόνων. Ο ορισμός της συσχέτισης εικόνων είναι σύμφωνα με τους **Chu et.al. (1985)**:

$$COF = \frac{\sum g_{ij} \tilde{g}_{ij}}{\sqrt{\sum g_{ij}^2 \cdot \sum \tilde{g}_{ij}^2}}$$

Όπου  $g_{ij}$  και  $\tilde{g}_{ij}$ , είναι η κλίμακα του γκρι της εικόνας A στη συντεταγμένη (i,j) και της εικόνας B στην ( $\underline{i}$ , $\underline{j}$ ) αντίστοιχα.

Η λειτουργία της συσχέτισης εικόνων κάθε υποεικόνας αναλύεται ώστε να βρεθεί η μέγιστη συσχέτιση. Έτσι μπορούν να βρεθούν οι συντεταγμένες της υποεικόνας μετά την παραμόρφωση. Μπορεί να υπολογιστεί η μετατόπιση κάθε κόμβου χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες πριν και μετά την μετατόπιση [Tung et al. 2005].

Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που δεν αναλύουν άμεσα το συντελεστή συσχέτισης. Μια επαναληπτική προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεγιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης με τη χρήση μη γραμμικής τεχνικής βελτιστοποίησης. Η μη γραμμική προσέγγιση βελτιστοποίησης είναι εννοιολογικά απλή, αλλά όπως οι περισσότερες τεχνικές μη-γραμμικής βελτιστοποίησης, είναι αρκετά αργή.

Ο συντελεστής συσχέτισης ορίζεται ως:

$$r_{ij}(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}) = 1 - \frac{\sum_i \sum_j [F(x_i, y_j) - \bar{F}][G(x_i^*, y_j^*) - \bar{G}]}{\sqrt{\sum_i \sum_j [F(x_i, y_j) - \bar{F}]^2 \sum_i \sum_j [G(x_i^*, y_j^*) - \bar{G}]^2}}$$

Όπου  $F(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j)$  είναι η ένταση των pixel ή η τιμή της κλίμακας του γκρι στο σημείο  $(x_i, y_j)$  της μη παραμορφωμένης εικόνας

$G(\mathbf{x}_i^*, \mathbf{y}_j^*)$  αντίστοιχα με το F αλλά για την παραμορφωμένη εικόνα

$\bar{F}$  και  $\bar{G}$  είναι οι μέσες τιμές των πινάκων F και G αντίστοιχα

$(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j)$  και  $(\mathbf{x}_i^*, \mathbf{y}_j^*)$  είναι οι συντεταγμένες των σημείων που σχετίζονται με την παραμόρφωση στις δύο εικόνες που εξετάζονται

Αν η κίνηση είναι κάθετη στον οπτικό άξονα της φωτογραφικής μηχανής, η σχέση μεταξύ των σημείων  $(x_i, y_j)$  και  $(x_i^*, y_j^*)$  μπορεί να προσδιοριστεί με δισδιάστατο μετασχηματισμό συσχέτισης ως εξής:

$$\begin{aligned} x^* &= x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y^* &= y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned}$$

Όπου u,v η μετάφραση του κέντρου της υποεικόνας στις διευθύνσεις X, Y αντίστοιχα. Οι αποστάσεις από το κέντρο της υποεικόνας ως το σημείο (x,y) είναι τα



$\Delta x$  και  $\Delta y$ . Έτσι ο συντελεστής συσχέτισης  $r_{ij}$  είναι συνάρτηση των παραμέτρων  $(u,v)$  της μετατόπισης και των κλίσεων των τροπών.

### 3.3.Εφαρμογή

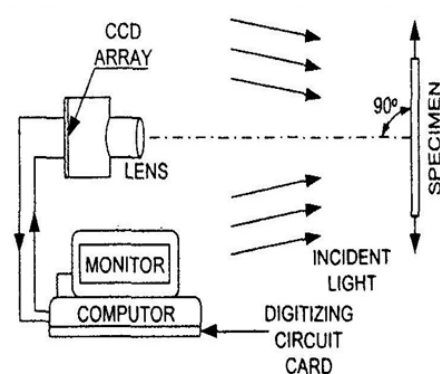
#### 3.3.1.Η διαδικασία

Μια κάμερα καταγράφει εικόνες από ένα δοκίμιο, ενώ αυτό παραμορφώνεται ή κινείται.



4.α.

Δοκιμή θλίψης κυβικού δοκιμίου με εφαρμογή της μεθόδου DIC



4.β.

Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου DIC σε δοκίμιο που εφελκύεται  
(Πηγή: Adeel Zafar, 2008)

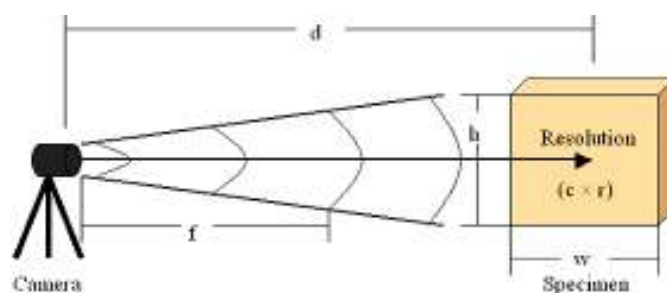
Εικόνα 4

Αρχικά λαμβάνεται μια εικόνα πριν την έναρξη της φόρτισης η οποία αποτελεί την εικόνα αναφοράς (reference image). Στη συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία της φόρτισης του δοκιμίου και λαμβάνονται εικόνες ανά τακτά χρονικά διαστήματα οι οποίες αποτελούν τις παραμορφωμένες εικόνες (deformed images). Οι εικόνες αυτές δείχνουν ένα τυχαίο μοτίβο, το οποίο συσχετίζεται με την αρχική εικόνα αναφοράς από τον αλγόριθμο που έχουμε επιλέξει. Από τον αλγόριθμο, κάθε εικόνα διαιρείται σε πολλές υπο-εικόνες, καθεμία από τις οποίες κεντράρεται σε ένα σημείο ελέγχου συσχέτισης όπου υπολογίζεται και η μετατόπιση. Οι υπο-εικόνες στη συνέχεια μετατοπίζονται σταδιακά και συγκρίνονται με τις προηγούμενες εικόνες της ακολουθίας χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση συσχέτισης μέχρι να βρεθεί η μέγιστη συσχέτιση. Η μετατόπιση που απαιτείται για να επιτευχθεί η μέγιστη συσχέτιση λαμβάνεται να είναι η μετατόπιση του σημείου ελέγχου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία και εικόνες. Παράλληλα, δημιουργούνται και τα σχέδια μετατοπίσεων και παραμορφώσεων.

Η διαδικασία DIC χωρίζεται σε 2 στάδια. Το πρώτο στάδιο παίρνει διακριτά βήματα του ενός pixel και κάνει το συσχετισμό με τα υπόλοιπα. Η υψηλότερη

συσχέτιση λαμβάνεται να είναι το σημείο εκκίνησης για το επόμενο στάδιο, το οποίο χρησιμοποιεί γραμμική παρεμβολή για να επιτύχει ακρίβεια sub-pixel. Γι αυτό το λόγο σε τέτοια προβλήματα είναι χρήσιμη η MATLAB, για την επίτευξη διαφορετικής ταχύτητας και ακρίβειας [Parker, 2009]. Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Αυτές είναι:

- ✓ το ύψος του δοκιμίου ( $h$ )
- ✓ το πλάτος του δοκιμίου ( $w$ )
- ✓  $\text{pixelσηλών} (c) * \text{pixelγραμμών} (r)$
- ✓ την απόσταση μεταξύ κάμερας και δοκιμίου ( $d$ )
- ✓ την εστιακή απόσταση των φακών ( $f$ )
- ✓ την εφαρμογή του προτύπου



**Εικόνα 5**  
Παράμετροι μεθόδου DIC

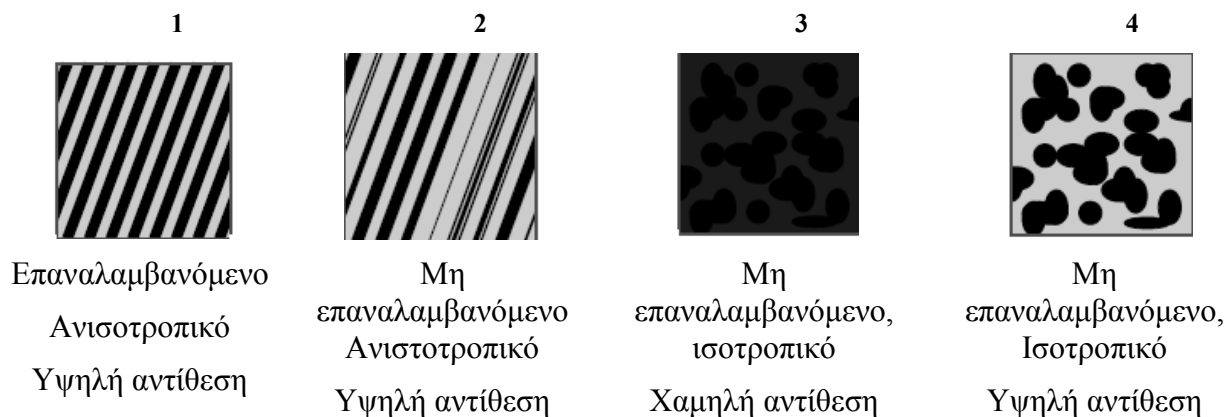
Επίσης η μέθοδος διαθέτει πολλές πηγές σφάλματος οι οποίες είναι:

- ✓ Το μοτίβο
- ✓ Ο φωτισμός
- ✓ Ο αλγόριθμος
- ✓ Το μέγεθος των υποεικόνων
- ✓ Η επιφάνεια του δοκιμίου
- ✓ Η οπτική
- ✓ Η εφαρμοζόμενη πίεση

### 3.3.2. Το μοτίβο (pattern)

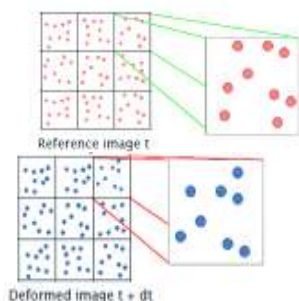
Πριν την έναρξη κάθε δοκιμής, πρέπει να τοποθετηθεί το κατάλληλο μοτίβο (pattern) πάνω στην περιοχή ενδιαφέροντος στο δοκίμιο, όπου και θα τραβηχθούν οι φωτογραφίες. Οι φωτογραφίες αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση DIC με σκοπό το προσδιορισμό της παραμόρφωσης.

Το μοτίβο αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες σφάλματος της δοκιμής, γι αυτό πρέπει να επιλεγεί με προσοχή. Θα πρέπει να είναι μη επαναλαμβανόμενο, ιστροπικό και με μεγάλη αντίθεση.



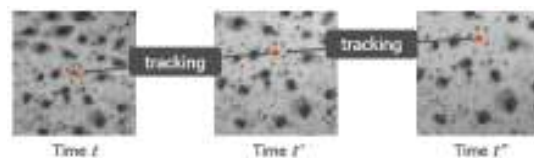
**Εικόνα 6**  
*Επιλογή Μοτίβου*  
 (Πηγή: *University of South Carolina, 2009*)

Μελέτες ερευνητών συγκλίνουν στο 4<sup>ο</sup> μοτίβο της παραπάνω εικόνας, δηλαδή τις τυχαίες κηλίδες, ως καταλληλότερο. Από τον αλγόριθμο (της matlab σε αυτή την περίπτωση), υπολογίζονται τα διανύσματα της παραμόρφωσης των κηλίδων και συνεπώς και οι παραμορφώσεις του υλικού.



7.α

(Πηγή: *Crammond, 2011*)

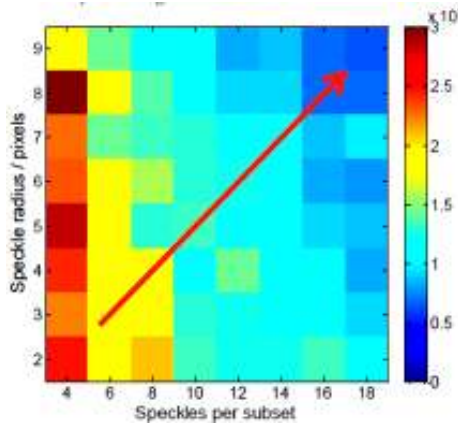


7.β.

(Πηγή: *University of South Carolina, 2009*)

**Εικόνα 7**  
*Διαδικασία σύγκρισης υποεικόνων*

Ο Crammond G. (2011) σε έρευνά του στο πανεπιστήμιο του Southampton, χρησιμοποίησε διαφορετικούς συνδιασμούς μεγεθών και πυκνότητας κηλίδων και κατέληξε στο παρακάτω διάγραμμα:



- ✓ Είναι εμφανής η βάρθρωση του σφάλματος
- ✓ Υπάρχουν μικρότερα σφάλματα όσο το μέγεθος και η συχνότητα των κηλίδων αυξάνεται
- ✓ Μεγάλες κηλίδες είναι πιο «μοναδικές» σε σχήμα και σε μέγεθος μειώνοντας την αβεβαιότητα της μέτρησης

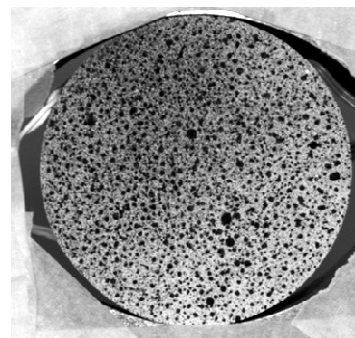
**Εικόνα 8**

*Μελέτη του μεγέθους των κηλίδων (Πηγή: Crammond 2011)*

Γενικά, απαιτείται ένα σχέδιο κηλίδων τυχαίο, με διαφόρων μεγεθών κηλίδες οι οποίες θα εξασφαλίζουν την μοναδικότητα κάθε υποεικόνας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια ενός σπρέι.



**9.α**  
*Μοτίβο με μαρκαδόρο*



**9.β**  
*Μοτίβο με σπρέι*

**Εικόνα 9**

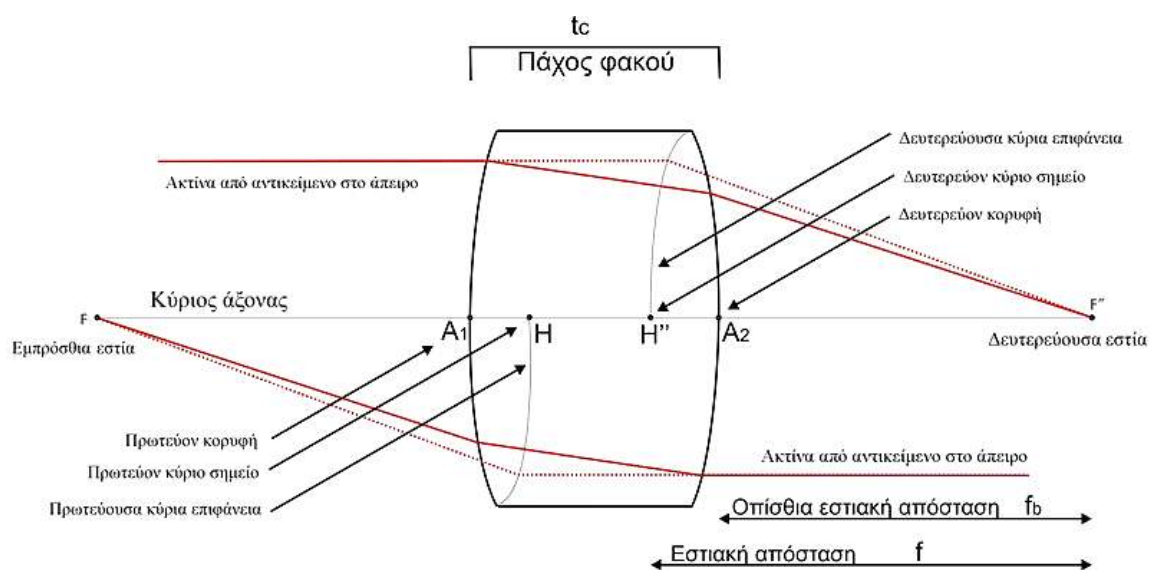
*Μοτίβα υψηλής αντίθεσης σε κυλινδρικό δοκίμιο που πρόκειται να φορτιστεί σε δοκιμή Brazilian με ταυτόχρονη μέτρηση της παραμόρφωσης με τη μέθοδο DIC*

### 3.3.3.Εστιακή Απόσταση και Απόσταση μεταξύ Κάμερας-δοκιμίου

Τα χαρακτηριστικά των φακών είναι η εστιακή απόσταση, το μέγιστο άνοιγμα του διαφράγματος και το εύρος που εκτείνεται η εστιακή απόσταση (zoom). Υπάρχουν φακοί σταθερής εστιακής απόστασης (κανονικός, ευρυγώνιος ή τηλεφακός) και μεταβλητής εστιακής απόστασης. Ως εστιακή απόσταση, ορίζεται η απόσταση ανάμεσα στο οπτικό κέντρο του φακού και την φωτοευαίσθητη επιφάνεια (εστιακό επίπεδο) ή αλλιώς η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα CCD των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών ή του φιλμ στην περίπτωση των αναλογικών φωτογραφικών μηχανών και του κέντρου του συστήματος εσωτερικών φακών του φακού. Όσο

μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση, τόσο μεγαλύτερο είναι το μοτίβο, ή όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση τόσο μεγαλύτερη είναι η οπτική γωνία (ευρυγώνιος φακός). Η εστιακή απόσταση αποδίδεται σε χιλιοστά. Η τυπική εστιακή απόσταση ανέρχεται σε 50 mm που αντιστοιχεί περίπου στην οπτική του ανθρώπινου ματιού. Οι φακοί κάτω των 50 mm ονομάζονται ευρυγώνιοι φακοί, ενώ οι φακοί άνω των 50 mm ονομάζονται τηλεφακοί. Ο ορισμός των μικρών, κανονικών ή μεγάλων εστιακών αποστάσεων, δηλαδή η απόδοση σε χιλιοστά, σχετίζεται πάντα με τη διαγώνιο της μορφής λήψης. Η μορφή 35 mm αντιστοιχεί σε 24x36 mm. Συνεπώς προκύπτει διαγώνιος 43,3 mm. Με μια χονδρική στρογγυλοποίηση, 50 mm. Αντιστοίχως, ένας φακός με εστιακή απόσταση 50 mm θεωρείται κανονικός για τη μορφή 35 mm.

Η απόσταση ή το εστιακό μήκος δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστά εξ αρχής καθώς αυτά μπορούν να ρυθμιστούν με διαφορετικούς τρόπους για να αποτυπωθεί το δοκίμιο με τη φωτογραφική μηχανή. Η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του δοκιμίου εξαρτάται και από τις διαστάσεις του δοκιμίου έτσι ώστε όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις, τόσο μεγαλύτερη θα πρέπει να είναι και η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του δοκιμίου.



**Εικόνα 10**  
Θεμελιώδη σημεία και αποστάσεις ενός φακού (Πηγή: Wikipedia)

### 3.3.4.Ο φωτισμός

Ο φωτισμός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της δοκιμής. Θα πρέπει να είναι σταθερός, να μην υπάρχουν σκιές και γυαλιστερά αντικείμενα στην εικόνα, έτσι ώστε όλες οι φωτογραφίες να έχουν την ίδια φωτεινότητα. Η σημασία της φωτεινότητας γίνεται αντιληπτή με ένα απλό πείραμα: Αν τραβηχτούν μια σειρά από φωτογραφίες ενός αντικειμένου με ένα φως που αναβοσβήνει δίπλα του και

αναλυθούν με το πρόγραμμα συσχέτισης ψηφιακών εικόνων, παρατηρείται ότι το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τον φωτισμό ως παραμόρφωση.

Ένας τρόπος εξάλειψης του προβλήματος της αλλαγής της φωτεινότητας είναι η ύπαρξη σταθερού έντονου λευκού φωτός πάνω στο δοκίμιο και η απομάκρυνση ή κάλυψη γυαλιστερών επιφανειών γύρω από αυτό. Ένας άλλος τρόπος είναι η κανονικοποίηση των παραμέτρων της συνάρτησης συσχέτισης σε μοναδιαίο μήκος, έτσι ώστε η ευαισθησία στην ένταση της εικόνας και οι αλλαγές του φωτισμού να εξαλειφθούν. Η λειτουργία αυτή θα δώσει μια κανονικοποιημένη συσχέτιση που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 με το 1 να δείχνει την τέλεια συσχέτιση. Η εξίσωση που ακολουθεί αποτελεί την κανονικοποιημένη συσχέτιση (Normalized Cross Correlation) [Parker 2009].

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{xy} [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0.5}}$$

Όπου  $t(x - u, y - v)$  η υποεικόνα μετά που έχει μετατοπιστεί κατά  $u$  στην διεύθυνση  $x$  και κατά  $v$  στην διεύθυνση  $y$

$f(x, y)$  είναι η εικόνα αναφοράς

$\bar{t}$  η μέση τιμή της υποεικόνας

$\bar{f}_{u,v}$  είναι η μέση τιμή της εικόνας αναφοράς  $f(x, y)$  στην περιοχή κάτω από την υποεικόνα

### 3.3.5.0 έλεγχος του αλγορίθμου

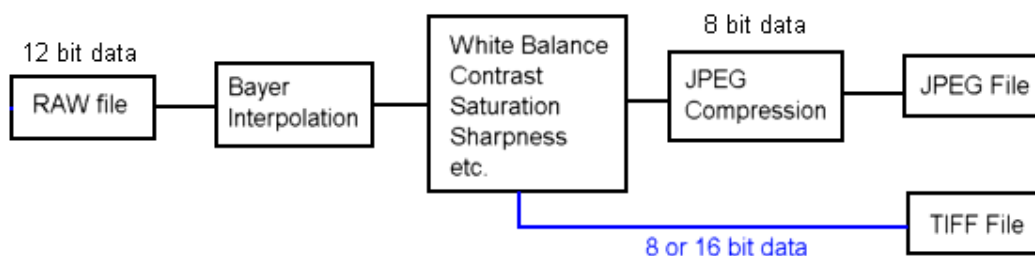
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πιο ορθό θα ήταν να γραφτεί ένας αλγόριθμος που θα υπολογίζει την παραμόρφωση με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του υλικού. Όμως επειδή δεν θα γίνει αυτό, θα πρέπει να ελεγχθεί ο αλγόριθμος που έχει επιλεγεί.

Αρχικά, πριν από κάθε πείραμα, πρέπει να εξεταστεί αν λειτουργεί σωστά το λογισμικό αλλά και η μορφή των φωτογραφιών. Έτσι, πριν από κάθε δοκιμή πρέπει να τραβηχτεί μια σειρά από φωτογραφίες με τον ίδιο φωτισμό και τις ίδιες ρυθμίσεις της ψηφιακής μηχανής με αυτές που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα, οι οποίες θα αναλυθούν με το πρόγραμμα συσχέτισης εικόνων (MATLAB). Εάν δεν υπάρχει κανένα σφάλμα θα πρέπει μεταξύ των εικόνων να υπάρχει πλήρη ταύτιση, δηλαδή ο συντελεστής συσχέτισης να είναι ίσος με τη μονάδα, αλλιώς σημαίνει ότι υπάρχει σφάλμα. Το σφάλμα αυτό ή θα πρέπει να διορθωθεί στον κώδικα του λογισμικού ή αν

είναι δυνατή η επεξεργασία του λογισμικού, θα πρέπει να αφαιρεθεί από τις τιμές των κυρίων πειραμάτων. Ο αριθμός των φωτογραφιών πριν τη δοκιμή για τον παραπάνω έλεγχο, θα πρέπει να είναι ίσος με αυτόν του πειράματος έτσι ώστε να βρεθεί το σφάλμα μέτρησης μεταξύ των φωτογραφιών που αναλύονται κάθε φορά. Αν για παράδειγμα το πείραμα έχει 20 φωτογραφίες για συσχέτιση, απαιτείται το σφάλμα σε αυτές τις 20 φωτογραφίες. Επειδή όμως δεν είναι προβλέψιμος ο αριθμός των φωτογραφιών κάθε πειράματος γιατί αυτό εξαρτάται από το ρυθμό φόρτισης και την αντοχή του δοκιμίου η οποία είναι άγνωστη (τουλάχιστον στα πρώτα πειράματα), λαμβάνεται ένα μεγάλο πλήθος φωτογραφιών έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν όσες απαιτούνται.

### 3.3.6.Εικόνες μορφής RAW

Όλες οι μηχανές DSLR έχουν την επιλογή λήψης εικόνων σε μορφή JPEG ή RAW. Οι εικόνες μορφής JPEG είναι καλύτερες οπτικά γιατί η μηχανή εκτελεί μόνη της κάποιο είδος επεξεργασίας όπως για παράδειγμα αυξημένη αντίθεση. Αν και αυτό λειτουργεί καλά «στο μάτι», δεν είναι το ιδανικό για κάθε περίπτωση, ειδικά όταν ο φωτισμός δεν είναι ικανοποιητικός. Οι εικόνες JPEG είναι κατάλληλες για απλή φωτογράφιση, για χαμηλής ποιότητας φωτογραφίες, για γρήγορη φωτογράφιση, για περισσότερες φωτογραφίες στη μνήμη της μηχανής κλπ, όμως η μορφή RAW είναι για πιο επαγγελματική φωτογραφία ή όταν χρειαζόμαστε επιπλέον εύρος και τονική διαφορά. Στην ψηφιακή συσχέτιση, εικόνων είναι επιθυμητό να έχουμε όσες περισσότερες πληροφορίες είναι δυνατό στην εικόνα, γιατί κάθε λεπτομέρεια μπορεί να βοηθήσει στον υπολογισμό παραμορφώσεων των sub-pixel. Η μορφή RAW είναι η πραγματική έξοδος του αισθητήρα χωρίς να υφίσταται καμία επεξεργασία. Αυτό δε σημαίνει πως μορφή RAW κάνει τη δουλειά για μας, αλλά ότι μας δίνει το περιθώριο να προσαρμόσουμε τις φωτογραφίες όπως τις θέλουμε. Αυτό βέβαια απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας όμως το αποτέλεσμα είναι πιο σωστό για την εφαρμογή που το χρειαζόμαστε.



Εικόνα 11

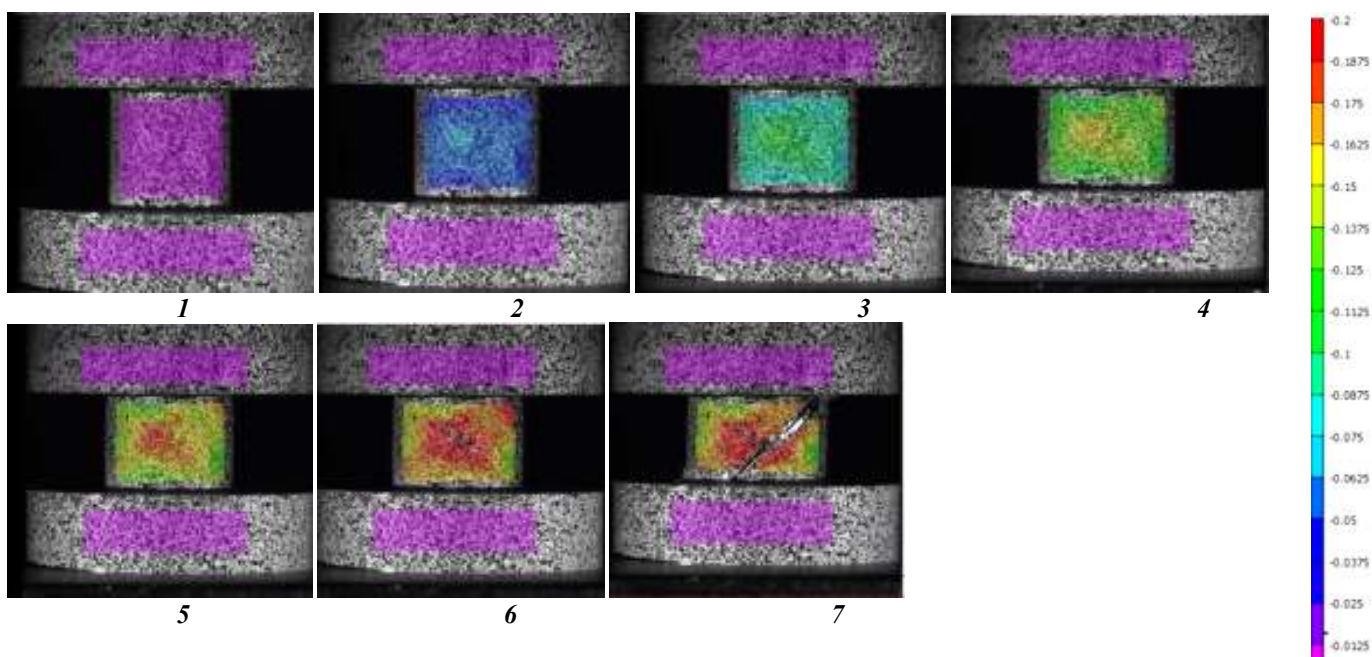
Διαδικασία μετατροπής των εικόνων μορφής RAW σε TIFF ή JPEG  
(Πηγή: <http://photo.net/learn/raw/>)

Μια πολύ βασική πηγή σφάλματος είναι και η μετατροπή των εικόνων μορφής RAW σε TIFF. Αυτό είναι μια αναπόφευκτη λειτουργία που πρέπει να γίνει καθώς η

MATLAB δεν δέχεται τη μορφή RAW για επεξεργασία ψηφιακής συσχέτισης. Το σφάλμα αυτό, περιλαμβάνεται στον έλεγχο του αλγορίθμου που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.4. Επίσης πολύ σημαντικό είναι η μετατροπή όλων των φωτογραφιών να γίνει με το ίδιο πρόγραμμα μετατροπής έτσι ώστε αν έχει κάποιο σφάλμα στην μετατροπή να γίνει σε όλες τις εικόνες. Η μετατροπή στην περίπτωσή μας θα γίνει με το ελεύθερο λογισμικό **dcraw**.

### 3.3.7.Χαρτογράφηση της παραμόρφωσης

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των περισσότερων προγραμμάτων ψηφιακής συσχέτισης εικόνων (και της MATLAB) είναι ότι παρέχουν χαρτογράφηση της παραμόρφωσης αλλά και βίντεο της εξέλιξης της παραμόρφωσης όσο προχωράει από τη μια φωτογραφία στην άλλη. Όπως είναι λογικό, τα περισσότερα πειράματα έχουν γίνει σε μέταλλα καθώς έχουν μεγάλη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Ακολουθεί ένα παράδειγμα που αφορά τον χάρτη της παραμόρφωσης σε δοκίμιο τιτανίου (Ti-6Al-4V) που θλίβεται.



**Εικόνα 12**

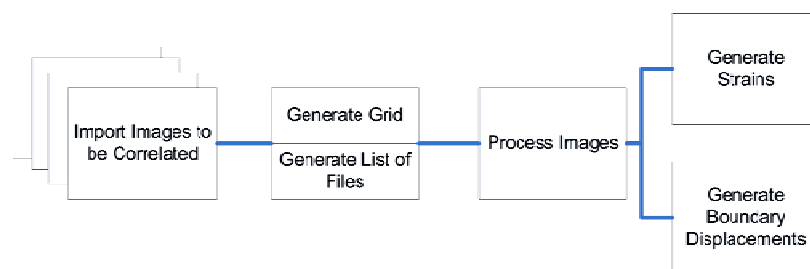
Γραμμική συσχέτιση εικόνων σε δοκίμιο Τιτανίου που θλίβεται  
Πηγή: (<http://www.youtube.com/watch?v=HttVw4ZPnuE>)



### 3.3.8. Η εφαρμογή του αλγορίθμου στο MATLAB

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ελεύθερα διαθέσιμο πρόγραμμα DIC κωδικοποιημένο στο μαθηματικό πρόγραμμα MATLAB. Το πρόγραμμα έχει κωδικοποιηθεί από τους Rob Thompson, Danie IGianola και Christoph Eberl στο πανεπιστήμιο Johns Hopkins University και η τελευταία ελεύθερα διαθέσιμη έκδοσή του είναι του 2010 και βρίσκεται στο ψηφιακό αποθετήριο της Mathworks. Οι βασικές λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι με σειρά οι ακόλουθες:

- **filelist\_generator** - Δημιουργείται η λίστα των εικόνων που θα συσχετιστούν και σώζεται σαν filelist.dat για επόμενο άνοιγμα
- **grid\_generator**- Δημιουργείται ένας κάναβος x,y πάνω στον οποίο θα δουλέψει το πρόγραμμα. Εδώ μας δίνεται η ευκαιρία να επιλέξουμε πόσο πυκνός θέλουμε να είναι κι έτσι να επιτύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια, με μεγαλύτερο όμως χρόνο επεξεργασίας. Ο κάναβος σώζεται με δύο αρχεία τα grid\_x.dat και grid\_y.dat.
- **automate\_image**- Η εντολή αυτή διαβάζει τα παραπάνω αρχεία (filelist.dat, grid\_x.dat και grid\_y.dat) και εκτελεί τον συσχετισμό των εικόνων. Όσο πυκνότερος ή μεγαλύτερος είναι ο κάναβος, τόσο πιο αργή είναι η διαδικασία. Η εντολή αυτή χρησιμοποιεί την cropm εντολή της MATLAB για να εκτελέσει το συσχετισμό σε επίπεδο Pixel και στη συνέχεια παράγει δεδομένα παραμόρφωσης των sub-pixel χρησιμοποιώντας μια άλλη εντολή της MATLAB την findpeak.m για την καμπύλη του συντελεστή συσχέτισης. Εδώ σώζονται τα αρχεία validx.dat και validy.dat που περιέχουν τις θέσεις των σημείων x,y όπως έχουν εντοπιστεί από το πρόγραμμα.
- **displacement** – Η εντολή αυτή διαβάζει τα αρχεία validx.dat και validy.dat και παράγει τις μετατοπίσεις κατά x και κατά y καθώς και δεδομένα στροφής και σώζεται σαν displacement.dat. Χρησιμοποιείται όταν ο ψάχνουμε την μετατόπιση στα άκρα (boundarydisplacement) [Parker 2009].



**Εικόνα 13**  
Σχηματική απεικόνιση του αλγόριθμου της MATLAB  
(Πηγή:Parker 2009)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

---

#### 4.1.Εξοπλισμός δοκιμών

##### 4.1.1.Μηχανή φόρτισης

Η μηχανή φόρτισης των δοκιμών είναι σερβοϋδραυλική και έχει την δυνατότητα ελέγχου τεσσάρων πλαισίων φόρτισης με ηλεκτρονική επιλογή του ενεργού πλαισίου. Περιλαμβάνει τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- ✓ Πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας 5000 kN για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε πετρώματα και σκυρόδεμα.
- ✓ Πλαίσιο θλίψης με δύο έμβολα δυναμικότητας 15 και 250 kN 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 150 kN 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/μορφοτροπείς 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 λήψη των μετρήσεων.



**Εικόνα 1**

*Η Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης με τα πλαίσια δοκιμών κάμψης και θλίψης και οι μονάδες ελέγχου στο εργαστήριο*

#### 4.1.2. Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής

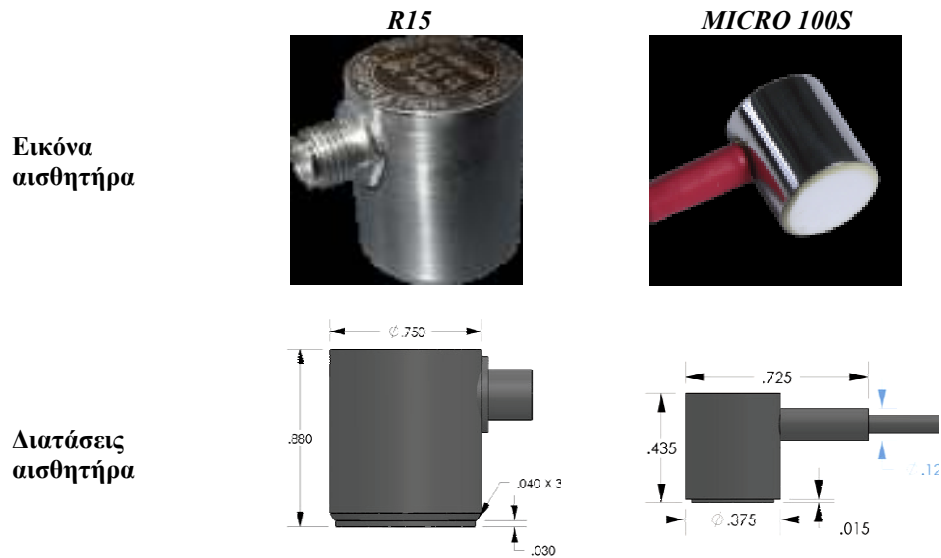
Για την καταγραφή των ακουστικών σημάτων κατά την διάρκεια της φόρτισης δοκιμίων, το εργαστήριο διαθέτει 2 συστήματα ακουστικής εκπομπής (acoustic emission - AE): το Micro-II PCI-2 και το PCI-8 της εταιρείας PAC. Το PCI-8 είναι ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα που λειτουργεί βάση του προγράμματος AE Win for Windows και ενσωματώνει μία κάρτα οχτώ καναλιών της ομώνυμης εταιρείας PAC. Το Micro-II PCI-2 είναι ένα πολυκάναλο σύστημα υποδοχής έως και τεσσάρων καρτών PCI-2 δύο καναλιών AE έκαστη. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές της παρούσας εργασίας για τη καταγραφή των σημάτων AE. Τα χαρακτηριστικά της κάρτας PCI-2 είναι συνοπτικά τα παρακάτω:

- ✓ Χαμηλού θορύβου, 2 καναλιών, σύστημα AE σε μια κάρτα με δυνατότητα επεξεργασίας κυματομορφών και κτύπων σε μια 32-bit κάρτα PCI
- ✓ Ενσωματωμένη 18-bit μετατροπή και επεξεργασία A/D για καλύτερη ανάλυση (μικρότερη από 1dB) σε πολύ χαμηλά πλάτη σημάτων και ρυθμίσεις κατωφλιού, παρέχοντας υψηλή απόδοση με χαμηλό θόρυβο
- ✓ 40MHz, 18-bit μετατροπή με δειγματοληψία A/D σε παραγωγικό χρόνο (2x ή 4x) για ενισχυμένη ακρίβεια
- ✓ Εξαγωγή χαρακτηριστικών AE σε πραγματικό χρόνο και μεταφορά DMA σε κάθε κανάλι για μεγαλύτερη ταχύτητα ανάλυσης προσωρινών δεδομένων σε υψηλά ποσοστά λήψης κτύπων
- ✓ Ενσωματωμένη επεξεργασία κυματομορφής με ανεξάρτητη μεταφορά DMA σε κάθε κανάλι για ταχύτερη μεταφορά και επεξεργασία των κυματομορφών
- ✓ Δυνατότητα συνεχούς καταγραφής κυματομορφών AE στο σκληρό δίσκο έως και 10MSamples/sec (σε ένα κανάλι, 5MSamples/sec σε 2 κανάλια)
- ✓ 4 High pass και 6 low pass φίλτρα για κάθε κανάλι
- ✓ Έως 2 παραμετρικές εισοδοί σε κάθε κάρτα PCI-2 με 16-bit μετατροπέα A/D και συχνότητα καταγραφής >100 αναγνώσεις /δευτερόλεπτο. Το πρώτο παραμετρικό είναι ένα πλήρες όργανο μέτρησης που παρέχει προσαρμογή του σήματος που περιλαμβάνει έλεγχο και επιλογές λήψης, αντιστάθμισης και φιλτραρίσματος για άμεση είσοδο δεδομένων των αισθητήρων (π.χ.τροπόμετρων). Το δεύτερο παραμετρικό παρέχει μία είσοδο +/-10 volt για ρυθμισμένες εξόδους αισθητήρων.
- ✓ Διαθέτει οδηγούς ήχου πάνω στην κάρτα PCI-2 που μπορούν να επεξεργαστούν μέσω της κάρτας ήχου PAC PCI-Audio Card
- ✓ Διαθέτει κύκλωμα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος που εξαλείφει ουσιαστικά τις εκτροπές (drift), επιτυγχάνοντας έτσι υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.

#### 4.1.3. Αισθητήρες και προενισχητές

Η ανίχνευση των σημάτων AE γίνεται με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αισθητήρων AE, οι **MICRO-100S** και οι **R15** της εταιρείας PAC. Οι MICRO100S είναι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής με

εύρος συχνοτήτων λειτουργίας **200-950 kHz** ενώ οι R15 έχουν εύρος συχνοτήτων λειτουργίας **50-200 kHz**, με δεσπόζουσα συχνότητα στα 150 kHz.



**Εικόνα 2**  
*Αισθητήρες ΑΕ*  
 (Πηγή: *Physical acoustics corporation*)

Για την ενίσχυση του σήματος ΑΕ χρησιμοποιούνται προενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος κατά 20/40/60 dB και δυνατότητα σύνδεσης με αισθητήρες μονής εξόδου ή διαφορικούς αισθητήρες. Παρακάτω φαίνονται οι ενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και τα χαρακτηριστικά τους.

**Πίνακας 1**

Αριθμός αισθητήρα και καναλιού	serial number ενισχυτή	Τύπος ενισχυτή
1	2462546604	BP-SYS
2	2462547604	BP-SYS
3	2462549604	BP-SYS
4	2462548604	BP-SYS
5	2462545604	BP-SYS
6	2462544604	BP-SYS



**Εικόνα 3**

*Προενισχυτές της Physical acoustics corporation συνδεδεμένοι με τους αισθητήρες MICRO 100S*

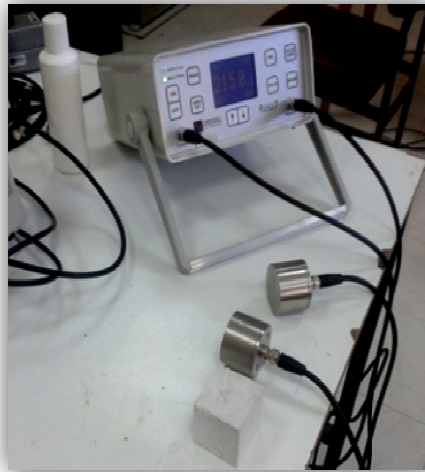
#### **4.1.4.Συσκευή υπερήχων**

Το εργαστήριο διαθέτει την συσκευή **PUNDIT 7** (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) για την πραγματοποίηση δοκιμών μέτρησης της ταχύτητας υπερήχων. Η δοκιμή αυτή αποτελεί μια **μη καταστροφική δοκιμή ελέγχου** της ομοιογένειας και της ποιότητας του υπό εξέταση δοκιμίου. Μπορεί να εφαρμοστεί για παράδειγμα σε δοκίμια σκυροδέματος προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν ασυνέχειες ή κενά. Επίσης η ταχύτητα διαδοσης του υπερηχητικού παλμού μπορεί να συσχετιστεί με τις ελαστικές παραμέτρους και την πυκνότητα του δοκιμίου. Η συσκευή PUNDIT 7 είναι φορητή για δοκιμές στο ύπαιθρο αλλά και στο εργαστήριο. Αποτελείται από την κεντρική μονάδα, 2 μορφοτροπείς 54kHz, 2 μορφοτροπείς P & S 1MHz και τα απαραίτητα παρελκόμενα όπως καλώδια, υλικό επαφής κλπ.

Πριν από κάθε δοκιμή, γίνεται έλεγχος ορθής λειτουργίας της συσκευής με ένα υλικό αναφοράς και τοποθετείται στα άκρα των αισθητήρων gel για την σύζευξη των αισθητήρων με το δοκίμιο. Με δεδομένη την απόσταση που μετράμε και τον χρόνο που καταγράφει η συσκευή, υπολογίζουμε την ταχύτητα του κύματος με την σχέση:

$$v = \frac{x}{t}$$

Όπου  $v$  η ταχύτητα που ζητάμε,  $x$  η διάσταση του υλικού και  $t$  ο χρόνος διάδοσης του κύματος που δίνεται από τη συσκευή των υπερήχων.



*Εικόνα 4  
Φορητή συσκευή PUNDIT7*

#### **4.1.5.Λογισμικά**

##### **AEWin**

Το AEWin είναι ένα πρόγραμμα (32-bit WINDOWS) συλλογής δεδομένων και ανάγνωσης και επεξεργασίας σημάτων ΑΕ 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, κλπ. 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 PAC με επέκταση \*.DTA , το οποίο μας επιτρέπει να αναπαράγουμε και να αναλύουμε όλα τα αρχεία ΑΕ. Το AEWin είναι εύκολο στη χρήση και τη λειτουργία . Το λογισμικό έχει όλες τις δυνατότητες επεξεργασίας, γραφημάτων και ανάλυσης των δεδομένων καθώς και πολλά άλλα νέα και βελτιωμένα χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την ανάλυση των και 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 τύπων διαγραμμάτων) και τον χειρισμό δεδομένων ακουστικής εκπομπής. Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από τις μη καταστρεπτικές δοκιμές ακουστικής εκπομπής (ΑΕ). Επιπλέον, το Noesis μπορεί να πραγματοποιήσει ταξινόμηση και επεξεργασία δεδομένων κατά την 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.

### **Matlab**

Το πρόγραμμα Matlab είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια γλώσσα προγραμματισμού. Αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο είναι πολύ "ισχυρό" και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς περιέχει εντολές από την C++ όπως την while, την switch και την if. Στον τομέα των γραφικών όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών και άλλες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα από τα εργαλεία που συνδυάζει αρχεία .m και σχηματίζει έναν ολοκληρωμένο κώδικα γραμμικής συσχέτισης εικόνων. Δίνοντας στο πρόγραμμα μια σειρά από εικόνες ενός δοκιμίου που έχουν τραβηχθεί σταδιακά κατά την παραμόρφωσή του, ο κώδικας αναλύει τις εικόνες και προβάλλει τις μετατοπίσεις και παραμορφώσεις στο πεδίο ελέγχου που ορίζουμε πάνω στην εικόνα.

### **Matchid**

Το πρόγραμμα **Matchid** ([www.matchid.org](http://www.matchid.org)) δημιουργήθηκε από την ερευνητική ομάδα της «Μηχανικής των υλικών, προϊόντων και διεργασιών» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Καθολικού Πανεπιστημίου της Γάνδης (Catholic University College Ghent) σε συνεργασία με το τμήμα Μεταλλουργίας και Μηχανικής των υλικών του Καθολικού Πανεπιστημίου της Λέουβεν (K.U. Leuven). Πρόκειται για μια πλατφόρμα συσχέτισης ψηφιακών εικόνων για δισδιάστατες και τρισδιάστατες μετρήσεις, που επιτρέπει τη μέτρησή της παραμόρφωσης και την εφαρμογή συμπληρωματικών αλγορίθμων συσχέτισης όταν απαιτείται. Το πρόγραμμα αυτό μας δόθηκε δωρεάν για κάποιους μήνες από τον **Pascal Lava**.

### **Phase<sup>2</sup>**

Το Phase<sup>2</sup> της εταιρίας **Rocscience**, είναι ένα ισχυρό δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση ελαστοπλαστικών αναλύσεων σε υπόγειες και επιφανειακές εκσκαφές σε βράχο ή έδαφος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εργασίες μηχανικού όπως για τον σχεδιασμό υποστήριξης, τη μελέτη ευστάθειας πρανών, τη διαρροή υπόγειων υδάτων καθώς και πιθανολογικές αναλύσεις.

## 4.2.Χρησιμοποιούμενα υλικά και χαρακτηρισμός τους

### 4.2.1.Γύψος

Το πρώτο υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματά είναι η **γύψος**. Είναι ένα υλικό φθινό, εύκολο στην παρασκευή και διαμόρφωση δοκιμίων. Σημαντικό μειονέκτημα βέβαια, αποτελεί η χαμηλή αντοχή του.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με σκοπό τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του υλικού (αντοχή, λόγος Poisson, Μέτρο ελαστικότητας Young, κλπ). Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τετραγωνικά 5x5x5cm (δοκιμές θλίψης), ορθογωνικά 4x4x16cm (δοκιμές κάμψης) και 15x7,5x3,5cm (δοκιμές θλίψης), κυλινδρικά 5,5x12cm (δοκιμές θλίψης) και μορφής δίσκου 5,5x2,5cm (δοκιμές brazilian).

Η αναλογία που επελέγη να χρησιμοποιηθεί ήταν **γύψος/νερό=1,5**. Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων έχει ως εξής:

- Βάζουμε το νερό σε μια λεκάνη
- Ρίχνουμε σιγά σιγά τη γύψο αναδεύοντας ομαλά
- Βάζουμε τη λεκάνη στο μίξερ και ανακατεύουμε για 2 λεπτά ή εναλλακτικά με το χέρι
- Με τη βοήθεια μιας σπάτουλας, βάζουμε το υλικό στα καλούπια και πιέζουμε για να μην δημιουργήσουμε κενά
- Δονούμε το καλούπι με το μίγμα για 2 περίπου λεπτά
- Ζυγίζουμε το καλούπι με το μίγμα
- Βάζουμε τα καλούπια στο φούρνο στους 45°C για 1 ώρα
- Μετά τη 1 ώρα ξεκαλουπώνουμε και καθαρίζουμε τα καλούπια για επόμενη χρήση
- Ζυγίζουμε τα δοκίμια και καταγράφουμε την ώρα
- Τα τοποθετούμε ξανά μέσα στο φούρνο στους 45°C και ζυγίζουμε κάθε μια ώρα με σκοπό τον προσδιορισμό της απώλειας μάζας που αντιστοιχεί σε απώλεια υγρασίας
- Οι δοκιμές γίνονται μετά από τουλάχιστον 4 μέρες και αφού σταθεροποιηθεί η μάζα των δοκιμίων.
- Η απώλεια μάζας σε ποσοστό % υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{απώλεια μάζας} = \frac{\text{μάζα σε χρόνο } t - \text{αρχική μάζα μετά από 1 ώρα}}{\text{αρχική μάζα μετά από 1 ώρα}} \times 100$$

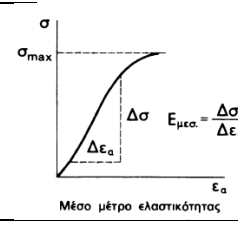
Δοκιμές έγιναν με **γύψο καλλιτεχνίας** και **οικοδομική γύψο KNAUF** ταχείας πήξεως. Στις δοκιμές με την γύψο καλλιτεχνίας χρησιμοποιήθηκε αναλογία γύψου/νερού 1,8 έως 2, ενώ στην οικοδομική γύψο αναλογία 1,5 για να έχει κάποια εργασιμότητα καθώς είναι ταχεία πήξεως. Παρατηρήθηκε ότι η γύψος καλλιτεχνίας παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα αντοχών από την οικοδομική. Εν τούτοις δεν επιλέχθηκε να



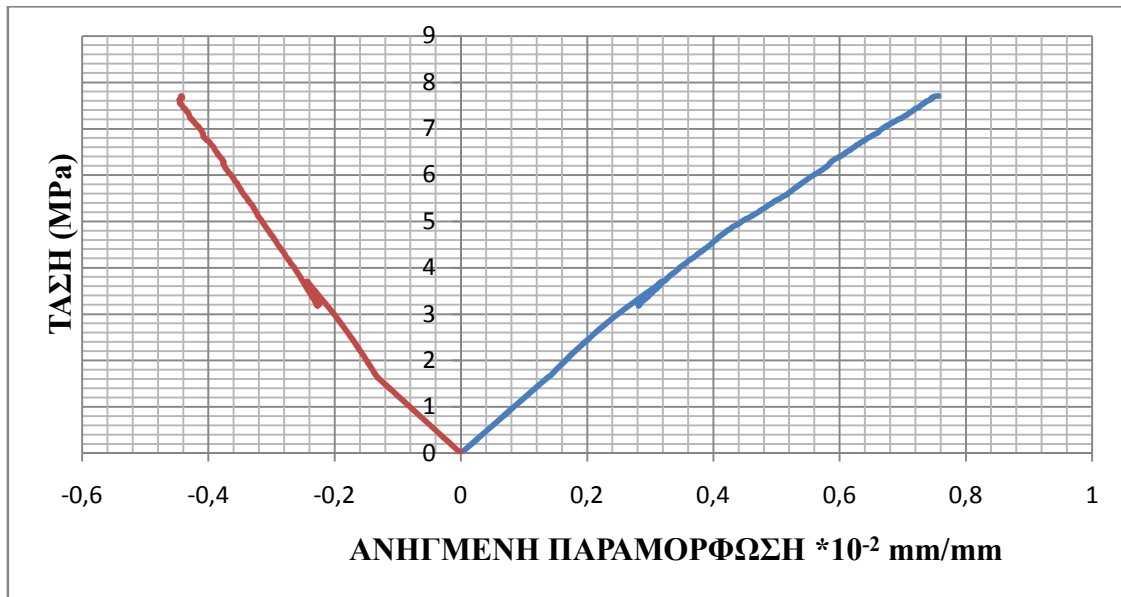
χρησιμοποιηθεί, καθώς η διαθέσιμη ποσότητα δεν επαρκούσε για την εκτέλεση όλων των δοκιμών.

Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα χαρακτηριστικά της γύψου που προσδιορίστηκαν, οι τιμές τους καθώς και ο τρόπος υπολογισμού τους.

**Πίνακας 2**

<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΥΨΟΥ</b>			
<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Τρόπος υπολογισμού</b>	
<b>Λόγος Poisson</b>	0,3	$\nu = -\frac{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_d}$	
<b>Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)</b>	3,8GPa		
<b>Αντοχή σε θλίψη</b>	7,5MPa	Μέγιστη τάση θραύσης	
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό</b>	2,83MPa	Δοκιμή Brazilian	
		$\sigma_s = -\frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t}$	
<b>Wave Velocity</b>	2419m/s 2240m/s 3008m/s	Σε δοκίμιο 15x15x4 Σε δοκίμιο 15x15x3,5 Σε δοκίμιο 5x5x5	Με συσκευή υπερήχων
<b>Ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος Vp σε κυλινδρικά δοκίμια</b>	2556m/s	$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}}$	
<b>Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος Vs σε κυλινδρικά δοκίμια</b>	1366m/s	$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}}$	
		$K = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)}, G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$	
<b>Vp/Vs</b>	1,87		

Ένα από τα διαγράμματα Αξονικής τάσης-Αξονικής τροπής από το οποίο υπολογίστηκαν ο λόγος Poisson και το Μέτρο Ελαστικότητας φαίνεται παρακάτω. Στο διάγραμμα αυτό, το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται στα 10GPa, που αποτελεί μη ρεαλιστική τιμή για τη γύψο. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην κόλλα στερεοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για την στήριξη των τροπόμετρων, η οποία ήταν παλιά και πιθανώς είχε σκληρυνθεί, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να μεταφέρει τις παραμορφώσεις του υλικού στο τροπόμετρο.



**Διάγραμμα 1**

Διάγραμμα Αξονικής Τάσης – αξονικής τροπής και αξονικής Τάσης – διαμετρικής τροπής κυλινδρικού δοκιμίου γύψου

#### 4.2.2. Έγχυτο τσιμεντοειδές κονίαμα

Το δεύτερο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα έγχυτο τσιμεντοειδές κονίαμα περιορισμένης συρρίκνωσης της Sika (**Sika Grout 212**). Πρόκειται για ενός συστατικού διογκούμενο τσιμεντοειδές κονίαμα χυτεύσεων, γεμισμάτων και αγκυρώσεων, η χημική βάση του οποίου είναι τσιμέντο, επιλεγμένα αδρανή με μέγιστη διάμετρο κόκκου 2mm και ειδικά πρόσθετα. Η πυκνότητα του κονιάματος είναι 2,15-2,35Kg/lit και:

- Είναι σύμφωνο με EN 1504-6
- Έχει υψηλή ρευστότητα χωρίς απόμειξη
- Υφίσταται περιορισμένη συρρίκνωση λόγω διόγκωσης,
- Φτάνει υψηλές πρώιμες αντοχές και τελικές μηχανικές αντοχές
- Έχει δυνατότητα προσθήκης αδρανών αν κριθεί απαραίτητο.

Για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του υλικού επαναλαμβάνεται ίδια διαδικασία με τη γύψο. Ο τρόπος παρασκευής του είναι εξίσου απλός με τη γύψο:

- Καθαρίζουμε τα καλούπια από σκόνες και τοποθετούμε λάδι ή βαζελίνη στις επιφάνειες για εύκολο ξεκαλούπωμα
- Ρίχνουμε 28kg σκόνης σε 4L νερό (3,7-4,4L νερό ανάλογα την επιθυμητή εργασιμότητα). Στην συγκεκριμένη περίπτωση ρίξαμε 4,45L νερού
- Ανακατεύουμε για 3 λεπτά με το μίξερ σε χαμηλές στροφές (<500Rpm)
- Αφήνουμε το κονίαμα για 2-3 λεπτά
- Ανακατεύουμε με ένα μυστρί

- Αδειάζουμε το υλικό μέσα στα καλούπια εντός μισής ώρας (χρόνος ενέργειας 30 λεπτά)
- Σύμφωνα με τις οδηγίες ανάμιξης, το υλικό χρειάζεται 4 ώρες για να σκληρυνθεί, όμως θα αφαιρεθεί από το καλούπι μετά από 24 ώρες.

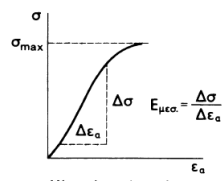
Με την ανάμιξη παρασκευάστηκαν τα εξής δοκίμια:

- 4 δίσκοι για δοκιμή Brazilian (5,5x2,75cm)
- 4 κυλινδρικά για δοκιμές θλίψης (5,5x12cm)
- 12 κυβικά για δοκιμές θλίψης (5x5x5cm)
- 1 ορθογωνικό για δοκιμή κάμψης (4x12cm)
- 4 πρισματικά για δοκιμές θλίψης (15x7,5x3cm,8)
- 1 τετραγωνικό χωρίς οπή (15x15x3,9cm)
- 6 τετραγωνικά (15x15x3,9cm) με οπές 1,5cm/ 1,8cm (x2)/ 2cm/ 4cm/ 5cm
- 2 τετραγωνικά με οπή 3,4cm (15x15x7,5cm)

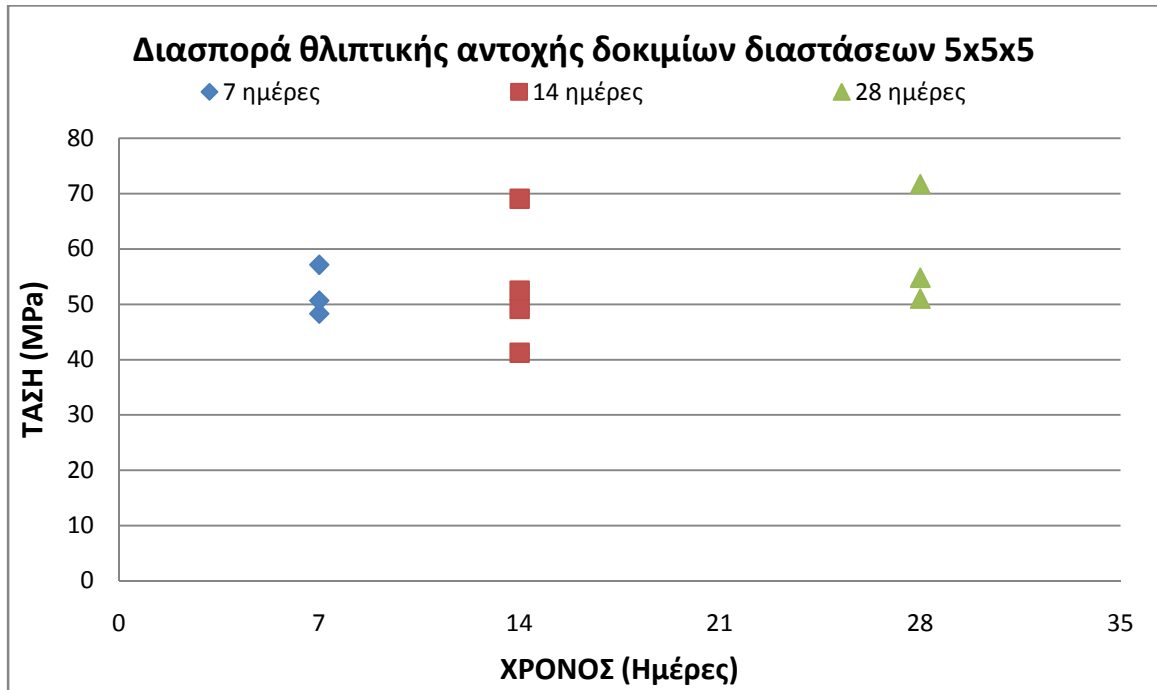
Ο συνολικός όγκος των καλουπιών ήταν 17296,78cm<sup>3</sup>=17,29lt, ο συνολικός όγκος των οπών ήταν 312,95cm<sup>3</sup>=0,31lt, άρα παρασκευάστηκαν **16,98lt υλικού**.

