



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Τομέας Μηχανικής

Εφαρμογή καινοτόμων πειραματικών τεχνικών
για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς
δομικών μελών αρχαίων μνημείων
και αριθμητική προσομοίωση

Ιωάννα Νικ. Δακανάλη
Διπλ. Πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π

Αθήνα

Ιανουάριος 2017

Διατριβή για την απονομή του ακαδημαϊκού τίτλου
της διδάκτορος του Ε.Μ.Π



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**Εφαρμογή καινοτόμων πειραματικών τεχνικών
για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς
δομικών μελών αρχαίων μνημείων
και αριθμητική προσομοίωση**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΑΣ ΝΙΚ. ΔΑΚΑΝΑΛΗ
Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΣΤΑΥΡΟΣ Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**Εφαρμογή καινοτόμων πειραματικών τεχνικών
για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς
δομικών μελών αρχαίων μνημείων
και αριθμητική προσομοίωση**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΑΣ ΝΙΚ. ΔΑΚΑΝΑΛΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

1. Σ.Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ,
Καθ. Ε.Μ.Π (Επιβλέπων)
2. Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ,
Καθ. University of Kentucky, USA
3. Γ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ,
Ομότιμος Καθ. Ε.Μ.Π

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙ-
ΤΡΟΠΗ:**

1. Σ.Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ,
Καθ. Ε.Μ.Π (Επιβλέπων)
2. Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ,
Καθ. University of Kentucky, USA
3. Γ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ,
Ομότιμος Καθ. Ε.Μ.Π
4. Δ. ΤΡΙΑΝΤΗΣ, Καθ. ΤΕΙ Αθήνας
5. Δ. ΚΑΡΑΛΕΚΑΣ,
Καθ. Πανεπιστημίου Πειραιώς
6. Α. ΜΑΡΙΝΕΛΛΗ,
Λέκτορας. Edinburgh Napier University
7. Ε. ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ, Καθ. Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2017

«Σφίγγω ήσυχα, πονετικά, ένα σβώλο κρητικό χώμα στη φούχτα μου, το κρατούσα το χώμα ετούτο πάντα μαζί μου, σε όλες μου τις περιπλάνησες, και στις μεγάλες μου αγωνίες το' σφιγγα μέσα στη φούχτα μου κι έπαιρνα δύναμη, δύναμη μεγάλη, σαν να' σφιγγα το χέρι φίλου αγαπημένου.»

N. Καζαντζάκης

Στην πολυαγαπημένη πατρίδα,
την Κρήτη

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κ. Σταύρο Κ. Κουρκουλή που μου γνώρισε τον όμορφο κόσμο των μνημείων και με βοήθησε να μάθω να σκέφτομαι διαφορετικά σαν μηχανικός.
- Τον καθηγητή κ. Δήμο Τριάντη για τη βοήθεια του και για τις εκρηκτικές συζητήσεις μας που πάντα μου έδιναν τροφή για περαιτέρω έρευνα και σκέψη.
- Τους συνεργάτες μου στο εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του ΕΜΠ και στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Διατάξεων και Υλικών του ΤΕΙ Αθήνας για τη στήριξη και τη βοήθεια.
- Τον φίλο και συνεργάτη Ιγνάτιο Χίου, ειδικευμένο μαρμαροτεχνίτη των έργων αποκατάστασης του Παρθενώνα για την πολύτιμη βοήθεια του στην παρασκευή των απαραίτητων δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.
- Τον Γιώργο Ζαχαριάδη, ηλεκτρολόγο μηχανικό για τη βοήθεια του στο κομμάτι των αριθμητικών προσομοιώσεων.
- Τέλος, την εταιρεία Δαμιανός Μ. Στρομπούλης Ε.Π.Ε για τα υλικά που μου παρέιχε για την παρασκευή των κονιαμάτων που χρειάστηκαν στην παρούσα διατριβή.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Μέρος 1^ο	9
1. Εισαγωγή	9
1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	9
1.2 Τα Χαρακτηριστικά των μνημείων της Ακρόπολης.....	11
1.3 Παρθενώνας.....	12
2. Αποκαταστάσεις Μνημείων.....	15
2.1 Βασικές αρχές αναστήλωσης και αποκατάστασης μνημείων	15
2.2 Η ιστορία των επεμβάσεων στα μνημεία της Ακρόπολης των Αθηνών.....	16
3. Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης/ αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών.....	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Αρχικά υλικά δόμησης.....	21
3.2.1 Πεντελικό μάρμαρο.....	21
3.2.2 Αρχαίος δομικός σίδηρος.....	22
3.2.3 Μόλυβδος.....	23
3.3 Υλικά συντήρησης-αποκατάστασης μνημείων της Ακρόπολης.....	24
3.3.1 Μάρμαρο Διονύσου.....	24
3.3.2 Κονιάματα	28
3.3.3 Τιτάνιο.....	33
4. Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών.....	35
4.1 Εισαγωγή.....	35
4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων καταγραφών ΑΕ.....	37
4.3 Ακουστικοί αισθητήρες.....	41
4.4 Βαθμονόμηση συστήματος- Σημαντικές παράμετροι	42
4.5 Διάκριση σημάτων ακουστικών εκπομπών.....	44
5. Παραγωγή Ηλεκτρικών Σημάτων.....	47
5.1 Εισαγωγή.....	47
5.2 Διαταραχές- ατέλειες υλικών- dislocations	47

Περιεχόμενα

5.3	Σημειακές ατέλειες	47
5.3.3	Γραμμικές ατέλειες-γραμμοαταξίες	48
5.3.4	Επίπεδες ατέλειες	50
5.3.5	Ατέλειες τριών διαστάσεων.....	51
5.4	Γενεση γραμμοαταξιων	51
5.5	Το ρεύμα λόγω μετάθεσης γραμμοαταξιών (dislocations).....	53
5.6	Μελέτη φαινομένων κατά τη θραύση των υλικών	54
5.7	Πιεζοηλεκτρισμός- Παραγωγή ρεύματος λόγω παραμόρφωσης.....	56
5.8	Εκπομπές σημάτων θραύσης– Στατικός ηλεκτρισμός.....	58
5.9	Μηχανικώς διεγερόμενα ρεύματα- Pressure Stimulated Currents (PSC)	60
Μέρος 2^ο	65
6.	Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου ...	65
6.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	65
6.2	Περιγραφή μετρητικών συστημάτων- πειραματικής διαδικασίας.....	66
6.3	Δοκίμιο Tc04_01 με μήκος εγκοπής 4cm.....	71
6.4	Δοκίμιο Tc04_02 με μήκος εγκοπής 4cm.....	80
6.5	Δοκίμιο Tc02_01 με μήκος εγκοπής 2cm.....	88
6.6	Δοκίμιο Tc02_02 με μήκος εγκοπής 2cm.....	98
7.	Αλφάς- Ρεθύμνου.....	103
7.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	103
7.2	Εφαρμογή τεχνικών ακουστικής εκπομπής και ηλεκτρικών σημάτων (PSC) σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια από αλφά	106
7.3	Εφαρμογή τεχνικών ακουστικής εκπομπής και ηλεκτρικών σημάτων (PSC) σε δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια από αλφά.....	114
8.	Δοκίμια από κονίαμα & πάστα λευκού τσιμέντου/ υλικά συντήρησης και αποκατάστασης.....	123
8.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	123
8.2	Πειράματα κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια κονιάματος	124
8.3	Πειράματα κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας	128
Μέρος 3^ο	133
9.	Εξόλκευση.....	133
9.1	Το φαινόμενο της εξόλκευσης στην αποκατάσταση της μονολιθικότη- τας των μνημείων.....	133

Περιεχόμενα

9.2	Το φαινόμενο της εξόλκευσης στα έργα μηχανικού	134
9.3	Περιγραφή δοκιμών.....	140
9.4	Πειράματα	142
9.5	Μορφές αστοχίας.....	146
9.6	Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	147
9.7	Αποτελέσματα/ Συνδυασμός ακουστικών εκπομπών, ηλεκτρικών σημάτων με μηχανικά χαρακτηριστικά	149
9.8	Τροποποίηση δοκιμών- Πειράματα pull-out (αγκύρωση στο κάτω άκρο της οπής του μαρμάρου).....	155
9.8.1	Αποτελέσματα	158
9.9	Τροποποίηση δοκιμών- Πειράματα push in	170
9.9.1	Αποτελέσματα	171
10.	Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου, συγκολλημένου με ράβδους τιτανίου	181
10.1	Εισαγωγή	181
10.2	Μελέτη σύνδεσης	181
10.3	Θεωρητική μέθοδος υπολογισμού οπλισμών σύνδεσης θραυσμένων επιστυλίων	182
10.4	Παλαιότερες πειραματικές έρευνες συμπεριφοράς θραυσμένων και συγκολλημένων επιστυλίων	186
10.5	Κατασκευή πειραματικού δοκιμίου σύμφωνα με τα πρότυπα αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης	187
10.6	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και τεχνικών που εφαρμόστηκαν	191
10.7	Αποτελέσματα	195
Μέρος 4^ο	207
11.	Προσομοίωση δοκιμών εξόλκευσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Elements FE).....	207
11.1	Εισαγωγή- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS- Βασικές αρχές.....	207
11.2	Προσομοίωση συνθηκών επαφής.....	210
11.3	Χαρακτηριστικά και αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης.....	211
12.	Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης	217

Περιεχόμενα

12.1	Προσομοίωση δοκιμίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύση και συγκόλληση των θραυσμάτων με ράβδους τιτανίου.	217
12.2	Παραμετρική ανάλυση επιρροής της κλίσης του θραύσματος στη συνολική συμπεριφορά του επιστυλίου.....	225
13.	Ανασκόπηση- Συμπεράσματα	237
14.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	243
15.	Αναφορές.....	245

Περίληψη

Η αποκατάσταση της μονολιθικότητας των δομικών μελών μαρμάρινων μνημείων είναι ένα πρόβλημα το οποίο απαιτεί τον συγκερασμό πολλών αντικρουόμενων απόψεων (αρχαιολόγων, αρχιτεκτόνων, πολιτικών μηχανικών, χημικών κ.α.). Το βασικό πρόβλημα είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα μάρμαρα είναι έντονα κατακερματισμένα. Για να αποκατασταθεί η στατική επάρκεια και η δομική αριότητα των μνημείων προτάθηκε, πριν μερικές δεκαετίες, μία πρωτοποριακή μέθοδος από τους επιστήμονες οι οποίοι εργάζονταν στα αναστηλωτικά έργα της Ακρόπολης των Αθηνών. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική τα μαρμάρια θραύσματα συγκολλούνται με λευκό τσιμέντο Portland και ενισχύονται με κοχλιοτομημένες ράβδους τιτανίου (Korres et al., 1989).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει κατά πόσο μπορούν τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά των αποκαταστημένων μνημείων και να εντοπίσουν έγκαιρα σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Κατά το σχεδιασμό των συνδέσεων για την αποκατάσταση της μονολιθικότητας των επιστυλίων βασικό μέλημα είναι να μην αστοχήσει ούτε το μάρμαρο αλλά ούτε και το τιτάριο. Αν όμως υπάρξει αστοχία αυτή θα πρέπει ιδεατά να είναι η σχετική ολίσθηση της ράβδου ως προς το μάρμαρο (εξόλκευση οπλισμού).

Υλοποιήθηκε σειρά πειραμάτων εξόλκευσης σε μαρμάρινους όγκους διαφορετικών διαστάσεων εφαρμόζοντας την τεχνική των Ακουστικών Εκπομπών και των ηλεκτρικών σημάτων (PSC). Τα αποτελέσματα των τεχνικών συσχετίστηκαν με τα αντίστοιχα των κλασικών μηχανικών τεχνικών ώστε να διαπιστωθεί αν είναι εφικτό να εντοπιστούν φαινόμενα από το εσωτερικό του δοκιμίου τα οποία οδηγούν στην αστοχία πολύ πριν αυτό γίνει μακροσκοπικά αντιληπτό.

Έγιναν εναλλακτικοί σχεδιασμοί των πειραμάτων εξόλκευσης με στόχο να επιτευχθεί η εξάλειψη των παρασιτικών σημάτων που καταγράφουν οι τεχνικές και οφείλονται στις συνοριακές συνθήκες στήριξης του δοκιμίου αλλά και γενικότερα στην πειραματική διάταξη. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά δίνοντας καθαρά σήματα για τη συμπεριφορά της σύνδεσης μαρμάρου - τσιμεντοκονίας - ράβδου τιτανίου αλλά και για το πότε επίκειται η έναρξη της εξόλκευσης της ράβδου.

Δεδομένου όμως ότι οι παραπάνω δοκιμές αφορούν σύνθετα συμπλέγματα (κατασκευές όπου συνδυάζονται 3 διαφορετικά υλικά) είναι σαφέστατα πιο πολύπλοκο να διαχωριστούν και να ταυτοποιηθούν οι πηγές των σημάτων. Συνεπώς, κρίθηκε αναγκαίο οι βασικές τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου να εφαρμοστούν κατ' αρχήν σε απλά τυποποιημένα δοκίμια από μεμονωμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στην αποκατάσταση των μνημείων.

Έγιναν πειράματα εφελκυσμού σε δύο κατηγορίες δοκιμίων μορφής «Double Edge Notched Tensile (DENT)» από μάρμαρο Διονύσου με συμμετρικές εγκοπές ως προς τον κατακόρυφο άξονα του δοκιμίου. Η θραύση του δοκιμίου καταγράφηκε με τη βοήθεια κάμερας με υψηλή ταχύτητα καταγραφής (high speed) ώστε να εντοπιστεί με βεβαιότητα από ποια εγκοπή ξεκίνησε η ρωγμή και πώς αυτή διαδόθηκε. Η τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (Digital Image Correlation DIC) κατέγραψε τη συνολική μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου και συσχετίστηκε επιτυχώς με τις καταγραφές απλών μηχανικών τεχνικών (clip gauges). Τέλος οι τεχνικές

των Ακουστικών εκπομπών (Acoustic Emission AE) και των ηλεκτρικών σημάτων (Pressure Stimulated Currents PSC) έδωσαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα πλήρως συσχετιζόμενα με τα αντίστοιχα των υπόλοιπων τεχνικών.

Επίσης έγιναν δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια από τσιμεντοκονία και κοιλία σε αναλογίες ίδιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται στα έργα αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών. Εφαρμόστηκαν οι τεχνικές των Ακουστικών Εκπομπών AE αλλά και των ηλεκτρικών σημάτων PSC, από τις οποίες προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα τόσο για το χαρακτηρισμό των σημάτων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όσον και για τον εντοπισμό πιθανών ενδείξεων ότι το υλικό ευρίσκεται κοντά στη αστοχία (όσον το δυνατόν ενωρίτερον σε σχέση με το χρονικό σημείο της τελικής θραύσης).

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια από μαργαϊκό ασβεστόλιθο (Αλφάς) εφαρμόζοντας τις τεχνικές των ακουστικών και ηλεκτρικών σημάτων. Το πέτρωμα αλφάς εξορύσσεται σε λατομεία κοντά στο χωριό Αλφά της επαρχίας Μυλοποτάμου (Ρέθυμνο Κρήτης), είναι υπόλευκο και έχει χρησιμοποιηθεί στην δόμηση σειράς μνημειακών κατασκευών στην Κρήτη. Τα πειράματα έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Βασικός στόχος των παραπάνω πειραμάτων είναι η ταυτοποίηση των σημάτων και η συσχέτιση με τις πηγές από τις οποίες αυτά προέρχονται, σε δοκίμια απλά και ελεγχόμενα ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι τεχνικές και να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα τους σε πειράματα με πλέον σύνθετα και πλέον περίπλοκης γεωμετρίας δοκίμια.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πείραμα κάμψης 10 σημείων σε προσομοίωμα ενός θραυσμένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο ρήγματος. Για τη συγκόλληση των θραυσμάτων χρησιμοποιήθηκαν 6 ράβδοι τιτανίου και πάστα λευκού τσιμέντου σύμφωνα με την τεχνική που ακολουθείται στα έργα αναστήλωσης και αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης.

Στο πείραμα εφαρμόστηκαν οι τεχνικές των Ακουστικών Εκπομπών, των ηλεκτρικών σημάτων PSC, της τεχνικής συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (DIC) οι οποίες συνδυάστηκαν με απλές μηχανικές τεχνικές όπως η εφαρμογή απλών μηκυνσιομέτρων τύπου clip gauge και ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων τύπου LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

Στη συνέχεια τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση - αξιολόγηση αριθμητικού προσομοιώματος τόσο των δοκιμών της εξόλκευσης όσον και αυτών της κάμψης 10 σημείων του αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο ρήγμα, μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Βασικός στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο αριθμητικό προσομοίωμα που θα έχει τη δυνατότητα να περιγράψει τη μηχανική συμπεριφορά τόσο των διεπιφανειών μεταξύ οπλισμών και μαρμάρου αλλά και τη συνολική μηχανική συμπεριφορά των συγκεκριμένων κατασκευών. Με τη βοήθεια των αριθμητικών προσομοιωμάτων έγινε παραμετρική ανάλυση δοκιμών με διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων για να μελετηθεί η επιρροή της κλίσης στην μηχανική απόκριση του επιστυλίου.

Abstract

The structural restoration of stone monuments is a complicated task that demands the co-operation of specialists from various scientific disciplines such as archeologists, architects, structural engineers, chemical engineers and survey engineers. The final decision made is usually a compromise between many and contradictory points of view. The basic problem in case of marble monuments is the restoration of their monolithic character which is sometimes badly damaged. In order for the structural integrity of such monuments to be properly restored, a pioneering technique was developed, some decades ago, by scientists working for the restoration of the Acropolis of Athens. According to this technique the fractured marble elements are connected by inserting titanium bars into pre-drilled holes. The adhesion between marble and bars is achieved by a suitable white cement paste (Korres et al., 1989).

The aim of the present work is to quantify the parameters influencing the pull-out phenomenon, i.e. the gradual or abrupt slip of the reinforcing bars, without prior failure of neither the bar nor the marble. More specifically this study is devoted to the investigation of the progressive failure of the interfaces between the constituent elements of the marble-cement paste-titanium complex, by using sensing techniques which permit pumping data from the interior of the specimens. In this direction the Acoustic Emission (AE) and the Pressure Stimulated Currents (PSC) techniques were used. In parallel an attempt is described to check whether the signals recorded using the above two techniques could be considered as proper pre-failure indicators.

Due to the fact that the above tests are complex and include three different materials, the characterization of the emitted signals is considered a complicated task. Therefore, it was necessary initially that the non-destructive monitoring techniques were applied on individual materials used in the restoration of monuments in order to extract preliminary useful data.

Two classes of Double Edge Notched specimens of Dionysos marble with different lengths of notches were tested on direct tension experiments. The monitoring techniques applied to the tests included a high speed camera detecting the onset and the evolution of the crack in many frames/seconds, the Digital Image Correlation technique (DIC) providing a wider view of the mechanical behavior-deformation of the specimen, the Acoustic Emission technique (AE), monitoring the acoustic activity during the test and the Pressure Stimulated Currents (PSC) technique recording the electrical signals produced by the material's cracking. The results by the previous innovative techniques were successfully correlated with the traditional mechanical techniques (clip gauges).

Also, 3-point bending tests were conducted on specimens of cement paste and mortar similar to those used in the restoration works of the Acropolis monuments of Athens. The applied techniques of the Acoustic Emission and the electrical signals PSC provided interesting results in monitoring the materials behavior and gave signs that the material is near to its fracture. Furthermore, the characterization of the acoustic signals during the experiments identified a significant separation between the signals near and right before the fracture.

Another material, Alfas- Rethymnon stone, was tested on uniaxial compression tests and on 3 point bending tests. The Alfas stone is a limestone which was used in many monuments in Crete due to its abundance in the area. Nowadays, Alfas is considered as a potential substitute stone for the restoration of the Epidaurus monuments while in the past it was extensively used for the restoration of several monuments in Crete such as the Monastery of Arkadi, a monument of great historical and cultural significance.

After the identification of the acoustic signals and the electrical signals emitted by the individual materials, these techniques were applied to more complex structures, combining different and more than one materials.

A multipoint bending experiment were conducted in order to simulate the loading on a restored fractured epistyle with an inclined fault plane. For the monolithic restoration of the two fragments six titanium rods and white cement paste were used, according to the technique followed in the restoration works of the Acropolis monuments.

The experimentally applied recording techniques were the Acoustic Emission technique, the electrical signals PSC technique and the Digital Image Correlation (DIC). Their results were successfully combined with those extracted by simple mechanical techniques such as clip gauges and LVDTs (Linear Variable Differential Transformer).

The “pull out” test and the multipoint bending test of the restored epistyle are simulated numerically using the Finite Element program ABAQUS. The main goal is to have a reliable numerical model that will be able to describe the behavior of the interface between the titanium bars - marble and the overall mechanical behavior of the above complex structures. Finally, through a numerical parametric analysis, the influence of different fault’s angles on the restored epistyle’s mechanical behavior will be examined.

Μέρος 1°

1. Εισαγωγή

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Στο κέντρο της σύγχρονης Αθήνας δεσπόζει ο μεγαλοπρεπής βραχώδης λόφος της Ακρόπολης όπου βρίσκεται το σπουδαιότερο ιερό της αρχαίας πόλης αφιερωμένο στην προστάτιδα θεά της, την Αθηνά. Τα μνημεία της Ακρόπολης είναι εναρμονισμένα με το φυσικό περιβάλλον και αποτελούν αριστουργήματα της αρχαίας αρχιτεκτονικής συνδυάζοντας ρυθμούς και τάσεις της κλασικής τέχνης. Η Ακρόπολη του 5ου αι. π.Χ. αποδίδει με τον πιο γλαφυρό τρόπο το μεγαλείο, τη δύναμη και τον πλούτο της Αθήνας στην εποχή της μεγαλύτερης ακμής της, το "χρυσό αιώνα" του Περικλή (1).

Από τα νεολιθικά κιόλας χρόνια (4000/3500-3000 π.Χ.) ο λόφος επιλέχθηκε ως χώρος εγκατάστασης των κατοίκων της περιοχής ενώ τον 8ο αι. π.Χ. η Ακρόπολη απέκτησε ουσιαστικά για πρώτη φορά τον ιερό της χαρακτήρα με την καθιέρωση της λατρείας της Αθηνάς Πολιάδος. Την εποχή του τυράννου Πεισίστρατου (μέσα 6ου αι. π.Χ.) το ιερό σημείωσε σπουδαία ακμή. Καθιερώθηκε η μεγαλύτερη γιορτή των Αθηναίων προς τιμή της Αθηνάς, τα Παναθήναια, και ιδρύθηκαν τα πρώτα μνημειακά κτήρια και οι ναοί για τη λατρεία της, μεταξύ των οποίων, ο λεγόμενος "Αρχαίος ναός" και ο Εκατόμπεδος, πρόδρομος του Παρθενώνα. Το 490 π.Χ., μετά τη νίκη εναντίον των Περσών στο Μαραθώνα, οι Αθηναίοι προσπάθησαν να κτίσουν ένα πολύ μεγαλύτερο ναό στη θέση του Παρθενώνα, γνωστό ως Προπαρθενώνα. Αυτός ο ναός δεν ολοκληρώθηκε ποτέ, γιατί το 480 π.Χ., οι Πέρσες εισέβαλαν στην Αττική, λεηλάτησαν την Ακρόπολη και πυρπόλησαν τα μνημεία (1).

Στα μέσα του 5ου αι. π.Χ., με πρωτοβουλία του Περικλή, τέθηκε σε εφαρμογή ένα μεγαλεπήβολο κατασκευαστικό σχέδιο που διήρκεσε όλο το β' μισό του 5ου αι. π.Χ (1).

Στους επόμενους αιώνες η μορφή της Ακρόπολης δεν άλλαξε, μέχρι το 267 μ.Χ., όταν η πόλη δέχθηκε την επιδρομή των Ερούλων (ένα λαό σκανδιναβικής προέλευσης), οι οποίοι κατέλαβαν την Αθήνα και πυρπόλησαν τον Παρθενώνα. Καταστράφηκε η αρχική στέγη, ολόκληρη η εσωτερική κιονοστοιχία, ενώ έπαθαν σοβαρές ζημιές οι τοίχοι του σηκού. Τότε κατασκευάστηκε το τείχος οχύρωσης με τις δύο πύλες, από τις οποίες η μία, η δυτική, σώζεται μέχρι σήμερα και είναι γνωστή με το όνομα Beule, από το όνομα του Γάλλου αρχαιολόγου που έκανε έρευνες στο χώρο το 19ο αιώνα (1).

Το 529 μ.Χ. η μετατροπή των ναών σε χριστιανικές εκκλησίες από τον αυτοκράτορα Ιουστινιανό προστάτευσε τα μνημεία της Ακρόπολης τα οποία διατηρήθηκαν σχεδόν ακέραια σε όλο το Μεσαίωνα. Ο Παρθενώνας τότε αφιερώθηκε στην Παρθένο Μαρία, ενώ στη συνέχεια ονομάστηκε Παναγία η Αθηνιώτισσα. Το Ερέχθειο είχε μετατραπεί σε ναό του Σωτήρος ή της Θεοτόκου, ο ναός της Αθηνάς Νίκης σε εκκλησάκι και τα Προπύλαια σε επισκοπική κατοικία (1).

Εισαγωγή

Η Ακρόπολη στα Βυζαντινά χρόνια ξαναέγινε κάστρο. Σπίτια χτίστηκαν ανάμεσα στα μαρμάρινα μνημεία και η παλιά ένδοξη πόλη είδε τον 11ο αιώνα μια μικρή άνθιση (2). Κατά την περίοδο της Φραγκοκρατίας (1204-1456), τα Προπύλαια μετατράπηκαν σε ανάκτορο των Φράγκων ηγεμόνων, ενώ στην Τουρκοκρατία (1456-1833) η Ακρόπολη και πάλι έγινε το φρούριο της πόλης, όπου κατοικούσε ο Τούρκος φρούραρχος.

Κατά τη διάρκεια του Β' Ενετοτουρκικού πολέμου, ο λόφος πολιορκήθηκε από τον Φραγκίσκο Μοροζίνι και στις 26 Σεπτεμβρίου 1687, μία βόμβα των Ενετών ανατίναξε τον Παρθενώνα που είχε μετατραπεί σε πυριτιδαποθήκη. Ο Μοροζίνι τελικά κυριεύσε την Ακρόπολη και στην προσπάθειά του να κλέψει κάποια γλυπτά προκάλεσε κι άλλες ζημιές. Τον επόμενο χρόνο εγκαταλείπει την Αθήνα και επιστρέφουν οι Τούρκοι.

Το 1801 μ.Χ. ο Thomas Bruce, κόμης του Έλγιν, πρεσβευτής της Αγγλίας στην Υψηλή Πύλη, κατάφερε να αποσπάσει από το Σουλτάνο φερμάνι με το οποίο του δινόταν η άδεια να αφαιρέσει από τις χώρες που βρίσκονταν στη δικαιοδοσία του σουλτάνου ό,τι αρχαιότητα ήθελε. Έτσι ο Έλγιν απέσπασε από την Ακρόπολη διάφορα γλυπτά. Στην προσπάθειά του να αρπάξει όσο περισσότερα μπορούσε, προκάλεσε μεγάλες ζημιές. Συνολικά μετέφερε στο Λονδίνο δεκαοκτώ αγάλματα από τα αετώματα, δεκαπέντε μετόπες και πενήντα λίθους από τη ζωφόρο μήκους εβδομήντα πέντε μέτρων. Το 1815 το Βρετανικό Μουσείο αγόρασε από τον Έλγιν τα γλυπτά του Παρθενώνα (3).

Το 1822 η Ακρόπολη πέρασε οριστικά στην κυριαρχία των Ελλήνων και πρώτος φρούραρχός της ορίσθηκε ο Οδυσσεάς Ανδρούτσος (1).

Οι πρώτες ανασκαφές στο βράχο έγιναν ανάμεσα στα έτη 1835 και 1837. Η μεγάλη συστηματική ανασκαφή της Ακρόπολης διεξήχθη το διάστημα 1885-1890 από τον Παναγιώτη Καββαδία.



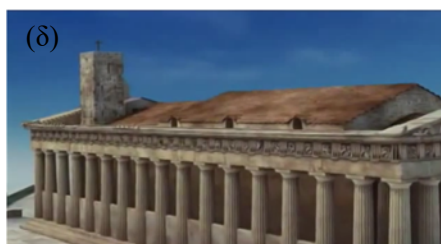
(α)



(β)

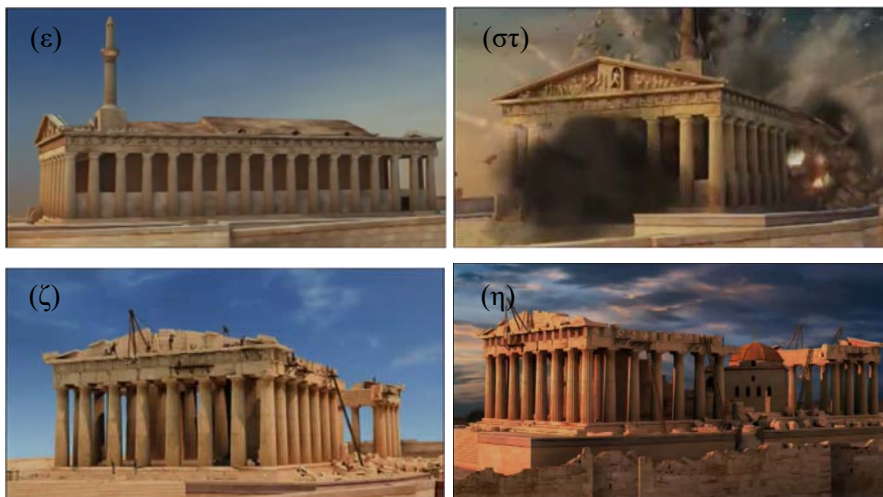


(γ)



(δ)

Εισαγωγή



Εικόνα 1.1 Σχηματικά: (α) η αρχική μορφή του Παρθενώνα, (β) η επιδρομή των Ερούλων, (γ) η μετατροπή του Παρθενώνα σε εκκλησία, (δ) ο Παρθενώνας κατά τη Φραγκοκρατία, (ε) ο Παρθενώνας κατά την Τουρκοκρατία, (στ) η ανατίναξη του Παρθενώνα από το Φραγκίσκο Μοροζίνι, (ζ) η αφαίρεση του γλυπτού διάκοσμου των μνημείων από το λόρδο Έλγιν, (η) η Ακρόπολη περνάει στην κυριαρχία των Ελλήνων (4).

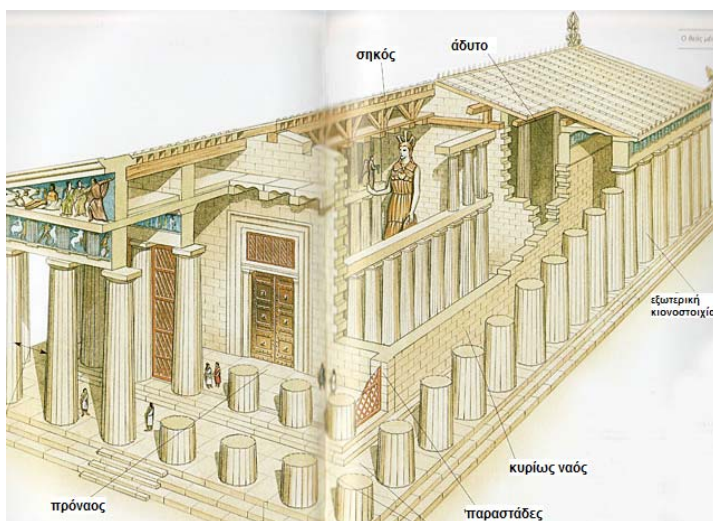
1.2 Τα Χαρακτηριστικά των μνημείων της Ακρόπολης

Τα μνημεία της Ακρόπολης Αθηνών παρουσιάζουν πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά παρά τα 2500 χρόνια ζωής τους και οι περισσότερες ζημιές που παρουσιάζουν οφείλονται σε ανθρώπινες παρεμβάσεις και καταστροφές και όχι σε λανθασμένο σχεδιασμό ή φυσικά αίτια.

Η μορφή και η κατασκευή τους έγινε με βάση μορφολογικά και λειτουργικά κριτήρια και όχι βάσει στατικού σχεδιασμού με την έννοια την οποία τον αντιλαμβανόμαστε σήμερα. Παρόλα αυτά όμως τα κτίρια της Ακρόπολης ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις σημερινές απαιτήσεις του αντισεισμικού σχεδιασμού και παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε δυναμικά φορτία. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην απλότητα και τη σαφή στατική τους δομή. Η κανονικότητα τους σε κάτοψη, η συμμετρική διάταξη των φερόντων στοιχείων και η ομαλή κατανομή της δυσκαμψίας είναι χαρακτηριστικά τα οποία δίνουν στα μνημεία τη δυνατότητα να απορροφούν ενέργεια κατά τη διάρκεια του σεισμού με τις ελάχιστες δυνατές ζημιές και παραμορφώσεις. Επίσης, οι μεγάλες δυσκαμψίες των τοίχων οι οποίες μαζί με τη διαφραγματική λειτουργία η οποία επιτυγχάνεται μέσω τις τριβής δίνουν ομοιόμορφη παραμόρφωση και άριστη συμπεριφορά σε οριζόντιες φορτίσεις. Όμως όλα τα παραπάνω θα έχαναν την ευεργετική συμβολή τους αν τα κτίρια της Ακρόπολης εδράζονταν σε ένα σαθρό έδαφος. Ο ιερός βράχος της Ακρόπολης είναι η ιδανικότερη συνθήκη για την ανθεκτική συμπεριφορά ενός δομήματος στο σεισμό (5).

1.3 Παρθενώνας

Ο Παρθενώνας είναι το κορυφαίο μνημείο του αρχαίου ελληνικού πολιτισμού. Επικεφαλής για την κατασκευή του ήταν ο γλύπτης Φειδίας, με αρχιτέκτονες τον Ικτίνο και τον Καλλικράτη. Έχει κατασκευασθεί σχεδόν εξολοκλήρου από πεντελικό μάρμαρο. Στο εσωτερικό του ναού, τον σηκό, ήταν στημένο το χρυσελεφάντινο άγαλμα της Αθηνάς (ύψους 12μ), έργο του Φειδία (Εικ. 1.2).



Εικόνα 1.2 (α) Σχηματική απεικόνιση Παρθενώνα (6)

Ο γλυπτός διάκοσμος συνδυάζει με μοναδικό τρόπο τις δωρικές μετόπες και τις τριγλύφους με την ιωνική ζωφόρο.



Εικόνα 1.3 Δωρικός και Ιωνικός ρυθμός αρχαίων ναών.

Εισαγωγή

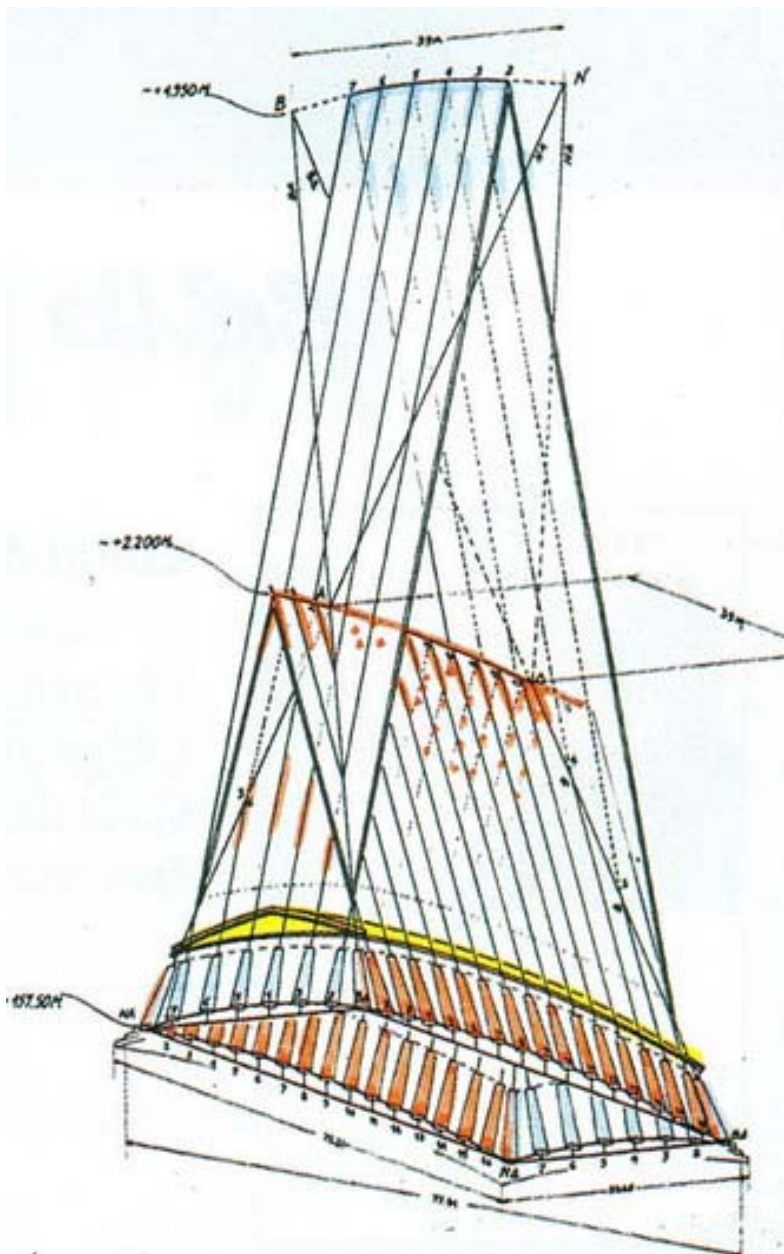
Μέσα σε εννιά μόλις χρόνια ολοκληρώθηκαν οι εργασίες ανέγερσης του πιο φημισμένου ναού της αρχαιότητας. Ο Παρθενώνας αποτελεί το μεγαλύτερο δωρικό ναό του οποίου η οικοδόμησή ολοκληρώθηκε. Οι διαστάσεις του στυλοβάτη είναι 30,88μ x 69,50μ. Ακόμη είναι ο μόνος ναός που χτίστηκε εξ ολοκλήρου από μάρμαρο (μέχρι και τα κεραμίδια ήταν μαρμάρινα), εκτός φυσικά από τα ξύλα που στήριζαν τη σκεπή.

Η ιδιαιτερότητα του Παρθενώνα φαίνεται επίσης και από τον αριθμό αλλά και τη δομή των κίωνων του. Αποτελείται από 8 κίονες σε κάθε μία από τις προσόψεις και 17 σε κάθε μία από τις μεγαλύτερες πλευρές. Το ύψος των κίωνων του είναι 10.45μ και ο κάθε ένας αποτελείται από 10-12 σπονδύλους διαφορετικού ύψους. Η διάμετρος των κίωνων δεν είναι ίδια σε όλο το ύψος τους (η διάμετρος στη βάση του κίονα είναι 1.9μ) ενώ η διάμετρος των γωνιακών κίωνων είναι κατά τι μεγαλύτερη (2), (7). Ο Παρθενώνας αποτελεί ένα δόμημα με ασύλληπτα σωστά υπολογισμένες διαστάσεις και με σοφά εναρμονισμένες κλίσεις και καμπυλώσεις. Οι καμπυλώσεις εντοπίζονται κυρίως στον στυλοβάτη, στο επιστύλιο, στα τρίγλυφα, στο γείσο και στο αέτωμα. Επίσης, οι κίονες λεπταίνουν όπως ανεβαίνουν από τη βάση προς το κιονόκρανο, και λίγο πριν το μέσο τους (στο 1/3 περίπου του ύψους τους) υφίστανται μία εξόγκωση (η λεγόμενη έντασις) η οποία δημιουργεί επίσης καμπυλότητα. Από την άλλη, οι κλίσεις εντοπίζονται σε όλα τα ορθά στοιχεία, τους κίονες και τους τοίχους. Συγκεκριμένα, οι κίονες του πτερού κλίνουν όλοι προς το εσωτερικό κατά 7εκ., ενώ οι γωνιακοί κλίνουν διαγωνίως κατά 10εκ. (2), (7). Οι τοίχοι, εσωτερικά είναι κάθετοι, αλλά εξωτερικά κλίνουν προς τα μέσα. Συνεπώς, το σχήμα του ναού δεν είναι παραλληλεπίπεδο, αλλά πυραμιδοειδές όπως δίνεται στην Εικ. 1.4. Οι άξονες των κίωνων αν προεκταθούν προς τα πάνω, εκείνοι της βόρειας και νότιας πλευράς τέμνονται σε ύψος 2.2χλ. περίπου, ενώ εκείνοι της ανατολικής και δυτικής σε ύψος 5χλ. περίπου.

Με βάση τα παραπάνω, ο σχεδιασμός του ναού είναι από κάθε άποψη τέλειος και λεπτομερής. Η εκτέλεση όμως με τα μέσα της τότε εποχής φαίνεται ακατόρθωτη. Αρκεί, με βάση τις καμπυλώσεις και τις κλίσεις των δομικών στοιχείων του ναού, να αναλογιστούμε ότι κάθε λίθος του κτίσματος έχει εντελώς δικό του σχήμα, διαστάσεις και μοναδική θέση στο σύνολο (2).

Παράλληλα ο Παρθενώνας αποτελεί ένα καλλιτέχνημα της εποχής. Ο Φειδίας θέλησε να δημιουργήσει ένα ναό με ιδιαίτερη γλυπτική διακόσμηση. Είναι ο μόνος δωρικός ναός του οποίου και οι 92 μετόπες έχουν ανάγλυφες παραστάσεις (3). Οι μετόπες της ανατολικής πλευράς απεικονίζουν την Γιγαντομαχία. Στη δυτική παριστάνεται η Αμαζονομαχία, στη νότια η Κενταυρομαχία και στη βόρεια σκηνές από τον Τρωικό Πόλεμο. Η ζωφόρος απεικονίζει την πομπή των Παναθηναίων, την πιο μεγάλη θρησκευτική γιορτή της αρχαίας Αθήνας. Η ζωφόρος περιέβαλε το ναό και απεικόνιζε μορφές θεών, ζώων και περίπου 360 μορφές ανθρώπων (6). Τα δύο αετώματα του ναού απεικονίζουν σκηνές από την μυθολογία. Συγκεκριμένα, πάνω από την κυρία είσοδο του ναού, στα ανατολικά, απεικονίζεται η γέννηση της Αθηνάς και στην δυτική πλευρά η διαμάχη της Αθηνάς και του Ποσειδώνα για την κατοχή της Αττικής γης (6).

Εισαγωγή



Εικόνα 1.4 Σχηματική απεικόνιση των κλίσεων και καμπυλώσεων του Παρθενώνα (8).

2. Αποκαταστάσεις Μνημείων

2.1 Βασικές αρχές αναστήλωσης και αποκατάστασης μνημείων

Η αποκατάσταση των μνημείων είναι ένα ζήτημα που αντιμετωπίζεται συνήθως στα πλαίσια του πολιτισμού και των παραδόσεων του κάθε έθνους. Είναι όμως ένα θέμα που απασχολεί ιδιαίτερα τη διεθνή κοινότητα και για αυτό είναι γενικά αποδεκτό η γενική φιλοσοφία των αποκαταστάσεων να συμμορφώνεται ως προς ένα γενικό σύνολο αρχών και κανόνων, το Χάρτη της Βενετίας (1964) (9). Σύμφωνα με το χάρτη της Βενετίας, η αποκατάσταση των μνημείων θα πρέπει να ακολουθεί τις παρακάτω βασικές αρχές:

- Συνεργασία όλων των επιστημών (αρχαιολόγοι, αρχιτέκτονες, πολιτικοί μηχανικοί, χημικοί κ.α) και όλων των τεχνών.
- Διάσωση των μνημείων τόσο ως έργων τέχνης όσο και ως ιστορικών μαρτυριών.
- Διατήρηση του άμεσου περιβάλλοντος του μνημείου στην κλίμακα του.
- Διατήρηση των γλυπτικών, ζωγραφικών ή διακοσμητικών στοιχείων που είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένα με το μνημείο (ο διαχωρισμός τους να επιτρέπεται μόνο αν το μέτρο αυτό είναι η μοναδική διέξοδος για να εξασφαλιστεί η διάσωσή τους).
- Εφαρμογή των σύγχρονων επιστημονικώς τεκμηριωμένων τεχνικών συντηρήσεως (όταν οι παραδοσιακές τεχνικές αποδεικνύονται ανεπαρκείς).
- Αρμονική ένταξη όλων των αρχαίων μελών και των συμπληρωμάτων (9), (10).

Η Ελλάδα μέσω των αναρίθμητων μνημείων της στα οποία επιτάσσεται η αναστήλωση και η αποκατάσταση της αρχιτεκτονικής και στατικής τους ακεραιότητας, έχει αποκτήσει ιδιαίτερη εμπειρία μέσα από τη μακροχρόνια ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα. Πέρα λοιπόν από το γενικό πλαίσιο αρχών του Χάρτη της Βενετίας, στην Ελλάδα ακολουθούνται κάποιες βασικές αρχές κατά την αναστήλωση και αποκατάσταση των μνημείων.

Οι επεμβάσεις στο μνημείο θα είναι τέτοιες ώστε οποιαδήποτε στιγμή το μνημείο να μπορεί να επανέλθει στην αρχική, πριν την επέμβαση, μορφή του (αναστρέψιμότητα). Οι αλλαγές στην εμφάνιση του μνημείου θα είναι οι ελάχιστες δυνατές και αναγκαίες για την προστασία του. Βασικό είναι η διατήρηση της αυτοτέλειας των αρχιτεκτονικών μελών και της απλής τους στατικής λειτουργίας. Τέλος, στα μέρη του μνημείου που ήδη έχουν αναστηλωθεί, περιορίζονται ακόμα περισσότερο οι επεμβάσεις (10).

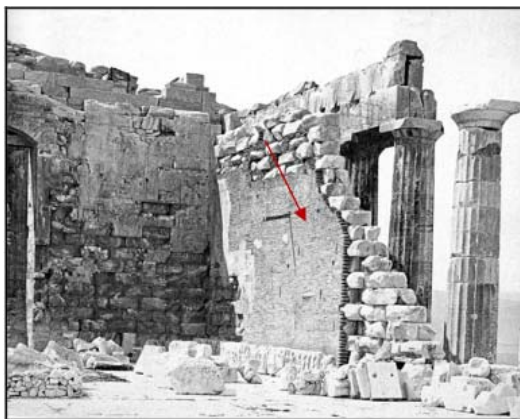
2.2 Η ιστορία των επεμβάσεων στα μνημεία της Ακρόπολης των Αθηνών

Οι επεμβάσεις στο μνημείο της Ακρόπολης άρχισαν από την 3η δεκαετία του 19ου αιώνα σε μία προσπάθεια του σύγχρονου ελληνικού κράτους να αποκτήσει τη χαμένη περηφάνεια και αυτοπεποίθησή του.

Οι πρώτες προσπάθειες άρχισαν με τη σύσταση της Αρχαιολογικής Υπηρεσίας το 1933. Για πρώτη φορά το ζήτημα της συντήρησης, αποκατάστασης και ανάδειξης των κλασικών μνημείων τίθεται από τον Leo von Klenze το 1834. Ο Leo von Klenze, L. Ross, C. Hansen και E. Schaubert (1834-1836) είχαν σαν αρχικό στόχο τη φύλαξη των αρχαιολογικών χώρων και την άμεση απομάκρυνση ερειπίων και προσθηκών. Η ανόρθωση του διάσπαρτου υλικού και η επανατοποθέτηση του στο μνημείο όχι απαραίτητα στην ακριβή του θέση έδωσε μορφή στα κατεστραμμένα μνημεία. Οι παραπάνω απομάκρυναν τα υλικά που θεώρησαν άχρηστα από το χώρο του μνημείου και συμπλήρωσαν μέλη τα οποία έλειπαν χωρίς ιδιαίτερη προσοχή στο να μην διαφοροποιούνται τα νέα από τα αυθεντικά στοιχεία τόσο χρωματικά όσο και μορφολογικά (11).

Τα μαρμάρινα μέλη συμπληρώθηκαν με πορόλιθο ή με νέο μάρμαρο διαφορετικού χρωματισμού. Οι συνδέσεις επιτυγχάνονται με σιδηρούς χονδροειδείς εξωτερικούς συνδέσμους. Μπορεί με αυτό τον τρόπο να αποδόθηκε το αρχέτυπο σχέδιο όμως χάθηκαν βασικά στοιχεία του αυθεντικού υλικού και υποβάθμισε αισθητικά το μνημείο με τα ποικίλα χρωματικά και μορφολογικά συμπληρώματα (11).

Η δεύτερη περίοδος αναστηλωτικών έργων (1836 -1863) με βασικούς συντελεστές τους Κυριάκο Πιττάκη, Αλέξανδρο Ρίζο- Ραγκαβή, A. Paccard και Λύσανδρο Κανταντζόγλου προχώρησε στην εκτεταμένη ανεύρεση και περισυλλογή διάσπαρτων αρχαίων τμημάτων. Διενεργήθηκαν πολλές ανασκαφές, αναστηλώσεις και αντιστηρίξεις καθώς και εκτεταμένες απομακρύνσεις ερειπίων και προσθηκών. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν περιλάμβαναν σιδερένιες στεφάνες, σιδερένιες ράβδους σχήματος Π και ελκυστήρες για τη σύνδεση και στήριξη των δομικών στοιχείων.



Εικόνα 2.1 Στερέωση του βόρειου τοίχου του Παρθενώνα με οπτοπλινθοδομή (11).

Αποκαταστάσεις Μνημείων

Οι συμπληρώσεις με νέο μάρμαρο ή από μάρμαρο προερχόμενο από διάσπαρτα μέλη λαξεύονταν κατάλληλα ώστε να προσαρμοστούν στα αρχαία μέλη.



Εικόνα 2.2 Κορμός δέντρου που χρησιμοποιήθηκε από τον Πιττάκη στη στερέωση εσωτερικά των ορθοστατών τοίχου στο Ερέχθειο (11).

Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από τον έντονο αυτοσχεδιασμό και είχε ως συνέπεια τη σοβαρή επιβάρυνση των αυθεντικών δομικών μελών λόγω των ακατάλληλων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και της διάβρωσης τους. Επίσης σοβαρή ήταν η αισθητική υποβάθμιση των μνημείων, η απώλεια αυθεντικών στοιχείων και η εξάλειψη των μετακλασσικών τους φάσεων (11).

Επειτα ακολούθησε μία περίοδος (1864- 1884) με κύριους εκπροσώπους τους Παναγιώτη Ευστρατιάδη, Στέφανο Κουμανούδη, F. Boulanger, F.C Penrose, W. Dörpfeld και E. Ziller. Χαρακτηριστικό αυτής της περιόδου είναι η χρήση σιδηρένιων στεφάνων, σιδηροδοκών και ελκυστήρων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για συνδέσεις και αντιστηρίξεις. Επίσης για αντιστηρίξεις χρησιμοποιούνται τοιχοποιίες και πωρόλιθοι ως δομικό υλικό ενώ για συμπληρώσεις χρησιμοποιείται νέο μάρμαρο. Για σφραγίσεις ρωγμών χρησιμοποιείται το λεγόμενο «γαλλικό χρώμα» γνωστό από τον Martinelli. Για να γίνεται αδιάβροχη η επιφάνεια των μαρμάρων έγινε εμποτισμός με διάλυμα πυριτικού καλίου ή εν θερμώ με στεατικό οξύ. Εντοπίζεται επίσης και η χρήση σε κάποιες περιπτώσεις τσιμεντοσκυροδέματος. Η περίοδος αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως σωστικής φύσεως και όχι ευρέως αναστηλωτικής επεμβάσεων (11).

Η κυριότερη αναστηλωτική επέμβαση ήταν εκείνη του Νικόλαου Μπαλάνου (1885-1909) όπου βασικό μέλημα ήταν να διατηρηθεί η εικόνα του μνημείου ως ερείπιο χρησιμοποιώντας στο σύνολο του το αρχαίο υλικό που υπήρχε με ελάχιστες προσθήκες.

Η βασική ιδέα του Ν. Μπαλάνου να ενταχθούν στο σύνολο του μνημείου όλα τα διασωζόμενα αρχαία μέλη και οι προσθήκες νέου υλικού να είναι όσο το δυνατόν λιγότερες είναι απόλυτα αποδεκτή και οδήγησε στη διεθνή καθιέρωση του όρου αναστήλωση. Όμως υπήρχαν και αρνητικά σημεία στις επεμβάσεις που έγιναν εκείνη την εποχή. Βασικό ήταν ότι αγνοήθηκαν οι ιδιαιτερότητες του κάθε αρχιτεκτονικού μέλους με αποτέλεσμα πολλά θραύσματα να χρησιμοποιηθούν σε σημεία τα οποία δεν ανήκαν εξ αρχής. Για το σκοπό αυτό λαξεύτηκαν πολλά αρχιτεκτονικά

μέλη ώστε να δημιουργηθούν κατάλληλες επιφάνειες για να γίνει η συναρμολόγηση παλιών και νέων στοιχείων ή να τοποθετηθούν μεταλλικά φέροντα στοιχεία. Ο Ν. Μπαλάνος χρησιμοποίησε σύγχρονες (για εκείνη την εποχή) τεχνικές οι οποίες περισσότερο κατέστρεψαν το μνημείο παρά το προστάτευσαν (5). Η χρήση του μορφοσιδήρου της αγοράς χωρίς πρώτα να ελέγχουν οι ιδιότητες του και η μετέπειτα συμπεριφορά του ήταν από τις βασικές αδυναμίες της μεθόδου που ακολουθήθηκε. Επίσης αγνοήθηκε η άσχημη οπτική αίσθηση της προσθήκης τσιμεντοκονιάματος σε εμφανή σημεία πάνω στο πεντελικό μάρμαρο. Τέλος, δεν δόθηκε η πρέπουσα σημασία στην υφή και την πατίνα στα συμπληρώματα από νέο μάρμαρο (12), (13).

Οι συνέπειες των επεμβάσεων αυτών ήταν καταστροφικές. Οι σύνδεσμοι των αποκαταστημένων μελών δεν ήταν αντάξιοι των αντίστοιχων αρχαίων. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην ποιότητα του υλικού αλλά και στο σχεδιασμό των αρμών στο σύνολο τους. Οι αρμοί ήταν εκτεθειμένοι στην υγρασία και το νερό της βροχής με αποτέλεσμα όλοι οι μεταλλικοί σύνδεσμοι και τα στοιχεία στήριξης της επέμβασης να υποστούν οξειδωση και διόγκωση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ρηγμάτωση και τη διάσπαση του περιβάλλοντος μαρμάρου. Επίσης, οι αλλοιώσεις αλλά και ο θρυμματισμός του οπλισμού από τις προσθήκες και τις επικαλύψεις σκυροδέματος που έγιναν, όχι μόνο δεν βοηθούσαν στατικά αλλά μείωναν και την αισθητική εικόνα του μνημείου (14).

Μετά το 1935 δεν έγινε κάποιο σημαντικό έργο αναστήλωσης στα μνημεία της Ακρόπολης. Για να διατηρηθεί όμως η αρτιότητα και η μορφή του μνημείου ήταν επιτακτικό και αναγκαίο να ξεκινήσουν άμεσα εργασίες για την προστασία του. Το 1975 συγκροτήθηκε η Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως (Ε.Σ.Μ.Α.) η οποία αποτελείται από αρχαιολόγους, αρχιτέκτονες, πολιτικούς και χημικούς μηχανικούς και η οποία είχε να αντιμετωπίσει σοβαρά προβλήματα. Αρχικό μέλημα είναι ο έλεγχος της κατάστασης των μνημείων και της παθολογίας τους και στη συνέχεια να εντοπιστούν οι βασικές βλάβες που χρήζουν άμεσης επέμβασης. Οι βλάβες αυτές είναι κυρίως ο κατακερματισμός των μαρμάρων και η διάβρωση της επιφάνειάς τους. Με βάση αυτό, η νέα παρέμβαση στοχεύει σε δύο «μέτωπα». Πρώτον στην αποκατάσταση της στατικότητας και της ευστάθειας των μαρμαρίνων μελών στις αναστηλωμένες ή μη περιοχές και κατά δεύτερον στη φθορά της επιφάνειας των μνημείων λόγω των βιολογικών παραγόντων και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Αθήνα (5), (15).

Το πρόγραμμα των αναστηλωτικών έργων περιλαμβάνει αρχικά την αφαίρεση των σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων. Τα αρχαία συνδετήρια βρέθηκαν στην πλειοψηφία τους σε καλή κατάσταση καθώς ήταν προστατευμένα από το μόλυβδο. Στα σημεία όμως όπου είχαν αστοχήσει λόγω μηχανικής καταπόνησης ή οξειδωσης, τα συνδετήρια και το υλικό πλήρωσης (τσιμεντοκονίαμα συνήθως στα αναστηλωμένα από προηγούμενες επεμβάσεις τμήματα και σπανιότερα μόλυβδος) αφαιρέθηκαν ώστε να ακολουθήσει η αποκατάσταση. Η αποκατάσταση της μονολιθικότητας των μελών γίνεται με συγκόλληση των επιμέρους τμημάτων με λευκό τσιμέντο Portland και ράβδους τιτανίου (16). Οι ράβδοι, στις οποίες έχει διαμορφωθεί σπείρωμα, εμφυτεύονται με τσιμεντοκονία σε διατρήματα στο εσωτερικό της μάζα του μαρμάρου. Τα διατρήματα συνήθως δεν καταλήγουν στις εξωτερικές επιφάνειες των μελών ώστε να μην είναι ορατά. Όταν όμως αυτό δεν είναι εφικτό καταλήγουν

Αποκαταστάσεις Μνημείων

σε χονδρολαξευμένες επιφάνειες που μετά την τοποθέτηση δεν είναι θεατές. Για την ολοκλήρωση των αρχιτεκτονικών στοιχείων ή για την αντικατάσταση παλιότερων συμπληρωμάτων από σκυρόδεμα (τακτική προηγούμενων αναστηλώσεων) χρησιμοποιούνται όγκοι από νέο μάρμαρο. Η επιφάνεια του συμπληρώματος λαξεύεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται με ακρίβεια στην επιφάνεια θραύσης του αρχαίου μέλους (πονταδόρος, παντογράφος) (17).

Στη συνέχεια τα αρχιτεκτονικά στοιχεία αφού έχουν επισκευαστεί, επανατοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις και συνδέονται με ελάσματα από τιτάνιο διαμορφωμένα σε συνδέσμους ή γόμφους που στερεώνονται κατά κανόνα στις υφιστάμενες αρχαίες εντομίες με ισχυρό τσιμεντοκονίαμα (λευκό τσιμέντο Portland και χαλαζιακή άμμος). Λόγω των παραμενουσών παραμορφώσεων των μελών που δεν αποξηλώθηκαν δημιουργούνται γεωμετρικές ασυνέχειες κατά την επανατοποθέτηση των αρχιτεκτονικών μελών που αποκαταστάθηκαν. Για το λόγο αυτό γίνεται, στο μέτρο του δυνατού, η μερική άρση αυτών των γεωμετρικών παραμορφώσεων. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι κάποιοι αρμοί να παραμένουν ανοικτοί. Τότε, για να εξασφαλισθεί η επαφή των μελών αυτών χρησιμοποιούνται φύλλα μόλυβδου που διαστρώνονται στις επιφάνειες έδρασης ή σφηνώνονται στους κατακόρυφους αρμούς (18).

Τέλος στο πρόγραμμα των αναστηλωτικών έργων συμπεριλαμβάνεται η επανατοποθέτηση των διάσπαρτων μελών. Οι αρχικές θέσεις των διάσπαρτων μελών έχουν προσδιορισθεί από τη μελέτη του Μ. Κορρέ (19) και η επανατοποθέτηση τους κρίνεται αναγκαία όχι μόνο γιατί οι εκτεθειμένες επιφάνειες έδρασης των διάσπαρτων μελών φθείρονται με αποτέλεσμα να αχρηστεύονται σημαντικά δομικά στοιχεία, αλλά και λόγω της καλλιτεχνικής υποβάθμισης του συνόλου από τη φυσική αλλοίωση αυτών των τμημάτων.

3. Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης/ αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

3.1 Εισαγωγή

Τα μνημεία της Ακρόπολης αποτελούνται από λαξευτούς λίθους σε μορφή πλίνθων ή σπονδύλων και στην πλειοψηφία τους έχουν κατασκευαστεί από Πεντελικό μάρμαρο. Η σύνδεση μεταξύ τους δεν γίνεται με κάποιο συνδετικό κονίαμα αλλά με μεταλλικά συνδετήρια στοιχεία. Σε ειδικά διαμορφωμένες εντορμίες τοποθετούνται τα μεταλλικά στοιχεία ενώ το κενό γύρω τους γεμίζει με χυτό μόλυβδο. Στόχος της χρήσης του μόλυβδου είναι να προστατευτεί ο σίδηρος από το περιβάλλον και να αποφευχθεί η οξειδωση.

Στις εργασίες αναστήλωσης δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Πρέπει να είναι αβλαβή και συμβατά με τα αυθεντικά υλικά και να μην προκαλέσουν βλάβες στο μνημείο λόγω μελλοντικής φθοράς τους.

Για τα νέα μέλη μαρμάρου που απαιτούνται για τη συμπλήρωση των κενών όπου δεν υπάρχει αρχαίο υλικό έχει επιλεγεί το μάρμαρο Διονύσου, το οποίο έχει αποδειχθεί ότι έχει παραπλήσια συμπεριφορά με το αρχικό (20).

Για τη σύνδεση των θραυσμένων μελών χρησιμοποιείται τιτάνιο το οποίο έχει μεγάλη αντοχή και είναι ανοξείδωτο (21) ενώ για την πλήρωση του κενού μεταξύ μαρμάρου και τιτανίου χρησιμοποιούνται ειδικά κονιάματα τα οποία είναι ανθεκτικά στο χρόνο (22).

3.2 Αρχικά υλικά δόμησης

3.2.1 Πεντελικό μάρμαρο

Τα κύρια χαρακτηριστικά του Πεντελικού μαρμάρου είναι η μοναδική λευκή απόχρωση του (23), η καθαρότητα, η διαύγεια και η διαφάνεια του. Σήμερα στην περιοχή των αρχαίων λατομείων (ΝΔ πλαγιά του Πεντελικού όρους-κοιλιάδα της Σπηλιάς, υψόμετρο 700m) διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση ένα από τα αρχαία μέτωπα εξόρυξης (24).

Το μάρμαρο Πεντέλης προέρχεται από μεταμόρφωση χημικών ιζημάτων ανθρακικού ασβεστίου (19). Το ειδικό του βάρος είναι 2.72 g/cm^3 , έχει συντελεστή θερμικής διαστολής $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$ και το πορώδες του, πολύ χαμηλό, κυμαίνεται από 0.3 έως 2.1% (όταν είναι διαβρωμένο). Με την πάροδο του χρόνου και όταν το μάρμαρο εκτεθεί στο περιβάλλον αλλοιώνεται χρωματικά. Αυτό οφείλεται στις προσμείξεις υδροξειδίων και οξειδίων του σιδήρου που περιέχει (25).

Η δομή του πεντελικού μαρμάρου, από άποψη κρυστάλλων, χαρακτηρίζεται από επάλληλες στρώσεις εξαιτίας των συνθηκών μεταμόρφωσης του πετρώματος. Οι στρώσεις αυτές είναι πτυχωμένες κατά μία έννοια ενώ κατά την εγκάρσια έννοια είναι σχεδόν επίπεδες. Η σκληρότητα του υλικού διαφέρει στις τρεις διευθύνσεις. Συγκεκριμένα οι επιφάνειες παράλληλα στις στρώσεις είναι λιγότερο σκληρές ενώ

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

οι επιφάνειες εγκάρσια στις στρώσεις και παράλληλα προς τις πτυχώσεις είναι περισσότερο σκληρές. (Σημ. στη λιθοξοϊκή γλώσσα οι επιφάνειες αυτές ονομάζονται αντιστοίχως Πρόσωπο, Μουρέλο και Κεφάλι) (19).

Οι δοκιμές σε μάρμαρο Πεντέλης είναι δύσκολες λόγω της σπανιότητας του. Στο παρελθόν έχουν γίνει πειράματα θλίψης και κάμψης τριών σημείων για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού. Συνοπτικά:

- Το 1976 ο καθηγητής Θεοχάρης έκανε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π. σε 3 πρισματικά δοκίμια, από άμορφο αρχαίο θραύσμα. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν 7cm x 7cm x 7cm και έδωσαν μέση αντοχή 77.8 MPa.
- Το 1983 ο Κ. Ζάμπας χρησιμοποίησε 43 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 5cm x 5cm x 15cm τα οποία έδωσαν μέση τιμή θλιπτικής αντοχής 58.5 MPa (26).
- Το 1976 ο καθηγητής Θεοχάρης (Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π) υπέβαλε σε δοκιμή κάμψης 3 σημείων 3 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 2cm x 2cm x 26cm τα οποία έδωσαν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής 18.4 MPa.
- Το 1989 ο Κ. Ζάμπας υπέβαλε στα Εργαστήρια του Εργοταξίου Αποκατάστασης του Παρθενώνα 68 κυλινδρικά δοκίμια (διάμετρος 3.5cm και ύψος 15cm) σε πείραμα κάμψης 3 σημείων που έδωσαν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής (στρώσεις μαρμάρου κάθετες στη φόρτιση) 19.4 ± 3 MPa και μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής (στρώσεις μαρμάρου παράλληλες στη φόρτιση) 13.1 ± 2.7 MPa (26).

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας E του μαρμάρου έγιναν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. 3 δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε δοκούς μεγάλου μεγέθους (πρισματικά δοκίμια 19cm x 16.5cm x 80cm) τα οποία έδωσαν μέση τιμή $E=23.000$ MPa (26). Τέλος, το 1984 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θλίψης από τον Θ. Τάσιο σε κυλινδρικά δοκίμια (διάμετρος 10 cm και ύψος 10cm) τα οποία έδωσαν μέση τιμή συντελεστή Poisson $\nu=0.35$ (26).

3.2.2 Αρχαίος δομικός σίδηρος

Ο αρχαίος δομικός σίδηρος είναι ένα ισότροπο και ομογενές υλικό (27), (28), (29). Στις αρχαίες συνδέσεις χρησιμοποιούνταν στρώματα μαλακού καθαρού σιδήρου και σκληρού χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Από δυο συνδέσμου του Παρθενώνα, οι οποίοι συνέδεαν το γείσο της ΒΑ γωνίας του Παρθενώνα με το γειτονικό του της ανατολικής πλευράς, απεκόπησαν 7 δοκίμια. Οι διαστάσεις τους ήταν ανάλογες των απαιτήσεων των βραχέων δοκιμίων όπως ορίζονται από το πρότυπο ASTM E8-69.

Έγιναν δοκιμές εφελκυσμού στα εργαστήρια του Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογίας της Αεροπορίας (ΚΕΤΑ) σε μηχανή MTS-327.12 με αυτόματη καταγραφή της καμπύλης φορτίου - μήκυνσης με καταγραφικό MTS-431 (30). Με βάση τα αποτελέσματα, η τάση διαρροής παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, η ελάχιστη τιμή ήταν 218 MPa ενώ η μέγιστη 356 MPa. Ομοίως και η μέγιστη τάση θραύσης όπου

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

η ελάχιστη τιμή ήταν 335 MPa και η μέγιστη 538 MPa. Οι διαφορές αυτές αποδόθηκαν στη σχέση των στρωμάτων μαλακού και σκληρού χάλυβα στο κάθε δοκίμιο αλλά και σε πιθανά εγκλείσματα σκουριάς (25). Επίσης πολύ μεγάλη είναι και η διακύμανση των τιμών της ανηγμένης μήκυνσης θραύσης. Συγκεκριμένα η ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε είναι 3.5% και η μέγιστη 22.5%. Τέλος, στα διαγράμματα δύο δοκιμίων σημειώθηκαν απότομες πτώσεις της καμπύλης στην πλαστική περιοχή οι οποίες αντιστοιχούν σε μικρορηγματώσεις ψαθυρών περιοχών των δοκιμίων (18).

Η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα των στρωμάτων σιδήρου και χάλυβα είναι τα στοιχεία που καθορίζουν την εφελκυστική συμπεριφορά του αρχαίου δομικού σιδήρου (26). Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού παρατηρείται σταδιακή αστοχία των χαλύβδινων στρώσεων η οποία οδηγεί στην ανακατανομή του φορτίου στο σύνολο της διατομής.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψαν οι παρακάτω μέσες τιμές στα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά:

- Μέση τάσης διαρροής $f_{sym}=265$ MPa
- Μέση τάσης θραύσης $f_{stm}=428$ MPa
- Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας είναι $E_{sm}=220$ GPa.

Λόγω όμως της μεγάλης διακύμανσης των τιμών χρησιμοποιούνται σαν αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές οι ακόλουθες: $f_{syk}=200$ MPa και $f_{stk}=360$ MPa (18).

Η φέρουσα ικανότητα και η παραμορφωσιμότητα των συνδέσμων είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που προκύπτει από τις δοκιμές των βραχέων δοκιμίων. Οι παράγοντες που τις επηρεάζουν είναι (26).

- Η αναλογία των στρωμάτων σιδήρου και χάλυβα.
- Η μέθοδος κατασκευής και ιδιαίτερα ο τρόπος συγκόλλησης των αναδιπλωμένων στρώσεων.
- Η παρουσία εγκλεισμάτων σκουριάς και τυχαίων ατελειών στην παραγωγή σιδήρου.
- Η κατάσταση διατήρησης του συνδέσμου.

3.2.3 Μόλυβδος

Ο μόλυβδος τον οποίο χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι μετά από μία ειδική διαδικασία (μόλυβδοχόηση) είχε τριπλό ρόλο:

- Δίνει πλήρη μηχανική συνέχεια ανάμεσα στο συνδετήριο στοιχείο και το λίθο. Κάτι που θα ήταν ακατόρθωτο στην εν ξηρώ σύνδεση λόγω της ανελαστικότητας του μαρμάρου.
- Είναι μαλακότερο και περισσότερο παραμορφώσιμο υλικό, απορροφώντας αποτελεσματικά ένα μέρος από τους κραδασμούς καθώς και την παραμορφωσιακή ενέργεια που δημιουργείται από έναν σεισμό.

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

- Απομονώνει τον σίδηρο από το περιβάλλον και τον προστατεύει από την οξείδωση. Εξουδετερώνει τις μηχανικές τάσεις από τη διόγκωση του χάλυβα εξαιτίας της διάβρωσης, παρεμποδίζοντας έτσι τη ρηγμάτωση του περιβάλλοντος μαρμάρου (10).

Βασικό για να λειτουργήσει σωστά ο μολύβδος είναι να υπάρχει η δυνατότητα παραμόρφωσης του. Με τη μολυβδοχόηση όμως, επιτυγχάνεται πολύ καλός εγκλιβωτισμός του μολύβδου στις εντορμίες και τα υπερκείμενα μέλη δεν αφήνουν χώρο για περαιτέρω διόγκωση του υλικού. Συνεπώς, ο μολύβδος δεν παραμορφώνεται, αφού δεν υπάρχει χώρος. Κατά συνέπεια βρίσκεται υπό τριαξονικό περιορισμό παραμορφώσεων και θεωρητικά όχι μόνο δεν απορροφά αλλά αντίθετα μεταφέρει αυτούσια την πίεση που εξασκεί το συνδετήριο στα τοιχώματα της εντορμίας. Βέβαια, αν η εφαρμογή του μολύβδου επιτρέπει την ύπαρξη μικρών κενών, τότε πράγματι υπάρχει μια περιορισμένη έστω δυνατότητα παραμόρφωσης (31).

Ο μολύβδος ως υλικό είναι ανθεκτικό στη διάβρωση γιατί τα οξειδία του (PbO , Pb_3O_4 , Pb_2O_3 και PbO_2) τον παθητικοποιούν. Από την άλλη όμως, η όξινη βροχή διαλυτοποιεί τα οξειδία αυτά και προωθεί τη διάβρωσή του σχηματίζοντας το διαλυτό $Pb(NO_3)_2$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προχωράει η διάβρωση του χάλυβα. Για το λόγο αυτό, δεν χρησιμοποιείται το σύστημα χάλυβας- μολύβδος στα έργα αποκατάστασης στην Ακρόπολη (19), (25), (32).

3.3 Υλικά συντήρησης-αποκατάστασης μνημείων της Ακρόπολης

3.3.1 Μάρμαρο Διονύσου

Το μάρμαρο Διονύσου αποτελείται κατά 98% από ασβεστίτη, έχει πυκνότητα 2730 kg/m^3 , φαινόμενη πυκνότητα 2717 kg/m^3 και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος 0.11. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ μεταξύ 15°C και 100°C . Το πορώδες του είναι ιδιαίτερα χαμηλό και κυμαίνεται μεταξύ 0.3% στην παρθενική κατάσταση και 0.7% μετά την επίδραση διαφόρων φυσικών ή και τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων. Το μέγεθος των κόκκων είναι περίπου $0.43 \times 10^{-3} \text{ m}$ και οι κρύσταλλοί του έχουν πολυγωνικό σχήμα με σχεδόν ομοιόμορφες διαστάσεις μεταξύ $900 \times 650 \mu\text{m}$ και $950 \times 874 \mu\text{m}$. Το χρώμα του είναι λευκό με λίγες σταχτόχρωμες φλέβες στη διεύθυνση της σχιστότητας. Τοπικά εντοπίζονται ασημόχρωμες περιοχές λόγω της παρουσίας μικρών ποσοτήτων μοσχοβίτη και χλωρίτη (10), (33).

Το μάρμαρο Διονύσου είναι ανισότροπο υλικό με τρεις διευθύνσεις ανισotropίας, μία κάθετη στις στρώσεις του και δύο εντός του επιπέδου των στρώσεων. Οι μηχανικές ιδιότητες κατά τις δύο διευθύνσεις ανισotropίας είναι παραπλήσιες, όπως δίνεται στον Πίν.3.1 (34).

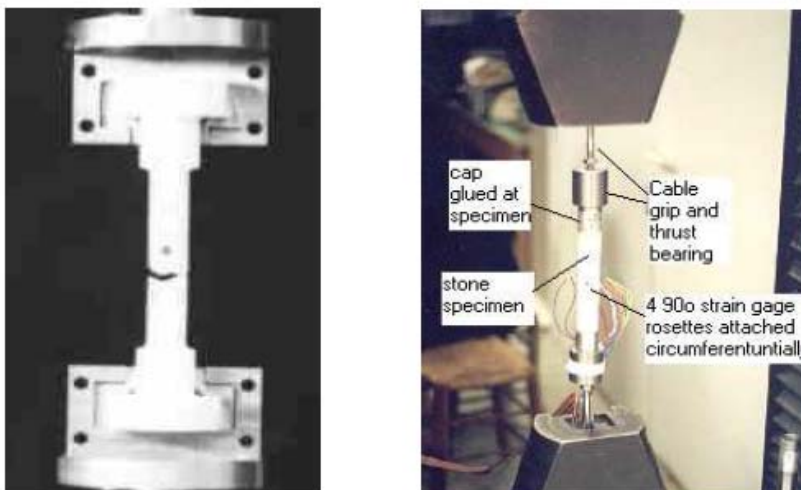
Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

Πίνακας 3.1 Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου (34).

	E [GPa]	$\nu(-)$	σ_f [MPa]
Ισχυρή διεύθυνση	84.5	0.26	10.8
Ενδιάμεση διεύθυνση	79.5	0.26	9.5
Ασθενής διεύθυνση	50.0	0.11	5.3

Οι τιμές οι οποίες προέκυψαν από τα πειράματα παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, όπως συμβαίνει συχνά σε γαιώδη υλικά των οποίων η μηχανική συμπεριφορά εξαρτάται κατά πολύ από το ακριβές σημείο εξόρυξης (10).

Τα πρώτα πειράματα άμεσου μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου έγιναν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π (34), (35). Οι διατάξεις οι οποίες δοκιμάστηκαν ήταν δύο. Η πρώτη αποτελείται από δοκίμια κυλινδρικής διατομής με ειδικά διαμορφωμένα άκρα (κύλινδροι μεγαλύτερης διαμέτρου) για να συγκρατούνται από τις αρπάγες όπως φαίνεται στην Εικ. 3.1. Το φορτίο μεταφέρεται μέσω των αρπαγών διατμητικά, δηλαδή χωρίς σύνθλιψη. Τα πειράματα έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα όμως αυτού του είδους οι δοκιμές έχουν μεγάλο βαθμό δυσκολίας λόγω της ειδικής κατεργασίας των δοκιμίων η οποία απαιτείται για να λάβουν την κατάλληλη μορφή. Επίσης είναι δύσκολη η απόλυτη ευθυγράμμιση του άξονα φόρτισης με τον άξονα του δοκιμίου με αποτέλεσμα όταν υπάρχουν αποκλίσεις, ακόμα και ελάχιστες, να δημιουργούνται παρασιτικές καμπτικές τάσεις και να επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Για να εξαλειφθούν οι τάσεις αυτές τροποποιήθηκε η διάταξη ώστε η στήριξη να αποτελείται από ειδικά συρματόσχοινα τα οποία θα εφαρμόζουν το εφελκυστικό φορτίο σε ειδικό κέλυφος μέσα στο οποίο κοχλιώνεται μεταλλική κεφαλή με εσωτερική διάμετρο αυτή του δοκιμίου (Εικ. 3.1 (δεξιά)). Στο εσωτερικό της κεφαλής, το δοκίμιο συγκολλάται με ειδική κυανοακρυλική συγκολλητική ουσία.

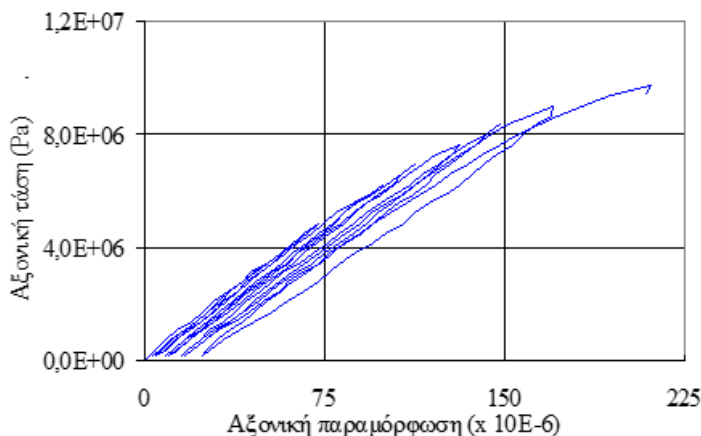


Εικόνα 3.1 Μορφή διατάξεων για δοκιμές άμεσου μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου (34), (35).

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων
της Ακρόπολης των Αθηνών

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τεκμηρίωσαν την άποψη ότι το μάρμαρο Διονύσου μπορεί να θεωρηθεί εγκάρσιως ισότροπο με ένα άξονα ελαστικής συμμετρίας απείρου τάξεως. Συνεπώς, μηχανικά προσδιορίζεται με πέντε σταθερές: δύο μέτρα ελαστικότητας, E στο επίπεδο εγκάρσιας ισοτροπίας και E' κάθετα σ' αυτό, δύο λόγους Poisson, ν και ν' , που περιγράφουν την εγκάρσια απόκριση των παραμορφώσεων εντός του επιπέδου ισοτροπίας σε εφελκυστικές φορτίσεις παράλληλα και κάθετα σ' αυτό και το μέτρο διάτμησης, G , σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας (36).

Μετά από μία σειρά κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης σε δοκιμή άμεσου μονοαξονικού εφελκυσμού (Εικ. 3.2) το μάρμαρο Διονύσου παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά ακόμα και στα αρχικά στάδια της φόρτισης (37). Ομοίως και για το λόγο Poisson (λόγος εγκάρσιας συστολής σε συνάρτηση με τη διαμήκη). Το μάρμαρο εμφανίζει παραμένουσες παραμορφώσεις οι οποίες στον 4° κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης πλησιάζουν το 10^{-5} , ενώ στον όγδοο αγγίζουν το 2.5×10^{-5} . Εμφανίζει δηλαδή φαινομενικά όλκιμη συμπεριφορά (10).

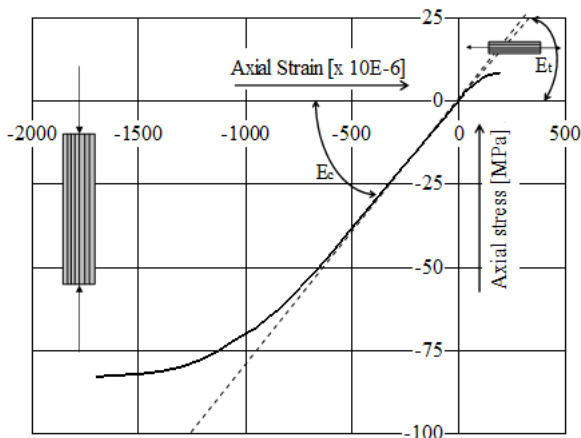


Εικόνα 3.2 Διάγραμμα αξονικών τάσεων-παραμορφώσεων σε άμεσο μονοαξονικό εφελκυσμό με κύκλους φόρτισης- αποφόρτισης (37).

Το μάρμαρο Διονύσου δοκιμάστηκε υπό ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη και το βασικό συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων είναι η διαφορετική μηχανική συμπεριφορά (απόλυτη τιμή τάσεων και παραμορφώσεων) μεταξύ των δύο φορτίσεων, μονοαξονικού εφελκυσμού και θλίψης (Εικ. 3.3 (35)).

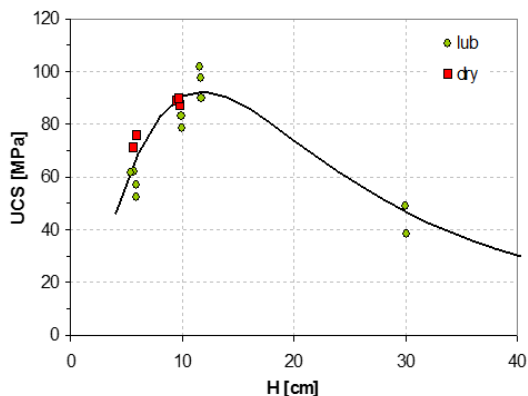
Στην περιοχή εφελκυσμού η καταστατική σχέση είναι εξ αρχής σαφώς μη γραμμική ενώ στην αντίστοιχη περιοχή θλίψης είναι απολύτως γραμμική, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ιδιαίτερα σε καταπονήσεις όπου συνυπάρχουν εφελκυσμός και θλίψη. Από την Εικ. 3.2 προκύπτει επίσης ότι το μάρμαρο Διονύσου είναι «διπλομετρικό (bimodular)» υλικό, με το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη να υπερβαίνει το αντίστοιχο μέτρο σε εφελκυσμό και ο σχετικός λόγος να είναι ίσος περίπου με 1.15 (35).

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα αξονικών τάσεων-παραμορφώσεων μαρμάρου Διονύσου (35).

Στα πειράματα μονοαξονικής θλίψης καθοριστικό ρόλο παίζουν οι συνοριακές συνθήκες, αν οι δοκιμές γίνονται εν ξηρώ ή μεσολαβεί κάποιο λιπαντικό μεταξύ του δοκιμίου και της πλάκας φόρτισης. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τρόποι και τα αποτελέσματα δίνονται στην Εικ. 3.4 (34). Διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα ότι η θλιπτική αντοχή συναρτήσκει των διαστάσεων των δοκιμίων για πειράματα με λίπανση είναι μικρότερη από την αντοχή του υλικού στα εν ξηρώ πειράματα.



Εικόνα 3.4 Θλιπτική αντοχή μαρμάρου Διονύσου συναρτήσκει των διαστάσεων των δοκιμίων για δοκιμές με λίπανση και εν ξηρώ συνθήκες (34).

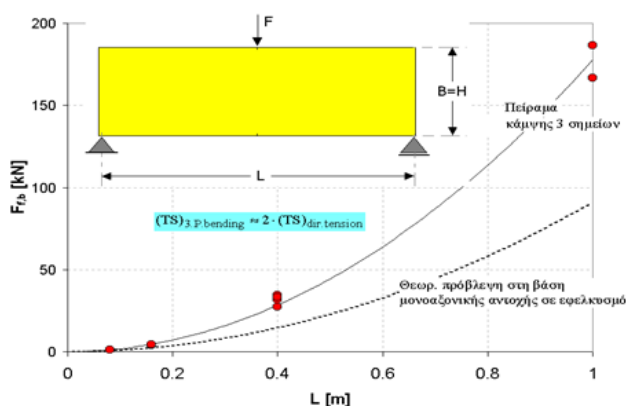
Τέλος, έγιναν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου Διονύσου με τετράγωνη διατομή και λόγο (μήκος δοκιμίου)/ (ύψος διατομής ίσο με 4, και μήκη ίσα με 8, 15, 40 και 100cm. Η διεύθυνση φόρτισης ήταν κάθετη στις στρώσεις του υλικού. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με σύστημα ηλεκτρομηκυσιομέτρων,

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

γραμμικώς διατεταγμένων σε διάφορες κρίσιμες διατομές του δοκιμίου και σε διάφορα ύψη, ώστε να καταστεί δυνατή η μελέτη της επίδρασης του φαινομένου Poisson στην περιοχή επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου (33).

Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν είναι τα εξής:

- Το φορτίο αστοχίας από αναγωγή των δεδομένων εφελκυσμού σε κάμψη υστερεί κατά περίπου 50% του πραγματικού φορτίου αστοχίας υπό κάμψη.
- Το συγκεντρωμένο φορτίο επιδρά στην κατανομή των παραμορφώσεων.
- Η κεντρική διατομή του δοκιμίου βρίσκεται συνεχώς υπό εφελκυστική εντατική κατάσταση σε όλο το ύψος της (33).



Εικόνα 3.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια μαρμάρου Διονύσου (33).

3.3.2 Κονιάματα

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στα έργα αναστήλωσης και αποκατάστασης πρέπει να είναι συμβατά στο μέτρο του δυνατού με την αρχαία πέτρα. Το κονίαμα συνεπώς πρέπει να έχει όμοια μικροδομή, δηλαδή χαρακτηριστικά όπως το πορώδες, το μέγεθος και η μορφή των πόρων, ο τρόπος σύνδεσης τους κλπ. να είναι παρόμοιος. Η μικροδομή επηρεάζει τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας κ.λ.π.). Κατά συνέπεια, το κονίαμα πρέπει να έχει υψηλό ποσοστό πορώδους (~30%) και η μέση ακτίνα του πόρου θα πρέπει να είναι (>0.2μm) ώστε να εξασφαλιστεί ικανοποιητική απορρόφηση του απομένουτος νερού και της υγρασίας από το φθαρμένο μάρμαρο ή από τις ενώσεις καθώς και γρήγορη εξάτμιση του νερού από τη μάζα του. Η μηχανική αντοχή των κονιαμάτων πρέπει να είναι μικρότερη από εκείνη του Πεντελικού μαρμάρου ώστε σε περίπτωση αστοχίας να φθαρεί το υλικό της αποκατάστασης και όχι το αυθεντικό μάρμαρο. Η αντοχή πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να εξασφαλίσει τη συνοχή, την επαρκή σύνδεση και τη διάρκεια της επέμβασης στο χρόνο. Τέλος, η ικανότητα

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

απορρόφησης των δονήσεων και των μικρών μετακινήσεων ώστε να υπάρχει επαρκής συμβατότητα του κονιάματος με το αρχαίο μάρμαρο χαρακτηρίζεται από το μετρό ελαστικότητας όπου πρέπει να είναι χαμηλό (22).

Καθ' υπόδειξη του καθηγητή Θ.Ν Σκουλικίδη, το κονίαμα που χρησιμοποιείται σήμερα στα έργα αναστήλωσης και αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών βασίζεται στη χρήση λευκού τσιμέντου ειδικής κατασκευής ώστε να έχει μικρό ποσοστό θειικών.

Στην απόφαση αυτή συνετέλεσαν τα παρακάτω δεδομένα:

- Το τσιμέντο που είχε χρησιμοποιήσει ο Ν. Μπαλάνος κατά την αναστήλωση του Ερεχθείου εξετάστηκε και προέκυψε ότι η μηχανική αντοχή, η ανθράκωση και η θείωσή του ήταν σε απολύτως ανεκτά όρια, καίτοι η ποιότητά του, την εποχή εκείνη, δεν ήταν ίδια με τη σημερινή και πέραν του γεγονότος ότι δεν ήταν λευκό αλλά γκριζο τσιμέντο.

- Οι επιφάνειες του μαρμάρου οι οποίες ήταν σε επαφή με το τσιμέντο εξετάστηκαν και διαπιστώθηκε ότι δεν είχαν υποστεί καμία φθορά, μηχανική ή χημική, από τσιμέντο ηλικίας 80 περίπου ετών.

- Οι γνωστές επιπτώσεις των αλάτων του τσιμέντου σε πετρώματα μπορούν να εμφανιστούν σε πετρώματα με μεγάλο πορώδες και διαμπερείς πόρους αλλά όχι στο Πεντελικό μάρμαρο με το μικρότερο πορώδες όλων των γνωστών πετρωμάτων: 0.3-2.1% (η τελευταία τιμή αντιστοιχεί σε διαβρωμένο μάρμαρο) (23).

Η σύσταση του κονιάματος που χρησιμοποιείται στα έργα αποκατάστασης εξαρτάται από το λόγο για τον οποίο χρησιμοποιείται. Υπάρχουν δύο ειδών κονιάματα:

1. Κονίαμα αποκατάστασης θραυσμένων δομικών μελών με τη βοήθεια ράβδων οπλισμού.

Στην περίπτωση αυτή το κονίαμα αποτελείται από λευκό τσιμέντο και νερό. Από τεχνίτες του εργοταξίου του Παρθενώνα προετοιμάστηκε μία σειρά κυλινδρικών δοκιμίων με λόγο διαμέτρου προς ύψος ½ περίπου. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε νερό για 28 μέρες και στη συνέχεια δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π. Οι δοκιμές έγιναν με ρυθμό επιβολής μετατόπισης 0.01 mm/s ώστε να προσομοιώνονται συνθήκες “οιονεί” στατικές. Για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκε ένα σύμπλεγμα ηλεκτρομηκυνσιομέτρων τα οποία τοποθετήθηκαν στην περιφέρεια του δοκιμίου σε 3 σημεία. Η μορφή αστοχίας ήταν ψαθυρή με σημαντική ή πλήρη καταστροφή των δοκιμίων (38). Συνοπτικά, τα πειράματα έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- μέτρο ελαστικότητας: $E \sim 15.5 \text{ GPa}$,
- λόγος Poisson: $\nu \sim 0.26$,
- τάση διαρροής: $\sigma_y \sim 10 \text{ MPa}$
- και τάση θραύσης: $\sigma_u \sim 35 \text{ MPa}$ (38).

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C109, οι διαστάσεις κυβικών δοκιμίων κονιαμάτων για δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη είναι 5cm x 5cm x 5cm ενώ σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C348 για πειράματα κάμψης τριών σημείων οι διαστάσεις των πρισματικών δοκιμίων είναι 4cm x 4cm x 16cm.

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

Παρασκευάστηκαν με τη βοήθεια τεχνιτών από το εργοτάξιο του Παρθενώνα κυβικά δοκίμια και πρισματικά δοκίμια κάμψης από πάστα λευκού τσιμέντου με αναλογία νερού/τσιμέντου ίδια με εκείνη που χρησιμοποιείται στα έργα αποκατάστασης. Τα δοκίμια καλύφθηκαν με νοπά υφάσματα για να διατηρηθεί η φυσική τους υγρασία και συντηρήθηκαν με αυτόν τον τρόπο για 28 ημέρες.



Εικόνα 3.6 (α) Δοκίμια κάμψης 3 σημείων και μονοαξονικής θλίψης από πάστα λευκού τσιμέντου, (β) δοκίμια κάμψης 3 σημείων από τσιμεντοκονία μετά τις δοκιμές.

Στη συνέχεια δοκιμάστηκαν σε ανεμπόδιση μονοαξονική θλίψη σε εν ξηρώ συνθήκες (ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και το δοκίμιο δεν τοποθετήθηκε κάποια λιπαντική ουσία). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πλαίσιο φόρτισης INSTRON 300kN με έλεγχο της μετατόπισης.

Η αστοχία ήταν ψαθυρή και σε κάποιες περιπτώσεις με πλήρη καταστροφή του δοκιμίου (Εικ. 3.7). Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πιν. 3.2.



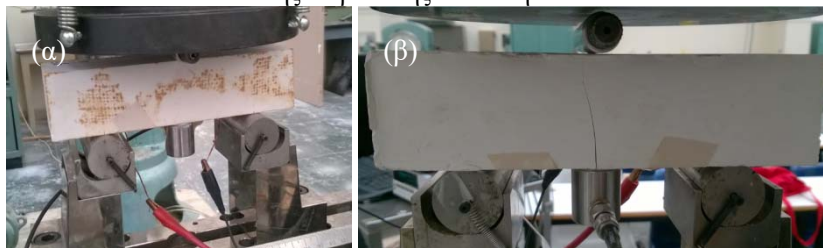
Εικόνα 3.7 (α) Δοκίμιο θλίψης τσιμεντοκονίας πριν και (β) μετά τη δοκιμή.

Πίνακας 3.2 Μέγιστη τάση δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε θλίψη.

Δοκίμια	Μέγιστη τάση [MPa]
p-01	90.78
p-02	63.98
p-03	88.56
p-04	81.05
p-05	75.87
p-06	86.67

Τέλος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης 3 σημείων (Εικ. 3.8) τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στον Πιν. 3.3.

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών



Εικόνα 3.8 (α) Δοκίμια κάμψης τριών σημείων πριν και (β) μετά τη δοκιμή.

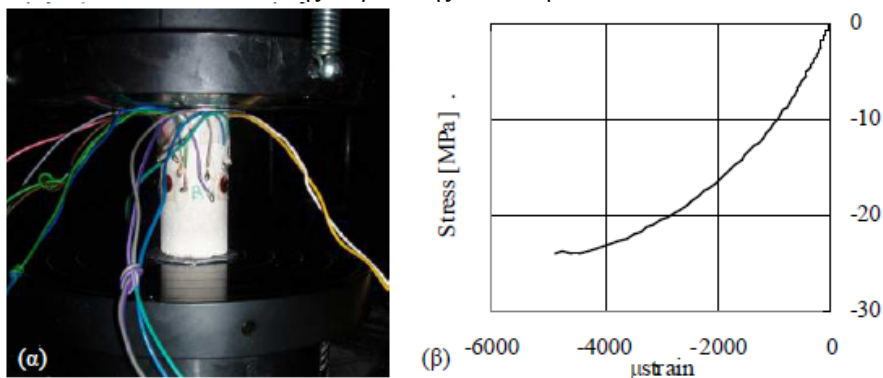
Πίνακας 3.3 Μέγιστο φορτίο σε δοκιμές κάμψεως τριών σημείων.

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο [kN]	Ρυθμός μετατόπισης [mm/min]
paste-01	0.45	0.2
paste-02	0.40	0.2
paste-03	0.41	0.02
paste-04	0.30	0.02
paste_a	0.30	0.01
paste_b	0.58	0.02
paste_c	0.28	0.02
paste_d	0.24	0.02
paste_e	0.60	0.02
paste_f	0.30	0.02

2. Κονίαμα σύνδεσης δομικών μελών με τη χρήση συνδετηρίων στοιχείων.

Στις συνδέσεις όπου υπήρχε αρχαίος μόλυβδος η αποκατάσταση της σύνδεσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια κονιάματος το οποίο περιέχει λευκό τσιμέντο, χαλαζιακή άμμο διάφορων διαβαθμίσεων και νερό (τσιμέντο/άμμος = 1/3 κατά βάρος). Τα δοκίμια τα οποία παρασκευάστηκαν από τους τεχνίτες του εργοταξίου του Παρθενώνα, ήταν κυλινδρικά με λόγο διάμετρος/ύψος=1/2. Στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στο πλαίσιο φόρτισης INSTRON 300kN του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π. Πριν τη δοκιμή εφαρμόστηκαν τρία ηλεκτρομηκυσιόμετρα σε κάθε δοκίμιο ανά 120°. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο της μετατόπισης (ρυθμό 0.01mm/s). Τα αποτελέσματα έδωσαν μέτρο ελαστικότητας $E \sim 10.5 \text{ GPa}$, τάση διαρροής σε θλίψη $\sigma_y \sim 17 \text{ MPa}$, τάση θραύσης $\sigma_u \sim 24 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu \sim 0.18$ (39).

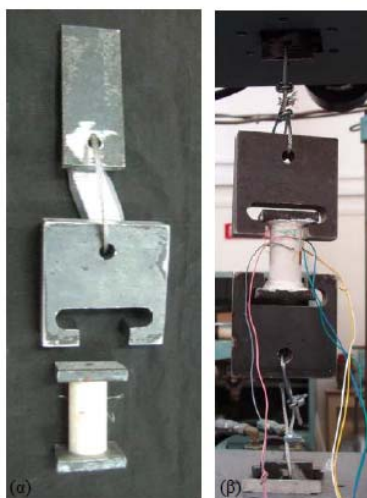
Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών



Εικόνα 3.9 (α) Κυλινδρικό δοκίμιο πριν το πείραμα σε μονοαξονική θλίψη και (β) τυπική καμπύλη τάσεων- παραμορφώσεων (39).

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού- αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test). Οι δοκιμές έγιναν στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π στο πλαίσιο INSTRON 300kN με ρυθμό επιβολής μετατόπισης 0.005mm/s. Τα πειράματα έδωσαν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής περίπου ίση με 2.14 MPa (39).