Έτσι, αντίστοιχα με τη γύψοπροέκυψαν:

**Πίνακας 2**

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ			
Χαρακτηριστικό	Τιμή	Τρόπος υπολογισμού	
Λόγος Poisson	0.15	$\nu = - \frac{\Delta\sigma / \Delta\varepsilon_d}{\Delta\sigma / \Delta\varepsilon_d}$	
Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)	20.2GPa	 <p>Μέσο μέτρο ελαστικότητας</p>	
Αντοχή σε θλίψη	53MPa	Μέγιστη τάση θραύσης	
Αντοχή σε εφελκυσμό	5,76MPa	Δοκιμή Brazilian	
		$\sigma_s = - \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t}$	
Wave Velocity (m/s)	4265,23	Σε δοκίμιο 12x5,5	Με συσκευή υπερήχων
	4090.90	Σε δοκίμιο 5x5x5	
Ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος V <sub>p</sub> σε κυλινδρικά δοκίμια (m/s)	4265,23	$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1-2\nu)(1+\nu)}}$ $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1+\nu)}}$ $K = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)}, G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$	
Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος V <sub>s</sub> σε κυλινδρικά δοκίμια (m/s)	2765,63		
V <sub>p</sub> /V <sub>s</sub>	1,56		

Στις δοκιμές που εκτελέσθηκαν η θλιπτική αντοχή του υλικού παρουσίασε διακύμανση η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα για τις 7, 14 και 28 ημέρες. Η διασπορά αυτή αποδίδεται στην διαδικασία της προετοιμασίας του υλικού, αφού παρατηρήθηκε κάποια ανομοιογένεια κατά την ανάμιξη.



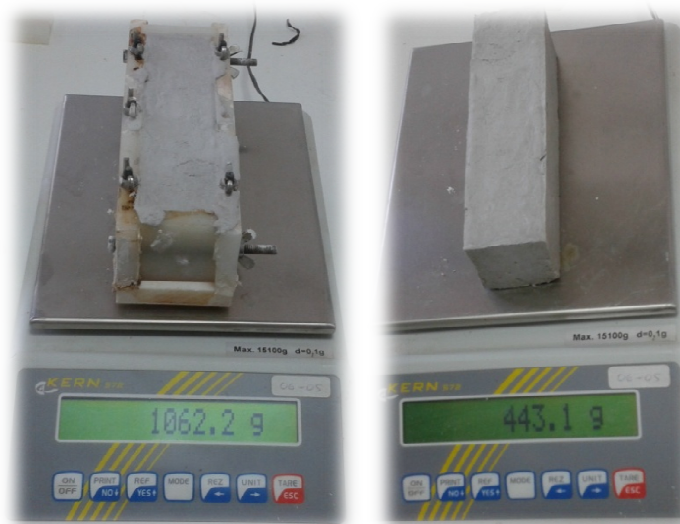
Διάγραμμα 2

#### 4.2.3. Φωτογραφίες από την προετοιμασία και τις δοκιμές



**Εικόνα 5**

Καλούπια τετραγωνικά και ορθογωνικά από υλικό κατασκευής «ertacetal» με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες



**Εικόνα 6**

Ζύγιση του ορθογωνικού δοκιμίου από γύψο καλλιτεχνίας πριν και μετά την αφαίρεσή του από το καλούπι

Προσδιορισμός ποσοστού απώλειας μάζας:  $w = 1 - \frac{363,9}{443,1} = \underline{\underline{17,87\%}}$  όπου 363,9g το τελικό βάρος του δοκιμίου μετά από 4 ημέρες.



*7.α.  
Δοκιμή υπερήχων στο δοκίμιο Δ1*



*7.β.  
Συσκευή υπερήχων*

*Εικόνα 7*



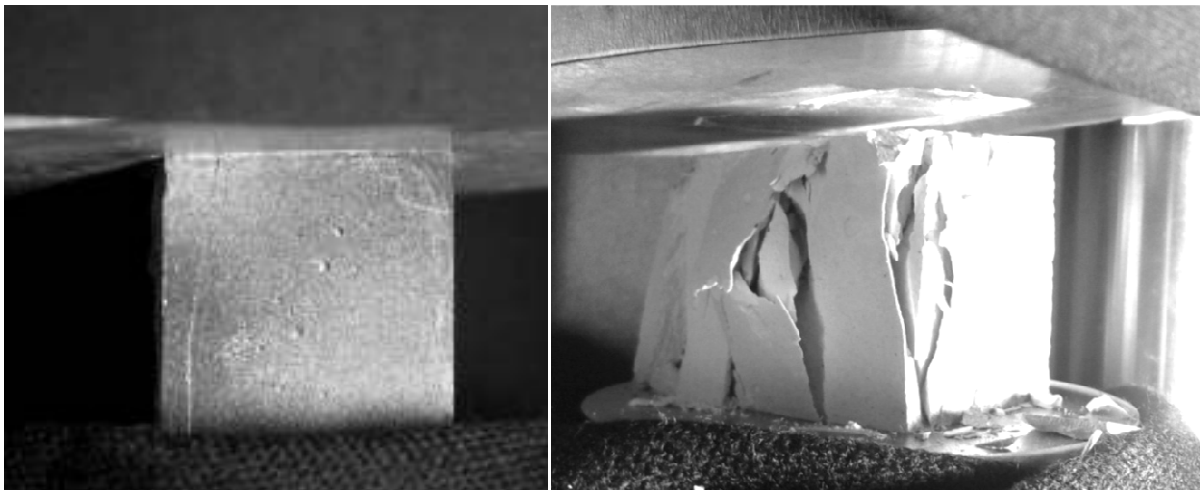
*Εικόνα 8  
Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος*



*Εικόνα 9  
Δοκίμια γύψου με διαφόρων διαστάσεων οπές*



**Εικόνα 10**  
*Αστοχία σε θλίψη κυβικών δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος*



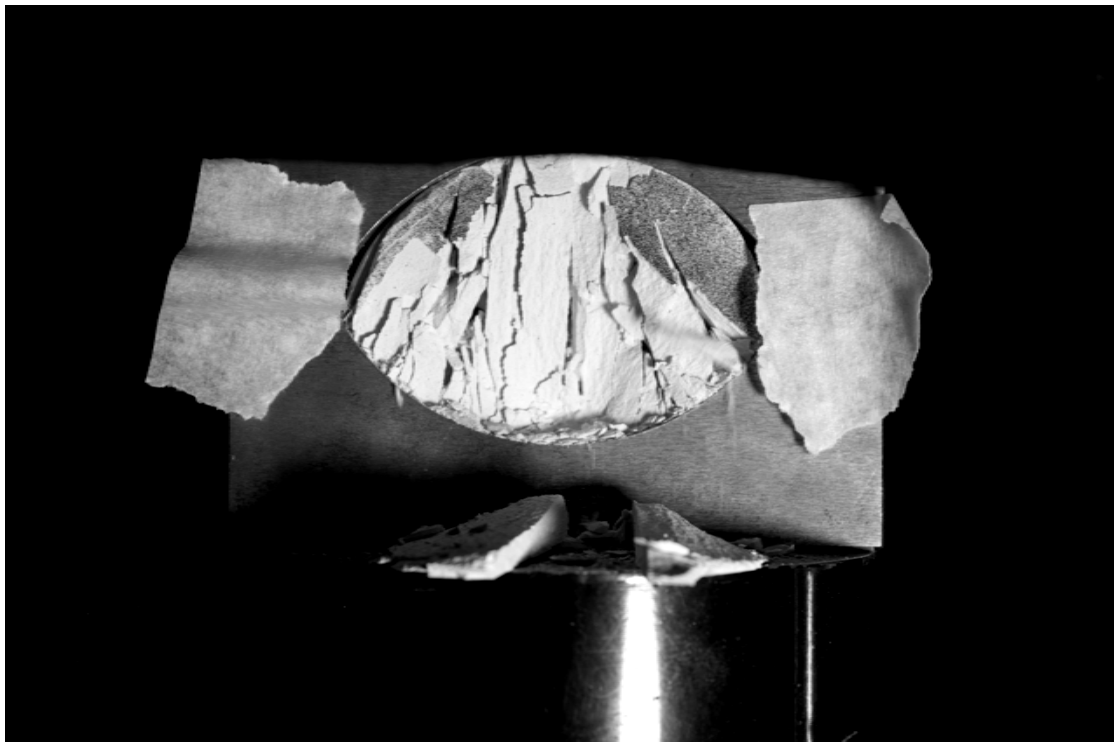
**Εικόνα 11**  
*Αστοχία κυβικών δοκιμίων γύψου σε θλίψη με ταυτόχρονη δοκιμή μέτρησης της παραμόρφωσης μέσω συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC)*



**Εικόνα 12**  
*Αστοχία γύψινου δοκίμιου σε εφελκυσμό (Brazilian test)*



**Εικόνα 13**  
*Αστοχία δοκίμιου τσιμεντοκονιάματος σε εφελκυσμό (Brazilian test)*



**Εικόνα 14**  
*Αστοχία δοκίμιου γύψου σε δοκιμή Brazilian με ταυτόχρονη δοκιμή μέτρησης της παραμόρφωσης μέσω συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC). Οι ταινίες τοποθετήθηκαν για να μην γίνεται αντανάκλαση του φωτός στη συσκευή κατά την δοκιμή DIC και η ταινία γύρω από το δοκίμιο σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία της ISRM*





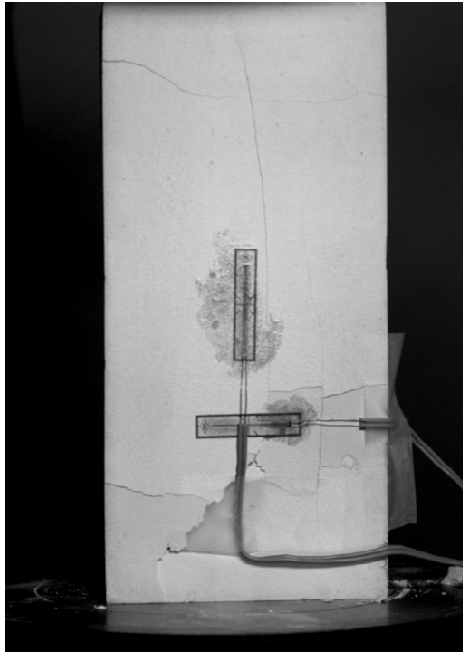
**Εικόνα 15**  
Αστοχία δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος σε θλίψη  
(αξονικός σχισμός σε θλίψη)



**Εικόνα 16**  
Αστοχία κυλινδρικού δοκιμίου γύψου σε θλίψη  
(αξονικός σχισμό σε θλίψης)



**Εικόνα 17**  
Διατμητική θραύση κοντά στο άκρο του κυλινδρικού γύψινου δοκιμίου που αστόχησε σε θλίψη με αξονικό σχισμό. Το ίδιο συνέβη και στο δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος.



**Εικόνα 18**  
Τροπόμετρα σε πρισματικό δοκίμιο γύψου που έχει  
αστοχήσει σε θλίψη



**Εικόνα 19**  
Αστοχία σε θλίψη πρισματικού δοκιμίου από  
τσιμεντοκονίαμα



**Εικόνα 20**  
Προετοιμασία για τη δοκιμή κάμψης με  
ταυτόχρονη δοκιμή μέτρησης της  
παραμόρφωσης μέσω συσχέτισης  
ψηφιακών εικόνων (DIC)



**Εικόνα 21**  
Αστοχία γύψινου δοκιμίου σε κάμψη

### **4.3.Προκαταρκτικές μετρήσεις ακουστικής εκπομπής**

#### **4.3.1.Επιλογή αισθητήρων και μέσου σύζευξης με το δοκίμιο**

Οι αισθητήρες που θα δοκιμαστούν είναι οι **MICRO 100S** με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας **200-950 kHz** και οι **R15** με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας **50-200 kHz**. Για την ενίσχυση του σήματος ΑΕ χρησιμοποιούνται προενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος κατά 20/40/60 dB και δυνατότητα σύνδεσης σε αισθητήρες μονής εξόδου ή διαφορικούς αισθητήρες.

Ένα πολύ βασικό πρόβλημα σε πειράματα ακουστικής εκπομπής, είναι ο τρόπος στήριξης των αισθητήρων πάνω στο υλικό. Η επιφάνεια των αισθητήρων είναι ευαίσθητη και είναι επικίνδυνο να καταστραφούν χρησιμοποιώντας π.χ. κάποια ισχυρή κόλλα. Έτσι, πρώτη ανησυχία αποτελεί η εύρεση κατάλληλου τρόπου στήριξης των αισθητήρων πάνω στα δοκίμια της γύψου και του τσιμεντοκονιάματος. Οι τρόποι που δοκιμάστηκαν είναι:

- ❖ Πλαστελίνη
- ❖ Blutack
- ❖ Grease silicon OKS 1110
- ❖ Σελοταιπ με Grease silicon OKS 1110 ή gel υπερήχων ή γράσσο
- ❖ Λάστιχο και Grease silicon OKS 1110 ή gel υπερήχων ή γράσσο
- ❖ Ταινία με Grease silicon OKS 1110 ή gel υπερήχων ή γράσσο

Από τους τρόπους που δοκιμάστηκαν, το λάστιχο με κάποιο υλικό σύζευξης (Grease silicon OKS 1110 ή gel υπερήχων ή απλό γράσσο) είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος στήριξης των αισθητήρων. Φυσικά και η ταινία με κάποιο υλικό σύζευξης είναι αποτελεσματική, όμως καλύπτει περισσότερη επιφάνεια του δοκιμίου κι έτσι δεν είναι δυνατή η παρακολούθηση της θραύσης του δοκιμίου.

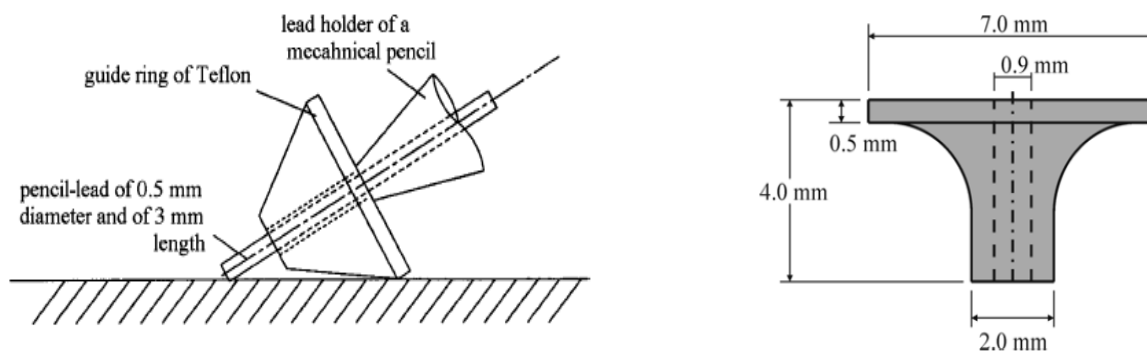
Μετά την επιλογή του τρόπου στήριξης των αισθητήρων, ακολουθούν δοκιμές ορθής λειτουργίας τους και εντοπισμού της θέσης της πηγής ακουστικών γεγονότων από το πρόγραμμα AEWin for SAMOS.

#### **4.3.2 Μετρήσεις ταχύτητας διάδοσης και εξασθένησης σήματος ΑΕ σε δοκίμια γύψου και τσιμεντοκονιάματος**

Για να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τη βλάβη που υφίσταται το υλικό, πρέπει να εξεταστεί η συμπεριφορά της εξασθένησης του σήματος και της ταχύτητας των υπερήχων. Η παρουσία ανομοιογενειών αυξάνει την απόσβεση κυρίως λόγω της αναδιανομής της ενέργειας σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτή του δέκτη. Πολύ ανομοιογενή υλικά έχουν μεγαλύτερη διασπορά στην απόσβεση παρά στην ταχύτητα. Η ταχύτητα μπορεί να μειωθεί 30% με την ανομοιογένεια [Aggelis και Shiotania, 2007]. Το εργαστήριο διαθέτει την συσκευή PUNDIT 7 (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) για την πραγματοποίηση δοκιμών μέτρησης της ταχύτητας υπερήχων. Η

δοκιμή αυτή αποτελεί μια μη καταστροφική δοκιμή ελέγχου της ομοιογένειας και της ποιότητας του υπό εξέταση δοκιμίου. Η μέτρηση γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.4.

Πριν από τη μέτρηση της εξασθένησης και άλλων προκαταρκτικών δοκιμών θα πρέπει να γίνει έλεγχος της ορθής τοποθέτησης των αισθητήρων. Αυτό γίνεται με το σπάσιμο μύτης μολυβιού (2H), τεχνική γνωστή ως **PLB (Pencil Lead Break)** ή μέθοδος **Hsu-Nielsen**. Στη μύτη του μολυβιού προσαρμόζεται ειδικά διαμορφωμένο πλαστικό κάλυμμα, ώστε να αποφεύγεται η επαφή της μεταλλικής άκρης του μολυβιού με την επιφάνεια του δοκιμίου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε μετρήσεις ταχύτητας και εξασθένησης των σημάτων ΑΕ αλλά και για τον έλεγχο της ορθής εγκατάστασης των αισθητήρων στο δοκίμιο.



**Εικόνα 22**

*Ειδικό προστατευτικό κάλυμμα Hsu-Nielsen προσαρμοσμένο στην άκρη μηχανικού μολυβιού απαραίτητο για την τεχνική PLB*

*(Πηγή: Hardy 2006 και RILEM Technical Committee - Ohtsu, 2010)*

Κάποια σήματα μπορεί να μην είναι ανιχνεύσιμα από τους αισθητήρες λόγω της εξασθένησης ή της διάδοσης προς διαφορετική κατεύθυνση. Επιπρόσθετα κατά την μέτρηση ΑΕ, πρέπει να εκτιμηθεί το επίπεδο θορύβου. Η δοκιμή πρέπει να γίνεται ώστε να περιορίζεται η καταγραφή του ανεπιθύμητου θορύβου όσο το δυνατόν περισσότερο. Αν οι θόρυβοι έχουν παρόμοιες συχνότητες με αυτές της δοκιμής, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν τα πλάτη και οι πηγές των θραύσεων στο υλικό [RILEM Technical Committee - Ohtsu, 2010].

Για τις δοκιμές, το κατώφλι ορίστηκε σε όλες τις περιπτώσεις σε **45 dB** και ο ρυθμός δειγματοληψίας για τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σε 5 MSPS (Mega Samples Per Second), ενώ οι ενισχυτές παρέχουν ενίσχυση **40dB**. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι έγιναν και δοκιμές με χαμηλότερο κατώφλι από την προενίσχυση και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά. Οι δοκιμές των αισθητήρων περιλαμβάνουν δοκιμή βαθμονόμησης και σύζευξης (calibration και coupling), δοκιμή εξασθένησης του σήματος (attenuation) και δοκιμή εντοπισμού της θέσης της πηγής.

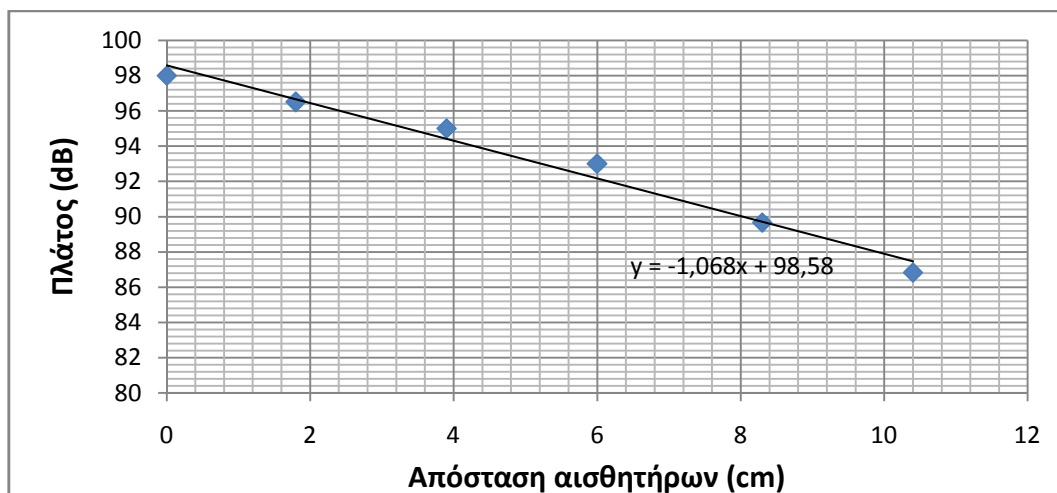
- **Βαθμονόμηση και σύζευξη (Calibration και coupling)**

Αρχικά γίνεται ένας έλεγχος όλων των αισθητήρων μεμονωμένα για να φανεί αν λειτουργούν σωστά. Αυτό που γίνεται είναι εγκατάσταση των αισθητήρων (αφού έχει τοποθετηθεί κάποιο υλικό σύζευξης στην επιφάνειά τους π.χ. γράσσο ή gel υπερήχων) και δοκιμή pencil lead break, δηλαδή σπάσιμο μυτών μολυβιού (0.5, 2H) σε μια μικρή απόσταση (π.χ.1cm) από αυτούς και έλεγχος αν το πλάτος που διαβάζουν είναι μεγαλύτερο από **90dB**. Αν ναι, αυτό σημαίνει πως ο αισθητήρας λειτουργεί σωστά, βρίσκεται σε καλή επαφή με το δοκίμιο και το υλικό σύζευξης που έχει χρησιμοποιηθεί είναι αποτελεσματικό. Η δοκιμή αυτή γίνεται σε όλους τους αισθητήρες όχι μόνο στην αρχή, αλλά σε τακτά χρονικά διαστήματα ανάμεσα στις δοκιμές καθώς σε κάθε νέα δοκιμή, οι αισθητήρες καθαρίζονται και τοποθετείται ξανά σε αυτούς gel υπερήχων. Επίσης σε κάθε δοκιμή γίνεται βαθμονόμηση των αισθητήρων με σπάσιμο μύτης (0.5, 2H) δίπλα ακριβώς από κάθε αισθητήρα (σε απόσταση 1 cm περίπου) ώστε να εξακριβωθεί αν η τιμή του πλάτους που καταγράφεται είναι υψηλή. Αν δεν είναι υψηλή σημαίνει ότι υπάρχει κάποιο πρόβλημα όπως π.χ. να μην πατάει καλά ο αισθητήρας ή να μην είναι αρκετό το υλικό σύζευξης.

- **Δοκιμή εξασθένησης σήματος AE (Attenuation)**

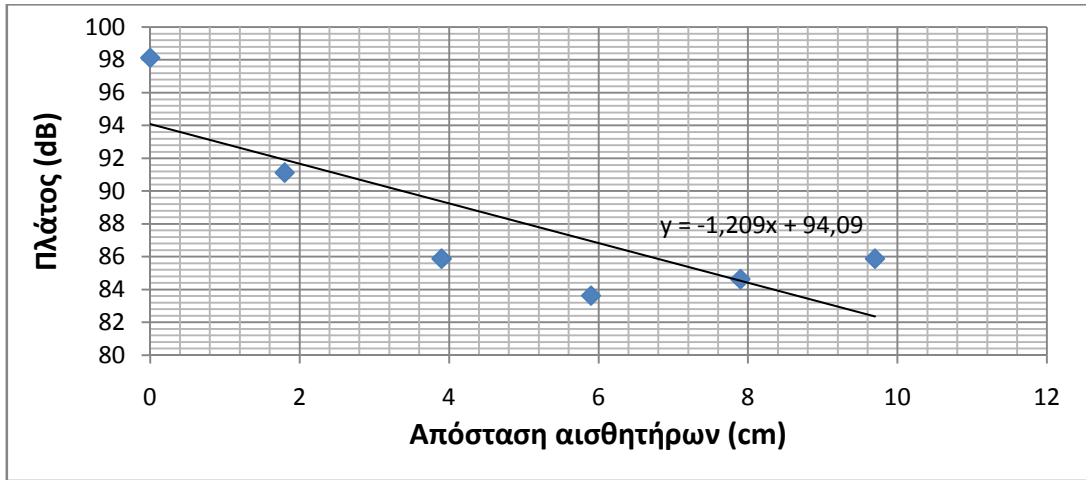
Αφού λοιπόν αποδείχθηκε ότι λειτουργούν σωστά οι αισθητήρες, τοποθετούνται σε μια σειρά με απόσταση 1,5cm μεταξύ τους εκτελείται και πάλι δοκιμή pencil lead break σπάζοντας μύτες ακριβώς δίπλα στον 1<sup>ο</sup> αισθητήρα και καταγράφοντας τα πλάτη που διαβάζουν όλοι οι αισθητήρες. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνεται η καμπύλη εξασθένησης του σήματος. Η δοκιμή γίνεται στα δοκίμια γύψου και τσιμεντοκονιάματος με τα δύο διαθέσιμα είδη αισθητήρων, MICRO 100S και R15 και με τρία διαφορετικά υλικά σύζευξης: grease silicon OKS 1110, gel υπερήχων και γράσο. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα εξασθένησης του σήματος της ακουστικής εκπομπής.

✚ Καμπύλες εξασθένησης σε δοκίμια γύψου



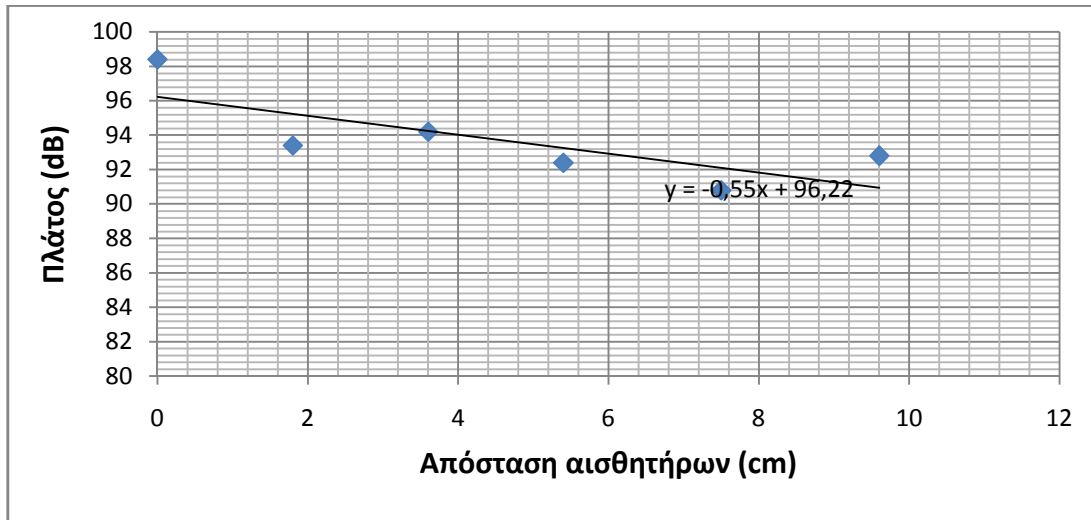
**Διάγραμμα 3**

Καμπύλη εξασθένησης του σήματος AE των αισθητήρων MICRO 100S σε δοκιμή pencil lead break με υλικό σύζευξης Grease silicon OKS 1110 και λάστιχο για καλύτερη επαφή του αισθητήρα με το δοκίμιο γύψου



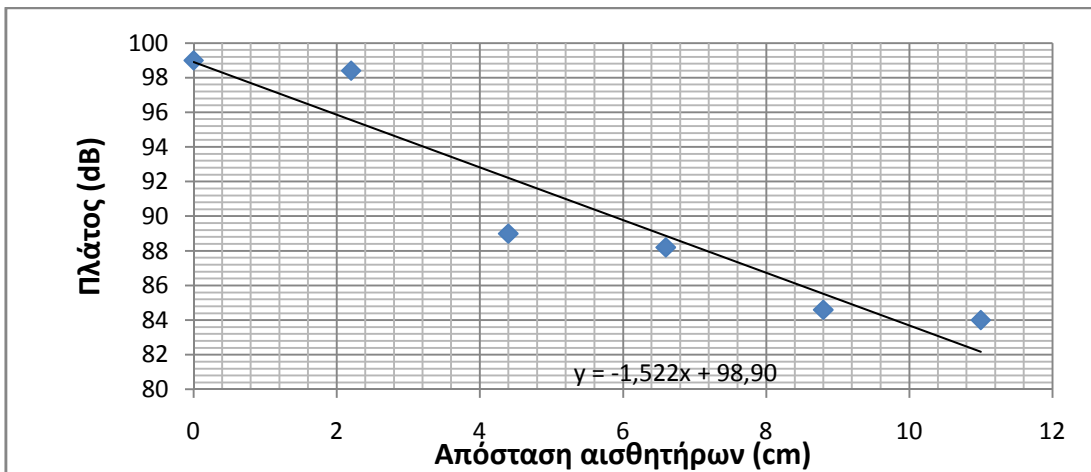
**Διάγραμμα 4**

Καμπύλη εξασθένισης του σήματος ΑΕ των αισθητήρων **MICRO 100S** σε δοκιμή pencil lead break με υλικό σύζευξης **γέλη υπερήχων** και λάστιχο για καλύτερη επαφή του αισθητήρα με το **δοκίμιο γύψου**




**Διάγραμμα 5**

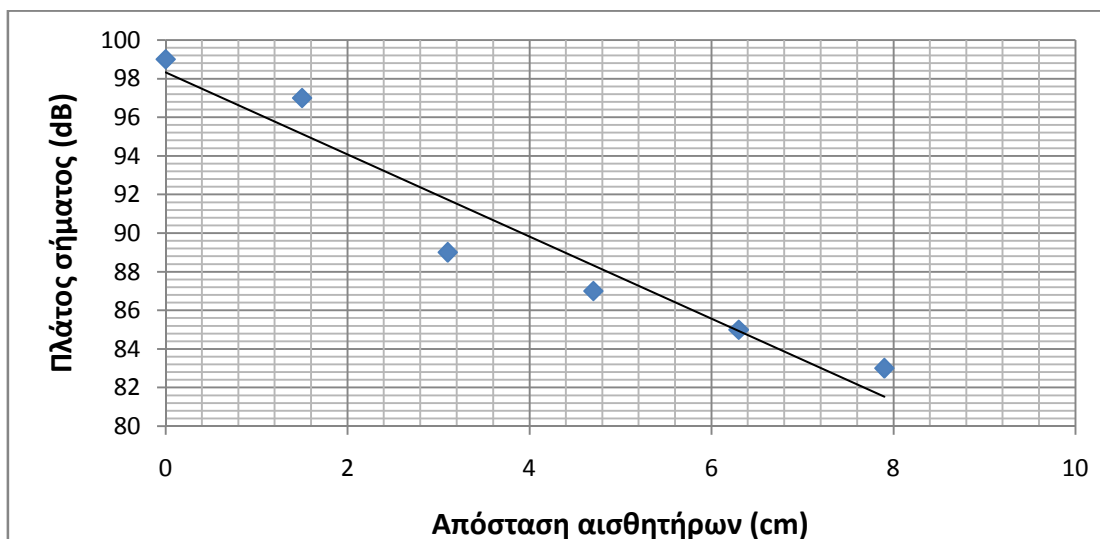
Καμπύλη εξασθένισης του σήματος ΑΕ των αισθητήρων **MICRO 100S** σε δοκιμή pencil lead break με υλικό σύζευξης **γράσο** και λάστιχο για καλύτερη επαφή του αισθητήρα με το **δοκίμιο γύψου**



**Διάγραμμα 6**

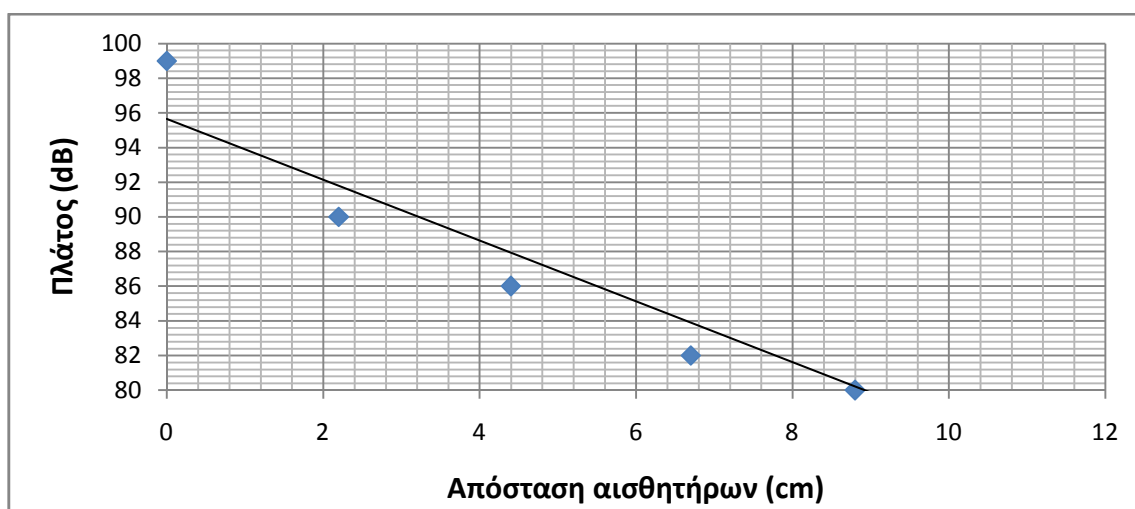
Καμπύλη εξασθένισης αισθητήρων **R15** του σήματος ΑΕ σε δοκιμή pencil lead break με υλικό σύζευξης **gel υπερήχων** και λάστιχο για καλύτερη επαφή του αισθητήρα με το **δοκίμιο γύψου**

 Καμπύλες εξασθένισης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος



*Διάγραμμα 7*

*Καμπύλη εξασθένισης αισθητήρων **MICRO 100S** του σήματος AE σε δοκιμή pencil lead break με υλικό σύζευξης **gel υπερήχων** και λάστιχο για καλύτερη επαφή του αισθητήρα με το **δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος***



*Διάγραμμα 8*

*Καμπύλη εξασθένισης αισθητήρων **R15** του σήματος AE σε δοκιμή pencil lead break με υλικό σύζευξης **gel υπερήχων** και λάστιχο για καλύτερη επαφή του αισθητήρα με το **δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος***

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες, το γράσο και η σιλικόνη OKS 1110 λειτουργούν καλύτερα σαν υλικό σύζευξης στους MICRO 100S, όμως οι αισθητήρες γλιστράνε σε θέσεις διαφορετικές από τις επιθυμητές και μπορεί να χρειαστούν και μισή ώρα για να σταθεροποιηθούν πάνω στο δοκίμιο. Για αυτό το λόγο, στα πειράματα θα χρησιμοποιηθεί το **gel υπερήχων**. Στους αισθητήρες R15 δοκιμάστηκε μόνο gel υπερήχων το οποίο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης στα δοκίμια του τσιμεντοκονιάματος τοποθετήθηκε μόνο gel υπερήχων αφού το γράσο και η σιλικόνη OKS 1110 είχαν τα ίδια προβλήματα με τη γύψο.

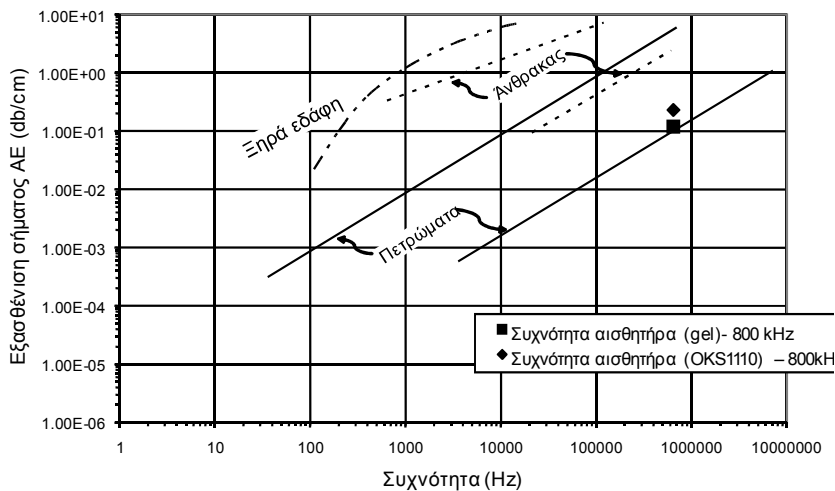
Για τη συσχέτιση των μετρήσεων με δημοσιευμένα δεδομένα της βιβλιογραφίας (Koerner et al., 1981) υπολογίσθηκε ο συντελεστής εξασθένησης  $a_c$  (attenuation coefficient). Ο συντελεστής εξασθένησης υπολογίζεται από τη σχέση (Hardy, 2003):

$$a_c = (20/d) \log A_1/A_2$$

όπου  $a_c$  ο συντελεστής εξασθένησης,  $d$  η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και  $A_1$ ,  $A_2$  η μέση τιμή του πλάτους από 3 δοκιμές των σημάτων ΑΕ στους αισθητήρες S1 και S2 αντίστοιχα. Οι αισθητήρες S1 και S2 απέχουν μεταξύ τους 7,5cm. Εάν το  $d$  είναι σε m, ο  $a_c$  υπολογίζεται σε **dB/m**. Έτσι προκύπτουν:

Πίνακας 3

Υλικό	Τύπος αισθητήρα	Υλικό σύζευξης	$a_c$ (dB/m)
Γύψος	MICRO 100S	Grease silicon OKS 1110	10,10
		Gel υπερήχων	11,94
		Γράσο	5,30
	R15	Gel υπερήχων	12,97
Τσιμεντοκονίαμα	MICRO 100S	Gel υπερήχων	19,38
	R15	Gel υπερήχων	21,03



Διάγραμμα 9

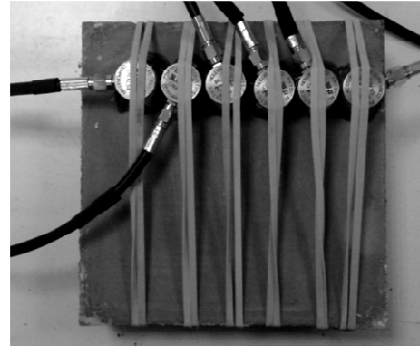
Συντελεστής εξασθένησης  $a_c$  συναρτήσει της συχνότητας για διάφορα υλικά σύμφωνα με τον Hardy, 2003 που συμπεριλαμβάνει τις μετρήσεις στη γύψο με αισθητήρες MICRO 100S με gel υπερήχων και γράσο





**Εικόνα 23**

Δοκιμή εξασθένισης του σήματος της ΑΕ με gel υπερήχων σαν μέσο σύζευξης στους αισθητήρες MICRO 100S σε δοκίμιο γύψου (αντίστοιχα έγινε και στο δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος)

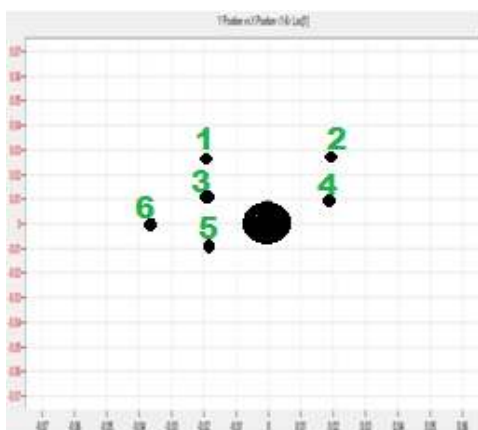


**Εικόνα 24**

Δοκιμή εξασθένισης του σήματος της ΑΕ με gel υπερήχων σαν μέσο σύζευξης στους αισθητήρες R15 σε δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος (αντίστοιχα έγινε και στο γύψινο δοκίμιο)

### 4.3.3 Εντοπισμός της θέσης της πηγής

Απαραίτητο πριν από κάθε δοκιμή είναι να εξακριβωθεί αν λειτουργεί σωστά το σύστημα εντοπισμού της πηγής. Έτσι, τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες στη θέση στην οποία θα τοποθετηθούν κατά τη δοκιμή θλίψης και με την εκτέλεση 50 δοκιμών pencil lead break (50 μύτες μολυβιού 0,5, 2H) στο ίδιο σημείο. Σκοπός είναι προσδιοριστεί αν το πρόγραμμα επεξεργασίας που χρησιμοποιείται (AEWin for SAMOS) βρίσκει το σημείο αυτό ή αν υπάρχει διασπορά στα αποτελέσματα. Επίσης, ένας άλλος έλεγχος είναι αν το πρόγραμμα βρίσκει τη σωστή χρονική στιγμή υπέρβασης. Στη δοκιμή αυτή γίνεται πειραματισμός και με τη θέση τοποθέτησης των αισθητήρων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται 3 διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων. Το κέντρο της οπής βρίσκεται στο 0,0 κι έχει διάμετρο 1,8cm.



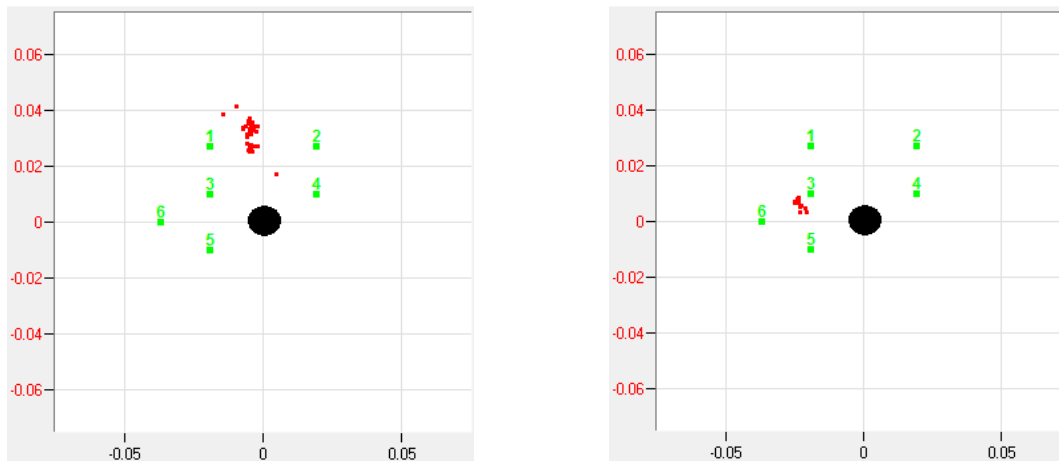
**Εικόνα 25**

Θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων για δοκιμές εντοπισμού θέσης της πηγής



**Εικόνα 26**

Δοκιμή Pencil lead break Για τον εντοπισμό της πηγής



**Εικόνα 27**  
Κάναβος τοποθέτησης των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής

**Πίνακας 4**

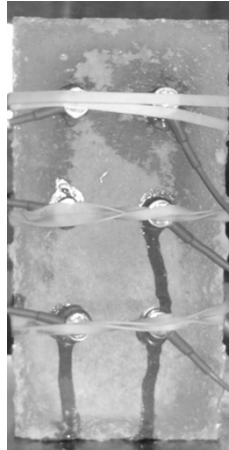
Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.019	0,027
2	0.019	0,027
3	-0.019	0,010
4	0.019	0,010
5	-0.019	-0,010
6	-0,037	0,000

Στον παραπάνω πίνακα οι τιμές είναι ως προς το κέντρο της οπής.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται μια διασπορά στη θέση εντοπισμού της πηγής η οποία οφείλεται στο ότι στο σημείο που έσπαγαν οι μύτες το υλικό φθειρόταν με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται λίγο και το σημείο εφαρμογής. Επίσης μπορεί να οφείλεται σε μικροδομήσεις του δοκιμίου που έχει τοποθετηθεί οριζόντια, καθώς τα λάστιχα που εξασφαλίζουν την καλή επαφή των αισθητήρων με το δοκίμιο, δεν επιτρέπουν την τέλεια οριζοντίωσή του. Γενικά τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

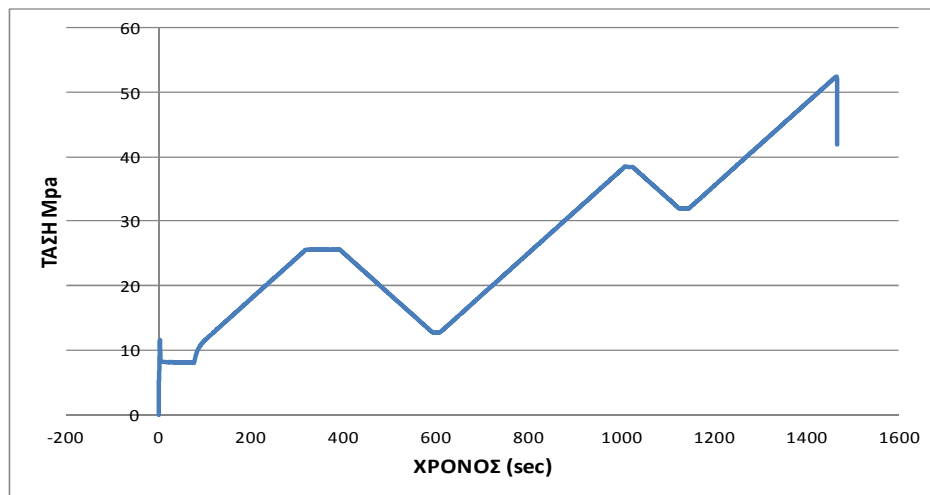
#### 4.3.4. Πείραμα εξακρίβωσης του φαινομένου Kaiser σε δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος

Για την παρακολούθηση του **φαινομένου Kaiser**, τοποθετήθηκαν σε πρισματικό δοκίμιο διαστάσεων 15,2x7,8x4 cm οι αισθητήρες MICRO100S με gel υπερήχων σαν υλικό σύζευξης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



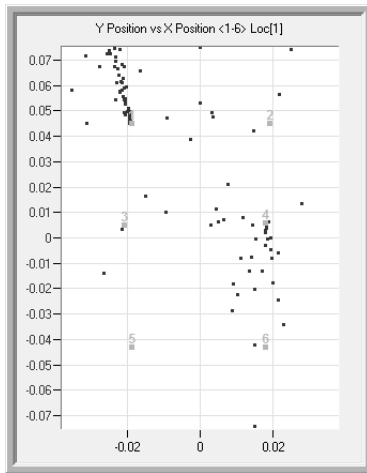
**Εικόνα 28**  
*Τοποθέτηση αισθητήρων σε πρισματικό δοκίμιο*

Το δοκίμιο αποφορτίστηκε δύο φορές, μία στα **25,65MPa** και μια στα **38,49MPa** και τελικά αστόχησε στα **52,45MPa** όπως δείχνει το παρακάτω διάγραμμα:



**Διάγραμμα 10**  
*Διάγραμμα κύκλων Φόρτισης-αποφόρτισης*

Από το πρόγραμμα εντοπισμού της θέσης της πηγής των σημάτων προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα το οποίο δείχνει τη διαγώνιο στην οποία έσπασε το δοκίμιο:



**Εικόνα 29**

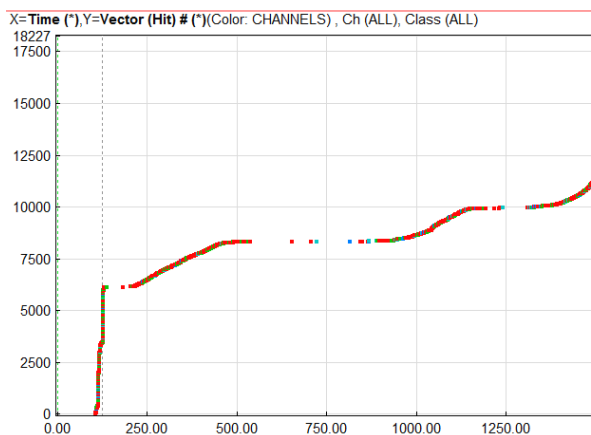
Εντοπισμός θέσης από το πρόγραμμα AEWin for SAMOS



**Εικόνα 30**

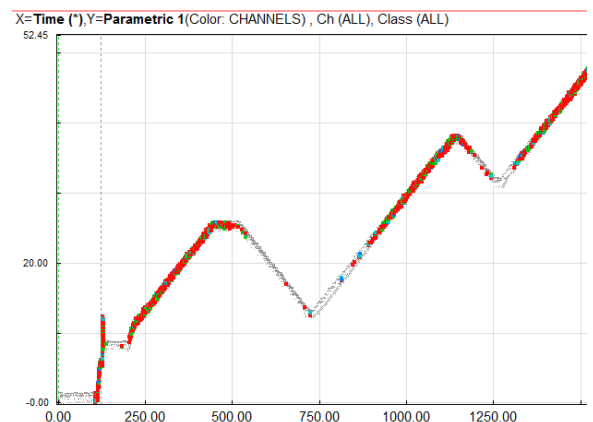
Εικόνα του δοκιμίου μετά την αστοχία από την αντίθετη πλευρά από αυτή που είχαν τοποθετηθεί οι αισθητήρες διότι από αυτή των αισθητήρων δεν ήταν τόσο ξεκάθαρη η ρωγμή. Ενδεικτικά έχουν τοποθετηθεί πάνω οι αριθμοί των αισθητήρων

Με τη βοήθεια του προγράμματος Noesis, προέκυψαν τα διαγράμματα Κτύπων-Χρόνου και Φορτίου-Χρόνου που ακολουθούν. Σύμφωνα με αυτά, μόλις φτάνει το πρώτο μέγιστο φορτίο (25,65MPa) ακολουθεί ένα διάστημα όπου υπάρχουν κάποια σήματα και το φορτίο είναι σταθερό στη μέγιστη τιμή. Μόλις το φορτίο φτάσει τα **12,6MPa**, ξεκινάει και πάλι η φόρτιση του δοκιμίου. Το διάστημα που πέφτει το φορτίο, παρατηρούνται 6 σήματα. Κατά την επαναφόρτιση του δοκιμίου, η λήψη σημάτων ξεκινάει σε φορτίο **22,5MPa**. Κατά τον δεύτερο κύκλο αποφόρτισης-φόρτισης, παρατηρείται το ίδιο ακριβώς πράγμα. Η αποφόρτιση γίνεται έως τα **30MPa** και στη συνέχεια ακολουθεί η επαναφόρτιση. Σήματα κατά την επαναφόρτιση παρατηρούνται σε φορτίο **34,5MPa**, λίγο μικρότερο από το μέγιστο φορτίο (38,42MPa). Άρα επαληθεύεται το φαινόμενο Kaiser (παράγραφος 2.3.2.2).



**Διάγραμμα 11**

Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου (sec)



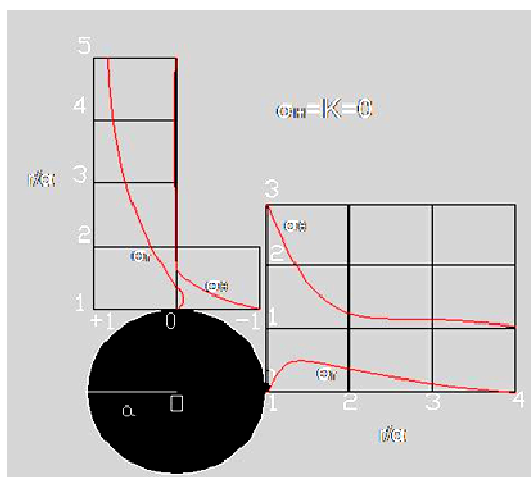
**Διάγραμμα 12**

Διάγραμμα Φορτίου(MPa)-Χρόνου(sec)

#### 4.4. Συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στην στέψη της κυκλικής οπής

Η γνώση του τασικού πεδίου του χώρου της διάνοιξης μιας υπόγειας εκσκαφής αποτελεί βασικό παράγοντα για το σχεδιασμό της υποστήριξης. Για κάθε τιμή του συντελεστή ωθήσεων  $K$ , οι τάσεις και οι μετατοπίσεις στο πέτρωμα δίνονται από τις εξισώσεις του Kirsch (1898) όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1. Βασικές προϋποθέσεις των επιλύσεων είναι η παραδοχές της θεωρίας γραμμικά ελαστικού ομογενούς και ισότροπου μέσου αλλά και η υπόθεση της απεριόριστης δυνατότητας μετάδοσης θλιπτικών, εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Kirsch, η σχέση της εφαπτομενικής τάσης στη στέψη της οπής συναρτήσει του λόγου  $a/r$ , όπου  $a$  η ακτίνα της οπής και  $r$  η απόσταση ελέγχου, θα έπρεπε να είναι η εξής:



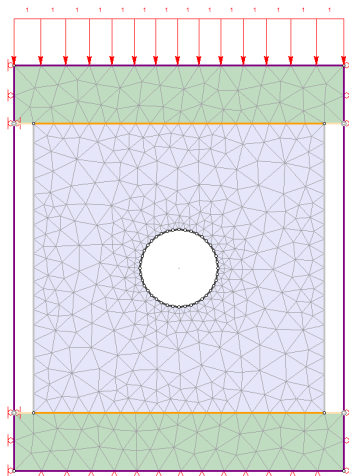
**Εικόνα 31**

*Σχέση της εφαπτομενικής τάσης στη στέψη της οπής συναρτήσει του λόγου  $a/r$ .*

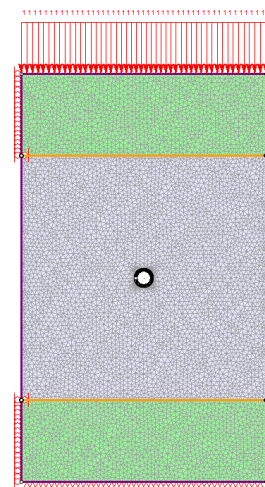
Επειδή δεν υπάρχει οριζόντια φόρτιση, έγινε παραδοχή ότι  $K=0$  κι έτσι οι εξισώσεις απλουστεύθηκαν. Ο λόγος  $a/r$  έλαβε τιμές από 1-3, ενώ η γωνία  $\theta=90^\circ$  αφού ζητείται η εφαπτομενική τάση στη στέψη της οπής.

Στην πράξη, κατά την επαφή των πλακών της μηχανής με το δοκίμιο υπάρχουν **τριβές** στη διεπιφάνεια πλάκας φόρτισης/δοκιμίου. Όπως παρατηρήθηκε από τα πρώτα πειράματα το δοκίμιο μετά τη δοκιμή κολλούσε στις πλάκες της μηχανής. Έτσι ήταν αναγκαίο να εξεταστεί η επίδραση της τριβής, αλλά και του μεγέθους της οπής στην συγκέντρωση τάσεων στη στέψη της. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος **Phase<sup>2</sup>** για διάφορες γωνίες τριβής  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$  και  $40^\circ$  και εξετάστηκε η επίδρασή της στον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων (εφαπτομενικής τάσης) στο σύνορο της οπής, για να υπολογιστεί η πιθανή διαφοροποίηση στα αποτελέσματα. Για την προσομοίωση αυτή, δημιουργήθηκαν τα παρακάτω μοντέλα στα οποία:

- με πράσινο χρώμα είναι οι χαλύβδινες πλάκες της μηχανής που μεταφέρουν τη φόρτιση στο δοκίμιο, με πλάτος 17cm, ύψος 3cm, Μέτρο Ελαστικότητας 210GPa, λόγο Poisson 0,2
- με μπλε χρώμα είναι το δοκίμιο διαστάσεων 15x15x3.8 με οπή της οποίας τη διάμετρο μεταβάλλουμε διαγράφοντας και δημιουργώντας ξανά τα Boundaries με ίδιο αριθμό segments ίσο με 40 (boundaries>edit>delete και Boundaries>add excavation), Μέτρο Ελαστικότητας 3,8GPa, λόγο Poisson 0,3
- Με πορτοκαλί χρώμα είναι η διεπιφάνεια μεταξύ των πλακών και του δοκιμίου η οποία προσομοιάζεται με joint της οποίας η γωνία τριβής μεταβάλλεται από 0-40°
- Η στήριξη της πλάκας στο κάτω μέρος του δοκιμίου είναι σταθερή με άρθρωση ενώ στα άκρα της τοποθετείται κύλιση. Στο πάνω μέρος του δοκιμίου, τοποθετείται ξανά κύλιση στα άκρα της πλάκας αφού μπορεί και μετακινείται στον κατακόρυφο άξονα για την φόρτιση του δοκιμίου, ενώ στο πάνω μέρος της τοποθετείται μοναδιαίο φορτίο.
- Οι ρυθμίσεις του πλέγματος και της διακριτοποίησης (discretize and mesh) μένουν ίδιες σε όλες τις οπές ως εξής: διαβαθμισμένος τύπος πλέγματος (mesh type: graded), τριγωνικά στοιχεία με 3 κόμβους (element type: 3 noded triangles), παράγοντας διαβάθμισης ίσος με 0,1 (gradation factor=0,1) και προεπιλεγμένος αριθμός κόμβων σε όλες τις εκσκαφές 90 (default number of nodes on all excavations=90).



**Εικόνα 32**  
1<sup>η</sup> προσομοίωση με Phase



**Εικόνα 33**  
2<sup>η</sup> Προσομοίωση με Phase

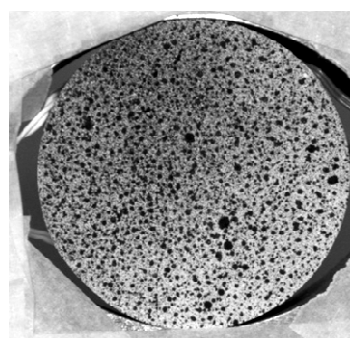
Από τις αναλύσεις προέκυψαν συντελεστές συγκέντρωσης της εφαπτομενικής τάσης στο όριο της οπής από 0,97 έως 1,25. Η απόσταση μηδενισμού της  $\sigma_{xx}$  ήταν σε όλες τις περιπτώσεις κοντινή έως ίση με μια διάμετρο οπής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα καθώς ανάλογα με τη διάμετρο της οπής, το πρόγραμμα μετέβαλε την διακριτοποίηση (discretize and mesh) της ανάλυσης με αποτέλεσμα να διεξάγονται μη συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των διαφόρων διαμέτρων οπών. Για το λόγο αυτό, θα θεωρηθεί συντελεστής συγκέντρωσης εφαπτομενικής τάσης στο όριο της οπής ίσος με τη μονάδα, μία παραδοχή που έχει χρησιμοποιηθεί και σε εργασίες άλλων ερευνητών (π.χ. Lajtai 1975).

#### **4.5.Προεργασία για τη δοκιμή μέτρησης παραμόρφωσης μέσω συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC)**

Για την δοκιμή μέτρησης της παραμόρφωσης μέσω συσχέτισης ψηφιακών εικόνων, το μόνο που χρειάζεται να γίνει είναι η τοποθέτηση του μοτίβου (pattern) πάνω στο δοκίμιο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ψεκασμού του δοκιμίου στην περιοχή ενδιαφέροντος με μαύρο ματ σπρέι. Το μοτίβο όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 πρέπει να είναι τυχαίο, γι αυτό όταν βγαίνει περίπου όμοιο ή πολύ σκούρο, δημιουργούνται κηλίδες διαφορετικού μεγέθους με μαρκαδόρο.



*Μοτίβο με μαρκαδόρο*

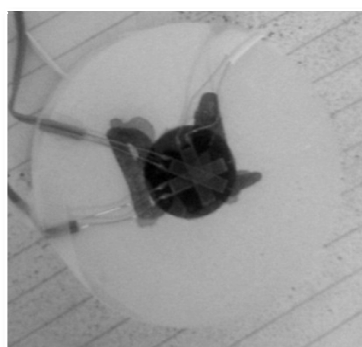


*Μοτίβο με σπρέι*

**Εικόνα 34**

*Μοτίβα υψηλής αντίθεσης σε κυλινδρικό δοκίμιο που πρόκειται να φορτιστεί σε Braziliantest με ταυτόχρονη μέτρηση της παραμόρφωσης με τη μέθοδο DIC*

Όσον αφορά τη συνέχεια της δοκιμής, ρυθμίζεται η ψηφιακή μηχανή έτσι ώστε να παίρνει εικόνες σε μορφή RAW ανά τακτά χρονικά διαστήματα (συνήθως ανά 5 δευτερόλεπτα) και στοχεύεται στην περιοχή που ενδιαφέρει. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα τροπόμετρα (strain gauge), πίσω από την περιοχή που στοχεύεται, τοποθετούνται ένα ή δύο τροπόμετρα κατά τη διεύθυνση της παραμόρφωσης που ενδιαφέρει. Στα ορθογωνικά και κυλινδρικά δοκίμια τοποθετήθηκαν ένα strain gauge οριζόντια και ένα κατακόρυφα, ενώ στα μορφής δίσκου των δοκιμών Brazilian τοποθετήθηκαν ροζέτες παραμορφώσεων (strain rosettes).



**Εικόνα 35**

*Ροζέτα παραμορφώσεων σε γύψινο δοκίμιο μορφής δίσκου*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 5.1.Πειράματα σε γύψινα δοκίμια

Τα δύο πρώτα πειράματα θα θεωρηθούν δοκιμαστικά. Σκοπός είναι να προσδιοριστεί η καταλληλότερη πειραματική διάταξη, τα τυχόν προβλήματα που θα αντιμετωπισθούν και οι απαιτούμενες υποθέσεις που πρέπει να γίνουν. Έτσι, ετοιμάστηκαν δύο δοκίμια από γύψο, με διαφορετικό λόγο γύψου/νερού τα οποία δοκιμάστηκαν μετά από 9 ημέρες. Στις 6 ημέρες η απώλεια βάρους τους ήταν 27,3% στο 1<sup>ο</sup> και στο 30% στο 2<sup>ο</sup> δοκίμιο. Η απώλεια βάρους υπολογίστηκε ως 1 – υπόλειμμα, το οποίο αντιστοιχεί στο λόγο του βάρους του δοκιμίου μετά από 6 ημέρες προς το βάρος του μετά την αφαίρεσή του από το καλούπι. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 1*

	Διαστάσεις(cm)	Διάμετρος οπής (cm)	Λόγος γύψου/νερό	Θερμοκρασία /ημέρες	Σπάσιμο μετά από
ΔΟΚΙΜΙΟ 1	15*15*4	1.8	1,5	45°C/6 ημέρες	9 ημέρες
ΔΟΚΙΜΙΟ 2	15*15*4	1.8	1,65	45°C/6 ημέρες	9 ημέρες

#### Δοκίμιο 1



*Εικόνα 1  
Τοποθέτηση του δοκιμίου 1 στο πλαίσιο θλίψης*

Ο κánaβος τοποθέτησης των αισθητήρων ΑΕ δίνεται στον επόμενο πίνακα:

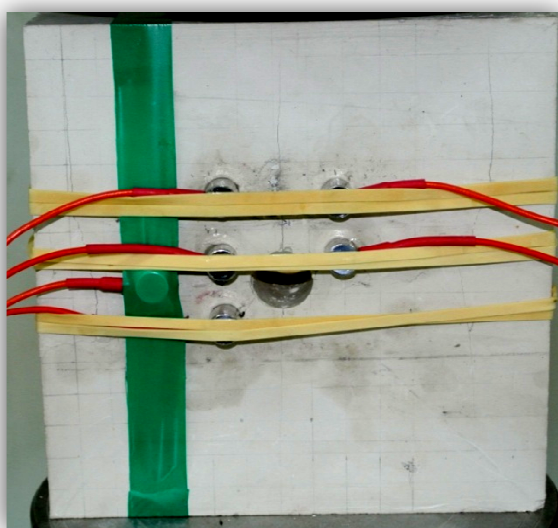


Πίνακας 2

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.019	0,027
2	0.019	0,027
3	-0.019	0,010
4	0.019	0,010
5	-0.019	-0,010
6	-0,037	0,000

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **MICRO 100S**, η ενίσχυση του σήματος ορισίστηκε στα **40dB**, σαν υλικό σύζευξης χρησιμοποιήθηκε το **gel υπερήχων**, ενώ λάστιχα και ταινία εξασφαλίζουν την επαφή των αισθητήρων με το δοκίμιο. Ο ρυθμός φόρτισης ρυθμίστηκε αρχικά στα 50N/s, στη συνέχεια αυξήθηκε στα **100N/s**. Το δοκίμιο αστόχησε στα **7,9MPa**.

Η μορφή αστοχίας του δοκιμίου ήταν ο **αξονικός σχισμός** με ελάχιστη αποφλοίωση στα τοιχώματα της οπής που προκλήθηκε από διατμητικές ρωγματώσεις όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Στην πρόσοψη του δοκιμίου (αυτή με τους αισθητήρες), η πάνω εφελκυστική ρωγή φτάνει ως την άκρη του δοκιμίου ενώ η κάτω περίπου 1cm πριν την άκρη. Στην πίσω πλευρά του δοκιμίου, φαίνεται μόνο η πάνω εφελκυστική ρωγή.



Εικόνα 2  
Πρόσοψη



Εικόνα 3  
Πίσω όψη

Μακροσκοπικά, αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι όλα τα φαινόμενα ρωγμάτωσης εμφανίστηκαν πολύ κοντά χρονικά μεταξύ τους. Γι αυτό μπορεί να ευθύνεται το υλικό που είναι πολύ ψαθυρό ή το πλαίσιο φόρτισης, που θεωρείται εύκαμπτο με αποτέλεσμα να ωθεί το δοκίμιο σε θραύση εκτονώνοντας την συσσωρευμένη ενέργεια παραμόρφωσης. Η εφελκυστική ρωγή εμφανίστηκε ξεκάθαρα, με οπτική παρατήρηση, 7 δευτερόλεπτα πριν την αστοχία, ενώ με

παρατήρηση των 2 βίντεο στις 2 όψεις του δοκιμίου, 17 δευτερόλεπτα πριν την αστοχία, στο πίσω και πάνω μέρος του δοκιμίου. Η πρωτογενής εφελκυστική αστοχία ήταν πολύ χαμηλής έντασης με αποτέλεσμα οι **αισθητήρες να μην καταγράψουν κανένα σήμα ΑΕ πριν από τη θραύση του δοκιμίου**. Ακόμη και κατά τη θραύση, κατά την οποία κατεγράφησαν μόλις 22 σήματα ΑΕ, το μέγιστο πλάτος του σήματος ήταν **57dB**.

Γενικά, όσον αφορά τη θραύση, παρατηρήθηκαν τα εξής:

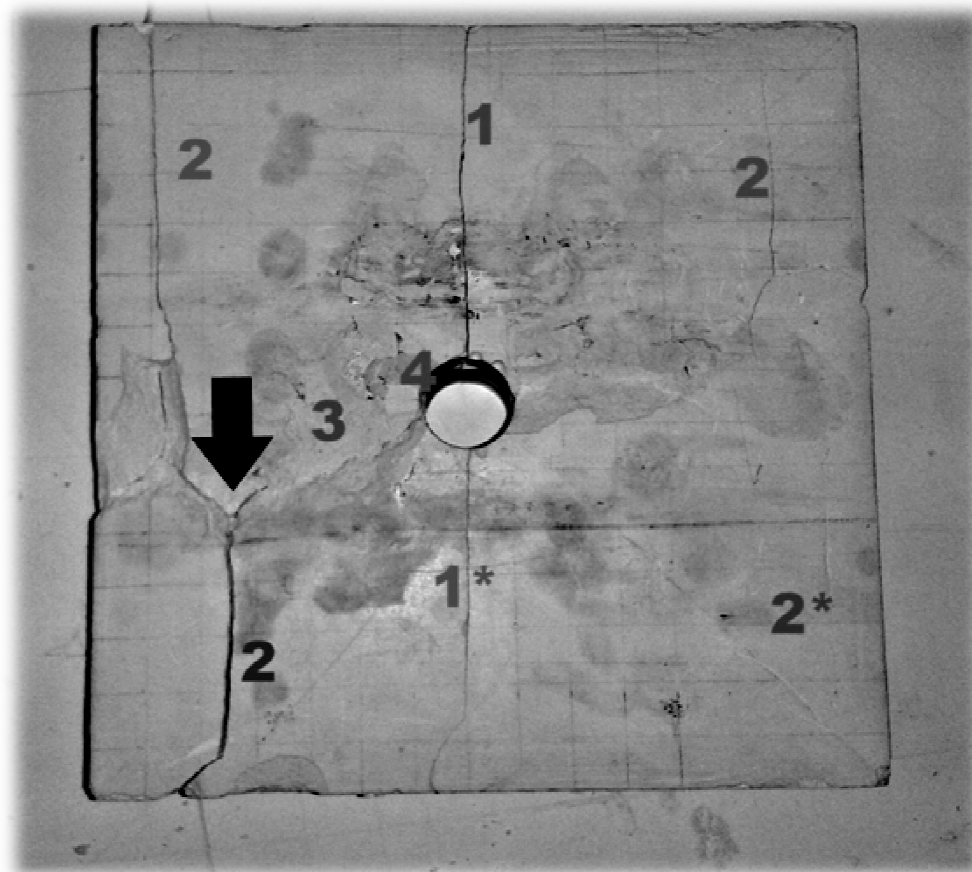
1. Οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές εμφανίζονται πρώτες ξεκινώντας από το σύνορο της οπής και κατευθύνθηκαν προς το άκρο του δοκιμίου
2. Οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές ενώνονται με τις πλάγιες ρωγμές διάτμησης και πιθανόν ευθύνονται για την αστοχία του δοκιμίου
3. Η αστοχία είναι χαμηλής έντασης
4. Όλα τα φαινόμενα συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα ή χρονικά πολύ κοντά μεταξύ τους

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η τελική μορφή του δοκιμίου μετά την μακροσκοπική (οπτική) εξέταση και εικόνες από τις επιφάνειες θραύσης και τη μορφή της διάδοσης της αρχικής εφελκυστικής ρωγμής.



**Εικόνα 4**

*Η επιφάνεια της αρχικής εφελκυστικής ρωγμής στα δύο μέρη του δοκιμίου μετά τη θραύση. Η επιφάνεια όπως φαίνεται είναι τραχεία ενώ διακρίνεται και η τροχιά που ακολούθησε η ρωγμή μέχρι το άκρο του δοκιμίου*



**Εικόνα 5**  
Εικόνα δοκιμίου 1 μετά την αστοχία

**1.**Πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή

**1\*.**Πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή που δεν έχει επεκταθεί μέχρι το άκρο του δοκιμίου

**2.**Δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές. Οι επιφάνειές τους ήταν τραχείες γεγονός που δείχνει ότι προέρχονται από εφελκυσμό.

**2\*.**Δευτερογενής εφελκυστική ρωγμή που είναι ελάχιστα εμφανής σε σχέση με τις άλλες 3

**3.**Πλάγια ρωγμή που προέρχεται από διάτμηση καθώς η επιφάνειά της ήταν πουδραρισμένη

**4.**Αποφλοιώση εσωτερικά της οπής σε περιορισμένο βαθμό

▣ Σημείο ένωσης των δευτερογενώνεφελκυστικών ρωγμών με την πλάγια διατμητική ρωγμή.

Στις περιοχές όπου η ταινία συγκράτησης των αισθητήρων ήταν σε επαφή με το δοκίμιο προκλήθηκαν περιορισμένης έκτασης επιφανειακές αποφλοιώσεις. Επίσης, στα σημεία που είχε γίνει η δοκιμή pencilleadbreak, εμφανίσθηκαν ορισμένες επιφανειακές εκδορές.

## Δοκίμιο 2



**Εικόνα 6**

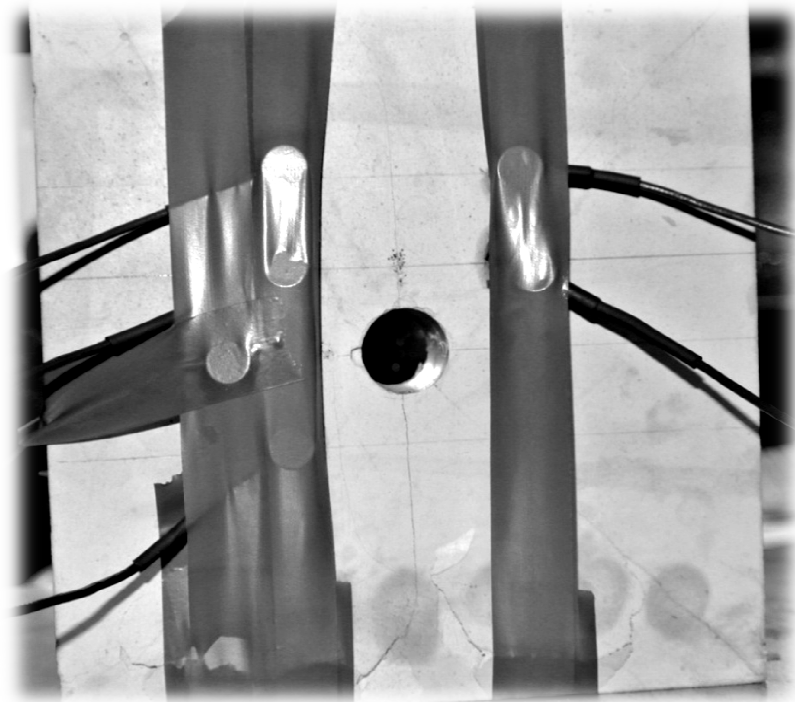
Έντονος φωτισμός για καλύτερη μακροσκοπική παρατήρηση του βίντεο στο δοκίμιο 2

Στο δεύτερο πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι αισθητήρες (**MICRO 100S**) με ενίσχυση του σήματος 40dB, με ίδια διάταξη τοποθέτησης και το δοκίμιο μεταφέρθηκε σε πλαίσιο φόρτισης μεγαλύτερης δυναμικότητας. Επίσης έγινε αλλαγή στο κατώφλι της AE σε **35dB αντί 40dB** που ήταν στην προηγούμενη δοκιμή ενώ ο ρυθμός φόρτισης ήταν σταθερός στα **200N/s** καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος. Μια ακόμα αλλαγή ήταν ότι οι αισθητήρες είχαν σαν υλικό σύζευξης το **γράσο** και στηρίχθηκαν με ταινία για την καλύτερη οπτική παρατήρηση του δοκιμίου στην περιοχή πάνω από την κυκλική οπή. Οι ρυθμίσεις (**acquisition setup**) του προγράμματος AEWIN για τους αισθητήρες ήταν:

**Πίνακας 3: Acquisition setup**

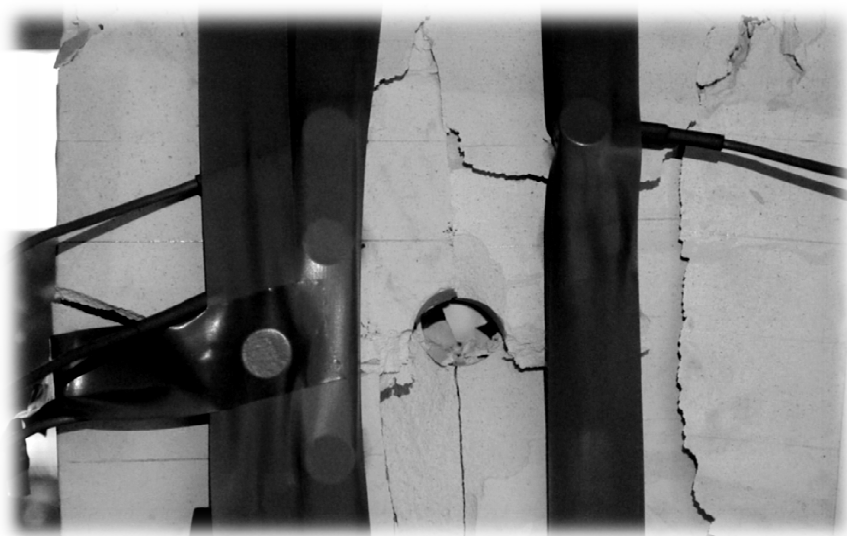
κανάλι	Threshold			Gain	Pre Amp	Analog Filter		Waveform setup			Timing Parameters			
	type	db	FT Band			Lower	Upper	Sample rate	Pre-Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration
1-6	FIXED	35	6	0	40	1kHz	3MHz	10MSPS	120	5K	50	300	300	2msec

Στη δοκιμή αυτή, κατά την επαφή των πλακών της μηχανής με το δοκίμιο, το **αρχικό φορτίο** που ασκήθηκε ήταν **21,114kN** και προκάλεσε την πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή από την αρχή της δοκιμής σε τάση μικρότερη από **3,52MPa**. Και σε αυτή τη δοκιμή τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ήταν πολύ χαμηλά με αποτέλεσμα να **μην καταγράφουν τη θραύση οι αισθητήρες**. Το δοκίμιο αστόχησε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με την προηγούμενη δοκιμή στα **5,3MPa**. Στη συνέχεια αποφασίστηκε επαναφόρτιση του δοκιμίου για την εξέταση της συμπεριφοράς του μετά τη θραύση. Η τελική του μορφή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Μακροσκοπικά παρατηρούνται τραχείες επιφάνειες που οφείλονται στον εφελκυσμό αλλά και πιο πουδραρισμένες επιφάνειες που οφείλονται στη διάτμηση του υλικού.



**Εικόνα 7**

*Εικόνα του δοκιμίου κατά την επαφή του με τις πλάκες της μηχανής, πριν δηλαδή την έναρξη της φόρτισης όπου φαίνονται ξεκάθαρα οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές*

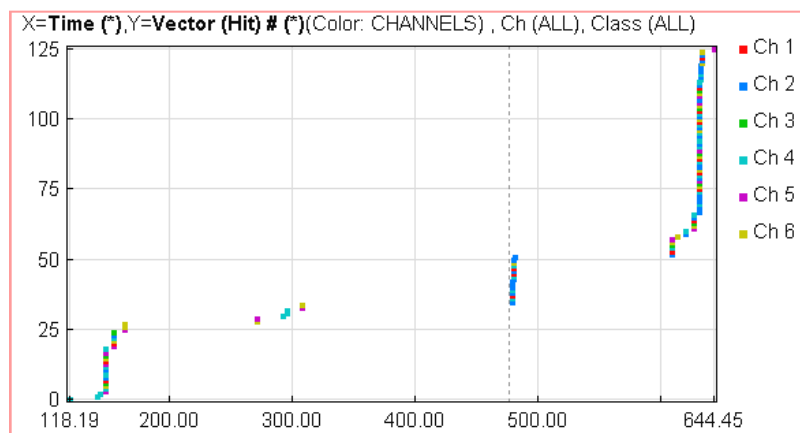


**Εικόνα 8**

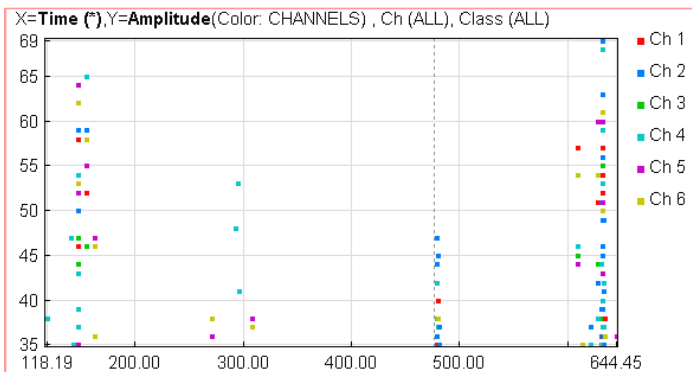
*Τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την συνέχιση της φόρτισης*

Όσον αφορά την ακουστική εκπομπή του δοκιμίου, το μέγιστο πλάτος του σήματος ήταν τα **69dB**, ενώ όλα τα κανάλια κατέγραψαν συνολικά 126 σήματα. Τα διαγράμματα που ακολουθούν, προέκυψαν με ανάλυση των σημάτων με το πρόγραμμα Noesis. Η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή (στη συνέχεια αναφέρεται και ως **timemark**) στα διαγράμματα δηλώνει την **έναρξη της φόρτισης** που στην συγκεκριμένη περίπτωση έγινε στα **476,63 sec**. Ο λόγος που υπάρχει αυτό το χρονικό διάστημα έως την έναρξη της φόρτισης, είναι γιατί πρέπει να συγχρονιστούν οι δύο

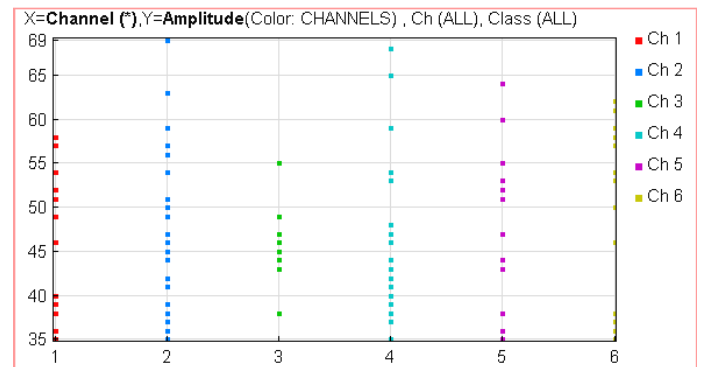
κάμερες που θα καταγράφουν την διαδικασία στις δύο όψεις του δοκιμίου και για να καταγραφούν τα σήματα που προέρχονται από την επαφή των πλακών της μηχανής φόρτισης με το δοκίμιο. Επίσης αν κάποιος αισθητήρας καταγράφει θόρυβο, θα φανεί με την παρουσία συνεχόμενων σημάτων πριν την έναρξη της φόρτισης. Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι στην αρχή (144 sec) υπάρχουν κάποια σήματα τα οποία προφανώς οφείλονται στο πάτημα της πλάκας της μηχανής πάνω στο δοκίμιο που προκάλεσε και τη δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Η προέλευση των σημάτων κοντά στα 300 δευτερόλεπτα του διαγράμματος είναι άγνωστη καθώς δεν είχε αρχίσει ακόμα η φόρτιση. Κατά την έναρξη της φόρτισης (476,63 sec) υπάρχουν κάποια σήματα τα οποία μπορεί να οφείλονται στη διεύρυνση της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής και στη συνέχεια, περισσότερα σήματα εμφανίζονται ακριβώς πριν την αστοχία του δοκιμίου.



Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου



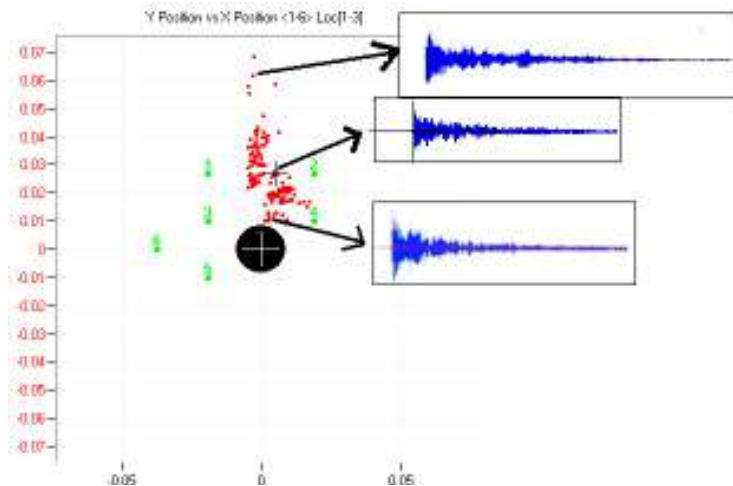
Διάγραμμα Πλάτους-Χρόνου



Διάγραμμα Πλάτους-Καναλιού

### Διαγράμματα 1

Από το πρόγραμμα **AEWin for SAMOS** που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θέσης της πηγής ΑΕ, εντοπίστηκαν διάσπαρτα σήματα γύρω από την πρώτη ρωγμή κατά την επέκτασή της προς τα πάνω.



**Εικόνα 9**  
 Εντοπισμός θέσης από το πρόγραμμα AEWinforSAMOS και διάφορες κυματομορφές κατά μήκος της 1<sup>ης</sup> ρωγμής

Με τα παραπάνω δοκιμαστικά πειράματα έγιναν κατανοητά τα εξής:

- ✓ Ο τρόπος που θα στηθούν τα πειράματα και ο συγχρονισμός μεταξύ των φάσεων της δοκιμής (καταγραφής σημάτων ΑΕ, έναρξη φόρτισης κλπ).
- ✓ Ο τρόπος και οι επιφάνειες αστοχίας που αναμένονται να συναντηθούν και στα επόμενα πειράματα που επιβεβαιώνουν παλαιότερα πειράματα άλλων ερευνητών (π.χ. τα πειράματα του Lajtai και των συνεργατών του, το 1976).
- ✓ Ότι η αρχική ρωγμάτωση του δοκιμίου (πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές) είναι χαμηλής έντασης και ενδεχομένως να μην εντοπίζονται ικανοποιητικά από τους αισθητήρες MICRO 100S (εύρος συχνοτήτων 200-950kHz), γι' αυτό και στα επόμενα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν και οι αισθητήρες R15 που είναι χαμηλότερης συχνότητας (50-200kHz) και αναμένεται να έχουν και μεγαλύτερη ευαισθησία.
- ✓ Δεν υπάρχει ένας σταθερός τρόπος στήριξης των αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο, αλλά αυτός εξαρτάται από τη θέση που θα τοποθετηθούν και το οπτικό πεδίο που είναι επιθυμητό για την παρατήρηση της θραύσης. Γενικά, τα λάστιχα αποτελούν ίσως την πιο αποτελεσματική λύση καθώς αφήνουν περισσότερη επιφάνεια ελεύθερη για παρατήρηση. Παρά το γεγονός αυτό, στα επόμενα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν διάφοροι τρόποι στήριξης ανάλογα με τη θέση τοποθέτησης των αισθητήρων.
- ✓ Όσον αφορά το υλικό σύζευξης, όλα όσα έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι αποτελεσματικά και δεν προκαλούν βλάβη στους αισθητήρες. Το σιλικονούχο γράσο (OKS 1110) έχει μεγαλύτερη διάρκεια από τα υπόλοιπα και μια ικανότητα ελαφράς συγκόλλησης των αισθητήρων στην επιφάνεια, όμως θέλει αρκετή ώρα για κολλήσει και να μη γλιστράει γι αυτό και στα πειράματα θα χρησιμοποιηθεί gel υπερήχων.

Στα παραπάνω συμπεράσματα θα στηριχθούν τα επόμενα πειράματα. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιούνται δύο κάμερες μία στην κάθε πλευρά του δοκιμίου και σε κάποια από αυτά, ψηφιακή μηχανή **DSLR** για τη δοκιμή της ψηφιακής συσχέτισης

εικόνων. Επίσης, θα πρέπει να ξεκαθαριστούν κάποιες έννοιες που αναφέρονται στην συνέχεια:

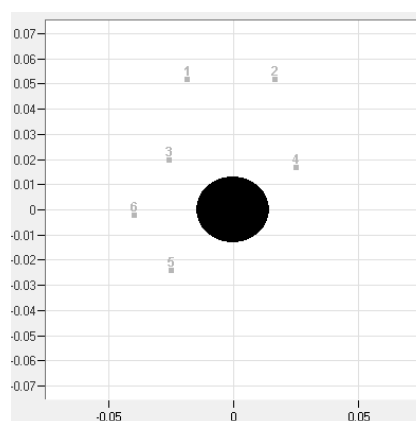
- **Πρόσψη δοκιμίου:** Είναι η πλευρά του δοκιμίου πάνω στην οποία τοποθετούνται οι αισθητήρες.
- **Πίσω όψη:** Η όψη του δοκιμίου η οποία αφήνεται κενή για καλύτερη παρατήρηση της ρωγμάτωσης με την κάμερα στην οποία συνήθως τοποθετείται το μοτίβο για την ψηφιακή συσχέτιση εικόνων.
- **Timemark:** Η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή στα διαγράμματα ακουστικής εκπομπής που δηλώνει την έναρξη ενός γεγονότος π.χ. έναρξη της φόρτισης ή έναρξη βιντεοσκόπησης.
- **Μακροσκοπική εξέταση:** Η εξέταση που γίνεται με την οπτική παρατήρηση ή με την εξέταση των βίντεο στις δύο όψεις του δοκιμίου.
- **Ενόργανη εξέταση:** Η εξέταση που γίνεται από τα straingauges ή τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται π.χ. Matlab, Noesis, AEWinforSAMOS, κλπ.
- **Πρώτη ρωγμή:** Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή η οποία εμφανίζεται πρώτη όπως παρατηρήθηκε στα δοκιμαστικά πειράματα.
- **Τάση γεγονότος, π.χ. τάση πρώτης ρωγμής:** Ο λόγος δύναμη/επιφάνεια τη στιγμή εμφάνισης του γεγονότος π.χ. της πρώτης ρωγμής κι όχι την τάση στο όριο της οπής.

### Δοκίμιο 3

Το 3<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x4 cm** και οπή διαμέτρου **2,4 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **R15**, στηρίχτηκαν **με ταινία και λάστιχο**, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Οι αποστάσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής ήταν:

*Πίνακας 4*

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.019	0,027
2	0.019	0,027
3	-0.019	0,010
4	0.019	0,010
5	-0.019	-0,010
6	-0,037	0,000

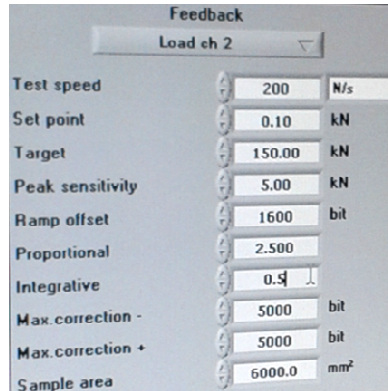


Τα χαρακτηριστικά της φόρτισης και οι ρυθμίσεις της ακουστικής εκπομπής έχουν ως εξής:



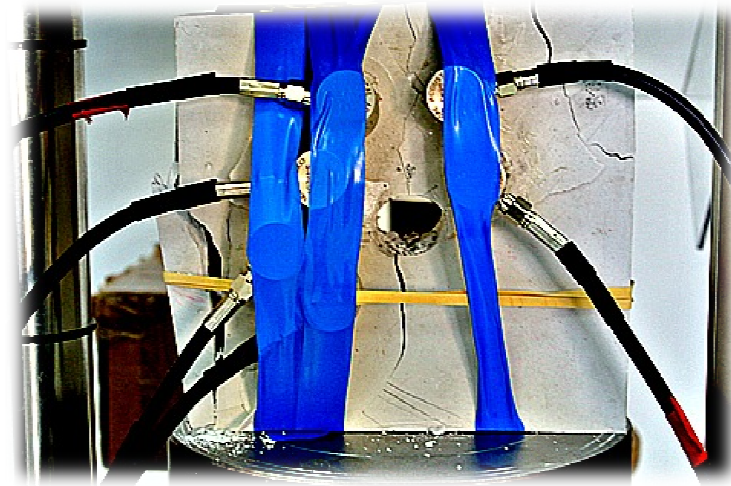
Πίνακας 5: Acquisition setup

κανάλι	Threshold			Gain	Pre Amp	Analog Filter		Waveform setup				Timing Parameters			
	type	db	FT Band	db	db	Lower	Upper	Sample rate	Pre-Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration	
1-6	FIXED	40	6	0	40	1kHz	3MHz	5MSPS	500.000	5K	50	200	300	2msec	



Εικόνα 10  
Testsetup

Το δοκίμιο αστόχησε στα **5MPa**. Στη συνέχεια φορτίστηκε περαιτέρω για να γίνουν πιο εμφανείς οι ρωγμές που είχαν ήδη σχηματιστεί και να είναι εύκολος ο διαχωρισμός του για περαιτέρω εξέταση.

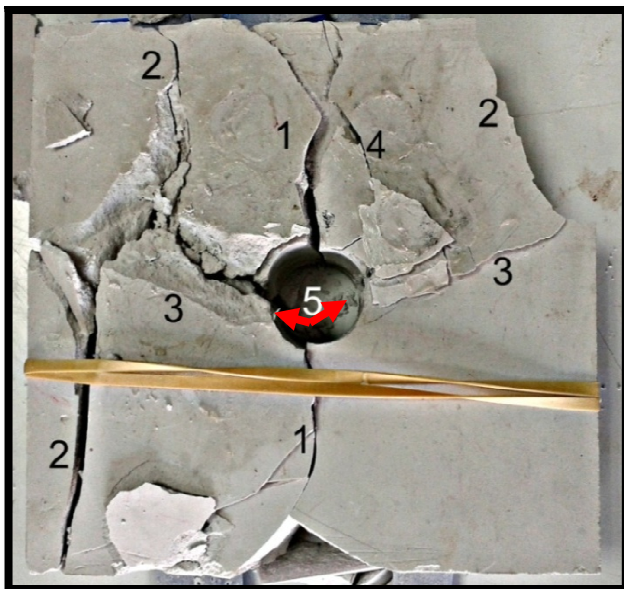


Εικόνα 11  
Δοκίμιο 3 μετά την επαναφόρτιση

Από την οπτική παρατήρηση μετά την αφαίρεση των αισθητήρων και των ταινιών, προέκυψαν τα εξής:

- Οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές σχηματίστηκαν πρώτες. Ξεκίνησαν από το σύνορο της οπής, παράλληλα στη διεύθυνση της θλίψης και επεκτάθηκαν προς τα πάνω και κάτω ως το σύνορο του δοκιμίου. Οι ρωγμές αυτές καθώς εισήλθαν στην περιοχή των άκρων του δοκιμίου, άλλαξαν τροχιά.
- Εφελκυστικές ρωγμές εμφανίστηκαν παράλληλα στο πρόσωπο του δοκιμίου.
- Οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές εμφανίστηκαν σε 3 περιοχές (δεν ήταν εμφανείς στην κάτω δεξιά πλευρά).
- Διατμητικές ρωγμές ξεκίνησαν από το σύνορο της οπής με μια κλίση 30-40°, ενώ εμφανίστηκαν και ρωγμές διάτμησης λοξά ως προς το μέτωπο του δοκιμίου με κλίση 50-55° οι οποίες συναντήθηκαν με τις δευτερεύουσες εφελκυστικές και πιθανώς προκάλεσαν την αστοχία.
- Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμάτωσή είναι χαμηλής έντασης στη γύψο και η χρονική διαφορά από τη στιγμή που γίνονται μακροσκοπικά ορατές ως την αστοχία του δοκιμίου είναι μικρή.

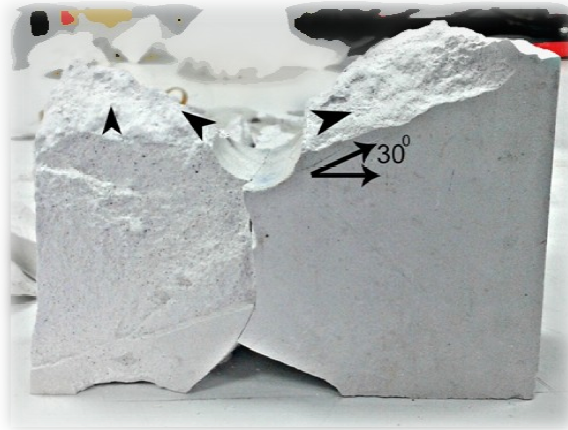
Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι παραπάνω παρατηρήσεις.



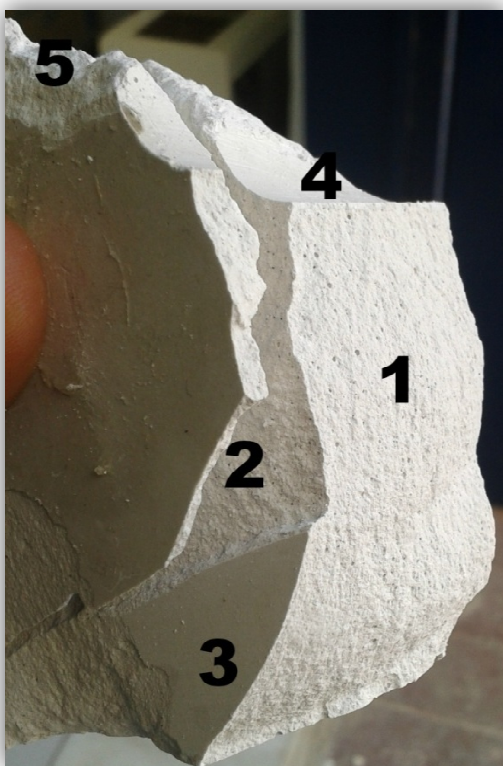
#### *Ρωγμές:*

1. Πρωτογενείς εφελκυστικές
2. Δευτερογενείς εφελκυστικές
3. Διάτμησης
4. Εφελκυστικές παράλληλες στο μέτωπο του δοκιμίου
5. Αποφλοιώσεις στα τοιχώματα της οπής

**Εικόνα 12**  
Δοκίμιο μετά την αστοχία



**Εικόνα 13**  
Ρωγμές διάτμησης



**Εικόνα 14**

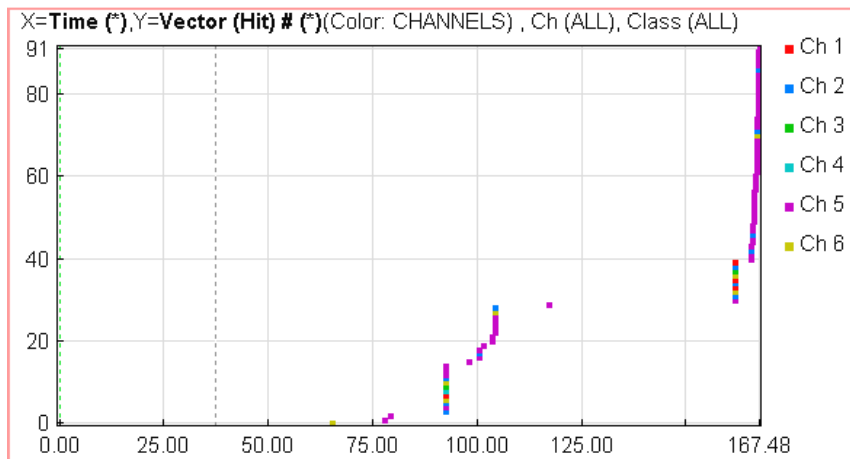
- 1.Τραχεία επιφάνεια της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής (στο κάτω μέρος του δοκιμίου)
- 2.Εφελκυστική ρωγμή παράλληλα στο πρόσωπο του δοκιμίου (τραχεία επιφάνεια)
- 3.Αλλαγή κλίσης της πρωτογενούς ρωγμής καθώς εισήλθε στην περιοχή των άκρων
- 4.Οπή διαμέτρου 2,4cm
- 5.Πουδραρισμένη επιφάνεια διάτμησης



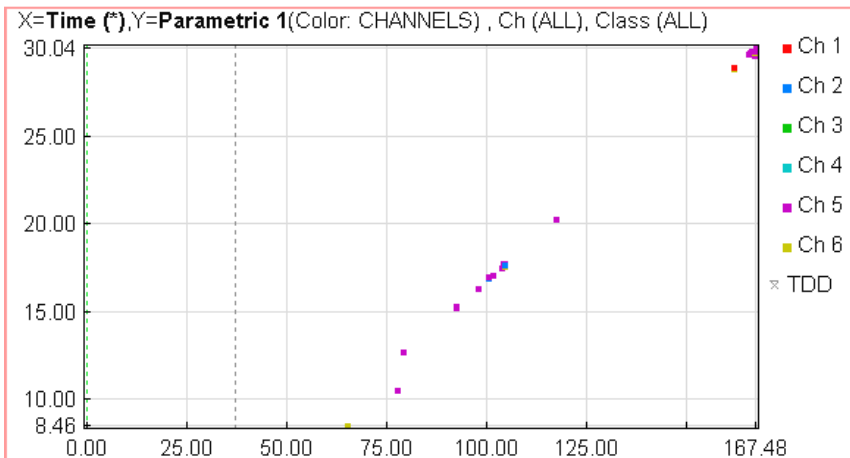
**Εικόνα 15**

Η εμφανής διαφορά των επιφανειών διάτμησης και εφελκυσμού. Οι επιφάνειες διάτμησης είναι πουδραρισμένες, ενώ οι επιφάνειες εφελκυσμού είναι τραχείες.  
 Α.Κλίση της διατμητικής ρωγμής ως προς την οπή  
 Β. Ρωγμές διάτμησης λοξά ως προς το μέτωπο του δοκιμίου με κλίση 50-55°  
 Γ.Εφελκυστική ρωγμή παράλληλα προς το μέτωπο του δοκιμίου

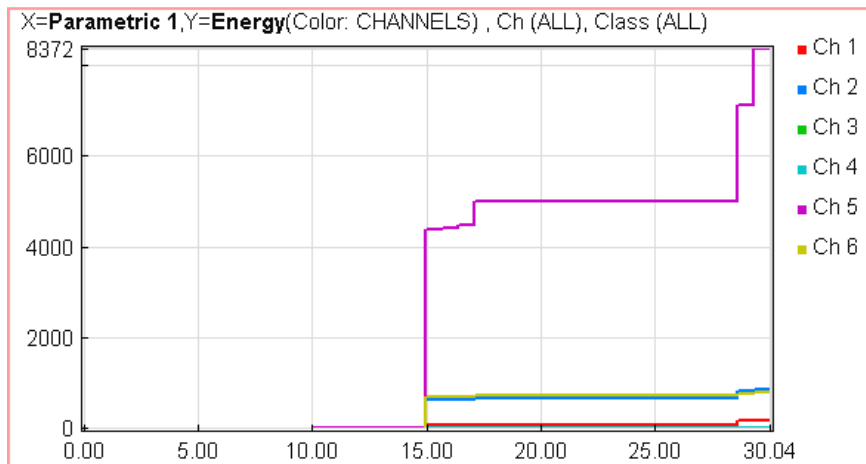
Όσον αφορά την ακουστική δραστηριότητα, το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης κατέγραψε 2 event που δεν είναι αρκετά για τον εντοπισμό της πρώτης ρωγμής. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από το Noesis. Ο συνολικός αριθμός των σημάτων ήταν 92, από τα οποία τα 66 ήταν από τον αισθητήρα 5, γεγονός που κινεί την υποψία ότι ίσως δεν λειτουργεί σωστά ή καταγράφει θόρυβο. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, η διακεκομμένη γραμμή υποδηλώνει την **έναρξη της φόρτισης** η οποία ξεκίνησε στα **37,42 sec**. Το δοκίμιο αστόχησε στα 167,49 sec δηλαδή σε  $167,49-37,42=130,07$  sec από την έναρξη της φόρτισης. Η πρώτη ρωγμή φάνηκε μακροσκοπικά με παρατήρηση των βίντεο, στα 93,4sec από την έναρξη της φόρτισης και σε φορτίο 3,82MPa (22,947kN). Αφού η έναρξη στα διαγράμματα είναι στα 37,42 sec, τότε πριν τα 130,82sec(=37,42+93,4) αναμένονται κάποια σήματα προερχόμενα από τη δημιουργία της ρωγμής. Εδώ παρατηρείται ότι υπάρχει απότομη αύξηση των σημάτων στα **92,5 sec**, γεγονός που δηλώνει ότι η ρωγμή ίσως ξεκίνησε νωρίτερα αλλά δεν ήταν οπτικά εμφανής.



Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου



Διάγραμμα Φορτίου-Χρόνου



Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

### Διαγράμματα 2

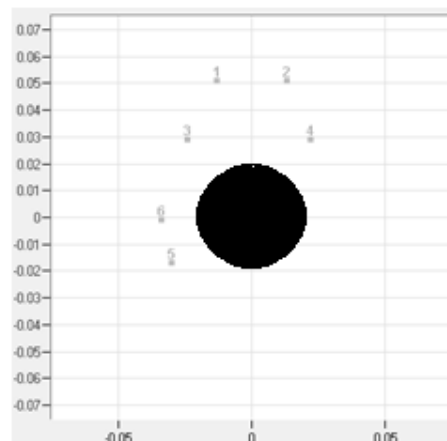
Διαγράμματα από ανάλυση των σημάτων με το πρόγραμμα Noesis

### ✚ Δοκίμιο 4

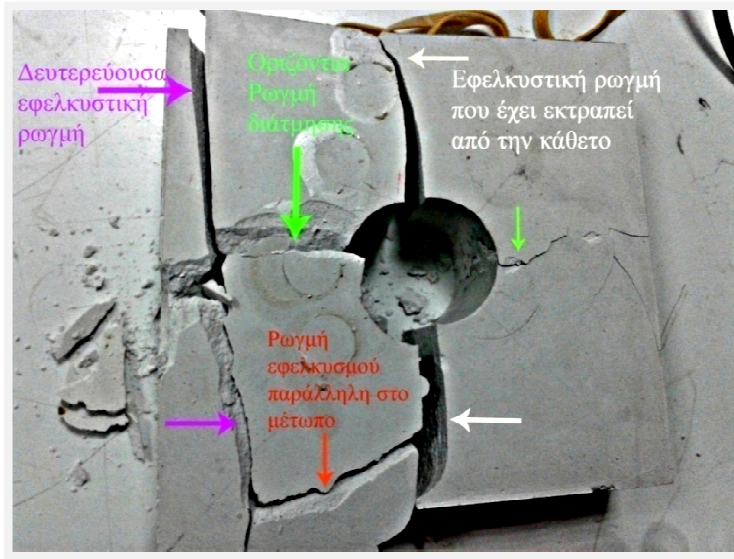
Το 4<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x4 cm** και οπή διαμέτρου **4 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **R15**, στηρίχτηκαν με **λάστιχο**, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Οι αποστάσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής ήταν:

Πίνακας 6

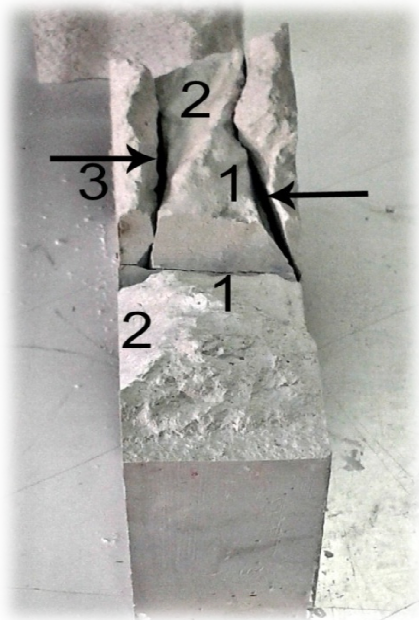
Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.013	0.051
2	0.013	0.051
3	-0.024	0.029
4	0.022	0.029
5	-0.030	-0.017
6	-0.034	0.001



Τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν τα ίδια με τη δοκιμή 3, ενώ στις ρυθμίσεις της ακουστικής εκπομπής έγινε αλλαγή στο κατώφλι (threshold) **από 40dB σε 30dB**. Το δοκίμιο αστόχησε στα **5,38MPa (32,323kN)**. Σε αυτή τη δοκιμή, δεν φορτίστηκε περαιτέρω το δοκίμιο. Οι παρατηρήσεις σχετικά με τη ρωγμάτωση είναι ίδιες με αυτές της δοκιμής 3. Η μόνη διαφορά είναι ότι η διαμητική ρωγμή, δεν εμφανίστηκε υπό κλίση 30°-40°, αλλά σχεδόν οριζόντια (περίπου 10° στην μια πλευρά και 15° στην άλλη). Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την αστοχία του δοκιμίου.



**Εικόνα 16**  
*Πρόσοψη του δοκιμίου μετά την αστοχία*



1. Διατμητική ρωγμή σχεδόν οριζόντια ( $10-15^\circ$ )
2. Διατμητική ρωγμή λοξά ως προς το μέτωπο του δοκιμίου ( $70^\circ$ )
3. Εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες προς το μέτωπο του δοκιμίου

**Εικόνα 17**  
*Οπτική εξέταση του δοκιμίου μετά την αστοχία*



**Εικόνα 18**

*Με μαύρο βέλος φαίνονται οι εφελκυστικές ρωγμές και με άσπρο οι ρωγμές διάτμησης. Είναι εμφανής επίσης η διαφορά στις επιφάνειες.*



**Εικόνα 19**

*Το πουδράρισμα της επιφάνειας από τη διάτμηση*

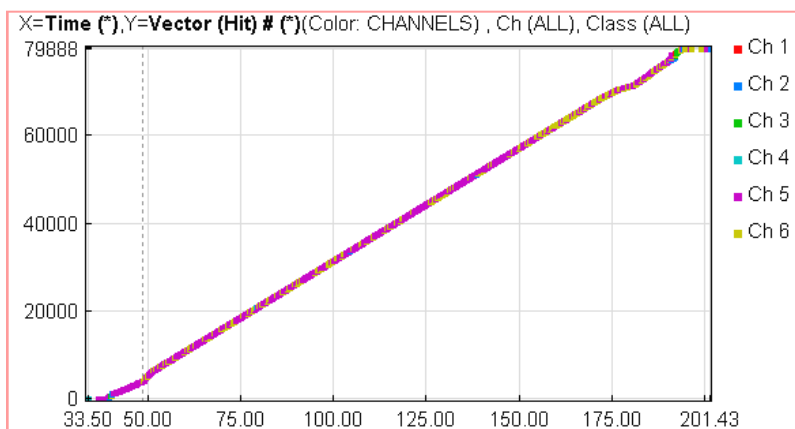


**Εικόνα 20**

*Επιφάνεια εφελκυσμού που φαίνεται και η τροχιά της ρωγμής από το σημείο έναρξης προς τα πάνω*

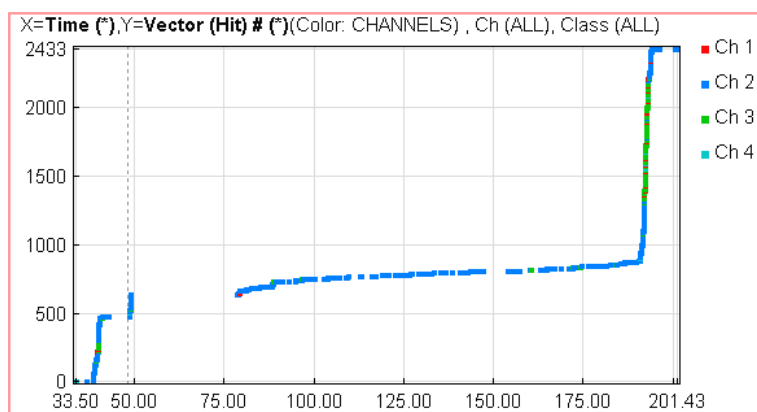
Όσον αφορά τη ακουστική δραστηριότητα στο δοκίμιο, δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής με το πρόγραμμα AEWIn for SAMOS, καθώς

εντοπίσθηκαν δύο μόνο event. Από το Noesis, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:



**Διάγραμμα 3**  
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου

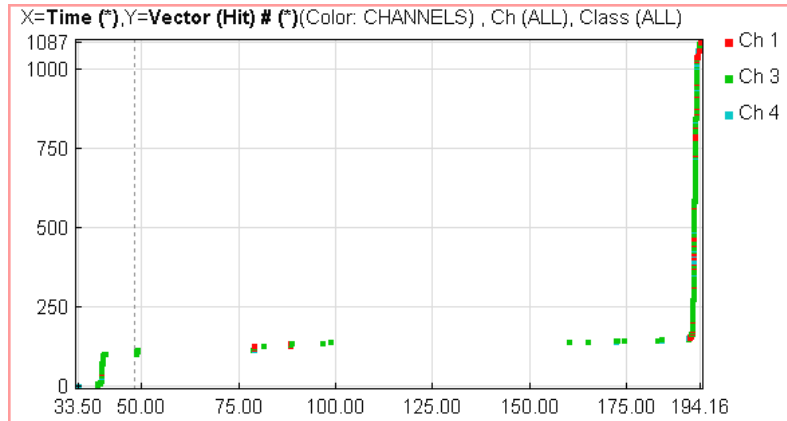
Στο διάγραμμα **χρόνου-κτύπων**, παρατηρείται ότι οι αισθητήρες 5 και 6 δίνουν πολλά και συνεχόμενα σήματα, άρα προφανώς έχουν κάποιο πρόβλημα,γι'αυτό και διαγράφονται (τρόπος εξάλειψης του θορύβου). Στη συνέχεια, στο διάγραμμα που ακολουθεί, φαίνεται ότι και ο αισθητήρας 2 καταγράφει κάποιο θόρυβο, άρα διαγράφεται και αυτός.



**Διάγραμμα 4**  
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου χωρίς τους αισθητήρες 5 και 6

Έτσι, μένει το παρακάτω διάγραμμα με 1088 σήματα:

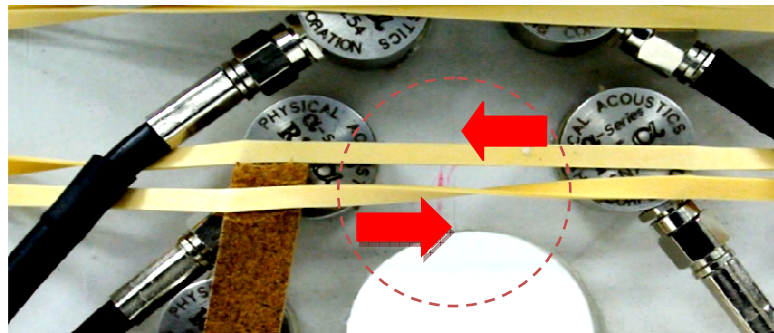




**Διάγραμμα 5**

*Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου χωρίς τους αισθητήρες 2, 5 και 6*

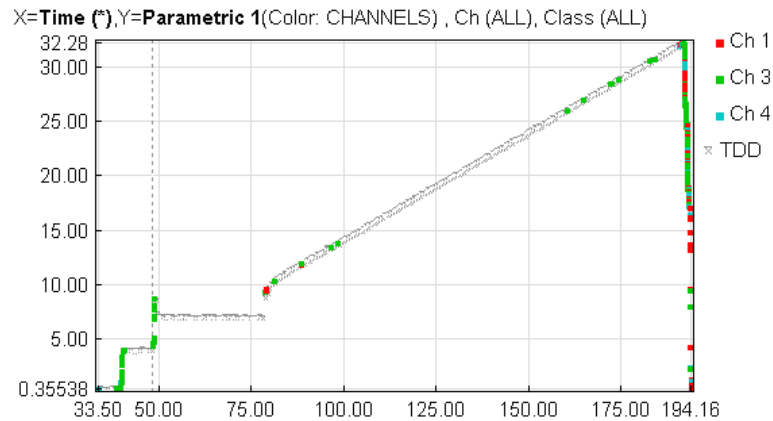
Στο τελικό διάγραμμα αυτό, η διακεκομμένη γραμμή δηλώνει την **έναρξη** της φόρτισης που έγινε στα **48,21 sec**. Πριν την έναρξη της φόρτισης, υπάρχουν κάποια σήματα που οφείλονται στο πάτημα των πλακών της μηχανής στο δοκίμιο. Στη δοκιμή αυτή, η **πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή** φάνηκε **μακροσκοπικά** από εξέταση των 2 βίντεο στα **60,2 sec** από την έναρξη της φόρτισης και σε φορτίο **2,62MPa**, χρόνο που αντιστοιχεί σε  $60,2+48,21=108,41$  sec. Στο παραπάνω διάγραμμα υπάρχουν κάποια σήματα πριν τα 100sec που μπορεί να οφείλονται στην έναρξη της ρωγμής αυτής. Τα επόμενα αυξανόμενα σήματα έχουν καταγραφεί λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου. Η εικόνα που ακολουθεί προέρχεται από το βίντεο και δείχνει την εμφάνιση της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής.



**Εικόνα 21**

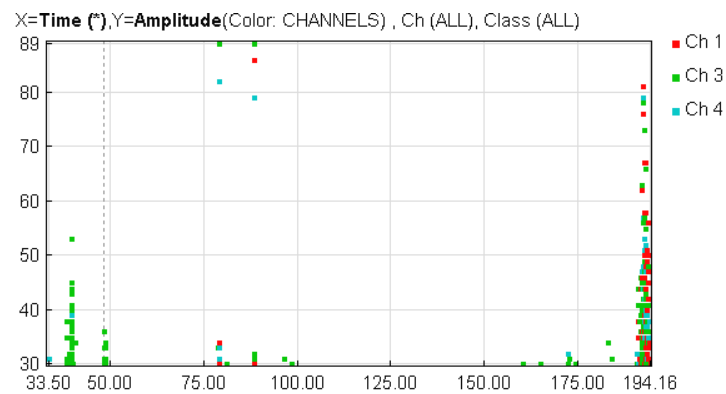
*Η εμφάνιση της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής από την μακροσκοπική παρατήρηση (εικόνα από το βίντεο)*

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η σχέση μεταξύ φορτίου (parametric 1- άξονας Y) και χρόνου (Time-άξονας x).



**Διάγραμμα 6**  
*Διάγραμμα Φορτίου (parametric 1)-Χρόνου χωρίς τους αισθητήρες 2, 5 και 6*

Όσον αφορά το πλάτος, στην επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες της μηχανής φτάνει στα **52dB**, κατά την πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή φτάνει στα **89dB** και κατά την αστοχία τα **80dB**, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί.



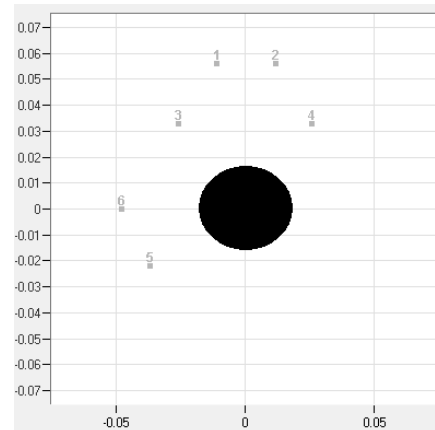
**Διάγραμμα 7**  
*Διάγραμμα Πλάτους-Χρόνου χωρίς τους αισθητήρες 2, 5 και 6*

### **✚ Δοκίμιο 5**

Το 5<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x6,5 cm** και οπή διαμέτρου **3,4 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **R15**, στηρίχτηκαν με λάστιχο, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Οι αποστάσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής ήταν:

**Πίνακας 7**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.011	0.056
2	0.012	0.056
3	-0.026	0.033
4	0.026	0.033
5	-0.037	-0.022
6	-0.048	0.000



Τα χαρακτηριστικά φόρτισης και οι ρυθμίσεις της ακουστικής εκπομπής ήταν:

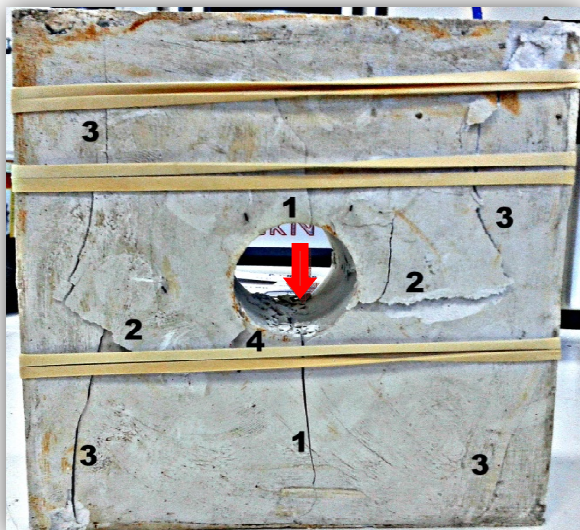


**Εικόνα 22**  
*Testsetup*

**Πίνακας 8 : Acquisition setup**

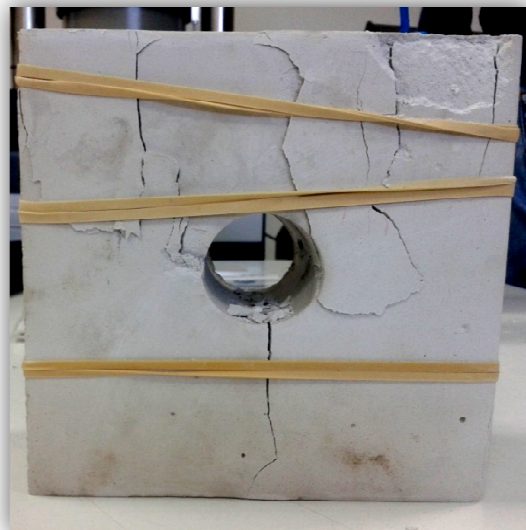
κανάλι	Threshold			Gain	PreAmp	Analog Filter		Waveform setup				Timing Parameters			
	type	db	FT Band			Lower	Upper	Sample rate	Pre-Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration	
1-6	FLOAT	30	6	0	40	20kHz	400kHz	1MSPS	1000.000	5K	50	200	300	2msec	

Το δοκίμιο αστόχησε στα **7,13 MPa** σε 236 sec. Οι παρατηρήσεις σχετικά με τη ρωγμάτωση είναι ίδιες με αυτές των προηγούμενων δοκιμών αλλά λίγο πιο ξεκάθαρες. Η διατμητική ρωγή εμφανίστηκε υπό κλίση **65°-70°**, ενώ η διατμητική ρωγή-λοξά ως προς το μέτωπο του δοκιμίου, υπό γωνία σχεδόν 80°. Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την αστοχία του δοκιμίου.