Επίσης για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής συμπεριφοράς του κονιάματος έγιναν πειράματα άμεσου εφελκυσμού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταλλικές πλάκες οι οποίες κολλήθηκαν στις δύο βάσεις του δοκιμίου. Οι πλάκες αυτές τοποθετούνται στη συνέχεια σε δύο ειδικά διαμορφωμένες αρπάγες. Οι αρπάγες συνδέονται μέσω ειδικών συρματόσχοινων με δύο μεταλλικές πλάκες οι οποίες με τη σειρά τους συγκρατούνται από τις αρπάγες του πλαισίου φόρτισης (Εικ. 3.10 (39)).



Εικόνα 3.10 Πειραματική διάταξη δοκιμής άμεσου εφελκυσμού (39).

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

Στόχος της πειραματικής διάταξης είναι να έχει τόσους βαθμούς ελευθερίας ώστε το δοκίμιο να ευθυγραμμίζεται σωστά και να αποφεύγονται οι παρασιτικές φορτίσεις στο δοκίμιο. Η σχέση των αξονικών τάσεων- παραμορφώσεων είναι γραμμική μέχρι το μέγιστο φορτίο το οποίο είναι περίπου 1.70MPa (39).

Τέλος, στο Εργαστήριο Αντοχής των υλικών του Ε.Μ.Π πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο INSTRON 300kN δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε πρισματικά δοκίμια. Τα δοκίμια προετοιμάστηκαν από το έμπειρο προσωπικό του εργοταξίου του Παρθενώνα και είχαν διαστάσεις 4cm x 4cm x 16cm.

Από τα πειράματα το μέγιστο φορτίο το οποίο προέκυψε αλλά και ο ρυθμός μετατόπισης του πλαισίου φόρτισης δίνεται στον Πιν. 3.4.

Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης 3 σημείων

Δοκίμια	Μέγιστο φορτίο [kN]	Τάση [MPa]	Ρυθμός Επιβολής μετατόπισης [mm/s]
m-a	3.26	7.64	0.2
m-b	3.66	8.58	0.2
m-c	3.59	8.41	0.2
m-d	3.76	8.81	0.2
m-e	3.58	8.39	0.2
m-f	3.70	8.67	0.2

3.3.3 Τιτάνιο

Η βασική αρχή των έργων αποκατάστασης είναι η αναστρεψιμότητα. Δηλαδή χρησιμοποιούνται υλικά και μέθοδοι οι οποίοι αν αστοχήσουν, το έργο να μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση του πριν την επέμβαση. Για το λόγο αυτό, οι σύνδεσμοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην αποκατάσταση μνημείων είναι από τιτάνιο. Οι αρχαίοι χρησιμοποιούσαν μαλακό σίδηρο, χάλυβα ή ανοξείδωτο χάλυβα ή ορείχαλκο. Η διάβρωση των σιδερένιων και ορειχάλκινων στοιχείων οδηγεί στη διόγκωση των ράβδων και στη συνέχεια στον κατακερματισμό του περιβάλλοντος μαρμάρου. Σήμερα, το έντονα διαβρωτικό περιβάλλον της Αθήνας δεν αφήνει άλλη επιλογή πέρα από το τιτάνιο.

Το τιτάνιο υπερτερεί των άλλων υλικών ως προς τη μηχανική αντοχή, το σχετικά μικρό βάρος, τον ίδιο θερμικό συντελεστή διαστολής με το μάρμαρο αλλά και την άριστη συμπεριφορά του έναντι όλων των ειδών διάβρωσης (21).

Η χρήση του τιτανίου προτάθηκε από τον καθηγητή Θ.Ν. Σκουλικίδη και από το 1979 χρησιμοποιείται στην Ακρόπολη καθώς και σε άλλα μνημεία της Ελλάδας και του εξωτερικού (23). Το εμπορικά καθαρό τιτάνιο Grade 2 κατά ASTM B265 και B348 είναι αυτό που χρησιμοποιείται στα έργα αναστήλωσης της Ακρόπολης των Αθηνών και είναι ιδιαίτερα συμβατό υλικό με το μάρμαρο τόσο από άποψη φυσικών όσο και μηχανικών ιδιοτήτων (26).

Αρχικά υλικά δόμησης και υλικά συντήρησης- αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών

Πίνακας 3.5 Βασικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τιτανίου (26).

Πυκνότητα [g/cm ³]	4.51
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	105
Συντελεστής Poisson	0.32
Συντελεστής θερμικής διαστολής [10^{-6} grad ⁻¹]	9
Θερμοαγωγιμότητα [cal/cm· grad·sec]	0.007
Σκληρότητα [HB]	130
Εφελκυστική αντοχή [MPa]	420
Όριο διαρροής [MPa]	300
Επιμήκυνση θραύσης [%]	20-22

Απο συμπληρωματικά πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού σε ράβδους τιτανίου προέκυψαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του Πιν. 3.6. (39). Η παραμόρφωση των δοκιμίων μετρήθηκε με ηλεκτρομηκυνσιόμετρο αλλά και με παραδοσιακό μηκυνσιόμετρο.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά τιτανίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό (39).

Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	100-108
Συντελεστής Poisson	0.34
Όριο διαρροής [MPa]	270-415
Εφελκυστική αντοχή [MPa]	430-492
Επιμήκυνση θραύσης [%]	25-37

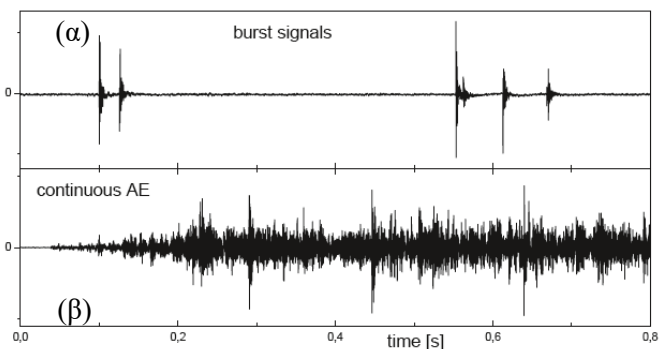
4. Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών

4.1 Εισαγωγή

Οι πρώτες αναφορές στη μέθοδο των Ακουστικών Εκπομπών (AE) εμφανίστηκαν στα μέσα του 20^{ου} αιώνα (40).

Κατά τη διάρκεια φόρτισης ενός στερεού, όταν οι τάσεις γίνουν αρκετά υψηλές, το υλικό παράγει ήχους με τη μορφή διακριτών παλμών. Το υλικό αστοχεί τοπικά και η ελαστική ενέργεια η οποία έχει αποθηκευτεί απελευθερώνεται ξαφνικά. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται μεταβατικά ελαστικά κύματα (transient elastic waves) τα οποία διαδίδονται ομόκεντρα γύρω από τη θέση δημιουργίας τους. Η ενέργεια που απελευθερώνεται με αυτό τον τρόπο μπορεί να ανιχνευτεί με κατάλληλους ακουστικούς αισθητήρες (40). Το φαινόμενο αυτό καλείται Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission – AE) ή Εκπομπή Κυμάτων Τάσης (Stress- Wave Emission – SWE). Η Ακουστική Εκπομπή περιλαμβάνει συχνότητες του ακουστικού φάσματος αλλά κυρίως αποτελείται από υπερήχους. Τα ακουστικά σήματα τα οποία τυχαία δημιουργούνται από τη μικρορηγμάτωση ενός υλικού δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος, τη θέση και τους μηχανισμούς παραμόρφωσης του. Ο όρος «ακουστική» είναι παραπλανητικός αφού επί της ουσίας αναφερόμαστε σε τασικά ελαστικά κύματα και τα καταγραφόμενα σήματα βρίσκονται στην υπερηχητική περιοχή συχνοτήτων (41).

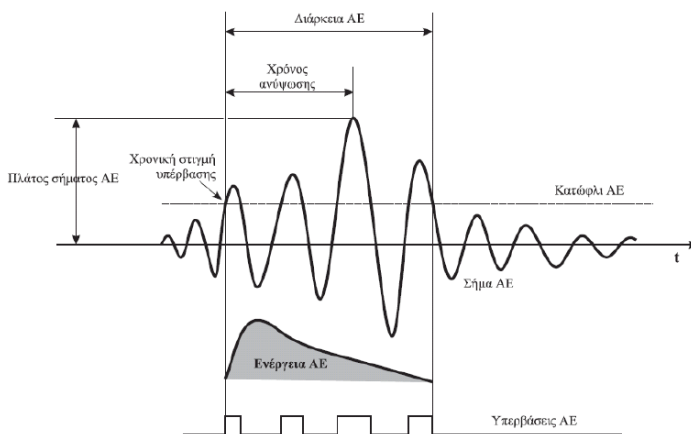
Οι ακουστικές εκπομπές έχουν ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών λόγω της ποικιλομορφίας των πηγών που τις προκαλούν. Αυτές οι διαφορές είναι εμφανείς όταν το σήμα «καθαριστεί» από τον εξωτερικό θόρυβο. Συνεχή σήματα τα οποία παράγονται από κοπή μετάλλων ή τριβή υλικών έχουν αισθητά διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα απότομα σήματα τα οποία παράγονται από την ξαφνική απελευθέρωση ενέργειας λόγω δημιουργίας ρωγμών (Εικ. 4.1) (42). Μελετώντας τις συνεχείς ακουστικές εκπομπές είναι εφικτό να παρακολουθείται αποτελεσματικά η λειτουργία μηχανών όμως λόγω της μορφής τους καθιστούν αδύνατο τον εντοπισμό της θέσης της πηγής (40).



Εικόνα 4.1 (α) Διακριτά και (β) συνεχή σήματα ακουστικών εκπομπών (42).

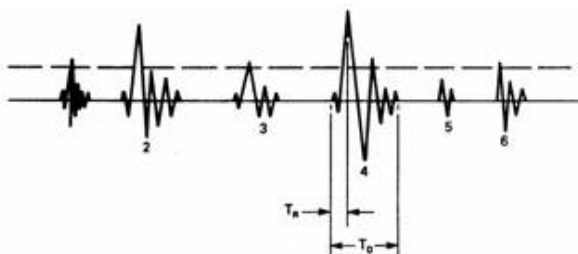
Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών

Κύρια χαρακτηριστικά των παλμών Ακουστικής Εκπομπής είναι ο χρόνος ανύψωσης (rise time-RT), η συνολική διάρκεια DT και το πλάτος τους (amplitude) όταν ξεπερνά ένα ελάχιστο όριο-κατώφλι ΑΕ (threshold) (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 Βασικά χαρακτηριστικά παλμών (43).

Η ρύθμιση του ελάχιστου ορίου (κατώφλι-threshold) είναι σημαντική για την επιλογή ή απόρριψη των παλμών (π.χ. στην Εικ. 4.3, ο παλμός 5 αγνοείται ενώ ο 4 υπολογίζεται δυο φορές).



Εικόνα 4.3 Σειρά παλμών Ακουστικής Εκπομπής (40).

Η τελική επιλογή της παρουσίας ή όχι ενός παλμού είναι μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία στην οποία συμβάλλουν ειδικά κυκλώματα φίλτρων και προγραμμάτων Η/Υ τα οποία εφαρμόζουν τεχνικές θεωρίας αποφάσεων και αναγνώρισης προτύπων. Το πιο βασικό όμως στην επιλογή των τελικών ρυθμίσεων είναι η κρίση του μελετητή.

Βασικό πριν την επεξεργασία των δεδομένων είναι να γίνει η διάκριση του όρου «κτύπος- hit » από τον όρο «γεγονός- event». Ο «κτύπος» είναι το σήμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα και καταγράφεται στο σύστημα ενώ το «γεγονός» αντιστοιχεί στο φυσικό φαινόμενο το οποίο παράγει τα σήματα. Μπορεί να υπάρξει ένα σύνολο κτύπων που να αντιστοιχούν σε ένα μόνο γεγονός. Συνεπώς η βαθμονόμηση του συστήματος είναι πολύ σημαντική και ιδιαίτερα πολύπλοκη. Σύνηθες φαινόμενο είναι οι ανακλάσεις του ίδιου σήματος μέσα στο υλικό με αποτέλεσμα το ίδιο

σήμα να καταγραφεί περισσότερες από μία φορές. Επίσης ένα σήμα μπορεί να χαθεί ή να έχει εξασθενήσει πριν φτάσει να καταγραφεί από κάποιο αισθητήρα. Δεδομένων όλων των παραπάνω, ο ορισμός των παραμέτρων του συστήματος για τα χαρακτηριστικά των σημάτων που προσδιορίζουν ένα γεγονός αποτελεί σημαντικό στάδιο για τη μελέτη των ακουστικών εκπομπών.

Μια από τις ευρύτερα διαδεδομένες εφαρμογές της ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης της ατέλειας που παράγει τους παλμούς ΑΕ. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικειμένου σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να το καλύπτουν ολόκληρο. Η χρονική συσχέτιση των σημάτων που καταγράφονται από κάθε ένα αισθητήρα και βάση της ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων (χαρακτηριστικό κάθε υλικού) γίνεται ο γεωμετρικός προσδιορισμός της θέσης της πηγής κάθε παλμού ΑΕ. Για ατέλειες που βρίσκονται σε ακτίνα περίπου 1 m από τους αισθητήρες, μπορεί να εντοπιστεί η θέση τους με ακρίβεια εκατοστού (1 cm).

Η μέθοδος των ΑΕ είναι μια από τις νεότερες μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ). Έχει ήδη περάσει τα βασικά στάδια ανάπτυξης και έχουν δοθεί οι πρώτες τυποποιήσεις από την ASTM με πιο σημαντικό το ASTM E750. Το κυριότερο προτερήματα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες και κατασκευές.

Η μέθοδος έχει φυσικά και μειονεκτήματα:

- Δεν εκπέμπονται παλμοί ΑΕ από όλες τις ατέλειες του υλικού.
- Η απόδοσή της εξαρτάται από τη μέθοδο φόρτισης της κατασκευής, από την ύπαρξη εξωτερικού θορύβου, από την κατάρτιση και την εκπαίδευση του μελετητή.
- Δεν είναι ακόμη μια πλήρως τυποποιημένη μέθοδος.

4.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων καταγραφών ΑΕ

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων υπάρχουν κυρίως δύο προσεγγίσεις οι οποίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία, η συγκριτική ανάλυση (44) και η ανάλυση έντασης (45). Η συγκριτική ανάλυση συσχετίζει τις μέγιστες καταγραφές των σημάτων στο χρόνο με την αντίστοιχη αθροιστική ένταση του σήματος (cumulative signal strength). Η μέθοδος αυτή αναλύει το φαινόμενο μνήμης του υλικού (Kaiser effect) και τον «Λόγος Ευστοχίας-felicity ratio» όταν πια δεν ισχύει το φαινόμενο Kaiser.

Το φαινόμενο Kaiser σχετίζεται με τη «μνήμη» του υλικού σε προγενέστερη καταπόνηση του. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα δοκίμιο φορτιστεί και αποφορτιστεί (σύμφωνα με το φαινόμενο Kaiser) όταν επαναφορτιστεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες δεν θα γίνει καταγραφή κάποιου ακουστικού φαινομένου μέχρι να ξεπεραστεί το προηγούμενο μέγιστο φορτίο. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να μην έχει υποστεί το υλικό κάποια μόνιμη καταστροφή. Όταν όμως υπάρξει κάποια ακουστική εκπομπή πριν την εφαρμογή του προγενέστερου μέγιστου φορτίου δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει το φαινόμενο Kaiser. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη ο «Λόγος Ευστοχίας-Felicity Ratio FR». Πιο συγκεκριμένα, ο FR είναι ο λόγος του φορτίου μετά την έναρξη της επαναφόρτισης όπου καταγράφεται ακουστική εκπομπή προς το προηγούμενο μέγιστο φορτίο. Συνεπώς, όταν ο FR είναι μεγαλύτερος

ή ίσος με την μονάδα τότε θεωρείται ότι δεν υπήρξε κάποια σοβαρή βλάβη κατά την προηγούμενη φόρτιση. Αν όμως ο FR είναι μικρότερος της μονάδας τότε η ζημιά που υπέστη το υλικό ήταν σοβαρή και μόνιμη. Βέβαια η συσσώρευση ακουστικών εκπομπών δεν παραπέμπει σε σοβαρές καταστροφές της δομής του υλικού αλλά μπορεί να οφείλεται και σε τριβές μεταξύ του δοκιμίου και των συσκευών ελέγχου.

Μία άλλη προσέγγιση αξιολόγησης των δεδομένων ΑΕ είναι η στατιστική τους επεξεργασία για τη λήψη της σοβαρότητας ενός ακουστικού γεγονότος υπολογίζοντας τον δείκτη ΗΙ (Ιστορικός Δείκτης- Historic Index) και τη δριμύτητα του (S_r -Severity). Σημαντική είναι η εξέλιξη αυτών των παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου. Υπολογίζοντας τον ΗΙ εκτιμώνται οι αλλαγές της καμπύλης της αθροιστικής έντασης του σήματος (cumulative signal strength) ως προς το χρόνο. Χαρακτηριστικό είναι το «γόνατο» της καμπύλης το οποίο δίνει την ύπαρξη σοβαρών βλαβών (Εικ. 4.4).

Μετά το πρώτο «γόνατο» των ΑΕ η αθροιστική ένταση σήματος αρχίζει να μειώνεται μέχρι το επόμενο (Εικ. 4.4). Αν εξακολουθεί η καμπύλη να μειώνεται τότε σηματοδοτείται η έναρξη της αστοχίας.

Ο υπολογισμός του ΗΙ σύμφωνα με τους Blessing, Fowler και Strauser γίνεται ως εξής :

$$H(I) = \frac{N}{N-K} * \left(\frac{\sum_{i=K+1}^N S_{oi}}{\sum_{i=1}^N S_{oi}} \right) \quad (45), (46), 4.1$$

N είναι ο αριθμός των hits,

S_{oi} η ένταση του σήματος κάθε γεγονότος

K ο εμπειρικός τύπος ο οποίος εξαρτάται από το υλικό και τον αριθμό των κύπων-hits.

Δριμύτητα (S_r) ορίζεται ως η μέση ένταση σήματος (average signal strength) ενός δεδομένου αριθμού γεγονότων (J) με τη μεγαλύτερη τιμή της έντασης σήματος. Η S_r μπορεί να αυξάνεται ή να παραμένει σταθερή καθώς αυξάνεται το φορτίο. Μια απότομη αύξηση της S_r είναι ένδειξη αστοχίας. Η αύξηση της μπορεί να συνεχίζεται όμως με μειωμένο ρυθμό (47).

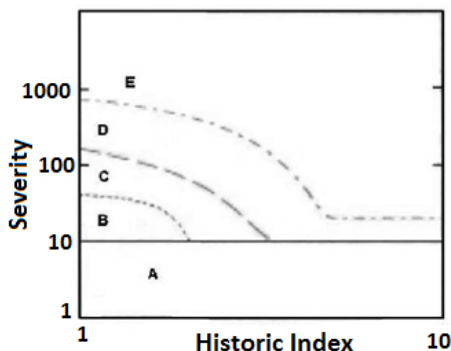
$$S_r = \frac{1}{J} (\sum_{m=1}^J S_{oi}) \quad (45), (46), 4.2$$

J εμπειρική σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό,

S_{oi} η ένταση του σήματος στο i γεγονός.

Το διάγραμμα της δριμύτητας S_r και του ΗΙ χωρίζεται σε 5 περιοχές ανάλογα με την σημαντικότητα των ακουστικών εκπομπών (46). Η πρώτη περιοχή Α είναι ελάσσονος σημασίας εκπομπές, η περιοχή Β αντιστοιχεί σε μικρές ατέλειες ενώ η περιοχή C σε σημαντικές ατέλειες με ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης. Τέλος οι περιοχές D, E είναι επικίνδυνες περιοχές οι οποίες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή (Εικ. 4.4).

Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών



Εικόνα 4.4 Το διάγραμμα δριμύτητας S_r και του δείκτη HI (46).

Για να ποσοτικοποιηθεί το επίπεδο ζημιάς ενός υλικού υπάρχουν διάφοροι παράμετροι ή συνδυασμοί αυτών.

Η μέθοδος Ledeczki et al. (48) χρησιμοποιεί τον αριθμό των γεγονότων για να προσδιοριστεί η ακουστική δραστηριότητα και ο μέσος όρος του πλάτους αυτών για να ποσοτικοποιηθεί η ένταση τους. Επίσης σύμφωνα με τους Gong et al. (49) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση μεταξύ του ρυθμού των υπερβάσεων (counts-πόσες φορές ένα σήμα AE υπερβαίνει το κατώφλι) με το συντελεστή έντασης της τάσης ΔK (stress intensity factor) έχοντας ως στόχο να γίνει κατηγοριοποίηση της ρωγμής σε 5 διαφορετικά επίπεδα.

$$N' = A (\Delta K)^n \quad 4.3$$

A, n πειραματικές σταθερές.

Η παραπάνω σχέση δεν είναι κάτι διαφορετικό από το νόμο Paris για τη διάδοση της ρωγμής (κόπωση).

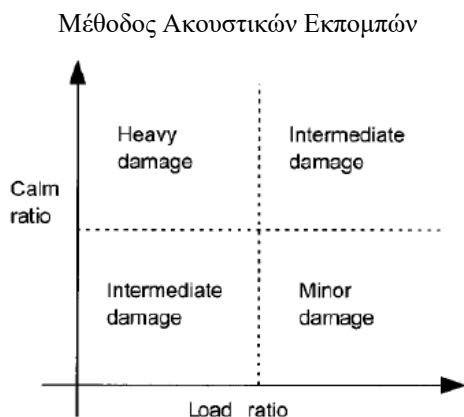
$$\frac{da}{dn} = C (\Delta K)^n \quad 4.4$$

$\frac{da}{dn}$ ο ρυθμός της διάνοιξης της ρωγμής,

C πειραματική σταθερά και

n ο αριθμός των κύκλων κόπωσης

Στην Ιαπωνία οι μη καταστροφικές μέθοδοι παρακολούθησης κατασκευών βασίζονται σε δύο παραμέτρους (load ratio – calm ratio). Η σχέση μεταξύ αυτών των δύο παραμέτρων δίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 4.5 (50), (51).



Εικόνα 4.5 Σχέση μεταξύ των παραμέτρων load ratio – calm ratio (50).

Μια επίσης πολύ διαδεδομένη μέθοδος ανάλυσης των ακουστικών εκπομπών είναι η b-value ανάλυση. Η ανάλυση αυτή έχει τις ρίζες της στη σεισμολογία και δίνει τη σχέση μεταξύ των γεγονότων με μεγάλο πλάτος αλλά μικρότερη συχνότητα εμφάνισης με τα γεγονότα μικρότερου πλάτους. Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως σχέση Gutenberg-Richter (52), (53).

$$\log_{10} N = a - b * M_L \quad 4.5$$

M_L είναι το μέγεθος Richter των γεγονότων,

N είναι ο αριθμός των γεγονότων με πλάτος στο διάστημα $M_L \pm \frac{\Delta M}{2}$,

a, b είναι εμπειρικές σταθερές.

Η αντιστοίχιση του παραπάνω τύπου με τη μέθοδο των ακουστικών εκπομπών ΑΕ μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\log_{10} N = \alpha - b' * A_{dB} \quad 4.6$$

A_{dB} είναι το μέγιστο πλάτος των ΑΕ γεγονότων.

Και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$A_{dB} = 10 \log_{10} A_{max}^2 = 20 \log_{10} A_{max} \quad 4.7$$

Τέλος η b value λαμβάνεται ίση με $20b'$.

Με βάση τα παραπάνω, η b-value είναι η κλίση της καμπύλης του λογαρίθμου της συχνότητας των γεγονότων προς το πλάτος των ακουστικών εκπομπών (54).

Για τιμές της b-value από 1.5-2.5 θεωρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικά γεγονότα αποδόμησης του υλικού. Οι τιμές στη συνέχεια μικραίνουν καθώς αυξάνονται οι μικρορηγματώσεις και υπάρχουν χαρακτηριστικές διακυμάνσεις οι οποίες προμηνύουν την επικείμενη θραύση. Οι αρχικές υψηλές τιμές αποδίδονται στον μεγάλο αριθμό γεγονότων μικρού πλάτους τα οποία αντιστοιχούν στο σχηματισμό νέων

Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών

ρωγμών και μικρής ανάπτυξης κάποιων παλιών ενώ οι μικρές τιμές της b-value οφείλονται σε λιγότερα γεγονότα μεγαλύτερου πλάτους τα οποία αντιπροσωπεύουν γρήγορες και ασταθείς ρωγμές (55).

Η τιμή της b-value τροποποιήθηκε σταδιακά χρησιμοποιώντας στατιστικές τιμές της κατανομής τους πλάτους των γεγονότων (μέσος όρος και τυπική απόκλιση) και αυτή η μέθοδος αναφέρεται ως βελτιωμένη b-value (Improved b-value) (56).

$$lb = \frac{\log_{10} N(\omega_1) - \log_{10} N(\omega_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (56), 4.8$$

$$\omega_1 = \mu - \alpha_1\sigma, \quad \omega_2 = \mu + \alpha_2\sigma$$

μ μέσο πλάτων γεγονότων,
 σ τυπική απόκλιση της κατανομής πλάτους,
 α_1, α_2 σταθερές.

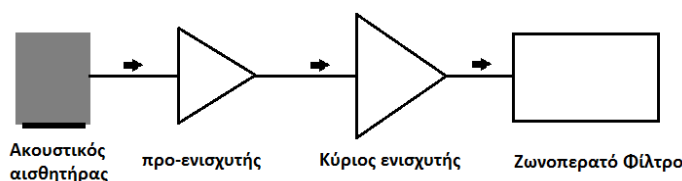
4.3 Ακουστικοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην τεχνική των ακουστικών εκπομπών βασίζονται στις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο αποτελούνται. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες συνδυάζουν το χαμηλό κόστος με την υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία, την εύκολη εφαρμογή και το κατάλληλο εύρος απόκρισης συχνοτήτων. Δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλων πεδίων αλλά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί σε δοκιμές εργαστηριακών προδιαγραφών και εφαρμογών (57).

Οι ακουστικές εκπομπές όταν φτάνουν στον αισθητήρα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα μέσω του πιεζοηλεκτρικού υλικού του αισθητήρα το οποίο έχει την ιδιότητα όταν ασκείται σε αυτό μηχανική φόρτιση (η οποία το παραμορφώνει) να παράγει ηλεκτρική τάση (πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Στη συνέχεια, αυτά τα σήματα μεγεθύνονται και φιλτράρονται.

Το βασικό πρόβλημα που υπάρχει στην καταγραφή των ακουστικών εκπομπών είναι ο θόρυβος, τα παρασιτικά σήματα από τον περιβάλλοντα χώρο. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να εξαλειφθούν με την ανάπτυξη και την εξειδίκευση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται. Το φάσμα συχνοτήτων που καταγράφουν τα μεμονωμένα συστήματα είναι πάνω από εκείνο του ήχου και των περιβαλλοντικών θορύβων (40).

Τα κύματα των ακουστικών εκπομπών τα οποία ανιχνεύονται από τον αισθητήρα είναι ισχά γι' αυτό ενισχύονται από δύο ενισχυτές (έναν προ-ενισχυτή και ένα κύριο ενισχυτή) (Εικ. 4.6).



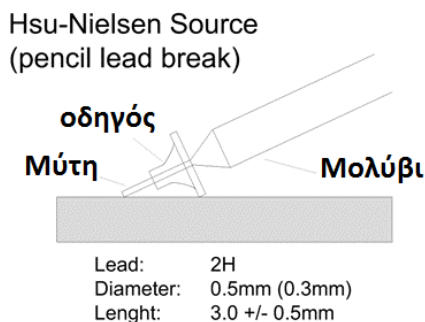
Εικόνα 4.6 Σχηματική απεικόνιση συστήματος καταγραφής ΑΕ.

Ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο πρέπει να είναι χαμηλός, και γι' αυτό το λόγο οι ενισχυτές συνήθως παρέχουν ισχύ μέχρι και 100 φορές μεγαλύτερη. Σε πειράματα σε περιορισμένο χώρο (εργαστηριακά πειράματα) για την εξάλειψη των θορύβων το εύρος της ζώνης διέλευσης σημάτων είναι από κάποια kHz έως 100 kHz ή 1MHz (40).

4.4 Βαθμονόμηση συστήματος- Σημαντικές παράμετροι

Η καταγραφή ακουστικών σημάτων σε ένα υλικό εξαρτάται ουσιαστικά από δύο παραμέτρους. Την ταχύτητα διάδοσης με την οποία ταξιδεύει ένα σήμα μέσα σε ένα υλικό και την εξασθένηση, την απώλεια έντασης του, μέχρι να καταγραφεί από τον ακουστικό αισθητήρα. Όταν το δοκίμιο έχει μικρές διαστάσεις τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι το σήμα καταγράφεται ακέραιο. Η εξασθένηση του σήματος οφείλεται κυρίως σε γεωμετρικές ατέλειες του υλικού και εμπόδια που ανακάλυπτον τη διάδοση του λόγω ανακλάσεων του κύριου σήματος. Αυτό εντείνεται σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας της κατασκευής όπου εναλλαγές στη δυσκαμψία και διαφορές στις συνοριακές συνθήκες αλλάζουν το σήμα μέχρι να φτάσει στον αισθητήρα. Τέλος, η μεταβολή της ελαστικής και κινηματικής ενέργειας σε θερμότητα οδηγεί στην απορρόφηση μέρους της αρχικής ενεργειακής κατάστασης του σήματος με αποτέλεσμα πάλι η καταγραφή να είναι αλλοιωμένη.

Τα δυο χαρακτηριστικά του υλικού, η ταχύτητα διάδοσης και η εξασθένηση μπορούν να προσδιοριστούν με μία απλή και οικονομική λύση. Βασίζεται στην παραγωγή ενός γνωστού ως προς τη θέση και την ένταση σήματος με τη βοήθεια ενός μηχανικού μολυβιού.



Εικόνα 4.7 Μέθοδος βαθμονόμησης AE Hsu - Nielsen.

Η μύτη του μολυβιού πιέζεται στην επιφάνεια της κατασκευής όπως δίνεται στην Εικ.4.7 προκαλώντας μία τοπική παραμόρφωση. Με τη σωστή τεχνική μπορεί να παραχθεί ένα αντιπροσωπευτικό ακουστικό σήμα. Την τεχνική αυτή ανέπτυξαν οι Hsu- Nielsen. Κατάφεραν με αυτό τον τρόπο να παράγεται σήμα μικρής διάρκειας και με χαρακτηριστικά όμοια εκείνου που οφείλεται σε μία ρωγμή (58).

Ανάλογα το χρόνο στον οποίο καταγράφεται ένα γεγονός από όλους τους αισθητήρες και την ταχύτητα διάδοσης του κύματος, είναι εφικτό (με δεδομένες τις θέσεις των αισθητήρων) να υπολογιστεί η θέση της πηγής (57).

Οι βασικές περιπτώσεις εντοπισμού θέσης είναι (43):

Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών

1. Ο χωρικός εντοπισμός της θέσης της ΑΕ (3d location).
2. Ο εντοπισμός της θέσης ΑΕ πάνω σε ένα επίπεδο (2d location).
3. Γραμμικός εντοπισμός, εντοπισμός της θέσης της ΑΕ ανάμεσα σε δύο σημεία (linear location).
4. Εντοπισμός σε ζώνη. Δίνει προσεγγιστικά τη θέση του γεγονότος σύμφωνα με το ποιος αισθητήρας το κατέγραψε χρονικά πρώτος (zonal location).

Ανεξάρτητα από το αν ο εντοπισμός της θέσης είναι σε 1, 2 ή 3 διαστάσεις η μαθηματική λογική είναι ίδια. Αρχικά ορίζεται η αρχή των αξόνων και δίνονται οι διαστάσεις της κατασκευής που μελετάται. Με βάση το σύστημα συντεταγμένων ορίζονται οι θέσεις των αισθητήρων. Ανάλογα τη χρονική στιγμή την οποία καταγράφεται ένα γεγονός από όλους τους αισθητήρες υπολογίζεται η απόσταση της πηγής από κάθε αισθητήρα.

Για παράδειγμα, για τον εντοπισμό της θέσης ενός γεγονότος στο επίπεδο (δύο διαστάσεις) ορίζονται αρχικά οι συντεταγμένες δύο αισθητήρων οι οποίοι καταγράφουν πρώτοι το γεγονός, έστω $((x_1, y_1), (x_2, y_2))$. Η άγνωστη θέση της πηγής θεωρείται ότι έχει συντεταγμένες x_s, y_s .

Για αυτούς τους δύο αισθητήρες θα ισχύει:

$$t_2 - t_1 = \frac{\sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}}{v} \quad 4.9$$

Όπου v η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Για την επίλυση της Εξ. 4.9 απαιτείται και μία δεύτερη εξίσωση καθώς οι άγνωστοι είναι δύο (x_s, y_s) . Άρα χρειάζεται και τρίτη καταγραφή.

Για την τρίτη καταγραφή του σήματος θα ισχύει:

$$t_3 - t_1 = \frac{\sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}}{v} \quad 4.10$$

Όσες περισσότερες καταγραφές υπάρχουν τόσες εξισώσεις ορίζονται:

$$t_i - t_1 = \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}}{v} \quad 4.11$$

Οι χρόνοι που καταγράφουν οι αισθητήρες δίνουν μια δεδομένη διαφορά χρόνου άφιξης σε κάθε αισθητήρα ως προς την πρώτη καταγραφή:

$$\Delta t_{i,καταγ} = t_i - t_1 \quad 4.12$$

Για ένα σύνολο θέσεων της πηγής υπολογίζονται οι αντίστοιχοι χρόνοι:

$$\Delta t_{i,υπολ} = \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}}{v} \quad 4.13$$

Στη συνέχεια ορίζεται ο όρος χ^2 ο οποίος πρέπει να είναι 0.

$$\chi^2 = \sum (\Delta t_{i,καταγ} - \Delta t_{i,υπολ})^2 \quad 4.14$$

Το σύστημα δοκιμάζει ένα σύνολο τιμών x_s , y_s το οποίο θα δώσει την ελάχιστη δυνατή τιμή χ . Αυτές οι τιμές θα είναι οι συντεταγμένες της πηγής του σήματος. Ανάλογα γίνεται ο καθορισμός της θέσης για τις 3 διαστάσεις (43).

4.5 Διάκριση σημάτων ακουστικών εκπομπών

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών ως τρόπος παρακολούθησης των κατασκευών (κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα) είναι ένας οικονομικός και αξιόπιστος τρόπος εντοπισμού κρίσιμων περιοχών αστοχίας στο υλικό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα χαρακτηριστικά των ακουστικών σημάτων εξαρτώνται καθαρά από την πηγή. Αν η ρωγμή που προκάλεσε ένα συγκεκριμένο σήμα είναι εφελκυστικού, διατμητικού ή σύνθετου τύπου, το σήμα θα διαφέρει σημαντικά. Συνεπώς, η ταυτοποίηση των σημάτων ανάλογα τα χαρακτηριστικά τους θα μπορούσε να δώσει σημαντική πληροφορία για την εντατική κατάσταση του υλικού.

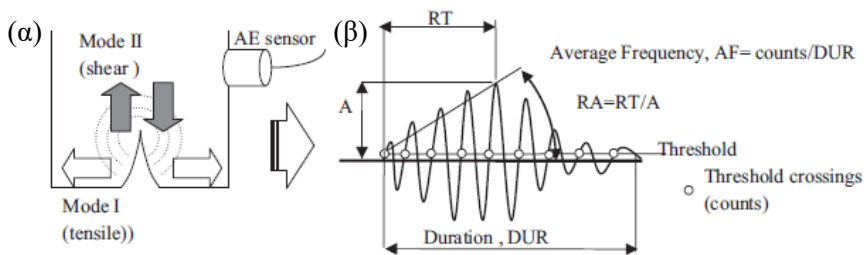
Έχει διαπιστωθεί ότι στα αρχικά στάδια φόρτισης ενός υλικού αναπτύσσονται ρωγμές εφελκυστικού τύπου ενώ οι διατμητικού τύπου ρωγμές εμφανίζονται αρκετά αργότερα (59). Αυτό είναι ένα σύνθηες συμπέρασμα σε δοκιμές οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη. Οι αρχικές ρωγμές καταγράφονται στην κάτω εφελκυστική περιοχή του σκυροδέματος ενώ το μέλος αστοχεί από διαγώνιες διατμητικές ρωγμές (60).

Για τη διάκριση κάθε είδους ρωγμής κατά την καταπόνηση ενός υλικού αναπτύχθηκε η ανάλυση του τανυστή των ροπών (moment tensor analysis- MTA). Εφαρμόστηκε σε πολλά πειράματα δίνοντας ενθαρρυντικά αποτελέσματα (60), (61). Για την ανάλυση MTA απαιτείται 6 τουλάχιστον αισθητήρες να έχουν καταγράψει το ίδιο γεγονός (62). Η θέση όμως ενός γεγονότος δεν είναι γνωστή εξ αρχής. Για τον εντοπισμό της, οι αισθητήρες διατάσσονται σε μία αρκετά μεγάλη περιοχή. Κατά συνέπεια, η απόσταση μεταξύ γειτονικών αισθητήρων είναι σημαντικά μεγάλη ώστε να μην επιτρέπει πάντα την καταγραφή ενός σήματος από όλους τους αισθητήρες. Σε κάποιους αισθητήρες μπορεί να φτάσει το σήμα εξασθενημένο και με βάση τις παραμέτρους που έχουν οριστεί να απορριφθεί ή λόγω ανακλάσεων να μην φτάσει ποτέ. Για τον εντοπισμό λοιπόν της θέσης ενός γεγονότος, η διάταξη των αισθητήρων μπορεί να είναι επαρκής (4 αισθητήρες απαιτούνται για τον εντοπισμό θέσης σε 3 διαστάσεις (Ενότητα 4.4)) ενώ για τη MTA ανάλυση να μην υπάρχουν αρκετά δεδομένα για να εφαρμοστεί.

Η λύση στο πρόβλημα είναι να επικεντρωθεί η ανάλυση στον εντοπισμό της θέσης ενός γεγονότος και να γίνει ταυτοποίηση του είδους της πηγής με βάση τα χαρακτηριστικά των καταγραφόμενων κυματομορφών. Η εφελκυστικού τύπου ρωγμή δίνει κυματομορφές με μικρό «χρόνο ανύψωσης» και υψηλή συχνότητα. Αντίθετα οι διατμητικού τύπου ρωγμές δίνουν μεγάλο «χρόνο ανύψωσης» και μικρή συχνότητα (62).

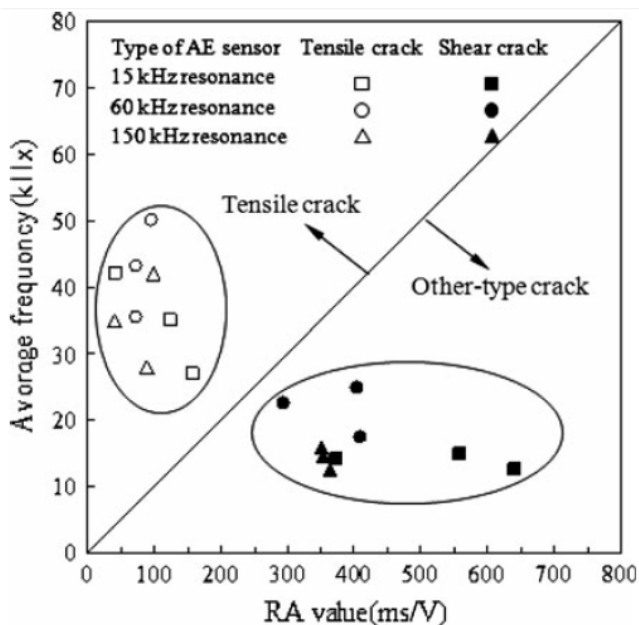
Οι ακουστικές παράμετροι στις οποίες βασίστηκε η διάκριση των ακουστικών σημάτων είναι η μέση συχνότητα, δηλαδή ο λόγος της υπέρβασης του «κατωφλιού» προς την αντίστοιχη διάρκεια και ο δείκτης $RA = \text{χρόνος ανύψωσης} / \text{πλάτος σήματος}$ (Εικ. 4.8).

Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών



Εικόνα 4.8 (α) Μορφές ρωγμών, (β) χαρακτηριστικές παράμετροι Ακουστικών εκπομπών (62).

Το διάγραμμα της μέσης συχνότητας ως προς τη μεταβολή του δείκτη RA (έχουν υπολογιστεί για ένα μέσο όρο πάνω των 50hits) δίνει μία γενική εικόνα για το είδος των ρωγμών που εμφανίστηκαν ανάλογα τα χαρακτηριστικά τους (Εικ. 4.9). Υψηλές τιμές μέσης συχνότητας και μικρές τιμές του δείκτη RA δείχνουν εφελκυστικού τύπου ρωγμές ενώ πριν την τελική θραύση του υλικού η μέση συχνότητα μειώνεται και ο δείκτης RA αυξάνεται (60).



Εικόνα 4.9 Τυπικό διάγραμμα ταυτοποίησης ρωγμών (63).

5. Παραγωγή Ηλεκτρικών Σημάτων

5.1 Εισαγωγή

Ένα υλικό θεωρείται ότι αστοχεί όταν αδυνατεί να φέρει φορτία. Αυτό μακροσκοπικά μπορεί να συμβεί όταν ένα συνεχές υλικό υποστεί διαχωρισμό (cleavage) ή ολίσθηση (slip). Όταν δύο γειτονικά επίπεδα υπό την επίδραση σταθερής και ομοιόμορφης εφελκυστικής τάσης απομακρυνθούν, τότε το υλικό έχει υποστεί διαχωρισμό, ενώ όταν τα δύο αυτά τμήματα ολισθήσουν υπό ομοιόμορφη σταθερής διατμητικής τάσης τότε το υλικό έχει υποστεί ολίσθηση.

Στις περιπτώσεις αυτές, το τασικό πεδίο δεν είναι πάντα τόσο απλό αλλά ούτε και ομογενές. Αυτό οφείλεται τόσο στα εξωτερικά φορτία όσο και στις γεωμετρικές ανωμαλίες του υλικού. Οι ανωμαλίες αυτές μπορεί να είναι μακροσκοπικές (διαστάσεις, γωνίες, καμπυλότητες) και εύκολα αντιληπτές με το μάτι ή μικροσκοπικές (εγκλείσματα, κενά, δυστοπίες- γραμμοαταξίες (dislocations), όρια κόκκων) οι οποίες δεν εντοπίζονται εύκολα (64).

Η πιο συνηθισμένη ανωμαλία στην οποία αποδίδονται ιδιαίτερης σημασίας φαινόμενα όπως η παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων (Pressure Stimulated Currents PSC) είναι η ύπαρξη δυστοπιών-γραμμοαταξιών (dislocations) οι οποίες θα εξετασθούν εκτενώς στις επόμενες ενότητες.

5.2 Διαταραχές- ατέλειες υλικών- dislocations

Ένας τέλειος κρύσταλλος, με κάθε άτομο του ίδιου τύπου στη σωστή θέση, δεν υπάρχει. Όλοι οι κρύσταλλοι έχουν μερικές ατέλειες. Αυτές οι ατέλειες μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές, τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, την κινητικότητα των ηλεκτρονίων στα μέταλλα αλλά και τη δημιουργία ή την εξαφάνιση φορέων ηλεκτρικού ρεύματος σε ημιαγωγούς.

Ανάλογα με τη μορφή και τη γεωμετρία των ατελειών της κρυσταλλικής δομής του υλικού οι ατέλειες αυτές διακρίνονται σε 4 κατηγορίες (65):

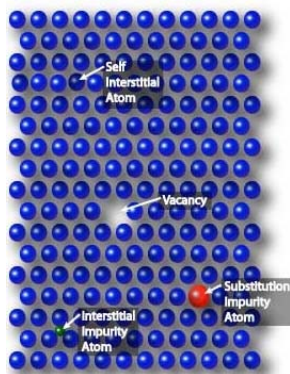
- Σημειακές ατέλειες- μηδενικής διάστασης.
- Γραμμικές ατέλειες – ατέλειες μίας διάστασης.
- Επίπεδες ατέλειες- ατέλειες δύο διαστάσεων.
- Ατέλειες τριών διαστάσεων.

5.3 Σημειακές ατέλειες

Οι σημειακές ατέλειες δημιουργούνται όταν λείπει ένα άτομο ή έχει τοποθετηθεί ακανόνιστα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Στις σημειακές ατέλειες συμπεριλαμβάνονται επίσης οι ατέλειες αντικατάστασης και παρεμβολής. Ως ατέλεια αντικατάστασης θεωρείται η τοποθέτηση ενός ατόμου ξένου στοιχείου σε μία κανονική θέση του κρυσταλλικού πλέγματος ενώ η ατέλεια παρεμβολής είναι η κατάληψη μιας θέσης μεταξύ των ατόμων που βρίσκονται στις κανονικές πλεγματικές θέσεις

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

από ένα ξένο άτομο (Εικ. 5.1). Τα ξένα άτομα μπορεί να προέρχονται από ακαθαρσίες ή από προσμίξεις όπου λόγω της διαφορετικής διάστασης τους προκαλούν παραμόρφωση στην αρχική μορφή του κρυστάλλου (65).



Εικόνα 5.1 Σημειακές ατέλειες (65).

Στα ιοντικά στερεά όπου οι δομικές μονάδες είναι ιόντα, οι ατέλειες μηδενικής διάστασης (σημειακές ατέλειες) είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες λόγω του ότι πρέπει να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα. Για παράδειγμα, αν απουσιάζει ένα θετικό ιόν από μία θέση και υπάρχει ένα κενό τότε μπορεί να απουσιάζει και ένα αρνητικό ιόν από δίπλα του. Η ατέλεια αυτή ονομάζεται Scottky. Επίσης υπάρχει η περίπτωση ένα θετικό ιόν να μετακινηθεί σε κάποια άλλη θέση και να δημιουργηθεί ένα κενό (ατέλεια Frenkel) (65).

5.3.3 Γραμμικές ατέλειες-γραμμοαταξίες

Οι γραμμικές ατέλειες είναι οι ατέλειες οι οποίες δημιουργούνται από ομάδες ατόμων οι οποίες βρίσκονται σε ακανόνιστες θέσεις και είναι η πιο συχνή μορφή ατέλειας. Ουσιαστικά είναι περιοχές όπου τα άτομα έχουν μετακινηθεί από την «τακτοποιημένη» δομή τους. Η προέλευση αυτού του είδους ατελειών είναι η άσκηση κάποιου είδους πίεσης στο υλικό. Σε αυτές τις γραμμικές ατέλειες μπορεί να αποδοθεί η ολίσθηση-πλαστική παραμόρφωση των υλικών.

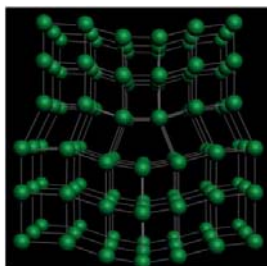
Πριν την ανακάλυψη τους από τον Taylor, Orowan και Polyanι κανένας δε μπορούσε να βρει που οφείλονται οι πλαστικές παραμορφώσεις των μετάλλων οι οποίες παρουσιάζουν έντονες αλλαγές χωρίς να υπάρχει μεταβολή στην χημική σύσταση του υλικού. Πολλοί μεταλλουργοί έμειναν διστακτικοί στη θεωρία των γραμμοαταξιών μέχρι την ανακάλυψη της μεταφοράς ηλεκτρονίων στα τέλη του 1950. Αυτό έδωσε την εξήγηση ότι η αντοχή και η πλαστικότητα των μετάλλων ελέγχεται από αυτές τις αταξίες (65) .

Οι γραμμικές ατέλειες είναι 2 ειδών, οι ατέλειες ακμής και ατέλειες μορφής έλικας. Βέβαια, στην πραγματικότητα οι διαταραχές οι οποίες παρατηρούνται στα υλικά είναι πολύ πιο πολύπλοκες και ουσιαστικά αποτελούν ένα συνδυασμό των βασικών μορφών.

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

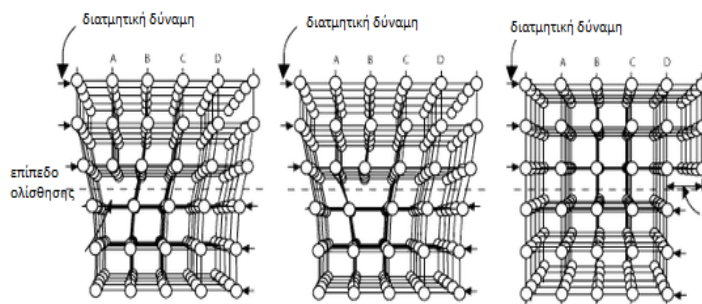
- Διαταραχές ακμής

Όπως διακρίνεται στην Εικ. 5.2 υπάρχει ένα επιπλέον «ημι-επίπεδο» από άτομα στην κρυσταλλική δομή του υλικού. Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων διαταράσσονται στην περιοχή αυτής της ατέλειας.



Εικόνα 5.2 Μορφή γραμμοαταξίας (65).

Πολύ σημαντική ιδιότητα των γραμμοαταξιών είναι η ευκολία μετάθεσης τους χωρίς τη δαπάνη μεγάλης ποσότητας ενέργειας.



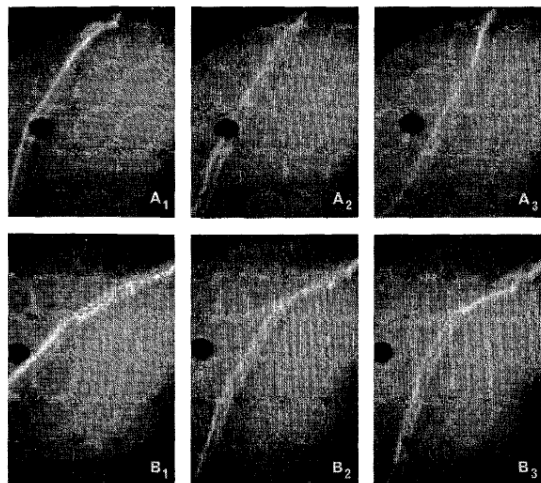
Εικόνα 5.3 Σταδιακή πορεία γραμμοαταξίας υπό την επίδραση διατμητικής δύναμης (65).

Η παραπάνω εικόνα δίνει σταδιακά την πορεία μίας μετάθεσης «γραμμής». Ασκείται διατμητική δύναμη και παρατηρείται η μετάθεση του πάνω μισού τμήματος του κρυστάλλου το οποίο ολισθαίνει κατά μία «στήλη» τη φορά καθώς προχωράει προς τα δεξιά. Ολοκληρώνεται όταν το πάνω τμήμα έχει μετακινηθεί σε σχέση με το κάτω ως προς ένα συγκεκριμένο μήκος (b). Το μήκος αυτό λέγεται διάνυσμα Burgers (Burgers's vector). Το μήκος και η κατεύθυνση της γραμμοαταξίας δίνεται από το διάνυσμα Burger (b) και είναι βασικό χαρακτηριστικό της.

Σημαντικό είναι ότι με την παραπάνω ολίσθηση μόνο ένα μικρό μέρος των δεσμών μεταξύ των ατόμων έχει διαταραχθεί και απαιτήθηκε μικρότερη δύναμη από εκείνη που θα χρειαζόταν για να σπάσει μονομιάς όλους τους δεσμούς των ατόμων πάνω στο επίπεδο ολίσθησης.

Στην Εικ. 5.4 δίνεται μία χαρακτηριστική φωτογραφία μετάθεσης αταξίας. Παρατηρείται η μετακίνηση 2 διαφορετικών γραμμοαταξιών (A, B) σε σχέση με ένα σταθερό σημείο (μαύρος κύκλος) όπως καταγράφεται από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (66).

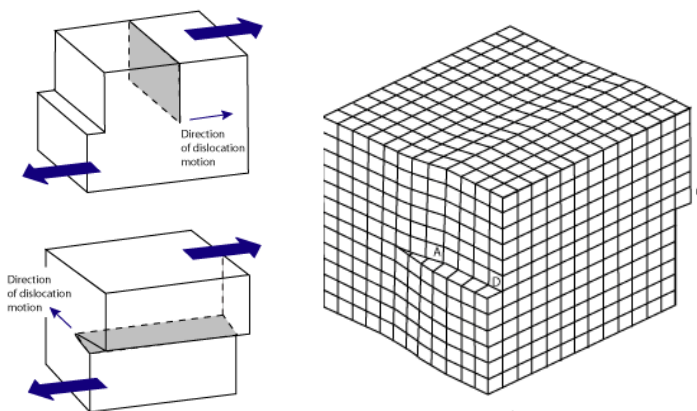
Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων



Εικόνα 5.4 Φωτογραφία μετάθεσης αταξίας (66), (67).

- Διαταραχή κοχλία-έλικα

Ο δεύτερος τύπος διαταραχής είναι η στροφή ως προς ένα επίπεδο. Η διαφορά σε αυτή τη διαταραχή είναι ότι η κίνηση της μετάθεσης είναι κάθετη στην κατεύθυνση της τάσης και όχι παράλληλη (Εικ. 5.5).



Εικόνα 5.5 Διαταραχή μορφή έλικας (65).

Η γραμμοαταξία μορφής έλικα μπορεί να κινηθεί σε περισσότερα επίπεδα ολίσθησης. Υπάρχει δηλαδή η πιθανότητα καθώς οι γραμμοαταξίες ολισθαίνουν επάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο και να αλλάξουν επίπεδο ολίσθησης ώστε να συνεχίσουν την πορεία τους. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σταυρωτή ολίσθηση (cross-slip) (68).

5.3.4 Επίπεδες ατέλειες

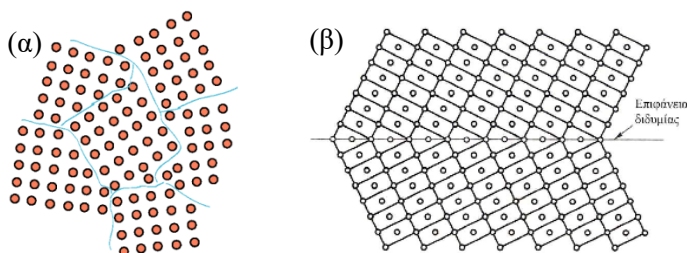
Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

Επίπεδες ατέλειες θεωρούνται οι διεπιφάνειες μεταξύ ομογενών περιοχών του υλικού. Σε αυτές συγκαταλέγονται τα όρια των κόκκων, τα σφάλματα στοιβάγματος και οι επιφάνειες διδυμίων.

Οι διεπιφάνειες στα σύνορα των κόκκων χωρίζουν τις περιοχές με διαφορετικό κρυσταλλικό προσανατολισμό μέσα σε ένα πολυκρυσταλλικό στερεό. Τα άτομα μέσα στην κάθε περιοχή δεν είναι απαραίτητα ταξινομημένα τέλεια.

Τα σφάλματα στοιβάγματος είναι μεταβολές στην αναμενόμενη διαδοχή των επιπέδων κατά μήκος μίας κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης.

Οι διδυμίες συναντώνται σε κρυστάλλους όπου το ένα μέρος του κρυστάλλου έχει μετατοπιστεί σε σχέση με το υπόλοιπο ώστε το ένα να είναι κατοπτρικό είδωλο του άλλου ως προς ένα επίπεδο το οποίο λέγεται επίπεδο διδυμίας (Εικ. 5.6).



Εικόνα 5.6 (α) Επίπεδες αταξίες (69), (β) σχηματική αναπαράσταση διδυμίας (70).

5.3.5 Ατέλειες τριών διαστάσεων

Οι ατέλειες τριών διαστάσεων είναι μακροσκοπικής κλίμακας. Τέτοιες είναι οι πόροι, οι ρωγμές και τα ξένα εγκλείσματα (ακαθαρσίες εντός του υλικού) και κατακρημνίσματα (ενώσεις μετάλλου με κράματα).

5.4 Γενεση γραμμοαταξιών

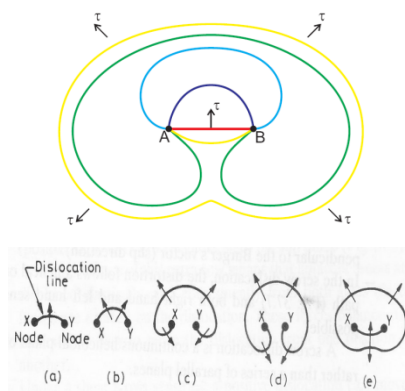
Οι αταξίες υπάρχουν στο υλικό από τη γένεση του. Όμως όταν το στοιχείο υπόκειται σε μεγάλες φορτίσεις που οδηγούν σε πλαστικές παραμορφώσεις τότε η πυκνότητα των αταξιών αυξάνεται. Η πυκνότητα των αταξιών σε ένα υλικό εκφράζεται ως το μήκος της γραμμοαταξίας ανά μονάδα όγκου. Ισοδυναμεί (όχι με μεγάλη ακρίβεια) με το πλήθος των αταξιών που διαπερνούν μία επιφάνεια (μοναδιαία) οπουδήποτε στο υλικό.

Οι Charles Frank και Thornton Read (71) ήταν οι πρώτοι οι οποίοι μελέτησαν τη γένεση των γραμμοαταξιών σε ένα κρύσταλλο ο οποίος παραμορφώνεται (72). Καθώς παραμορφώνεται ο κρύσταλλος για να υπάρξει η ολίσθηση που αναλύθηκε παραπάνω θα πρέπει να υπάρχουν περιοχές όπου οι συνθήκες είναι κατάλληλες για να συμβεί αυτό. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται με μεγάλη πυκνότητα γραμμοαταξιών.

Η πηγή Frank-Read είναι ένας μηχανισμός επεξήγησης του «πολλαπλασιασμού» των γραμμοαταξιών πάνω σε ένα επίπεδο ολίσθησης υπό την επιβολή διατμητικών τάσεων.

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

Έστω μία γραμμοαταξία AB. Η διατμητική τάση η οποία εφαρμόζεται κάθετα στο ευθύγραμμο τμήμα AB (μήκος x) θα τείνει να επιμηκύνει τη γραμμοαταξία και να την καμπυλώσει (μπλε γραμμή). Τα άκρα A και B θεωρούνται σταθερά. Η δύναμη που θα προκαλέσει τη μετακίνηση της γραμμοαταξίας b (Burger vector) θα είναι $F = \tau b x$.



Εικόνα 5.7 Γένεση γραμμοαταξίας (72).

Η καμπτική δύναμη η οποία προκαλείται από τη διατμητική τάση είναι αντίθετη της εφελκυστικής δύναμης η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος της γραμμοαταξίας και προκαλεί την επιμήκυνση της. Το μέγεθος της είναι ίσο με Gb^2 όπου G είναι το μέτρο διάτμησης.

Καθώς η διατμητική τάση αυξάνεται και η γραμμοαταξία κάμπτεται η κάθετη συνιστώσα της εφελκυστικής δύναμης που εντείνει την αταξία μεγαλώνει και την κάμπει προσεγγίζοντας το σχήμα ενός τόξου κύκλου. Η εφελκυστική δύναμη σε αυτή τη φάση είναι κάθετη στο ευθύγραμμο τμήμα με αποτέλεσμα στο σύνολο της να εναντιώνεται στη δύναμη κάμψης (λόγω της τ).

Στην κατάσταση αυτή θα ισχύει

$$\tau b x = 2Gb^2 \tag{72}, 5.1$$

Συνεπώς η τάση τ θα είναι ίση με

$$\tau = \frac{2Gb}{x} \tag{72}, 5.2$$

Αν η τάση τ συνεχίσει να αυξάνεται τότε το στοιχείο περνάει σε κατάσταση ισορροπίας (ημικύκλιο) και συνεχίζει να κάμπτεται και να μεγαλώνει γύρω από τα άκρα A και B μέχρι να πάρει μία σπειροειδή μορφή. Όσο ανοίγει η έλικα τα άκρα ενώνονται και σβήνει η καμπύλη (72).

Η δημιουργία των βρόγχων αυτών γύρω από τα A και B σε ένα επίπεδο ολίσθησης μπορεί υπό την επίδραση κάποιας συνεχούς διατμητικής τάσης να είναι εξακολουθητική ακολουθώντας την ίδια πορεία που περιγράφηκε παραπάνω.

5.5 Το ρεύμα λόγω μετάθεσης γραμμοαταξιών (dislocations)

Από τις πιο διαδεδομένες θεωρίες για τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές οι οποίες παρατηρούνται κατά τη θραύση των υλικών σχετίζονται με τη συμπεριφορά των γραμμοαταξιών και των ελεύθερων ηλεκτρονίων (73).

Έχει παρατηρηθεί αξιοσημείωτη σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής πυκνότητας και του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης του υλικού η οποία αποδίδεται στη διάδοση μιας σειράς φορτισμένων γραμμοαταξιών. Η διάδοση των γραμμοαταξιών γίνεται παράλληλα στην αναπτυσσόμενη διατμητική τάση επιτρέποντας την ανάπτυξη ενός δίπολου ηλεκτρικού πεδίου παράλληλου στο επίπεδο ολίσθησης της γραμμοαταξίας (74).

Ο Misra (75) και οι Misra and Ghosh (76) παρατήρησαν μία ανομοιόμορφη κατανομή των γραμμοαταξιών κατά τη διαρροή των υλικών. Η ανακατανομή αυτή οφείλεται στην προσπάθεια των γραμμοαταξιών να λάβουν θέσεις μηχανικά σταθερότερες λόγω των παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη θλίψη και ειδικότερα κατά τη διαρροή και την εξάπλωση των ρωγμών στο εσωτερικό του υλικού. Αν στις θέσεις αυτές η ενέργεια είναι σημαντικά μειωμένη τότε η γραμμοαταξία σταθεροποιείται εκεί. Τα «ηλεκτρόνια αγωγιμότητας- conduction electrons CE» τα οποία σχετίζονται με τέτοιου είδους αταξίες «παγιδεύονται» από τα θετικά ιόντα. Στα ηλεκτρόνια αυτά αποδίδονται τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα (Misra (75)) τα οποία παρατηρούνται κατά τη διαρροή αλλά και τη θραύση των υλικών λόγω της δημιουργίας του λεγόμενου Herzian δίπολου μετά την ανακατανομή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα (73).

Σε μία μεταγενέστερη ανάλυση ο Molotskii (77) αντιτέθηκε στα όσα υποστήριξε ο Misra θεωρώντας ότι η συχνότητα των εκπεμπόμενων σημάτων θα έπρεπε να είναι της τάξεως των 103Hz, σαφέστατα μειωμένη με εκείνη που είχε μετρηθεί από το Misra. Η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας λόγω της κίνησης των γραμμοαταξιών δεν μπορεί να είναι η εξήγηση για τα σήματα που λαμβάνονται και έδωσε τη δική του εκδοχή. Σύμφωνα με την εκδοχή του Molotskii, τα σήματα δημιουργούνται λόγω της αύξησης του μήκους και της ταχύτητας των γραμμοαταξιών, τα οποία παρατηρούνται κατά τα διάφορα μεταβατικά στάδια. Δεδομένου ότι οι γραμμοαταξίες ενεργούν ως ηλεκτρικά δίπολα, αυτός ο μηχανισμός οδηγεί σε αύξηση της διπολικής ροπής του υλικού.

Η κίνηση των γραμμοαταξιών δεν έχει καθολική αποδοχή ως αιτία των σημάτων των οποίων λαμβάνονται κατά τη ρηγγάτωση των ψαθυρών υλικών. Κάποιοι ερευνητές έχουν καταλήξει ότι η μορφή των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων ποικίλει ανάλογα το υλικό (γυαλί, υαλοκεραμικά, γρανίτης, ρυολίτης, ασβεστόλιθος και κιμωλία) ((78), (79), (80), (81), (82), (83), (84), (85), (86), (87)) και είναι ανεξάρτητη από τον τύπο της φόρτισης (θλίψη, γεωτρήσεις και ανατινάξεις ((88), (89)) (73).

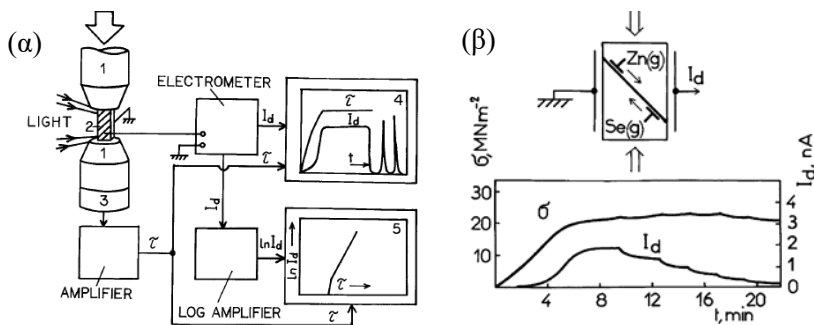
Από την άλλη όμως, οι Jagasivamani και Iyer (90) θεώρησαν ότι υπάρχει κάποια εξάρτηση των σημάτων από την ψαθυρότητα των υλικών. Οι μετρήσεις που έγιναν από τους Frid et al. (85) έδειξαν ότι αυξάνονται σημαντικά οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές με την αύξηση της ψαθυρότητας (73).

Πειραματικά η ποσότητα η οποία μετράται είναι το μέσο ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα μήκους της γραμμοαταξίας. Όμως η κατανομή του φορτίου μεταξύ δύο

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

γραμμοαταξιών είναι άνιση. Τα πειράματα έχουν δείξει ότι το φορτίο σχετίζεται περισσότερο με γραμμοαταξίες γραμμής παρά έλικας (66).

Η παρατήρηση ότι οι γραμμοαταξίες σχετίζονται με μικρής ποσότητας ρεύματα οδήγησε στην ανάπτυξη μίας μεθόδου μελέτης και παρακολούθησης της κίνησης των αταξιών με αποτέλεσμα να ανακαλυφθεί η εξάρτηση της τάσης με την ταχύτητα κίνησης των γραμμοαταξιών (66).



Εικόνα 5.8 (α) Διάταξη μελέτης της κίνησης των αταξιών (66), (β) πείραμα μέτρησης ρεύματος λόγω γραμμοαταξιών σε ZnSe κρύσταλλο ο οποίος παραμορφώνεται πλαστικά υπό θλιπτική τάση (66).

Ο Osip'yan και Petrenko μέτρησαν το ρεύμα το οποίο παράγεται όταν ο κρύσταλλος παραμορφώνεται κατά τη δοκιμή θλίψης (Εικ. 5.8). Στα αλκάλια οι γραμμοαταξίες θα κινηθούν και στις δύο διευθύνσεις πάνω στο επίπεδο ολίσθησης και θα μεταφέρουν το ίδιο φορτίο με αποτέλεσμα το ρεύμα που θα καταγραφεί να είναι λόγω της έλλειψης συμμετρίας στην παραμορφωμένη κατάσταση. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως μπορεί μία γραμμοαταξία να κινηθεί περισσότερο από τη μία πλευρά παρά από την άλλη και το ρεύμα αλλά και η παραμόρφωση να οφείλεται αποκλειστικά σε αυτές. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε ότι το ρεύμα I_d εξαρτάται γραμμικά από την παραμόρφωση ϵ_p (66).

Καθώς αυξάνεται η θλιπτική τάση αυξάνεται και το ρεύμα το οποίο καταγράφεται. Όταν σταθεροποιηθεί η τάση (σ), το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται μέχρι σχεδόν να μηδενιστεί (Εικ. 5.8 (β)).

Η θεωρία του ρεύματος το οποίο προέρχεται από τη μετάθεση των γραμμοαταξιών βασίζεται σε 4 βασικές προσεγγίσεις.

- Το φορτίο το οποίο έχει εκ φύσεως ο κρύσταλλος λόγω του ιοντικού χαρακτήρα του.
- Το ρεύμα το οποίο σχετίζεται με τις αταξίες σημείου.
- Το φορτίο λόγω πλεονάσματος ή ελλείματος ηλεκτρονίων.
- Το φορτίο λόγω μεταφοράς φορτίου υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

5.6 Μελέτη φαινομένων κατά τη θραύση των υλικών

Στη μηχανική των θραύσεων είναι βασικό να καθοριστεί η έναρξη μίας ρωγμής προσδιορίζοντας τα κρίσιμα χαρακτηριστικά του υλικού. Για το σκοπό αυτό ανα-

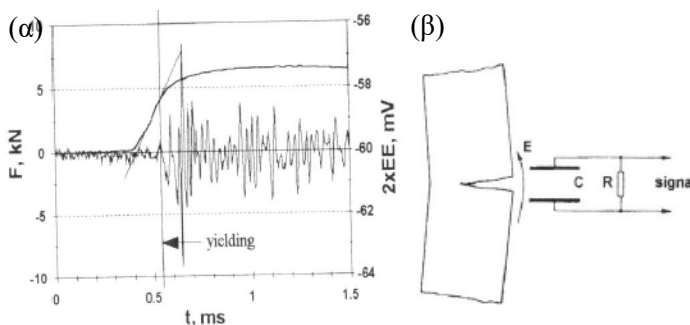
Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

πτύχθηκε ένα πεδίο έρευνας το οποίο εξέτασε τα διάφορα φαινόμενα τα οποία καταγράφονται κατά τη θραύση των υλικών. Τα φαινόμενα αυτά είναι οι μαγνητικές και οι ηλεκτρικές εκπομπές (91). Για το σκοπό αυτό έγιναν πειράματα σε διάφορα υλικά με τα γενικά χαρακτηριστικά όπως ορίζονται στον Πιν. 5.1.

Πίνακας 5.1 Υλικά τα οποία μελετήθηκαν για εντοπισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών εκπομπών κατά την καταπόνηση τους (91).

Material	HDPE	PVC	PA6.6	Araldit B
Structure	semi crystalline	amorphous	semi crystalline	thermoset
Molecule type	apolar	polar	polar	polar
Dielectric constant	2,3-2,5 As/Vm	3,5 As/Vm	8 As/Vm	3,5-5 As/Vm
Fracture type	brittle fracture after some plastic def.	brittle	brittle/ductile depending on the additions	brittle

Στα μέταλλα παρατηρήθηκαν ηλεκτρικά σήματα κατά τη διαρροή τους. Παρόμοιες ενδείξεις όμως δεν υπήρξαν κατά τη θραύση (Εικ. 5.9).

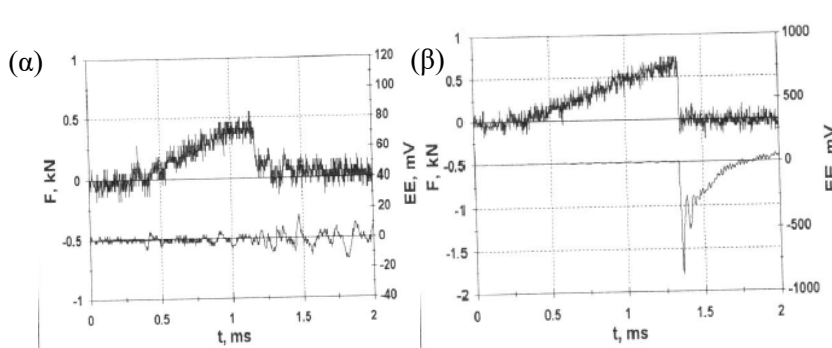


Εικόνα 5.9 (α) Φόρτιση και ηλεκτρικά σήματα σε μεταλλικά δοκίμια με αρχική ρωγμή, (β) σχηματική διάταξη πειράματος (91)

Η θραύση σε πλαστικά υλικά χωρίς πολική μοριακή δομή και με μικρή διηλεκτρική σταθερά δε δίνουν ηλεκτρικά σήματα κατά την ασταθή διάδοση της ρωγμής (Εικ. 5.10 (α)).

Σε πολυμερή υλικά όμως με πολική μοριακή δομή και υψηλή διηλεκτρική σταθερά παρατηρήθηκαν υψηλά ηλεκτρικά σήματα και η ασταθής επέκταση των ρωγμών έδωσε μία ευδιάκριτη αλλαγή του ηλεκτρικού σήματος (Εικ. 5.10 (β)) (91).

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων



Εικόνα 5.10 (α) Φόρτιση και ηλεκτρικά σήματα κατά τη δοκιμή σε HDPE με ταχύτητα 1,5m/sec (91), (β) φόρτιση και ηλεκτρικά σήματα κατά τη δοκιμή σε PVC με ταχύτητα 1,09m/sec (91).

Η πρώτη φορά όπου καταγράφηκε ότι κατά τη θραύση των υλικών παράγονται ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές ήταν το 1933 από τον Stepanov. Γενικά το φαινόμενο αυτό είναι πολύ πολύπλοκο και ακόμα και σήμερα δεν είναι απόλυτα ξεκάθαρη η αιτία αυτών των εκπομπών (92).

Η επιτάχυνση ή η επιβράδυνση των γραμμοαταξιών (93), το ηλεκτροστατικό φαινόμενο και το ηλεκτροκινηματικό φαινόμενο, η θραύση των δεσμών του κρυσταλλικού πλέγματος (94), η φόρτιση και αποφόρτιση του ηλεκτρικού διπόλου (95), το θλιπτικό μοντέλο του ατόμου (96) και το φαινόμενο σύνθεσης του παροδικού ηλεκτρικού διπόλου, η επιτάχυνση και επιβράδυνση του ηλεκτρικού φορτίου (97) είναι κάποιες εξηγήσεις που έχουν δοθεί για αυτό το φαινόμενο (92).

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έχουν γίνει από την πρώτη ανακάλυψη των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών κατά τη θραύση των υλικών οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο είναι αρκετά πολύπλοκο και επηρεάζεται από την εσωτερική μικροσκοπική κατάσταση του υλικού (97) και τις ιδιότητες των υλικών (76), (85). Η μελέτη όμως του φαινομένου αυτού είναι πολύ βασική και χρήσιμη και βρίσκει εφαρμογή στην πρόβλεψη των γεωλογικών δυναμικών φαινομένων (σεισμοί) αλλά και την αποφυγή καταστροφών σε ανθρακωρυχεία (92).

5.7 Πιεζοηλεκτρισμός- Παραγωγή ρεύματος λόγω παραμόρφωσης

Τα κρυσταλλικά αλλά και μερικά κεραμικά υλικά έχουν την ιδιότητα να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική πίεση (τάση). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πιεζοηλεκτρισμός. Ποιοτικά ο πιεζοηλεκτρισμός μπορεί να εξηγηθεί ως τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος (ηλεκτρική πόλωση-electrical polarization). Ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση (98).

Πρώτοι ασχολήθηκαν με το φαινόμενο οι αδερφοί Jacques και Pierre Curie το 1880 οι οποίοι μέτρησαν το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο δημιουργήθηκε σε κρυστάλλους κατά τη μηχανική καταπόνηση τους. Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιο-

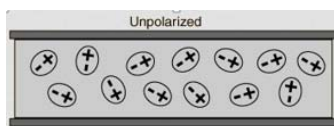
Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

νάτριο, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), το ένυδρο θεικό λίθιο, ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride) κ.α (98).

Για πρώτη φορά το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου. Αποτέλεσε εργαλείο εντοπισμού των γερμανικών υποβρυχίων για την προστασία των πλοίων από επιθέσεις με τορπίλες (99).

Έρευνες έχουν δείξει ότι ακόμα και υλικά τα οποία δεν συγκαταλέγονται στα πιεζοηλεκτρικά παρουσιάζουν το φαινόμενο του ψευδο-πιεζοηλεκτρισμού.

Ένα παράδειγμα είναι ο πάγος ο οποίος θεωρείται ότι έχει κανονική κρυσταλλική δομή και τα δίπολα του έχουν τυχαίο προσανατολισμό (100).

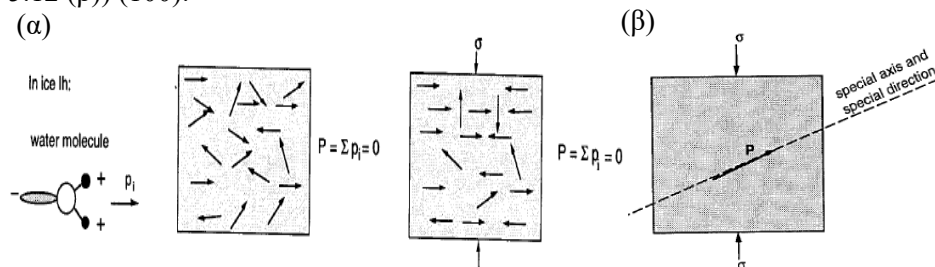


Εικόνα 5.11 Τυχαίος προσανατολισμός διπόλων στον πάγο (100).

Η επιβολή όμως ομοιόμορφης παραμόρφωσης θα προκαλέσει τον επαναπροσανατολισμό ενός ποσοστού των διπόλων χωρίς όμως να επηρεάσει τη συμμετρία (Εικ. 5.12 (α)).

Παρόλο λοιπόν που ο πάγος δεν είναι ένα κοινό πιεζοηλεκτρικό υλικό, κάτω από ειδικές συνθήκες η ελαστική παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρική πόλωση.

Σύμφωνα με τον Petrenko, όταν ασκηθεί ομοιόμορφη τάση στον πάγο δημιουργείται ηλεκτρική πόλωση \vec{P} η οποία δεν είναι συμβατή με το κέντρο συμμετρίας του στοιχείου. Αν ήταν τότε το διάνυσμα \vec{P} δεν θα είχε συγκεκριμένη διεύθυνση (Εικ. 5.12 (β)) (100).



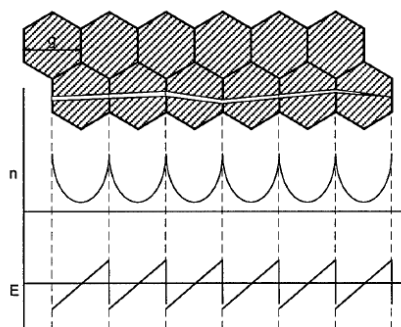
Εικόνα 5.12 (α) Το ηλεκτρικό δίπολο του νερού- Ο χαοτικός προσανατολισμός των μορίων του νερού- μερική οργάνωση των μορίων υπό σταθερή τάση σ (100), (β) γένεση πιεζοηλεκτρικής πόλωσης σε ένα κρύσταλλο υπο μονοαξονική θλίψη (100).

Με βάση την αρχή του Neumann, η συμμετρία σε κάθε φυσική ιδιότητα «ταυτίζεται» με τη συμμετρία της ατομικής δομής του κρυστάλλου. Όμως αν το κρυσταλλικό πλέγμα στοιχείου είναι συμμετρικό δεν μπορεί να υπάρξει τότε το φαινόμενο της πιεζοηλεκτρικής πόλωσης (100).

Στον πάγο υπάρχει εκ φύσεως ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αποδίδεται στην ανομοιόμορφη συγκέντρωση των ιόντων εντός του όγκου του. Όταν το νερό μετατρέπεται σε πάγο και οι κόκκοι του μεγαλώνουν, οι ξένες προσμίξεις απομακρύνονται

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

από το κέντρο προς τα όρια των κόκκων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε πολλά υλικά. Τα ελεύθερα ιόντα με αυτό τον τρόπο παγιδεύονται στον εσωτερικό του πάγου και λόγω της κατανομής τους προκαλούν το παραπάνω ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αλλάζει από κόκκο σε κόκκο. Όταν δημιουργηθεί μία ρωγμή η οποία μεγαλώνει ραγδαία κάθετα στο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργούνται 2 επιφάνειες οι οποίες φορτίζονται με αντίθετα πρόσημα. Η σχηματική μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων n αλλά και το ηλεκτρικό πεδίο E δίνεται στην Εικ. 5.13 (100).



Εικόνα 5.13 Σχηματική αναπαράσταση της μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης των ιόντων n , του ηλεκτρικού πεδίου E (100).

Το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο καθώς μεταβάλλεται κατά μήκος της ρωγμής δημιουργεί διηλεκτρική διπολική ροπή. Όταν η ρωγμή μεγαλώνει η συνολική διπολική ροπή μεταβάλλεται και παράγει τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα τα οποία έχουν παρατηρηθεί. Η συχνότητα των φαινομένων αυτών σχετίζονται με την ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής και θεωρείται ίση με $f = \frac{vcr}{g}$ όπου g είναι το μέσο μέγεθος των κόκκων ((101), (102), (100))

5.8 Εκπομπές σημάτων θραύσης– Στατικός ηλεκτρισμός

Οι εκπομπές σημάτων θραύσης (Fracto-emissions) είναι εκπομπές σωματιδίων και φωτονίων κατά τη θραύση ενός υλικού. Τα σωματίδια μπορεί να είναι ανιόντα ή κατιόντα, ουδέτερα στοιχεία ή ορατά φωτόνια (103).

Έχει παρατηρηθεί ότι η εκπομπή των σημάτων αυτών είναι αρκετά εντονότερη κατά τη θραύση του υλικού και συνεχίζει ακόμα και μετά την αστοχία του. Αυτό αποδεικνύει ότι οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν είναι ακόμα ενεργές για κάποιο χρονικό διάστημα το οποίο μπορεί να είναι από μερικά ms έως κάποια sec. Το χρονικό διάστημα αυτό εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης και από τον τύπο φόρτισης του υλικού (103).

Η πηγή των εκπομπών αυτών έχει αποδοθεί στο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο παράγεται λόγω στατικού ηλεκτρισμού στα χείλη της ρωγμής είτε στις ποικίλες αδιαβατικές διεργασίες (διεργασίες χωρίς τη μεταφορά θερμότητας) οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε αυτή τη μεταβατική φάση είτε ακόμα στη δημιουργία αλλά και το

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

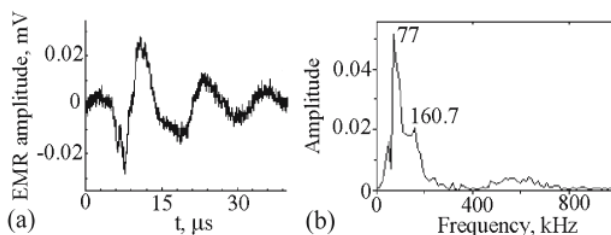
συνδυασμό σημειακών ατελειών και μεταφορέων φορτίου (ηλεκτρόνια, οπές) (103).

Στατικός ηλεκτρισμός ή διαχωρισμός φορτίων (charge separation) είναι η δημιουργία κενού μεταξύ σωματιδίων με διαφορετικά φορτία. Τα ηλεκτρόνια είναι ασταθή και μπορεί εύκολα να μεταπηδήσουν από ένα άτομο σε άλλο και να οδηγήσουν σε στατικό ηλεκτρισμό. Οι λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν σε στατικό ηλεκτρισμό είναι η τριβή, η πίεση, η θερμότητα κ.λ.π (104).

Οι Finkel et al (105) απέδειξαν ότι ο διαχωρισμός των κρυστάλλων αλκαλίων-αλογονίδιο δημιουργεί φορτία θετικά και αρνητικά στις δύο πλευρές της ρωγμής που σχηματίστηκε. Λόγω αυτού του διαχωρισμού το φαινόμενο του στατικού ηλεκτρισμού δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίου της τάξεως 107 Vcm^{-1} το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μία ηλεκτρική εκκένωση την οποία απέδωσε ο Finkel στα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που έχουν καταγραφεί κατά καιρούς (106).

Οι Miroshnichenko και Kuksenko (107) και Khatiashvili (108) σημείωσαν ήδη ότι το φάσμα της ακτινοβολίας εκκένωσης, γνωστό ως «λευκός θόρυβος», είναι ανεξάρτητο από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Οι ηλεκτρομαγνητικές καταγραφές μπορεί να εμφανιστούν ως μεμονωμένοι παλμοί ή ομάδες παλμών οι οποίοι προκαλούνται από διαφορετικές αστοχίες (ατομικές ή ομαδικές) ((81), (86), (106)).

Οι ιδιότητες των παλμών επηρεάζονται από το μέγεθος της ρηγμάτωσης ((80), (81), (86)) και από τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών ((108), (85), (106)).



Εικόνα 5.14 Παράδειγμα EMR σήματος από δοκιμή θλίψης σε γρανίτη και το αντίστοιχο φάσμα (106).

Γενικά, έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τα παραπάνω φαινόμενα. Κάποια από τα πιο συνηθισμένα είναι τα παρακάτω.

- Μοντέλο κίνησης άκρου ρωγμής- Movement of Fracture Tips.

Η ανάπτυξη της ρωγμής (tip) διαδίδεται προς την κατεύθυνση της εσοχής. Σύμφωνα με την υπόθεση των Gershenzon et al. (109), το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο κινείται με την άκρη της ρωγμής ενώ το θετικό θεωρείται ότι συσσωρεύεται στην περιοχή της ακανόνιστης επιφάνειας επαφής του υλικού.

Το μοντέλο του κινούμενου άκρου της ρωγμής έχει αμφισβητηθεί γιατί είναι δύσκολο στη φύση να υπάρξει μία απόλυτα «συμμετρική θραύση ρωγμής» και να προσδιοριστεί ένας μηχανισμός που να καθορίζει ότι το ένα άκρο της ρωγμής φορτίζεται αρνητικά και το άλλο θετικά και όχι αντίστροφα. Συγκεκριμένα, δεν υπάρχει σαφής εξήγηση γιατί ή άκρη της ρωγμής να συγκεντρώνει το αρνητικό και όχι το θετικό φορτίο (106).

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

- Μοντέλο πυκνωτή (the “Capacitor” Model) – Κίνηση των πλευρών της ρωγμής (106).

Οι O’Keefe και Thiel (110) πρότειναν το μοντέλο «πυκνωτή» στο οποίο ένας φορτισμένος παράλληλος επίπεδος πυκνωτής δημιουργείται στις δύο πλευρές της ρωγμής οι οποίες συνεχίζουν να επεκτείνονται και να αυξάνονται οι επιφάνειες τους. Μετά το αρχικό φορτίο το οποίο εμφανίζεται στις επιφάνειες της ρωγμής ο περαιτέρω διαχωρισμός λογικά θα οδηγήσει στη μείωση της ηλεκτρικής χωρητικότητας και της αύξησης της τάσης στα άκρα της ρωγμής.

Οι παραπάνω εκδοχές δημιουργούν κάποια ερωτήματα. Η υπόθεση ότι οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές προκαλούνται από δίπολα δημιουργούμενα από τις φορτισμένες άκρες της ρωγμών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτό συμβαίνει μόνο στην ρωγμή τύπου I, εφελκόμενες ρωγμές. Όμως δεν μπορεί να υιοθετηθεί για τις διατμητικές ρωγμές. Πειράματα των Frid et al. (86) σε κιμωλία υπό μονοαξονική και τριαξονική θλίψη έδειξαν ότι η συμπεριφορά των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών δεν εξαρτάται από τη μορφή των ρωγμών αλλά από τη συνολική εικόνα των ρωγμών (106).

Οι O’Keefe και Thiel (110) εξέτασαν διάφορες πιθανές πηγές από τις οποίες θα μπορούσε να δημιουργηθεί το καθαρό ηλεκτρικό φορτίο το οποίο έχει κατά καιρούς καταγραφεί. Οι αιτίες αυτές είναι η προ-πόλωση του υλικού, η θερμοκρασία, η παραμόρφωση, η συγκέντρωση ρύπων- προσμίξεων κ.λ.π (106).

Συνοψίζοντας, σίγουρα οι καταγραφές ηλεκτρικών-ηλεκτρομαγνητικών σημάτων σε υλικά που καταπονούνται είναι πολλές. Η πηγή και η εξήγηση αυτών των σημάτων δεν είναι ξεκάθαρη και υπάρχουν πολλές απόψεις.

Στην παρούσα εργασία δεν θα γίνει προσπάθεια επεξήγησης για το που οφείλονται τα σήματα τα οποία καταγράφονται αλλά θα εξεταστεί αν η ύπαρξη αυτών των σημάτων μπορεί να δώσει τη δυνατότητα να εντοπιστεί το κρίσιμο σημείο πριν την αστοχία του υλικού. Θα εξεταστεί η ύπαρξη ηλεκτρικών σημάτων όχι μόνο σε μεμονωμένα υλικά (αλάς, κονιάματα, μάρμαρο Διονύσου) αλλά και σε σύνθετες κατασκευές όπου υπάρχει συνδυασμός υλικών και ύπαρξη διεπιφανειών όπως είναι η σύνδεση μαρμάρου-κονιάματος-ράβδου τιτανίου η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς στα έργα αποκατάστασης μνημείων. Στόχος είναι οι καταγραφές αυτές να χρησιμοποιηθούν ως συντελεστής κρισιμότητας της εντατικής κατάστασης των υλικών και να προειδοποιήσουν για επικείμενη θραύση ώστε να προστατευτεί το μνημείο από περαιτέρω καταστροφές.

5.9 Μηχανικώς διεγερόμενα ρεύματα- Pressure Stimulated Currents (PSC)

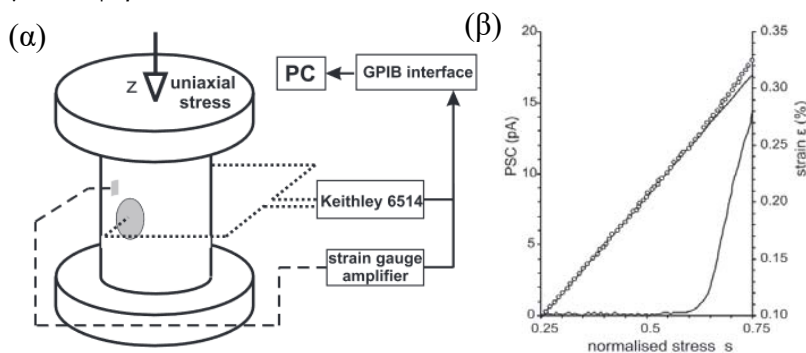
Στην καταγραφή παροδικών ηλεκτρικών φαινομένων, αρχικά σε έρευνες ευρύτερου πεδίου και σεισμολογικού ενδιαφέροντος, έχουν γίνει εκτενείς αναφορές από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (111), (112), (113), (114). Έκτοτε στα πλαίσια εργαστηριακών ερευνών πραγματοποιήθηκε πλήθος δοκιμών σε διάφορα υλικά και υπό διαφορετικές καταπονήσεις κατά τις οποίες καταγράφηκαν τα μηχανικώς διεγερόμενα ρεύματα- Pressure Stimulated Currents (PSC) αποδιδόμενα στο μοντέλο

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

της μετακίνησης φορτισμένων ατελειών MCD (Motion of Charged edge Dislocations) εντός του υλικού.

Ουσιαστικά τα σήματα PSC είναι η καταγραφή ενός ασθενούς ηλεκτρικού ρεύματος από ένα ευαίσθητο ηλεκτρόμετρο μέσω ενός ζεύγους ηλεκτροδίων το οποίο διατάσσεται σε κατάλληλη θέση πάνω στο δοκίμιο και όντας σε απόλυτη ηλεκτρικά επαφή με την επιφάνεια του υλικού (Εικ. 5.16). Για να υπάρξει καταγραφή πρέπει το υλικό να μην βρίσκεται μηχανικά σε ηρεμία αλλά να καταπονείται.

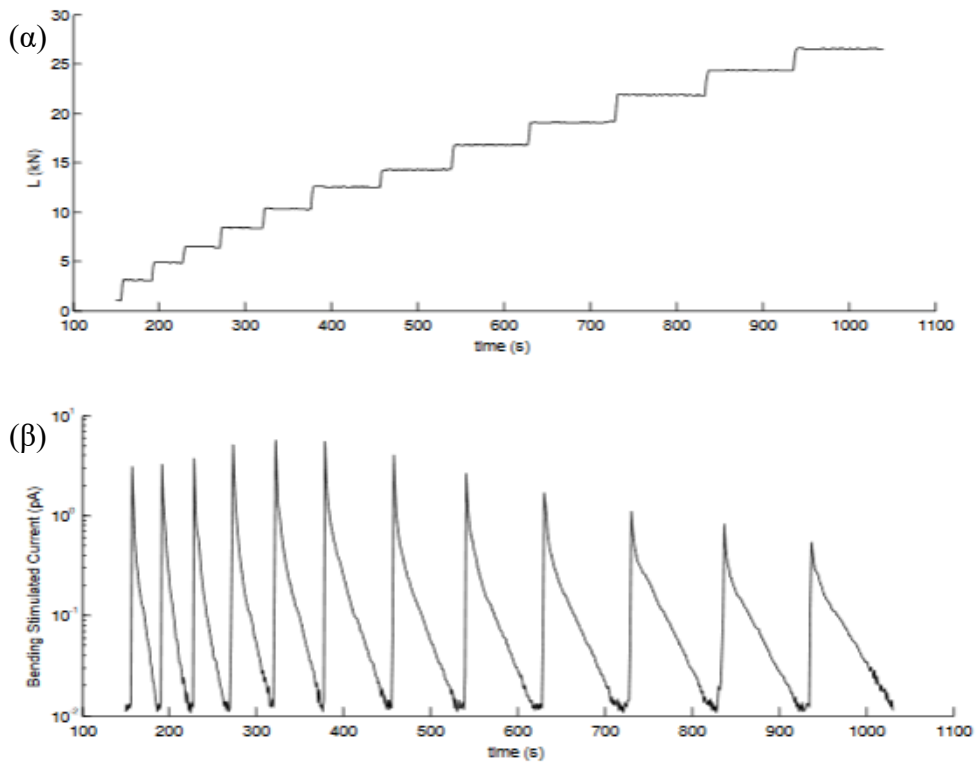
Η τεχνική έχει εφαρμοστεί με ενδιαφέροντα αποτελέσματα σε ψαθυρά υλικά όπως μάρμαρο (115), (116) και αμφιβολίτη (117), τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Τα σήματα PSC συστηματικά είχαν γραμμική σχέση με το ρυθμό μεταβολής της φόρτισης καθώς το υλικό βρισκόταν στην ελαστική περιοχή. Παρέκκλιση από τη γραμμικότητα καταγράφηκε όταν το υλικό περνούσε στην περιοχή της πλαστικότητας (118). Πιο συγκεκριμένα, στην Εικ. 5.15 (β) δίνονται τα σήματα PSC και η μεταβολή της παραμόρφωσης ενός δοκιμίου από μάρμαρο Διονύσου υπό μονοαξονική θλίψη ως προς τη μεταβολή της τάσης (stress). Χαρακτηριστικό είναι ότι η καμπύλη των ηλεκτρικών σημάτων αλλάζει κλίση μετά το 65% του μέγιστου φορτίου.



Εικόνα 5.15 (α) Πειραματική διάταξη δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε μάρμαρο Διονύσου με ταυτόχρονη καταγραφή σημάτων PSC, (β) διάγραμμα μεταβολής σημάτων PSC και παραμόρφωσης ως προς την μεταβολή της τάσης (stress) (118).

Ενδεικτικές καταγραφές PSC έχουν πραγματοποιηθεί και σε πειράματα κάμψης 3 σημείων σε πρισματικά δοκίμια μαρμάρου (119). Η φόρτιση περιελάμβανε επιμέρους βήματα κάθε ένα μεγαλύτερου φορτίου από το προηγούμενο. Σε κάθε βήμα το φορτίο διατηρούνταν σταθερό για μικρό χρονικό διάστημα όπως περιγράφεται στο διάγραμμα της Εικ. 5.16 (α). Είναι ενδιαφέρον ότι οι καταγραφές των PSC σημάτων παρουσιάζουν αύξηση στην έναρξη κάθε βήματος η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση του φορτίου, και σταδιακή μείωση καθώς το φορτίο διατηρείται σταθερό (Εικ. 5.16 (β)).

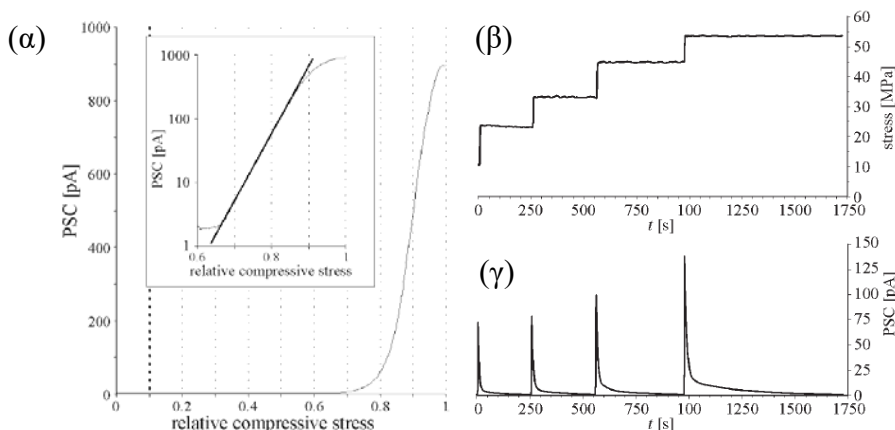
Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων



Εικόνα 5.16 (α) Επιβολή φορτίου υπό μορφή διαδοχικών βημάτων αυξανόμενου φορτίου σε δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε μάρμαρο; (β) η χρονική μεταβολή των σημάτων PSC (119).

Η τεχνική των σημάτων PSC έχει δοκιμαστεί και σε υλικά που έχουν βάση το τσιμέντο. Σε δοκίμια θλίψης διαστάσεων 50mm x 50mm x 70mm εφαρμόστηκαν δύο τρόποι φόρτισης. Στη μία περίπτωση η επιβολή του φορτίου έγινε μονοτονικά με αργό ρυθμό ενώ στη δεύτερη, καθώς το δοκίμιο βρισκόταν υπό σταθερό φορτίο, επιβάλλονταν απότομη αύξηση για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια διατηρούνταν σταθερό στη νέα του τιμή. Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνεται η διαφορά των καταγραφών PSC για τις δύο φορτίσεις.

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων

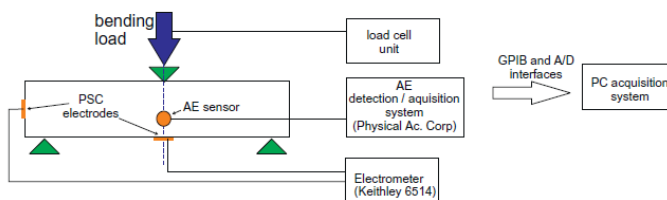


Εικόνα 5.17 (α) Αποτελέσματα PSC καταγραφών ως προς την θλιπτική τάση σε δοκίμια από κονίαμα τσιμέντου υπό μονοτονική φόρτιση αργού ρυθμού και (β) η χρονική μεταβολή της θλιπτικής τάσης σε δοκίμιο από κονίαμα τσιμέντου με την επιβολή διαδοχικών απότομων μεταβολών του φορτίου και (γ) των αντίστοιχων PSC σημάτων (120).

Στην πρώτη περίπτωση (Εικ. 5.17(α)) το ρεύμα μπορεί να είναι ασθενές αλλά δείχνει να μεταβάλλεται ανάλογα με το ρυθμό της παραμόρφωσης του δοκιμίου. Ειδικότερα, όταν το η τάση (stress) ξεπεράσει το 65% της αντοχής του υλικού τότε παρατηρείται εκθετική αύξηση του PSC. Στη δεύτερη περίπτωση (Εικ. 5.17 (β, γ)) παρατηρείται ότι σε κάθε απότομη αύξηση του φορτίου σημειώνεται αντίστοιχη απότομη αύξηση του PSC.

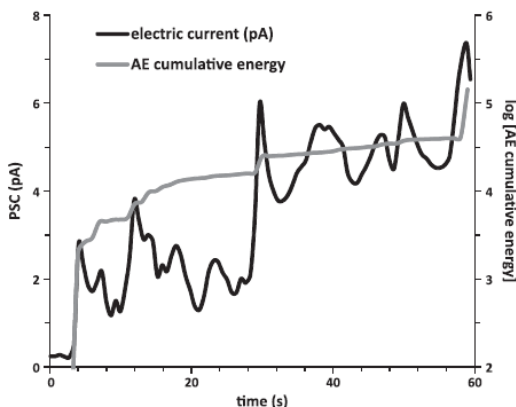
Όταν ένα φαινόμενο είναι στιγμιαίο, τοπικά δημιουργείται μία ρωγμή και κατ' επέκταση διαμορφώνονται δύο νέες επιφάνειες μεταξύ των οποίων έχουν σπάσει οι δεσμοί και έχει καταστραφεί η δομή του υλικού. Στις επιφάνειες αυτές αποδίδεται ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων και κατά συνέπεια των ηλεκτρικών σημάτων τα οποία καταγράφονται αυτή τη χρονική στιγμή (120).

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στα σήματα PSC τα οποία καταγράφονται σε δοκίμια κάμψης 3 σημείων σε υλικά με βάση το τσιμέντο (121), (122), (123) αλλά και στη συσχέτιση των ηλεκτρικών σημάτων με την τεχνική των ακουστικών εκπομπών (123). Η πειραματική διάταξη δίνεται σχηματικά στην Εικ. 5.18. Η μεταβολή των σημάτων PSC δείχνει να είναι απόλυτα συμβατή με τη μεταβολή της ακουστικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (Εικ. 5.19).



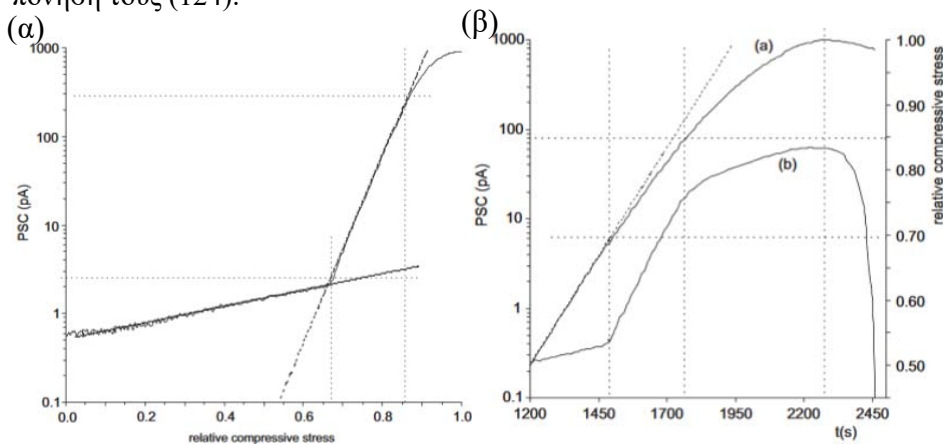
Εικόνα 5.18 Πειραματική διάταξη κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια από κονίαμα (123).

Παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων



Εικόνα 5.19 Χρονική μεταβολή των σημάτων PSC και της ακουστικής ενέργειας από πείραμα κάμψης 3 σημείων σε δοκίμιο από κονίαμα (123).

Με τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα, το ηλεκτρικό σήμα PSC σε δείγματα τσιμεντού είναι σαφώς ισχυρότερο από ότι εκείνο του μαρμάρου φθάνοντας αρκετές φορές στην τάξη των nA. Ποιοτικά όμως τα δύο υλικά δίνουν συμβατά μεταξύ τους αποτελέσματα ως προς τις καταγραφές των ηλεκτρικών σημάτων κατά την καταπόνηση τους (124).



Εικόνα 5.20 (α) Αποτελέσματα PSC καταγραφών ως προς την θλιπτική τάση σε δοκίμια από κονίαμα τσιμεντού και (β) η χρονική μεταβολή των PSC σημάτων και της θλιπτικής τάσης σε δοκίμιο μαρμάρου (124).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια η τεχνική των PSC έχει δοκιμαστεί πέραν των μεμονωμένων υλικών και σε σύνθετες κατασκευές με πολύ καλά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα σε δοκιμές διάτμησης σε δοκίμια αποκαταστημένων δομικών μελών αρχαίων μνημείων εφαρμόστηκε η τεχνική δίνοντας σημαντικές ενδείξεις για το πότε το μέλος βρίσκεται κοντά στην αστοχία (125), (126).

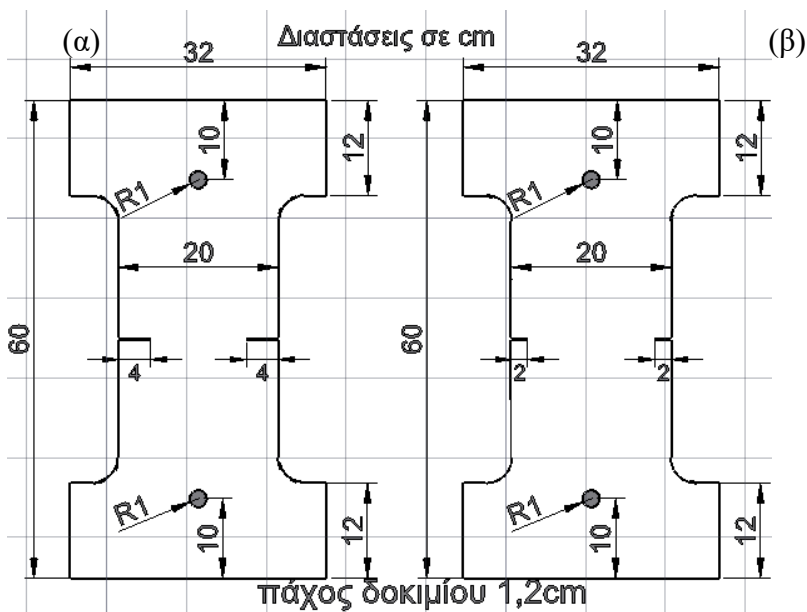
Μέρος 2^ο

6. Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

6.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Έγιναν πειράματα εφελκυσμού σε δύο κατηγορίες δοκιμίων μορφής «Dent (Double Edge Notched)» από μάρμαρο Διονύσου με συμμετρικές εγκοπές ως προς τον κατακόρυφο άξονα του δοκιμίου. Το μήκος των εγκοπών ήταν ίσο με 4cm και 2cm αντίστοιχα. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων δίνονται αναλυτικά στην Εικ. 6.1.

Στο πείραμα του εφελκυσμού, το δοκίμιο στηρίζεται μέσω δύο πείρων από τα δύο άκρα του (οπές διαμέτρου 2cm- Εικ. 6.1) όπου και επιβάλλεται η φόρτιση. Τα άκρα είναι μεγαλύτερα σε πλάτος από τον κορμό του δοκιμίου για να ενισχυθεί η περιοχή. Η θραύση αναμένεται να ξεκινήσει από το άκρο ενός εκ των δύο εγκοπών. Λόγω της μορφής του δοκιμίου χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος «dog bone».



Εικόνα 6.1 (α) Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων τύπου Dog Bone με μήκος εγκοπής 4cm- Tc4 και (β) 2cm- Tc2.

Για την ενίσχυση των στηρίξεων, λόγω της ψαθυρότητας του μαρμάρου, κολλήθηκαν στα άκρα του δοκιμίου και εκατέρωθεν των δύο πλευρών του, πρόσθετα φύλλα plexiglass (Εικ. 6.2).



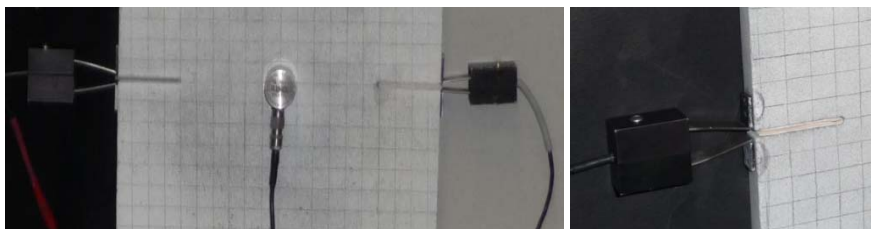
Εικόνα 6.2 Ενίσχυση άκρων δοκιμίου με plexiglass.

6.2 Περιγραφή μετρητικών συστημάτων- πειραματικής διαδικασίας

Συνοπτικά κατά τη διάρκεια του πειράματος εφαρμόστηκαν οι παρακάτω πειραματικές τεχνικές:

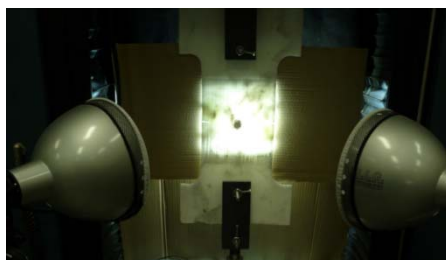
- Παραδοσιακά μηκυσιόμετρα τύπου clip gauges.
- Κάμερα υψηλής ταχύτητας καταγραφής (High speed camera).
- Τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (Digital image correlation DIC).
- Τεχνική ηλεκτρικών σημάτων (Pressure Stimulated Currents PSC).
- Τεχνική Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission AE).

Πιο αναλυτικά, για την καταγραφή του ανοίγματος των χειλέων εγκοπής τοποθετήθηκαν 2 μηκυσιόμετρα τύπου clip gauges (NMOD). Εκατέρωθεν της εγκοπής κολλήθηκαν δύο μικρά μεταλλικά ελάσματα για να στηριχθούν τα άκρα των μηκυσιομέτρων (Εικ. 6.3).



Εικόνα 6.3 Μηκυσιόμετρα τύπου clip gauge (NMOD).

Οι οπτικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν (DIC & High speed camera) απαιτούν τη χρήση δυνατού φωτισμού. Το μάρμαρο λόγω του μικρού πάχους του είναι οπτικά διάφανο (Εικ. 6.4).



Εικόνα 6.4 Οπτική διαφάνεια μαρμάρου.

Για το λόγο αυτό το δοκίμιο βάφτηκε εκατέρωθεν με σπρέι για να μην αλληλοεπηρεάζονται οι δύο τεχνικές.

Η τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (Digital Image Correlation DIC) είναι μία τεχνική ιδιαίτερης ακρίβειας που καταφέρνει να παρακολουθεί την παραμόρφωση του υλικού καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος μέσω ενός μοτίβου κουκίδων που έχουν αποτυπωθεί πάνω στο δοκίμιο εξ αρχής.

Η τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας έχει αποδείξει ότι είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση και ανάλυση διάφορων μετακινήσεων και συμπεριφορών. Η αρχή αυτής της τεχνικής είναι αρκετά εύκολη στην κατανόηση και ανοίγει ένα πραγματικά αχανές πεδίο εφαρμογών.

Στην κλασσική περίπτωση, η παραμόρφωση ενός στοιχείου καθορίζεται από την παρακολούθηση του από μία κάμερα. Η μετατόπιση, ή/και η στροφή ή η στρέβλωση ενός μικρού επιφανειακού στοιχείου υπολογίζεται συγκρίνοντας κάθε φωτογραφία η οποία λαμβάνεται με την αρχική εικόνα η οποία έχει ληφθεί ως θέση-μορφή αναφοράς. Ο αλγόριθμος συσχέτισης καθορίζει τη μέγιστη μετακίνηση με ακρίβεια 1/100 pixel. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τον καθορισμό της παραμόρφωσης του στοιχείου που μελετάται σε ένα επίπεδο παράλληλο σε αυτό της εικόνας της κάμερας.

Με τη χρήση δύο καμερών μπορεί να γίνει ακόμα και τρισδιάστατος έλεγχος. Για να γίνει αυτό, το υπό μελέτη αντικείμενο πρέπει να είναι ορατό υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες από δύο κάμερες. Κάθε σημείο του αντικειμένου θα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο pixel στο πεδίο της κάμερας.

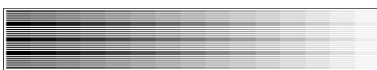
Αν οι θέσεις των δύο καμερών είναι κατάλληλες συσχετισμένες, οι φακοί έχουν τη σωστή εστίαση και οι απαιτούμενες παράμετροι είναι γνωστές τότε οι απόλυτες συντεταγμένες για κάθε σημείο της επιφάνειας στο χώρο μπορούν εύκολα να καθοριστούν (127).



Εικόνα 6.5 Σύστημα τεχνικής συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC (127).

Αν αυτό γίνει για κάθε σημείο τότε μπορεί να δοθεί μία τρισδιάστατη καμπύλη παραμόρφωσης για κάθε περιοχή η οποία είναι ορατή και από τις δύο κάμερες.

Σε κάθε pixel μίας εικόνας, η ένταση του φωτός ανάλογα τον τόνο του χρώματος, μετράται σε μία κλίμακα του γκρι (Εικ. 6.6).



Εικόνα 6.6 Κλίμακα του γκρι η οποία χρησιμοποιείται στην τεχνική συσχέτιση ψηφιακής εικόνας DIC.

Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μία τιμή μέσα σε ένα εύρος τιμών μεταξύ του μηδενός (0-μαύρο) και του ένα (λευκό-1).

Ο αλγόριθμος συσχέτισης βασίζεται στην παρακολούθηση αυτού του γκριζου μοτίβου. Αν $G(x,y)$ είναι η τιμή του γκρι για κάθε pixel με συντεταγμένες x και y μέσα σε ένα υποσύνολο ή μία πλευρά-όψη τότε ο αλγόριθμος θα ελαχιστοποιήσει το άθροισμα.

$$\sum_{x,y} (G_t(x_t - y_t) - G(x,y))^2 \quad 6.1$$

Όπου

$$G_t(x_t - y_t) = g_0 + g_1 G(x_t, y_t) \quad 6.2$$

και

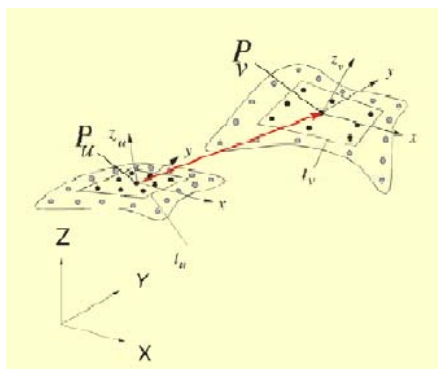
$$x_1 = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \quad 6.3$$

$$y_1 = a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 xy \quad 6.4$$

Καλύτερη ακρίβεια της τάξεως των 0.01 pixel γίνεται με τη βοήθεια της διακύμανσης των παραμέτρων φωτισμού ($g_0, g_1 \dots$) και των παραμέτρων των μετασχηματισμών συσχέτισης ($a_0 \dots a_7$) (127).

Όταν το περίγραμμα (επιφανειακή καμπύλη-χρωματοκλίμακα) σχηματίζεται για κάθε φωτογραφία ακολουθεί η συσχέτιση κατά την οποία καθορίζεται η τρισδιάστατη μετακίνηση της επιφάνειας του αντικειμένου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συσχέτιση των εικόνων και από τις δύο κάμερες με τις αρχικές φωτογραφίες οι οποίες λαμβάνονται ως σημείο αναφοράς.

Το σημείο P στο επιφανειακό στοιχείο, το οποίο ενδεικτικά απεικονίζεται στην Εικ. 6.7, έχει μετακινηθεί από την αρχική του κατάσταση u στην παραμορφωμένη v . Το στοιχείο έχει χαρακτηριστικά στραφεί και στρεβλωθεί.



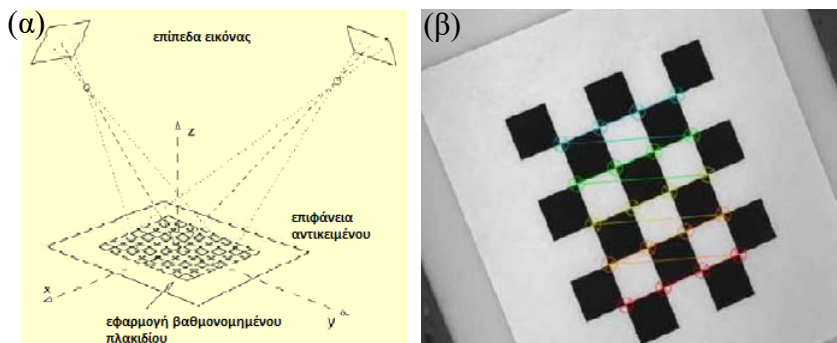
Εικόνα 6.7 Μετακίνηση και στρέβλωση σημείου P (127).

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Γνωρίζοντας τα διανύσματα μετακίνησης για κάθε επιφανειακό σημείο και με δεδομένα τα στοιχεία αναφοράς υπολογίζονται οι παραμορφώσεις.

Πολύ σημαντικό ρόλο στη μέθοδο αυτή είναι η διαδικασία βαθμονόμησης της τεχνικής για σωστότερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

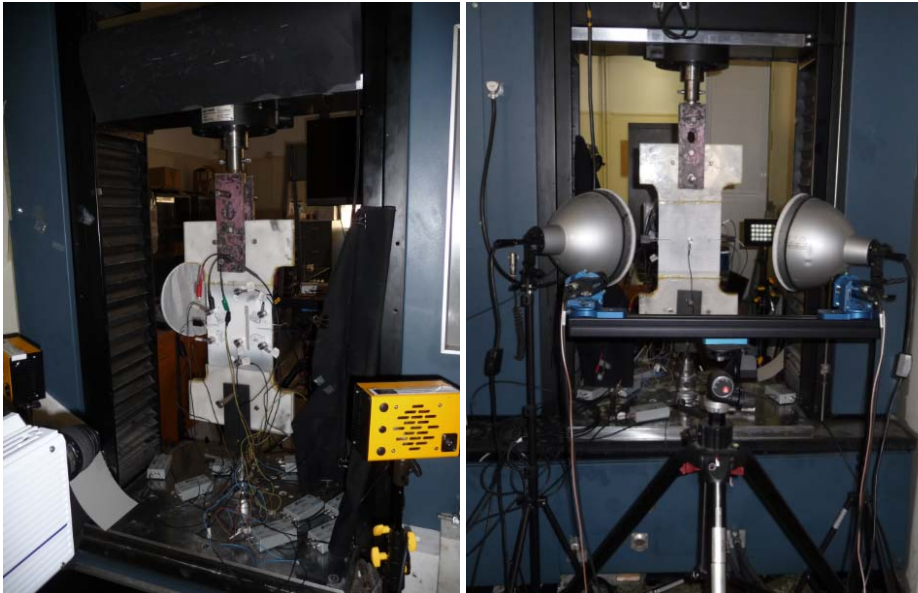
Για τη βαθμονόμηση είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των «εσωτερικών» παραμέτρων, όπως η εστιακή απόσταση των φακών, η αρχική θέση των φακών, οι ακτινικές και οι εφαπτομενικές παραμορφώσεις των φακών.



Εικόνα 6.8 (α) Βαθμονόμηση συστήματος συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC, (β) πλακίδιο βαθμονόμησης συστήματος (127).

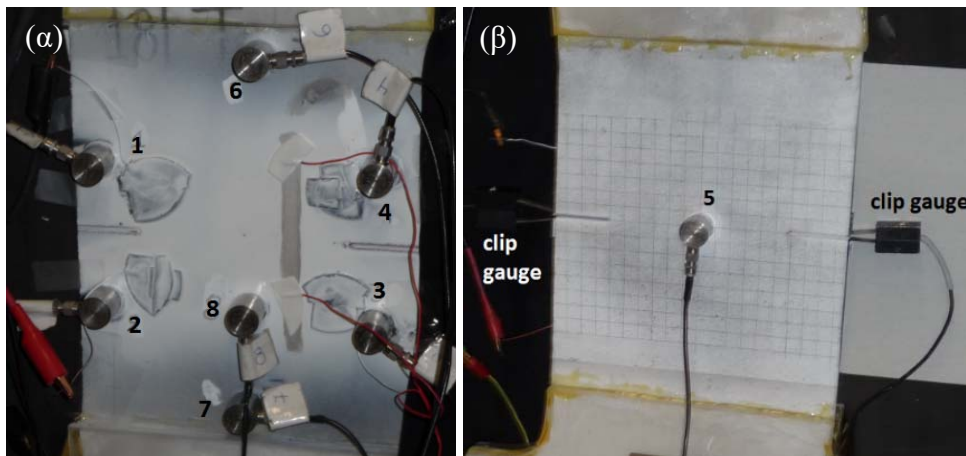
Για τον καθορισμό αυτών των παραμέτρων χρησιμοποιείται ένα πλακίδιο της μορφής που δίνεται στην Εικ. 6.8. Αυτό το πλακίδιο μετακινείται μπροστά στις κάμερες και εκείνες καταγράφουν τις διαφορετικές θέσεις του πλακιδίου. Το λογισμικό καταχωρεί τα σημεία των κόμβων των τετραγώνων για τις διάφορες φωτογραφίες που λαμβάνει αυτόματα. Μετά την απόκτηση των αντίστοιχων φωτογραφιών γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία τους από το πρόγραμμα ώστε να γίνει η βαθμονόμηση των εσωτερικών παραμέτρων. Απαραίτητο επίσης είναι να καθοριστούν οι εξωτερικές παράμετροι. Οι εξωτερικές παράμετροι είναι το διάνυσμα «μετάφρασης» και το μητρώο στροφής. Για τον προσδιορισμό τους τοποθετείται το πλακίδιο δοκιμής και στις δύο κάμερες ταυτόχρονα.

Παρακάτω στην Εικ. 6.9 δίνεται η γενική όψη των οπτικών τεχνικών οι οποίες εφαρμόστηκαν.



Εικόνα 6.9 Πειραματική διάταξη – Πειραματικές τεχνικές (γενική όψη).

Για τον εντοπισμό των ακουστικών εκπομπών που παράγονται κατά τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 8 ακουστικοί αισθητήρες (Εικ. 6.10). Οι αισθητήρες 6 και 7 χρησιμοποιήθηκαν για να καταγράφουν τα σήματα που προέρχονται από τις στηρίξεις και να τα απορρίπτουν από τον προσδιορισμό της θέσης των ακουστικών εκπομπών (guard sensors). Για την καταγραφή των ηλεκτρικών σημάτων εκατέρωθεν της εγκοπής τοποθετήθηκαν δύο ζεύγη ηλεκτροδίων από χαλκό. Για να εξασφαλιστεί καλύτερη επαφή μεταξύ ηλεκτροδίου και μαρμάρου η περιοχή βάφτηκε με υγρό άργυρο (αγωγίμο υλικό) (Εικ 6.11).



Εικόνα 6.10 (α) Θέση ακουστικών αισθητήρων και (β) clip gauges.



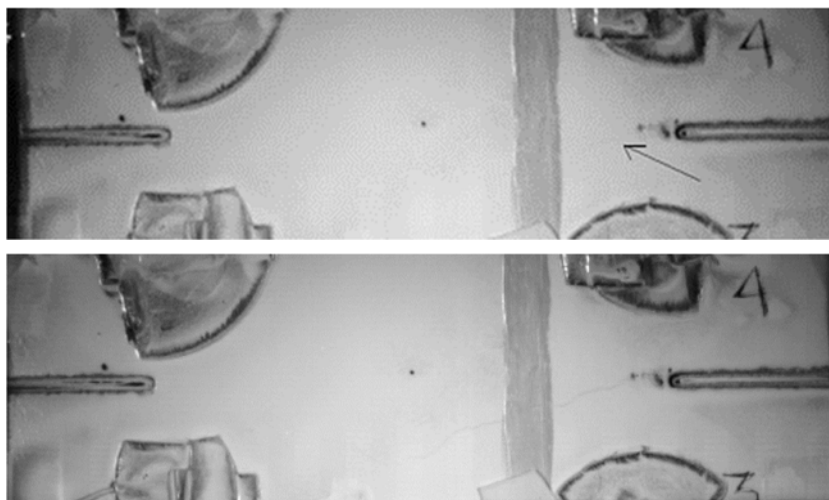
Εικόνα 6.11 Θέσεις ηλεκτροδίων εκατέρωθεν των εγκοπών του δοκιμίου.

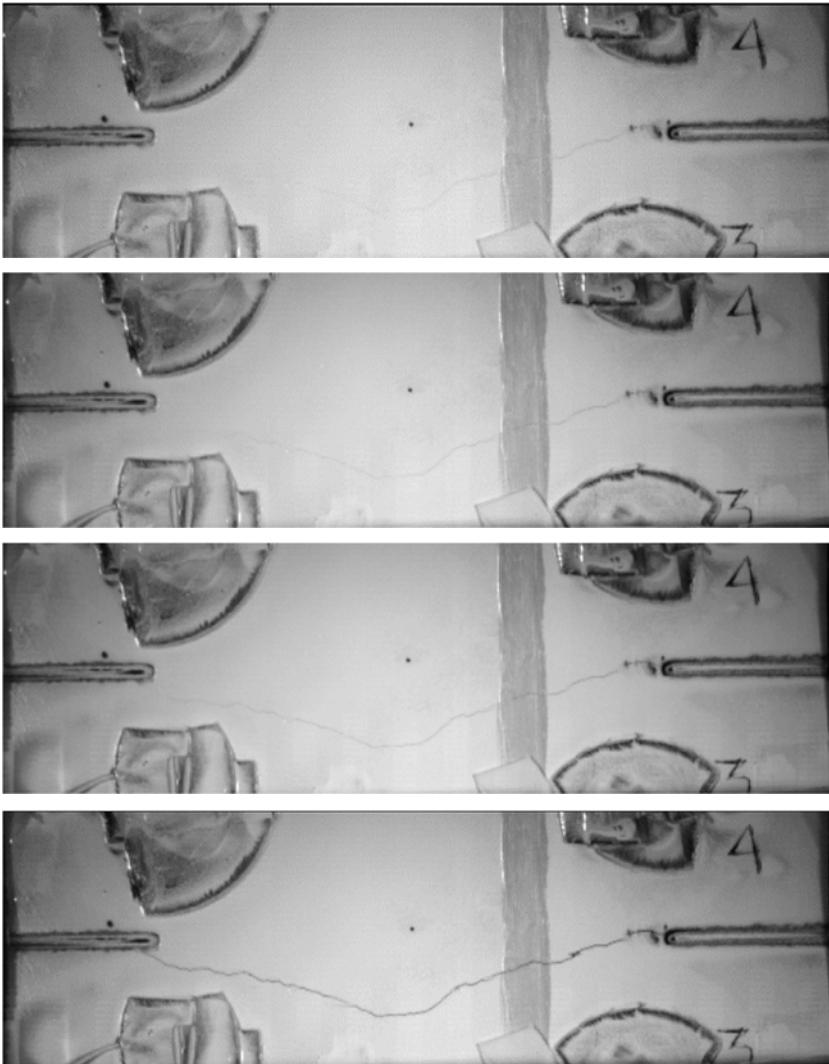
6.3 Δοκίμιο Tc04_01 με μήκος εγκοπής 4cm

Η έναρξη της ρωγμής είναι δεδομένο ότι θα ξεκινήσει από τη μία εγκοπή και ανάλογα την μορφή των «νερών» του μαρμάρου μπορεί να καταλήξει στην απέναντι εγκοπή αλλά και εκτός αυτής. Το φαινόμενο είναι πάρα πολύ γρήγορο και δεν είναι ξεκάθαρο από ποια εγκοπή ξεκινάει η αστοχία. Καθαρή εικόνα για την έναρξη και την εξέλιξη της ρωγμής μας δίνει η κάμερα υψηλής ταχύτητας καταγραφής (high speed camera). Στο πρώτο πείραμα με εγκοπή 4cm επιλέχθηκε η καταγραφή 50.000 καταγραφές ανά δευτερόλεπτο fps (frames per second).

Η ρωγμή είναι δεδομένο ότι ξεκίνησε από τη δεξιά εγκοπή κοντά στους ακουστικούς αισθητήρες 3-4 όπως φαίνεται από την αλληλουχία των φωτογραφιών που κατέγραψε η high speed κάμερα (Εικ. 6.12).

Ως πλευρά αναφοράς σε όλα τα δοκίμια θα θεωρηθεί στο εξής εκείνη στην οποία καταγράφει την εξέλιξη της ρωγμής η high speed κάμερα.



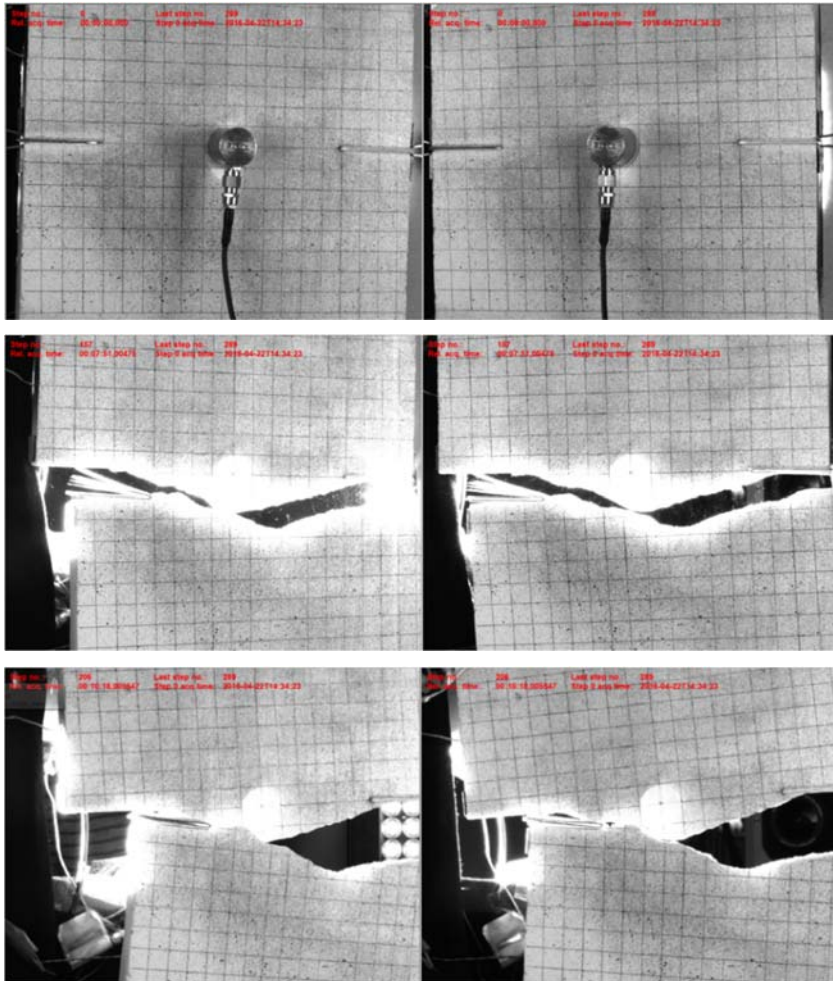


Εικόνα 6.12 Έναρξη και εξέλιξη της ρωγμής όπως δίνεται από την high speed camera.

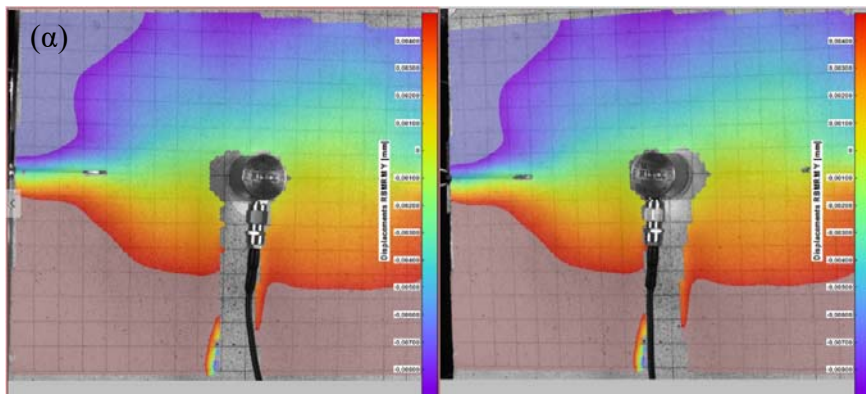
Παρατηρώντας τη μετακίνηση κατά τον άξονα y του δοκιμίου από τις εικόνες τις οποίες κατέγραψαν οι κάμερες της DIC είναι χαρακτηριστικό ότι στην εγκοπή όπου ξεκίνησε η θραύση υπάρχουν αυξημένες μετακινήσεις (Εικ. 6.14, 6.15).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις εικόνες της DIC, η θραύση φαίνεται στην αριστερή πλευρά λόγω του ότι οι δύο τεχνικές βρίσκονται εκατέρωθεν του δοκιμίου και το παρακολουθούν από διαφορετικές πλευρές.

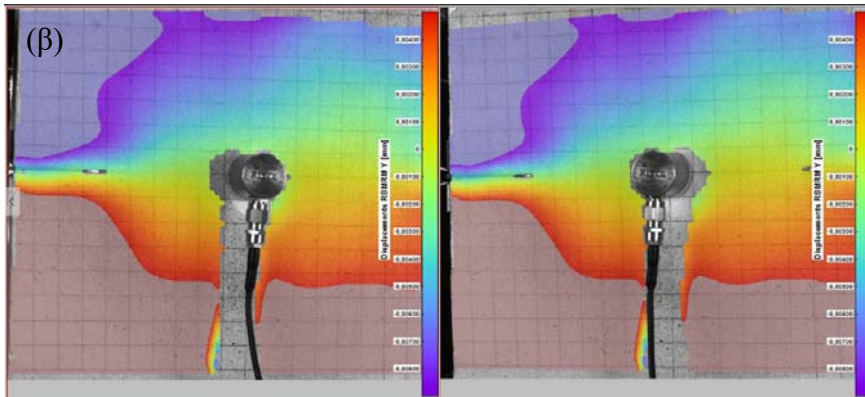
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



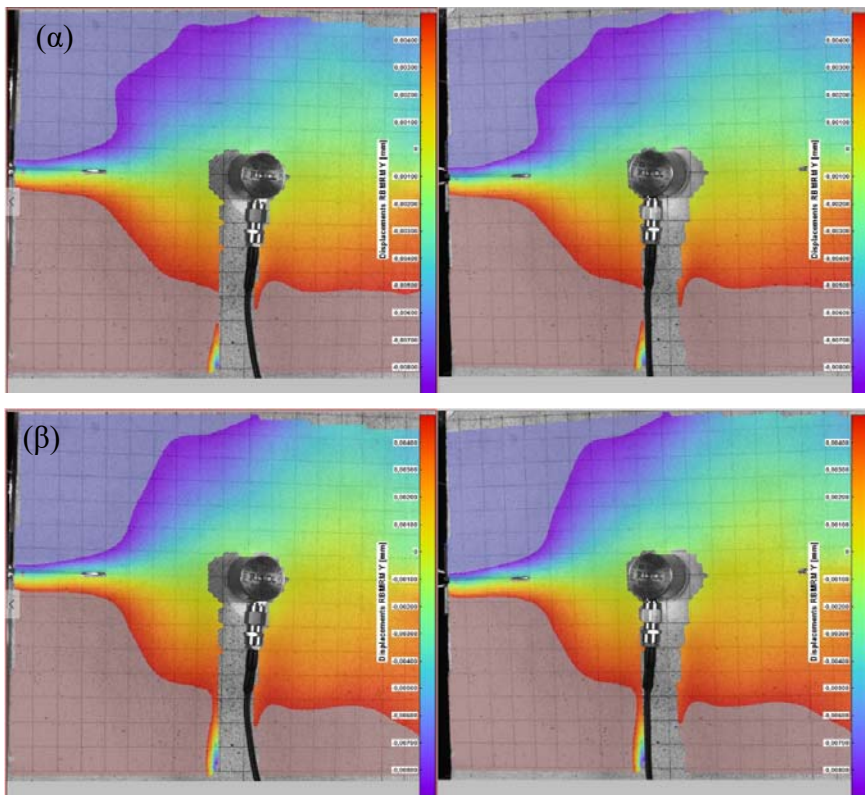
Εικόνα 6.13 Δοκίμιο πριν και μετά τη θραύση όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC.



Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



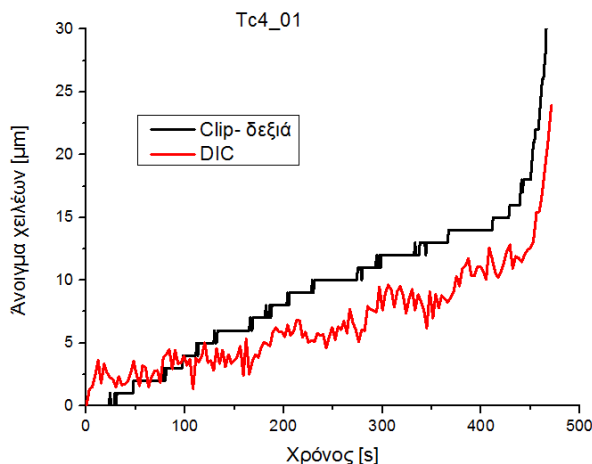
Εικόνα 6.14 (α) Μετακινήσεις δοκιμίου κατά τον άξονα y υπό μορφή χρωματοκλίμακας όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC 13 και (β) 7 δευτερόλεπτα πριν τη θραύση.



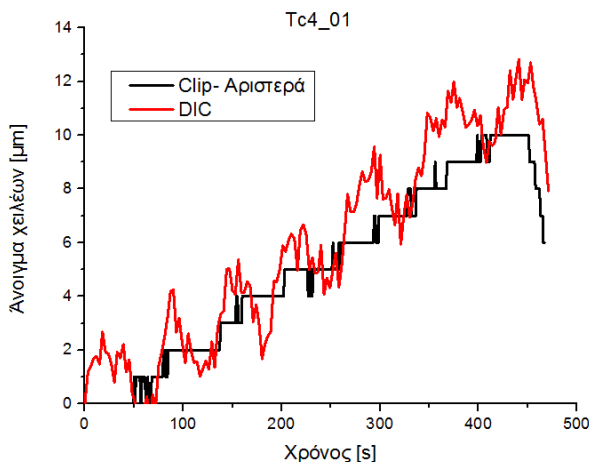
Εικόνα 6.15 (α) Μετακινήσεις δοκιμίου κατά τον άξονα y υπό μορφή χρωματοκλίμακας όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC 4 και (β) 1 δευτερόλεπτο πριν τη θραύση.

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Τα αποτελέσματα από τη μέθοδο συσχέτισης ψηφιακής εικόνας- DIC δίνουν ικανοποιητικά αξιόπιστα αποτελέσματα για την παραμόρφωση του υλικού στην περιοχή γύρω από τις εγκοπές. Αυτό αποδεικνύεται από τη συσχέτιση των καταγραφών του ανοίγματος των χειλέων των εγκοπών τα οποία προέκυψαν τόσο από την κλασική μηχανική τεχνική των clip gauges όσο και από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (Εικ. 6.16, Εικ. 6.17).



Εικόνα 6.16 Διάγραμμα ανοίγματος των χειλέων της δεξιάς εγκοπής όπως καταγράφηκε από το clip gauge και την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC.

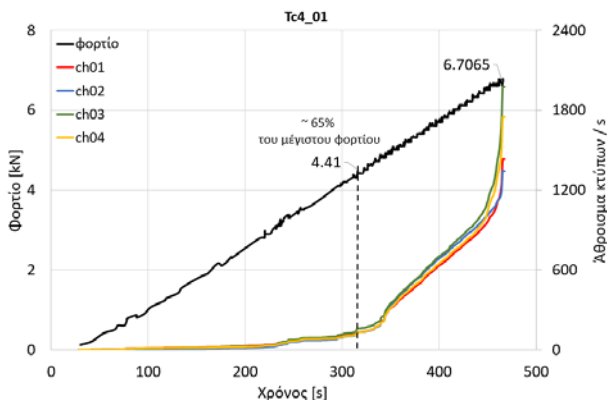


Εικόνα 6.17 Διάγραμμα ανοίγματος των χειλέων της αριστερής εγκοπής όπως καταγράφηκε από το clip gauge και την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των ακουστικών εκπομπών, μία γενική εικόνα δίνουν οι ακουστικοί κτύποι (hits) οι οποίοι καταγράφονται ανά δευτερόλεπτο, η ταχύτητα δηλαδή με την οποία εμφανίζονται τα ακουστικά σήματα κατά τη διάρ-

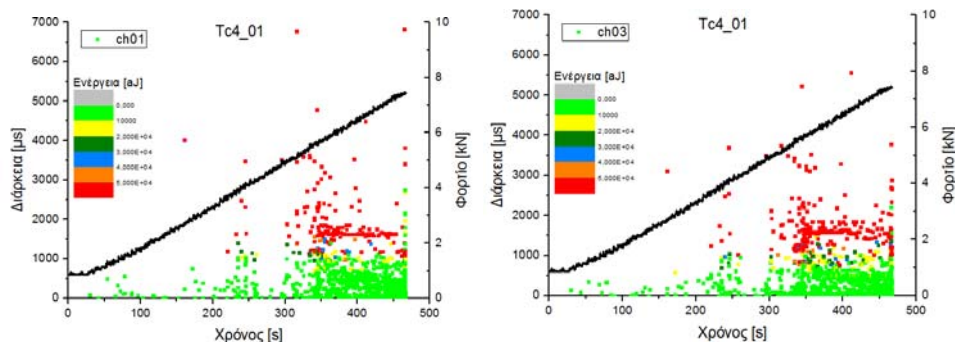
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

κεια του πειράματος. Στο διάγραμμα της Εικ. 6.18 δίνεται το άθροισμα των ακουστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο για τους αισθητήρες που βρίσκονται εκατέρωθεν των εγκοπών μαζί με την εξέλιξη του φορτίου. Το φορτίο αυξάνεται ομαλά μέχρι την αστοχία και δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στην κλίση του. Είναι σημαντικό όμως ότι κοντά στο 65% του μέγιστου φορτίου αρχίζουν να καταγράφονται με μεγάλη ταχύτητα ακουστικά σήματα στους τέσσερεις αισθητήρες με μεγαλύτερη δραστηριότητα στους αισθητήρες όπου ξεκίνησε η ρωγμή (αισθητήρες 03, 04).



Εικόνα 6.18 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του φορτίου και αθροίσματος ακουστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο για τους αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται κοντά στις 2 εγκοπές.

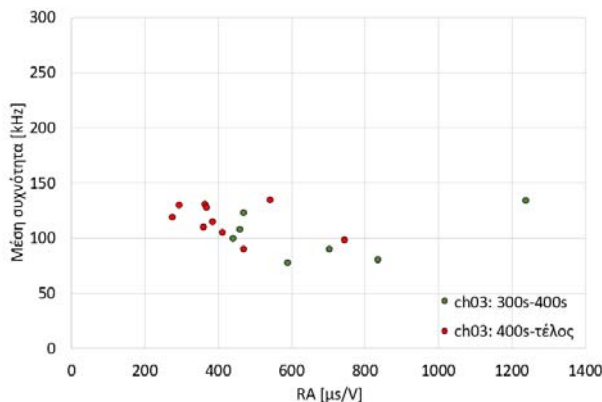
Για δύο αισθητήρες (01, 03), ένας σε κάθε εγκοπή, δίνεται στην Εικ. 6.19 η χρονική εξέλιξη της διάρκειας των κτύπων με την αντίστοιχη ενέργεια τους. Το διάγραμμα μπορεί να χωριστεί χρονικά σε 2 περιοχές όπου διακρίνονται χαρακτηριστικές μεταβολές στη διάρκεια και την ενέργεια των ακουστικών σημάτων. Για τις περιοχές αυτές, στην Εικ. 6.20, δίνεται το διάγραμμα των μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των σημάτων ως προς την παράμετρο RA ($RA = Rise\ time\ [\mu s] / Amplitude [dB]$) (εκτενής αναφορά στο Κεφ. 4.5) για τον αισθητήρα 3 ο οποίος βρίσκεται στην εγκοπή από όπου ξεκίνησε η ρωγμή.



Εικόνα 6.19 Διάγραμμα φορτίου & διάρκειας ακουστικών κτύπων με την αντίστοιχη ενέργεια σε χρωματοκλίμακα τα οποία κατεγράφησαν από τους ακουστικούς αισθητήρες 01 και 03.

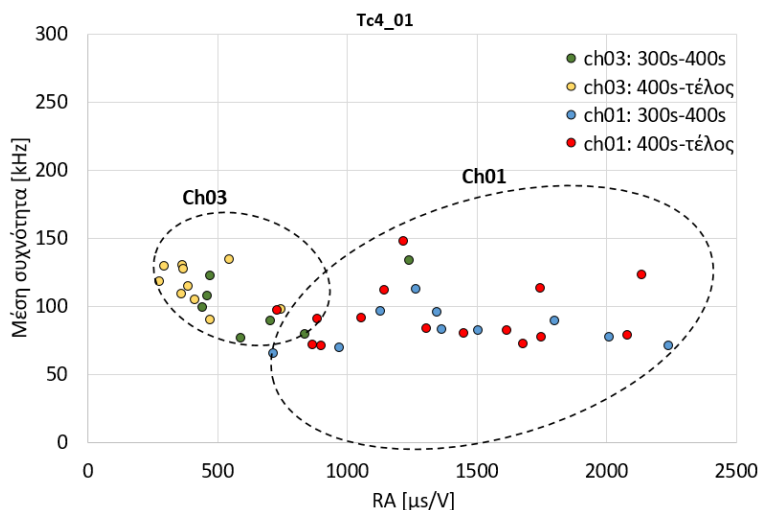
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Παρατηρείται ότι όσο πλησιάζει η θραύση, η παράμετρος RA μειώνεται ενώ η μέση συχνότητα διατηρείται σχετικά σταθερή (Εικ. 6.20). Δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των χαρακτηριστικών (μέση συχνότητα-RA) των δύο περιοχών. Πιθανότατα γιατί οι ρωγμές είναι εφελκυστικού τύπου (μείωση του RA είναι χαρακτηριστικό ρωγμών εφελκυστικού τύπου) οι οποίες είτε δημιουργούνται ή εξελίσσονται σταδιακά μέχρι τη θραύση.



Εικόνα 6.20 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρας 03) ως προς την παράμετρο RA.

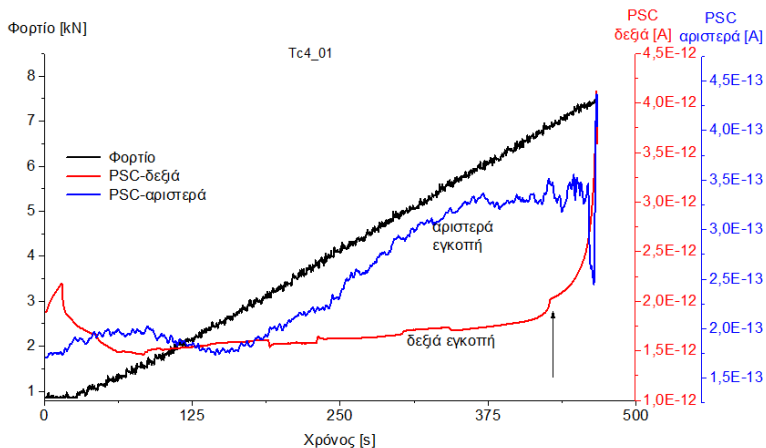
Στην Εικ. 6.21 δίνονται για 2 αισθητήρες, ένα σε κάθε εγκοπή οι τιμές της μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα σημεία για κάθε ένα από τους δύο αισθητήρες παρουσιάζουν διαφορά ως προς την παράμετρο RA. Ο αισθητήρας που βρίσκεται κοντά στην εγκοπή έχει μικρότερες τιμές RA, κάτι το οποίο παρατηρήθηκε και σε άλλα πειράματα.



Εικόνα 6.21 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρες 03 και 01) ως προς την παράμετρο RA.

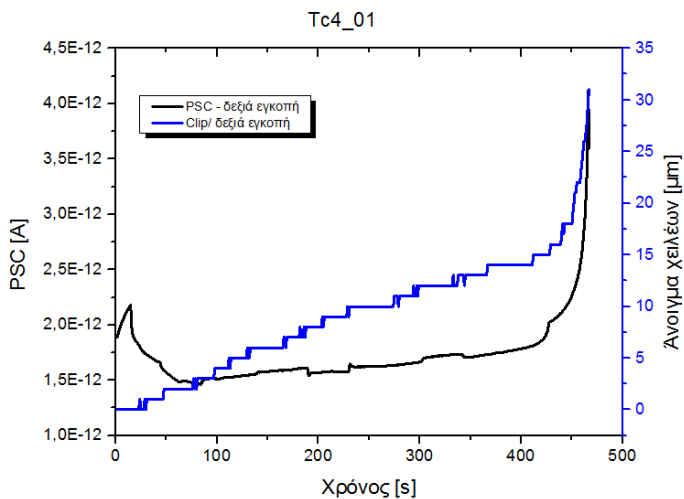
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τα ηλεκτρικά σήματα εκατέρωθεν των εγχοπών είναι εμφανές ότι οι ηλεκτρικές καταγραφές της δεξιάς πλευράς σημειώνουν σημαντική αύξηση λίγο πριν τη θραύση σε αντίθεση με τα σήματα της αριστερής πλευράς τα οποία στην αρχή δείχνουν να αυξάνονται όμως πριν τη θραύση σταθεροποιούνται και παραμένουν σχετικά αμετάβλητα μέχρι τη θραύση (Εικ. 6.22).



Εικόνα 6.22 Διάγραμμα φορτίου και ηλεκτρικών σημάτων (PSC) που κατεγράφησαν εκατέρωθεν της αριστερής και δεξιάς εγχοπής.

Στην Εικ. 6.23 δίνεται το άνοιγμα των χειλέων της δεξιάς εγχοπής σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα το οποίο κατέγραψαν τα ηλεκτρόδια που τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν της συγκεκριμένης εγχοπής. Παρατηρείται ότι όταν το clip gauge δίνει απότομη αύξηση του ανοίγματος της εγχοπής, το διάγραμμα του ηλεκτρικού ρεύματος δίνει αντίστοιχη απότομη αύξηση.

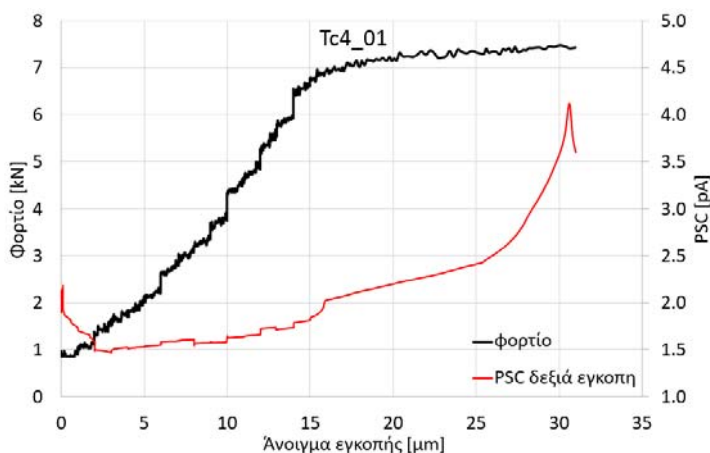


Εικόνα 6.23 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) που κατεγράφησαν εκατέρωθεν της δεξιάς εγχοπής και το αντίστοιχο άνοιγμα των χειλέων όπως καταγράφηκε από το clip gauge.

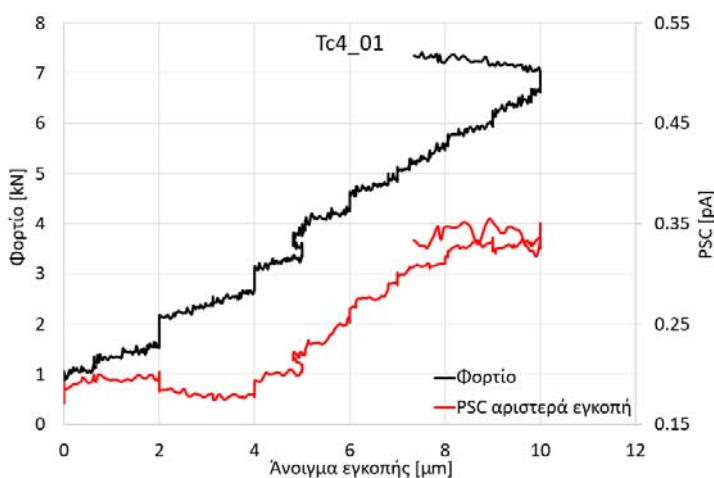
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Τέλος, στα διαγράμματα των Εικ. 6.24, 6.25 δίνεται η μεταβολή των ηλεκτρικών καταγραφών και του φορτίου ως προς το άνοιγμα της αντίστοιχης εγκοπής. Οι μικρές αστάθειες των διαγραμμάτων οφείλονται στην ακρίβεια- ευαισθησία καταγραφής των clip gauges. Είναι σημαντικό ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ των δύο καμπυλών και στα δύο διαγράμματα.

Στην δεξιά εγκοπή (εγκοπή έναρξης ρωγμής) το φορτίο και τα ηλεκτρικά σήματα αυξάνονται παράλληλα. Στη συνέχεια, όταν το φορτίο σταθεροποιείται αλλάζει, χρονικά πολύ κοντά, η κλίση της καμπύλης των ηλεκτρικών καταγραφών και αρκετά πριν σπάσει το δοκίμιο σημειώνεται απότομη μεταβολή της κλίσης του διαγράμματος, προμηνύοντας την αστοχία.



Εικόνα 6.24 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και φορτίου ως προς το άνοιγμα της δεξιάς εγκοπής (clip gauge).



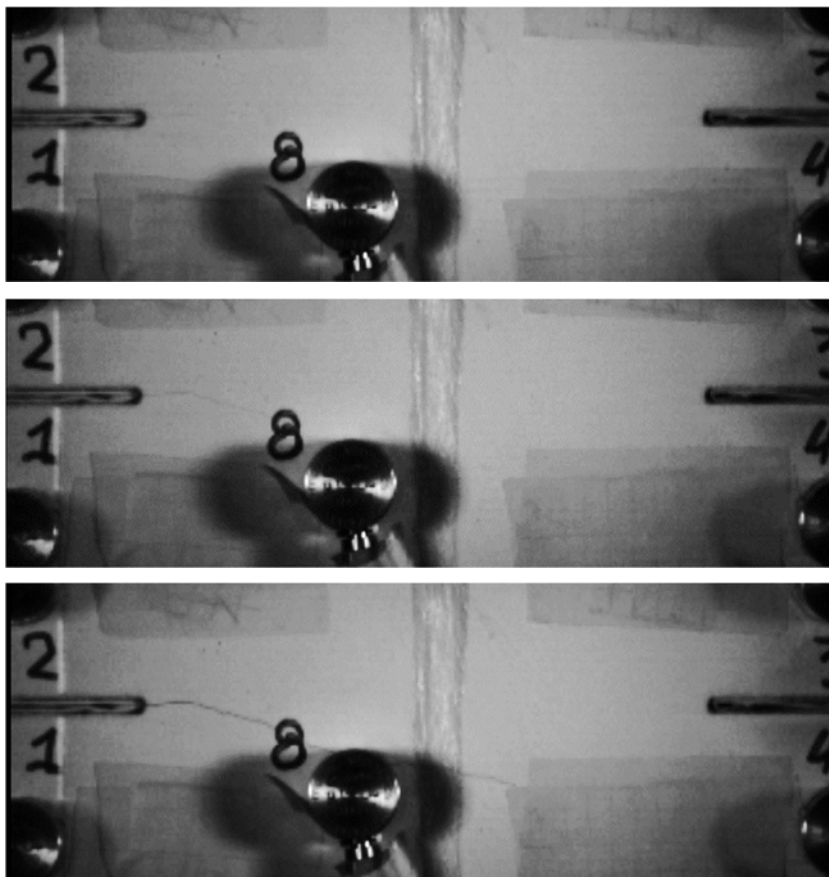
Εικόνα 6.25 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και φορτίου ως προς το άνοιγμα της αριστερής εγκοπής (clip gauge).

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Στην αριστερή εγκοπή, και τα δύο διαγράμματα έχουν όμοια συμπεριφορά. Αυξάνονται στο μεγαλύτερο μέρος του πειράματος ενώ σε κοινό χαρακτηριστικό σημείο αλλάζουν κατεύθυνση. Πιθανότατα θα μπορούσε να είναι μία ένδειξη ανακούφισης της εντατικής κατάστασης στη συγκεκριμένη περιοχή.

6.4 Δοκίμιο Tc04_02 με μήκος εγκοπής 4cm

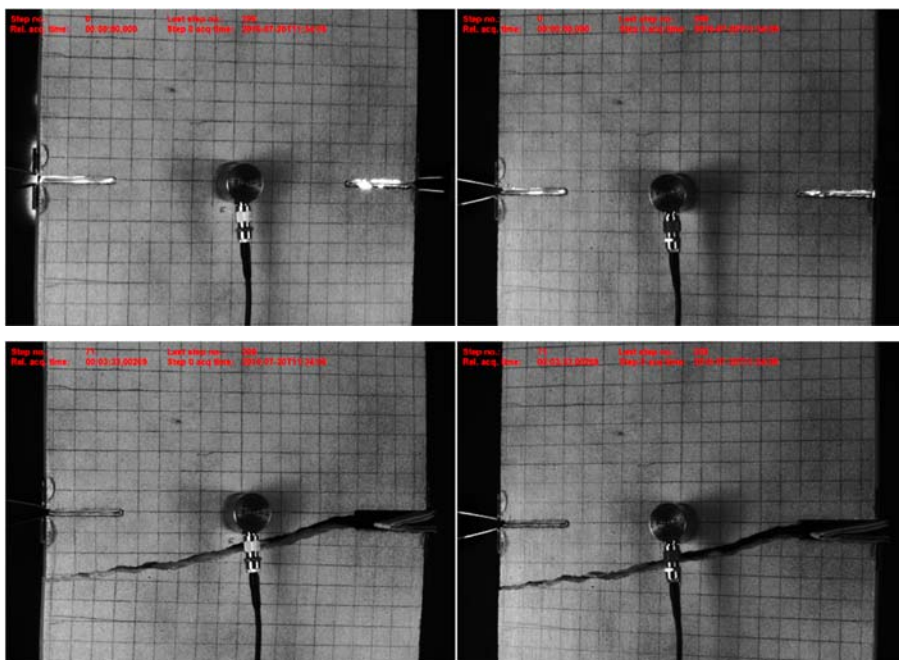
Το μάρμαρο είναι ένα ιδιαίτερα ανισότροπο υλικό του οποίου η συμπεριφορά επηρεάζεται πολύ από τα «νερά» και τον προσανατολισμό αυτών. Συνεπώς ήταν αναμενόμενο ότι το δεύτερο δοκίμιο με το ίδιο μήκος εγκοπής δεν θα είχε την ίδια μορφή αστοχίας με το πρώτο.



Εικόνα 6.26 Έναρξη και εξέλιξη ρωγμής δοκιμίου Tc04-02 όπως δίνεται από τη high speed camera.

Η ρωγμή ξεκίνησε από την αριστερή εγκοπή και λόγω του προσανατολισμού των «νερών» δεν κατέληξε στην απέναντι εγκοπή αλλά κάτω από αυτήν (Εικ. 6.26, 6.27, 6.28).

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



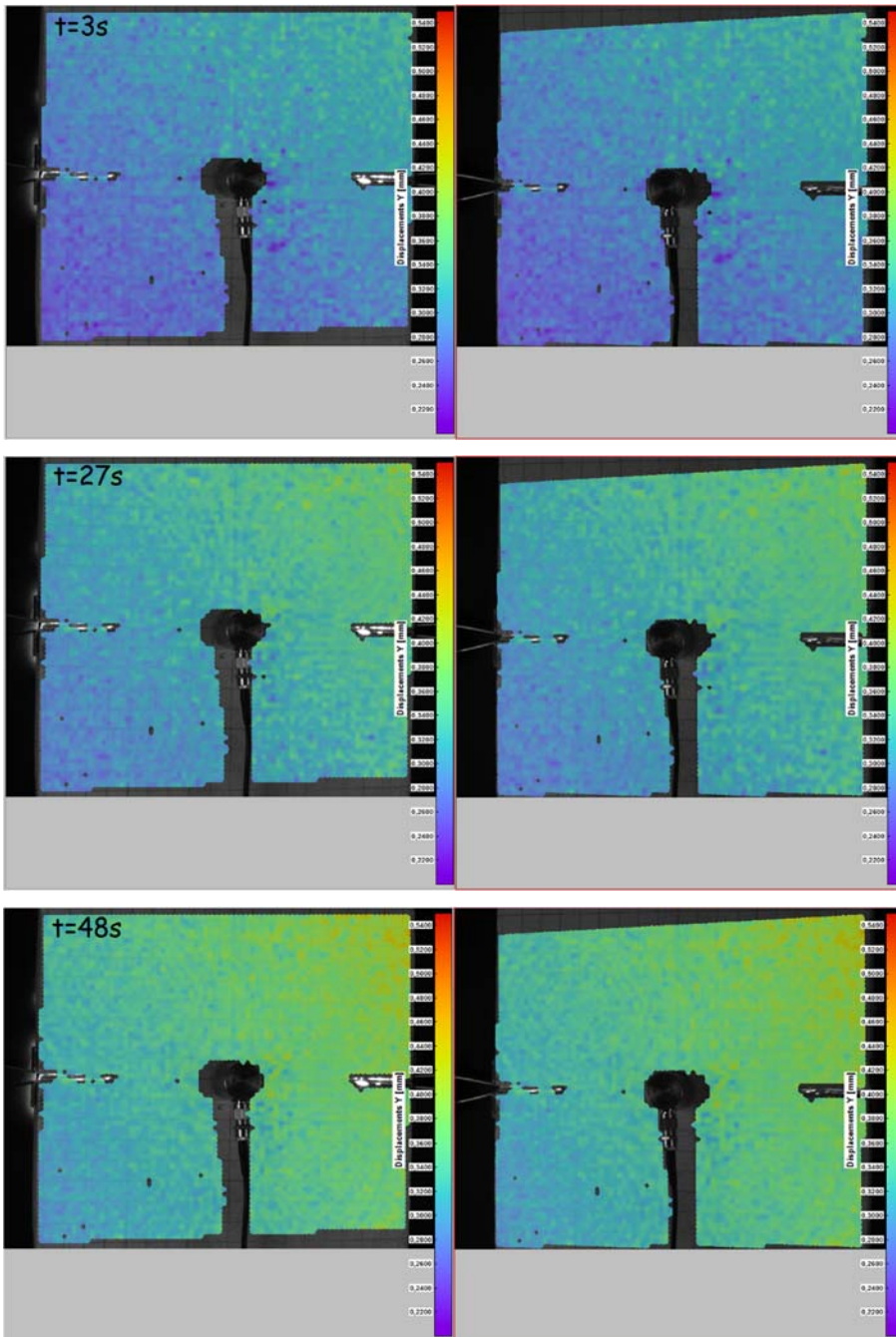
Εικόνα 6.27 Δοκίμιο πριν και μετά τη θραύση όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC.

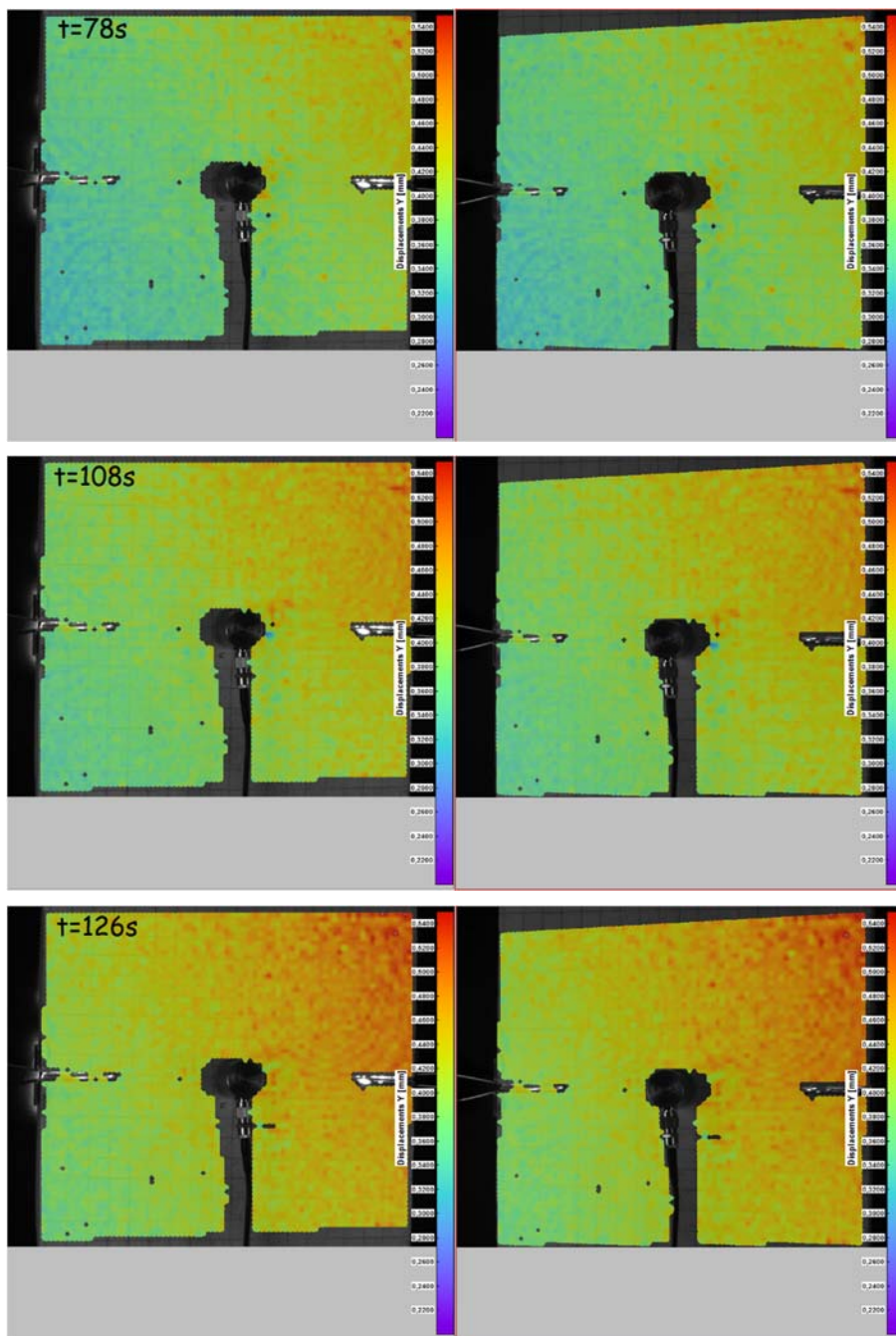


Εικόνα 6.28 Το δοκίμιο μετά τη θραύση.

Στις εικόνες που ακολουθούν δίνεται η μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y του δοκίμιου σε διάφορες χρονικές στιγμές. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι μετακινήσεις είναι αυξημένες από την πλευρά από όπου ξεκίνησε η θραύση (δεξιά όπως παρακολουθεί η τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC).

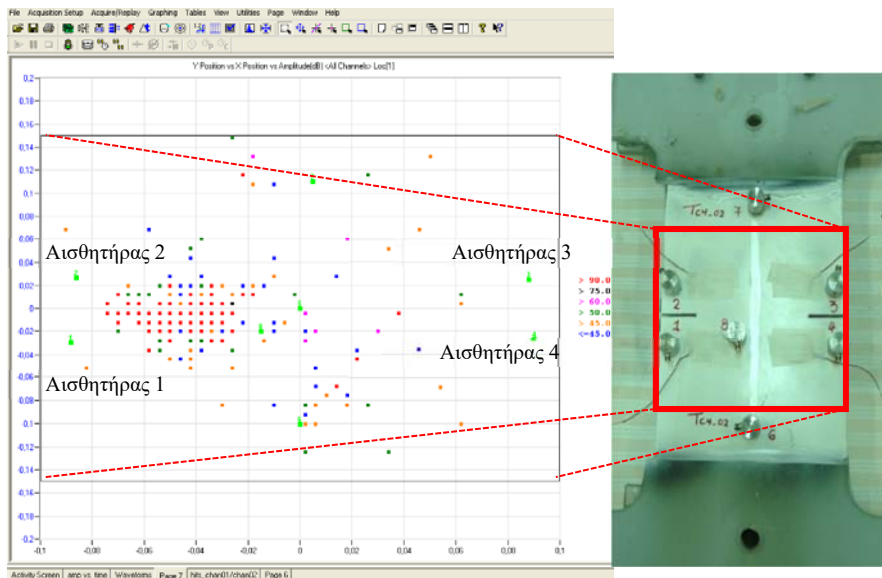
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου





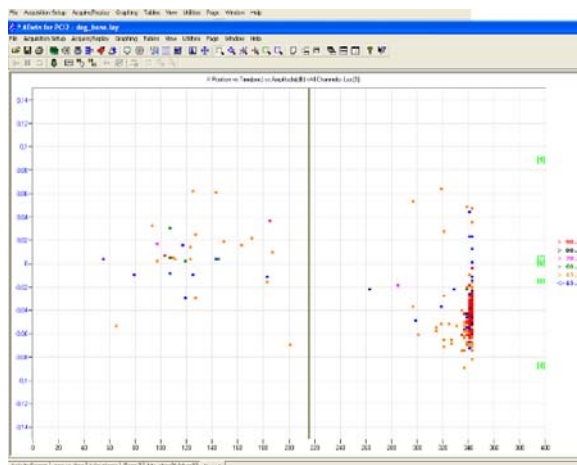
Εικόνα 6.29 Μετακινήσεις δοκιμίου κατά τον άξονα y υπό μορφή χρωματοκλίμακας όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC για κάποιες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές πριν τη θραύση.

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



Εικόνα 6.30 Επίπεδος εντοπισμός θέσης ακουστικών γεγονότων καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Άξονας y καθ' ύψος θέση, άξονας x κατά μήκος θέση των ακουστικών γεγονότων (events).

Στην Εικ. 6.31 δίνεται η θέση των ακουστικών γεγονότων που σημειώνονται πάνω στην νοητή ευθεία που ενώνει τις δύο εγκοπές (άξονας y του διαγράμματος) κατά τη διάρκεια του πειράματος (άξονας x: χρόνος).

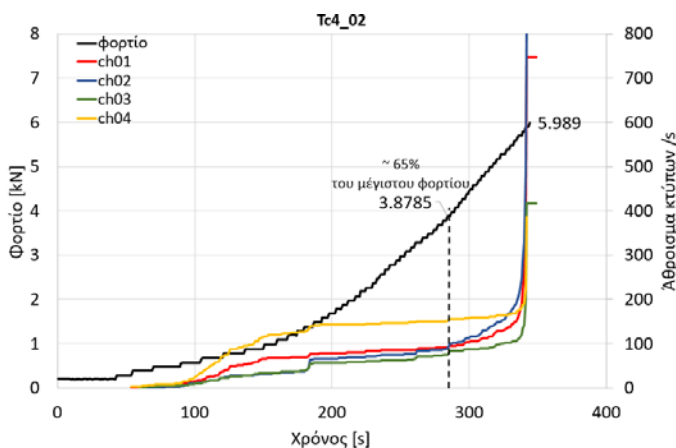


Εικόνα 6.31 Χρονική εξέλιξη της θέσης των ακουστικών γεγονότων που καταγράφονται πάνω στην νοητή ευθεία που ενώνει τις δύο εγκοπές. Το πλάτος των γεγονότων δίνεται σε χρωματική κλίμακα.

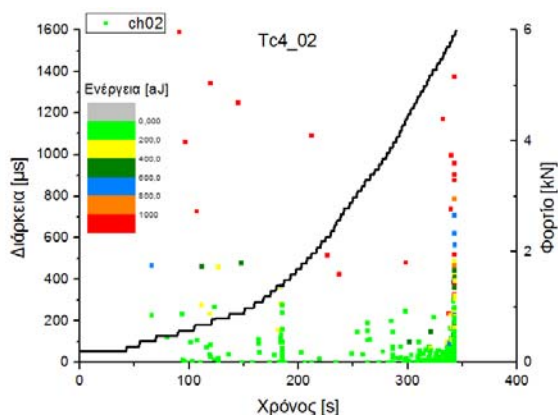
Κατά τον εντοπισμό των ακουστικών γεγονότων (events), στις Εικ. 6.30, 6.31, παρατηρούνται λίγα διάσπαρτα γεγονότα στα αρχικά στάδια της φόρτισης κοντά στο μέσο μεταξύ των δύο εγκοπών και αρκετά πυκνά και συγκεντρωμένα γεγονότα,

λίγο πριν τη θραύση, στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου κοντά στους αισθητήρες 1 και 2 όπου ξεκίνησε η ρωγμή.

Στο διάγραμμα της Εικ. 6.32 δίνεται το άθροισμα των ακουστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο των αισθητήρων εκατέρωθεν των εγκοπών καθώς και η χρονική εξέλιξη του φορτίου. Κοντά στο 65% του μέγιστου φορτίου αρχίζουν να καταγράφονται με μεγαλύτερη ταχύτητα ακουστικά σήματα. Ο αισθητήρας 04 φαίνεται να καταγράφει αρχικά κάποια ακουστική δραστηριότητα η οποία πιθανότατα να οφείλεται στην ανισοτροπία του μαρμάρου. Τη στιγμή όμως που παράγονται πολλά ακουστικά λόγω της συσσώρευσης των ρωγμών, οι αισθητήρες 01, 02 όπου ξεκίνησε η ρωγμή δίνουν περισσότερα ακουστικά σήματα.



Εικόνα 6.32 Διάγραμμα του αθροίσματος ακουστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο για τους αισθητήρες εκατέρωθεν των εγκοπών και της χρονικής εξέλιξης του φορτίου.



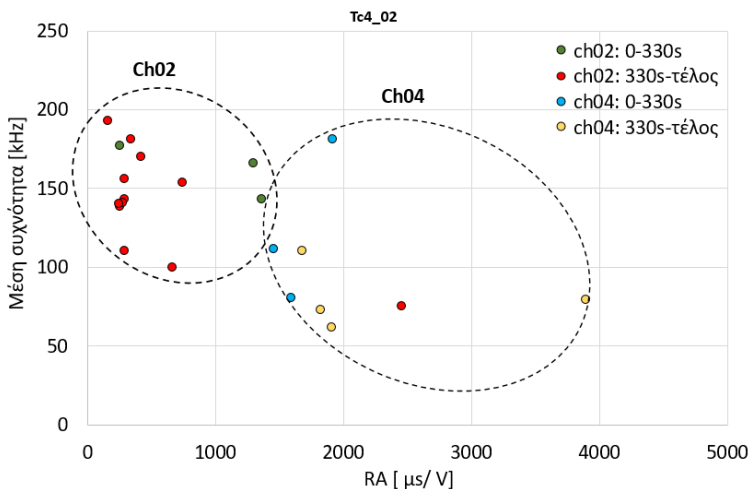
Εικόνα 6.33 Διάγραμμα φορτίου και διάρκειας ακουστικών κτύπων με την αντίστοιχη ενέργεια σε χρωματοκλίμακα (αισθητήρας 02) κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στην Εικ. 6.33 δίνονται η χρονική εξέλιξη του φορτίου και της διάρκειας των ακουστικών κτύπων με την αντίστοιχη ενέργεια τους σε μορφή χρωματοκλίμακας.

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

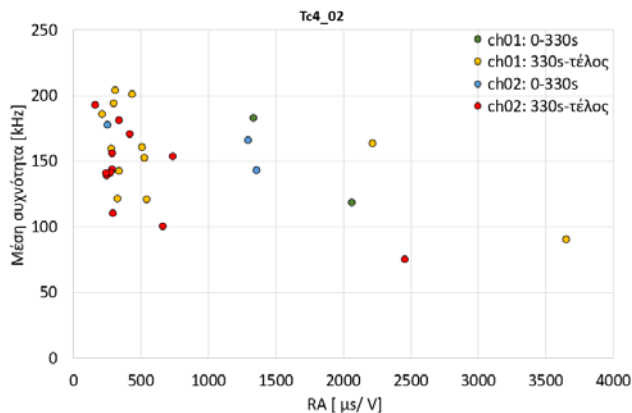
Το πλήθος των ακουστικών σημάτων δεν είναι μεγάλο όμως υπάρχει σαφής χρονικός διαχωρισμός σε δύο ουσιαστικά περιοχές.

Για δύο αισθητήρες, ένας σε κάθε εγκοπή, δίνεται το διάγραμμα των μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών κτύπων ως προς την παράμετρο RA.



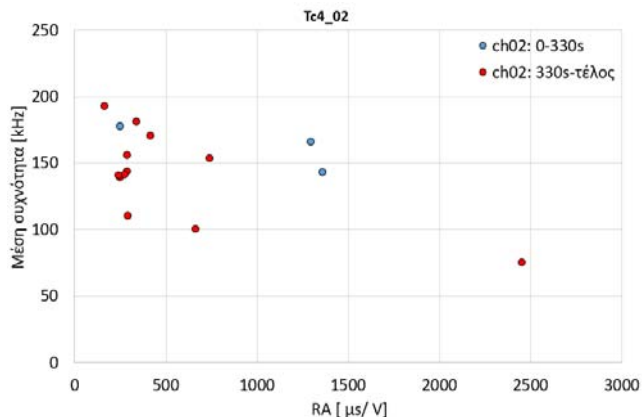
Εικόνα 6.34 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρες 02 και 04) ως προς την παράμετρο RA.

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, στον αισθητήρα όπου ξεκίνησε η ρωγμή οι τιμές του RA είναι μικρότερες. Επίσης για κάθε ένα αισθητήρα ξεχωριστά δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός των σημείων που αντιστοιχούν στις διαφορετικές χρονικές περιόδους (Εικ. 6.35, 6.36) όπως ορίστηκαν από το διάγραμμα της Εικ. 6.33. Αυτό οφείλεται στη φύση των σημάτων.



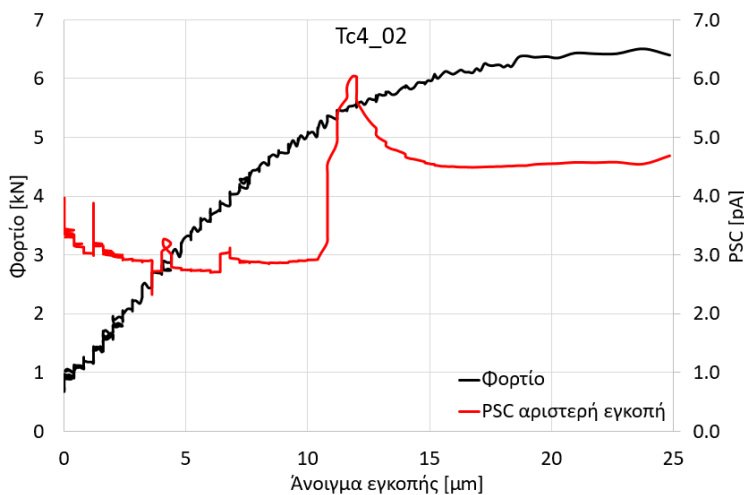
Εικόνα 6.35 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρες 01 και 02) ως προς την παράμετρο RA.

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



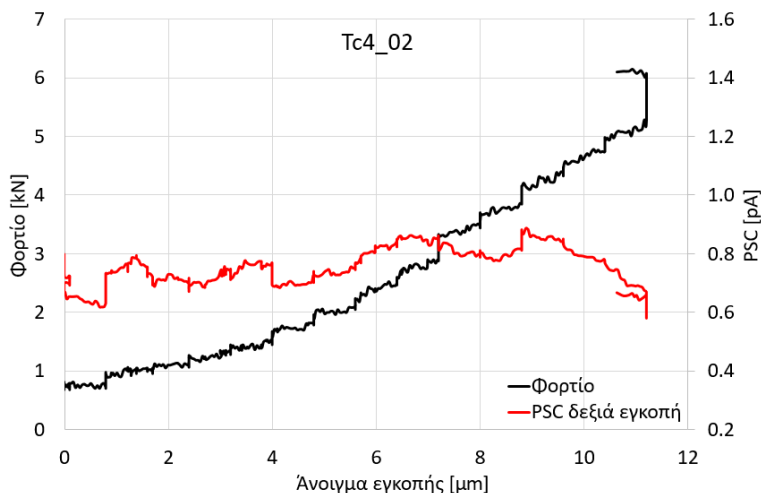
Εικόνα 6.36 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρας 02) ως προς την παράμετρο RA.

Στα διαγράμματα των Εικ. 6.37, 6.38 δίνονται τα ηλεκτρικά σήματα και το φορτίο ως προς το άνοιγμα της αντίστοιχης εγκοπής. Η ρωγμή ξεκίνησε από την αριστερή εγκοπή όπου το ηλεκτρικό σήμα δείχνει μία έντονη μεταβολή αρκετά πριν την τελική θραύση. Τα ηλεκτρικά σήματα της δεξιάς εγκοπής ακολουθούν τη μεταβολή του φορτίου ενώ λίγο πριν τη θραύση και ενώ το φορτίο αυξάνεται τα ηλεκτρικά σήματα αρχίζουν να μειώνονται σημαντικά.



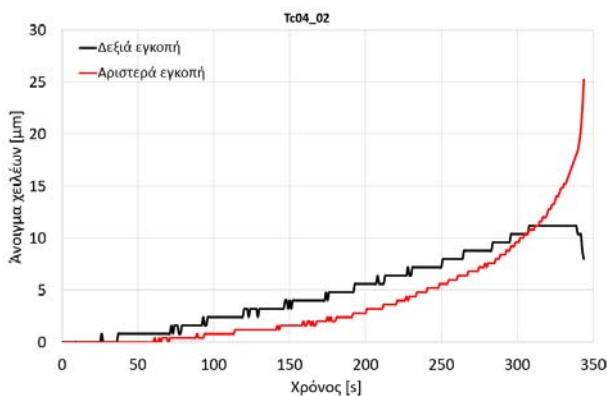
Εικόνα 6.37 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και φορτίου ως προς το άνοιγμα της αριστερής εγκοπής (clip gauge).

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



Εικόνα 6.38 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και φορτίου ως προς το άνοιγμα της δεξιάς εγκοπής (clip gauge).

Το άνοιγμα των χειλέων των δύο εγκοπών δίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 6.39. Και οι δύο εγκοπές ανοίγουν μαζί, με παρόμοιο ρυθμό σε μεγάλο διάστημα του πειράματος. Μετά τη χρονική στιγμή των 300s περίπου, το άνοιγμα της δεξιάς εγκοπής παραμένει σταθερό και συνεχίζει να αυξάνεται με μεγάλη κλίση το άνοιγμα της αριστερής εγκοπής μέχρι να σημειωθεί η θραύση.

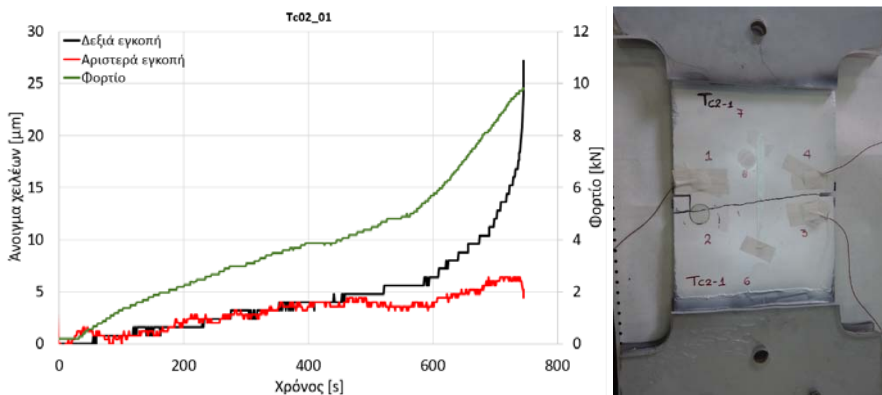


Εικόνα 6.39 Διάγραμμα ανοίγματος των χειλέων των δύο εγκοπών.

6.5 Δοκίμιο Tc02_01 με μήκος εγκοπής 2cm

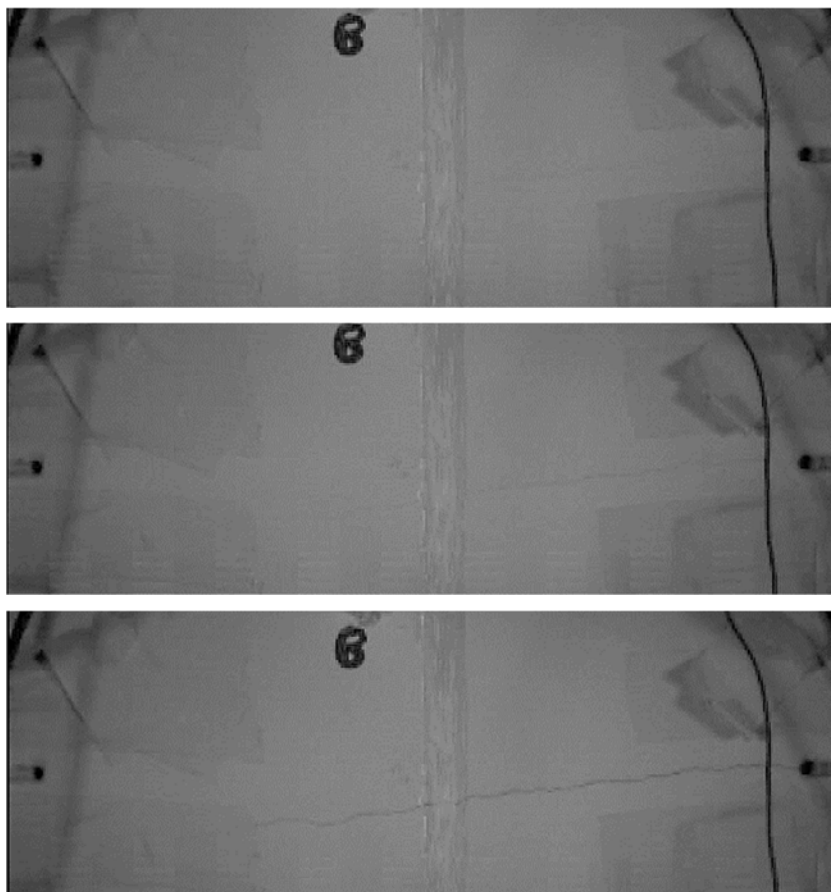
Στο 1° δοκίμιο με μήκος εγκοπής 2cm, κατά τη διάρκεια του πειράματος, δεν υπήρχαν σαφείς ενδείξεις για το από ποια από τις δύο εγκοπές θα ξεκινήσει η ρωγή. Τα clip gauges μέχρι τα 600s άνοιγαν μαζί. Στη συνέχεια, υπήρξε ένα διάστημα σταθερότητας και μετά αρχίζει να ανοίγει περισσότερο το clip στην δεξιά εγκοπή από όπου ξεκίνησε και η ρωγή (Εικ. 6.40).

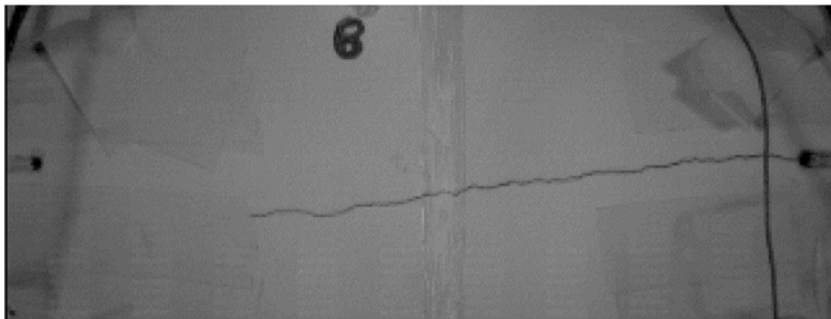
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



Εικόνα 6.40 Διάγραμμα φορτίου& ανοίγματος των χειλέων των δύο εγκοπών (αριστερά), δοκίμιο μετά τη θραύση(δεξιά).

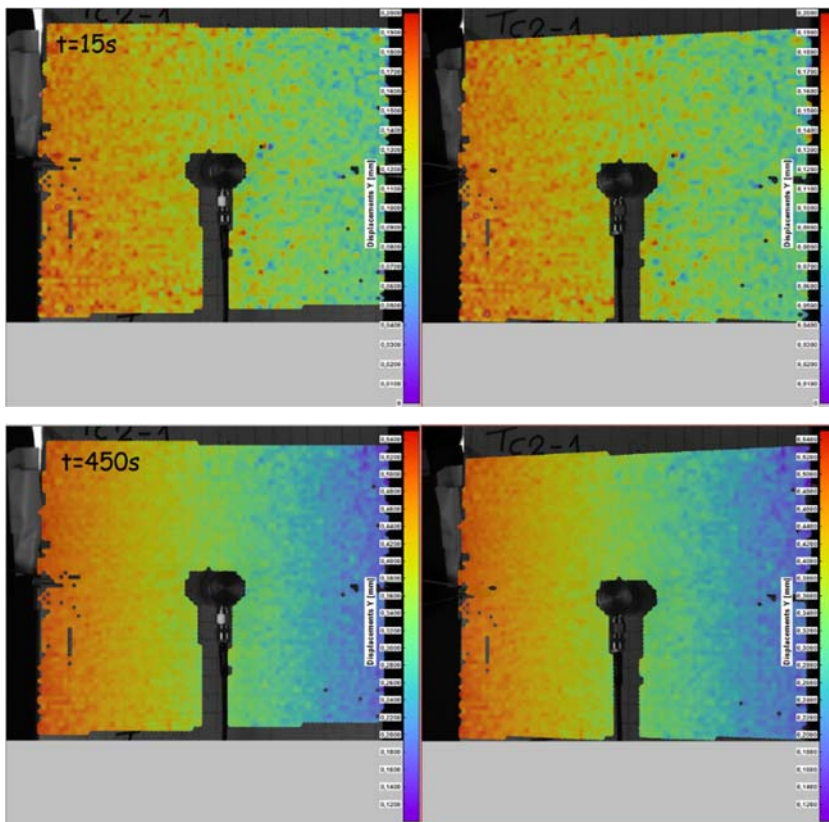
Στην παρακάτω εικόνα δίνονται οι φωτογραφίες κατά τη διάρκεια της θραύσης όπως λαμβάνονται από την high speed κάμερα. Η ρωγμή ξεκινάει από τη δεξιά εγκοπή όπως δείχνουν όλα τα μετρητικά συστήματα.



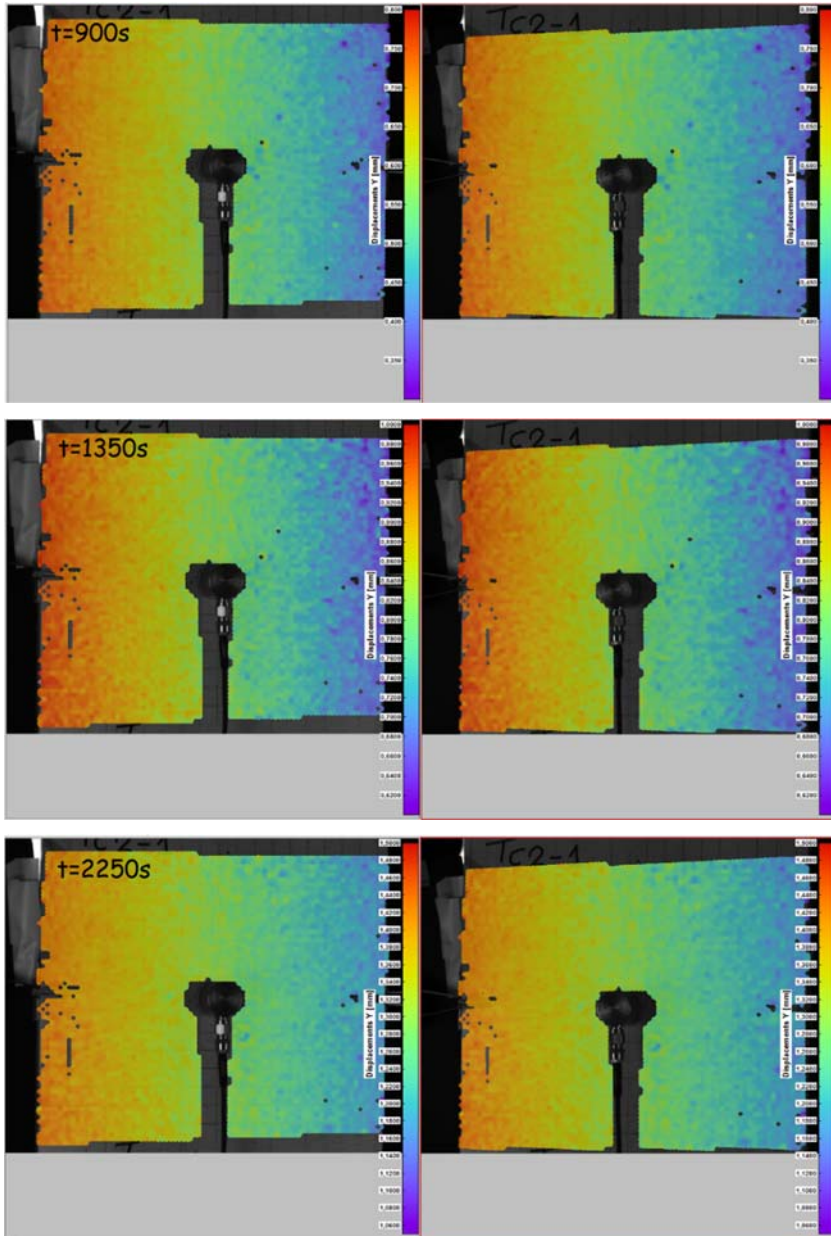


Εικόνα 6.41 Έναρξη και εξέλιξη ρωγμής δοκιμίου Tc02-01 όπως δίνεται από τη high speed camera.

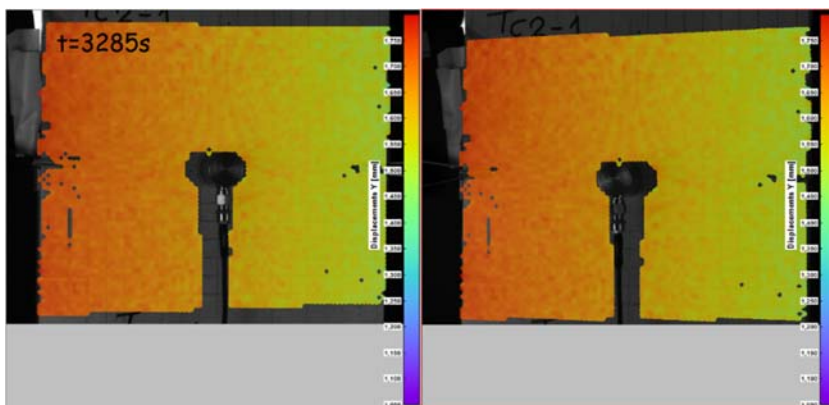
Παρακάτω δίνονται σε χρωματοκλίμακα οι μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση y όπως λαμβάνονται από την τεχνική DIC. Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (Εικ. 6.42) η αριστερή πλευρά (από όπου ξεκίνησε η ρωγμή) έχει μεγαλύτερες μετακινήσεις σε σχέση με τη δεξιά. Λίγο πριν τη θραύση (Εικ. 6.43) οι μετακινήσεις δείχνουν να είναι ομοιόμορφες σε όλο το μήκος του δοκιμίου.



Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

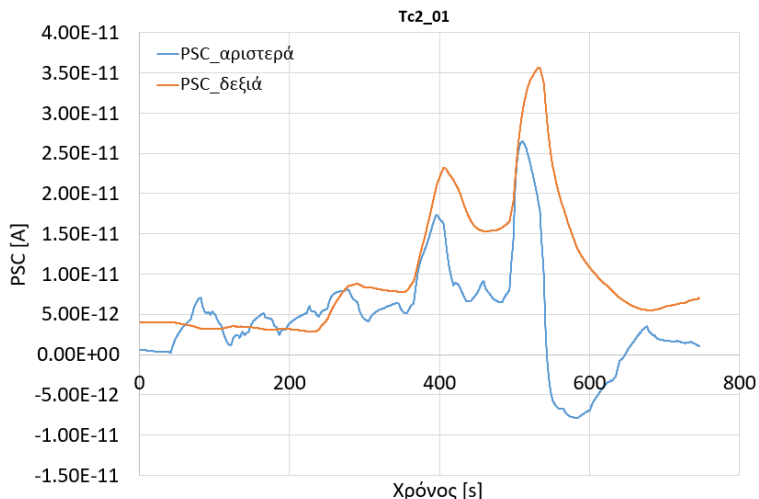


Εικόνα 6.42 Μετακινήσεις δοκιμίου κατά τον άξονα y υπό μορφή χρωματοκλίμακας όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC για κάποιες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές.



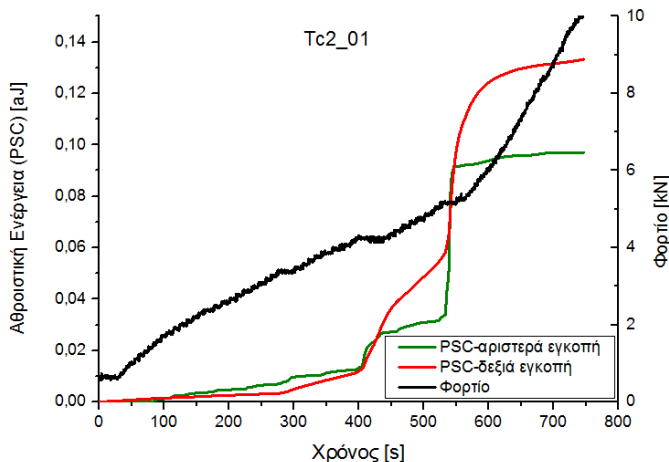
Εικόνα 6.43 Μετακινήσεις κατά τον άξονα y υπό μορφή χρωματοκλίμακας όπως δίνεται από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC για το δευτερόλεπτο πριν τη θραύση.

Όσον αφορά τις καταγραφές των ηλεκτρικών σημάτων, φαίνεται ότι δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των PSC που προέκυψαν από τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων στις δύο εγκοπές (Εικ. 6.44). Αυτό λογικά οφείλεται στο ότι μεταξύ των εγκοπών υπήρχε ομοιόμορφη κατανομή ζημιών πριν την τελική θραύση.



Εικόνα 6.44 Διάγραμμα ενδείξεων PSC στις δύο εγκοπές.

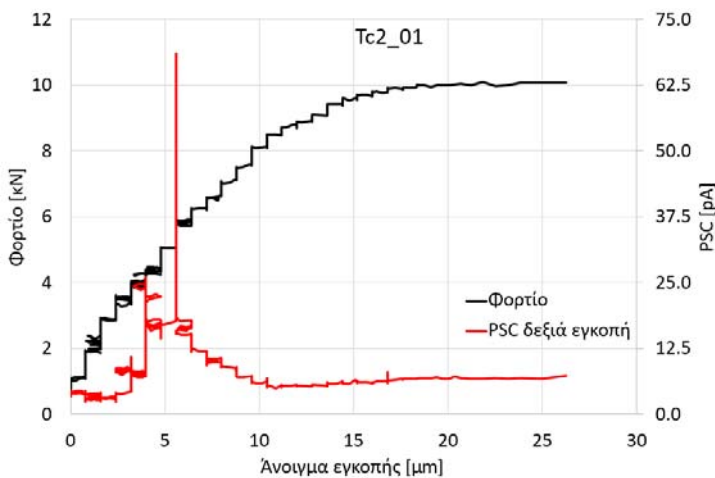
Στο διάγραμμα της Εικ. 6.45 δίνονται οι μεταβολές της αθροιστικής ενέργειας όπως υπολογίστηκε βάσει των καταγραφών PSC.



Εικόνα 6.45 Διάγραμμα μεταβολής φορτίου και αθροιστικών ενεργειών (PSC) στις δύο εγκοπές του δοκιμίου.

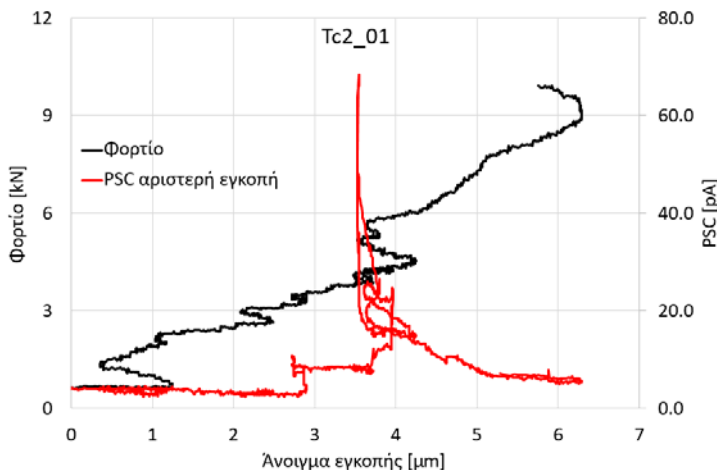
Η ενέργεια και στις δύο εγκοπές ποσοτικά είναι περίπου της ίδιας τάξεως. Ποιοτικά ακολουθούν την ίδια μορφή και μόνο λίγο πριν τη θραύση, πριν το σημείο αλλαγής της κλίσης του φορτίου, υπάρχει μία έντονη μεταβολή και στα δύο διαγράμματα. Σε αυτό το σημείο, μεγαλύτερη ενέργεια δίνει το ζεύγος των ηλεκτροδίων το οποίο βρίσκεται στην εγκοπή από όπου τελικά ξεκίνησε η ρωγμή.

Τέλος το διάγραμμα της μεταβολής του φορτίου και των ηλεκτρικών σημάτων της δεξιάς εγκοπής (έναρξη ρωγμής) ως προς το άνοιγμα των χειλέων της δίνονται στην Εικ. 6.46 και για την αριστερή εγκοπή στην Εικ. 6.47. Χαρακτηριστική είναι η έντονη μεταβολή των ηλεκτρικών σημάτων πολύ πριν το μέγιστο φορτίο. Κάτι που έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενο πείραμα (Tc4_02) (Εικ. 6.37).



Εικόνα 6.46 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και φορτίου ως προς το άνοιγμα της αριστερής εγκοπής (clip gauge).

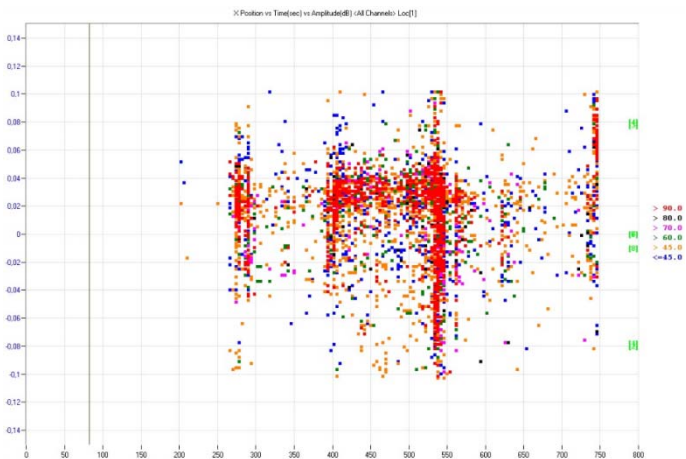
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



Εικόνα 6.47 Διάγραμμα ηλεκτρικών σημάτων (PSC) και φορτίου ως προς το άνοιγμα της αριστερής εγκοπής (clip gauge).

Τα διαγράμματα του φορτίου και των ηλεκτρικών σημάτων για την αριστερή εγκοπή έχουν ποιοτικά όμοια συμπεριφορά. Όπως και σε προηγούμενο πείραμα (Tc4_02) (Εικ. 6.38), στην αντίθετη εγκοπή από εκεί που ξεκίνησε η ρωγμή, όταν το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται το ρεύμα δείχνει σταδιακή μείωση (Εικ. 6.47).

Στο διάγραμμα της Εικ. 6.48 δίνεται η θέση των ακουστικών γεγονότων που σημειώνονται πάνω στην νοητή ευθεία που ενώνει τις δύο εγκοπές (άξονας y του διαγράμματος) κατά τη διάρκεια του πειράματος (άξονας x: χρόνος). Σημείωση: με κόκκινο χρώμα είναι τα σήματα με το μέγιστο πλάτος.



Εικόνα 6.48 Χρονική εξέλιξη της θέσης των ακουστικών γεγονότων που καταγράφονται πάνω στην νοητή ευθεία που ενώνει τις δύο εγκοπές. Το πλάτος των γεγονότων δίνεται σε χρωματική κλίμακα.

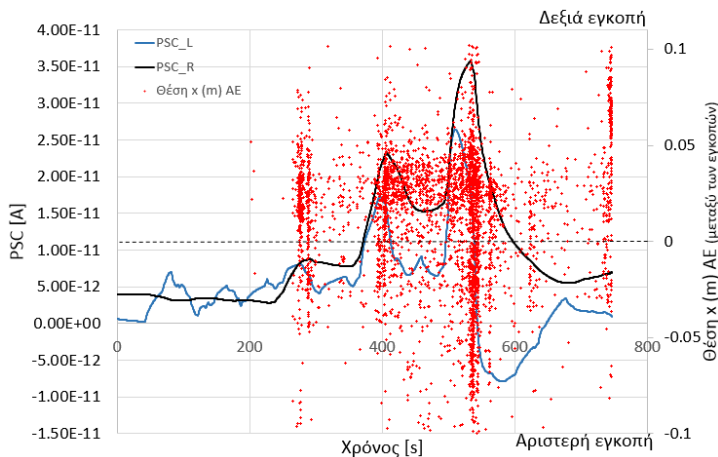
Παρατηρείται ότι αρχικά υπάρχουν χρονικά σημεία συγκέντρωσης γεγονότων στο μέσο του διαστήματος μεταξύ των δύο εγκοπών. Έπειτα, στα 540s, τα γεγονότα

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

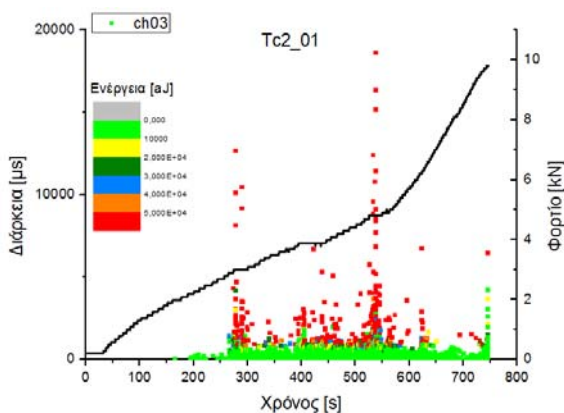
πυκνώνουν ακόμα περισσότερο σε όλο το μήκος μεταξύ των εγκοπών και μόνο λίγο πριν την θραύση υπάρχει σημαντική δραστηριότητα στους αισθητήρες 3-4 όπου ξεκίνησε η ρωγή.

Είναι σημαντικό ότι στο σύνολο τους οι τεχνικές συμφωνούν στην περιγραφή της συμπεριφοράς του δοκιμίου. Σίγουρα οι διαφορές που σημειώνονται οφείλονται στην ανισοτροπία του υλικού και όχι σε ανεπάρκεια παρακολούθησης της μηχανικής συμπεριφοράς του δοκιμίου από τις εφαρμοζόμενες τεχνικές.

Στο διάγραμμα της Εικ. 6.49 αποτυπώνεται ότι χρονικά η πύκνωση των ακουστικών σημάτων συμπίπτει με τις κορυφές των ηλεκτρικών σημάτων.



Εικόνα 6.49 Θέση κατά τη διαμήκη διεύθυνση του δοκιμίου (διεύθυνση εγκοπών) των ακουστικών και καταγραφές ηλεκτρικών σημάτων(PSC) από τα ζεύγη των ηλεκτροδίων εκατέρωθεν των εγκοπών.

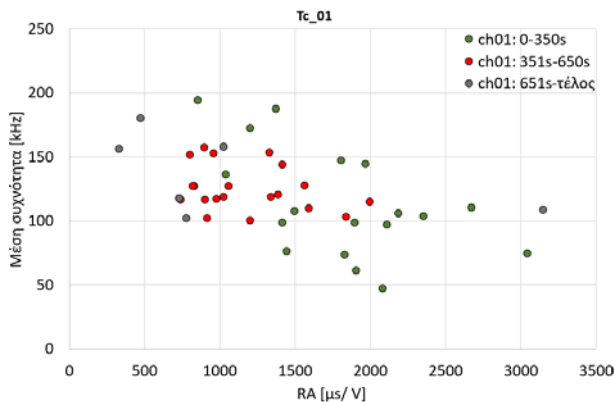


Εικόνα 6.50 Διάγραμμα φορτίου και διάρκειας ακουστικών κτύπων με την αντίστοιχη ενέργεια σε χρωματοκλίμακα (αισθητήρας 03) κατά τη διάρκεια του πειράματος.

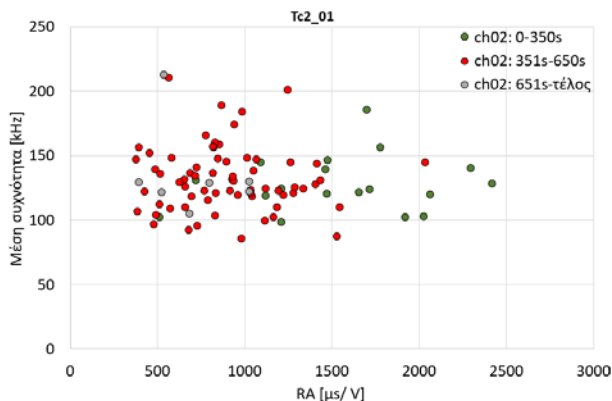
Στο διάγραμμα της διάρκειας των ακουστικών σημάτων (ενέργεια σημάτων σε χρωματοκλίμακα) (Εικ. 6.50) ορίζονται 3 χαρακτηριστικές χρονικές περιόδοι για

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

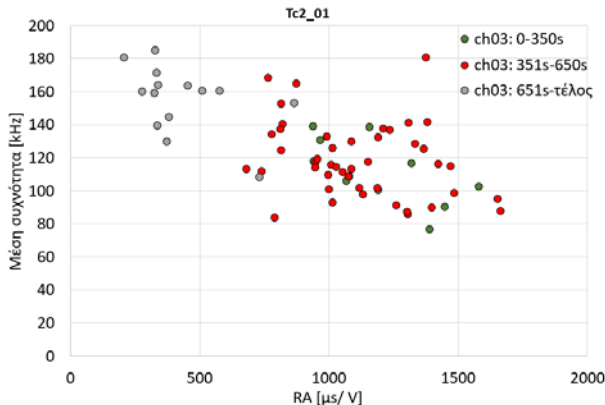
τις οποίες θα διαμορφωθούν, όπως και στα προηγούμενα πειράματα, τα διαγράμματα της μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA για όλους τους αισθητήρες (Εικ. 6.51- 6.54).



Εικόνα 6.51 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρας 01) ως προς την παράμετρο RA.

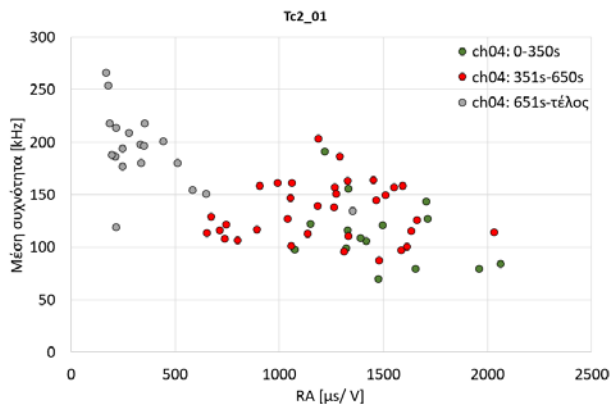


Εικόνα 6.52 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρας 02) ως προς την παράμετρο RA.



Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

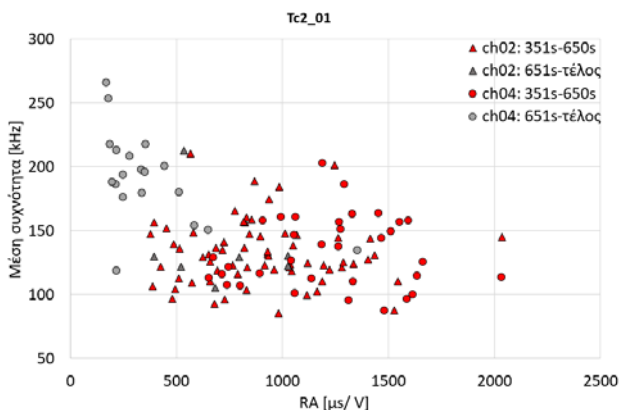
Εικόνα 6.53 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρας 03) ως προς την παράμετρο RA.



Εικόνα 6.54 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων (αισθητήρας 04) ως προς την παράμετρο RA.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, στους αισθητήρες 03, 04 από όπου ξεκίνησε η ρωγή υπάρχει χαρακτηριστικός διαχωρισμός των τιμών RA μεταξύ των πρώτων χρονικών περιόδων με το τελευταίο διάστημα πριν τη θραύση.

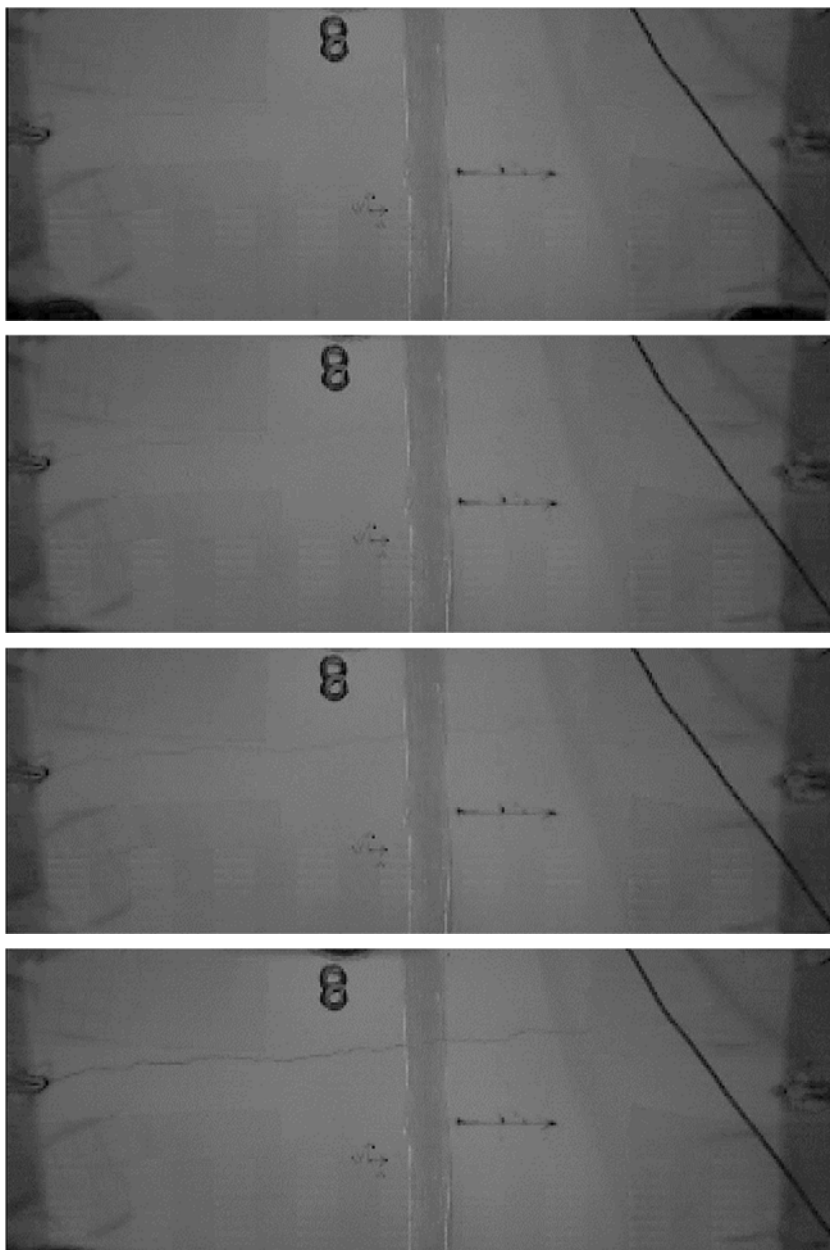
Τέλος, στο συγκεκριμένο πείραμα δεν διακρίνεται σαφής διαχωρισμός των χαρακτηριστικών «μέση συχνότητα-RA» για τους αισθητήρες των δύο εγχοπών (Εικ. 6.55) όπως στα προηγούμενα πειράματα. Αναμενόμενο από τη στιγμή που σε όλη τη διάρκεια του πειράματος υπήρχαν σημαντικά ακουστικά γεγονότα και στις δύο εγχοπές.



Εικόνα 6.55 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων όπως καταγράφηκαν από τον αισθητήρα 02 και 04 για τα τελευταία δευτερόλεπτα του πειράματος ως προς την παράμετρο RA.

6.6 Δοκίμιο Tc02_02 με μήκος εγκοπής 2cm

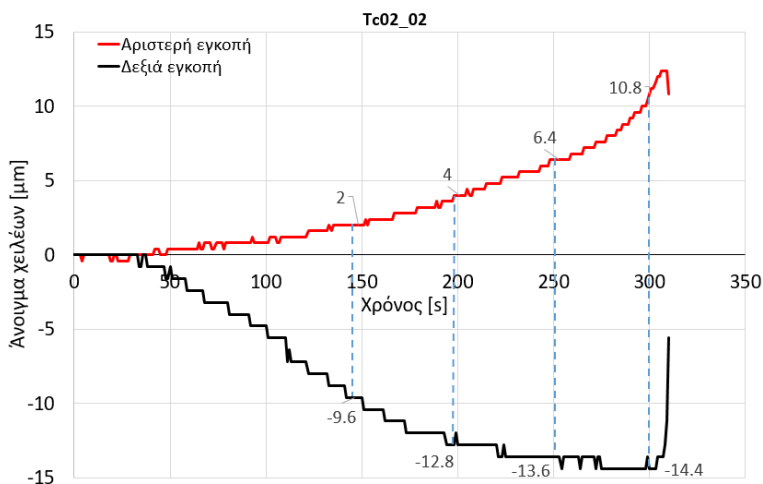
Στο 2° δοκίμιο με μήκος εγκοπής 2cm, η ρωγμή ξεκίνησε από την αριστερή εγκοπή όπως δίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες από τη high speed κάμερα.



Εικόνα 6.56 Έναρξη και εξέλιξη ρωγμής δοκίμιου Tc02-02 όπως δίνεται από τη high speed camera.

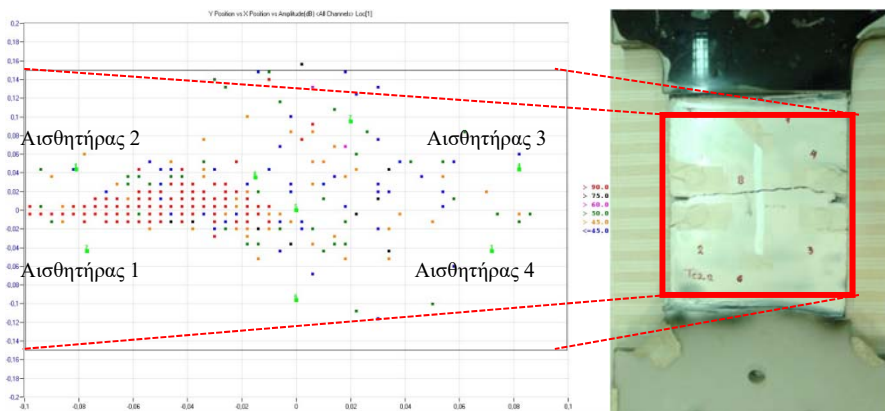
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικ. 6.57 όπου δίνονται οι καταγραφές των clip gauges, η αριστερή εγκοπή ανοίγει ενώ η δεξιά κλείνει. Ο ρυθμός με τον οποίο κλείνει η δεξιά εγκοπή είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό με τον οποίο ανοίγει η αριστερή εγκοπή.



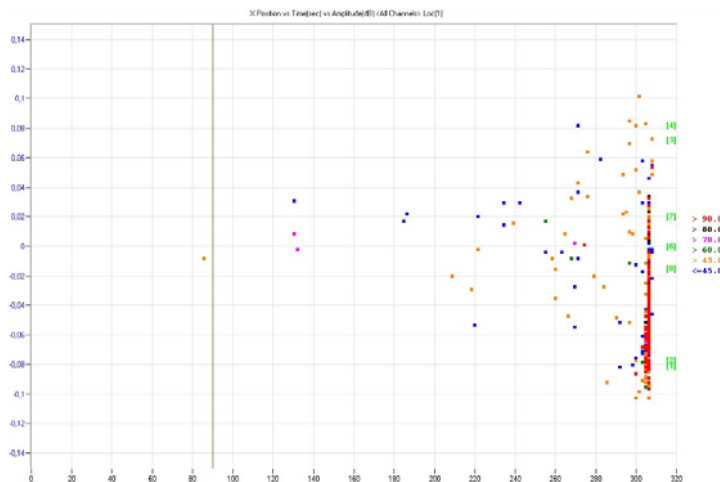
Εικόνα 6.57 Διάγραμμα φορτίου & ανοίγματος των χειλέων των δύο εγκοπών.

Για το ότι η ρωγμή ξεκινάει από την αριστερή εγκοπή συμφωνεί και η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (Εικ. 6.58, Εικ. 6.59).



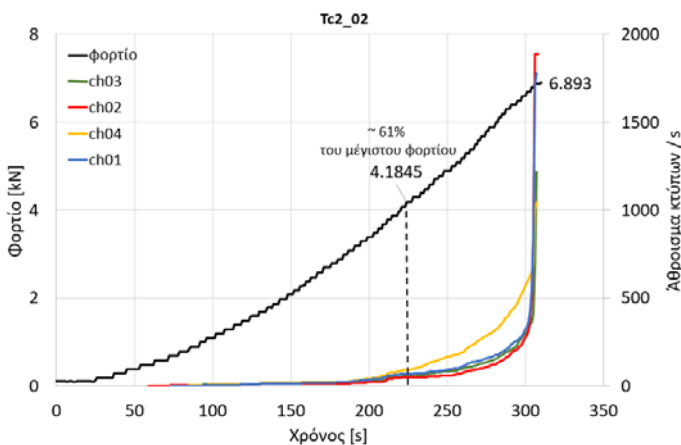
Εικόνα 6.58 Επίπεδος εντοπισμός θέσης ακουστικών γεγονότων καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Άξονας y: καθ' ύψος θέση, άξονας x: κατά μήκος θέση των ακουστικών γεγονότων (events)(αριστερά). Δοκίμιο μετά τη θραύση(δεξιά).

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



Εικόνα 6.59 Χρονική εξέλιξη της θέσης των ακουστικών γεγονότων που καταγράφονται πάνω στην νοητή ευθεία που ενώνει τις δύο εγκοπές. Το πλάτος των γεγονότων δίνεται σε χρωματική κλίμακα.

Στο διάγραμμα της Εικ. 6.60 δίνεται το άθροισμα των κτύπων ανά δευτερόλεπτο για τους αισθητήρες που βρίσκονται κοντά στις εγκοπές. Δεν είναι σαφές κατά τη διάρκεια του πειράματος από τα clip gauges από ποια εγκοπή θα ξεκινήσει η ρωγμή. Υπάρχει όμως η ένδειξη ότι το υλικό έχει μπει σε κρίσιμη κατάσταση από το 60% του μέγιστου φορτίου από το πλήθος των ακουστικών σημάτων που καταγράφουν οι αισθητήρες κοντά στις εγκοπές (Εικ. 6.60).

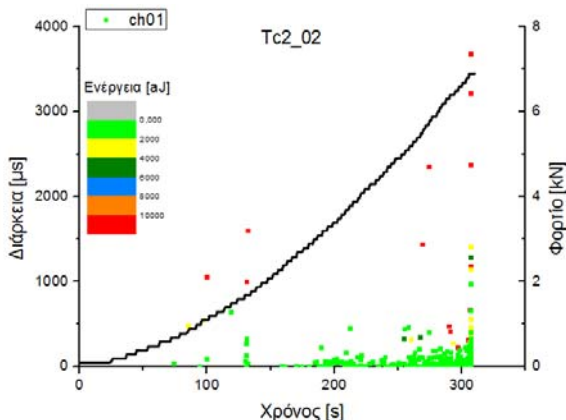


Εικόνα 6.60 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του φορτίου και αθροίσματος ακουστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο για τους αισθητήρες 01, 02, 03, 04.

Σύμφωνα με το διάγραμμα της διάρκειας των ακουστικών σημάτων (Εικ. 6.61), όπως και στα προηγούμενα πειράματα, ορίζονται οι χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους του πειράματος. Για αυτά τα διαστήματα διαμορφώθηκαν τα διαγράμματα

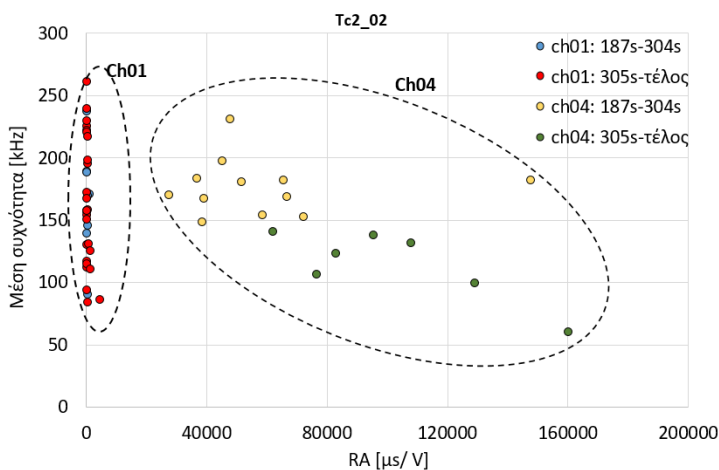
Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου

των μέσων συχνοτήτων των σημάτων ως προς την παράμετρο RA για δύο αισθητήρες, έναν σε κάθε εγκοπή (Εικ. 6.62).



Εικόνα 6.61 Διάγραμμα φορτίου και διάρκειας ακουστικών κτύπων με την αντίστοιχη ενέργεια σε χρωματοκλίμακα (αισθητήρας 01) κατά τη διάρκεια του πειράματος.

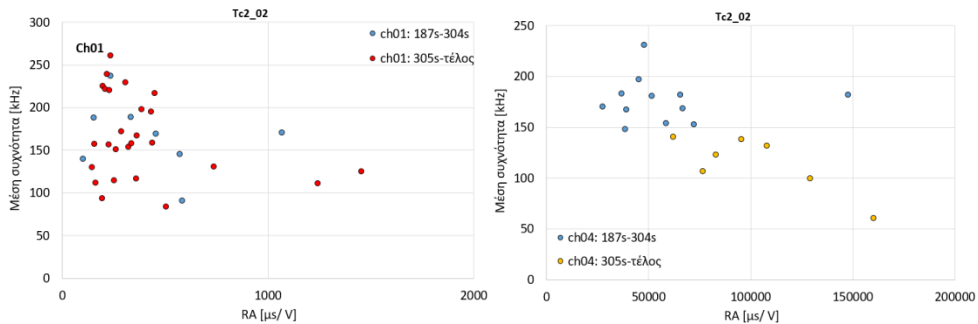
Είναι χαρακτηριστικό ότι τα σημεία για κάθε ένα από τους δύο αισθητήρες παρουσιάζουν διαφορά ως προς την παράμετρο RA. Ο αισθητήρας που βρίσκεται κοντά στην εγκοπή έχει μικρότερες τιμές RA όπως ακριβώς σημειώθηκε και σε άλλα πειράματα.



Εικόνα 6.62 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα 01 και 04 ως προς την παράμετρο RA.

Μεμονωμένα τα διαγράμματα των αισθητήρων 01 και 04 δίνονται στην Εικ. 6.63.

Δοκιμή Εφελκυσμού σε δοκίμια μορφής Dog-Bone από μάρμαρο Διονύσου



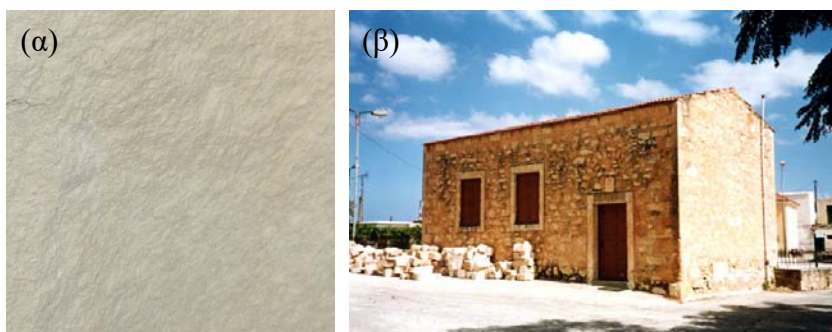
Εικόνα 6.63 Διάγραμμα μέσων τιμών της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα 04 ως προς την παράμετρο RA.

Σαφής διαχωρισμός διακρίνεται στον αισθητήρα 04 όπου τα σήματα έχουν μεγαλύτερο RA κοντά στη θραύση σε σχέση με εκείνα της προγενέστερης χρονικής περιόδου.

7. Αλφάς- Ρεθύμνου

7.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Το πέτρωμα αλφάς εξορύσσεται σε λατομεία κοντά στο χωριό Αλφά της επαρχίας Μυλοποτάμου (Ρέθυμνο Κρήτης). Είναι ένα πέτρωμα ιδιόμορφο που δεν συναντάται κάπου αλλού. Είναι γνωστό ως «αλφόπετρα» ή «πέτρα της Αλφάς». Η αλφόπετρα (υπόλευκος μαργαϊκός ασβεστόλιθος) μόλις βγει από το λατομείο είναι εξαιρετικά μαλακή και εύπλαστη, ενώ αν μείνει για λίγο στον ήλιο αρχίζει να σκληραίνει και παίρνει την τελική μορφή της. Η μάζα της είναι συμπαγής και δεν υπάρχει ίχνος εσοχής και κενών. Η πιο πιθανή εκδοχή για την προέλευση του ονόματος της αλφόπετρας είναι από το επίθετο αλφάς-αλφή-αλφού που σημαίνει λευκός (128).



Εικόνα 7.1 (α) Αλφάς Ρεθύμνου Κρήτης και (β) το δημοτικό σχολείο στο Σκορδίλω (1884).

Λόγω της αφθονίας του χρησιμοποιήθηκε σε πολλές κατασκευές της περιοχής. Πολλά κτίσματα έχουν λιθοδομή κατασκευασμένη από αλφόπετρα, μεταξύ των οποίων και το δημοτικό σχολείο στο Σκορδίλω, έτος κατασκευής 1884 (Εικ. 7.1). Επίσης από αλφόπετρα έχουν χτιστεί πολλές εκκλησίες στην Κρήτη, όπως η Μονή Αρσανίου, ο Άγιος Μηνάς Ηρακλείου, ο Άγιος Γεώργιος Ρεθύμνου και η Αγία Σοφία. Πρόσφατα κατά τη διαμόρφωση του δρόμου Αλφάς- Αρχαίας Ελεύθερας ανακαλύφθηκαν 128 τάφοι που ανήκαν στο βόρειο τμήμα του νεκροταφείου της αρχαίας Ελεύθερας όλοι λαξευμένοι στο χαρακτηριστικό πέτρωμα της περιοχής (128).

Ο αλφάς έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε πολλά έργα αποκατάστασης της περιοχής όπως η μονή Αρκαδίου, μνημείο εξέχουσας ιστορικής και πολιτισμικής κληρονομιάς (Εικ. 7.2), το φρούριο Φορτέτζα στο Ρέθυμνο, η ενετική Λότζια Ρεθύμνου κ.α.

Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.2 Μονή Αρκαδίου – Ρέθυμνο.

Ο Αλφάς είναι ένας εξαιρετικά μεταμορφωμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος. Είναι ένα πέτρωμα για το οποίο δεν έχουν γίνει ιδιαίτερες δοκιμές και έρευνες. Αρχικά στοιχεία για τον αλφά μπορούν να ληφθούν από την εταιρεία που τον εξορύσσει (Πέτρης Αλφάς Μ& Δ. Σαρρής Α.Β.Ε.Ε):

Ορυκτολογική σύσταση: Ασβεστίτης (99%), Χαλαζίας (0,5%), Αραγωνίτης (0,5%).

Φαινόμενη πυκνότητα 1440 kg/m^3 .

Ανοιχτό πορώδες (EN1936) 35,2% κ.ο.

Αντοχή σε κάμψη (EN 12372) 7,4MPa.

Αντοχή σε θλίψη (EN 1926) 31,5MPa.

Αντίσταση σε τριβή (EN 14157-μέθοδος Α) 44,0mm.

Ενέργεια θραύσης (κρούση) (EN 141158) 2 Joule.

Ο αλφάς μετά από έρευνα της επιτροπής συντήρησης μνημείων Επιδαύρου (Νι-νής κ.α 2001) (129) αποδείχθηκε ως ιδανικό υλικό για τα έργα αποκατάστασης των μνημείων της Επιδαύρου. Σύμφωνα με την ίδια πηγή, τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του συγκεντρώνονται παρακάτω:

Δοκιμές μηχανικής αντοχής:

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (kg/cm^2) 238 \rightarrow 23,8MPa

Αντοχή σε κάμψη (kg/cm^2) 104 \rightarrow 10.4 MPa

Δοκιμές πορώδους δομής:

Απόλυτη πυκνότητα (g/cm^3) 2,45

Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm^3) 1,73

Πορώδες (%) 29,3.

Στοιχεία για την αντοχή του αλφά προέκυψαν από πειράματα ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές τριαξονικής θλίψης τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (130).

Πιο συγκεκριμένα, από δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης η αντοχή του πετρώματος δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Αλφάς - Ρεθύμνου

Πίνακας 7.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά αλφά (130).

Αριθμός Δοκιμίου	σ_0 (MPa)	ϵ
1	32.41	0.31
2	36.80	0.28
3	30.37	0.24
4	21.23	0.17
5	26.96	0.27
6	28.87	0.26

Ενώ από δοκιμές τριαξονικής θλίψης η αντοχή και η παραμόρφωση του υλικού που προέκυψαν δίνονται στον Πιν. 7.2.

Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια αλφά (130).

Αριθμός δοκιμίου	σ_0 (MPa)	σ_3 (MPa)	ϵ
7	34.13	2	0.59
8	31.89	4	0.49
10	41.36	6	0.71

Τέλος, έγιναν 30 συνολικά δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια Αλφά τα οποία προήλθαν από δύο διαφορετικά σημεία του λατομείου εξόρυξης του (131). Οι δοκιμές έγιναν σε άκαμπτη μηχανή φόρτισης MTS-815 χρησιμοποιώντας κελί φόρτισης 500 kN σε συνθήκες ελέγχου μετατόπισης με ρυθμό 0.01mm/s. Η μέση τιμή της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας για κάθε πέτρωμα δίνεται στον Πιν. 7.3.

Πίνακας 7.3 Αντοχή και μέτρο ελαστικότητας αλφά (131).

	σ_0 (MPa)	E(MPa)
Άνω βαθμίδα Εκμετάλλευσης	23.8	7000
Κάτω βαθμίδα Εκμετάλλευσης	30	8300

Τα πετρώματα (από δύο διαφορετικά σημεία του λατομείου) έχουν παρόμοια σύσταση ενώ και στα δύο κατά την εξέταση λεπτών τομών τους στο μικροσκόπιο παρατηρήθηκαν κρύσταλλοι ασβεσίτη ενώ δε διακρίνεται χαλαζίας (131).

Για τη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων έγιναν δοκιμές επί τόπου (σεισμική διασκόπηση) στο λατομείο και στις δύο βαθμίδες αλλά και στο εργαστήριο (μέθοδος υπερήχων). Τα αποτελέσματα έδειξαν σχετική ασυμβατότητα (131).

Πίνακας 7.4 Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων σε αλφά (131).

	Μέση τιμή V_p (m/sec)	Μέση τιμή V_s (m/sec)
Άνω βαθμίδα Εκμετάλλευσης	2420	1400

Αλφάς - Ρεθύμνου

Κάτω βαθμίδα Εκμετάλλευσης	2930	1650
----------------------------	------	------

	Μέση τιμή Vp(m/sec)	
Άνω βαθμίδα Εκμετάλλευσης	3100	
Κάτω βαθμίδα Εκμετάλλευσης	3300	

Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη υγρασίας στους πόρους του άρρηκτου υλικού στο λατομείο. Στο κάτω διάζωμα, όπου το πορώδες είναι μικρότερο, η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη ενώ στο πέτρωμα με μεγαλύτερο πορώδες μειώθηκε η ταχύτητα διάδοσης κύματος (131).

7.2 Εφαρμογή τεχνικών ακουστικής εκπομπής και ηλεκτρικών σημάτων (PSC) σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια από αλφά

Σε μία σειρά πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια από αλφά διαστάσεων που δίνονται στον Πιν. 7.5 εφαρμόστηκαν η τεχνική της Ακουστικής Εκπομπής (AE) και η τεχνική των ηλεκτρικών σημάτων (PSC).

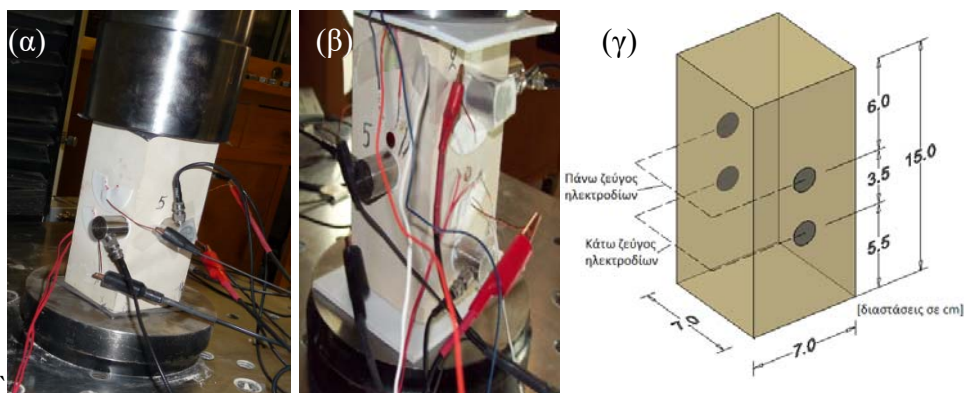
Πίνακας 7.5 Χαρακτηριστικά δοκιμών αλφά για δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη.

Δοκίμιο	x(cm)	y(cm)	H(cm)	Υλικό στα άκρα του δοκιμίου
1	7.2	7.1	15	τεφλόν
2	7.2	7.2	14.5	μολύβι
3	7.25	7.2	14.5	τεφλόν
4	7.2	7.2	14.5	τεφλόν
5	7.3	7.2	14.6	τεφλόν
6	7.1	7.2	14.6	τεφλόν

Στην Εικ. 7.3 δίνονται δύο ενδεικτικές εικόνες με τις τεχνικές οι οποίες εφαρμόστηκαν στα πειράματα.

Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν δύο ζεύγη κυκλικών ηλεκτροδίων (χάλκινα) διαμέτρου 1.4 cm, στο άνω και κάτω άκρο του δοκιμίου, σε δύο απέναντι πλευρές του (Εικ. 7.3). Η περιοχή βάφτηκε με υγρό άργυρο για την καλύτερη επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του δοκιμίου.

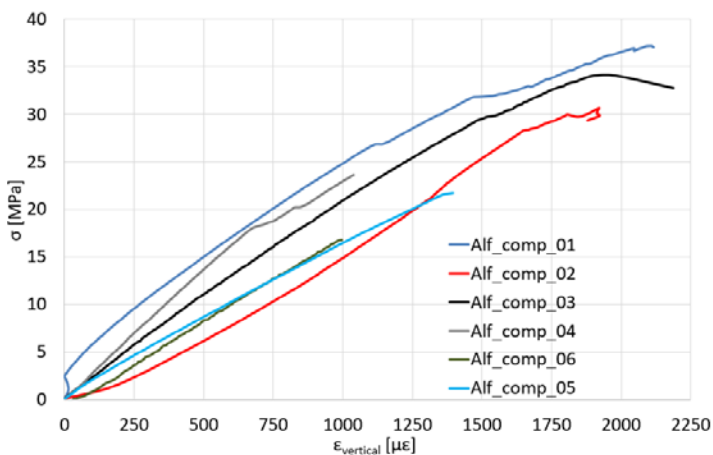
Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.3 (α) Πειραματική διάταξη- συστήματα για ένα πείραμα με μολύβι στις δύο πλευρές έδρασης και (β) με τεφλόν, (γ) διαστάσεις δοκιμίων και θέσεις ηλεκτροδίων.

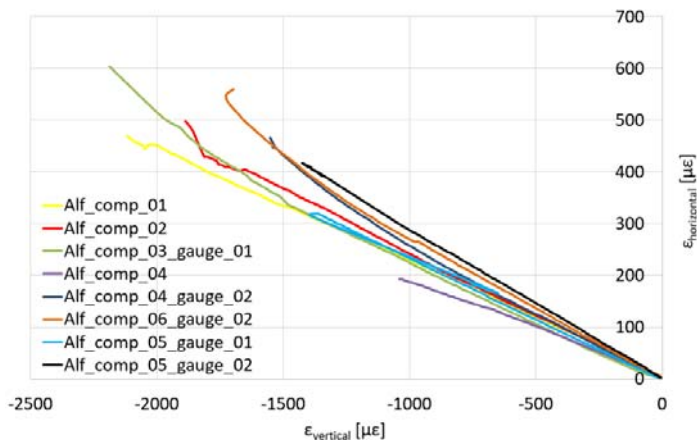
Για την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών τοποθετήθηκαν αισθητήρες περιμετρικά του δοκιμίου (Εικ. 7.3). Τέλος, για την παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς του δοκιμίου τοποθετήθηκαν σε δύο πλευρές του διατάξεις μέτρησης παραμορφώσεων (strain gauges) ένα στην κάθετη και ένα στην οριζόντια διεύθυνση.

Από τα πειράματα προέκυψαν οι παρακάτω καμπύλες τάση $[\sigma]$ - παραμόρφωσης $[\epsilon]$ (Εικ. 7.4) και κάθετης $[\epsilon_{\text{vertical}}]$ - οριζόντιας παραμόρφωσης $[\epsilon_{\text{horizontal}}]$ (Εικ. 7.5).



Εικόνα 7.4 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα 6 δοκίμια αλφά.

Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.5 Καμπύλες κάθετης και οριζόντιας παραμόρφωσης για τα 6 δοκίμια αλφά.

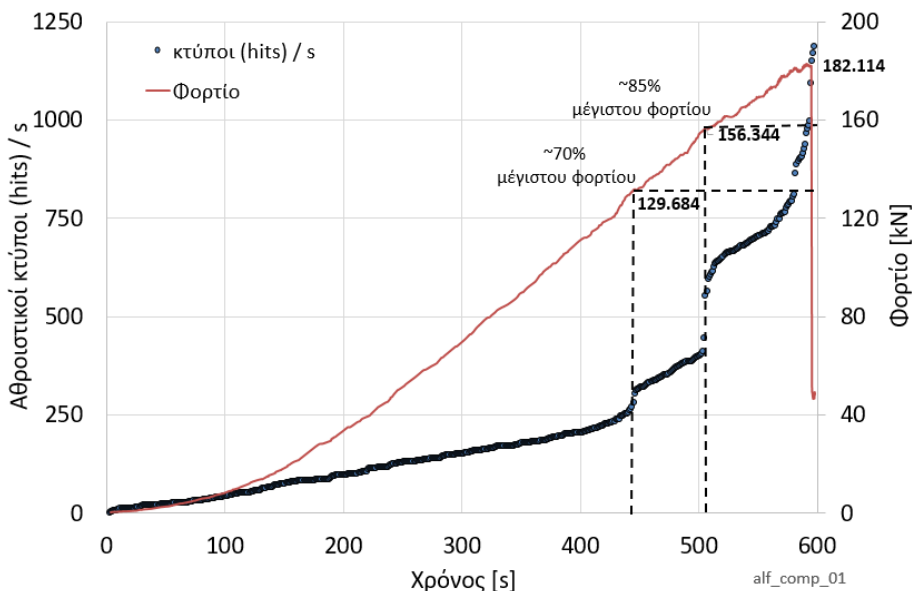
Συνοπτικά παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας τα οποία προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια αλφά. Τα αποτελέσματα δείχνουν να είναι συμβατά με τα αποτελέσματα προγενέστερων δοκιμών όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Η διασπορά των αποτελεσμάτων μπορεί να αποδοθεί σε ατέλειες των δοκιμίων.

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια αλφά

Δοκίμιο	Θλιπτική τάση [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]
1	37.05	~ 22.7
2	29.30	~ 17.2
3	32.76	~ 20.4
4	23.61	~ 26.8
5	24.34	~ 15.9
6	27.69	~ 17.8

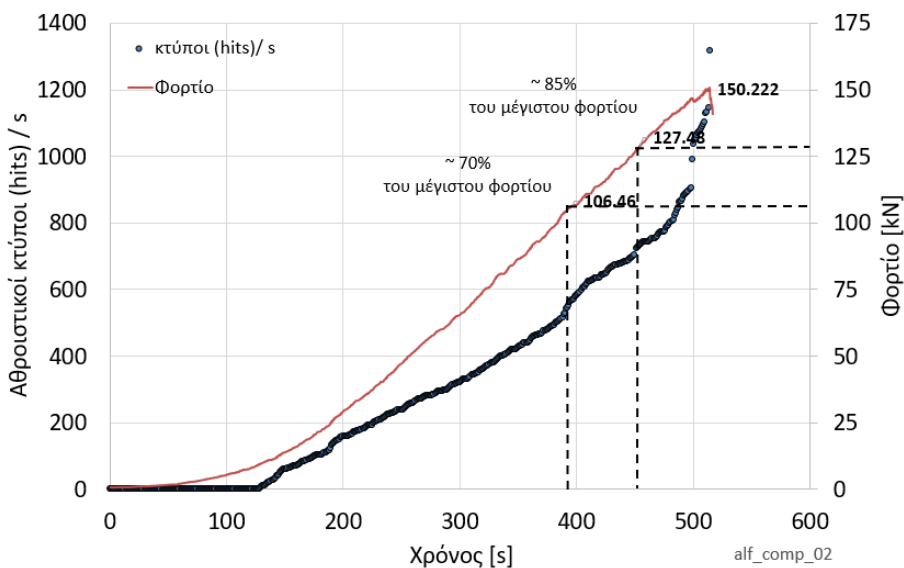
Στη συνέχεια δίνονται ενδεικτικά για 4 πειράματα τα διαγράμματα του αθροιστικού πλήθους των ακουστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο που καταγράφησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος μαζί με τη μεταβολή του φορτίου (Εικ. 7.6-7.9).

Αλφάς - Ρεθύμνου



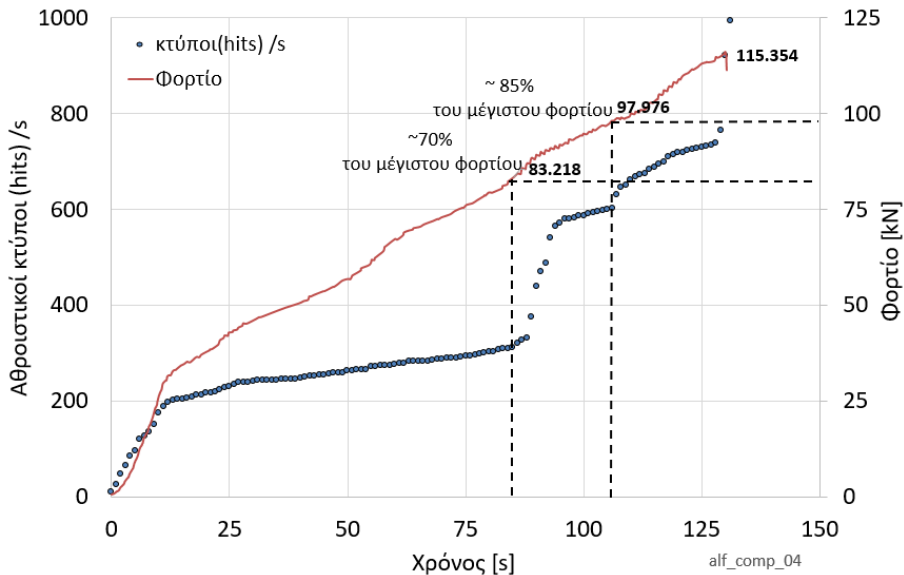
Εικόνα 7.6 Διάγραμμα αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων (hits) / δευτερόλεπτο και φορτίου για το 1° δοκίμιο αλφά.

Παρατηρείται στο 70% και 85% του μέγιστου φορτίου μια συστηματική αύξηση των ακουστικών κτύπων (Εικ. 7.6, Εικ. 7.7, Εικ.7.8). Ενώ στο 3° πείραμα μεγάλη μεταβολή των ακουστικών σημάτων φαίνεται μόνο στο 85% του μέγιστου φορτίου (Εικ. 7.9).

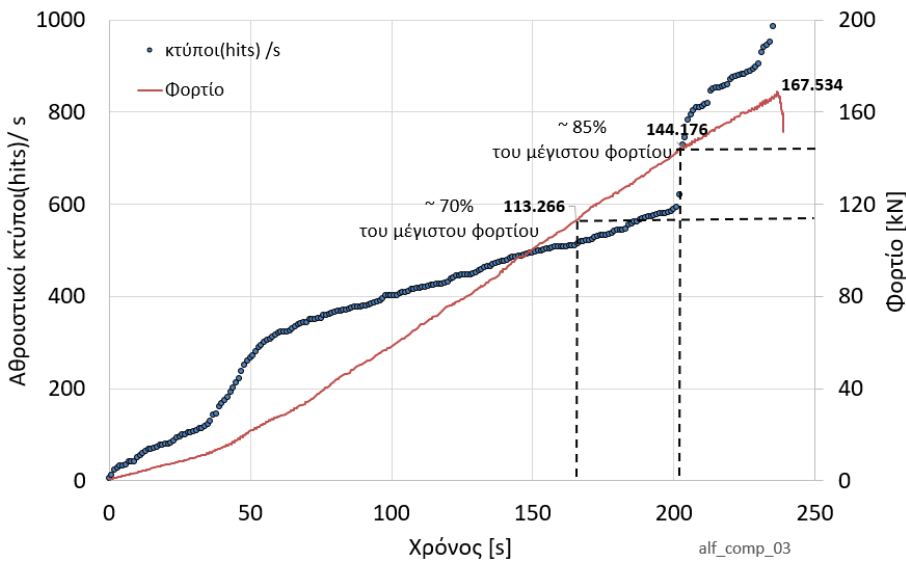


Εικόνα 7.7 Διάγραμμα αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων (hits)/ δευτερόλεπτο και φορτίου για το 2° δοκίμιο αλφά.

Αλφάς - Ρεθύμνου



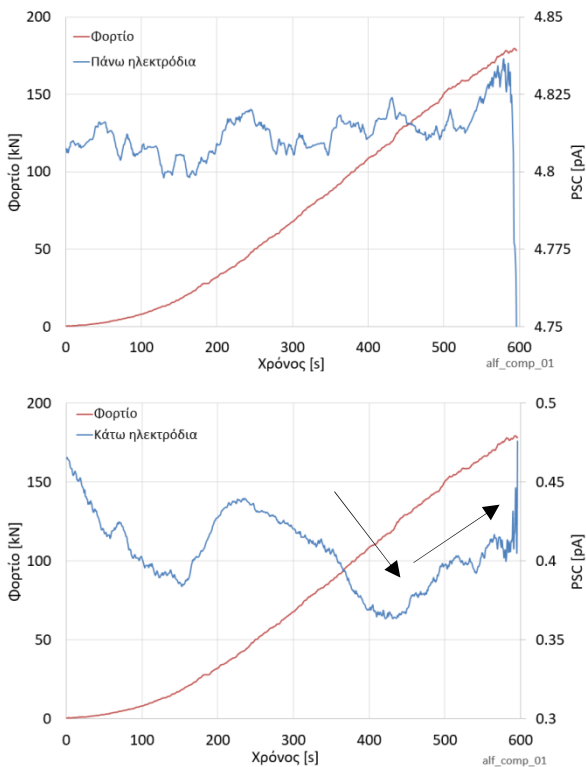
Εικόνα 7.8 Διάγραμμα αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων(hits) / δευτερόλεπτο και φορτίου για το 4° δοκίμιο αλφά.



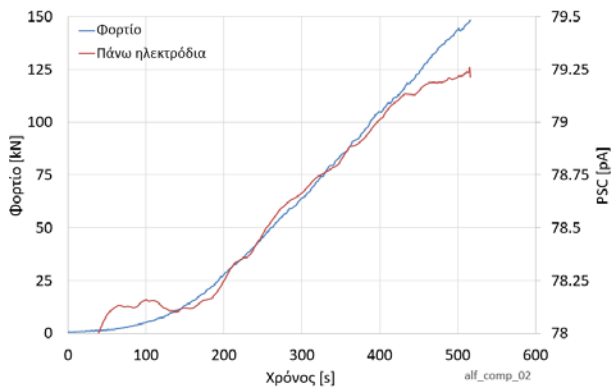
Εικόνα 7.9 Διάγραμμα αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων (hits) / δευτερόλεπτο και φορτίου για το 3° δοκίμιο αλφά.

Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα των ηλεκτρικών σημάτων για τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων για 3 χαρακτηριστικά πειράματα.

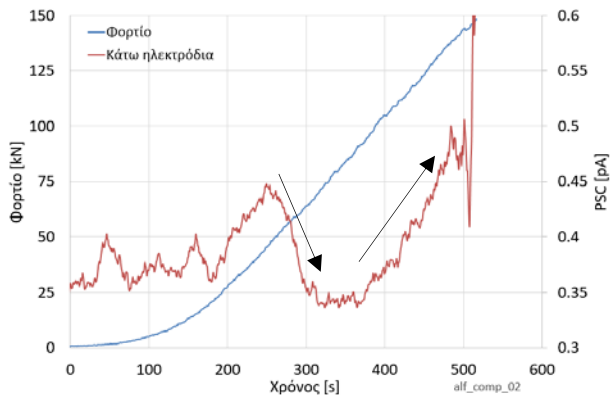
Αλφάς - Ρεθύμνου



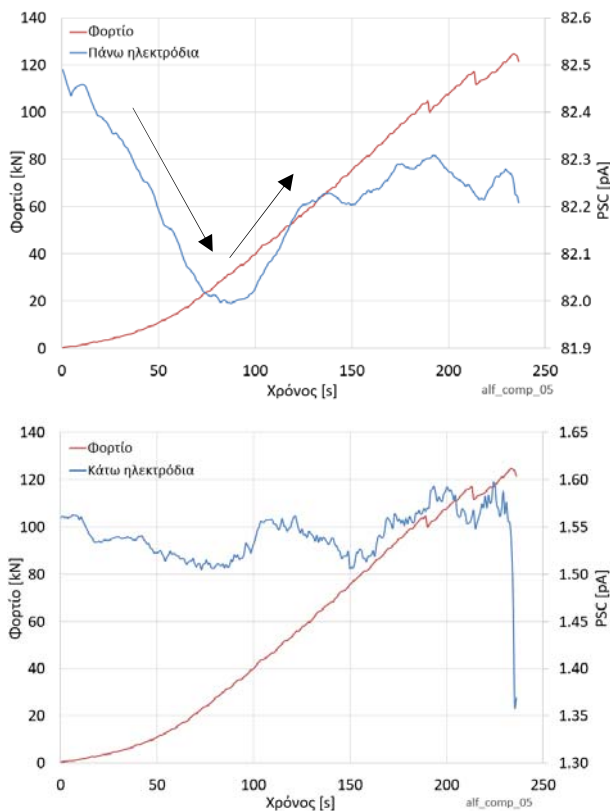
Εικόνα 7.10 Διαγράμματα ηλεκτρικών καταγραφών και φορτίου για τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων για το 1^ο δοκίμιο αλφά.



Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.11 Διαγράμματα ηλεκτρικών καταγραφών και φορτίου για τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων για το 2^ο δοκίμιο αλφά.



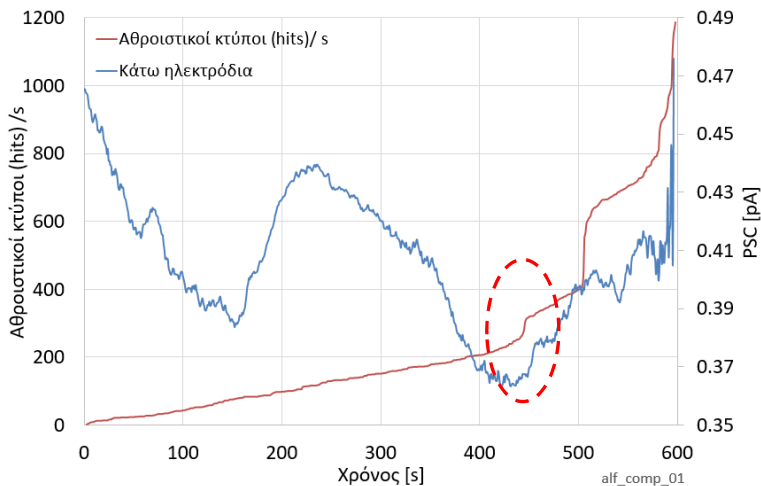
Εικόνα 7.12 Διαγράμματα ηλεκτρικών καταγραφών και φορτίου για τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων για το 5^ο δοκίμιο αλφά.

Υπάρχει μία συστηματική επανάληψη των σημάτων για ένα από τα δύο ζεύγη των ηλεκτροδίων, πιθανότατα σε αυτό που βρίσκεται κοντά στην περιοχή όπου

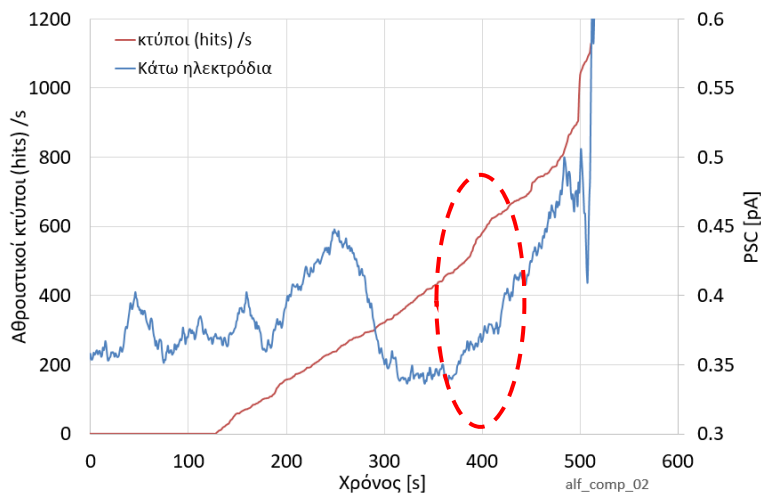
Αλφάς - Ρεθύμνου

συσσωρεύονται οι ρωγμές πριν τη θραύση. Στην Εικ. 7.10 το διάγραμμα που αντιστοιχεί στα κάτω ηλεκτρόδια δείχνει πτώση και αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος πριν τη θραύση. Αυτό επαναλαμβάνεται και σε άλλα πειράματα (Εικ. 7.11, 7.12).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει ότι η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος προηγείται χρονικά (μικρή διαφορά) των μεταβολών των κύττων των ΑΕ όταν το φορτίο είναι στο 70% του μέγιστου φορτίου (Εικ. 7.13, 7.14).



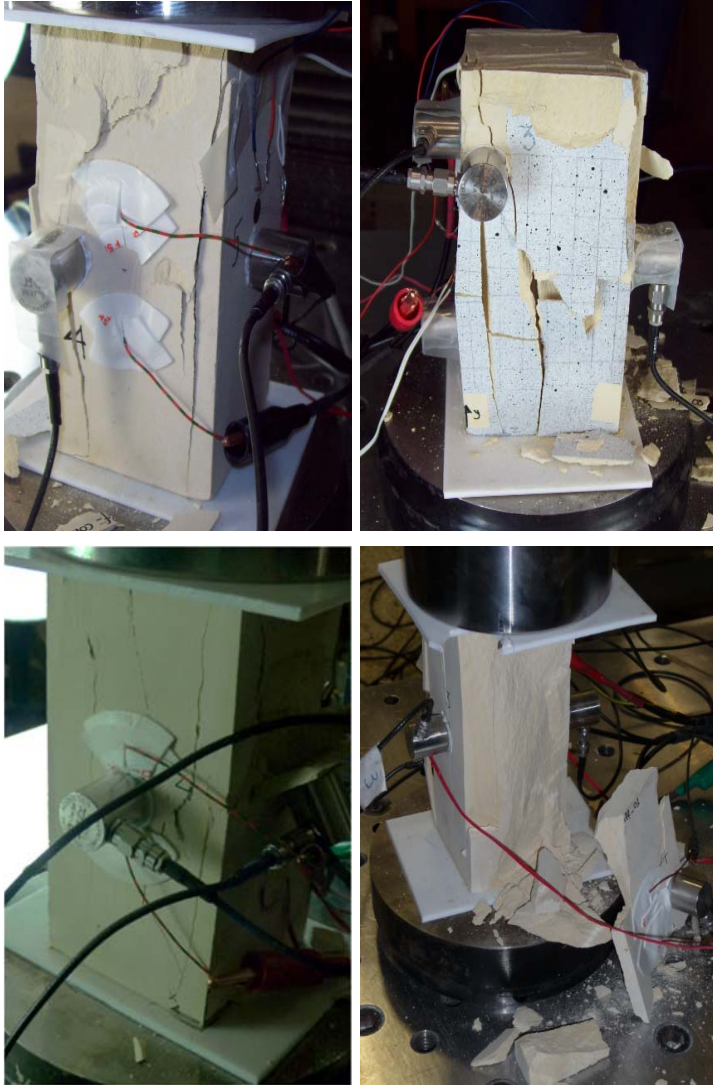
Εικόνα 7.13 Διαγράμματα ηλεκτρικών καταγραφών και φορτίου και του αθροιστικού πλήθους των κύττων(hits) / s για το 1^ο δοκίμιο αλφά.



Εικόνα 7.14 Διαγράμματα ηλεκτρικών καταγραφών και φορτίου και του αθροιστικού πλήθους των κύττων(hits) / s για το 2^ο δοκίμιο αλφά.

Τέλος δίνονται φωτογραφίες από χαρακτηριστικές αστοχίες του υλικού (Εικ. 7.15).

Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.15 Χαρακτηριστικές εικόνες από τις αστοχίες των δοκιμών αλφά σε μονοαξονική θλίψη.

7.3 Εφαρμογή τεχνικών ακουστικής εκπομπής και ηλεκτρικών σημάτων (PSC) σε δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια από αλφά

Στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια από αλφά. Τα δοκίμια ήταν 10 και οι διαστάσεις τους δίνονται στον Πιν. 7.7.

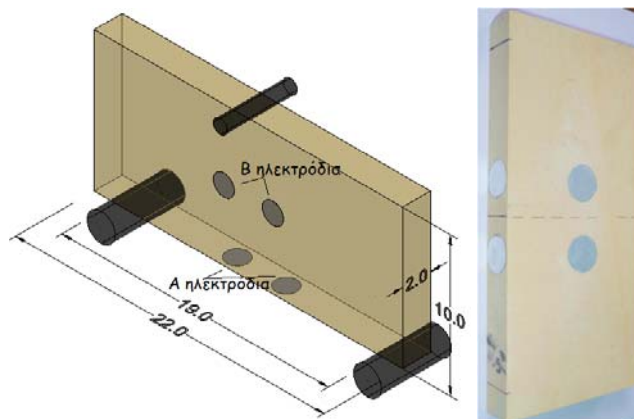
Αλφάς - Ρεθύμνου

Πίνακας 7.7 Διαστάσεις δοκιμίων κάμψης 3 σημείων από Αλφά

	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)	Πάχος (cm)
Αλφάς_3rb_A Αλφάς_3rb_B	22.2	7	2.2
Αλφάς_3rb_C Αλφάς_3rb_D Αλφάς_3rb_01 Αλφάς_3rb_02 Αλφάς_3rb_03 Αλφάς_3rb_04 Αλφάς_3rb_05 Αλφάς_3rb_06	22.5	10	2.2

Από τα προκαταρκτικά πειράματα διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός επιβολής της φόρτισης συντελεί σημαντικά στο μέγιστο φορτίο της δοκιμής. Συνεπώς για να επιτευχθούν «οιονεί» στατικές συνθήκες ο ρυθμός επιβολής της φόρτισης επιλέχθηκε αρκετά μικρός και ίσος με 0.02 mm/s.

Στα δοκίμια τοποθετήθηκαν 2 ζεύγη ηλεκτροδίων, ένα στην κάτω παρειά του δοκιμίου και ένα στο πλάι (Εικ. 7.16). Τα ηλεκτρόδια ήταν κυκλικά με διάμετρο 2cm. Τοποθετήθηκαν συμμετρικά (2.0cm εκατέρωθεν) ως προς το σημείο επιβολής της φόρτισης.



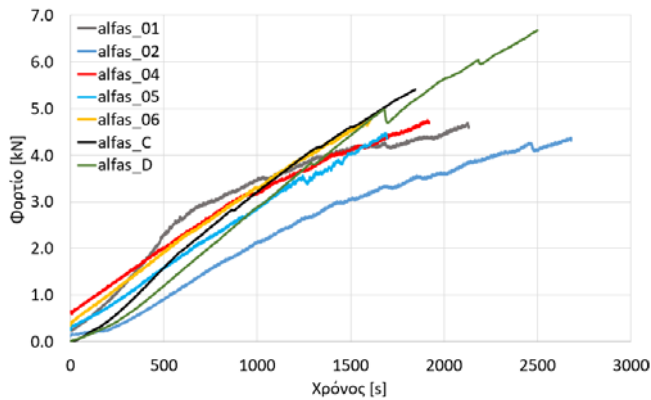
Εικόνα 7.16 Θέση ηλεκτροδίων για ένα ενδεικτικό δοκίμιο.

Επίσης, τοποθετήθηκαν για την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών στην περιοχή μεταξύ των στηρίξεων και σε όλο το ύψος του δοκιμίου 4 ακουστικοί αισθητήρες (Εικ. 7.18).

Τα διαγράμματα του φορτίου ως προς το χρόνο για τα πειράματα κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια αλφά δίνονται στην παρακάτω εικόνα.

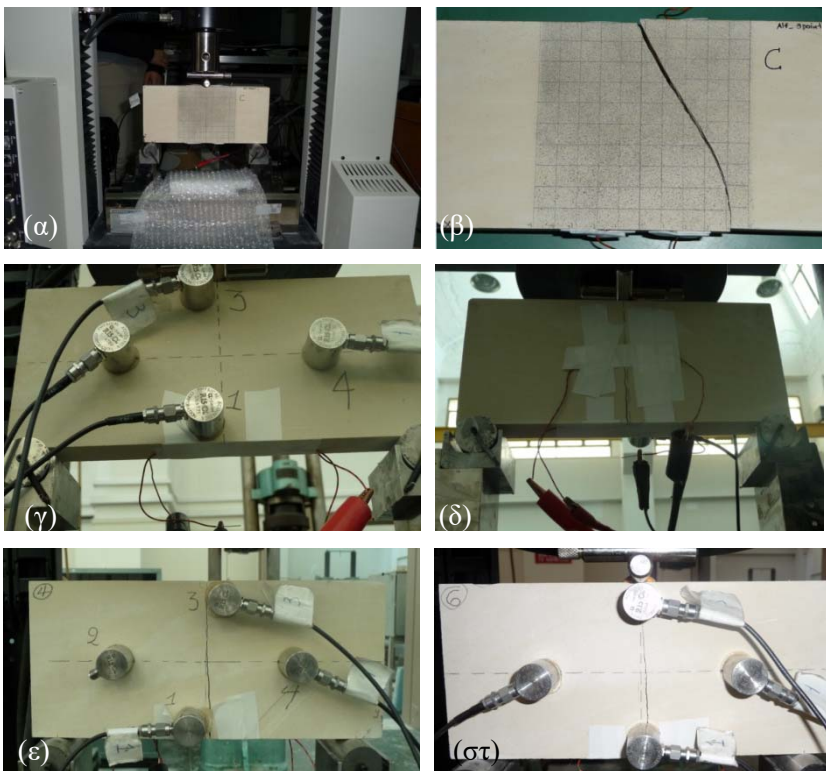
Αλφάς - Ρεθύμνου

κάμψη 3 σημείων σε δοκίμια αλφά



Εικόνα 7.17 Διάγραμμα φορτίου ως προς το χρόνο δοκιμίων αλφά σε κάμψη 3 σημείων.

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικές φωτογραφίες από τα πειράματα και τη μορφή αστοχίας των δοκιμίων.



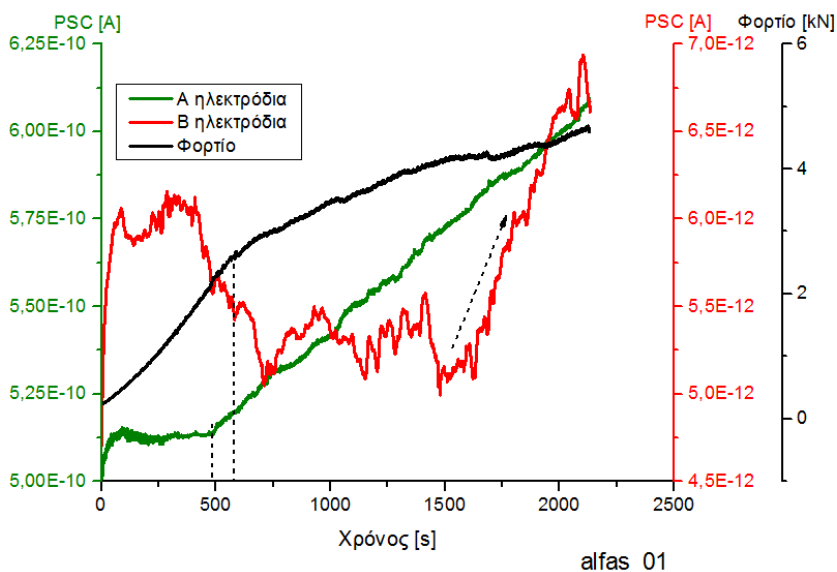
Εικόνα 7.18 Δοκίμια αλφά σε κάμψη 3 σημείων πριν και μετά τη δοκιμή.

Αλφάς - Ρεθύμνου



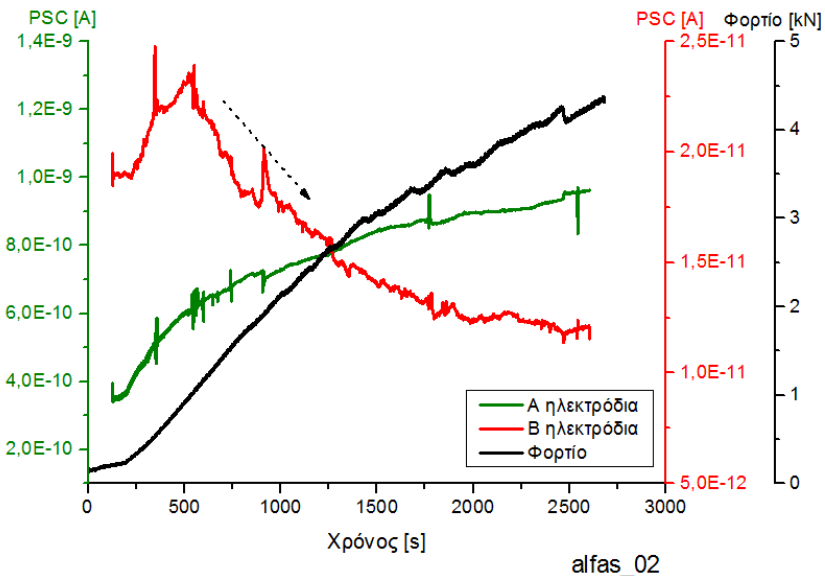
Εικόνα 7.19 Δοκίμια αλφά μετά τη δοκιμή.

Τα ηλεκτρικά σήματα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος από το ζεύγος των ηλεκτροδίων που βρίσκεται στην κάτω πλευρά του δοκιμίου (Α ηλεκτρόδια) δείχνουν να ακολουθούν ικανοποιητικά τη μεταβολή της καμπύλης του φορτίου χωρίς όμως να δώσουν κάποια ένδειξη ότι το δοκίμιο είναι λίγο πριν την αστοχία. Το δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων δείχνει συστηματικά μία έντονη αλλαγή πριν το μέγιστο φορτίο όμως όχι σε κάποιο χαρακτηριστικό στάδιο της δοκιμής (Εικ. 7.20-7.23).

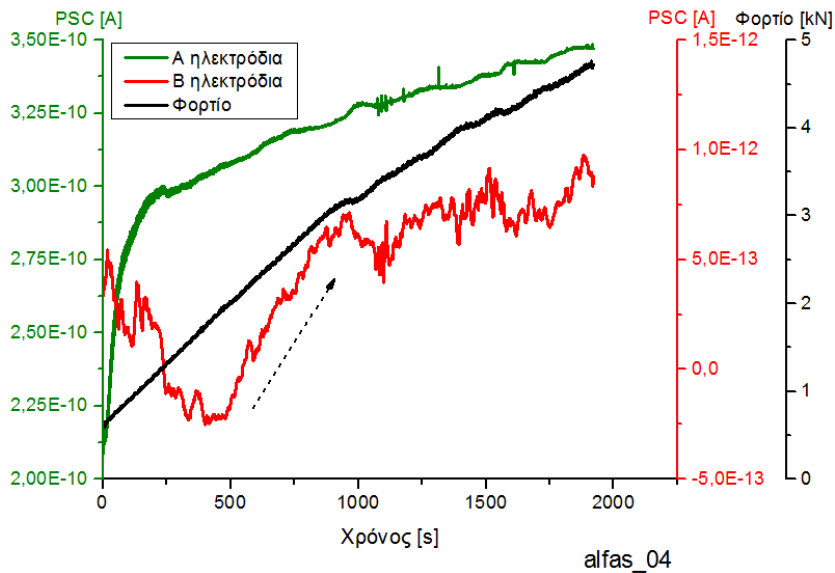


Εικόνα 7.20 Διαγράμματα φορτίου και ηλεκτρικών σημάτων από τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_01”).

Αλφάς - Ρεθύμνου

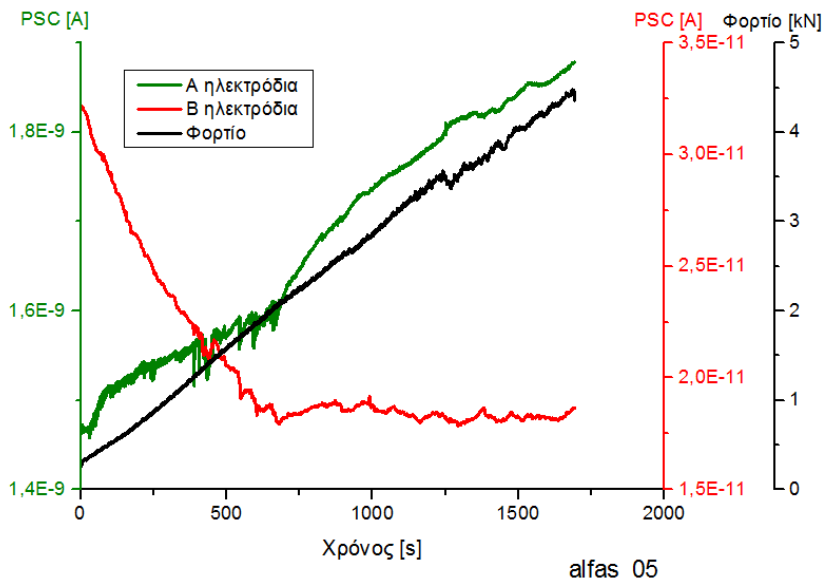


Εικόνα 7.21 Διαγράμματα φορτίου και ηλεκτρικών σημάτων από τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_02”).



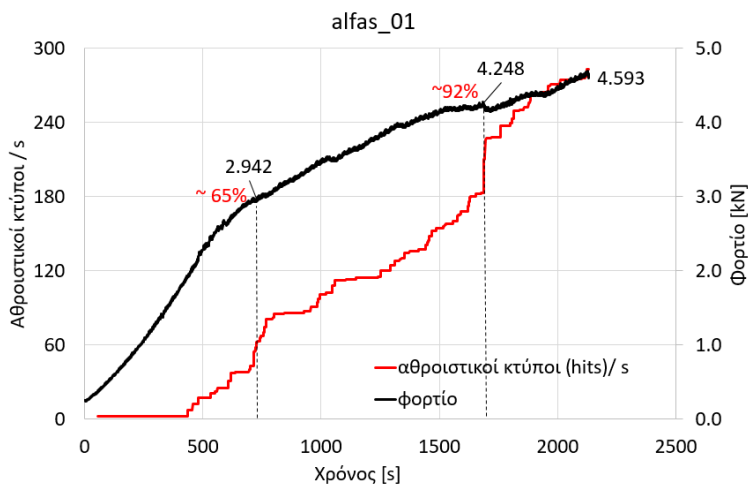
Εικόνα 7.22 Διαγράμματα φορτίου και ηλεκτρικών σημάτων από τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_04”).

Αλφάς - Ρεθύμνου



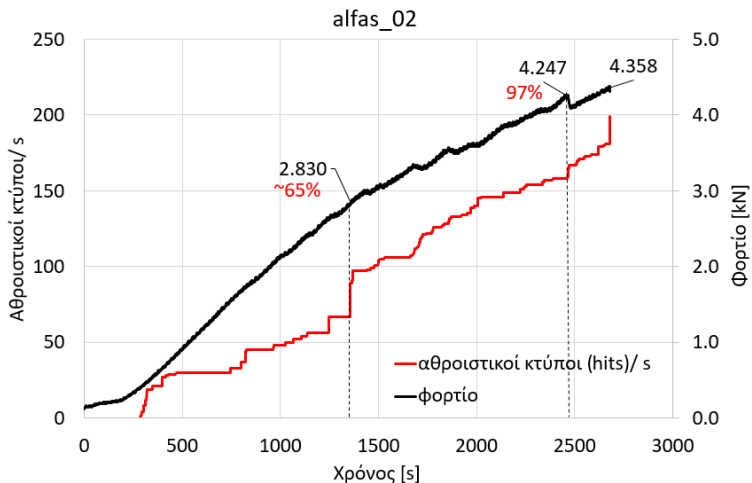
Εικόνα 7.23 Διαγράμματα φορτίου και ηλεκτρικών σημάτων από τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_05”).

Στα διαγράμματα των αθροιστικών κτύπων ανά δευτερόλεπτο (Εικ. 7.24-7.26), για κάποια χαρακτηριστικά πειράματα, παρατηρείται ότι η υπάρχει έντονη ακουστική δραστηριότητα κοντά στο 65% και στο 95% του μέγιστου φορτίου.

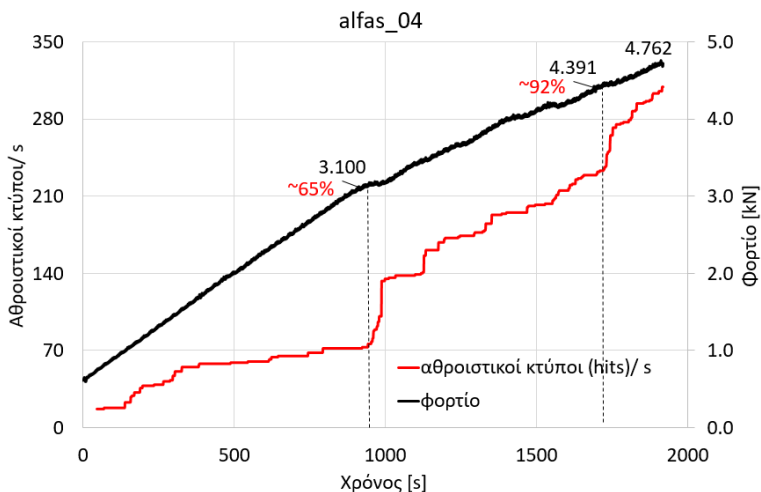


Εικόνα 7.24 Διαγράμματα φορτίου και αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων (hits)/s (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_01”).

Αλφάς - Ρεθύμνου



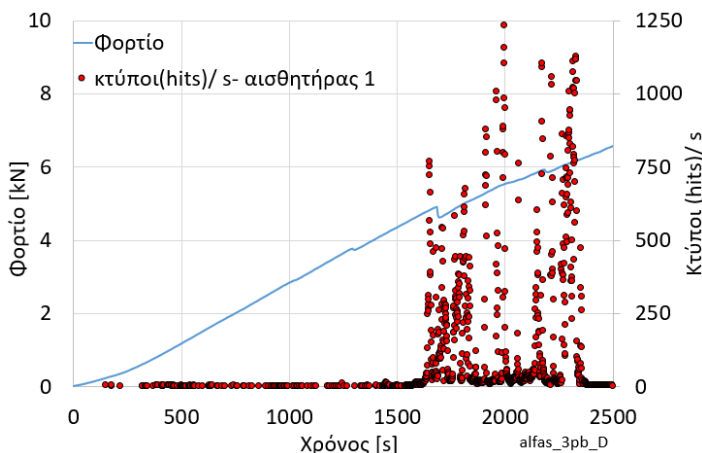
Εικόνα 7.25 Διαγράμματα φορτίου και αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων (hits)/ s (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_02”).



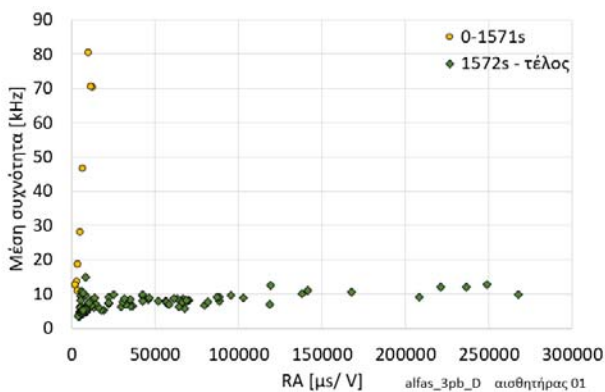
Εικόνα 7.26 Διαγράμματα φορτίου και αθροιστικού πλήθους ακουστικών κτύπων (hits)/ s (δοκιμή κάμψης 3 σημείων στο δοκίμιο “alfas_04”).

Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της Εικ. 7.27, διακρίνονται χρονικά 2 περιοχές όπου σημειώνεται μεγάλο πλήθος ακουστικών κτύπων στον αισθητήρα 01 ο οποίος βρίσκεται κοντά στο μέσο του ανοίγματος στήριξης του δοκιμίου. Για τις περιοχές αυτές υπολογίζονται οι αντίστοιχες μέσες τιμές των συχνοτήτων των ακουστικών σημάτων και οι αντίστοιχες μέσες τιμές της παραμέτρου RA (Χρόνος ανύψωσης (Rise time) [μs]/ πλάτος σήματος (Amplitude) [V]) (Εικ. 7.28).

Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.27 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης φορτίου και ακουστικών κτύπων(hits) ανά δευτερόλεπτο για τον αισθητήρα 01.



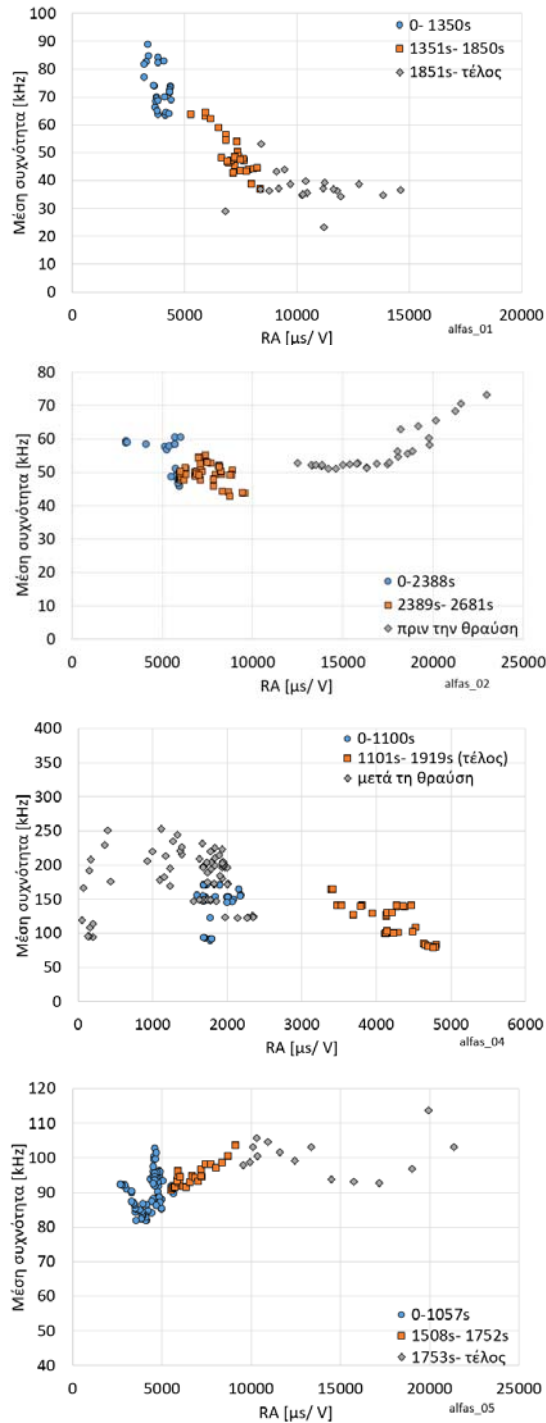
Εικόνα 7.28 Διάγραμμα μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA(αισθητήρας 1) (μέσες τιμές).

Υψηλές τιμές μέσης συχνότητας και μικρές τιμές του δείκτη RA δείχνουν εφελκυστικού τύπου ρωγμές. Σε αυτές τις τιμές αντιστοιχούν ακουστικά σήματα τα οποία καταγράφονται στο πρώτο χρονικό διάστημα (κίτρινος κύκλος- 0-1571s) ενώ πριν την τελική θραύση του υλικού, χρονικό διάστημα 1572s – τέλος (πράσινο ρόμβος), η μέση συχνότητα μειώνεται και ο δείκτης RA αυξάνεται. Σε αυτά τα σήματα αποδίδονται ρωγμές διατμητικού ή μικτού τύπου (60).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν το πλήθος των ακουστικών σημάτων που καταγράφηκαν δεν ήταν πολύ μεγάλο εκτός από κάποια μεμονωμένα πειράματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλφάς είναι ένα πέτρωμα με όχι ιδιαίτερες ατέλειες και κενά στη δομή του. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημαντικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις καταγραφές της ακουστικής εκπομπής.

Είναι χαρακτηριστικό ότι για διάφορα πειράματα η παράμετρος RA αυξάνεται συστηματικά μέχρι τη θραύση (Εικ. 7.29).

Αλφάς - Ρεθύμνου



Εικόνα 7.29 Διάγραμμα μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA(αισθητήρας 1) (μέσες τιμές) για κάποια χαρακτηριστικά πειράματα.

8. Δοκίμια από κονίαμα & πάστα λευκού τσιμέντου/ υλικά συντήρησης και αποκατάστασης

8.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Βασικό στοιχείο στα έργα αποκατάστασης της μονολιθικότητας αρχαίων μελών είναι το υλικό που παρεμβάλει μεταξύ του μαρμάρου και των συνδετήριων στοιχείων από τιτάνιο. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2, τα συνεκτικά κονιάματα τα οποία χρησιμοποιούνται στα έργα συντήρησης και αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών είναι δύο: κονίαμα με και χωρίς την προσθήκη λεπτόκοκκων αδρανών.

Ακολουθώντας την αναλογία των υλικών που χρησιμοποιείται στα έργα αναστήλωσης της Ακρόπολης και με τη βοήθεια του τεχνικού προσωπικού που εργάζεται σε αυτά, παρασκευάστηκαν δοκίμια από κονίαμα λευκού τσιμέντου διαστάσεων 4cm x4cm x16 cm σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C348.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Χαλαζιακή άμμος 1mm-2mm.
- Χαλαζιακή άμμος M-32 (φυσική χαλαζιακή άμμος, κοκκομετρίας (0.1-0.4 mm)).
- Λευκό τσιμέντο Δανίας (White Aalborg).



Εικόνα 8.1 Χαλαζιακή άμμος

Αναλογία υλικών:

χαλαζιακή άμμος 1mm-2mm	2
χαλαζιακή άμμος M-32	1
λευκό τσιμέντο	1

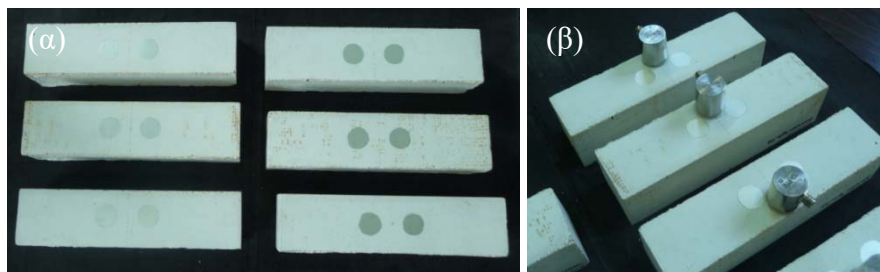
Η χαλαζιακή (πυριτική) άμμος πρέπει να είναι απόλυτα ξηρή, καθαρή και διαβαθμισμένη. Το ποσοστό του πυριτίου (SiO_2) που περιέχει χαρακτηρίζει και την ποιότητά της. Η πυριτική άμμος ανήκει στην ομάδα του χαλαζία (Quartz) η οποία είναι γνωστή για τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες της. Οι κόκκοι της πυριτικής άμμου, η οποία προέρχεται από τους ποταμούς, λόγω της φυσικής τριβής που έχουν υποστεί, έχουν διαμορφωθεί σε ένα σχήμα σχεδόν σφαιρικό. Αυτό προσδίδει στα προϊόντα τα οποία παράγονται με αυτή πολύ καλή εργασιμότητα και καλαισθητή τελική επιφάνεια. Επίσης με τη σωστή κοκκομετρική αναλογία μπορεί να μειωθούν τα κενά μεταξύ των κόκκων με αποτέλεσμα να αυξηθεί η αντοχή του κονιάματος σε τριβή και να μειωθεί η απορρόφηση του νερού επιτυγχάνοντας την επιθυμητή στεγανότητα. Είναι πολύ σημαντικό ότι με τη χρήση της χαλαζιακής άμμου σε σωστή κοκκομετρία ελαχιστοποιείται την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων. Πρόσθετα, η πυριτική άμμος προσδίδει στο κονίαμα την απαιτούμενη προστασία που χρειάζεται από τη διάβρωση λόγω κακών περιβαλλοντικών συνθηκών. Λόγω της χημικής αδράνειας του χαλαζία το προϊόν είναι αμετάβλητο χρονικά και δεν επηρε-

άζεται από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Τέλος, ένα βασικό πλεονέκτημα της χαλαζιακής άμμου είναι ότι δεν επηρεάζει τις χημικές ιδιότητες του συνδετικού υλικού (τσιμέντο) του κονιάματος.

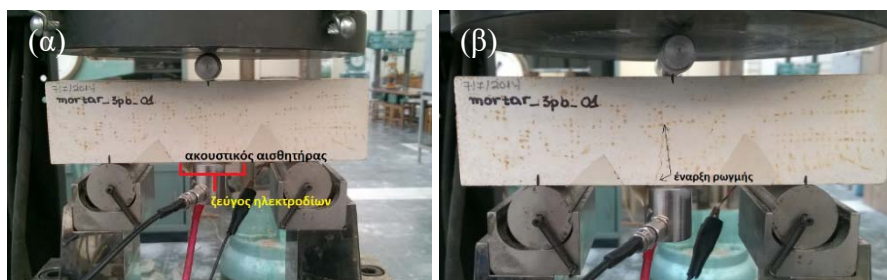
Το λευκό τσιμέντο Δανίας αποτελείται από πολύ καθαρό ασβεστόλιθο, που αφθονεί στην περιοχή Aalborg. Είναι υλικό πολύ υψηλών αντοχών, με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια και μεγάλη αντίσταση σε θειικά.

8.2 Πειράματα κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια κονιάματος

Στο Εργαστήριο αντοχής των Υλικών του ΕΜΠ έγιναν δοκιμές κάμψης 3 σημείων στα δοκίμια κονιάματος. Εφαρμόστηκαν οι τεχνικές των ακουστικών εκπομπών και της καταγραφής ηλεκτρικών σημάτων. Για το σκοπό αυτό στο δοκίμιο τοποθετήθηκαν δύο ηλεκτροδία διαμέτρου 1.5cm σε απόσταση 1.5cm εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος στήριξης. Η περιοχή βάφτηκε με υγρό άργυρο για την καλύτερη επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας του κονιάματος (Εικ. 8.2). Τέλος για την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών τοποθετήθηκε ένας ακουστικός αισθητήρας στο κέντρο του δοκίμιου όπου αναμένεται η έναρξη της ρωγμής.