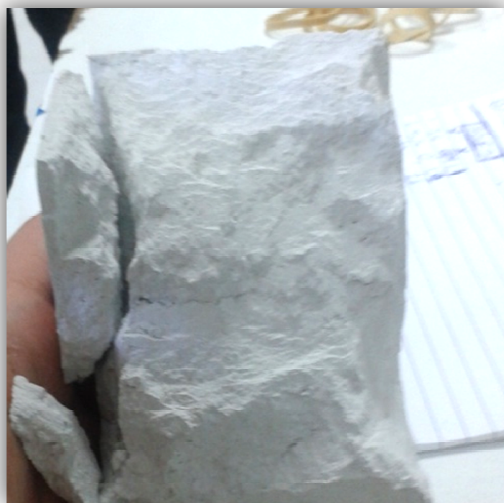


**Εικόνα 23**

Πρόσοψη (εκεί που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες)-Φαίνονται οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές (1), οι αποφλοιώσεις μέσα στην οπή όπως δείχνει το βέλος (4) και στην επιφάνεια του δοκιμίου(2) καθώς και οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές(3)



**Εικόνα 24**  
Πίσω όψη



**Εικόνα 25**  
Επιφάνεια ρωγμής διάτμησης



**Εικόνα 26**  
Αποφλοιώσεις στην οπή



**Εικόνα 27**  
Ρωγμή διάτμησης με κλίση σχεδόν 70°

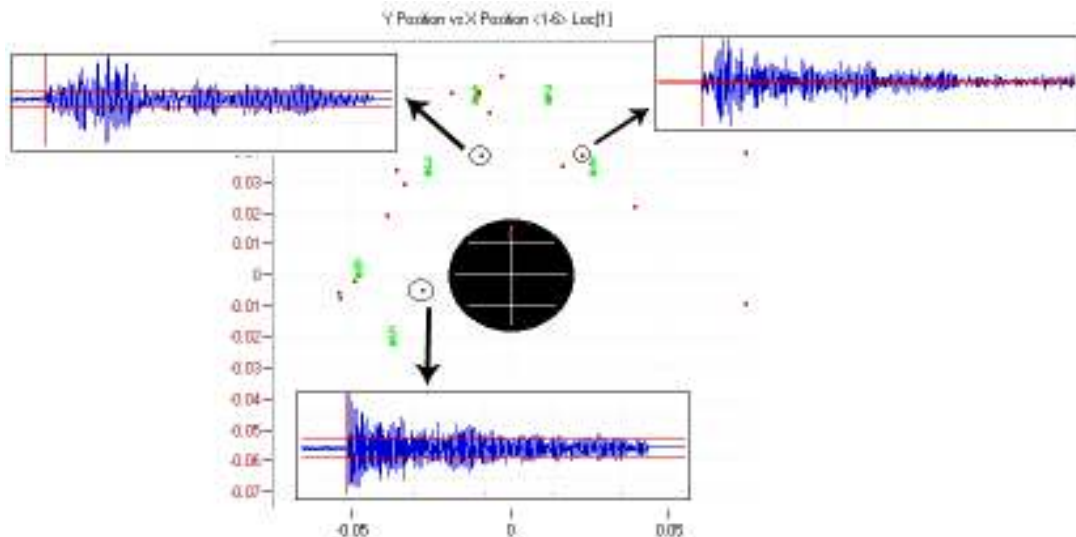


**Εικόνα 28**  
Πλάγια όψη



**Εικόνα 29**  
Γενική εικόνα του δοκιμίου μετά τη θραύση όπου φαίνονται οι ρωγμές διάτμησης με κλίση 70°

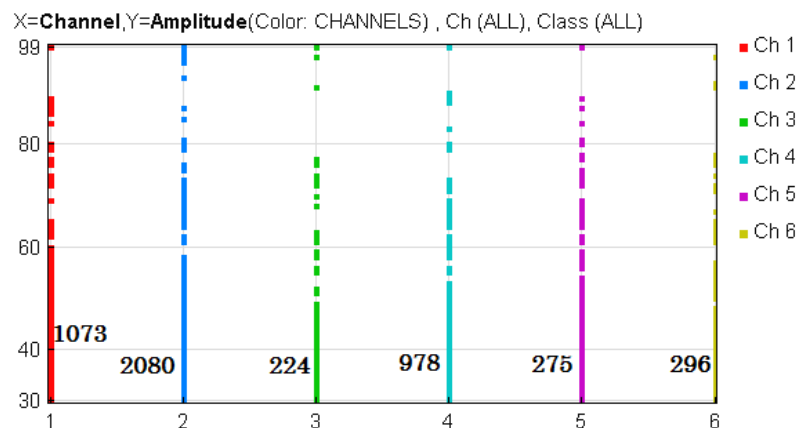
Όσον αφορά την ακουστική εκπομπή του υλικού, το πρόγραμμα AEWin for SAMOS κατέγραψε **131 Event**, όμως δεν ήταν ικανά να εντοπίσουν τη θέση της θραύσης καθώς ήταν διάσπαρτα. Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει τα αποτελέσματα του προγράμματος και μερικές κυματομορφές γύρω από την οπή από τους πιο κοντινούς αισθητήρες.



**Εικόνα 30**

*Αποτελέσματα από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης AEWin for SAMOS*

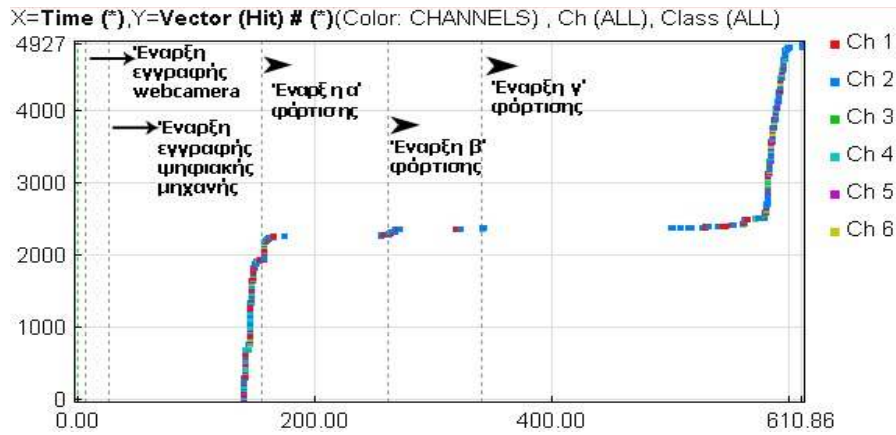
Το **Noesis** εμφανίζει 4926 σήματα. Όλοι οι αισθητήρες κατέγραψαν σήματα υψηλού πλάτους ο αριθμός των οποίων φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα δίπλα σε κάθε στήλη.



**Διάγραμμα 8**

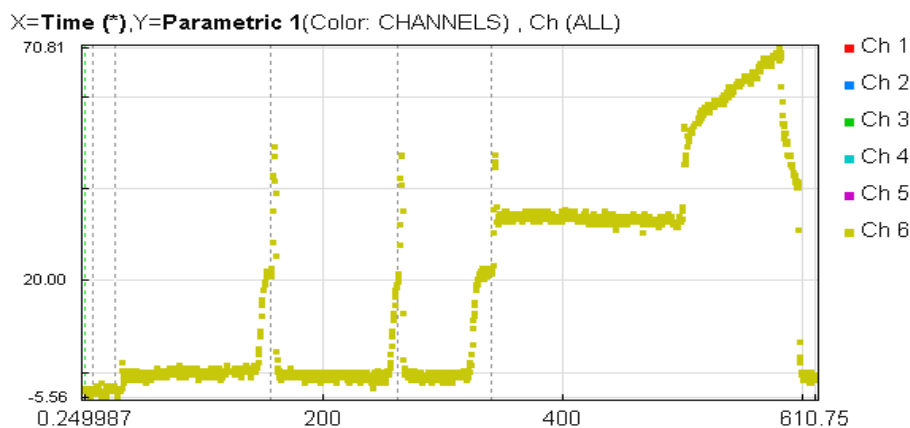
*Διάγραμμα Πλάτους-Χρόνου*

Από το διάγραμμα χρόνου-κτύπων που ακολουθεί, φαίνονται οι χρόνοι έναρξης εγγραφής της web camera και της ψηφιακής κάμερας και οι τρεις χρόνοι έναρξης της φόρτισης.



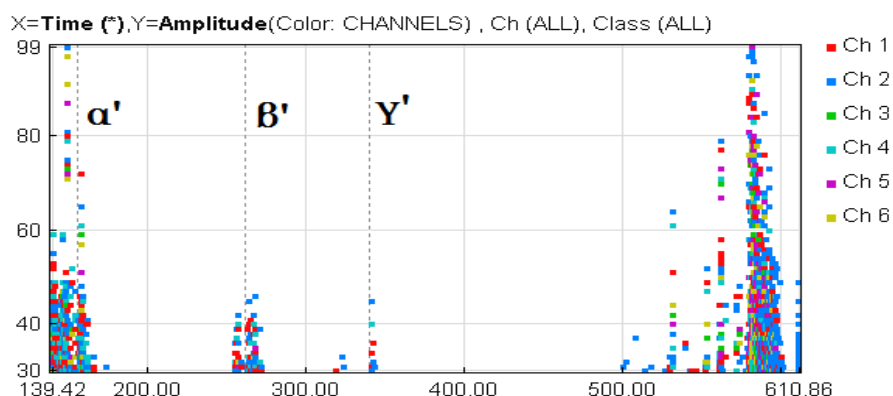
**Διάγραμμα 9**  
Διάγραμμα κτύπων-χρόνου

Κατά την **έναρξη της φόρτισης**, η μηχανή σταμάτησε να φορτίζει 2 φορές σε φορτίο περίπου **5MPa**, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα **Parametric1-Time** που ακολουθεί, για άγνωστο λόγο. Οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές, έπειτα από μακροσκοπική εξέταση κατά τη διάρκεια του πειράματος, φαίνεται ότι ξεκίνησαν κατά την πρώτη φόρτιση σε τάση μικρότερη από **5,01MPa**. Λίγο πριν την έναρξη της α' φόρτισης, φαίνεται να έχουν καταγραφεί σήματα που οφείλονται στην επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες της μηχανής, αλλά και σήματα μετά την έναρξη που οφείλονται πιθανώς στην δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Κατά την έναρξη της β' φόρτισης, καταγράφηκαν σήματα που πιθανώς οφείλονται πάλι στην επαφή των πλακών της μηχανής με το δοκίμιο ή στην ελαφρά επέκταση της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Αφού σταμάτησε ξανά η φόρτιση, την γ' φορά επιδιορθώθηκε το πρόβλημα στο πρόγραμμα και η φόρτιση συνέχισε πέραν των 5MPa. Μόλις πέρασε το φορτίο των 5,01MPa, σε χρόνο περίπου 76 δευτερόλεπτα πριν την **αστοχία**, που έγινε στα **7,31MPa**, άρχισε να επεκτείνεται η ρωγμή και σε αυτό μάλλον οφείλονται τα σήματα που έχουν καταγραφεί λίγο πριν τη θραύση στα διαγράμματα.



**Διάγραμμα 10**  
Διάγραμμα Φορτίου-Χρόνου

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση χρόνου και πλάτους των σημάτων ΑΕ και τα timemarks από τους 3 χρόνους έναρξης της φόρτισης. Κατά την πρώτη έναρξη (α') καταγράφονται υψηλά πλάτη, που οφείλονται στην επαφή των πλακών της μηχανής με το δοκίμιο αφού είναι πριν το timemark, ενώ μετά την έναρξη τα πλάτη είναι μεγέθους έως 78dB. Κατά την έναρξη της β' αλλά και της γ' φόρτισης τα γεγονότα έχουν πλάτη ιδίου μεγέθους, ενώ τα πλάτη αυξάνονται σταδιακά 100 δευτερόλεπτα πριν τη θραύση έως ότου αστοχήσει το υλικό.



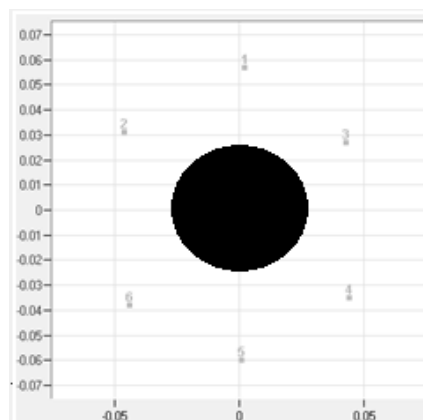
**Διάγραμμα 11**  
Διάγραμμα Πλάτους-Χρόνου

### **Δοκίμιο 6**

Το 6<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,9 cm** και οπή διαμέτρου **4,8 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **R15**. Το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **σιλικονούχο γράσσο** (OKS 1110). Το δοκίμιο βάφτηκε μαύρο στην μία πλευρά για να εξεταστεί αν είναι πιο εμφανείς οι πρωτογενείς ρωγμές. Οι αποστάσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής ήταν:

**Πίνακας 9**

Channel	X(m)	Y(m)
1	0.002	0.057
2	-0.046	0.031
3	0.043	0.027
4	0.044	-0.035
5	0.001	-0.060
6	-0.044	-0.038



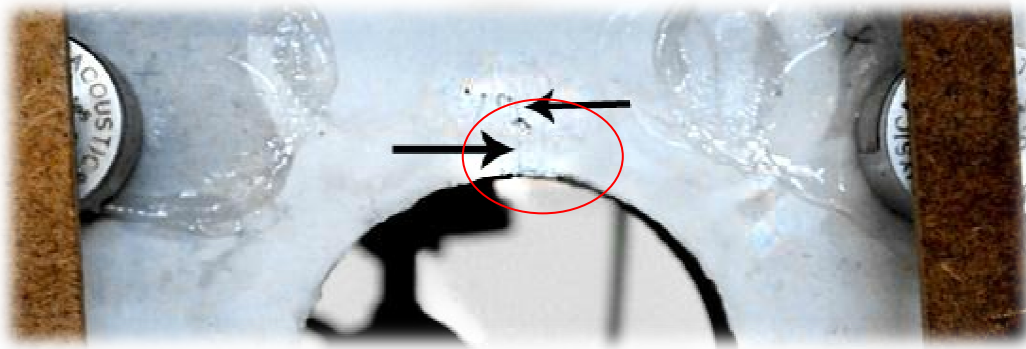


Τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με τη δοκιμή 3 που έγινε στο ίδιο πλαίσιο φόρτισης ενώ οι ρυθμίσεις της ακουστικής εκπομπής ήταν:

*Πίνακας 10: Acquisition setup*

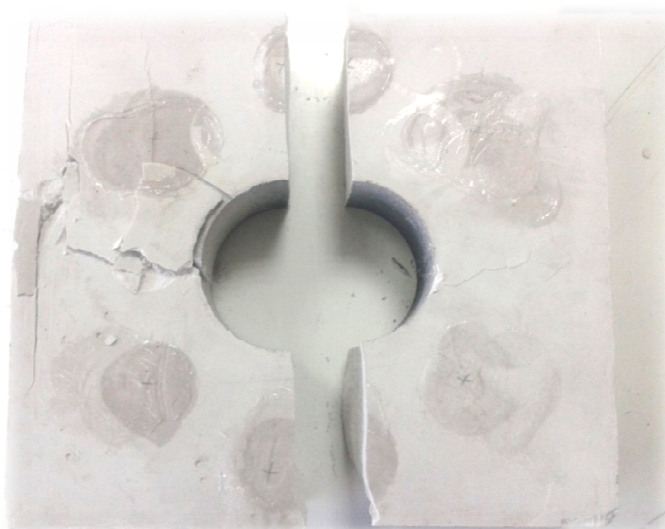
κανάλι	Threshold			Gain	Pre Amp	Analog Filter		Waveform setup			Timing Parameters			
	type	db	FT Band			Lower	Upper	Sample rate	Pre-Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration
1-6	FLOAT	35	6	0	60	20kHz	400kHz	1MSPS	120.000	5K	50	500	100	2msec

Το δοκίμιο αστόχησε στα **6,28MPa** (36,764kN). Οι παρατηρήσεις σχετικά με τη ρωγμάτωση είναι ίδιες με αυτές των προηγούμενων δοκιμών. Η διαμητική ρωγμή εμφανίστηκε από την μία πλευρά σχεδόν οριζόντια με κλίση **10°** περίπου, ενώ από την άλλη πλευρά με κλίση **25°**. Η διαμητική ρωγμή λοξά προς το μέτωπο του δοκιμίου εμφανίστηκε υπό γωνία περίπου 80°. Η **μαύρη επιφάνεια** του δοκιμίου δεν βοήθησε στην εξέταση της έναρξης της 1<sup>ης</sup> ρωγμής. Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την αστοχία του δοκιμίου.

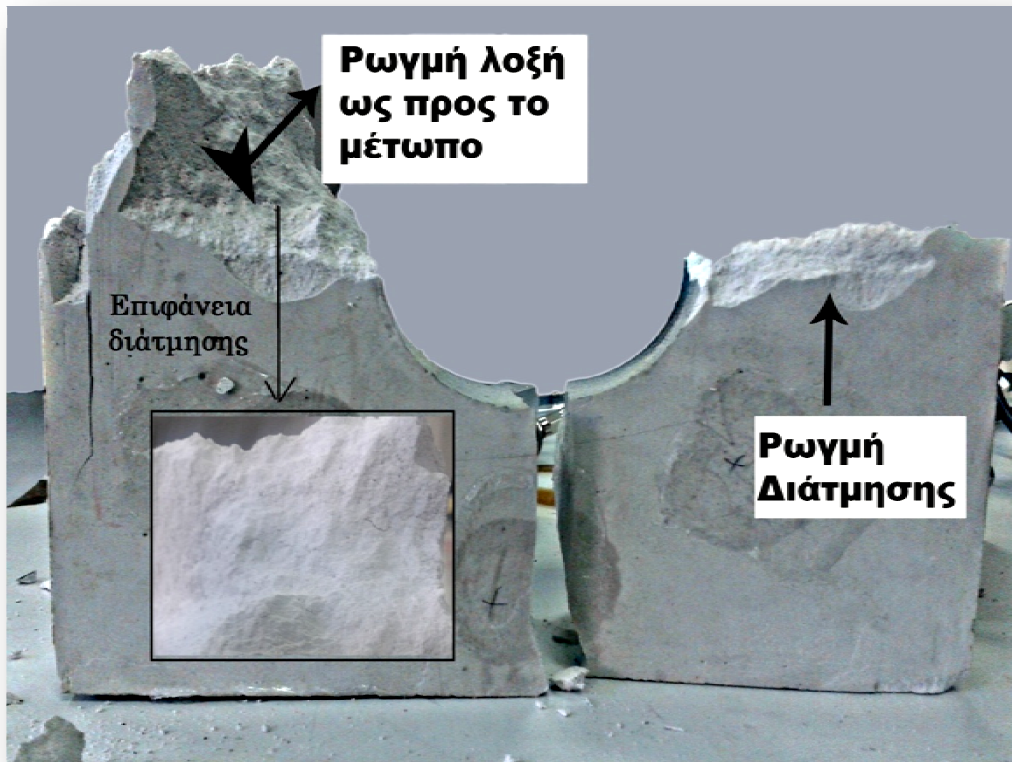


**Εικόνα 31**

*Η έναρξη της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής στο πάνω μέρος του δοκιμίου (εικόνα από το βίντεο). Έχει αυξηθεί η αντίθεση εντός του κύκλου στη φωτογραφία για να είναι πιο εμφανής η ρωγμή*

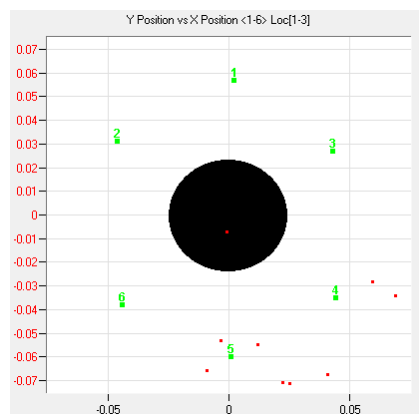


**Εικόνα 32**  
Η πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές του δοκιμίου 6



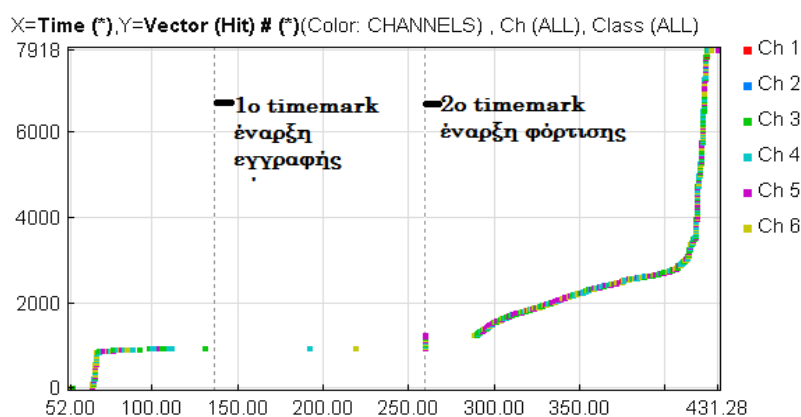
**Εικόνα 33**  
Οι διατμητικές ρωγμές του δοκιμίου 6

Το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης δεν εμφάνισε αξιόλογα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



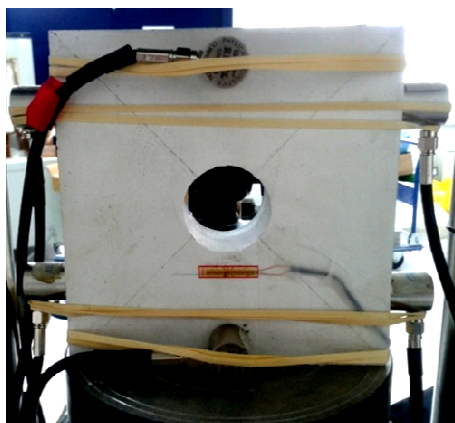
**Εικόνα 34**  
Αποτελέσματα του προγράμματος εντοπισμού θέσης για το δοκίμιο 6

Στο πρόγραμμα Noesis υπάρχουν δύο timemarks, όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα. Το πρώτο αντιστοιχεί στην έναρξη εγγραφής της κάμερας (136,3sec) και το δεύτερο στην **έναρξη της φόρτισης (259,29 sec)**. Οι κτύποι που καταγράφηκαν συνολικά από όλα τα κανάλια ήταν **7918**. Από το διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, παρατηρούνται στην αρχή κάποια σήματα που οφείλονται στην επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες της μηχανής. Η έναρξη της φόρτισης έγινε στο 2<sup>ο</sup> timemark, όπου τα σήματα αυξάνονται από την αρχή σχεδόν ως την αστοχία. Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή έγινε εμφανής μακροσκοπικά με τη βοήθεια των βίντεο στα **5,11MPa** και 35 δευτερόλεπτα πριν την αστοχία. Στο διάγραμμα δεν παρατηρείται κάποια απότομη αύξηση των σημάτων που μπορεί να οφείλεται στην δημιουργία της. Αν υποθεθεί ότι η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή δημιουργήθηκε στην έναρξη των παρακάτω σημάτων, δηλαδή στα 290 sec, τότε το φορτίο της έναρξης της αντιστοιχεί σε **3,02MPa**.



*Διάγραμμα 12*  
*Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου*

## Δοκίμιο 7

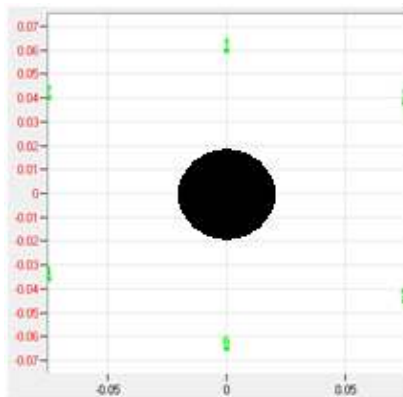


**Εικόνα 35**  
*Διάταξη των αισθητήρων στο 7<sup>ο</sup> δοκίμιο*

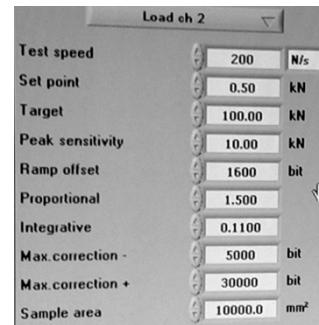
Το 7<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,8 cm** και οπή διαμέτρου **3,8 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **R15** και στηρίχτηκαν με διαφορετική διάταξη από τις προηγούμενες δοκιμές όπως φαίνεται στην παραπάνω φωτογραφία. Το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Στο δοκίμιο τοποθετήθηκε μοτίβο με ψεκάσμο με μαύρο χρώμα στην μία πλευρά για ταυτόχρονη δοκιμή μέτρησης της παραμόρφωσης μέσω **συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC)**. Επίσης τοποθετήθηκε τροπόμετρο (**strain gauge**) στην πρόσοψη για σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι αποστάσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής, τα χαρακτηριστικά της φόρτισης αλλά και της ακουστικής εκπομπής ήταν:

*Πίνακας 11*

Channel	X(m)	Y(m)
1	0.000	0.060
2	-0.075	0.040
3	0.075	0.038
4	-0.075	-0.036
5	0.075	-0.045
6	0.000	-0.065



*Διάταξη αισθητήρων*



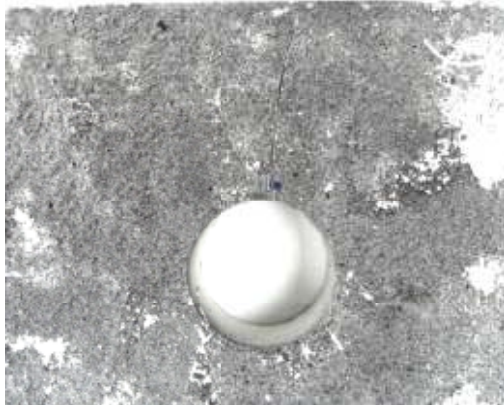
*Χαρακτηριστικά φόρτισης*

*Αποστάσεις αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής*

*Πίνακας 12: Acquisition setup*

κανάλι	Threshold			ain	re Amp	Analog Filter		Waveform setup			Timing Parameters			
	type	db	FT Band			Lower	Upper	Sample rate	Pre-Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration
1-6	FLOAT	61	6	0	60	20kHz	400kHz	5MSPS	120.000	5K	50	200	300	2msec

Το 7<sup>ο</sup>δοκίμιο αστόχησε σε **εφελκυσμό από κάμψη**, σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα δοκίμια. Αυτό που συνέβη, ήταν ότι δημιουργήθηκε ξεκάθαρα και με μεγάλο άνοιγμα η πρώτη εφελκυστική ρωγμή και μετά η οπή ακτίνας 1,9cm λειτούργησε σαν κενό που προκάλεσε την κάμψη. Επίσης δημιουργήθηκαν εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες στο μέτωπο του δοκιμίου. Η γενική μορφή του δοκιμίου μετά τη θραύση φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 36**  
*Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή*



**Εικόνα 37**  
*Η εφελκυστική ρωγμή κάμψης*

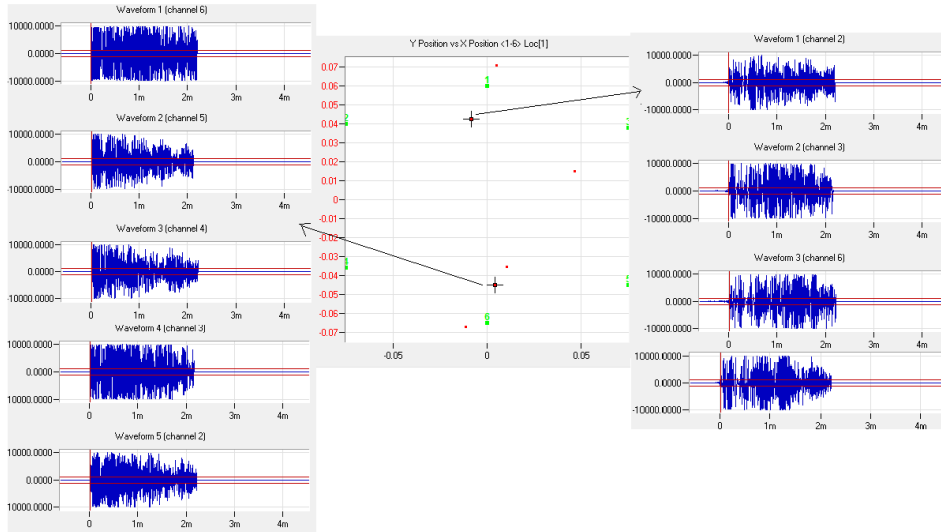


**Εικόνα 38**  
*Γενική μορφή θραύσης του δοκιμίου 7*



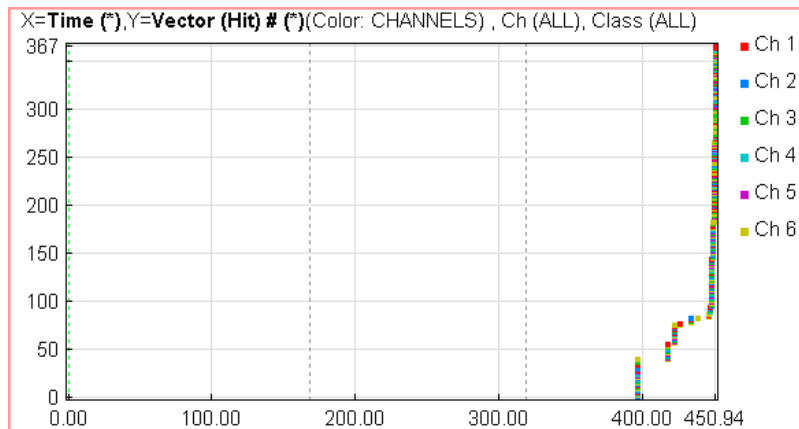
**Εικόνα 39**  
*Η εφελκυστική ρωγμή παράλληλα στο μέτωπο του δοκιμίου*

Η πρώτη ρωγμή δημιουργήθηκε στα **3,4MPa** σύμφωνα με το τροπόμετρο (strain gauge) που ήταν τοποθετημένο κάτω από την οπή αλλά και την ακουστική εκπομπή. Το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, δεν δίνει αποτελέσματα προς αξιολόγηση. Παρόλα αυτά, τα 3 από τα 8 events που έχει εντοπίσει, είναι κατά μήκος της εφελκυστικής ρωγμής. Επίσης, στο διάγραμμα φαίνονται και οι κυματομορφές που εντόπισαν οι διάφοροι αισθητήρες για δύο event. Τα σήματα είναι συνεχούς μορφής, γεγονός που υποδηλώνει ότι προέρχονται ενδεχομένως από συμβολές κυμάτων.



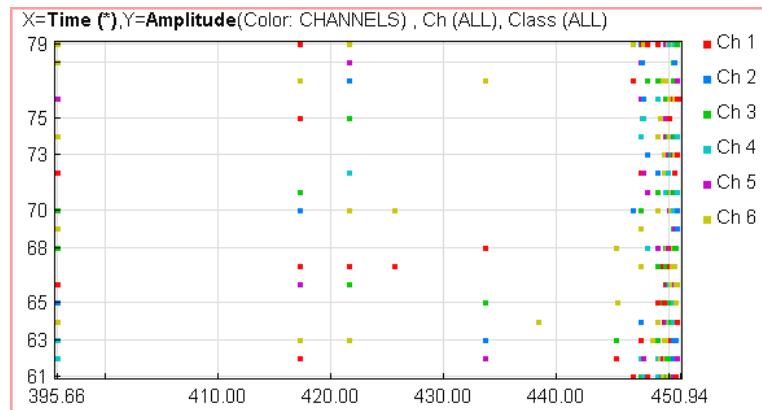
**Εικόνα 40**  
Κυματομορφές από το πρόγραμμα AEWinfor SAMOS

Από το διάγραμμα κτύπων-χρόνου του προγράμματος Noesis, το πρώτο timemark αντιστοιχεί στην έναρξη εγγραφής της κάμερας (168,33 sec) και το δεύτερο στην **έναρξη της φόρτισης (318,75 sec)**. Στα 395,66 sec, υπάρχουν σήματα από όλους τους αισθητήρες που αντιστοιχούν στη δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής, όπως αποδείχθηκε μετά από χρονική εξέταση των γεγονότων από την κάμερα και το strain gauge. Στη συνέχεια τα σήματα αυξάνονται έως ότου αστοχήσει το υλικό.



**Διάγραμμα 13**  
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου

Το επόμενο διάγραμμα αναπαριστά τη χρονική εξέλιξη του πλάτους των γεγονότων κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στο χρόνο 395,66 sec αντιστοιχεί η δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής, ενώ πριν την αστοχία, σε χρόνο 420 sec καταγράφονται αρκετά γεγονότα που οφείλονται στην εκτεταμένη ρωγμάτωση του δοκιμίου.



**Διάγραμμα 14**  
Διάγραμμα Πλάτους γεγονότων-Χρόνου

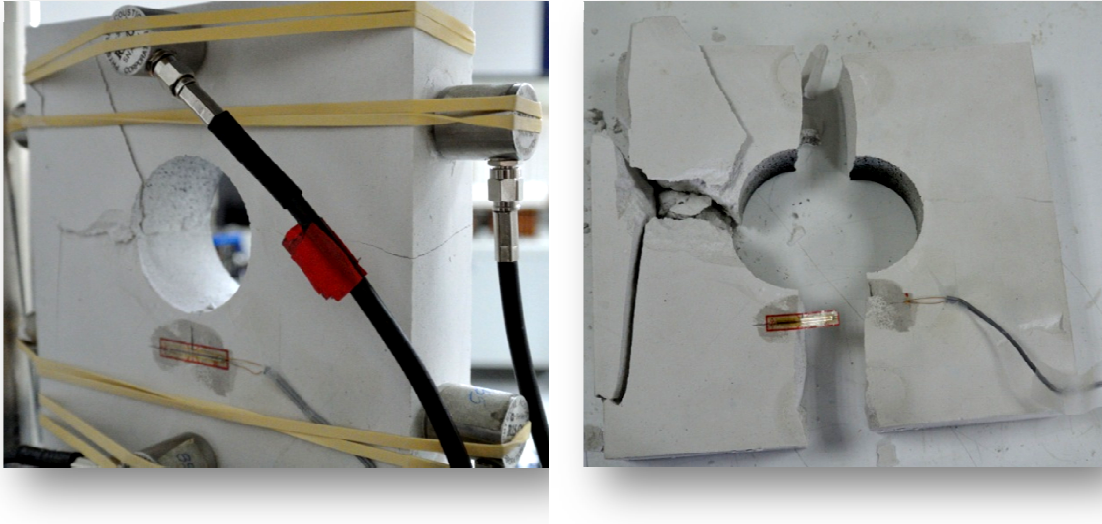
### **Δοκίμιο 8**

Το 8<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,5 cm** και οπή διαμέτρου **5 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **R15**, στηρίχτηκαν με λάστιχο, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Η διάταξη των αισθητήρων ήταν ίδια με την 7<sup>η</sup> δοκιμή με μικρές αποκλίσεις στις συντεταγμένες ως προς το κέντρο του δοκιμίου, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 12**

Channel	X(m)	Y(m)
1	0.000	0.065
2	-0.075	0.040
3	0.075	0.040
4	-0.075	-0.040
5	0.075	-0.040
6	0.000	-0.063

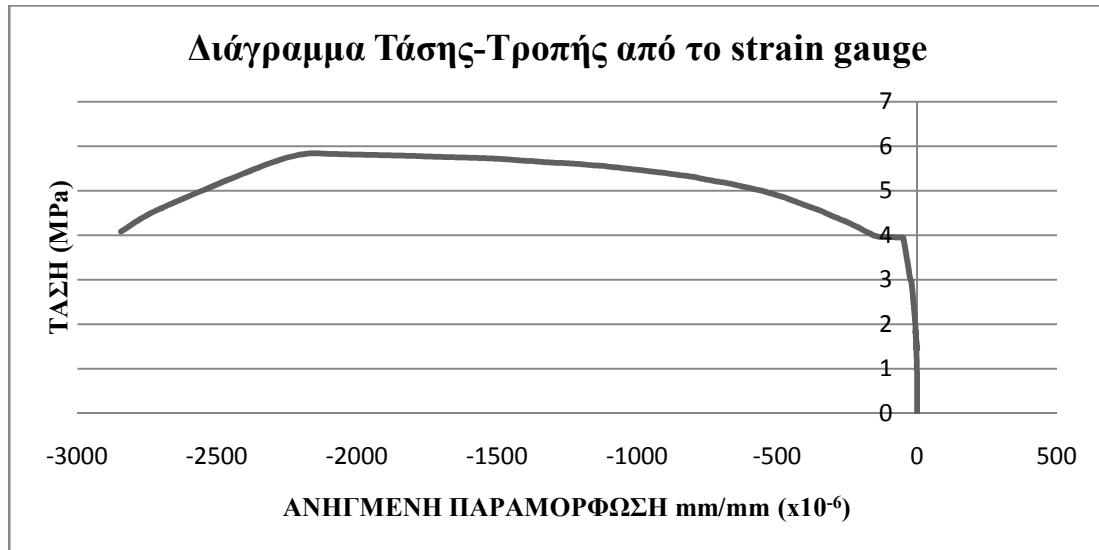
Τα χαρακτηριστικά φόρτισης και οι ρυθμίσεις της ακουστικής εκπομπής ήταν ίδιες με τη 7η δοκιμή. Το δοκίμιο αστόχησε στα **5,82MPa** (30,573kN). Οι παρατηρήσεις σχετικά με τη ρωγμάτωση είναι ίδιες με αυτές της των προηγούμενων δοκιμών (εκτός της 7ης δοκιμής). Πρώτα εμφανίζονται οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές στο άνω και κάτω όριο της οπής, μετά οι δευτερογενείς και τέλος οι διατμητικές. Οι διατμητικές ρωγμές που ξεκινάνε από το σύνορο της οπής εμφανίστηκαν στα δεξιά σχεδόν οριζόντια, ενώ στα αριστερά με κλίση περίπου 10°. Επίσης εμφανίστηκαν λοξές ρωγμές ως προς το μέτωπο του δοκιμίου με μεγάλη κλίση, περίπου 65°. Εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες προς το μέτωπο του δοκιμίου (όπως π.χ. στο δοκίμιο 3), δεν υπάρχουν. Οι αποφλοιώσεις μέσα στην οπή αλλά και επιφανειακά του δοκιμίου ήταν ελάχιστες. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν, φαίνεται η μορφή του δοκιμίου μετά τη θραύση.



**Εικόνα 41**

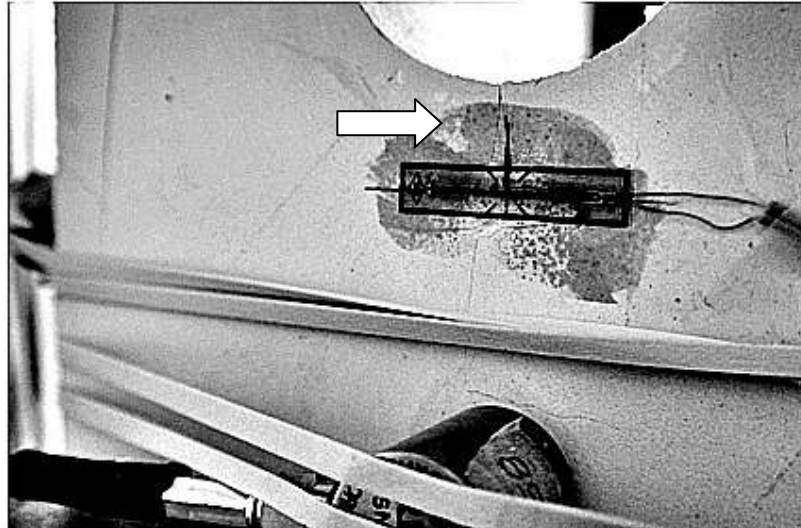
*Γενική μορφή του δοκιμίου μετά τη θραύση. Στην δεξιά φωτογραφία φαίνεται η διατμητική ρωγμή με κλίση*

Η πρώτη ρωγμή δημιουργήθηκε στα **3,9MPa** όπως έδειξε το strain gauge που είχε τοποθετηθεί κάτω ακριβώς από την οπή μέσω σκαλοπατιού που δημιουργήθηκε στο διάγραμμα τάσεων-τροπών που ακολουθεί. Βέβαια, η κλίση της γραμμής αλλάζει στα 3MPa, όμως θεωρείται ότι η ρωγμή αντιστοιχεί στην πιο απότομη αλλαγή της κλίσης.



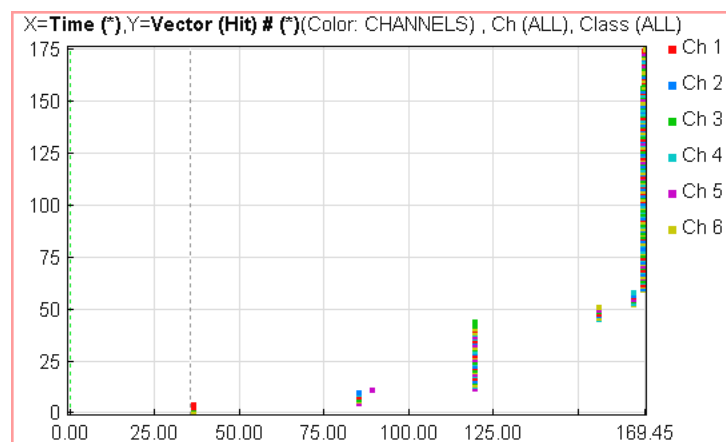
*Διάγραμμα 15*





**Εικόνα 42**  
*Η εφελκυστική ρωγμή στο κέντρο της οπής*

Στην δοκιμή αυτή δεν καταγράφηκε το φορτίο στο πρόγραμμα της ακουστικής εκπομπής λόγω δυσλειτουργίας της αναλογικής εξόδου της κονσόλας ελέγχου της μηχανής φόρτισης κι έτσι αξιολογούνται τα εξής διαγράμματα από το πρόγραμμα Noesis:

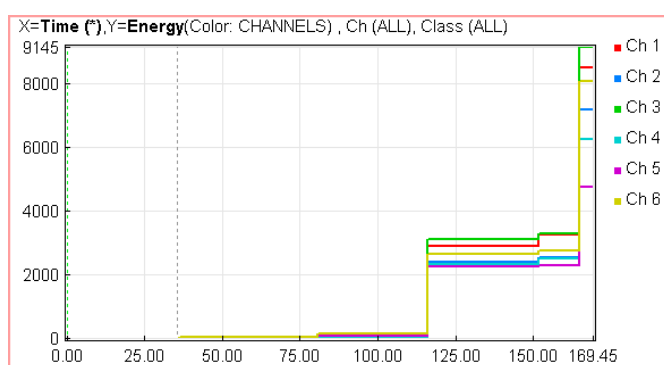


**Διάγραμμα 16**  
*Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου δοκιμίου 8*

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούνται κάποια Hit στην **έναρξη της φόρτισης**, που αντιστοιχεί στο timemark στα **36sec**, κάποια κοντά στα 85sec και κάποια κοντά στα 119sec τα οποία μπορεί να προέρχονται από την πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή. Σύμφωνα με το διάγραμμα τάσης-τροπής από το **strain gauge**, η πρώτη ρωγμή έγινε στα **84 sec (3,9MPa)** από την έναρξη μέτρησης δηλαδή στο παραπάνω διάγραμμα στα  $36+84=120$  sec. Συνεπώς τα σήματα που φαίνονται στα 119 sec πιθανώς προέρχονται από την δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Τα σήματα στα 85sec αντιστοιχούν σε τάση 2,65MPa που είναι πολύ κοντά

στα 3Μρα που αλλάζει η κλίση του διαγράμματος τάσης-τροπής των τροπόμετρων. Τα σήματα στο τέλος του διαγράμματος προέρχονται από τη ρωγμάτωση του δοκιμίου λίγο πριν τη θραύση.

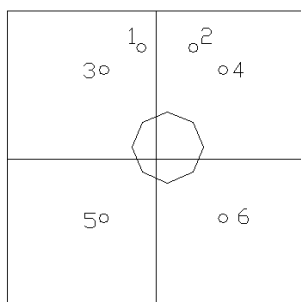
Αξιολογώντας το διάγραμμα **Αθροιστικής ενέργειας ΑΕ-Χρόνου** που ακολουθεί, φαίνεται ότι στην αρχή της φόρτισης η ενέργεια είναι πολύ χαμηλή, στη συνέχεια κατά τη δημιουργία της πρώτης ρωγμής η ενέργεια αυξάνεται απότομα, ακολουθεί ένα σταθερό στάδιο και τη στιγμή της θραύσης, δημιουργείται άλλο ένα σκαλοπάτι και η ενέργεια αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Το ίδιο συμβαίνει με όλα τα κανάλια. Η ενέργεια από τα κανάλια 2 και 4 που βρισκόταν στην ίδια πλευρά του δοκιμίου, είναι ακριβώς η ίδια, αλλά και του καναλιού 5 που ήταν αντιδιαμετρικά του 4. Αντίθετα το κανάλι 3 που ήταν αντιδιαμετρικά του 2 και στην ίδια πλευρά με το 5 κατέγραψε υψηλότερες τιμές ενέργειας. Τα κανάλια 1 και 6 που ήταν στο μέτωπο του δοκιμίου κατέγραψαν επίσης σχεδόν την ίδια ενέργεια.



**Διάγραμμα 17**  
Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου του δοκιμίου 8

## **Δοκίμιο 9**

Το 9<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **20x20x4,7 cm** και οπή διαμέτρου **4,8 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **MICRO 100S**, στηρίχτηκαν με ταινία, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Κατά τη δόνηση του δοκιμίου μετακινήθηκε ο σωλήνας ρν που τοποθετείται για τη δημιουργία της οπής κι έτσι αυτή δεν βρίσκεται στο κέντρο του δοκιμίου αλλά έκκεντρη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μαζί με την τοποθέτηση των αισθητήρων.



Έκκεντρη οπή και κάναβος αισθητήρων MICRO 100S

**Πίνακας 13**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.010	0.075
2	0.025	0.075
3	-0.035	0.060
4	0.045	0.060
5	-0.035	-0.040
6	0.045	-0.040

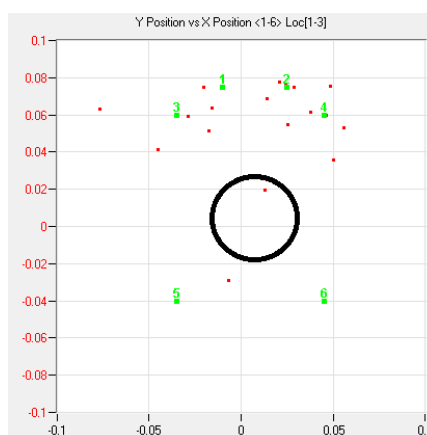
Συντεταγμένες αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά της φόρτισης ήταν τα ίδια με τις προηγούμενες δοκιμές με εξαίρεση το threshold (κατώφλι) το οποίο μειώθηκε στα **40dB**. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε πλαίσιο μεγαλύτερης δυναμικότητας (5000kN) από τα προηγούμενα και αστόχησε σχεδόν αμέσως σε τάση **4,91MPa**. Η μηχανή πάτησε πάνω στο δοκίμιο με **2,2MPa** με συνέπεια να δημιουργηθεί απευθείας η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή, όπως έγινε και στο δοκίμιο 2. Η μορφή αστοχίας του δοκιμίου είναι ίδια με αυτή των προηγούμενων δοκιμίων. Οι εικόνες που ακολουθούν δείχνουν την γενική μορφή του δοκιμίου μετά την αστοχία.



**Εικόνα 43**  
Η αστοχία του δοκιμίου 9

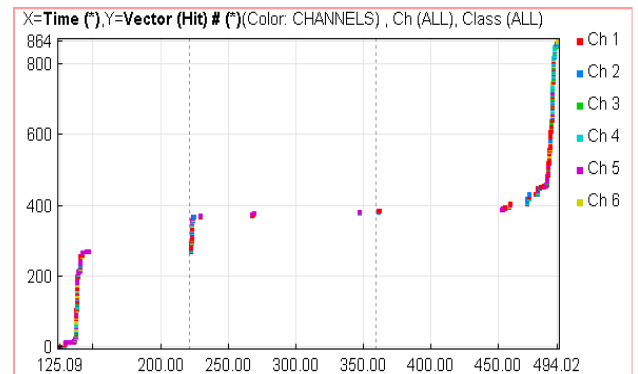
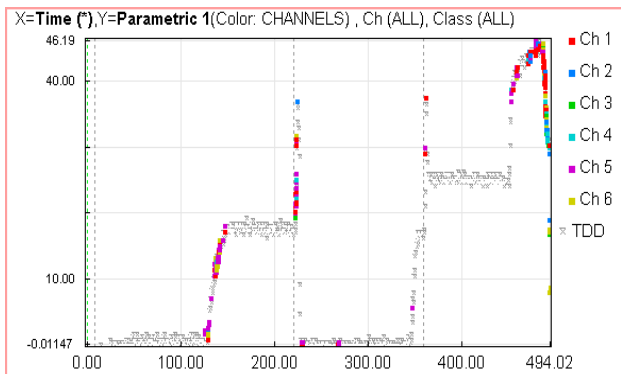
Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης, εντοπίστηκαν 30 διάσπαρτα γεγονότα (events) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 44**  
Αποτελέσματα προγράμματος AEWinforSAMOS

Από το πρόγραμμα Noesis προέκυψαν τα διαγράμματα που ακολουθούν στα οποία υπάρχουν 3 χρονοσημάνσεις (timemarks). Το πρώτο αντιστοιχεί στην έναρξη εγγραφής της κάμερας (8,13 sec) το δεύτερο στην **έναρξη της φόρτισης (221,44 sec)** και το τρίτο στην **επαναφόρτιση (359,1 1sec)**.

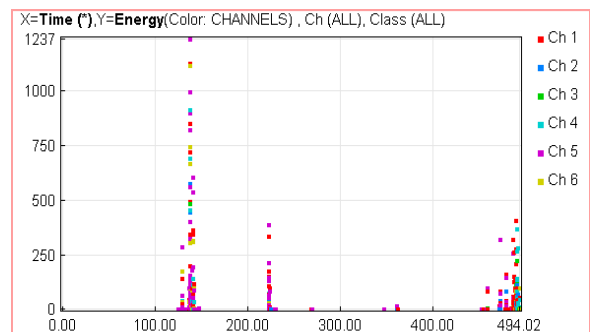
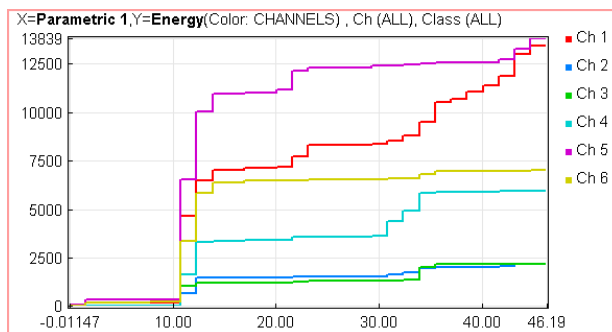
Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η σχέση φορτίου-χρόνου. Σε αυτό παρατηρείται ότι στα 125 sec υπάρχουν κάποια σήματα τα οποία οφείλονται στην δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής από την επαφή των πλακών της μηχανής με το δοκίμιο (<math>20\text{kN}</math>). Η φόρτιση ξεκίνησε στα <math>221,44\text{ sec}</math> όπου εμφανίζονται ξανά κάποια σήματα τα οποία οφείλονται στην θραύση του δοκιμίου αφού η μηχανή πάτησε με <math>20\text{kN}</math> με αποτέλεσμα στην έναρξη της φόρτισης το φορτίο να φτάσει απευθείας στα <math>40\text{kN}</math> και να αστοχήσει. Στη συνέχεια επιχειρήθηκε επαναφόρτιση του δοκιμίου. Στην έναρξη καταγράφηκαν ελάχιστα σήματα, το δοκίμιο δέχτηκε λίγο παραπάνω φορτίο και ρωγματώθηκε περαιτέρω γεγονός που εξηγεί τα σήματα στο τέλος της επαναφόρτισης. Τα ίδια συμπεράσματα εξάγονται και από το διάγραμμα κτύπων-χρόνου.



### Διαγράμματα 18

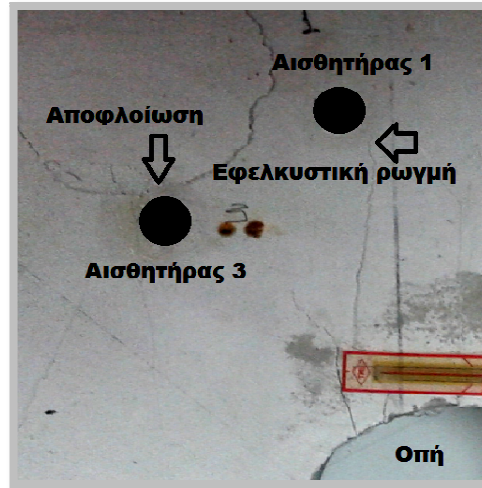
Αριστερά: Διάγραμμα Φορτίου- Χρόνου, δεξιά: Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου

Όσον αφορά την **αθροιστική ενέργεια**, στα διαγράμματα ενέργειας-φορτίου και ενέργειας-χρόνου που ακολουθούν, στα 125sec στα οποία δημιουργήθηκε η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή (σε φορτίο <math>12\text{kN}</math>), η ενέργεια αυξήθηκε απότομα σε όλους τους αισθητήρες. Στην συνέχεια στα 225 sec που ξεκίνησε η φόρτιση, η ενέργεια αυξήθηκε ελάχιστα και σταδιακά (με σκαλοπάτια στο διάγραμμα) σε όλους τους αισθητήρες με εξαίρεση τον 1 όπου η ενέργειά του διπλασιάστηκε σε σχέση με αυτήν στα <math>20\text{kN}</math>. Αυτό συνέβη πιθανώς γιατί η εφελκυστική ρωγμή πέρασε ακριβώς δίπλα από τον 1 όπως μπορούμε να διακρίνουμε στην εικόνα που ακολουθεί τα διαγράμματα.



### Διαγράμματα 19

Αριστερά: Διάγραμμα Ενέργειας- Φορτίου, δεξιά: Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου



**Εικόνα 45**

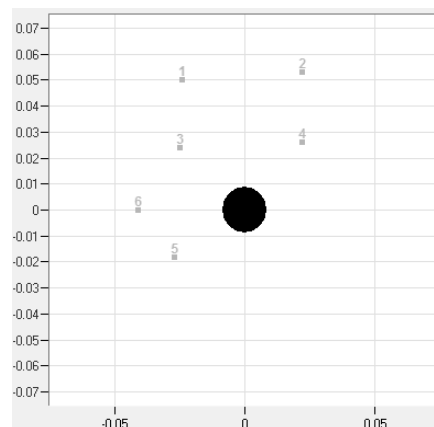
*Η εφελκυστική ρωγμή έφτασε στον αισθητήρα 1 του οποίου η ενέργεια αυξήθηκε απότομα σε σχέση με τους άλλους αισθητήρες*

### **Δοκίμιο 10**

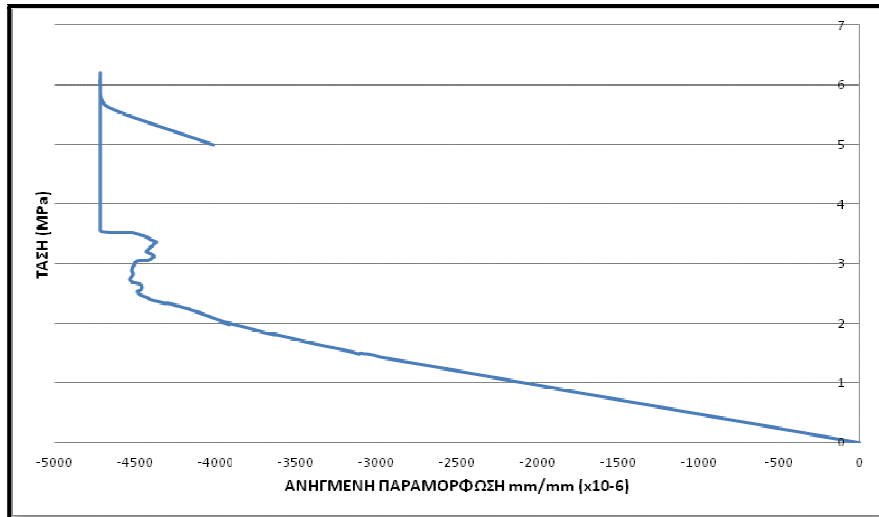
Το 10<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,7 cm** και οπή διαμέτρου **1,8 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **MICRO 100S**, στηρίχτηκαν με ταινία, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Οι θέσεις των αισθητήρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 14**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.024	0.050
2	0.022	0.053
3	-0.025	0.024
4	0.022	0.026
5	-0.027	-0.018
6	-0.041	0.000

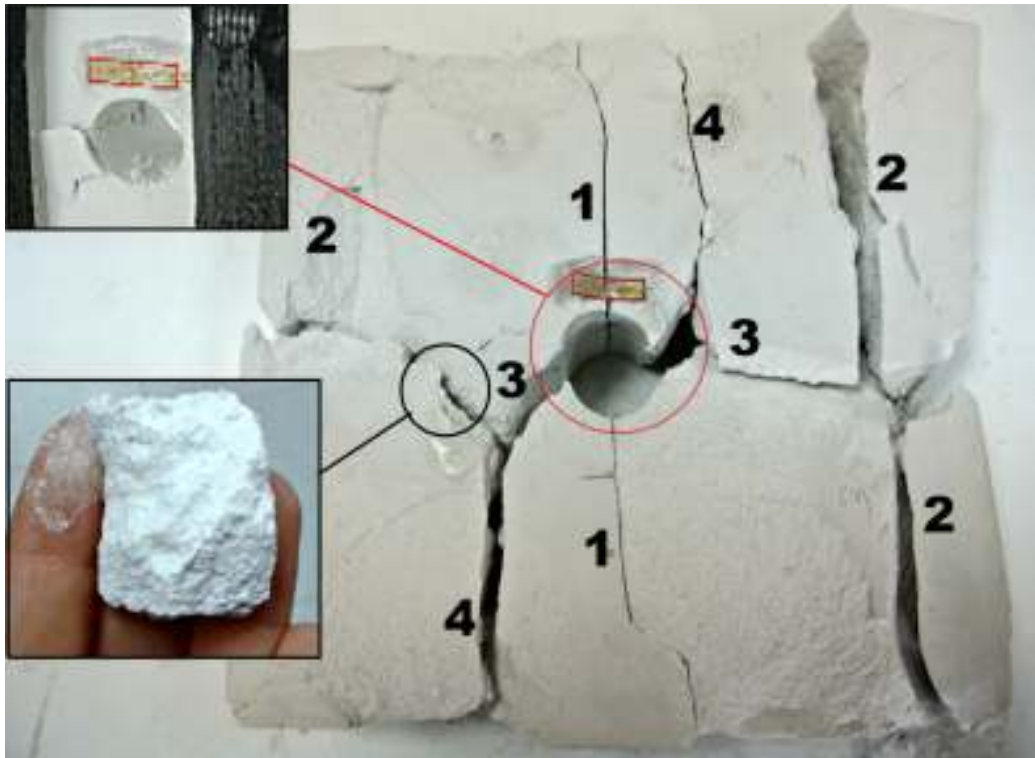


Το δοκίμιο φορτίστηκε με ρυθμό **200N/s** και αστόχησε στα **6,19MPa**. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ακουστικής εκπομπής, το threshold ορίστηκε fixed στα **30dB** με προενίσχυση **60dB**. Τα **30dB**, είναι το όριο κάτω από το οποίο οι **αισθητήρες καταγράφουν θόρυβο**. Η πρώτη ρωγμή εμφανίστηκε στα **5,32MPa** σύμφωνα με παρατήρηση των βίντεο στις δύο όψεις του δοκιμίου, ενώ σύμφωνα με ένδειξη τουstrainingauge, στα **2,54MPa**.



**Διάγραμμα 20**  
*Διάγραμμα τάσης-τροπής από το τροπόμετρο*

**Η μορφή αστοχίας διαφέρει λίγο από αυτή των προηγούμενων δοκιμών.** Όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, οι εφελκυστικές που ξεκινάνε από την οπή εμφανίστηκαν πρώτες (1) παράλληλες στη διεύθυνση της φόρτισης και εκτράπηκαν καθώς πλησίασαν στα άκρα του δοκιμίου. Η πάνω πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή έπεσε πάνω στο strain gauge, από το οποίο βρέθηκε και η τάση έναρξης της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Οι διατμητικές ρωγμές (3) εξελίχτηκαν σε αξονικές εφελκυστικές (4). Η μια διατμητική (αριστερά) εξελίχτηκε προς τα κάτω με κλίση 50° ενώ η άλλη (δεξιά) προς τα πάνω με κλίση 45°. Επίσης εμφανίστηκαν ρωγμές διάτμησης με κλίση ως προς το μέτωπο του δοκιμίου οι οποίες επεκτάθηκαν έως τα όρια του δοκιμίου και ενώθηκαν με τις δευτερεύουσες εφελκυστικές ρωγμές. Οι δευτερεύουσες εφελκυστικές ρωγμές (2) εμφανίστηκαν στις 3 από τις 4 πλευρές, ενώ υπήρχαν και εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες προς το μέτωπο του δοκιμίου. Εσωτερικά της οπής υπήρχαν λίγες αποφλοιώσεις όπως φαίνεται στην πάνω αριστερά λεπτομέρεια της εικόνας, ενώ οι επιφάνειες διάτμησης έγιναν αντιληπτές από την πουδραρισμένη επιφάνειά τους όπως φαίνεται στην κάτω αριστερά λεπτομέρεια της εικόνας.