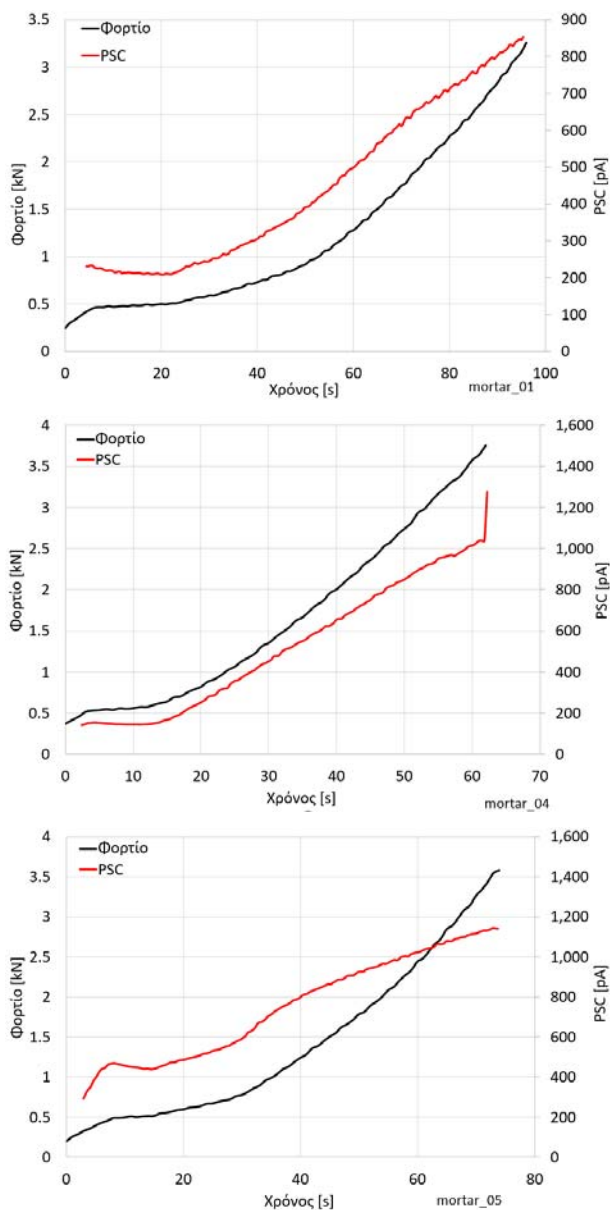
Εικόνα 8.2 (α) Θέσεις ηλεκτροδίων- Περιοχή βαμμένη με υγρό άργυρο και (β) θέσεις ακουστικών αισθητήρων στα δοκίμια κάμψης 3 σημείων από κονίαμα.



Εικόνα 8.3 (α) Δοκίμιο κάμψης 3 σημείων πριν και (β) μετά τη δοκιμή..

Τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά τα οποία προέκυψαν από τα πειράματα δόθηκαν στο κεφάλαιο 3.3.2.

Στην Εικ. 8.4 δίνονται συνοπτικά από 3 χαρακτηριστικά πειράματα τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών καταγραφών μαζί με τη χρονική εξέλιξη του φορτίου.

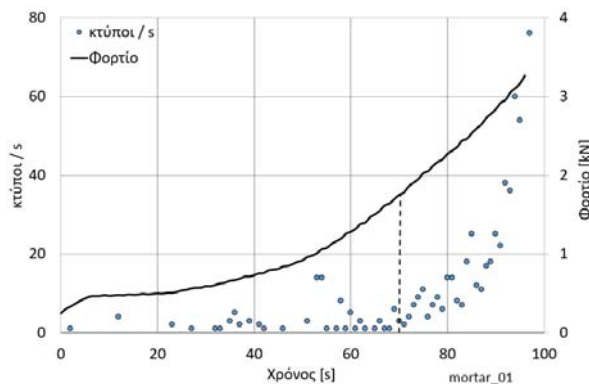


Εικόνα 8.4 Διαγράμματα φορτίου και ηλεκτρικών καταγραφών για 3 δοκίμια κάμψης 3 σημείων από κονίαμα.

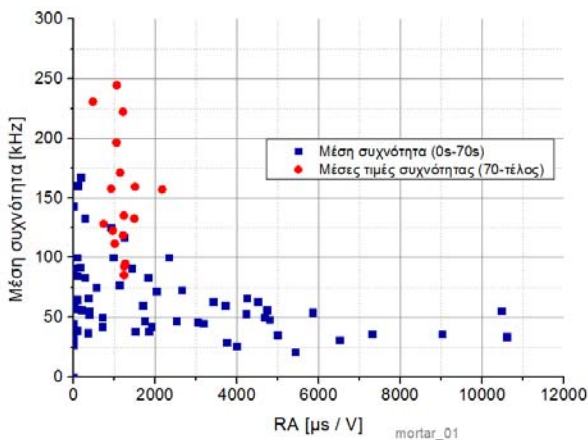
Οι καμπύλες των ηλεκτρικών σημάτων παρουσιάζουν άνοδο ανάλογη εκείνης του φορτίου χωρίς όμως να υπάρχει κάποια ένδειξη που να προειδοποιεί για την αστοχία λίγο πριν το μέγιστο φορτίο.

Στις εικόνες που ακολουθούν δίνεται η χρονική εξέλιξη των ακουστικών κύπων που καταγράφηκαν ανά δευτερόλεπτο και το αντίστοιχο φορτίο σε κάποια ενδει-

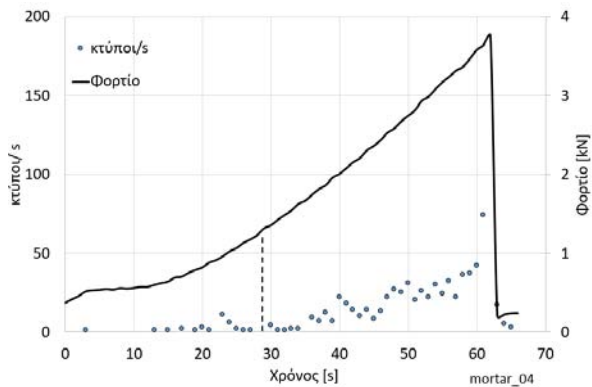
κτικά πειράματα. Στη συνέχεια, στα διαγράμματα ορίζονται χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους όπου παρατηρείται σημαντική μεταβολή των ακουστικών κτύπων (hits). Για αυτές τις περιόδους υπολογίζονται οι μέσες τιμές της παραμέτρου RA και της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων.



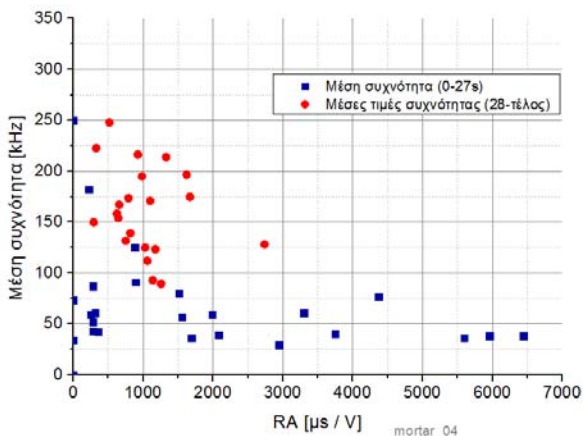
Εικόνα 8.5 Διάγραμμα αριθμού ακουστικών κτύπων (hits) ανά δευτερόλεπτο & διάγραμμα φορτίου (1^ο πείραμα).



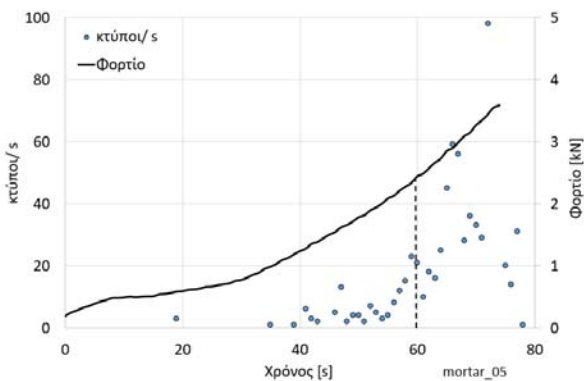
Εικόνα 8.6 Διάγραμμα μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA για τα 2 χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα (1^ο πείραμα).



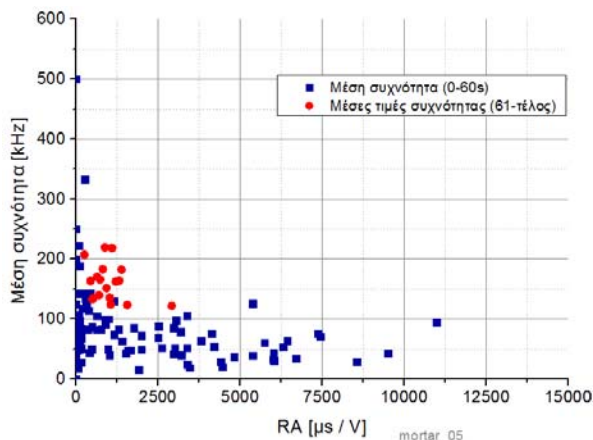
Εικόνα 8.7 Διάγραμμα αριθμού ακουστικών κτύπων (hits) ανά δευτερόλεπτο & διάγραμμα φορτίου (4° πείραμα).



Εικόνα 8.8 Διάγραμμα μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA για τα 2 χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα (4° πείραμα).



Εικόνα 8.9 Διάγραμμα αριθμού ακουστικών κτύπων (hits) ανά δευτερόλεπτο & διάγραμμα φορτίου (5° πείραμα).

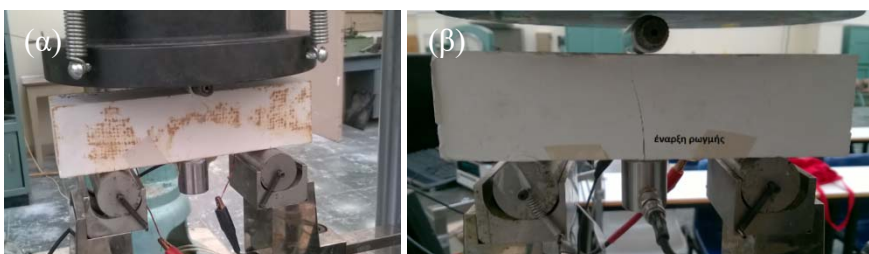


Εικόνα 8.10 Διάγραμμα μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA για τα 2 χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα (5^ο πείραμα).

Είναι σημαντικό ότι για αυτές τις δύο χαρακτηριστικές περιοχές για όλα τα πειράματα υπάρχει σαφής διαχωρισμός των σημείων «μέση συχνότητα»- RA κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα σήματα είναι διαφορετικής φύσης και χαρακτηριστικών.

8.3 Πειράματα κάμψης 3 σημείων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας

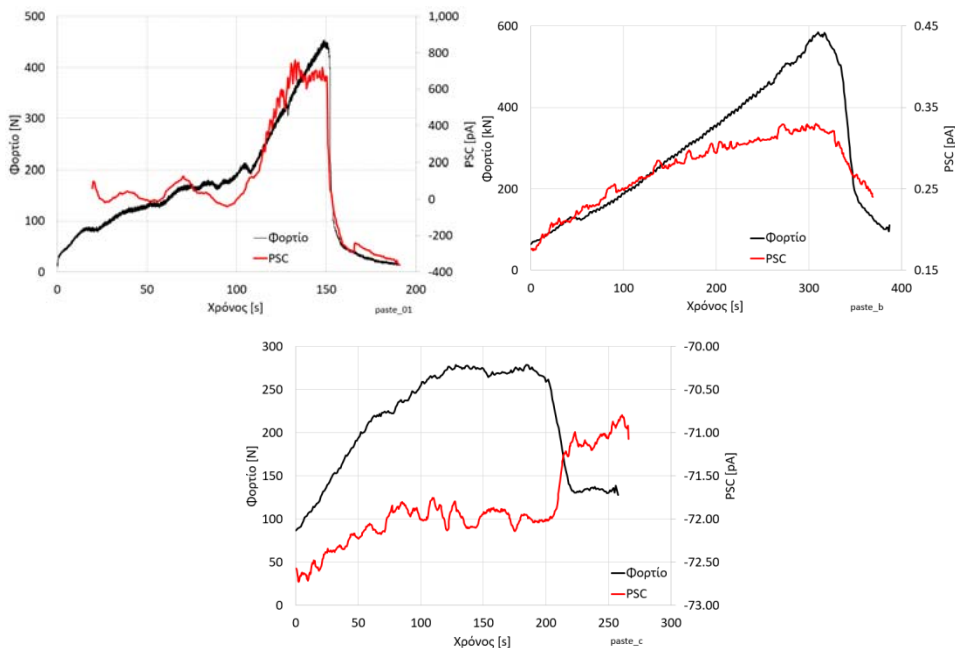
Κατά την παρασκευή των δοκιμίων για τα πειράματα εξόλκευσης (Κεφ. 9) ελήφθησαν από την τσιμεντοκονία που χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχα δοκίμια κάμψης διαστάσεων 4cm x4cm x16cm.



Εικόνα 8.11 (α) Δοκίμια κάμψης 3 σημείων από τσιμεντοκονία λευκού τσιμέντου πριν και (β) μετά τη δοκιμή.

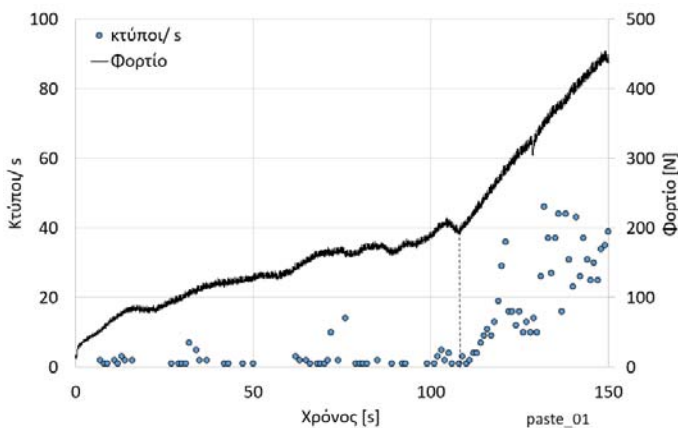
Τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά τα οποία προέκυψαν από τα πειράματα δόθηκαν στο κεφάλαιο 3.3.2.

Στην Εικ. 8.12 δίνονται τα διαγράμματα του φορτίου και των ηλεκτρικών καταγραφών για δύο ενδεικτικά δοκίμια. Τα ηλεκτρικά σήματα ακολουθούν τη μορφή της καμπύλης του φορτίου πριν αλλά και μετά το μέγιστο φορτίο.



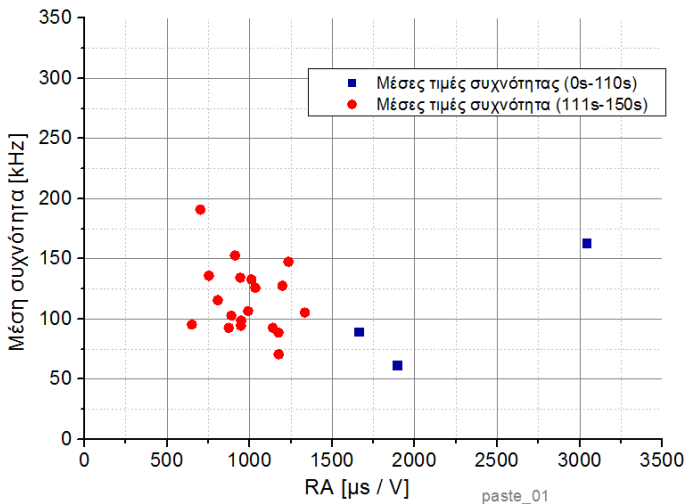
Εικόνα 8.12 Διαγράμματα φορτίου και ηλεκτρικών καταγραφών για 3 δοκίμια κάμψης 3 σημείων από τσιμεντοκονία λευκού τσιμέντου.

Όσον αφορά την τεχνική των ακουστικών εκπομπών, δίνονται στην Εικ. 8.13 και Εικ. 8.15 το φορτίο μαζί με τον αριθμό των ακουστικών κτύπων (hits) ανά δευτερόλεπτο. Αυτό μπορεί να αποδώσει μία γενική εικόνα της ακουστικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια του πειράματος και μπορεί να γίνει μία πρώτη εκτίμηση για τη διακριτοποίηση χαρακτηριστικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κάμψη του δοκιμίου.

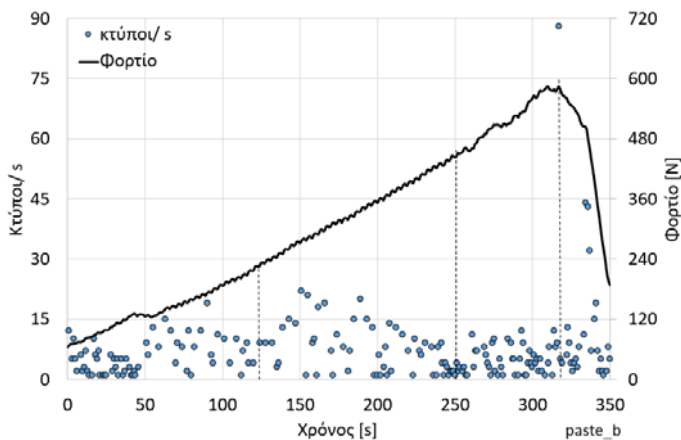


Εικόνα 8.13 Διάγραμμα αριθμού ακουστικών κτύπων (hits) ανά δευτερόλεπτο & διάγραμμα φορτίου για το δοκίμιο “paste_01”.

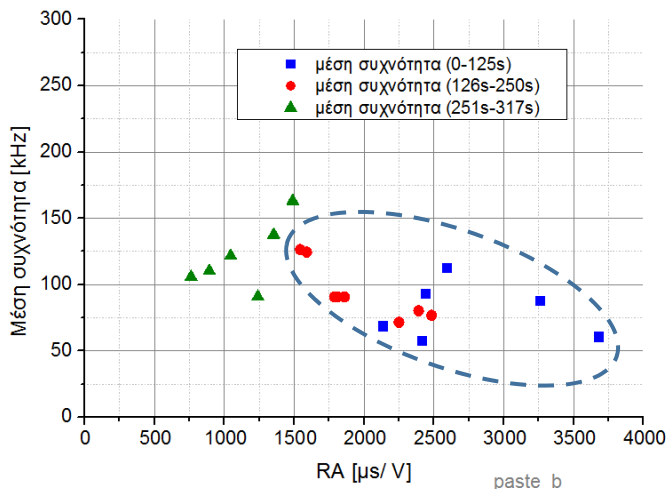
Λαμβάνοντας τα διαγράμματα (μέσες τιμές) της μέσης συχνότητας των ακουστικών σημάτων ως προς την παράμετρο RA (Εικ. 8.14, 8.16) για δύο χαρακτηριστικά πειράματα, παρατηρείται σημαντική μεταβολή της σχέσης μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών για την κάθε χρονική περιοχή. Η τιμή της RA μειώνεται σημαντικά και στα δύο διαγράμματα πριν το μέγιστο φορτίο.



Εικόνα 8.14 Διάγραμμα μέσης συχνότητας (μέσες τιμές) ως προς την παράμετρο RA (μέσες τιμές) (paste_01).

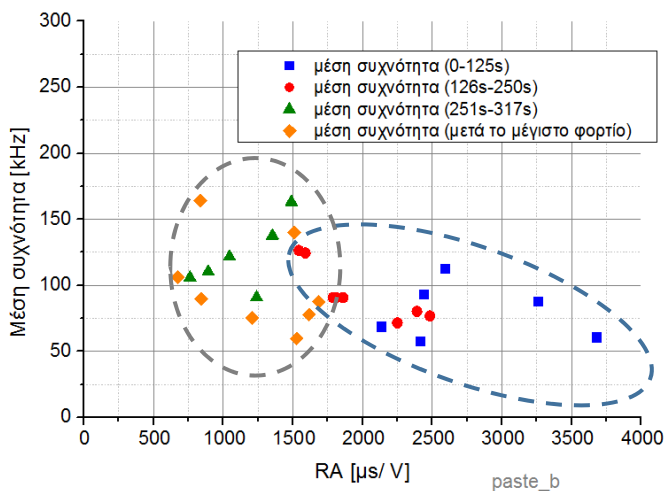


Εικόνα 8.15 Διάγραμμα αριθμού ακουστικών κτύπων (hits) ανά δευτερόλεπτο & διάγραμμα φορτίου για το δοκίμιο “paste_b”.



Εικόνα 8.16 Διάγραμμα μέσης συχνότητας (μέσες τιμές) ως προς την παράμετρο RA (μέσες τιμές) μέχρι το μέγιστο φορτίο (paste_b).

Στο διάγραμμα του φορτίου- ακουστικών κύττων/ s υπάρχει και ένα χρονικό διάστημα πτώσης του φορτίου. Τα σήματα σε αυτό το διάστημα δείχνουν, σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα, να είναι όμοια με εκείνα που καταγράφονται λίγο πριν το μέγιστο φορτίο.



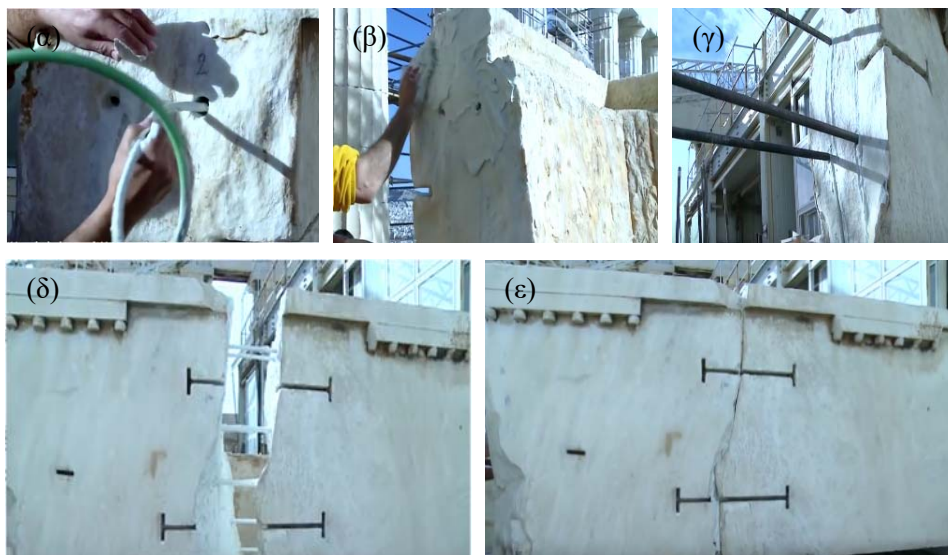
Εικόνα 8.17 Διάγραμμα μέσης συχνότητας (μέσες τιμές) ως προς την παράμετρο RA (μέσες τιμές) μέχρι και την πτώση του φορτίου (paste_b).

Μέρος 3^ο

9. Εξόλκευση

9.1 Το φαινόμενο της εξόλκευσης στην αποκατάσταση της μονολιθικότητας των μνημείων

Η τεχνική αποκατάστασης η οποία ακολουθείται στα αναστηλωτικά έργα των μνημείων της Ακρόπολης, περιλαμβάνει αρχικά τη διάνοιξη οπών στα συγκολλούμενα μέλη. Στη συνέχεια, γίνεται η πλήρωση των οπών με κατάλληλο ένεμα και επάλειψη των συγκολλούμενων επιφανειών με το ίδιο υλικό. Τέλος, εισάγονται στις οπές κοχλιωτές ράβδοι τιτανίου και τα δύο τμήματα ενώνονται παίρνοντας την τελική τους μορφή (Εικ. 9.1) (16). Όταν η σύνδεση δεν είναι εμφανής για να αποφευχθούν εκκεντρότητες και κατασκευαστικές ατέλειες η διάμετρος της οπής είναι κατά 4 mm μεγαλύτερη από την διάμετρο της ράβδου ενώ όταν γίνεται αποκατάσταση ρήγματος από την εξωτερική πλευρά τότε η οπή μπορεί να είναι κατά 2 mm μεγαλύτερη από τη ράβδο.

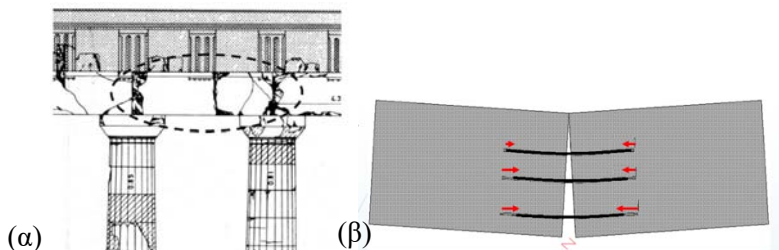


Εικόνα 9.1 Στάδια αποκατάστασης μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου (α) διάνοιξη και πλήρωση οπών με ένεμα, (β) επάλειψη συγκολλούμενων επιφανειών με ένεμα, (γ) εισαγωγή κοχλιωμένων ράβδων, (δ) ένωση δύο θραυσμάτων, (ε) τελική μορφή συγκολλημένου επιστυλίου (132).

Η επιλογή των υλικών που χρησιμοποιούνται βασίζεται όχι μόνο στις μηχανικές τους ιδιότητες αλλά και στη συμπεριφορά τους στις συνθήκες περιβάλλοντος του μνημείου.

Η διαστασιολόγηση της παραπάνω σύνδεσης λαμβάνει υπόψη τόσο το ίδιο πάχος της κατασκευής όσο και τα φορτία που μετέπειτα το επιστύλιο θα κληθεί να

παραλάβει. Βασικό μέλημα είναι τόσο οι ράβδοι τιτανίου όσο και το μάρμαρο να παραμείνουν ακέραια και να μην υποστούν περαιτέρω βλάβες από τυχόν κακό σχεδιασμό της σύνδεσης. Αν επέλθει αστοχία, η μόνη αποδεκτή θα ήταν η σχετική ολίσθηση της ράβδου ως προς τον μαρμάρινο όγκο (εξόλκευση). Αξιοσημείωτο είναι ότι στα μέχρι τώρα αποκαταστημένα μέλη δεν έχει σημειωθεί κανενός είδους αστοχία τουλάχιστον εμφανή στην εξωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων.



Εικόνα 9.2 (α) Σχηματική απεικόνιση επιστυλίου (133), (134) , (β) σχηματική απεικόνιση ολίσθησης οπλισμού στο εσωτερικό του συγκολλημένου επιστυλίου..

Παλαιότερες έρευνες έχουν δείξει ότι το ασθενέστερο σημείο της παραπάνω σύνδεσης είναι η διεπιφάνεια μεταξύ μαρμάρου και ενέματος (10), (5).

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να μελετηθεί η αδυναμία αυτής της επιφάνειας και η παρακολούθηση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ ράβδου – μαρμάρου (εξόλκευση) με τη χρήση μη καταστροφικών τεχνικών.

Για τα υλικά ,αλλά κυρίως για τον έλεγχο των συνδέσεων που ακολουθούνται στα έργα αποκατάστασης δεν υπάρχουν συγκεκριμένα πρότυπα γενικώς αποδεκτά. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν βασίστηκαν σε προηγούμενες πειραματικές έρευνες (5) αλλά και σε πρότυπα τα οποία μελετούν το φαινόμενο της εξόλκευσης χαλύβδινων ράβδων εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα.

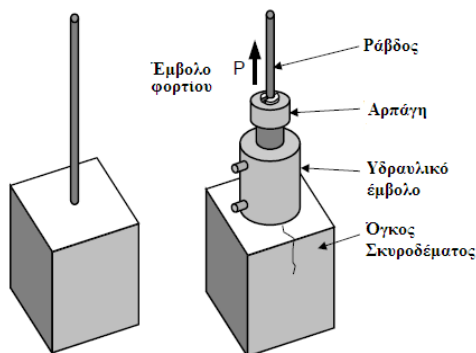
9.2 Το φαινόμενο της εξόλκευσης στα έργα μηχανικού

Η συνεργασία μεταξύ υλικών στις κατασκευές επιτυγχάνεται με τη συνάφεια. Η συνάφεια οφείλεται σε ένα σύνολο μηχανισμών που εμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο υλικών. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι η χημική πρόσφυση, η τριβή και, στην περίπτωση ράβδων με νευρώσεις, ενεργοποιείται επίσης ο μηχανισμός αντίστασης μεταξύ των νευρώσεων (135).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα συνεργασίας δύο υλικών είναι το σκυρόδεμα με το χάλυβα στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Λόγω της ευρύτατης χρήσης του οπλισμένου σκυροδέματος στις κατασκευές έχουν γίνει πάρα πολλές έρευνες γύρω από τις συνθήκες και τις αιτίες που μπορεί να καταλυθεί αυτή η συνέχεια και να λάβει χώρα το φαινόμενο της εξόλκευσης, της σταδιακής σχετικής μετακίνησης μίας ράβδου ως προς το περιβάλλον ένεμα.

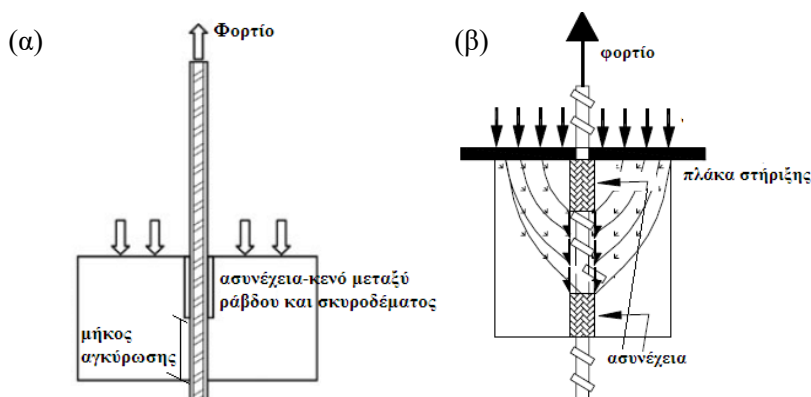
Η τυπική και η συνθηχότερη δοκιμή εξόλκευσης δίνεται στην Εικ. 9.3. Κατά τη σκυροδέτηση ενός κυβικού δοκιμίου τοποθετείται στο κέντρο κατακόρυφα μία ράβδος. Η δοκιμή εξόλκευσης περιλαμβάνει τη μετακίνηση, μέσω κατάλληλης αρπάγης, της ράβδου κρατώντας ακίνητο τον όγκο του σκυροδέματος.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.3 Τυπική διάταξη δοκιμής εξόλκεσης (pullout test) (136)

Τα τελευταία χρόνια άρχισαν να παράγονται σύνθετα υλικά (FRP Fiber Reinforced Plastics) για να αντικαταστήσουν το χάλυβα ο οποίος παρουσιάζει προβλήματα διάβρωσης στο πέρασμα του χρόνου. Μαζί με την εξέλιξη των FRPs δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις διατάξεις ελέγχου της συμπεριφοράς και της καλύτερης ή όχι συνάφειας τους με το σκυρόδεμα. Συνεπώς βελτιώθηκε και η δοκιμή εξόλκεσης μιας και η τυπική διάταξη δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στις πραγματικές συνθήκες στις οποίες υποβάλλονται τα υλικά που καλούνται να συνεργαστούν, το σκυρόδεμα και η ράβδος. Πιο συγκεκριμένα και επί της ουσίας, η ράβδος και το σκυρόδεμα βρίσκονται υπό εφελκυσμό σε συνθήκες λειτουργίας των κατασκευών. Στο πείραμα όμως η ράβδος εφελκύεται ενώ το σκυρόδεμα θλίβεται τοπικά. Για να περιοριστεί η επιρροή της πειραματικής διάταξης στην περιοχή που μελετάται (ράβδος και σκυρόδεμα γύρω από αυτήν) η διεθνής ένωση εργαστηρίων και εμπειρογνομόνων σε κατασκευαστικά υλικά, συστήματα και κατασκευές RILEM (International Union of Laboratories and Experts in construction materials, systems and structures) έδωσε κάποιες οδηγίες (RILEM 7-II-128(1994)). Το δοκίμιο εξόλκεσης τροποποιήθηκε έτσι ώστε η συνάφεια των δύο υλικών να απομακρυνθεί από την περιοχή όπου ασκείται η θλιπτική δύναμη της πειραματικής διάταξης (Εικ. 9.4 (α)).

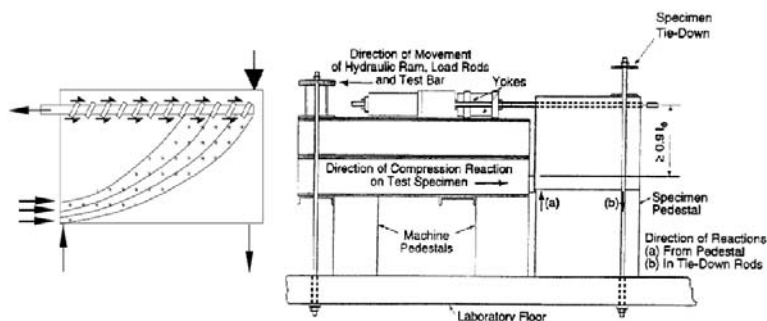


Εικόνα 9.4 (α) Τροποποιημένη διάταξη δοκιμής εξόλκεσης (137), (β) εναλλακτική διάταξη δοκιμής εξόλκεσης (138).

Εξόλκευση

Μία παραλλαγή του παραπάνω δοκιμίου εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία. Η σύνδεση-συνάφεια είναι στο κέντρο του ύψους του δοκιμίου ενώ υπάρχουν ασύνδετες περιοχές εκατέρωθεν αυτού (Εικ. 9.4 (β)) (138).

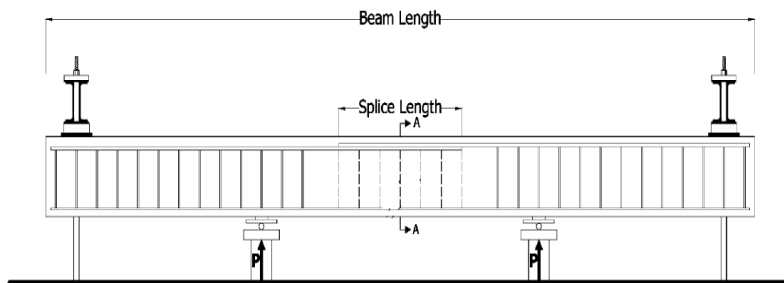
Σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM A944-10 για τον έλεγχο της αντοχής συνέχειας μεταξύ ράβδων και σκυροδέματος προτείνεται το δοκίμιο «άκρο δοκού» (beam end specimen) (Εικ. 9.5).



Εικόνα 9.5 ASTM A944 πειραματική διάταξη εξόλκεσης σε δοκίμιο beam-end.

Το δοκίμιο αποτελείται από μία ράβδο στην άνω παρειά της δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στη ράβδο επιβάλλεται μέσω ενός υδραυλικού εμβόλου η επιθυμητή μετακίνηση. Στη μία άκρη του, το δοκίμιο θα στηριχθεί κατακόρυφα ώστε να παραμείνει ακίνητο κατά τη δοκιμή. Για τον ίδιο λόγο υπάρχει ακόμα μία στήριξη στην κάτω παρειά της δοκού. Με αυτό τον τρόπο, η περιοχή του υλικού γύρω από τη ράβδο μένει όσο το δυνατόν ανεπηρέαστη από τις συνοριακές συνθήκες της δοκιμής.

Τέλος, σύμφωνα με το ASTM A1035, για να επιτευχθεί τα δυο υλικά να βρίσκονται ταυτόχρονα υπό εφελκυσμό, το δοκίμιο μπορεί να έχει τη μορφή της Εικ. 9.6 (σύνδεση δοκού-beam splice).

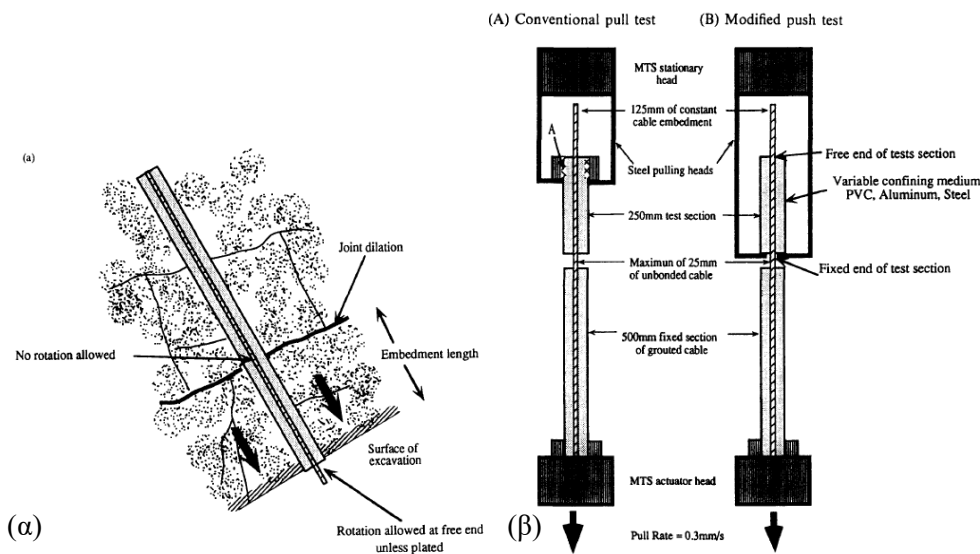


Εικόνα 9.6 Δοκίμιο ελέγχου συνάφειας ράβδου- σκυροδέματος σε δοκίμιο beam- splice (139)

Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζεται μία δοκός όπου στο κέντρο της υπάρχει η περιοχή αλληλεπικάλυψης- αγκύρωσης των οπλισμών (άνω παρειά). Η δοκός στηρίζεται στα άκρα. Μέσω δύο εμβόλων επιβάλλεται η φόρτιση σε δύο σημεία, συμμετρικά και εκατέρωθεν της σύνδεσης. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται πειραματικά η πραγματική κατάσταση της υπό μελέτη περιοχής.

Εξόλκευση

Βέβαια, το φαινόμενο της εξόλκευσης δεν αφορά μόνο τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Για την ευστάθεια πρανών και την ενίσχυση χαλαρών ή κατακερματισμένων εδαφών χρησιμοποιούνται αγκύρια. Είναι μία σύνθετη κατασκευή από συρματόσχοινο και τσιμεντένεμα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διεπιφάνειες που κινδυνεύουν είναι εκείνη του συρματόσχοινου-ένεματος και του ενέματος-βράχου. Η πιο συνηθισμένη αστοχία σε αυτά τα στοιχεία είναι η ολίσθηση μεταξύ του «ισχυρού» μεταλλικού στοιχείου σε σχέση με το «αδύναμο» τσιμεντοειδές ένεμα (Εικ. 9.7 (α)) (140).



Εικόνα 9.7 (α) Αποκατάσταση συνέχειας κερματισμένων βράχων με αγκύρια (140), (β) διατάξεις δοκιμών εξόλκευσης αγκυρίων (140).

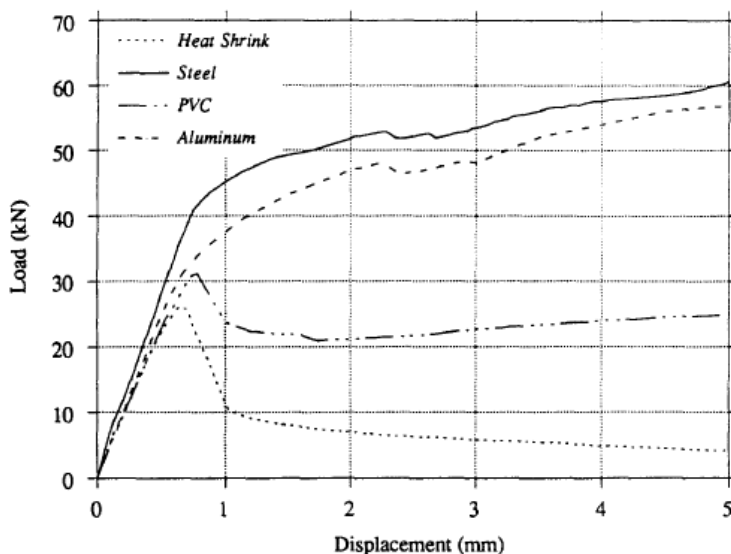
Για τον έλεγχο των αγκυρίων έχουν γίνει πειράματα προσομοιώνοντας στο μέτρο του δυνατού την κατάσταση που επικρατεί στο εργοτάξιο.

Στα πειράματα των A.J. Hyett, W.F Bawden και R.D. Reichert χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις. Η μία ήταν η κλασική διάταξη εξόλκευσης αγκυρίων (Εικ. 9.7 (β) αριστερά) ενώ λόγω του ότι το τμήμα του αγκυρίου που επρόκειτο να εξολκευθεί ήταν ελεύθερο να στραφεί κάτι που δεν ανταποκρινόταν στην πραγματικότητα η διάταξη τροποποιήθηκε (modified push test) (Εικ. 9.7 (β) δεξιά).

Σημαντικό είναι ότι σε αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά υλικά ως περίβλημα του ενέματος και του συρματόσχοινο. Αυτό έγινε για να επιτευχθεί διαφορετική περισφιγξή στο κατασκευή. Για να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή της περισφιγξης χρησιμοποιήθηκε λεπτό διαφανές θερμοδιαστελλόμενο «μανίκι». Τα πειράματα αυτά έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί η υπό μελέτη σύνδεση αποτελείται από τρία υλικά (περίβλημα- τσιμεντένεμα- συρματόσχοινο) όπως στην περίπτωση αποκατάστασης της μονολιθικότητας ενός επιστυλίου (μάρμαρο- τσιμεντένεμα-ράβδος τιτανίου).

Εξόλκευση

Στο διάγραμμα της Εικ. 9.8 παρατηρούνται δύο είδους αστοχίες. Στη μία περίπτωση το φορτίο μόλις λάβει τη μέγιστη τιμή του παραμένει σχεδόν σταθερό ή αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνεται η μετακίνηση. Η συμπεριφορά αυτή θεωρείται πλάστιμη και αυτό συμβαίνει στα δοκίμια όπου το περίβλημα (περίσφιγξη) αποτελείται από υλικά με μεγάλη δυσκαμψία. Στη δεύτερη περίπτωση, όταν το φορτίο λάβει τη μέγιστη τιμή του, ακολουθεί σημαντική πτώση ενώ στη συνέχεια καθώς αυξάνεται η μετακίνηση το φορτίο αρχίζει να σταθεροποιείται. Το φαινόμενο αυτό παραπέμπει σε ψαθυρή μορφή αστοχίας και καταγράφεται στα δοκίμια με περίβλημα από θερμοδιαστελλόμενο υλικό (εντονότερο το φαινόμενο) και από αλουμίνιο (140).



Εικόνα 9.8 Διαγράμματα Δύναμης – Μετακίνησης σε δοκιμές εξόλκεσης αγκυρίων (140).

Έχει παρατηρηθεί ότι στη σχέση δύναμη-μετακίνησης ενός πειράματος εξόλκευσης μπορεί να διακριθούν 4 περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικό μηχανισμό αστοχίας (Bawden et al (141)).

Στάδιο 1: Η αρχική γραμμική σχέση του πρώτου σταδίου οφείλεται στην αξονική δυσκαμψία της ράβδου, στις ελαστικές ιδιότητες του ενέματος και τις ιδιότητες της διεπιφάνειας. Η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας στο στάδιο αυτό αποδίδεται στη μηχανική εμπλοκή της ράβδου με το τσιμέντο αλλά και στην αντίσταση τριβής η οποία οφείλεται στην ακτινική θλιπτική δύναμη που προέρχεται από τη συστολή ξήρανσης του ενέματος κατά την ωρίμανση του.

Στάδιο 2: Ο δεσμός της διεπιφάνειας είναι σχετικά μικρός όμως μπορεί να λάβει χώρα μικρή σχετική ολίσθηση. Αρχίζουν να σχηματίζονται σφήνες από την ρηγματώση του τσιμέντου οι οποίες μπορούν να μετακινηθούν και να επιτρέψουν την ολίσθηση στη διεπιφάνεια. Το σημείο έναρξης της μη γραμμικότητας ορίζεται ανάλογα το μέγεθος της περίσφιγξης. Όσο ισχυρή περίσφιγξη υπάρχει τόσο μεγαλύτερο το φορτίο έναρξης τους φαινομένου. Στο τέλος του βήματος αυτού η τάση μειώνεται απότομα, πιθανότατα λόγω των ακτινικών ρωγμών.

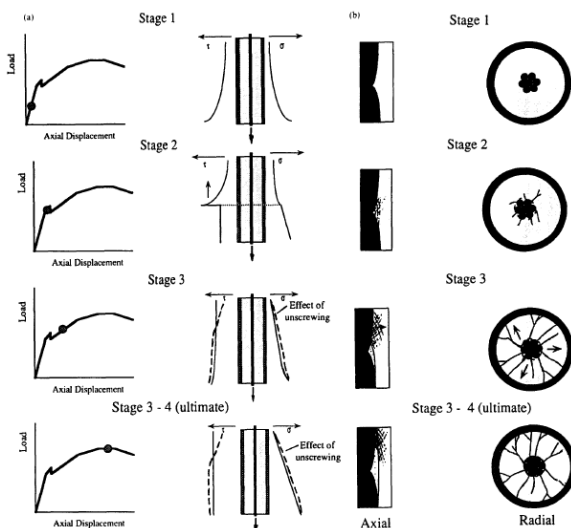
Εξόλκευση

Στάδιο 3: Στο στάδιο αυτό η συμπεριφορά του φορτίου ελέγχεται από την αντίσταση τριβής μεταξύ ράβδου και ενέματος καθώς και από την απομένουσα αντοχή του τσιμέντου.

Καθώς η ράβδος μετακινείται η αξονική περισφιγξη είναι εκείνη που αντιστέκεται στην εξόλκευση.

Στάδιο 4: Στο στάδιο αυτό παρατηρείται μείωση της αντοχής η οποία οφείλεται στην αρνητική γωνία διαστολής, στα θρύμματα του ενέματος τα οποία «μπλοκάρονται» στις επόμενες κορυφές-αυλακώσεις του σπειρώματος και στη ρηγμάτωση του ανέπαφου, μέχρι εκείνη τη στιγμή, ενέματος (82).

Τα παραπάνω φαινόμενα βέβαια εξαρτώνται κατά πολύ από τις συνοριακές συνθήκες και γενικά τις συνθήκες του πειράματος (140).

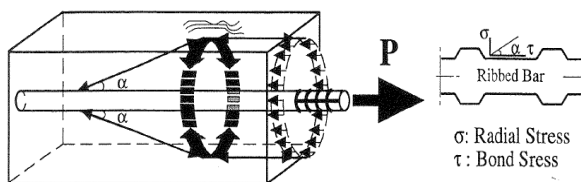


Εικόνα 9.9 Στάδια φαινομένου εξόλκευσης (140)

Μετά το πέρας των πειραμάτων, στα δοκίμια παρατηρήθηκαν 2 μορφές αστοχίας. Το ακτινικό «σχίσσιμο» του τσιμέντου περιμετρικά της ράβδου και η διαμητική αστοχία μεταξύ του οπλισμού και του περιβάλλοντος τσιμέντου. Για το ποια από τις δύο παραπάνω αστοχίες θα λάβει χώρα θα εξαρτηθεί από το πάχος του τσιμεντένιου περιβλήματος (142).

Αν η ράβδος είναι παραμορφώσιμη τότε οι δυνάμεις λόγω της χημικής πρόσφυσης και της τριβής θεωρούνται αμελητέες. Η μεταφορά της δύναμης από τη ράβδο στο ένεμα επιτυγχάνεται μέσω των νευρώσεων. Η συνισταμένη της θλιπτικής δύναμης που ασκείται από τις νευρώσεις σχηματίζει γωνία με τον άξονα της ράβδου. Αναλύοντας την προκύπτει μία ακτινική και μία διαμητική δύναμη (Terfers, 1973). Αν αυτή η εφελκυστική δύναμη ξεπεράσει την αντοχή του «δαχτυλιδιού» τότε έχουμε την διάρρηξη του τσιμέντου (Εικ. 9.10). Αν όμως η αντοχή είναι μεγαλύτερη ή υπάρχει επαρκής περισφιγξη η οποία αντιστέκεται τότε το τσιμέντο σπάει στην άκρη της νευρώσης και ολισθαίνει η ράβδος (143).

Εξόλκευση



Εικόνα 9.10 Κατανομή δυνάμεων κατά το φαινόμενο της εξόλκεσης (140).

9.3 Περιγραφή δοκιμών

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω πειραματικές διατάξεις έγιναν διάφορες δοκιμές και τροποποιήσεις για να βρεθεί η βέλτιστη δυνατή λύση σε μορφή και διαστάσεις του δοκιμίου που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή. Επιθυμητή είναι η αναπαραγωγή των συνθηκών κάτω από τις οποίες βρίσκεται ένα επιστύλιο του οποίου έχει αποκατασταθεί η μονολιθικότητα και απαιτείται η παρακολούθηση της μετέπειτα συμπεριφοράς του.

Αρχικά δοκιμάστηκαν μαρμάρيني όγκοι μορφής ανεστραμμένου ταυ (από μάρμαρο Διονύσου) (Εικ. 9.11). Στο κέντρο τους και καθ' ύψος διατρέχει διαμπερή σπή στην οποία εισέρχεται τσιμεντένεμα και κοχλιωμένη ράβδος τιτανίου ακριβώς όπως γίνεται σε μία τυπική σύνδεση αποκατάστασης. Μετά από 28 μέρες και υπό σταθερές συνθήκες υγρασίας, οι οποίες απαιτούνται για την ωρίμανση της τσιμεντοκονίας, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές. Η ράβδος συγκρατείται από την αρπάγη του πλαισίου φόρτισης (Εικ. 9.11 (β)) και το μάρμαρο σταθεροποιείται από τα πέλεματα του ταυ με ένα σύστημα μεταλλικών δοκών (Εικ. 9.11 (γ)). Επιλέχθηκε η μορφή αυτή του δοκιμίου και της πειραματικής διάταξης για να απομακρυνθεί η στήριξη και κατά συνέπεια οι θλιπτικές τάσεις μακριά από την περιοχή της ράβδου-τσιμεντενέματος-μαρμάρου. Τα πειράματα όμως δεν έφεραν τα επιθυμητά αποτελέσματα λόγω αναπόφευκτων εκκεντροτήτων που οδηγούσαν σε παρασιτικές καμπτικές δυνάμεις. Κατά συνέπεια, καθώς η αρπάγη του πλαισίου μετακινούνταν προς τα πάνω και αντίθετα από τον ακίνητο μαρμάρινο όγκο, αντί η ράβδος να ολισθήσει έσπαγε το μάρμαρο (Εικ. 9.12).

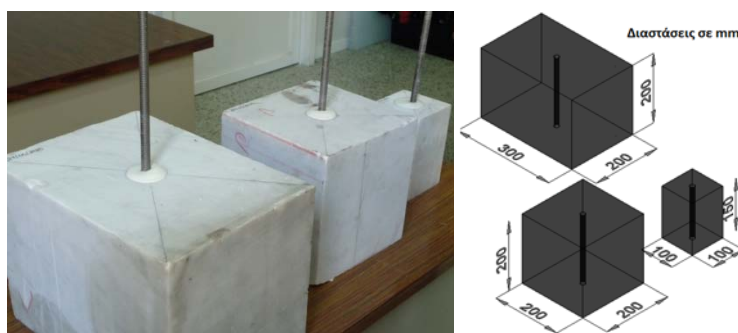


Εικόνα 9.11 (α) Δοκίμια μορφής ανεστραμμένου Ταυ, (β) πειραματική διάταξη δοκιμής εξόλκευσης.



Εικόνα 9.12 Αστοχίες δοκιμίων μορφής ανεστραμμένου ταυ.

Στη συνέχεια, λόγω της αστοχίας των παραπάνω δοκιμίων, επιλέχθηκαν πρισματικά δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου διάφορων διαστάσεων (Εικ. 9.13).



Εικόνα 9.13 Πρισματικά δοκίμια διάφορων διαστάσεων.

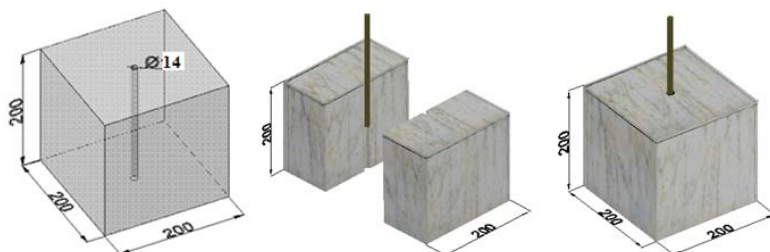
Στο κέντρο του μαρμαρίνου δοκιμίου δημιουργείται μία διαμπερής οπή διαμέτρου κατά τι μεγαλύτερη από τη ράβδο. Στη συνέχεια γίνεται η πλήρωση της οπής (από το άνω άκρο μέχρι το μέσο του ύψους της οπής) με ένεμα λευκού τσιμεντού και εισάγεται η κοχλιωτή ράβδος. Η ράβδος επιβάλλεται να είναι παράλληλη ως προς τις διαμήκεις ακμές του μαρμάρου και σε όλη την περίμετρο της να υπάρχει υγρό τσιμεντένεμα. Με κατάλληλη διάταξη συγκράτησης, η ράβδος διατηρείται σταθερή στη θέση της μέχρι την πήξη της τσιμεντοκονίας (Εικ. 9.14).



Εικόνα 9.14 Στάδια παρασκευής δοκιμίων εξόλκευσης.

Εξόλκευση

Σχηματικά στην Εικ. 9.15 δίνεται η διάμετρος της διαμπερούς οπής στο κέντρο της διατομής του μαρμάρου και το βάθος της αγκύρωσης της ράβδου το οποίο σε όλα τα δοκίμια παραμένει σταθερό και ίσο με 7.5 cm.



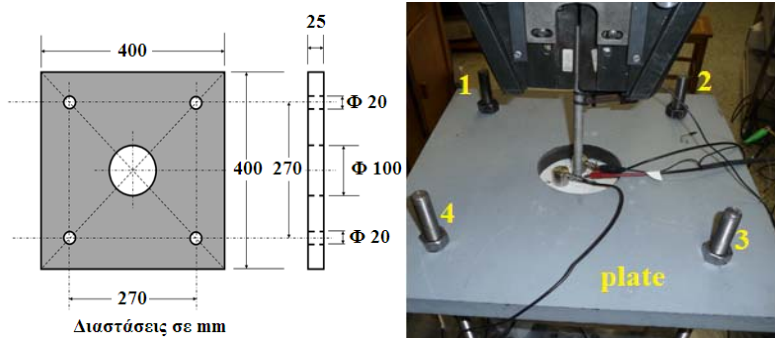
Εικόνα 9.15 Σχηματική περιγραφή δοκιμίων.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μετά το πέρας 28 ημερών οι οποίες απαιτούνται για τη μέγιστη αντοχή της τσιμεντοκονίας.

9.4 Πειράματα

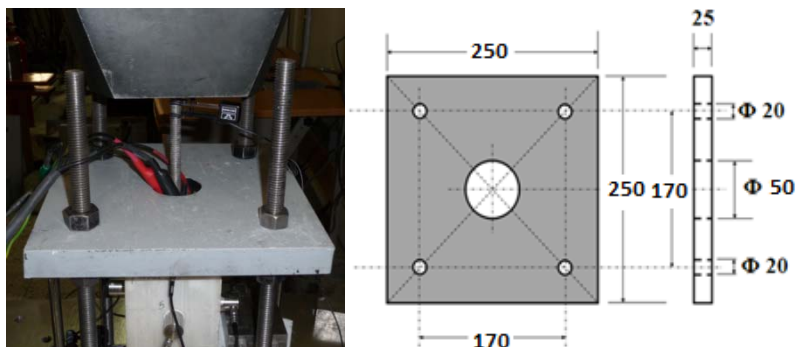
Τα πειράματα εξόλκεσης (pull-out) πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο φόρτισης INSTRON (MODEL 1126- με δυνατότητα επιβολής μέγιστου φορτίου 25tn) του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ.

Η μεταλλική πλάκα στηριζόταν από 4 περιμετρικές ράβδους διαμέτρου $\Phi 20$ (Εικ. 9.16- 9.18). Χρησιμοποιήθηκαν δύο πλάκες συγκράτησης ανάλογα τις διαστάσεις του μαρμάρου. Για τα μάρμαρα με διαστάσεις (20cm x 20cm x 20cm και 20cm x 30cm x 20cm) χρησιμοποιήθηκε η πλάκα με τη μεγάλη κεντρική κυκλική οπή ($\Phi 100$) για να απομακρυνθεί στο μέτρο του δυνατού η επιρροή της διάταξης στην περιοχή ολίσθησης της ράβδου (Εικ. 9.16). Στο μάρμαρο με διαστάσεις 10cm x 10cm x 15cm χρησιμοποιήθηκε αναγκαστικά πλάκα συγκράτησης με μικρότερη οπή (Εικ. 9.17).



Εικόνα 9.16 Μεταλλική πλάκα συγκράτησης δοκιμίου για τα μάρμαρα με διαστάσεις 20cm x 20cm x 20cm, 20cm x 30cm x 20cm.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.17 Μεταλλική πλάκα συγκράτησης δοκιμίου για τα μάρμαρα με διαστάσεις 10cm x10cm x15cm.



Εικόνα 9.18 (α)Αρπάγη- επιμηκνσιόμετρο, (β)μεταλλική πλάκα συγκράτησης δοκιμίου στηριζόμενη σε 4 περιμετρικές μεταλλικές ράβδους.

Το μάρμαρο παραμένει με την παραπάνω διάταξη ακίνητο. Το άνω κινητό στέλεχος της μηχανής με την κατάλληλη αρπάγη συγκρατεί τη ράβδο (Εικ. 9.18) και καθώς κινείται προς τα πάνω εξαναγκάζει τη ράβδο να εξολκευθεί. Η συνολική μορφή της πειραματικής διάταξης δίνεται στην Εικ. 9.19.

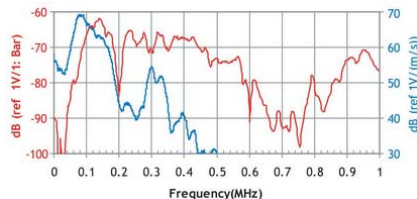
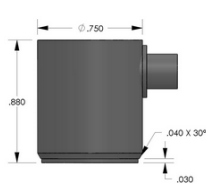


Εικόνα 9.19 Τελική μορφή πειραματικής διάταξης.

Εξόλκευση

Για την καταγραφή της παραμόρφωσης της ράβδου κατά τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε επιμηκνισιόμετρο (Instron-Dynamic Extensometer) το οποίο έχει τη δυνατότητα συνολικής μετατόπιση 12.5mm (Εικ. 9.18 (α)).

Περιμετρικά του μαρμάρου τοποθετήθηκαν ακουστικοί αισθητήρες της Physical Acoustics Corporation τύπου R15a (Εικ. 9.20) για την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Dynamic

- Peak Sensitivity V/(m/s); [V/μbar] 69 [-63] dB
- Operating Frequency Range 50 - 400 kHz
- Resonant Freq. V/(m/s); [V/μbar] 75 [150] kHz
- Directionality..... ±1.5 dB

Environmental

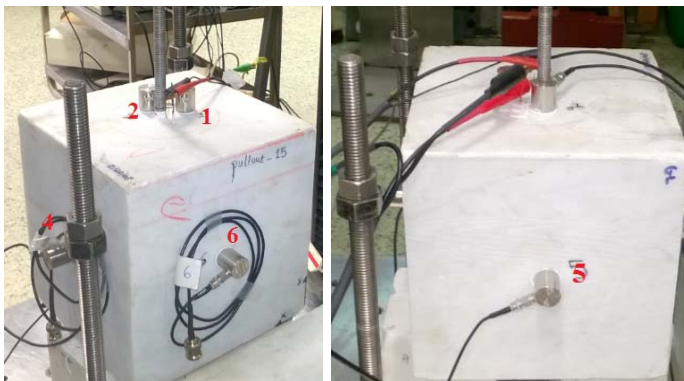
- Temperature Range -65 to 175°C
- Shock Limit 500 g
- Completely enclosed crystal for RFI/EMI immunity

Physical

- Dimensions.... 0.75" diam. x 0.88" h (19 x 22.4 mm)
- Weight..... 34 grams
- Case Material..... Stainless Steel
- Face Material..... Ceramic
- Connector..... SMA
- Connector Locations Side
- Seal Epoxy
- Sensor to Preamp Cable (1 or 2 meters) 1232-X-SMA

Εικόνα 9.20 Χαρακτηριστικά αισθητήρα τύπου R15a.

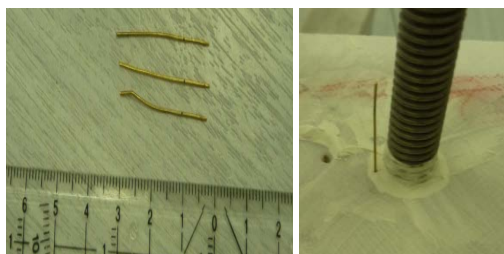
Ενδεικτικά οι θέσεις των ακουστικών αισθητήρων για ένα χαρακτηριστικό πείραμα δίνονται στην εικόνα 9.21.



Εικόνα 9.21 Θέσεις ακουστικών αισθητήρων.

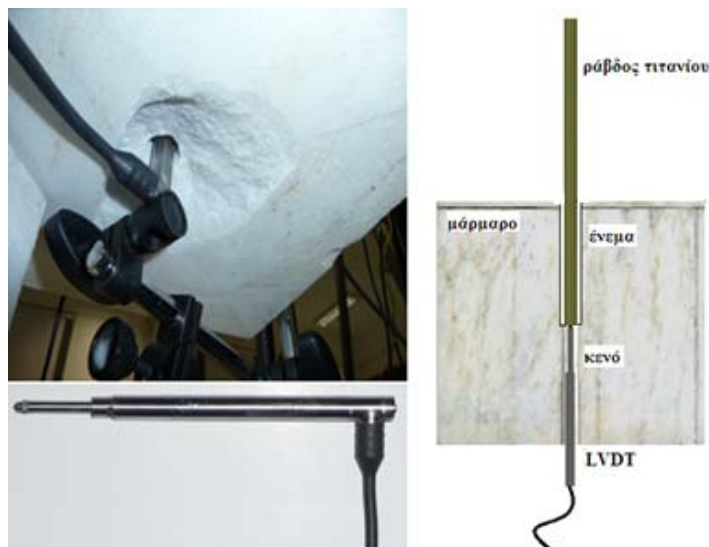
Εξόλκευση

Καθώς επιβάλλεται το φορτίο και δημιουργούνται αστοχίες πάσης φύσεως μέσα στο υλικό έχει παρατηρηθεί η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος. Το ρεύμα αυτό καταγράφεται με τη βοήθεια ηλεκτροδίων. Στο δοκίμιο εξόλκευσης εμφυτεύθηκε κατά την παρασκευή του ένα ηλεκτρόδιο (στην άνω παρειά του δοκιμίου) εντός της τσιμεντοκονίας πριν την πήξη της (Εικ. 9.22). Το ηλεκτρόδιο αποτελείται από επίχρωση βελόνα φτιαγμένη από ασήμι για να αποφευχθούν οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ηλεκτρίδιου και της τσιμεντοκονίας. Πολύ κοντά στην βελόνα δημιουργήθηκε στην επιφάνεια του μαρμάρου οπή διαμέτρου 1.5mm και βάθους 1cm στην οποία εισάγεται το δεύτερο ηλεκτρόδιο για την καταγραφή των ηλεκτρικών σημάτων τα οποία παράγονται κατά την εξόλκευση.



Εικόνα 9.22 (α) Ηλεκτρόδια (β) θέση ηλεκτροδίων.

Η ολίσθηση της ράβδου παρακολουθείται καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος με τη χρήση μηχανομομέτρου τύπου LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Τοποθετείται στο κάτω άκρο της ράβδου (Εικ. 9.23) και ακολουθεί την κίνηση της δίνοντας την αντίστοιχη μετακίνηση.



Εικόνα 9.23 Θέση μηχανομομέτρου τύπου LVDT.

Εξόλκευση

Για να υπολογιστεί η καθαρή ολίσθηση της ράβδου ως προς το μάρμαρο τοποθετήθηκαν μηχανοσυστοιχίες τύπου LVDT σε διάφορες θέσεις της μεταλλικής πλάκας συγκράτησης για να καταγράφονται οι συνολικές μετακινήσεις του συστήματος (Εικ. 9.24).



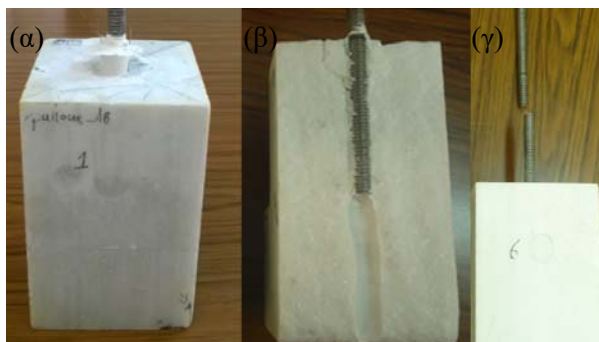
Εικόνα 9.24 Θέσεις μηχανοσυστοιχιών τύπου LVDT επί της μεταλλικής πλάκας συγκράτησης.

9.5 Μορφές αστοχίας

Η δύναμη εξόλκευσης εξαρτάται από το βάθος αγκύρωσης, τα γεωμετρικά στοιχεία του σπειρώματος της μεταλλικής ράβδου (βάθος, βήμα και κλίσεις του σπειρώματος) καθώς και από τις ιδιότητες των διεπιφανειών μάρμαρο-κονίαμα και κονίαμα-μεταλλική ράβδος.

Κατά τη δοκιμή εξόλκευσης, όπως παρατηρήθηκαν σε προγενέστερες μελέτες αλλά και στις σειρές πειραμάτων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ, μπορεί να σημειωθούν κυρίως 4 είδη αστοχιών:

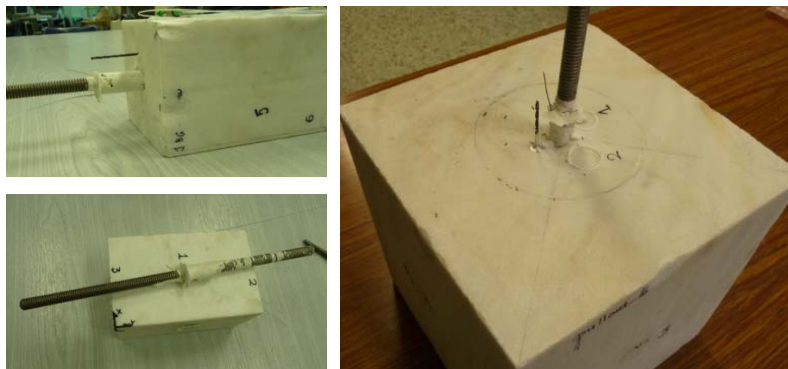
- Αστοχία της μεταλλικής ράβδου (όλκιμη αστοχία)
- Αστοχία του μαρμάρου (ψαθυρή αστοχία)
- Αστοχία της διεπιφάνειας μαρμάρου-κονιάματος.
- Συνδυασμός των παραπάνω.



Εικόνα 9.25 (α) εξόλκευση ράβδου (β) θραύση μαρμάρου (γ) αστοχία ράβδου.

Εξόλκευση

Η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε στα πειράματα όπου επετεύχθη καθαρή εξόλκευση της ράβδου ως προς το μαρμάρινο όγκο (Εικ. 9.26).



Εικόνα 9.26 Ολίσθηση ράβδου-αστοχία στη διεπιφάνεια μαρμάρου και κονιάματος.

9.6 Μηχανικά χαρακτηριστικά

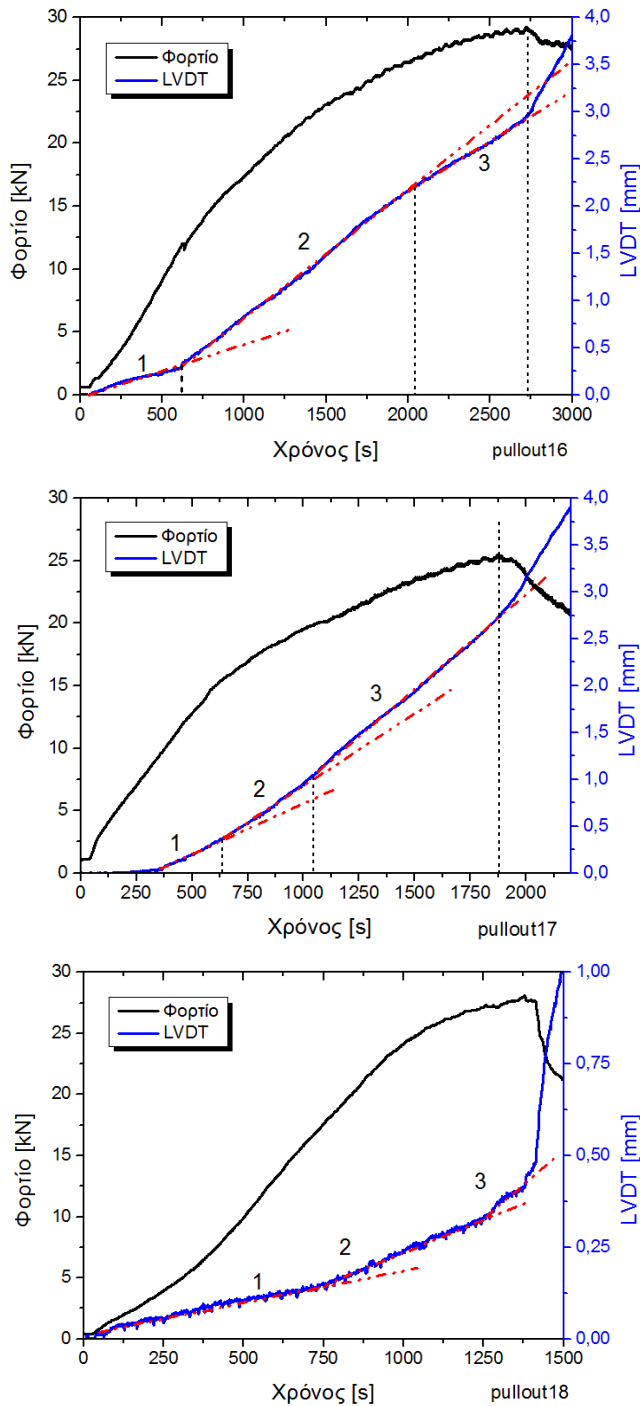
Ενδεικτικές καμπύλες μεταβολής τόσο του φορτίου εξόλκευσης όσο και της μεταβολής της μετακίνησης της ράβδου όπως αυτές λαμβάνονται από το μηχανοσκόπετρο LVDT δίνονται στην Εικ. 9.27.

Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στη μεταβολή του φορτίου περιλαμβάνουν ένα αρχικό γραμμικό τμήμα το οποίο φτάνει μέχρι το μισό περίπου του μέγιστου φορτίου. Ακολουθεί ένα έντονα μη γραμμικό κομμάτι μέχρι το μέγιστο φορτίο και στη συνέχεια το φορτίο αρχίζει να μειώνεται συνεχώς καθώς χάνεται η δομική ακεραιότητα της σύνδεσης.

Σε όλες τις παραπάνω καμπύλες της μετακίνησης της ράβδου παρατηρούνται 3 χαρακτηριστικές περιοχές. Οι δύο πρώτες αντιστοιχούν στην ελαστική απόκριση της πειραματικής διάταξης και του συστήματος συνολικά και μόνο η τρίτη, λίγο πριν το μέγιστο φορτίο, αφορά καθαρά την εξόλκευση της ράβδου.

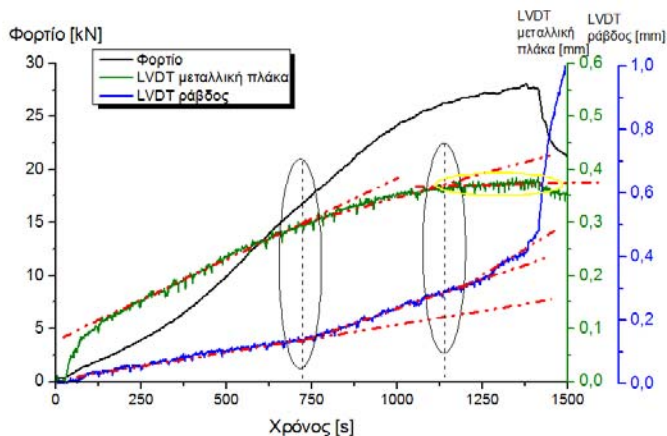
Παρατηρώντας την καμπύλη του μηχανοσκόπετρου (LVDT) το οποίο είναι τοποθετημένο στην μεταλλική πλάκα συγκράτησης του δοκιμίου διακρίνονται οι τρεις προαναφερόμενες περιοχές και είναι χαρακτηριστικό το plateau- οριζόντιο τμήμα της καμπύλης λίγο πριν το μέγιστο φορτίο (Εικ. 9.28). Αυτό δηλώνει ότι η πλάκα σταματάει από εκείνη τη στιγμή να κινείται και αυτό που καταγράφεται είναι η καθαρή ολίσθηση της ράβδου.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.27 Καμπύλη Φορτίου και ένδειξης LVDT στη ράβδο για τρία χαρακτηριστικά πειράματα.

Εξόλκευση

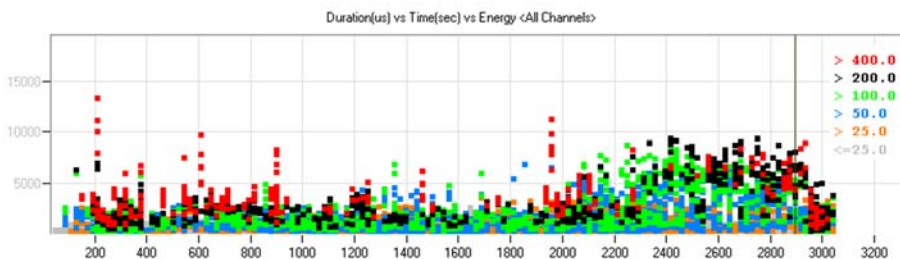


Εικόνα 9.28 Καταγραφές μηκυνσιομέτρων LVDT στη μεταλλική πλάκα συγκράτησης και στη ράβδο.

9.7 Αποτελέσματα/ Συνδυασμός ακουστικών εκπομπών, ηλεκτρικών σημάτων με μηχανικά χαρακτηριστικά

Στόχος των πειραμάτων είναι η συσχέτιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πειράματος με τις αντίστοιχες καταγραφές τόσο των ακουστικών εκπομπών (AE) όσο και των ηλεκτρικών σημάτων (PSC).

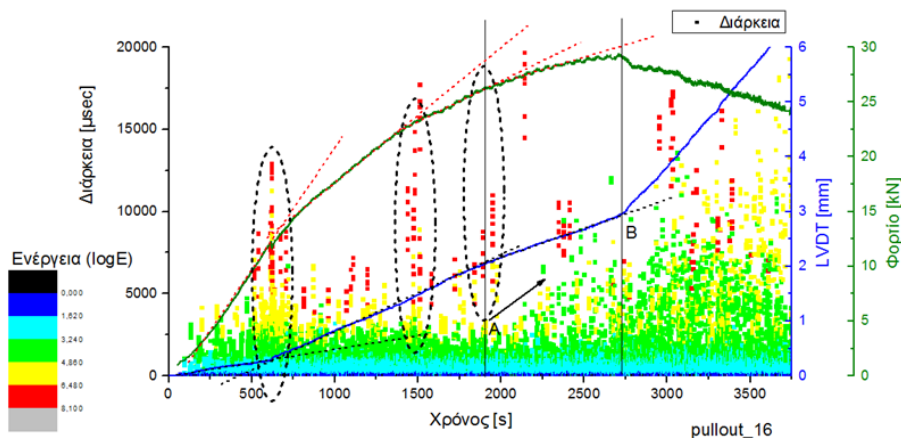
Ένα ενδεικτικό διάγραμμα των ακουστικών σημάτων όπως αυτό δίνεται από το πρόγραμμα AEWin δίνεται στην Εικ. 9.29. Είναι χαρακτηριστικό ότι στο τέλος του πειράματος όπου η ράβδος ολισθαίνει και υπερισχύει αυτό το φαινόμενο χωρίς να παρεμβάλλονται άλλα παρασιτικά σήματα λόγω της διάταξης, τα σήματα έχουν αυξηθεί σημαντικά (πύκνωση ανά μονάδα χρόνου) και έχουν μεγάλη διάρκεια και ενέργεια σε σχέση με τα πρώτα στάδια του πειράματος. Η μεγάλη διάρκεια των AE μπορεί να αποδοθεί σε διατμητικά ακουστικά σήματα (τριβή) σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (144), (145).



Εικόνα 9.29 Χρονική καταγραφή ακουστικών σημάτων (Διάρκεια (άξονας y), ενέργεια (χρωματοκλίμακα)).

Εξόλκευση

Βασικοί παράμετροι του πειράματος είναι το φορτίο εξόλκευσης και η αντίστοιχη ολίσθηση της ράβδου. Το παραπάνω διάγραμμα (Εικ. 9.29) σε αντιπαράθεση με την καμπύλη του φορτίου και τις ενδείξεις του LVDT το οποίο βρίσκεται στο κάτω άκρο της ράβδου, δείχνουν να συμφωνούν (Εικ. 9.30).

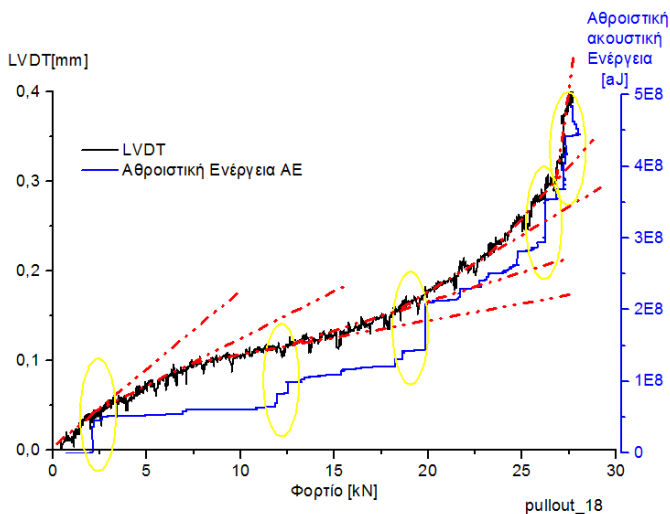


Εικόνα 9.30 Χρονική καταγραφή ακουστικών σημάτων (Διάρκεια (άξονας y) Πλάτος (χρωματοκλίμακα)) και ενδείξεων μηχανομετρου LVDT της ράβδου.

Στις ταυτόχρονες αλλαγές κλίσης των δύο καμπυλών του φορτίου και των τιμών του LVDT (καμπύλες με μπλε και πράσινο χρώμα) υπάρχουν αντίστοιχες απότομες κορυφές στα ακουστικά σήματα με μεγάλη διάρκεια και ενέργεια. Επίσης από το σημείο στο οποίο υπάρχουν ενδείξεις ότι έχει ξεκινήσει η ολίσθηση (πριν το μέγιστο φορτίο) αρχίζει σημαντική πύκνωση των σημάτων (σημείο A) και κορυφώνεται μετά το μέγιστο φορτίο (σημείο B).

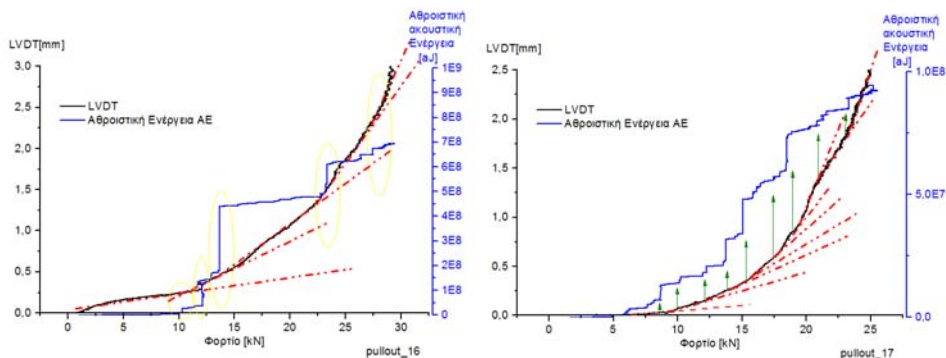
Στο διάγραμμα της Εικ. 9.31 δίνεται, για ένα ενδεικτικό πείραμα, η μεταβολή της ολίσθησης της ράβδου και της αθροιστικής απόλυτης ενέργειας των ακουστικών εκπομπών AE καθώς αυξάνεται το φορτίο της εξόλκευσης. Κάθε φορά που αλλάζει η κλίση της καμπύλης της ολίσθησης-φορτίου παρατηρείται απότομη και χρονικά συμβατή αύξηση της αθροιστικής ενέργειας των ακουστικών εκπομπών AE. Όμοια συμπέρασμα και σε άλλα πειράματα.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.31 Μεταβολή ολίσθησης ράβδου(LVDT) και αθροιστικής ακουστικής ενέργειας ως προς το φορτίο εξόλκευσης για το πείραμα με κωδ. Pullout_18.

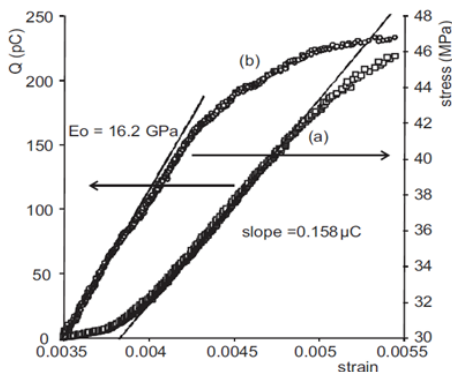
Ακολουθούν όμοια ενδεικτικά διαγράμματα για κάποια χαρακτηριστικά πειράματα.



Εικόνα 9.32 Μεταβολή ένδειξης LVDT & αθροιστικής ακουστικής ενέργειας ως προς το φορτίο εξόλκευσης ενδεικτικά για δύο πειράματα.

Σε παλαιότερες μελέτες έχει αποδειχθεί ότι κατά την καταπόνηση ενός ψαθυρού υλικού (π.χ μάρμαρο) και καθώς αυτό παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο παράγεται λόγω της γένεσης ρωγμών ή διάδοσης αυτών είναι ανάλογο με την αναπτυσσόμενη τάση. Συγκεκριμένα, σε δοκιμές θλίψης σε δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου, το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο καταγράφηκε είχε ανάλογη συμπεριφορά με την τάση και την παραμόρφωση του υλικού (Εικ. 9.33).

Εξόλκευση



Εικόνα 9.33 Μεταβολή Ηλεκτρικού φορτίου Q και τάσης (σ) ως προς την παραμόρφωση (ϵ) (146).

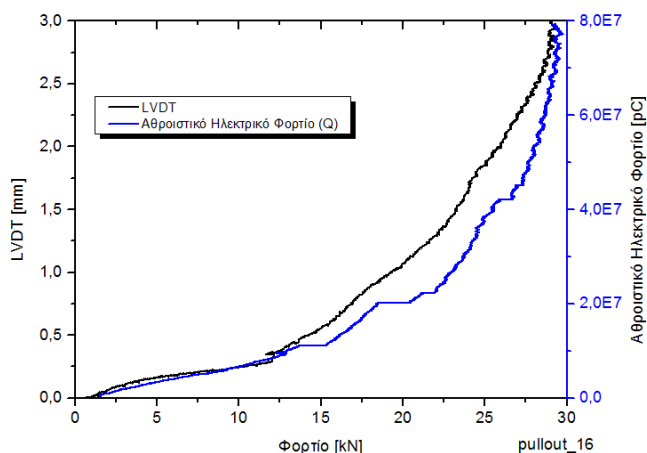
Το ηλεκτρικό φορτίο Q υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 9.1 (114), (146).

$$Q(t) = \int_0^t PSC(t)dt = \Gamma \epsilon(t) \tag{9.1}$$

Όπου,

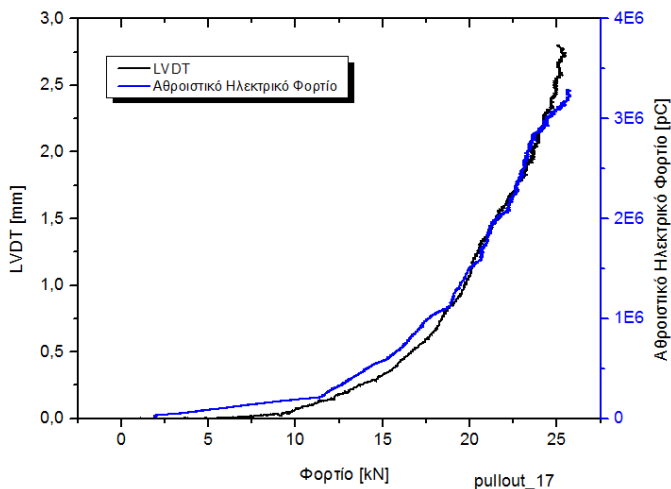
Γ το όριο αναλογίας το οποίο περιέχει τις φυσικές ιδιότητες του υλικού και $\epsilon(t)$ η παραμόρφωση του υλικού ως προς το χρόνο.

Υπολογίζοντας το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και συνδυάζοντας το με την ολίσθηση της ράβδου και το φορτίο εξόλκευσης παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική αναλογία στη μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου και της ολίσθησης της ράβδου ως προς το φορτίο εξόλκευσης ιδιαίτερα μέχρι το μέγιστο φορτίο (Εικ. 9.34- 9.36).

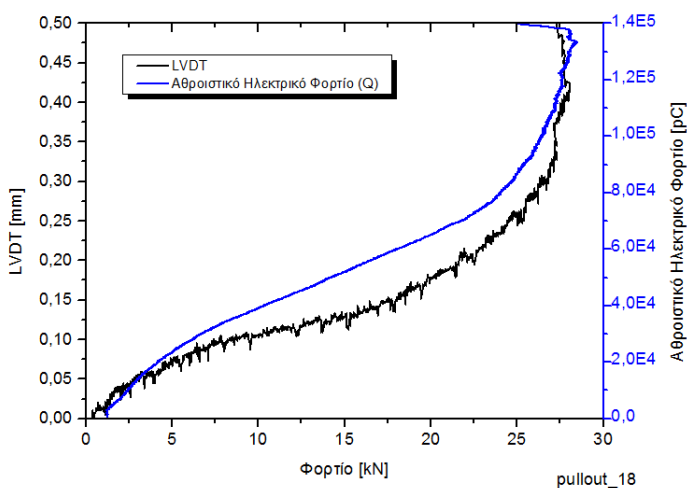


Εικόνα 9.34 Μεταβολή Ηλεκτρικού φορτίου Q και ολίσθησης ράβδου (LVDT) ως προς το φορτίο εξόλκευσης για το πείραμα με κωδ. Pullout_16

Εξόλκευση



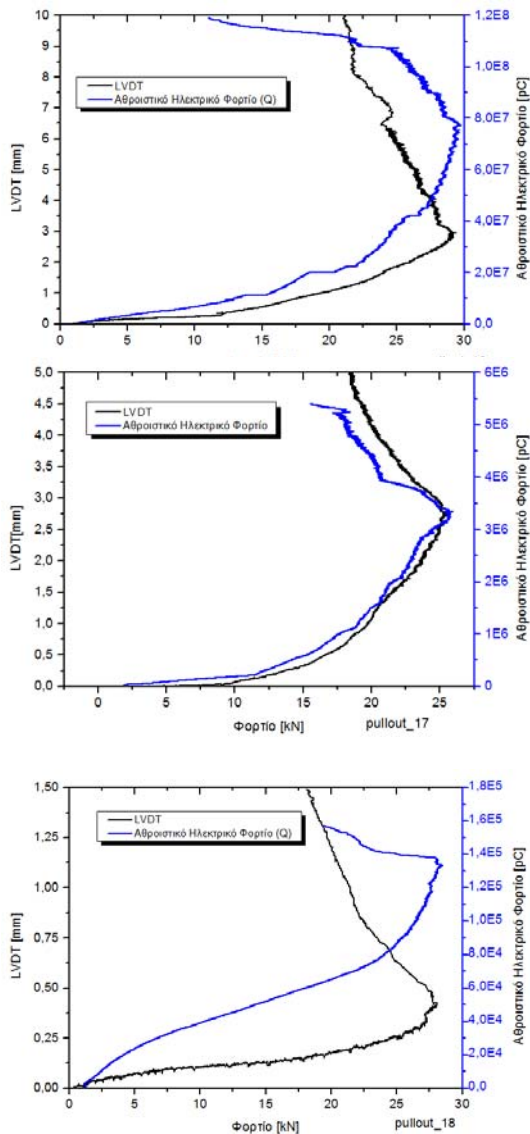
Εικόνα 9.35 Μεταβολή Ηλεκτρικού φορτίου Q και ολίσθησης ράβδου (LVDT) ως προς το φορτίο εξόλκευσης για το πείραμα με κωδ. Pullout_17



Εικόνα 9.36 Μεταβολή Ηλεκτρικού φορτίου Q και ολίσθησης ράβδου (LVDT) ως προς το φορτίο εξόλκευσης για το πείραμα με κωδ. Pullout_18.

Η καταγραφή του ηλεκτρικού φορτίου και μετά το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης ακολουθεί ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της ολίσθησης της ράβδου (Εικ. 9.37). Συνεπώς, η καταγραφή των ηλεκτρικών σημάτων μπορεί να είναι ένας αξιόπιστος τρόπος παρακολούθησης ολόκληρου του φαινομένου εξόλκευσης από της έναρξης, το μέγιστο φορτίο και την τελική πτώση του φορτίου.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.37 Μεταβολή Ηλεκτρικού φορτίου Q και ολίσθησης ράβδου (LVDT) ως προς το φορτίο εξόλκευσης μέχρι το μέγιστο φορτίο και την πτώση του για τα πειράματα με κωδ. Pullout_16/17/18.

Μία πολύ χρήσιμη ανάλυση των ακουστικών σημάτων είναι ο εντοπισμός της θέσης της πηγής που τα προκαλεί. Είναι όμως δύσκολο στο πείραμα της εξόλκευσης να γίνει ξεκάθαρος εντοπισμός της θέσης αυτής λόγω του ότι υπάρχουν σήματα τα οποία δεν αντιστοιχούν στην εξόλκευση αλλά στην πειραματική διάταξη λόγω της σύνθλιψης του μαρμάρου με την άκαμπτη πλάκα συγκράτησης. Με τη μεγέθυνση

Εξόλκευση

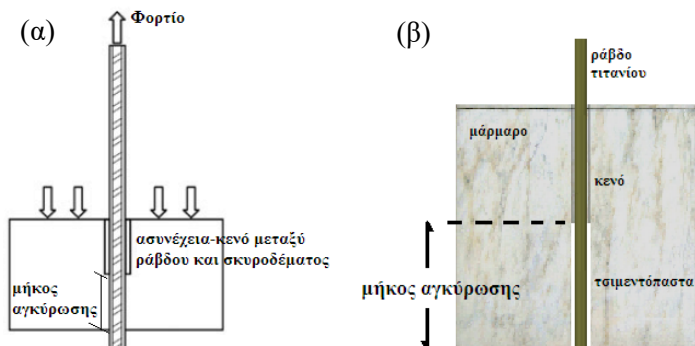
της οπής της πλάκας και των διαστάσεων των δοκιμίων επετεύχθη εν μέρει η μείωση των παρασιτικών σημάτων όμως απομακρύνθηκαν σημαντικά οι αισθητήρες από το κέντρο του δοκιμίου στο οποίο βρίσκεται η ράβδος.

Επίσης η λύση των μεγάλων δοκιμίων δυσχεραίνει τη πειραματική διαδικασία και είναι μια αντικονομική λύση. Συνεπώς έπρεπε να γίνει επανασχεδιασμός των πειραμάτων για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

9.8 Τροποποίηση δοκιμίων- Πειράματα pull-out (αγκύρωση στο κάτω άκρο της οπής του μαρμάρου)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί η αύξηση των διαστάσεων των δοκιμίων και η χρήση μεταλλικής πλάκας με μεγάλη οπή να έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα όμως αυτό δε μπορεί να θεωρηθεί για λόγους οικονομικούς αλλά και πρακτικούς ως βέλτιστη λύση στα πειράματα εξόλκευσης. Κρίθηκε αναγκαίο να τροποποιηθούν τα δοκίμια και να ακολουθήσουν τις αρχές που διέπουν τα πειράματα εξόλκευσης για τον έλεγχο συνάφειας μεταξύ χαλύβδινων ράβδων και σκυροδέματος. Εκτενής αναφορά έχει γίνει στην παράγραφο 9.2.

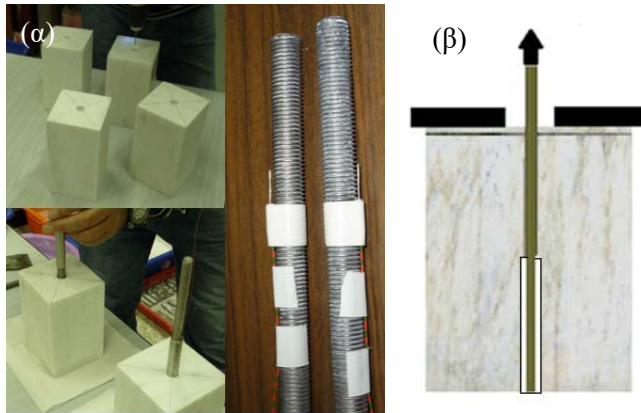
Αρχικά επιλέγεται μαρμάρινο πρίσμα διαστάσεων 10cm x 10cm x 15cm. Γίνεται διαμπερή οπή στο κέντρο της διατομής. Το κενό της οπής πληρώνεται με τσιμεντοκονία λευκού τσιμέντου Aalborg από το κάτω άκρο έως το μέσο του ύψους της οπής. Στη συνέχεια εισάγεται η ράβδος. Με αυτό τον τρόπο το μήκος αγκύρωσης ράβδου με το μάρμαρο εκτείνεται από το μέσο του ύψους έως το κάτω άκρο και το υπόλοιπο παραμένει ασύνδετο, χωρίς τσιμεντοκονία (Εικ. 9.38).



Εικόνα 9.38 (α) Σχηματική απεικόνιση δοκιμίου εξόλκευσης οπλισμένου σκυροδέματος (137), (β) τροποποιημένο δοκίμιο εξόλκευσης ράβδου τιτανίου σε μαρμάρινο όγκο

Η τελική μορφή των πειραμάτων (σχηματικά) δίνεται στην Εικ. 9.39.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.39 (α) Παρασκευή δοκιμίων, (β) σχηματική τομή πειράματος pull-out.

Όπως και στα αρχικά πειράματα, οι ακουστικοί αισθητήρες διατάσσονται κοντά στην εξεταζόμενη περιοχή. Τοποθετούνται 8 αισθητήρες περιμετρικά του μαρμάρινου όγκου (Εικ. 9.40).

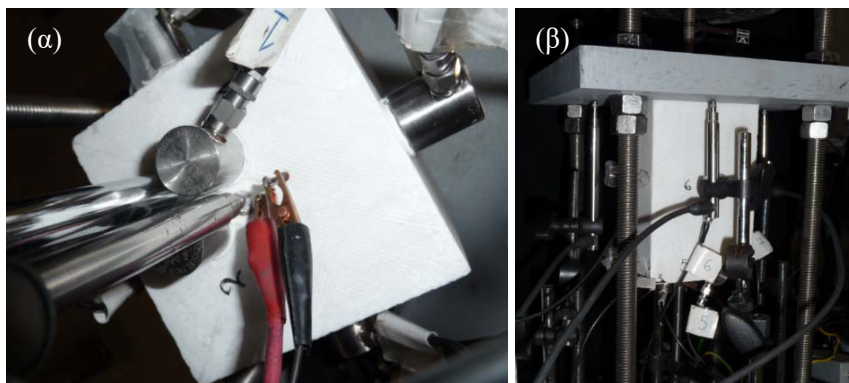


Εικόνα 9.40 Θέσεις ακουστικών αισθητήρων

Εξόλκευση

Για την καταγραφή των ηλεκτρικών σημάτων τοποθετήθηκαν δύο ηλεκτρικές επαφές στο κάτω άκρο του μαρμαρίνου όγκου. Η μία τοποθετήθηκε όπως και στα αρχικά δοκίμια κατά την πήξη της τσιμεντοκονίας ενώ για τη δεύτερη επαφή έγινε οπή διαμέτρου 1.5mm και βάθους 1cm στο μάρμαρο (Εικ. 9.41). Οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των μετρητικών συστημάτων διατηρήθηκαν σταθερά για να μπορέσουν να ελεγχθούν τα αποτελέσματα των τεχνικών που εφαρμόζονται μεταξύ των αρχικών και των νέων πειραμάτων.

Για την παρακολούθηση της ολίσθησης της ράβδου τοποθετήθηκε μηκυσιόμετρο τύπου LVDT στο κάτω άκρο της ράβδου (Εικ. 9.41).



Εικόνα 9.41 (α) Θέσεις μετρητικών συστημάτων, (β) θέσεις LVDTs κάτω από την πλάκα συγκράτησης του μαρμάρου.

Η πειραματική διάταξη παραμένει ακριβώς η ίδια με τα πειράματα της παραγράφου 9.4. Για την καταγραφή της μετακίνησης της μεταλλικής πλάκας συγκράτησης του μαρμάρου τοποθετήθηκαν 3 μηκυσιόμετρα τύπου LVDT. Οι θέσεις τους δίνονται στην Εικ. 9.41.

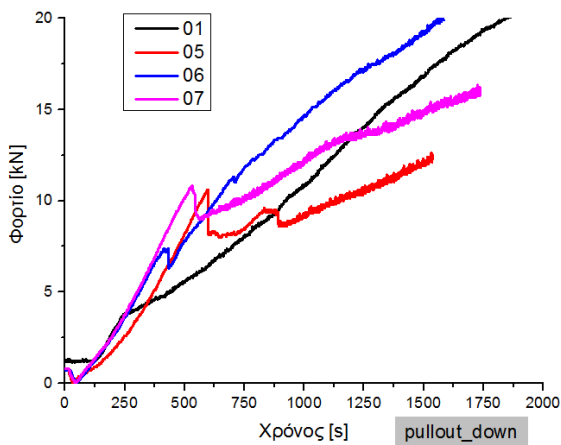
Η ράβδος ολίσθησε επιτυχώς. Η σύνδεση μεταξύ τσιμεντοκονίας και ράβδου έμεινε ανέπαφη (Εικ. 9.42). Επίσης, δεν δημιουργήθηκε ο κώνος εξόλκευσης ο οποίος παρατηρούνταν συστηματικά στα κλασσικά πειράματα εξόλκευσης (Εικ. 9.42).



Εικόνα 9.42 (α), (β) Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος, (γ) χαρακτηριστικός κώνος δοκιμής εξόλκευσης.

9.8.1 Αποτελέσματα

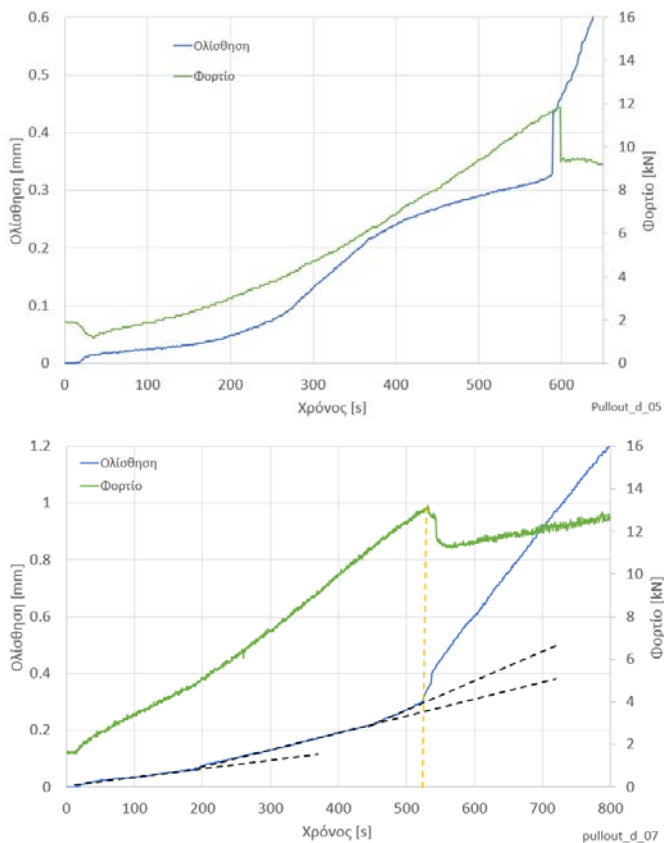
Η μηχανική συμπεριφορά των νέων πειραμάτων μέχρι το φορτίο όπου στα κλασικά πειράματα εξόλκευσης ήταν το μέγιστο και αντιστοιχεί στη στιγμή όπου η συνάφεια μεταξύ της ράβδου και του μαρμάρου έχει καταλυθεί, ακολουθεί την ίδια λογική. Η διαφορά είναι ότι μετά από αυτό το σημείο, η σύνδεση συνεχίζει να παραλαμβάνει φορτίο, γι' αυτό και στο διάγραμμα της Εικ. 9.43 το φορτίο εξακολουθεί να αυξάνεται έχοντας σημειώσει μία χαρακτηριστική μικρή πτώση μετά το «μέγιστο». Αυτό οφείλεται στη τριβή μεταξύ του τοιχώματος της οπής του μαρμάρου με το κονίαμα.



Εικόνα 9.43 Διάγραμμα Φορτίου – Χρόνου για κάποια ενδεικτικά πειράματα εξόλκευσης *pullout_down*.

Οι περιοχές που διακρίθηκαν στο διάγραμμα των ενδείξεων του LVDT στα αρχικά πειράματα εξόλκευσης όπου η περιοχή αγκύρωσης της ράβδου είναι στο άνω άκρο του μαρμαρίνου όγκου, διακρίνονται και στα πειράματα όπου η αγκύρωση εκτείνεται στο κάτω μισό του ύψους του μαρμάρου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνεται η καμπύλη του φορτίου εξόλκευσης μαζί με την καθαρή ολίσθηση της ράβδου κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων (Εικ. 9.44).

Εξόλκευση

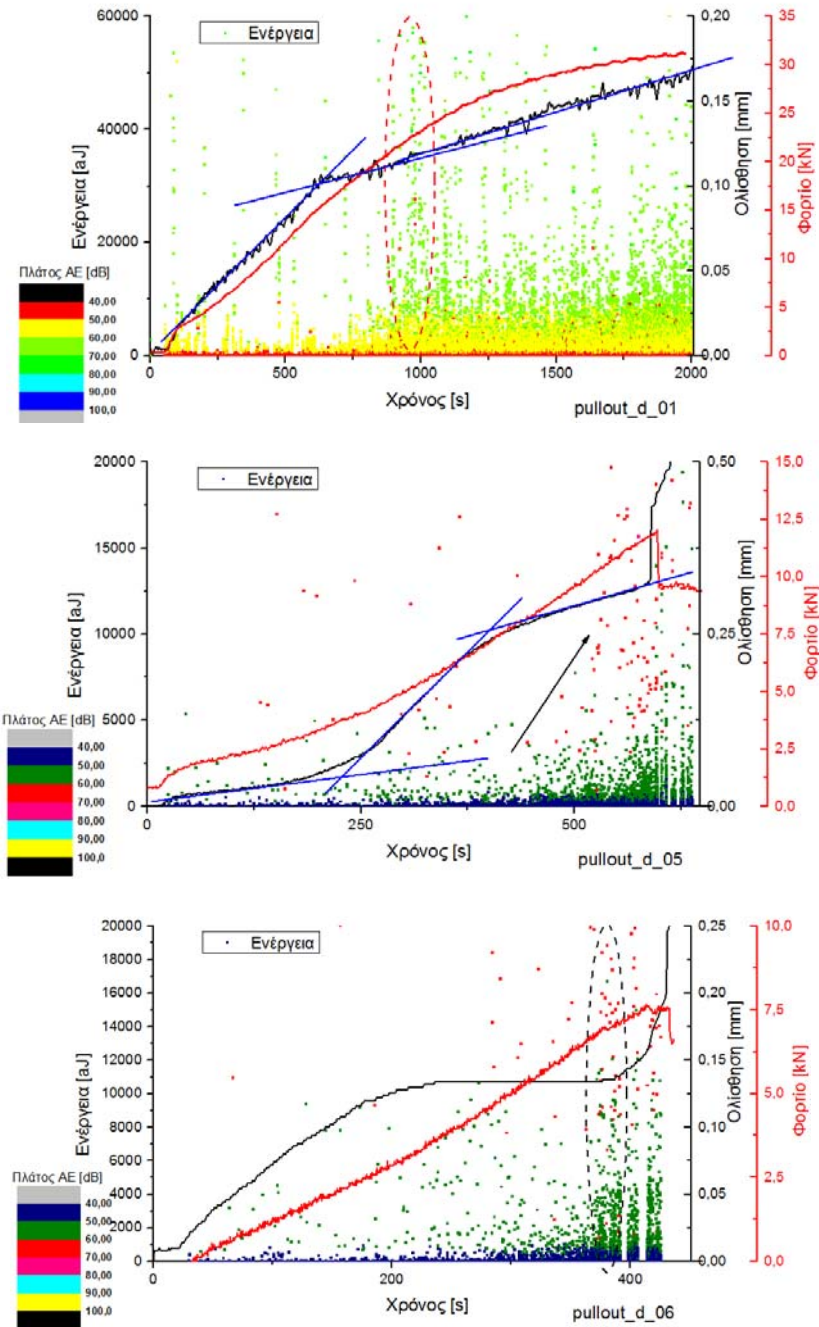


Εικόνα 9.44 Διάγραμμα φορτίου και καθαρής ολίσθησης της ράβδου ως προς το χρόνο για 2 χαρακτηριστικά πειράματα.

Η τροποποίηση των πειραματικών δοκιμών έγινε για να περιοριστούν τα ακουστικά γεγονότα που δεν αφορούν την εξόλκευση (ακουστικά γεγονότα λόγω συννοριακών συνθηκών), να ληφθούν ξεκάθαρα σήματα για το πότε ξεκινάει η ολίσθηση της ράβδου και αν αυτό μπορεί να εντοπιστεί έγκαιρα από την τεχνική των ακουστικών εκπομπών χωρίς όμως να αυξηθεί το μέγεθος των δοκιμών.

Στο διάγραμμα της Εικ. 9.45 δίνεται η ενέργεια των ακουστικών σημάτων ως προς το χρόνο και το αντίστοιχο πλάτος τους σε χρωματοκλίμακα. Δίνεται επίσης η χρονική μεταβολή της ολίσθησης της ράβδου και του φορτίου κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Εξόλκευση

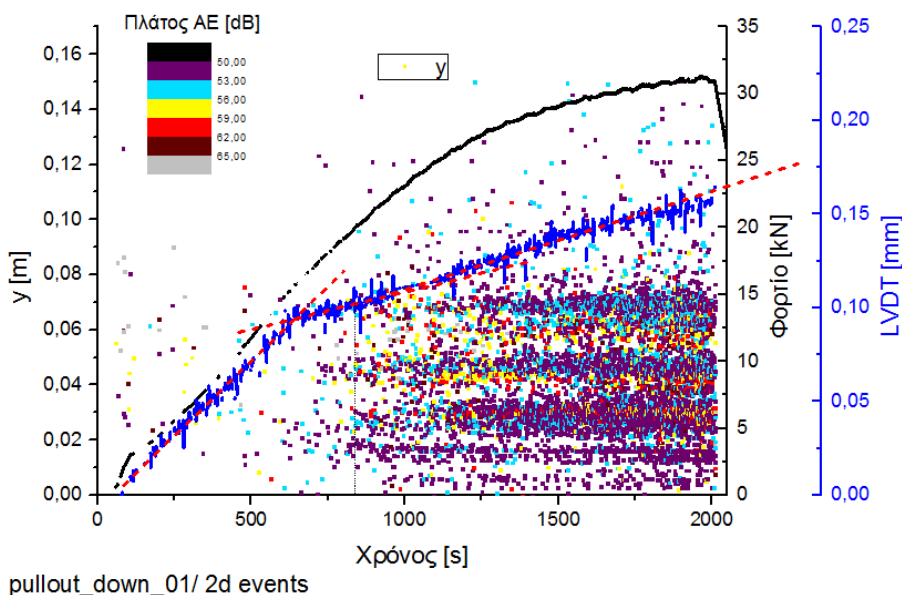


Εικόνα 9.45 Ενέργεια ακουστικών εκπομπών ως προς το χρόνο (πλάτος AE σε χρωματοκλίμακα), μετακίνηση ράβδου και φορτίου ως προς το χρόνο για 3 χαρακτηριστικά πειράματα pullout με αγκύρωση στο κάτω άκρο της σπής του μαρμάρου..

Εξόλκευση

Τα σήματα δείχνουν μια ξεκάθαρη συγκέντρωση τη στιγμή που η μετακίνηση της ράβδου αλλάζει κλίση για τρίτη φορά. Στα αρχικά στάδια, τα σήματα είναι συγκριτικά λιγότερα σε σχέση με εκείνα μετά την έναρξη της ολίσθησης της ράβδου γιατί έχουν περιοριστεί τα παρασιτικά ακουστικά γεγονότα. Στα πειράματα αυτά έχει απομακρυνθεί η μεταλλική πλάκα από την εξεταζόμενη περιοχή και οι αισθητήρες είναι σημαντικά μακριά από την πειραματική διάταξη.

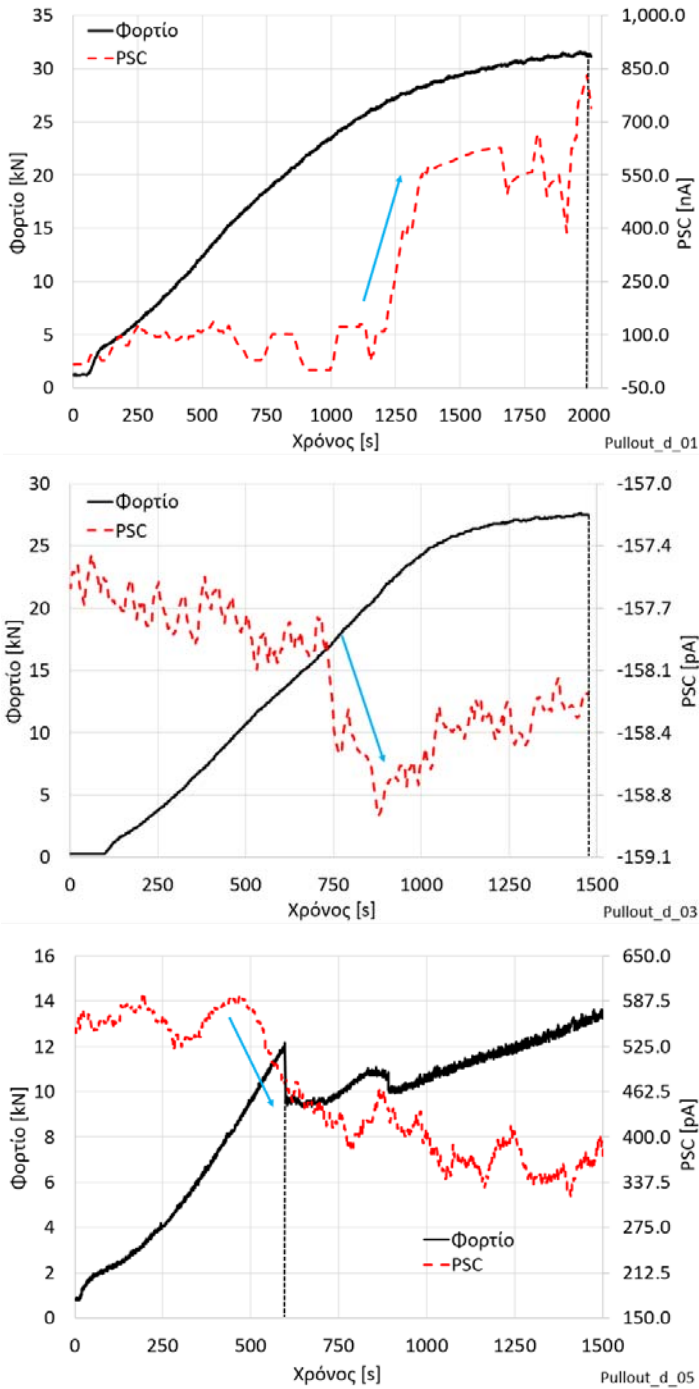
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο εντοπισμός της θέσης των ακουστικών εκπομπών καθ' ύψος της διεπιφάνειας μεταξύ ράβδου και μαρμάρου θα είναι πιο ξεκάθαρος από την πρώτη σειρά δοκιμίων. Στην Εικ. 9.46 δίνεται η θέση των ακουστικών γεγονότων καθ' ύψος του δοκιμίου με το αντίστοιχο πλάτος τους σε σχέση με τη μεταβολή της μετακίνησης της ράβδου και του φορτίου. Είναι εμφανής η πύκνωση των ακουστικών γεγονότων στην περιοχή όπου εκτείνεται η αγκύρωση της ράβδου με το μάρμαρο, δηλαδή από το κάτω άκρο του μαρμάρου ($y=0.0\text{m}$) μέχρι το μέσο του ύψους του ($y=0.075\text{m}$), και αυτό συμβαίνει λίγο πριν τη στιγμή όπου το μηκυνσιόμετρο καταγράφει την καθαρή ολίσθηση της ράβδου.



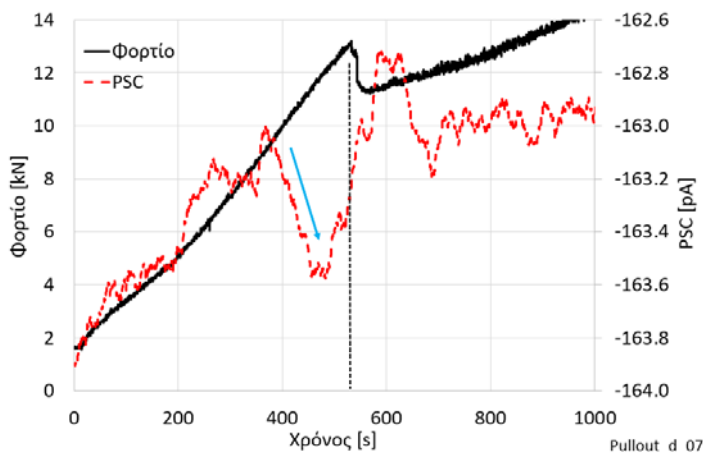
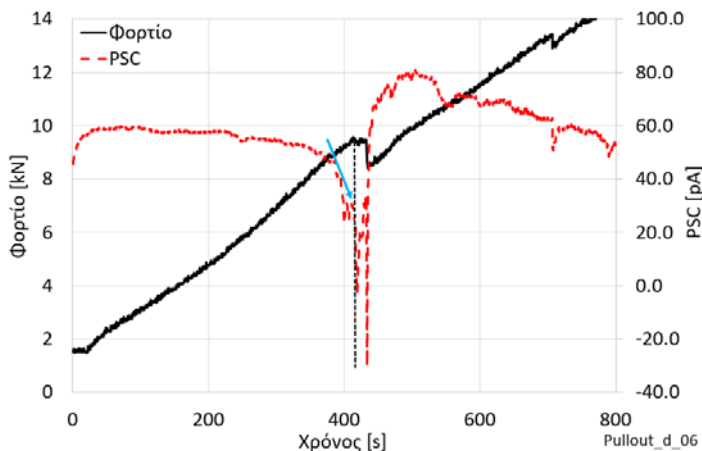
Εικόνα 9.46 Χρονική καταγραφή της καθ' ύψους θέσης των ακουστικών σημάτων με το αντίστοιχο πλάτος τους σε χρωματοκλίμακα, χρονική μεταβολή της μετακίνησης της ράβδου και χρονική μεταβολή του φορτίου.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών καταγραφών, κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά μιας και συστηματικά παρατηρείται μία χαρακτηριστική μεταβολή λίγο πριν το φορτίο όπου έχουμε κατάλυση της συνάφειας των στοιχείων της σύνδεσης. Στην Εικ. 9.47 δίνονται τα διαγράμματα των ηλεκτρικών καταγραφών (PSC) για πέντε ενδεικτικά πειράματα.

Εξόλκευση



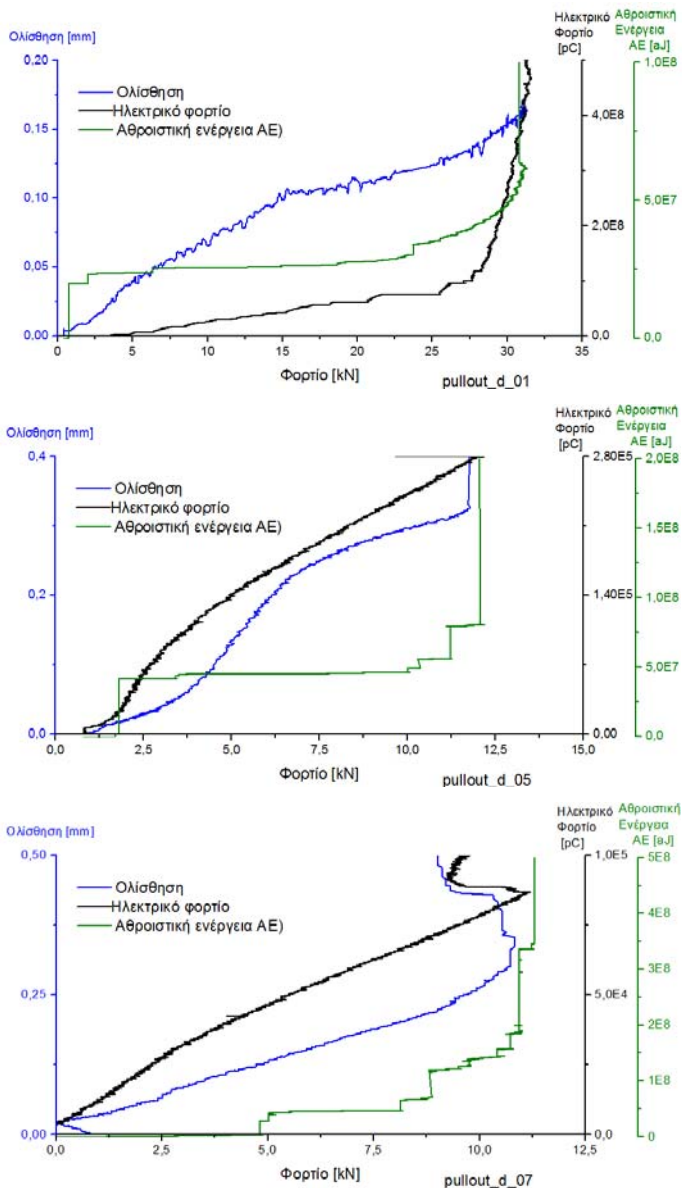
Εξόλκευση



Εικόνα 9.47 Διάγραμμα ηλεκτρικών καταγραφών (PSC) και φορτίου ως προς το χρόνο για πέντε χαρακτηριστικά πειράματα.

Συνοψίζοντας και συνδυάζοντας σε ένα διάγραμμα τα αποτελέσματα από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης με εκείνα τα οποία προέκυψαν από τις τεχνικές οι οποίες εφαρμοσθηκαν προκύπτουν ενδιαφέρουσες αντιστοιχίες.

Εξόλκευση



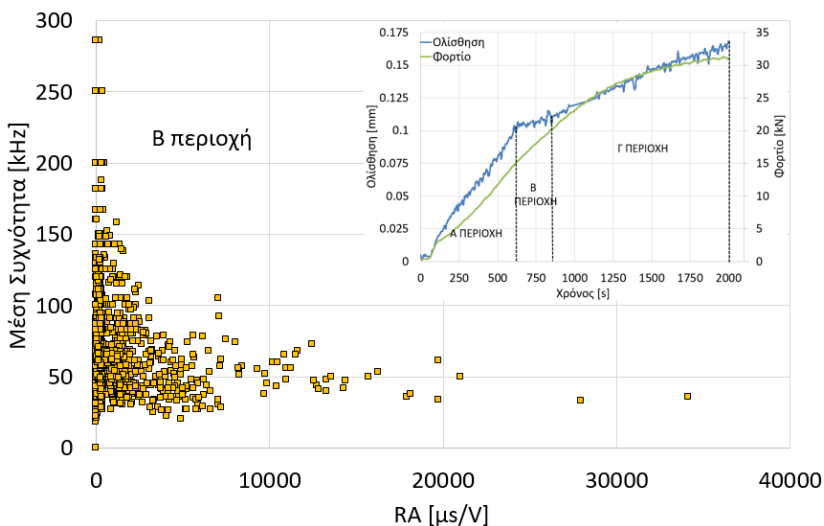
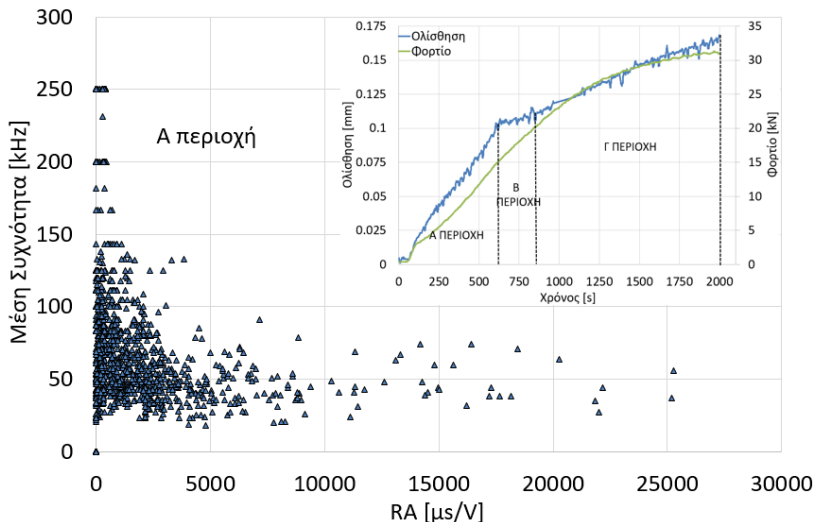
Εικόνα 9.48 Διάγραμμα ολίσθησης, ηλεκτρικού φορτίου, αθροιστική ενέργεια Ακουστικών Εκπομπών (AE) ως προς το φορτίο για 3 χαρακτηριστικά πειράματα.

Οι μηχανισμοί οι οποίοι λαμβάνουν χώρα κατά τη δοκιμή της εξόλκευσης είναι η ελαστική παραμορφωση της ράβδου, η ρηγμάτωση του κονιάματος, και η ολίσθηση της ράβδου (τριβή). Αν ήταν εφικτό αυτά τα στάδια να εντοπιστούν κατά τη διάρκεια του πειράματος θα ήταν χρήσιμο για τη μελέτη του φαινομένου. Η ταυτοποίηση σημάτων είναι ένα πρόβλημα που απασχολεί ιδιαίτερα τα έργα του μηχανικού και έχουν γίνει πολλές έρευνες γύρω από αυτό. Στα πειράματα της εξόλκευσης

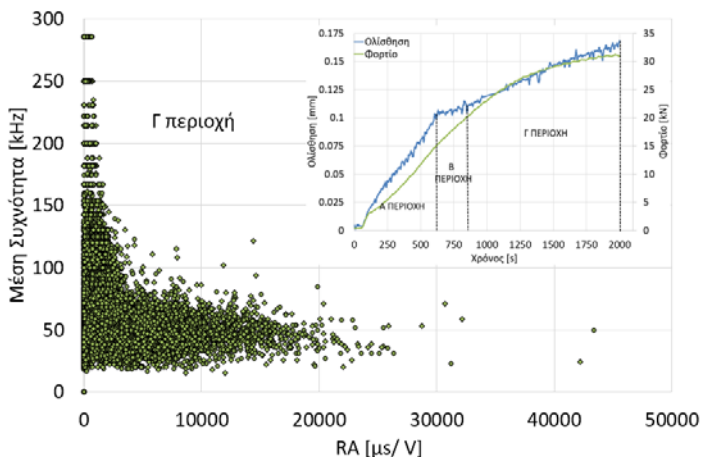
Εξόλκευση

σε δοκίμια μαρμάρου όπου τα υλικά που συμμετέχουν είναι τρία διαφορετικά, είναι εξαιρετικά δύσκολος ο σαφής διαχωρισμός της πηγής των ακουστικών σημάτων.

Στο διάγραμμα της ολισθησης της ράβδου σε όλα τα πειράματα τα οποία έχουν γίνει έχει διαπιστωθεί ο διακριτός διαχωρισμός της καμπύλης σε τρία τμήματα πριν το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η σύνδεση. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα της μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA για τις χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους του κάθε πειράματος.



Εξόλκευση

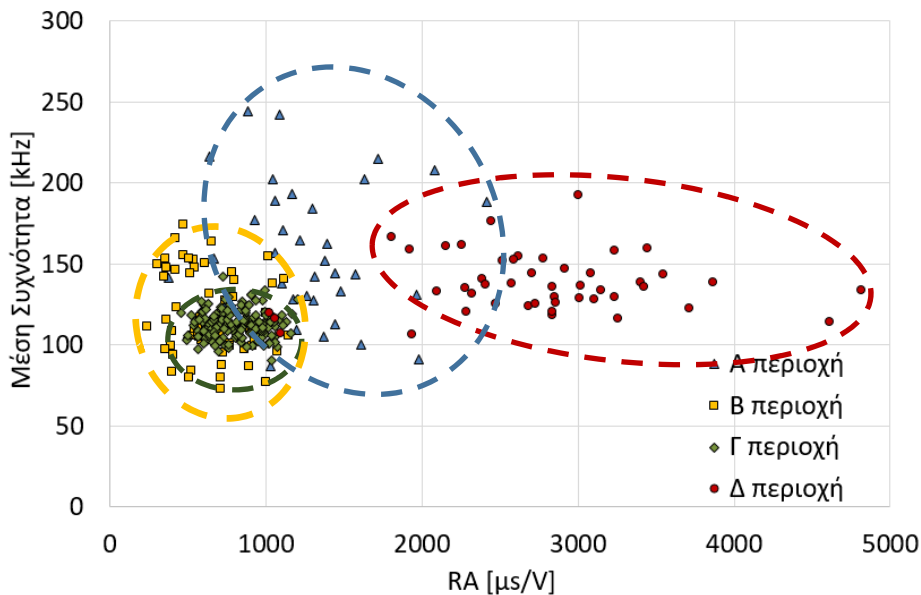


Εικόνα 9.49 Διάγραμμα μέσης συχνότητας ως προς την παράμετρο RA για τα τρία χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα όπως ορίζονται από το διάγραμμα ολίσθησης της ράβδου (ενσωματωμένο διάγραμμα).

Είναι χαρακτηριστικό ότι η παράμετρος RA αυξάνεται σημαντικά στην τρίτη χρονική περίοδο όπου ξεκινάει η ολίσθηση της ράβδου. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, συνήθως καταγραφές με υψηλό RA αντιστοιχούν σε διατμητικά σήματα όπως εκείνα της τριβής. Το φαινόμενο φαίνεται ακόμα πιο έντονο μετά το «μέγιστο φορτίο» όπου η σύνδεση έχει χάσει τη φέρουσα ικανότητα της και η ράβδος ολισθαίνει με μεγάλο ρυθμό (Δ περιοχή) (Εικ. 9.49).

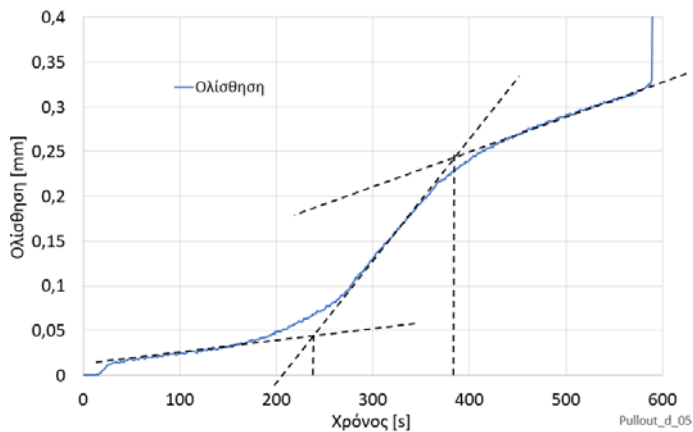
Συνοπτικά, στο διάγραμμα της Εικ. 9.50 δίνεται η σχέση της μέσης τιμής της παραμέτρου RA ως προς τις μέσες τιμές της συχνότητας των ακουστικών σημάτων για κάθε περιοχή. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα σήματα που αντιστοιχούν στο πρώτο χρονικό διάστημα (Α περιοχή) είναι συγκεντρωμένα αλλά με μεγαλύτερη διασπορά από εκείνα που έπονται (περιοχές Β, Γ). Η τιμή RA σταδιακά μειώνεται δείχνοντας ότι τα σήματα αυτά αντιστοιχούν σε εφελκυστικού τύπου αστοχίες. Στη συνέχεια ακολουθούν τα σήματα του τελευταίου χρονικού διαστήματος όπου έχει διαπιστωθεί ότι η ράβδος ολισθαίνει. Η τιμή της RA σε αυτό το διάστημα αυξάνεται δηλώνοντας την ύπαρξη έντονων διατμητικών σημάτων.

Εξόλκευση



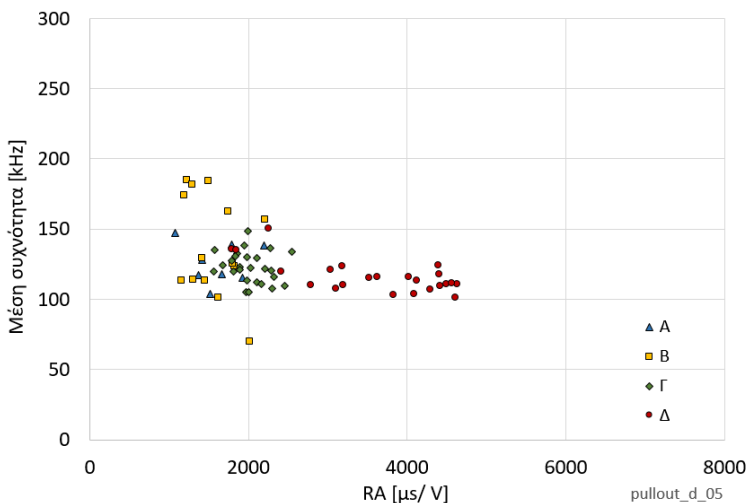
Εικόνα 9.50 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA για τα τρία χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα πριν αλλά και μετά (Δ περιοχή) το «μέγιστο» φορτίο όπως ορίζονται από το διάγραμμα ολίσθησης της ράβδου.

Ομοίως για άλλα δύο πειράματα.

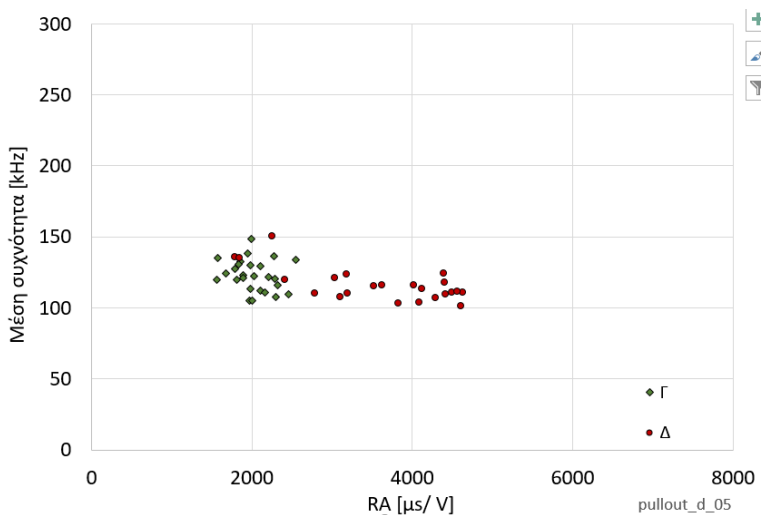


Εικόνα 9.51 Διάγραμμα ολίσθησης ράβδου κατά τη διάρκεια του πειράματος Pullout_05.

Εξόλκευση



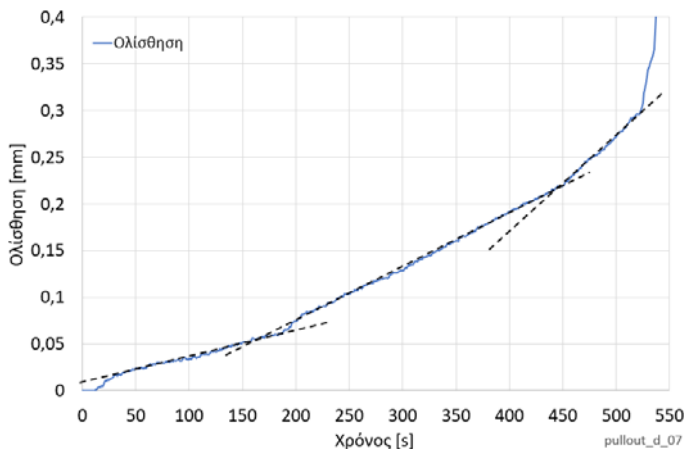
Εικόνα 9.52 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παράμετρου RA για τα τέσσερα χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα όπως ορίζονται από το διάγραμμα ολίσθησης της ράβδου (Pullout_05).



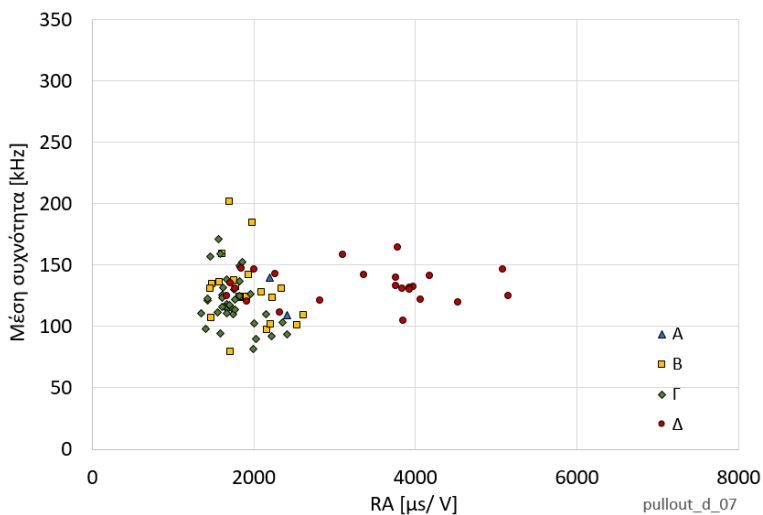
Εικόνα 9.53 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παράμετρου RA πριν και μετά το «μέγιστο» φορτίο (Pullout_05).

Στο διάγραμμα της Εικ. 9.53 απομονώνονται οι χρονικές περιόδους πριν και μετά το «μέγιστο» φορτίου. Όπως και πριν, τα σήματα των πρώτων χρονικών περιοχών είναι συγκεντρωμένα και δεν διαφέρουν σημαντικά οι μέσες συχνότητες και οι παράμετροι RA θεωρώντας ότι τα σήματα σε αυτά τα διαστήματα είναι ίδιου τύπου (εφελκυστικά). Τα σήματα της τελευταίας χρονικής περιόδου όπου η ράβδος ολισθαίνει έχουν σημαντική διαφορά στην παράμετρο RA η οποία μειώνεται σημαντικά.

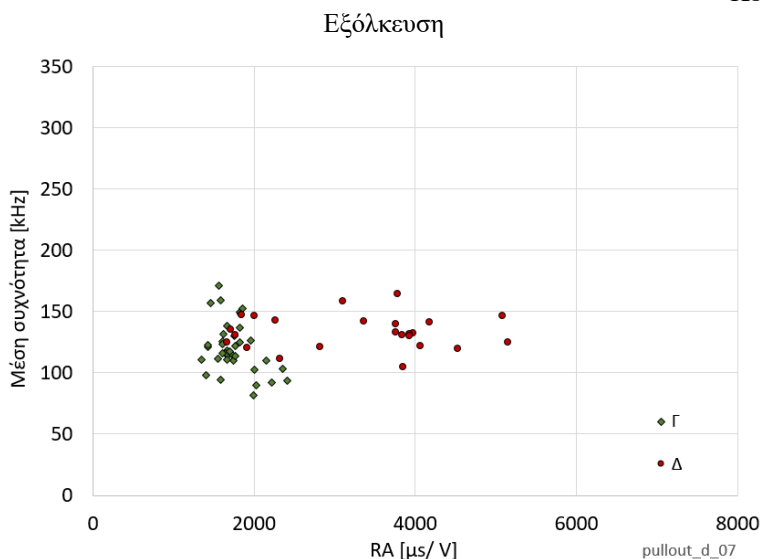
Εξόλκευση



Εικόνα 9.54 Διάγραμμα ολίσθησης ράβδου κατά τη διάρκεια του πειράματος Pullout_07.



Εικόνα 9.55 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA για τα τέσσερα χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα όπως ορίζονται από το διάγραμμα ολίσθησης της ράβδου (Pullout_07).



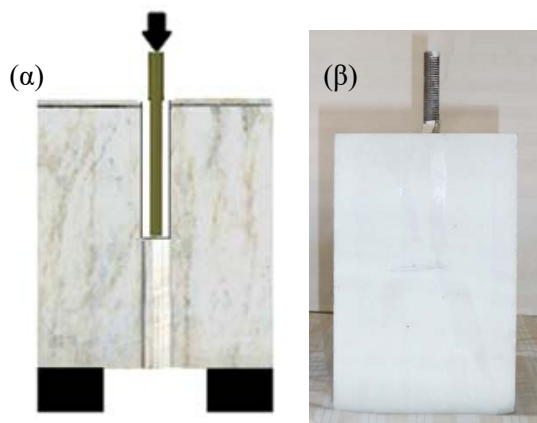
Εικόνα 9.56 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA πριν και μετά το «μέγιστο» φορτίο (Pullout_07).

Και σε αυτό το πείραμα, στην τέταρτη χρονική περιοχή η οποία περιλαμβάνει σήματα που καταγράφονται μετά το μέγιστο «φορτίο» όπου κυριαρχεί ως φαινόμενο η ολίσθηση της ράβδου, τα σήματα ξεχωρίζουν από τα προγενέστερα. Η συχνότητα δεν μεταβάλλεται σημαντικά όμως η παράμετρος RA είναι σαφώς μεγαλύτερη.

9.9 Τροποποίηση δοκιμίων- Πειράματα push in

Τέλος, μέχρι τώρα έχουν γίνει δοκιμές εξόλκευσης κατά τις οποίες η ράβδος εφελκύεται. Θα ήταν ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η συμπεριφορά του συμπλέγματος μάρμαρο-τσιμεντοκονία-ράβδος όταν η ράβδος θλίβεται. Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν δοκίμια όπου το μήκος αγκύρωσης ήταν στο άνω μισό του δοκιμίου όπως τα αρχικά δοκίμια. Η διαφορά αυτή τη φορά είναι ότι το μάρμαρο θα στηρίζεται στη βάση του και το στέλεχος της μηχανής θα θλίβει τη ράβδο της οποίας το ελεύθερο μήκος έχει μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό για να αποφευχθεί ο κίνδυνος λογισμού (Εικ. 9.57). Τα πειράματα αυτά στο εξής θα αναφέρονται ως πειράματα Push_in.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.57 (α) Σχηματική απεικόνιση πειράματος push-in, (β) παρασκευή αντίστοιχων δοκιμίων.



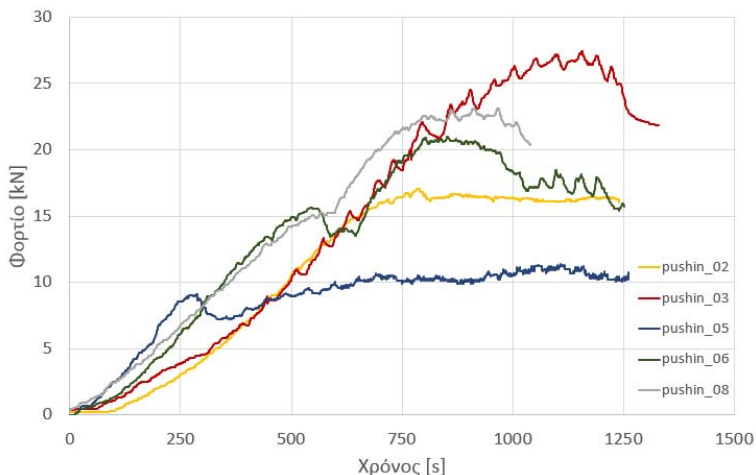
Εικόνα 9.58 Πειραματική διάταξη δοκιμίων push-in.

Όμοια με τα προηγούμενα πειράματα, κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφονταν οι μετακινήσεις της μεταλλικής πλάκας στήριξης και της ράβδου του δοκιμίου με ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα τύπου LVDT (Εικ. 9.58). Για την ομαλή εφαρμογή του φορτίου στο άνω άκρο της ράβδου τοποθετήθηκε ένα στέλεχος ελεύθερης περιστροφής (Εικ. 9.58). Επίσης 8 ακουστικοί αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο άνω άκρο του μαρμάρου κοντά στο μήκος αγκύρωσης της ράβδου και μακριά από τη στήριξη (η οποία βρίσκεται στο κάτω άκρο του μαρμάρου). Τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στο άνω άκρο του μήκους αγκύρωσης της ράβδου.

9.9.1 Αποτελέσματα

Στην Εικ. 9.59 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου ως προς το χρόνο για τα πειράματα push in.

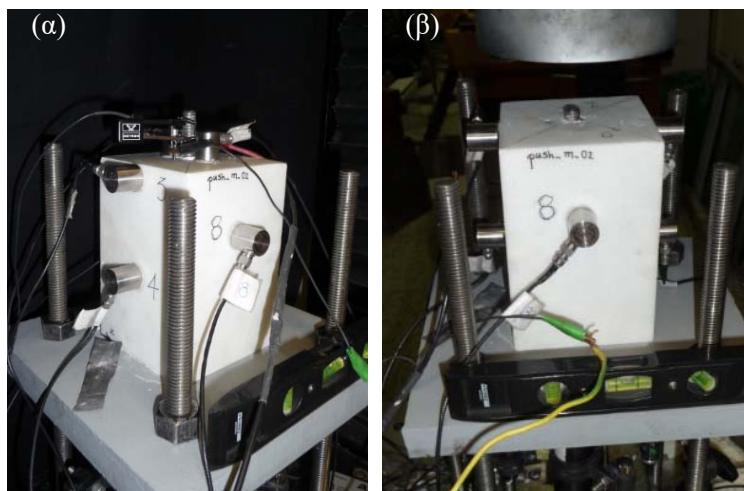
Εξόλκευση



Εικόνα 9.59 Διαγράμματα φορτίου ως προς το χρόνο για 5 πειράματα push-in..

Οι διαφορές που παρατηρούνται οφείλονται κυρίως στη διαφορετική σύσταση της τσιμεντοκονίας πλήρωσης του κενού μεταξύ της ράβδου και του μαρμάρου.

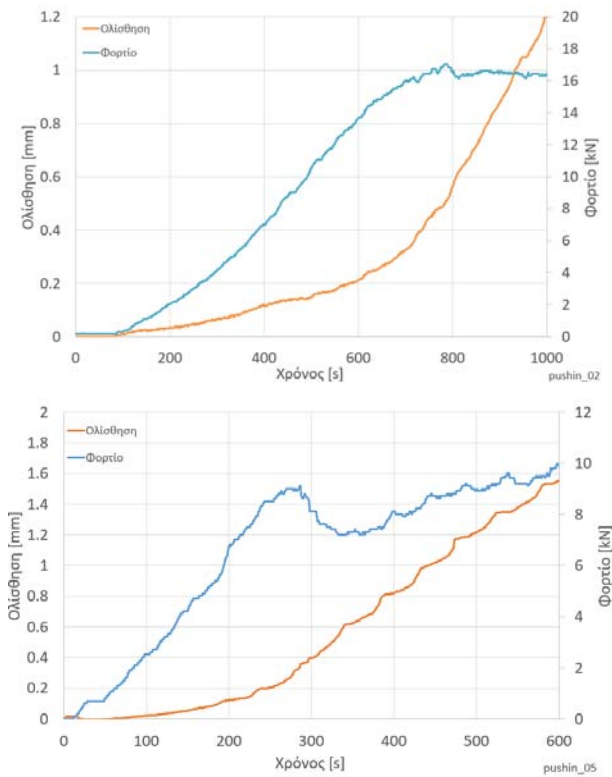
Ενδεικτικά στην Εικ. 9.60 δίνεται η εικόνα του δοκιμίου πριν και μετά το πείραμα. Η ράβδος πιέζεται και εισέρχεται στο εσωτερικό της οπής του μαρμάρου.



Εικόνα 9.60 (α) Δοκίμιο push-in πριν και (β) μετά τη δοκιμή.

Τα διαγράμματα της δύναμης εξόλκεσης αλλά και η καθαρή ολίσθηση της ράβδου για δύο χαρακτηριστικά πειράματα δίνονται παρακάτω.

Εξόλκευση

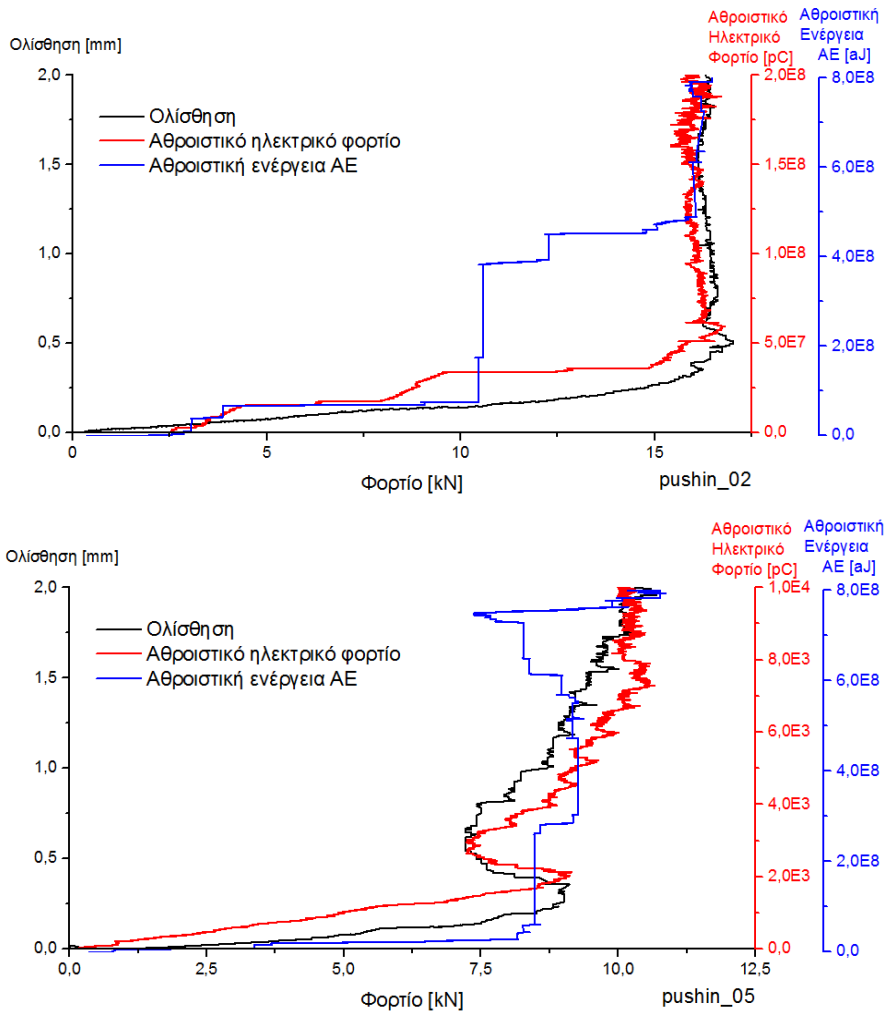


Εικόνα 9.61 Διαγράμματα δύναμης εξόλκευσης και καθαρής ολίσθησης ράβδου για 2 χαρακτηριστικά πειράματα push-in.

Είναι χαρακτηριστικό ότι στο πείραμα push-in δεν υπάρχει πτώση φορτίου μετά το «μέγιστο» το οποίο καταγράφεται αλλά παραμένει σταθερό ή συνεχίζει να αυξάνεται λόγω της τριβής μεταξύ της ολισθαίνουσας ράβδου και του μαρμάρου. Η αύξηση της δύναμης οφείλεται πιθανότατα στην αναπτυσσόμενη τέμνουσα συνιστώσα λόγω λοξότητας της ράβδου από ατέλειες κατά την παρασκευή των δοκιμίων.

Στα διαγράμματα της Εικ. 9.62 δίνεται η μεταβολή της ολίσθησης της ράβδου, του αθροιστικού ηλεκτρικού φορτίου και της αθροιστικής ακουστικής ενέργειας ως προς το φορτίο εξόλκευσης για δύο πειράματα. Υπάρχει σημαντική χρονική αλληλοσχετίση μεταξύ των τριών μεγεθών καθώς αυξάνεται το φορτίο της εξόλκευσης.

Εξόλκευση

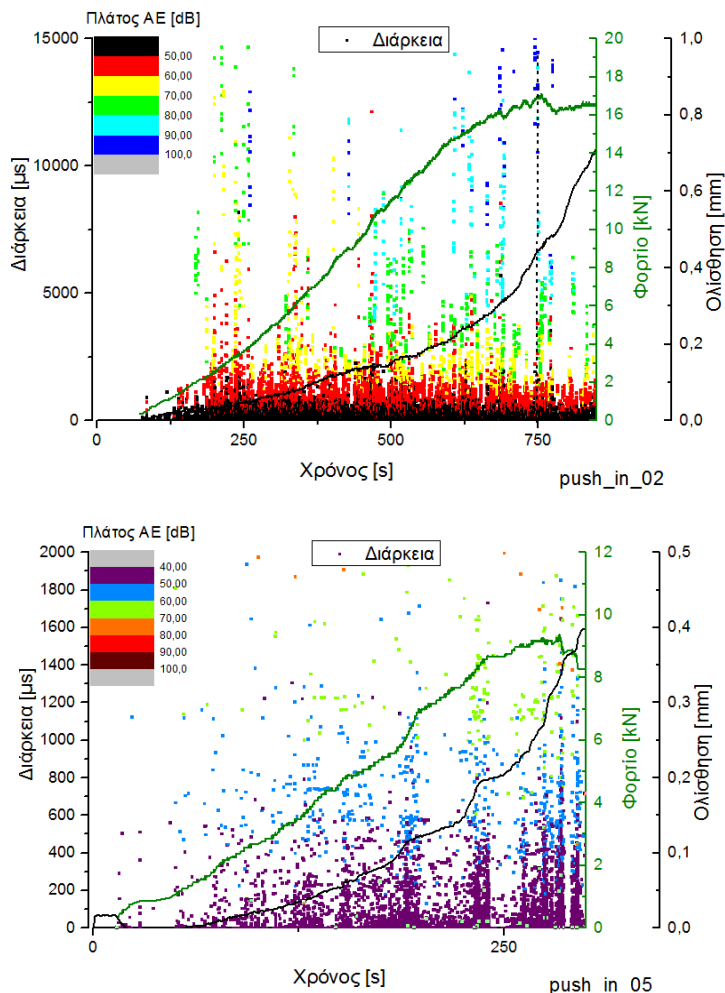


Εικόνα 9.62 Διάγραμμα ολίσθησης, ηλεκτρικού φορτίου, αθροιστική ενέργεια Ακουστικών Εκπομπών (ΑΕ) ως προς το φορτίο για δύο χαρακτηριστικά πειράματα.

Στο διάγραμμα της Εικ. 9.63 δίνεται η χρονική μεταβολή του φορτίου εξόλκευσης, της καθαρής σχετικής ολίσθησης της ράβδου και της διάρκειας των ακουστικών σημάτων με το αντίστοιχο πλάτος τους.

Η διακριτή διαφορά με τα προηγούμενα πειράματα είναι ότι υπάρχει έντονη ακουστική δραστηριότητα χρονικά αρκετά νωρίς. Η πυκνότητα και η διάρκεια των σημάτων είναι σημαντικά υψηλή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος μέχρι το μέγιστο φορτίο.

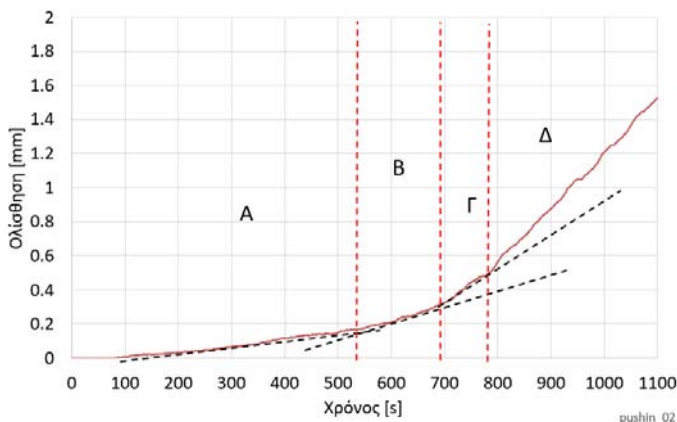
Εξόλκευση



Εικόνα 9.63 Ενέργεια ακουστικών εκπομπών ως προς το χρόνο (πλάτος AE σε χρωματοκλίμακα), μετακίνηση ράβδου και φορτίου ως προς το χρόνο.

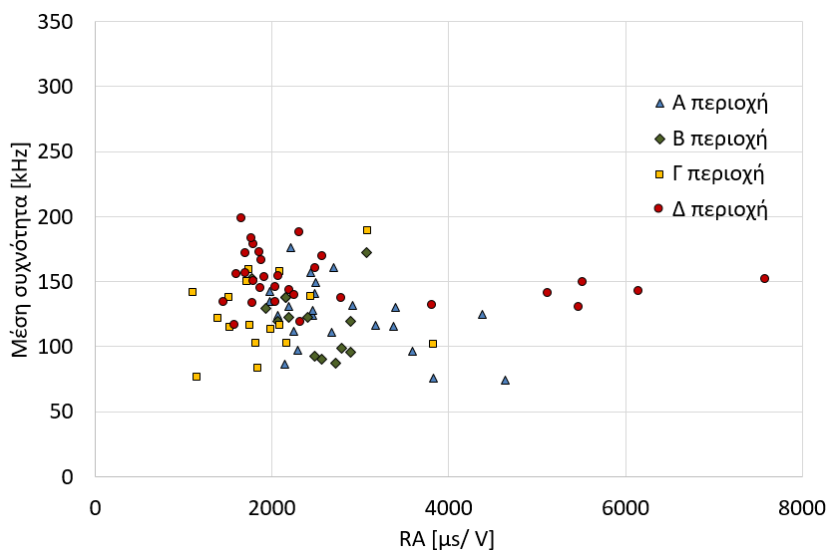
Για τον προσδιορισμό των περιοχών όπου θα μελετηθεί η μεταβολή των παραμέτρων (Μέση συχνότητα και $RA = Rise\ time / Amplitude$) των ακουστικών εκπομπών χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα της ολίσθησης της ράβδου. Στην Εικ. 9.64 παρατηρούνται 4 περιοχές όπου η κλίση της καμπύλης της ολίσθησης αλλάζει.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.64 Σχετική ολίσθηση ράβδου κατά τη διάρκεια του πειράματος.

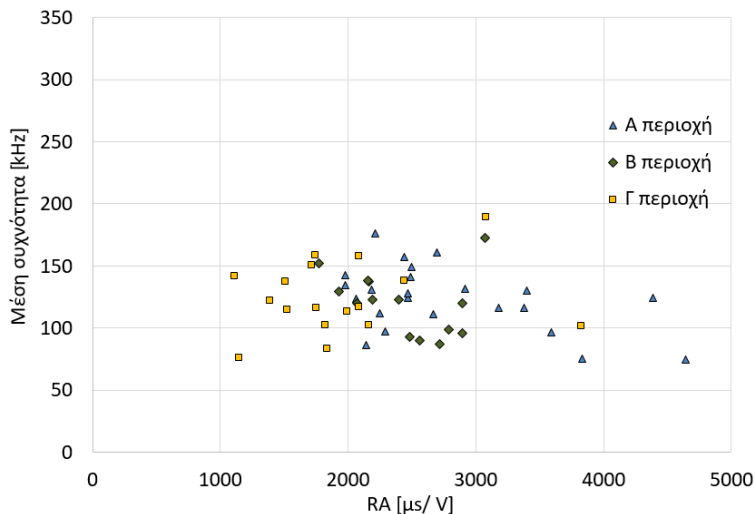
Τα διαγράμματα των μέσων συχνοτήτων ως προς την παράμετρο RA για τα παραπάνω χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα δίνονται στην Εικ. 9.65.



Εικόνα 9.65 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA για τα τέσσερα χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα όπως ορίζονται από το διάγραμμα ολίσθησης της ράβδου (pushin_02).

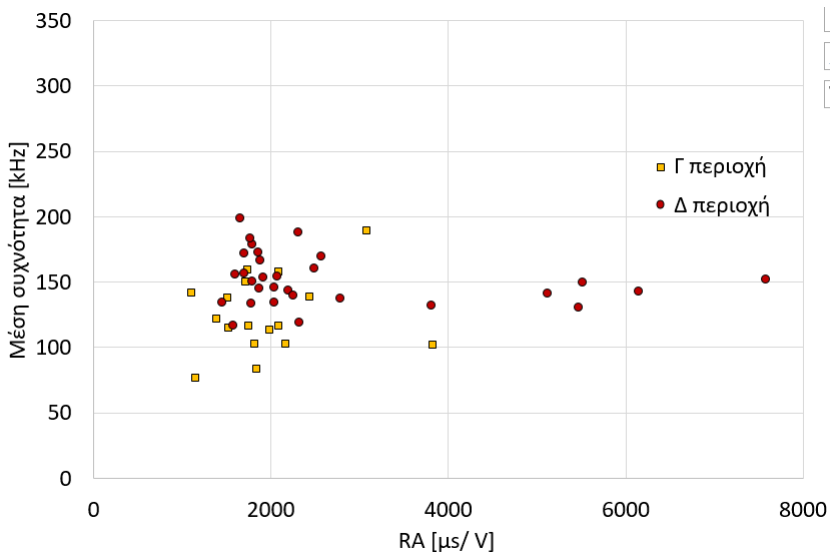
Απομονώνοντας τα διαγράμματα (Εικ. 9.66) φαίνεται στα πρώτα τρία χρονικά διαστήματα ότι η συχνότητα διατηρείται στις ίδιες τιμές και η παράμετρος RA μειώνεται.

Εξόλκευση



Εικόνα 9.66 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA για τα τρία πρώτα χρονικά διαστήματα (pushin_02).

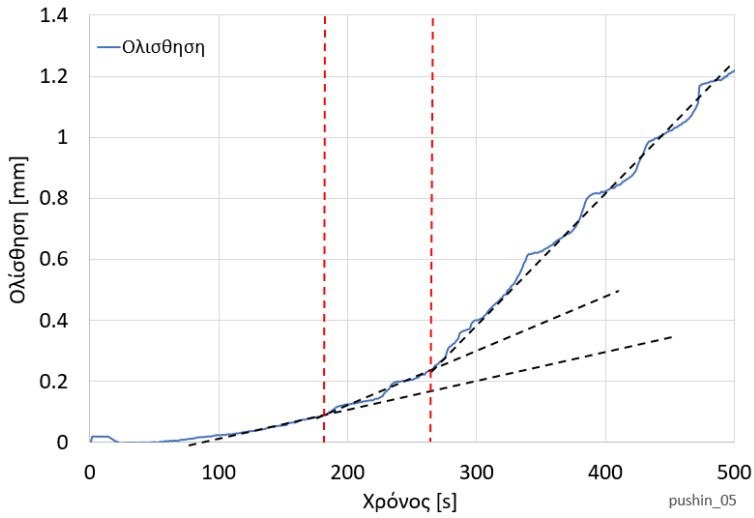
Μετά όμως το μέγιστο φορτίο η παράμετρος RA δείχνει να αυξάνεται (Εικ. 9.67).



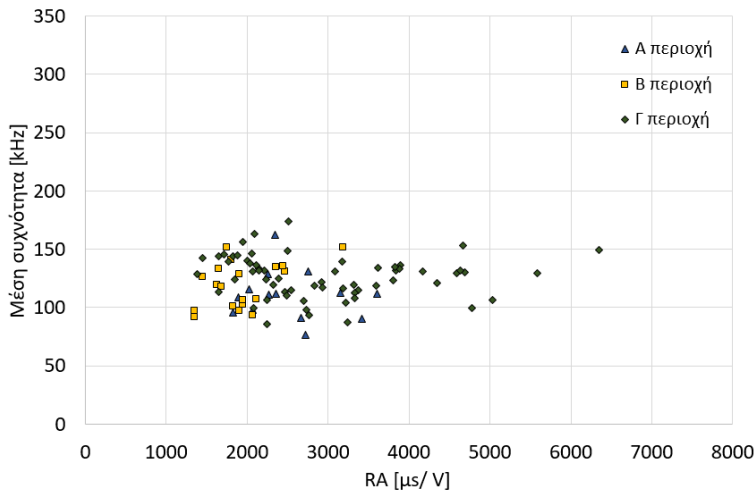
Εικόνα 9.67 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA πριν και μετά το «μέγιστο» φορτίο (pushin_02).

Όμοιες είναι οι παρατηρήσεις για τα αντίστοιχα διαγράμματα και για ένα ακόμα πείραμα.

Εξόλκευση

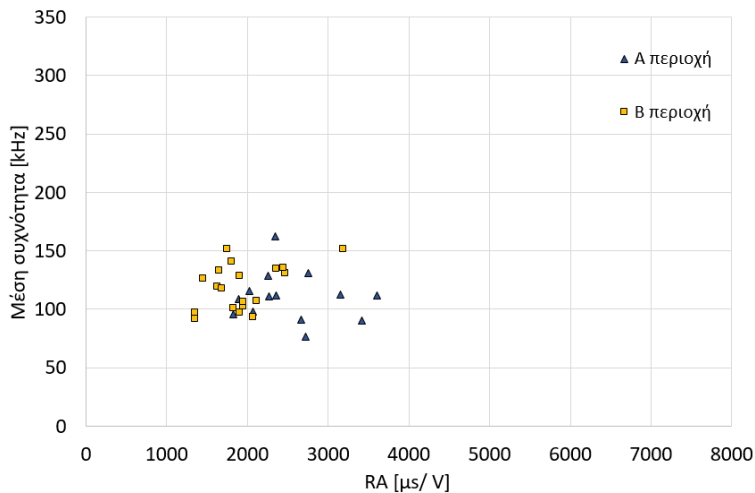


Εικόνα 9.68 Σχετική ολίσθηση ράβδου και αριθμός κτύπων ανά δευτερόλεπτο οι οποίοι καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

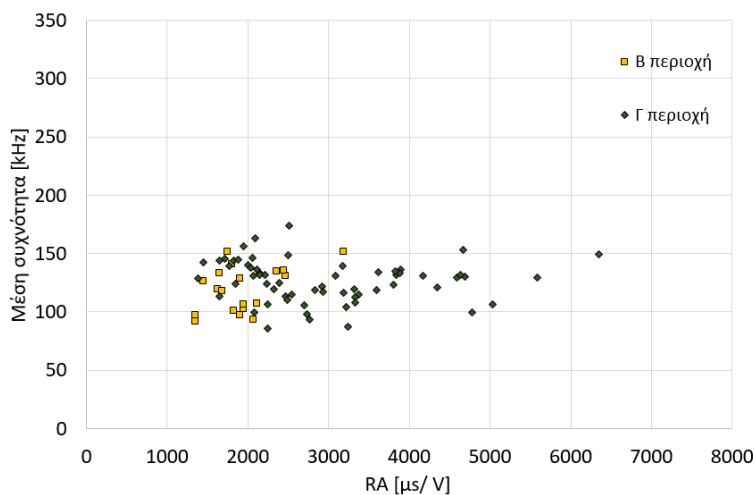


Εικόνα 9.69 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA για τα τρία χρονικά διαστήματα (pushin_05).

Εξόλκευση



Εικόνα 9.70 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA για τα δύο πρώτα χρονικά διαστήματα (pushin_05).



Εικόνα 9.71 Διάγραμμα των μέσων τιμών της συχνότητας ως προς τις μέσες τιμές της παραμέτρου RA πριν και μετά το «μέγιστο» φορτίο (pushin_05).

10. Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου, συγκολλημένου με ράβδους τιτανίου

10.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφούν οι παραδοχές αλλά και ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται ο οπλισμός για την αποκατάσταση μίας θραυσμένης δοκού.

Η αναπαραγωγή πλήθους πειραμάτων στο εργαστήριο στα οποία εξετάζονται δοκίμια- προσομοιώματα επιστυλίων είναι δαπανηρή, χρονοβόρα και δύσκολη. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να μπορούν επαρκώς βαθμονομημένα αριθμητικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων να αναπαραστήσουν συγκεκριμένα προβλήματα επιστυλίων και να δίνονται οι σωστές εντατικές καταστάσεις ώστε να επιλέγεται η βέλτιστη δυνατή τόσο στατικά όσο και οικονομικά λύση αλλά και να επιτυγχάνεται η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση στο μνημείο.

10.2 Μελέτη σύνδεσης

Στα έργα αναστήλωσης αρχαίων μνημείων ένα σύνθετο πρόβλημα είναι η αποκατάσταση της συνέχειας σημαντικά κατακερματισμένων μελών. Οι κυριότερες αιτίες αυτών των καταστροφών είναι η εκτεταμένη διάβρωση των μεταλλικών στοιχείων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε προγενέστερες επεμβάσεις στην αρχή του 20^{ου} αιώνα καθώς και επιθέσεις αλλά και μετατροπές που δέχθηκε το μνημείο στο πέρασμα των χρόνων από τους διάφορες κατακτητές που πέρασαν. Σεισμοί, φωτιές, ανατινάξεις συνετέλεσαν στην σοβαρή καταστροφή του μνημείου.

Κατά την αποκατάσταση της μονολιθικότητας των μελών βασικός στόχος είναι οι οπλισμοί να αναλάβουν τα εφελκυστικά φορτία στην κάθετη διεύθυνση των θραυσμένων επιφανειών. Ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε να αστοχήσει ο οπλισμός στη συγκόλληση και σε καμία περίπτωση το μάρμαρο. Αν επέλθει ρηγματώση του μαρμάρου εκτός συγκολλησεως ή απόσχιση του γύρω από τον οπλισμό ή τέλος σύνθλιψη του στη θλιβόμενη παρειά τότε έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση του οπλισμού και το δομικό μέλος κινδυνεύει από νέα βλάβη (147) (148).

Οι βασικές αρχές οι οποίες ακολουθούνται κατά το σχεδιασμό της αποκατάστασης της μονολιθικότητας των επιστυλίων είναι οι εξής (134):

- Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο μάρμαρο και το τιτάνιο δεν πρέπει να ξεπερνούν το όριο γραμμικής ελαστικότητας τους.
- Το μάρμαρο θεωρείται εγκαρσίως ισότροπο υλικό και το μέτρο ελαστικότητας του είναι σταθερό εφόσον τα καμπτικά φορτία δρουν κάθετα στις στρώσεις του υλικού.
- Το μήκος των επιστυλίων σε σχέση με τις δύο άλλες διαστάσεις είναι αρκετά μεγάλο ώστε οι διατομές να παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον διαμήκη ουδέτερο άξονα της δοκού ώστε να ισχύει η αρχή Euler-Bernoulli.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

- Το μάρμαρο και το τιτάνιο έχουν συμβατές ανηγμένες παραμορφώσεις ώστε να μην υπάρξει σχετική ολίσθηση και εξόλκευση του οπλισμού από το μάρμαρο.
- Το κονίαμα θεωρείται ότι έχει αμελητέα εφελκυστική αντοχή.
- Τα φορτία τα οποία θα ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό είναι τα κατακόρυφα λόγω ίδιου βάρους, το βάρος των υπερκείμενων στοιχείων και τα πιθανά σεισμικά φορτία τα οποία λαμβάνονται υπόψη μέσω μίας προσαύξησης των αντίστοιχων στατικών φορτίων με κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας.
- Η ροπή η οποία θα κληθεί να παραλάβει το επιστύλιο θα αναλυθεί σε ένα ζεύγος δυνάμεων, μία θλιπτική την οποία θα παραλάβει το μάρμαρο και μία εφελκυστική την οποία θα αναλάβουν οι ράβδοι οπλισμού. Γενικά τα ποσοστά οπλισμού κυμαίνονται μεταξύ 1-2% της διατομής του μαρμάρου.

Βασικό είναι η απόσταση των οπλισμών από τις ακραίες επιφάνειες των τμημάτων μαρμάρου που συνδέουν να είναι μεγαλύτερη ή ίση με το τετραπλάσιο της διαμέτρου του διατρήματος ώστε να αποφευχθεί η διάρρηξη του μαρμάρου. Το βάθος αγκύρωσης έχει προσδιοριστεί πειραματικά και βασίστηκε στη συνάφεια των σπειρωμένων ράβδων με το κονίαμα και το μάρμαρο (18), (26).

Οι συνδέσεις μελών καλούνται να παραλάβουν είτε εφελκυστικά είτε διατμητικά φορτία. Όταν τα συνδετήρια στοιχεία βρίσκονται στην ίδια στρώση του μαρμάρου τότε προορίζονται να παραλάβουν κυρίως εφελκυστικά φορτία και χαρακτηρίζονται ως «συνδέσμοι» ενώ όταν συνδέουν μάρμαρα διαδοχικών στρώσεων τότε παραλαμβάνουν διατμητικά κυρίως φορτία και χαρακτηρίζονται ως «γόφοι» (5).

10.3 Θεωρητική μέθοδος υπολογισμού οπλισμών σύνδεσης θραυσμένων επιστυλίων

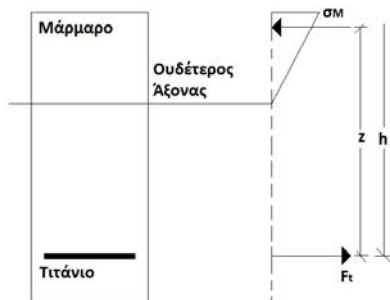
Η πορεία των επεμβάσεων στα μνημεία περιλαμβάνει αρχικά τη διάγνωση της παθολογίας, τη μελέτη και στη συνέχεια την πρόταση των μέτρων αποκατάστασης, τα οποία πρέπει να ικανοποιούν ένα σύνολο διεπιστημονικών αντικρουόμενων απόψεων (αρχαιολόγοι, αρχιτέκτονες, πολιτικοί μηχανικοί, χημικοί κ.α.).

Η λύση επέμβασης σε ένα δομικό μέλος είναι μοναδική και εξαρτάται κάθε φορά από την αδυναμία και τις απαιτήσεις φορτίων που καλείται να παραλάβει το στοιχείο. Μετά την αποκατάσταση, η συμπεριφορά του μέλους παρακολουθείται ποιοτικά και αλλά και ποσοτικά με μετρητικά συστήματα καταγραφής παραμορφώσεων, ρωγμών κ.α. Ο σχεδιασμός των επεμβάσεων αλλά και τα υλικά ακόμα που χρησιμοποιούνται, ελέγχονται στο πέρασμα του χρόνου και μπορεί να τροποποιηθούν αν κριθεί αναγκαίο. Είναι σημαντική η εμπειρία που αποκτάται στο εργοτάξιο και είναι ικανή να αλλάξει ολόκληρη τη φιλοσοφία των επεμβάσεων.

Η παρακάτω συλλογιστική προσέγγιση αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε σε συνεργασία των Μ. Ιωαννίδου, Μ. Μεντζίνη και Β. Πασχαλίδη πολιτικών μηχανικών της Υ.Σ.Μ.Α.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

Τα επιστύλια προσομοιώνονται ως καμπτόμενες δοκοί από μάρμαρο και ράβδους τιτανίου.



Εικόνα 10.1 Σχηματική αναπαράσταση επιστυλίου ορθογωνικής διατομής οπλισμένης με μια στρώση ράβδων τιτανίου (133) (149).

Από το νόμο του Hooke και την εξίσωση συμβιβαστού των παραμορφώσεων :

$$\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_\tau} = \frac{\frac{\sigma_M}{E_M}}{\frac{\sigma_\tau}{E_\tau}} = \frac{n \sigma_M}{\sigma_\tau} = \frac{x}{(h-x)} \rightarrow \sigma_M = x \frac{\sigma_\tau}{(h-x)n} \quad 10.1$$

Όπου,

σ_M η θλιπτική τάση του μαρμάρου στην άνω ίνα,

σ_τ η εφελκυστική τάση στο τιτάνιο,

x η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την άνω παρειά της δοκού,

h η απόσταση της στρώσης των τιτανίων από την άνω παρειά της δοκού

n ο λόγος E_τ / E_M , όπου E_M , E_τ τα μέτρα ελαστικότητας μαρμάρου και τιτανίου αντίστοιχα.

Από την εξίσωση ισοροπίας των ροπών προκύπτει:

$$\frac{\sigma_M x b z}{2} = F_\tau z \quad 10.2$$

Όπου,

b το πλάτος της δοκού,

z ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων και

$F_\tau = \sigma_\tau A_\tau$ η συνολική εφελκυστική δύναμη του οπλισμού τιτανίου, όπου A_τ η συνολική διατομή του τιτανίου.

Από τις εξισώσεις 10.1 και 10.2 προκύπτει η θέση του ουδέτερου άξονα:

$$x = \frac{n A_\tau}{b} \left[-1 \pm \left(1 + \frac{2 b h}{n A_\tau} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad 0 < x < h \quad 10.3$$

Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις τόσο για το μάρμαρο όσο και για το τιτάνιο και συγκρίνονται με τις μέγιστες επιτρεπόμενες.

$$M_{\varepsilon\xi} = \frac{1}{2} \sigma_M x b z \rightarrow \sigma_M = \frac{2 M_{\varepsilon\xi}}{x b z} < \sigma_M \text{ επιτρεπόμενη} \quad 10.4$$

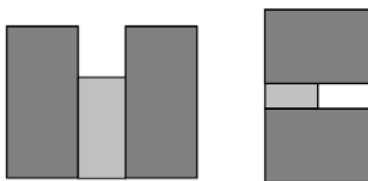
Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

$$M_{εξ} = \sigma_{\tau} A_{\tau} \rightarrow \sigma_{\tau} = \frac{M_{εξ}}{A_{\tau} z} < \sigma_{\tau \text{ επιτρεπόμενη}} \tag{10.5}$$

Αν ο οπλισμός είναι ανεπαρκής ή υπερβολικός, τροποποιείται ανάλογα η αρχική εκλογή και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

Ο προσδιορισμός του οπλισμού γίνεται για το σύνολο των φορτίων που πιθανόν να κληθεί να παραλάβει το δομικό στοιχείο μετά την επανατοποθέτηση του στο ναό. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα κατακόρυφα φορτία (ίδιο βάρος, άνεμος, χιόνι αλλά και το βάρος των υπερκείμενων μελών (αρχαία ή απαιτούμενα για την επέμβαση στο μνημείο (π.χ στεγάνωση ναού)) καθώς και δυναμικά φορτία (σεισμός ο οποίος λαμβάνεται υπόψη με προσαύξηση των στατικών φορτίων). Βασικό μέλημα είναι κατά τον σχεδιασμό είναι να ληφθούν υπόψη οι δράσεις κατά τη μεταφορά και τοποθέτηση του μέλους στη θέση του.

Τα είδη οπλισμού που χρησιμοποιούνται στις αποκαταστάσεις είναι δύο ειδών. Ο οπλισμός κάμψης ό οποίος αποθηκαστά την επιθυμητή αντοχή και ο οπλισμός αποκατάστασης του σχήματος της διατομής. Ο οπλισμός αυτός έχει σκοπό να επαναφέρει την ολότητα της διατομής και υπολογίζεται με απλή ισορροπία δυνάμεων. Η μεταβλητή διατομή επιστυλίων προκύπτει στην πράξη λόγω της ύπαρξης αύλακας από την αναστήλωση Μπαλάνου. Αν και κατά την αποκατάσταση η αύλακα πληρώνεται με νέο μάρμαρο, στο στάδιο της μελέτης η διατομή λαμβάνεται (υπέρ της ασφαλείας) ως μεταβλητή, θεωρείται δηλαδή ότι το μάρμαρο πληρώσεως δεν συνεισφέρει στην αντοχή (149).



Εικόνα 10.2 Μεταβλητές διατομές (149)

Για τον υπολογισμό του οπλισμού σε διατομές μεταβλητής διατομής διακρίνονται δύο περιπτώσεις.

A. Όταν ο ουδέτερος άξονας είναι μεταξύ $0 < x < h$. Τότε η απόσταση x προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$b_0 x^2 + 2n A_t x - 2n (E - H A_t) = 0 \tag{10.6}$$

Όπου,

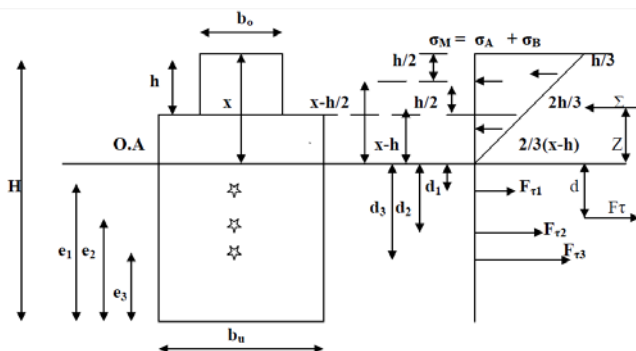
A_t το άθροισμα των εμβαδών των οπλισμών

E η στατική ροπή των οπλισμών ως προς την κάτω επιφάνεια της δοκού

($E = A_{t1}e_1 + A_{t2}e_2 + \dots + A_{tn}e_n$).

B. Όταν ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται εντός του διαστήματος $h < x < H$ τότε με βάση το σχήμα της Εικ.10.3 ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Εικόνα 10.3 Αναπαράσταση μεταβλητής διατομής με πολλές στρώσεις ράβδων τιτανίου (149).

$$\frac{\sigma_M}{x} = \frac{\sigma_A}{x-h} = \frac{\sigma_B}{h} \quad 10.7$$

$$\sigma_M = \frac{x\sigma_\tau}{(H-e_i-x)h} \quad 10.8$$

$$Z + d = \frac{M_{\text{εσωτερική}}}{\Sigma} = \frac{M_{\text{εξωτερική}}}{\Sigma} \quad 10.9$$

$$Z = \frac{M_o}{\Sigma} \quad 10.10$$

$$d = \frac{M_o}{F_\tau} \quad 10.11$$

$$M_o = \frac{1}{2} b_u \sigma_A \frac{2}{3} (x-h)^2 + \sigma_A b_o h \left(x - \frac{h}{2}\right) + \frac{1}{2} \sigma_B b_o h \left(x - \frac{h}{3}\right) \quad 10.12$$

$$\begin{aligned} M'_o &= F_{\tau 1} d_1 + F_{\tau 2} d_2 + F_{\tau 3} d_3 = A_{\tau o} \sigma_{\tau 1} \left(\mu_1 d_1 + \frac{\mu_2 d_2^2}{d_1} + \frac{\mu_3 d_3^2}{d_1} \right) = \\ &= A_{\tau o} \sigma_{\tau 1} \Sigma \mu_i \left(\frac{d_i^2}{d_1} \right) \end{aligned} \quad 10.13$$

$$\Sigma = \frac{1}{2} b_u \sigma_A (x-h) + \sigma_A b_o h + \frac{1}{2} \sigma_B b_o h \quad 10.14$$

$$\begin{aligned} F_\tau &= F_{\tau 1} + F_{\tau 2} + F_{\tau 3} = A_{\tau o} \sigma_{\tau 1} \left(\mu_1 + \frac{\mu_2 d_2}{d_1} + \frac{\mu_3 d_3}{d_1} \right) = \\ &= A_{\tau o} \sigma_{\tau 1} \Sigma \mu_i \left(\frac{d_i}{d_1} \right) \end{aligned} \quad 10.15$$

Όπου

Z και d οι αποστάσεις της συνισταμένης δύναμης Σ των θλιπτικών τάσεων του μαρμάρου και της συνισταμένης δύναμης των οπλισμών τιτανίου από τον ουδέτερο άξονα.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

M_o και M'_o οι ροπές των Σ και F_t ως προς τον ουδέτερο άξονα.
 A_{to} το εμβαδόν της διατομής μιας ράβδου τιτανίου
 σ_{t1} η εφελκυστική τάση των τιτανίων της στρώσης 1,
 F_{ti} η συνολική εφελκυστική δύναμη των οπλισμών της i στρώσης
 μ_i ο αριθμός των ράβδων οπλισμού στην i στρώση.

10.4 Παλαιότερες πειραματικές έρευνες συμπεριφοράς θραυσμένων και συγκολλημένων επιστυλίων

Έχουν γίνει αρκετά πειράματα για τη μελέτη της συμπεριφοράς αποκαταστημένων επιστυλίων. Παλαιότερα κατασκευάστηκε μοντέλο ενός ρηγματωμένου επιστυλίου της βόρειας κιονοστοιχίας του Παρθενώνα σε κλίμακα 1:3, όπου αποτυπώθηκαν πιστά η γεωμετρία, τα ρήγματα, οι ασυνέχειες και η γεωλογική διαστρωμάτωση του πρωτότυπου στοιχείου (133), (149), (134). Η συγκόλληση των θραυσμάτων έγινε με οπλισμούς τιτανίου όπως αυτοί προέκυψαν από τον θεωρητικό υπολογισμό και βασικός στόχος του πειράματος ήταν να ελεγχθεί το επιστύλιο τόσο σε συνθήκες όσο και σε κρίσιμες συνθήκες φόρτισης (10).

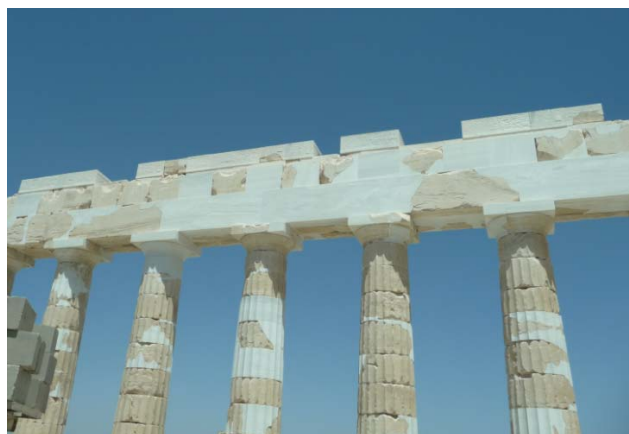
Το πείραμα έγινε υπό στατικές συνθήκες φόρτισης. Το μέγιστο φορτίο το οποίο παρέλαβε το δοκίμιο ήταν υπερδιπλάσιο του φορτίου σχεδιασμού (170 kN). Το βασικό συμπέρασμα από τα αποτελέσματα του πειράματος είναι ότι ο οπλισμός αλλά και ο τρόπος εφαρμογής του (σπείρωση του οπλισμού και χρήση κατάλληλου κονιάματος) έδωσε τη δυνατότητα στο επιστύλιο να συμπεριφερθεί ως ενιαίο δομικό μέλος και να παραλάβει φορτία περίπου διπλάσια του μέγιστου αναμενόμενου (134).

Επίσης, για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σε κάμψη αποκαταστημένων μαρμάρινων επιστυλίων κάτω από συνθήκες που προσεγγίζουν πιστά την πραγματικότητα, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π ένα σύνθετο πείραμα κάμψης (150). Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε δοκίμιο με μήκος = 1.43 m, πλάτος = 0.18 m, ύψος = 0.45 m το οποίο αποτελεί προσομοίωμα επιστυλίου με πραγματικές διαστάσεις μήκους = 4.30 m, πλάτους = 0.55 m και ύψους = 1.35 m. Τα δύο όμοια θραύσματα του επιστυλίου συγκολλήθηκαν με 3 στρώσεις οπλισμού, με δύο ράβδους ανά στρώση όπως προέκυψε από το θεωρητικό υπολογισμό (150).

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στη πρώτη δόθηκε έμφαση στην κατασκευή ενός συστήματος φόρτισης ανάλογο σε μικρογραφία με το τμήμα του ναού ανάμεσα στα μετακίονια και πάνω από τη στάθμη των αβάκων των κιονόκρανων. Στόχος ήταν να εντοπιστούν τα σημεία με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων για τις διάφορες εναλλαγές των υπερκείμενων μελών. Σε δεύτερη φάση σχεδιάστηκε διάταξη από ένα εκφορικό σύστημα σιδηροδοκών τύπου διπλού ταυ και σιδηρών ράβδων ώστε να επιτευχθεί η ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου δημιουργώντας πολλαπλά σημεία εφαρμογής συγκεντρωμένων σημείων φόρτισης (8 στον αριθμό) (10). Από το πείραμα προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα το οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS (10).

10.5 Κατασκευή πειραματικού δοκιμίου σύμφωνα με τα πρότυπα αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης.

Πολύ συχνά στον Παρθενώνα τα ρήγματα των μελών που πρόκειται να αποκατασταθούν έχουν κεκλιμένα επίπεδα συνένωσης (Εικ. 10.4). Αυτό αποτελεί μία ιδιόμορφη περίπτωση που αξίζει να μελετηθεί περαιτέρω. Πολύ σημαντικό είναι το σημείο όπου βρίσκεται το ρήγμα, αν είναι κοντά στη στήριξη ή στη μέση του ανοίγματος όπου η εντατική κατάσταση είναι δυσμενέστερη.



Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



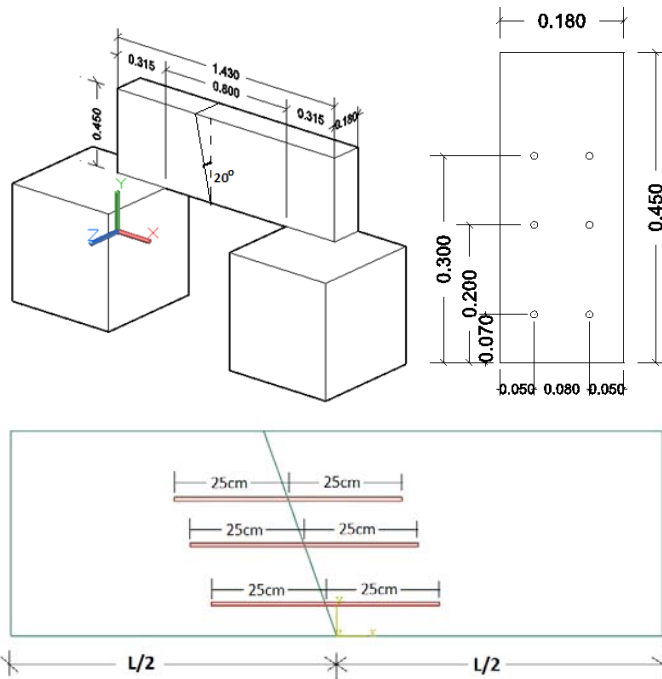
Εικόνα 10.4 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις επιπέδων θραύσης σε αναστυλωμένα επιστύλια του Παρθενώνα.

Κατασκευάστηκε πειραματικό δοκίμιο-προσομοίωμα ενός πραγματικού επιστυλίου υπό κλίμακα 1:3 το οποίο δοκιμάστηκε υπό τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Το επίπεδο θραύσης είναι κεκλιμένο στο μέσο του ανοίγματος της δοκού (Εικ. 10.5). Τα θραύσματα του επιστυλίου συνδέθηκαν με οπλισμό σε τρεις στρώσεις από δύο ράβδους ανά στρώση (Εικ. 10.5-10.9). Το μήκος αγκύρωσης των ράβδων ήταν 25cm εκατέρωθεν του επιπέδου θραύσης (Εικ. 10.5).

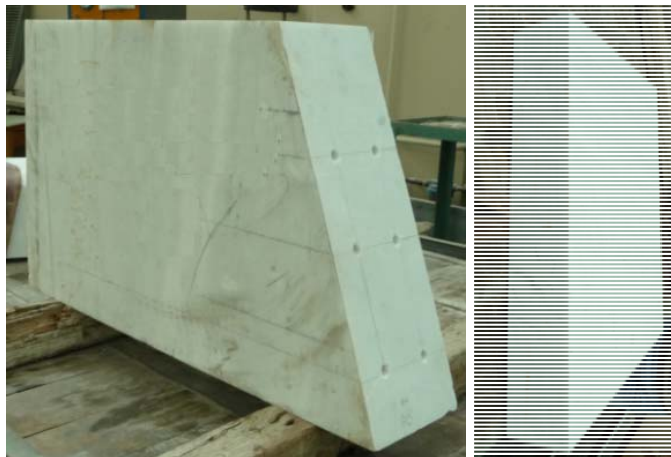
Για να υπάρχει πρόσβαση στις ράβδους κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι 3 (μία σε κάθε στάθμη) οπές του ενός εκ των δύο θραυσμάτων έγιναν διαμπερείς. Η συγκόλληση των ράβδων με το μάρμαρο έγινε σε δύο φάσεις για λόγους κατασκευαστικούς και συγκεκριμένα για την σωστότερη τοποθέτηση των μετρητικών συστημάτων που επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν στο εσωτερικό των οπών.

Πάνω στη ράβδο της κάτω στάθμης του οπλισμού τοποθετήθηκε μία οπτική ίνα (Εικ. 10.8). Επίσης στις άκρες των τριών καθ' ύψος ράβδων τοποθετήθηκε στην άκρη από ένα σύρμα για να μπορεί να εντοπιστεί η χρονική στιγμή που ξεκινάει η ολίσθηση της κάθε ράβδου (Εικ. 10.8). Σημαντικό είναι ότι στο επίπεδο θραύσης και στα δύο θραύσματα το μάρμαρο έπρεπε να έχει τραχειά επιφάνεια για καλύτερη συνάφεια με την τσιμεντοκονία (Εικ. 10.9).

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Εικόνα 10.5 Διαστάσεις πειραματικού δοκιμίου (πάνω αριστερά)- Θέσεις οπλισμού (πάνω δεξιά) (διαστάσεις σε m)- Αγκύρωση οπλισμού (κάτω).



Εικόνα 10.6 Θραύσματα δοκιμίου.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Εικόνα 10.7 Θέσεις οπλισμού.



Εικόνα 10.8 Μετρητικά συστήματα πάνω στις ράβδους, εισαγωγή στο εσωτερικό του δοκιμίου.



Εικόνα 10.9 Θραύσματα λίγο πριν τη συγκόλληση. Τράχυνση των επιφανειών συγκόλλησης.

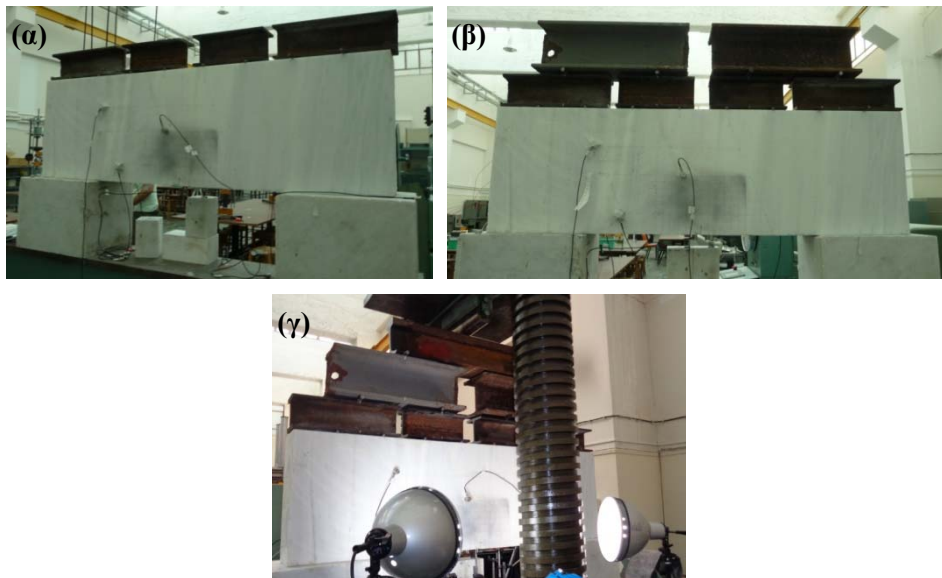
10.6 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και τεχνικών που εφαρμόστηκαν

Μετά το πέρας του απαιτούμενου χρόνου και διατηρώντας τα ποσοστά υγρασίας στα απαιτούμενα επίπεδα ώστε η τσιμεντοκονία να αποκτήσει την μέγιστη αντοχή της, το δοκίμιο μεταφέρθηκε και τοποθετήθηκε πάνω σε δύο μαρμάρινους όγκους ο οποίοι προσομοιώνουν τους άβακες των κιονόκρανων. Το ελεύθερο άνοιγμα της δοκού είναι 0.8m. Στα γωνιακά σημεία των αβάκων τα οποία έρχονται σε επαφή με το επιστύλιο δημιουργήθηκε υποτομή πλάτους 1.70 cm και ανάλογου βάθους.



Εικόνα 10.10 Τοποθέτηση επιστυλίου στην θέση της δοκιμής.

Η φόρτιση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε με ένα σύστημα σίδηρών δοκών ώστε να προσομοιωθεί στο μέτρο του δυνατού η εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου με ασκούμενη κάμψη πολλών σημείων (10 σημεία).



Εικόνα 10.11 (α) Κατανομή φορτίου με 8 ισαπέχουσες ράβδους επί του επιστυλίου (πρώτη σειρά δοκών) (β) 4 ισαπέχουσες ράβδοι επί των δοκών της πρώτης σειράς (δεύτερη σειρά δοκών) (γ) 2 ράβδοι επί της δεύτερης σειράς δοκών- Τελικό σημείο φόρτισης του πλαισίου στο μέσο της τρίτης δοκού.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

Το εκφορικό σύστημα φόρτισης πρέπει να ισορροπήσει πάνω στους κυλίνδρους (σημεία φόρτισης) και να μεταφέρει σταδιακά το φορτίο στο δοκίμιο. Αρχικά τοποθετούνται στη δοκό 8 κύλινδροι (σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους). Πάνω τους ισορροπούν 4 διατομές διπλού ταυ (Εικ. 10.11 (α)). Στο μέσο των κέντρων στήριξης των δοκών τοποθετούνται 4 κύλινδροι πάνω στους οποίους στηρίζεται το επόμενο επίπεδο ράβδων του εκφορικού συστήματος (Εικ. 10.11 (β)). Στη συνέχεια, στο μέσο των κέντρων στήριξης του δεύτερου επιπέδου φόρτισης τοποθετούνται 2 κύλινδροι στους οποίους στηρίζεται η τελευταία δοκός του συστήματος (Εικ. 10.11(γ)).