**Εικόνα 46**  
*Αστοχία του δοκιμίου 10*

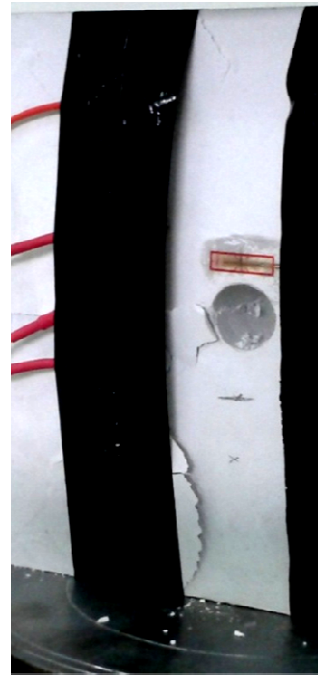
Αξίζει να σημειωθούν δύο πράγματα:

1. Οι επιφανειακές αποφλοιώσεις οφείλονται στην ταινία με την οποία στηρίχθηκαν οι αισθητήρες, η χρήση της οποίας είναι δύσκολο να αποφευχθεί
2. Οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές δεν ήταν μακροσκοπικά εμφανείς (με το μάτι), αλλά χρειάστηκε να πιεστεί ελαφρά το δοκίμιο με το χέρι για να φανούν.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται δύο όψεις του δοκιμίου μετά την αστοχία, όπου **δεν είναι εμφανής μακροσκοπικά** (με το μάτι) η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή. Αυτά που φαίνονται είναι επιφανειακές αποφλοιώσεις.

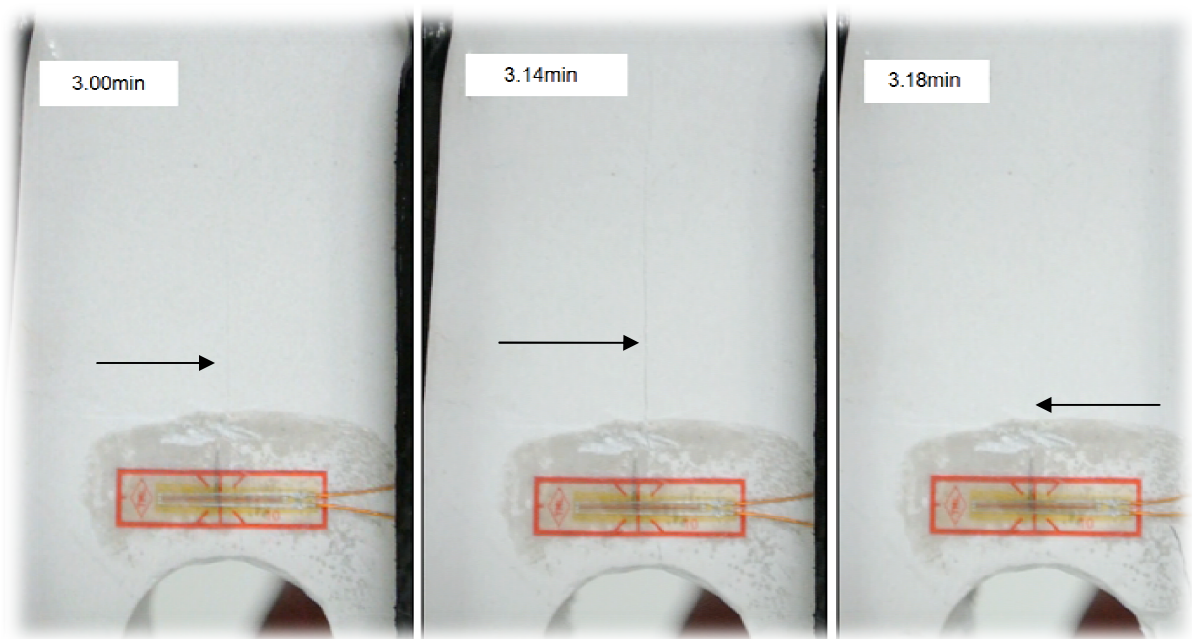


*Εικόνα 47*  
*Πίσω όψη*



*Εικόνα 48*  
*Μπροστά όψη*

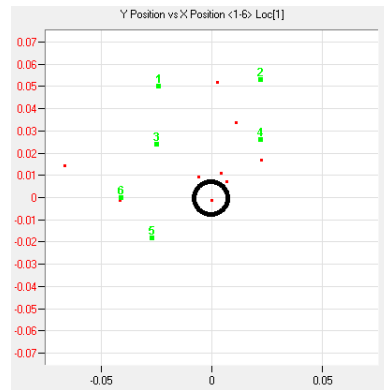
Στην παρακάτω εικόνα, η μακροσκοπική παρατήρηση **μέσω της κάμερας** δείχνει στα 3 λεπτά καταγραφής (η καταγραφή είχε ξεκινήσει πριν την έναρξη της φόρτισης) ένα ίχνος της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής που 14 δευτερόλεπτα μετά (3:14 λεπτά) γίνεται ξεκάθαρη, ενώ μόλις 4 δευτερόλεπτα μετά (3:18) η ρωγμή κλείνει και χάνεται οπτικά.



*Εικόνα 49*  
*Μακροσκοπική παρατήρηση πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής μέσω του βίντεο*



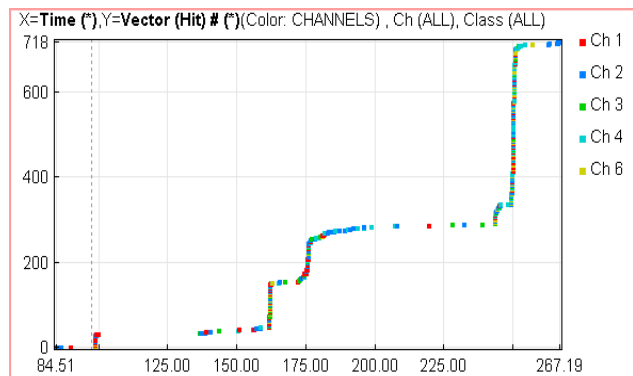
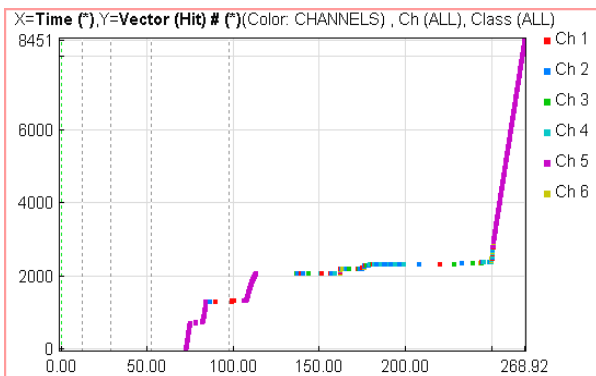
Το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης, κατέγραψε 18 γεγονότα συνολικά από τα οποία τα 3 μόνο είναι κοντά στην οπή και το σημείο έναρξης της πρώτης ρωγμής, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Εικόνα 50**

Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης της πηγής

Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο αισθητήρας 5 κατέγραφε συνεχώς γεγονότα που πιθανόν οφείλονται σε θόρυβο γι' αυτό και παραλείπεται από την ανάλυση με το πρόγραμμα Noesis, λαμβάνοντας έτσι τα διαγράμματα που ακολουθούν.



**Διαγράμματα 21**

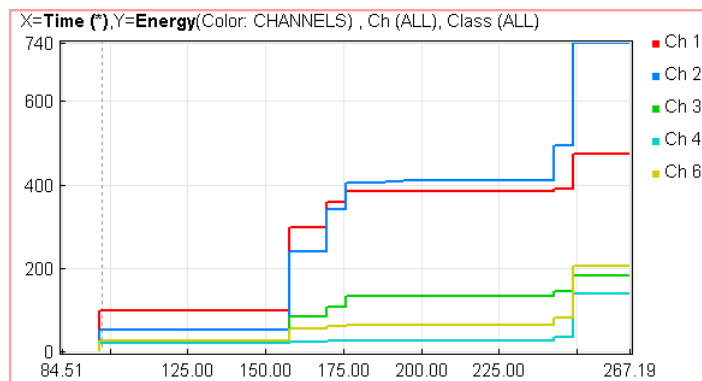
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου. Στα αριστερά με όλες τις χρονοσημάνσεις και δεξιά από την έναρξη της φόρτισης και μετά για καλύτερη εξέταση τω γεγονότων

Οι χρονοσημάνσεις των γεγονότων είναι:

**Πίνακας 15**

Χρόνος (sec)	Γεγονός
12,16	Έναρξη εγγραφής κάμερας πίσω όψης
29,00	Άκυρο
52,57	Έναρξη εγγραφής κάμερας πρόσοψης

Στο διάγραμμα κτύπων-χρόνου, παρατηρείται ότι στην **αρχή της φόρτισης** (timemark στα **97,61 sec**) υπάρχουν κάποια γεγονότα που οφείλονται στην αποφλοίωση λόγω της ταινίας, αφού η φόρτιση ξεκίνησε μετά που σταμάτησαν τα σήματα από την επαφή των πλακών της μηχανής με το δοκίμιο. Στη συνέχεια παρατηρείται απότομη αύξηση των σημάτων στα 161,50 sec και 175 sec. Ακολουθεί ένας σταθερός κλάδος έως λίγο πριν την αστοχία όπου τα σήματα αυξάνονται ξανά απότομα (249,50 sec). Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή γίνεται ορατή στα βίντεο 26,5 sec πριν την αστοχία όπου δεν υπάρχει απότομη αύξηση των σημάτων γεγονός που φανερώνει ότι η ρωγμή άρχισε να δημιουργείται πιο νωρίς. Με συσχέτιση της πρώτης αύξησης των γεγονότων με την πρώτη ρωγμή, όπως προέκυψε στα προηγούμενα πειράματα, αυτή πρέπει να δημιουργήθηκε στα  $249,5-161,5=88$  sec δηλαδή στα **3,94MPa**. Στο διάγραμμα της ενέργειας με το χρόνο, στα 161,5sec που θεωρείται ότι δημιουργήθηκε η πρώτη ρωγμή, παρατηρείται απότομη αύξηση της ενέργειας, ενώ στα 175 sec η ενέργεια ανεβαίνει σταδιακά (με σκαλοπάτια στο διάγραμμα) που μάλλον οφείλεται στην διάδοση της πρώτης ρωγμής ή δημιουργία νέων. Η ενέργεια αυξάνεται απότομα ξανά, λίγο πριν την αστοχία του δοκιμίου.



**Διάγραμμα 22**  
Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

## Δοκίμιο 11

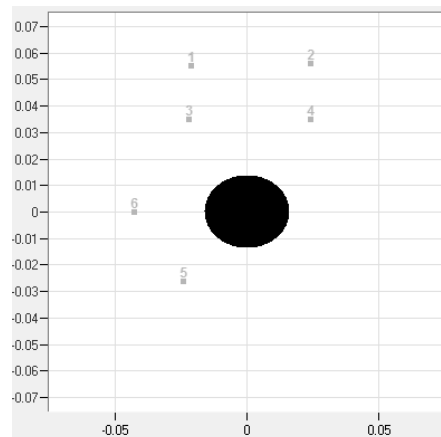


**Εικόνα 51**  
Παρακολούθηση 11<sup>ης</sup> δοκιμής

Το 11<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,9 cm** και οπή διαμέτρου **2,4 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **MICRO 100S**, στηρίχτηκαν με λάστιχο και ταινία, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Σκοπός ήταν η αποφυγή της ταινίας γιατί δημιουργεί αποφλοιώσεις και σήματα τα οποία μπλέκονται με αυτά της θραύσης της οποίας επιδιώκεται η παρατήρηση. Η διάταξη των αισθητήρων είναι η ίδια με το δοκίμιο 10, με μικρές διαφορές στις συντεταγμένες. Οι θέσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 16**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.021	0.055
2	0.024	0.056
3	-0.022	0.035
4	0.024	0.035
5	-0.024	-0.026
6	-0.046	0.000

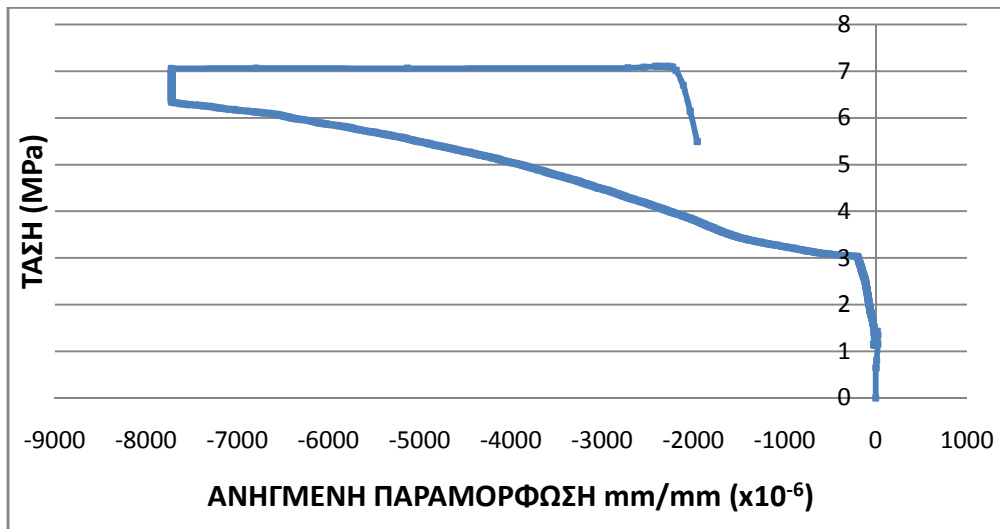


Το δοκίμιο φορτίστηκε με ρυθμό **200N/s** και αστόχησε στα **7,11MPa**. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ακουστικής εκπομπής, το threshold ορίστηκε fixed στα **30dB** με προενίσχυση **60dB**. Οι ρυθμίσεις φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 18: Acquisition setup**

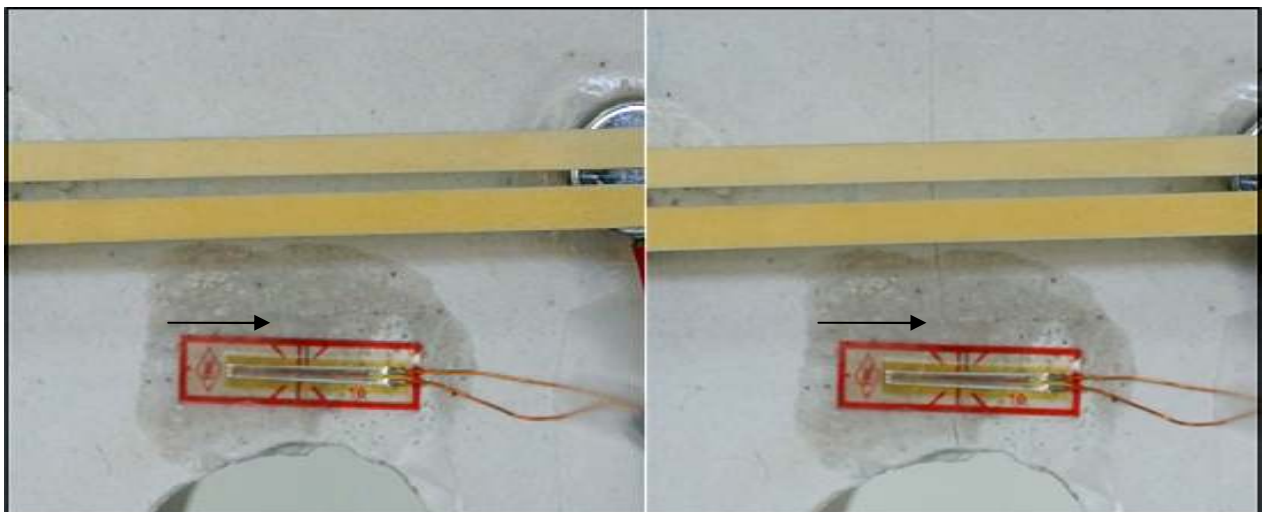
κανάλι	Threshold			Gain	Pre Amp	Analog Filter		Waveform setup				Timing Parameters			
	type	db	FT Band			Lower	Upper	Sample rate	Pre-Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration	
1-6	FIXED	30	6	0	60	20kHz	2MHz	5MSPS	120.000	5K	50	200	300	2msec	

Η πρώτη ρωγή εμφανίστηκε στα **3,72MPa** σύμφωνα με μακροσκοπική εξέταση των βίντεο από τις δύο όψεις του δοκιμίου, ενώ σύμφωνα με ένδειξη του strain gauge, εμφανίστηκε λίγο νωρίτερα στα **3,07MPa**.



Διάγραμμα 23

Στην παρακάτω εικόνα που προέρχεται από το βίντεο της πρόσοψης του δοκιμίου, φαίνεται η έναρξη της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής μέσω διαχωρισμού της κόλλας του τροπόμετρου. Η θέση επιβεβαιώνεται στη συνέχεια όπου γίνεται ξεκάθαρη η ρωγμή.

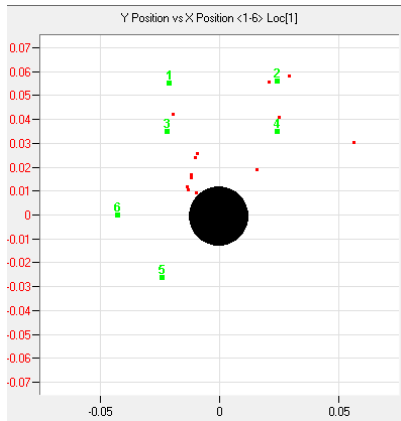


Εικόνα 52

Μακροσκοπικός εντοπισμός της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής (εικόνες από το βίντεο)

Ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου είναι ίδιος με αυτόν του 10<sup>0v</sup> δοκιμίου με διαφορά ότι οι διατμητικές ρωγμές ήταν σχεδόν οριζόντιες σε αντίθεση με το 10<sup>0</sup> δοκίμιο που είχαν μια κλίση της τάξης των 45° προς τα πάνω και 50° προς τα κάτω. Επίσης, οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές ήταν πιο ξεκάθαρες γι' αυτό και η τάση δημιουργίας τους που προκύπτει μακροσκοπικά (από τα βίντεο) και από το strain gauge είναι σχετικά κοντινή.

Όσον αφορά τον εντοπισμό θέσης της πηγής, το πρόγραμμα AEWin εντόπισε 60 γεγονότα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

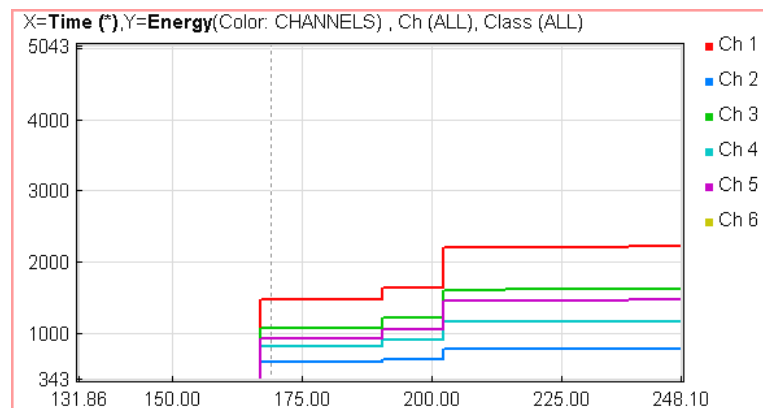
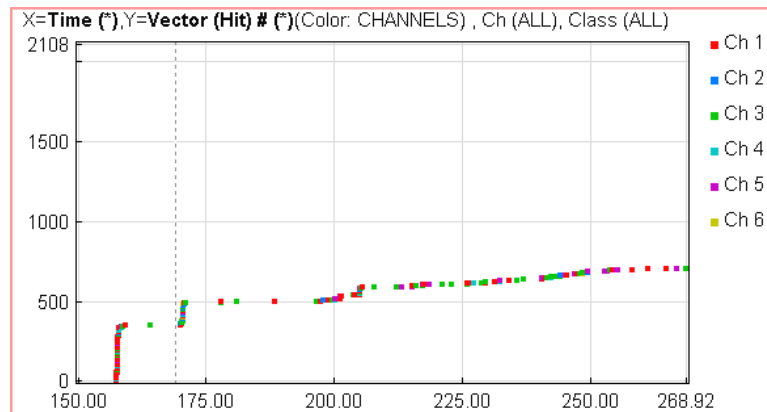


**Εικόνα 53**

Σύγκριση αποτελεσμάτων AEWinfor SAMOS με την πραγματική εικόνα του δοκιμίου μετά τη θραύση

Συγκρίνοντας το διάγραμμα με την εικόνα του δοκιμίου μετά την αστοχία, τα γεγονότα αριστεράστην οπή μάλλον προέρχονται από την αποφλοιώση που φαίνεται στην εικόνα. Τα γεγονότα δεξιά στην οπή μάλλον προέρχονται από τη δευτερογενή εφελκυστική ρωγμή που ξεχωρίζει στη εικόνα δεξιά από τους αισθητήρες 2 και 4.

Από το πρόγραμμα Noesis, προέκυψαν τα εξής διαγράμματα:



**Διαγράμματα 24**

Πάνω: Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, Κάτω: Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

Στο διάγραμμα κτύπων-χρόνου αλλά και ενέργειας-χρόνου, παρατηρείται ότι πριν την **έναρξη της φόρτισης** στα **169,07 sec** (timemark) υπάρχει απότομη αύξηση των σημάτων που οφείλεται στην επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες της μηχανής. Τα σήματα στην έναρξη της φόρτισης οφείλονται πάλι σε αποφλοίωση λόγω της ταινίας που χρησιμοποιήθηκε στον ένα αισθητήρα καθώς δεν γινόταν να στηριχτεί διαφορετικά χωρίς να εμποδίζει την μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου. Εδώ, σε αντίθεση με τα άλλα πειράματα, δεν υπάρχει κάποια άλλη απότομη αύξηση των σημάτων, ούτε καν στη θραύση. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε κακή επαφή των αισθητήρων με το δοκίμιο. Παρόλα αυτά, υπάρχει ένα μικρό σκαλοπάτι στα 204,5sec που αντιστοιχεί σε **1,83MPa**, φορτίο που δεν έχει σχέση με αυτό που κατέγραψε το strain gauge ή οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις.

## Δοκίμιο 12



**Εικόνα 54**  
Παρακολούθηση 12<sup>ης</sup> δοκιμής

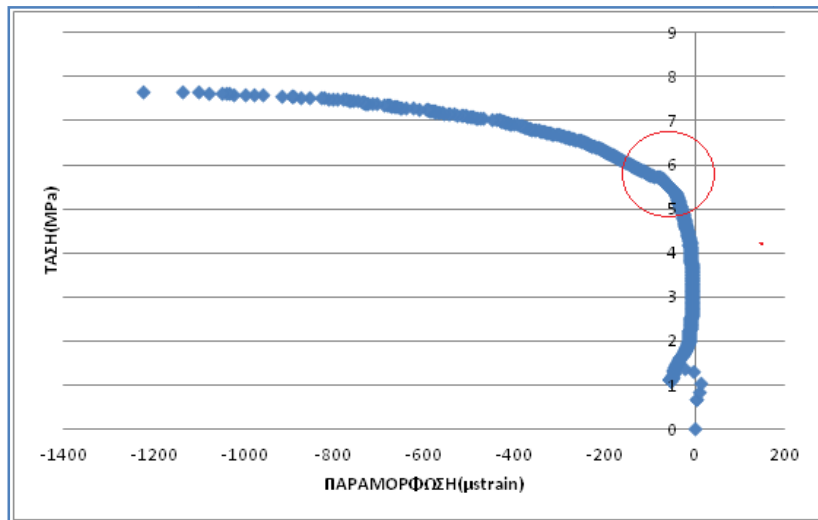
Το 12<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,7 cm** και οπή διαμέτρου **1,5 cm**. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι **MICRO 100S**, στηρίχτηκαν με **λάστιχο** και **ταινία**, ενώ το υλικό σύζευξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **gel υπερήχων**. Η διάταξη των αισθητήρων είναι η ίδια με το 10<sup>ο</sup> και 11<sup>ο</sup> δοκίμιο, με μικρές διαφορές στις συντεταγμένες. Οι θέσεις των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 17**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.018	0.054
2	0.024	0.054
3	-0.018	0.035
4	0.024	0.035
5	-0.020	-0.030
6	-0.030	0.000

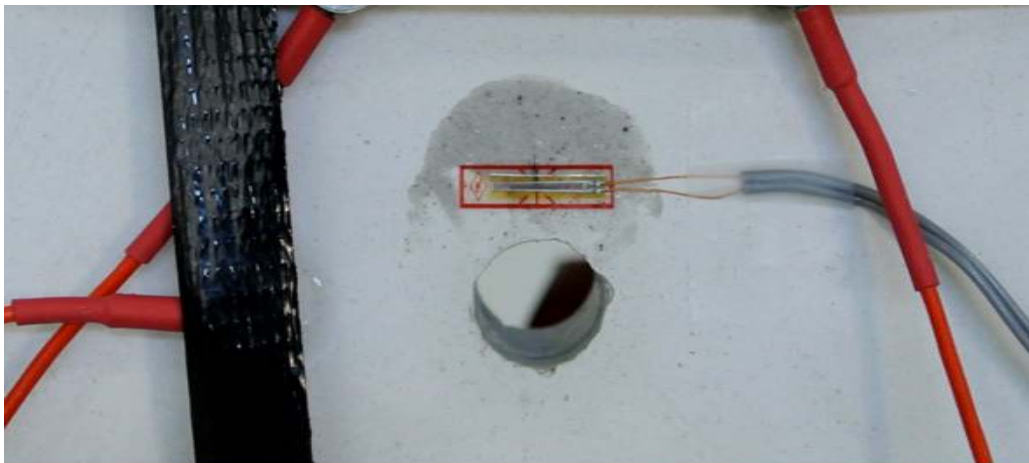
Το δοκίμιο φορτίστηκε με ρυθμό **200N/s** και αστόχησε στα **7,66MPa**. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ακουστικής εκπομπής, το threshold ορίστηκε fixed στα **30dB** με προενίσχυση **60dB** και οι ρυθμίσεις είναι ίδιες με αυτές της 11<sup>ης</sup> δοκιμής.

Η πρώτη ρωγή εμφανίστηκε στα **6,68MPa** σύμφωνα με μακροσκοπική παρατήρηση των βίντεο από τις δύο όψεις του δοκιμίου, ενώ σύμφωνα με ένδειξη του strain gauge στα **5,61MPa**.



*Διάγραμμα 25*

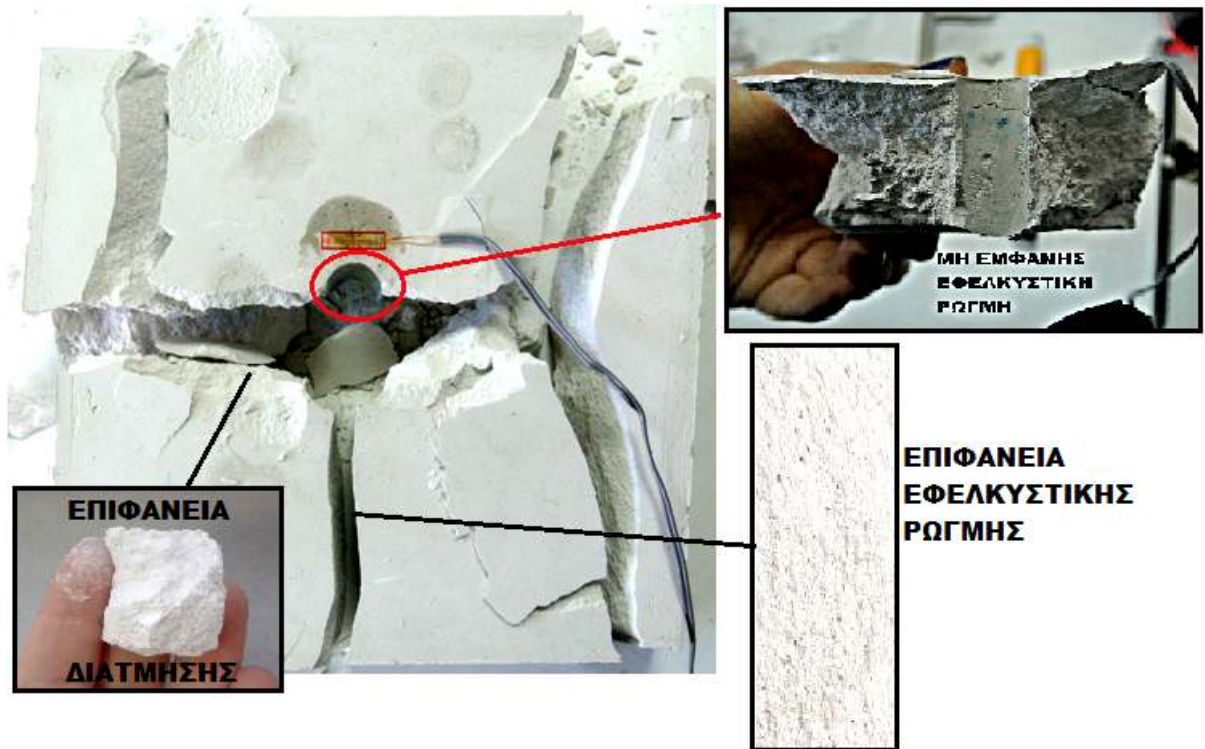
Ακολουθεί η εικόνα του δοκιμίου από το βίντεο της πρόσοψής του 2 δευτερόλεπτα πριν τη θραύση που παρατηρείται ότι δεν είναι εμφανής η πρωτογενής εφελκυστική ρωγή.



*Εικόνα 55*

*Εικόνα από το βίντεο της πρόσοψης*

Ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου, μοιάζει περισσότερο με αυτόν που περιγράφεται στη δοκιμή 1 και φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



*Εικόνα 56*  
*Αστοχία 12<sup>ο</sup> δοκιμίου*

Όπως παρατηρείται, η πάνω πρωτογενής εφέλκυστική ρωγή δεν είναι εμφανής οπτικά και πρέπει να πιεστεί το δοκίμιο για να σπάσει και να φανεί. Αριστερά, η διατμητική ρωγή είναι σχεδόν οριζόντια με κλίση  $10^\circ$  και διατμητική με κλίση ως προς το μέτωπο δημιουργήθηκε υπό γωνία  $35^\circ$ . Δεξιά, η διατμητική ρωγή έχει μια κλίση της τάξης των  $20^\circ$ , ενώ η διατμητική ως προς το μέτωπο έχει κλίση  $40^\circ$ . Η επιφανειακή διατμητική ρωγή που ξεκίνησε από την οπή (δεξιά του δοκιμίου), φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

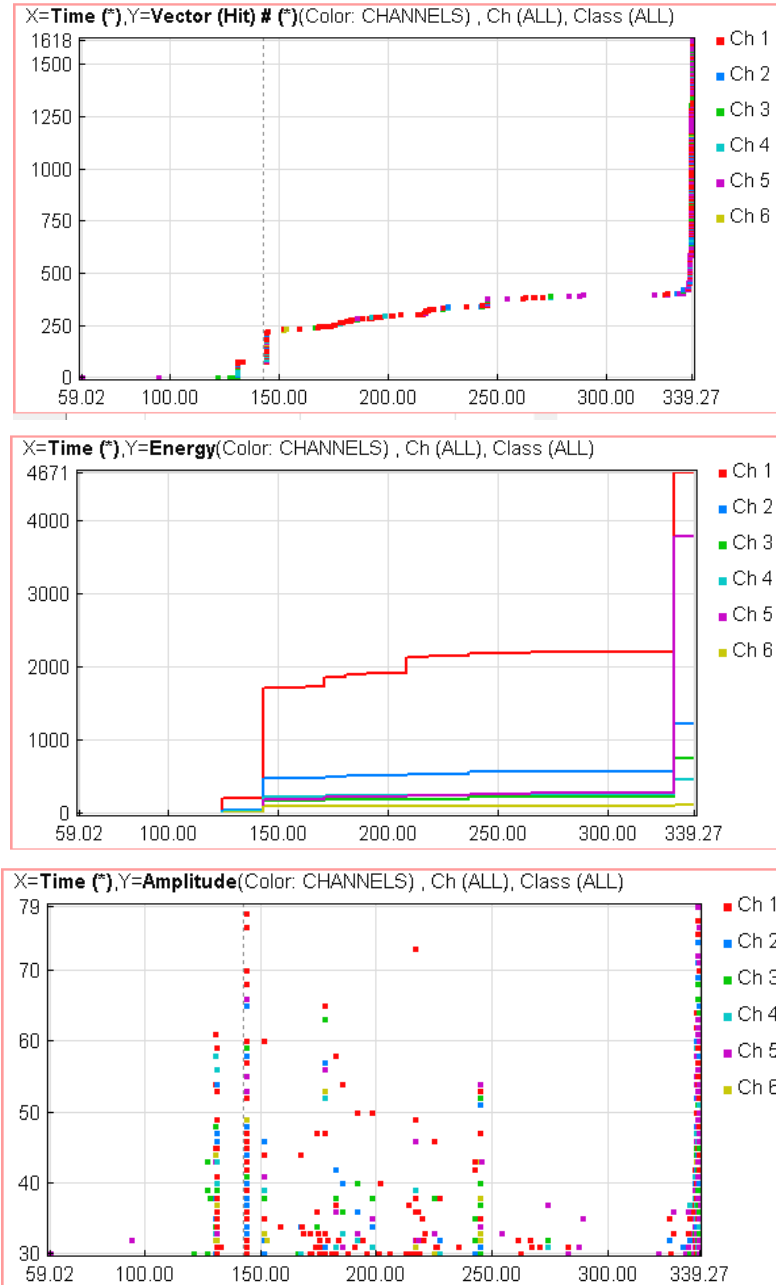


*Εικόνα 57*



Θέση έναρξης διατμητικής ρωγμής

Δεν εντοπίστηκαν οι θέσεις προέλευσης της ΑΕ από την επεξεργασία με το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης. Από την επεξεργασία με το πρόγραμμα Noesis προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:



Διαγράμματα 26

Από πάνω προς τα κάτω: Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, Ενέργειας-Χρόνου και Πλάτους-Χρόνου

Η ερμηνεία των διαγραμμάτων είναι ίδια με αυτή της 10<sup>ης</sup> δοκιμής με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει απότομη αύξηση των γεγονότων στην πρώτη ρωγμή. Υπάρχει ένα σκαλοπάτι στα 244,7sec που αντιστοιχεί σε **3,99MPa**, φορτίο πιθανό για τη δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής.

## 5.2.Πειράματα σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

Για τις δοκιμές σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με οπές, παρασκευάστηκαν 9 δοκίμια με τις εξής διαστάσεις:

Πίνακας 18

A/A	Μήκοςπλάτος (cm)	Πάχος (cm)	Διάμετρος οπής (cm)	Βάρος στις 14 μέρες (gr)
Grout0	15x15	3,85	0	1928,5
Grout1	15x15	3,6	1,5	1704,5
Grout2	15x15	3,7	1,9	1819,0
Grout3	15x15	3,8	1,9	1861,1
Grout4	15x15	3,85	2,5	1909,7
Grout5	15x15	3,7	4	1732,7
Grout6	15x15	3,85	4,8	1694,1
Grout7	15x15	7,6	3,8	3608,6
Grout8	15x15	7,45	3,7	3521,9

Το δοκίμιο 0 αντιστοιχεί στο “άρρηκτο” και θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση του με τα δοκίμια με οπές. Σε όλα τα δοκίμια η επιφάνεια χύτευσης ήταν αρκετά σκουρόχρωμη κι όχι λεία, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε η άλλη πλευρά για την τοποθέτηση των αισθητήρων, ενός strain gauge στην οριζόντια διεύθυνση πάνω ή κάτω από την οπή, καταγραφή της φόρτισης με βιντεοκάμερα και τοποθέτησης μοτίβου για τη δοκιμή συσχέτισης ψηφιακών εικόνων. Επίσης ο ρυθμός λήψης φωτογραφιών για την ψηφιακή συσχέτιση ήταν σταθερός σε όλες τις δοκιμές σε 1 εικόνα ανά 5 sec, άρα γνωρίζοντας το ρυθμό φόρτισης του δοκιμίου, συσχετίζεται κάθε μια υψηλής ανάλυσης εικόνα με τη στάθμη φόρτισης. Για παράδειγμα, αν ο ρυθμός φόρτισης είναι 400N/s, η κάθε φωτογραφία αντιστοιχεί σε αύξηση φορτίου  $5 \cdot 400 = 2\text{kN}$ . Φυσικά μπορεί να υπάρχει μια μικρή απόκλιση καθώς δε γίνεται να συγχρονιστεί η έναρξη της φόρτισης με τη λήψη φωτογραφίας. Η απόκλιση αυτή μπορεί να διορθωθεί με τη βοήθεια της βιντεοκάμερας από την οποία ακούγεται η ψηφιακή μηχανή αλλά και η έναρξη της φόρτισης. Σκοπός τοποθέτησης του τροπόμετρου είναι η καταγραφή της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής αλλά και της σύγκρισης της τροπής με αυτήν που εξάγεται από την ψηφιακή συσχέτιση εικόνων.

Κατά την καταγραφή της ακουστικής εκπομπής, έχουν τοποθετηθεί χρονοσημάνσεις ή αλλιώς **timemarks** στην έναρξη της ψηφιακής μηχανής, της βιντεοκάμερας και της φόρτισης για την εύκολη χρονική συσχέτιση των γεγονότων. Τα χαρακτηριστικά της ακουστικής εκπομπής είναι επιθυμητό να παραμείνουν σταθερά σε όλες τις δοκιμές για ευκολία αλλά και για σύγκριση. Η επιλογή των χαρακτηριστικών έγινε με βάση την εμπειρία από τις δοκιμές σε γύψο αλλά και τη βοήθεια πρισματικών δοκιμών διαστάσεων 15x7,5x4 cm τα οποία φορτίστηκαν με διάφορους συνδυασμούς κατωφλίου, τύπου κατωφλίου (σταθερό ή κυμαινόμενο),

προενίσχυσης αλλά και με τα δύο είδη αισθητήρων (MICRO100S και R15). Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι ο τύπος του κατωφλιού, δεν επηρέαζε τα αποτελέσματα αλλά και ότι κάτω από threshold=45dB καταγραφόταν πολλά σήματα (π.χ.120.000 σήματα) κυρίως από τους R15 τα οποία είναι μη διαχειρίσιμα. Έτσι, έγινε η επιλογή των MICRO 100S, της προενίσχυσης στα 40dB, του threshold=45db και του τύπου του threshold σε σταθερό εκτός μερικών δοκιμών που θα μεταβληθεί σε κυμαινόμενο. Οι χρονικές παράμετροι θα παραμείνουν σταθερές σε όλες τις δοκιμές όπως προτείνονται από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος ακουστικής εκπομπής:

*Πίνακας 19*

PDT	HDT	HLT
50	200	300

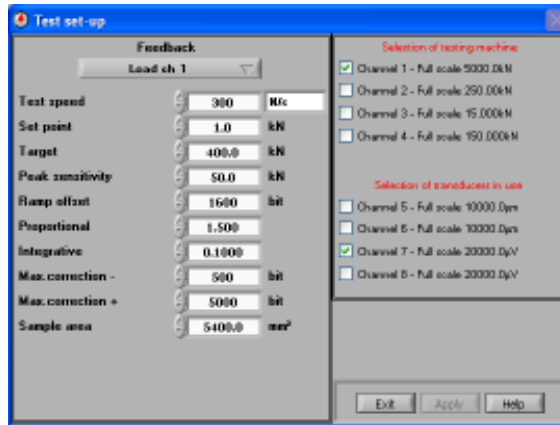
Η **στήριξη των αισθητήρων θα γίνει με λάστιχα** καθώς η ταινία αποδείχτηκε ότι προκαλεί αποφλοιώσεις οι οποίες δημιουργούν ανεπιθύμητα σήματα ακουστικής εκπομπής. Παρόλα αυτά θα δοκιμαστεί και η στήριξή τους μόνο με ταινία σε κάποιο πείραμα αφού πρόκειται για διαφορετικό υλικό. Σαν υλικό σύζευξης θα χρησιμοποιηθεί το **gel υπερήχων** το οποίο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα εξασθένισης του σήματος.

### Δοκίμιο grout1

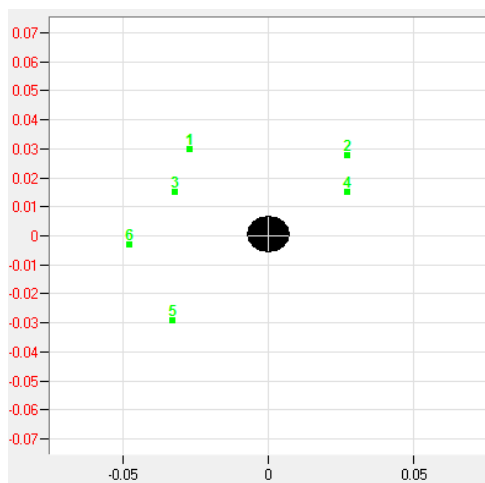
Το πρώτο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,6 cm** και οπή διαμέτρου **1,5 cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με λάστιχα και ο ένας με ταινία για να προσδιοριστεί αν προκαλεί αποφλοιώση στο δοκίμιο όπως έγινε στη γύψο. Πάνω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ, τα χαρακτηριστικά φόρτισης και ο κánaβος τοποθέτησης των αισθητήρων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:

*Πίνακας 20: Ρυθμίσεις ΑΕ*

κανάλι	Threshold			Gain db	Pre Amp db	Analog Filter		Waveform setup			Timing Parameters			
	type	db	FT Band			Lower	Upper	Sample rate	Pre- Trigger	Length	PDT	HDT	HLT	Duration
1-6	FIXED	45	6	0	40	20kHz	2MHz	5MSPS	120.000	5K	50	200	300	1msec



**Εικόνα 58**  
Χαρακτηριστικά φόρτισης



**Πίνακας 23**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.027	0.030
2	0.027	0.028
3	-0.032	0.015
4	0.027	0.015
5	-0.033	-0.029
6	-0.048	-0.003

*Κάναβος τοποθέτησης αισθητήρων*

Το δοκίμιο αστόχησε στα 216,018kN που αντιστοιχεί σε τάση **40MPa** όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι δεν φαίνεται μακροσκοπικά η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή σε καμία πλευρά του δοκιμίου. Ξεκάθαρα έχουν διαχωριστεί οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές ενώ από την οπή φαίνονται να ξεκινάνε δύο διατμητικές, μια προς τα πάνω και μια προς τα κάτω. Κάτω από την οπή φαίνεται ένα ίχνος ρωγμής το οποίο όμως αντιστοιχεί σε επιφανειακή αποφλοιώση. Στην πίσω όψη του δοκιμίου παρατηρείται μια ρωγμή στο αριστερό άνω μέρος της οπής που μοιάζει με την πρωτογενής εφελκυστική. Το υλικό στο σημείο αυτό έχει εσωτερικά μια ατέλεια η οποία μπορεί να συνέβαλε στην έναρξη της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής από εκείνο το σημείο.



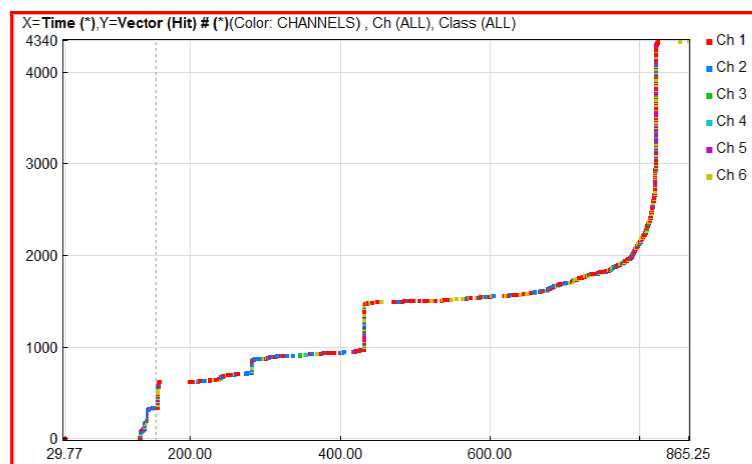
Πρόσοψη

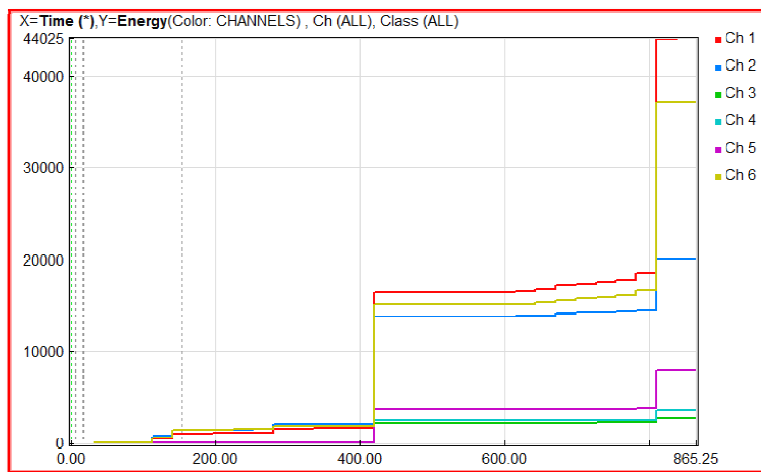
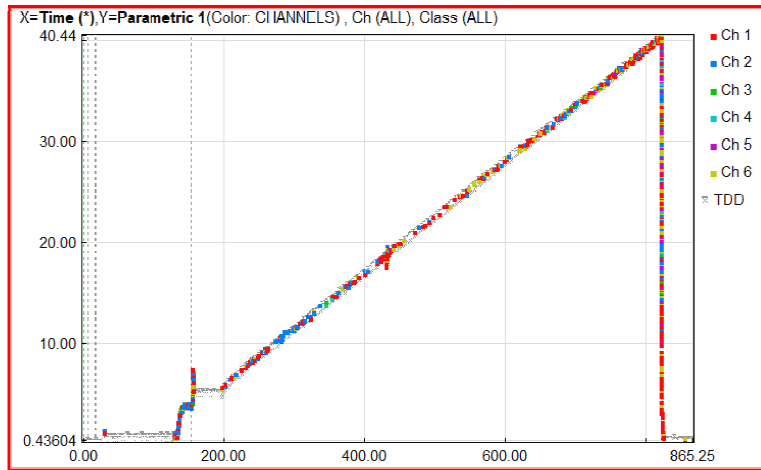


Πίσω όψη

**Εικόνα 59**  
Αστοχία δοκιμίου grout1

Από το πρόγραμμα Noesis προέκυψαν τα εξής διαγράμματα:





**Διαγράμματα 27**

Από πάνω προς τα κάτω: Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, Τάσης-Χρόνου και Ενέργειας-Χρόνου

Στα παραπάνω διαγράμματα υπάρχουν τα εξής timemarks:

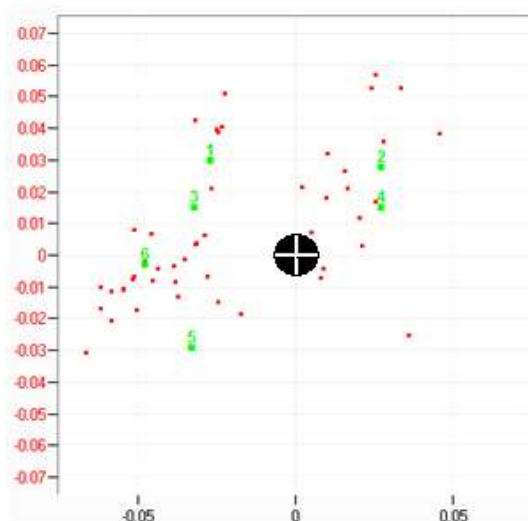
**Πίνακας 21**

Timemark	Χρόνος (sec)	Έναρξη
1	6,43	Ψηφιακής μηχανής
2	16,4	Βιντεοκάμερας
3	17,96	Άκυρο
4	154,32	Φόρτισης

Στο διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, τα σήματα που υπάρχουν πριν την έναρξη της φόρτισης αντιστοιχούν στο πάτημα της μηχανής πάνω στο δοκίμιο. Στη συνέχεια σε χρόνο 200 sec αρχίζουν να λαμβάνονται σήματα τα οποία κάνουν 2 απότομες αυξήσεις σε χρόνους 281 sec και 430,80 sec. Οι κτύποι στη συνέχεια ακολουθούν ένα

σχεδόν σταθερό κλάδο και σε χρόνο περίπου 790 sec αρχίζουν να αυξάνονται απότομα ως την αστοχία. Στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου φαίνεται το ίδιο ακριβώς πράγμα, με την ενέργεια να αυξάνεται πιο απότομα στα 430,80 sec. Στη συνέχεια υπάρχει ένας σταθερός κλάδος και στα 614,60 sec η ενέργεια αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά με σκαλοπάτια έως τα 809,55 sec όπου αυξάνεται απότομα και αστοχεί το δοκίμιο.

Από την μακροσκοπική παρατήρηση, ούτε οπτικά, ούτε με το βίντεο δεν ήταν δυνατό να εντοπιστεί η πρώτη ρωγμή. Από το τροπόμετρο πάνω από την οπή, επίσης δεν προέκυψε κάποιο συμπέρασμα. Έτσι θεωρείται ότι η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή δημιουργήθηκε στα 281 sec δηλαδή σε τάση **10,01MPa**, πολύ υψηλή και ίσως μη ρεαλιστική καθώς είναι διπλάσια από την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης, δεν εντοπίστηκαν γεγονότα ΑΕ στην πιθανή διαδρομή ανάπτυξης της εφελκυστικής ρωγμής, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί.

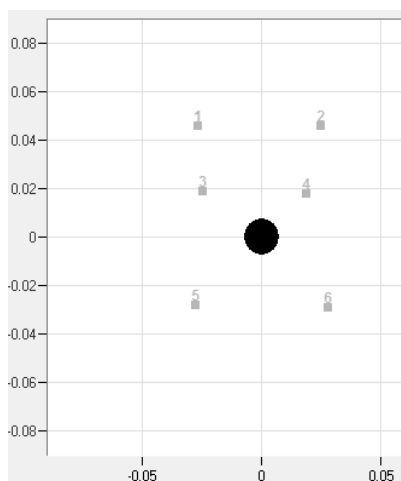


**Εικόνα 60**

*Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης τηςπηγής ΑΕ για το δοκίμιο GROUT1*

## **Δοκίμιο grout2**

Το δεύτερο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,7 cm** και οπή διαμέτρου **1,9 cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν μόνο με λάστιχα καθώς η ταινία προκαλεί αποφλοιώσεις. Κάτω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή grout 1 ενώ ο κάναβος τοποθέτησης των αισθητήρων φαίνεται στον επόμενο πίνακα:



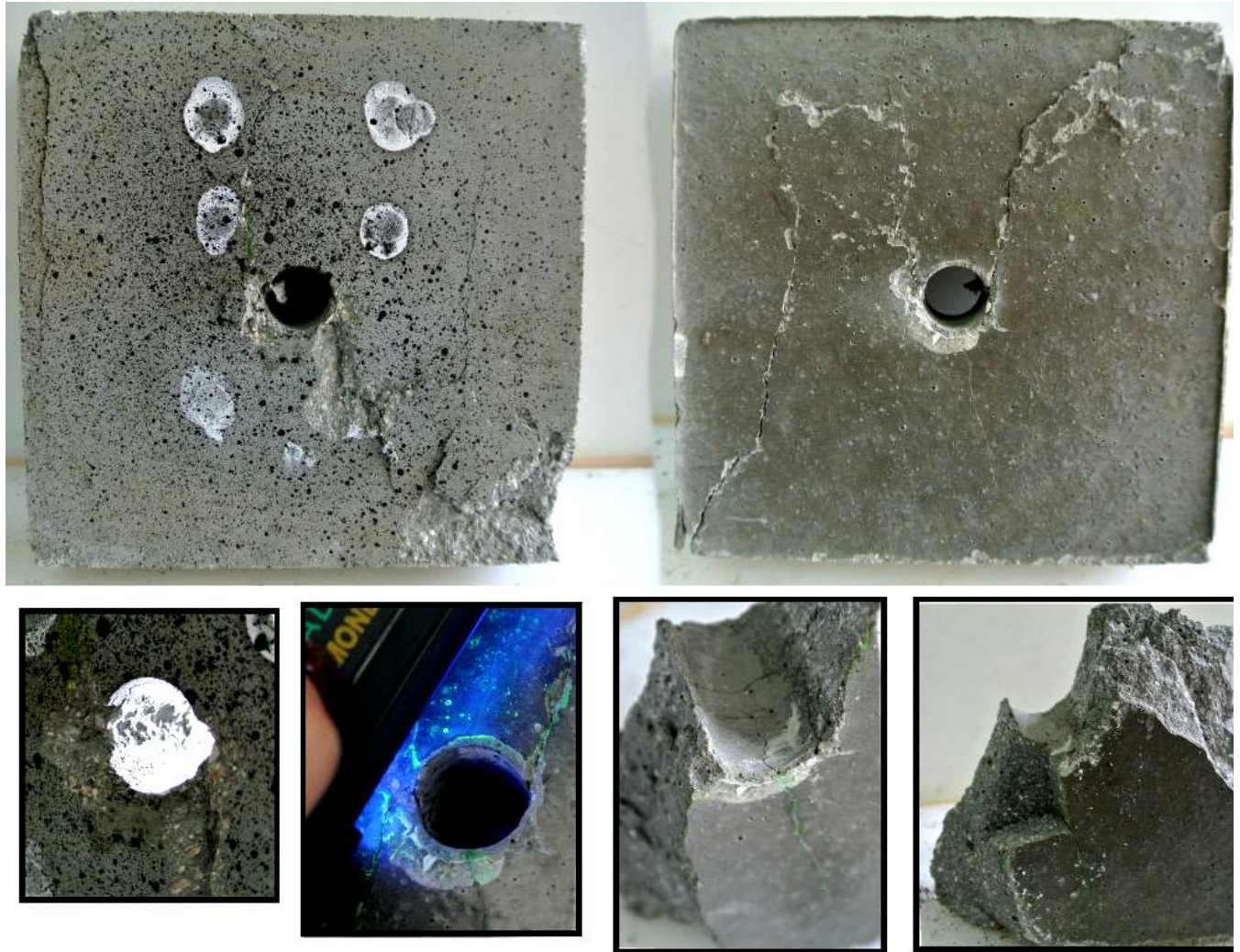
Πίνακας 22

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.027	0.046
2	0.025	0.046
3	-0.025	0.019
4	0.019	0.018
5	-0.028	-0.028
6	0.028	-0.009

Είναι προφανές ότι η τοποθέτηση των αισθητήρων εκατέρωθεν της οπής δεν μπορεί να είναι απόλυτα συμμετρική όπως θα ήταν επιθυμητό γιατί εξαρτάται από τα λάστιχα και την απόσταση που πρέπει να έχουν οι αισθητήρες για να διατηρούν καλή επαφή με το δοκίμιο.

Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο 271,22KN που αντιστοιχεί σε τάση **48,86MPa**, όπως φαίνεται στις εικόνες και τις λεπτομέρειες που ακολουθούν. Στην **πρόσοψη** φαίνονται δύο αποφλοιώσεις οι οποίες κρύβουν πίσω τους τη διατμητική θραύση. Μέσα στην οπή φαίνεται το σημείο έναρξης των διατμητικών ρωγμών από αποφλοιώσεις, όπως δείχνει η **πρώτη λεπτομέρεια**. Μετά την αφαίρεση του strain gauge που είχε τοποθετηθεί κάτω από την οπή, εμφανίστηκε η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή. Στο πάνω μέρος της οπής η ρωγμή δεν ήταν εμφανής και χρειάστηκε η **βοήθεια λάμπας υπερύθρων χαμηλής έντασης και χρωματισμός μεμαρκαδόρο υπογράμμισης** ώστε να προκύψει η **εικόνα της δεύτερης λεπτομέρειας**. Στην **πίσω όψη** του δοκιμίου, φαίνονται δύο ρωγμές που ξεκινάνε από την οπή και κατευθύνονται προς τα πάνω, ενώ η αριστερή κατευθύνεται και προς τα κάτω. Οι ρωγμές αυτές προέρχονται από διάτμηση με πολύ μεγάλη κλίση. Στην αριστερή πλευρά φαίνεται και η δευτερογενής εφελκυστική ρωγμή ενώ στην δεξιά όχι. Το δοκίμιο όπως παρατηρείται δεν έχει διαχωριστεί, γι αυτό χτυπήθηκε ελαφρά μέχρι το διαχωρισμό του για την καλύτερη εξέτασή του. Έτσι λοιπόν στην **3<sup>η</sup> λεπτομέρεια** παρατηρείται ότι έσπασε στο σημείο της διατμητικής ρωγμής κι όχι στην εφελκυστική ρωγμή όπως γινόταν με τη γύψο. Είναι όμως ξεκάθαρο ότι η εφελκυστική ρωγμή υπάρχει, γι αυτό και με πίεση στο σημείο αυτό, προέκυψε η εικόνα της **4<sup>ης</sup> λεπτομέρειας** όπου η **εφελκυστική ρωγμή δεν επεκτείνεται ως τα άκρα του δοκιμίου, αλλά σε απόσταση περίπου ίση με 1 διάμετρο οπής**. Εκτός από τις παραπάνω ρωγμές υπάρχουν και εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες στο μέτωπο του δοκιμίου.





1<sup>η</sup> λεπτομέρεια

αποφλοίωση

2<sup>η</sup> λεπτομέρεια

Πρωτογενής  
εφελκυστική ρωγμή άνω και  
κάτω

3<sup>η</sup> λεπτομέρεια

Πρωτογενής  
εφελκυστική ρωγμή κάτω

4<sup>η</sup> λεπτομέρεια

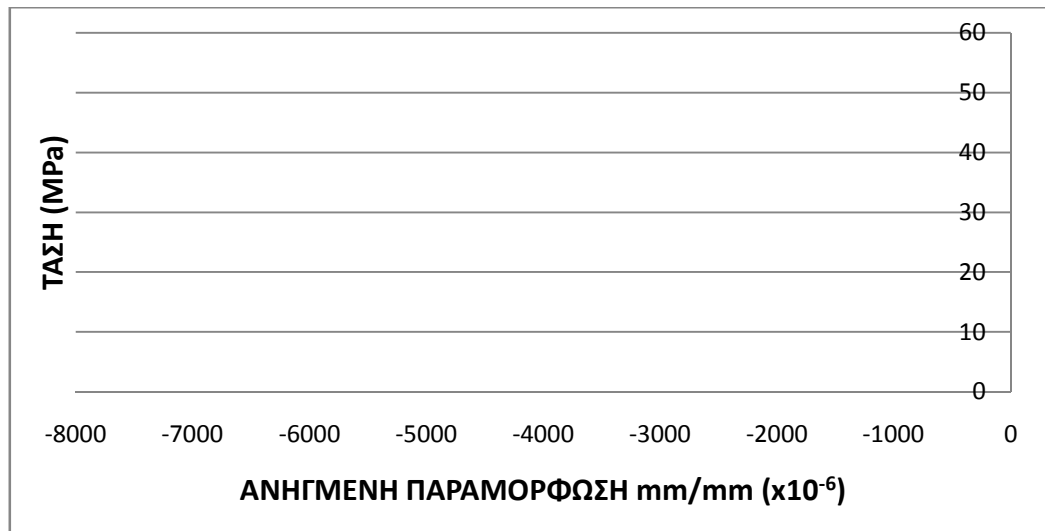
Πρωτογενής εφελκυστική που  
δεν επεκτείνεται

**Εικόνα 61**

Πρόσωση και πίσω όψη του δοκιμίου 2 μετά τη θραύση και λεπτομέρειες

Όσον αφορά την **μακροσκοπική παρατήρηση** του δοκιμίου, κατά τη διάρκεια φόρτισης ακούστηκε ένας έντονος θόρυβος στα 200kN(36,06MPa) ενώ οπτικά δεν φάνηκε τίποτα. Με την παρατήρηση της βιντεοκάμερας, φαίνεται ένα ίχνος στα 14 λεπτά καταγραφής κάτω από το strain gauge το οποίο χρονικά αντιστοιχεί σε 183 sec φόρτισης και σε τάση **14,21MPa**.

Κατά την **ενόργανη παρατήρηση**, το διάγραμμα που ακολουθεί προέκυψε από τα δεδομένα του τροπόμετρου. Σύμφωνα με αυτό στα **9MPa** υπάρχει μια ασυνέχεια του διαγράμματος που πιθανόν οφείλεται στη δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Το φορτίο είναι κοντά σε αυτό της μακροσκοπικής παρατήρησης το οποίο είναι λογικό να είναι μεγαλύτερο γιατί στην παρατήρηση παρεμβαίνει το τροπόμετρο (αφού η ρωγμή εμφανίστηκε κάτω από αυτό).

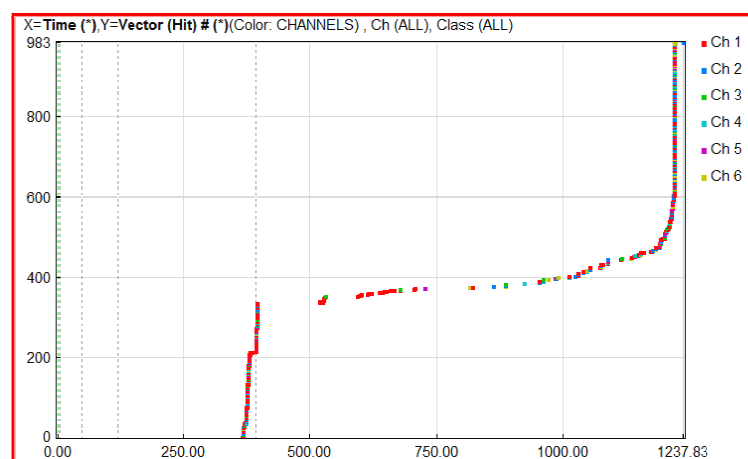


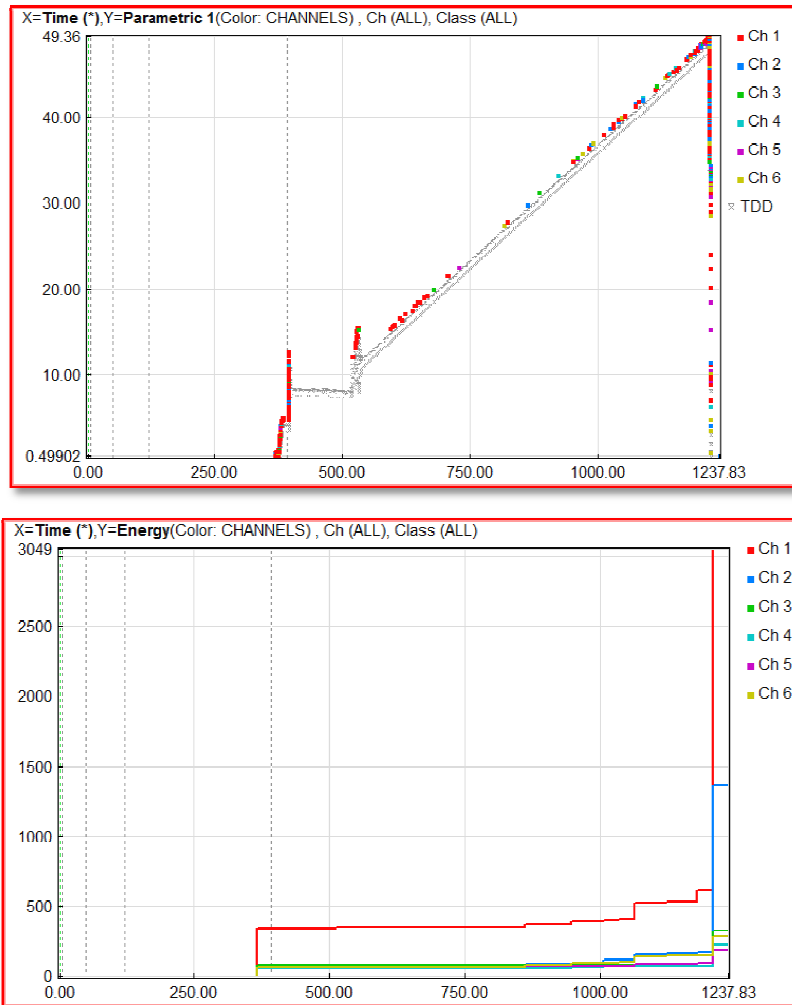
**Διάγραμμα 28**  
*Διάγραμμα δεδομένων του τροπόμετρου*

Από το πρόγραμμα Noesis προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα στα οποία υπάρχουν τα εξής timemarks:

**Πίνακας 23**

Timemark	Χρόνος (sec)	Έναρξη
1	4,56	Βιντεοκάμερας
2	48,68	Άκυρο
3	119,31	Ψηφιακής μηχανής
4	393,19	Φόρτισης





### Διαγράμματα 29

Από πάνω προς τα κάτω: Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, Τάσης-Χρόνου και Ενέργειας-Χρόνου

Στο διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, πριν την έναρξη της φόρτισης παρατηρούνται κάποια σήματα τα οποία οφείλονται στο πάτημα της μηχανής πάνω στο δοκίμιο. Στη συνέχεια τα σήματα αυξάνονται σταδιακά με χαμηλό ρυθμό μέχρι την αστοχία. Εδώ δεν υπάρχει καμία απότομη αύξηση των σημάτων όπως στο προηγούμενο δοκίμιο αλλά δύο μικρότερες στα 525sec και 600sec δηλαδή στα 11,5MPa και 15MPa αντίστοιχα. Στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου παρατηρείται ένα μικρό σκαλοπάτι στα 525sec ενώ στα 600sec δεν φαίνεται τίποτα. Η ενέργεια μένει σταθερή μέχρι τα 860,4sec που αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά ως την αστοχία.

Από την επεξεργασία με το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης δεν προέκυψε κανένα ακριβές αποτέλεσμα όσον αφορά τον εντοπισμό της θέσης της πηγής των σημάτων.

### Δοκίμιο grout3

Το τρίτο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,8 cm** και οπή διαμέτρου **1,9 cm** οποία είναι έκκεντρη κατά 0,5cm κατά x και κατά y. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν μόνο με λάστιχα καθώς η ταινία προκαλεί αποφλοιώσεις. Πάνω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή grout1 εκτός από το ρυθμό φόρτισης ο οποίος αυξήθηκε σε **400N/s** και το κατώφλι ρυθμίστηκε σε κυμαινόμενο (**floating threshold**). Ο κánaβος τοποθέτησης των αισθητήρων είναι ίδιος με αυτόν της δοκιμής grout 2 με μικρές αποκλίσεις στις συντεταγμένες.

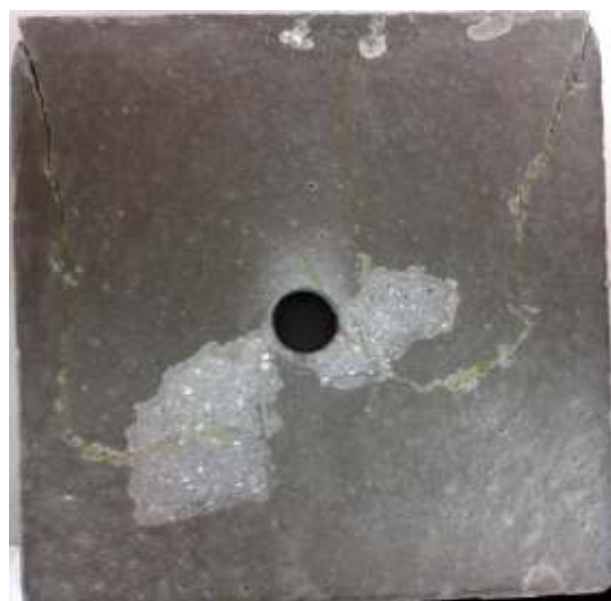
*Πίνακας 24*

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.031	0.055
2	0.033	0.055
3	-0.025	0.025
4	0.030	0.025
5	-0.027	-0.020
6	0.026	-0.020

Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο **277,812kN** δηλαδή σε τάση **48,74MPa**. Η εικόνα του δοκιμίου μετά την αστοχία δεν διαφέρει από τις προηγούμενες δοκιμές. Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή δεν είναι πάλι εμφανής σε καμία πλευρά του δοκιμίου, ενώ από την οπή ξεκινάνε διστιμητικές ρωγμές οι οποίες ενώνονται ξεκάθαρα, όπως φαίνεται στην πίσω όψη του δοκιμίου, με τις δευτερογενείς εφελκυστικές. Εκτός από τις παραπάνω ρωγμές υπάρχουν και εφελκυστικές ρωγμές παράλληλες στο μέτωπο του δοκιμίου



*Πρόσοψη*



*Πίσω όψη*

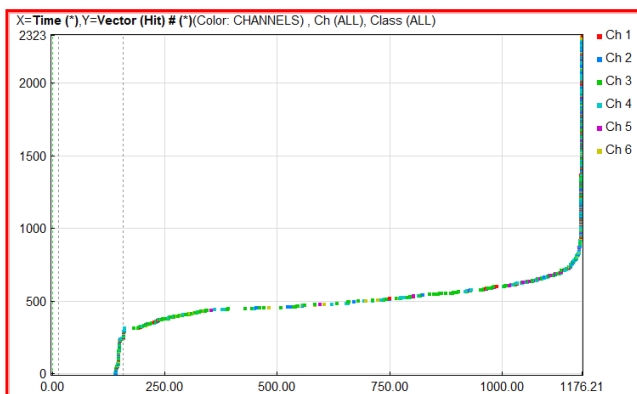
**Εικόνα 62**  
*Μορφή δοκιμίου μετά την αστοχία*

Όσον αφορά τη μακροσκοπική παρατήρηση, ούτε με την βιντεοκάμερα ούτε με το μάτι δεν φαίνεται η έναρξη της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής.

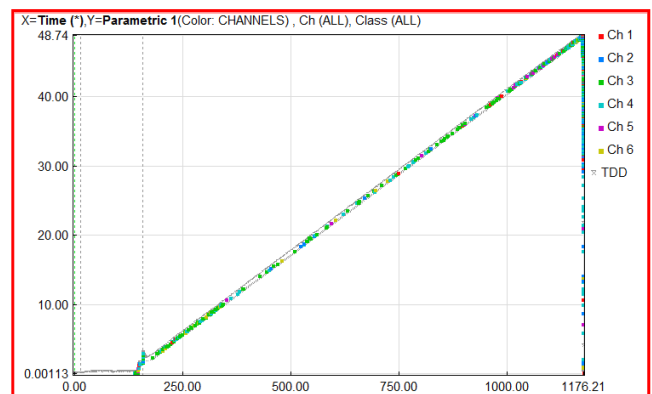
Κατά την ενόργανη παρατήρηση, το straingauge δεν δείχνει καμία απότομη αλλαγή πριν τα 37,7MPa. Όμως η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης του τροπόμετρου γίνεται στα **7,15MPa**. Τα διαγράμματα που προέκυψαν από το Noesis φαίνονται παρακάτω μαζί με το χρόνο του κάθε timemark:

*Πίνακας 25*

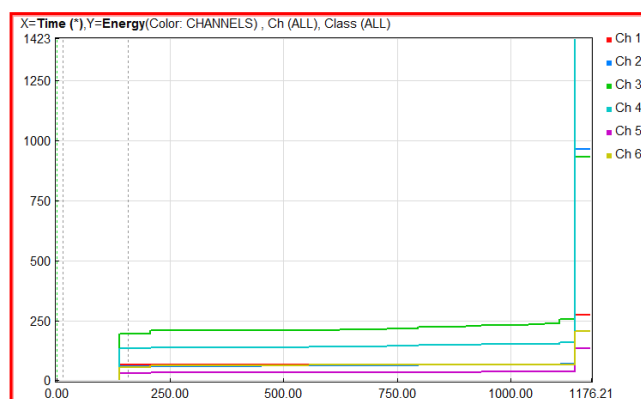
Timemark	Χρόνος (sec)	Έναρξη
1	0	Βιντεοκάμερας
2	14,65	Ψηφιακής μηχανής
3	157,39	Φόρτισης



*Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου*



*Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου*



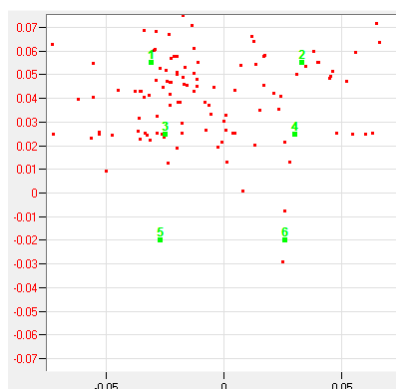
*Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου*

*Διαγράμματα 30*

Τα διαγράμματα μοιάζουν αρκετά με αυτά της 2<sup>ης</sup> δοκιμής. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία απότομη αύξηση των σημάτων. Στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

φαίνεται ένα σκαλοπάτι κοντά στην έναρξη της φόρτισης στα 207,39sec που αντιστοιχεί σε τάση **3,75MPa**, που ενδέχεται να σχετίζεται με την έναρξη της εφελκυστικής ρωγμής, στη συνέχεια είναι σχεδόν σταθερή, ενώ μετά τα 750sec αυξάνεται σταδιακά με σκαλοπάτια έως την αστοχία.

Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης, εντοπίστηκαν 177 γεγονότα όπως φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί, τα οποία όμως δεν καθορίζουν το σημείο έναρξης της ρωγμάτωσης γιατί είναι διάσπαρτα.



**Εικόνα 63**  
Αποτελέσματα AEWinforSAMOS για το δοκίμιο GROUT3

#### Δοκίμιο grout4

Το τέταρτο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,85cm** και οπή διαμέτρου **2,5cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν μόνο με λάστιχα καθώς η ταινία προκαλεί αποφλοιώσεις. Πάνω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή GROUT3. Οκάναβος τοποθέτησης των αισθητήρων είναι ίδιος με αυτόν της δοκιμής grout2 με μικρές αποκλίσεις στις συντεταγμένες.

**Πίνακας 26**

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.027	0.060
2	0.025	0.058
3	-0.025	0.032
4	0.025	0.031
5	-0.028	-0.017
6	0.028	-0.017

Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο **294,293kN** δηλαδή σε τάση **50,96MPa**. Η εικόνα του δεν διαφέρει από αυτές των προηγούμενων δοκιμών όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



**Εικόνα 64**

*Πρόσψη δοκιμίου grout4, 1.Πρωτογενής εφελκυστική ρωγή ελάχιστα εμφανής που δεν εκτείνεται ως το άκρο του δοκιμίου, 2. Δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές, 3. Ρωγμές διάτμησης*



**Εικόνα 65**

*Πίσω όψη του δοκιμίου όπου δεν φαίνεται σχεδόν καμία ρωγή. Στα δεξιά ξεχωρίζει λίγο η ρωγή διάτμησης αλλά οι εφελκυστικές ρωγμές δεν είναι εμφανείς*

Από την μακροσκοπική παρατήρηση δεν φάνηκαν οι εφελκυστικές ρωγμές. Το μόνο που ήταν εμφανές ήταν η δημιουργία της διατμητικής ρωγμής εσωτερικά στην

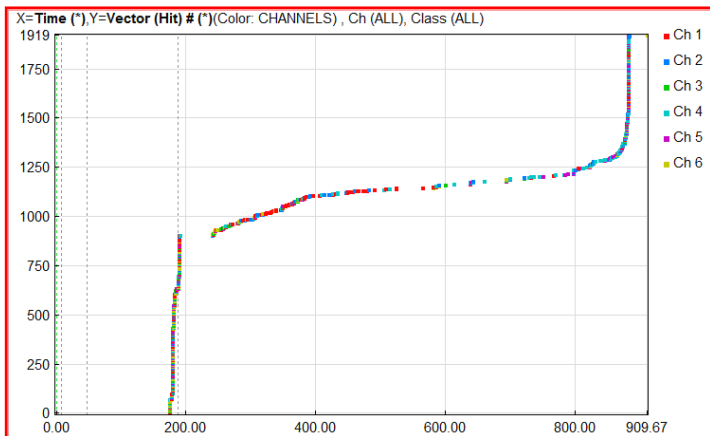
οπή, 1,5 λεπτό πριν τη θραύση, δηλαδή στο 77% του φορτίου αστοχίας (διάρκεια δοκιμής 11,5 λεπτά).

Από την ενόργανη παρατήρηση, το τροπόμετροεμφάνισε μια περίεργη καμπύλη στην οποία δεν φαίνεται κάποια έντονη ασυνέχεια που μπορεί να προέρχεται από τη δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Το μόνο που φαίνεται είναι κάπου στα **10MPa** μια μικρή ασυνέχεια στο διάγραμμα. Ανάλυση του διαγράμματος γίνεται σε επόμενη παράγραφο (5.3.2.) μαζί με την ψηφιακή συσχέτιση εικόνων.

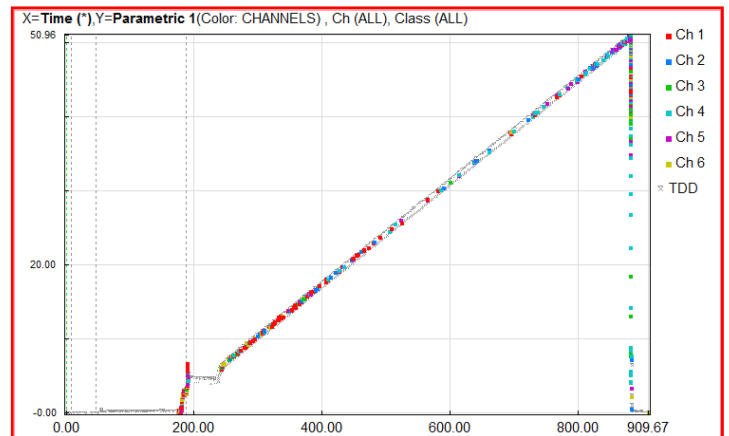
Παραμένοντας στη διερεύνηση της ενόργανης παρατήρησης, ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Noesis καθώς και ο πίνακας της χρονοσήμανσης (timemark).

**Πίνακας 27**

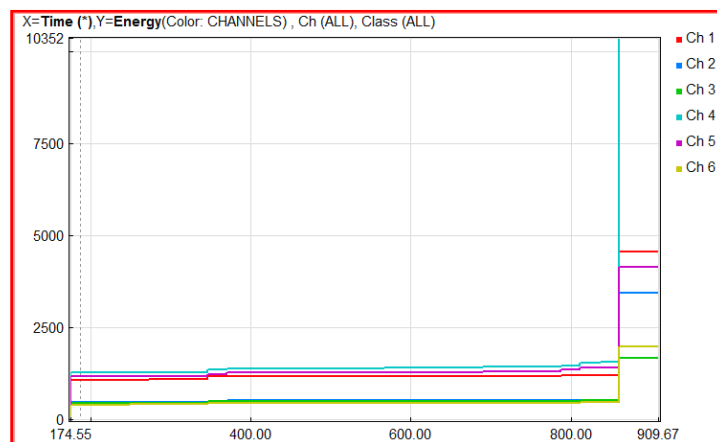
Timemark	Χρόνος (sec)	Έναρξη
1	8,35	Βιντεοκάμερας
2	46,76	Ψηφιακής μηχανής
3	187,32	Φόρτισης



*Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου*



*Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου*

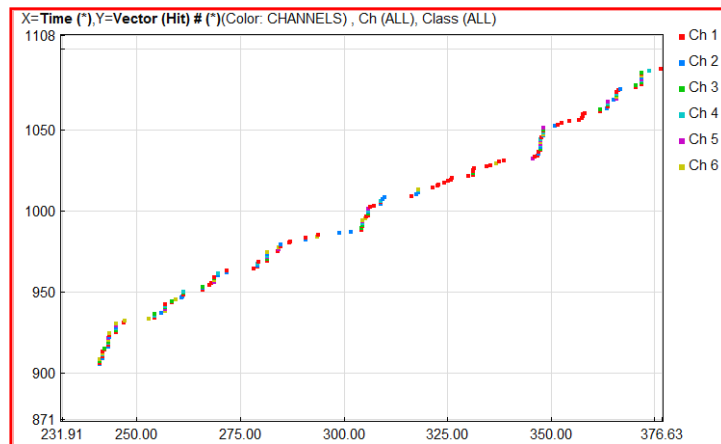


*Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου*

**Διαγράμματα 31**



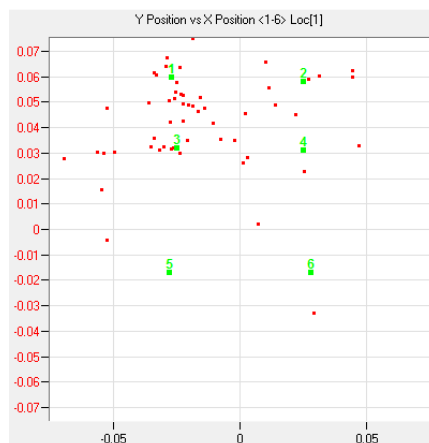
Η ερμηνεία των διαγραμμάτων δεν διαφέρει από αυτή των προηγούμενων δοκιμών. Τα σήματα πριν την έναρξη της φόρτισης αντιστοιχούν στο πάτημα των πλακών της μηχανής πάνω στο δοκίμιο και η απότομη αύξηση στο τέλος αντιστοιχεί στην αστοχία του δοκιμίου. Δεν υπάρχει καμία απότομη αύξηση των σημάτων ΑΕ που να μαρτυρά την έναρξη της εφελκυστικής ρωγμής, αντίθετα υπάρχουν αρκετά μικρά σκαλοπάτια που δεν είναι τόσο ξεκάθαρα στο διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, γι' αυτό με μεγέθυνση του διαγράμματος παίρνουμε το παρακάτω σχήμα:



**Διάγραμμα32**  
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου σε μεγέθυνση

Η πιο απότομη αύξηση των σημάτων, είναι στα 305 sec, φορτίο που ταιριάζει με την ασυνέχεια στο straingauge. Στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου, παρατηρείται ότι στα 305sec υπάρχει και η πιο απότομη αύξηση της ενέργειας.

Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης προέκυψε το διάγραμμα που ακολουθεί το οποίο είναι ίδιο με αυτό της δοκιμής grout3 με τα διάσπαρτα σήματα



**Εικόνα 66**  
Αποτελέσματα AEWinforSAMOS για το δοκίμιο Grout4

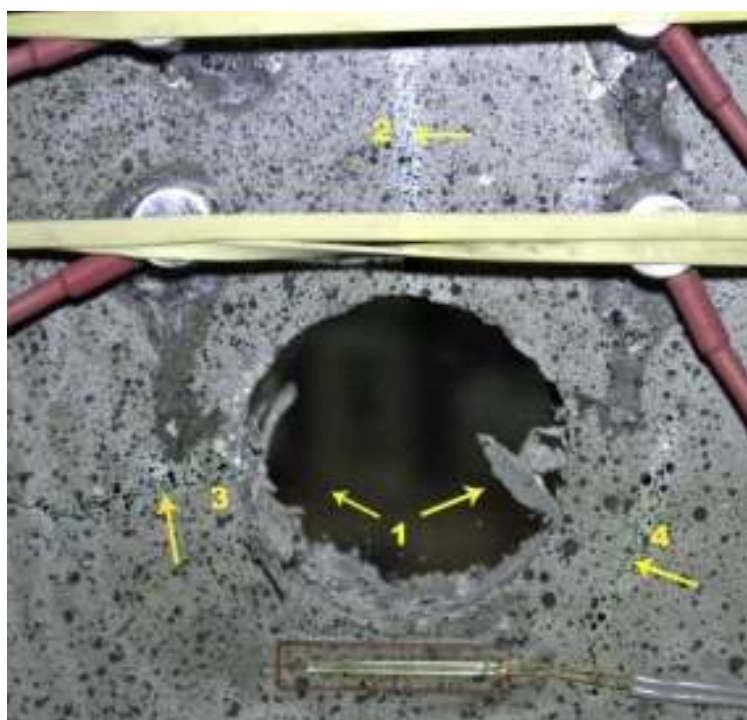
## Δοκίμιο grout5

Το πέμπτο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,7cm** και οπή διαμέτρου **4cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν μόνο με λάστιχα. Πάνω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή Grout1 με μόνη διαφορά ότι ο ρυθμός φόρτισης αυξήθηκε στα **500N/s**. Οκάναβος τοποθέτησης των αισθητήρων είναι ίδιος με αυτόν των προηγούμενων δοκιμών με μικρές αποκλίσεις στις συντεταγμένες.

*Πίνακας 28*

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.032	0.050
2	0.026	0.053
3	-0.029	0.027
4	0.024	0.027
5	-0.020	-0.043
6	0.012	-0.042

Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο **232,63kN** δηλαδή σε τάση **41,92MPa**. Η εικόνα του δεν διαφέρει από αυτές των προηγούμενων δοκιμών. Επίσης, επειδή τα δοκίμια δεν διαχωρίζονται για να φανούν οι ρωγμές τους, το συγκεκριμένο φορτίστηκε περαιτέρω μετά την αστοχία του. Αποτέλεσμα ήταν να διαλυθεί το δοκίμιο. Η εικόνα που ακολουθεί είναι από το δοκίμιο κατά την αστοχία του.



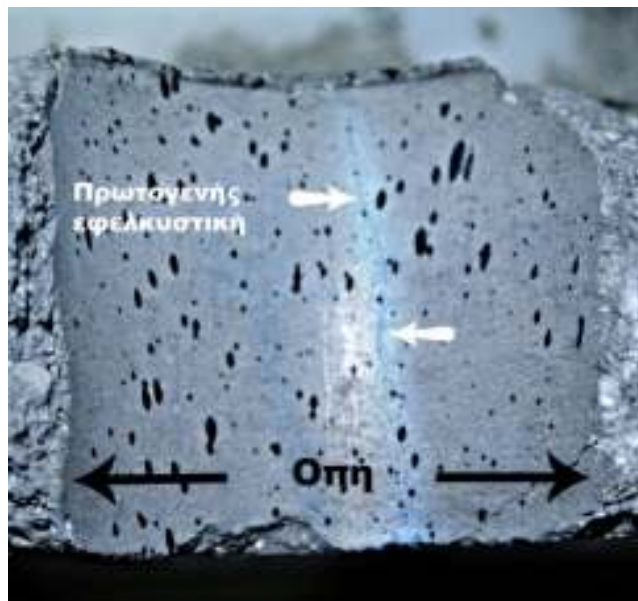
*Εικόνα 67*

*Εικόνα δοκιμίου grout 5 κατά την αστοχία (πριν την επαναφόρτιση)*

Σε αυτήν διακρίνονται οι αποφλοιώσεις μέσα στην οπή λόγω έναρξης των ρωγμών διάτμησης (1), η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή (2), μια ρωγμή η οποία ξεκινάει από την οπή και έχει κατεύθυνση προς τα κάτω η οποία είναι ή η διατμητική ρωγμή ή κάποια αποφλοίωση (3) αλλά και μια ρωγμή η οποία πλησιάζει την οπή αλλά και είναι προφανώς η δευτερεύουσα εφελκυστική η οποία κατευθύνεται προς την οπή για να ενωθεί με τη διατμητική και να προκαλέσει την αστοχία (4). Η εικόνα του δοκιμίου μετά την επαναφόρτιση είναι η ακόλουθη:



**Εικόνα 68.1:**  
Δοκίμιο grout 5 μετά την επαναφόρτιση



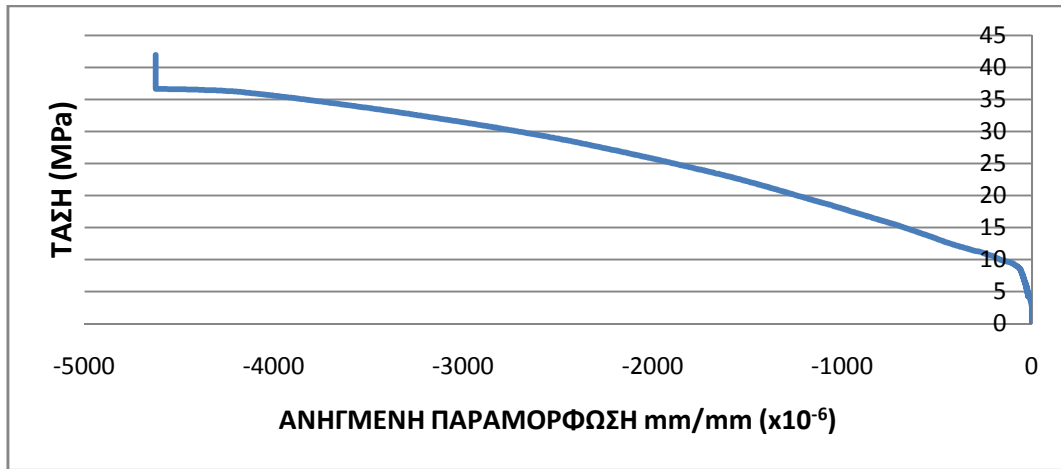
**Εικόνα 68.2:**  
Πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή εσωτερικά της οπής του δοκιμίου Grout5 η οποία έχει χρωματιστεί για να φαίνεται πιο ξεκάθαρα στην εικόνα.

**Εικόνα 68**  
Το δοκίμιο grout 5 μετά την επαναφόρτιση

Στην πρώτη εικόνα (68.1) φαίνονται ξεκάθαρα οι ρωγμές διάτμησης, δεξιά με κατεύθυνση προς τα πάνω και αριστερά με κατεύθυνση προς τα κάτω οι οποίες ενώνονται με τις δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές. Επίσης, τα κομμάτια του δοκιμίου που λείπουν δεξιά και αριστερά είναι από τις εφελκυστικές ρωγμές παράλληλα προς το μέτωπο του δοκιμίου. Παρατηρείται επίσης ότι έχει χαθεί η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή, όμως εσωτερικά του δοκιμίου είναι εμφανής όπως δείχνει η δεύτερη εικόνα (68.2).

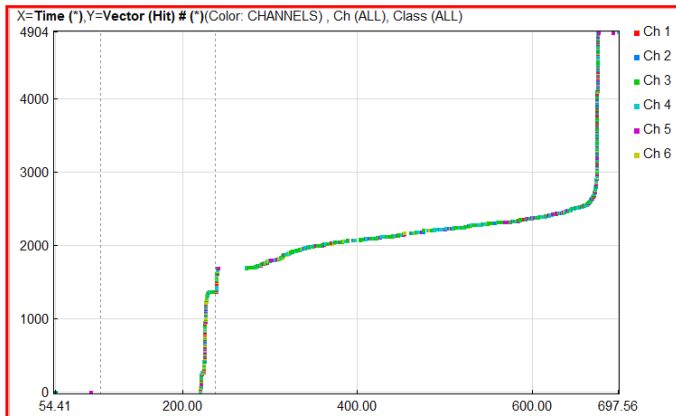
Η διάρκεια της φόρτισης ήταν 433,9 sec και η λήψη ψηφιακών φωτογραφιών ανά 5sec, συνεπώς προκύπτουν 86 φωτογραφίες έως την αστοχία. Από την παρατήρηση του βίντεο και των ψηφιακών εικόνων, στην 5<sup>η</sup> φωτογραφία φαίνεται ένα ίχνος που πιθανώς αντιστοιχεί στην πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή. Το φορτίο που αντιστοιχεί στην 5<sup>η</sup> εικόνα είναι **4MPa**.

Από την ενόργανη παρατήρηση, φαίνεται μια αλλαγή της κλίσης στο διάγραμμα Τάσεων-Τροπών σε τάση **3,45MPa** και μια ακόμα σε τάση **9,03MPa** όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

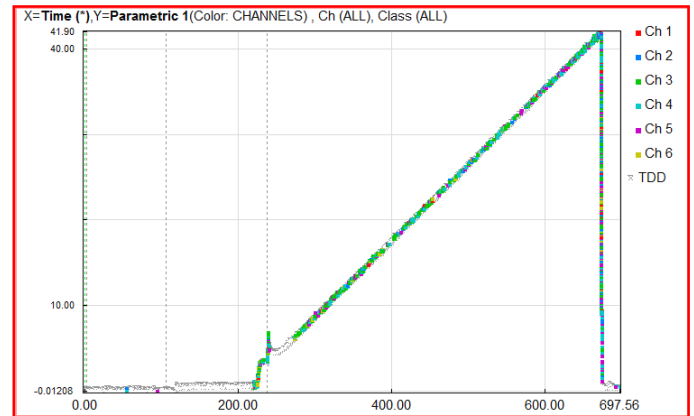


Διάγραμμα 33

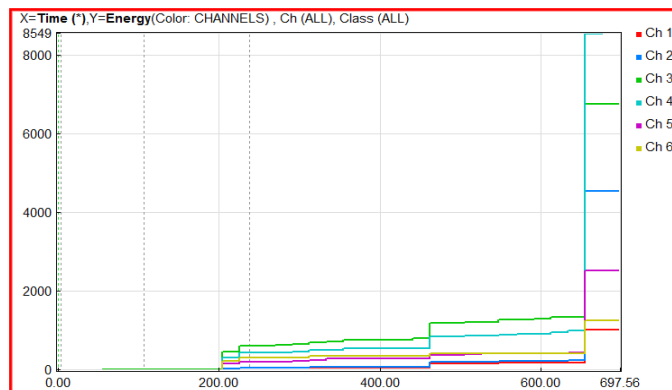
Από το πρόγραμμα Noesis προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα, στα οποία οι χρονοσημάνσεις φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί τα διαγράμματα.



Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου



Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου



Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

Πίνακας 29

Timemark	Χρόνος (sec)	Έναρξη
1	8,35	Βιντεοκάμερας
2	46,76	Ψηφιακής μηχανής
3	187,32	Φόρτισης

Η ερμηνεία των διαγραμμάτων είναι ίδια με αυτή των προηγούμενων δοκιμών. Στα 475,5sec του διαγράμματος υπάρχει ένα απότομο «σκαλοπάτι», το οποίο δεν φαίνεται στο διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου λόγω κλίμακας, όμως είναι εμφανές στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου. Αν υποθεθεί ότι αυτό είναι το σημείο δημιουργίας της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής, τότε αυτό αντιστοιχεί σε **τάση 24MPa**, πολύ υψηλή σε σχέση με αυτό που αναμένεται και όχι λογική σε σχέση με τα φορτία των εφελκυστικών ρωγμών των προηγούμενων δοκιμών με μικρότερες οπές. Σύμφωνα με τη θεωρία, οι μικρότερες οπές έχουν μεγαλύτερη τάση δημιουργίας της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής, γι' αυτό κι εδώ αναμένεται μια τιμή φορτίου μικρότερη των 10MPa. Αν θεωρηθεί ότι το φορτίο δημιουργίας της ρωγμής είναι τα **3,45MPa** που προέκυψαν από το τροπόμετρο (και τη μακροσκοπική παρατήρηση), αυτά αντιστοιχούν σε χρόνο 238,44sec στα παραπάνω διαγράμματα. Ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στην πρώτη απότομη αύξηση των σημάτων αμέσως μετά το timemark της έναρξης της φόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πάτημα των πλακών πάνω στο δοκίμιο έγινε με φορτίο **3,75MPa**, μεγαλύτερο από τα 3,45MPa που θεωρείται ότι ξεκίνησε η πρωτογενής εφελκυστική ρωγή, άρα δεν αποκλείεται αυτή να δημιουργήθηκε με το πάτημα των πλακών της μηχανής πριν την έναρξη της φόρτισης.

Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης AEWin for SAMOS, η εικόνα του διαγράμματος δεν διαφέρει από αυτές των προηγούμενων δοκιμών.

### Δοκίμιο grout6

Το έκτο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x3,7 cm** και οπή διαμέτρου **4,8 cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με ταινία. Κάτω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή grout3. Οι συντεταγμένες τοποθέτησης των αισθητήρων ως προς το κέτρο της οπής ήταν:

Πίνακας 30

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.032	0.050
2	0.026	0.053

3	-0.029	0.027
4	0.024	0.027
5	-0.020	-0.043
6	0.012	-0.042

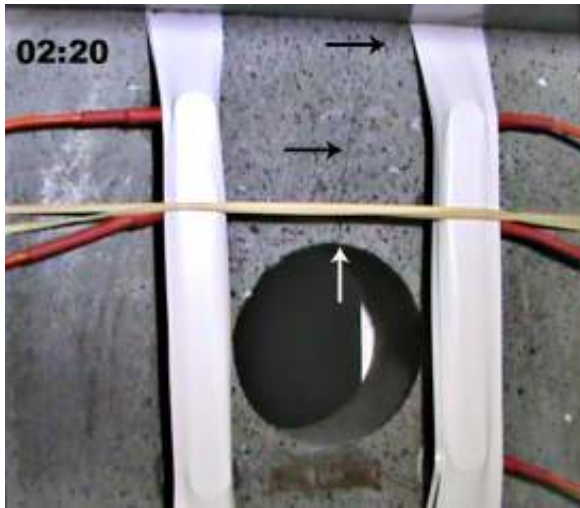
Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο **194,76kN** που αντιστοιχεί σε τάση **33,73MPa**. Το φορτίο αστοχίας είναι λογικό αφού έχει μεγαλύτερη οπή από τα προηγούμενα δοκίμια άρα αναμένεται να είναι μικρότερο όσο αυξάνεται η διάμετρος της οπής. Η εικόνα του κατά την αστοχία δεν διαφέρει από αυτές των προηγούμενων δοκιμών όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



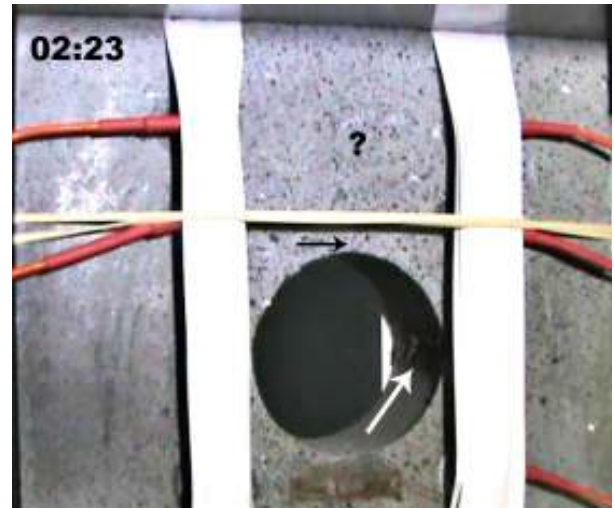
**Εικόνα 69**

*Εικόνα του 6<sup>ου</sup> δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος μετά την αστοχία*

Παρατηρώντας το δοκίμιο οπτικά (μακροσκοπικά), φαίνεται μια μικρή διάτμηση δεξιά και αριστερά της οπής με πολύ μεγάλη κλίση η οποία ενώνεται με δευτερεύουσες εφελκυστικές ρωγμές κι ευθύνεται για τη θραύση. Ποιά ρωγμή ξεκινάει πρώτη δεν γίνεται να προσδιοριστεί οπτικά. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο φαίνονται δύο δευτερεύουσες εφελκυστικές ρωγμές σε κάθε πλευρά. Όσον αφορά την πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή, δεν είναι οπτικά εμφανής. Με παρατήρηση του βίντεο στην όψη που φαίνεται παραπάνω, στα 16sec της φόρτισης εμφανίζεται η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή και ταυτόχρονα οι αποφλοιώσεις μέσα στη ρωγμή που προέρχονται από τη δημιουργία της διατμητικής ρωγμής. Οι εικόνες που ακολουθούν είναι από το βίντεο και πάνω δεξιά σημειώνεται ο χρόνος λήψης της εικόνας.



Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή 18sec από την έναρξη της φόρτισης (η έναρξη της φόρτισης στο βίντεο έγινε στα 02:02)



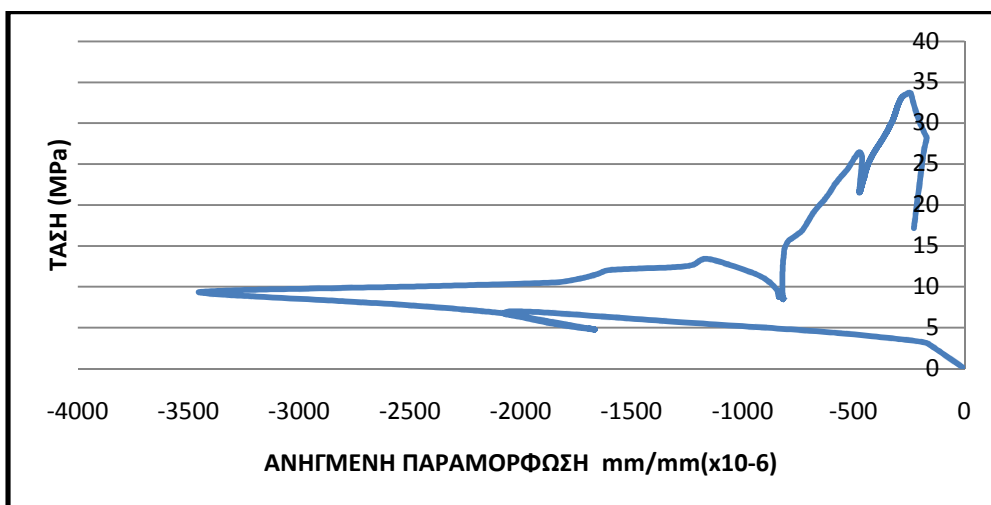
Αποφλοιώσεις 21sec από την έναρξη της φόρτισης

**Εικόνα 70**

Εικόνες από το βίντεο κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Εξετάζοντας το βίντεο, στα 02:17 (χρόνος εγγραφής του βίντεο κι όχι χρόνος φόρτισης) εμφανίζεται οπτικά και ηχητικά η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή η οποία ανοίγει στα επόμενα 4sec. Στα 02:22 εκτοξεύεται υλικό από το σημείο έναρξης της διατμητικής ρωγμής και ταυτόχρονα κλείνει η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή. Στο επόμενο δευτερόλεπτο φαίνονται οι αποφλοιώσεις στην οπή εξαιτίας της διάτμησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή δημιουργήθηκε στα **6,57 – 7,01MPa**. Από το χρόνο που φάνηκε η ρωγμή αφαιρέθηκαν 3δευτερόλεπτα αυθαίρετα αφού όπως έχει αποδειχθεί στα προηγούμενα πειράματα η ρωγμή δημιουργείται αλλά δεν φαίνεται αλλά και όταν έγινε εμφανής είχε ήδη προχωρήσει προς τα όρια του δοκιμίου.

Σύμφωνα με την ενόργανη παρατήρηση, τοstrainingauge έδωσε το παρακάτω διάγραμμα:

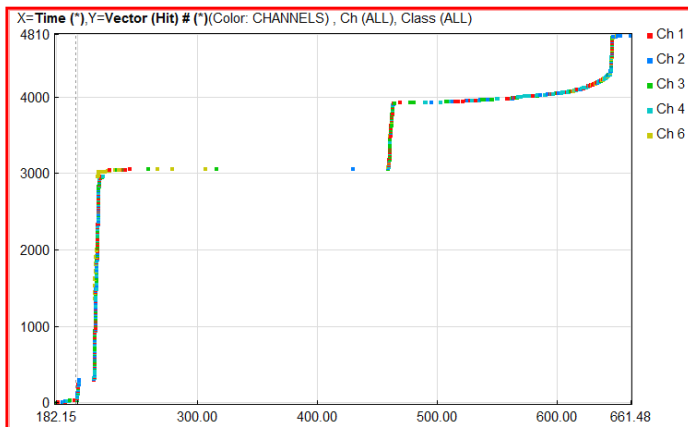


Διάγραμμα 35

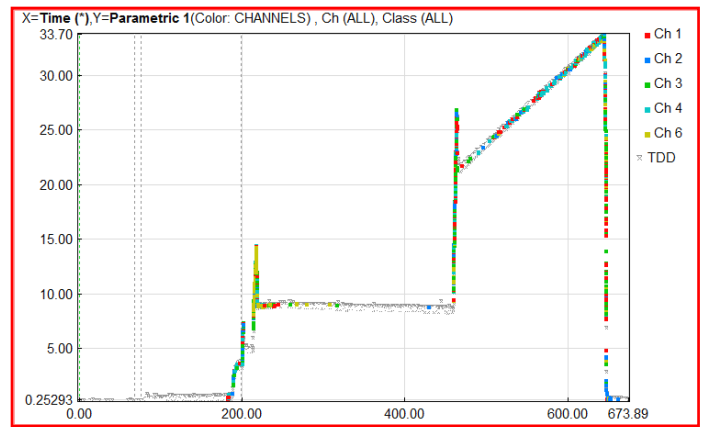
### Διάγραμμα Τάσης-Τροπής από το τροπόμετρο

Σύμφωνα με αυτό παρατηρείται μια απότομη αλλαγή κλίσης γύρω στα 3MPa και αργότερα γύρω στα 7MPa. Το διάγραμμα είναι περίεργο όμως μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής: Η εφελκυστική ρωγμή όπως φαίνεται από το βίντεο ανοίγει μέχρι 19 sec από την έναρξη της φόρτισης και στη συνέχεια κλείνει. Τα 19 αυτά sec αντιστοιχούν σε τάση 9,6MPa. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του τροπόμετρου, μέχρι λίγο πριν τα 10MPa η παραμόρφωση είναι αρνητική άρα το δοκίμιο εφελκύεται (δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής) ενώ στη συνέχεια η παραμόρφωση μικραίνει. Το γεγονός αυτό συνδέεται με το κλείσιμο της εφελκυστικής ρωγμής.

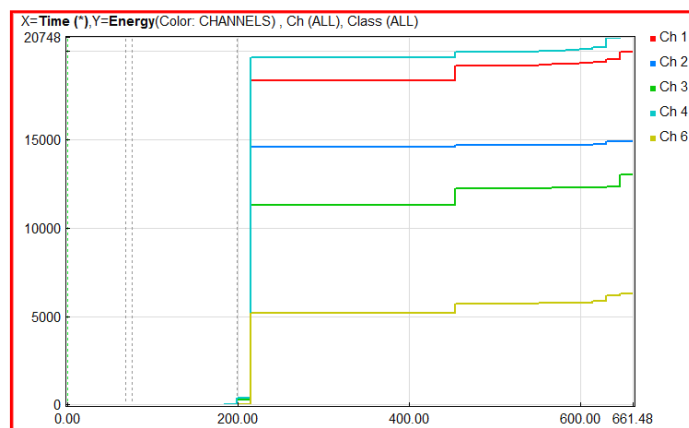
Πριν το έλεγχο με το πρόγραμμα Noesis, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη φόρτιση του δοκιμίου, έγινε διακοπή για άγνωστο λόγο στα 77,51kN (13,42MPa) και ο αισθητήρας 5 κατέγραφε θόρυβο από την αρχή της δοκιμής. Έτσι για την εξάλειψη του θορύβου και των υπερβολικών σημάτων (41200 σήματα) του αισθητήρα 5, διαγράφηκε από τα διαγράμματα κι έτσι έμειναν τα παρακάτω σήματα:



Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου



Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου



Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

### Διαγράμματα 36

Τα timemarks στα παραπάνω διαγράμματα είναι τα εξής:

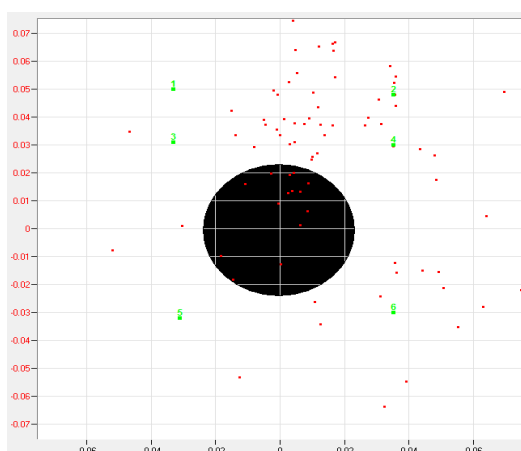


*Πίνακας 31*

Timemark	Χρόνος (sec)	Έναρξη
1	68,59	Ψηφιακής μηχανής
2	75,62	Βιντεοκάμερας
3	198,95	Φόρτισης

Στα διαγράμματα Κτύπων-Χρόνου και Ενέργειας-Χρόνου παρατηρείται μια πολύ απότομη αύξηση των σημάτων μετά την έναρξη της φόρτισης κι αφού έχουν σταματήσει τα σήματα από το πάτημα της μηχανής πάνω στο δοκίμιο. Η αύξηση αυτή είναι στα 213,25 sec και αντιστοιχεί σε φορτίο 6,8MPa, το οποίο συμφωνεί με την μακροσκοπική παρατήρηση αλλά και τα δεδομένα του τροπόμετρου. Επόμενη απότομη αύξηση υπάρχει στα 458,75 sec τα οποία αντιστοιχούν σε φορτίο 9,6MPa. Αυτή πιθανώς οφείλεται στο σταμάτημα της φόρτισης που έγινε μερικά δευτερόλεπτα μετά.

Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης δεν λήφθηκαν ακριβή αποτελέσματα όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



*Εικόνα 71*

*Αποτελέσματα προγράμματος AEWinforSAMOS*

### Δοκίμιο grout7

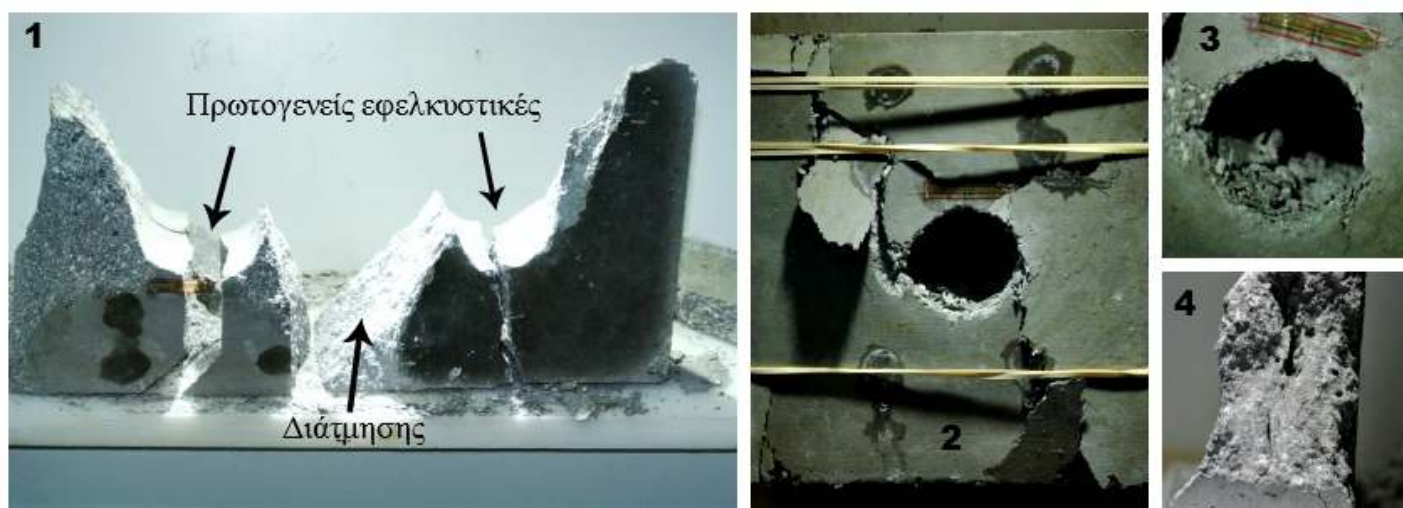
Το έβδομο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x7,6 cm** και οπή διαμέτρου **3,8 cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με λάστιχο. Πάνω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης

ήταν ίδια με την δοκιμή grout5 (ρυθμός φόρτισης 500N/s). Οι συντεταγμένες τοποθέτησης των αισθητήρων ως προς το κέντρο της οπής ήταν:

*Πίνακας 32*

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.032	0.050
2	0.026	0.053
3	-0.029	0.027
4	0.024	0.027
5	-0.020	-0.043
6	0.012	-0.042

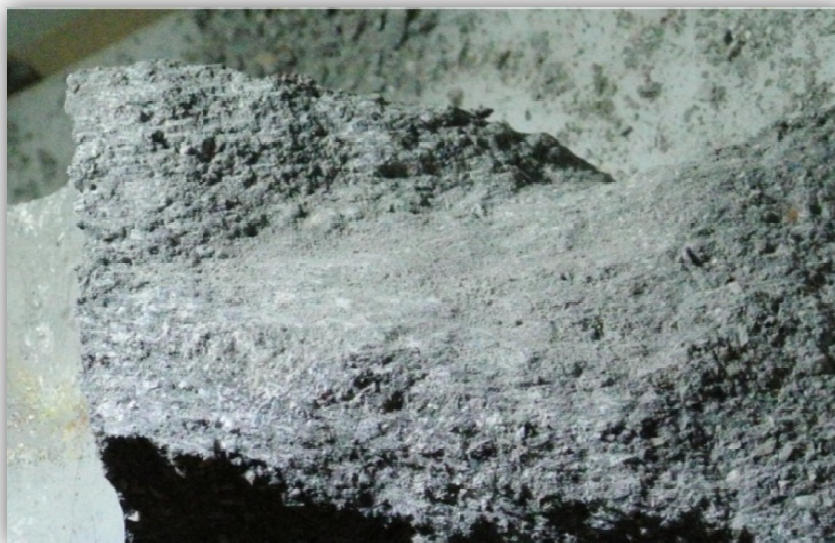
Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο **532,20kN** δηλαδή σε τάση **45,89MPa** και επαναφορτίστηκε για καλύτερη εξέταση. Φωτογραφίες του δοκιμίου μετά την θραύση και επαναφόρτιση φαίνονται παρακάτω.



*Εικόνα 72*

1. Δοκίμιο μετά την αστοχία και το διαχωρισμό του
2. Δοκίμιο μετά την αστοχία και πριν το διαχωρισμό του
3. Αποφλοιώσεις εσωτερικά στην οπή
4. Επιφάνεια διάτμησης

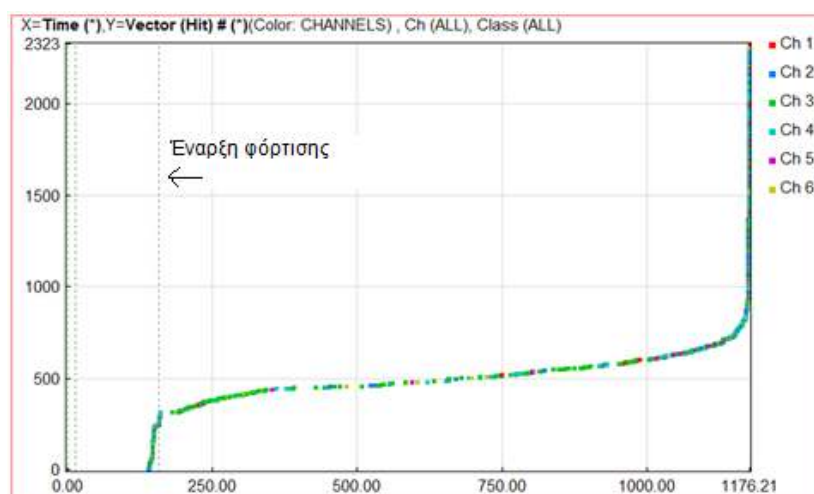
Όπως δείχνει η 2<sup>η</sup> εικόνα, η εφελκυστική ρωγμή δεν έχει εμφανιστεί ούτε μετά την επαναφόρτιση του δοκιμίου. Όμως εσωτερικά της οπής φαίνεται το ίχνος της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Έτσι παρατηρείται ότι υπάρχει η ρωγμή αλλά δεν έχει ανοίξει ή δεν έχει επεκταθεί ως το άκρο για να ανοίξει. Με ελαφρό χτύπημα του δοκιμίου, διαχωρίστηκαν οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές όπως δείχνει η εικόνα 1. Στην εικόνα 3 φαίνονται οι αποφλοιώσεις μέσα στην οπή, ενώ στην εικόνα 4 φαίνεται η πουδραρισμένη επιφάνεια διάτμησης. Μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της διατημένης επιφάνειας και η διαφορά της με την επιφάνεια εφελκυσμού φαίνεται παρακάτω:

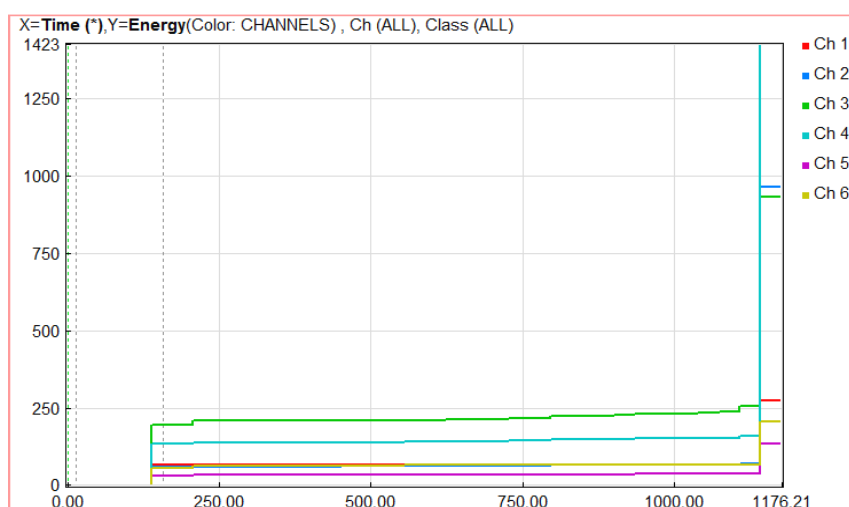
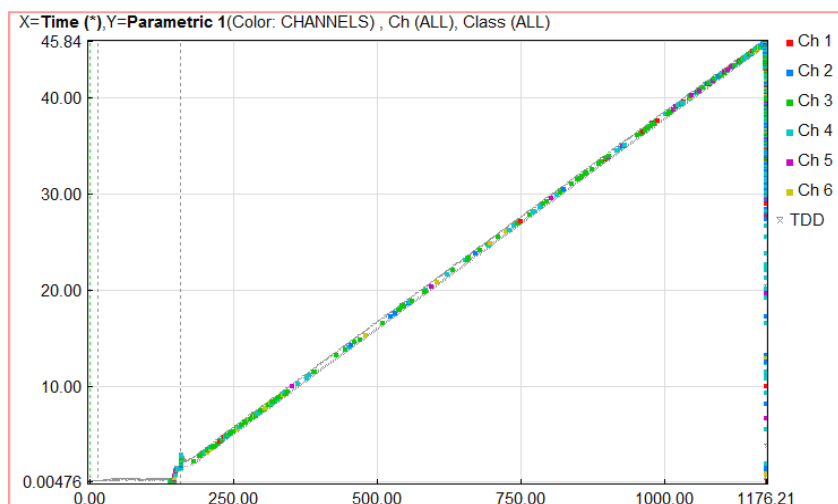


**Εικόνα 73**

*Διατημένη επιφάνεια και η διαφορά της με την επιφάνεια εφελκυσμού που φαίνεται πάνω δεξιά*

Εξετάζοντας το βίντεο, η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή αρχίζει να φαίνεται οπτικά στα 726,2 sec φόρτισης δηλαδή στα 33,31MPa, ενώ οι αποφλοιώσεις ξεκινάνε 25 sec πριν τη θραύση σε τάση 45,77MPa. Το δοκίμιο αυτό δεν έχει διαχωριστεί καθόλου και οι ρωγμές είναι λιγότερο εμφανείς από κάθε άλλο δοκίμιο γι' αυτό και φορτίστηκε περαιτέρω για την καλύτερη εξέτασή του. Από την ενόργανη παρατήρηση μέσω του τροπόμετρου, δεν υπάρχει κανένα «σπάσιμο» στην καμπύλη που να φανερώνει τη δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Από το πρόγραμμα Noesis προέκυψαν τα διαγράμματα που ακολουθούν. Σύμφωνα με αυτά, η πρώτη απότομη αύξηση είναι στα 226 sec που αντιστοιχεί σε τάση **4,5MPa**, ακολουθούν κάποιες μικρότερες και η επόμενη είναι στα 655 sec δηλαδή 23MPa. Στα 33MPa που έγινε μακροσκοπικά εμφανής (σε χρόνο 880 sec στο διάγραμμα) υπάρχουν κάποια μικρά «σκαλοπάτια» στο διάγραμμα που προφανώς οφείλονται στο άνοιγμα της ρωγμής.





### Διαγράμματα 37

Από πάνω προς τα κάτω: Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου, Τάσης-Χρόνου και Ενέργειας-Χρόνου

Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης δεν προέκυψαν ακριβή αποτελέσματα.

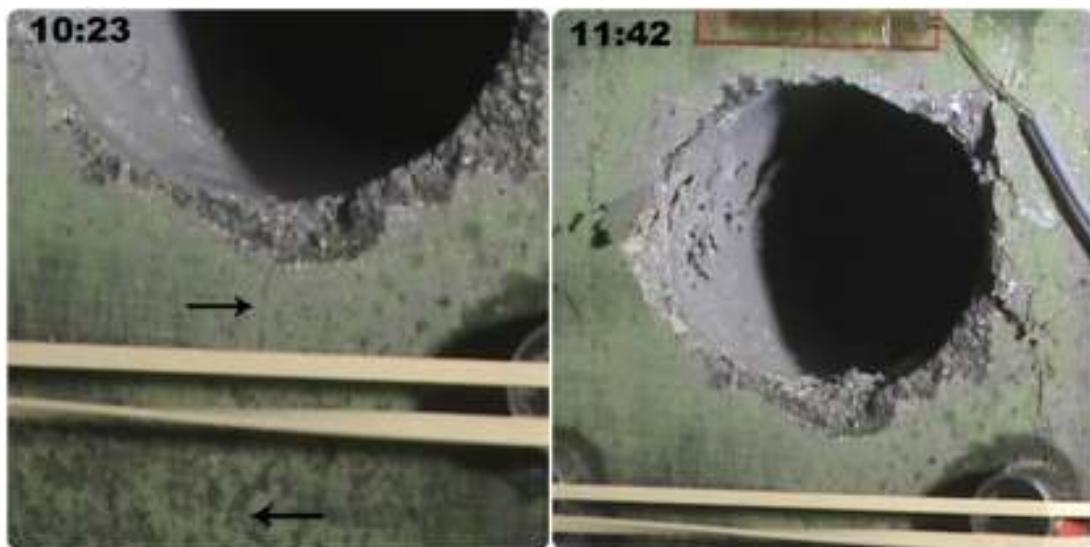
### Δοκίμιο grout8

Το όγδοο δοκίμιο είχε διαστάσεις **15x15x7,45 cm** και οπή διαμέτρου **3,7 cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με λάστιχο. Πάνω από την οπή τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή Grout7 με διαφορά στο ρυθμός φόρτισης που μεταβλήθηκε σε **900N/s**. Ο κάναβος τοποθέτησης των αισθητήρων είναι ίδιος με αυτόν της δοκιμής grout2 με μικρές αποκλίσεις στις συντεταγμένες.