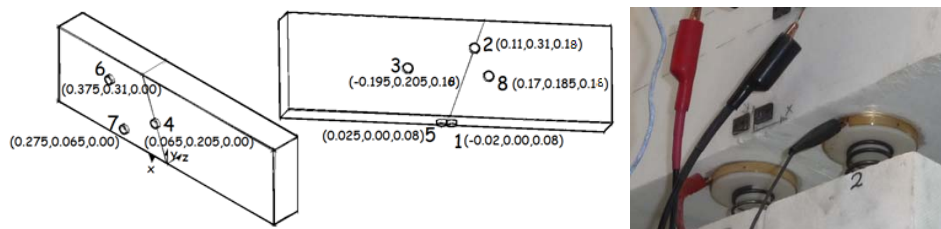
Τέλος, ο κύλινδρος φόρτισης του πλαισίου της μηχανής τοποθετείται στο κέντρο του μέσου στήριξης της τελευταίας δοκού (Εικ. 10.11(γ)).

Στο δοκίμιο θα εφαρμοστούν οι παρακάτω τεχνικές καταγραφής:

- Μηκνσιόμετρα τύπου LVDT για καταγραφή μετακινήσεων (Εικ. 10.12: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).
- Παραδοσιακά μηκνσιόμετρα τύπου clip gauges για την καταγραφή του ανοίγματος του ρήγματος (Εικ. 10.12: 9, 10).
- Για την καταγραφή των ακουστικών εκπομπών τοποθετήθηκαν γύρω από τη ρωγμή 8 ακουστικοί αισθητήρες (Εικ. 10.13 (α)).
- Για την καταγραφή των ηλεκτρικών σημάτων PSC εκατέρωθεν του ρήγματος τοποθετήθηκαν με μηχανική στήριξη 2 επίχρυσα ηλεκτροδία διαμέτρου 5cm. Η περιοχή βάφτηκε με υγρό άργυρο για την καλύτερη επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του μαρμάρου (Εικ. 10.13 (β)).
- Τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας DIC για την παρακολούθηση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος (Εικ. 10.15).



Εικόνα 10.12 Θέσεις μηκνσιόμετρων τύπου LVDT & clip gauges.



Εικόνα 10.13: (α) Θέσεις ακουστικών αισθητήρων; (β) θέσεις ηλεκτροδίων στη βάση του δοκιμίου.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



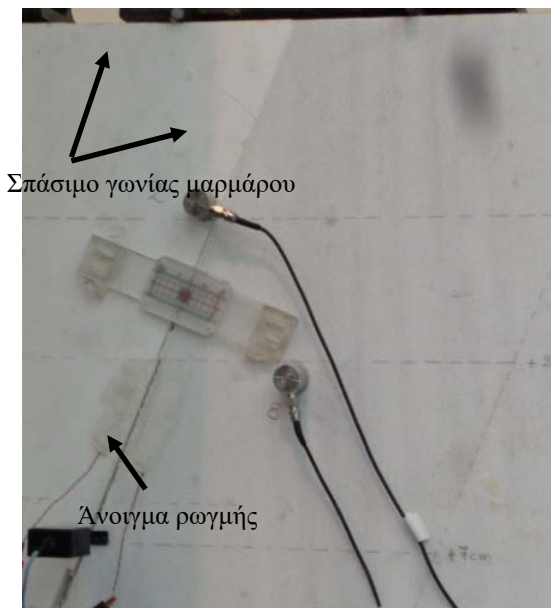
Εικόνα 10.14 Γενική όψη δοκιμίου και εφαρμοζόμενων τεχνικών πριν τη δοκιμή.



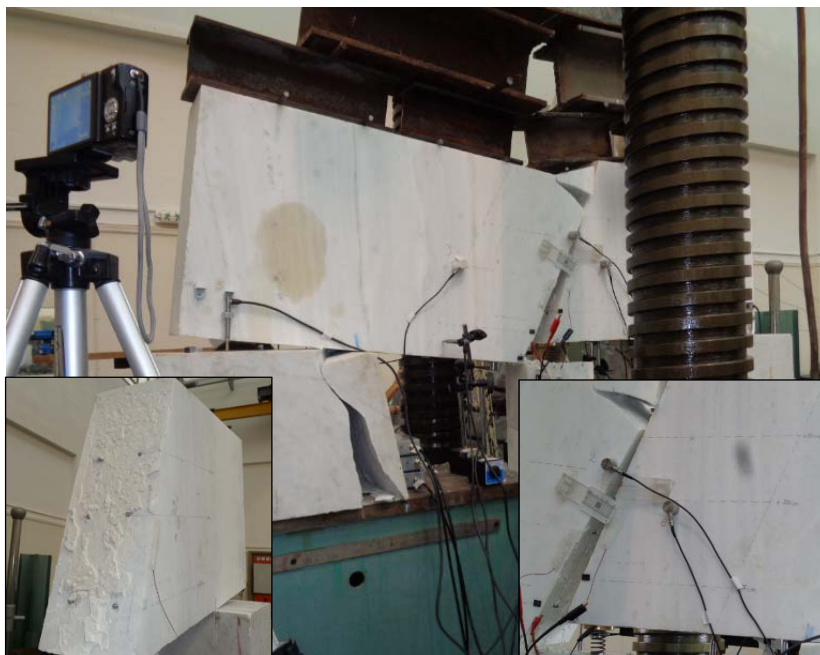
Εικόνα 10.15 Παρακολούθηση δοκιμίου με την τεχνική ψηφιακής εικόνας (DIC).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος έσπασε η γωνία στο άνω άκρο του ρήγματος (Εικ. 10.17).

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



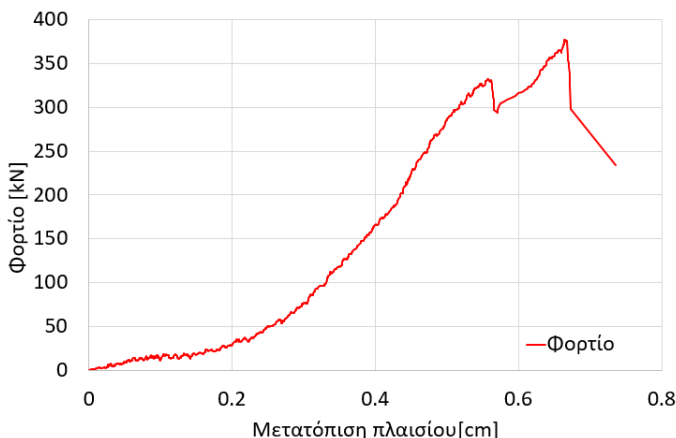
Εικόνα 10.16 Άνοιγμα ρωγμής & σπάσιμο γωνίας μαρμάρου στο άνω άκρο της ρωγμής.



Εικόνα 10.17 Τελική εικόνα δοκιμίου μετά τη θραύση των ράβδων, επιφάνεια συγκόλλησης μετά τη δοκιμή (κάτω αριστερά), ρωγμή (κάτω δεξιά).

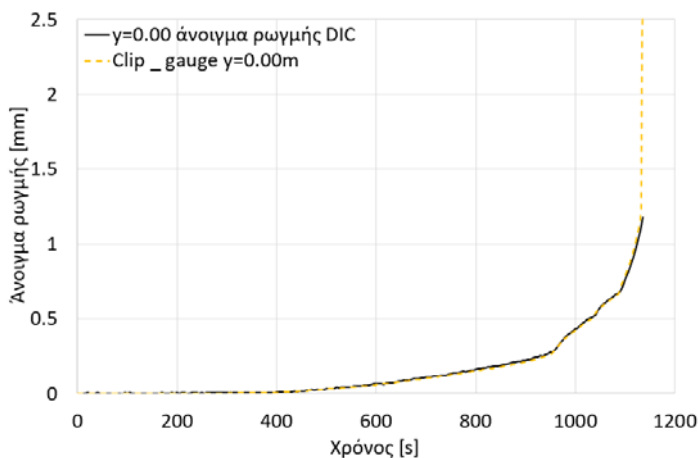
10.7 Αποτελέσματα

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με επιβολή σταθερού ρυθμού μετατόπισης ίσο με 0.005 mm/s. Στην Εικ. 10.18 δίνεται η μεταβολή του φορτίου ως προς τη μετατόπιση του πλαισίου.



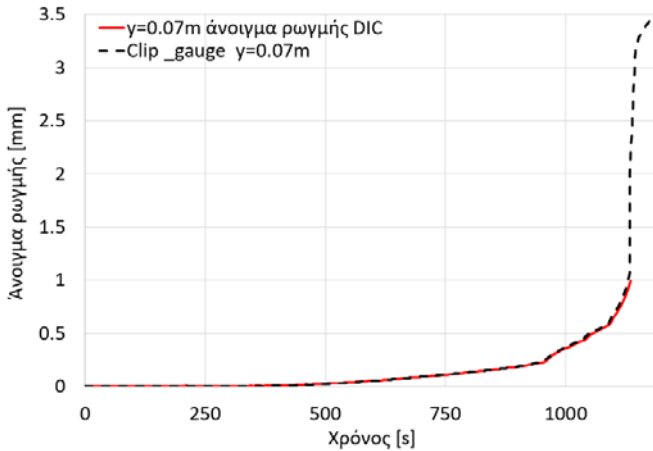
Εικόνα 10.18 Διάγραμμα μετατόπισης πλαισίου της μηχανής φόρτισης και το αντίστοιχο φορτίο κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Τα μηκυσιόμετρα τύπου clip gauge τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα στο κάτω άκρο του ρήγματος και στην πρώτη στάθμη των ράβδων (Εικ. 10.12) δείχνουν την εξέλιξη του ανοίγματος του ρήγματος κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι τιμές των clip gauges ταυτίζονται με τις αντίστοιχες που δίνουν οι καταγραφές της τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (DIC) (Εικ. 10.19, 10.20) για τα αντίστοιχα σημεία.



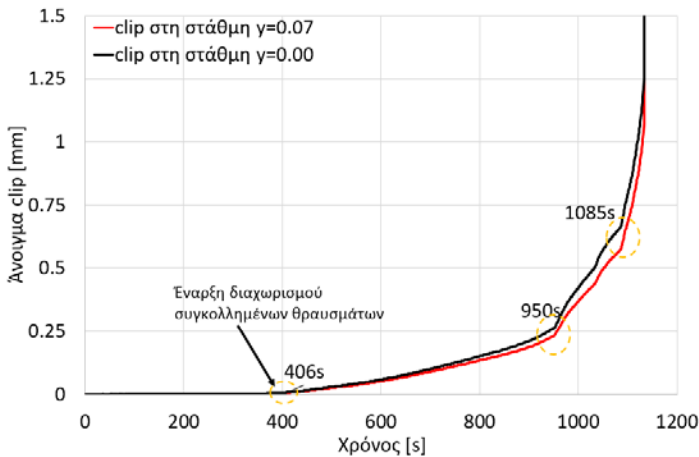
Εικόνα 10.19 Διάγραμμα ανοίγματος ρωγμής στο κάτω άκρο της ρωγμής όπως προέκυψε από το clip gauge και την τεχνική DIC.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



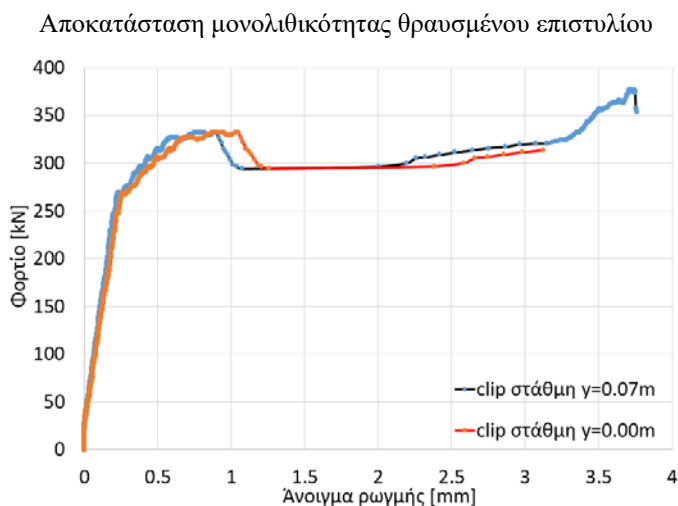
Εικόνα 10.20 Διάγραμμα ανοίγματος ρωγμής στη στάθμη της πρώτης στρώσης του οπλισμού όπως προέκυψε από το clip gauge και την τεχνική DIC.

Σύμφωνα με τις παραπάνω καταγραφές το ρήγμα δείχνει να αρχίζει να ανοίγει μετά τα 400s (Εικ. 10.21).



Εικόνα 10.21 Έναρξη διαχωρισμού ρωγμής σύμφωνα με τις καταγραφές των clip gauges.

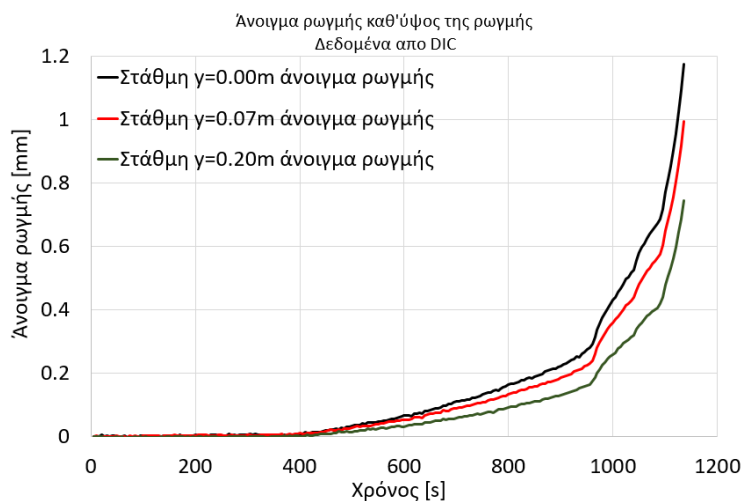
Στο διάγραμμα της Εικ. 10.22, το φορτίο ως προς το άνοιγμα του ρήγματος στις δύο στάθμες καταγραφής δίνουν έναν αρχικό γραμμικό κλάδο, στη συνέχεια η καμπύλη αλλάζει ρυθμό αύξησης μέχρι το μέγιστο φορτίο όπου σημειώνεται απότομη πτώση. Το φορτίο διατηρείται σταθερό με συνεχή αύξηση του ανοίγματος του ρήγματος μέχρι την τελική θραύση.



Εικόνα 10.22 Έναρξη διαχωρισμού ρωγμής σύμφωνα με τις καταγραφές των clip gauges.

Με τη βοήθεια της DIC τεχνικής είναι εφικτό να παρακολουθείται το ρήγμα σε όλη τη διάρκεια του πειράματος σε περισσότερα σημεία χωρίς την τοποθέτηση πολλών clip gauges καθ' ύψος του.

Στην Εικ. 10.23 δίνεται το άνοιγμα του ρήγματος για 3 χαρακτηριστικές στάθμες (κάτω άκρο δοκιμίου, 1^η στρώση οπλισμού, 2^η στρώση οπλισμού) όπως αυτές προέκυψαν από την τεχνική συσχέτισης ψηφιακής εικόνας.

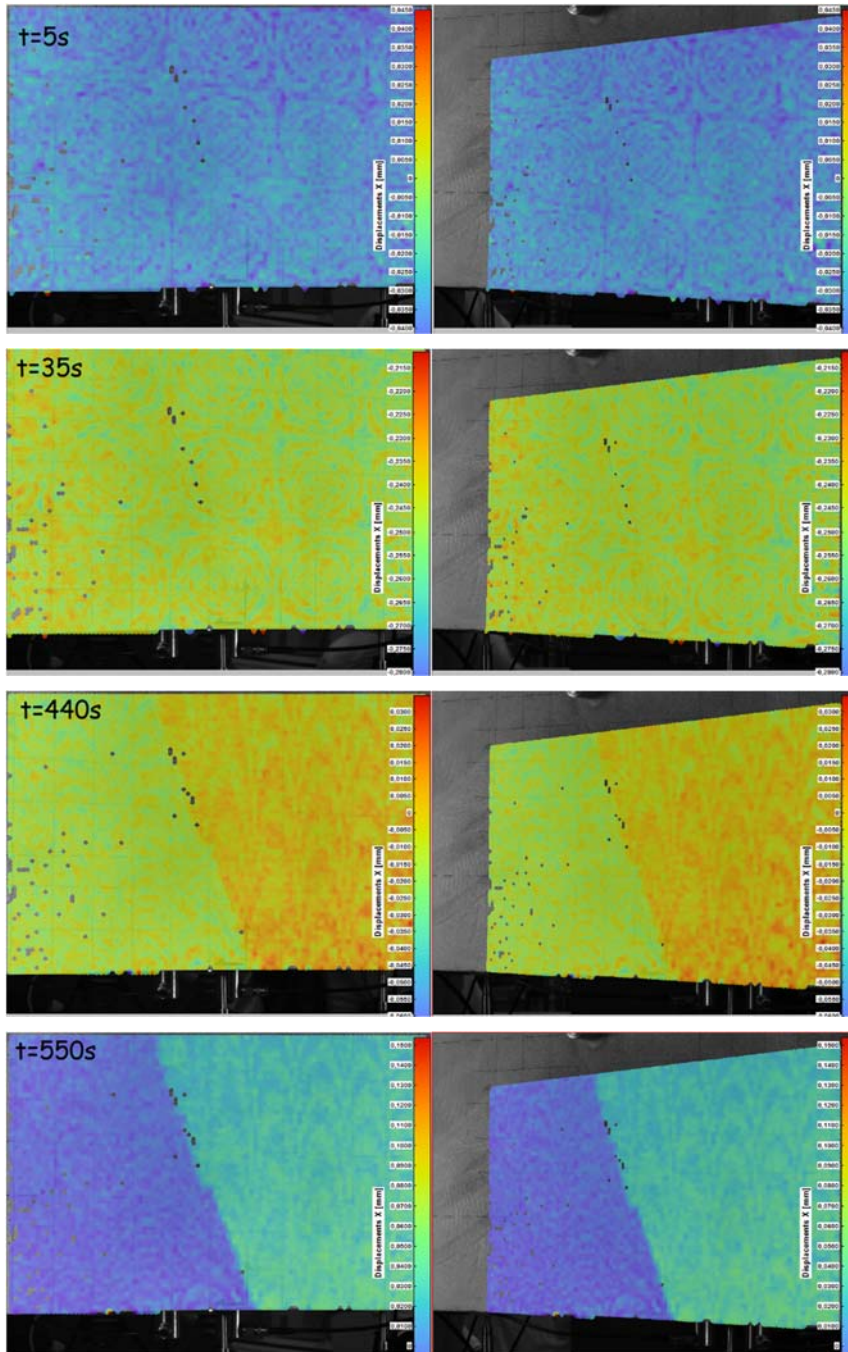


Εικόνα 10.23 Διάγραμμα ανοίγματος ρωγμής στο κάτω άκρο του δοκιμίου και στη στάθμη της 1^{ης} και 2^{ης} στρώσης του οπλισμού όπως προέκυψε από την τεχνική DIC.

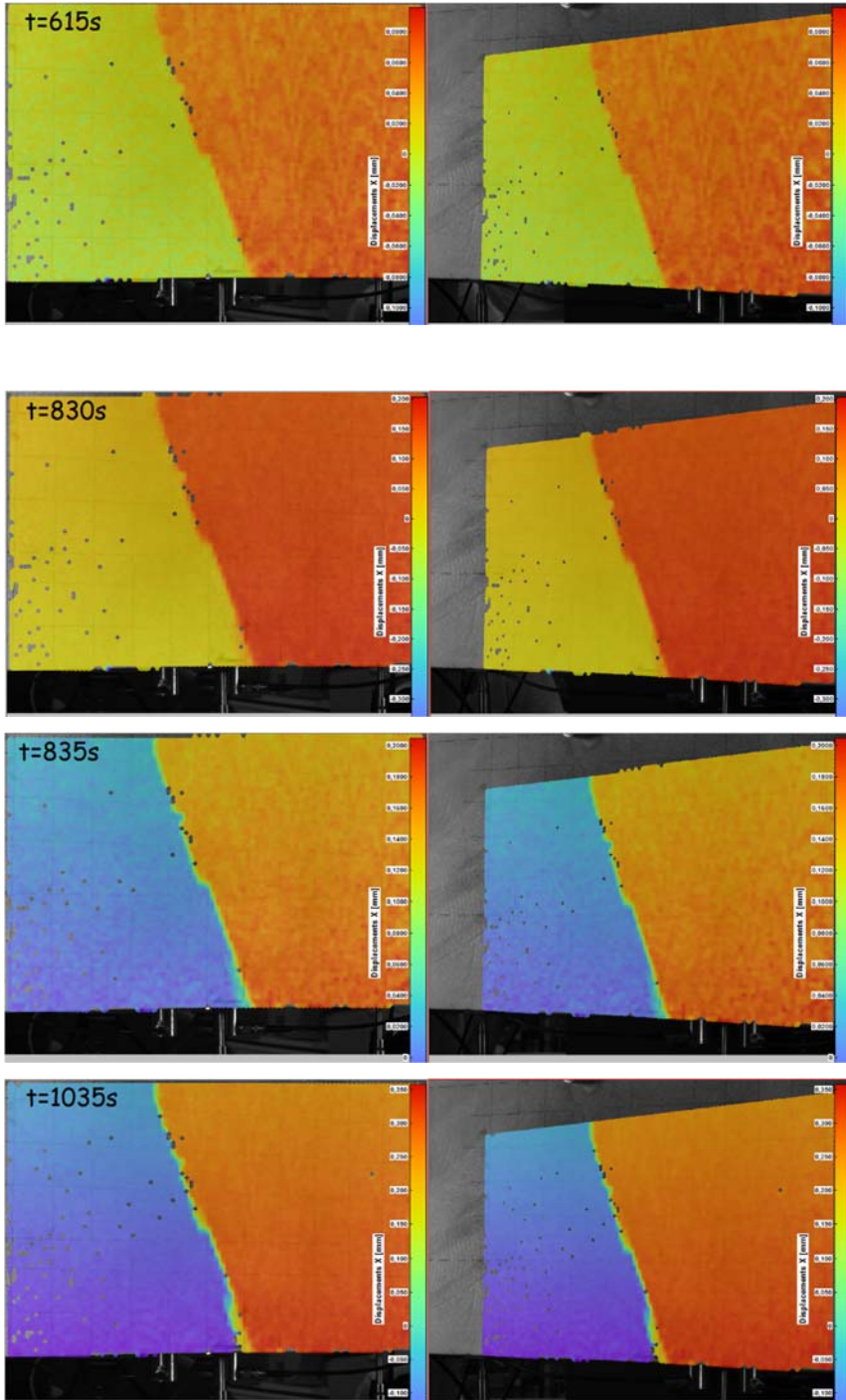
Είναι αξιοσημείωτο ότι η τεχνική DIC έδωσε, χρονικά κοντά με τις άλλες τεχνικές, ένδειξη ότι έχει ξεκινήσει ο διαχωρισμός των δύο συγκολλημένων θραυσμάτων. Παρακάτω παραθέτονται ενδεικτικά εικόνες από κάποιες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές (όπως δίνονται από την τεχνική DIC) οι οποίες δίνουν σε χρωματοκλίμακα την ποσοτική τιμή της χ μετατόπισης κάθε σημείου που είναι ορατό και

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

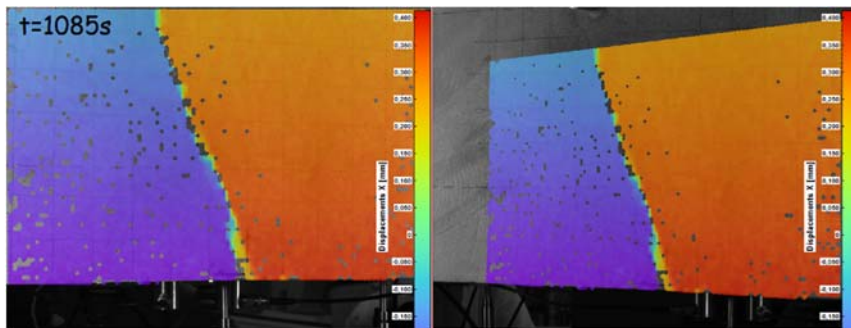
από τις δύο κάμερες. Τη χρονική στιγμή $t=440s$ δείχνει να ξεκινάει ο διαχωρισμός των δύο θραυσμάτων.



Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

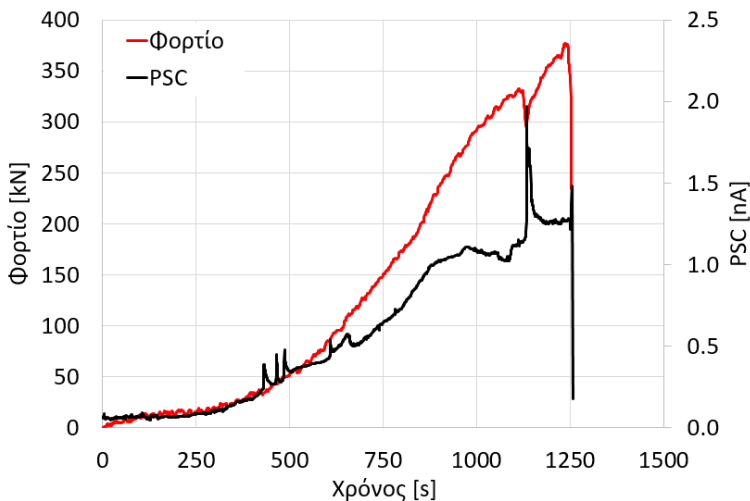


Εικόνα 10.24 Μετακίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση x όπως δίνεται με χρωματοκλίμακα από την τεχνική DIC για κάποιες ενδεικτικές χρονικές στιγμές.

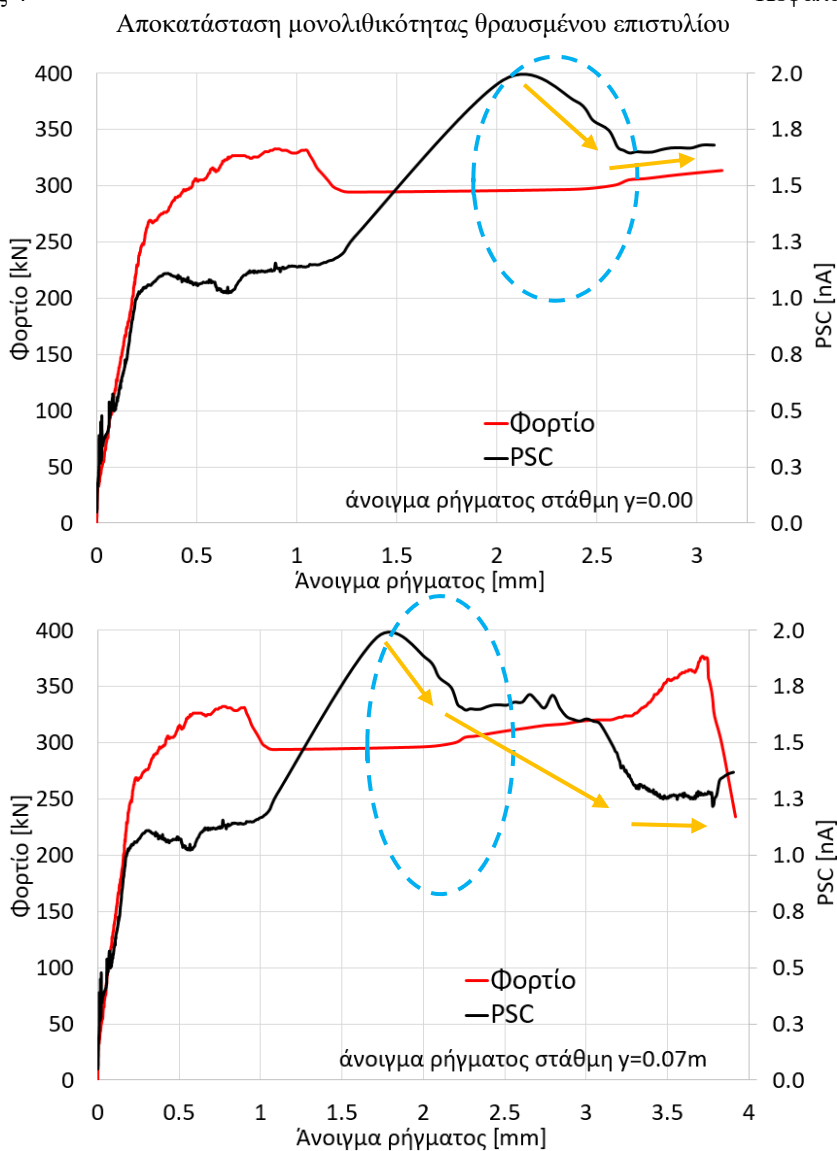
Αντίστοιχα στο διάγραμμα των ηλεκτρικών καταγραφών (Εικ. 10.25) υπάρχει μία χαρακτηριστική μεταβολή του ηλεκτρικού σήματος ($t=430s$), χρονικά πολύ κοντά με τις πρώτες ενδείξεις των clip gauges και της DIC τεχνικής. Ενώ λίγο πριν τη θραύση του επιστυλίου υπάρχει έντονη μεταβολή των ηλεκτρικών σημάτων.

Η μεταβολή των ηλεκτρικών σημάτων και του φορτίου ως προς το άνοιγμα του ρήγματος (Εικ. 10.26) δείχνουν να συμφωνούν με σημαντική χρονική ακρίβεια. Στην ελαστική περιοχή το ρεύμα αυξάνεται παράλληλα με το φορτίο μέχρι τη μέγιστη τιμή του. Στη συνέχεια, τα δύο διαγράμματα συνεχίζουν να αυξάνονται αλλά με διαφορετικό ρυθμό ενώ όταν το φορτίο σταθεροποιείται το ηλεκτρικό σήμα συνεχίζει να αυξάνεται αλλάζοντας σημαντικά κλίση.

Αξιοσημείωτο είναι ότι **χωρίς** να αλλάξει κάτι στο διάγραμμα του φορτίου το διάγραμμα των ηλεκτρικών σημάτων πριν την τελική θραύση και για τις δύο στάθμες ($y=0.00m, y=0.07m$) αρχίζει να μειώνεται με πολύ έντονο ρυθμό. Είναι μία σημαντική ένδειξη ότι το δοκίμιο βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση.



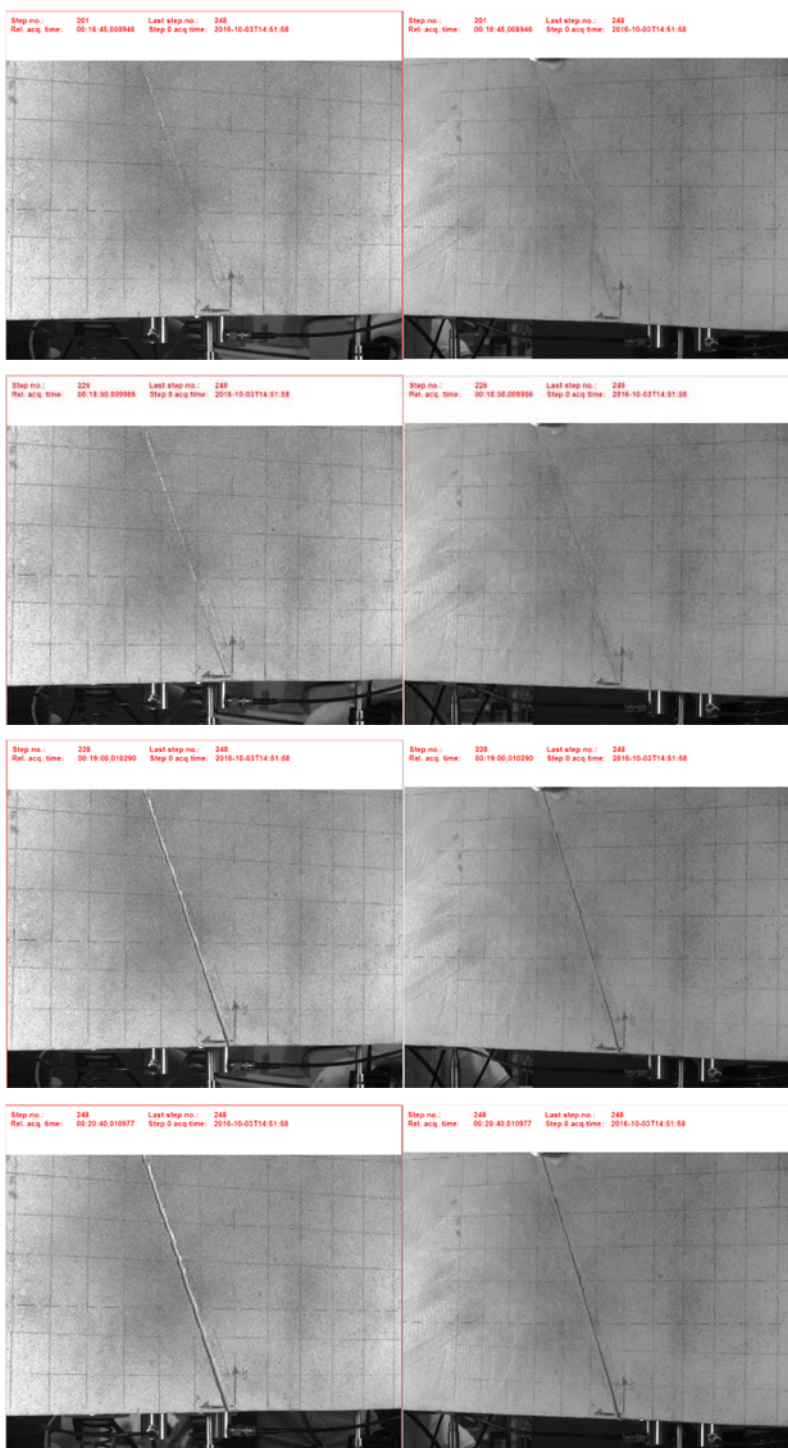
Εικόνα 10.25 Διάγραμμα ηλεκτρικών καταγραφών PSC και φορτίου κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 10.26 Διάγραμμα μεταβολής των ηλεκτρικών καταγραφών PSC και φορτίου ως προς το άνοιγμα του ρήγματος βάσει των καταγραφών των clips στις στάθμες (α) $\gamma=0.00m$, (β) $\gamma=0.07m$.

Στην Εικ. 10.27 δίνεται η εξέλιξη της ρωγμής όπως καταγράφεται από την τεχνική DIC.

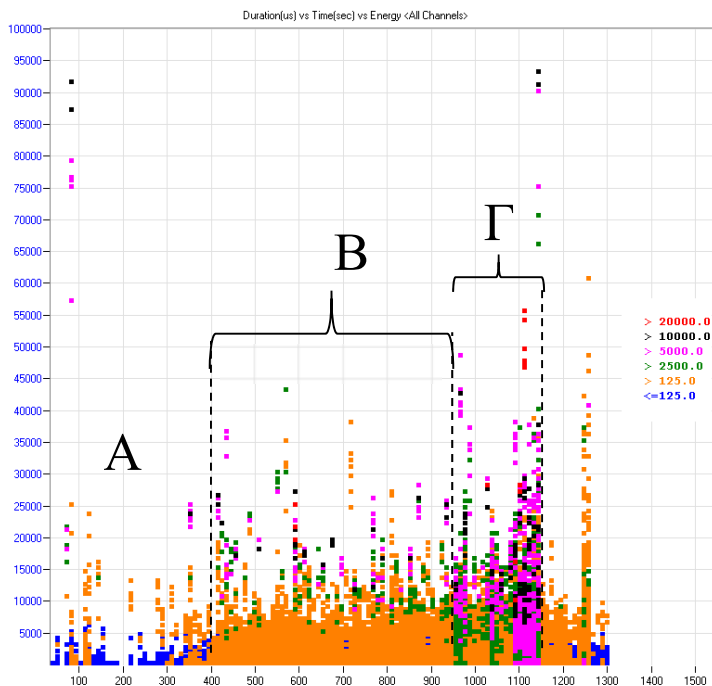
Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Εικόνα 10.27 Η εξέλιξη της ρωγμής όπως καταγράφηκε από την τεχνική DIC.

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου

Στο διάγραμμα της Εικ. 10.28 δίνεται η χρονική εξέλιξη της διάρκειας (duration) των κτύπων (hits) που καταγράφονται κατά τη διάρκεια του πειράματος με την αντίστοιχη ενέργεια σε χρωματοκλίμακα. Συγκρίνοντας με το διάγραμμα των clip gauges (Εικ. 10.23) παρατηρείται ότι κοντά στις χρονικές στιγμές $t=406s$, $t=950s$, $t=1085s$ όπου σημειώνεται έντονη αλλαγή στην κλίση των καμπυλών των clip gauges ορίζονται αντίστοιχες χαρακτηριστικές περιοχές στο διάγραμμα των ακουστικών κτύπων της Εικ. 10.28.

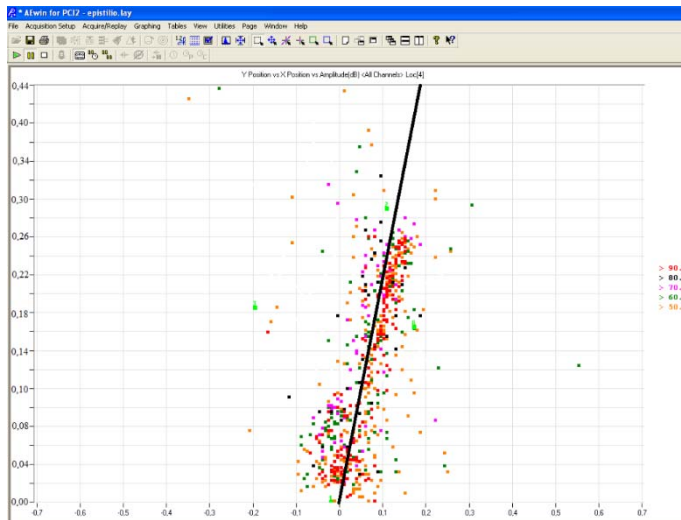


Εικόνα 10.28 Η χρονική εξέλιξη της διάρκειας (duration) των ακουστικών κτύπων κατά τη διάρκεια του πειράματος με την αντίστοιχη ενέργεια σε χρωματοκλίμακα

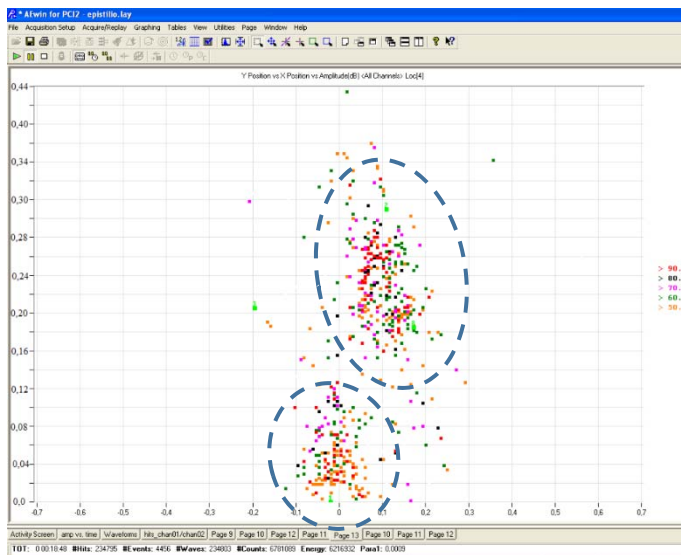
Στην πρώτη χρονική περίοδο τα σήματα έχουν χαμηλές σχετικά τιμές ενέργειας με τα μεταγενέστερα. Λογικά, αρχικά υπάρχει η θραύση του κονιάματος και το άνοιγμα του ρήγματος και μεταγενέστερα η θραύση των ράβδων τιτανίου.

Αποτυπώνοντας στο επίπεδο τα ακουστικά γεγονότα (events) (κατά μήκος θέσης x και καθ' ύψος θέσης y) για τα δύο σημαντικότερα χρονικά διαστήματα (B, Γ) παρατηρείται ότι στο B διάστημα υπάρχει μία κατανομή γεγονότων κατά μήκος του ρήγματος (η διαφορά του προσανατολισμού του ρήγματος οφείλεται σε διαφορετικό σύστημα αναφοράς) (Εικ. 10.29) ενισχύοντας την υπόθεση ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα κυριαρχεί η θραύση του ενδιάμεσου κονιάματος της σύνδεσης. Στη συνέχεια, απομονώνοντας τα γεγονότα (events) για το επόμενο χρονικό διάστημα (Γ) παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική συγκέντρωση στην περιοχή των ράβδων (Εικ. 10.30).

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



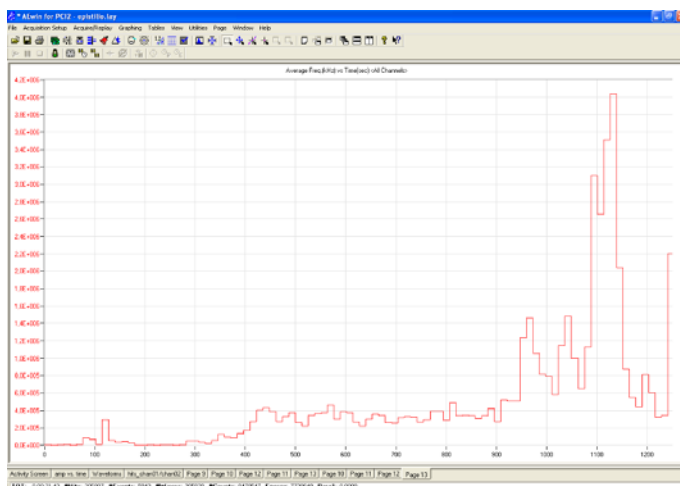
Εικόνα 10.29 Θέση (επίπεδος εντοπισμός) ακουστικών γεγονότων (events) για το χρονικό διάστημα Β.



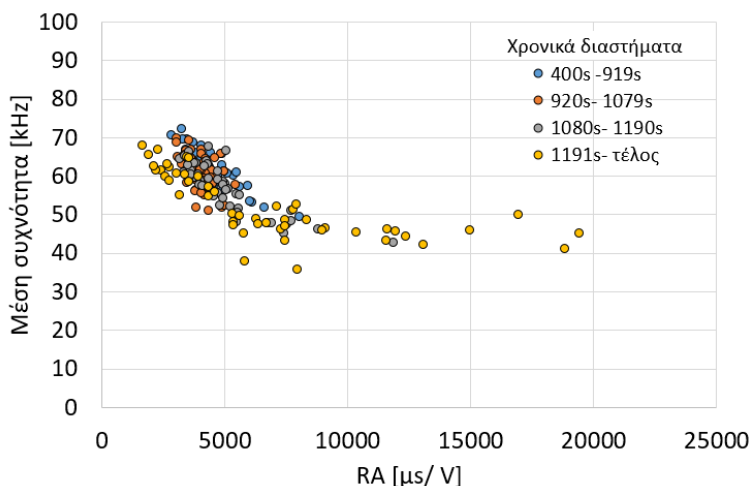
Εικόνα 10.30 Θέση (επίπεδος εντοπισμός) ακουστικών γεγονότων (events) για το χρονικό διάστημα Γ.

Στο διάγραμμα της Εικ. 10.31 δίνεται η χρονική εξέλιξη της αθροιστική συχνότητα των ακουστικών σημάτων. Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα μπορούν να οριστούν κάποια χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα όπου η συχνότητα κυμαίνεται στις ίδιες τιμές. Για τα διαστήματα αυτά θα προσδιοριστούν οι μέσες τιμές των συχνοτήτων και της παραμέτρου RA (Rise Time/ Amplitude) (Εικ. 10.32).

Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Εικόνα 10.31 Χρονική εξέλιξη αθροιστική συχνότητα ακουστικών σημάτων.

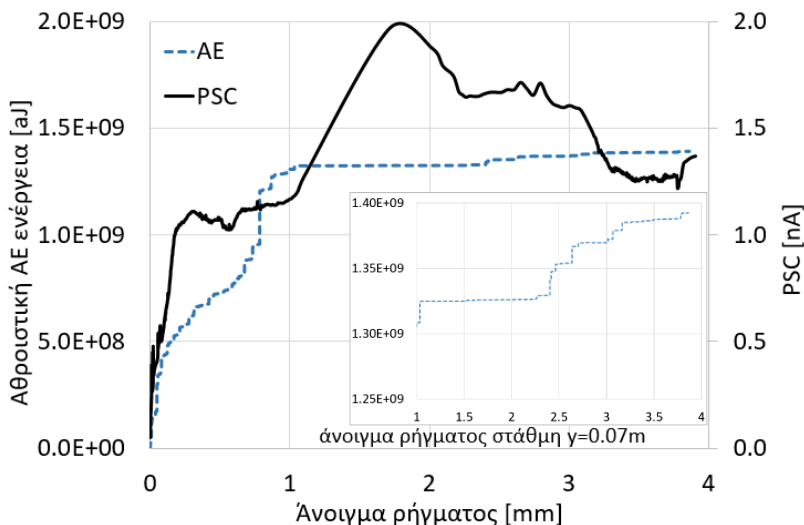


Εικόνα 10.32 Μεταβολή μέσης συχνότητας ακουστικών σημάτων ως προς την τιμή RA.

Τα σήματα στα αρχικά στάδια δεν παρουσιάζουν κάποια διαφορά ως προς την μέση συχνότητά και την παράμετρο RA παρά μόνο όσο πλησιάζει η τελική θραύση η τιμή RA αρχίζει σταδιακά να αυξάνεται σημαντικά.

Στην Εικ. 10.33 δίνεται η μεταβολή των ηλεκτρικών σημάτων και της αθροιστικής ακουστικής ενέργειας ως προς το άνοιγμα του ρήγματος. Οι δύο βασικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν αναγόμενες στο άνοιγμα του ρήγματος παρουσιάζουν μεταβολές «χρονικά» ταυτόσημες. Όταν αυξάνεται το PSC αυξάνεται και η αθροιστική ακουστική ενέργεια. Στον τελευταίο ανοδικό κλάδο του PSC η ακουστική ενέργεια φαίνεται σταθερή (σε σχέση με τις μεταβολές που σημειώθηκαν στα αρχικά στάδια, υπάρχει μεταβολή η οποία εντοπίζεται εστιάζοντας σε αυτή την περιοχή) και διατηρείται μέχρι την τελική θραύση.

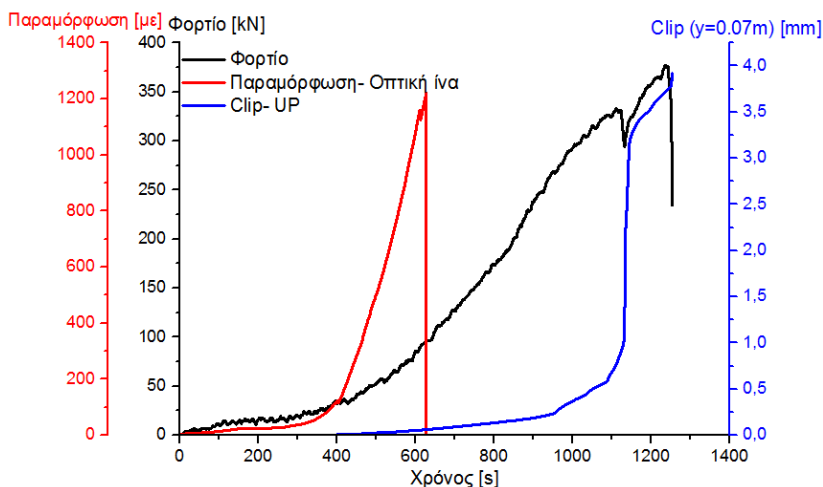
Αποκατάσταση μονολιθικότητας θραυσμένου επιστυλίου



Εικόνα 10.33 Μεταβολή αθροιστικής ακουστικής ενέργειας και ηλεκτρικών σημάτων PSC ως προς το άνοιγμα του ρήγματος.

Τέλος, για λόγους πληρότητας, μιας και δεν υπήρξε η αναμενόμενη απόκριση από τη χρήση της οπτικής ίνας, δίνεται στην Εικ. 10.34 το διάγραμμα της παραμόρφωσης της ράβδου όπου είχε τοποθετηθεί η ίνα πριν την κατασκευή του δοκιμίου μαζί με την μεταβολή του φορτίου και του ανοίγματος του ρήγματος.

Η ίνα δείχνει ότι η ράβδος εφελκύεται και μάλιστα με μεγαλύτερο ρυθμό μετά την χαρακτηριστική χρονική στιγμή των 400s. Όμως πολύ σύντομα διακόπτεται η καταγραφή χωρίς να μπορεί να αναχθεί το γεγονός αυτό σε κάποιο φυσικό φαινόμενο ή αστοχία του μετρητικού συστήματος.



Εικόνα 10.34 Χρονική μεταβολή καταγραφής παραμόρφωσης ράβδου (γ=0.07m) μέσω οπτικής ίνας, φορτίου και ανοίγματος του ρήγματος μέσω clip gauge στη στάθμη γ=0.07m.

Μέρος 4^ο

11. Προσομοίωση δοκιμών εξόλκευσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Elements FE)

11.1 Εισαγωγή- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS- Βασικές αρχές

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων σε διάφορα τεχνικά προβλήματα. Δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα όμως όταν τα προβλήματα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα απαιτεί αυξημένη υπολογιστική ισχύ.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα παρακάτω στάδια:

- Εισαγωγή της γεωμετρίας του προβλήματος σε δύο ή τρεις διαστάσεις.
- Διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία.
- Επιλογή του είδους της επίλυσης και εισαγωγή των δεδομένων που απαιτούνται.
- Επίλυση της αριθμητικής μεθόδου.

Το βασικό βήμα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η διακριτοποίηση του φορέα. Κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει ένα διακριτό ποσοστό της φυσικής δομής του φορέα. Τα στοιχεία μεταξύ τους μοιράζονται κάποιους κόμβους. Η διακριτοποίηση μπορεί να είναι πυκνή ή αραιή ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων ανά μονάδα μήκους ή επιφάνειας του στοιχείου στο σύνολο του.

Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS υπάρχουν δύο τρόποι επίλυσης προβλημάτων (151). Η επίλυση «γενικού σκοπού» (ABAQUS Standard) η οποία μπορεί να επιλύσει ένα μεγάλο εύρος γραμμικών και μη προβλημάτων τα οποία αφορούν στατικές, δυναμικές θερμικές, ηλεκτρικές κ.α. φορτίσεις (επιλύει ρητά συστήματα εξισώσεων σε κάθε στοιχείο-increment). Ο δεύτερος τρόπος προσέγγισης (ABAQUS explicit) προσεγγίζει μία λύση που έπεται χρονικά κάνοντας δοκιμές σε μικρά χρονικά στοιχεία (time increments) χωρίς να επιλύει συστήματα εξισώσεων, χωρίς δηλαδή να σχηματίζει καθολικό μητρώο ακαμψίας όπως γίνεται στην επίλυση «γενικού σκοπού».

Πιο συγκεκριμένα, το ABAQUS /Standard χρησιμοποιεί αυτόματη διακριτοποίηση βασισμένη στη μέθοδο Newton- Raphson (επίσης γνωστή ως μέθοδος Newton). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης συναρτήσεων. Στοχεύει στο να επιτευχθεί δυναμική ισορροπία στο τέλος κάθε χρονικού στοιχείου-increment ($t+\Delta t$) και να υπολογιστούν οι μετακινήσεις στον ίδιο χρόνο. Σε ένα στατικό πρόβλημα η χρονική μεταβλητή t δεν έχει πραγματικές διαστάσεις χρόνου, απλά αναφέρεται στο αντίστοιχο επαυξητικό βήμα φόρτισης (152). Το χρονικό διάστημα Δt είναι σχετικά μεγάλο συγκρίνοντας το με τη μέθοδο explicit.

Σε ένα γενικό πρόβλημα της μηχανικής, η εξίσωση της ισορροπίας εκφράζει την ισορροπία των εξωτερικά επιβαλλόμενων δράσεων P_t και των εσωτερικών δράσεων F_t που προκύπτουν από την ολοκλήρωση των τάσεων στον όγκο του φορέα.

$$F_t = P_t \quad 11.1$$

Η εξίσωση 11.1 είναι η θεμελιώδης εξίσωση για κάθε μη γραμμική στατική δυναμική ανάλυση. Υποθέτοντας ότι έχει επιλυθεί το πρόβλημα για το βήμα της χρονικής στιγμής t , στο βήμα φόρτισης Δt το διάνυσμα των συνολικών εξωτερικών δράσεων θα είναι:

$$P_{t+\Delta t} = P_t + \Delta P \quad 11.2$$

Όπου P_t , $P_{t+\Delta t}$, αντιστοιχούν στο φορτίο στην αρχή και στο τέλος του βήματος φόρτισης, ενώ ΔP είναι το βήμα φόρτισης, το οποίο θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητο από τις μετατοπίσεις. Αντίστοιχα για το διάνυσμα των μετατοπίσεων ισχύει:

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta u \quad 11.3$$

Οι μετατοπίσεις στην αρχή του βήματος είναι γνωστές συνεπώς μένει να υπολογιστούν οι επαυξητικές μετατοπίσεις ώστε να ισχύει η συνθήκη ισορροπίας στο τέλος του βήματος $t + \Delta t$. Αν αναπτύξουμε κατά Taylor τις εσωτερικές δυνάμεις $F_{t+\Delta t}$ γύρω από τις μετατοπίσεις u_t προκύπτει:

$$F_{t+\Delta t} = F_t + \frac{\partial F_t}{\partial u_t} \Delta u \quad 11.4$$

όπου $\frac{\partial F_t}{\partial u_t}$ το εφαπτομενικό μητρώο στιβαρότητας K_t .

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις η εξίσωση ισορροπίας γράφεται:

$$K_t \Delta u_t = P_{t+\Delta t} - F_t \quad 11.5$$

Η λύση του προβλήματος για κάθε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί μόνο αν το βήμα των επαυξητικών φορτίων ΔP είναι επαρκώς μικρό ώστε η εξίσωση 11.1 να ικανοποιείται σε κάθε βήμα φόρτισης. Στην αντίθετη περίπτωση εισάγεται σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό των μετατοπίσεων το οποίο είναι αθροιστικό, δηλαδή στο σφάλμα κάθε νέου βήματος προστίθεται το σφάλμα των προηγούμενων βημάτων. Για να αποφευχθεί αυτό σε κάθε επαυξητικό βήμα φόρτισης εισάγονται διορθωτικές επαναλήψεις. Η εξίσωση ισορροπίας κατά την j -οστή διορθωτική επανάληψη της χρονικής στιγμής $t+\Delta t$ θα είναι:

$$K_{t+\Delta t}^{j-1} \Delta u^j = P_{t+\Delta t} - F_t^{j-1} \quad 11.6$$

Οι μετατοπίσεις εντός μιας διορθωτικής επανάληψης μπορούν να διαχωριστούν στις συνολικές μετατοπίσεις εντός του βήματος Δu και στις μετατοπίσεις δu^j κάθε διορθωτικής επανάληψης, δηλαδή:

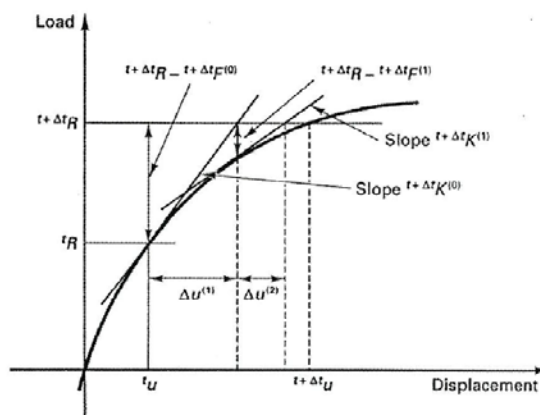
$$\Delta u_{t+\Delta t}^j = \Delta u_{t+\Delta t}^{j-1} + \delta u^j \quad 11.7$$

Οι συνολικές μετατοπίσεις μπορούν να γραφούν:

$$u_{t+\Delta t}^j = u_{t+\Delta t}^{j-1} + \delta u^j$$

$$u_{t+\Delta t}^j = u_t^0 + \Delta u_{t+\Delta t}^j \quad 11.8$$

Οι διορθωτικές επαναλήψεις εντός κάθε βήματος συνεχίζονται μέχρι να ικανοποιηθεί η ισορροπία μεταξύ των εξωτερικών και των εσωτερικών δυνάμεων, δηλαδή μέχρι η διαφορά τους να είναι ίση με το μηδενικό διάνυσμα. Πρακτικά αυτό προκύπτει με τη χρήση ενός κατάλληλου κριτηρίου σύγκλισης στο οποίο χρησιμοποιείται μια προκαθορισμένη ανοχή. Η μέθοδος Newton-Raphson θεωρείται ότι έχει υψηλό ρυθμό σύγκλισης αφού το μητρώο στιβαρότητας υπολογίζεται σε κάθε διορθωτική επανάληψη. Η διατύπωση του μητρώου στιβαρότητας σε κάθε επανάληψη έχει ως συνέπεια μεγάλο αριθμό υπολογισμών και είναι μία χρονοβόρα διαδικασία (152).



Εικόνα 11.1 Η πλήρης μέθοδος Newton-Raphson (152).

Οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης της εξίσωσης κίνησης έχουν πιο γενικό χαρακτήρα αφού υπολογίζεται η σχέση 11.8 για κάθε χρονικό βήμα. Ο όρος άμεση έγκειται στο ότι οι εξισώσεις δεν έχουν υποστεί κανενός είδους μετασχηματισμό πριν την επίλυση τους. Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται στις ρητές μεθόδους (explicit methods) και στις μη ρητές μεθόδους (implicit methods) ολοκλήρωσης. Η διαφορά τους έγκειται στη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρεται η ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης. Σε μία ρητή μέθοδο ολοκλήρωσης προκειμένου να υπολογιστεί η απόκριση της χρονικής στιγμής $t+\Delta t$ χρησιμοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας της χρονικής στιγμής t . Αντίθετα στις μη ρητές μεθόδους χρησιμοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας της χρονικής στιγμής $t+\Delta t$. Πρακτικά η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων ολοκλήρωσης εστιάζεται στο μέγεθος του επιτρεπόμενου βήματος ολοκλήρωσης Δt . Οι ρητές μέθοδοι εξ' ορισμού έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά για να είναι η λύση πάντοτε ευσταθής απαιτείται πολύ μικρό βήμα ολοκλήρωσης. Αντίθετα οι μη ρητές μέθοδοι επιτρέπουν τη χρήση μεγαλύτερου βήματος και άρα λιγότερων βημάτων ολοκλήρωσης αλλά συχνά συνοδεύονται με σφάλματα (152).

11.2 Προσομοίωση συνθηκών επαφής

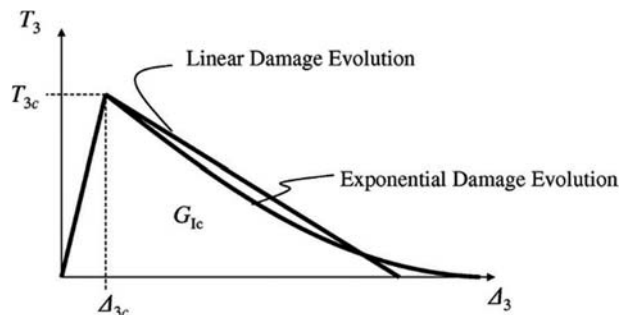
Κατά την προσομοίωση του πειράματος της εξόλκευσης (Κεφάλαιο 9) στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS πέραν της διακριτοποίησης των μελών που συνεργάζονται, σημαντικό είναι ο τρόπος που θα προσομοιωθούν οι διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών.

Το ABAQUS δίνει τη δυνατότητα όταν η απόσταση μεταξύ δύο επιφανειών είναι πάρα πολύ μικρή (αμελητέα), η σύνδεση τους να διέπεται απευθείας από ένα νόμο «έλξης- διαχωρισμού (traction- separation)» χωρίς την ενδιάμεση παρεμβολή ξεχωριστών στοιχείων (contact elements) με συγκεκριμένες ιδιότητες που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Η σχέση traction-separation υποθέτει αρχικά ότι η συμπεριφορά της διεπιφάνειας είναι γραμμικώς ελαστική. Ακολουθεί μία συνθήκη έναρξης και διάδοσης της βλάβης. Η ελαστική συμπεριφορά γράφεται σε όρους ενός ελαστικού μητρώου το οποίο συσχετίζει τις κάθετες και διατμητικές τάσεις με τις κάθετες και διατμητικές μετακινήσεις (separations) κατά μήκος της διεπιφάνειας.

Το κάθετο διάνυσμα των τάσεων (nominal traction stress vector) t περιλαμβάνει 3 συνιστώσες (δύο σε διδιάστατα προβλήματα) t_n, t_s και t_t στα τριδιάστατα. Οι συνιστώσες αυτές αντιπροσωπεύουν την κάθετη (κατά τον 3-τοπικό άξονα στις 3 διαστάσεις και κατά τον 2 τοπικό στις 2 διευθύνσεις) και τις δύο διατμητικές (κατά τον 1 και 2 τοπικό άξονα στις τρεις διαστάσεις και κατά τον 1 τοπικό άξονα στις 2 διαστάσεις) αντίστοιχα. Οι αντίστοιχοι διαχωρισμοί-separations ορίζονται από τους όρους $\delta_n, \delta_s, \delta_t$. Η ελαστική συμπεριφορά μπορεί να γραφτεί:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad 11.9$$

Στην κάθετη διεύθυνση της επιφάνεια, η σχέση μεταξύ πίεσης και απόστασης καθοδηγεί τη θλιπτική συμπεριφορά μεταξύ των επιφανειών και δεν σχετίζονται με τη «συνεκτική συμπεριφορά (cohesive behavior)» καθώς η κάθε μία περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειών σε διαφορετική περιοχή επαφής. Στη διατμητική διεύθυνση, αν η «συνεκτική- cohesive» ακαμψία είναι ακέραιη θεωρείται ότι το μοντέλο συνάφειας είναι ενεργό και το μοντέλο της τριβής είναι αδρανές. Οποιαδήποτε εφαπτομενική ολίσθηση θεωρείται ότι είναι καθαρά ελαστική και ανθίσταται λόγω της αντοχής συνοχής του δεσμού δίνοντας διατμητικές δυνάμεις. Αν υπάρξει ζημιά, η συνεισφορά των διατμητικών δυνάμεων ξεκινάει να υποβαθμίζεται με την εξέλιξη της ζημιάς. Καθώς η ακαμψία συνάφειας ξεκινάει να μειώνεται, το μοντέλο της τριβής ενεργοποιείται και ξεκινά να συνεισφέρει στις διατμητικές τάσεις. Η ελαστική ακαμψία επαφής του μοντέλου τριβής αυξάνεται ως ποσοστό της μείωσης της ακαμψίας συνοχής. Πριν την τελική αστοχία του δεσμού συνοχής και ακολούθως της έναρξης της απομείωσης του συνεκτικού δεσμού, η διατμητική τάση είναι ένας συνδυασμός της συνεισφοράς των δύο μοντέλων, τριβής και συνοχής (Εικ. 11.2).



Εικόνα 11.2 Σχηματική απεικόνιση νόμου διεπιφάνειας ABAQUS.

Η έναρξη της ζημιάς αναφέρεται στην αρχή της απομείωσης της συνοχής σε ένα σημείο επαφής. Η διαδικασία της απομείωσης ξεκινά όταν οι τάσεις επαφής ή και η απομάκρυνση των επιφανειών ικανοποιεί συγκεκριμένο κριτήριο. Τα διαθέσιμα κριτήρια ζημιάς είναι:

$$\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad 11.10$$

$$\max \left\{ \frac{\delta_n}{\delta_n^0}, \frac{\delta_s}{\delta_s^0}, \frac{\delta_t}{\delta_t^0} \right\} = 1 \quad 11.11$$

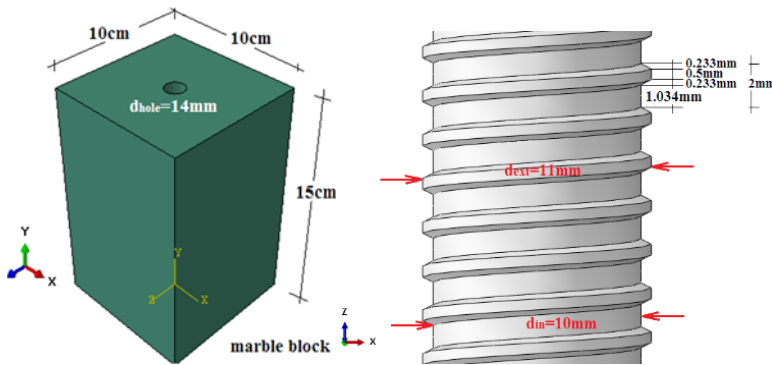
$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad 11.12$$

$$\left\{ \frac{\delta_n}{\delta_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\delta_s}{\delta_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\delta_t}{\delta_t^0} \right\}^2 = 1 \quad 11.13$$

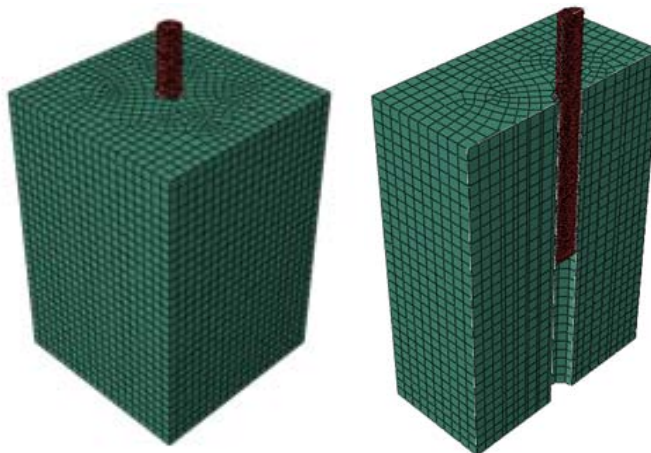
Στις παρακάτω αριθμητικές αναλύσεις δοκιμάστηκαν και τα τέσσερα παραπάνω κριτήρια αστοχίας και τα αποτελέσματα ταυτίζονταν πλήρως. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω προέκυψαν βάσει του κριτηρίου 11.10.

11.3 Χαρακτηριστικά και αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης

Τα αριθμητικά προσομοιώματα τόσο των δύο διαστάσεων (αξονοσυμμετρικό αριθμητικό προσομοίωμα) όσο και των τριών διαστάσεων κατασκευάστηκαν πιστά ως προς τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του πειραματικού δοκιμίου (10cm x10cm x15cm). Αναλυτικά οι διαστάσεις δίνονται στην Εικ. 11.3. Κρίνοντας από τα πειραματικά αποτελέσματα, η συμπεριφορά του δοκιμίου στην εξόλκευση δεν επηρεάζεται από τις διαστάσεις του μαρμάρου αλλά από τις ιδιότητες των διεπιφανειών των εμπλεκόμενων υλικών. Γι' αυτό επιλέχθηκε το δοκίμιο με τις μικρότερες διαστάσεις μαρμάρου.



Εικόνα 11.3 Διαστάσεις αριθμητικού προσομοιώματος.

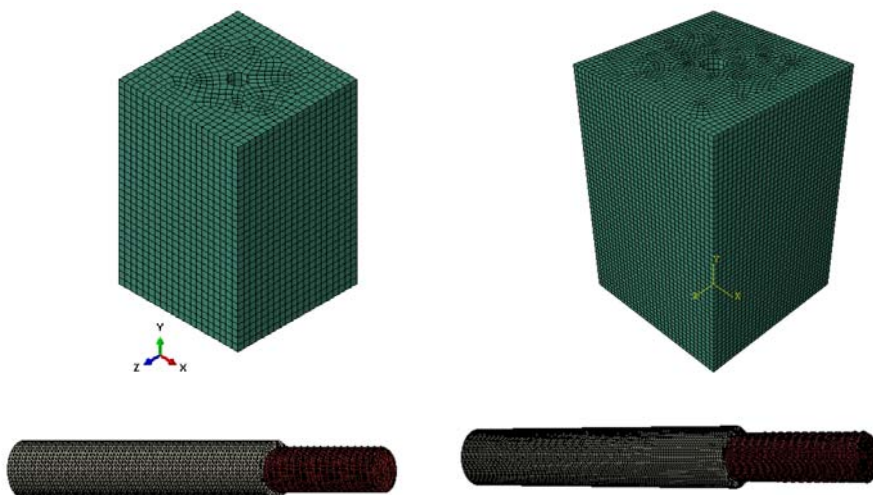


Εικόνα 11.4 Ενδεικτική απεικόνιση πλέγματος ενός αριθμητικού προσομοιώματος 3 διαστάσεων.

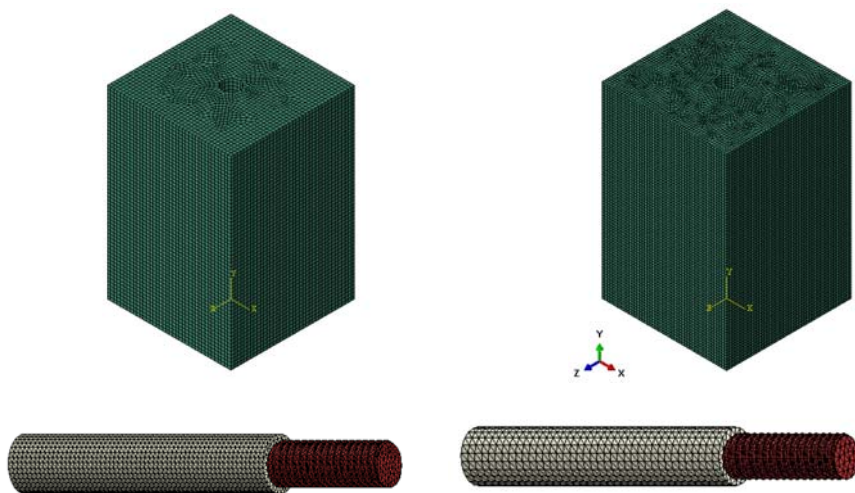
Είναι βασικό στις αριθμητικές αναλύσεις να γίνονται κάποιες παραμετρικές αναλύσεις ώστε να βρεθεί το καταλληλότερο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων και τα χαρακτηριστικά του αριθμητικού προσομοιώματος. Βασικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων με το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος.

Αρχικά στο τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, θα δοκιμαστούν διάφορα δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων αλλά και διαφορετική χρονική διακριτοποίηση της ανάλυσης ώστε να επιλεγθεί το προσομοίωμα με τον ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο (CPU time) και με αποτελέσματα όσο πιο κοντά στα αντίστοιχα πειραματικά.

Το πλήθος των στοιχείων τόσο για το σύμπλεγμα κονίαμα- ράβδου όσο και για το μάρμαρο δίνονται στον Πιν. 11.1. Επίσης δίνεται ο αντίστοιχος υπολογιστικός χρόνος για κάθε ένα από τα αριθμητικά προσομοιώματα τα οποία δοκιμάστηκαν.



Εικόνα 11.5 Γεωμετρία διακριτοποίησης ράβδου-κονιάματος και μαρμάρου για το προσομοίωμα model 01 (αριστερά) και για το προσομοίωμα model 02(δεξιά).

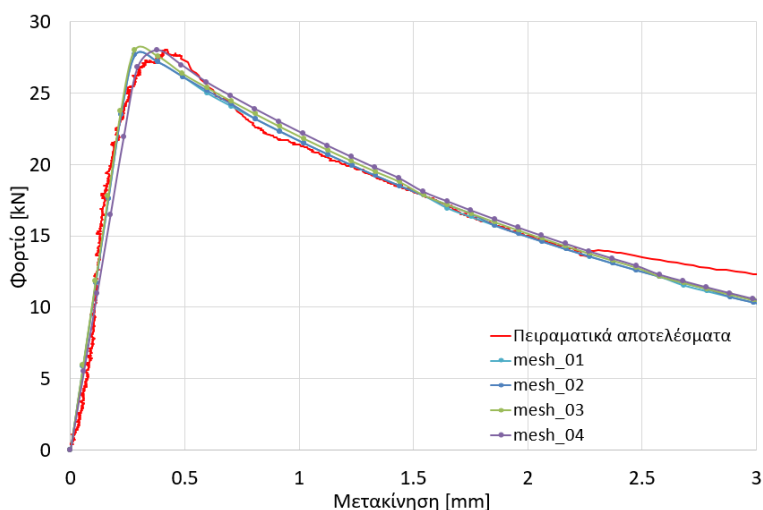


Εικόνα 11.6 Γεωμετρία διακριτοποίησης ράβδου-κονιάματος και μαρμάρου για το προσομοίωμα model 03 (αριστερά) και για το προσομοίωμα model 04(δεξιά).

Πίνακας 11.1 Το πλήθος των στοιχείων του σύμπλεγματος κονίαμα-ράβδου & μαρμάρου, ο υπολογιστικός χρόνος κάθε προσομοιώματος και ο λόγος της διάστασης των στοιχείων της ράβδου-κονιάματος με τη διάσταση του στοιχείου του μαρμάρου.

Τίτλος	CPU χρόνος [s]	Αριθμός τετράεδρων στοιχείων	Αριθμός εξάεδρων στοιχείων	Λόγος διάστασης έδρας τετράεδρου/ εξάεδρου στοιχείου
Model 01	4878,8	152532	15150	1:5
Model 02	52853	352358	72350	~ 1:4
Model 03	65400	92620	93728	~ 1:2
Model 04	278673	42840	215625	1:1

Στην Εικ. 11.7 δίνεται η καμπύλη δύναμη εξόλκευσης- μετακίνηση ράβδου που προέκυψε από τις αναλύσεις των 4 προσομοιωμάτων σε συνδυασμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα των 4 δοκιμών είναι ταυτόσημα και πολύ κοντά με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Όμως σύμφωνα με τον Πίν. 11.1 οι αναλύσεις μπορεί να έδωσαν όμοια αποτελέσματα όμως υπολογιστικά όσο αυξάνεται το δίκτυο, όσο δηλαδή γίνεται πιο πυκνό το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων, τόσο πιο απαιτητική σε χρόνο είναι η ανάλυση.



Εικόνα 11.7 Διαγράμματα φορτίου μετακίνησης για τα 4 αριθμητικά προσομοιώματα με διαφορετικά δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειράματος.

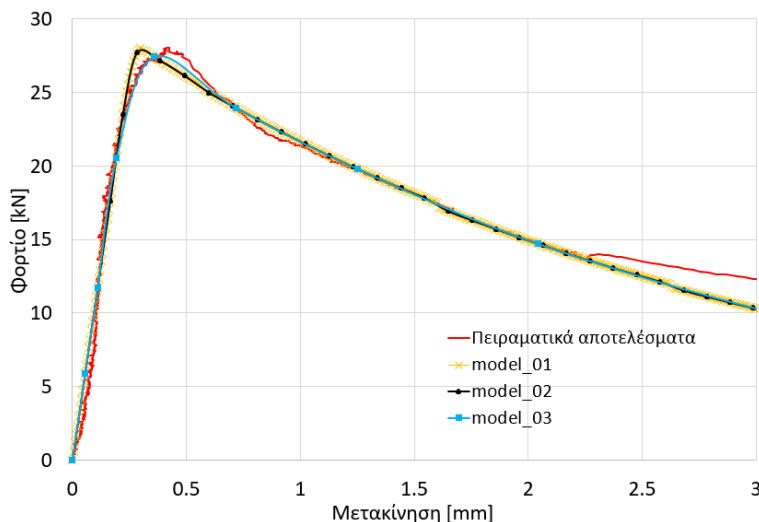
Στο ABAQUS Standard, ο ρυθμός σύγκλισης της ανάλυσης και η αξιόπιστη προσομοίωση της σταδιακής αστοχίας των δομικών μελών με διεπιφάνειες επηρεάζεται σημαντικά από το χρονικό στοιχείο (time increment) το οποίο θα επιλεγεί. Όσο πιο μικρό είναι τόσο πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα αλλά ιδιαίτερα χρονοβόρα (υψηλός CPU (Central Processing Time) χρόνος).

Το βέλτιστο μοντέλο ως προς το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων θα δοκιμαστεί για 3 διαφορετικές χρονικές διακριτοποιήσεις.

Στο διάγραμμα που προκύπτει, οι καμπύλες έχουν και το πλήθος των σημείων στα οποία η ανάλυση ανάλογα με τη χρονική διακριτοποίηση δίνει αποτελέσματα (Εικ. 11.8). Η κίτρινη καμπύλη όπου τα σημεία ολοκλήρωσης είναι πυκνότερα ταυτίζεται με την μαύρη που έχει λιγότερα. Η μπλε καμπύλη έχει τα λιγότερα σημεία ολοκλήρωσης και κρίνεται ανεπαρκής από τη στιγμή που τα διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών σημείων είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μην δίνονται στοιχεία για τη δύναμη και τη μετακίνηση της ράβδου. Στον Πίν. 11.2 δίνεται ο υπολογιστικός χρόνος για τις τρεις αναλύσεις. Το πρώτο προσομοίωμα (κίτρινη καμπύλη) είναι σαφέστατα κοστοβόρο υπολογιστικά και δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το δεύτερο το οποίο έχει λιγότερα σημεία ολοκλήρωσης. Συνεπώς επιλέγεται το δεύτερο προσομοίωμα.

Πίνακας 11.2 CPU time για τα τρία μοντέλα με διαφορετική χρονική διακριτοποίηση.

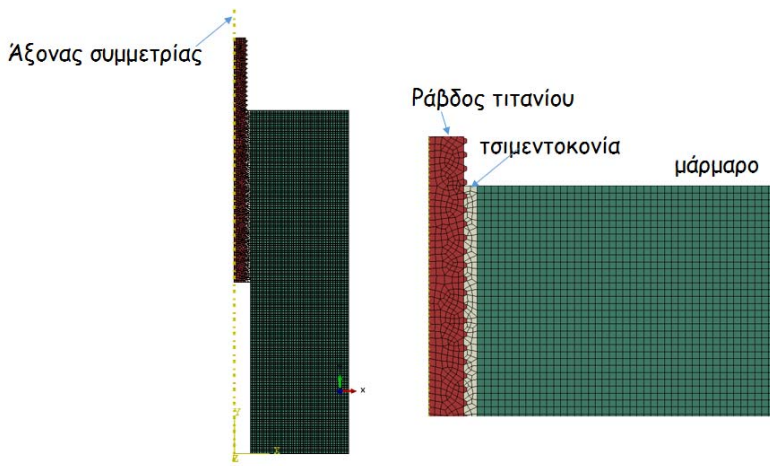
Τίτλος	CPU χρόνος [s]	Χρονικό στοιχείο [time increment]
Model_01	42584	0,001
Model_02	4878,8	0,01
Model_03	1508,8	0,1



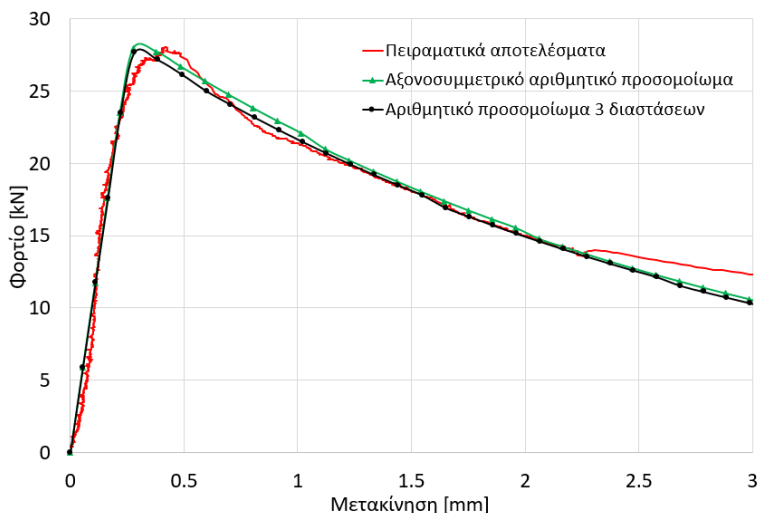
Εικόνα 11.8 Διαγράμματα φορτίου μετακίνησης για τα 3 αριθμητικά προσομοιώματα με διαφορετική χρονική διακριτοποίηση και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειράματος.

Όταν το αριθμητικό μοντέλο έχει κάποια συμμετρία, είναι συμφέρον υπολογιστικά να λαμβάνεται υπόψη. Στο παρόν πρόβλημα, μπορεί να γίνει η εκμετάλλευση του άξονα συμμετρίας ως προς το κέντρο της διατομής της ράβδου και να κατασκευαστεί ένα απλούστερο προσομοίωμα δύο διαστάσεων (Εικ. 11.9).

Οι διαστάσεις και οι ιδιότητες του υλικού παραμένουν ίδιες.



Εικόνα 11.9 Σχηματική απεικόνιση αριθμητικού προσομοιώματος 2 διαστάσεων.



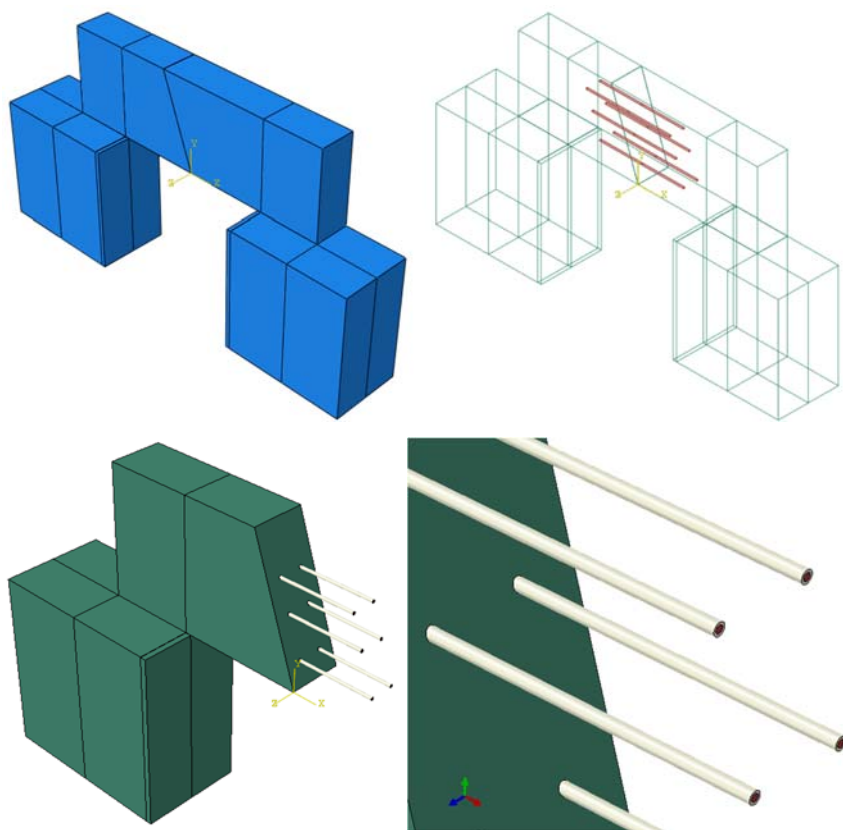
Εικόνα 11.10 Διαγράμματα φορτίου μετακίνησης για τα αριθμητικά προσομοιώματα 2 διαστάσεων, 3 διαστάσεων και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειράματος.

Ο υπολογιστικός χρόνος για το τρισδιάστατο πρόβλημα είναι σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για το διδιάστατο και οι καμπύλες όπως δίνονται στην Εικ. 11.10 για τα δύο προσομοιώματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και ικανοποιητικά ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα.

12. Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης

12.1 Προσομοίωση δοκιμίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύση και συγκόλληση των θραυσμάτων με ράβδους τιτανίου.

Κατασκευάστηκε μοντέλο ενός θραυσμένου επιστυλίου με κεκλιμένο ρήγμα σε 3 διαστάσεις. Το μοντέλο αποτελείται από δύο βάσεις διαστάσεων 0.63m x 0.36m x 0.63m και δύο θραύσματα τα οποία συνδέονται με 6 ράβδους (Εικ. 12.1).

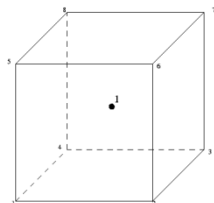


Εικόνα 12.1 Αριθμητικό μοντέλο, τομή και λεπτομέρεια σπλισμού του μοντέλου.

Οι ιδιότητες των υλικών που δόθηκαν στα επιμέρους τμήματα του προσομοιωματος βασίστηκαν στα πειραματικά στοιχεία που δόθηκαν στο κεφάλαιο 3. Στα μαρμάρινα στοιχεία αποδόθηκε υλικό γραμμικώς ελαστικό και ισότροπο επιλέγοντας για τα τμήματα του επιστυλίου τις ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου με βάση το διάγραμμα της Εικ. 3.3 (κεφάλαιο 3) ενώ για τις μαρμάρινες βάσεις δόθηκαν τα

χαρακτηριστικά του μαρμάρου κατά την ισχυρή του διεύθυνση (μέτρο ελαστικότητας $E=84.5$ GPa, λόγο Poisson $\nu=0.26$ και πυκνότητα $\rho=2.78$ g/cm³). Στο τιτάνιο αποδόθηκαν οι ιδιότητες του εμπορικού τιτανίου και θεωρήθηκε γραμμικώς ελαστικό και ισότροπο υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E=105$ GPa, λόγο Poisson $\nu=0.32$ και πυκνότητα $\rho=4.51$ g/cm³. Τέλος, το κονίαμα προσομοιώθηκε επίσης γραμμικώς ελαστικό και ισότροπο με μέτρο ελαστικότητας $E=15.4$ GPa, $\nu=0.26$ και πυκνότητα $\rho=1.7$ g/cm³.

Για τη διακριτοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε οκτακομβικό στοιχείο με ένα σημείο ολοκλήρωσης στο κέντρο του (Εικ. 12.2).



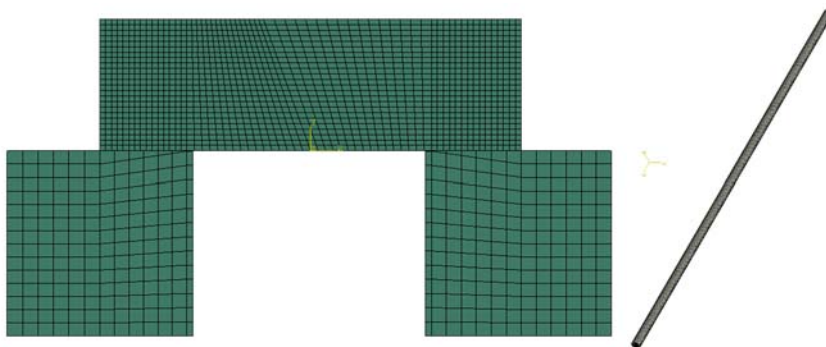
Εικόνα 12.2 Οκτακομβικό στοιχείο C3D8R.

Η ράβδος προσομοιώθηκε ως κύλινδρος διαμέτρου 6 mm (όπως και στο πειραματικό δοκίμιο) και μήκους 500 mm σε πλήρη συσσωμάτωση με το λεπτό στρώμα της τσιμεντοκονίας πάχους 2 mm. Μακροσκοπικά η προσομοίωση του σπειρώματος της ράβδου δεν προσέφερε ουσιαστική διαφορά στην εντατική κατάσταση του επιστυλίου παρά θα προσέθετε άσκοπο υπολογιστικό κόστος. Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που τελικά ορίστηκαν δίνονται συνοπτικά στον Πιν. 12.1.

Πίνακας 12.1 Αριθμός κόμβων και στοιχείων αριθμητικού προσομοιώματος.

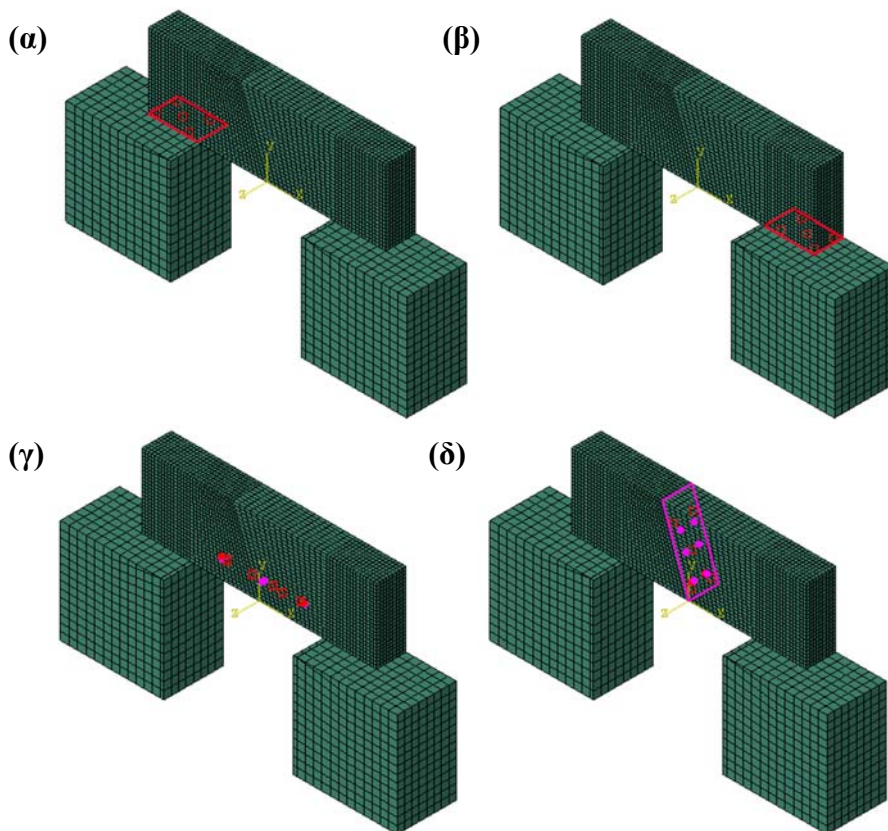
	κόμβοι	στοιχεία	Πλήθος
Ράβδος + τσιμεντοκονία	28998	24633	6 (ράβδοι)
Βάσεις	1881	1448	2 βάσεις
Επιστύλιο	52748	47056	2 θραύσματα

Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων δίνεται σχηματικά στην Εικ. 12.3.



Εικόνα 12.3 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για τα μαρμάρινα τμήματα (αριστερά) και το σύστημα ράβδου-τσιμεντοκονίας (δεξιά).

Το μοντέλο αποτελείται από διαφορετικά τμήματα τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των διεπιφανειών τους. Συνεπώς απαιτείται η χρήση «νόμου» που θα διέπει τη συμπεριφορά αυτών των διεπιφανειών. Αρχικά το επιστύλιο εδράζεται επί των 2 μαρμάρινων βάσεων, τα τμήματα επαφής είναι δύο (Εικ. 12.4 (α), (β)). Κάθε ένα σύστημα ράβδου-τσιμεντοκονίας έρχεται σε επαφή με τα δύο μαρμάρινα θραύσματα εκατέρωθεν του κεκλιμένου επιπέδου θραύσης (Εικ. 12.4 (γ)), 6 σημεία επαφής. Τέλος υπάρχει η αλληλεπίδραση των επιπέδων ένωσης των δύο μαρμάρινων θραυσμάτων (Εικ. 12.4 (δ)), ένα σημείο επαφής.

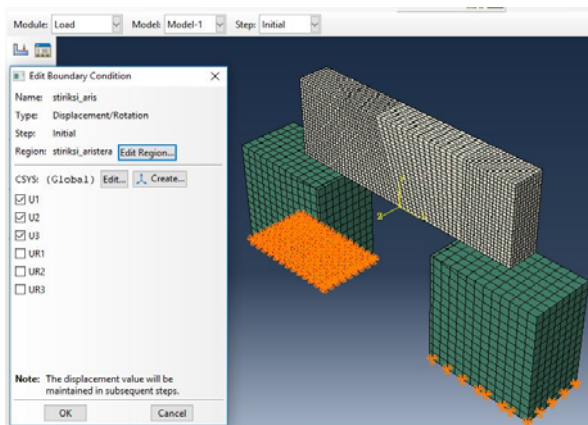


Εικόνα 12.4 (α) (β) Διεπιφάνειες μεταξύ επιστυλίου και μαρμάρινων βάσεων, (γ) διεπιφάνειες για μία ενδεικτική ράβδο-τσιμεντοκονία με το επιστύλιο, (δ) διεπιφάνεια κεκλιμένου επιπέδου θραύσης.

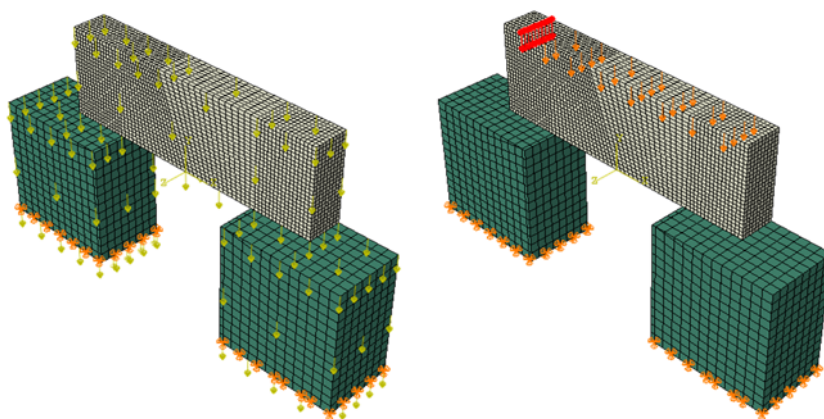
Οι διεπιφάνειες στη στήριξη του επιστυλίου επί των βάσεων αλλά και των δύο θραυσμάτων στο κεκλιμένο επίπεδο προσομοιώθηκαν ως απλές επαφές με συνθήκη τριβής ενώ στις διεπιφάνειες μεταξύ των ράβδων-τσιμεντοκονία με το μάρμαρο επιβλήθηκαν συνθήκες νόμου «έλξης- διαχωρισμού» όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 11.

Στην έδραση των δύο μαρμάρινων βάσεων επιλέχθηκε να δεσμευτούν οι μετακινήσεις σε όλες τις διευθύνσεις (U1, U2, U3) ενώ να υπάρχει δυνατότητα στροφής (Εικ. 12.5).

Η ανάλυση του φορέα έγινε σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιβλήθηκε το ίδιο βάρος του φορέα και στο δεύτερο βήμα επιβλήθηκε φόρτιση σε 8 ισαπέχοντα σημεία (όπως στο πείραμα) υπό μορφή μετατόπισης και υπό μορφή δύναμης (Εικ. 12.6).

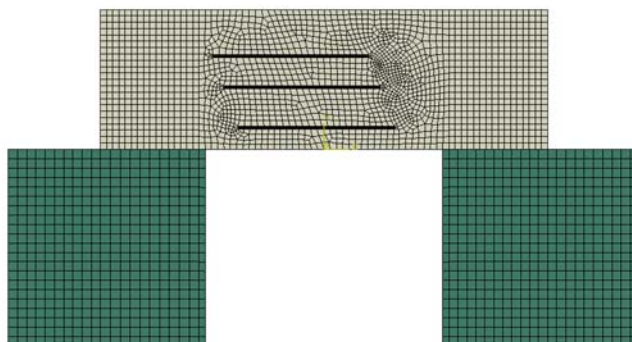


Εικόνα 12.5 Συνθήκες στήριξης μαρμάρινων βάσεων.



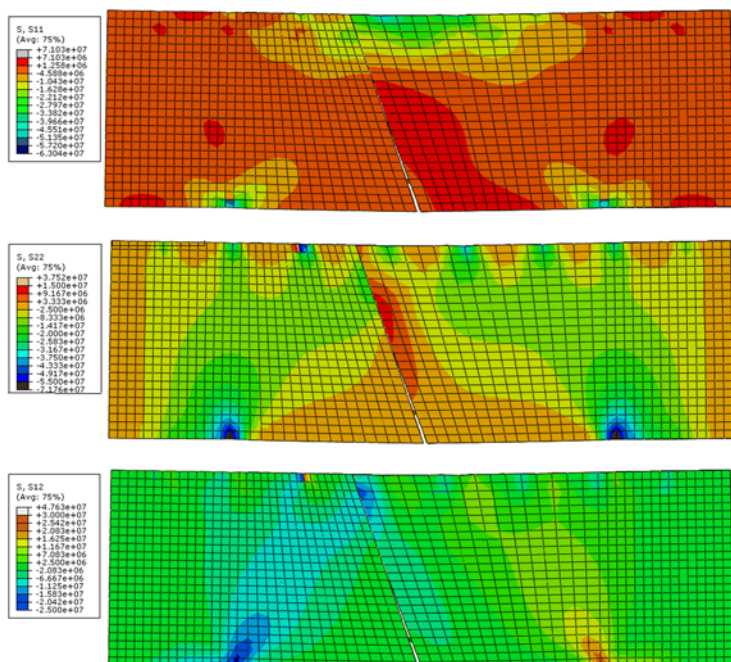
Εικόνα 12.6 Βήματα ανάλυσης, επιβολή ίδιου βάρους κατασκευής (αριστερά), επιβολή μετατόπισης σε 8 ισαπέχοντα σημεία (δεξιά).

Για υπολογιστικούς σκοπούς κατασκευάστηκε αριθμητικό προσομοίωμα 2 διαστάσεων. Τα χαρακτηριστικά των υλικών, οι συνθήκες στήριξης, οι νόμοι των διεπιφανειών αλλά και η επιβολή της φόρτισης διατηρήθηκαν ίδια για λόγους σύγκρισης. Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων για το προσομοίωμα δύο διαστάσεων δίνεται στην Εικ. 12.7.



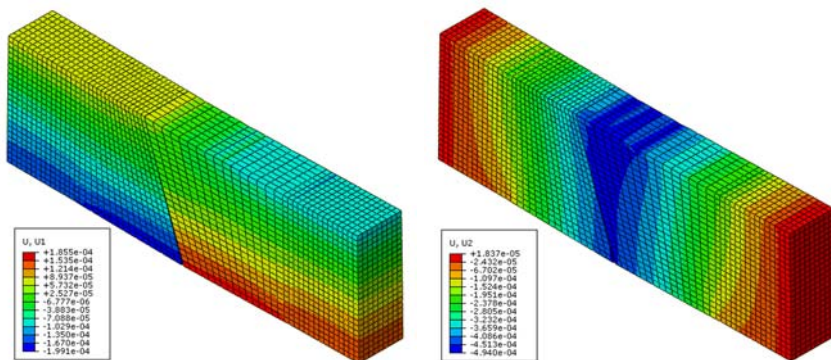
Εικόνα 12.7 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώματος 2 διαστάσεων.

Ενδεικτικά, στις εικόνες που ακολουθούν δίνονται οι ορθές τάσεις κατά τη διεύθυνση x και y , η διαμητική τάση τ_{xy} καθώς και οι μετατοπίσεις κατά x και y για το αριθμητικό προσομοίωμα των 3 διαστάσεων με επιβολή μετατόπισης.



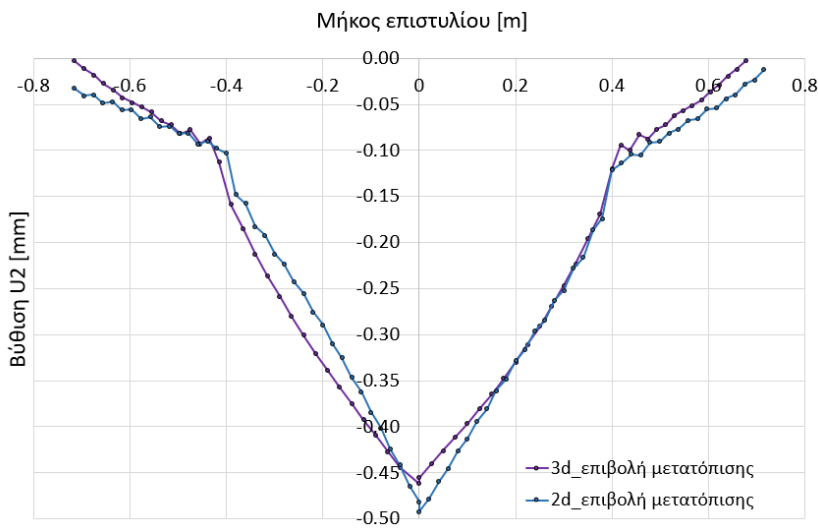
Εικόνα 12.8 Ορθές τάσεις και διαμητική τάση επιστυλίου (3 διαστάσεων αριθμητικό προσομοίωμα με επιβολή μετατόπισης).

Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης

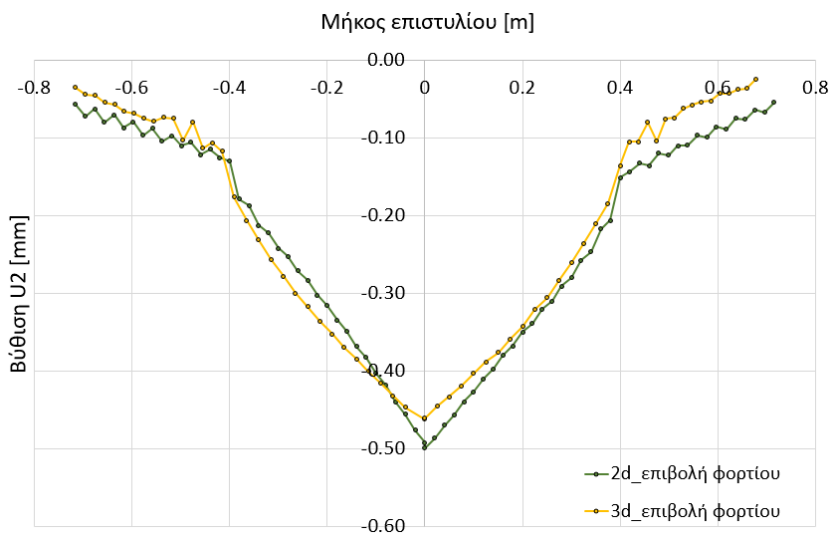


Εικόνα 12.9 Μετακινήσεις κατά x (αριστερά) και y (δεξιά) του επιστυλίου (3 διαστάσεων αριθμητικό προσομοίωμα με επιβολή μετατόπισης).

Τα αποτελέσματα των βυθίσεων του επιστυλίου από τα δύο προσομοιώματα (δύο και τριών διαστάσεων) δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων στις Εικ. 12.10, 12.11



Εικόνα 12.10 Διαγράμματα βύθισης επιστυλίου όπως προέκυψαν από τα αριθμητικά προσομοιώματα 2 και 3 διαστάσεων με επιβολή μετατόπισης.



Εικόνα 12.11 Διαγράμματα βύθισης επιστυλίου όπως προέκυψαν από τα αριθμητικά προσομοιώματα 2 και 3 διαστάσεων με επιβολή φορτίου.

Τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου και του πλήθους τόσο των στοιχείων όσο και των διεπιφανειών οι οποίες συντελούν στη συνολική συμπεριφορά των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

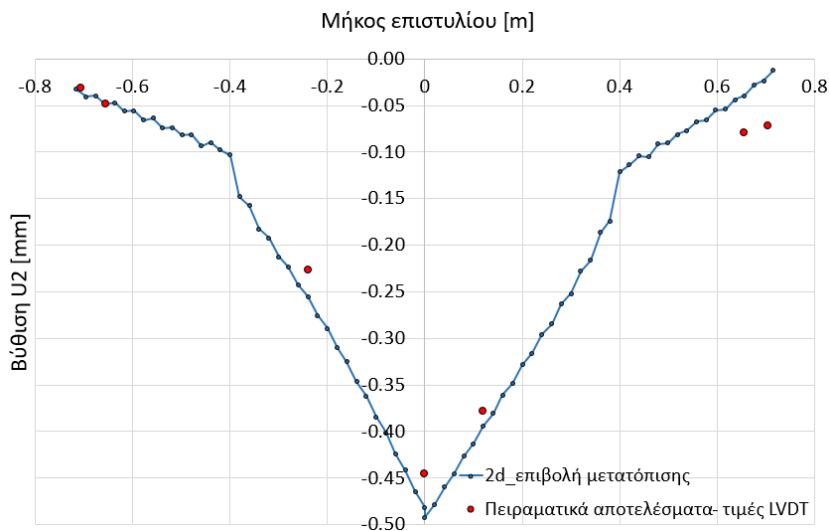
Είναι σημαντικό στις αριθμητικές προσομοιώσεις να υπάρχουν τα βέλτιστα αποτελέσματα με το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος. Στον Πιν. 12.2 δίνονται για τα 4 αριθμητικά μοντέλα ο υπολογιστικός χρόνος όπως δίνεται από το πρόγραμμα αλλά και ο αντίστοιχος πραγματικός που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση της ανάλυσης.

Πίνακας 12.2 Υπολογιστικό κόστος – Πραγματικός χρόνος

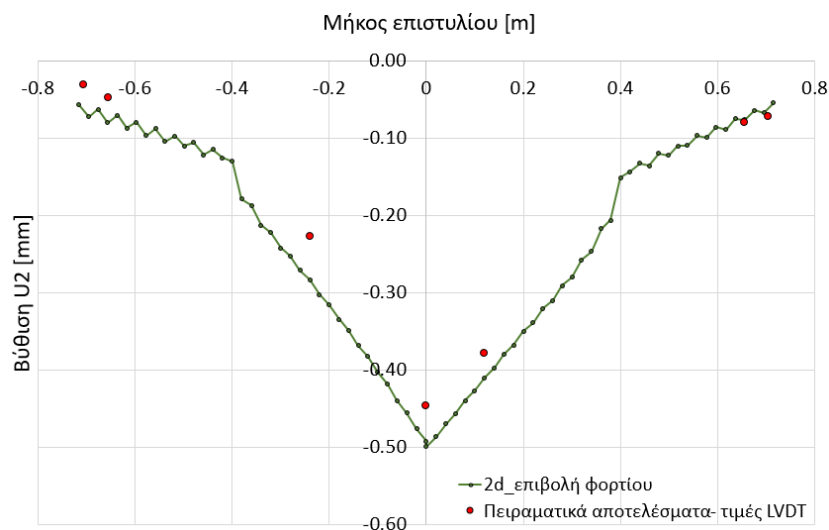
	CPU time [sec]	Πραγματικός χρόνος [min]
3d προσομοίωμα/ επιβολή μετατόπισης	34668	580
3d προσομοίωμα/ επιβολή φορτίου	36484	610
2d προσομοίωμα/ επιβολή μετατόπισης	47.90	1
2d προσομοίωμα/ επιβολή φορτίου	51.40	1

Τα προσομοιώματα των 2 διαστάσεων είναι σαφέστερα πιο «γρήγορα» υπολογιστικά (~ 700 φορές μικρότερο CPU χρόνο) λόγω του μικρού πλήθους των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται. Οι διαφορές των διαγραμμάτων των βυθίσεων για τα δύο προσομοιώματα (Εικ. 12.10, 12.11) είναι πολύ μικρές και ασήμαντες βάσει του χρόνου που απαιτείται στα προσομοιώματα των 3 διαστάσεων για να ολοκληρωθεί η ανάλυση.

Στις Εικ. 12.12, 12.13 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των βυθίσεων που προέκυψαν από τα προσομοιώματα των 2 διαστάσεων και των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων όπως καταγράφηκαν από τα μηχανοσκόπια τύπου LVDT.



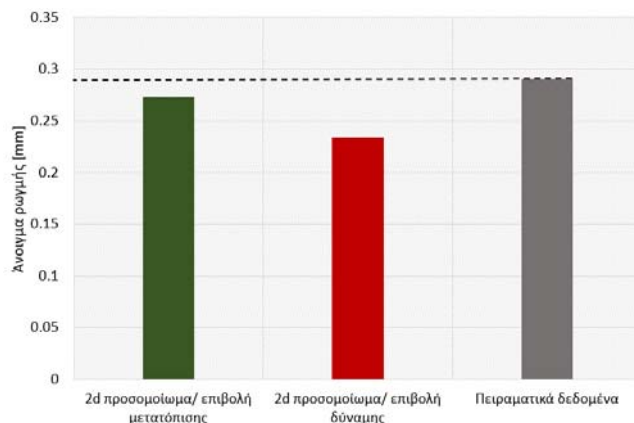
Εικόνα 12.12 Διαγράμματα βύθισης επιστυλίου όπως προέκυψαν από το πείραμα (LVDTs) και τα αριθμητικά προσομοιώματα 2 διαστάσεων με επιβολή μετατόπισης.



Εικόνα 12.13 Διαγράμματα βύθισης επιστυλίου όπως προέκυψαν από το πείραμα (LVDTs) και τα αριθμητικά προσομοιώματα 2 διαστάσεων με επιβολή φορτίου.

Η προσέγγιση των μοντέλων κρίνεται ικανοποιητική.

Τέλος, στην Εικ. 12.14 παρουσιάζεται σε μορφή ραβδογράμματος το άνοιγμα της ρωγμής όπως προέκυψε από τα αριθμητικά μοντέλα καθώς και η αντίστοιχη τιμή από το πείραμα όπως καταγράφηκε από το clip gauge. Οι τιμές είναι συγκριτικά αρκετά κοντά.

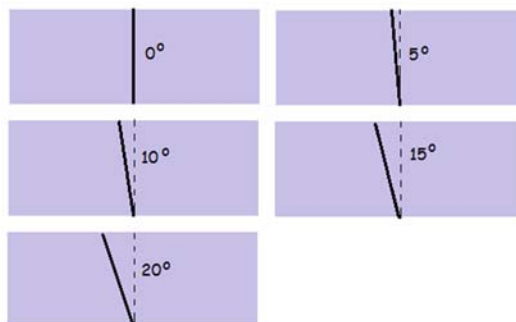


Εικόνα 12.14 Άνοιγμα ρήγματος όπως προέκυψε από το πείραμα και τα αριθμητικά προσομοιώματα 2 διαστάσεων.

Με βάση τα παραπάνω, τα αριθμητικά προσομοιώματα των δύο διαστάσεων μπορούν να δώσουν αξιόπιστα και γρήγορα αποτελέσματα για την προσομοίωση της κάμψης 10 σημείων επί του αποκαταστημένου επιστυλίου.

12.2 Παραμετρική ανάλυση επιρροής της κλίσης του θραύσματος στη συνολική συμπεριφορά του επιστυλίου

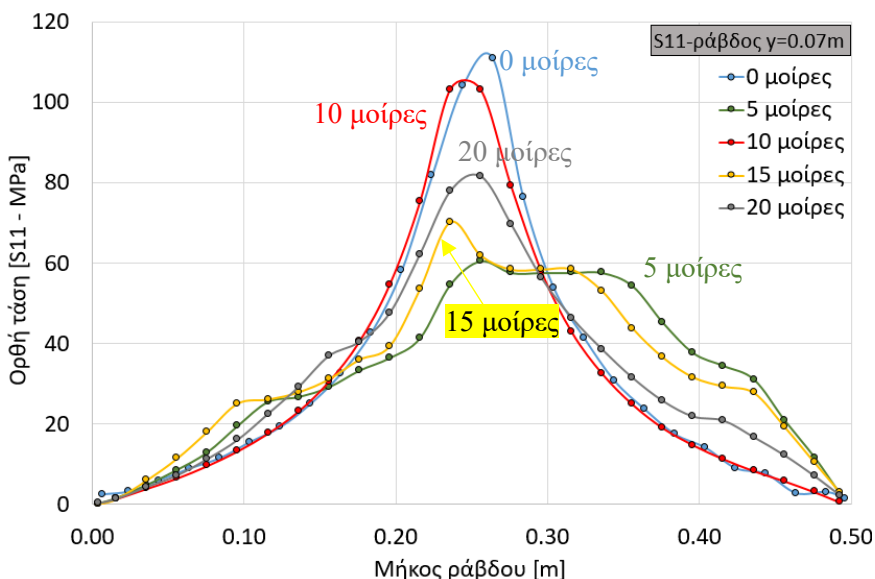
Κατά το σχεδιασμό της σύνδεσης για την αποκατάσταση της μονολιθικότητας ενός επιστυλίου είναι σημαντικό να μελετηθεί η επιρροή της κλίσης του ρήγματος στη μηχανική συμπεριφορά του αποκαταστημένου δομικού συνόλου. Για το λόγο αυτό θα κατασκευαστούν 5 αριθμητικά μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων (0° , 5° , 10° , 15° , 20°), (Εικ. 12.15). Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο η προσομοίωση του θραυσμένου επιστυλίου στις 2 διαστάσεις αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση και επομένως επιλέγεται εδώ για λόγους οικονομίας χρόνου.



Εικόνα 12.15 Κλίσεις ρηγμάτων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

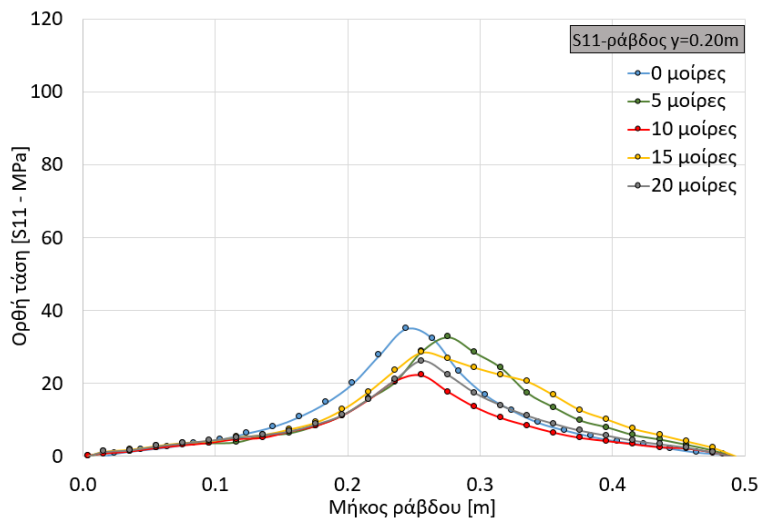
Στο διάγραμμα της Εικ. 12.16 φαίνεται η αξονική τάση της ράβδου στην κατώτερη στάθμη του οπλισμού. Η κλίση του ρήγματος δεν δείχνει να επηρεάζει την

τάση S11 της ράβδου στο άκρο του αριστερού θραύσματος. Διαφορές παρουσιάζονται στο σημείο ένωσης των δύο θραυσμάτων και στο δεξιό τμήμα. Είναι χαρακτηριστικό ότι δεν υπάρχει αναλογική μεταβολή της τάσης με την αύξηση της κλίσης του ρηγματος. Οι τάσεις της ράβδου στα δοκίμια με κλίσεις ρηγμάτων 0 και 10 μοιρών είναι κοντά μεταξύ τους τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Παίρνουν τις μέγιστες τιμές στο κέντρο-σημείο ένωσης ($x=0.25\text{m}$) ενώ στα άκρα έχουν μικρότερες τιμές από τις υπόλοιπες 3 περιπτώσεις. Αντίθετα οι τάσεις της ράβδου στα δοκίμια με ρηγματα 5 και 15 μοιρών, οι οποίες επίσης είναι ποιοτικά και ποσοτικά κοντά, παίρνουν μεγαλύτερες τιμές στο δεξιό τμήμα από τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η συμπεριφορά της ράβδου στην περίπτωση του ρηγματος με κλίση 20° δείχνει να είναι η μοναδική με συμμετρία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος του επιστυλίου ($x=0.25\text{m}$).

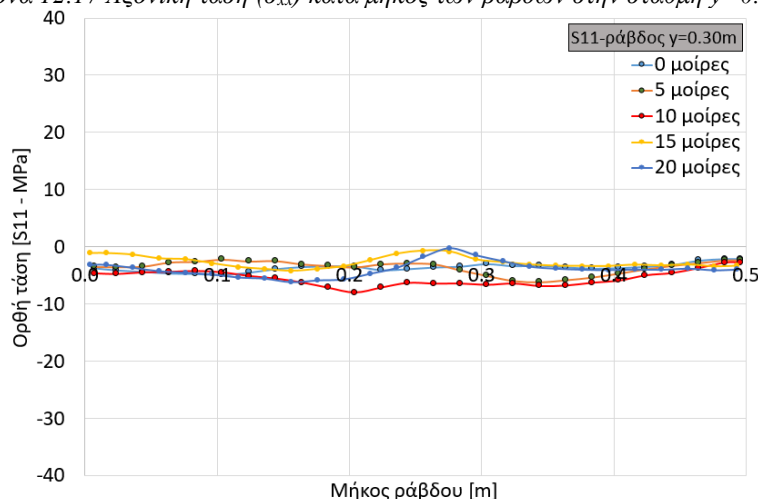


Εικόνα 12.16 Αξονική τάση (σ_{xx}) κατά μήκος των ράβδων στην στάθμη $\gamma=0.07\text{m}$.

Οι θλιπτικές τάσεις για τις ράβδους των δύο άλλων επιπέδων όπλισης για τις 5 διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων δίνονται στις παρακάτω εικόνες. Οι τάσεις είναι σαφώς μικρότερες από εκείνες της κατώτερης στάθμης. Οι διαφορές ποιοτικά αλλά και ποσοτικά μεταξύ των ράβδων των 5 ρηγμάτων είναι μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.



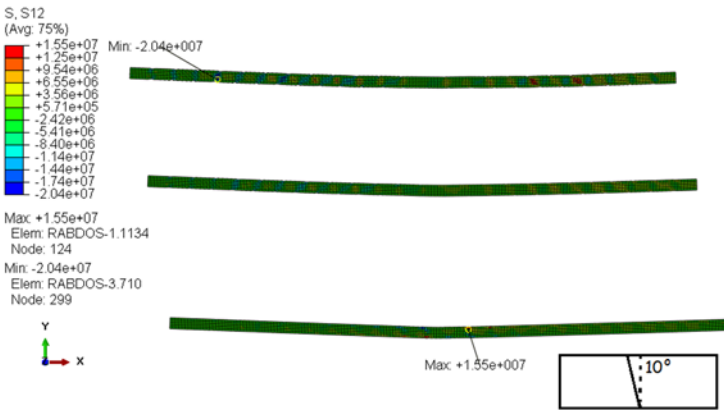
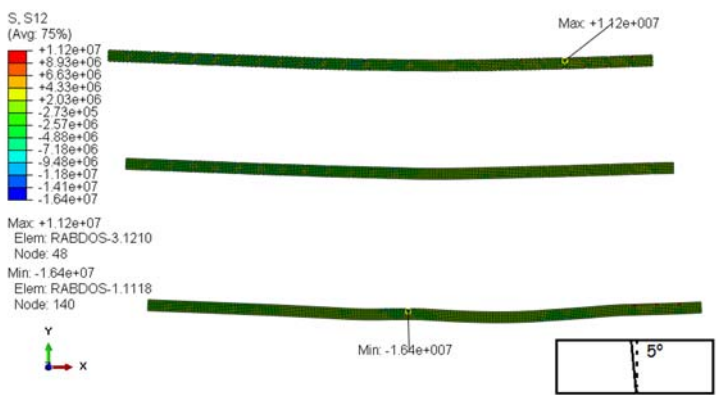
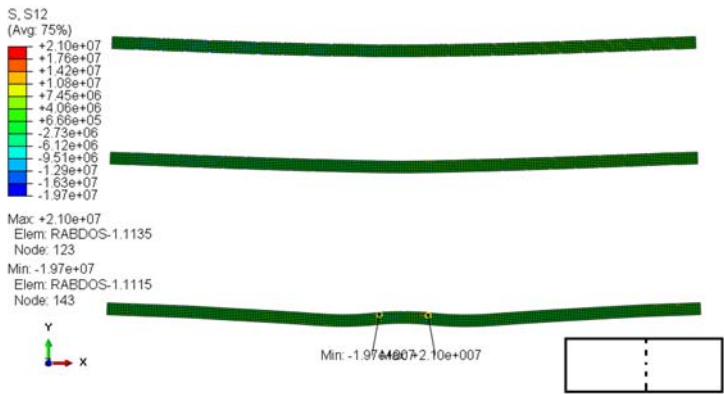
Εικόνα 12.17 Αξονική τάση (σ_{xx}) κατά μήκος των ράβδων στην στάθμη $\gamma=0.20m$.

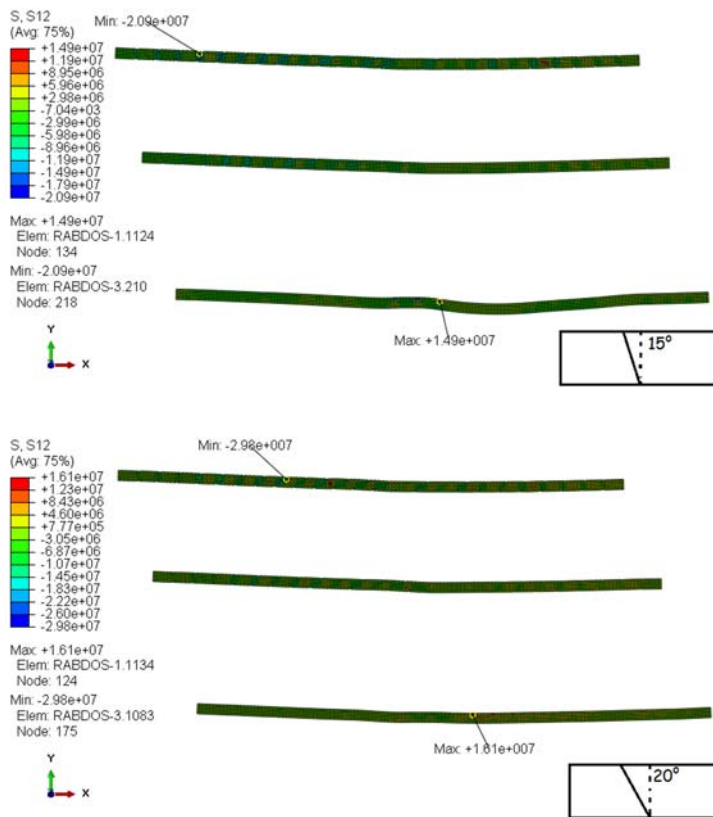


Εικόνα 12.18 Αξονική τάση (σ_{xx}) κατά μήκος των ράβδων στην στάθμη $\gamma=0.30m$.

Στα σχήματα της Εικ. 12.19 δίνονται οι διατμητικές τάσεις σε όλες τις ράβδους για κάθε μία περίπτωση ρήγματος. Στην εικόνα σημειώνεται το σημείο με τη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση για κάθε ρήγμα. Στο κατακόρυφο ρήγμα οι μέγιστες θετικές και αρνητικές διατμητικές τάσεις σημειώνονται στην κατώτερη στάθμη του οπλισμού και εκατέρωθεν του ρήγματος. Στο ρήγμα με κλίση 5^ο η μέγιστη αρνητική διατμητική τάση αναπτύσσεται στο κέντρο της κατώτερης ράβδου και η μέγιστη θετική στη ράβδο της στάθμης +0.30m στην άκρη του δεξιού ρήγματος. Όσο μεγαλώνει η κλίση του ρήγματος η κατάσταση αντιστρέφεται. Η μέγιστη θετική διατμητική τάση εμφανίζεται στο κέντρο του ανοίγματος του επιστυλίου στην κατώτερη στάθμη όπλισης (10^ο, 15^ο, 20^ο) ενώ η μέγιστη αρνητική στο άκρο της άνω στάθμης του οπλισμού στο άκρο του αριστερού ρήγματος.

Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης

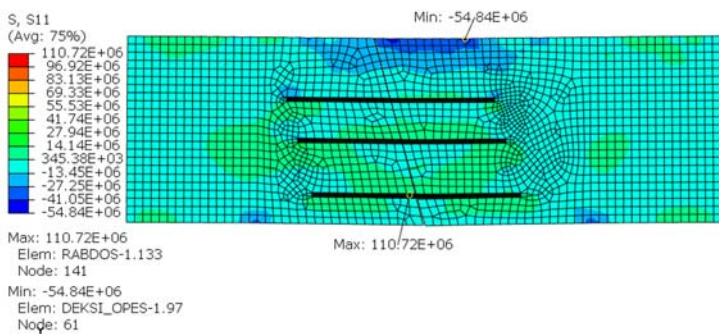
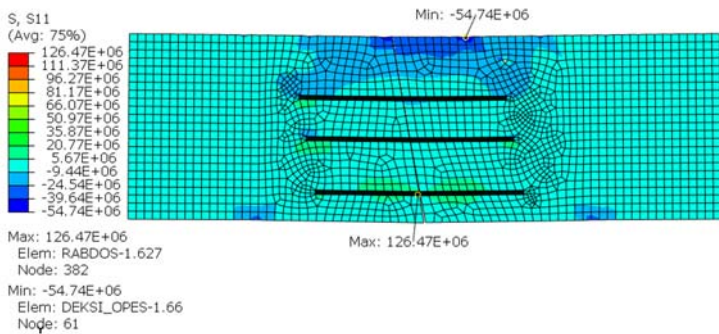
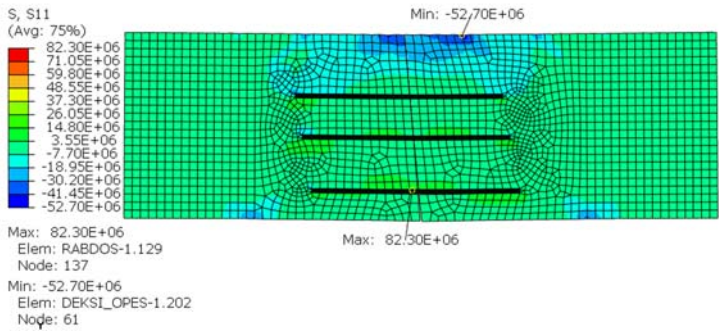
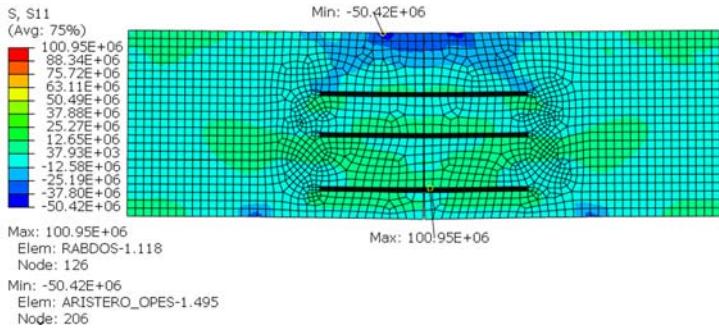


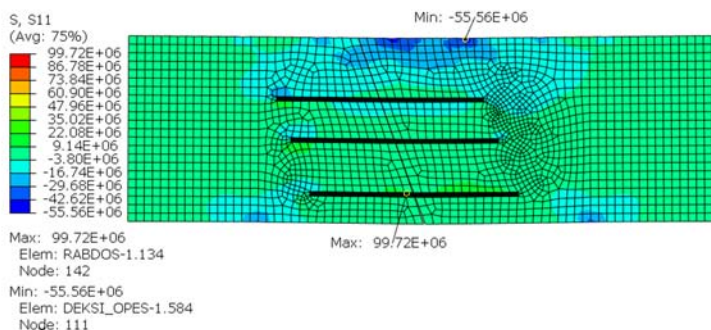


Εικόνα 12.19 Διατμητική τάση επί των ράβδων τιτανίου για τα αριθμητικά προσομοιώματα με τις 5 διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων (0°, 5°, 10°, 15°, 20°).

Εξετάζοντας τις θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σύμπλεγμα μάρμαρο-ράβδος / τσιμεντοκονία (Εικ. 12.20) για όλα τα ρήγματα παρατηρείται ότι η μέγιστη θλιπτική τάση στο κατακόρυφο ρήγμα εμφανίζεται συμμετρικά εκατέρωθεν του άνω άκρου ένωσης των δύο θραυσμάτων. Η τάση αυξάνεται κατ' απόλυτη τιμή καθώς αυξάνεται η κλίση του ρήγματος και υπάρχει χαρακτηριστική συγκέντρωση στο άνω άκρο του δεξιού τμήματος. Η μέγιστη τάση στο προσομοίωμα με το κατακόρυφο ρήγμα είναι της τάξεως των 50.42 MPa και αυξάνεται καθώς μεταβάλλεται η κλίση του ρήγματος φθάνοντας τη μέγιστη τιμή των 55.56 MPa στο προσομοίωμα με κλίση ρήγματος 20°. Οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις είναι στα πλαίσια των τιμών της τάσης θραύσης του μαρμάρου που δίνεται από τη βιβλιογραφία και εκτενή αναφορά γίνεται στο κεφ. 3.3.1.

Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης



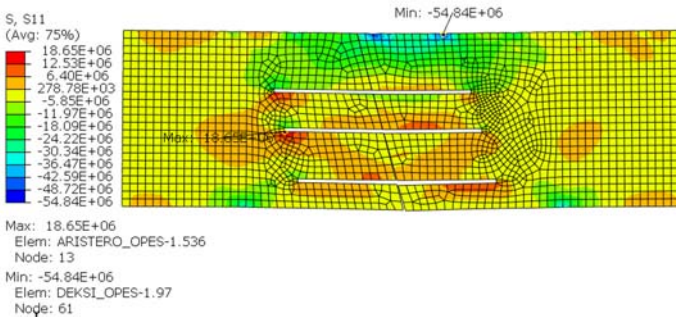
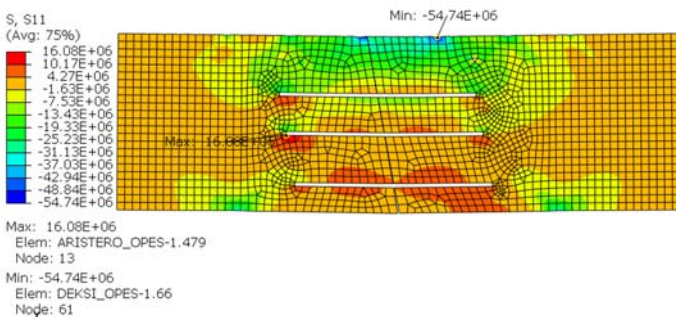
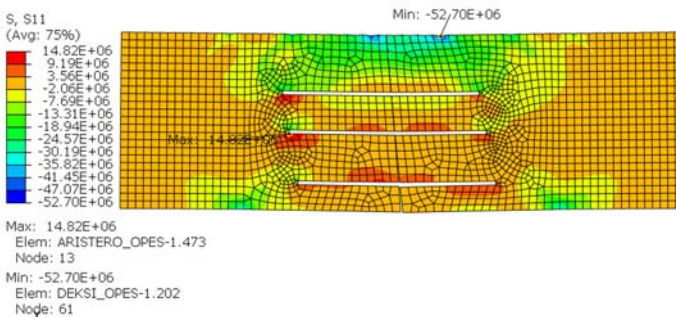
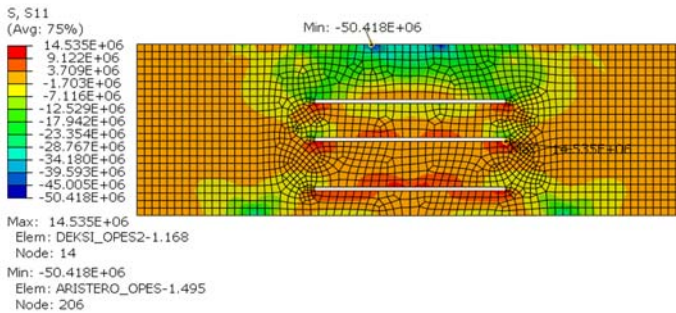


Εικόνα 12.20 Ορθή τάση σ_{xx} του αποκαταστημένου επιστυλίου για τα αριθμητικά προσομοιώματα με τις 5 διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων (0° , 5° , 10° , 15° , 20°).

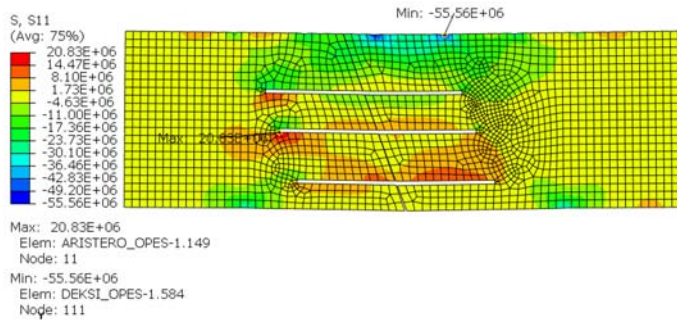
Απομονώνοντας το μαρμάρινο όγκο, και εστιάζοντας στην μηχανική του συμπεριφορά (ορθές και διατμητικές τάσεις) (Εικ. 12.21– 12.23) παρατηρείται ότι λόγω του οπλισμού αναπτύσσονται υψηλές τάσεις (S11) (Εικ. 12.21) στο αριστερό άκρο στο επίπεδο της δεύτερης στάθμης του οπλισμού για όλα τα ρήγματα. Η μέγιστη εφελκυστική τάση για το προσομοίωμα με το κατακόρυφο ρήγμα είναι 14.54 MPa και αυξάνεται καθώς αυξάνεται η κλίση του ρήγματος με μέγιστη τιμή τα 20.83 MPa στο προσομοίωμα με κλίση 20° . Οι τιμές ξεπερνούν τη μέγιστη εφελκυστική τάση του μαρμάρου όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Συνεπώς απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά. Επίσης και όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η κλίση του ρήγματος χάνεται η συμμετρία στις αναπτυσσόμενες τάσεις εκατέρωθεν του ρήγματος. Οι ορθές τάσεις S22 (Εικ. 12.22) δείχνουν μια ιδιομορφία στη μεταβολής τους καθώς αυξάνεται η κλίση του ρήγματος. Στο κατακόρυφο ρήγμα είναι σαφώς ομοιόμορφες εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας. Στο ρήγμα με 5° κλίση υπάρχουν συγκεντρώσεις υψηλών τάσεων εκατέρωθεν της κάτω ράβδου. Καθώς αυξάνεται η κλίση του ρήγματος επεκτείνεται και η περιοχή των υψηλών τάσεων γύρω από την κάτω ράβδο. Στο ρήγμα με 15° κλίση επανέρχεται η κατάσταση με τις διακριτές περιοχές συκέντρωσης τάσεων εκατέρωθεν της κατώτερης στάθμης όπλισης ενώ για δοκίμιο με ρήγμα 20° παρατηρείται εκ νέου διεύρυνση αυτής της περιοχής. Η ανομοιόμορφη αυτή μεταβολή χρήζει περαιτέρω μελέτης τόσο πειραματικής όσο και αριθμητικής.

Τέλος, οι διατμητικές τάσεις (Εικ. 12.23) που αναπτύσσονται στον μαρμάρινο όγκο παρουσιάζουν σημαντικές συγκεντρώσεις στα άκρα των οπλισμών σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Αυτό παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις των ρηγμάτων.

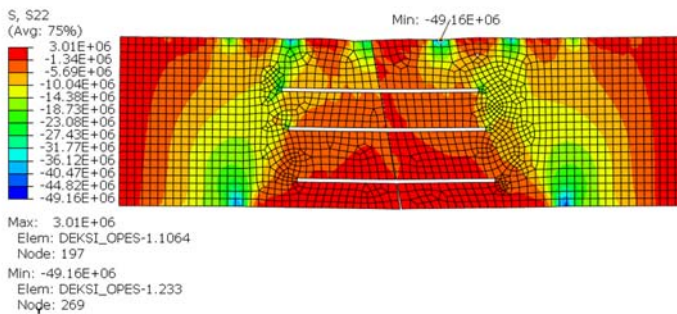
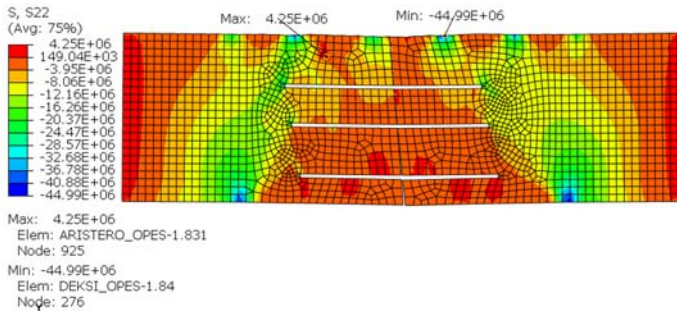
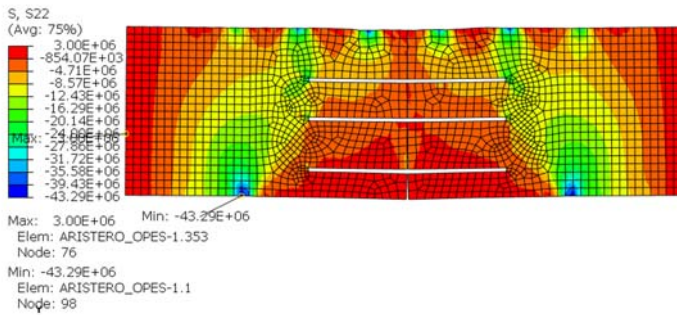
Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης

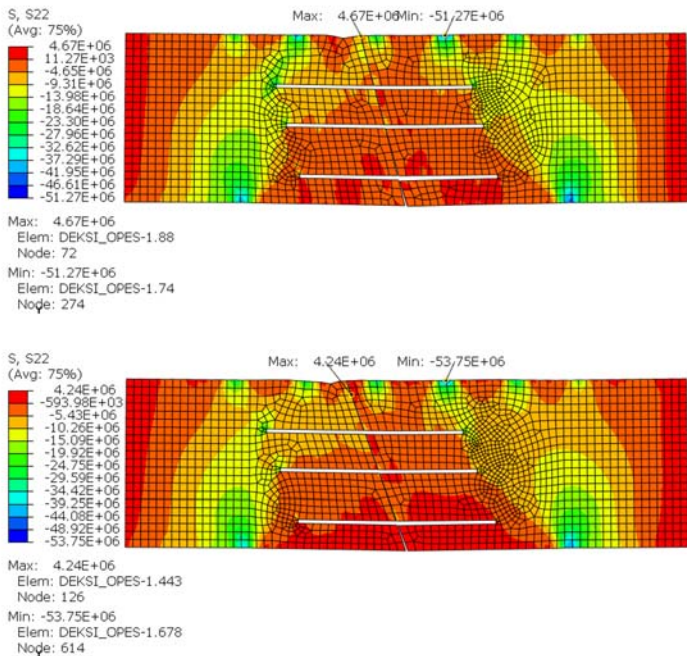


Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης

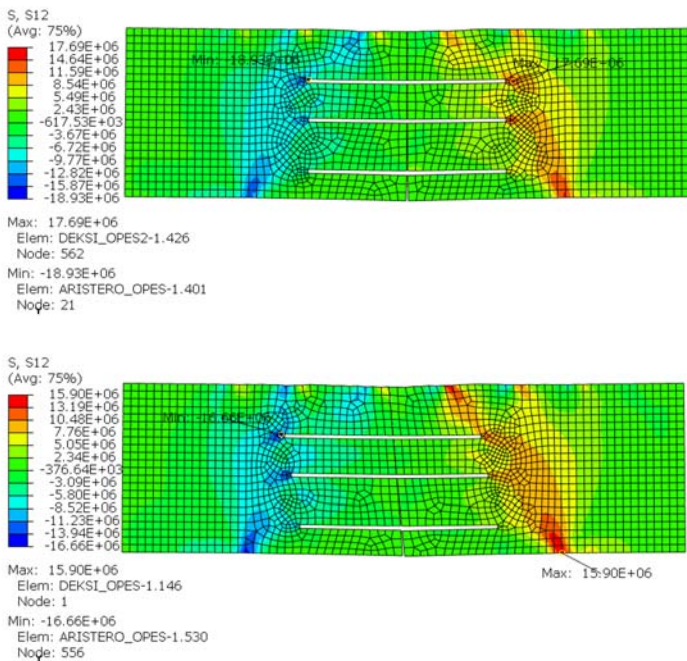


Εικόνα 12.21 Ορθή τάση σ_{xx} των μαρμάρινων θραυσμάτων για τα αριθμητικά προσομοιώματα με τις 5 διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων (0° , 5° , 10° , 15° , 20°).

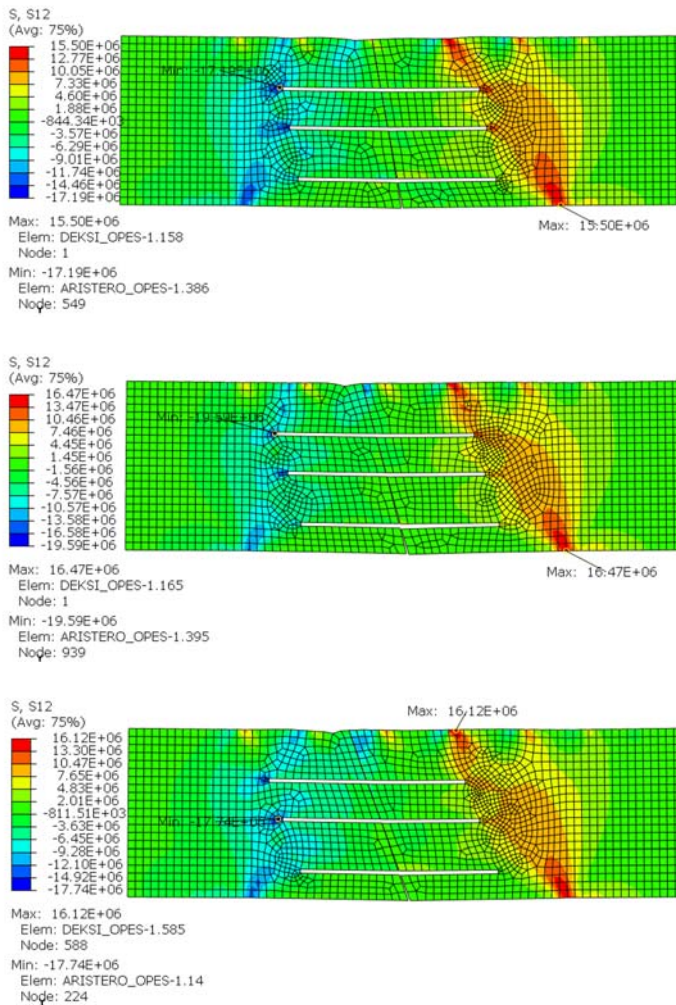




Εικόνα 12.22 Ορθή τάση σ_{yy} των μαρμάρινων θραυσμάτων για τα αριθμητικά προσομοιώματα με τις 5 διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων (0°, 5°, 10°, 15°, 20°).



Αριθμητική προσομοίωση αποκαταστημένου επιστυλίου με κεκλιμένο επίπεδο θραύσης



Εικόνα 12.23 Διατμητική τάση των μαρμάρινων θραυσμάτων για τα αριθμητικά προσομοιώματα με τις 5 διαφορετικές κλίσεις ρηγμάτων (0°, 5°, 10°, 15°, 20°).

13. Ανασκόπηση- Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η εφαρμοσιμότητα (applicability) σειράς καινοτόμων πειραματικών τεχνικών παρακολούθησης της μηχανικής απόκρισης δομικών υλικών, τα οποία ευρίσκουν εφαρμογή τόσο σε σύγχρονες κατασκευές όσο και στη συντήρηση - αναστήλωση αρχαίων μνημείων. Οι τεχνικές που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν: τη μέθοδο των ακουστικών εκπομπών (AE), τη μέθοδο των ηλεκτρικών ρευμάτων (PSC) που παράγονται κατά τη μηχανική καταπόνηση, τη μέθοδο των οπτικών ινών, τη μέθοδο τρισδιάστατης συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (3D-DIC), κάμερα υψηλής ταχύτητας καταγραφής (high speed camera). Οι ως άνω τεχνικές εφαρμόστηκαν σε όλα τα πειράματα σε «αντιπαραβολή» με σειρά παραδοσιακών πειραματικών τεχνικών όπως (ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, ωρολογιακά βελόμετρα, μηκυνσιόμετρα τύπου LVDT, μετρητές ανοίγματος ρωγμής τύπου clip gauges, και ρωγμόμετρα).

Κύριος στόχος της εργασίας ήταν η εξέταση της δυνατότητας άντλησης αξιόπιστων ποσοτικών δεδομένων από τις καινοτόμες πειραματικές τεχνικές και σε δεύτερο στάδιο η βαθμονόμηση των σχετικών δεδομένων.

Στην κατεύθυνση αυτή υλοποιήθηκαν τόσο στοιχειώδη τυποποιημένα πειράματα (elementary standardized tests) όσον και μη τυποποιημένα πειράματα μεγάλης κλίμακας (structural tests) με δοκίμια αποτελούμενα από πλέον του ενός συστατικών υλικών.

Από τη σφαιρική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των τυποποιημένων πειραμάτων (μονοαξονική θλίψη, μονοαξονικός εφελκυσμός, κάμψη τριών σημείων), συνάγεται το συμπέρασμα ότι το σύνολο των καινοτόμων τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν παρέχει ιδιαίτερα χρήσιμα δεδομένα, σχετικά με την κατανομή των πεδίων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων αλλά και τον χωροχρονικό εντοπισμό της εσωτερικής βλάβης (internal damage) και της εξέλιξης αυτής. Επίσης ορισμένες εξ αυτών παρέχουν δεδομένα τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ενδείκτες επερχόμενης αστοχίας (pre-frailure indicators).

Ειδικά για τους ενδείκτες επερχόμενης αστοχίας ιδιαίτερης προσοχής χρήζουν τα δεδομένα της μεθόδου AE και της μεθόδου PSC. Οι καταγραφές αμφοτέρων των τεχνικών αυτών συναρτήσεως του χρόνου, χαρακτηρίζονται είτε από ακρότατα είτε από αλλαγές κλίσεως, οι οποίες σαφώς προηγούνται αντιστοίχων μεταβολών των καθαρά μηχανικών μεγεθών όπως τα επιβαλλόμενα φορτία και τα αναπτυσσόμενα πεδία μετατοπίσεων και τάσεων. Επιπλέον, είναι άξιο αναφοράς το γεγονός ότι τα δεδομένα αυτών των δύο τεχνικών ευρίσκονται σε εξαιρετική ποιοτική συμβατότητα μεταξύ τους: Μεταβολές της κλίσεως καμπύλων σχετιζόμενων με ακουστικές εκπομπές ευρίσκονται σε ευθεία αναλογία με ακρότατα των καταγραφών της μεθόδου PSC.

Εξίσου σημαντικό είναι, πάντα για τα στοιχειώδη τυποποιημένα πειράματα, ότι οι συμβατικές πειραματικές τεχνικές παρέχουν δεδομένα τα οποία ευρίσκονται επίσης σε εξαιρετική ποιοτική συμβατότητα με τα δεδομένα του συνόλου των καινοτόμων πειραματικών τεχνικών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν.

Οι παραπάνω ενθαρρυντικές παρατηρήσεις και τα αντίστοιχα συμπεράσματα ώθησαν την ερευνητική προσπάθεια στην εφαρμογή των τεχνικών αυτών στην περίπτωση δομικών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας και συγκεκριμένα σε πειράματα εξόλκευσης και κάμψεως αποκαταστημένων επιστυλίων. Το κύριο χαρακτηριστικό στην κατηγορία αυτή των πειραμάτων είναι ότι τα δοκίμια αποτελούνται από τρία υλικά των οποίων οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να χαρακτηριστούν απολύτως ασύμβατες: Το εξόχως όλκιμο τιτάνιο πρέπει να «συνεργαστεί» με το εξόχως ψαθυρό μάρμαρο και ένα σχετικώς ψαθυρό τσιμεντοειδές υλικό. Επιπλέον το πρόβλημα δυσχεραίνεται τόσο από την ανισοτροπία του μαρμάρου (και την κάποια ανομοιογένειά του) όσον και από την αναπόφευκτη δημιουργία διεπιφανειών, η μηχανική απόκριση των οποίων είναι καθοριστικής σημασίας για τη δομική αρτιότητα των κατασκευών.

Διαπιστώθηκε και σε αυτή την περίπτωση πειραμάτων ότι η χρονική εξάρτηση των καταγραφών των διαφόρων καινοτόμων τεχνικών είναι εξαιρετικά συμβατή τόσο μεταξύ τους όσον και με τις αντίστοιχες καταγραφές των παραδοσιακών πειραματικών τεχνικών. Επιπλέον και στην περίπτωση αυτή η τεχνική των ακουστικών εκπομπών και η τεχνική των ηλεκτρικών ρευμάτων παρέχουν σαφείς ενδείξεις επερχόμενης αστοχίας.

Συνεκτίμηση επομένως όλων των πειραματικών δεδομένων επιτρέπει τη διατύπωση των κάτωθι συμπερασμάτων:

- Οι μελετηθείσες καινοτόμες πειραματικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοζονται με ασφάλεια σε απλά και σύνθετα δοκίμια από δομικά υλικά παρέχοντας δεδομένα από το εσωτερικό των δοκιμίων πράγμα που δεν είναι εφικτό με τη χρήση παραδοσιακών πειραματικών τεχνικών (όχι μόνο αυτών που εδώ χρησιμοποιήθηκαν αλλά και άλλων πλέον συνθέτων όπως η φωτοελαστικότητα η ολογραφία, η μέθοδος των καυστικών κ.λ.π), οι οποίες αντλούν δεδομένα αποκλειστικά και μόνο από την εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών και των κατασκευών. Αν στο σημείο αυτό ληφθεί υπόψη ότι οι μηχανισμοί οι οποίοι τελικώς οδηγούν σε μακροσκοπική αστοχία ενεργοποιούνται πολύ πριν μακροσκοπικές ρωγμές ή άλλες αστοχίες γίνουν ορατές στην επιφάνεια του δοκιμίου καθίσταται σαφής η σημασία των δεδομένων που παρέχουν οι καινοτόμες πειραματικές τεχνικές. Ειδικά δε στην περίπτωση συνθέτων δοκιμίων με διεπιφάνειες, όπου είναι δεδομένο ότι οι μηχανισμοί αστοχίας ενεργοποιούνται κατά προτίμηση επί των διεπιφανειών αυτών, συνάγεται ότι η χρήση των καινοτόμων τεχνικών είναι «εκ των ων ουκ άνευ» στην κατεύθυνση της περιγραφής και ερμηνείας των γενεσιουργών αιτίων των μηχανισμών αστοχίας.
- Η ποσοτική βαθμονόμηση των καταγραφών των καινοτόμων πειραματικών τεχνικών δεν είναι εισέτι απολύτως εφικτή. Κυρίως διότι το φυσικό υπόβαθρο των τεχνικών αυτών είναι ακόμα υπό ανάπτυξη. Εν τούτοις ακόμα και η ποιοτική συσχέτιση των καταγραφών των ως άνω τεχνικών είναι ιδιαίτερης σπουδαιότητας διότι επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενώ η άριστη συσχέτιση με τα δεδομένα

των παραδοσιακών τεχνικών παρέχει ένα σημαντικό εργαλείο στην περαιτέρω προσπάθεια απόλυτης ποσοτικής βαθμονόμησης.

- Για την περίπτωση της εφαρμογής σε μνημειακές κατασκευές όπου η συνεχής παρακολούθησης της δομικής αρτιότητας αποκαταστημένων μελών είναι κομβικής σημασίας, από την παρούσα εργασία κατεδείχθει ότι τουλάχιστον δύο εκ των τεχνικών (ακουστικές εκπομπές και μηχανικώς διεγερόμενα ρεύματα) μπορούν με ασφάλεια να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό δεδομένου ότι παρέχουν συστηματικά και με συνέπεια ενδείκτες επερχόμενης αστοχίας σε σχετικά ικανοποιητικό χρονικό διάστημα προ της αστοχίας.
- Ειδικά για την συνεχή παρακολούθηση δομικής αρτιότητας μνημειακών κατασκευών όπου ο αριθμός των απαιτούμενων αισθητήρων είναι πολύ μεγάλος και επομένως υπεισέρχονται με σημαντική βαρύτητα οικονομικές παράμετροι, η τεχνική των μηχανικώς επαγομένων ηλεκτρικών ρευμάτων φαίνεται να είναι η πλέον πρόσφορη, δεδομένου ότι το κόστος των απαιτούμενων αισθητήρων είναι εξαιρετικά μικρό ενώ το μέγεθος τους δεν τους καθιστά απαγορευτικούς (από την άποψη της αισθητικής).

Πέραν των ανωτέρω, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα μεγάλης κλίμακος έδωσε μία σειρά ειδικότερων αλλά όχι λιγότερο σημαντικών συμπερασμάτων.

Όσον αφορά τα δοκίμια εξόλκευσης μεγάλη σημασία έχει:

- Ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης αλλά και της μορφής των δοκιμίων. Κατασκευαστικές ατέλειες των δοκιμίων οδηγούσαν στη μη επιθυμητή θραύση του μαρμάρου αντί της ολίσθησης της ράβδου ως προς το μαρμάρινο όγκο.
- Η θέση του μήκους αγκύρωσης της ράβδου (στο άνω ή κάτω άκρο της διαμερούς οπής του μαρμάρινου όγκου).
- Αν η ράβδος εφελκύεται (pull out) ή θλίβεται (push in).
- Η θέση των ακουστικών αισθητήρων γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατό η καταγραφή παρασιτικών ακουστικών σημάτων, τα οποία προκύπτουν κυρίως λόγω τριβών μεταξύ δοκιμίου και πειραματικής διάταξης αλλά και λόγω συνθλίψεως των μαρμάρινων όγκων επί των πλακών συγκράτησης σε ορισμένες εκ των διατάξεων που μελετήθηκαν.
- Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων κατά την παρασκευή του δοκιμίου για να αποφευχθεί η επαφή μεταξύ ηλεκτροδίου και ράβδου και να παραμείνουν αυτά εντός του λεπτού στρώματος της τσιμεντοκονίας.

Για το δοκίμιο κάμψης αποκαταστημένου επιστυλίου σημαντικό είναι η παρασκευή του να γίνεται σε δύο βήματα με σκοπό τη σωστή τοποθέτηση των μετρητικών συστημάτων στο εσωτερικό του και η ένωση των θραυσμάτων να γίνει με προσοχή για να μην καταστραφεί η οπτική ίνα η οποία είχε τοποθετηθεί στην κατώτερη ράβδο του οπλισμού.

Για την πραγματοποίηση του πειράματος ιδιαίτερη προσοχή απαιτήθηκε:

- Στη σωστή και ασφαλή τοποθέτηση του εκφορικού συστήματος μεταφοράς της φόρτισης στο δοκίμιο.
- Στην τοποθέτηση των ακουστικών αισθητήρων ώστε να βρίσκονται διατεταγμένοι σωστά για τον εντοπισμό των αστοχιών στο εσωτερικό του δοκιμίου.
- Στη σωστή βαθμονόμηση της τεχνικής συσχέτισης ψηφιακής εικόνας ώστε να εστιάσει και να καλύπτει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια του δοκιμίου.
- Στην αδιάκοπη επαφή των ηλεκτροδίων με μηχανικό τρόπο με το δοκίμιο ώστε να μην σταματήσει η καταγραφή λόγω της αναμενόμενης κατακόρυφης μετατόπισης του.
- Στη σωστή τοποθέτηση των μηκυνσιομέτρων τύπου LVDT ώστε να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο η συμπεριφορά του δοκιμίου και να διακοπεί η δοκιμή σε περίπτωση μη ασφαλούς εξέλιξης του πειράματος.

Δεδομένου του κόστους της πειραματικής διερεύνησης, του μεγάλου αριθμού παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων μεγάλης κλίμακας και απαιτούν μεγάλο αριθμό δοκιμών και της απαίτησης για δοκίμια μεγάλων απολύτως διαστάσεων ώστε να εξαλείφεται η επίδραση του φαινομένου κλίμακας, καθίσταται σαφές ότι απαντήσεις στα ως αρχικώς τεθέντα ερωτήματα δεν είναι εφικτό να δοθούν από καθαρά πειραματικά πρωτόκολλα. Στην κατεύθυνση αυτή, τα δεδομένα του αριθμού πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στη σχεδίαση και βαθμονόμηση - αξιολόγηση αριθμητικών προσομοιωμάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, τόσο για τα πειράματα εξόλκευσης όσο και για τα πειράματα κάμψεως.

Με τη βοήθεια των προσομοιωμάτων αυτών κατέστη εφικτή η παραμετρική διερεύνηση του ρόλου διαφόρων παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν την απόκριση των δοκιμίων. Τα κύρια συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως κάτωθι:

- Τα προσομοιώματα δύο και τριών διαστάσεων μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα πειραματικά.
- Οι λύσεις των μοντέλων δύο διαστάσεων έχουν το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος χωρίς να υστερούν σε αξιοπιστία.
- Το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων, μεταβάλλοντας το σε λογικά πλαίσια, δεν επηρέαζε ουσιαστικά τα αποτελέσματα παρά μόνο τον χρόνο υπολογισμού.
- Σημαντική επιρροή στην όλη συμπεριφορά των δομικών συμπλεγμάτων τα οποία προσομοιώθηκαν (πείραμα εξόλκευσης, κάμψη αποκαταστημένου επιστυλίου) έχει η ορθή προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς και αστοχίας των διεπιφανειών και όχι οι ιδιότητες των συνιστώμενων υλικών.

Διαμορφώνοντας το προσομοίωμα με ιδιότητες και χαρακτηριστικά που δίνουν στο μέτρο του δυνατού αποτελέσματα αξιόπιστα και συμβατά με τα αντίστοιχα πειραματικά αλλά και στο ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην επιρροή που έχει η κλίση του ρήγματος στην μηχανική συμπεριφορά του απο-

Ανασκόπηση- Συμπεράσματα

καταστημένου επιστυλίου. Αυξάνοντας την κλίση από 0 μοίρες έως 20° (βήμα αύξησης: 5°) διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει ομοιόμορφη μεταβολή της συμπεριφοράς τόσο στα μεμονωμένα μέλη (ράβδοι, μάρμαρο) όσο και στο σύνολο του επιστυλίου. Κάθε περίπτωση φαίνεται να είναι μοναδική και πρέπει να εξεταστεί μεμονωμένα.

14. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς ενός αποκαταστημένου δομικού μέλους μετά τις εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης αποτελεί ένα αχανές πεδίο έρευνας. Η χρησιμοποίηση νέων ασύρματων τεχνικών με ενσωματωμένους στο μέλος αισθητήρες (στη φάση αναστήλωσης), φιλικών προς το μνημείο τόσο αισθητικά όσο και χημικά και μηχανικά, οι οποίες θα παρακολουθούν και θα προειδοποιούν για πιθανές αστοχίες στο εσωτερικό του πριν αυτές γίνουν αντιληπτές και μη αναστρέψιμες θα ήταν χρήσιμη και ωφέλιμη για την πολιτιστική κληρονομιά η οποία χρήζει ειδικής μέριμνας και φροντίδας.

Για τις ήδη αναφερόμενες καινοτόμες τεχνικές οι οποίες εφαρμόστηκαν στην παρούσα διατριβή, θα μπορούσε να γίνει περαιτέρω μελέτη σε περισσότερα υλικά και υπό διαφορετικές καταπονήσεις ώστε να χαρτογραφηθεί ένα ευρύ φάσμα τόσο ακουστικών σημάτων όσο και συμπεριφοράς των ηλεκτρικών καταγραφών. Κάθε πηγή ακουστικής εκπομπής, ανάλογα τα χαρακτηριστικά της, μπορεί να έχει διαφορετική συχνότητα, ενέργεια αλλά και συνολική εικόνα. Επαναλαμβάνοντας, στο μέτρο του δυνατού, όμοια πειράματα θα μπορούσαν πραγματικά να ταυτοποιηθούν συγκεκριμένα ακουστικά σήματα με τα αντίστοιχα φυσικά φαινόμενα που τα προκαλούν. Για τη διάκριση κάθε είδους ρωγμής σε υλικά όπως το σκυρόδεμα έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια η ανάλυση του τανυστή των ροπών (moment tensor analysis- MTA). Χρήσιμο και ενδιαφέρον θα ήταν να εφαρμοστεί σε πειράματα με υλικά αποκατάστασης και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα ήδη υπάρχοντα για τον καλύτερο εντοπισμό και χαρακτηρισμό των ρωγμών που προκαλούνται στο εσωτερικό του υλικού υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις.

Το βασικό υλικό αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών είναι το μάρμαρο Διονύσου, ένα ιδιαίτερα ανισότροπο υλικό. Ο προσανατολισμός των «νερών» του μαρμάρου επηρεάζει εξαιρετικά τη μηχανική συμπεριφορά είτε μεμονωμένα σαν υλικό είτε σαν στοιχείο ενός σύνθετου συμπλέγματος (πχ δοκίμια εξόλκευσης). Ο σωστός προσανατολισμός των «νερών» του μαρμάρου ως προς την κύρια διεύθυνση καταπόνησης αλλά και ως προς τον οπλισμό θα αποτελούσε ένα ενδιαφέρον θέμα μελέτης και θα έδινε χρήσιμες κατευθυντήριες γραμμές για τη βέλτιστη τεχνική αποκατάστασης η οποία μέχρι τώρα στηρίζεται σε εμπειρικές εφαρμογές.

Τέλος, η επιλογή της διαμέτρου, του αριθμού των ράβδων και του μήκους αγκύρωσης στο μαρμάρινο όγκο για την αποκατάσταση ενός θραυσμένου επιστυλίου βασίζεται σε πλήθος παραδοχών και απλουστεύσεων. Η πειραματική εφαρμογή διαφορετικής όπλισης τόσο σε διάταξη όσο και σε πλήθος των ράβδων θα αποτελούσε ένα ενδιαφέρον πεδίο περαιτέρω έρευνας και μελέτης.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

15. Αναφορές

1. Ι. Βενιέρη. *Αρχαιολογικοί χώροι*. Αθήνα: Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού, 2012.
2. Α. Μανόλης. *Ακρόπολη*. Αθήνα: Εκδοτική Αθηνών Α.Ε., 2009.
3. Αρχιτεκτονικές ματιες. *Αρχαιολογικός χώρος ακροπόλεως*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.greekarchitects.gr/gr/αρχιτεκτονικές-ματιες/αρχαιολογικός-χώρος-ακροπόλεως>.
4. [Ηλεκτρονικό] <https://www.youtube.com/watch?v=WtYQBkyfb9A>.
5. Αικ. Μαρινέλλη. *Αποκατάσταση μονολιθικότητας δομικών μελών αρχαίων μνημείων: πειραματική και αριθμητική διερεύνηση*. Αθήνα: 2010.
6. Αρχαίων τόπος/ The ancient web Greece. *Ο αρχαίος ελληνικός πολιτισμός*. [Ηλεκτρονικό], <https://theancientwebgreece.wordpress.com>.
7. Ν. Δρόσου-Παναγιώτου. *Χθες και Σήμερα, Οδηγός με αναπαράσταση των Μνημείων της Αθήνας όπως ήταν και όπως είναι*. Αθήνα: Εκδόσεις "Γνώση", 1990.
8. Μουσαίος. [Ηλεκτρονικό], <http://www.mousaios.gr/περί-της-ακροπόλεως-των-αθηνών>.
9. Αρχιτεκτονικά Θέματα. *Διεθνής Χάρτης Αποκαταστάσεως των Μνημείων 2ο Διεθνές Συνέδριο Βενετίας Μάιος 1964, 1975*, σ. 108.
10. Ε. Γαννιάρη-Παπαγεωργίου. *Αποκατάσταση μονολιθικότητας δομικών μελών αρχαίων μνημείων κατασκευασμένων από φυσικούς δομικούς λίθους με χρήση ράβδων τιτανίου*. Αθήνα: 2010.
11. Κλ. Παπασταματίου. *Υλικά και τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν σε εκτεταμένες επεμβάσεις συντήρησης λίθινων μνημείων κατά τον 19ο και στις αρχές του 20ου αιώνα- Τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και η σημασία τους για τις σημερινές επεμβάσεις συντήρησης*. Αθήνα: 2009.
12. Φ. Μαλλούχου- Tufano. *Η αναστήλωση των αρχαίων μνημείων στη νεώτερη Ελλάδα(1834-1939)*. Βιβλιοθήκη της εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας, 1998, σ. 176.
13. Μ. Ιωαννίδου. *Τα αναστηλωτικά έργα της Ακρόπολης: Παρελθόν, Παρόν και Μέλλον*. Θεσσαλονίκη, 16/3/2007: Πρακτικά Ημερίδας για την Ακρόπολη, 2007.
14. L. Lambrinou. *State of the Art: Parthenon of Athens: A Challenge throughout History*. European Research on Cultural Heritage, State of the art studies, ARCCHIP, 2004, Vol. 3, 69.
15. Υπηρεσία Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως. *Ημερίδα για τα αναστηλωτικά έργα στην Αθηναϊκή Ακρόπολη*. Θεσσαλονίκη : Υπουργείο Πολιτισμού, 16 Μαρτίου 2007.
16. M. Korres, N. Toganides, C. Zambas, Th. Skoulikidis. *Study for the restoration of the Parthenon*, 1989, Vol. 2a.
17. Π. Τουρκινιώτης. *Ο Παρθενώνας και η ακτινοβολία του στα νεότερα χρόνια*. Επιστημονική επιμέλεια και συντονισμός: Εκδοτικός οίκος "Μέλισσα".

18. Κ. Ζάμπας. *Δομικά Προβλήματα της Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, Μελέτη Αποκατάστασης του Παρθενώνος, 1989.
19. Μ. Κορρές και Χ. Μπούρας. *Μελέτη αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*. Αθήνα : Υπουργείο Πολιτισμού και Επιστημών, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, 1983.
20. S.K Kourkoulis, G.E Exadaktylos, I. Vardoulakis. *U-notched Dionysos Pentelicon marble in three point bending: The effect of nonlinearity, anisotropy and microstructure*. International Journal of Fracture, 1999, 98, p. 369-392.
21. G.GR. Penelis. *Techniques materials for structural restoration*. Proc. 11th World Conference on Earthquake Engineering (11WCEE), 1996.
22. E. Aggelakopoulou. *Design and evaluation of restoration mortars for the Acropolis monuments*. The Acropolis Restoration News. 13 December 2013, 13, p. 13-17.
23. Θ.Ν. Σκουλικίδης. *Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2000.
24. Τ. Πελεκάση. *Λατομεία Μαρμάρου και Τοπικές Κοινωνίες- Η Περίπτωση του Διονύσου*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2010.
25. Β. Λαμπρόπουλος. *Διάβρωση και συντήρηση της πέτρας*. Αθήνα: Ιδιωτική έκδοση, 2004.
26. Κ. Ζάμπας. *Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*. 1994.
27. Κ. Κονοφάγος, Γ. Παπαδημητρίου. *Οι χαλύβδινοι σύνδεσμοι του Ερεχθείου κατασκευάστηκαν με τεχνική που ξαναβρίσκεται στο Μεσαίωνα στα "Δαμασκηνά Σπαθιά"*. 1981, 56.
28. C.J. Livadefs. *The structural iron of the Parthenon*. 1956.
29. G.J. Varoufakis. *The iron clamps and dowels from the Parthenon and Erechthion*. The Journal of the Historical Metallurgy Society, 1992, Vol. 26, p.1-18.
30. C. Zambas. *Structural repairs to the monuments of the Acropolis-the Parthenon*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering, November, 1992, Vol. 92, p. 166-176.
31. Ε.Ε. Τουμπακάρη. *Τεκμηρίωση φέροντος οργανισμού, ανάλυση & ερμηνεία δομικής παθολογίας, μέθοδοι ελέγχου σχεδιασμός επεμβάσεων, συσχετισμός δομικής παθολογίας με τη δράση των συνδετήριων στοιχείων. Μελέτη Δομικής Αποκαταστάσεως Ορθοστατών Βορείου Τοίχου Σηκού Παρθενώνος*. Δεκέμβριος 2004 / Ιούλιος 2006, Τόμ. 1.
32. Χ. Μπούρας, Κ. Ζάμπας. *Τα έργα της επιτροπής συντηρήσεως μνημείων Ακροπόλεως στην αθηναϊκή Ακρόπολη*. Υπουργείο Πολιτισμού, Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων.
33. A.G. Tassogiannopoulos. *A contribution to the study of the properties of structural natural stones of Greece*. Athens: Ph.D Dissertation, National Technical University of Athens, 1986.
34. I. Vardoulakis, S.K. Kourkoulis, G.E. Exadaktylos, A. Rosakis. *Mechanical properties and compatibility of natural building stones of ancient*

- monuments: Dionysos marble (in Greek)*, Proc. Interdisciplinary Workshop "The Nuiling Stone in Monuments", 2002, p. 187-210.
35. I. Vardoulakis, S.K.Kourkoulis. *Mechanical properties of Dionysos marble*. Final report of the Environment Project EV5V -CT93-0300: Monuments under seismic action 1997.
 36. S.G. Lekhnitskii. *Theory of elasticity of an anisotropic body*. Moscow: Mir, 1977.
 37. I. Vardoulakis, S.K. Kourkoulis, D.N. Pazis, N.P. Andrianopoulos. *Mechanical behaviour of Dionysos marble in direct tension*. Felsmechanik Kolloquium, 1995, p. 1-11.
 38. A. Marinelli, S. Papanikolopoulos, S.K Kourkoulis, I. Vayas. *The pull-out problem in restoring marble fragments: A design criterion based on experimental results*. Strain, October, 2009, Vol. 45, 5, p. 433-444.
 39. Ε. Πάσιου. *Σύνδεση δομικών μελών αρχαίων μνημείων με χρήση μεταλλικών ενισχύσεων και κατάλληλων κονιαμάτων: Πειραματική μελέτη με καινοτόμες τεχνικές και αριθμητική προσομοίωση*. Αθήνα: 2014.
 40. C. Grosse, M. Ohtsu. *Acoustic Emission Testing*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
 41. Θ.Χ. Λούτας. *Μεθοδολογίες επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής και ακουστουπέρηχου για την παρακολούθηση και την ταυτοποίηση της εξέλιξης της βλάβης σε σύνθετα κεραμικά υλικά*. Πατρα: 2007.
 42. R.K Miller, P. McIntire. *Acoustic emission testing. Nondestructive testing handbook*. American Society for Nondestructive Testing, 1987.
 43. Corporation Physical Acoustic. *PCI-2 Based AE System- User's Manual*. Princeton Junction, NJ: 2007.
 44. T.J Fowler, J.A Blessing, P.J Conlisk. *New Direction in Testing*. Proc. of the 3rd International Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials (AECM-3), 1989, p. 16-27.
 45. J.A Blessing, T.J Fowler, F.E Strauser. *Intensity analysis*. Proc. of 4th Int Symp. on Acoustic Emission from Composite Materials, 1992.
 46. L. Golaski, P. Gebiski, K. Ono. *Diagnostics of reinforced concrete bridges by acoustic emission*. Journal of acoustic emission, 2002, Vol. 20, p. 83-98.
 47. R.S Gostautas, G. Ramirez, R.J. Peterman, D. Meggers. *Acoustic emission monitoring and analysis of glass fiber-reinforced composites bridge decks*. Journal of bridge engineering, 2005, Vol. 10, 6, p. 713-721.
 48. A. Ledeczki, T. Hay, P. Volgyesi, D.R Hay, A. Nadas, S. Jayaraman. *Wireless acoustic emission sensor network for structural monitoring*. IEEE Sensors Journal, 2009, Vol. 9, 11, p. 1370-1377.
 49. Z. Gong, E.O. Nyborg, G. Oommen. *Acoustic emission monitoring of steel railroad bridges*. Materials Evaluation, 1992, Vol. 50, 7, p. 883-887.
 50. S. Colombo, M.C. Forde, I.G. Main, J. Halliday, M. Shigeshi. *AE energy analysis on concrete bridge beams*. Materials and structures, 2005, Vol. 38, p. 851-856.

51. Z. Liu, P. Ziehl. *Evaluation of reinforced concrete beam specimens with acoustic emission and cyclic load test methods*. ACI Structural Journal, 2009, Vol. 106, 3, p. 288-299.
52. A. Carpinteri, G. Lacidogna, G. Niccolini. *Critical behaviour in concrete structures and damage localization by acoustic emission*. Key Engineering Materials, 2006, Vol. 312, p. 305-310.
53. S. Colombo, I.G. Main, M.C. Forde. *Assessing damage of reinforced concrete beam using 'b-value' analysis of acoustic emission signals*. Journal of materials in Civil Engineering, 2003, Vol. 15, 3, p. 280-286.
54. A. Carpinteri, G. Lacidogna, S. Puzzi. *From criticality to final collapse: Evolution of the 'b-value' from 1.5 to 1.0*. Chaos. Solitons and Fractals, 2009, Vol. 41, 2, p. 843-853.
55. M.V.M.S Rao, P.K.J Lakshmi. *Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture*. Current Science, 10 November 2005, Vol. 89, 9, p. 1577-1582.
56. T. Shiotani, S. Yuyama, Z.W Li, M. Ohtsu. *Application of AE improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials*. Journal of acoustic emission, 2001, Vol. 19, p. 118-133.
57. J.H. Kurz, F. Finck, C.U Grosse, H.W Reinhardt. *Stress drop and stress redistribution in concrete quantified over time by the b-value analysis*. Structural health monitoring, 2006, Vol. 5, 1, p. 69-81.
58. C.A., Tatro. *Design criteria for Acoustic Emission*,. Philadelphia : ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, 1971. p. 84-99.
59. S. Yuyama, Z. Li, Y. Ito, M. Arazoe. *Quantitative analysis of fracture process in RC column foundation by moment tensor analysis of acoustic emission*. Construction and Building Materials, 1999, Vol.13, 1-2, p.87-97.
60. K. Ohno, M. Ohtsu. *Crack classification in concrete based on acoustic emission*. Construction and Building Materials, Vol. 12, 24, p. 2339-2346.
61. Y. Kawasaki, Y. Tomoda, M. Ohtsu. *AE monitoring of corrosion process in cyclic wet-dry test*. Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, 12, p. 2353-2357.
62. D.G. Aggelis. *Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters*. Mechanics Research Communications, 2011, 38, p. 153-157.
63. M. Ohtsu. *Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage ecaluation in concrete*. Materials and Structures, 2010, 43, p. 1187-1189.
64. N. Ανδριανόπουλος. *Μηχανική των θραύσεων*. Εκδόσεις: Συμείων, 2006.
65. NDT Resource Center. [Ηλεκτρονικό], http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/linear_defects.htm.
66. Yu.A. Osip'yan, V.F. Petrenko , A.V. Zaretski. *Properties of II-VI semi-conductors associated with moving dislocations associated with moving dislocations*. Advance in Physics, 1986, Vol. 35, p. 88-115.
67. D.J.H Cockayne, A. Hons, J.C.H Spence. *Gliding dissociated dislocations in hexagonal CdS*. Philosophical Magazine A: Physics of Condensed

- Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties, 1980, Vol. 42, 6, p. 773-781.
68. Α. Κατσαμάς. *Μικροπλαστικότητα των κρυστάλλων. Μηχανική συμπεριφορά των υλικών.* (εκπαιδευτικό υλικό μαθήματος). Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας- Πολυτεχνική σχολή - Τμήμα μηχανολόγων μηχανικών, 2004.
 69. Utah Engineering: College of Engineering/ The university of Utah. [Ηλεκτρονικό]<http://www.eng.utah.edu/~lzung/images/lecture-6-grain-boundary-dislocation-defects-vacancy.pdf>.
 70. <http://ikaros.teipir.gr/kalogeropoulou/chapter2.pdf>. [Ηλεκτρονικό]
 71. F.C. Frank and W.T. Read. Multiplication processes for slow moving dislocations. *Physical Review*. 1950, Vol. 79, 4, p. 722–723.
 72. *Source Frank-Read*. Wikipedia. [Ηλεκτρονικό].
 73. D. Bahat, A. Rabinovitch, V. Frid. *Tensile Fracturing in Rocks-Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods*. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
 74. I. Stavrakas. *Investigation of Pressure Stimulated Current in rock through laboratory induced stress measurements as a mechanism for electromagnetic emissions and its analysis as a precursor phenomenon of seismic events*. London, UK: Brunel University, 2005.
 75. A. Misra. *A physical model for the stress- induced electromagnetic effect in metals*. *Appl. Phys*, 1978, 16, p. 195-199.
 76. A. Misra and S. Ghosh. *Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure*. *Appl. Phys*, 1980, 23, p. 387-390.
 77. M.I. Molotskii. *Dislocation mechanism for Misra effect*. *Sov Tekh Phys Lett*, 1980, Vol. 6, 1, p. 22-23.
 78. A. Rabinovitch, D. Bahat and V. Frid. *Comparison of electromagnetic radiation and acoustic emission in granite fracturing*. *Int J Fracture*, 1995, Vol. 41, 2, p. 33-41.
 79. A. Rabinovitch, D. Bahat, V. Frid. *Emission of electromagnetic radiation by rock fracturing*. *Z. Geol. Wissenschaft*, 1996, Vol. 24, 3-4, p 361–368.
 80. A. Rabinovitch, V. Frid, D. Bahat. *Parametrization of electromagnetic radiation pulses obtained by triaxial fracture in granite samples*. *Phil Mag Lett*, 1998, Vol. 77, 5, p. 289-293.
 81. A. Rabinovitch, V. Frid, D. Bahat. *A note on the amplitude – frequency relation of electromagnetic radiation pulses induced by material failure*. *Phil Mag Lett*, 1999, 79, p. 195-200.
 82. A. Rabinovitch, G. Belizovsky, D. Bahat. *Origin of mist and hackle patterns in brittle fracture*. *Phys Rev*, 2000, 61, p. 14968-14974.
 83. A. Rabinovitch, R. Zlotnikov, D. Bahat. *Flaw length distribution measurement in brittle materials*. *J Appl. Phys*, 2000, 87, p. 7720-7725.
 84. A. Rabinovitch, D. Bahat, V. Frid. *Similarity and dissimilarity of electromagnetic radiation from carbonate rocks under compression*. *Int J Rock Mech Min*, 2002, Vol. 39, 1, p. 125-129.
 85. V. Frid, A. Rabinovitch, D. Bahat. *Electromagnetic radiation associated with induced triaxial fracture in granite*. *Phil Mag Lett*, 1999, 79, p. 79-84.

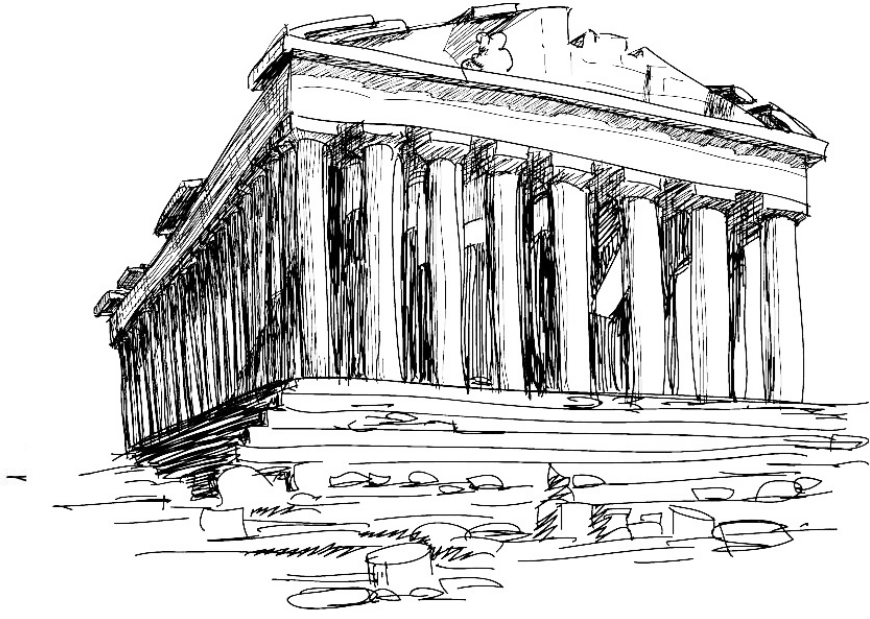
86. V. Frid, D. Bahat, J. Goldbaum, A. Rabinovitch. *Experimental and theoretical investigation of electromagnetic radiation induced by rock fracture*. Israel J Earth Sci, 2000, 49, p. 9-19.
87. D. Bahat, V. Frid, A. Rabinovitch, V. Palchik. *Exploration via electromagnetic radiation and fractographic methods of fracture properties induced by compression in glass-ceramic*. Int J Fracture, 2002, 116, p. 179–194.
88. J. Goldbaum, V. Frid, A. Rabinovitch, D. Bahat. *Electromagnetic radiation induced by percussion drilling*. Int J Fracture. 2001, 111, p. 15-20.
89. A. Rabinovitch, V. Frid, D. Bahat. *Gutenberg-Richter type relation for laboratory fracture induced electromagnetic radiation*. Physical Review E, 2002, 65, p. 011401–011404.
90. V. Jagasivamani, KJL. Iyer. *Electromagnetic emission during the fracture of heat-treated springsteel*. Mater Lett, 1988, Vol. 6, 11–12, p. 418–422.
91. G.B. Lenkey, S. Winkler, Z. Major, I. Levay. *Applicability of magnetic and electric emission techniques for detecting crack initiation in impact tests*. Proc. ECF11- Mechanisms and mechanics of damage and failure, 1990, p. 1989-1994.
92. C. Wenxue, H. Xueqiu, N. Baisheng, M. Hani. *Experimental study on quantitative application of electromagnetic radiation excited by coal-rock fracture*. University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011, p. 129-135.
93. M. Perelman and N. Khatiashvilli. *Radio emission during brittle failure*. DAN SSSR, 1981, Vol. 256, 4, p. 824-826.
94. N. Gershenson, D. Zilpimiani, P. Manguladzeand, OA. Pokhotelov. *Effect of a magnetic field on the fracture of LiF single crystals*. Soviet Physics-Solid State, 1986, Vol. 28, 3, p. 394-396.
95. T. Ogawa, K. Oike and T. Miura. *Electromagnetic radiation from rocks*. J. Geophys Res. 1985, Vol. 90, D4, p. 6245-6249.
96. Z. Guo, H. Yang, B. Liu. *A quantum chemistry model for fractoemission of granite*. Chines Journal of Geophysics. 1990, Vol.33, 4, p. 424-429.
97. X. He and M. Liu. *Electromagnetic dynamics of coal rock failure containing gas*. Xuzhou, China University of Mining and Technology press. 1995.
98. *Πιεζοηλεκτρισμός*. Βικιπαίδεια- Ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια. [Ηλεκτρονικό].
99. Erik van der Giessen, H. Aref. *Advances in Applied Mechanics (AAM)*. The Netherlands: Elsevier, 2012. Vol. 39.
100. V. Petrenko. *Electromechanical phenomena in ice*. Virginia: U.S Army Regions Research and Engineering Laboratory, Thayer School of Engineering Dartmouth College, 1996.
101. V.F. Petrenko. *Applications of electrical signals from cracks to ice micromechanics*. Proceedings of the IAHR Ice Symposium, 1992, Vol. 2, p. 140-154.
102. O.V. Gluschenkov, V.F Petrenko. *Remote sensing of damage in ice using electromagnetic emission from cracks: theoretical background and preliminary experimental results*. In Ice Mechanics, 1993, p. 97-111.

103. J.T, Dickinson. Fracto-Emission from Adhesive Failure. Lee Lieng-Huang ed., Adhesive Bonding. Washington: Springer US, 1991, p. 395-523.
104. Boundless.com. [Ηλεκτρονικό] <https://www.boundless.com/physics/electric-charge-and-field/overview/charge-separation>.
105. V.M, Finkel, Y.I Golovin, V.E Sereda. *Electric effects at fracture of LiF crystals in connection with the crack control problem*. Sov. Phys. Solid State, 1975, 17, p. 492-500.
106. V. Frid, A. Rabinovitch, D. Bahat. *Fracture induced electromagnetic radiation*. Journal of physics D: Applied physics, 2003, 36, p. 1620-1628.
107. M. Miroschnichenko, V. Kuksenko. Study of electromagnetic pulses in initiation of cracks in solid dielectrics. Sov. Phys. Solid State, 1980, 22, p. 1531-1533.
108. N. Khatiashvili. *The electromagnetic effect accompanying the fracturing of alkaline halide crystals and rocks*. Izv Earth Phys, 1984, 20, p. 656-61.
109. N. Gershenzon, D. Zilpimiani, P. Manguladze. *Electromagnetic radiation from crack tip during ionic crystals fracture*. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1985, 248, p. 1077-1081.
110. S.G O'Keefe, D.V. Thiel. *A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials*. Phys. Earth and Planet, 1995, 89, p. 127-135.
111. S.K. Park, M.J.S. Johnston, T.R. Madden, F.D. Morgan, H.F. Morisson. *Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms*. Rev. Geophys, 1993, Vol. 31, 2, p. 117-132.
112. M.J.S Johnston. *Review of electrical and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity*. Surv. Geophys. 1997, 18, p. 441-475.
113. A. Tzanis, F. Vallianatos. *A critical review of electric earthquake precursors*. Anna. Geof. 2001, Vol. 44, 2, p. 429-460.
114. F. Vallianatos, D. Triantis, A. Tzanis, C. Anastasiadis, I. Stavrakas. *Electric Earthquake Precursors: From Laboratory Results to Field Observations. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2004, Vol. 29, 4-9, p. 339-351.
115. I. Stavrakas, C. Anastasiadis, D. Triantis, F. Vallianatos. *Piezo Stimulated currents in marble samples: Precursory and concurrent with failure signals*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3, p. 243-247.
116. D. Triantis, I. Stavrakas, C. Anastasiadis, A. Kyriazopoulos, F. Vallianatos. *An analysis of Pressure Stimulated Currents (PSC), in marble samples under mechanical stress*. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31, p. 234-239.
117. D. Triantis, C. Anastasiadis, F. Vallianatos, P. Kyriazis, G. Nover. *Electric signal emissions during repeated abrupt uniaxial compressional stress steps in amphibolite from KTB drilling*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007, 7, p. 149-154.
118. I. Stavrakas, D. Triantis, Z. Agioutantis, S. Maurigiannakis, V. Saltas, F. Vallianatos, M. Clarke. *Pressure stimulated currents in rocks and their*

- correlation with mechanical properties*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4, p. 563-567.
119. P. Kyriazis, C. Anastasiadis, I. Stavrakas, D. Triantis, J. Stonham. *Modelling of electric signals stimulated by bending of rock beams*. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2009, 4, p. 5-18.
120. A. Kyriazopoulos, I. Stavrakas, C. Anastasiadis, D. Triantis. *Study of weak electric current emissions on cement mortar under uniaxial compressional mechanical stress up to the vicinity of fracture*. Journal of Mechanical Engineering, 2011, Vol. 3, 57, p. 237-244.
121. A. Kyriazopoulos, C. Anastasiadis, D. Triantis, J. C. Brown. *Non-destructive evaluation of cement-based materials from pressure-stimulated electrical emission - Preliminary results*. Construction and Building Materials, 2011, 25, p. 1980-1990.
122. D. Triantis, I. Stavrakas, A. Kyriazopoulos, G. Hloupis, Z. Agioutantis. *Pressure Stimulated Electrical Emissions from cement mortar used as failure predictors*. International Journal of Fracture, 2012, 175, p. 53-61.
123. C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, G. Hloupis, D. Triantis, F. Vallianatos. *Electrical and acoustic emissions in cement mortar beams subjected to mechanical loading up to fracture*. Engineering Failure Analysis, 2013, Vol. 35, p. 454-461.
124. D. Triantis, C. Anastasiadis, I. Stavrakas, A. Kyriazopoulos. *The ascertainment of the presence of damage processes using the Pressure Stimulated Current (PSC) technique on marble and cement Samples*. Proceedings of the 9th ECNDT, 2006
125. S.K. Kourkoulis, E.D. Pasiou, D. Triantis, I. Stavrakas, G. Hloupis. *Innovative Experimental Techniques in the Service of Restoration of Stone Monuments - Part I: the Experimental Set up*. Procedia Engineering, 2015, Vol. 109, p. 268-275.
126. D. Triantis, I. Stavrakas, E.D. Pasiou, G. Hloupis, S.K. Kourkoulis. *Innovative experimental techniques in the service of restoration of stone monuments- Part II: Marble epistyles under shear*. Procedia Engineering, 2015, 109, p. 276-284.
127. C. Herbst, K. Splithhof. *Basics of 3D Digital Image Correlation*. DANTEC DYNAMICS.
128. ΣΤ. Καφφάτος. *ΑΛΦΑ ΜΥΛΟΠΟΤΑΜΟΥ/ALFA MYLOPOTAMOY*. 22/09/2013, [Ηλεκτρονικό], <http://alfamilopotamou.blogspot.gr/2013/09/blog-post.html>.
129. Ν.Α. Νινής, Σ.Κ Κουρκουλής, Α. Σακελλαρίου. *Κριτήρια αξιολόγησης δομικών λίθων στα Ανασθηλωτικά Έργα του Ασκληπιείου Επιδαύρου*. Αθήνα-Μυτιλήνη, Εκδόσεις ΙΓΜΕ, 2001, Πρακτικά Διεπιστημονικής Ημερίδας: Ο δομικός λίθος στα μνημεία, σ. 235-248.
130. Κ. Κεχαγιάς. *Σύγκριση αποτελεσμάτων συμβατικής τριαξονικής δοκιμής και πολυεπίπεδης τριαξονικής δοκιμής σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο*. Πολυτεχνείο Κρήτης - Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά: 2012.

131. Κ. Κακλή, Ζ. Αγιουτάντη, Α. Βαφείδη, Σ. Μαυριγιαννάκη, Μ. Κουβελά και Γ. Φέγγος. *Χαρακτηρισμός του βιοκλαστικού ασβεστόλιθου Αλφά Ρεθύμνου με εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές*. Αθήνα: ΤΕΕ, 2008. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων.
132. *Αναστηλωτικά έργα στον Παρθενώνα/Restoration works on the Parthenon*, Acropolis Restoration Service, 15/12/2014, [Ηλεκτρονικό] <https://www.youtube.com/watch?v=uFJz2odV9jU>.
133. Μ. Mentzini. *Joining together architraves and drums of Parthenon using titanium*. Proc. 5th International Symposium for the Restoration of Acropolis Monuments. Committee for the Preservation of Acropolis Monuments, 2002, p. 233-242.
134. S.K Kourkoulis, E. Ganniari-Papageorgiou, M. Mentzini. *Experimental and numerical evaluation of a new method for joining together fragmented structural members*. Proc. Heritage, Weathering and Conservation (HWC-2006) Conference, June 2006, Vol. 2, p. 657-665.
135. Μ.Σ. Κώνστα-Γδούτου, Χρ. Κοντομήτρος, Κ. Pilakoutas, Μ. Guadagnini. *Διεθνής Συνεργασία για τη Διερεύνηση Σύναφειας Ράβδων από Σύνθετα Υλικά Οπλισμένων με Ίνες (FRPs): International Round Robin Tests (iRRT) for the evaluation of Bond Properties of FRP Bars in Concrete*, 2003, Τόμ. Β, σ. 392-398.
136. M.K. Thompson, J.O. Jirsa, J.E. Breen, R.E. Klingner. *Bond And Development Length of Deformed Bars*. Austin: Texas Department of Transportation, 2002.
137. T.J Looney, M. Arezoumandi, J.S. Volz, J.J. Myers. *An experimental study on bond strength of reinforcing steel in self consolidating concrete*. International journal of concrete structures and materials, 2012, Vol. 6, 3, p. 187-197.
138. S.P. Tastani, S.J. Pantazopoulou. *Experimental Evaluation Of the Direct Tension- Pullout Bond Test*, 2002.
139. H.M. Seliem, A. Hosny, S. Rizkalla, P. Zia, M. Briggs, S. Miller, D. Darwin, J. Browning, G.M. Glass, K. Hoyt, K. Donnelly, J.O. Jirsa. *Bond Characteristics of ASTM A1035 Steel Reinforcing Bars*. ACI Structural, 2009, Vol. 106, 4.
140. A.J. Hyett, W.F Bawden, R.D. Reichert. *The Effect of Rock Mass Confinement on the Bond Strength of Fully Grouted Cable Bolts*. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, September 1992, Vol. 29, 5, p. 503-524.
141. Ν. Παπάζογλου. *Η ιστορία του μνημείου της Ακρόπολης που στέγασε το χαρμόσυνο του Δισδάρη*. 22/10/2014, [Ηλεκτρονικό], <http://www.newsbeast.gr/greece/arthro/745505/i-istoria-tou-mnimeiou-tis-akropolis-pou-stegase-to-haremi-tou-disdari>.
142. P.G Fuller, R.H.T.Cox. *Mechanics of load transfer from steel tendons to cement based grout*. Proceedings Fifth Australian Conference on the mechanics of structures and materials, 1975, p. 189-203.

143. B.Tork, J.Galvez, J. Planas, M.Elices. *Splitting Cracks In Reinforced Concrete Elements Under Tensile Loads*. International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures. Proceedings FraMCoS-3, 1998, Vol. 2, p. 1291-1300.
144. D.G Aggelis, D.V Soulioti, N. Sapouridis, N.M Barkoula, A.S Paipetis, T.E. Matikas. *Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete*. Construction and building material, November 2011, Vol. 25, 11, p. 4126-4131.
145. C.U Grosse, M. Ohtsu. *Acoustic Emission testing, Basics for research - Applications in Civil Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
146. D. Triantis, C. Anastasiadis, I. Stavrakas. *The correlation of electrical charge with strain on stressed rock samples*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, Vol. 8, 6, p. 1243-1248.
147. Ε. Πάσιου. *Μελέτη Συνδέσμου Τιτανίου Μορφής Διπλού 'T' και του Περιβάλλοντος Μαρμάρου υπό Διάτμηση*. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων» ΕΜΠ, 2008.
148. Ε. Τουμπακάρη. *Δομική Παθολογία των Κιονοκράνων και του Θριγκού του Οπισθονάου του Παρθενώνα και ο Ρόλος των Συνδετήριων Στοιχείων*. Αθήνα: 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, 2008.
149. V. Paschalides, M. Mentzini, S.K. Kourkoulis, I. Vardoulakis. *Experimental evaluation of a new method for the calculation of the put-together-reinforcement of fractured structural members (in Greek)*. Proc. 1st National Conference of the Greek Association of Mechanical Engineers, 28-30 March 2005.
150. Μ. Μεντζίνη. *Συμπεριφορά σε κάμψη μαρμάρινης αποκαταστημένης δοκού - επιστυλίου*. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων, 21-24 Μαΐου 2009, σ. 124-126.
151. Hibbitt, Karlsson and Sorensen. *ABAQUS Analysis User's manual, v.6.10, Inc., 2010*.
152. Μ. Παπαδρακάκης, Μ. Φραγκιαδάκης. *Μη γραμμικά προσομοιώματα φορέων ΩΣ και χάλυβα*. Αθήνα: ΕΜΠ Σχολή Πολιτικών Μηχανικών - Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, 2007.
153. M.R. Kaphle, A.C.C. Tan, D.P. Thambiratnam, T.H.T. Chan. *Damage Quantification Techniques In Acoustic Emission Monitoring*. WCEAM 2011Sixth World Congress onEngineering Asset Management, 2011.
154. Ι.Ν Πρασιανακης, Σ.Κ Κουρκουλής. *Πειραματική αντοχή των Υλικών*. Αθήνα: Συμμετρία, 1999.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Τομέας Μηχανικής