*Πίνακας 33*

Channel	X(m)	Y(m)
1	-0.035	0.057
2	0.035	0.056
3	-0.035	0.037
4	0.035	0.037
5	-0.030	-0.025
6	0.030	-0.024

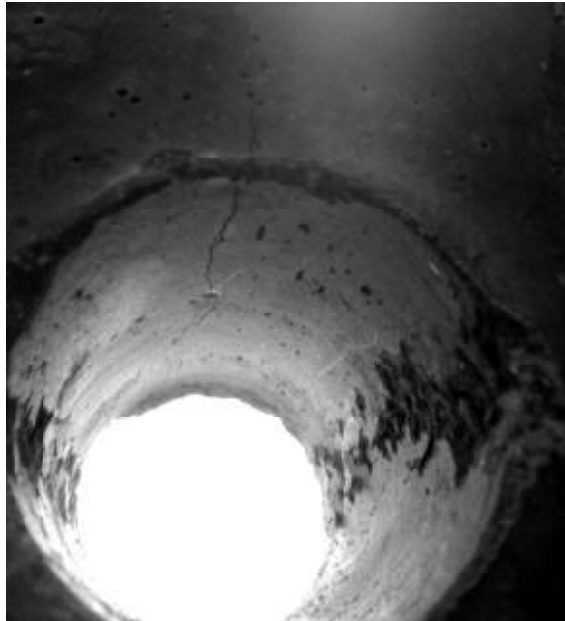
Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο 523,68kN που αντιστοιχεί σε τάση **45,94MPa**. Η μορφή αστοχίας καθώς και οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις δεν διαφέρουν από αυτές των προηγούμενων δοκιμών. Η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή έγινε οπτικά εμφανής εσωτερικά της οπής και ελάχιστα εξωτερικά αυτής στα 234 sec από την έναρξη της φόρτισης που αντιστοιχεί σε τάση **19,79MPa**. Εξωτερικά έγινε πιο ξεκάθαρη περίπου 74 sec πριν την αστοχία σε τάση 39,5MPa. Οι αποφλοιώσεις μέσα στην οπή ξεκίνησαν (με μακροσκοπική παρατήρηση) 32 sec πριν την αστοχία σε τάση 43,47MPa. Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται στις εικόνες που προέρχονται από το βίντεο της δοκιμής:



*Εικόνα 74*

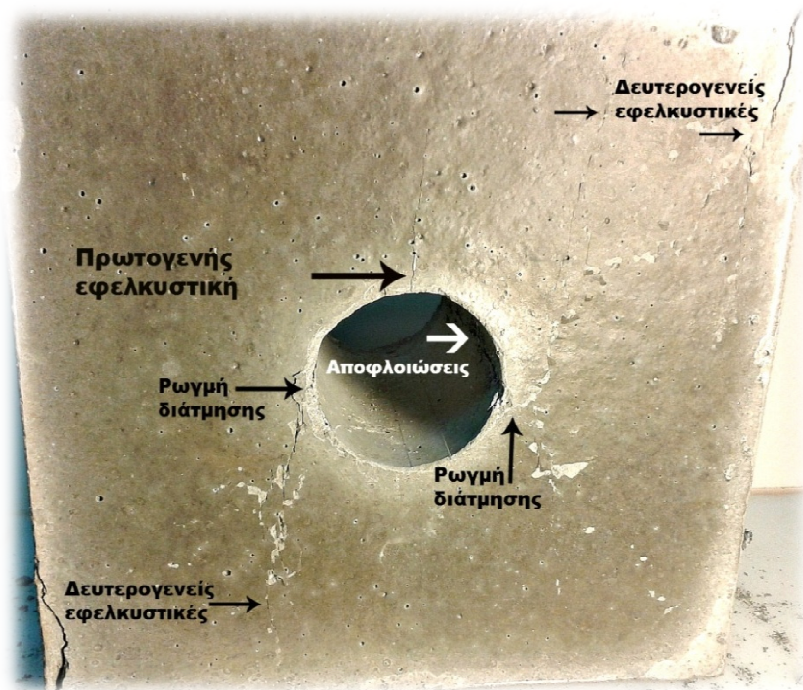
*Μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου grout8 μέσω της βιντεοκάμερας. Οι χρόνοι πάνω αριστερά αντιστοιχούν στο χρόνο εγγραφής της βιντεοκάμερας κι όχι στο χρόνο φόρτισης*

Στις παραπάνω εικόνες, στα 10:23min καταγραφής της βιντεοκάμερας, φαίνεται την πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή, ενώ στην αστοχία (11:42min) η ρωγμή έχει εξαφανιστεί. Μετά την αστοχία του δοκιμίου η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή φαίνεται εσωτερικά και εξωτερικά της οπής από την πίσω και άνω πλευρά του δοκιμίου. Οι εικόνες που ακολουθούν δείχνουν την κατάσταση του δοκιμίου.



*Εικόνα 75*

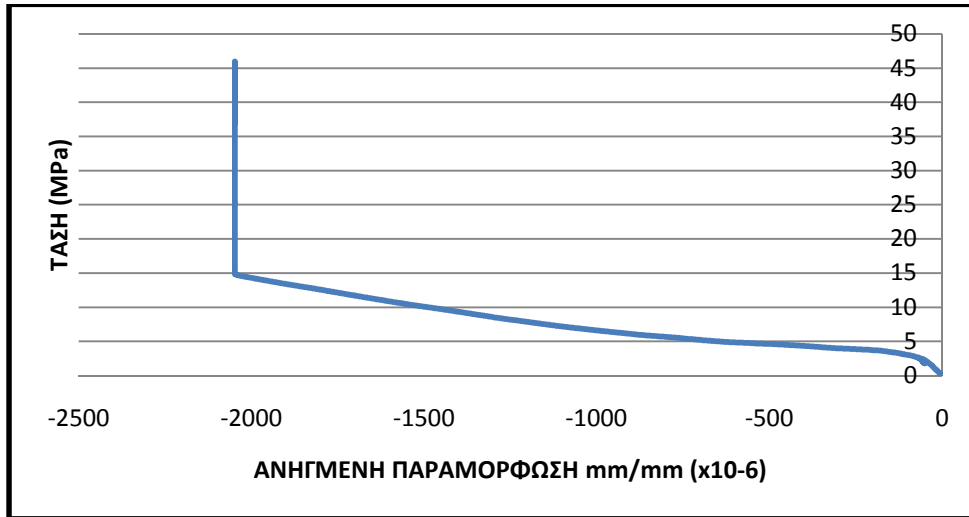
*Εικόνα εσωτερικά της οπής του δοκιμίου grout 8 μετά την αστοχία*



*Εικόνα 76*

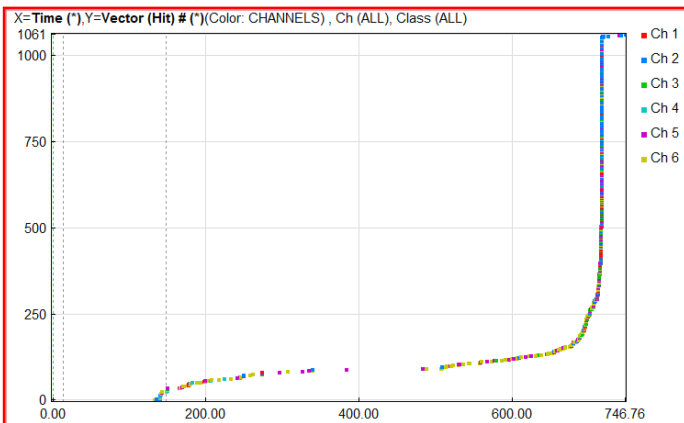
*Εικόνα δοκιμίου μετά την επαναφόρτιση*

Όσον αφορά την ενόργανη παρατήρηση, το διάγραμμα τάσης-τροπής από το τροπόμετρο, παρουσιάζει μία ασυνέχεια στα **2,65MPa**, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, δηλαδή 17sec από την έναρξη της φόρτισης. Από την βιντεοκάμερα στον χρόνο αυτό δεν φαίνεται αλλά ούτε ακούγεται κάποια αλλαγή (όπως π.χ. στο δοκίμιο 6 που έγινε ένας κρότος μαζί με τη δημιουργία της ρωγμής).

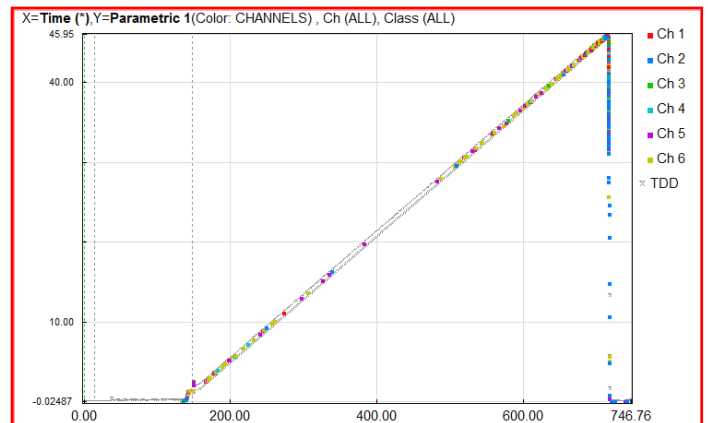


Διάγραμμα 38

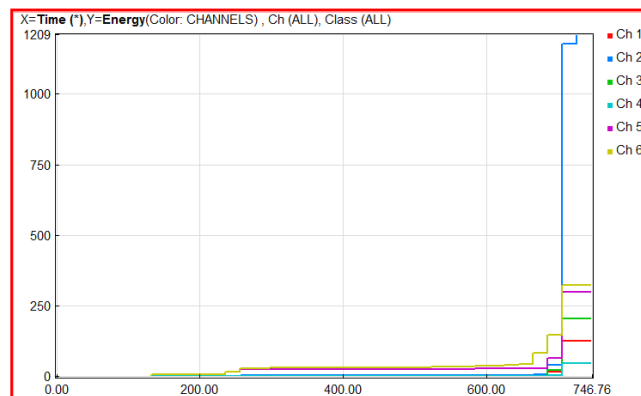
Από το Noesis προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα, στα οποία το πρώτο timemark σε χρόνο 14,11sec αντιστοιχεί στην έναρξη εγγραφής της βιντεοκάμερας και το άλλο στα 147,87 sec αντιστοιχεί στην έναρξη της φόρτισης:



Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου



Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου



Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

Διαγράμματα 39

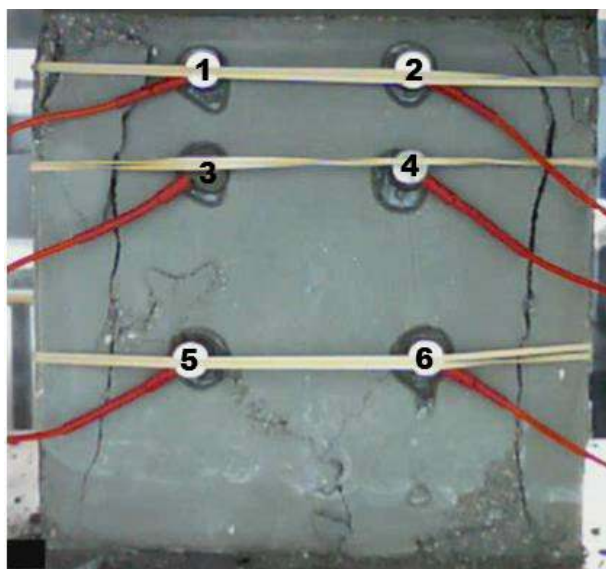
Στα παραπάνω διαγράμματα η πρώτη απότομη αύξηση των σημάτων στο διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου γίνεται στα 173,53 sec που αντιστοιχεί σε τάση **3,10MPa**, πολύ κοντινή με αυτή του τροπόμετρου. Στο παραπάνω διάστημα, στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου, υπάρχει ένα μικρό σκαλοπάτι το οποίο διακρίνεται μόνο με μεγέθυνση στο σημείο αυτό. Η πρώτη αύξηση της ενέργειας γίνεται στα 234,95 sec που αντιστοιχούν σε τάση 7,8MPa.

Από το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης δεν προέκυψαν κάποια αξιολογικά αποτελέσματα.

### Δοκίμιο grout0

Το δοκίμιο αυτό δημιουργήθηκε με σκοπό να βρεθεί η συμπεριφορά του δοκιμίου σε θλίψη χωρίς οπή. Οι διαστάσεις του ήταν **15x15x3,85 cm**. Οι αισθητήρες στηρίχθηκαν με λάστιχο και τηρήθηκε ο κánaβος τοποθέτησης των αισθητήρων του 4<sup>ου</sup> δοκιμίου με το οποίο είχαν ίδιες διαστάσεις. Στη δοκιμή αυτή δεν τοποθετήθηκε τροπόμετρο στην οριζόντια διεύθυνση. Οι ρυθμίσεις της ΑΕ και τα χαρακτηριστικά φόρτισης ήταν ίδια με την δοκιμή grout4.

Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο **312,891kN** δηλαδή σε τάση **54,19MPa**. Το φορτίο αστοχίας είναι λογικό να είναι μεγαλύτερο από τα δοκίμια με οπές γιατί δεν διέθετε ασυνέχεια. Η εικόνα του δοκιμίου κατά τη θραύση ήταν:



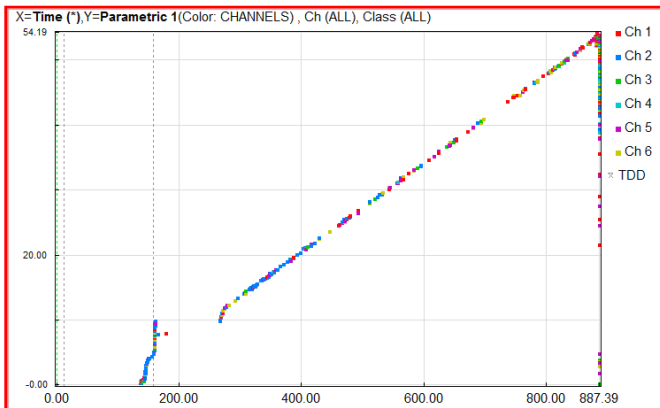
*Εικόνα 77*  
*Αστοχία «άρρηκτου» δοκιμίου Grout 0*

Από την μακροσκοπική παρατήρηση, το δοκίμιο κατά την φόρτιση έσπασε στα πάνω άκρα κυρίως δίπλα στον αισθητήρα 2 ο οποίος κατέγραψε και περισσότερα σήματα από τον αισθητήρα 1. Η εφελκυστική ρωγμή που αντιστοιχεί στη δευτερεύουσα εφελκυστική ρωγμή των δοκιμίων με οπή, εμφανίστηκε πρώτα στο

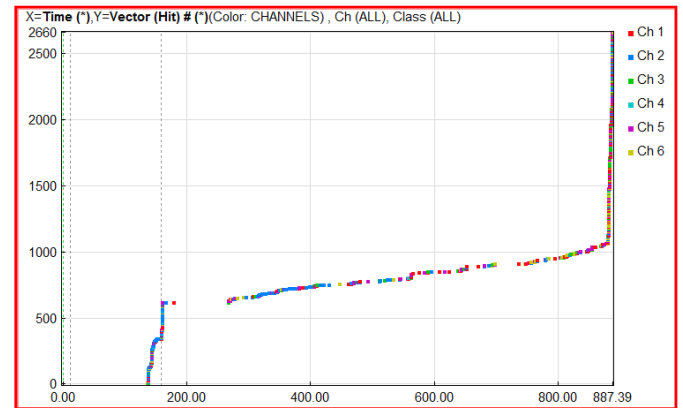


δεξιό τμήμα από πάνω προς τα κάτω (δίπλα στον αισθητήρα 2 στα 14:25 λεπτά καταγραφής) και 3 sec αργότερα στο δεξιό τμήμα. Στη συνέχεια μόλις 2 δευτερόλεπτα αργότερα το δοκίμιο αστόχησε.

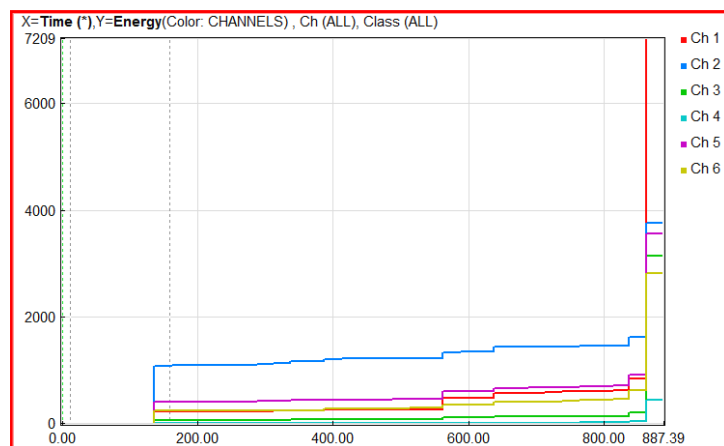
Η ακουστική εκπομπή του δοκιμίου κατά τη φόρτιση, έδωσε τα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα Τάσης-Χρόνου



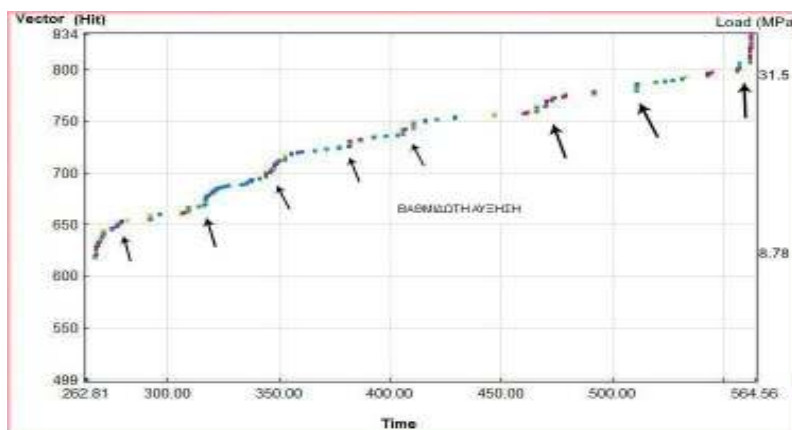
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου



Διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου

#### Διαγράμματα 40

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι από την έναρξη της φόρτισης και μετά υπάρχει ένα διάστημα όπου δεν καταγράφονται σήματα. Το διάστημα αυτό είναι 89,7sec ή αλλιώς δεν υπάρχουν σήματα μέχρι τα 8,78MPa. Στη συνέχεια τα σήματα αυξάνονται βαθμιαία με μεγαλύτερο “σκαλοπάτι” στα 31,5MPa, όπως δείχνει το διάγραμμα που ακολουθεί:



**Διάγραμμα41**  
*Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου σε μεγέθυνση*

Αυτό σημαίνει ότι το δοκίμιο ούτως ή αλλιώς παρουσιάζει βαθμιδωτή αύξηση των σημάτων, συνεπώς **είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η έναρξη της εφελκυστικής ρωγμής στα δοκίμια με οπές**, εάν δεν υπάρχει κάποια άλλη ένδειξη (π.χ.strain gauge) που να καθορίζει που περίπου πρέπει να γίνει η αναζήτηση. Σε αντίθεση με τη γύψο, τα δοκίμια με οπές δεν παρουσίασαν πολύ μεγάλη αύξηση των σημάτων κατά τη δημιουργία της πρώτης ρωγμής ώστε να ξεχωρίζει από τις παραπάνω αυξήσεις των σημάτων. Στο διάγραμμα Ενέργειας-Χρόνου, παρατηρείται βαθμιδωτή αύξηση της ενέργειας στο παραπάνω διάστημα και πιο απότομη αύξηση στα 31,5MPa που υποδηλώνει ότι κάτι συνέβη στο φορτίο αυτό. Συσχετίζοντας το χρόνο του φορτίου με τη διάρκεια εγγραφής του βίντεο, παρατηρείται ότι στο φορτίο αυτό σπάει η πάνω δεξιά γωνία του δοκιμίου λόγω μη επιπεδότητας.

Με το πρόγραμμα εντοπισμού θέσης παρατηρούνται διάσπαρτα σήματα σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου, χωρίς να προσδιορίζουν μια διακριτή πηγή σημάτων.

### **5.3.Πειράματα ψηφιακής συσχέτισης εικόνων (Digital Image Correlation - DIC)**

Πειράματα ψηφιακής συσχέτισης εικόνων έγιναν σε ορισμένα από τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν. Στα πρώτα πειράματα σκοπός ήταν να προσδιοριστεί η διαδικασία της μεθόδου DIC, από το στήσιμο του πειράματος, το μοτίβο, τις ρυθμίσεις της ψηφιακής μηχανής, μέχρι την επεξεργασία των εικόνων δηλαδή το πρόγραμμα μετατροπής των φωτογραφιών από RAW σε TIFF με την ελάχιστη επεξεργασία αλλά και τη χρήση των εργαλείων συσχέτισης του Matlab.

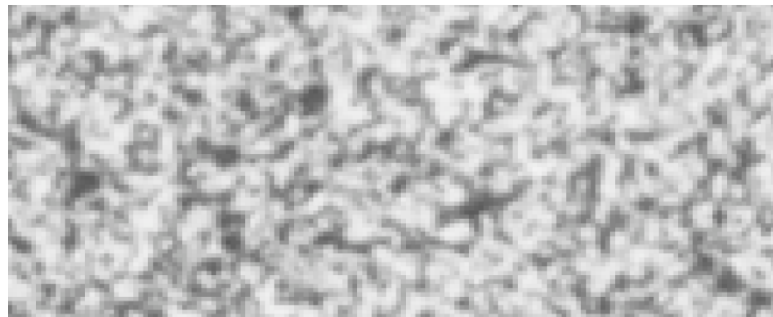


**Εικόνα 78**  
*Δοκιμή κάμψης με μοτίβο από βερνίκι*



**Εικόνα 79**  
*Δοκιμή Brazilian με μοτίβο από ματ σπρέι όπου έχουν καλυφθεί οι γυαλιστερές επιφάνειες για να μην δημιουργούν προβλήματα στην φωτεινότητα*

Σύμφωνα με τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μοτίβα (με ματ σπρέι, με βερνίκι και με μαρκαδόρο), διάφορα προγράμματα μετατροπής των εικόνων από RAW σε TIFF με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος από την επεξεργασία που υφίσταται η εικόνα κατά την μετατροπή αλλά και την ελαχιστοποίηση του χρόνου μετατροπής, καθώς και δυο ψηφιακές μηχανές. Τα αποτελέσματα των πειραματισμών δεν περιλαμβάνονται στο παρόν κεφάλαιο επειδή στα δοκίμια δεν είχαν τοποθετηθεί straingauges για τη σύγκρισή των αποτελεσμάτων, αξιολογούνται όμως στα συμπεράσματα του **Κεφαλαίου 6**.

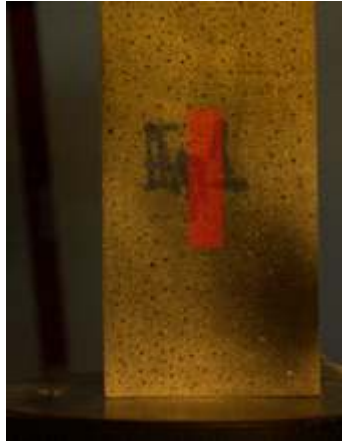


**Εικόνα 80**  
*Μεγέθυνση μοτίβου σε κυβικό δοκίμιο όπου διακρίνονται τα pixel*

### 5.3.1. Δοκίμια γύψου

#### **Δοκίμιο prism1 διαστάσεων 15x7,5x3,5cm**

Μετά τον προσδιορισμό της διαδικασίας, ακολούθησε τοποθέτηση τροπόμετρων (**strain gauges**) πάνω στα δοκίμια με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της ψηφιακής συσχέτισης του **matlab**. Επίσης χρησιμοποιήθηκε άλλο ένα πρόγραμμα ψηφιακής συσχέτισης εικόνων το **Matchid**. Η μέτρηση της παραμόρφωσης μέσω των προγραμμάτων συσχέτισης, έγινε στην πλευρά με το μοτίβο, σε θέση ίδια με αυτή του strain gauge που βρισκόταν στην άλλη πλευρά. Έτσι προκύπτουν δύο αναλύσεις, μια κατά x και μια κατά y.

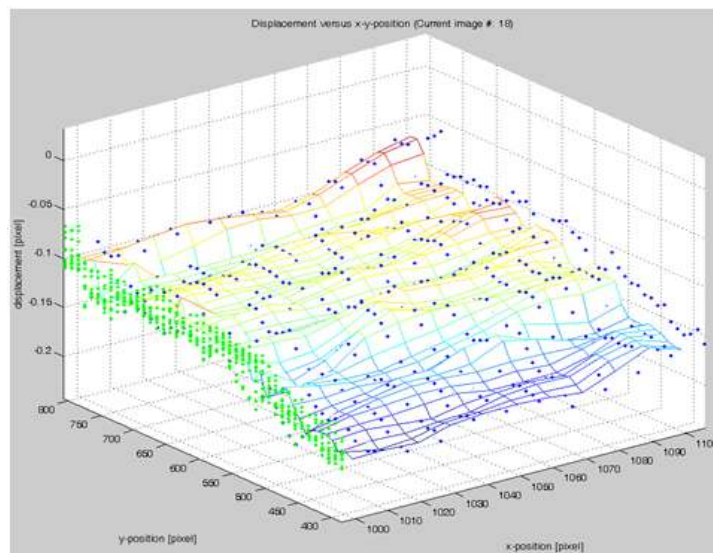


**Εικόνα 81**  
Κάναβος στη θέση ελέγχου

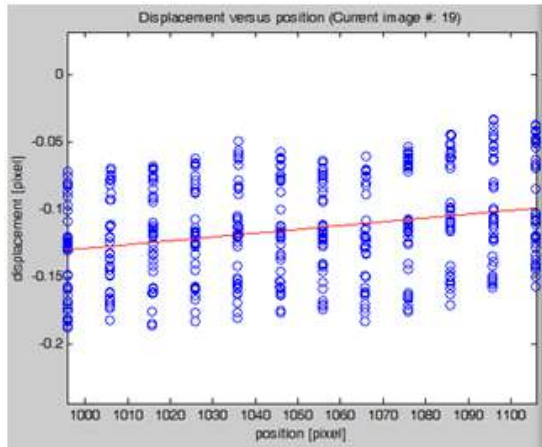


**Εικόνα 82**  
Θέσεις τοποθέτησης των straingauges  
σε δοκίμιο που έχει αστοχήσει

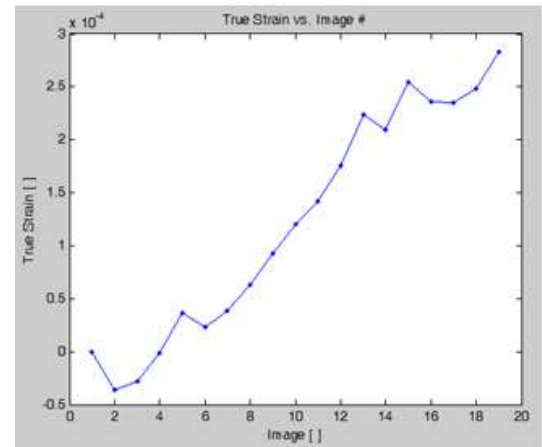
➤ **Κατά y**



**Εικόνα 83**  
Τρισδιάστατη απεικόνιση της παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τα Pixel κατά x και κατά y (ανάλυση στον άξονα y)

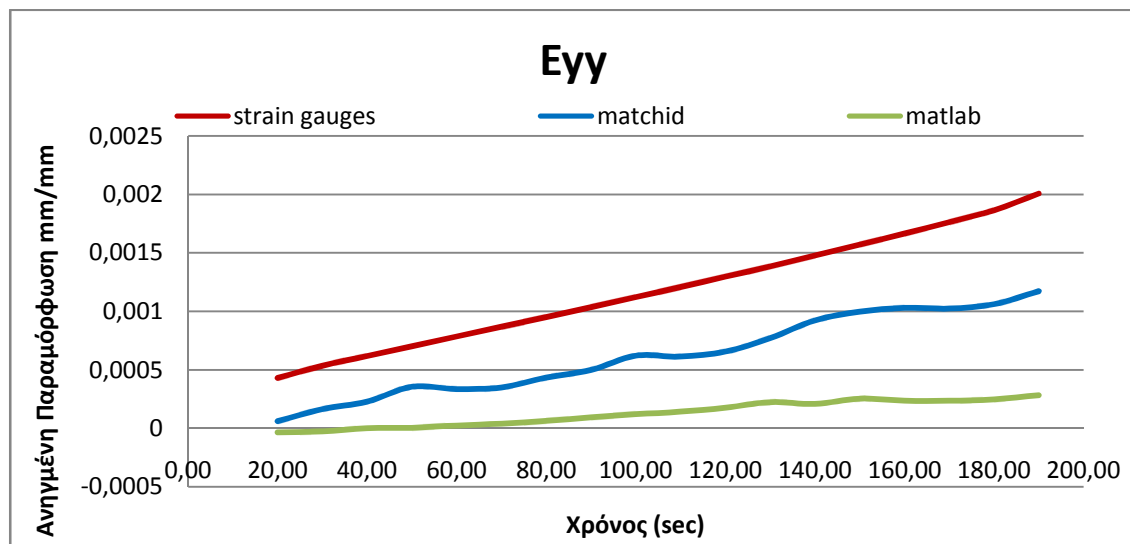


**Διάγραμμα 42**  
*Διάγραμμα μετακίνησης-θέσης Pixel*



**Διάγραμμα 43**  
*Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Αριθμού εικόνας*

Η μηχανή είχε ρυθμιστεί να τραβάει φωτογραφίες ανά 5sec, οπότε γνωρίζοντας ποια είναι η πρώτη φωτογραφία και πόση ώρα διήρκεσε η φόρτιση, είναι δυνατός ο σχεδιασμός του διαγράμματος παραμόρφωσης-χρόνου αντί παραμόρφωσης-αριθμού εικόνας που δίνεται από το πρόγραμμα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η ψηφιακή συσχέτιση γίνεται μέχρι λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου, δηλαδή λίγο πριν ρωγματοωθεί η επιφάνειά του. Τοποθετώντας τα αποτελέσματα από την ανάλυση μέσω του matlab και του matchid με αυτά των straingauges προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



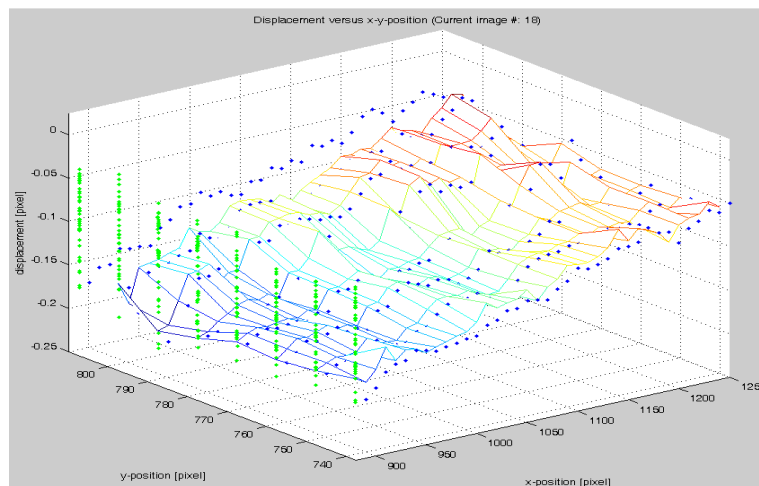
**Διάγραμμα 44**

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι υπάρχει καλή συσχέτιση της κλίσης της καμπύλης παραμόρφωσης προς το χρόνο μεταξύ του τροπόμετρου και της ανάλυσης με το πρόγραμμα matchid. Όμως η κλίση της καμπύλης της παραμόρφωσης που προέκυψε από την επεξεργασία με το matlab παρουσιάζει σημαντική διαφορά. Η απόκλιση που παρουσιάζεται στη στάθμη των καμπυλών

οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει δυνατότητα εντοπισμού της αρχικής τροπής με τους κώδικες ψηφιακής ανάλυσης εικόνων. Επίσης η μη ευθυγραμμία των τιμών του matlab και του matchid πιθανόν να οφείλεται στη διαφορά της φωτεινότητας μεταξύ των εικόνων, η οποία σε αρκετές εικόνες είναι εμφανής. Για το λόγο αυτό σε επόμενα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν ασπρόμαυρες φωτογραφίες για την μετρίαση του προβλήματος αυτού.

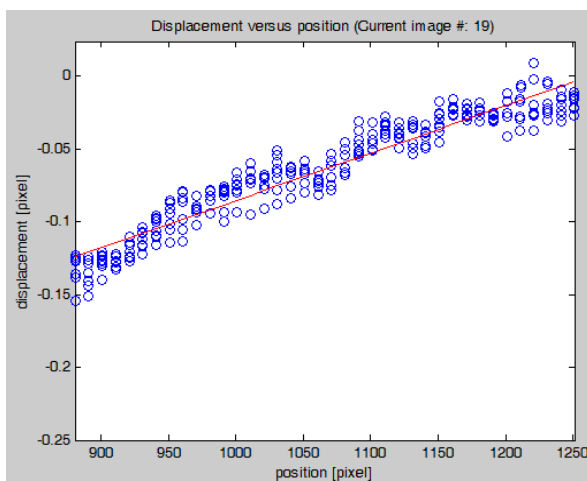
➤ **Κατά x**

Αντίστοιχα γίνεται και ο έλεγχος στην xx' διεύθυνση.



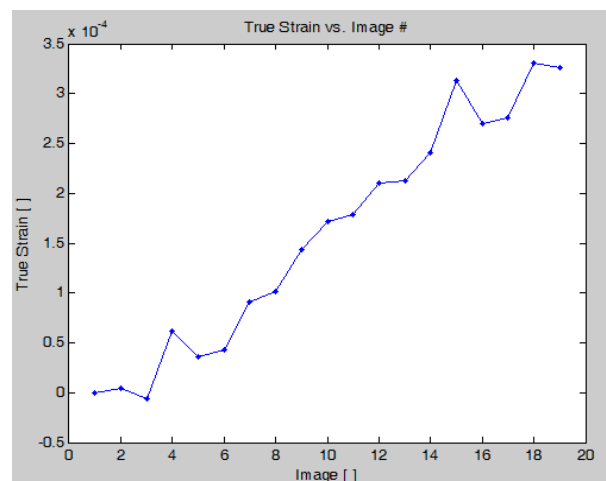
**Εικόνα 84**

Τρισδιάστατη απεικόνιση της παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τα Pixel κατά x και κατά y (ανάλυση στον άξονα x)



**Διάγραμμα 45**

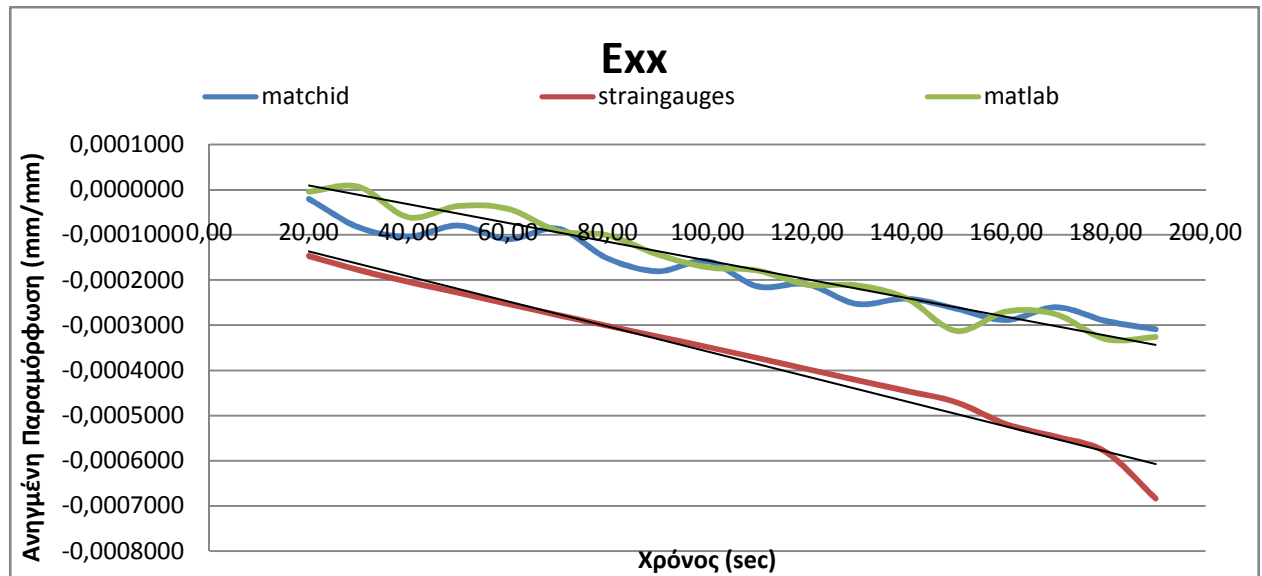
Διάγραμμα μετακίνησης-θέσης Pixel



**Διάγραμμα 46**

Διάγραμμα Παραμόρφωσης – Αριθμού εικόνας

Τοποθετώντας ξανά τα αποτελέσματα των προγραμμάτων συσχέτισης και του strain gauge στο ίδιο διάγραμμα προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



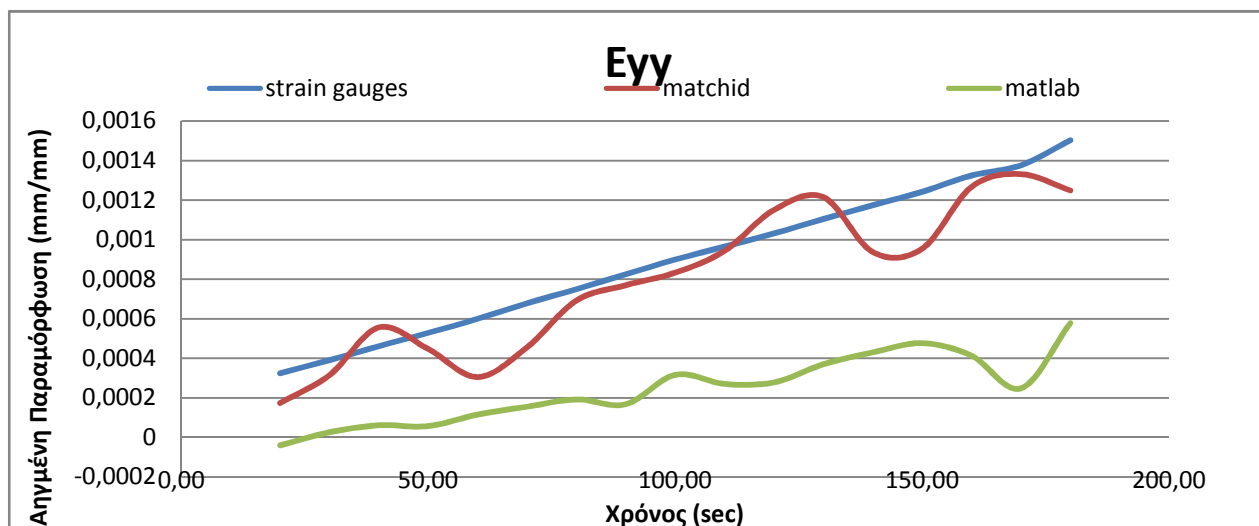
Διάγραμμα 47

Εδώ παρατηρείται ότι πάλι το strain gauge δίνει υψηλότερες τιμές, ενώ τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων συσχέτισης σχεδόν ταυτίζονται. Οι κλίσεις των των καμπυλών της παραμόρφωσης που προκύπτουν από την επεξεργασία των εικόνων και τη μέτρηση του τροπόμετρου είναι σχεδόν η ίδια.

#### 🚧 Δοκίμιο prism2 διαστάσεων 15x7,5x3,5cm

Με αντίστοιχη διαδικασία με το δοκίμιο prism1, γίνεται και η ανάλυση για το δοκίμιο prism 2 που είναι ίδιας σύνθεσης και ίδιων διαστάσεων. Έτσι τοποθετώντας τα αποτελέσματα των strain gauges και των προγραμμάτων matlab και matchid προκύπτει:

#### ➤ Κατά y

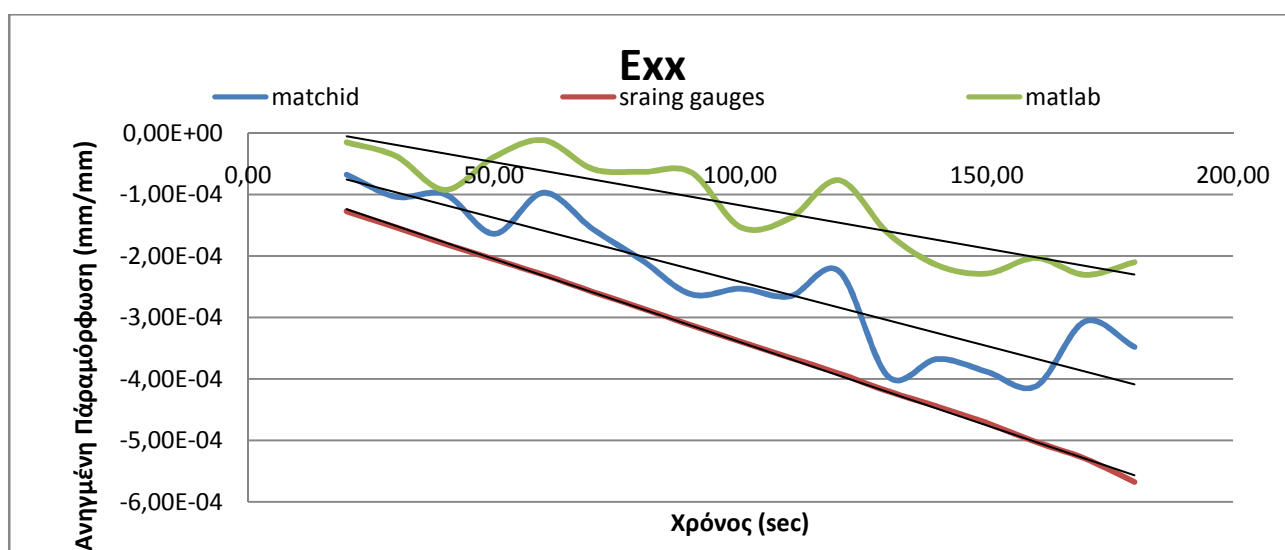


Διάγραμμα 48

Στο διάγραμμα της κατακόρυφης παραμόρφωσης παρατηρείται, όπως και πριν, ότι το strain gauge έχει τις μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα του Matchid πλησιάζουν αυτά του strain gauge αλλά με αρκετές διακυμάνσεις που πιθανόν οφείλονται στη φωτεινότητα των εικόνων που μεταβάλλεται από τη μια φωτογραφία στην άλλη και πιθανόν το πρόγραμμα την αντιλαμβάνεται σαν παραμόρφωση. Η ευθεία που προκύπτει από γραμμική παλινδρόμηση στα αποτελέσματα του matchid, έχει ακριβώς την ίδια κλίση με αυτή του strain gauge. Αντίθετα, τα αποτελέσματα του matlab έχουν μεγάλη απόκλιση από τις άλλες δύο καμπύλες. Επίσης, η καμπύλη του matlab δεν έχει τόσο μεγάλες διακυμάνσεις όσο αυτή του matchid.

➤ **Κατά x**

Αντίστοιχα για την οριζόντια διεύθυνση προκύπτει:

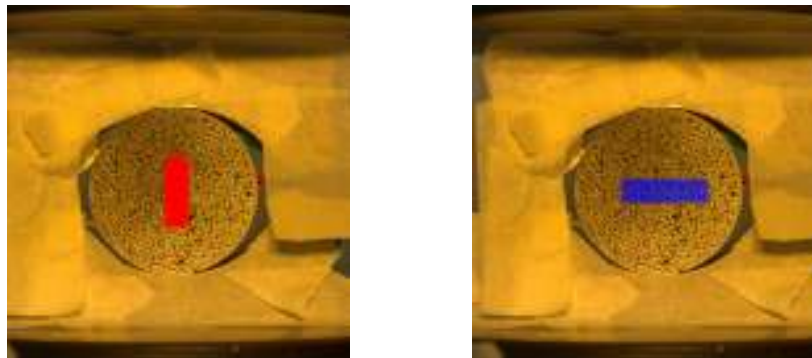


Διάγραμμα 49



Εδώ παρατηρείται ξανά ότι το strain gauge δίνει τις μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης, ενώ οι καμπύλες από τα δύο προγράμματα ψηφιακής συσχέτισης έχουν την ίδια μορφή, τις ίδιες διακυμάνσεις αλλά αποκλίνουν στις τιμές. Η κλίσεις των τριών γραμμών τάσεων, δεν έχουν μεγάλη απόκλιση.

✚ Δοκίμιο μορφής δίσκου 5,5x2,75cm – Δοκιμή Brazilian

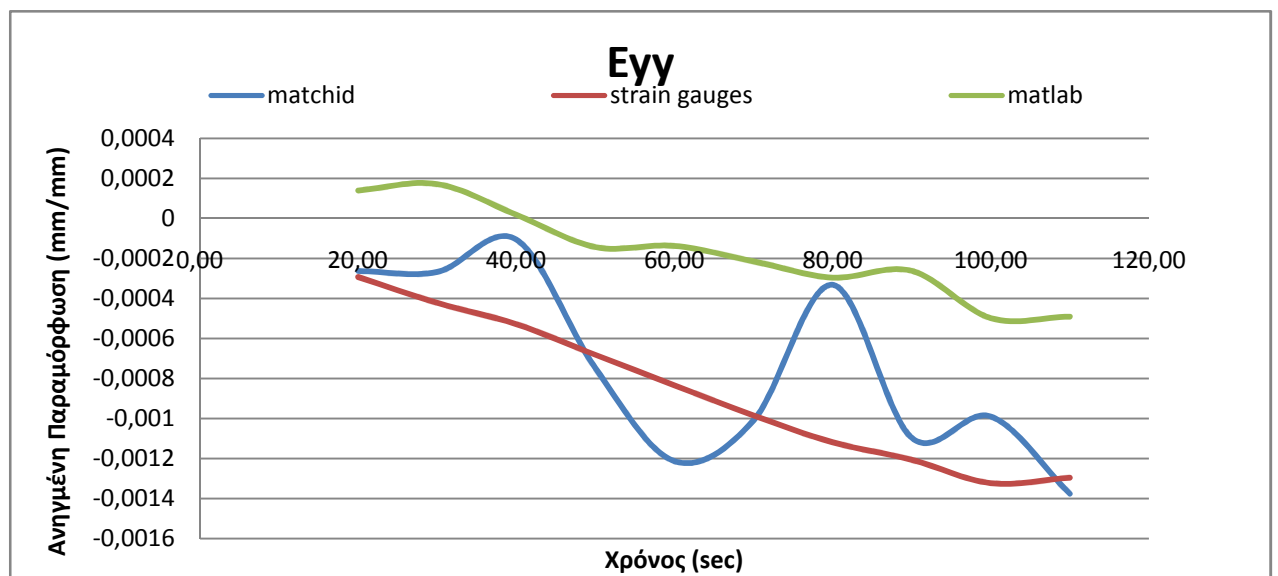


**Εικόνα 85**

Αριστερά: Κάναβος για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης παραμόρφωσης με το Matlab, Δεξιά: Κάναβος για τον προσδιορισμό της οριζόντιας παραμόρφωσης με το Matlab

Αντίστοιχη διαδικασία με παραπάνω, ακολουθήθηκε και στη δοκιμή Brazilian από την οποία προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα.

➤ **Κατά y**

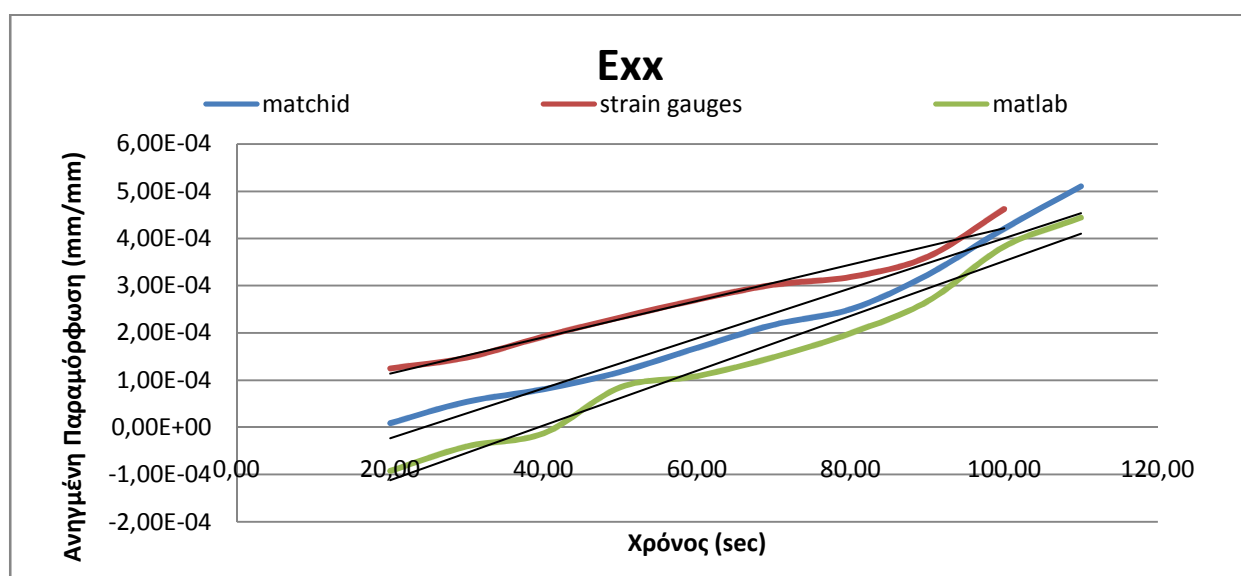


**Διάγραμμα 50**

Στο παραπάνω διάγραμμα τοstraingauge δίνει τις μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης και έχει ίδα κλίση με τη γραμμή τάσης του matchid, με μικρή απόκλιση στις τιμές της τάξης των  $0.0002 \cdot 10^{-6} \text{mm/mm}$ . Βέβαια, υπάρχουν πολύ μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές της παραμόρφωσης που δίνει το matchid που πιθανόν οφείλονται και πάλι στη φωτεινότητα. Αντίθετα, οι τιμές του matlab παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τις άλλες δύο καμπύλες, με μικρότερες όμως διακυμάνσεις σε σχέση με το matchid.

### ➤ *Κατά x*

Αντίστοιχα στην οριζόντια διεύθυνση:



Διάγραμμα 51

Στην οριζόντια διεύθυνση, τα διαγράμματα των παραμορφώσεων, ξεκινάνε από διαφορετικά σημεία αλλά όσο προχωράει η φόρτιση, συγκλίνουν. Τοstraingaugeέχει πάλι τις μεγαλύτερες τιμές τροπής και το matlab τις χαμηλότερες. Η καμπύλη του matchid έχει περίπου ίδια μορφή και κλίση με αυτή του matlab αλλά μεγαλύτερες τιμές.

### ✚ Δοκίμιο διαστάσεων 15x15x3,5cm με οπή διαμέτρου 5cm

Η παραμόρφωση επιχειρήθηκε να μετρηθεί και στα δοκίμια γύψου με οπή στο κέντρο. Συγκεκριμένα οι δοκιμές έγιναν στα δοκίμια **7 και 8** με ίδιες περίπου διαστάσεις. Το δοκίμιο 7 είχε διαστάσεις 15x15x3,8cm και οπή διαμέτρου 4cm, ενώ τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις ήταν ίδια. Τα διαγράμματα που ακολουθούν προέρχονται από το δοκίμιο 8. Στις δοκιμές αυτές **δεν χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα matchid και έγινε αλλαγή της ψηφιακής κάμερας.**

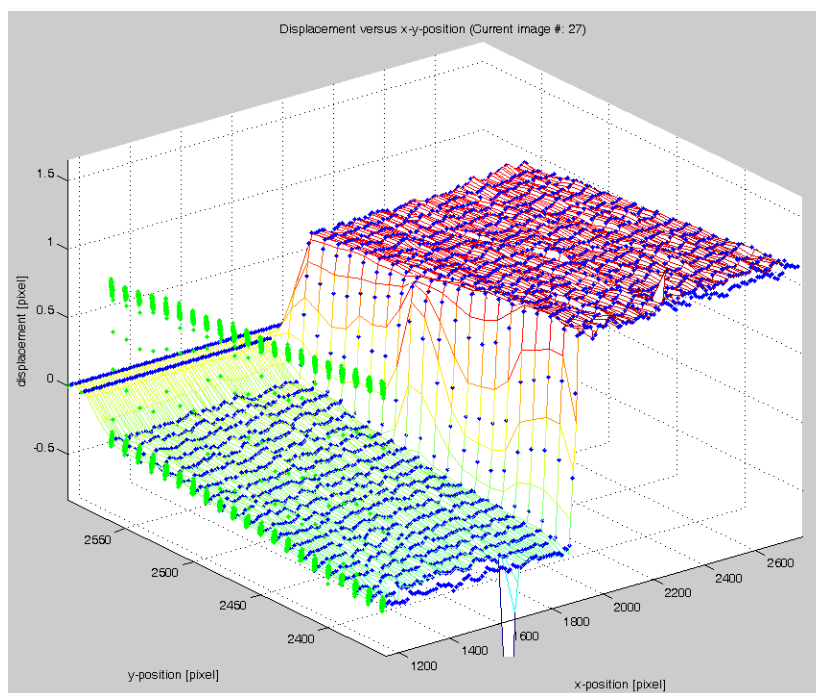
Στην πίσω πλευρά των δοκιμίων 7 και 8 τοποθετήθηκε μοτίβο από μη γυαλιστερό σπρέι και στην πρόσοψή τους τοποθετήθηκανstraingauges ακριβώς κάτω από την οπή με σκοπό τον προσδιορισμό του φορτίου της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής αλλά και της παραμόρφωσης. Η ψηφιακή μηχανή (NIKON) ρυθμίστηκε να λαμβάνει φωτογραφίες ανά 5sec, ενώ το πρόγραμμα μετατροπής των εικόνων από NEF σε TIFF ήταν το λογισμικό **dcraw**.



**Εικόνα 86**  
Κάναβος ελέγχου της παραμόρφωσης στην οριζόντια διεύθυνση στο δοκίμιο 8 (αντίστοιχα και στο 7)

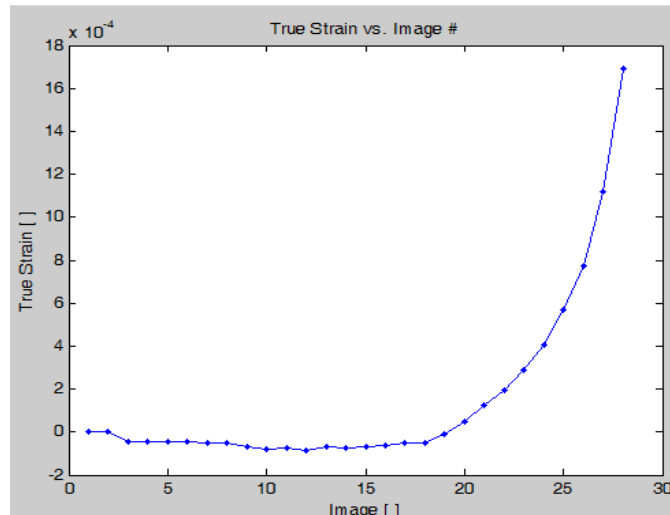


**Εικόνα 87**  
Θέση τοποθέτησης του strain gauge στο δοκίμιο 8



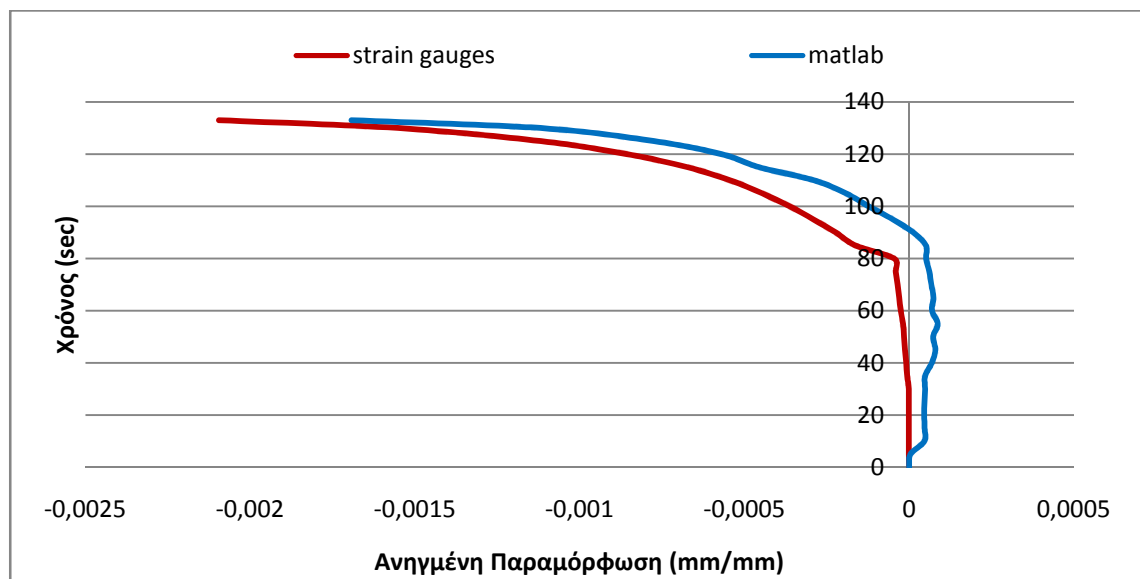
**Εικόνα 88**  
Τρισδιάστατη απεικόνιση της παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τα Pixel κατά x και κατά y

Το διάγραμμα της οριζόντιας παραμόρφωσης συναρτήσητου αριθμού της φωτογραφίας φαίνεται παρακάτω.



**Διάγραμμα 52**  
*Διάγραμμα μεταβολής της τροπής σε κάθε φωτογραφία*

Οι φωτογραφίες ήταν 28, άρα είναι εύκολο να κατασκευαστεί το διάγραμμα της παραμόρφωσης με το χρόνο αντί της παραμόρφωσης συναρτήσει του αριθμού φωτογραφίας που δίνεται από το matlab. Τοποθετώντας το μαζί με αυτό από το strain gauge προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



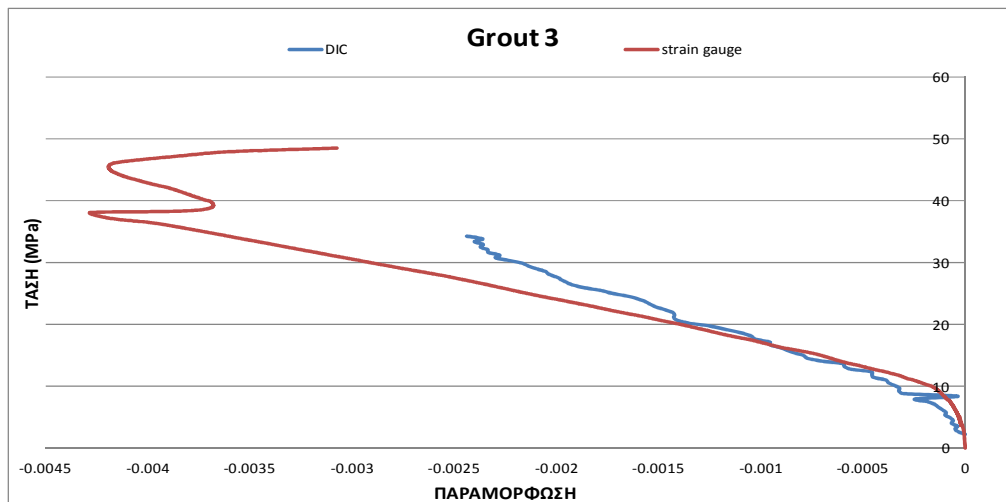
**Διάγραμμα 53**

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι το διάγραμμα της τροπής του matlab έχει παρόμοια μορφή με το διάγραμμα της τροπής του strain gauge. Επίσης φαίνεται ότι το matlab εντοπίζει και την πρώτη ρωγμή στα 80 sec. Ο λόγος που υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση στον εντοπισμό της πρώτης ρωγμής της τάξης των 5-6 sec οφείλεται στο γεγονός ότι με την ψηφιακή μηχανή λαμβάνονται δεδομένα ανά 5 sec (χρόνος λήψης φωτογραφιών) ενώ με το strain gauge συνεχόμενα.

### 5.3.2. Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

Έχοντας δοκιμάσει την ψηφιακή συσχέτιση εικόνων στα δοκίμια της γύψου και σύμφωνα με τα τελευταία πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όπου εντοπίζεται η πρώτη ρωγμή, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε όλες τις δοκιμές τσιμεντοκονιάματος (κυρίως στα δοκίμια με σπές). Από κάθε δοκιμή, αφαιρέθηκαν οι δύο πρώτες εικόνες μετά την έναρξη της φόρτισης, γι αυτό και τα διαγράμματα δεν ξεκινάνε από το 0 αλλά από μία στάθμη φορτίου. Αφαιρέθηκαν ακόμα όσες εικόνες χρειάστηκαν προς το τέλος της δοκιμής γιατί η παραμόρφωση προσδιορίζεται μέχρι πριν την ρωγμάτωση του δοκιμίου.

Η δοκιμή ψηφιακής συσχέτισης για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης στα δοκίμια grout 1 και 2, δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω κακής ποιότητας εικόνας. Συγκεκριμένα, αλλάζει συνεχώς η φωτεινότητα με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τα πίξελ της εικόνας και συνεπώς η μετρούμενη παραμόρφωση. Δοκιμή ψηφιακής συσχέτισης έγινε και στα δοκίμια grout 3, 4, 5 και 6 τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στην συνέχεια. Στα διαγράμματα που ακολουθούν η «Παραμόρφωση» στους άξονες αφορά **ανηγμένη παραμόρφωση (mm/mm)**.

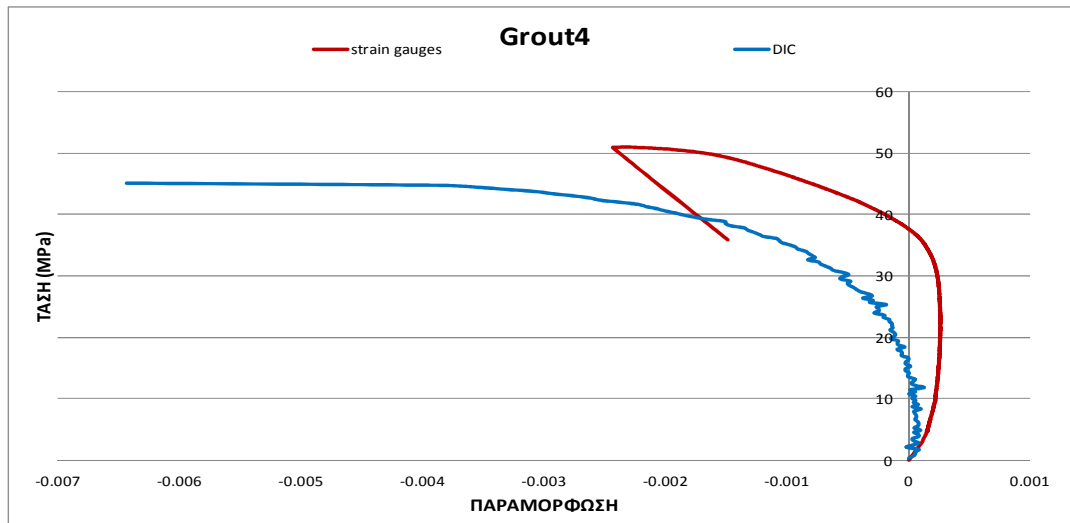


Διάγραμμα 54

Στο διάγραμμα του 3<sup>ου</sup> δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος παρατηρείται ότι η καμπύλη έχει αρκετές αποκλίσεις οι οποίες πιθανώς οφείλονται στην διαφορά της φωτεινότητας των εικόνων. Αν θεωρηθεί ότι η πιο απότομη αντιστοιχεί στη δημιουργία της πρώτης ρωγμής, τότε αυτή έγινε στα **7,89MPa**. Σύμφωνα με το τροπόμετρο, δεν υπάρχει κάποιο σημείο που να υποδεικνύει την δημιουργία της πρώτης ρωγμής, όμως στο παραπάνω φορτίο αλλάζει απότομα η κλίση της καμπύλης. Από το πρόγραμμα Noesis, παρατηρείται ότι στο παραπάνω φορτίο δεν υπήρχε καμία αύξηση των σημάτων ή της ενέργειας της ακουστικής εκπομπής. Σύμφωνα με το πρόγραμμα το φορτίο στο οποίο παρατηρείται μια απότομη αύξηση των σημάτων είναι τα **3,75MPa**.

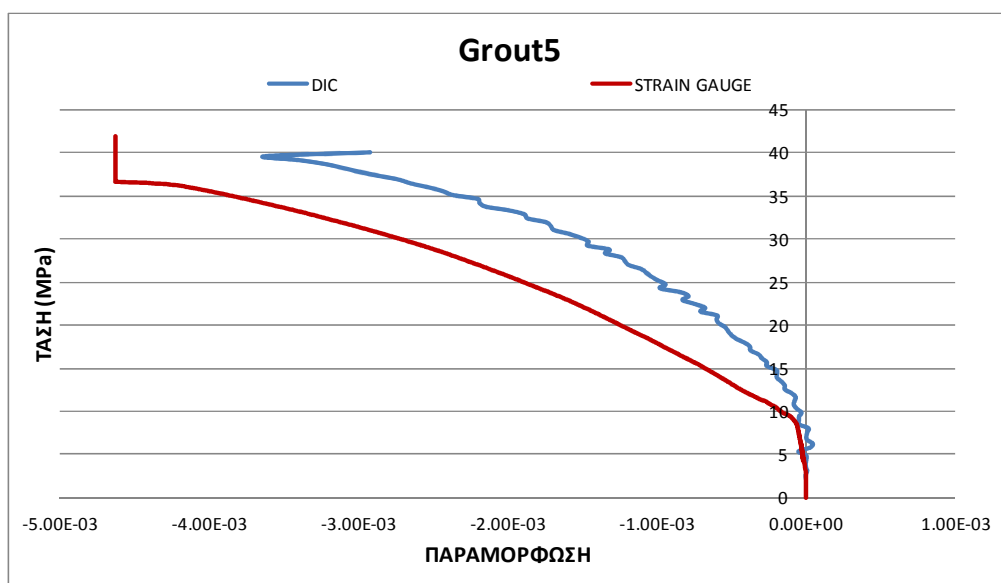
Στο 4<sup>ο</sup> δοκίμιο παρατηρείται ότι η παραμόρφωση που προσδιορίζεται από το Matlab είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που προσδιορίζεται από το τροπόμετρο. Η καμπύλη από το Matlab είναι κυματοειδής και δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του

σημείου έναρξης της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής, ούτε όμως από το τροπόμετρο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της.



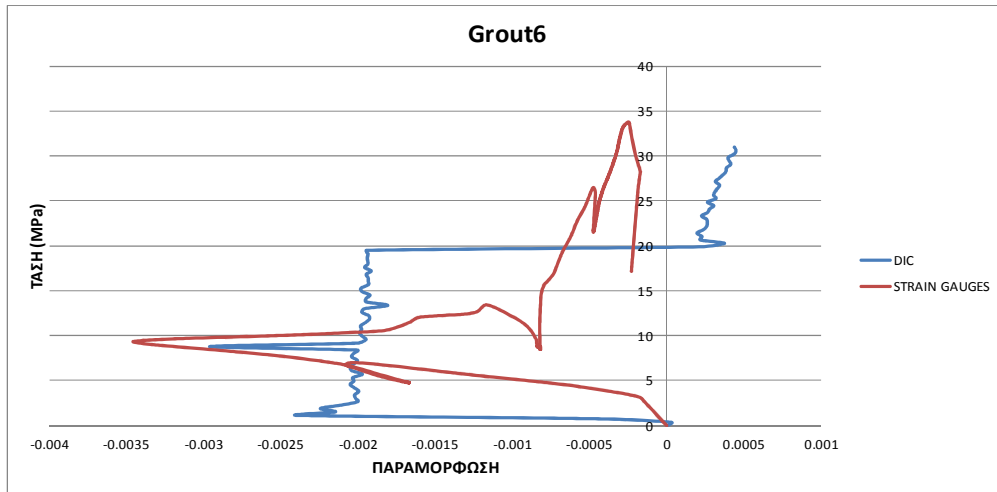
Διάγραμμα 55

Στο 5<sup>ο</sup> δοκίμιο και πάλι ο αλγόριθμος στο πρόγραμμα συσχέτισης του Matlabπροσδιορίζει μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης από το τροπόμετρο. Επίσης ξανά η μορφή της καμπύλης είναι κυματοειδής με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής. Η καμπύλη του τροπόμετρου παρουσιάζει την πρώτη αλλαγή κλίσης στα 3,45MPa που πιθανώς οφείλεται στην πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή. Στο φορτίο αυτό παρατηρείται και απότομη αύξηση των κτύπων στο πρόγραμμα Noesis. Όμως όπως παρατηρήθηκε το παραπάνω φορτίο είναι μικρότερο από το φορτίο με το οποίο πάτησαν οι πλάκες της μηχανής πάνω στο δοκίμιο γεγονός που σημαίνει ότι η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή μπορεί να δημιουργήθηκε πριν την έναρξη της φόρτισης γι'αυτό και δεν φαίνεται κάποια έντονη αλλαγή στις καμπύλες του παρακάτω διαγράμματος.



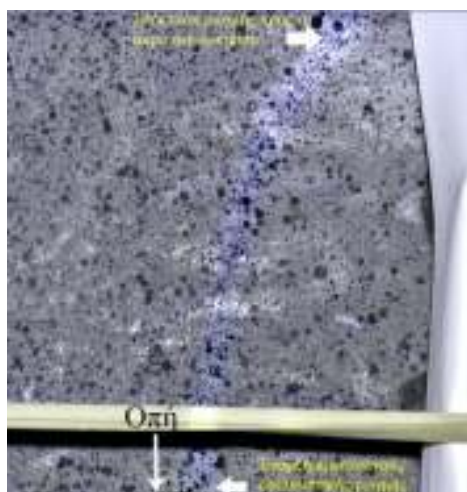
Διάγραμμα 56

Όσον αφορά το 6<sup>ο</sup> δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος, αυτό παρουσιάζει την παρακάτω περίεργη μορφή:



Διάγραμμα 57

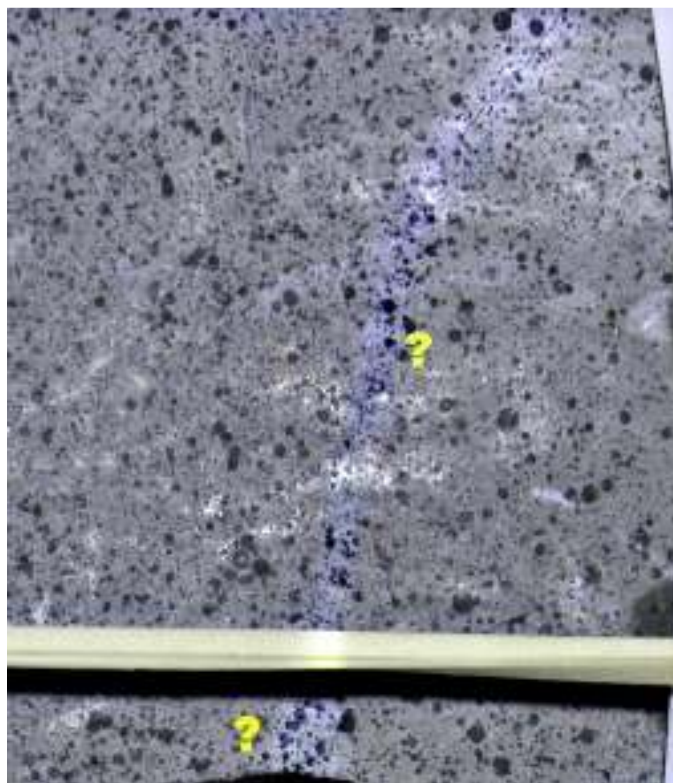
Η μορφή του διαγράμματος του straingaugesεξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο (5.2) στην ανάλυση του 6<sup>ου</sup> δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος. Η μορφή του διαγράμματος του Matlabeίναι εξίσου περίεργη όμως μπορεί να εξηγηθεί. Παρατηρώντας τις φωτογραφίες, στην 5<sup>η</sup> φωτογραφία γίνεται μια απότομη αύξηση του πλάτους του δοκιμίου η οποία είναι εμφανής και οπτικά και ταυτόχρονα ξεκινάει η αποφλοίωση εσωτερικά της οπής. Η εφελκυστική παραμόρφωση είναι υψηλή, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τότε πιθανώς δημιουργήθηκε η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή. Πράγματι, με μεγέθυνση της φωτογραφίας, φαίνεται αχνά η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή, η οποία ξεκινάει από την οπή και επεκτείνεται προς το άκρο του δοκιμίου.



Εικόνα 89

Πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή στο δοκίμιο Grout6. Η ρωγμή έχει χρωματισθεί πάνω στην εικόνα για να φαίνεται καλύτερα.

Στις επόμενες ψηφιακές εικόνες δεν εμφανίζονται αλλαγές (τουλάχιστον μακροσκοπικά), η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή εξακολουθεί να φαίνεται μόνο με μεγέθυνση των εικόνων, οπότε η παραμόρφωση παραμένει σχεδόν σταθερή. Γύρω στην 54<sup>η</sup> φωτογραφία παρατηρείται μια αποφλοιώση εσωτερικά της οπής και η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή δείχνει να κλείνει. Το δοκίμιο υφίσταται αισθητή θλίψη η οποία οδηγεί σε κλείσιμο της ρωγμής ως την αστοχία του. Το κομμάτι της τελευταίας εικόνας που ακολουθεί απεικονίζει αυτό το αισθητό κλείσιμο της ρωγμής.



**Εικόνα 90**

*Εικόνα δοκιμίου Grout6 μετά την αστοχία. Τα ερωτηματικά (?) δείχνουν τα σημεία στα οποία η ρωγμή δεν φαίνεται ούτε με μεγέθυνση. Η διαδρομή της έχει σημαδευτεί σύμφωνα με την προηγούμενη εικόνα*

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η 5<sup>η</sup> φωτογραφία στην οποία φάνηκε οπτικά η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή αντιστοιχεί σε φορτίο 8,84MPa. Εξετάζοντας τις προηγούμενες εικόνες παρατηρείται ότι φαίνεται ένα ίχνος της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής στην 3<sup>η</sup> εικόνα η οποία αντιστοιχεί σε φορτίο **4,42MPa**. Το φορτίο αυτό είναι λογικό καθώς είναι κοντά στην εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοκονιάματος ( $\sigma_t^{grout}=5,76MPa$ ). Το γεγονός ότι είναι μικρότερο από την εφελκυστική αντοχή οφείλεται στο ότι η οπή έχει μεγάλη διάμετρο σχετικά με τις διαστάσεις του δοκιμίου και η διάμετρος επηρεάζει το συντελεστή συγκέντρωσης τάσης και συνεπώς το φορτίο έναρξης της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

---

#### **6.1. Το υλικό**

##### **6.1.1. Γύψος**

Η γύψος, είναι ένα υλικό λεπτόκκοκο με χαμηλή αντοχή σε σχέση με τα πετρώματα. Για αναμίγματα με λόγο γύψου προς νερό 1,5 η αντοχή σε θλίψη προσδιορίστηκε ίση με 7,5 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 2,83 MPa και το μέτρο ελαστικότητας 3,8 GPa. Έχει δηλαδή λόγο εφελκυστικής/θλιπτικής αντοχής=38% σε αντίθεση με το 10% που συνήθως παρατηρείται στα πετρώματα. Στις εργαστηριακές δοκιμές θλίψης εμφάνισε συμπεριφορά ψαθυρού υλικού, δηλαδή η φάση όπου συμπεριφέρεται σαν άρρηκτο ελαστικό υλικό μπορεί να φτάσει και το 99,5% της συνολικής διαδρομής φόρτισης ενώ η επακόλουθη αστοχία του συμβαίνει απότομα. Αυτό προέκυψε ξεκάθαρα από τα πειράματα καθώς όλα τα φαινόμενα ρωγμάτωσης φάνηκαν λίγα δευτερόλεπτα πριν τη θραύση και σχεδόν ταυτόχρονα.

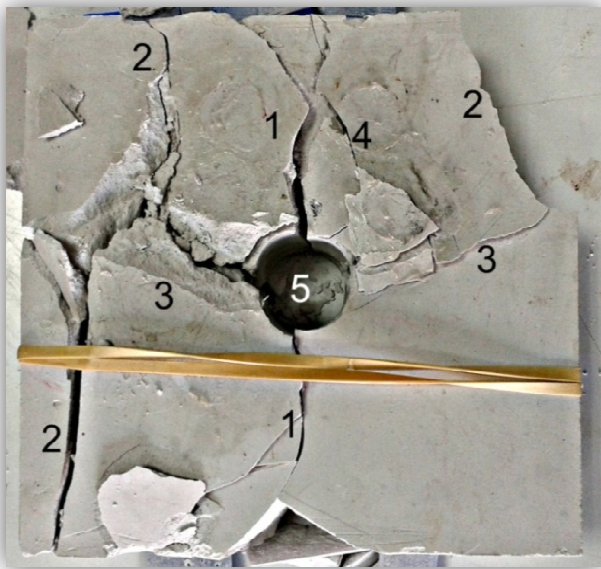
##### **6.1.2. Τσιμεντοκονίαμα**

Το τσιμεντοκονίαμα αποδείχθηκε ένα υλικό με υψηλή αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό. Ο λόγος της αντοχής σε εφελκυσμό προς την αντοχή σε θλίψη είναι 9,5%, πολύ κοντά δηλαδή στο 10% που ισχύει στα πετρώματα. Η αντοχή του σε θλίψη παρουσιάζει διακύμανση, όμως αυτό μπορεί να οφείλεται στην ανάμιξη του υλικού, καθώς αναμενόταν μικρότερη ποσότητα υλικού από όση προέκυψε κι έτσι το μίξερ που είχε επιλεγεί πιθανόν δεν επαρκούσε για την ανάδευση του υλικού. Είναι και αυτό ένα ψαθυρό υλικό, όμως σε αντίθεση με τη γύψο, έχει πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή.

#### **6.2. Πειράματα θλίψης σε δοκίμια γύψου με οπή**

Αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι επιβεβαιώνονται περισσότερες από τις παρατηρήσεις από τα πειράματα του Lajtai και των συνεργατών του σε γύψο (1975). Από 12 συνολικά πειράματα σε δοκίμια γύψου με οπή διαφόρων διαστάσεων προέκυψαν τα εξής:

1. Η μορφή αστοχίας των δοκιμίων είναι ίδια ανεξάρτητα από το μέγεθος της οπής.



1. Πρωτογενείς εφελκυστικές

2. Δευτερογενείς εφελκυστικές

3. Διάτμησης

4. Εφελκυστικές παράλληλες στο μέτωπο

5. Αποφλοιώσεις

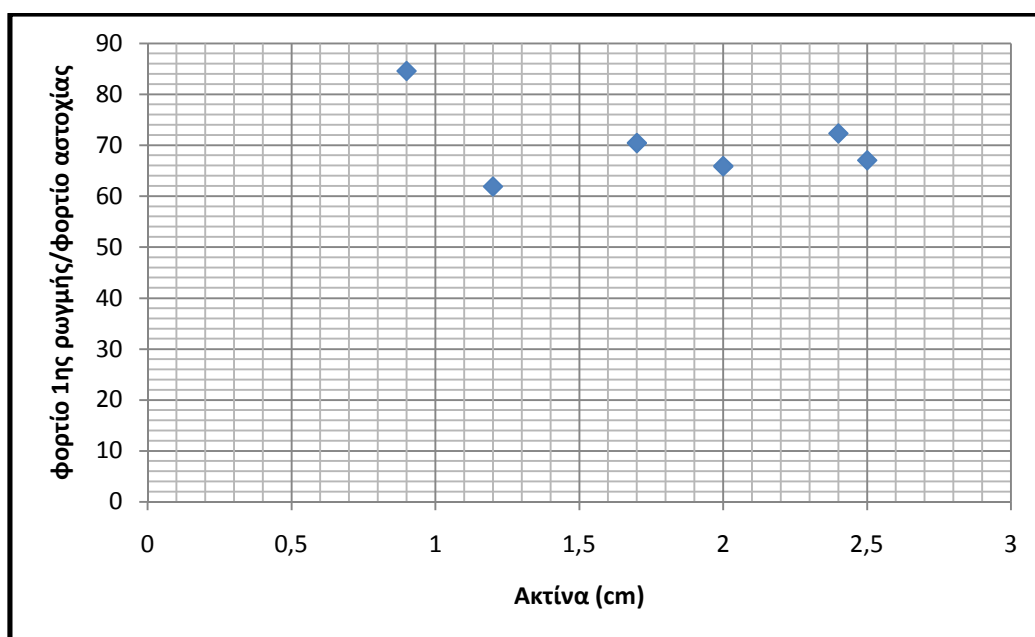
**Εικόνα 1**  
Δοκίμιο μετά την αστοχία

Οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές εμφανίζονται πρώτες ξεκινώντας από την οπή στο πάνω και κάτω μέρος της και επεκτείνονται προς τα όρια του δοκιμίου. Οι ρωγμές αυτές είναι παράλληλες στη διεύθυνση φόρτισης και καθώς εισέρχονται στη θλιβόμενη ζώνη εκτρέπονται από την ευθυγραμμία. Σε όλα σχεδόν τα πειράματα έγιναν εμφανείς, εκτός λίγων περιπτώσεων (με μικρότερους διαμέτρους οπών) όπου χρειάστηκε να πιέσουμε ελαφρά το δοκίμιο με το χέρι για να φανούν. Η οπτική παρατήρηση των δοκιμίων έγινε με κάμερες στις δύο όψεις του, η οποία συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα της ΑΕ των αισθητήρων και προέκυψε ότι υπάρχει απότομη αύξηση των γεγονότων της ΑΕ κατά την δημιουργία της ρωγμής.



**Διάγραμμα 1**  
Διάγραμμα Κτύπων-Χρόνου

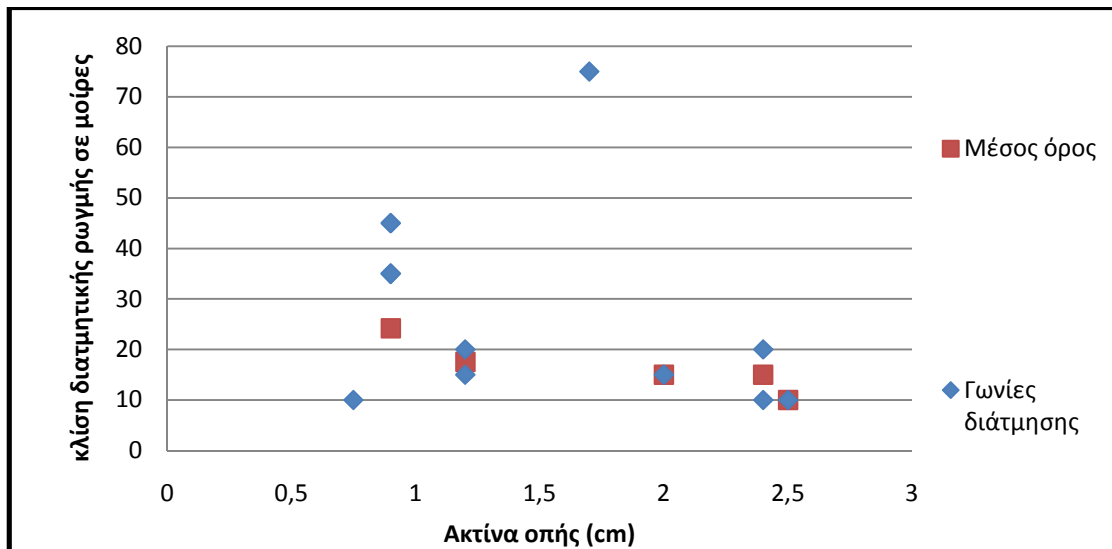
Επίσης όσο μικρότερη είναι η οπή, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που απαιτείται για την δημιουργία της πρώτης ρωγμής όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2

Στη συνέχεια σχηματίζονται οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές, ενώνονται με τις πλάγιες ρωγμές διάτμησης και πιθανόν ευθύνονται για την αστοχία του δοκιμίου. Οι δευτερογενείς αυτές ρωγμές μπορεί να μην σχηματιστούν και στις 4 πλευρές του δοκιμίου και τις περισσότερες φορές δεν σχηματίστηκαν στην ίδια στάθμη φορτίου. Συνήθως εμφανίζονται στις 3. Όσον αφορά τη διαδρομή τους, ξεκινάνε από τα όρια του δοκιμίου, σχεδόν παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης και καμπυλώνονται στη συνέχεια καθώς κατευθύνονται προς την οπή, όπου στην πορεία συναντάνε τις διατμητικές ρωγμές. Επίσης, διασχίζουν όλο το πάχος του δοκιμίου.

Οι ρωγμές διάτμησης εμφανίζονται προς το τέλος της φόρτισης προκαλώντας αποφλοιώσεις μέσα στην οπή στο σημείο έναρξής τους. Ξεκινάνε από τα όρια της οπής και επεκτείνονται προς τα άκρα του δοκιμίου. Στην διαδρομή τους, ενώνονται με δευτερεύουσες ρωγμές διάτμησης οι οποίες είναι λοξές ως προς το μέτωπο του δοκιμίου με μεγάλη κλίση ( $>60^\circ$ ). Η κλίση της διατμητικής ρωγμής σε σχέση με την οπή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Βλέπουμε ότι σε κάθε ακτίνα υπάρχει ένα εύρος γωνιών της τάξης των  $10^\circ$  το οποίο όμως είναι λογικό γιατί ακόμα και στο ίδιο δοκίμιο μπορεί να υπήρχε αυτή η διαφορά στην δεξιά και αριστερή πλευρά του δοκιμίου. Αν λάβουμε τον μέσο όρο των γωνιών διάτμησης σε κάθε διάμετρο, παίρνουμε τα κόκκινα σημεία του διαγράμματος.



Διάγραμμα 3

**Ρωγμές από εφελκυσμό** εμφανίστηκαν και παράλληλα στο μέτωπο του δοκιμίου.

Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελεί το 7<sup>ο</sup> δοκίμιο το οποίο αστόχησε σε εφελκυσμό από κάμψη. Αυτό συνέβη γιατί η οπή ήταν αρκετά μεγάλη, δημιουργήθηκε ξεκάθαρα και με μεγάλο άνοιγμα η πρώτη εφελκυστική ρωγμή και στη συνέχεια η οπή ακτίνας 2cm λειτούργησε σαν κενό που βοήθησε στην κάμψη. Επίσης στο 10 και 11<sup>ο</sup> δοκίμιο, σχηματίστηκαν 2 δευτερεύουσες εφελκυστικές ρωγμές σε κάθε πλευρά του δοκιμίου, οι οποίες ενώθηκαν με τις διατμητικές ρωγμές.

## 2. Η αστοχία είναι γενικά χαμηλής έντασης

Ανεξάρτητα τους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν (MICRO100S, R15) τα σήματα ήταν λίγα σχετικά με αυτά που αναμενόταν. Εκτός από την πρώτη ρωγμή και την αστοχία, στα ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα μπορεί να μη λαμβάνονταν και καθόλου σήματα. Επίσης δεν ήταν αρκετά έτσι ώστε να γίνει δυνατός ο εντοπισμός της θέσης των γεγονότων.

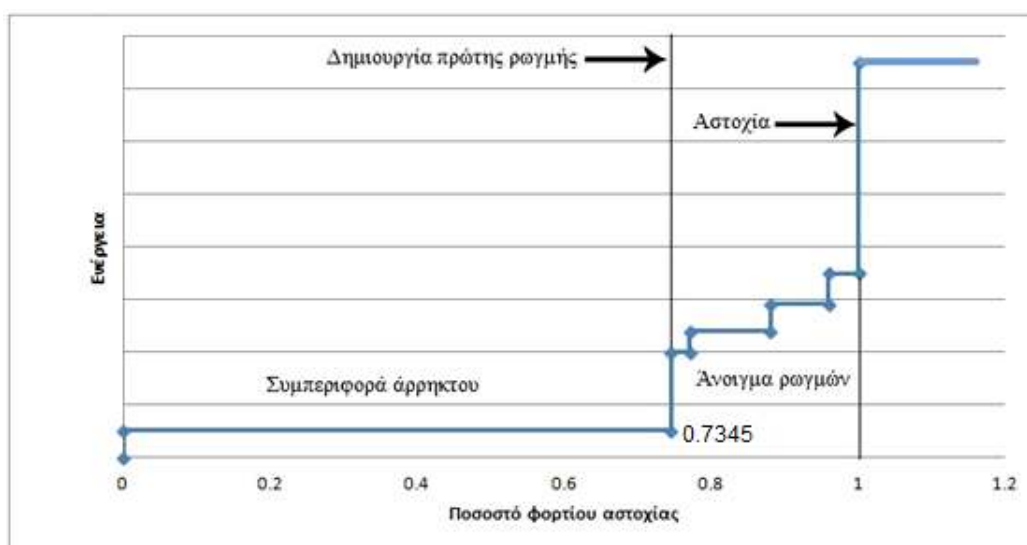
## 3. Όλα τα φαινόμενα συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα

Η εφελκυστική ρωγμή που εμφανίζεται πρώτη, σχηματίζεται γύρω στο 70% του φορτίου. Οπότε απομένει ένα 25,5% για την παρατήρηση όλων των φαινομένων θραύσης που είναι πάρα πολύ μικρό χρονικά.

## 4. Η αθροιστική ενέργεια συναρτήσε του χρόνου (ή φορτίου) έχει ίδια μορφή

Η γενική μορφή της σχέσης ενέργειας με τη στάθμη φόρτισης στις δοκιμές, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Οι τιμές της ενέργειας έχουν τοποθετηθεί ενδεικτικά. Βλέπουμε ότι η ενέργεια αυξάνεται λίγο στην αρχή της φόρτισης, στη συνέχεια παραμένει σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα, μετά αυξάνεται απότομα

στην δημιουργία της πρώτης ρωγμής, συνεχίζει να αυξάνεται σταδιακά (με σκαλοπάτια) και τελικά αυξάνεται ξανά απότομα λίγο πριν την αστοχία.



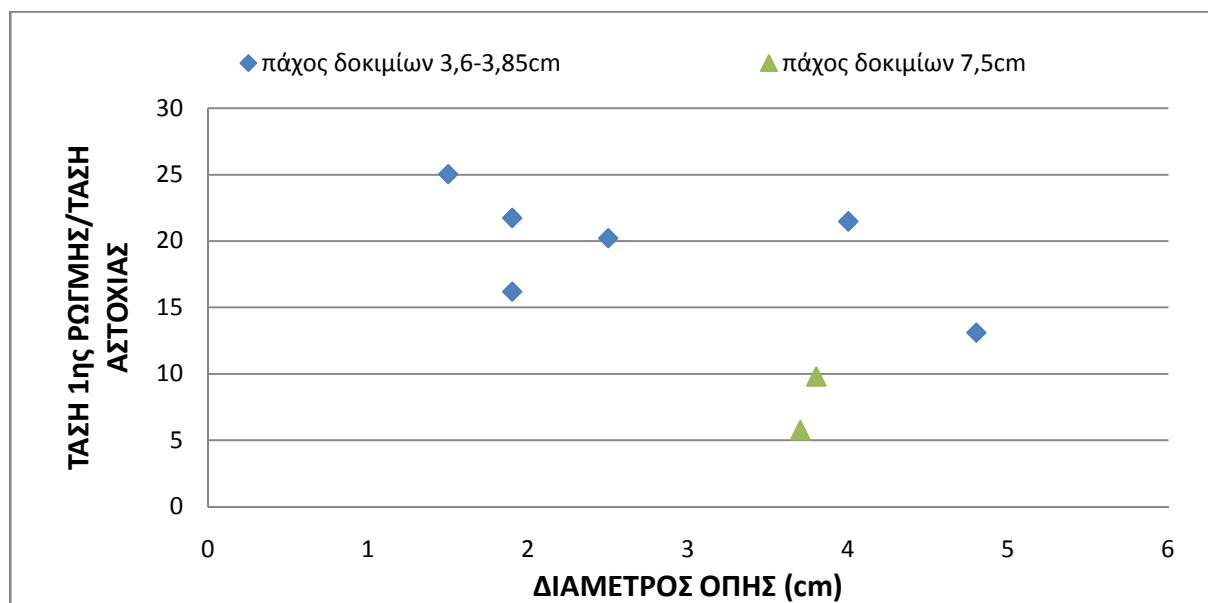
Διάγραμμα 4

### 6.3. Πειράματα θλίψης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με οπή

Από συνολικά 8 πειράματα σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος, προέκυψαν τα παρακάτω:

**1. Η μορφή αστοχίας των δοκιμών είναι ίδια ανεξάρτητα από το μέγεθος της οπής.**

Οι πρωτογενείς εφελκυστικές ρωγμές που δημιουργούνται πρώτες σύμφωνα με τη θεωρία, δεν είναι μακροσκοπικά εμφανείς σε κανένα από τα δοκίμια. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο χρώμα του δοκιμίου και στην μεγάλη εφελκυστική αντοχή του που δεν επιτρέπει μεγάλο άνοιγμα της ρωγμής. Παρόλα αυτά η ρωγή γίνεται σύμφωνα με τη θεωρία αλλά δεν επεκτείνεται ως το άκρο του δοκιμίου αλλά συνήθως σε απόσταση μια διάμετρο οπής. Το διάγραμμα που ακολουθεί δείχνει τη σχέση μεταξύ της τάσης έναρξης της ρωγμής προς την τάση αστοχίας με τη διάμετρο της οπής. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος της οπής, τόσο νωρίτερα εμφανίζεται η εφελκυστική ρωγή, όπως έγινε και στη γύψο και σύμφωνα με τη θεωρία. Οι οπές με διάμετρο 3,7cm και 3,8cm αντιστοιχούν στα δοκίμια 7 και 8 που είχαν μεγαλύτερο πάχος.



*Διάγραμμα 5*

Οι δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές δημιουργούνται συνήθως στις 3 από τις 4 πλευρές του δοκιμίου και σε μερικά δοκίμια δημιουργήθηκαν και δύο δευτερογενείς εφελκυστικές ρωγμές σε κάθε πλευρά του (π.χ. grout6). Οι ρωγμές αυτές ενώνονται με τις ρωγμές διάτμησης και προκαλούν την αστοχία. Η εμφάνισή τους γίνεται στο τέλος των δοκιμών λίγο πριν την αστοχία και μαζί με την εμφάνιση της αποφλοίωσης εσωτερικά της οπής που σηματοδοτεί την έναρξη των ρωγμών διάτμησης.

**Ρωγμές από εφελκυσμό** σχηματίστηκαν παράλληλα στο μέτωπο του δοκιμίου όχι όμως σε όλα τα δοκίμια. Στο δοκίμιο grout7 που έχει διαχωριστεί πλήρως μετά την επαναφόρτιση, φαίνονται ξεκάθαρα οι ρωγμές που είναι παράλληλες ως προς το μέτωπο του δοκιμίου.



*Εικόνα 2*

*Εικόνα του δοκιμίου grout 7 όπου φαίνεται η παράλληλη εφελκυστική ρωγμή.*

Οι ρωγμές διάτμησης σε όλα τα δοκίμια εμφανίστηκαν η μια με κατεύθυνση προς τα πάνω και η άλλη με κατεύθυνση προς τα κάτω. Η κλίση τους ήταν της τάξης των 70-80° σε όλα τα δοκίμια ανεξάρτητα με τη διάμετρο της οπής. Η έναρξή τους σηματοδοτείται από την δημιουργία αποφλοιώσεων εσωτερικά της οπής που συνέβη συνήθως προς το τέλος των δοκιμών. Υπήρχαν βέβαια και δοκιμές που οι αποφλοιώσεις ξεκίνησαν σχεδόν ταυτόχρονα με την πρωτογενή εφελκυστική ρωγμή όπως π.χ. στο δοκίμιο grout 6.

Οι αποφλοιώσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου ήταν περιορισμένες και εντοπίστηκαν στα σημεία έναρξης των διατμητικών ρωγμών και στα άκρα λόγω μη επιπεδότητας.

## ***2. Αυξημένη ακουστική δραστηριότητα***

Η ακουστική δραστηριότητα του υλικού ήταν υψηλότερη σε σχέση με τα δοκίμια της γύψου γι' αυτό επιλέχθηκε κατώφλι στα **45dB** για τον περιορισμό των σημάτων. Ο αριθμός των σημάτων που λήφθηκαν ήταν αρκετά όχι όμως ικανά να προσδιορίσουν τη θέση έναρξης της ρωγμάτωσης, όπως και στη γύψο. Επίσης σε αντίθεση με τη γύψο, δεν υπήρχαν μεγάλα διαστήματα που δεν λαμβάνονταν σήματα.

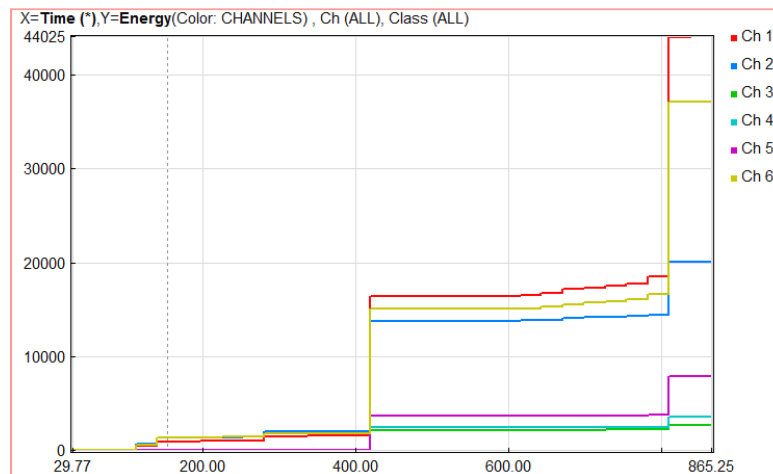
## ***3. Τα φαινόμενα συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα***

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πρωτογενής εφελκυστική ρωγμή δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί αλλά από τη γενική παρατήρηση προέκυψε λίγο χαμηλότερα από την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Οι δευτερογενείς εφελκυστικές εμφανίζονται μαζί με τις ρωγμές διάτμησης προς το τέλος της δοκιμής.

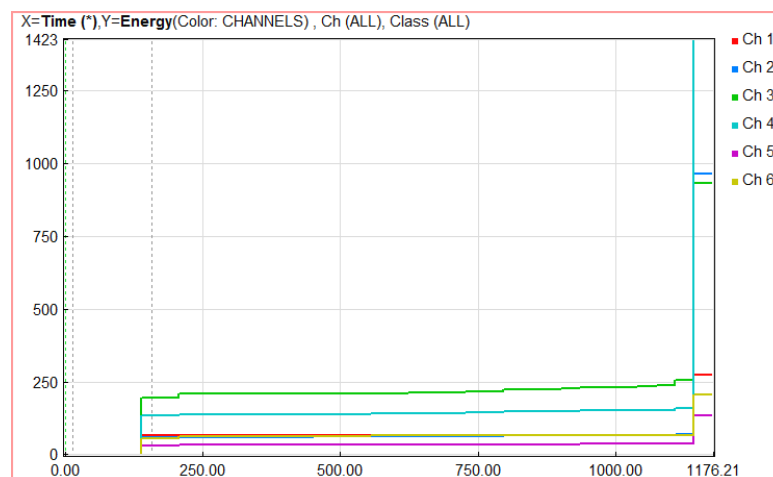
## ***4. Η αθροιστική ενέργεια συναρτήσεαι του χρόνου (ή φορτίου) δεν έχει ίδια μορφή σε όλα τα δοκίμια***

Σε αντίθεση με τα δοκίμια της γύψου, η μορφή των διαγραμμάτων της αθροιστικής ενέργειας δεν είναι ίδια σε όλα τα δοκίμια. Αντίθετα παρουσιάζει δύο διαφορετικές μορφές. Η πρώτη μορφή παρουσιάζει ένα έντονο σκαλοπάτι κατά την έναρξη της φόρτισης που οφείλεται στην δημιουργία της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής (κι αυτό όχι σε όλα), στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά αλλά με χαμηλό ρυθμό, κάπου στη μέση της φόρτισης παρουσιάζει ένα μεγάλο σκαλοπάτι και λίγο πριν την αστοχία αυξάνεται ακόμη πιο απότομα. Η δεύτερη μορφή είναι ίδια με παραπάνω με τη διαφορά ότι στη μέση της φόρτισης δεν υπάρχει κανένα σκαλοπάτι αλλά συνεχίζει την σταδιακή αύξηση.

### 1<sup>η</sup> μορφή (grout 1)



### 2<sup>η</sup> μορφή (grout 3)



Διαγράμματα 6

## 6.4.Συμπεράσματα της μεθόδου DIC

Με τα πειράματα που διεξήχθησαν προέκυψαν τα εξής:

1. Το **μοτίβο** με ματ σπρέι είναι πολύ ικανοποιητικό αρκεί να διαθέτει διαφόρων μεγεθών κηλίδες.
2. Όπως αποδείχθηκε με ένα απλό πείραμα λήψης φωτογραφιών με κυμαινόμενο φωτισμό, το πρόγραμμα συσχέτισης εικόνων αντιλαμβάνεται την **αλλαγή της φωτεινότητας** σαν παραμόρφωση, εισάγοντας έτσι ένα σφάλμα στις μετρήσεις. Έτσι λοιπόν πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην φωτεινότητα. Οι γυαλιστερές επιφάνειες γύρω από το δοκίμιο πρέπει να καλύπτονται για να μη δημιουργούν περιοχές ανάκλασης του φωτός κατά τη λήψη φωτογραφιών της



δοκιμής και ο φωτισμός πρέπει να είναι έντονος πάνω στο δοκίμιο για να μην δημιουργούνται σκιές ώστε να μην επηρεάζει ο περιβάλλον χώρος τη φωτεινότητα των εικόνων (π.χ. ανοιχτά παράθυρα). Στην παρούσα διπλωματική δοκιμάστηκαν διάφορες πηγές φωτός γι' αυτό και υπήρξε μεγάλη επιρροή της φωτεινότητας στις φωτογραφίες και συνεπώς στη μέτρηση της παραμόρφωσης.

3. Και οι δυο **ψηφιακές μηχανές** έδωσαν ικανοποιητικές φωτογραφίες για την ψηφιακή συσχέτιση εικόνων. Όμως, δεν ήταν δυνατόν να εκτιμηθεί ο τυχόν θόρυβος που προέρχεται από τον αισθητήρα CMOS των φωτογραφικών μηχανών. Επίσης, δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν φωτογραφίες σε διάστημα μικρότερο από 5 sec. Ενδεχομένως, η χρήση μηχανής με αισθητήρα CCD και με δυνατότητα λήψης τουλάχιστο 1 φωτογραφία ανά δευτερόλεπτο να έδινε καλύτερα αποτελέσματα.
4. Όπως αποδείχθηκε από τα πειράματα, οι **ψηφιακές εικόνες** δίνουν μια καθαρή και λεπτομερή εικόνα των δοκιμίων κατά τη φόρτισή τους. Η λήψη ανά σταθερό χρονικό διάστημα δίνει τη δυνατότητα συσχέτισμού της κάθε φωτογραφίας με τη στάθμη φόρτισης. Υπήρχαν περιπτώσεις, κυρίως στο τσιμεντοκονίαμα, όπου μακροσκοπικά (οπτικά ή με το βίντεο) δεν φαινόταν οι ρωγμές, όμως με μεγέθυνση των ψηφιακών εικόνων, φάνηκαν οι λεπτομέρειες που αναζητούνταν σε κάθε περίπτωση. Ο χρόνος επεξεργασίας και παρατήρησης των εικόνων είναι αρκετός όμως αξίζει όταν επιδιώκεται λεπτομέρεια.
5. Ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης μέσω των εικόνων αυτών, αποτελεί ένα ζήτημα που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, **είναι δυνατός ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης** μέσω της ψηφιακής συσχέτισης εικόνων. Στην παρούσα διπλωματική, τα πειράματα προσδιορισμού της παραμόρφωσης έγιναν σε δεύτερη φάση με εξοπλισμό χαμηλού κόστους (εμπορικές φωτογραφικές μηχανές που χαρακτηρίζονται ως εισαγωγικές DSLR). Σκοπός των παραπάνω ήταν να εξακριβωθεί αν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων χωρίς εξειδικευμένο εξοπλισμό και χωρίς εμπορικό λογισμικό ανά πάσα στιγμή που χρειασθεί, ή αν χρειάζεται στήσιμο και συγκεκριμένες ρυθμίσεις που απαιτούν μεγάλο χρόνο προετοιμασίας. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις, στις περισσότερες περιπτώσεις, έφτασαν την ίδια τάξη μεγέθους και είχαν την ίδια μορφή με το τροπόμετρο. Υπήρχαν και περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα μπορεί μη ήταν αναμενόμενα, όμως η λεπτομερής οπτική εξέταση έδωσε δεδομένα που δεν καταγράφηκαν από τα τροπόμετρα (π.χ.δοκίμιο grout 6).

## **6.5.Γενικές παρατηρήσεις**

### **1. Αξιοπιστία των μετρήσεων των τροπόμετρων**

Όπως προέκυψε από τα πειράματα, διατηρείται μια επιφύλαξη σχετικά με τις μετρήσεις των τροπόμετρων. Η ακρίβεια ελέγχθηκε με ταυτόχρονη χρήση LVDT's σε

κάποια από τα πειράματα, αλλά και εκτιμήθηκε με βάση την εμπειρία από παλαιότερα πειράματα που έχουν εκτελεσθεί στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Διάνοιξης Σηράγγων. Η κόλλα με την οποία στερεώθηκαν τα τροπόμετρα στις δοκιμές ήταν κυανοακρυλική κόλλα ταχείας στερεοποίησης η οποία πιθανόν να μη μπορεί να μεταφέρει τις παραμορφώσεις λόγω αυξημένου μέτρου ελαστικότητας. Επίσης ενδέχεται η κόλλα να διεισδύει στα κενά του υλικού και να δημιουργεί μια τοπική ζώνη ενίσχυσης αλλοιώνοντας έτσι τις μετρήσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αμφιβολία της ακρίβειας των δεδομένων παραμόρφωσης σε ορισμένες δοκιμές με αποτέλεσμα να υπάρχει μια επιφύλαξη σχετικά με τη σύγκριση με την ψηφιακή συσχέτιση εικόνων.

## **2. Εξήγηση του μη εντοπισμού της πηγής της ακουστικής εκπομπής**

Όπως αποδείχθηκε από την προεργασία, οι αισθητήρες είναι ικανοί να εντοπίσουν τη θέση της πηγής με μικρή διασπορά γύρω από αυτήν. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, τα σήματα για τον εντοπισμό της πηγής μπορεί να επικαλύπτονταν από άλλες πηγές σημάτων όπως π.χ. επιφανειακή απόσπαση του υλικού, τοπικές αποφλοιώσεις από την ταινία στερέωσης των αισθητήρων, έναρξη μικρορωγμών από τοπικές ατέλειες του υλικού, μικροδομήσεις των αισθητήρων, κακή επαφή των αισθητήρων λόγω απορρόφησης του υλικού σύζευξης από το υλικό, μη αναμενόμενο θόρυβο από το περιβάλλον. Οι παραπάνω παράγοντες πιθανώς προκάλεσαν διασπορά των σημάτων σε μεγαλύτερη επιφάνεια του δοκιμίου με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο εντοπισμός της πηγής έναρξης.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων, το οποίο πρέπει να επιλεγεί με βάση την ακουστική δραστηριότητα του υλικού. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη αισθητήρων, ένα με δεσπόζουσα συχνότητα 150kHz και ένα με ευρύ φάσμα συχνοτήτων έως 950kHz. Ενδεχομένως, η χρήση αισθητήρων με μεγαλύτερες συχνότητες να έδινε πιο ακριβή αποτελέσματα. Η ικανότητα εντοπισμού βέβαια εξαρτάται και από το κατώφλι της ακουστικής εκπομπής που έχει οριστεί. Το κατώφλι επελέγη ώστε να μην καταγράφει θόρυβο από το περιβάλλον καθώς το εργαστήριο στεγάζεται σε ισόγειο χώρο. Με την επιλογή μικρότερης τιμής κατωφλίου, καταγράφονταν στο τσιμεντοκονίαμα περίπου 40.000 σήματα/αισθητήρα, πλήθος μη διαχειρίσιμο που αύξανε το χρόνο επεξεργασίας. Επίσης ενδεχόμενη πηγή θορύβου είναι η Σερβουδραυλική μηχανή φόρτισης. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, είναι πιθανό να χάθηκαν σήματα ικανά για τον εντοπισμό της πηγής.

## **3. Αξιοπιστία εντοπισμού φορτίου πρώτης ρωγμής**

Από το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων και παρατηρήσεων προκύπτει μία δυσκολία στον ακριβή εντοπισμό του φορτίου εκκίνησης της 1<sup>ης</sup> ρωγμής. Η οπτική

παρατήρηση δεν είναι αρκετή για τον εντοπισμό της σε όλες τις περιπτώσεις καθώς θα πρέπει ο παρατηρητής να έχει καλή και κοντινή οπτική επαφή με το δοκίμιο χωρίς να διακινδυνεύει να τραυματισθεί από κάποιο θραύσμα του υλικού. Η παρατήρηση μέσω βιντεοκάμερας μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό του χρόνου εκκίνησης της ρωγμής, υπό την προϋπόθεση ότι η ρωγμή θα έχει πάχος τουλάχιστον 1 pixel. Υπάρχει η πρόσθετη δυσκολία συγχρονισμού των βίντεο με την εκτέλεση του πειράματος καθώς οι συνήθεις βιντεοκάμερες δεν έχουν κάποια έξοδο που να συνδέεται σε καταγραφικό. Η παρατήρηση μέσω της καταγραφής της παραμόρφωσης από τροπόμετρα δίνει στοιχεία για το φορτίο στο οποίο η ρωγμή διέρχεται από το τροπόμετρο. Όμως η κόλλα στερέωσής τους επάνω στο δοκίμιο μπορεί να προκαλεί τοπική ενίσχυση του υλικού και να αλλοιώνει τα αποτελέσματα. Εξάλλου, η χρήση τροπόμετρων για την παρατήρηση του συνόλου της ρωγμάτωσης του δοκιμίου μπορεί να θεωρηθεί ως μεγάλου κόστους. Η δοκιμή εφαρμογής της μεθόδου DIC έδωσε ορισμένα ικανοποιητικά αποτελέσματα, πλην όμως για την παρούσα εργασία αυτά χαρακτηρίζονται **περισσότερο ως ποιοτικά και λιγότερο ως ποσοτικά**. Τέλος, η καταγραφή της ακουστικής εκπομπής έδωσε στοιχεία για την έναρξη της πρώτης ρωγμής που όμως δεν ήταν δυνατόν, στις περισσότερες περιπτώσεις, να επιβεβαιωθούν από άλλες παρατηρήσεις. Η αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας δεν ήταν δυνατόν να επιβεβαιωθεί με εντοπισμό της θέσης της πηγής της ΑΕ, καθώς σε λίγα πειράματα εντοπίστηκαν γεγονότα ΑΕ στη διαδρομή ανάπτυξης των πρωτογενών εφελκυστικών ρωγμών. Κατά συνέπεια, τα φορτία 1ης ρωγμής, που αναφέρονται στην εργασία, προέκυψαν μετά από συναξιολόγηση όλων των παραπάνω παραγόντων.

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

---

- **AE** - Ακουστική εκπομπή, Accoustic emission
- **ASL** - Average Signal Level σε dB (μέση στάθμη σήματος)
- **cm** – centimeters (εκατοστά)
- **dB** - decibel (μονάδα λογαριθμικής κλίμακας που μετράει τη στάθμη της ηχητικής έντασης)
- **DIC**- Digital Image Correlation (Ψηφιακή συσχέτιση εικόνων)
- **EMI** - Electromagnetic Interference (Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές, κάθε σήμα ή εκπομπή που ακτινοβολείται στον χώρο ή άγεται σε καλώδια τροφοδοσίας ή σημάτων και θέτει σε κίνδυνο τη λειτουργία συστημάτων ασύρματης πλοήγησης)
- **HDT** - Hit Definition Time (Ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος)
- **HLT** - Hit Lockout Time (Ο χρόνος αναμονής του συστήματος ώσπου να ξεκινήσει νέα καταγραφή)
- **Kg**- Kilograms, Κιλά
- **kHz** – kilo Hertz (μονάδα μέτρησης συχνότητας = 10<sup>3</sup> Hz)
- **κλπ.** – Και τα λοιπά
- **kN**- kilo Newton (μονάδα μέτρησης της δύναμης κατά το σύστημα SI =10<sup>3</sup> Newton)
- **LEFM** - Linear Elastic Fracture Mechanics (Γραμμική ελαστικότητα Θραυστομηχανικής)
- **Lt**- litre (Λίτρο)
- **m/s** – meters per second (Μέτρα ανά δευτερόλεπτο)
- **MHz** – Mega Hertz (μονάδα μέτρησης συχνότητας = 10<sup>6</sup> Hz)
- **MKE** - Μη Καταστροφικού Ελέγχου
- **mm** – millimeters (Χιλιοστά)
- **MPa**- Mega Pascal
- **mV** – micro Volt (μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης = 10<sup>-6</sup> Volt)
- **sec**- second, δευτερόλεπτο)
- **PAC** - Physical Acoustics Corporation (Εταιρία κατασκευής αισθητήρων ακουστικής εκπομπής)
- **Π.χ.** – Παραδείγματος χάριν
- **PDT** - Peak Definition Time (Ο μέγιστος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του σήματος)
- **PCI** - Peripheral Component Interconnect (υλικό δίαυλου ηλεκτρονικού υπολογιστή)
- **PZT**- lead-zirconate-titanate (κεραμικό υλικό το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα)
- **P1b** – pencil lead break (δοκιμή εξασθένισης σήματος προτεινόμενη ή αλλιώς δοκιμή Hsu Nielsen)
- **PUNDIT** - Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester (Όργανο για την πραγματοποίηση δοκιμών μέτρησης της ταχύτητας υπερήχων)
- **RMS** - Root Mean Square σε Volts τετραγωνικός μέσος όρος, στατικό μέγεθος μέτρησης της έντασης μιας ποσότητας που μεταβάλλεται
- **Rpm** – rotates per minute, στροφές το λεπτό
- **SUR** - Stability of Underground Gas Storage Reservoirs (Πρόγραμμα υποστηριζόμενο από την Pipeline Research Committee για τη μελέτη της ευστάθειας των υπόγειων ταμιευτήρων αερίου)
- **URMS** – Root mean square velocity (μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους)

## Βιβλιογραφία 1ου κεφαλαίου

---

- Μηχανική συμπεριφορά των υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/mhx\\_symp\\_ylik\\_VII.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_VII.pdf)
- Μηχανική Συμπεριφορά των υλικών, Τμήμα μηχανικών παραγωγής και διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης  
<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/3%20MHXANIKH%20SYMPERIFORAw.pdf>
- Paterson M.S, Wong T, 2005, “Experimental Rock Deformation-The Brittle Field”, Second Edition, Springer Berlin Heidelberg New York
- Hochgraf F., 2004, Ductile and brittle fracture, New Hampshire Materials Laboratory, <http://nhml.com/ductile--brittle-fracture.cfm>
- Α.Ι. Σοφιανός & Π.Π. Νομικός, 2008, Σημειώσεις μαθήματος «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων», ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων έργων», [http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/uploads/4/4/A04\\_Fracture.pdf](http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/uploads/4/4/A04_Fracture.pdf)
- Αντωνογιαννάκη Ε., 2004, «Η Θραυστομηχανική ως εργαλείο για την ανάλυση και σχεδιασμό ενίσχυσης ρωγματωμένων κατασκευών», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
- <http://www.metalpass.com/metaldoc/paper.aspx?docID=705>
- Madhukar Vable, «Intermediate Mechanics of Materials», Chapter 7, Michigan Department of Mechanical Engineering  
[http://www.me.mtu.edu/~mavable/MEEM4405/Energy\\_slides.pdf](http://www.me.mtu.edu/~mavable/MEEM4405/Energy_slides.pdf)
- Eberhardt E. et.al 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock
- Παπαδόπουλος Β., 2007, Σημειώσεις του μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα
- Carter B.J., Lajtai E.Z., Petukhov A, 1991, «Primary and remote fracture around underground cavities», International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics Vol.15, 21-40,
- Carter B.J., 1992, «Size and Stress Gradient Effects on Fracture Around Cavities», Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer-Verlag
- Lajtai, E. Z., Carter B. J., Ayari, M. L. (1990): Criteria for brittle fracture in compression. Engng. Fracture Mech. 37, 59--74.
- Lajtai E. Z., Lajtai V. N., 1975, «The collapse of cavities», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 12, pp. 81-86. Pergamon Press
- Sih G.C., 1973, «Some basic problems in fracture mechanics and new concepts»
- Dzik E.J. and Lajtai E.Z, 1996, «Primary fracture propagation from circular cavities loaded in compression», International Journal of Fracture 79: 49-64, Kluwer Academic Publishers
- Lajtai E.Z., 1971, «Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, pp. 569-578, Pergamon Press

- Bieniawski Z.T., 1968, «Mechanism of brittle fracture of rock», Part I. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 4, 395-406
- Gonano L.P., 1974, «Stress gradient and size effect phenomena in brittle materials», Ph.D. Dissertation, James Cook University, Townsville, Australia
- Baecher G.B., Einstein H.H., 1981, «Size effect in rock testing», Geophysical Research Letters
- Nesetova V., Lajtai E.Z., 1972, «Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 10. pp. 265-284, Pergamon Press
- Diederichs MS, Kaiser P.K., Eberhardt E., 2004, «Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of nearface stress rotation». Int J Rock Mech Min Sci 2004;41:785–812
- Cai M, Kaiser P.K., Tasaka Y., Maejima T., Morioka H., Minami M., 2004, «Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations», IntJ.RockMech.Min.Sci 2004;41:833–47

## Βιβλιογραφία 2ου κεφαλαίου

---

- Μπακογιάννης Σ, 2011. Διπλωματική εργασία με τίτλο «Ακουστική Εκπομπή κατά την καταπόνηση βωξίτη» Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών ΕΜΠ
- Jaeger J.C., Cook N.G.W, and Zimmerman R.W., 2007. Fundamentals of Rock Mechanics (Fourth Edition)
- Κυπριωτάκη Α., 2012, Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία «Εργαστηριακές Δοκιμές Ακουστικής Εκπομπής σε δοκίμια άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος», ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», ΕΜΠ
- [http://www.envirocoustics.gr/acoustic\\_emission\\_theory\\_gr.htm](http://www.envirocoustics.gr/acoustic_emission_theory_gr.htm)
- Paterson M. S., Wong T., 2005 Experimental Rock Deformation, the Brittle Field, Springer 2005 (Second Edition)
- NDT Resource Center, [http://www.ndt-ed.org/index\\_flash.htm](http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm)
- Hardy H.R., 2003, Accoustic Emission/Microseismic Activity, Principles, Techniques and Geotechnical Applications, Volume 1, A.a.Balkema Publishers
- Unnhórsson R., 2013, Hit Detection and Determination in AE Bursts, INTECH
- Κατσικογιάννη Γ. Παναγιώτα, ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», ΕΜΠ 2006
- Lockner D., 1993, Room temperature creep in saturated granite, Journal of Geophysical Research 98
- Ettouney M.M., 2012 Infrastructure health in Civil engineering, Theory and Components, CRC Press, Taylor and Francis Group
- Vahaviolos S.J., 1999, ASTM, Acoustic Emission: Standards and Technology Update,

- Hardy, H.R. Jr., Mowrey, G.L. and Kimble, E.J. Jr. 1981. A Microseismic Study of an Underground Natural Gas Storage Reservoir, Volume I—Instrumentation and Data Analysis Techniques, and Field Site Details, American Gas Association, Inc., Arlington, Virginia, A.G.A. Cat. No. L-51396.

## **Βιβλιογραφία 3ου κεφαλαίου**

---

- Tung Shih-Heng, Kuo Jui-Chao, Shih Ming-Hsiang, 2005, Strain Distribution Analysis Using Digital-Image-Correlation Techniques
- Wikipedia, Digital Image Correlation
- Pohl H., Weibrecht O., Wiesenburg U., Arrangement for control of aerial cameras, US Patent 3997795, filed 4-23-1975
- Bruck H.A., McNeill S.R., Sutton M.A., Peters W.H. III, 1989, ExpMech 29 261
- Peters W.H., 1982, Digital imaging techniques in experimental stress analysis, Optical Engineering, vol. 21, pp. 427-431
- Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, M.A. and Peters, W.H., 1985 Application of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics”, Experimental Mechanics, 25(3), p.232 ,
- Parker W.J., 2009, Development and Implementation of a low cost image correlation system to obtain full-field in-plane displacement and strain data, Montana State University, April
- Crammond G. 2011, Speckle pattern characterisation for high resolution digital imagecorrelation, University of Southampton

## **Βιβλιογραφία 4ου κεφαλαίου**

---

- Aggelis D. and Shiotania T., 2007. Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media
- RILEM Technical Committee -Masayasu Ohtsu, 2010, Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete,