Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Διδακτορική Διατριβή

Μεθοδολογίες επεξεργασίας σημάτων ακουστικής
εκπομπής και ακουστοϋπέρηχου για την
παρακολούθηση και την ταυτοποίηση της εξέλιξης της
βλάβης σε σύνθετα κεραμικά υλικά

Θεόδωρος Χ. Λούτας
Μηχανολόγος και Αεροναυπηγός Μηχανικός

ΠΑΤΡΑ 2007

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Υποβαλλόμενη προς το Τμήμα Μηχανολόγων και
Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

ΤΙΤΛΟΣ:

Μεθοδολογίες επεξεργασίας σημάτων ακουστικής εκπομπής
και ακουστοϋπέρηχου για την παρακολούθηση και την
ταυτοποίηση της εξέλιξης της βλάβης σε σύνθετα κεραμικά
υλικά

ΘΕΟΔΩΡΟΣ Χ. ΛΟΥΤΑΣ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΗΣ ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	ΣΕΛ. 7-8
--------------------	-----------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχοι διατριβής	ΣΕΛ. 11-12
1.2 State-of-the-art στον έλεγχο συνθέτων υλικών με ΑΥ	ΣΕΛ. 13-19
1.3 Καινοτόμα στοιχεία διατριβής	ΣΕΛ. 20-21
1.4 Δομή της διατριβής	ΣΕΛ. 22-24
1.5 Βιβλιογραφία	ΣΕΛ. 25-27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ - ΠΛΕΚΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ C/C

2.1 Τα σύνθετα υλικά γενικά	ΣΕΛ. 29-30
2.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση τύπου υφάσματος	ΣΕΛ. 30-33
2.3 Κεραμικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση τύπου υφάσματος	ΣΕΛ. 33
2.4 Υλικά διατριβής	ΣΕΛ. 34
2.5 Μηχανική συμπεριφορά πλεκτών κεραμικών συνθέτων υλικών	ΣΕΛ. 34-38
2.6 Πειραματική διαδικασία-αποτελέσματα	ΣΕΛ. 38-39
2.7 Βιβλιογραφία	ΣΕΛ. 40-43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή	ΣΕΛ. 45-47
3.2 Σύγκριση της ΑΕ με τις άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου	ΣΕΛ. 47-50
3.3 Φόρτιση κατασκευών – πηγές ΑΕ	ΣΕΛ. 50-52
3.4 Βασικές αρχές διάδοσης κυμάτων	ΣΕΛ. 52-57
3.5 Σύστημα καταγραφής δεδομένων	ΣΕΛ. 58-61
3.6 Το πρόβλημα του θορύβου	ΣΕΛ. 61-63

3.7	Καταγραφή των σημάτων ΑΕ	ΣΕΛ. 63-67
3.8	Χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ	ΣΕΛ. 67-69
3.9	Ιστορική ανασκόπηση της μεθόδου ΑΕ	ΣΕΛ. 69-72
3.10	Πειραματικά αποτελέσματα ΑΕ	ΣΕΛ. 72-75
3.11	Υλικό C/C M5	ΣΕΛ. 75-78
3.12	Υλικό C/C M6	ΣΕΛ. 79-82
3.13	Υλικό C/C M8	ΣΕΛ. 83-86
3.14	Συμπεράσματα	ΣΕΛ. 86-87
3.15	Βιβλιογραφία	ΣΕΛ. 88-94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΕ

4.1	Εισαγωγή	ΣΕΛ. 97
4.2	Περί της αναγνώρισης προτύπων - Γενικές αρχές	ΣΕΛ. 97-99
4.3	Ταξινομητές	ΣΕΛ. 99-102
4.4	Προεπεξεργασία και επιλογή χαρακτηριστικών	ΣΕΛ. 102-105
4.5	Ανάλυση διαχωριστότητας (Discriminant Analysis)	ΣΕΛ. 105-107
4.6	Αναγνώριση προτύπων χωρίς επίβλεψη	ΣΕΛ. 107-108
4.7	Αρχικές συνθήκες	ΣΕΛ. 109
4.8	Αλγόριθμοι	ΣΕΛ. 110-116
4.9	Τεκμηρίωση και εγκυρότητα των ομαδοποιήσεων	ΣΕΛ. 116-119
4.10	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	ΣΕΛ. 119-121
4.11	Διαδικασία εφαρμογής της αναγνώρισης προτύπων σε δεδομένα ΑΕ	ΣΕΛ. 121-122
4.12	Προεπεξεργασία δεδομένων ΑΕ	ΣΕΛ. 122-128
4.13	Αποτελέσματα εφαρμογής των αλγοριθμικών σχημάτων	ΣΕΛ. 128-136
4.14	Αναγνώριση μηχανισμών αστοχίας	ΣΕΛ. 136-137
4.15	Υλικό C/C M5	ΣΕΛ. 138-141
4.16	Δοκίμιο C/C M6	ΣΕΛ. 141-144
4.17	Δοκίμιο C/C M8	ΣΕΛ. 145-147
4.18	Σύγκριση εξέλιξης μηχανισμών αστοχίας στα 3 υλικά–συμπεράσματα	ΣΕΛ. 148-150
4.19	Βιβλιογραφία	ΣΕΛ. 151-156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΟ-ΥΠΕΡΗΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ

5.1	Εισαγωγή	ΣΕΛ. 157
5.2	Περί του μετασχηματισμού κυματιδίων	ΣΕΛ. 157-160
5.3	Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου	ΣΕΛ. 160-162
5.4	Κλίμακα και συχνότητα	ΣΕΛ. 162-163
5.5	Διακριτός μετασχηματισμός	ΣΕΛ. 163-167
5.6	Μεθοδολογία διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου	ΣΕΛ. 168-172
5.7	Μεθοδολογία διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου	ΣΕΛ. 173-177
5.8	Συνάφεια	ΣΕΛ. 177-178
5.9	Λόγος θετικών προς αρνητικών εμβαδών κυματομορφών(Rpn)	ΣΕΛ. 178
5.10	Αποτελέσματα	ΣΕΛ. 178-179
5.11	Υλικό C/C M5	ΣΕΛ. 180-189
5.12	Υλικό C/C M6	ΣΕΛ. 190-198
5.13	Υλικό C/C M8	ΣΕΛ. 198-205
5.14	Σύνοψη αποτελεσμάτων	ΣΕΛ. 206-208
5.15	Συμπεράσματα	ΣΕΛ. 209-210
5.16	Βιβλιογραφία	ΣΕΛ. 211-215

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1	Συνολικά συμπεράσματα	ΣΕΛ. 217-220
6.2	Επίλογος - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	ΣΕΛ. 220-221

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	ΣΕΛ. 223
------------------------------------	-----------------

Ευχαριστίες

Στο σημείο της ολοκλήρωσης της παρούσας διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για μερικούς ανθρώπους δίχως τους οποίους δε θα έφτανα μέχρι το τέλος, ίσως δε θα ξεκινούσα καν αν δε με ενέπνεαν. Κατ' αρχήν τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βασίλη Κωστόπουλο. *‘Το ζην το οφείλω στον πατέρα μου, το ευ ζην στο διδάσκαλό μου’* είπε κάποτε ένας άνδρας που σχεδόν κυρίευσε τον κόσμο της εποχής του (Μ. Αλέξανδρος για το δάσκαλό του Αριστοτέλη). Η γνωριμία μας πηγαίνει περίπου 8 χρόνια πίσω, όταν στις παραδόσεις του προπτυχιακού μαθήματος της Δυναμικής με παρότρυνε να περάσω από το γραφείο του για να μου μιλήσει. Έκτοτε συνεργαζόμαστε αδιάλειπτα. Πέραν όμως της στενής επιστημονικής μας συνεργασίας, τα papers, τα συνέδρια και τα projects, ο Βασίλης μου προσφέρει κάτι πιο πολύτιμο και πιο ουσιαστικό από οποιαδήποτε στείρα γνώση. Τη φιλία και τη συμπαράστασή του σε οτιδήποτε έχω χρειαστεί. Έχω πολυάριθμες φορές απολαύσει τις συζητήσεις που συχνά-πυκνά κάνουμε για πολιτική, θέατρο, μουσική, επιστήμη, φιλοσοφία, ανθρώπινες σχέσεις, αθλητισμό. Αποτελεί για μένα διαρκή πηγή έμπνευσης και πρότυπο ακαδημαϊκού. Τον ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελή επιτροπή η οποία και δέχτηκε να επιβλέψει τη συγκεκριμένη μελέτη, αλλά και την υπόλοιπη επταμελή επιτροπή για τις πολύ σημαντικές υποδείξεις και τις διορθώσεις τους καθώς και την υπομονή τους με το κείμενο. Εξ' αυτών ιδιαίτερα και ονομαστικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Σ. Φασόη, Δ. Πολύζο, Θ. Φιλιππίδη που υπήρξαν δάσκαλοί μου από τα φοιτητικά μου χρόνια στο τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών και με μύησαν στο χώρο των μη καταστροφικών ελέγχων,

της ανάλυσης σήματος, της κυματικής διάδοσης και σκέδασης. Ξεχωριστό ευχαριστώ στον πνευματικό μου παππού (καθότι ο ίδιος σε ανύποπτο χρόνο με προσφώνησε πνευματικό του εγγόνι!) καθηγητή κ. Γ. Δάσιο κορυφαίο δάσκαλο των εφαρμοσμένων μαθηματικών στον οποίο οφείλω τις όποιες γνώσεις μου γύρω από το αρχικά παντελώς άγνωστο πεδίο του μετασχηματισμού κυματιδίων. Με τιμούν μόνο με την παρουσία τους στην επταμελή επιτροπή.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους άμεσους συνεργάτες και φίλους μου στο εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής (Άκη, Σταύρο, Πέτρο, Ιγνάτιο, Άλκη, Γιώτα, Αντώνη, Χρήστο, Τάσο, Μαριγιάννα) για τη φιλία και τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τεράστιο ευχαριστώ στο Γιώργο Σωτηριάδη, για την υποστήριξη, τις ιδέες, την ανοχή του απέναντι μου επί πολλά συναπτά έτη και τη σπάνια ψυχή του. Ξεχωριστό ευχαριστώ στους αδερφικούς μου φίλους Βαγγέλη, Γιάννη, Βασίλη, Χάρη, Fairangel γιατί στις πολλές δύσκολες στιγμές ήταν πάντοτε δίπλα μου.

Τέλος, από τα βάθη της καρδιάς μου, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους γονείς και την αδερφή μου, που όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου και μου προσέφεραν τα εφόδια πνευματικά, ψυχικά και υλικά έτσι ώστε να μπορώ να πατώ στέρεα στα δικά μου πόδια και να στηρίζομαι στις δικές μου δυνάμεις, πάντοτε με τιμή και αξιοπρέπεια.

Wir müssen wissen, wir werden wissen
(πρέπει να μάθουμε, θα μάθουμε)

David Hilbert

1.1 Στόχοι διατριβής

Τα σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας είναι μια κατηγορία υλικών που έχει αποκτήσει εξαιρετικό τεχνολογικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια με πληθώρα εφαρμογών στην αεροπορική και διαστημική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη formula 1, στα σπορ και γενικότερα όπου οι απαιτήσεις για λειτουργία σε περιβάλλον διαβρωτικό ή/και υψηλής θερμοκρασίας, συνδυάζεται με την απαίτηση για αντοχή σε μηχανικά φορτία και με την απαίτηση για χαμηλό βάρος. Στην κατεύθυνση αυτή έχει συντελέσει και το διαρκώς μειούμενο κόστος παραγωγής των υλικών αυτών μέσω της χρήσης καινοτόμων τεχνικών. Είναι προφανές λοιπόν ότι η τεκμηριωμένη γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς, της διαδικασίας ανάπτυξης και εξέλιξης της βλάβης και των μηχανισμών αστοχίας μιας κατηγορία υλικών με τόσο σημαντικές εφαρμογές είναι ζητούμενο από την ερευνητική κοινότητα παγκοσμίως. Προς αυτήν την κατεύθυνση είναι και η συμβολή της παρούσης διατριβής.

Η συσσώρευση της βλάβης σε σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας που υπόκεινται σε μηχανική φόρτιση είναι ένα ζήτημα που δεν έχει απαντηθεί ικανοποιητικά μέχρι σήμερα. Η βασικότερη αντικειμενική δυσκολία στο πρόβλημα αυτό είναι ο τρόπος προσέγγισης και προσδιορισμού της βλάβης στα σύνθετα υλικά καθώς πρόκειται για πολυπαραμετρικό πρόβλημα. Επίσης τίθεται το ζήτημα του τρόπου παρακολούθησης της βλάβης. Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι αποτελούν μια πολύ καλή επιλογή για την παρακολούθηση και τη μελέτη της εξέλιξης της βλάβης.

Ο βασικός λοιπόν σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της εξέλιξης της βλάβης και των μηχανισμών αστοχίας στα υλικά αυτά με τη χρήση δύο διαφορετικών τεχνικών μη καταστροφικών ελέγχων (Ακουστική Εκπομπή ΑΕ και Ακουστο-Υπέρηχο ΑΥ) κατά τη διάρκεια μηχανικών δοκιμών, καθώς επίσης και η εύρεση ποσοτικών δεικτών ικανών να παρακολουθούν τα διάφορα επίπεδα βλάβης του υλικού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεθοδολογίες επεξεργασίας των σημάτων που προκύπτουν από κάθε τεχνική.

Στην κατεύθυνση αυτή δοκιμάστηκαν τρεις τύποι υλικών C/C με ενίσχυση τύπου υφάσματος. Η διαφοροποίηση από τύπο σε τύπο υλικού έγκειται στις διαφορετικές ιδιότητες της διεπιφάνειας που επέλεξε ο κατασκευαστής να προσδώσει χωρίς να διατεθούν περαιτέρω λεπτομέρειες (βιομηχανικό απόρρητο). Παράλληλα, από τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διαφορετικών μεθοδολογιών επεξεργασίας των σημάτων που προέκυψαν από κάθε μη καταστροφική μέθοδο, επιχειρείται η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο που οι διαφορετικές ποιότητες της διεπιφάνειας επηρεάζουν τους μηχανισμούς συσσώρευσης βλάβης στα υπό εξέταση υλικά. Αναλυτικότερα οι στόχοι που επιδιώχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής είναι οι ακόλουθοι:

- Εκτέλεση ειδικά επιλεγμένων μηχανικών δοκιμών σε τρία είδη συνθέτων υλικών C/C με ενίσχυση τύπου υφάσματος, που δίδουν τη δυνατότητα ανάπτυξης βλάβης πολλαπλών επιπέδων στη δομή του υλικού
- Χρήση μη καταστροφικών μεθόδων όπως η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) και οι ακουστο-υπέρηχοι (ΑΥ) για την παρακολούθηση της βλάβης που αναπτύσσεται και εξελίσσεται κατά τη διάρκεια των μηχανικών δοκιμών

- Αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας και εξέλιξης της βλάβης έπειτα επεξεργασία των σημάτων ΑΕ
- Ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων τεχνικών επεξεργασίας για τα σήματα του ΑΥ βασιζόμενες στο μετασχηματισμό κυματιδίων
- Ανάπτυξη ποσοτικών δεικτών για την παρακολούθηση της συσσώρευσης της βλάβης από την επεξεργασία των σημάτων του ΑΥ
- Εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο που η διαφοροποίηση στις τελικές ιδιότητες της διεπιφάνειας επηρεάζει τον τρόπο εξέλιξης και συσσώρευσης στα υπό εξέταση υλικά

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου: η Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ) και ο Ακουστο-Υπέρηχος (ΑΥ) κατά τη διάρκεια πειραμάτων επαναλαμβανόμενης φόρτισης – αποφόρτισης – επαναφόρτισης με αυξανόμενο επίπεδο φορτίου σε σύνθετα υλικά C/C με ενίσχυση τύπου υφάσματος.

Ακολουθεί μια ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας η οποία αφορά κατά βάση το μη καταστροφικό έλεγχο των κεραμικών συνθέτων υλικών με ακουστο-υπέρηχο και αποτέλεσε πηγή έμπνευσης και ενασχόλησης με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

1.2 State-of-the-art στον έλεγχο συνθέτων υλικών με ΑΥ

Η τεχνική του Ακουστο-Υπέρηχου (ΑΥ) αναπτύχθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του '70 ως εργαλείο NDE για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των ενισχυμένων σύνθετων υλικών [1-3]. Κατά την υποβολή των συνθέτων υλικών σε μηχανικά φορτία (στατικά ή δυναμικά), η αστοχία συμβαίνει εξαιτίας της συσσώρευσης της βλάβης. Η βλάβη σε αυτά τα υλικά οφείλεται είτε σε αστοχία της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας,

είτε στη μήτρα που ρηγματώνεται, είτε σε αστοχία των ινών ενίσχυσης, είτε σε αποστρωματώσεις [5]. Οι παραπάνω τύποι βλάβης συνδυάζονται εμφανιζόμενοι με κάποιας μορφής αλληλουχία οδηγώντας στην τελική αστοχία του υλικού. Συνεπώς, ο μη καταστροφικός έλεγχος τέτοιων υλικών αφορά την αξιολόγηση της συνδυασμένης επίδρασης της συσσώρευσης της βλάβης στο υλικό παρά τον προσδιορισμό και την ταξινόμηση μιας ρωγμής.

Ο ΑΥ είναι μια τεχνική που αποπειράται να ποσοτικοποιήσει εμπειρικά τη βλάβη στα προηγμένα υλικά. Η θεμελιώδης πτυχή της μεθόδου ΑΥ αφορά τη δημιουργία μηχανικής διέγερσης σε ένα σημείο του υλικού και τη λήψη της προκύπτουσας διαταραχής σε ένα άλλο σημείο του [1-3]. Η μέθοδος διέγερσης περιλαμβάνει συνήθως τη χρησιμοποίηση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Ένας αισθητήρας χρησιμοποιείται ως πομπός (pulser) για να εισαγάγει έναν ευρυζωνικό, υπερηχητικό παλμό στο υλικό. Ο υπερηχητικός παλμός ταξιδεύει εντός του υλικού μέχρι να παραληφθεί από αισθητήρα που χρησιμοποιείται ως δέκτης (receiver).

Η μέθοδος του ΑΥ για τη μελέτη της εξέλιξης της βλάβης σε σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκε κατά βάση από τη NASA (όπου και αναπτύχθηκε) και οι περιορισμένες δημοσιεύσεις πάνω στο θέμα προέρχονται από ερευνητές του χώρου αυτού. Ο Alex Vary ήταν αυτός που ανέπτυξε τη μέθοδο και την εφήρμοσε για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας συνθέτων υλικών. Η αρχική του πρόθεση ήταν να δημιουργήσει μια διαδικασία μέτρησης που θα ήταν σε θέση να ποσοτικοποιήσει τη συνολική επίδραση της συσσωρευμένης βλάβης στα ινώδη σύνθετα υλικά [1,2,6,7].

Οι Hemann et al. [3] χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ΑΥ συσχέτισαν γραμμικά την πυκνότητα των ρωγμών σε σύνθετο εποξειδικής μήτρας με ενίσχυση γραφίτη (ίνες άνθρακα) με την παράμετρο SWF (Stress Wave Factor) που εξάγεται από τις ληφθείσες κυματομορφές.

Οι Klima et al. [4] διεξήγαγαν μετρήσεις του SWF κυματομορφών ΑΥ (SWF ορίζεται ως το κέντρο βάρους του φάσματος ισχύος του σήματος) σε δοκίμια εφελκυσμού SiC/SiC₃N₄, σε οξειδωτικό περιβάλλον σε θερμοκρασίες από 700-1200 °C. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν την ύπαρξη μιας εμπειρικής σχέσης μεταξύ του κανονικοποιημένου SWF και του μέτρου ελαστικότητας και συμπέραναν ότι η μέθοδος του ΑΥ είναι ευαίσθητη σε έναν αριθμό παραγόντων που επηρεάζουν τη δυσκαμψία του υλικού συμπεριλαμβανομένης και της δομικής ακεραιότητας του διεπιφανειακού δεσμού ίνας-μήτρας.

Οι Duke et al. [5] κάνουν μια ανασκόπηση των εφαρμογών του ακουστο-υπέρηχου μέχρι το 1989. Οι Grosskopf και Duke [8] στη μεταπτυχιακή τους διατριβή διερεύνησαν τη μηχανική συμπεριφορά δοκιμών Glass/SiC σε κάμψη τεσσάρων σημείων, με περιοδικές μετρήσεις ΑΥ και συσχέτισαν τα αποτελέσματά τους με αποτελέσματα άλλων μη καταστροφικών δοκιμών όπως ραδιογραφία, ακουστική εκπομπή και διευσδυτικά υγρά. Για την παρακολούθηση της βλάβης χρησιμοποίησαν δύο παράμετρους που εξήχθησαν από τις κυματομορφές ΑΥ, αναφορικά την M0 και το λόγο M1/M0, και έδειξαν σημαντική πτώση τους με την εξέλιξη της βλάβης στο δοκίμιο αν και οι μετρήσεις ΑΥ που έκαναν ήταν σαφώς περιορισμένου αριθμού και περιοδικής φύσεως. Μαθηματικά η παράμετρος M0 είναι η μέση τιμή του φάσματος ισχύος $S(f)$ της κυματομορφής ΑΥ ενώ M1 η ροπή 1^{ης} τάξεως ($M0 = \int S(f)df$, $M1 = \int S(f)f df$).

Οι Cios et al. [9] εφήρμοσαν τον ΑΥ σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (MMCs). Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα δεδομένα που προέκυψαν σε νευρωνικό δίκτυο για να εκτιμήσουν τη βλάβη των δοκιμών μέσω των μετρήσεων ΑΥ. Στην εργασία τους δεν προϋπέθεσαν γνώση πάνω στη σπουδαιότητα ορισμένων παραμέτρων των κυματομορφών του ΑΥ αλλά βασίστηκαν στην ικανότητα του

νευρωνικού δικτύου να εξάγει τα σημαντικά χαρακτηριστικά από την κυματομορφή-σήμα.

Ένας πολύ σημαντικός ερευνητής στο χώρο του ΑΥ και των εφαρμογών του, ο Kautz [10] διέτύπωσε την άποψη ότι τα τασικά κύματα (stress waves) που δημιουργούνται με τον ΑΥ και ταξιδεύουν στο δοκίμιο-υλικό, είναι ουσιαστικά κύματα Lamb (συμμετρικά και αντισυμμετρικά). Μέτρησε τη φασική τους ταχύτητα και υπολόγισε το ρυθμό μείωσης του πλάτους του διαχεόμενου τασικού πεδίου (diffuse field decay rate), μια παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα και αργότερα. Έδειξε επίσης ότι αυτές οι παράμετροι είναι ευαίσθητες στις μεταβολές της δυσκαμψίας του υλικού και μπορούν να εκτιμήσουν βλάβη όπως η εκτεταμένη ρηγμάτωση της μήτρας, η αστοχία του διεπιφανειακού δεσμού ίνας-μήτρας και οι μεταβολές της πυκνότητας στα κεραμικά σύνθετα υλικά.

Οι Baaklini et al. [11] εκτός των άλλων μη καταστροφικών μεθόδων χρησιμοποίησαν τον ΑΥ και την παράμετρο SWF για την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας εξαρτημάτων αεριοστροβίλων από μήτρα τιτανίου και ενισχυτική φάση ινών SiC. Ο Kautz et al. [12] διεξήγαγε περιοδικές μετρήσεις σε τρεις παραμέτρους που εξήγαγε από κυματομορφές ΑΥ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας εφελκυστικών δοκιμών σε SiC/CAS και SiC/SiC με αρχιτεκτονική 2D και 3D. Τον SWF, την ταχύτητα ομάδας (group velocity) του χαμηλότερου mode συμμετρικού και την ταχύτητα ομάδας του αντισυμμετρικού κύματος Lamb που δημιουργείται με τον ΑΥ. Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις πριν και μετά την εφελκυστική δοκιμή.

Οι Guo και Cawley [13] θέλησαν να διερευνήσουν το πρόβλημα της επαναληψιμότητας των μετρήσεων ΑΥ. Για το λόγο μελέτησαν τη διάδοση κυμάτων Lamb σε πλάκες από σύνθετα υλικά με και χωρίς βλάβες τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά. Επικέντρωσαν την

εργασία τους περισσότερο σε βλάβες τύπου αποστρωματοποίησης (delamination) και συμπέραναν ότι ο ΑΥ είναι περισσότερο ευαίσθητος στη βλάβη λόγω ρηγμάτωσης της μήτρας, αστοχίας του διεπιφανειακού δεσμού και ανομοιογένειας που επηρεάζουν συνολικά τη διαδρομή που διανύουν τα κύματα που εκπέμπονται από τον πομπό (pulser) εκτός και αν ο ένας από τους δύο αισθητήρες βρίσκεται πάνω από την περιοχή της αποστρωμάτωσης.

Οι Workman et al. [14,16] θέλησαν να ελέγξουν την ικανότητα του ΑΥ να μετρήσει το εύρος της ζημίας λόγω κρούσης σε κυλινδρικά πιεστικά δοχεία graphite-epoxy. Η παράμετρος που διερευνήθηκε ήταν η ενέργεια του φάσματος ισχύος των κυματομορφών ΑΥ.

Ο Tiwary [15] χρησιμοποίησε τον ΑΥ για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της εξέλιξης της βλάβης σε κεραμικά σύνθετα υλικά SiC/CAS και SiC/MAS υπό κυκλική και ψευδοστατική φόρτιση. Η εφαρμογή της τεχνικής έδειξε τη δυνατότητα της για τον εντοπισμό των κρίσιμων επιπέδων τάσης στα οποία ξεκινούν και φτάνουν σε κορεσμό οι ρωγμές της μήτρας. Με τη χρήση της μεθόδου έδειξε ότι το κρίσιμο επίπεδο τάσης που χρησιμοποιείται σαν τάση σχεδιασμού σε ψαθυρά σύνθετα υλικά βρίσκεται 10-15% χαμηλότερα από την τιμή που προκύπτει από αναλυτικές μεθόδους.

Ο Kautz [17] μελέτησε τη συμπεριφορά του ρυθμού μείωσης του πλάτους του διαχεόμενου τασικού πεδίου (diffuse field decay rate) σε πάνελς από σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Στην εργασία του περιγράφει αναλυτικά τον τρόπο υπολογισμού της παραμέτρου αυτής και αποδεικνύει τη χρησιμότητά της στην παρακολούθηση της διαδικασίας συσσώρευσης βλάβης. Ο ίδιος ερευνητής σε άλλη του εργασία [18] μελετά την εφαρμογή του ΑΥ με τη χρήση laser αισθητήρων με σύζευξη αέρα (air-coupling) για τη δημιουργία υπερηχητικών τασικών κυμάτων.

Ένας άλλος σπουδαίος ερευνητής ο Gyekenyesi [19] μελετά την εφαρμογή του ΑΥ για την παρακολούθηση της συσσώρευσης της βλάβης σε πολυμερικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα τύπου υφάσματος σε κοπωτικά φορτία και περιβάλλον υψηλής σταθερής θερμοκρασίας.

Οι Baaklini et al. [20] κάνουν μια ανασκόπηση των μη καταστροφικών μεθόδων, μεταξύ άλλων του ΑΥ και της ΑΕ για το χαρακτηρισμό προηγμένων αεροδιαστημικών υλικών και την εκτίμηση της βλάβης σε πειράματα ερπυσμού. Και ο Gyekenyesi [21] ασχολείται με την αποτίμηση της βλάβης λόγω ερπυσμού στο υλικό Udimet 520 ένα μεταλλικό κράμα με βάση το νικέλιο. Οι παράμετροι που εξάγει από τις κυματομορφές ΑΥ είναι ο ρυθμός μείωσης του πλάτους του διαχεόμενου τασικού πεδίου (diffuse field decay rate) και το κεντροειδές του φάσματος ισχύος f_c (centroid of power spectrum) περισσότερο για το οποίο θα πούμε στο κεφάλαιο 5.

Ο Kautz [22] κάνει μια αναλυτική σύνοψη των εφαρμογών του ΑΥ για την εκτίμηση της βλάβης σε προηγμένα σύνθετα υλικά και παρουσιάζει τον αναλυτικό προσδιορισμό όλων των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα. Τέλος στην πιο πρόσφατη εργασία στο χώρο, οι Gyekenyesi et al. [23] δημοσιεύουν αποτελέσματα εφαρμογής του ΑΥ σε δύο τύπους SiC/SiC υλικών που καταπονούνται με κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης σε αυξανόμενο από κύκλο σε κύκλο φορτίο.

Σε όλες τις παραπάνω εργασίες κοινός τόπος είναι εφαρμογή του ΑΥ σε συγκεκριμένες περιορισμένες χρονικές στιγμές και η χρήση πολύ συγκεκριμένων τεχνικών για την επεξεργασία των κυματομορφών και την εξαγωγή παραμέτρων ικανών να παρακολουθήσουν την εξέλιξη της βλάβης. Στην παρούσα διατριβή αποφασίσαμε πρωτίστως να εφαρμόσουμε συνεχή καταγραφή ΑΥ καθ' όλη τη διάρκεια των

μηχανικών δοκιμών θέλοντας έτσι να μελετήσουμε λεπτομερέστερα και πιο επισταμένα τη συμπεριφορά διαφόρων παραμέτρων εξαγόμενων από τις κυματομορφές ΑΥ, υποψηφίων για το δύσκολο έργο της εξέλιξης και παρακολούθησης της βλάβης.

Επιπλέον αποφασίσαμε να καταγράψουμε ταυτόχρονα και την ΑΕ από τις μηχανικές δοκιμές έτσι ώστε να αξιολογήσουμε δύο διαφορετικής φιλοσοφίας τεχνικές καθώς επίσης και να προτείνουμε σε κάθε ενδιαφερόμενο τρόπους για την αξιοποίηση των δεδομένων κάθε μιας.

Εξαιρετικά ουσιώδες και στοιχείο στο οποίο δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα από τον συγγραφέα ήταν η ανάπτυξη νέων τεχνικών επεξεργασίας των προκυπτουσών κυματομορφών ΑΥ αλλά και εν γένει σημάτων. Στην κατεύθυνση αυτή αποφασίσαμε να στραφούμε σε νέες, ανερχόμενες στη διεθνή βιβλιογραφία τεχνικές όπως ο συνεχής και διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων. Στόχος μας ήταν πάντοτε η επεξεργασία των κυματομορφών ΑΥ και η εξαγωγή νέων αλλά και 'συμβατικών' παραμέτρων για την παρακολούθηση της βλάβης σε σύνθετα υλικά.

Για ότι αφορά τη μέθοδο της ΑΕ και την αξιοποίηση της πληθώρας των προκυπτουσών κυματομορφών ΑΕ, χρησιμοποιήσαμε αλγοριθμικά σχήματα αναγνώρισης προτύπων χωρίς επίβλεψη, με στόχο την αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας του υλικού, την εξέλιξή τους κατά τη διάρκεια της φόρτισης αλλά και τη διαφοροποίησή τους όταν μεταβάλλεται η διεπιφάνεια στο ίδιο κατά βάση υλικό. Αναπτύχθηκε συνολική συστηματική μεθοδολογία με καινοτόμα στοιχεία σε ότι αφορά την επιλογή των παραμέτρων που ρυθμίζουν την εσωτερική λειτουργία των αλγοριθμικών σχημάτων και που οι τιμές τους δίνονται κάθε φορά εκ των προτέρων από το χρήστη.

1.3 Καινοτόμα στοιχεία διατριβής

Ακολούθως παραθέτουμε τα αμιγώς καινοτόμα στοιχεία που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας για την υλοποίηση της παρούσας διατριβής.

1. Συνεχής καταγραφή ακουστο-υπέρηχου καθ' όλη τη διάρκεια των μηχανικών δοκιμών

Μέχρι σήμερα η τεχνική του ΑΥ εφαρμοζόταν μόνο σε πολύ περιορισμένο αριθμό χρονικών στιγμών κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στην παρούσα εργασία σήματα ΑΥ καταγράφονταν συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

2. Εφαρμογή αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων σε πειραματικά δεδομένα ΑΕ από μηχανικές δοκιμές φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης

3. Ανάπτυξη πλήρους μεθοδολογίας εφαρμογής αλγοριθμικών σχημάτων αναγνώρισης προτύπων σε πειραματικά δεδομένα ΑΕ από σύνθετα υλικά

Με την ειδική διαδικασία που αναπτύχθηκε δίνεται απάντηση στο αναπάντητο μέχρι σήμερα πρόβλημα της επιλογής των παραμέτρων των αλγορίθμων. Επίσης απλοποιείται και συστηματοποιείται η διαδικασία αναγνώρισης προτύπων σε δεδομένα ΑΕ

4. Ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων μεθοδολογιών επεξεργασίας σημάτων ΑΥ βασισμένων στον μετασχηματισμό

κυματιδίων με στόχο την ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση της βλάβης σε ινώδη σύνθετα υλικά

- α) Ανάπτυξη μεθοδολογίας επεξεργασίας κυματομορφών ΑΥ βασισμένης στο διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων
- β) Ανάπτυξη μεθοδολογίας επεξεργασίας κυματομορφών ΑΥ βασισμένης στο συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίων

5. Χρήση υπαρχόντων-συμβατικών τεχνικών για την επεξεργασία σημάτων ΑΕ και ΑΥ με στόχο την ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση της βλάβης σε ινώδη σύνθετα υλικά

- α) Μονοπαραμετρική ανάλυση σημάτων ΑΕ
- β) Χρήση συνάρτησης συνάφειας σε κυματομορφές ΑΥ
- γ) Χρήση λόγου θετικών προς αρνητικά εμβαδά των κυματομορφών ΑΥ

6. Χρήση των αποτελεσμάτων εφαρμογής των μη καταστροφικών τεχνικών για την αξιολόγηση της διαφοροποίησης της διαδικασίας συσσώρευσης της βλάβης με τη διαφοροποίηση στην ποιότητα της διεπιφάνειας των υπό εξέταση υλικών

1.4 Δομή διατριβής

Το περιεχόμενο της διατριβής αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια, σύντομη περιγραφή των οποίων δίνεται στη συνέχεια.

Κεφάλαιο 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στόχοι και τα καινοτόμα στοιχεία της διατριβής και δίνεται μια συνολική εικόνα του state-of-the-art στον έλεγχο προηγμένων συνθέτων υλικών με ακουστοϋπέρηχο.

Κεφάλαιο 2^ο: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ C/C

Στο 2^ο κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη παρουσίαση των συνθέτων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος, της μηχανικής συμπεριφοράς τους καθώς και των διαδικασιών συσσώρευσης βλάβης στα υλικά αυτά. Παρουσιάζονται τα υλικά που δοκιμάστηκαν στην διατριβή καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα -σε επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων- από τις δοκιμές τους.

Κεφάλαιο 3^ο: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μη καταστροφική μέθοδος της ακουστικής εκπομπής και αναλύεται η εφαρμογή της στην πειραματική διαδικασία των τριών τύπων υλικών C/C. Διεξάγεται η λεγόμενη συμβατική, μονοπαραμετρική ανάλυση. Δίδονται και σχολιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα και συζητώνται τα εξαγόμενα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 4^ο: Η ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΕ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία βασισμένη σε αναγνώριση προτύπων χωρίς επίβλεψη για την επεξεργασία των σημάτων της ακουστικής εκπομπής προκειμένου να αναγνωρισθούν οι μηχανισμοί αστοχίας των υλικών και η εξέλιξή τους κατά την πειραματική διαδικασία. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων που χρησιμοποιήθηκαν για το λόγο αυτό καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους. Συζητώνται διεξοδικά τα αποτελέσματα και η δυνατότητα αξιολόγησης των τριών τύπων διεπιφανειών των υπό εξέταση υλικών.

Κεφάλαιο 5^ο: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΟ-ΥΠΕΡΗΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ

Στο 5^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται και παρουσιάζονται καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων του ακουστοϋπέρηχου με στόχο την εξαγωγή παραμέτρων ικανών να παρακολουθούν την εξέλιξη της βλάβης στο υλικό. Παρουσιάζεται η τεχνική του μετασχηματισμού κυματιδίων πάνω στη συνεχή και διακριτή εκδοχή του οποίου βασίζονται δύο εκ των προτεινόμενων τεχνικών επεξεργασίας. Παράλληλα χρησιμοποιούνται και δύο πιο απλές τεχνικές η συνάφεια και ο λόγος θετικών προς αρνητικά εμβαδά των κυματομορφών τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με τις μεθοδολογίες που βασίζονται στο μετασχηματισμό κυματιδίων. Δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής των νέων προτεινόμενων τεχνικών πάνω

στα σήματα του ακουστοϋπέρηχου και σχολιάζεται η ικανότητα τους για ότι αφορά την παρακολούθηση της βλάβης στα υπό εξέταση υλικά.

Κεφάλαιο 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Τέλος στο κεφάλαιο 6 συζητώνται μερικά από τα κυριότερα συμπεράσματα της διατριβής και δίδονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

1.5 Βιβλιογραφία

1. **Vary A., Bowles KJ.,** An ultrasonic-acoustic technique for nondestructive evaluation of fiber composite quality, Polymer Engineering Science 1979;19.
2. **Vary A.,** The Acousto-Ultrasonic Approach, NASA TM-89843, 1987
3. **J.H. Hemann, K.J. Bowles, H. Kautz, P. Cavano,** Transply crack density detection by acousto-ultrasonics, NASA-TM-100224,1987
4. **S.J. Klima, H.E. Kautz,** Nondestructive Evaluation of Advanced Ceramics, NASA-TM-101489, 1988
5. **J. C. Duke, E. G. Henneke, M. T. Kiernan and P. P. Grosskopf,** A Study of the Stress Wave Factor Technique for Evaluation of Composite Materials, NASA-CR-4195,1989
6. **Vary A.,** Acousto-ultrasonics. In: Summerscales J, editor. Nondestructive testing of fiber reinforced plastic composites, vol. 2. London: Elsevier; 1990. p. 1–54.
7. **Vary A.,** Acousto-ultrasonics - Retrospective exhortation with bibliography, NASA 19910052388, 1991
8. **P. Grosskopf, J. Duke,** Mechanical behavior of a ceramic matrix composite material, M.S. Thesis Final Report, NASA CR-187072, 1991

9. **K. Cios, R. Tjia, A. Vary, H.E. Kautz**, Application of neural networks in the acousto-ultrasonic evaluation of metal-matrix composite specimens, NASA 19930053012, 1992
10. **Kautz H.E.**, Determination of plate wave velocities and diffuse field decay rates with broadband acousto-ultrasonics In: Second international conference on acousto-ultrasonics, ASNT, Atlanta, GA 1993.
11. **G. Baaklini, L. Percival, R. Yancey, H.E. Kautz**, NDE of titanium alloy MMC rings for gas turbine engines, NASA-TM-106188, 1993
12. **H.E. Kautz, A. Chulya**, Acousto-Ultrasonic Analysis of Failure in Ceramic Matrix Composite Tensile Specimens, NASA-TM-106219, 1993
13. **N. Guo and P. Cawley**, Lamb wave propagation in composite laminates and its relationship with acousto-ultrasonics, NDT&E International, Vol. 26, Number 2, 1993
14. **G. Workman, J. Walker, M. Lansing**, Acoustic method of damage sensing in composite materials, NASA-CR-196538, 1994
15. **Tiwari A.**, Real time acousto-ultrasonic NDE technique for monitoring damage in ceramic composites under dynamic loads, NASA CR 198374, 1995.

16. **G.L. Workman, J.L. Walker**, An acoustic emission and acousto-ultrasonic analysis of impact damaged composite pressure vessels, NASA-CR-201136, 1996
17. **H.E. Kautz**, Acousto-Ultrasonic Decay in Metal Matrix Composite Panels, Res Nondestr Eval (1996) 8:39–50
18. **H.E. Kautz**, Noncontact Acousto-Ultrasonics for Material Characterization, NASA TM-208410, 1998
19. **Gyekenyesi AL.**, Isothermal fatigue, damage accumulation, and life prediction of a woven PMC. NASA CR-206593, 1998.
20. **G.Y. Baaklini, H.E. Kautz, A.L. Gyekenyesi, A. Abdul-Aziz, R.E. Martin**, Nondestructive Evaluation Approaches Developed for Material Characterization in Aeronautics and Space Applications, NASA 20050198845, 2001
21. **Gyekenyesi AL, Kautz HE, Cao W.**, Damage assessment of creep tested and thermally aged Udimet 520 using acousto-ultrasonics NASA CR-210988, 2001
22. **H. E. Kautz**, Acousto-Ultrasonics to Assess Material and Structural Properties, NASA CR-211881, 2002
23. **Andrew L. Gyekenyesi, Gregory N. Morscher, Laura M. Cosgriff**, In situ monitoring of damage in SiC/SiC composites using acousto-ultrasonics, Composites: Part B 37 (2006) 47–53

2.1 Τα σύνθετα υλικά γενικά

Εν γένει ως σύνθετο υλικό ορίζεται εκείνο που αποτελείται από πολλά διαφορετικά υλικά ή φάσεις, που βρίσκονται σε μηχανική ισορροπία και προσφέρουν στο τελικό προϊόν βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με αυτές των φάσεων που το αποτελούν [1]. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να είναι συνεχούς ενίσχυσης ή διακριτής (σε μορφή μικροινιδίων, κόκκων ή δισκίων). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα ασχοληθούμε με υλικά συνεχούς ενίσχυσης. Το κύριο χαρακτηριστικό όλων των σύνθετων υλικών είναι η ανισοτροπία η διαφοροποίηση δηλαδή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών ανάλογα με τη διεύθυνση προσανατολισμού. Στο σύνθετο υλικό προσδιορίζονται δύο κύριες φάσεις, η μητρική και η ενισχυτική φάση. Η μήτρα είναι αυτή που ουσιαστικά μεταφέρει τα φορτία στην ενισχυτική φάση. Επιπλέον προστατεύει την ενίσχυση από εξωτερικούς παράγοντες και από άλλες φυσικές φθορές οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν αιτία για την ανάπτυξη αστοχιών. Η ενίσχυση μπορεί να είναι υπό τη μορφή συνεχών ινών πολύ μικρής διαμέτρου (μερικά μm) ή υπό τη μορφή υφάσματος (fabric). Η δεύτερη περίπτωση είναι και αυτή που οδηγεί στην κατηγορία των συνθέτων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος με τα οποία ασχοληθήκαμε στην παρούσα διατριβή. Τα σχήματα 2.1 και 2.2 συνοψίζουν τυπικά είδη μητρικού υλικού και ενισχυτικών ινών αντίστοιχα.

Σχήμα 2.1: Βασικά είδη μήτρας

Σχήμα 2.2: Μερικοί συνήθεις τύποι ινών ενίσχυσης

2.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση τύπου υφάσματος

Η ανάπτυξη της κατηγορίας των συνθέτων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος προέκυψε εξαιτίας της απλούστερης διαδικασίας

κατασκευής τους. Το σχήμα 2.3 συνοψίζει τα βασικότερα στάδια κατά τη διαδικασία παρασκευής τους. Τέσσερα είναι τα σημαντικά ιεραρχικά επίπεδα στην παραγωγή τους [3]:

ίνες → δέσμες ινών (yarns) → δομή υφάσματος (woven fabric) → τελικό προϊόν ενίσχυσης

Το πρώτο στάδιο είναι ο σχηματισμός των δεσμών ινών (yarns). Ακολούθως οι δεσμίδες ινών υφαίνονται ώστε να σχηματισθεί η δομή υφάσματος. Η ομάδα ινών κατά το μήκος της ύφανσης ονομάζεται στημόνι (warp) ενώ κατά το πλάτος ονομάζεται υφάδι (fill). Τελικά το σύνθετο υλικό μορφοποιείται μετά την εμβάπτιση της ενίσχυσης στο μητρικό υλικό σε ειδικά καλούπια.

Σχήμα 2.3: Στάδια παρασκευής των πλεκτών συνθέτων υλικών (Cox and Flanagan 1997)

Κατηγοριοποίηση

Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει μια κατηγοριοποίηση των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφάσματος [3]. Ο πρώτος διαχωρισμός σε δισδιάστατα 2D και τρισδιάστατα 3D γίνεται ανάλογα με το αν η υφασμένη δομή απουσία της μήτρας μπορεί να παραλάβει φορτία σε δύο διαστάσεις (επίπεδο 2D) ή στις τρεις διαστάσεις (χώρος 3D).

Σχήμα 2.4: Κατηγορίες πλεκτών (Cox and Flanagan 1997)

Στη συνέχεια τα 2D χωρίζονται ανάλογα με το πρότυπο της ύφανσης (plain, satin κλπ) ενώ τα 3D ανάλογα με τη γωνία ενίσχυσης στην z-διεύθυνση. Το σχήμα 2.5 παρουσιάζει τρία τυπικά πρότυπα ύφανσης για 2D και ένα για 3D. Στο α) έχουμε απλή πλέξη ενώ στα β) και γ) έχουμε ύφανση satin. Το δ) είναι το κλασικό ορθογώνιο 3D.

Σχήμα 2.5: Αντιπροσωπευτικά είδη 2D και 3D πλεκτών ενισχύσεων

2.3 Κεραμικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση τύπου υφάσματος

Τα κεραμικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση τύπου υφάσματος (woven ceramic composites) [2,4,5] αποτελούν μια ειδική κατηγορία εξελιγμένων συνθέτων υλικών των οποίων η ενισχυτική φάση έχει τη μορφή υφάσματος. Πρόκειται για υλικά που προέκυψαν από τις ανάγκες της αεροδιαστημικής κυρίως βιομηχανίας για υλικά με υψηλή δυσθραυστότητα (toughness) που θα έχουν σχετική “ανοσία” στις μικρές ρωγμές και διατηρούν την ικανότητά τους να φέρουν φορτία σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μήτρα τους αποτελείται από γυαλί, άνθρακα, Al_2O_3 ή SiC ενώ η ενισχυτική φάση είναι συνηθέστερα άνθρακας, Al_2O_3

ή SiC και είναι σε μορφή πλεκτού με διδιάστατη (2D) ή τρισδιάστατη αρχιτεκτονική (3D).

2.4 Υλικά διατριβής

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κεραμικά σύνθετα υλικά C/C (Carbon fibre bundles C6 3k, phenolic resin matrix+PyC interface by CVI). Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από την Schunk στη Γερμανία. Πρόκειται για υλικά C/C με ενίσχυση τύπου υφάσματος με πρότυπη πλέξη 2x2 twill. Η εταιρεία μας παρείχε τρεις διαφορετικούς τύπους υλικών με διαφορές μη γνωστοποιημένες από τον κατασκευαστή στην διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είχαν στόχο τη μελέτη της επίδρασης τους στην διεπιφανειακή διατμητική αντοχή (interfacial shear strength) καθώς επίσης και την εν γένει επίδρασή τους στη μηχανική συμπεριφορά του συνθέτου υλικού.

2.5 Μηχανική συμπεριφορά πλεκτών κεραμικών συνθέτων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την πειραματική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος [6-9]. Η παρατήρηση των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης για το σύνθετο αποκαλύπτει ότι σε ένα σημείο αρκετά κάτω από την αντοχή του, η συμπεριφορά του υλικού γίνεται μη γραμμική. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης από αρχικά γραμμική παρεκκλίνει από τη γραμμικότητα και το υλικό εμφανίζει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Όταν το υλικό αποφορτίζεται και επαναφορτίζεται στη συνέχεια, το μέτρο ελαστικότητας διατηρεί τη χαμηλότερη τιμή του. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος ότι η

μήτρα υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή παραμόρφωσης εμφανίζοντας ένα εκτεταμένο δίκτυο μικρορωγμών. Σε αυτές τις μικρο-ρηγματώσεις της μήτρας οφείλεται το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας.

Έχει αποδειχθεί ότι η συμπεριφορά των κεραμικών συνθέτων υλικών εξαρτάται ιδιαίτερα από τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας [10-15]. Ένα σύνθετο υλικό στο οποίο υπάρχει ένας ισχυρός δεσμός μεταξύ των ινών και της μήτρας, θα συμπεριφερθεί ως ένα πολύ “εύθραυστο” υλικό κατά τη διάδοση των ρωγμών. Οι ρωγμές ξεκινούν από ανομοιογένειες σε επίπεδο μικροδομής και είναι τυχαία κατανομημένες στη μήτρα. Όταν συναντήσουν ισχυρή διεπιφάνεια θα προχωρήσουν χωρίς ενεργειακές απώλειες και θα θραύσουν τις ενισχυτικές ίνες. Τα υλικά με τέτοιας φιλοσοφίας διεπιφάνεια προσφέρουν ελάχιστη ή καμία αντίσταση στην διάδοση των ρωγμών. Αντίθετα μια ελεγχόμενα ασθενέστερη διεπιφάνεια οδηγεί σε ένα σύνθετο με υψηλότερη δυσθραυστότητα. Στην περίπτωση αυτή η διαδιδόμενη ρωγμή προσεγγίζει τη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, προκαλεί την αστοχία και αποκόλλησή της και εκτρέπεται από την πορεία της διαδιδόμενη κατά μήκος της διεπιφάνειας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απαιτούμενη ενέργεια για την συνέχιση της επέκτασης της βλάβης στο υλικό.

Η αποκολλημένη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας μετά τη θραύση κάποιων ινών επιτρέπει και την εξόλκευση (pull-out) των σπασμένων ινών εισάγοντας έναν ακόμη μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας κατά τη διάδοση της βλάβης εντός του υλικού. Στην άλλη άκρη βρίσκεται μια τελείως ασθενής διεπιφάνεια που αδυνατεί να μεταβιβάσει τα εξωτερικά εφαρμοζόμενα φορτία στην ισχυρή φάση που είναι οι ίνες ενίσχυσης.

Διάφορες μέθοδοι υπάρχουν για να ελεγχθεί η διεπιφάνεια ινών-μήτρας έτσι ώστε να επιτευχθεί η ιδανική διεπιφανειακή αντοχή. Η επιτυχέστερη μέθοδος φαίνεται να είναι οι επιστρώσεις (coatings) ινών.

Οι ίνες με τον τρόπο αυτό “ντύνονται” με ένα λεπτό στρώμα ενός άλλου υλικού που δημιουργεί τον επιθυμητό δεσμό τριβής με τη μήτρα.

Το πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των συνθέτων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος είναι η πληθώρα των μηχανισμών αστοχίας γεγονός που τους προσφέρει πολύ υψηλές τιμές δυσθραυστότητας (fracture toughness). Οι κυριότεροι μηχανισμοί αστοχίας ή μηχανισμοί συσσώρευσης βλάβης είναι η ρηγμάτωση της μήτρας, οι αστοχίες του διεπιφανειακού δεσμού καθώς και η θραύση των δεσμίδων ινών [6,7]. Η τελική αστοχία συντελείται από αστοχία των δεσμίδων ινών στα τελικά στάδια. Τόσο η ρηγμάτωση της μήτρας όσο και οι αστοχίες των ινών είναι ψαθυρές θραύσεις [18,22].

Τα κεραμικά σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μια πολύ ενδιαφέρουσα και επιθυμητή (με την έννοια της μη απότομης ψαθυρής θραύσης) μη γραμμική συμπεριφορά υπό εφελκυστικά φορτία. Δεν αστοχούν με ψαθυρό τρόπο δηλαδή αλλά συσσωρεύουν βλάβη σταδιακά. Η συμπεριφορά αυτή είναι συνέπεια της πληθώρας των μηχανισμών διάχυσης ενέργειας όπως οι μικρο-ρηγματώσεις της μήτρας, οι αστοχίες του διεπιφανειακού δεσμού ίνας-μήτρας και η εξόλκευση των ενισχυτικών ινών μετά την αστοχία τους.

Μια τυπική καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης σε μια αλληλουχία φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης του υλικού με αυξανόμενο επίπεδο τάσης σε κάθε κύκλο μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου φαίνεται στο σχήμα 2.6 [16,17]. Το υλικό παρουσιάζει μια εκτεταμένη μη γραμμικότητα έπειτα από το αρχικό ελαστικό-γραμμικό τμήμα. Οι κύκλοι φόρτισης-αποφόρτισης αποκαλύπτουν την αλληλουχία της βλάβης (προοδευτική μείωση του αξονικού μέτρου ελαστικότητας σε συνδυασμό με την αύξηση των εναπομενουσών παραμορφώσεων). Οι εναπομένουσες παραμορφώσεις (residual strains) που παρατηρούνται κατά την αποφόρτιση στα κεραμικά σύνθετα υλικά μπορούν να

αποδωθούν στην επίδραση διαφόρων φαινομένων όπως: (i) η απελευθέρωση των εναπομείναντων θερμικών τάσεων που υπάρχουν στο υλικό εκ κατασκευής (ii) η μερικώς μη αναστρέψιμη ολίσθηση που προέρχεται από διάφορους μηχανισμούς διάχυσης ενέργειας τριβολογικής φύσεως και των οποίων η επίδραση συνεισφέρει κατά βάση στην υστέρηση που παρατηρείται στους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης και (iii) η μηχανική παρεμπόδιση του πλήρους κλεισίματος της κυριαρχούσας ρωγμής που οφείλετε πιθανόν στην τραχύτητα των ινών και/ή στην επαφή μεταξύ των χειλέων μικρορωγμών που μετακινήθηκαν από τις αρχικές τους θέσεις, που οδηγεί σε αύξηση της δυσκαμψίας προς το τέλος των κύκλων [19-21].

Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης σε κεραμικά σύνθετα υλικά

Έτσι η βλάβη μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπτύσσεται σε τέσσερα στάδια [23-28],

- i) Μια ελαστική απόκριση του υλικού συνδυασμένη με το εν μέρει άνοιγμα των ήδη υπαρχόντων εξαιτίας θερμικών τάσεων μικρορωγμών
- ii) Πολλαπλές μικρο-ρηγματώσεις της μήτρας
- iii) Σχηματισμός και ανάπτυξη μακρο-ρωγμής παράλληλα με μηχανισμούς όπως αστοχία διεπιφανειακού δεσμού ίνας-μήτρας
- iv) Προοδευτική μεταφορά της τάσης στις δεσμίδες ινών οι οποίες αστοχούν σταδιακά μέχρι τη θραύση του δοκιμίου

2.6 Πειραματική διαδικασία - αποτελέσματα

Τα πειραματικά δοκίμια C/C υπεβλήθησαν σε κυκλική φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση με αυξανόμενο κατά 2 kN σε κάθε κύκλο επαναφόρτισης, μέχρι τελικής θραύσεως. Οι δοκιμές έγιναν σε υδραυλική μηχανή δοκιμών τύπου Instron 4550 με έλεγχο μετατόπισης (displacement control) και ρυθμό 0.5 mm/min. Η διατομή των δοκιμών είναι $2.5 \times 12 \text{ mm}^2$.

Στον πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών που δοκιμάστηκαν ενώ στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται οι πειραματικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για δύο τυπικά δοκίμια C/C.

Να σημειωθεί ότι τα δοκίμια δεν αποφορτίζονται πλήρως μέχρι μηδενικής μετατόπισης, αλλά μέχρι ένα επίπεδο φορτίου μερικών δεκάδων Nt και αυτό για να μη μεταπέσουν σε κατάσταση θλίψης.

Κωδικός δοκιμίου	Αριθμός κύκλων φόρτισης	Φορτίο θραύσεως (kN)	Τάση θραύσεως (MPa)	Παραμόρφωση θραύσεως (%)
M5P2C1S1	5	12.25	408.33	1.067
M5P2C1S6	5	11.9	396.67	1.083
M5P2C1S12	5	14.54	484.67	1.167
M6P2C1S3	4	11.94	398.00	1.25
M6P2C1S6	4	11.98	399.33	1.183
M6P2C1S11	4	7.34	244.67	1.1
M6P2C1S12	5	10.08	336.00	1.117
M8P2C1S1	4	9.71	323.67	1.233
M8P2C1S3	4	10.22	340.67	1.383
M8P2C1S6	4	9.98	332.67	1.00
M8P2C1S11	5	12.68	422.67	1.083

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών

Σχήμα 2.7: Τυπικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για δύο δοκίμια C/C

2.7 Βιβλιογραφία

1. **Engineered Material Handbook**, Composites, V.1, ASM International, 1987
2. **K.K. Chawla**, Ceramic Matrix Composites, Chapman and Hall, 1997
3. **B.N. Cox and G. Flanagan**, Handbook of Analytical Methods for Textile Composites, NASA CR-4750, 1997
4. **A.R. Hyde**, Ceramic Matrix Composites, Materials & Design, Vol. XI, No. 1, 1990, pp. 30_36.
5. **J.J. Mecholsky**, Engineering Research Needs of Advanced Ceramics and Ceramic-Matrix Composites, Ceramic Bulletin, Vol. 68, No.2, 1989, pp. 367-375.
6. **D.B. Marshall and A.G. Evans**, Failure Mechanisms in Ceramic-Fiber/Ceramic-Matrix Composites, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 68, No. 5, May 1985, pp. 225-231.
7. **J.N. Baucom and M.A. Zikry**, Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-static Perforation, Journal of Composite materials, Vol. 37, No. 18/2003
8. **Y.A. Bahei-El-Din, A.M. Rajendran and M.A. Zikry**, A micromechanical model for damage progression in woven composite systems, International Journal of Solids and Structures 41 (2004) 2307–2330

9. **P.P. Grosskopf and J.C. Duke**, Mechanical Behavior of a Ceramic Matrix Composite Material, NASA CR-187072, 1991
10. **J. W. Krynicki**, Design and Behavior of Ceramic Matrix Composite Subjected to Mechanical and Thermal Loading, Master of Science Essay, Johns Hopkins University, October 1989.
11. **K. M. Prewo**, Fiber Reinforced Glasses and Glass-Ceramics for High Performance Applications, Ceramic Bulletin, Vol. 65, No. 2, 1986, pp. 305-313.
12. **K. M. Prewo**, Carbon Fibre Reinforced Glass Matrix Composite Tension and Flexure Properties, Journal of Materials Science, Vol. 23, 1988, pp. 2745-2752.
13. **T. Mah**, Recent Developments in Fiber-Reinforced High Temperature Ceramic Composites, Ceramic Bulletin, Vol. 66, No. 2, 1987, pp. 304-317.
14. **R. W. Davidge**, Fibre-reinforced ceramics, Composites, Vol. 18, No. 2, Apr. 1987, pp. 93-98.
15. **T. Mah**, Room-Temperature Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Ceramic - Matrix Composites, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 68, No. 1, 1985, pp. C27-C30.
16. **G. Gamus, L. Guillaumat and S. Baste**, Development of damage in a 2d woven c/sic composite under mechanical loading: I. Mechanical

characterization, Composites Science and Technology 56 (1996) 1363-1372

17. **G. Gamus, L. Guillaumat and S. Baste,** Development of damage in a 2d woven c/sic composite under mechanical loading: II. Ultrasonic characterization, Composites Science and Technology 56 (1996) 1373-1382

18. **V.Calard, J. Lamon,** A probabilistic-statistical approach to the ultimate failure of ceramic-matrix composites—part I: Experimental investigation of 2D woven SiC/SiC composites, Composites Science and Technology 62 (2002) 385–393

19. **M. Bouquet, J.M. Birbis and J.M. Quenisset,** Toughness assessment of ceramic matrix composites. Comp. Sci. Technol., 37 (1990) 223-248.

20. **P. Gudmundson and S. Ostlund,** Prediction of thermoelastic properties of composite laminates with matrix cracks. Comp. Sci. Technol., 44 (1992) 95-105.

21. **W.S. Kuo and T.W. Chou,** Modeling of the thermomechanical behavior of glass matrix composites. In Metal and Ceramic Matrix Composites: Processing, Modeling and Mechanical Behavior, ed. R. B. Bhagat et al. The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, 1990, pp. 311-318.

22. **P.J. Callus, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, K.H. Leong,** Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites, Composites: Part A 30 (1999) 1277–1287

23. **U.A. Khashaba**, Fracture Behavior of Woven Composites Containing Various Cracks Geometry, Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol.37, No.1/2003
24. **T. Takeda, S. Takano, Y. Shindo, F. Narita**, Deformation and progressive failure behavior of woven-fabric-reinforced glass/epoxy composite laminates under tensile loading at cryogenic temperatures, Composites Science and Technology 65 (2005) 1691–1702
25. **O. Siron , G. Chollon , H. Tsuda , H. Yamauchi , K. Maeda , K. Kosaka**, Microstructural and mechanical properties of filler-added coal-tar pitch-based C/C composites: the damage and fracture process in correlation with AE waveform parameters, Carbon 38 (2000) 1369–1389
26. **F. Gao, L. Boniface, S.L. Ogin, P.A. Smith, R.P. Greaves**, Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: Part 1. Observations of damage accumulation, Composites Science and Technology 59 (1999), 123-136
27. **H. Hatta, M.S. Aly-Hassan, Y. Hatsukade, S. Wakayama, H. Suemasu, N. Kasai**, Damage detection of C/C composites using ESPI and SQUID techniques, Composites Science and Technology 65 (2005) 1098–1106
28. **X.Tang and J.D. Whitcomb**, Progressive Failure Behaviors of 2D Woven Composites, Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 37, No. 14/2003

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της **Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ)** είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την πραγματοποίηση πειραμάτων μη καταστροφικού ελέγχου υλικών και κατασκευών. Γενικά με τον όρο Ακουστική Εκπομπή χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά (τασικά) κύματα που διαδίδονται σε ένα συνεχές στερεό μέσο και τα οποία παράγονται με απότομη απελευθέρωση ενέργειας λόγω έναρξης ή διάδοσης αστοχίας στο υλικό. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E610-82 [1] η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) ορίζεται ως εξής: “πρόκειται για κατηγορία φαινομένων με τα οποία μεταβατικά ελαστικά κύματα παράγονται από την απότομη απελευθέρωση της ενέργειας από συγκεκριμένες πηγές μέσα σε ένα υλικό, ή τα ίδια τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που παράγονται με τον τρόπο αυτό”.

Σύμφωνα με τους Wolters & Bardenheir [2], ο όρος μέτρηση ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) χρησιμοποιείται όταν σε οποιοδήποτε υλικό δημιουργούνται μηχανικές ταλαντώσεις χωρίς εξωτερική διέγερση. Το εύρος των γεγονότων ακουστικής εκπομπής επεκτείνεται σε γεγονότα χαμηλής συχνότητας όπως οι σεισμοί, σε φαινόμενα με ακουστικές συχνότητες (20 Hz-20 kHz) όπως κατά τη διάρκεια του σπασίματος του ξύλου και σε γεγονότα υψηλών συχνοτήτων (υπερηχητικό φάσμα) όπως τα συμβαίνοντα κατά τη διάρκεια των μικρο-ρηγματώσεων στα στερεά. Όταν η τάση υπερβεί κάποια κρίσιμη τιμή σε συγκεκριμένες περιοχές ενός υλικού τότε το υλικό τοπικά αστοχεί και η ελαστική ενέργεια που έχει αποθηκευθεί απελευθερώνεται ξαφνικά. Το γεγονός

αυτό δημιουργεί μεταβατικά ελαστικά κύματα (transient elastic waves), τα οποία διαδίδονται ομόκεντρα γύρω από τη θέση δημιουργίας τους. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να ανιχνευθεί με τους κατάλληλους αισθητήρες. Το κύμα στον αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο αποθηκεύεται και αναλύεται. Κάθε σήμα ονομάζεται κυματομορφή AE ή γεγονός AE.

Αν και ο ορισμός που δόθηκε παραπάνω μοιάζει πολύπλοκος, η βασική αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η μέθοδος της AE είναι πολύ πιο κατανοητή. Ένα απλό παράδειγμα της AE στην καθημερινή ζωή είναι ο ήχος που παράγεται, ή αλλιώς, τα ακουστικά κύματα που δημιουργούνται καθώς ένα κομμάτι ξύλου πάει να σπάσει ή όταν ρίξουμε ένα παγάκι μέσα σε ένα ποτήρι με ζεστό νερό. Από τα παραδείγματα αυτά, γίνεται αντιληπτό ότι όταν ένα υλικό ή μια κατασκευή φορτίζεται, η ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη στη δομή του υλικού είναι δυνατόν να απελευθερωθεί με τη μορφή ενός μεταβατικού ελαστικού κύματος. Η απελευθέρωση αυτής της ενέργειας πραγματοποιείται, όταν λαμβάνει χώρα ένας μη αντιστρεπτός μηχανισμός στην ατομική δομή του υλικού. Το παραγόμενο κύμα τάσης διαδίδεται μέσα στο υλικό και είναι δυνατόν να ανιχνευτεί στην επιφάνειά του μέσω της χρήσης κατάλληλων αισθητήρων.

Η AE ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου βασίζεται στην ανίχνευση και μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία στη συνέχεια ψηφιοποιούνται και οδηγούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένο σύστημα καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων.

Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών αρχών της ΑΕ

Στην πραγματικότητα, η μέθοδος της ΑΕ είναι ικανή να ανιχνεύσει τη διάδοση ατελειών και την ανάπτυξη μηχανισμών αστοχίας σε πολύ πρώιμο στάδιο, δηλαδή αρκετά πριν η κατασκευή (ή το υλικό) πλησιάζει την τελική φάση αστοχίας. Η απελευθερωνόμενη ενέργεια είναι μέρος της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας μέσα στο υλικό, γεγονός που συνεπάγεται ότι το ίδιο το υλικό παράγει το μετρούμενο σήμα και όχι μια εξωτερική πηγή. Κατά συνέπεια, η επιβολή φορτίου είναι απαραίτητη.

Ο όρος «ακουστική», βέβαια, είναι παραπλανητικός, εφόσον στην πράξη αναφερόμαστε σε τασικά κύματα και τα μετρούμενα σήματα βρίσκονται στην υπερηχητική περιοχή συχνοτήτων και πιο συγκεκριμένα στο εύρος **20** έως **1200 kHz**.

3.2 Σύγκριση της ΑΕ με τις άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου

Η ΑΕ μαζί με άλλες τεχνικές όπως η Ραδιογραφία, τα Δινορεύματα, οι Υπέρηχοι κ.α, ανήκει στις λεγόμενες Μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου, εφόσον δεν προκαλεί κάποια φυσική φθορά στο υλικό κατά

τη διάρκεια της δοκιμής. Παρουσιάζει όμως ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους, που την καθιστούν μοναδική στον τομέα του μη καταστροφικού ελέγχου. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα εξής:

- Οι παλιότερες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου ανιχνεύουν γεωμετρικές ασυνέχειες, διοχετεύοντας κάποια μορφή ενέργειας στην υπό έλεγχο κατασκευή. Η ΑΕ δρα διαφορετικά. Ανιχνεύει τη μικροσκοπική κίνηση των ατελειών καταγράφοντας τα ελαστικά κύματα που δημιουργούνται από τη διάδοση αυτή και όχι τις γεωμετρικές ασυνέχειες. Η διάδοση της ρωγμής, η θραύση των εγκλεισμάτων και οι διαρροές από αγωγούς είναι μερικές από τις δεκάδες διαδικασίες που παράγουν ανιχνεύσιμη εκπομπή, η οποία μπορεί να καταγραφεί με την τεχνολογία των διατάξεων ΑΕ.
- Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μέθοδο της ΑΕ, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους, αποτελεί η φόρτιση της κατασκευής. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές, καθώς επιτρέπει την διεξαγωγή του ελέγχου χωρίς να απαιτείται η διακοπή της λειτουργίας της υπό εξέταση κατασκευής. Επιπλέον, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η εξέλιξη που έχει σε συνεχή χρόνο η βλάβη μέσα στο υλικό και να εκτιμηθεί η κρισιμότητα της συσσωρευμένης βλάβης. Από την άλλη μεριά όμως, το γεγονός ότι είναι απαραίτητη η φόρτιση της υπό έλεγχο κατασκευής δε δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της βλάβης σε κατασκευές εκτός λειτουργίας που συχνά είναι χρήσιμη.
- Το σήμα που ανιχνεύεται στη μέθοδο της Α.Ε παράγεται από το ίδιο το υλικό και όχι από κάποια εξωτερική πηγή, όπως γίνεται στις άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι η αναπτυσσόμενη ατέλεια παράγει κατά τη δημιουργία και διάδοσή της

ακουστική εκπομπή, η οποία ταξιδεύει δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες μέτρα αν το μέγεθος της κατασκευής είναι μεγάλο μέχρι να ανιχνευτεί από τους ειδικούς αισθητήρες. Το σημαντικό είναι ότι με την ΑΕ, όχι μόνο ανιχνεύονται τα παραγόμενα σήματα, αλλά είναι δυνατόν να εντοπιστεί και η περιοχή από την οποία προήλθαν, μέσω υπολογισμών που βασίζονται στη διαφορά των χρόνων αφίξεων στους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες.

➤ Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της ΑΕ σε σχέση με τις άλλες μεθόδους είναι το γεγονός ότι ο εφαρμοζόμενος έλεγχος είναι τέτοιος που επιτρέπει την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας ολόκληρης της κατασκευής μη καταστροφικά και μάλιστα με μόνο μια διαδικασία εφαρμογής φορτίου πάνω σε αυτήν. Δεν είναι, δηλαδή, απαραίτητο να γίνει σάρωση της κατασκευής προκειμένου να ανιχνευθούν τοπικές ατέλειες. Το μόνο που χρειάζεται είναι η τοποθέτηση ικανοποιητικού αριθμού αισθητήρων. Κατά συνέπεια, απαιτείται πρόσβαση μόνο στους αισθητήρες και όχι σε όλες τις περιοχές που ελέγχονται. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε τεράστια οφέλη στην περίπτωση ελέγχου μεγάλων κατασκευών, στις οποίες οι άλλες τεχνικές απαιτούν την απομάκρυνση για παράδειγμα του μονωτικού υλικού ή το άδειασμα του περιεχομένου (περίπτωση δεξαμενών αερίου ή καυσίμων).

➤ Μειονέκτημα της μεθόδου της ΑΕ αποτελεί το γεγονός ότι δεν είναι άμεσα επαναλήψιμη και δεν μπορεί να απεικονίσει τη γεωμετρία της βλάβης, δυνατότητα που παρέχει τόσο η μέθοδος των υπερήχων όσο και η μέθοδος των ακτίνων Χ.

➤ Σημαντικό, επίσης, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι στα σήματα της ακουστικής εκπομπής ο θόρυβος, μηχανικός, ηλεκτρονικός ή οποιασδήποτε άλλης φύσεως, είναι παρών και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστεί και να εξαλειφθεί.

Συμπερασματικά, η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής διαφέρει σημαντικά από τις υπόλοιπες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Έχει μοναδικές δυνατότητες, αλλά και περιορισμούς. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί κατανόηση των αρχών πάνω στις οποίες στηρίζεται (θεωρία διάδοσης και σκέδασης ελαστικών κυμάτων), γνώση του τρόπου χειρισμού του εξοπλισμού και εξοικείωση με τις χρήσιμες παραστάσεις δεδομένων και τις διαδικασίες ερμηνείας των φαινομένων που έχουν προέλθει μετά από πολλά χρόνια έρευνας. Σωστή χρήση της μεθόδου σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές προσφέρει σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης και βελτιώνει την ποιότητα του ελέγχου.

3.3 Φόρτιση κατασκευών – πηγές ΑΕ

Τα σήματα ακουστικής εκπομπής παράγονται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας, η οποία λαμβάνει χώρα όταν στο υλικό ή στην κατασκευή που βρίσκεται υπό φορτίο δημιουργηθεί μία αστοχία στη δομή ή διαδοθεί μία ήδη υπάρχουσα. Οι επιβαλλόμενες τάσεις λοιπόν, αποτελούν το διεγέρτη που παράγει τα σήματα και επιτρέπει να γίνει η διάγνωση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής. Οι υπάρχουσες ατέλειες μέσα στη δομή του υλικού εξελίσσονται υπό φορτίο και παράγουν ελαστικά κύματα.

Οι τάσεις, εξάλλου, είναι το αίτιο που προκαλεί την αστοχία του υλικού ή της κατασκευής. Έτσι, η ΑΕ συνδέεται άμεσα με την αστοχία εφόσον δρα ως διαγνωστικό εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει τις εκπομπές των ατελειών πολύ πριν την αστοχία.

Οι τάσεις που απαιτούνται προκειμένου να παραχθεί ακουστική εκπομπή, μπορούν να αναπτυχθούν με πολλούς τρόπους: με μηχανική φόρτιση, με το εντατικό πεδίο που δημιουργείται από την υπό πίεση

αποθήκευση υγρών ή αερίων, με θερμικά μέσα (θερμικές τάσεις) ακόμα και από το πεδίο ακουστικής διαταραχής που προκαλεί ένα ηχείο.

Συνήθεις πηγές ακουστικής εκπομπής είναι η δημιουργία νέας βλάβης, η διάδοση ρωγμής (προσανατολισμός και ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής), ενώ στην περίπτωση συνθέτων υλικών μηχανισμοί όπως θραύση ινών, αστοχίες της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας, ρηγματώση μήτρας και αποστρωματοποιήσεις αποτελούν τυπικά παραδείγματα αστοχιών που γεννούν ελαστικά κύματα.

Για τη σωστή διεξαγωγή του ελέγχου και για την ορθή εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ΑΕ είναι απαραίτητη η γνώση των παρακάτω πληροφοριών [3]:

Φαινόμενο Kaiser (Kaiser effect)

Έχει βρεθεί ότι όταν επιβληθεί κάποιο φορτίο στην κατασκευή και στη συνέχεια γίνει αποφόρτισή της, το υλικό σε ενδεχόμενη επαναφόρτιση δε δίνει σήματα ΑΕ, μέχρι το φορτίο να ξεπεράσει το προηγούμενο όριο. Το φαινόμενο αυτό ισχύει σχεδόν μέχρι πλήρους αστοχίας σε μεταλλικές κατασκευές, ενώ στην περίπτωση των συνθέτων υλικών με συνεχή ινώδη ενίσχυση το φαινόμενο ισχύει μόνο για μικρές τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου, πριν αρχίσουν να εμφανίζονται αστοχίες μεγάλης κλίμακας στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό καλείται συμπεριφορά τύπου Kaiser από το όνομα του πρωτοπόρου στον τομέα της ακουστικής εκπομπής Γερμανού επιστήμονα που το παρατήρησε πρώτος.

Από τη στιγμή που θα αρχίσει η συσσώρευση βλάβης σε κατασκευές από σύνθετα υλικά και δεδομένης της στάθμης του αρχικού φορτίου P_1 το υλικό θα αρχίσει να εκπέμπει σε μικρότερο φορτίο P_2 ($P_2 < P_1$).

Ο λόγος:

$$FR = \frac{P_2}{P_1}$$

ονομάζεται Felicity Ratio και η τιμή του για κατασκευές απο σύνθετα υλικά είναι υψίστης σπουδαιότητας, εφόσον συνδέεται άμεσα με τη συσσώρευση βλάβης. Όσο μικρότερος της μονάδας είναι ο λόγος αυτός, τόσο μεγαλύτερη είναι η βλάβη στο υλικό. Έτσι, όταν ο λόγος τείνει στο μηδέν, το υλικό είναι πλήρως κατεστραμμένο. Στην πράξη καθιερώνονται όρια της τάξης του 0.9, που σημαίνει ότι από το όριο αυτό και κάτω χρειάζεται επισκευή ή αντικατάσταση του κατασκευαστικού στοιχείου, ανάλογα πάντα με τον τύπο του υλικού, τη φύση της κατασκευής και το περιβάλλον λειτουργίας.

3.4 Βασικές αρχές διάδοσης ελαστικών κυμάτων σε συνεχή μέσα

Το παραγόμενο σήμα ΑΕ κατά τη δημιουργία του είναι θεωρητικά ένας κρουστικός χρονικός παλμός Dirac. Όμως το σήμα που ανιχνεύεται έχει μια πολύπλοκη μορφή που οφείλεται σε διάφορα φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με τη διάδοση του κύματος από την πηγή μέχρι τον αισθητήρα. Σημαντικές παράμετροι της διάδοσης του κύματος για τους σκοπούς της ΑΕ είναι τα διάφορα είδη ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται σε στερεά μέσα με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης, η εξάσθενιση (attenuation), η διασκόρπιση (dispersion), η σκέδαση (scattering) των κυμάτων κατά την αλληλεπίδρασή τους με ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (ανακλάσεις, διαθλάσεις) και οι πολλαπλές διαδρομές. Η γνώση των παραγόντων αυτών είναι πολύ σημαντική για τον αξιόπιστο και βέλτιστο σχεδιασμό του ελέγχου καθώς και για την κατανόηση των κυματομορφών που μετρώνται από το σύστημα ΑΕ

1) Μορφές και ταχύτητα κύματος

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία, καθώς σχετίζεται με τη διαδικασία εντοπισμού της πηγής που προκαλεί την ΑΕ. Υπάρχουν διάφορες μορφές κυμάτων [4-6]: διαμήκη, εγκάρσια, επιφανειακά (Rayleigh waves), κύματα Lamb κ.α., τα οποία ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στο συνεχές μέσο. Τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα είναι τα κλασικά κύματα που μπορούν να διαδοθούν σε άπειρο ελαστικό μέσο (bulk waves).

Τα επιφανειακά (Rayleigh waves) είναι μια ενδιαφέρουσα κατηγορία ελαστικών κυμάτων που δημιουργούνται σε ελεύθερες επιφάνειες λόγω του πεπερασμένου (μη άπειρου) των διαστάσεων του μέσου διάδοσης. Το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος του μέσου διάδοσης και χαρακτηρίζονται από τη μικρή απόσβεση της ενέργειας που μεταφέρουν. Μια ακόμα σημαντική κατηγορία είναι τα κύματα Lamb τα οποία δημιουργούνται σε λεπτές πλάκες όπου το μήκος κύματος της διαταραχής είναι μεγαλύτερο του πάχους της πλάκας. Η ταχύτητα διάδοσής τους είναι συνάρτηση του πάχους της πλάκας και της συχνότητας κυματικής διαταραχής.

Η ύπαρξη ανισοτροπίας σε ένα μέσο επηρεάζει δραστικά τον τρόπο διάδοσης των ελαστικών κυμάτων. Η διάδοση μιας ελαστικής διαταραχής ορίζεται από το διάνυσμα διάδοσης $\tilde{k}$. Στην περίπτωση του άπειρου, ισότροπου, ελαστικού και ομογενούς μέσου διαδίδονται τρία κύματα, ένα διαμήκες, δύο εγκάρσια που ταξιδεύουν στη διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής με πολώσεις 0,90,90 αντίστοιχα. Αντίθετα στην περίπτωση ανισότροπου μέσου -στη γενική περίπτωση που η διεύθυνση διάδοσης δε συμπίπτει με καμία από τις κύριες διευθύνσεις του υλικού- διαδίδονται τρία ανεξάρτητα κύματα. Τα κύματα αυτά δεν τυποποιούνται σε έναν τύπο κύματος αλλά περιέχουν ταυτόχρονα διαμήκεις και εγκάρσιες συνιστώσες. Ο χαρακτηρισμός τους γίνεται

βάση της ταχύτητάς τους με το γρηγορότερο να ονομάζεται QL (quasi-longitudinal), το αμέσως αργότερο QT1 (quasi-transverse) και το αργότερο των τριών QT2 [4-6].

II) Εξασθένιση κύματος

Καθώς το κύμα διαδίδεται, το πλάτος ελαττώνεται. Αυτό σημαίνει ότι θα είναι πιο δύσκολο να ανιχνευθούν πηγές σημάτων ΑΕ σε μεγάλες αποστάσεις από τους αισθητήρες. Οι δυο πιο σημαντικές αιτίες που προκαλούν την ελάττωση του πλάτους της κυματικής διαταραχής είναι:

A) Γεωμετρική απόσβεση που σημαίνει πρακτικά ότι το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την πηγή στις τρεις διαστάσεις και αντιστρόφως ανάλογα με τη ρίζα της απόστασης στις δυο διαστάσεις. Η επίδραση αυτή είναι πιο ισχυρή αναλογικά κοντά στην πηγή.

B) Απόσβεση λόγω του μέσου διάδοσης που συνεπάγεται την εκθετική μείωση του πλάτους με την απόσταση. Ο ρυθμός πτώσης (που για λόγους ευκολίας μετράται σε dB/μέτρο) είναι ιδιότητα του υλικού, σχετίζεται με απώλειες ενέργειας που δημιουργούνται κατά τη διάδοση της κυματικής διαταραχής και γενικά εξαρτάται από τη συχνότητα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η μείωση του πλάτους. Η απόσβεση ισχύει και για το θόρυβο, τον οποίο επιθυμούμε να αποφύγουμε, άρα μπορεί να θεωρηθεί σχετικό πλεονέκτημα σε ορισμένες περιπτώσεις.

Μείωση του πλάτους του κυματικού μπορεί επίσης να προκληθεί και από σειρά φαινομένων που σχετίζονται με τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος όπως για παράδειγμα η απώλεια της ενέργειας του κύματος σε παρακείμενα μέσα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των υγρών όταν διαβρέχουν την υπό έλεγχο κατασκευή.

III) Σκέδαση και πολλαπλές διαδρομές

Τα κύματα αλληλεπιδρούν με δομικές ασυνέχειες του μέσου διάδοσης που μπορούν να είναι δομικές ασυνέχειες ή περιοχές του χώρου με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Στην περίπτωση αυτή η ασυνέχεια αποκόπτει από το κύμα τμήμα της διαδιδόμενης ενέργειας και το ανακατανέμει σε όλες τις διευθύνσεις. Παράλληλα, λόγω του φαινομένου της κυματικής μετατροπής (mode conversion) η φύση/τύπος του διαδιδόμενου κυματικού πεδίου μεταβάλλεται. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα κύμα πίεσης σε ισότροπο ελαστικό μέσο αλληλεπιδράσει με ασυνέχεια του μέσου διάδοσης, μετά την αλληλεπίδραση (σκέδαση του κυματικού πεδίου) δημιουργούνται και διαδίδονται στο ελαστικό μέσο το κύμα πίεσης που υπήρχε αλλά και διατμητικά κύματα που ταξιδεύουν με διαφορετική φασική ταχύτητα. Παράλληλα δημιουργείται κυματική διαταραχή και στο εσωτερικό της ασυνέχειας όπου διαδίδονται όλα τα κύματα που μπορεί να διαδώσει το μέσο που αποτελεί την ασυνέχεια. Υπάρχουν μόνο συγκεκριμένες διευθύνσεις διάδοσης του κύματος όπου όσα περιγράφηκαν εν γένει για την κυματική μετατροπή ανωτέρω, δεν ισχύουν πχ. κάθετη πρόσπτωση στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Το ποσοστό της ενέργειας του προσπίπτοντος κύματος που αποκόπτεται από το σκεδαστή και ανακατανέμεται στο χώρο σε όλους τους τύπους κύματος που μπορούν να διαδοθούν όπως επίσης και η ένταση του φαινομένου της κυματικής μετατροπής εξαρτώνται από τα υλικά και τη γεωμετρία. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι όταν ένα κύμα που ταξιδεύει μέσα σε μέταλλο φθάσει στη διεπιφάνεια/όριο της κατασκευής και εκεί συναντήσει νερό, τότε περίπου –ανάλογα με το υλικό- το 13% της ενέργειας περνάει μέσα στο νερό και το υπόλοιπο 87% ανακλάται πίσω στο μέταλλο. Το ποσοστό της ενέργειας που ανακλάται, εξαρτάται από τη φύση και τη γεωμετρία

της διεπιφάνειας, το μήκος κύματος, πιθανές γεωμετρικές ασυνέχειες κλπ.

Συνήθως υπάρχουν πολλές διαδρομές που συνδέουν την πηγή με τον αισθητήρα. Ένας καλός τρόπος για να γίνει αντιληπτός ο μηχανισμός αυτός, είναι να θεωρηθεί ότι λαμβάνουν χώρα διαδοχικές αφίξεις κυμάτων στον αισθητήρα αναλόγως της διαδρομής που ακολούθησε το καθένα απ' αυτά. Στο σχήμα 3.2 δίνεται μια γραφική εξήγηση της παραπάνω παρατήρησης.

IV) Διασκόρπιση (*dispersion*)

Ως συνάρτηση διασκόρπισης $f(\tilde{k}, \omega) = 0$ ορίζεται η σχέση που συνδέει την κυκλική συχνότητα του κύματος με το διάνυσμα διάδοσης του. Αν $d\omega/dk = \text{σταθ.}$ Τότε το μέσο δεν επιβάλλει διασκόρπιση στα ελαστικά κύματα δηλαδή η ταχύτητα διάδοσης δεν εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος. Αν όμως $d\omega/dk \neq \text{σταθ.}$ Που είναι και το συνηθέστερο στα τεχνικά υλικά τότε το μέσο επιβάλλει διασκόρπιση πράγμα που σημαίνει ότι το κύμα αλλάζει μορφή στο χώρο μετά από οποιοδήποτε χρονικό διάστημα [4-6].

Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων τύπων κύματος που ανιχνεύονται από τον αισθητήρα ΑΕ και αντιστοίχισή τους στα διάφορα τμήματα τυπικού σήματος.

3.5 Σύστημα καταγραφής δεδομένων

Ένα σύστημα AE δεν είναι τίποτα άλλο από μια διάταξη ηλεκτρονικών στοιχείων ικανή να καταγράψει με πολύ μεγάλη ευαισθησία την απελευθερωνόμενη από μικρο-αστοχίες στο υλικό ενέργεια πολύ νωρίτερα, από κρίσιμες για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής καταστάσεις.

Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση τυπικής δομής μετρητικής διατάξεως AE

Η επιλογή του εξοπλισμού γίνεται με σκοπό την επίτευξη ορισμένων βασικών στόχων, όπως την αξιόπιστη αναγνώριση των σημάτων που προέρχονται από πραγματικές αστοχίες του υλικού και τον προσδιορισμό της θέσης της αστοχίας, την απομόνωση του θορύβου και τέλος, το χαρακτηρισμό του τύπου και της κρισιμότητας της βλάβης.

Τα ελαστικά (τασικά) κύματα ανιχνεύονται από ειδικούς, πολύ ευαίσθητους αισθητήρες, οι οποίοι είναι στην πραγματικότητα πιεζοκρύσταλλοι, όπως quartz ή tourmaline ή είναι φτιαγμένοι από κεραμικά υλικά. Ο πλέον κοινός και ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος αισθητήρα είναι ο πιεζοηλεκτρικός. Ένα παράδειγμα της δομής ενός

χαρακτηριστικού πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα παρουσιάζεται στο κατωτέρω σχήμα 3.4 [7].

Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει όταν παραμορφώνεται ένα τμήμα του κρυστάλλου οπότε δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στον κρύσταλλο. Αντίθετα, όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο σε πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, το υλικό θα παραμορφωθεί. Συνεπώς, η εφαρμογή μιας τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος θα παραγάγει ελαστικό κύμα και αντίστροφα όταν τασικό κύμα χτυπήσει τον πιεζοκρύσταλλο τότε αυτός παράγει ηλεκτρικό πεδίο.

Συνήθως στο περίβλημα, το οποίο μονώνει και προστατεύει τον αισθητήρα, περιλαμβάνονται και ηλεκτρονικά στοιχεία καθώς και προενισχυτές για τη μερική ενίσχυση του παραγόμενου σήματος. Η επιλογή του αισθητήρα παίζει ουσιαστικό ρόλο για την επιτυχία του πειράματος, καθώς υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων που εξυπηρετούν ποικίλες ανάγκες. Έτσι, υπάρχουν αισθητήρες περιορισμένου εύρους συχνοτήτων και συνεπώς μεγάλης ευαισθησίας,

αλλά υπάρχουν και αισθητήρες ικανοί να λαμβάνουν σήματα σε μια μεγαλύτερη περιοχή συχνοτήτων, με μικρότερη όμως ευαισθησία.

Για τη βέλτιστη καταγραφή της πληροφορίας που περιέχεται στο ελαστικό κύμα μέσω του αισθητήρα της ΑΕ απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η καλή ακουστική σύζευξη μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του μέσου. Είναι γεγονός ότι τα τασικά κύματα ανακλώνται σε κάθε διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών που εμφανίζουν μεγάλη διαφορά στην ακουστική αντίσταση (που ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας επί την ταχύτητα του κύματος στο μέσο). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να καθαρίζονται οι επιφάνειες πριν την τοποθέτηση των αισθητήρων. Συχνά, για να αποφευχθούν τα προβλήματα σύζευξης, χρησιμοποιείται ένα ειδικό μέσο που εξασφαλίζει καλή μετάδοση του κύματος. Τέτοια μέσα είναι η σιλικόνη, το γράσο, καθώς και διάφορα ειδικά μέσα που χρησιμοποιούνται για βελτίωση της ακουστικής σύζευξης [8].

Για μέγιστη ευαισθησία του συστήματος ΑΕ οι αισθητήρες λειτουργούν συνήθως στη συχνότητα συντονισμού τους. Το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδό του, προενισχύεται κατά 20 έως 60 dB και οδηγείται σε φίλτρο ζώνης συγκεκριμένου εύρους, ώστε να αποκοπούν ανεπιθύμητοι «θόρυβοι». Θα πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή του φίλτρου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επιλογή του αισθητήρα, διότι τα όρια συχνοτήτων του φίλτρου θα πρέπει να συμβαδίζουν με αυτά του αισθητήρα. Στη συνέχεια, το σήμα ενισχύεται επιπλέον και μέσω κατάλληλης κάρτας μετατρέπεται σε ψηφιακό, κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία.

Το τυπικό σύγχρονο σύστημα ΑΕ διαθέτει έναν αριθμό καναλιών στα οποία συνδέεται αντίστοιχος αριθμός αισθητήρων ΑΕ. Σε κάθε κανάλι, το αναλογικό σήμα που προέρχεται από τον αισθητήρα ψηφιοποιείται και καταγράφεται. Υπάρχει η δυνατότητα πλήρους καταγραφής της

κυματομορφής ΑΕ ή ενός αριθμού χαρακτηριστικών παραμέτρων του σήματος. Επίσης το σύστημα είναι σε θέση να παράσχει κάποιες απεικονίσεις των καταγραφόμενων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Συνηθέστερα τα δεδομένα υπόκεινται μετεπεξεργασία μετά το τέλος του πειράματος. Όμως, το βασικό βήμα είναι μια σωστή πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια προετοιμασίας του πειράματος. Η επιλογή του αριθμού και της θέσης των αισθητήρων, οι τιμές της προενίσχυσης και της ενίσχυσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια καταγραφής αξιόπιστης πληροφορίας, απαλλαγμένης από θόρυβο και άλλες διαταραχές.

3.6 Το πρόβλημα του θορύβου

Ένας επιτυχής έλεγχος με τη μέθοδο της ΑΕ βασίζεται στην ικανότητα ανίχνευσης των σημάτων ενδιαφέροντος, τα οποία βρίσκονται πάνω από το επίπεδο του θορύβου. Τα προβλήματα που σχετίζονται με το θόρυβο μπορεί να είναι από αμελητέα μέχρι πολύ σοβαρά, αναλόγως του προβλήματος που θα αντιμετωπιστεί. Σημαντικό στοιχείο για την απαλοιφή του θορύβου είναι η γνώση των πηγών του. Έτσι λοιπόν οι πηγές του θορύβου μπορούν να διακριθούν σε δυο βασικές κατηγορίες [3] :

1) Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται :

- ✓ Ο λευκός θόρυβος κατά την προενίσχυση, ο οποίος καθορίζει την ευαισθησία του συστήματος. Ο τύπος αυτός του θορύβου είναι αναπόφευκτος και με ένα καλό σχεδιασμό του προενισχυτή είναι δυνατό να περιοριστεί στα θεωρητικά όρια.

- ✓ Ο παρασιτικός θόρυβος που δημιουργείται στο σύστημα της ΑΕ από αλληλεπίδραση των διαφόρων εξαρτημάτων του. Με καλό σχεδιασμό είναι εφικτός ο περιορισμός και του τύπου αυτού.
- ✓ Η κακή γείωση του συστήματος μπορεί να προκαλεί επίσης θόρυβο.
- ✓ Θόρυβος παράγεται και από την ηλεκτρομαγνητική επιρροή στοιχείων όπως πρίζες, ραδιοφωνικοί σταθμοί, παρακείμενοι πομποί και δέκτες κ.α.

II) Μηχανικός θόρυβος

Ο μηχανικός θόρυβος προέρχεται από :

- ✓ Το θόρυβο της μηχανής που χρησιμοποιείται για το πείραμα.
- ✓ Το θόρυβο της λειτουργικής εγκατάστασης στο χώρο που πραγματοποιείται ο έλεγχος. Αυτό περιλαμβάνει και την περίπτωση θορύβου που προέρχεται από ένα δοχείο πίεσης ή από το σωλήνα που εξετάζουμε για την ύπαρξη π.χ. διαρροής.
- ✓ Τη ροή ρευστού ή την περιστροφή μιας μηχανής.
- ✓ Τις κάθε είδους τριβές του συστήματος επιβολής του φορτίου.
- ✓ Την ανθρώπινη δραστηριότητα ή τη δράση ζώων στην περιοχή του ελέγχου.

Γενικές τεχνικές για την αποφυγή του θορύβου είναι αυτές που περιγράφονται παρακάτω :

- Κατάλληλη επιλογή της συχνότητας λειτουργίας. Συνήθως χρησιμοποιούμε το εύρος συχνοτήτων 100 έως 300 kHz.
- Χρήση διαφορικών αισθητήρων που πρακτικά αποδείχτηκε ότι έχουν καλύτερη απόδοση.
- Χρήση ειδικών φίλτρων για τις συχνότητες.
- Μείωση της ευαισθησίας του ελέγχου.
- Απαλοιφή του θορύβου στην πηγή.

- ο Εισαγωγή μέσων μόνωσης ή απόσβεσης ανάμεσα στην πηγή του θορύβου και τους αισθητήρες.
- ο Κατάλληλη γείωση του συστήματος.
- ο Έλεγχος των εισερχόμενων σημάτων στο πεδίο του χρόνου.
- ο Έλεγχος του επιβαλλόμενου φορτίου.
- ο Χρήση των λεγόμενων “guard” αισθητήρων κοντά στις αρπάγες της μηχανής επιβολής του φορτίου, ώστε το σήμα που προέρχεται από την περιοχή αυτή να ανιχνεύεται πρώτα απ’ αυτούς.
- ο Χρήση κατάλληλων φίλτρων κατά την καταγραφή ή την ανάλυση των σημάτων, ικανά να απορρίπτουν ή να δέχονται σήματα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.
- ο Απαλοιφή του θορύβου κατά το στάδιο επεξεργασίας των σημάτων με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών

3.7 Καταγραφή των σημάτων ΑΕ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέθοδος της ΑΕ δεν είναι άμεσα επαναλήψιμη. Το γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη της σωστής και αξιόπιστης καταγραφής των δεδομένων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος. Για να επιτευχθεί ο βασικός αυτός στόχος, ουσιαστικό ρόλο παίζει ο καθορισμός της ευαισθησίας του συστήματος, όρος ο οποίος αναφέρεται στην ικανότητά του να ανιχνεύει μικρού εύρους σήματα μέσα στην υπό εξέταση κατασκευή. Εν μέρει αυτό καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και την ευαισθησία τους. Ο κυρίαρχος όμως παράγοντας που επηρεάζει την ευαισθησία του συστήματος είναι η χρήση του λεγόμενου «κατωφλίου» που ορίζει ένα επίπεδο τάσης (σε dB), με το οποίο συγκρίνονται τα ενισχυμένα σήματα ΑΕ. Όταν ένα σήμα έχει εύρος που ξεπερνά την

τάση κατώφλιου, τότε αναγνωρίζεται ως σήμα ΑΕ και καταγράφεται. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή της τάσης αυτής, τόσο μικρότερη είναι η ευαισθησία του συστήματος.

Αντίθετα με ότι θα μπορούσε να φανταστεί κανείς δεν είναι πάντοτε η καλύτερη λύση να επιζητείται η μέγιστη ευαισθησία του συστήματος, διότι ελλοχεύει πάντοτε ο κίνδυνος του θορύβου. Επιπλέον, είναι συνήθως τα μεγαλύτερα και ισχυρότερα σήματα τα οποία είναι τα πιο σημαντικά σε ότι αφορά τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, μια τυπική και συνιστώμενη τιμή για γενική χρήση είναι τα 40 dB.

Όταν ένα σήμα περάσει το όριο που ορίζεται με το κατώφλι, ανοίγει στην ουσία το κύκλωμα το οποίο θα πρέπει να κλείσει μόλις τελειώσει το σήμα και να ανοίξει πάλι αμέσως μόλις ένα καινούργιο σήμα περάσει το κατώφλι. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με διάφορες τεχνικές και λειτουργίες, όπως ο καθορισμός ορισμένων χρονικών παραμέτρων οι οποίες επιτρέπουν στο σύστημα να ανταποκριθεί στην παραπάνω απαίτηση. Τέτοιες χρονικές παράμετροι είναι [9]:

- **Hit Definition Time (HDT)** που ορίζεται ως ο μέγιστος χρόνος διάρκειας ενός σήματος ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων του.
- **Hit Location Time (HLT)** που είναι ο χρόνος που θα πρέπει να αναμένει το σύστημα μέχρι να ξεκινήσει την καινούργια καταγραφή.
- **Peak Definition Time (PDT)** που καθορίζει το μέγιστο χρόνο μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών του σήματος.

Έχει βρεθεί εμπειρικά ότι μια ικανή σχέση ανάμεσα στα παραπάνω τρία μεγέθη που στις περισσότερες των περιπτώσεων δίνει καλά αποτελέσματα είναι η ακόλουθη :

$$\text{HLT} > \text{HDT} > 2 \times \text{PDT}$$

Οι παράμετροι αυτές καθορίζονται από το χρήστη πριν την έναρξη του πειράματος. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται σχηματικά η επίδραση της επιλογής του HDT πάνω στο σήμα ΑΕ.

Η καταγραφή των σημάτων ΑΕ γίνεται με δυο τρόπους: είτε με αποθήκευση ολόκληρου του παλμού είτε με παραμετροποίηση του σήματος. Η πρώτη τεχνική, αν και προσφέρει περισσότερες πληροφορίες, έχει συγκεκριμένα μειονεκτήματα που οφείλονται κυρίως στο μεγάλο αριθμό των σημάτων. Συγκεκριμένα είναι δύσκολη τόσο η καταγραφή τους, αφού απαιτούν μεγάλο αποθηκευτικό χώρο-μνήμη του υπολογιστή, όσο και η ανάλυσή τους. Με τη δεύτερη μέθοδο, το σήμα περιγράφεται από συγκεκριμένες παραμέτρους, οι οποίες για ένα σήμα εκρηκτικού τύπου είναι οι ακόλουθες [3].

Σχήμα 3.5: Επίδραση του HDT πάνω στο σήμα AE

- Ο αριθμός των κορυφών που φτάνουν ή ξεπερνούν το κατώφλι **(Counts)**
- Το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής **(Amplitude)**
- Η ενέργεια του σήματος που ισούται με το εμβαδόν κάτω από το σήμα και δεν έχει σχέση με το φυσικό μέγεθος της ενέργειας **(Energy)**
- Η διάρκεια του σήματος ή ο χρόνος ανάμεσα στην πρώτη και την τελευταία κορυφή **(Duration)**
- Ο χρόνος ανόδου που ορίζεται να είναι ο χρόνος ανάμεσα στην πρώτη κορυφή του σήματος που ξεπερνά το κατώφλι και την κορυφή με το μέγιστο πλάτος **(Rise Time)**
- Ο πραγματικός χρόνος στον οποίο ανιχνεύθηκε το σήμα **(Time)**
- Η μέση συχνότητα του σήματος **(Average Frequency)**
- Παράμετροι όπως το φορτίο, η μετατόπιση κ.α., οι οποίες μπορούν να καταγραφούν τη στιγμή που λαμβάνεται το σήμα.

Σχήμα 3.6: Μερικά από τα βασικά μετρούμενα μεγέθη ενός τυπικού σήματος ΑΕ

3.8 Χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ

Είναι γεγονός ότι τόσο στις βιομηχανικές εφαρμογές, όσο και στον εργαστηριακό έλεγχο της συμπεριφοράς των συνθέτων υλικών, ο χαρακτηρισμός και η αξιολόγηση της πληροφορίας κάθε σήματος ΑΕ με στόχο να συσχετιστεί αυτή η γνώση με μια συγκεκριμένη μορφή αστοχίας, αποτελεί βασική ανάγκη. Το πρόβλημα είναι δύσκολο, σε μεγάλο βαθμό άλυτο και αποτελεί ξεχωριστό πεδίο έρευνας. Η δυσκολία έγκειται τόσο στην πληθώρα των διαφορετικών μορφών αστοχίας στα σύνθετα υλικά και των πολλαπλών πηγών θορύβου, όσο και στην πληθώρα των παραμέτρων που επηρεάζουν τη μορφή του τασικού παλμού, καθώς και την τελική μορφή του καταγεγραμμένου ηλεκτρικού σήματος.

Γενικά, στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μια σειρά μεθόδων χαρακτηρισμού των σημάτων ΑΕ, όπως :

- ✓ **Ανάλυση δραστηριότητας:** Χρησιμοποιείται ο αριθμός γεγονότων, ο συντελεστής Felicity Ratio κ.α.
- ✓ **Ανάλυση Χαρακτηριστικών Παραμέτρων της ΑΕ (Χ.Π.):** Γίνεται ανάλυση των παραμέτρων για το διαχωρισμό των μηχανισμών βλάβης.
- ✓ **Ανάλυση συχνοτικού περιεχομένου:** Μελετάται η απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων.
- ✓ **Ανάλυση κυματομορφών (modal analysis):** Πραγματοποιείται ανάλυση των χαρακτηριστικών κυματικής διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στα στερεά και αξιοποιούνται πληροφορίες σχετικά με την πηγή των συμβάντων ΑΕ, την απόσβεση και τη διασκόρπιση.

Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες ομάδες. Την ομάδα των συμβατικών μεθόδων (conventional AE), όπου πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων με στόχο τη συσχέτιση των Χ.Π. του σήματος με την κάθε μορφή βλάβης και την ομάδα των ποσοτικών μεθόδων (quantitative AE). Στη δεύτερη, επιχειρείται μια μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών κυματικής διάδοσης και μετατροπή των τασικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα με συναρτήσεις μεταφοράς, έχοντας ως στόχο την εύρεση του αρχικού παλμού διέγερσης. Οι ποσοτικές μέθοδοι χαρακτηρισμού των σημάτων ΑΕ, αν και εφαρμόζονται με επιτυχία για το χαρακτηρισμό των ρωγμών σε μέταλλα, δεν εφαρμόζονται σε ινώδη σύνθετα υλικά, λόγω δυσκολιών στον καθορισμό των Συναρτήσεων Μεταφοράς, της ανισοτροπίας και της ανομοιογένειας των υλικών αυτών.

Ο χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ με τις συμβατικές μεθόδους, βασίζεται, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, στο συσχετισμό του πλάτους του σήματος με κάθε μορφή αστοχίας. Στην τεχνική αυτή

καθορίζεται συνήθως ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας για αντιπροσωπευτικά στάδια φόρτισης μέσω της χρήσης άλλων μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου ή με εξέταση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope-SEM) και συσχετίζεται ο μηχανισμός αυτός με την πιο συχνά καταγραφόμενη τιμή πλάτους του σήματος στο αντίστοιχο διάστημα φόρτισης. Ο χαρακτηρισμός όμως των σημάτων ΑΕ με βάση μόνο το πλάτος του σήματος, πέραν της ευκολίας και της απλότητας που παρέχει, έχει μια σειρά από μειονεκτήματα με κυριότερο αυτό της έλλειψης ικανότητας διαχωρισμού διαφορετικών φαινομένων, τα οποία παράγουν σήματα παρόμοιου πλάτους. Για να επιτευχθεί καλύτερος διαχωρισμός με τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιούνται συνήθως επιπλέον παράμετροι όπως η ενέργεια, τα counts και η συνολική διάρκεια του σήματος. Επομένως, γίνεται σαφές ότι προκειμένου να επιτευχθεί αξιόπιστος χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ επιβάλλεται η χρήση περισσότερων παραμέτρων του σήματος και εξελιγμένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων, όπως η τεχνική αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition) που έχει χρησιμοποιηθεί ως πολυπαραμετρική μέθοδος χαρακτηρισμού και η οποία αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

3.9 Ιστορική ανασκόπηση της μεθόδου ΑΕ

Η πιο πρώιμη εφαρμογή της ακουστικής εκπομπής εμφανίστηκε στη σεισμολογία [10] όπου και γεννήθηκε η ιδέα της μεθόδου. Η πρώτη σαφώς τεκμηριωμένη έρευνα για την ακουστική εκπομπή σε δομικά υλικά έγινε από τον Joseph Kaiser το 1950, ο οποίος ερεύνησε την ακουστική δραστηριότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης δειγμάτων πολυκρυσταλλικών μετάλλων, σε επίπεδο φυσικά ακουστών συχνοτήτων. Κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης ο Kaiser

επισήμανε ένα δοκίμιο που είχε προηγουμένως φτάσει σε κάποια συγκεκριμένα επίπεδα φόρτισης δεν απελευθέρωσε σήματα ΑΕ έως ότου το επίπεδο φόρτισης ξεπερνούσε το προηγούμενο μέγιστο φορτίο. Αυτή η επίδραση είναι γνωστή ως φαινόμενο Kaiser όπως προείπαμε και χρησιμοποιείται για να καθορίζεται το προηγούμενο επίπεδο της φόρτισης σε μια μεταλλική δομή. Η πιθανή χρησιμότητα της μεθόδου της ΑΕ για το δομικό έλεγχο κατασκευών αναγνωρίστηκε πολύ σύντομα. Σήμερα, οι εφαρμογές της ΑΕ ποικίλουν και μπορούν να συναντηθούν σε ένα πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής και ειδικότερα για διάγνωση και πρόβλεψη της αστοχίας δομικών τμημάτων ή δεξαμενών κατασκευών της. Επίσης η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο των δομών αντιδραστήρων πυρηνικής ενέργειας για τον εντοπισμό ατελειών και στη συνέχεια την παρακολούθησή τους μέχρι αυτές να γίνουν κρίσιμες για την λειτουργία του αντιδραστήρα. Η μη καταστροφική επιθεώρηση δεξαμενών αποθήκευσης και πιεστικών δοχείων με στόχο την αξιολόγηση του πυθμένα των δεξαμενών και την ανίχνευση πιθανών διαρροών σε αγωγούς και βαλβίδες πετροχημικών εργοστασίων και διυλιστηρίων είναι μια άλλη εξίσου σημαντική και ευρύτατα διαδεδομένη εφαρμογή της μεθόδου της ΑΕ. Λοιπές εφαρμογές σε ερευνητικό κυρίως επίπεδο εντοπίζονται στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας πλήθους δομών και κατασκευών όπως γέφυρες, σιδηροδρομικές γραμμές καθώς επίσης και για τον ποιοτικό έλεγχο της επεξεργασίας και της δοκιμής υλικών σε εργαστηριακό περιβάλλον. Η πρώτη τεκμηριωμένη εφαρμογή ΑΕ εμφανίζεται σε δοκιμή ελέγχου πυραύλων Polaris και αφορά τον έλεγχο των στερεών περιβλημάτων της μηχανής και πραγματοποιήθηκε από τον Green και άλλους το 1964 [11]. Άλλα παραδείγματα της χρήσης της μεθόδου της ΑΕ για το δομικό έλεγχο κατασκευών αφορούν τον έλεγχο της δεξαμενής αντιδραστήρων

από τους Voltava και Jax [12] και την ανίχνευση των τρόπων αστοχίας στις δεξαμενές αποθήκευσης υψηλής πίεσης από τον Le Floch [13]. Η σταθερή βελτίωση των αποτελεσμάτων και τεχνικών αυτών των εφαρμογών έχει οδηγήσει στην τυποποιημένη βιομηχανική εφαρμογή της μεθόδου σε συγκεκριμένες κατασκευές και για συγκεκριμένους στόχους [14-16]. Στον τομέα του ελέγχου διαδικασίας, ο Bentley και άλλοι [17] ήταν από τους πρώτους που εφάρμοσαν τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής για τον έλεγχο των διαδικασιών συγκόλλησης. Μεταξύ των άλλων, διαδικασίες μορφοποίησης υλικών έχουν ελεγχθεί με την τεχνική της ΑΕ από τον Lan και τον Dornfeld [18] και από τον Inaseki [19]. Για την ανίχνευση διαρροών, σημαντική δουλειά έχει γίνει πρόσφατα από τους Cole [20] και Dickey [21]. Μια συγκεντρωτική καταγραφή των διάφορων εφαρμογών της μεθόδου της ΑΕ παρουσιάζεται από τον Spanner [22]. Σημαντικές εφαρμογές ΑΕ έχουν εμφανιστεί και στην έρευνα για την πρόβλεψη και κατανόηση των σεισμικών κυμάτων [23-24] και μια εκτενής αναφορά των εφαρμογών της μεθόδου αυτής στη συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή καθώς και που αυτή μπορεί τελικά να οδηγήσει έχει παρουσιαστεί από τον Niitsuma [25].

Σημαντική ερευνητική προσπάθεια έχει αφιερωθεί όσον αφορά την εφαρμογή της ακουστικής εκπομπής στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των συνθέτων υλικών. Εδώ η προσπάθεια δίνεται στην έρευνα και στον έλεγχο συστημάτων και κατασκευών όχι πραγματικού μεγέθους αλλά σε μικρή κλίμακα, σε επίπεδο πειραματικών δοκιμών. Σε αυτήν την ομάδα υλικών έχουν παρουσιαστεί πολλές εργασίες και έχουν ακολουθηθεί διαφορετικοί τρόποι ανάλυσης και επεξεργασίας των σημάτων ΑΕ έχοντας πάντα ως στόχο και επιδίωξη να προσδιορίσουν και να χαρτογραφήσουν τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας και να τους συνδυάσουν-ταυτοποιήσουν τελικά με

συγκεκριμένους τύπους σημάτων ΑΕ. Εκτενή παρουσίαση πολλών τέτοιων εφαρμογών ΑΕ στα σύνθετα υλικά παρουσιάζεται από τον Hamstad [26-27]. Μια επιλογή εφαρμογών της μεθόδου της ΑΕ στα σύνθετα υλικά παρουσιάζεται στις βιβλιογραφικές αναφορές στο τέλος αυτού του κεφαλαίου [30-52]. Χρήζει ωστόσο, ειδικής αναφοράς και υπογράμμισης το γεγονός ότι η πλειοψηφία αυτών των εργασιών εξετάζει το γενικό προσδιορισμό της μηχανικής κατάστασης και ικανότητας του ερευνούμενου συστήματος υλικών με απλή στατιστική αναφορά στην ποσότητα των καταγεγραμμένων γεγονότων ΑΕ και τις περισσότερες φορές στη διάρκεια απλών δοκιμών. Κάποιες από τις εργασίες αυτές εξετάζουν ανεξάρτητα το φέρον υλικό από τις επιστρώσεις και το αντίθετο. Τελικά όμως, καμία από αυτές δεν ασχολείται ή δεν καταφέρνει να ολοκληρώσει μια λεπτομερή έρευνα, σε συνθήκες φόρτισης κοντά στις πραγματικές, όσον αφορά τον προσδιορισμό των μηχανισμών αστοχίας, τον έλεγχο και την αξιολόγηση του ποσοστού της βλάβης στα συστήματα των υλικών και προφανώς την πιθανή πρόβλεψη της επερχόμενης αστοχίας και της εναπομένουσας διάρκειας ζωής.

3.10 Πειραματικά αποτελέσματα ΑΕ – Μονοπαραμετρική ανάλυση

Τα πειραματικά δοκίμια C/C υπεβλήθησαν σε κυκλική φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση με αυξανόμενο κατά 2 kN κάθε φορά μέγιστο επίπεδο φόρτισης μέχρι τελικής θραύσεως. Οι δοκιμές έγιναν σε υδραυλική μηχανή δοκιμών τύπου Instron 4550 με έλεγχο μετατόπισης (displacement control) και ρυθμό 0.5 mm/min. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγινε συνεχής καταγραφή της δραστηριότητας ΑΕ και ΑΥ. Στον πίνακα 2.1 του κεφ.2 φαίνεται ο πλήρης κατάλογος των δοκιμών

που εξετάστηκαν με την επαναληψιμότητα από άποψη δραστηριότητας AE και AY να κρίνεται ικανοποιητική.

Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες ευρέως φάσματος τύπου pico κατασκευασμένοι από την Physical Acoustics Corporation με φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας στα 100-800 MHz ως πομπός (pulser) κυμάτων ακουστο-υπέρηχου και ως δέκτες τόσο των ακουστο-υπέρηχων όσο και της ακουστικής εκπομπής από το υλικό κατά τη φόρτισή του. Οι διαμέτρου 6 mm αισθητήρες στηρίχθηκαν πάνω στα δοκίμια με τη βοήθεια ελατηριωτών συνδετήρων και τοποθετήθηκαν στην ίδια πλευρά του δοκιμίου σε απόσταση περίπου 50 mm μεταξύ τους. Το σύστημα καταγραφής αποτελείτο από κάρτα καταγραφής 16-bit τύπου PCI-2 (4 κανάλια), προενισχυτές τύπου 2/4/6-AST με προενίσχυση στα 40 db και συχνοτικό φίλτρο 20-1200 kHz όλα κατασκευασμένα από την Physical Acoustics Corporation. Ο ρυθμός δειγματοληψίας των κυματομορφών AY και AE ήταν 5 MHz και το μέγεθος των κυματομορφών (hit length) ορίστηκε στα 4096 σημεία. Το κατώφλι καταγραφής (threshold) για την AE τέθηκε στα 40 dB. Το σχήμα 3.7 απεικονίζει τη γεωμετρία των δοκιμίων με τις θέσεις των αισθητήρων πάνω σε αυτά. Οι παράμετροι καταγραφής PDT, HDT και HLT που αναλύθηκαν παραπάνω ρυθμίστηκαν στις ακόλουθες τιμές:

$$PDT= 50 \mu\text{sec}, HDT= 200 \mu\text{sec}, HLT=800 \mu\text{sec}$$

Για να εξαλειφθεί ο μηχανικός θόρυβος από τη μηχανή (υδραυλικά κλπ) αλλά και η AE από τα σημεία που συγκρατείται το δοκίμιο από τις αρπάγες της μηχανής χρησιμοποιήθηκε χρονικό φίλτρο τύπου front-end. Αποκλείστηκαν έτσι σήματα εκτός του 80% του μήκους (gauge length) του δοκιμίου.

Σχήμα 3.7: Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων και αισθητήρων

Ακολουθούν τα αποτελέσματα σε επίπεδο ΑΕ από τις δοκιμές των υλικών. Πρόκειται για την κλασική, συμβατική, μονοπαραμετρική ανάλυση, προσπάθεια δηλαδή εξαγωγής συμπερασμάτων για τη βλάβη και τους μηχανισμούς αστοχίας του υλικού βασιζόμενοι σε μία κάθε φορά παράμετρο ΑΕ. Για ένα δοκίμιο από κάθε τύπο υλικού που δοκιμάστηκε παρουσιάζουμε 5 διαφορετικά γραφήματα που εν πολλοίς συνοψίζουν την δραστηριότητα ΑΕ κατά τη διάρκεια του πειράματος. Πρόκειται για τα εξής γραφήματα:

1. Πλάτος σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο
2. Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο
3. Συσσωρευμένη ενέργεια σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο
4. Μέγιστη συχνότητα σήματος ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο
5. Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τη μέγιστη συχνότητα σημάτων ΑΕ

Στο υπόβαθρο των παραπάνω γραφημάτων -πλην του 5ου- φαίνεται ποιοτικά και η εναλλαγή του εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου, προσδίδοντας περισσότερο ενδιαφέρον στην παρουσίαση της

δραστηριότητας ΑΕ καθώς καθίσταται δυνατή η συσχέτιση της με τη εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση.

3.11 Υλικό C/C M5

Σχήμα 3.8: Πλάτος σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M5

Στο σχήμα 3.8 βλέπουμε τη διασπορά του πλάτους των σημάτων ΑΕ στον πειραματικό χρόνο. Η συντριπτική πλειοψηφία των κυματομορφών έχει πλάτη έως 80 dB. Στο υπόβαθρο φαίνεται η διαδικασία φόρτισης-αποφόρτισης του δοκιμίου. Εντυπωσιακή είναι η εμφάνιση του Felicity effect καθώς είναι εμφανές ότι σε κάθε κύκλο η ΑΕ ουσιαστικά ξεκινάει από μια συγκεκριμένη τιμή φορτίου και έπειτα. Επισημαίνεται ακόμη η ύπαρξη σημαντικής δραστηριότητας ΑΕ κατά την αποφόρτιση και ιδίως κατά το τέλος της. Οι καταγραφές αυτές αποδίδονται σε φαινόμενα push-in που κυριαρχούν στην τελευταία

φάση της αποφόρτισης. Υπενθυμίζεται ότι τα δοκίμια δεν αποφορτίζονται πλήρως μέχρι μηδενικής μετατόπισης, αλλά μέχρι ένα επίπεδο φορτίου μερικών δεκάδων N και αυτό για να μη μεταπέσουν σε κατάσταση θλίψης.

Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η κατανομή των συμβάντων AE στο χρόνο και φαίνεται η ένταση της δραστηριότητας AE σε κάθε κύκλο. Πολύ έντονη δραστηριότητα παρατηρείται στον 4^ο κύκλο όπου κατά πάσα πιθανότητα ολοκληρώνεται η ρηγμάτωση της μήτρας (matrix cracking saturation) μετά και το χαρακτηριστικό 'γόνατο' του 3^{ου} κύκλου.

Στο σχήμα 3.10 παρατηρούμε την εξέλιξη της συσσωρευμένης ενέργειας των κυματομορφών της AE, με τους αρχικούς κύκλους να κυριαρχούν ενεργειακά αντίθετα απ' ότι θα δούμε στα υλικά M6 και M8 (σχ. 3.14, 3.19) όπου οι τελευταίοι δύο κύκλοι κυριαρχούν.

Σχήμα 3.9: Κατανομή συμβάντων AE ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M5

Σχήμα 3.10: Συσσωρευμένη ενέργεια σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M5

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η κυρίαρχη συχνότητα των συμβάντων ΑΕ ως προς τον στον πειραματικό χρόνο και σε αντιπαραβολή πάντα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο [27,28]. Διακρίνονται δύο περιοχές συχνοτικών φασμάτων μία στα 110-280 kHz και μια δεύτερη στα 370-480 kHz μέσα στις οποίες κατανέμεται πάνω από το 95% των καταγραφών. Το σχήμα 3.12 μας δίνει επιπλέον πληροφόρηση με την κατανομή των μεγίστων συχνοτήτων απ' όπου παρατηρούμε ότι το δεύτερο συχνοτικό φάσμα έχει πολύ περισσότερες καταγραφές ΑΕ. Απουσιάζουν δε παντελώς καταγραφές ΑΕ στο πεδίο 280-370 kHz όπως επίσης και πάνω από 500 kHz. Οι παραπάνω παρατηρήσεις έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον εφόσον οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι ευρέως φάσματος.

Η αντιστοιχία των συχνοτικών φασμάτων σε μηχανισμούς εξέλιξης της βλάβης διατυπώθηκε ως υπόθεση από τους Loutas et al. στην [28,29] και παρουσιάζει ενδιαφέρον.

Σχήμα 3.11: Μέγιστη συχνότητα σήματος ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M5

Σχήμα 3.12: Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τη μέγιστη συχνότητα σημάτων ΑΕ για το C/C M5

3.12 Υλικό C/C M6

Σχήμα 3.13: Πλάτος σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M6

Στο δοκίμιο C/C M6 έχουμε ελάχιστα συμβάντα ΑΕ με πλάτος μεγαλύτερο των 70 dB (σχ. 3.13). Και εδώ παρατηρείται σημαντική δραστηριότητα ΑΕ κατά το τέλος της αποφόρτισης που οφείλεται στο push-in των ανθρακονημάτων. Στο σχήμα 3.14 φαίνεται ξεκάθαρα η έντονη δραστηριότητα στον τελευταίο και προτελευταίο κύκλο φόρτισης γεγονός που προϋδεάζει για την κυριαρχία φαινομένων θραύσης δεσμίδων ινών και φαινόμενα εξόλκευσης συγκριτικά με τη ρηγμάτωση της μήτρας που λαμβάνει χώρα στα αρχικά στάδια φόρτισης. Αντίθετα δηλαδή με το C/C M5 όπου συμβαίνει το αντίθετο, κυριαρχεί δηλαδή η ρηγμάτωση της μήτρας στον 3^ο και 4^ο κύκλο (σχ.3.8-3.10).

Σχήμα 3.14: Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M6

Το σχήμα 3.15 που δείχνει τη συσσώρευση της ενέργειας στο χρόνο πιστοποιεί την παραπάνω παρατήρηση καθώς δείχνει τη σημαντική αύξηση της ενέργειας των συμβάντων ΑΕ στα τελικά στάδια της φόρτισης.

Στα σχήματα 3.16-3.17, στην εξέλιξη και κατανομή δηλαδή των μεγίστων συχνοτήτων, παρατηρούμε διαφοροποιήσεις εν συγκρίσει με το δοκίμιο M5. Εντοπίζονται τέσσερις ομάδες συχνοτικών φασμάτων. Μία στα 120-220 kHz, μία στα 220-240 kHz, μία στα 380-480 kHz και μία στα 510-580 kHz. Η 1^η ομάδα παρατηρούμε ότι δραστηριοποιείται έντονα προς το τέλος με μικρή συνεισφορά στα αρχικά στάδια. Η 2^η ομάδα και μικρότερη εκ των τεσσάρων ομοίως, εμφανίζεται ουσιαστικά στον τελευταίο κύκλο.

Σχήμα 3.15: Συσσωρευμένη ενέργεια σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M6

Σχήμα 3.16: Μέγιστη συχνότητα σήματος ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M6

Η 3^η και με διαφορά η πολυπληθέστερη ομάδα έχει συνεχή παρουσία σε όλη τη διάρκεια του πειράματος ενώ η 4^η σε συγκεκριμένα σημεία και κυρίως στις φορτίσεις. Τέλος υπάρχει και μια πολύ μικρή παρουσία στην στενή περιοχή των 800 kHz.

Σχήμα 3.17: Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τη μέγιστη συχνότητα σημάτων ΑΕ για το C/C M6

3.13 Υλικό C/C M8

Για το δοκίμιο M8 ισχύουν εν γένει οι παρατηρήσεις που έγιναν για το δοκίμιο M6. Η δραστηριότητα AE είναι με διαφορά ογκωδέστερη στον τελευταίο κύκλο (σχ. 3.19) γεγονός που υποδηλώνει και στο υλικό M8 την κυριαρχία φαινομένων θραύσης ινών παρά φαινομένων που σχετίζονται με τη ρηγμάτωση της μήτρας και λαμβάνουν χώρα στα αρχικά στάδια φόρτισης του υλικού. Το ίδιο συμπέρασμα ενισχύεται και από την κατανομή των συμβάντων AE του σχήματος 3.20.

Σχήμα 3.18: Πλάτος σημάτων AE ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M8

Αλλά και η ενέργεια των σημάτων AE (σχ. 3.20) είναι υψηλότερη στους δύο τελευταίους κύκλους φόρτισης και ειδικά στον τελευταίο.

Σχήμα 3.19: Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M8

Σχήμα 3.20: Συσσωρευμένη ενέργεια σημάτων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M8

Σχήμα 3.21: Μέγιστη συχνότητα σήματος ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο για το C/C M8

Σχήμα 3.22: Κατανομή συμβάντων ΑΕ ως προς τη μέγιστη συχνότητα σημάτων ΑΕ για το C/C M8

Όσο για τις ομάδες συχνοτικών φασμάτων παρατηρούμε (σχ.3.21-3.22) τις εξής: 110-230 kHz, 290-315 kHz και 380-480 kHz ενώ μια μικρή ομάδα δραστηριοποιείται στην περιοχή 510-560 kHz. Η συντριπτική πλειοψηφία των κυματομορφών ΑΕ έχει μέγιστη συχνότητα στην περιοχή των 380-480 kHz σε απόλυτη αναλογία με το υλικό Μ6 και το αντίστοιχο σχήμα 3.17. Και στην περίπτωση αυτή η δραστηριότητα της κάθε ομάδας δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος.

3.14 Συμπεράσματα

Από την συμβατική μονοπαραμετρική ανάλυση που παρουσιάστηκε παραπάνω προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα για ότι αφορά τη δυνατότητα της παραπάνω ανάλυσης να αξιολογήσει την εξέλιξη της βλάβης στα σύνθετα υλικά. Κατ' αρχήν δε φαίνεται να χρησιμεύουν σε ποσοτική εκτίμηση της διαδικασίας συσσώρευσης της βλάβης. Ποιοτικά θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι στο υλικό Μ5 μεγάλο μέρος της δραστηριότητας ΑΕ τόσο από άποψη όγκου συμβάντων ΑΕ όσο και ενεργειακά λαμβάνει χώρα στους αρχικούς κύκλους (σχ. 3.8-3.10). Κατά συνέπεια φαινόμενα που σχετίζονται με τη ρηγμάτωση της μήτρας έχουν τον πρώτο λόγο για ότι αφορά τους μηχανισμούς αστοχίας οι οποίοι πάραυτα με την μονοπαραμετρική αυτή ανάλυση είναι αδύνατο να ταυτοποιηθούν και να ξεχωρίσουν. Αντίθετα στα υλικά Μ6 και Μ8 που ελάχιστα φαίνεται να διαφοροποιούνται παρατηρούμε το μεγάλο μέρος της δραστηριότητας ΑΕ να λαμβάνει χώρα στους τελευταίους κύκλους (σχ. 3.13-3.15 και 3.18-3.20) υποδηλώνοντας την κυριαρχία φαινομένων που σχετίζονται με τη θραύση των δεσμίδων ινών κατά κύριο λόγο.

Σε επίπεδο μεγίστων συχνοτήτων των καταγεγραμμένων σημάτων, στο υλικό M5 πέραν του πεδίου 380-480 kHz που φαίνεται να συγκεντρώνει την πλειοψηφία των σημάτων στα υλικά M6 και M8, μια ομάδα σημάτων με κορυφαίες συχνότητες στο πεδίο 260-280 kHz εμφανίζεται με ικανό πλήθος σημάτων ΑΕ. Η συσχέτιση των ομάδων που σχηματίζουν τα σήματα ΑΕ με παραπλήσιες μέγιστες συχνότητες, με τους μηχανισμούς αστοχίας του υλικού, είναι δύσκολη αν περιοριστούμε μόνο στην παραπάνω ανάλυση.

Στην κατεύθυνση της αξιολόγησης της διαφοροποίησης της διαδικασίας συσσώρευσης της βλάβης με τη διαφοροποίηση στην ποιότητα της διεπιφάνειας των υπό εξέταση υλικών, πλέον χρήσιμη είναι η ανωτέρω παρατήρηση της κυριαρχίας φαινομένων ρηγμάτωσης της μήτρας στους αρχικούς κύκλους φόρτισης στο υλικό M5, σε αντίθεση με τα υλικά M6 και M8 που συμπεριφέρονται παρόμοια με τα φαινόμενα αστοχίας των δεσμίδων ινών στα τελευταία στάδια της φόρτισης να κυριαρχούν.

3.15 Βιβλιογραφία

1. **ASTM E 610-82**, 'Standard Definition of Terms Relating to Acoustic Emission'.
2. **Wolters J. & Bardenheier**, *Acoustic Emission Analysis in Plastics*, Kunststoffe 77-9, (Hanser Publishers, 1987), pp. 31-34
3. **Pollock A.A.**, *Acoustic Emission Inspection*, Technical Report TR-103-96-12/89, (Physical Acoustics Corporation, 1989), p. 282
4. **B. A. Auld**, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Volume II, (Robert E. Drieger Publishing Co., Malabar, Florida, 1990) p. 2.
5. **J. Rose**, *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University Press, 1999
6. **K. Graff**, *Wave motion in elastic solids*, Ohio state university press, 1973
7. **McIntosh J.**, *Advances in capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) technologies*, Ph.D. Thesis in Engineering, Warwick University 2002
8. **ASTM E 976-94**, 'Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response'.
9. **AEWIN v. 3.1 manual**, Envirocoustics 2004

- 10. G. Liptai, D. O. Harris, R. B. Engle and C. A. Tatro,** "Acoustic Emission Techniques in Materials Research," *International Journal of Nondestructive Testing*, 3 (1971) pp. 215-275.
- 11. A.T. Green, C. S. Lockman and R. K. Steele,** "Acoustic Verification of Structural Integrity of Polaris Chambers," *Modern Plastics*, 41 (1964) p. 137.
- 12. E. Votava and P. Jax,** "Inspection of Nuclear Reactors by Means of Acoustic Emission During Hydrostatic Test," *Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems*, ASTM STP 697 (1979) pp. 149-164.
- 13. C. Le Floch,** "Acoustic Emission Monitoring of Composite High Pressure Fluid Storage Tanks," *NDT International*, 19 (1986) pp. 259-262.
- 14. T. J. Fowler,** "Acoustic emission testing of chemical process industry vessels", Pres. At AE short course, org. PAC, 1998, paper 11, p28
- 15. P. T. Cole, A. R. Korko,** "On-line testing of pressure vessels and storage tanks using acoustic emission", *Proc. of the 14th World Conf. on NDT*, New Delhi, 1996, pp 1-10
- 16. P. T. Cole,** "MONPAC-condition monitoring for static plant-case histories", *J. of AE*, vol.8, no.3, pp. 31-34
- 17. P. G. Bentley, D. G. Dawson, and D. W. Prine,** "An Evaluation of Acoustic Emission for the Detection of Defects Produced During

Fusion Welding of Mild and Stainless Steels", *NDT International*, 15 (1982) p. 243.

18. M. S. Lan and D. A. J. Dornfeld, "In-Process Tool Fracture Detection, "Journal of Engineering Materials and Technology, 106 (1984) p. 111-118.

19. I. Inaseki, S. Yonetsu, "In-process detection of cutting tool damage by acoustic emission measurement", TR 104-31-10, 1985, pp. 261-268

20. P. T. Cole, M. Hunter, "An acoustic emission technique for detection and quantification of gasthrough-valve leakage to reduce gas losses from process plants", Pres. At 4th Oil Loss Conf. ,1991, paper no.9, p6

21. J. Dickey, J. Dimmick, P. M. Moore, "Acoustic measurement of valve leakage rates", *Materials Evaluation*, 1978, pp. 67-77

22. J. C. Spanner, *Advances in Acoustic Emission*, (Dunhart, USA, 1981).

23. G. Manthei, J. Eisenblatter, T. Spies, "Acoustic emission in rock mechanics studies", *Acoustic Emission Beyond the Millennium*, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp.127-144

24. J. F. Labuz, F. C. S. Carvalho, "Post-failure micromechanisms in shear banding of rock", *Acoustic Emission Beyond the Millennium*, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp. 145-158

- 25. H. Niitsuma**, "Acoustic Emission/Microseismic Technique: review of research in the 20th century and future aspects", Acoustic Emission Beyond the Millennium, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp. 109-126
- 26. M. A. Hamstad**, "A Review: Acoustic Emission, a Tool for Composite-Materials Studies," Experimental Mechanics, 26 (1986) pp. 7-13.
- 27. M. A. Hamstad**, "Thirty years of advances and some remaining challenges in the application of acoustic emission to composite materials", Acoustic Emission Beyond the Millennium, T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama (eds), Elsevier 2000, pp. 77-92
- 28. T.H. Loutas, V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimenez, M. Pharaoh**, "Damage evolution of Glass/Polyester composites using acoustic emission monitoring and advanced signal processing techniques", Composites Science and Technology 66 (2006) 1366-1375
- 29. Ramirez-Jimenez C. et al**, Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event, Composite Science and Technology Vol. 64, (Elsevier Science and Technology, 2004), pp 1819-1827
- 30. Barre S.**, 'On the Use of Acoustic Emission to Investigate Damage Mechanisms in Glass-Fiber-Reinforced Polypropylene', Composite Science and Technology, V. 52, pp. 369-376, 1994.

31. Charewicz A. and Daniel I. M., 'Damage Mechanisms and Accumulation in Graphite/Epoxy Laminates', In Composite Materials: Fatigue and Fracture, ASTM STP 907, Ed. H. T. Hahn, Philadelphia, PA USA, pp. 274-297, 1986.

32. Curtis G. J., 'The Characterization of Failure Mechanisms by Means of Acoustic Emission', Symp. On Acoustic Emission, Imperial College, 1972.

33. Komai K., Minoshima K. and Shibutani T., 'Investigations of the Fracture Mechanism of C/E Composites by AE Signal Analysis', International Journal of JSME, V. 34, 1991 .

34. Mizutani Y., Nagashima K., Takemoto M. and Ono K., 'Fracture Mechanism Characterization of Cross-Ply Carbon-Fiber Composites Using Acoustic Emission Analysis', NDT & E International, V. 33, pp. 101-110, 2000.

35. Pappas Y. Z., Markopoulos Y. P. and Kostopoulos V., 'Failure Mechanism Analysis of 2D Carbon/Carbon Using Acoustic Emission Monitoring', NDT & E International, V. 31, pp. 157-163, 1997.

36. Pappas Y. Z. and Kostopoulos V., 'Toughness Characterization and Acoustic Emission Monitoring of a 2-D Carbon/Carbon Composite', Engineering Fracture Mechanics, V. 68(14), pp. 1557-1573, 2001.

37. Philippidis T. P., Nikolaidis V. N. and Anastassopoulos A. A., 'Damage Characterization of C/C Laminates Using Neural Network Techniques on AE signals', NDT & E International, V. 31 (5), pp. 329-340, 1998

38. Prosser W. H., Jackson K. E., Kellas S., Smith B. T., McKeon J. and Friedman A., 'Advanced Waveform-Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites', *Materials Evaluation*, V. 3, pp. 1 052-1057, 1995.

39. Russell S. S. and Henneke E. G., 'Signature of Acoustic Emission from Graphite/Epoxy Composites', NASA Grant NSG 1 238, Report No. VPI-E-77-22, 1977.

40. Sachse W. and Kim K. Y., 'Quantitative Acoustic Emission and Failure Mechanisms of Composite Materials', *Ultrasonics*, V. 25, pp. 1 95-203, 1 987

41. Vaidya U. K. and Raju P. K., 'Identification of Failure Modes of Carbon-Carbon Composites at Various Processing Stages Using the Acoustic Emission Technique', NCA-V. 1 6/AMD-V.1 72, pp. 1 53-161, 1993.

42. Giordano M. et al, *Analysis of acoustic emission signals resulting from fiber breakage in single fiber composites*, *Polymer composites* Vol. 20 No. 6, (1999)

43. Surgeon M. & Wevers M., *Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates*, *NDT&E international* Vol. 32, (Elsevier Science, 1999)

44. Johnson M. & Gudmunson P., *Experimental and theoretical characterization of acoustic emission transients in composite*

laminates, Composites Science and technology Vol. 61, (Elsevier Science Ltd. 2001)

45. Hughet S. et al, *Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester*, Composite Science and Technology Vol. 62, (Elsevier Science Ltd. 2002)

46. Siron O. & Tsuda H., *Acoustic emission in carbon fibre reinforced composite materials*, Carbon fibre reinforced plastics Vol. 25, (Elsevier Paris 2000)

47. Zhuang X. & Yan X., *Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission*, Composite Science and Technology Vol. 66, (Elsevier Ltd.2005)

48. W. H. Prosser, "Waveform analysis of AE in composites", Proc. Of 6th Int. Symp. On AE from Composite Materials, San Antonio, 1998, pp. 61-70

49. R. W. Neu, I. Roman, "Acoustic emission monitoring of damage in metal-matrix composites subjected to thermomechanical fatigue", Comp. Science and Technology 52, 1994, pp 1-8

50. W. H. Prosser, "Advanced AE techniques on composite materials research", J. of AE, vol.14, no.3-4, 1996, pp 1-11

51. M. R. Bhat, M. A. Majeed, C. R. L. Murthy, "Characterization of fatigue damage in unidirectional GFRP composites through acoustic emission signal analysis", NDT&E Int., vol.27, no.1, 1994, pp27-32

52. P. J. De Groot, P. A. M. Wijnen, R. B. F. Janssen, "Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites", *Comp. Science and Technology* 55, 1995, pp. 405-412

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΕ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκαν τα δεδομένα ΑΕ όπως προέκυψαν από τα πειράματα κυκλικής φόρτισης - αποφόρτισης - επαναφόρτισης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε και εφαρμόζουμε την τεχνική της αναγνώρισης προτύπων χωρίς επίβλεψη στα πειραματικά δεδομένα ΑΕ με στόχο την αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας και την παρακολούθηση της εξέλιξης τους κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

4.2 Περί της αναγνώρισης προτύπων - Γενικές αρχές

Η επιστημονική περιοχή της αναγνώρισης προτύπων έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη και εφαρμογή αλγορίθμων με σκοπό να προσδοθούν, σε κάποιο βαθμό, και στις μηχανές τα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης ευφυΐας - νοημοσύνης. Η αναγνώριση θεωρείται βασική ανθρώπινη λειτουργία, ενώ ένα πρότυπο είναι, για παράδειγμα, η περιγραφή ενός αντικειμένου. Ο βασικός στόχος κάθε προβλήματος αναγνώρισης προτύπων είναι η ταυτοποίηση και ταξινόμηση της πληροφορίας που καταγράφηκε με κάποια μορφή γνώσης. Σε καθημερινή βάση ο άνθρωπος εγκέφαλος πραγματοποιεί αναγνώριση προτύπων. Αναγνωρίζουμε γράμματα, λέξεις, φωτογραφίες, μουσική, εικόνες και τα αντικείμενα γύρω μας. Με απλά λόγια, η αναγνώριση προτύπων μπορεί να οριστεί ως η κατηγοριοποίηση των εισερχόμενων δεδομένων σε ταυτοποιήσιμες “κλάσεις” μέσω της εξαγωγής

σημαντικών χαρακτηριστικών από τα δεδομένα. Μια πρότυπη κλάση καθορίζεται από ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά των στοιχείων που την απαρτίζουν.

Συνεπώς, οι βασικές λειτουργίες ενός συστήματος αναγνώρισης προτύπων είναι να ανιχνεύει και να εξάγει κοινά χαρακτηριστικά από τα πρότυπα, καθώς και να αναγνωρίζει το πρότυπο αυτό σε οποιοδήποτε καινούριο περιβάλλον και να το ταξινομεί σύμφωνα με τις υπάρχουσες πρότυπες κλάσεις. Ανεξάρτητα από το είδος του προβλήματος και τη συγκεκριμένη εφαρμογή η διαδικασία αναγνώρισης προτύπων μπορεί να περιγραφεί από 3 στάδια [1-4]:

- Μέτρηση, καταγραφή και αποθήκευση δεδομένων (data acquisition)
- Αρχική επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων (preprocessing and data analysis)
- Ταξινόμηση και αναγνώριση (classification and recognition)

Ο σχεδιασμός ενός αυτόματου συστήματος αναγνώρισης προτύπων εμπεριέχει διάφορα προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα αφορά την αναπαράσταση των εισερχόμενων δεδομένων που μπορούν να μετρηθούν από τα προς αναγνώριση αντικείμενα. Κάθε μετρούμενη ποσότητα περιγράφει ένα χαρακτηριστικό του προτύπου. Συνηθίζεται οι μετρήσεις αυτές να εισέρχονται στο σύστημα αναγνώρισης με τη μορφή **διανύσματος προτύπων** (pattern vector). Οι συνιστώσες του διανύσματος αυτού είναι τα επιμέρους **χαρακτηριστικά** (descriptors) που περιγράφουν τα προς αναγνώριση φαινόμενα:

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$$

Το δεύτερο πρόβλημα αφορά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών παραμέτρων ταξινόμησης από τα εισερχόμενα δεδομένα, διαδικασία που

περιλαμβάνει την επιλογή των πιο χρήσιμων συνιστωσών και συνεπώς τη μείωση της διάστασης του διανύσματος προτύπων. Τέλος, το τρίτο πρόβλημα αφορά των καθορισμό των βέλτιστων διαδικασιών λήψεως αποφάσεων που απαιτούνται για την ταξινόμηση. Θα πρέπει δηλαδή να χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι ταξινομητές προκειμένου να επιτευχθεί ο διαχωρισμός των δεδομένων σε κλάσεις.

4.3 Ταξινομητές

Η ταξινόμηση αποτελεί θεμελιώδη λειτουργία κατά την εφαρμογή ενός αλγορίθμου αναγνώρισης προτύπων και ο βασικός κανόνας σχεδιασμού της είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος αναγνώρισης. Οι ταξινομητές προτύπων μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες [1-4]: **“Παραμετρικοί”** και **“Μη Παραμετρικοί”**. Οι παραμετρικοί βασίζονται στην εκτίμηση της πυκνότητας πιθανότητας της κάθε κλάσης και η ταξινόμηση γίνεται χρησιμοποιώντας στατιστική θεωρία αποφάσεων. Υποτίθεται ότι οι κατηγορίες των προτύπων περιγράφονται από πολυμεταβλητή κανονική κατανομή (multivariate Gaussian distribution). Οι μη παραμετρικοί δεν απαιτούν υποθέσεις για τον τύπο στατιστικής κατανομής των δεδομένων και είναι δομημένοι με τρόπο που υλοποιούνται εύκολα σε Η/Υ. Ο σχεδιασμός τους απαιτεί προσδιορισμό των παραμέτρων απόφασης, πράγμα που επιτυγχάνεται κατά το στάδιο της εκμάθησης. Στο στάδιο αυτό αντιπροσωπευτικά παραδείγματα από κάθε κλάση παρουσιάζονται στον ταξινομητή με τη μορφή διανυσμάτων προτύπων, με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων απόφασης. Η φάση της διδασκαλίας είναι επαναληπτική και ολοκληρώνεται όταν ο ταξινομητής αναγνωρίσει επιτυχώς όλα τα παραδείγματα. Η μέθοδος ονομάζεται **αναγνώριση προτύπων με επίβλεψη** (supervised pattern recognition).

Όταν, δηλαδή, υπάρχει πλήρης a priori γνώση για τα πρότυπα οι ταξινομητές καθορίζονται με ακρίβεια βάσει αυτής της γνώσης. Στην γενικότερη περίπτωση μη ύπαρξης αυτής της γνώσης, επιλέγονται αρχικά τυχαίοι ταξινομητές και βελτιστοποιούνται μέσω επαναληπτικών διαδικασιών μέχρι να προσεγγίσουν βέλτιστες μορφές. Στην περίπτωση αυτή είναι άγνωστα τόσο ο αριθμός όσο και οι εν γένει ιδιότητες των κλάσεων. Οι τεχνικές ομαδοποίησης (cluster analysis) αποτελούν τον κορμό των αυτοδιδασκόμενων μεθόδων αναγνώρισης προτύπων χωρίς επίβλεψη. Έχουν ως σκοπό την ταξινόμηση N προτύπων σε C -κλάσεις, με τον αριθμό και τα χαρακτηριστικά των κλάσεων να προσδιορίζονται αυτόματα ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνική. Εφόσον ολοκληρωθεί και ελεγχθεί η ποιότητα της ταξινόμησης, βάσει αντικειμενικών κριτηρίων, τα πρότυπα της κάθε κλάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διδασκαλία ενός συμβατικού ταξινομητή.

Η πιο σημαντική προσέγγιση στο πρόβλημα της ταξινόμησης είναι μέσω των συναρτήσεων αποφάσεων (decision functions). Για παράδειγμα έστω $\mathbf{d}(\mathbf{x}) = \mathbf{w}_1\mathbf{x}_1 + \mathbf{w}_2\mathbf{x}_2 + \mathbf{w}_3 = 0$ η εξίσωση της διαχωριστικής ευθείας του σχήματος 4.1.

Σχήμα 4.1: Μια απλή συνάρτηση απόφασης δύο κλάσεων

Είναι προφανές ότι οποιοδήποτε πρότυπο $\mathbf{X}$ της κλάσης ω_1 αντικατασταθεί στην $d(x)$ θα δώσει θετική ποσότητα. Αντίστοιχα η $d(x)$ προκύπτει αρνητική για πρότυπο της κλάσης ω_2 . Για το λόγο αυτό η $d(x)$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνάρτηση απόφασης. Για ένα άγνωστο πρότυπο $\mathbf{X}$ θα λέμε ότι ανήκει στην κλάση ω_1 εάν $d(\mathbf{X}) > 0$ ή στην ω_2 αν $d(\mathbf{X}) < 0$. Οι έννοιες αυτές δεν περιορίζονται σε προβλήματα 2 κλάσεων. Επιπλέον, γενικεύονται ώστε να συμπεριλάβουν μη-γραμμικές υπερεπιφάνειες απόφασης σε πολυδιάστατους ευκλείδειους χώρους.

Στοιχείο διαφοροποίησης των διαφόρων ταξινομητών είναι η επιλογή των κανόνων κατάταξης, οι οποίοι καθορίζουν τη δυνατότητα επίτευξης συγκεκριμένου τύπου διαχωριστικών επιφανειών. Η πιο απλή επιφάνεια απόφασης είναι η γραμμική. Επιπλέον, στις διάφορες τεχνικές αναγνώρισης προτύπων χρησιμοποιούνται και τμηματικά γραμμικές ή μη γραμμικές (πχ. πολυωνυμικές). Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές ταξινόμησης με τις αντίστοιχες διαχωριστικές επιφάνειες που χρησιμοποιούν.

#	Ταξινομητής	Σύμβολο	Διαχωριστική επιφάνεια
1	Πλησιέστερου σημείου	NNC	Κατά τμήματα γραμμική
2	κ-Πλησιέστερων σημείων	κ-NNC	Κατά τμήματα γραμμική
3	κ-Αντιστοιχών πλησιέστερων σημείων	κ-CNN	Κατά τμήματα γραμμική
4	Τροποποιημένος πλησιέστερου σημείου	MNNC	Γενικευμένη κατά τμήματα γραμμική
5	Συναρτήσεων Δυναμικού	PFC	Γενικευμένη μη γραμμική
6	Γραμμικός	LIN	Γραμμική (Υπερεπίπεδο)
7	Πολυωνυμικής επέκτασης	F-M	Πολυωνυμική-Μη γραμμική
8	Bayes Μεταβλητού βήματος διόρθωσης	ICB	Γραμμική
9	Bayes ελαχίστων τετραγώνων	LMB	Γραμμική

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των συνηθέστερων ταξινομητών

Θεωρητική εκτίμηση των αποτελεσμάτων των παραπάνω ταξινομητών δεν είναι εφικτή μέχρι σήμερα. Επιπλέον, οι γεωμετρικές ιδιότητες των προτύπων είναι άγνωστες όταν πρόκειται για πολυδιάστατους χώρους και κατά συνέπεια είναι άγνωστο το απαιτούμενο από την επιφάνεια απόφασης σχήμα. Έτσι, το πρόβλημα της επιλογής ενός ταξινομητή είναι πολύ σημαντικό και ο πειραματισμός απαραίτητος.

4.4 Προεπεξεργασία και επιλογή χαρακτηριστικών

Αδιαστατοποίηση

Οι χαρακτηριστικές συνιστώσες του διανύσματος προτύπων σε πολλές περιπτώσεις αναπαριστούν μετρήσεις διαφορετικού τύπου, με διαφορετικές μονάδες και εύρη τιμών. Αυτό ισοδυναμεί με επιλογή διαφορετικών βαρών για κάθε μεταβλητή με συνέπεια να επηρεάζονται τα αποτελέσματα των ταξινομητών, χωρίς να είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ποσοτικά η συμβολή της κάθε μεταβλητής. Έτσι, είναι προτιμότερο οι χαρακτηριστικές παράμετροι του διανύσματος προτύπων που θα χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση να αδιαστατοποιηθούν. Ορισμένες από τις τεχνικές αδιαστατοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

$$1. \quad x_i^* = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (4.1)$$

$$2. \quad x_i^* = \frac{x_i - \mu_i}{ADev_i} \quad (4.2)$$

$$3. \quad x_i^* = \frac{x_i - \mu_i}{MDev_i} \quad (4.3)$$

$$4. \quad x_i^* = \frac{x_i}{\max |x_i|} \quad (4.4)$$

$$5. \quad x_i^* = x_i - \mu_i \quad (4.5)$$

Το σύμβολο * αναφέρεται στο αδιαστατοποιημένο χαρακτηριστικό, ενώ ο δείκτης i στην i συνιστώσα του διανύσματος προτύπων. Τα σύμβολα μ_i , σ_i , $ADev_i$, $MDev_i$ συμβολίζουν μέση τιμή, τυπική απόκλιση, απόλυτη και μέγιστη τυπική απόκλιση αντίστοιχα. Από τις παραπάνω τεχνικές η (4.1) δίνει μοναδιαία διασπορά, η (4.2) δίνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$, οι (4.3),(4.4) στο διάστημα $[-1,1]$ και η (4.5) δίνει μηδενική μέση τιμή αφαιρώντας το μέσο όρο.

Επιλογή χαρακτηριστικών

Η επιλογή των χαρακτηριστικών παραμέτρων [1-4] από το διάνυσμα προτύπων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η ταξινόμηση γίνεται ως προς αυτές τις παραμέτρους. Θα πρέπει, λοιπόν, να είναι αντιπροσωπευτικές της υπό αναγνώριση φυσικής διεργασίας και στατιστικά ασυσχέτιστες μεταξύ τους, καθώς είναι περιττός πλεονασμός η χρήση δύο στατιστικά εξαρτημένων μεταβλητών και δεν συνεισφέρει στην ταξινόμηση. Ελλείψει *a priori* γνώσης η επιλογή των χαρακτηριστικών παραμέτρων γίνεται κατά κύριο λόγο με βάση τη μήτρα των συντελεστών συσχέτισης των διαφόρων μεταβλητών και τα δένδρογράμματα απλής και πλήρους διασύνδεσης που προκύπτουν από τη μήτρα αυτή. Η μήτρα των συντελεστών συσχέτισης $[R]$, είναι παράγωγο της μήτρας συνδιασποράς (covariance matrix) η οποία ορίζεται ως εξής:

$$C_{ij} = E\{(x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j)\} \quad (4.6)$$

$$\text{και θέτοντας } r_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}, \quad |r_{ij}| \leq 1 \quad (4.7)$$

προκύπτει το μητρώο συσχέτισης R, το οποίο είναι συμμετρικό. Τα βασικά στάδια των ιεραρχικών μεθόδων ομαδοποίησης είναι τα εξής:

1. Αρχικά όλες οι μεταβλητές θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους και ο αλγόριθμος ξεκινάει με d ομάδες μεταβλητών (όπου d η διάσταση του διανύσματος προτύπων).
2. Αναζητείται η μέγιστη τιμή του συντελεστή συσχέτισης r_{pq} , που καθορίζει και τις δύο πιο συσχετισμένες μεταβλητές (όπου p,q οι αντίστοιχες μεταβλητές και έστω $p > q$).
3. Δημιουργείται μια καινούρια ομάδα από την ένωση των μεταβλητών p,q. Η νέα ομάδα ονομάζεται q και η μήτρα συσχέτισης επαναπροσδιορίζεται.
4. Διαγράφονται οι γραμμές και στήλες που αντιστοιχούν στην μεταβλητή p και γίνεται μερική αναδιάταξη γραμμών και στηλών.
5. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2,3,4 μέχρι όλες οι μεταβλητές να ταξινομηθούν στην ίδια ομάδα. Συνεπώς, η διαδικασία επαναλαμβάνεται d-1 φορές και σε κάθε βήμα αποθηκεύονται τα εκάστοτε p,q και r_{pq} για το σχεδιασμό του δενδρογράμματος.

Συμβολίζοντας με S_{tr} το συντελεστή συσχέτισης της νέας ομάδας μεταβλητών p, που προσωρινά ονομάζεται t, και οποιασδήποτε άλλης προϋπάρχουσας ομάδας r, διακρίνουμε τις εξής βασικές τεχνικές ιεραρχικής ομαδοποίησης:

Απλή διασύνδεση (single link): $S_{tr} = \max(S_{pr}, S_{qr})$

Πλήρης διασύνδεση (complete link): $S_{tr} = \min(S_{pr}, S_{qr})$

Η τεχνική απλής διασύνδεσης είναι πιο ευαίσθητη σε χαμηλά επίπεδα συσχέτισης ενώ η τεχνική πλήρους διασύνδεσης έχει μεγαλύτερη ευκρίνεια σε υψηλές τιμές συσχέτισης.

4.5 Ανάλυση διαχωριστότητας (Discriminant Analysis)

Ο ορισμός των ακόλουθων μητρών [1-4] είναι απαραίτητος για την συνέχεια. Έστω C κλάσεις $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_C$ κάθε μία εκ των οποίων έχει $N_1, N_2, \dots, N_C$ πρότυπα. Ορίζονται:

1. Συνολική μήτρα διασποράς (Total scatter matrix S_T)

$$S_T = \sum_{i=1}^C (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T \quad (4.8)$$

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^C N_i m_i \quad (4.9)$$

$$m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^C x_i, \quad i=1,2,\dots,C \quad (4.10)$$

2. Εσωτερική των κλάσεων μήτρα διασποράς (Within class scatter matrix S_w)

Υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους μητρών διασποράς των κλάσεων:

$$S_w = \sum_{i=1}^C S_i \quad (4.11)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - m_i)(x_{ij} - m_i)^T \quad (4.12)$$

3. Μεταξύ κλάσεων μήτρα διασποράς (Between class scatter matrix S_B)

$$S_B = \sum_{i=1}^C N_i (m_i - \mu)(m_i - \mu)^T \quad (4.13)$$

Η συνολική μήτρα διασποράς S_T είναι ισοδύναμη με τη μήτρα συνδιασποράς όλων των προτύπων, ενώ η εσωτερική των κλάσεων μήτρα διασποράς S_w μπορεί να δείξει πόσο συμπαγείς είναι οι κλάσεις. Πολύ συμπαγείς κλάσεις με όλα τους τα σημεία κοντά στο γεωμετρικό κέντρο της κλάσεως, μειώνουν την S_w και αυξάνουν την S_B . Κριτήρια διαχωριστότητας των κλάσεων προκύπτουν συνδυάζοντας τις παραπάνω μήτρες. Τα κριτήρια πρέπει να βελτιστοποιούνται είτε όταν μεγιστοποιείται η S_B , ή όταν ελαχιστοποιείται η S_w . Οι μεταβολές στις μήτρες S_w , S_B λαμβάνονται υπόψιν μετατρέποντας τις μήτρες σε βαθμωτά μεγέθη χρησιμοποιώντας το ίχνος ή την ορίζουσα τους. Προκύπτουν έτσι δύο βασικά κριτήρια:

$$J_1 = \frac{tr S_w}{tr S_T} \quad \text{κριτήριο ίχνους} \quad (4.14)$$

$$J_2 = \frac{\det S_w}{\det S_T} \quad \text{κριτήριο ορίζουσας (Wilk's \lambda)} \quad (4.15)$$

Τα προαναφερθέντα κριτήρια είναι φραγμένα στο διάστημα $[0,1]$ και όσο μικρότερη η τιμή τους, τόσο μεγαλύτερη η διαχωριστική ικανότητα της ομάδας των χαρακτηριστικών παραμέτρων προς ταξινόμηση. Όμως, δεν είναι πάντοτε αμερόληπτα και δεν πρέπει να θεωρούνται ως απόλυτοι δείκτες διαχωριστότητας. Σε επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται και δύο ακόμη κριτήρια (κριτήρια R και τ), τα οποία είναι περισσότερο αξιόπιστα.

4.6 Αναγνώριση προτύπων χωρίς επίβλεψη

Ο Everitt διατύπωσε το πρόβλημα της ομαδοποίησης ως εξής:

"Με δεδομένο ένα δείγμα N αντικειμένων-σημείων, κάθε ένα εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από d μεταβλητές, το πρόβλημα της ομαδοποίησης συνίσταται στη ταξινόμηση των N σημείων σε C κατηγορίες, όπου όμως τόσο ο αριθμός των κατηγοριών, όσο και τα χαρακτηριστικά αυτών πρέπει να προσδιορισθούν από τη μέθοδο ομαδοποίησης."

Οι δύο πιο δημοφιλείς μέθοδοι ομαδοποίησης είναι οι ιεραρχικές και οι επαναληπτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Οι ιεραρχικές μέθοδοι αναλύθηκαν διεξοδικά στην προηγούμενη παράγραφο. Οι επαναληπτικές μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούνται και ευρύτερα, αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση είτε του $\text{tr}S_w$ ή του $\text{det}S_w$. Σε αντίθεση με τις ιεραρχικές μεθόδους, εφαρμόζονται σε μεγάλο αριθμό δεδομένων καθώς απαιτούν αποθήκευση στη μνήμη μόνο των

προτύπων. Οι τεχνικές ελαχιστοποίησης trS_w τείνουν να δημιουργήσουν ομάδες σημείων σφαιρικού σχήματος, ενώ οι τεχνικές ελαχιστοποίησης του $detS_w$ οδηγούν σε πιο γενικευμένα ελλειψοειδή σχήματα χωρίς περιορισμούς. Για το λόγο αυτό, η ελαχιστοποίηση του $detS_w$ θεωρητικά πλεονεκτεί έναντι αυτής του trS_w . Βασική υπόθεση κατά την ελαχιστοποίηση του $detS_w$ είναι ότι όλες οι ομάδες θα έχουν το ίδιο σχήμα, ενώ όταν συναντώνται ομάδες διαφορετικού σχήματος υπάρχει τάση δημιουργίας επιμηκυνμένων ομάδων. Έτσι, όταν πρόκειται για ομάδες διαφορετικού σχήματος η ελαχιστοποίηση του trS_w είναι αποδοτικότερη. Η περίπτωση κλάσεων επιμηκυνσμένων ή ελλειψοειδούς σχήματος μπορεί να προσεγγισθεί με τις μεθόδους βελτιστοποίησης του trS_w από μια αλληλουχία σφαιρικών κλάσεων. Για το λόγο αυτό συχνά ενδείκνυται η αρχική αύξηση του αριθμού των κλάσεων και η εκ των υστέρων χρήση εμπειρικών κανόνων για τη δημιουργία νέων κλάσεων ή τη συνένωση των ήδη υπαρχόντων με στόχο την καλύτερη εκτίμηση του αριθμού των ομάδων-κλάσεων. Επιπρόσθετα, διεξάγονται παραμετρικές μελέτες για την επίτευξη του πιο αντιπροσωπευτικού αριθμού των δεδομένων και την εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού των κλάσεων. Έτσι τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται η ελαχιστοποίηση του trS_w μέσω αλγορίθμων, οι οποίοι εν γένει ακολουθούν τα εξής βήματα:

1. Επιλογή C αρχικών αντιπροσωπευτικών σημείων $z_1, z_2, \dots, z_C$ για κάθε μια από τις αρχικές ομάδες. Τα σημεία αυτά θεωρούνται ως τα γεωμετρικά κέντρα των κλάσεων.
2. Ταξινόμηση όλων των δειγμάτων-σημείων στις αρχικές ομάδες.
3. Επαναπροσδιορισμός των γεωμετρικών κέντρων z_i κάθε ομάδας ω_i με βάση τα αποτελέσματα της φάσης 2.
4. Επανάληψη των βημάτων 2,3 μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

4.7 Αρχικές συνθήκες

Όλες οι τεχνικές βελτιστοποίησης απαιτούν είτε τον εκ των προτέρων καθορισμό των κέντρων των κλάσεων (σημεία εκκίνησης) ή μια αρχική ομαδοποίηση. Η επιλογή C αρχικών σημείων για τα κέντρα των κλάσεων μπορεί να γίνει με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Να χρησιμοποιηθούν τα C πρώτα διαφορετικά μεταξύ τους σημεία.
2. Να επιλεγούν C τυχαία σημεία.
3. Να χρησιμοποιηθεί το γεωμετρικό κέντρο των δεδομένων και C-1 επιπλέον σημεία z_i , των οποίων οι συντεταγμένες ορίζονται από την εξής σχέση:

$$z_{ij} = \mu_j + \operatorname{sgn} \left\{ \sin \left(\frac{2\pi}{2^j} i - \frac{2\pi}{2^{1+i}} \right) \right\} \sigma_j, \quad j=1,2,\dots,d \quad (4.16)$$

όπου μ_j η μέση τιμή του χαρακτηριστικού j και σ_j η τυπική του απόκλιση

4. Με την υπόθεση διάταξης όλων των σημείων από 1 έως N μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα C διανύσματα προτύπων που έχουν αριθμούς: $\frac{N}{C}, \frac{2N}{C}, \dots, \frac{C-1}{C}N, N$.

5. Αν απαιτείται ένα μόνο αρχικό κέντρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πλέον απομακρυσμένο από τον μέσο όρο.

Από τη στιγμή που θα επιλεγούν τα αρχικά σημεία ως κέντρα των κλάσεων η αρχική ταξινόμηση γίνεται με τον ταξινομητή πλησιέστερου σημείου (NNC).

4.8 Αλγόριθμοι

Αλγόριθμος MaxMin Distance

Ο αλγόριθμος μέγιστης-ελάχιστης απόστασης [1-4] είναι ημιεμπειρικός και ιδιαίτερα αποδοτικός στο διαχωρισμό δεδομένων με αρκετά απομακρυσμένα σημεία (outliers). Από τη στιγμή που ένα σημείο θα χαρακτηριστεί ως γεωμετρικό κέντρο κλάσης, διατηρεί τη θέση αυτή μέχρι τη λήξη της διαδικασίας ομαδοποίησης. Δεν επαναπροσδιορίζονται, δηλαδή, επαναληπτικά τα κέντρα των κλάσεων. Η χρησιμότητα του αλγορίθμου έγκειται:

α) στην εύρεση των σημείων εκκίνησης και την αρχική προσέγγιση του αριθμού των κλάσεων ώστε να γίνεται παραπέρα βελτιστοποίηση με άλλους αλγορίθμους και

β) στη χρήση του ως διαδικασία αύξησης του αριθμού των κλάσεων διαχωρίζοντας ήδη υπάρχουσες κλάσεις. Ο αλγόριθμος περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Επιλογή C αρχικών σημείων $z_1, z_2, \dots, z_c$ ως κέντρων των κλάσεων.
2. Υπολογισμός αποστάσεων κάθε σημείου x_i από όλα τα κέντρα των κλάσεων και αποθήκευση της μικρότερης D_{mi} για κάθε σημείο.
3. Εύρεση της μέγιστης από τις μικρότερες αποστάσεις D_{mi} για κάθε σημείο και προσωρινή αποθήκευση του δείκτη i του αντίστοιχου σημείου $D_{Mi} = \max\{D_{mi}\}, \quad i=1,2,\dots,N$

4. Υπολογισμός της μέσης απόστασης $\overline{D_z}$ μεταξύ των κέντρων των κλάσεων $\overline{D_z} = \frac{2}{C(C-1)} \sum_{i=1}^{C-1} \sum_{j=2}^C D_{ij}$ όπου D_{ij} η απόσταση μεταξύ των κέντρων z_i και z_j .
5. Υπολογισμός κατωφλίου απόστασης D_{Thr} για τη δημιουργία νέας κλάσης. Ως κατώφλι ορίζεται το γινόμενο της παραμέτρου $T_m \in (0,1]$ με τη μέση απόσταση μεταξύ των κλάσεων $D_{Thr} = T_m \overline{D_z}$.
6. Εάν $D_{mi} > D_{Thr}$ δημιουργείται νέα ομάδα σημείων με κέντρο το x_i και η διαδικασία πηγαίνει στο βήμα 2.
7. Επαναταξινόμηση των σημείων των κλάσεων με τη χρήση του ταξινομητή NNC και επαναπροσδιορισμός των κέντρων των νέων κλάσεων, υπολογίζοντας τη μέση τιμή της κάθε μιας από αυτές.

Είναι προφανές ότι αυξάνοντας το T_m αυξάνουμε τον αριθμό των κλάσεων και αντίστροφα.

Αλγόριθμος cluster-seeking, ακτινικοί αλγόριθμοι

Πρόκειται για ακτινικό αλγόριθμο αναζήτησης [1-4] και εμπεριέχει τρόπους διαγραφής κλάσεων με πολύ λίγα σημεία χωρίς να αφήνει αταξινόμητα σημεία μετά το τέλος κάθε επαναλήψεως ως προς όλα τα δεδομένα. Η γενική μορφή του έχει ως εξής:

1. Επιλογή αρχικών κέντρων κλάσεων και δημιουργία αρχικού χωρισμού των δεδομένων.
2. Χρήση του αλγόριθμου ακτινικής αναζήτησης είτε μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση ή μέχρι το τέλος K_1 επαναλήψεων.
3. Κατάταξη όλων των σημείων χρησιμοποιώντας ως κέντρα των κλάσεων τα αποτελέσματα του βήματος 2 και τον ταξινομητή

πλησιέστερου σημείου (NNC). Εάν έχουμε σύγκλιση μετά από δύο διαδοχικά περάσματα από το βήμα αυτό ή αν έχει επιτευχθεί το όριο K_2 επαναλήψεων, η διαδικασία οδηγείται στο βήμα 4 αλλιώς πίσω στο βήμα 2.

4. Διαγράφονται οι κλάσεις με λιγότερα από $N_{\min}$ σημεία. Η διαδικασία οδηγείται στο βήμα 2 μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση ή μέχρι το όριο K_3 επαναλήψεων

Ο απλός ακτινικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο βήμα 2 μετά την επιλογή των αρχικών κέντρων των κλάσεων συνεχίζει ως εξής:

1. Επιλογή ενός τυχαίου σημείου x_i από τα πρότυπα.
2. Εύρεση του πλησιέστερου κέντρου z_n στο πρότυπο x_i και έστω D_{mi} η αντίστοιχη απόσταση.
3. Έστω D_{Thr} ένα όριο απόστασης που ορίζεται ως ποσοστό της απόστασης των πιο απομακρυσμένων προτύπων: $D_{Thr} = T_w D_{\max}$. Ορίζοντας την παράμετρο $a \in [0,1]$:
 - Εάν $D_{mi} > D_{Thr}$ τότε αυξάνει ο αριθμός των κλάσεων και το x_i γίνεται το κέντρο της νέας κλάσης.
 - Εάν $D_{mi} < aD_{Thr}$ τότε το x_i κατατάσσεται στην κλάση ω_n .
 - Εάν $aD_{Thr} < D_{mi} < D_{Thr}$ το πρότυπο παραμένει χωρίς ταξινόμηση.
4. Σε περίπτωση που σε αυτήν την επανάληψη έχουμε τροποποίηση της κατάταξης του προτύπου x_i , σε σχέση με την προηγούμενη, γίνεται επαναπροσδιορισμός των κέντρων των εμπλεκόμενων κλάσεων με βάση τις σχέσεις:

Νέα κλάση του **X**:

$$z_{gj} = \frac{z_{gj} N_g + x_j}{N_g + 1} \quad (4.17)$$

Προηγούμενη κλάση του $\mathbf{X}$:
$$z_{lg} = \frac{z_{lg} N_l - x_j}{N_l - 1} \quad (4.18)$$

όπου $j=1,2,\dots,d$

δηλώνει τη διάσταση του χώρου και οι δείκτες g,l συμβολίζουν τη νέα και την προηγούμενη κλάση του $\mathbf{X}_i$ αντίστοιχα, ενώ τα N_g, N_l συμβολίζουν τον αριθμό των προτύπων των αντιστοιχών κλάσεων. Εάν η κλάση l περιείχε μόνο το πρότυπο $\mathbf{X}_i$, η σχέση (4.18) δεν θα μπορούσε να εφαρμοσθεί. Στην περίπτωση αυτή η κλάση απλώς διαγράφεται. Εάν, τέλος, η προηγούμενη κατάταξη είχε αφήσει το πρότυπο $\mathbf{X}_i$ αταξινόμητο, δεν γίνεται εφαρμογή της (4.18).

5. Ο αλγόριθμος επανέρχεται στο βήμα 1 και εξετάζει το επόμενο σημείο. Η διαδικασία συνεχίζεται τουλάχιστον μέχρι να εξετασθούν μια φορά όλα τα δεδομένα ή μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, με την έννοια ότι δεν αλλάζουν τα κέντρα των κλάσεων έπειτα από δύο διαδοχικές επαναλήψεις.

Προφανώς η αύξηση του T_w συνεπάγεται αύξηση του D_{Thr} και, συνεπώς, μείωση του αριθμού των κλάσεων, ενώ η παράμετρος a καθορίζει τη συμπύκνωση των επιμέρους κλάσεων.

Αλγόριθμος k-means

Από τους πλέον διαδεδομένους αλγόριθμους τόσο λόγω της απλότητας αλλά και λόγω της αποτελεσματικότητας του [1-4]. Στόχος του αλγόριθμου είναι η ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος δηλαδή του trS_w . Η λειτουργία του περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Επιλογή C αρχικών σημείων ως κέντρων των κλάσεων και αρχική ταξινόμηση με τον ταξινομητή πλησιέστερης απόστασης (NNC).
2. Επαναπροσδιορισμός των κέντρων των κλάσεων έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το trS_w .
3. Επαναταξινόμηση όλων των προτύπων στα νέα κέντρα με τη χρήση του NNC.
4. Εναλλαγή των βημάτων 2,3 μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση ή μέχρι το όριο των K_1 επαναλήψεων.

Ο αλγόριθμος είναι αρκετά ευαίσθητος στα σημεία εκκίνησης. Απαιτούνται πολλαπλά τρεξίματα από διαφορετικά σημεία με στόχο την ολική βελτιστοποίηση του trS_w καθώς πολλές φορές ο αλγόριθμος 'παγιδεύεται' σε τοπικά ελάχιστα. Ο k-means είναι και ο ακρογωνιαίος λίθος των ακόλουθων δύο αλγορίθμων.

Τροποποιημένος Forgy

Βασίζεται στον k-means και με την προσθήκη εμπειρικών κανόνων αποσκοπεί στην καλύτερη προσέγγιση του αριθμού των κλάσεων. Η λειτουργία του [1-4] περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Επιλογή C αρχικών σημείων και αρχική ταξινόμηση με τον NNC
2. Χρησιμοποίηση του k-means για βελτιστοποίηση της αρχικής διαμόρφωσης. Το όριο K_1 επαναλήψεων χρησιμοποιείται για τις εσωτερικές επαναλήψεις του k-means, αν δεν υπάρξει σύγκλιση.
3. Δημιουργία νέων κλάσεων εάν ικανοποιείται η ακόλουθη

$$\text{συνθήκη: } |D_{mi} - D_{avi}| \leq T_f D_{avi} \quad \text{με} \quad D_{avi} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C D(x_i, z_i) \quad \text{να}$$

είναι η μέση απόσταση μεταξύ του προτύπου $\mathbf{X}_i$ και καθενός από τα υπάρχοντα κέντρα των κλάσεων, ενώ D_{mi} συμβολίζει την απόσταση του $\mathbf{X}_i$ από το πιο κοντινό κέντρο. Η $T_f \in [0,1]$ είναι η παράμετρος ελέγχου δημιουργίας νέων κλάσεων. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται για όλα τα N σημεία του δείγματος.

4. Συνεχείς εναλλαγές των βημάτων 2,3 μέχρι να μην παρατηρείται αλλαγή σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις ή μέχρι την επίτευξη K_2 επαναλήψεων του βήματος 3.
5. Διαγραφή κλάσεων με λιγότερα από N_{min} πρότυπα.
6. Συνέχιση στο βήμα 2, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση ή μέχρι την επίτευξη K_3 επαναλήψεων στο βήμα 5.

Αύξηση του T_f οδηγεί στην αύξηση του αριθμού των κλάσεων ενώ αύξηση του N_{min} οδηγεί στη μείωση του αριθμού των κλάσεων, καθώς όλο και περισσότερες κλάσεις διαγράφονται.

Αλγόριθμος ISODATA

Πρόκειται για έναν από τους πιο γενικούς αλγόριθμους [1-4]. Μπορεί να θεωρηθεί ως γενικευμένη μορφή του τροποποιημένου Forgy καθώς περιέχει διαδικασίες για συνένωση ή διαχωρισμό των κλάσεων. Είναι αρκετά ευέλικτος καθώς περιέχει αρκετές παραμέτρους που καθορίζονται από το χρήστη, όμως για άγνωστα δεδομένα απαιτείται αρκετός πειραματισμός. Ο αλγόριθμος ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Επιλογή αρχικών κέντρων και αρχική ταξινόμηση με τον NNC
2. Χρήση του k-means μέχρι την επίτευξη σύγκλισης ή μέχρι το όριο K_1 επαναλήψεων
3. Διαγραφή κλάσεων με λιγότερα από N_{min} πρότυπα και κατάταξη αυτών στις εναπομένουσες κλάσεις

4. Έστω C ο αριθμός των κλάσεων στη συγκεκριμένη επανάληψη και C_D ο επιθυμητός αριθμός κλάσεων:
- Εάν $C > 2C_D$ τότε επιχειρείται συνένωση ενός ή περισσότερων ζευγών κλάσεων.
 - Εάν $C < C_D/2$ τότε επιχειρείται διαχωρισμός μερικών κλάσεων σε δύο.
 - Εάν $C_D/2 \leq C \leq 2C_D$ τότε συνένωση επιχειρείται στις επαναλήψεις με άρτιο αριθμό και διαχωρισμός σε αυτές με περιττό αριθμό.
5. Η λειτουργία επιστρέφει στο βήμα 2. Ο αλγόριθμος συνεχίζει με διαδοχικές εναλλαγές των βημάτων 2,3,4 και μέχρι να φτάσουμε το όριο των επαναλήψεων. Κατά την τελευταία επανάληψη δεν επιτρέπεται συνένωση.

4.9 Τεκμηρίωση και εγκυρότητα των ομαδοποιήσεων

Από την παραπάνω παρουσίαση των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν είναι σαφές ότι σε ένα πρόβλημα ομαδοποίησης δεν υπάρχει μονοσήμαντη λύση. Κάθε αλγόριθμος μπορεί να δώσει διαφορετικές ομαδοποιήσεις. Ακόμα και με τον ίδιο αλγόριθμο παίρνουμε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με την επιλογή των παραμέτρων του αλγορίθμου. Ο όρος εγκυρότητα ομαδοποίησης (cluster validity) περιγράφει διαδικασίες που προσπαθούν να απαντήσουν ποσοτικά τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Πόσες κλάσεις χαρακτηρίζουν τα δεδομένα;
- Είναι οι ομάδες πραγματικές ή τεχνητές;
- Ποια είναι η καλύτερη ομαδοποίηση;
- Είναι η ταξινόμηση των δεδομένων η βέλτιστη;

Ο πρώτος στόχος της τεκμηρίωσης [1-4] είναι η εκτίμηση του αριθμού των κλάσεων. Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι, παρόλο που μπορεί να αναμένουμε ένα συγκεκριμένο αριθμό κλάσεων για φυσικούς λόγους, τα δεδομένα μας να περιέχουν περισσότερες ή και λιγότερες κλάσεις, καθώς δύο φυσικά φαινόμενα μπορεί να επικαλύπτονται ή ένα φαινόμενο να χαρακτηρίζεται από δύο υποκατηγορίες. Ο δεύτερος στόχος είναι η χρήση μαθηματικών κριτηρίων για ποσοτική σύγκριση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στα αποτελέσματα της ομαδοποίησης. Στην περίπτωση ομαδοποίησης σημάτων Ακουστικής Εκπομπής και όσον αφορά τον πρώτο στόχο, επιδιώκουμε τη δημιουργία κλάσεων με σαφή αντιστοίχιση στα φυσικά φαινόμενα και τις πηγές ακουστικής εκπομπής. Εφόσον όμως αυτές δεν είναι a priori γνωστές, απαιτείται πειραματισμός και παραμετρικές μελέτες και τα κριτήρια εγκυρότητας χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά εργαλεία και όχι ως απόλυτοι δείκτες τεκμηρίωσης των αποτελεσμάτων. Παράμετροι κατά τη χρήση αλγορίθμων για ομαδοποίηση είναι:

1. Το σετ των χαρακτηριστικών παραμέτρων που επιλέγουμε από τις συνιστώσες του διανύσματος προτύπων.
2. Ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών και σημείων εκκίνησης των αλγορίθμων.
3. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται.
4. Οι λειτουργικές παράμετροι των αλγορίθμων.
5. Οι τεχνικές αδιαστατοποίησης.

Στην παρούσα εργασία όλες οι παραπάνω παράμετροι μελετήθηκαν διεξοδικά. Από μια πληθώρα κριτηρίων εγκυρότητας όπως **κριτήρια συμπύκνωσης και εσωτερικής συνάφειας, κριτήρια εξωτερικής απομόνωσης και κριτήρια γενικής προσέγγισης** τα πρώτα ήταν

αυτά που χρησιμοποιήθηκαν πιο πολύ και ιδιαιτέρως τα **κριτήρια R** και **T**.

Το κριτήριο R διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$R_{ij} = \frac{D_i + D_j}{D_{ij}} \text{ και } r_i = \max\{R_{ij}\} \quad \forall i \neq j \quad i, j = 1, 2, \dots, C \quad (4.19)$$

όπου D_i, D_j η μέση απόσταση των σημείων των κλάσεων i, j από τα αντίστοιχα κέντρα των κλάσεων ενώ το D_{ij} δηλώνει την απόσταση μεταξύ των κλάσεων i και j . Με βάση τα παραπάνω το κριτήριο R ορίζεται ως εξής:

$$R = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C r_i \quad (4.20)$$

Το τ κριτήριο που προτάθηκε από τον Του ορίζεται ως εξής:

$$\tau = \frac{\min\{D_{ij}\}}{\max\{D_k\}} \quad i, j, k = 1, 2, \dots, C \quad (4.21)$$

Όσο μεγαλύτερη η διαχωριστότητα των δεδομένων, τόσο μικρότερη η τιμή του R και τόσο μεγαλύτερη η τιμή του τ . Το R κριτήριο είναι μια μέση ένδειξη συμπύκνωσης προς διαχωριστότητα, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις κλάσεις. Το τ κριτήριο αποτελεί μια ακραία εκτίμηση του πιο πάνω λόγου. Οι τιμές των κριτηρίων επηρεάζονται από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους (ΧΠ) και έτσι η σύγκριση ομαδοποιήσεων με διαφορετικές χαρακτηριστικές παραμέτρους δεν συνιστά απόλυτο κριτήριο. Για λόγους σύγκρισης λοιπόν τα κριτήρια R, τ υπολογίζονται σε μια κοινή ομάδα ΧΠ και έτσι λειτουργούν ως απόλυτοι δείκτες.

Άλλα κριτήρια διαχωριστότητας είναι το κριτήριο $\text{tr}S_w$ και τα κριτήρια ίχνους $\text{tr}S_w/\text{tr}S_T$ και του Wilk $\text{det}S_w/\text{det}S_T$. Εμφανίζουν όμως κάποιες ανεπιθύμητες ιδιότητες και γι'αυτό δεν επαρκούν για τεκμηρίωση

εγκυρότητας ομαδοποίησης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι ότι πρόκειται για ισχυρά φθίνουσες συναρτήσεις του αριθμού των κλάσεων λόγω της ύπαρξης του S_w στον αριθμητή. Έτσι η ελαχιστοποίηση τους που είναι και το ζητούμενο οδηγεί σε συνεχώς αυξανόμενο αριθμό κλάσεων.

4.10 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας στα σύνθετα υλικά είναι ένα δύσκολο έργο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης και δομής των υλικών αυτών που οφείλεται σε παράγοντες όπως πολλαπλές φάσεις υλικών, ποικίλες αλληλουχίες στρώσεων, διαφορετικές κατ' όγκο αναλογίες (volume fraction) ινών και διαφορετικές τελικές διεπιφανειακές ιδιότητες. Η αναγνώριση προτύπων είναι μια πολυπαραμετρική μέθοδος που όπως θα αναλύσουμε και παρακάτω πιο διεξοδικά δημιουργεί διανύσματα χαρακτηριστικών παραμέτρων AE και προσπαθεί με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων να τα ομαδοποιήσει στο n -διάστατο χώρο.

Βιβλιογραφικά ο Belchamber και άλλοι [5] το 1985 ήταν από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν τεχνικές αναγνώρισης προτύπων για την ομαδοποίηση δεδομένων AE από σύνθετα και πολυμερή υλικά. Οι Kenji και Ono [6] εφήρμοσαν αναγνώριση προτύπων με επίβλεψη για τον εντοπισμό των μηχανισμών αστοχίας σε σύνθετα υλικά. Από πειραματικά δεδομένα AE επέλεξαν τρία έως τέσσερα σήματα τυπικά των μηχανισμών αστοχίας. Στη συνέχεια εκπαίδευσαν έναν ταξινομήτη k -nearest και κατέταξαν τα υπόλοιπα σήματα τους σε τρεις ή τέσσερις ομάδες. Οι Ono και Kawamoto [7] χρησιμοποίησαν ως χαρακτηριστικές παραμέτρους το πλάτος (amplitude), τη διάρκεια (duration), τον αριθμό

υπερβάσεων (counts) και την ενέργεια (energy) των σημάτων AE και αναγνώρισαν τους βασικούς μηχανισμούς αστοχίας.

Οι Anastassopoulos και Philippidis με σημαντικές εργασίες [8-10] χρησιμοποίησαν συστηματικά τους αλγορίθμους αναγνώρισης προτύπων για την αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας σε σύνθετα υλικά carbon/epoxy και αξιολόγησαν τις ποικίλες ταξινομήσεις χρησιμοποιώντας μαθηματικά κριτήρια. Οι Kostopoulos, Loutas και άλλοι [11-12] συστηματοποίησαν την αυθαίρετη διαδικασία επιλογής των παραμέτρων της εσωτερικής λειτουργίας των αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων χωρίς επίβλεψη και παρουσίασαν μια συνολική μεθοδολογία εργασίας σε οποιοδήποτε σετ πειραματικών δεδομένων AE. Εφήρμοσαν τις μεθοδολογίες τους σε σύνθετα υλικά Al_2O_3/Al_2O_3 [11] και SiC/Glass [12]. Οι Pappas et al. [13-15] χρησιμοποίησε τον αλγόριθμο k-means για να ταυτοποιήσει μηχανισμούς αστοχίας και να χαρακτηρίσει τη δυσθραυστότητα σε 2-D C/C υλικά.

Ο Yamaguchi [16-17] ανέπτυξε ροπές ανώτερης τάξης για την ενέργεια και το πλάτος των σημάτων AE. Οι ροπές αυτές συνδυάστηκαν με τις συμβατικές παραμέτρους AE για να αναγνωρισθούν οι μηχανισμοί αστοχίας. Οι Merienne και Favre [18] παρουσίασαν μια μικρο-μηχανική μελέτη της αστοχίας ενός συνθέτου υλικού μεταλλικής μήτρας. Αναλύθηκαν μοντέλα βλάβης που αφορούσαν τη διεπιφάνεια και τη μήτρα. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της ρηγμάτωσης της μήτρας, της αστοχίας των ινών και του διεπιφανειακού δεσμού σε όρους συμβατικής και ενεργειακής/συχνοτικής ανάλυσης. Τρεις τύποι σημάτων AE εξήχθησαν από τα αποτελέσματα, ένας για κάθε μηχανισμό βλάβης και ανάλογα με το συχνотικό περιεχόμενο των σημάτων.

Άλλες ερευνητικές προσπάθειες που χρησιμοποιούν κυρίως το πλάτος των σημάτων AE παρουσιάζονται στα [19-20]. Στις εργασίες αυτές αναφέρεται ότι η ρηγμάτωση της μήτρας δημιουργεί σήματα χαμηλού

πλάτους ενώ η αστοχία των ινών και της διεπιφάνειας δημιουργεί σήματα υψηλότερου πλάτους. Όμως, υπάρχουν και μελέτες [21-22] που ισχυρίζονται ότι τα πλάτη των σημάτων ΑΕ που προέρχονται από αστοχία της μήτρας είναι υψηλότερα. Μια επιλογή εφαρμογών της μεθόδου της αναγνώρισης προτύπων σε σήματα ΜΚΕ παρουσιάζεται στις βιβλιογραφικές αναφορές στο τέλος αυτού του κεφαλαίου [23-38]. Το βέβαιο είναι ότι η συμβατική μονοπαραμετρική ανάλυση όπως αυτή που έγινε στο κεφάλαιο 3 προσφέρει μεν χρήσιμες πληροφορίες, είναι όμως ακατάλληλη να οδηγήσει σε αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας.

4.11 Διαδικασία εφαρμογής της αναγνώρισης προτύπων σε δεδομένα ΑΕ

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφηκε αναλυτικά η πειραματική διαδικασία των μηχανικών δοκιμών. Στο κεφάλαιο 3 επίσης δόθηκαν λεπτομέρειες για τη διάταξη καταγραφής του συστήματος ΑΕ. Στο σημείο αυτό θα επεξηγηθεί αναλυτικά όλη η μεθοδολογία της εφαρμογής της αναγνώρισης προτύπων σε δεδομένα ΑΕ. Μια σχηματική αναπαράσταση της πρωτότυπης διαδικασίας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 4.2.

Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας εφαρμογής της τεχνικής αναγνώρισης προτύπων για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων AE [Kostopoulos, Loutas et al., ref. 11]

4.12 Προεπεξεργασία δεδομένων AE

Η προεπεξεργασία των δεδομένων AE έχει ιδιαίτερη σημασία και αξία για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Οι κυματομορφές της AE καταγράφονται και από αυτές εξάγονται ένα πλήθος παραμέτρων AE όπως φαίνονται στον πίνακα 4.2. Δημιουργείται έτσι ένα διάνυσμα

προτύπων με το πλήθος αυτών των παραμέτρων. Το διάνυσμα αυτό είναι προφανώς χαρακτηριστικό της κάθε κυματομορφής.

AE Feature	Symbol	Unit
Duration	DUR	μs
Counts	CNT	#
Amplitude	AMP	dB
Counts To Peak	CNP	#
Risetime	RT	μs
Energy	E	pJ
Absolute Energy	ABE	fJ
Signal Strength	SS	pVs
Rise Angle	RAN	deg
Decay Angle	DAN	deg
Average Frequency	AF	kHz
Initiation Frequency	INF	kHz
Reverberation	REVF	kHz
Frequency		
FFT Amplitude	FFTAMP	-
FFT Peak Frequency	FFTPF	kHz

Πίνακας 4.2: Παράμετροι που εξάγονται από τις κυματομορφές AE

Επτά από τις παραπάνω παραμέτρους μετρώνται σε πραγματικό χρόνο από το σύστημα καταγραφής ενώ οι υπόλοιπες υπολογίζονται από αυτές εκ των υστέρων.

Προτού προχωρήσουμε με τη διαδικασία εφαρμογής των αλγορίθμων είναι απαραίτητο να αποφασίσουμε ποιες από το σύνολο των παραμέτρων των διανυσμάτων προτύπων θα χρησιμοποιήσουμε για να βασίσουμε τη διαδικασία της ομαδοποίησης. Αυτό γιατί η χρήση δύο ή περισσότερων παραμέτρων με υψηλό βαθμό συσχέτισης μεταξύ τους δεν συνεισφέρει στη διαδικασία της ομαδοποίησης και επιπλέον καθυστερεί την εφαρμογή των αλγορίθμων. Για να διευκολυνθεί η επιλογή των ασυσχέτιστων παραμέτρων AE χρησιμοποιήθηκε η λεγόμενη ιεραρχική ομαδοποίηση πλήρους σύνδεσης (Complete Link

Hierarchical Clustering) η οποία βασίζεται στη χρήση του μητρώου συσχέτισης των δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία ομάδων με ασυσχέτιστες μεταβλητές. Το δένδρόγραμμα του σχήματος 4.3 παρουσιάζει σχηματικά το επίπεδο συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων ΑΕ. Στην παρούσα εργασία το επίπεδο συσχέτισης διατηρήθηκε σε λιγότερο από 0.65 και αυτό οδήγησε σε έναν αριθμό ομάδων με τις λιγότερο συσχετισμένες παραμέτρους ΑΕ. Από το παράδειγμα του σχήματος 3 προκύπτουν οι εξής ασυσχέτιστες ομάδες παραμέτρων ΑΕ:

- 1) Duration, Amplitude, Counts, Energy, Signal Strength
- 2) Counts To Peak, Risetime
- 3) Absolute Energy
- 4) Average Frequency, Initiation Frequency
- 5) Reverberation Frequency, FFT Peak Frequency
- 6) Rise Angle
- 7) Decay Angle

Σχήμα 4.3: Δένδρόγραμμα των παραμέτρων ΑΕ

Διαλέγοντας μία το πολύ παράμετρο από κάθε ομάδα μπορούν να κατασκευαστούν ένα πλήθος από διανύσματα πρότυπων με ασυσχέτιστες μεταξύ τους παραμέτρους ΑΕ. Έτσι για παράδειγμα ένα τέτοιο διάνυσμα μπορεί να έχει τις εξής χαρακτηριστικές παραμέτρους: [Amplitude, Absolute Energy, Reverberation Frequency, Rise Angle].

Η εμπειρία εκατοντάδων “τρεξιμάτων” των αλγορίθμων μας υπέδειξε τη χρήση διανυσμάτων προτύπων με όχι περισσότερες από 4-5 παραμέτρους ΑΕ πάνω στις οποίες βασίζεται εν τέλει η ομαδοποίηση τους.

Έπειτα λοιπόν από τη μείωση της τάξης των διανυσμάτων προτύπων αποκλείοντας τις υψηλά συσχετισμένες παραμέτρους, το επόμενο βήμα είναι η αδιαστατοποίηση των υπολοίπων παραμέτρων που απαρτίζουν τα διανύσματα προτύπων. Η αδιαστατοποίηση είναι πολύ σημαντική καθώς οι παράμετροι ΑΕ δεν έχουν τις ίδιες μονάδες ούτε τα ίδια πεδία τιμών, γεγονός που τους προσφέρει διαφορετική βαρύτητα. Για να αποφευχθεί λοιπόν μια “προκατειλημένη” (biased) ταξινόμηση των διανυσμάτων προτύπων εφαρμόζεται αδιαστατοποίηση στο πεδίο (0,1) στο σετ των δεδομένων.

Το λογισμικό Noesis Professional v4.1 που προμηθευτήκαμε από την Envirocoustics AEBE μας προσέφερε μια πληθώρα αλγορίθμων για αναγνώριση προτύπων δίχως επίβλεψη όπως οι Maxmin Distance, Cluster Seeking, Forgy, k-means και Isodata. Με την εξαίρεση του αλγορίθμου Cluster Seeking, ενός γενικευμένου αλγορίθμου ακτινικής αναζήτησης, όλοι οι υπόλοιποι είναι γνωστοί στη βιβλιογραφία [1-4,9,11].

Ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών, των αρχικών κέντρων δηλαδή των κλάσεων, είναι κρίσιμος για τη λειτουργία των αλγορίθμων και προϋποθέτει εκκίνηση από συγκεκριμένο αριθμό κλάσεων. Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση [9,11] χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Maxmin

Distance για μια πρωταρχική ταξινόνηση των δεδομένων και τη χρήση εν συνεχεία των κέντρων των κλάσεων που προκύπτουν ως αρχικές συνθήκες για την εφαρμογή ενός εκ των Cluster Seeking, Forgy και Isodata. Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε όλους τους διαθέσιμους αλγορίθμους έτσι ώστε να αξιολογήσουμε την επίδοσή τους στο ίδιο πρόβλημα ταξινόμησης. Συνεπώς τα αλγοριθμικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία ήταν τα εξής:

1. Maxmin Distance - Forgy
2. Maxmin Distance -Cluster Seeking
3. Main Distance - Isodata
4. k-means

Μόνο ο αλγόριθμος k-means χρησιμοποιήθηκε μόνος του καθώς δεν προ-απαιτεί αρχικές συνθήκες αλλά μονάχα τον επιθυμητό αριθμό των κλάσεων.

Ένα πρόβλημα ουσίας στην αναγνώριση προτύπων χωρίς επίβλεψη είναι το γεγονός ότι η εφαρμογή καθενός από τους προαναφερθέντες αλγορίθμους απαιτεί τον προκαθορισμό ενός συνόλου από παραμέτρους οι οποίες ρυθμίζουν την εσωτερική λειτουργία του αλγορίθμου και οι οποίες μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή από ένα συγκεκριμένο ευρύ πεδίο τιμών. Έτσι ο ερευνητής που αποπειράται να κάνει χρήση ενός αλγορίθμου αναγνώρισης προτύπων δεν γνωρίζει ποιες τιμές πρέπει να προσδώσει στις διάφορες παραμέτρους καθώς οι συνδυασμοί των επιλογών είναι ασύμφορα πολλοί. Στον πίνακα 4.3 φαίνονται αναλυτικά οι παράμετροι που πρέπει να προκαθοριστούν για την εφαρμογή του καθενός από τα προτεινόμενα αλγοριθμικά σχήματα.

Αλγοριθμικό σχήμα	παράμετροι	T_m	T_f	T_w	Desired Clusters	Nmin	Radiu s	StDev	Distanc e	Max Lumped Clusters
Maxmin-Forgy	a,b,e	a	b	-	-	e	-	-	-	-
Maxmin-Cluster seeking	a,c,e,f	a	-	c	-	e	f	-	-	-
Maxmin-Isodata	a,d,e,g,h,i	a	-	-	d	e	-	g	h	i

Πίνακας 4.3: Επεξήγηση των παραμέτρων των αλγοριθμικών σχημάτων

Για το λόγο αυτό αποφασίσαμε να μελετήσουμε το πολυπαραμετρικό αυτό πρόβλημα, να εντοπίσουμε τα πεδία τιμών των διαφόρων παραμέτρων και να προτείνουμε μια 'φόρμα εργασίας' με συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους που να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε πρόβλημα αναγνώρισης προτύπων για δεδομένα ΑΕ. Έπειτα λοιπόν από συστηματικές δοκιμές και διεξαγωγή παραμετρικής ανάλυσης, καθορίστηκαν τόσο το πεδίο τιμών καθώς όσο και το ελάχιστο βήμα αύξησης των παραμέτρων. Έτσι δημιουργήθηκε μια 'φόρμα εργασίας' η οποία σε πρώτη φάση περιείχε περί στις 120 εφαρμογές των τεσσάρων διαφορετικών αλγοριθμικών σχημάτων. Στη συνέχεια έπειτα από αρκετό χρόνο εφαρμογής σε πληθώρα δεδομένων ΑΕ η φόρμα εργασίας μειώθηκε περαιτέρω σε περίπου 40 εφαρμογές. Υποσύνολο της φόρμας εργασίας αποτελούν οι πίνακες 4.4-4.12 που συνοψίζουν τα αποτελέσματα της εφαρμογής των αλγοριθμικών σχημάτων στα πειραματικά δεδομένα ΑΕ. Ο χρόνος που απαιτείται για τη συμπλήρωση αυτής της φόρμας είναι περίπου 1,5 ώρα για ένα συγκεκριμένο σετ χαρακτηριστικών παραμέτρων ΑΕ, ανάλογα πάντα με το πλήθος των κυματομορφών του πειράματος και την υπολογιστική ισχύ του υπολογιστή. Η σπουδαιότητα της συγκεκριμένης φόρμας εργασίας είναι

ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σκετ δεδομένων ΑΕ προκειμένου να επιτευχθεί ταξινόμηση των δεδομένων χωρίς επίβλεψη. Μονάχα η παράμετρος N_{min} , που καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό των προτύπων που θα έχει η κάθε κλάση, θα πρέπει να διαφοροποιείται ανάλογα με τον όγκο των δεδομένων, δηλαδή το πλήθος των κυματομορφών ΑΕ.

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης-ομαδοποίησης αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τα λεγόμενα κριτήρια εγκυρότητας κλάσεων. Από μια πληθώρα κριτηρίων στη βιβλιογραφία, επιλέχθηκαν τα κριτήρια **R** και **T** [1-4] καθώς έχουν το πλεονέκτημα της ανεξαρτησίας από τον αριθμό των κλάσεων. Οι τιμές των δύο κριτηρίων δίνουν μια ένδειξη του πόσο συμπαγής και καλά διαχωρισμένες είναι μεταξύ τους οι προκύπτουσες ομάδες (clusters). Χαμηλές τιμές για το R και υψηλές για το T είναι ένδειξη επιτυχούς ταξινόμησης και παραπέμπουν σε σχηματισμό καλά καθορισμένων συμπαγών κλάσεων.

4.13 Αποτελέσματα εφαρμογής των αλγοριθμικών σχημάτων

Έπειτα από την εφαρμογή των αλγοριθμικών σχημάτων τα αποτελέσματα σε επίπεδο προκυπτουσών κλάσεων καθώς και τιμών των κριτηρίων **R** και **T** συνοψίζονται στους πίνακες 4.4-4.12. Να σημειωθεί ότι οι πίνακες αυτοί δεν περιέχουν όλα τα αποτελέσματα από τις 'φόρμες εργασίας' αλλά ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολό τους.

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, RAN, REVF, ABE]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,800,0.3	5	1.14	1.34
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,800,0.3	6	1.31	1.2
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,800,0.4	2	1.24	1.56
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,800,0.4	3	1.08	1.72
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,800,0.4	4	1.1	1.31
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,800,0.4	5	1.15	1.43
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.7,800,0.4	3	1.15	1.4
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.1,0.1,2	6	1.16	1.58
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.2,0.1,2	4	1.09	1.68
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.3,0.3,2	3	1.08	1.56
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.1,0.5,2	4	1.18	1.53
	Maxmin Isodata	0.5,3,800,0.3,0.5,2	2	1.22	1.61
	Maxmin Isodata	0.5,4,800,0.1,0.1,2	5	1.16	1.12
	Maxmin - Forgry	0.3,0.4,800	5	1.19	1.09
	Maxmin - Forgry	0.3,0.5,800	3	1.05	1.13
	K-Means	-	4	1.16	1.20

**Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C
M5 (1^ο σετ Χ.Π.)**

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, RAN, REVF]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,800,0.3	6	1.26	1.19
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,800,0.3	7	1.3	0.82
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,800,0.4	4	1.21	1.19
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,800,0.4	3	1.22	1.32
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.1,0.1,2	6	1.05	1.32
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.2,0.1,2	4	1.17	1.53
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.3,0.1,2	2	1.22	1.6
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.1,0.5,2	3	1.08	1.56
	Maxmin - Isodata	0.5,4,800,0.2,0.1,2	5	1.18	1.41
	Maxmin - Forgry	0.3,0.4,800	3	1.09	1.15
	K-Means	-	4	1.19	1.10

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M5 (2^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, DAN, ABE]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,800,0.3	4	1.1	1.24
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,800,0.4	4	1.05	1.4
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,800,0.4	4	1.26	1.12
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,800,0.4	3	1.21	1.39
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,800,0.4	4	1.32	1.26
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.1,0.1,2	4	0.99	1.39
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.2,0.1,2	4	0.95	1.33
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.3,0.1,2	5	1.03	1.4
	Maxmin - Isodata	0.5,3,800,0.1,0.5,2	3	1.11	1.48
	Maxmin - Forgry	0.4,0.3,800	4	1.02	1.31

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M5 (3^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, RAN, REVF, ABE]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.3	4	1.15	1.06
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,1000,0.3	4	1.40	1.00
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,1000,0.4	4	1.00	0.99
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,1000,0.4	4	1.18	1.23
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,1000,0.4	5	1.23	1.23
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,1000,0.4	3	0.98	1.76
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.1,2	6	1.35	1.18
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.2,0.1,2	6	1.10	1.27
	Maxmin - Forgey	0.1,0.3,1000	5	1.08	1.21
	K-Means	-	4	1.16	1.24

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M6 (1^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, RAN, REVF]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.3	5	1.28	1.04
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,1000,0.3	6	1.30	0.91
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.4	4	1.41	1.18
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,1000,0.4	4	1.27	1.05
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.1,2	6	1.10	1.27
	Maxmin - Isodata	0.5,4,1000,0.1,0.1,2	6	1.35	1.18
	Maxmin - Isodata	0.5,4,1000,0.1,0.3,2	8	1.27	0.93
	Maxmin - Isodata	0.5,4,1000,0.2,0.5,2	3	0.97	1.77
	Maxmin - Forgey	0.1,0.3,1000	4	1.32	1.02
	K-Means	-	4	1.31	1.06

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M6 (2^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, DAN, ABE]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.3	4	1.07	0.89
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,1000,0.3	5	1.19	1.06
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,1000,0.3	6	0.97	1.06
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,1000,0.3	5	1.00	1.22
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.4	3	1.04	1.61
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.7,1000,0.4	4	1.03	1.46
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,1000,0.4	4	1.12	1.3
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.2,0.1,2	5	0.95	1.22
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.3,2	5	1.15	1.16
	Maxmin - Isodata	0.5,4,1000,0.1,0.1,2	6	1.12	0.88
	Maxmin - Forgy	0.4,0.3,1000	4	1.02	1.31
	K-Means	-	4	1.06	1.27

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M6 (3^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, RAN, REVF, ABE]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.3	5	1.37	0.79
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,1000,0.3	4	1.13	0.78
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.4	7	1.22	0.82
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,1000,0.4	4	1.30	1.09
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.9,1000,0.4	3	1.82	1.04
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.1,2	5	1.15	1.10
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.2,0.1,2	3	0.88	1.74
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.5,2	4	1.06	1.38
	Maxmin - Isodata	0.5,4,1000,0.2,0.1,2	4	1.02	1.5
	Maxmin - Forgy	0.4,0.1,1000	4	1.06	1.15
	k-means	-	4	1.08	1.43

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M8 (1^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, RAN, REVF]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.3	4	1.22	1.17
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,1000,0.3	3	1.45	1.05
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.4	4	1.3	0.89
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.4,1000,0.4	4	1.19	0.91
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.5,1000,0.4	3	1.06	1.48
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.1,2	5	1.14	1.11
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.2,0.1,2	4	1.02	1.5
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.3,0.1,2	3	0.87	1.66
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.2,0.5,2	3	0.87	1.75
	Maxmin - Forgey	0.4,0.1,1000	4	1.09	1.43
	K-Means	-	4	1.16	1.32

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M8 (2^ο σετ Χ.Π.)

Set χαρακτηριστικών παραμέτρων (Χ.Π.) ΑΕ	Αλγοριθμικό σχήμα	Παράμετροι	Αριθμός κλάσεων	R	τ
[par1 (φορτίο), Amp, DAN, ABE]	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.3	3	1.24	1.26
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,1000,0.3	4	0.98	0.99
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.3,1000,0.4	4	1.08	1.03
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.6,1000,0.4	4	1.27	0.99
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.7,1000,0.4	4	1.42	1.00
	Maxmin - Cluster Seeking	0.5,0.8,1000,0.4	4	0.99	1.05
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.1,2	4	0.96	0.97
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.2,0.1,2	4	0.99	0.98
	Maxmin - Isodata	0.5,3,1000,0.1,0.3,2	4	1.15	0.97
	Maxmin - Forgey	0.1,0.1,1000	4	1.06	1.01
	K-Means	-	4	1.06	1.27

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα αναγνώρισης προτύπων για το C/C M8 (3^ο σετ Χ.Π.)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, τις τιμές των R και τ κριτηρίων δηλαδή, με επιθυμητές χαμηλές τιμές R και υψηλές για το τ , αλλά και από τη φυσική γνώση του τι αναμένουμε από αυτά τα υλικά ως αριθμό μηχανισμών αστοχίας καταλήγουμε σε πρόβλημα τεσσάρων κλάσεων για τις τρεις περιπτώσεις των υλικών που εξετάστηκαν. Αυτό προέκυψε έπειτα από μελέτη πάρα πολλών διαφορετικών περιπτώσεων και με γνώμονα τις τιμές των δύο κριτηρίων αλλά και τη χρονική εξέλιξη των γεγονότων ΑΕ κάθε κλάσης έτσι ώστε να συμφωνούν με τις θραυστομηχανικές παρατηρήσεις.

Τα αλγοριθμικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία οδήγησαν στο σχηματισμό συμπαγών και καλά διαχωρισμένων κλάσεων στον n -διάστατο χώρο, όπου $n=4$ ή 5 καθώς η διάσταση του διανύσματος προτύπων είναι όσο ο αριθμός των χαρακτηριστικών παραμέτρων πάνω στις οποίες βασίστηκε η ταξινόμηση.

Ενδεικτικά της επιτυχούς ομαδοποίησης και δημιουργίας καλά διαχωρισμένων συμπαγών κλάσεων είναι τα σχήματα 4.4-4.6. Αν και θεωρητικά οι κλάσεις είναι απόλυτα διαχωρισμένες στον n -διάστατο χώρο όπως προείπαμε, εντούτοις κάτι τέτοιο φαίνεται ήδη από τον δισδιάστατο χώρο με τις απεικονίσεις των σχημάτων 4-6 να επιδεικνύουν ικανοποιητικό διαχωρισμό.

Σχήμα 4.4: Αδιάστατο φορτίο (parametric 1) ως προς την αδιάστατη γωνία ανόδου (rise angle) για το υλικό C/C M5

Σχήμα 4.5: Αδιάστατο φορτίο (parametric 1) ως προς την αδιάστατη γωνία ανόδου (rise angle) για το υλικό C/C M6

Σχήμα 4.6: Αδιάστατο φορτίο (parametric 1) ως προς την αδιάστατη γωνία καθόδου (decay angle) για το υλικό C/C M8

Από την παραμετρική ανάλυση τα αποτελέσματα της οποίας συνοψίζονται στους πίνακες 4.4-4.12, τις τιμές των κριτηρίων **R** και **T** και τη φυσική ερμηνεία για ό,τι αφορά τους αναμενόμενους μηχανισμούς αστοχίας σε αυτά τα υλικά καταλήγουμε σε πρόβλημα τεσσάρων κλάσεων για όλους τους τύπους υλικών που εξετάστηκαν και αναλύθηκαν. Οι ταξινομήσεις που τελικά επιλέχτηκαν φαίνονται στους πίνακες 4.4, 4.7, 4.12 με ιδιαίτερη 'σκίαση'.

4.14 Αναγνώριση μηχανισμών αστοχίας

Η ανάλυση που προηγήθηκε κατέληξε σε πρόβλημα τεσσάρων κλάσεων για τους τρεις τύπους υλικών που εξετάζουμε. Ακολουθεί το πλέον δύσκολο κομμάτι της αναγνώρισης των μηχανισμών αστοχίας [9,11] και της αντιστοίχισής τους με τις προκύπτουσες κλάσεις. Στόχος φυσικά

είναι η κατανόηση της διαδικασίας συσσώρευσης και εξέλιξης της βλάβης στα υπό εξέταση σύνθετα υλικά.

Πρωτίστως, είναι εξαιρετικά ουσιώδης η εφαρμογή του αλγοριθμικού σχήματος αναγνώρισης προτύπων να οδηγεί σε συμπαγείς και καλά διαχωρισμένες κλάσεις. Αυτό ελέγχεται -και στη συγκεκριμένη εργασία επιτυγχάνεται- από τις ικανοποιητικές τιμές των κριτηρίων **R** και **T** όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (βλ. πίνακες 4.4-4.12) καθώς επίσης και από τα σχήματα 4.4-4.6. Εφόσον λοιπόν η ομαδοποίηση επιτελέστηκε με επιτυχία συνεχίζουμε προς την αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας υποθέτοντας ότι κάθε μηχανισμός αστοχίας περιγράφεται και αντιστοιχίζεται σε μία μοναδική κλάση.

Για κάθε τύπο δοκιμίου σχεδιάζονται δύο πολύ σημαντικά για το έργο της αναγνώρισης γραφήματα:

1. Συσσωρευμένος αριθμός συμβάντων ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο
2. Συσσωρευμένη ενέργεια ΑΕ ως προς τον πειραματικό χρόνο και το επιβαλλόμενο φορτίο

Τα γραφήματα αυτά της εξέλιξης των κλάσεων στη διάρκεια της μηχανικής δοκιμής συνεισφέρουν σημαντικά και ουσιαστικά στην αναγνώριση των μηχανισμών αστοχίας - συσσώρευσης βλάβης. Να σημειωθεί ότι παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός αντιπροσωπευτικού δοκιμίου από κάθε ένα εκ των τριών υλικών.

4.15 Υλικό C/C M5

Στα σχήματα 4.7 και 4.8 εικονίζεται η εξέλιξη των κλάσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων στα πειραματικά δεδομένα ΑΕ από το υλικό C/C M5 σε επίπεδα συσσωρευμένου αριθμού συμβάντων ΑΕ και συσσωρευμένης ενέργειας των συμβάντων ΑΕ.

Σχήμα 4.7: Χρονική εξέλιξη των κλάσεων για το υλικό C/C M5

Η κλάση 1 όπως φαίνεται είναι κυρίαρχη στους πρώτους κύκλους της φόρτισης και ιδιαιτέρως στον 3^ο και 4^ο τόσο από άποψη αριθμού συμβάντων ΑΕ όσο και ενεργειακά. Αν κρίνουμε από το γεγονός ότι η δραστηριότητα ΑΕ στους δύο πρώτους κύκλους είναι μικρή τότε συμπεραίνουμε ότι η κλάση 1 αφορά κατά βάση γεγονότα ΑΕ προερχόμενα από την εκτενή ρηγμάτωση της μήτρας που λαμβάνει χώρα στα αρχικά στάδια της φόρτισης.

Η κλάση 4 αντιθέτως κυριαρχεί στα τελευταία στάδια της φόρτισης και ειδικά στον τελευταίο κύκλο φόρτισης όπου στην ουσία μονοπωλεί τη δραστηριότητα ΑΕ αριθμητικά και ενεργειακά. Συνεπώς αντιστοιχίζεται στην αστοχία μεμονωμένων ινών και δεσμίδων ινών που λαμβάνει χώρα προς το τέλος της ζωής του δοκιμίου.

Η κλάση 3 είναι αυτή με τη χαμηλότερη ενέργεια και ενεργοποιείται κατά κύριο λόγο κατά την αποφόρτιση. Περιλαμβάνει λοιπόν τα φαινόμενα rush-in των ινών καθώς και κάποια περιορισμένου αριθμού αρχικά συμβάντα ΑΕ κατά την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου.

Σχήμα 4.8: Συσσωρευμένη ενέργεια των κλάσεων για το υλικό C/C M5

Τέλος η κλάση 2 -παρούσα από το χρονικό σημείο των 250 sec περίπου και έπειτα- αποδίδεται σε διεπιφανειακά φαινόμενα ξεκινώντας από την αστοχία του διεπιφανειακού δεσμού και ακολουθεί η τριβή και η εξόλκευση των αστοχούντων ινών. Ενισχυτικό του συμπεράσματος αυτού είναι η παράλληλη εξέλιξη της κλάσης 2 τόσο κατά τη διάρκεια

της εκτεταμένης ρηγμάτωσης της μήτρας (κλάση 1) όσο και κατά την απλή και πολλαπλή αστοχία της ενισχυτικής φάσης (κλάση 4).

Συνοψίζοντας λοιπόν την εξέλιξη της βλάβης στο δοκίμιο M5 θα λέγαμε ότι αυτή ξεκινάει με την πολλαπλή ρηγμάτωση της μήτρας (κλάση 1) και κυριαρχεί από την έναρξη της φόρτισης μέχρι τα $\frac{3}{4}$ της ζωής του δοκιμίου (περίπου μέχρι τα 1000 sec) κατέχοντας το 40.7% των καταγραφών ΑΕ καθ' όλη τη διάρκεια της μηχανικής δοκιμής. Έπειτα σταματά καθώς η ρηγμάτωση της μήτρας έχει φτάσει σε σημείο κορεσμού. Η κλάση 2 (26.8% των συμβάντων ΑΕ) κάνει αισθητή την παρουσία της στο χρονικό σημείο που η ρηγμάτωση της μήτρας δίνει εντατική δραστηριότητα ΑΕ και συνεχίζει την εξέλιξή της και στα τελευταία στάδια όπου η κλάση 4 (θραύση ινών) κυριαρχεί. Αυτό είναι λογικό καθώς τα διεπιφανειακά φαινόμενα που δίνουν τα γεγονότα ΑΕ του πληθυσμού της κλάσης 2 είναι αλληλένδετα τόσο με την αστοχία της μήτρας όσο και των ινών.

Η κλάση 3 (12.7% των συμβάντων ΑΕ) αρχίζει με λιγοστά συμβάντα ΑΕ κατά την ελαστική φόρτιση του υλικού και κατ' ουσίαν εξελίσσεται κατά τις αποφορτίσεις αντιστοιχιζόμενη κατά συνέπεια σε φαινόμενα push-in των ανθρακονημάτων. Τέλος η θραύση των ινών μονοπωλεί την ΑΕ στα τελευταία στάδια της φόρτισης (κλάση 4: 19.7% των συμβάντων ΑΕ).

Συμπερασματικά, η αντιστοιχία μηχανισμών συσσώρευσης-εξέλιξης της βλάβης και προκυπτουσών κλάσεων πειραματικών δεδομένων ΑΕ από το δοκίμιο M5 έχει ως εξής:

Κλάση 1 → ρηγμάτωση της μήτρας

Κλάση 2 → διεπιφανειακά φαινόμενα (αστοχία διεπιφάνειας – εξόλκευση)

Κλάση 3 → push-in ινών

Κλάση 4 → αστοχία μονών ή πολλαπλών ινών άνθρακα

4.16 Υλικό C/C M6

Στα σχήματα 4.9 και 4.10 φαίνεται η εξέλιξη των κλάσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων στα πειραματικά δεδομένα ΑΕ από το υλικό C/C M6 για το συσσωρευμένο αριθμό συμβάντων ΑΕ και τη συσσωρευμένη ενέργεια των συμβάντων ΑΕ.

Σχήμα 4.9: Χρονική εξέλιξη των κλάσεων για το υλικό C/C M6

Η κλάση 3 (19,1% των συμβάντων ΑΕ) περιλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό δραστηριότητας ΑΕ στους δύο πρώτους κύκλους. Αφορά κατά βάση γεγονότα ΑΕ χαμηλής ενέργειας (βλ. σχ.14 κεφ.3 και σχ.10) που συμβαίνουν κατά την ελαστική φόρτιση του δοκιμίου σε χαμηλές τιμές φορτίου καθώς επίσης και κατά την αποφόρτιση (φαινόμενα push-in ινών). Η κλάση 1 (23,7% των συμβάντων ΑΕ) ξεκινάει ουσιαστικά στο 2^ο κύκλο φόρτισης και αυξάνει σημαντικά στους δύο τελευταίους

κύκλους. Στον προτελευταίο δε κύκλο όπου επισημαίνεται η ύπαρξη του χαρακτηριστικού γονάτου που συνδέεται με εκτεταμένη βλάβη στη μήτρα, κυριαρχεί ενεργειακά. Επιπλέον ξεκινάει τη δράση της πριν την κλάση 2 και συνεχίζει μέχρι τελικής θραύσεως, συνεπώς θα αντιστοιχιστεί στη ρηγμάτωση της μήτρας η οποία αντίθετα με το δοκίμιο M5 δεν φθάνει σε κορεσμό πριν την τελική αστοχία.

Η κλάση 4 (26,9% των συμβάντων AE) ενεργειακά ισχυρότερη στον τελευταίο κύκλο φόρτισης μέχρι αστοχίας, θα αντιστοιχιστεί στη θραύση των ινών, ενώ η πολυπληθέστερη όλων κλάση 2 (30,4% των συμβάντων AE) η οποία δραστηριοποιείται παράλληλα με τη ρηγμάτωση της μήτρας (κλάση 1) και την αστοχία των ινών (κλάση 4) περιέχει γεγονότα AE προερχόμενα από διεπιφανειακά φαινόμενα και κυριότερα την αστοχία του διεπιφανειακού δεσμού και φαινόμενα τριβής λόγω της εξόλκευσης των ινών.

Σχήμα 4.10: Συσσωρευμένη ενέργεια των κλάσεων για το υλικό C/C M6

Συνοψίζοντας λοιπόν την εξέλιξη της βλάβης στο δοκίμιο M6 έχουμε την κλάση 3 να ξεκινάει μονοπωλώντας τη δραστηριότητα AE στους δύο πρώτους κύκλους φόρτισης με σήματα προερχόμενα από την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου και ελάχιστα σήματα κατά την αποφόρτιση. Εν συνεχεία στον 3^ο κύκλο φόρτισης η κλάση 3 δίνει πάλι δραστηριότητα AE μέχρι το σημείο του χαρακτηριστικού γόνατου περίπου στα 500 sec όπου ξεκινά η σημαντική ρηγμάτωση της μήτρας (κλάση 1). Παράλληλα ξεκινούν να δραστηριοποιούνται μηχανισμοί βλάβης όπως αστοχία της διεπιφάνειας, τριβές λόγω εξόλκευσης (κλάση 2) των ινών και αστοχίες ινών (κλάση 4). Στην αποφόρτιση του 3^{ου} κύκλου μόνο η κλάση 3 δραστηριοποιείται με φαινόμενα push-in των ινών κατά τη φάση της αποφόρτισης σε κάθε κύκλο ενώ στον τελευταίο κύκλο φόρτισης μέχρι αστοχίας οι μηχανισμοί βλάβης που αντιστοιχούν στις κλάσεις 1,2,4 είναι σε πλήρη δράση.

Συμπερασματικά, η αντιστοιχία μηχανισμών συσσώρευσης-εξέλιξης της βλάβης και προκυπτουσών κλάσεων πειραματικών δεδομένων AE από το δοκίμιο M6 έχει ως εξής:

Κλάση 1 —————> ρηγμάτωση της μήτρας

Κλάση 2 —————> διεπιφανειακά φαινόμενα (εξόλκευση - αστοχία διεπιφάνειας)

Κλάση 3 —————> ελαστική παραμόρφωση δοκιμίου, push-in ινών

Κλάση 4 —————> αστοχία μονών ή πολλαπλών ινών άνθρακα

4.17 Υλικό C/C M8

Στα σχήματα 4.11 και 4.12 εικονίζεται η εξέλιξη των κλάσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων στα πειραματικά δεδομένα ΑΕ από το υλικό C/C M8 για το συσσωρευμένο αριθμό συμβάντων ΑΕ και τη συσσωρευμένη ενέργεια των συμβάντων ΑΕ.

Σχήμα 4.11: Χρονική εξέλιξη των κλάσεων για το υλικό C/C M8

Η κλάση 3 (15,3% των συμβάντων ΑΕ) περιλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό δραστηριότητας ΑΕ κατά τη φόρτιση του 1^{ου}, 2^{ου} και ως ένα σημείο του 3^{ου} κύκλου, καθώς επίσης και γεγονότα ΑΕ κατά την αποφόρτιση στους κύκλους 2 και 3. Αφορά κατά βάση γεγονότα ΑΕ χαμηλής ενέργειας (σχ.4.12) που συμβαίνουν κατά την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου σε χαμηλές τιμές φορτίου καθώς επίσης και κατά την αποφόρτιση (φαινόμενα push-in ινών).

Η κλάση 1 (25,7% των συμβάντων ΑΕ) ξεκινάει ουσιαστικά στο 2^ο κύκλο φόρτισης και αυξάνει σημαντικά στους δύο τελευταίους κύκλους

και ειδικά στον 3^ο όπου παρουσιάζεται το χαρακτηριστικό γόνατο που συνδέεται με εκτεταμένη βλάβη στη μήτρα. Συνεπώς αντιστοιχίζεται στη ρηγμάτωση της μήτρας.

Η κλάση 4 (28,2% των συμβάντων ΑΕ) κυριαρχεί στον τελευταίο κύκλο φόρτισης μέχρι αστοχίας, θα αντιστοιχιστεί στη θραύση των ινών, ενώ η πολυπληθέστερη όλων κλάση 2 (30,9% των συμβάντων ΑΕ) και ισχυρότατη ενεργειακά (σχ. 4.12) περιέχει γεγονότα ΑΕ προερχόμενα από διεπιφανειακά φαινόμενα και κυριότερα αστοχία της διεπιφάνειας και εν συνεχεία τριβές λόγω εξόλκευσης των ινών.

Σχήμα 4.12: Συσσωρευμένη ενέργεια των κλάσεων για το υλικό C/C M8

Συνοψίζοντας την εξέλιξη της βλάβης στο υλικό M8 έχουμε την κλάση 3 να μονοπωλεί τη δραστηριότητα ΑΕ στον πρώτο κύκλο φόρτισης με σήματα προερχόμενα από την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου. Εν συνεχεία στον 2^ο κύκλο φόρτισης η κλάση 1 δίνει πάλι δραστηριότητα

ΑΕ μέχρι το χρόνο των 250 sec όπου εκκινούν οι μηχανισμοί της ρηγμάτωσης της μήτρας και τα διεπιφανειακά φαινόμενα, οι κλάσεις 1 και 2 δηλαδή. Στην αποφόρτιση επανέρχεται η κλάση 3 με φαινόμενα push-in ινών. Στη φόρτιση του 3^{ου} κύκλου συνεχίζει η ΑΕ κατά την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου (κλάση 3) ενώ στο τέλος της αρχίζει έντονη δραστηριότητα ΑΕ λόγω εκτεταμένης ρηγμάτωσης της μήτρας (κλάση 1) και διεπιφανειακών φαινομένων (εξόλκευση ινών - αστοχία διεπιφ. δεσμού, κλάση 2) ενώ στην αποφόρτιση παρουσιάζονται ξανά φαινόμενα push-in ινών (κλάση 3). Στον τελευταίο κύκλο φόρτισης μέχρι αστοχίας, η ρηγμάτωσης της μήτρας (κλάση 1) φθάνει σε κορεσμό γύρω στα 1050 sec όπου και σταματά, ενώ τη στιγμή αυτή οι ενισχυτικές ίνες ξεκινούν να αστοχούν μαζικά (κλάση 4) δίνοντας εντυπωσιακή ποσότητα ΑΕ στα 200 περίπου sec μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Παράλληλα με την αστοχία των ινών τα διεπιφανειακά φαινόμενα (κλάση 2) συνεχίζουν να δίνουν ΑΕ πολύ υψηλής ενέργειας.

Εν τέλει, η αντιστοιχία μηχανισμών συσσώρευσης-εξέλιξης της βλάβης και προκυπτουσών κλάσεων πειραματικών δεδομένων ΑΕ από το δοκίμιο M8 έχει ως εξής:

Κλάση 1 —————> ρηγμάτωση της μήτρας

Κλάση 2 —————> διεπιφανειακά φαινόμενα (αστοχία διεπιφάνειας – εξόλκευση)

Κλάση 3 —————> ελαστική παραμόρφωση δοκιμίου, push-in ινών

Κλάση 4 —————> αστοχία μονών ή πολλαπλών ινών άνθρακα

4.18 Σύγκριση εξέλιξης μηχανισμών αστοχίας στα 3 υλικά - συμπεράσματα

Στο υλικό M5 επιβεβαιώνεται η παρατήρηση του κεφαλαίου 3 περί κυριαρχίας φαινομένων ρηγμάτωσης της μήτρας στους πρώτους κύκλους φόρτισης, καθώς η κλάση που αντιστοιχεί σε αυτά τα φαινόμενα, κυριαρχεί τόσο ενεργειακά όσο και σε αριθμό συμβάντων ΑΕ. Ολοκληρώνεται δε πριν από τη θραύση του δοκιμίου (βλ. σχ. 4.7). Ακολουθεί η κλάση που σχετίζεται με τα διεπιφανειακά φαινόμενα, όπως αστοχία της διεπιφάνειας και εξόλκευση ινών, αφήνοντας τρίτη τόσο σε αριθμό συμβάντων ΑΕ όσο και ενεργειακά την κλάση που αφορά φαινόμενα αστοχίας της ενισχυτικής φάσης των ινών η οποία δραστηριοποιείται μόνο στους δύο τελευταίους κύκλους φόρτισης.

Στο υλικό M6 η αστοχία της μήτρας ξεκινάει στο 2^ο κύκλο φόρτισης με μικρή δραστηριότητα κορυφώνοντας τη δραστηριότητά της στον επόμενο και μεθεπόμενο κύκλο και ολοκληρώνοντας την στη θραύση του δοκιμίου. Παράλληλα κινείται και η κλάση που σχετίζεται με τα διεπιφανειακά φαινόμενα ενώ η αστοχία των ινών κυριαρχεί στον τελευταίο κύκλο.

Τέλος στο υλικό M8 η δραστηριότητα αστοχίας της μήτρας κορυφώνεται στον 3^ο κύκλο και ολοκληρώνεται στον 4^ο και τελευταίο κύκλο όπως και στο υλικό M6. Η κλάση αστοχίας των ινών ενεργοποιείται και κυριαρχεί μόνο στο τελευταίο στάδιο της φόρτισης μέχρι τη θραύση. Από άποψη εξέλιξης των μηχανισμών αστοχίας η συμπεριφορά του μοιάζει με το υλικό M6.

Στην κατεύθυνση της αξιολόγησης της διεπιφάνειας σε κάθε υλικό, η αναγνώριση και διαφοροποίηση της εξέλιξης των μηχανισμών αστοχίας προσφέρει εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες. Οι πίνακες 4.13 και 4.14 συνοψίζουν τα ποσοστά του αριθμού συμβάντων ΑΕ και

συσσωρευμένης ενέργειας ΑΕ των κλάσεων που αφορούν τους βασικούς μηχανισμούς αστοχίας (μήτρα, διεπιφάνεια, ίνες). Τα ποσοστά του πίνακα 4.13 έχουν ήδη δοθεί στα σχ. 4.7, 4.9, 4.11. Τα ποσοστά του πίνακα 4.14 προέκυψαν από τις τελικές τιμές της συσσωρευμένης ενέργειας κάθε κλάσης (από σχ. 4.8, 4.10, 4.12) σε σχέση με τη συνολική συσσωρευμένη ενέργεια όλων των συμβάντων ΑΕ (τιμές από σχ. 3.10, 3.15, 3.20).

υλικό	Μήτρα-κλάση 1	Διεπιφάνεια-κλάση 2	Ίνες-κλάση 4
M5	40.7%	19.7%	12.7%
M6	23.7%	30.4%	26.9%
M8	25.7%	30.9%	28.2%

Πίνακας 4.13: Ποσοστό αριθμού συμβάντων ΑΕ σε κάθε κλάση σε σχέση με το συνολικό αριθμό των συμβάντων ΑΕ

υλικό	Μήτρα-κλάση 1	Διεπιφάνεια-κλάση 2	Ίνες-κλάση 4
M5	57.7%	19.2%	19.4%
M6	18.2%	30.3%	37.8%
M8	18.8%	50.0%	16.7%

Πίνακας 4.14: Ποσοστό συνολικής συσσωρευμένης ενέργειας συμβάντων ΑΕ σε κάθε κλάση σε σχέση με τη συνολική συσσωρευμένη ενέργεια όλων των συμβάντων ΑΕ

Τα αποτελέσματα του πίνακα 4.13 επιβεβαιώνουν την ομοιότητα στη συμπεριφορά των υλικών M6 και M8 με παρόμοια ποσοστά αριθμού συμβάντων γεγονότων ΑΕ που αποδίδονται στην κλάση με τα διεπιφανειακά φαινόμενα (30.4% και 30.9%) και σαφώς μεγαλύτερα από το ποσοστό της M5 (19.2%). Στα υλικά M6 και M8 λοιπόν τα διεπιφανειακά φαινόμενα δίνουν σημαντικά περισσότερη σε όγκο αλλά

και σε συνολική ενέργεια δραστηριότητα ΑΕ. Συνεπώς, διαθέτουν ασθενέστερη διεπιφάνεια συγκριτικά με το υλικό Μ5.

Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι το υλικό Μ5 έχει σημαντικά περισσότερα συμβάντα ΑΕ από τη μήτρα (40.7%) σε σχέση με τα ποσοστά των Μ6 και Μ8 (23.7% και 25.7% αντίστοιχα) που σημαίνει ότι η ισχυρότερη διεπιφάνεια στο Μ5 ευνοεί τη μεταβίβαση τάσεων (stress-transfer) από την ενισχυτική φάση στη μήτρα. Οι ασθενέστερες διεπιφάνειες των υλικών Μ6 και Μ8 επιτρέπουν εκτεταμένη εξόλκευση των ινών δίνοντας έτσι περισσότερη αριθμητικά και ενεργειακά ΑΕ. Στο Μ8 μάλιστα το ποσοστό της ενέργειας της κλάσης των διεπιφανειακών φαινομένων (50.0%) είναι ακόμα υψηλότερο από το υλικό Μ6 (30.3%) και φυσικά του Μ5 (19.2%) γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υλικό Μ8 έχει ίσως την πιο ασθενή διεπιφάνεια από τα τρία δίνοντας πολλά συμβάντα ΑΕ με υψηλή ενέργεια.

4.19 Βιβλιογραφία

1. **Anderberg MR.,** Cluster analysis for applications. New York:Academic Press; 1973.
2. **Fukunaga K.,** Introduction to statistical pattern recognition, 2nd English ed. San Antonio, CA, USA: Academic Press; 1990.
3. **Tou JT, Gonzales RC.,** Pattern recognition principles. Reading, MA:Addison-Wesley; 1974.
4. **S. Bow,** Pattern recognition-application to large data-set problems, Marcel Dekker Inc., 1984
5. **R. M. Belchamber, D. Betteridge, Y. T. Chow, T. Lilley, M. E. A. Cudby, D. C. M. Wood,** "Evaluation of pattern recognition analysis of acoustic emission from stressed polymers and composites", J. of AE, vol.4, no.4, 1985, pp.71-83
6. **K. Kenji and K. Ono,** Pattern recognition of acoustic emission signals from carbon fiber/epoxy composites, 7th International acoustic emission symposium, Zao, Japan, 1987
7. **K. Kawamoto, K. Ono,** "Pattern recognition analysis of acoustic emission signals from carbon fiber/epoxy composites", 3rd Int. Symp. on acoustic emission from composite materials, Paris, France, 1989, pp.230-239

- 8. A. Αναστασσόπουλος,** "Μη καταστροφικός χαρακτηρισμός βλάβης σε σύνθετα υλικά με τεχνικές αναγνώρισης προτύπων", Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1995
- 9. A. Anastassopoulos, T. Philippidis,** Clustering methodologies for the evaluation of AE from composites. Journal of Acoustic Emission 1995;13(1/2):11-22
- 10. Philippidis T. P., Nikolaidis V. N. and Anastassopoulos A. A,** 'Damage Characterization of C/C Laminates Using Neural Network Techniques on AE signals', NDT & E International, V. 31 (5), pp. 329-340, 1998
- 11. V. Kostopoulos, T. H. Loutas, A. Kontsos, G. Sotiriadis and Y. Z. Pappas,** "On the identification of the failure mechanisms in oxide/oxide composites using acoustic emission", NDT & E International, Volume 36, Issue 8, December 2003, Pages 571-580
- 12. V. Kostopoulos, T. Loutas and K. Dassios,** Fracture behavior and damage mechanisms identification of SiC/glass ceramic composites using AE monitoring, Composites Science and Technology, Volume 67, Issues 7-8, June 2007, Pages 1740-1746
- 13. Pappas Y. Z., Markopoulos Y. P. and Kostopoulos V.,** 'Failure Mechanism Analysis of 2D Carbon/Carbon Using Acoustic Emission Monitoring', NDT & E International, V. 31, pp. 157-163, 1997.
- 14. Pappas Y. Z. and Kostopoulos V.,** 'Toughness Characterization and Acoustic Emission Monitoring of a 2-D Carbon/Carbon Composite', Engineering Fracture Mechanics, V. 68(1 4), pp. 1557-1573, 2001.

15. Παππάς Ι., Μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση συνθέτων υλικών μέσω της χρήσης στοχαστικών και πιθανοθεωρητικών μοντέλων, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2001

16. K. Yamaguchi, H. Oyaizu, J. Johkaji and J. Kobayashi, Recognition of fracture modes and behavior in frp by ae wavefom microdata, Third International symposium on acoustic emission from composite materials, pages 268-277, Paris, France, 1989

17. K. Yamaguchi, H. Oyaizu, J. Johkaji and J. Kobayashi, Acoustic emission technology using multi-parameter analysis of waveform and application to GFRP tensile tests, Acoustic emission: Current practice and future directions, ASTM STP 1077, pages 123-143, Philadelphia, 1991

18. M.C. Merienne and J.P. Favre, Identification of the acoustic signals generated by the rupture of SiC fiber/metallic matrix composites. 7th International acoustic emission symposium, Zao, Japan, 1987

19. H. Otsuka and H. Scarton, Variations in acoustic emission between graphite and glass epoxy composites, Journal of composite materials, 5: 591-597, 1981

20. N. Shippen and D. Adams, Acoustic emission monitoring of damage progression in graphite/epoxy laminates, Journal of reinforced plastics and composites, 4: 243-261, 1985

- 21. D. Valentin, P. Bonniau and A. Bunsell,** Failure mechanism discrimination in carbon fiber-reinforced epoxy composites, *Composites*, 14 (4): 345-351, 1983
- 22. J.P. Favre and J.C. Laizet,** Amplitude and counts per event analysis of acoustic emission generated by transverse cracking of cross-ply frp, *Composites science and technology*, 36:27-34, 1989
- 23. Zhuang X. & Yan X.,** Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission, *Composite Science and Technology* Vol. 66, 2005
- 24. Hughet S. et al,** Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester, *Composite Science and Technology* Vol. 62, (Elsevier Science Ltd. 2002)
- 25. U. K. Vaidya, P. K. Raju,** Identification of failure modes of carbon-carbon composites at various processing stages using the acoustic emission technique, *NCA-vol.16/ AMD-vol.172, Dynamic Characterization of Advanced Materials, ASME*, 1993, pp. 153-161
- 26. Mizutani Y., Nagashima K., Takemoto M. and Ono K.,** 'Fracture Mechanism Characterization of Cross-Ply Carbon-Fiber Composites Using Acoustic Emission Analysis', *NDT & E International*, V. 33, pp. 101-110, 2000.

27. I. Βουγιουκλάκης, Διερεύνηση των Μηχανισμών Αστοχίας Επικαλύψεων Δομικών Στοιχείων Θερμικών Στροβιλομηχανών υπό Συνθήκες Θερμομηχανικής Φόρτισης με τη Χρήση Μη-Καταστροφικών Δοκιμών, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003

28. E. Emel, E. Kannatey-Asibu, "Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of AE signals", Journal of Eng. For industry-transactions of the ASME, vol.110, 1988, pp.137-145

29. P. A. Dickstein, Y. Segal, E. Segal, A. N. Sinclair, "Statistical pattern recognition techniques: a sample problem of ultrasonic determination of interfacial weakness in adhesive joints", J. Nondestructive Evaluation, vol.8, 1989, pp.27-35

30. R. W. Y. Chan, D. R. Hay, V. Caron, M. Hone, D. R. Sharp, "Classification of acoustic emission signals generated during welding", J. of AE, vol.4, no.4, 1985, pp.115-123

31. R. D. Hay, R. W. Y. Chan, D. R. Sharp, K. J. Siddiqui, "Classification for acoustic emission signals from deformation mechanisms in aluminium alloys", J. of AE, vol.3, no.3, 1984, pp.118-129

32. C. Roy, A. Maslouhi, D. Gaucher, Z. Piasta, "Classification of acoustic emission sources in CFRP assisted by pattern recognition analysis", Canadian Aeronautics and Space Journal, vol.34, no.4, 1988, pp.224-232

- 33. D. E. Brown, V. Corruble, C. L. Pittard,** "A comparison of decision tree classifiers with backpropagation neural networks for multimodal classification problems", Pattern Recognition, vol.26, no.4, 1993, pp.953-961
- 34. C. R. L. Murthy, B. Dattaguru, A. K. Rao,** "Application of pattern recognition concepts to acoustic emission signal analysis", J. of AE, vol.6, no.1, 1987, pp.19-28
- 35. Y. L. Hinton,** "Problems associated with statistical pattern recognition of acoustic emission signals in a compact tension fatigue specimen", Technical Publication, NASA/TP-1999-209351, ARL-TR-1691, 1999, p.19
- 36. S. F. Botten,** "Use of pattern recognition as a method to evaluate acoustic emission signals", ASME 1993, pp.7-13
- 37. Barre S.,** On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. Composites Science Technology 1994;52:369–76.
- 38. Mizutani Y., Nagashima K., Takemoto M., Ono K.,** Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon fibre composites using acoustic emission analysis. NDT&E Int 2000;33:101–109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΟ-ΥΠΕΡΗΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Στα κεφάλαια 3 και 4 παρουσιάστηκαν μεθοδολογίες αξιοποίησης των πειραματικών δεδομένων ΑΕ. Σε αυτό το κεφάλαιο θα προταθούν τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων ΑΥ με απώτερο στόχο την εξαγωγή παραμέτρων που θα συσχετίζονται και θα μπορούν να παρακολουθήσουν την εξέλιξη της βλάβης. Θα χρησιμοποιηθούν καινοτόμες τεχνικές που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής βασισμένες στο συνεχή και διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου (wavelet transform) αλλά και απλούστερες τεχνικές. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής των παραπάνω τεχνικών είναι μια πληθώρα παραμέτρων των οποίων η μεταβολή κατά τη διάρκεια της φόρτισης παρουσιάζονται εκτενώς και αξιολογείται η χρησιμότητα και η δυνατότητα κάθε μιας για την παρακολούθηση της βλάβης σε σύνθετα υλικά C/C με ενίσχυση τύπου υφάσματος.

5.2 Περί του μετασχηματισμού κυματιδίων

Ο μετασχηματισμός κυματιδίων εισήγαγε νέες δυνατότητες στην επεξεργασία σήματος και εικόνας τα τελευταία 20 χρόνια. Πρόκειται για έναν μαθηματικό μετασχηματισμό όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω που έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι μεταφέρει/αναλύει τη συνάρτηση στην οποία εφαρμόζεται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας-χρόνου ταυτόχρονα. Το κυματίδιο είναι ένα κύμα

πεπερασμένης (και όχι άπειρης) διάρκειας το οποίο έχει μηδενική μέση τιμή. Στο σχήμα 5.1 εικονίζεται ένα τυπικό κυματίδιο από την οικογένεια Daubechies [1-8].

Για να κατανοηθεί καλύτερα η λειτουργία του μετασχηματισμού κυματιδίων θα συγκριθεί με το μετασχηματισμό Fourier.

Σχήμα 5.1: Κυματίδιο 'db10' από την οικογένεια κυματιδίων Daubechies

Μαθηματικά στο συνεχή μετασχηματισμό Fourier το σήμα αναλύεται σε άπειρο αριθμό ημιτονοειδών συναρτήσεων με διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας η κάθε μια.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5.1)$$

Το αποτέλεσμα το μετασχηματισμού είναι οι συντελεστές Fourier οι οποίοι όταν πολλαπλασιαστούν με ημίτονα κατάλληλης συχνότητας και αθροιστούν δίνουν το αρχικό σήμα. Σχηματικά η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 5.2.

Σχήμα 5.2: Σχηματική παράσταση της ανάλυσης Fourier

Αντίστοιχα ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου αναλύει το σήμα σε ένα άθροισμα υπό κλίμακα (scaled) και μετατοπισμένων χρονικά (shifted) μητρικών συναρτήσεων κυματιδίου ψ . Αντίθετα από το μετασχηματισμό Fourier ο μετασχηματισμός κυματιδίων έχει συμπαγή φορέα είναι δηλαδή εντοπισμένος χρονικά.

$$C(scale, position) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(scale, position, t)dt \quad (5.2)$$

Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι οι συντελεστές C οι οποίοι είναι συνάρτηση της κλίμακας και της θέσης, δηλαδή σε αντιστοιχία συχνότητα και χρόνος. Σχηματικά η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 3. Παρακάτω αναλύεται περισσότερο διεξοδικά η έννοια της κλίμακας και της μετατόπισης.

Σχήμα 3: Μετασχηματισμός κυματιδίων σχηματικά

Ο Morlet ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την ιδέα των κυματιδίων σε τελείως εμπειρικό όμως επίπεδο. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι τη βασική ιδέα την είχε διατυπώσει ο Haar (1908), ο Morlet όμως μίλησε πρώτος για κυματίδια. Αργότερα η Daubechies [2] ανέπτυξε μια συστηματική μαθηματική τεχνική για την παραγωγή πεπερασμένης διάρκειας ορθογώνιων κυματιδίων χρησιμοποιώντας FIR (Finite Impulse Response) φίλτρα. Ήταν οι δικές της εργασίες που έδωσαν τεράστια

ώθηση στην νέα αυτή τεχνική. Σημαντικές εργασίες ήταν και αυτές των Mallat [11-12] πάνω σε multiresolution ανάλυση και του Cohen [5-6] σε δι-ορθογώνια (biorthogonal) κυματίδια.

5.3 Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου

Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου μοιάζει με τον αντίστοιχο Fourier [9]. Έχει όμως και βασικές διαφορές που τον κάνουν ελκυστικό στην ανάλυση σήματος με σπουδαιότερη διαφορά το γεγονός ότι ο μετασχηματισμός κυματιδίου προσφέρει το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας [1, 10, 26]. Έστω $f(t)$ συνεχής συνάρτηση ορισμένη σε χώρο Hilbert $L^2(\mathbb{R})$. Τότε ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου της συνάρτησης $f(t)$ έχει την ακόλουθη μορφή:

$$CW(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5.3)$$

με τον αντίστροφο μετασχηματισμό να διατυπώνεται ως εξής:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} CW(a,b) \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) da db \quad (5.4)$$

Η σταθερά C_ψ μπορεί να γραφεί ως: $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi(\omega)}{\omega} d\omega < \infty$ με $\Psi(\omega)$ το μετασχηματισμό Fourier της $\psi(t)$.

Όπου a συμβολίζουμε την κλίμακα (scale) και b τη μετατόπιση της μητρικής συνάρτησης κυματιδίου $\psi(t)$. Με ψ^* συμβολίζουμε το συζυγή μιγαδικό του μητρικού κυματιδίου. $CW(a,b)$ είναι οι συντελεστές του

συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίου. Το αποτέλεσμα λοιπόν της εφαρμογής του συνεχούς μετασχηματισμού είναι ένα πλήθος συντελεστών που είναι συνάρτηση της κλίμακας και της μετατόπισης του μητρικού κυματιδίου. Ας δούμε όμως πιο πρακτικά πως λειτουργεί αυτός ο μετασχηματισμός.

Η συνάρτηση $\psi(t)$ όπως είπαμε είναι η μητρική συνάρτηση κυματιδίου. Η $\psi(t)$ δεν μπορεί να είναι οποιαδήποτε μαθηματική συνάρτηση αλλά πρέπει να ικανοποιεί κάποιες συγκεκριμένες απαιτήσεις. Κατά πρώτον πρέπει $|\Psi(\omega)| < \infty, \forall \omega$ και $\int \psi(t) dt = 0$. Ένα πλεονέκτημα που προσφέρει ο μετασχηματισμός κυματιδίου είναι ακριβώς η ελευθερία επιλογής (ή ακόμη και δημιουργίας) της μητρικής συνάρτησης $\psi(t)$. Βεβαίως για να είναι ελκυστικό ένα κυματίδιο θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε ο μετασχηματισμός να είναι ορθογώνιος (orthogonal) ή εναλλακτικά ημι-ορθογώνιος (semi-orthogonal) ή δι-ορθογώνιος (bi-orthogonal). Ακολουθούν μερικά παραδείγματα μητρικών συναρτήσεων με αναλυτικές μορφές:

1. Κυματίδιο Morlet

$$\psi(t) = e^{i\omega t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad \Psi(\omega) = \sqrt{2\pi} \quad (5.5)$$

2. Κυματίδιο Shannon

$$\psi(t) = \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{2}\right)}{\frac{\pi t}{2}} \cos\left(\frac{3\pi t}{2}\right), \quad \Psi(\omega) = \begin{cases} 1, & \pi < |\omega| < 2\pi \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.6)$$

Αυτό λοιπόν που στην ουσία κάνει ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου είναι η σύγκριση κατά τμήματα της $f(t)$ με τη μητρική συνάρτηση σε διαφορετική κλίμακα και μετατόπιση.

$$f(t) = \psi(t) \quad ; \quad a = 1$$

$$f(t) = \psi(2t) \quad ; \quad a = \frac{1}{2}$$

$$f(t) = \psi(4t) \quad ; \quad a = \frac{1}{4}$$

Σχήμα 5.4: Η έννοια της κλίμακας (scale)

Μητρική συνάρτηση $\psi(t)$

Μετατοπισμένη χρονικά μητρική συνάρτηση $\psi(t-\tau)$

Σχήμα 5.5: Η έννοια της μετατόπισης (shift)

Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου είναι πολύ απαιτητικός υπολογιστικά καθώς πραγματοποιεί υπολογισμούς για όλες τις κλίμακες a που έχουν *a priori* οριστεί.

5.4 Κλίμακα και συχνότητα

Ο μετασχηματισμός κυματιδίων συχνά αναφέρεται ως μετασχηματισμός στο πεδίο ταυτόχρονα συχνότητας-χρόνου. Για την ακρίβεια πρόκειται για μετασχηματισμό στο πεδίο της κλίμακας-χρόνου (βλ. εξίσωση 5.2). Εμμέσως όμως η κλίμακα συνδέεται με τη συχνότητα [16].

Σχήμα 5.6: Χαμηλή και υψηλή κλίμακα κυματιδίου

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.6 υπάρχει η εξής αντιστοιχία μεταξύ κλίμακας και συχνότητας:

- Χαμηλή κλίμακα $\Rightarrow$ συμπιεσμένο κυματίδιο $\Rightarrow$ απότομα μεταβαλλόμενες λεπτομέρειες $\Rightarrow$ υψηλή συχνότητα
- Υψηλή κλίμακα $\Rightarrow$ 'τεντωμένο' κυματίδιο $\Rightarrow$ αργά μεταβαλλόμενες λεπτομέρειες $\Rightarrow$ χαμηλή συχνότητα

5.5 Διακριτός μετασχηματισμός

Μάλλον ανέλπιστα προέκυψε ότι η ανάλυση είναι εξίσου ακριβής και φυσικά πολύ πιο γρήγορη αν βασιστούμε μόνο σε δυαδικές (δυνάμεις του 2) κλίμακες και μετατοπίσεις. Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$DW(j,k) = \sqrt{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi^*(2^j t - k) dt \quad (5.7)$$

όπου ψ η μητρική συνάρτηση βάσης και ψ^* ο συζυγής μιγαδικός της. Το j αφορά κλίμακα (και εμμέσως συχνότητα) ενώ το k χρονική μετατόπιση. Αντίθετα με το μετασχηματισμό Fourier που μας μεταφέρει στο πεδίο των συχνοτήτων μόνο ο μετασχηματισμός κυματιδίου

εμπεριέχει και χρόνο, γι'αυτό πολλές φορές χαρακτηρίζεται ως ανάλυση ταυτόχρονα σε συχνότητα και χρόνο (time-frequency analysis). Αντίστοιχα με το συνεχή ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός εκφράζεται ως:

$$f(t) = c \sum_j \sum_k DW(j,k) \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (5.8)$$

Η συνάρτηση ψ όπως προείπαμε μπορεί να είναι οποιαδήποτε αρκεί να ικανοποιεί κάποια μαθηματικά κριτήρια. Όμως η οικογένεια κυματιδίων της Daubechies έπαιξε κυρίαρχο ρόλο στην εφαρμογή του διακριτού μετασχηματισμού σε εφαρμογές ανάλυσης σήματος και έκανε την ανάλυση κυματιδίων δημοφιλέστατη παγκοσμίως με εφαρμογές σε πάρα πολλούς επιστημονικούς κλάδους. Θα περιγράψουμε συνοπτικά τον αλγόριθμο δημιουργίας των κυματιδίων της Daubechies και γιατί αποτέλεσαν σημαντική τομή στον κλάδο αλλά και γιατί κυματίδιο από τη συγκεκριμένη οικογένεια χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία των σημάτων της παρούσας διατριβής.

Τα κυματίδια της Daubechies δεν έχουν αναλυτική μορφή αλλά προκύπτουν από επαναληπτικούς αλγορίθμους. Ξεκινώντας από τη συνάρτηση του Haar,

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (5.9)$$

η συνάρτηση κλίμακας (scaling function) για την οικογένεια Daubechies διατυπώνεται ως εξής:

$$\phi_j(x) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \phi_{j-1}(2x - k) \quad j=1,2,\dots \quad (5.10)$$

Ο επαναληπτικός αυτός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό όλων των συναρτήσεων κλίμακας με αρχική συνθήκη $\phi_0 = \phi$ όπως ορίστηκε στην (5.9). Η επιλογή των συντελεστών c_k είναι πολύ ουσιαστική για τις ιδιότητες του μετασχηματισμού καθώς καθορίζει το αν ο μετασχηματισμός θα είναι ή όχι ορθογώνιος ή ημι-ορθογώνιος. Η Daubechies υπέδειξε τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούν οι συντελεστές c έτσι ώστε να προκύπτει ορθογώνιος μετασχηματισμός [2].

1. Κριτήριο μοναδικότητας

$$\sum_{k=0}^{N-1} c_k = 2 \quad (5.11)$$

Το κριτήριο αυτό καθιστά τη συνάρτηση κλίμακας μοναδική και της επιτρέπει να διατηρεί μοναδιαίο εμβαδό κατά την επαναληπτική διαδικασία.

2. Κριτήριο ακρίβειας

$$\sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k k^m c_k = 0 \quad (5.12)$$

3. Κριτήρια ορθογωνιότητας

$$\sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k k^m c_k c_{k+2m} = 0 \quad (5.13)$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k k^m c_k^2 = 0 \quad (5.14)$$

Η μητρική συνάρτηση ψ μπορεί πλέον να προσδιοριστεί ως εξής:

$$\psi(x) = \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k c_k \phi(2x + k - N + 1) \quad (5.15)$$

όπου η ϕ προσδιορίζεται από την (5.9).

Στο σχήμα 5.7 εικονίζονται τυπικές μητρικές συναρτήσεις ψ καθώς επίσης και οι συναρτήσεις κλίμακας ϕ από τις οποίες προήλθαν, της οικογένειας Daubechies, τα κυματίδια db5, db10.

Σχήμα 5.7: α) συνάρτηση κλίμακας ϕ για το db5 κυματίδιο β) κυματίδιο db5 γ) συνάρτηση κλίμακας ϕ για το db10 κυματίδιο δ) κυματίδιο db10

Αυτό λοιπόν που πρακτικά κάνει ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου είναι να 'περνάει' -ανάλογα με τα επίπεδα ανάλυσης που έχουμε προεπιλέξει- το αρχικό σήμα από ένα φίλτρο χαμηλών και ένα φίλτρο υψηλών συχνοτήτων (σχήμα 5.8). Η έξοδος του φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων ονομάζεται 'προσέγγιση' (Approximation) ενώ η έξοδος του φίλτρου υψηλών συχνοτήτων 'λεπτομέρεια' (Detail). Αυτό είναι ανάλυση ενός επιπέδου. Αν επιθυμούμε περισσότερα επίπεδα ανάλυσης τότε η 'προσέγγιση' θα περάσει εκ νέου από φίλτρο χαμηλών και φίλτρο υψηλών συχνοτήτων δίνοντας μια καινούρια 'προσέγγιση 2' και 'λεπτομέρεια 2'. Η διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί για όσα επίπεδα ανάλυσης επιθυμούμε. Στο σχήμα 5.9 απεικονίζεται ανάλυση τριών επιπέδων.

Σχήμα 5.8: Ανάλυση ενός επιπέδου

Σχήμα 5.9: Ανάλυση πολλαπλών επιπέδων

Περαιτέρω πληροφορίες για το μετασχηματισμό κυματιδίου και τις δυνατότητες που προσφέρει στην ανάλυση σήματος μπορούν να αναζητηθούν στις αναφορές [13-26].

5.6 Μεθοδολογία διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου για την ανάλυση των κυματομορφών ΑΥ

Με βάση λοιπόν το γεγονός ότι ο μετασχηματισμός κυματιδίου είναι ο πλέον κατάλληλος για την επεξεργασία σημάτων μεταβατικής φύσεως όπως οι κυματομορφές του ΑΥ, αναπτύχθηκαν καινοτόμες μεθοδολογίες επεξεργασίας βασισμένες στο μετασχηματισμό κυματιδίων. Για την εφαρμογή τεχνικών βασισμένων στο μετασχηματισμό κυματιδίων σε σήματα από μη καταστροφικούς ελέγχους κάποιος μπορεί να ανατρέξει στις αναφορές [26-37,39] του παρόντος κεφαλαίου.

Η μεθοδολογία που βασίζεται στο διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου για την ανάλυση των κυματομορφών ΑΥ εικονίζεται στο σχήμα 5.10. Οι καταγεγραμμένες κυματομορφές ΑΥ εισάγονται στο Matlab όπου και αποσυντίθενται σε προκαθορισμένο αριθμό επιπέδων ανάλυσης χρησιμοποιώντας το διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων (DWT), με τη χρήση του κυματιδίου 'db10'. Η αποσύνθεση μιας τυπικής κυματομορφής απεικονίζεται στο σχήμα 5.11 όπου φαίνονται τα επίπεδα αποσύνθεσης της αρχικής κυματομορφής. Το άθροισμα των επιμέρους κυματομορφών οδηγεί στην αρχική κυματομορφή.

Κάθε επίπεδο αποσύνθεσης αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων. Στο σχήμα 5.12 απεικονίζονται τα συχνοτικά φάσματα των επιπέδων. Αυτά προέκυψαν έπειτα από την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier (FFT) σε κάθε επίπεδο.

Τέλος υπολογίζεται το ενεργειακό περιεχόμενο κάθε επιπέδου $f_i(t)$ ως:

$$E^{(i)}(t) = \sum_{\tau=t_0}^t \left(f^{(i)}(\tau) \right)^2 \quad (5.16)$$

Σχήμα 5.10: Μεθοδολογία διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων

Σχήμα 5.11: Αποσύνθεση 10 επιπέδων τυπικής κυματομορφής ΑΥ

Σχήμα 5.12α: Φάσματα συχνοτήτων επιπέδων αποσύνθεσης (επίπεδα 1-6)

Το πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου να αποσυνθέτει τις κυματομορφές σε διακριτά συχνотικά πεδία είναι προφανές από τα σχήματα 5.12a, 5.12b. Τα επίπεδα 1-10 αντιστοιχούν στις 'λεπτομέρειες' (details) d1-d10 του σχήματος 5.7. Το επίπεδο 0 αντιστοιχεί στην 'προσέγγιση' (approximation) a10. Εφόσον η συχνότητα δειγματοληψίας των κυματομορφών ΑΥ είναι 4 MHz σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist η μέγιστη θεωρητική συχνότητα των σημάτων είναι η μισή δηλαδή 2 MHz. Στον πίνακα 5.1 αντιπαραθέτουμε τα θεωρητικά πεδία συχνοτήτων του μετασχηματισμού με τα πραγματικά όπως αυτά μετρήθηκαν από τα σχήματα 12a και 12b. Βλέπουμε ότι στην πραγματικότητα υπάρχει μια μικρή επικάλυψη

(overlap) των πεδίων συχνότητας ιδιαίτερα στα χαμηλές συχνότητας επίπεδα.

Σχήμα 5.12b: Φάσματα συχνοτήτων επιπέδων αποσύνθεσης (επίπεδα 0,7-10)

Επίπεδο ανάλυσης	Approximation- Detail	Θεωρητικό συχνοτικό πεδίο (kHz)	Πραγματικό πεδίο συχνοτήτων (από σχ.5.12 α,β) (kHz)
1	d1	1000-2000	1100-2000
2	d2	500-1000	550-750
3	d3	250-500	270-420
4	d4	125-250	100-300
5	d5	62.5-125	85-130
6	d6	31.25-62.5	25-65
7	d7	15.625-31.25	13-35
8	d8	7.813-15.625	6-15
9	d9	3.906-7.813	2-10
10	d10	1.953-3.906	2-5
0	a10	0-1.953	0-2

Πίνακας 5.1: Συχνοτικά πεδία επιπέδων ανάλυσης

5.7 Μεθοδολογία συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίου - Ροπές κυματιδίων

Πέραν της μεθοδολογίας του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ήταν επιθυμητή και η αξιοποίηση του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίων σε αντίστοιχη μεθοδολογία για την αξιοποίηση των κυματομορφών ΑΥ. Την ένδειξη ότι ο συνεχής μετασχηματισμός μπορεί να αξιολογήσει τη διαφοροποίηση των κυματομορφών ΑΥ λόγω συσσώρευσης της βλάβης στο υλικό μας την έδωσαν τα κλιμακογράμματα (scalograms) των σχημάτων 5.13-5.16. Τέσσερις κυματομορφές ΑΥ επελέγησαν από ένα πείραμα έτσι ώστε η πρώτη να αντιστοιχεί σε πολύ αρχικό στάδιο φόρτισης (50 sec), οι δύο επόμενες σε μεσαία στάδια της φόρτισης (350 sec και 750sec) και η τελευταία σε τελικό στάδιο φόρτισης (1000 sec). Οι κλίμακες που επελέγησαν είναι από 1:500. Με τον τρόπο αυτό παρατηρούμε ότι καθώς ανεβαίνει το επιπέδο της βλάβης από κύκλο σε κύκλο να αλλάζουν ποιοτικά τα κλιμακογράμματα. Κατά συνέπεια συμπεραίνουμε ότι ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων προσφέρει πληροφορία σχετικά με τη μεταβολή των κυματομορφών ΑΥ καθώς η βλάβη εξελίσσεται.

Για την αξιολόγηση όμως των χιλιάδων κυματομορφών ΑΥ που προκύπτουν από ένα πείραμα απαιτείται μια ποσοτική μεθοδολογία που δεν προσφέρουν τα κλιμακογράμματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της ροπής WGM (wavelet grey moment) που περιγράφεται ακολούθως.

Σχήμα 5.13: Κυματομορφή ΑΥ που αντιστοιχεί σε πειραματικό χρόνο 50 sec και συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων (scalogram)

Σχήμα 5.14: Κυματομορφή ΑΥ που αντιστοιχεί σε πειραματικό χρόνο 350 sec και συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων (scalogram)

Σχήμα 5.15: Κυματομορφή ΑΥ που αντιστοιχεί σε πειραματικό χρόνο 750 sec και συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων (scalogram)

Σχήμα 5.16: Κυματομορφή ΑΥ που αντιστοιχεί σε πειραματικό χρόνο 1000 sec και συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων (scalogram)

Από την εφαρμογή του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίων σε μια εν γένει χρονοσειρά προκύπτει ένα μητρώο συντελεστών $[C]_{m \times n}$ όπου m οι κλίμακες και n τα σημεία της χρονοσειράς. Η ροπή WGM (wavelet grey moment) g_k k -τάξης ορίζεται ως:

$$g_k = \frac{1}{m \times n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^k \cdot \sqrt{(i-1)^2 + (j-1)^2} \quad (5.17)$$

Όπου c_{ij} τα στοιχεία του μητρώου $[C]_{m \times n}$, $\sqrt{(i-1)^2 + (j-1)^2}$ η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των στοιχείων c_{ij} και του σημείου αναφοράς στοιχείο (1,1). Βιβλιογραφικά στο πεδίο των μη καταστροφικών δοκιμών η 1^η ροπή έχει χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία σημάτων από ταλαντώσεις και τον χαρακτηρισμό βλαβών σε κιβώτιο ταχυτήτων με τεχνητές βλάβες [39].

Για τον υπολογισμό της ροπής g_1 στα σήματα ακουστο-υπέρηχου που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των μηχανικών δοκιμών λοιπόν ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία:

1. Κανονικοποίηση του κάθε σήματος

Τα σήματα ακουστο-υπέρηχου αποτελούνται από 2048 σημεία $\{A_1, A_2, \dots, A_{2048}\}$ συνεπώς το κανονικοποιημένο σήμα θα είναι μια

χρονοσειρά $\{x_1, x_2, \dots, x_{2048}\}$ όπου $x_i = A_i / \sqrt{\sum_{i=1}^{2048} A_i^2}$ και $\sum_{i=1}^{2048} x_i^2 = 1$. Ο

σκοπός της κανονικοποίησης είναι ο περιορισμός των διαφόρων σημάτων σε ένα προκαθορισμένο εύρος και η εξασφάλιση της διατήρησης της ενέργειας κατά τον μετασχηματισμό.

2. Υπολογισμός του μητρώου συντελεστών $[C]_{500 \times 2048}$ για τα κανονικοποιημένα σήματα.

Οι κλίμακες που επιλέγουμε κατά το συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίων είναι από 1:500.

3. Υπολογισμός της ροπής g_1 που αντιστοιχεί στο μητρώο $[C]_{500 \times 2048}$ μέσω της εξίσωσης (5.17)

5.8 Συνάφεια

Πέραν των δύο μεθοδολογιών που βασίζονται στο μετασχηματισμό κυματιδίου και αναλύθηκαν ανωτέρω, προτείνονται και δύο ακόμη δείκτες προς υπολογισμό από τις κυματομορφές ΑΥ ως υποψήφιοι για την παρακολούθηση της βλάβης στα υλικά. Η συνάφεια και ο λόγος θετικών προς αρνητικά εμβαδά [38].

Η συνάφεια (coherence) C_{xy} μεταξύ δύο χρονοσειρών $x(t)$, $y(t)$ ορίζεται ως εξής:

$$C_{xy} = \frac{|P_{xy}|^2}{P_{xx} \cdot P_{yy}} \quad (5.18)$$

Όπου P_{xx} η πυκνότητα του φάσματος ισχύος (power spectrum density) της χρονοσειράς $x(t)$, P_{yy} η πυκνότητα του φάσματος ισχύος της χρονοσειράς $y(t)$, P_{xy} η πυκνότητα του φάσματος ισχύος της χρονοσειράς $x(t) * y(t)$.

Η πυκνότητα του φάσματος ισχύος P_{xx} μιας χρονοσειράς $x(t)$ ορίζεται ως ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης R_{xx} ως εξής:

$$P_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_{xx}(m) \cdot e^{-j\omega m} \quad (5.19)$$

όπου $R_{xx} = E[x(t) \cdot x(t + \tau)] \quad (5.20)$

Η πυκνότητα του φάσματος ισχύος P_{xy} ορίζεται ως ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης R_{xy} ως εξής:

$$P_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_{xy}(m) \cdot e^{-j\omega m} \quad (5.21)$$

όπου $R_{xy} = E[x(t) \cdot y(t + \tau)] \quad (5.22)$

Στην παρούσα εργασία υπολογίσαμε τη συνάφεια όλων των κυματομορφών ΑΥ συγκριτικά με την πρώτη. Δηλαδή η $x(t)$ ήταν η πρώτη κυματομορφή (δοκίμιο χωρίς βλάβη) και $y(t)$ κάθε μια από τις υπόλοιπες. Υπολογίστηκε έτσι ένα διάνυσμα με τη συνάφεια κάθε κυματομορφής ΑΥ σε σύγκριση με την πρώτη μεγέθους όσο και το πλήθος των κυματομορφών.

5.9 Λόγος θετικών προς αρνητικά εμβαδά κυματομορφών (Rpn)

Ο λόγος Rpn των θετικών προς τα αρνητικά εμβαδά των κυματομορφών υπολογίζεται απλά για κάθε μια από κυματομορφές ΑΥ κάθε πειράματος ως το άθροισμα των θετικών εμβαδών προς το άθροισμα των αρνητικά εμβαδά.

5.10 Αποτελέσματα

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διαφορετικών τεχνικών που αναλύθηκαν προηγούμενα, στις κυματομορφές ΑΥ που προήλθαν από την πειραματική διαδικασία. Συνοψίζοντας υπολογίστηκαν τα ακόλουθα μεγέθη:

- Συνάφεια των κυματομορφών ΑΥ συγκριτικά με την πρώτη κυματομορφή όπου ουσιαστικά έχουμε 'υγιές', χωρίς βλάβη δοκίμιο
- Λόγος R_{pn} κάθε κυματομορφής
- Ροπή g_1 (βλ. εξίσωση 5.17) από το συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίων των κυματομορφών
- Ενεργειακό περιεχόμενο επίπεδων ανάλυσης E_a και $E_{d1-E_{d10}}$ όπως προέκυψαν από το διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων των κυματομορφών

A priori επιθυμητή -και εκ των στόχων της παρούσας διατριβής- είναι η μεταβολή τους κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της φόρτισης κατά τρόπο που να συμβαδίζει με την εξέλιξη της βλάβης στον όγκο του δοκιμίου. Στα γραφήματα με τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τεχνικών επεξεργασίας που ακολουθούν, πέραν των ανωτέρω υπολογισθέντων μεγεθών απεικονίζεται και η εξέλιξη του φορτίου στα πειραματικά δοκίμια στην αριστερή κλίμακα του κατακόρυφου άξονα ενώ στον οριζόντιο άξονα τοποθετήθηκε ο πειραματικός χρόνος. Η ποσοστιαία μεταβολή των μεγεθών υπολογίζεται ως $\frac{|αρχική τιμή - τελική τιμή|}{αρχική τιμή} * 100$.

Τα σχήματα 5.17-5.58 απεικονίζουν τα υπολογισθέντα από τις κυματομορφές ΑΥ μεγέθη για τα κανάλια 1 και 2, τους αισθητήρες-δέκτες (receivers) δηλαδή στα άκρα του δοκιμίου. Ο πομπός (pulser) βρίσκεται στο κέντρο του δοκιμίου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και για τα τρία είδη υλικών C/C που μελετήθηκαν.

5.11 Υλικό C/C M5

Στο σχήμα 5.17 η συνάφεια των κυματομορφών ΑΥ ξεκινάει από τη μονάδα (εφόσον συγκρίνονται με την 1^η κυματομορφή ΑΥ) και καθώς το πείραμα εξελίσσεται και η βλάβη αυξάνει, η συνάφεια των κυματομορφών μειώνεται σημαντικά με το κανάλι 1 να παρουσιάζει μια μείωση της τάξης του 60% και 50% για το κανάλι 2 μέχρι το τέλος της δοκιμής. Η μείωση της συνάφειας δεν είναι ακριβώς μονότονη καθώς κατά τις αποφορτίσεις κυρίως παρατηρούνται τοπικές αυξήσεις. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο στη συνάφεια αλλά και σε άλλα μεγέθη όπως θα δούμε παρακάτω. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι κατά τις αποφορτίσεις οι ρωγμές στη μήτρα τείνουν να κλείσουν με αποτέλεσμα τα ελαστικά κύματα να ταξιδεύουν ευκολότερα και να μεταφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια.

Σχετικά με τις διαφορές στα δύο κανάλια καταγραφής, είναι σαφές ότι η βλάβη στο κάθε ήμισυ του δοκιμίου που ταξιδεύουν τα ελαστικά κύματα που δημιουργούνται από τον αισθητήρα-πομπό προς τους αισθητήρες-δέκτες, δεν εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο και αυτό ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις των πειραμάτων.

Σχήμα 5.17: Εξέλιξη της συνάφειας των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2)-υλικό Μ5

Στα σχήματα 5.18 και 5.19 φαίνονται ο λόγος R_{ph} και η ροπή g_1 των οποίων η μεταβολή είναι άνευ ιδιαίτερου ενδιαφέροντος κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Σχήμα 5.18: Εξέλιξη της τιμής του λόγου R_{ph} των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ5

Σχήμα 5.19: Εξέλιξη της τιμής της ροπής g_1 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ5

Η ενέργεια E_a εικονίζεται στο σχήμα 5.20 χωρίς να παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον εφόσον δε μεταβάλλεται μονότονα αλλά παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις.

Σχήμα 5.20: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου E_a του επιπέδου ανάλυσης 0 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ5

Στο σχήμα 5.21 η ενέργεια Ed1 παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς σημειώνει μια πολύ σημαντική πτώση στον 3^ο κύκλο φόρτισης (310 sec) της τάξης του 99% σε σχέση με την αρχική τιμή για το κανάλι 1 και 97% για το κανάλι 2 από το 2^ο ήδη κύκλο (130 sec). Από τον 3^ο κύκλο και έπειτα η ενέργεια Ed1 παραμένει πρακτικά αμετάβλητη και στα δύο κανάλια.

Στο σχήμα 5.22 η ενέργεια Ed2 μειώνεται διαρκώς –αν και όχι απαραίτητως μονότονα- στους δύο πρώτους κύκλους έως τα 310 sec όπου σημειώνεται μεγάλη τοπική πτώση κατά 85% στο κανάλι 1 και 75% στο κανάλι 2. Από την έναρξη μέχρι το τέλος της δοκιμής στο κανάλι 1 η πτώση αγγίζει το 100% ενώ είναι περίπου 80% για το κανάλι 2.

Σχήμα 5.21: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed1 του επιπέδου ανάλυσης 1 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Σχήμα 5.22: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed2 του επιπέδου ανάλυσης 2 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Η ενέργεια Ed3 στο σχήμα 5.23 έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, με πολύ λιγότερες διακυμάνσεις στις τιμές καθώς το επίπεδο 3 στο οποίο αντιστοιχεί είναι το πιο ισχυρό ενεργειακά. Από την αρχή μέχρι το τέλος του 1^{ου} κύκλου (0-78 sec) παρατηρείται μια βαθμιαία μονότονη πτώση ύψους 30%. Στα 150 sec του 2^{ου} κύκλου βλέπουμε μια απότομη τοπική πτώση περίπου 30%, ενώ στο διάστημα 311-321 sec του 3^{ου} κύκλου παρατηρείται σημαντικότερη πτώση κατά 85%. Από το σημείο αυτό μέχρι το τέλος της δοκιμής η ενέργεια Ed3 μειώνεται κατά 95%. Συνολικά για το κανάλι 1 από την αρχή μέχρι το τέλος του πειράματος η πτώση της ενέργειας Ed3 φτάνει σχεδόν το 100%. Στο κανάλι 2 από την αρχή μέχρι το τέλος του 1^{ου} κύκλου (0-78 sec) μετράται πτώση 29%, ενώ στα 120 sec του 2^{ου} κύκλου υπάρχει απότομη πτώση 60%. Από τον 3^ο κύκλο κι έπειτα η μεταβολή είναι αμελητέα με τη συνολική πτώση της ενέργειας Ed3 από αρχής μέχρι τέλους να φτάνει το 86% συνολικά.

Σχήμα 5.23: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed3 του επιπέδου ανάλυσης 3 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Σχήμα 5.24: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed4 του επιπέδου ανάλυσης 4 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Στο σχήμα 5.24 η ενέργεια Ed4 του καναλιού 1 σημειώνει τοπική πτώση περίπου 58% στα 152 sec (2^{ος} κύκλος) και 90% στα 312 sec

(3^{ος} κύκλος) ξεπερνώντας συνολικά το 99% από την έναρξη του πειράματος μέχρι το τέλος. Στο κανάλι 2 δεν υπάρχει αξιόλογη μονότονη μεταβολή της ενέργειας Ed4.

Στο σχήμα 5.25 η ενέργεια Ed5 του καναλιού 1 από την έναρξη μέχρι το τέλος του 2^{ου} κύκλου (0-234 sec) μειώνεται κατά 42% ενώ κατά στο χρονικό διάστημα 320-420 sec του 3^{ου} κύκλου σημειώνεται πτώση 97%. Συνολικά η πτώση κατά τη διάρκεια της δοκιμής ξεπερνάει το 99%. Στο κανάλι 2 στα 150 sec του 3^{ου} κύκλου η ενέργεια Ed5 πέφτει κατά 68% ενώ από εκεί κι έπειτα διατηρείται στα ίδια επίπεδα με διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια των φορτίσεων - αποφορτίσεων.

Σχήμα 5.25: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed5 του επιπέδου ανάλυσης 5 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ5

Η ενέργεια Ed6 (σχήμα 5.26) παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις στα πρώτα στάδια της δοκιμής. Πάραυτα από τα 310-320 sec παρατηρούμε πτώση 93% ενώ από τα 320 sec μέχρι το τέλος βλέπουμε 90% πτώση στο κανάλι 1 φθάνοντας για τη συνολική πειραματική διάρκεια το 99%.

Στο κανάλι 2 παρατηρείται συνολική πτώση 90% με σημαντικές πτώσεις στο 2^ο και 3^ο κύκλο με σημαντικές όμως διακυμάνσεις.

Στα σχήματα 27 και 28 οι ενέργειες Ed7 και Ed8 του καναλιού 1 έχουν παρόμοια εξέλιξη. Έντονη διακύμανση στα 150 πρώτα sec πτώση κατά 75% στο διάστημα 310-420 sec και ακολούθως πτώση μεγαλύτερη από 90% μέχρι τέλους. Στο κανάλι 2 παρατηρείται έντονη διακύμανση των τιμών με συνολική πάντως πτώση ύψους 85%.

Σχήμα 5.26: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed6 του επιπέδου ανάλυσης 6 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Σχήμα 5.27: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed7 του επιπέδου ανάλυσης 7 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Σχήμα 5.28: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed8 του επιπέδου ανάλυσης 8 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Τέλος οι ενέργειες Ed9 και Ed10 (σχήματα 5.29-5.30) των ασθενέστερων ενεργειακά επιπέδων έχουν παρόμοια εξέλιξη και στα δύο κανάλια. Στο κανάλι 1 δεν υπάρχει καμία μονότονη αλλαγή στους

δύο πρώτους κύκλους. Στον 3^ο κύκλο από 310-420 sec σημαντική πτώση 82% λαμβάνει χώρα. Από το σημείο αυτό και μέχρι το τέλος δεν έχουμε μονότονη συμπεριφορά της ενέργειας αν και στο τελευταίο στάδιο της ζωής του δοκιμίου (1700-1850 sec) σταθεροποιείται σε τιμή 87% χαμηλότερη της τιμής κατά την έναρξη της δοκιμής. Στο κανάλι 2 η συμπεριφορά της ενέργειας πέραν της εμφανούς πτώσης στα 150 περίπου sec η υπόλοιπη διακύμανση της είναι ανασφαλής για επιπλέον συμπεράσματα.

Σχήμα 5.29: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed9 του επιπέδου ανάλυσης 9 των κυματομορφών AY στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M5

Σχήμα 5.30: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed10 του επιπέδου ανάλυσης 10 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ5

5.12 Υλικό C/C M6

Στο σχήμα 5.31 η συνάφεια των κυματομορφών ΑΥ ξεκινάει από τη μονάδα (εφόσον συγκρίνονται με την 1^η κυματομορφή ΑΥ) και καθώς το πείραμα εξελίσσεται και η βλάβη αυξάνει, η συνάφεια των κυματομορφών μειώνεται σημαντικά με το κανάλι 1 να παρουσιάζει μια εντυπωσιακή μείωση της τάξης του 98% και 96% για το κανάλι 2 μέχρι το τέλος της δοκιμής. Σημαντική είναι η πτώση κατά 50% που παρουσιάζεται γύρω στα 540 sec του 3^{ου} κύκλου στο χαρακτηριστικό 'γόνατο' της καμπύλης φόρτισης που συσχετίζεται με τον κορεσμό της ρηγμάτωσης της μήτρας. Μέχρι το σημείο αυτό η μείωση της συνάφειας είναι περίπου 20%. Μετά το σημείο αυτό και έως το χρόνο των 820 sec παρατηρείται μικρή διακύμανση της συνάφειας. Από τα 820 sec όμως μέχρι τη θραύση του δοκιμίου παρατηρείται σημαντική μονότονη μείωση.

Σχήμα 5.31: Εξέλιξη της συνάφειας των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Ο λόγος R_{rh} του σχήματος 5.32 εξελίσσεται με έντονα στοχαστική συμπεριφορά και πολύ μικρές ποσοστιαίες μεταβολές των τιμών του.

Σχήμα 5.32: Εξέλιξη του λόγου R_{rh} των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Σχήμα 5.33: Εξέλιξη της τιμής της ροπής g_1 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M6

Η συμπεριφορά της ροπής g_1 (σχ. 5.33) κατά τη διάρκεια της δοκιμής στο υλικό M6 παρουσιάζει σαφώς περισσότερο ενδιαφέρον συγκριτικά με την αντίστοιχη του υλικού M5. Το κανάλι 1, αν και παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, στο τελευταίο στάδιο του τελευταίου κύκλου φόρτισης (960-1080 sec) σημειώνει αξιοσημείωτη πτώση 65% και συνολικά από την έναρξη μέχρι την τελική αστοχία μια εντυπωσιακή μεταβολή 400%. Στο κανάλι 2 χαρακτηριστική είναι η τοπική πτώση 375% στο διάστημα 480-510 sec του 3^{ου} κύκλου στο 'γόνατο' της καμπύλης φόρτισης ενώ από την έναρξη μέχρι τη θραύση η πτώση φτάνει το 400%.

Σχήμα 5.34: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου E_a του επιπέδου ανάλυσης 0 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Στο σχήμα 5.34 η ενέργεια E_a δεν προσφέρεται για ιδιαίτερα συμπεράσματα εξαιτίας των έντονων διακυμάνσεων στις τιμές της.

Οι ενέργειες E_{d1} και E_{d2} (σχήματα 5.35, 5.36) παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον και παρόμοια συμπεριφορά. Στο κανάλι 1 η πτώση ξεκινάει στα 220 sec στο 2^ο κύκλο φόρτισης, διατηρείται σταθερή μέχρι τα 470 sec όπου και πέφτει σημαντικά κατά 94% για να παραμείνει σε πολύ χαμηλά σταθερά επίπεδα σημειώνοντας συνολική πτώση πάνω από 99%. Στο κανάλι 2 μέχρι την πολύ σημαντική πτώση στα 470 sec οι ενέργειες E_{d1} και E_{d2} παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις. Η πτώση είναι της τάξης του 99% και οι ενέργειες εφεξής παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες μέχρι την τελική αστοχία.

Σχήμα 5.35: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed1 του επιπέδου ανάλυσης 1 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Σχήμα 5.36: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed2 του επιπέδου ανάλυσης 2 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Η ενέργεια Ed3 (σχήμα 5.37) -και για τα δύο κανάλια- μέχρι το χαρακτηριστικό χρονικό σημείο των 470 sec μεταβάλλεται αυξητικά μεν ακανόνιστα δε, πέφτει σε εκείνο το χρονικό σημείο κατά 96% για να διατηρηθεί σχεδόν αμετάβλητη μέχρι τέλους.

Χρόνος (sec)

Χρόνος (sec)

Σχήμα 5.37: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed3 του επιπέδου ανάλυσης 3 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Χρόνος (sec)

Χρόνος (sec)

Σχήμα 5.38: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed4 του επιπέδου ανάλυσης 4 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Η ενέργεια Ed4 χαρακτηρίζεται από δύο πτώσεις μία αρκετά ευρεία και μία μικρότερη. Και στα δύο κανάλια η πρώτη συμβαίνει κατά τη φόρτιση του 2^{ου} κύκλου (220-255 sec) και η πτώση είναι της τάξης του

85% για το κανάλι 1 και 71% για το κανάλι 2. Η άνοδος της ενέργειας κατά την αποφόρτιση του 2^{ου} κύκλου έχει αποδοθεί στο κλείσιμο την μητρικών ρωγμών και στην κατά συνέπεια με λιγότερες ενεργειακές απώλειες κυματική διάδοση. Στη φόρτιση του 3^{ου} κύκλου επαναρχίζει η πτώση η οποία από τα 480-540 sec φτάνει το 87% για το κανάλι 1 και το 50% για το κανάλι 2 για να σταθεροποιηθεί εφεξής και μέχρι το τέλος του πειράματος.

Η ενέργεια Ed5 (σχήμα 5.39) ελαττώνεται εντυπωσιακά κατά 90% στο κανάλι 1 στο χαρακτηριστικό χρονικό σημείο των (220-255 sec) και λιγότερο (περίπου 70%) στο χρονικό σημείο των 480-540 sec. Στο κανάλι 2 η πτώση στο 1^ο χρονικό σημείο είναι 38% και στο 2^ο χρονικό σημείο 76%.

Σχήμα 5.39: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed5 του επιπέδου ανάλυσης 5 των κυματομορφών AY στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M6

Στα σχήματα 5.40 και 5.41 οι ενέργειες Ed6 και Ed7 εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις στο κανάλι 1. Στο κανάλι 2 περισσότερο άξια λόγου είναι η Ed7 η οποία δίνει σημαντικές πτώσεις στα δύο χαρακτηριστικά χρονικά σημεία.

Σχήμα 5.40: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed6 του επιπέδου ανάλυσης 6 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Σχήμα 5.41: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed7 του επιπέδου ανάλυσης 7 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Αντίστοιχα για τις ενέργειες Ed8, Ed9 (σχ. 5.42, 5.43) μόνο το κανάλι 1 παρουσιάζει πτωτική συμπεριφορά.

Σχήμα 5.42: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed8 του επιπέδου ανάλυσης 8 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Σχήμα 5.43: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed9 του επιπέδου ανάλυσης 9 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ6

Τέλος η ενέργεια Ed10 (σχήμα 5.44) δεν παρουσιάζει αξία λόγου συμπεριφορά.

Σχήμα 5.44: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed9 του επιπέδου ανάλυσης 9 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M6

5.13 Υλικό C/C M8

Η συνάφεια για το υλικό C/C M8 (σχήμα 5.45) μειώνεται εντυπωσιακά κατά τη συνολική διάρκεια του πειράματος (96% στο κανάλι 1, 97,5% στο κανάλι 2). Ορόσημο αποτελεί το χρονικό διάστημα 550-670 sec του 3^{ου} κύκλου όπου παρατηρείται η πλέον σημαντική πτώση της συνάφειας.

Ο λόγος R_{rh} (σχήμα 5.46) έχει μια πολύ μικρή ποσοστιαία ανοδική τάση 2-3% η οποία θα θεωρηθεί όμως αμελητέα.

Η ροπή g_1 (σχήμα 5.47) στο χρονικό διάστημα 570-680 sec του 3^{ου} κύκλου σημειώνει πτώση περίπου 600% για να κυμανθεί στα ίδια επίπεδα μέχρι τελικής αστοχίας για το κανάλι 1. Στο κανάλι 2 αντίθετα παρατηρείται πτώση μόνο στο πολύ τελευταίο στάδιο της φόρτισης.

Σχήμα 5.45: Εξέλιξη της συνάφειας των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.46: Εξέλιξη της τιμής του λόγου Rph των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Η ενέργεια E_a (σχήμα 5.48) σημειώνει από τον 1^ο κύκλο πτώση στο κανάλι 1 με σημαντικότερη μεταβολή την πτώση πάνω από 95% στο 2^ο κύκλο. Αντίθετα η συμπεριφορά της ενέργειας E_a από το κανάλι 2 είναι μάλλον αδιάφορη.

Σχήμα 5.47: Εξέλιξη της ροπής $g1$ των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.48: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ea του επιπέδου ανάλυσης 0 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Η ενέργεια $Ed1$ (σχήμα 5.49) μετά τις διακυμάνσεις στον 1^ο κύκλο παρατηρούμε πτώση 97% στο κανάλι 1 και 99% στο κανάλι 2, στο

χρονικό διάστημα 260-300 sec του 2^{ου} κύκλου. Αντίστοιχα εξελίσσεται και η ενέργεια Ed2 (σχήμα 5.50).

Σχήμα 5.49: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed1 του επιπέδου ανάλυσης 1 των κυματομορφών AY στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M8

Σχήμα 5.50: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed2 του επιπέδου ανάλυσης 2 των κυματομορφών AY στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό M8

Οι ενέργειες Ed3 έως Ed6 (σχήματα 5.51-5.54) παρουσιάζουν επίσης πολύ σημαντική πτώση στο χαρακτηριστικό χρονικό διάστημα 270-400 sec του 2^{ου} κύκλου με την ενέργεια Ed4 να παρουσιάζει τις μικρότερες διακυμάνσεις και το περισσότερο ενδιαφέρον.

Σχήμα 5.51: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed3 του επιπέδου ανάλυσης 3 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.52: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed4 του επιπέδου ανάλυσης 4 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.53: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed5 του επιπέδου ανάλυσης 5 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.54: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed6 του επιπέδου ανάλυσης 6 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Τέλος οι ενέργειες Ed7-Ed10 (σχήματα 5.55-5.58) παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις και μη μονότονη συμπεριφορά.

Σχήμα 5.55: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed7 του επιπέδου ανάλυσης 7 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2)-υλικό Μ8

Σχήμα 5.56: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed8 του επιπέδου ανάλυσης 8 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.57: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed_9 του επιπέδου ανάλυσης 9 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

Σχήμα 5.58: Μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου Ed_{10} του επιπέδου ανάλυσης 10 των κυματομορφών ΑΥ στη διάρκεια του πειράματος (κανάλια 1 και 2) -υλικό Μ8

5.14 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στους πίνακες που ακολουθούν συνοψίζονται τα προηγούμενα αποτελέσματα. Στη 2^η στήλη η συνολική μεταβολή υπολογίζεται βάση της πρώτης και της τελευταίας τιμής της συνολικής διάρκειας του πειράματος. Η μεταβολή του κάθε κύκλου αντίθετα υπολογίζεται βάση της πρώτης και της τελευταίας τιμής στην αρχή και το τέλος κάθε κύκλου φόρτισης. Η διακύμανση χαρακτηρίζεται με τρεις διαβαθμίσεις: μικρή, μέτρια, υψηλή. Όλες οι μεταβολές είναι **πτωτικές** διαφορετικά μπαίνει το θετικό πρόσημο.

μέγεθος	Συνολική μεταβολή ch1/ch2	Μεταβολή 1 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 2 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 3 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 4 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 5 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Διακύμανση ch1/ch2
συνάφεια	60%/48%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	30%/10%	21%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ 30%	Μέτρια / Μέτρια
R_{pn}	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ροπή g1	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ea	99%/70%	33%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ 50%	98%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed1	99%/99%	Αμελητέα/ 72%	Αμελητέα/ 92%	99%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed2	99%/78%	55%/ Αμελητέα	15%/50%	80%/75%	67%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Μέτρια / Υψηλή
Ed3	99%/88%	27%/29%	32%/78%	86%/36%	70%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Μικρή / Μικρή
Ed4	99%/33%	24%/13%	25%/31%	91%/22%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Μέτρια / Υψηλή
Ed5	99%/88%	Αμελητέα / Αμελητέα	36%/52%	97%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Μέτρια / Υψηλή
Ed6	99%/90%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	99%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed7	99%/90%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	98%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed8	99%/91%	Αμελητέα / Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	98%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed9	99%/92%	50%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	95%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed10	99%/89%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	96%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – υλικό C/C M5

Με τη χαρακτηριστική σκίαση ξεχωρίζουν τα μεγέθη που εξαιτίας της εξέλιξης τους κατά την πειραματική διαδικασία, θεωρούνται τα πλέον ικανά για την παρακολούθηση της βλάβης.

μέγεθος	Συνολική μεταβολή ch1/ch2	Μεταβολή 1 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 2 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 3 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Διακύμανση ch1/ch2
συνάφεια	98%/96%	10%/10%	Αμελητέα/ Αμελητέα	44%/59%	Μικρή / Μικρή
Rpn	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ροπή g1	400%/300%	Αμελητέα/ Αμελητέα	250%/75%	Αμελητέα/ 370%	Υψηλή / Υψηλή
Ea	99%/+600%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ 83%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed1	99%/99%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	99%/99%	Υψηλή / Υψηλή
Ed2	99%/98%	Αμελητέα/ Αμελητέα	43%/25%	95%/87%	Μέτρια / Υψηλή
Ed3	99%/95%	Αμελητέα /+50%	Αμελητέα /+16%	92%/80%	Υψηλή / Υψηλή
Ed4	99%/86%	Αμελητέα /+16%	62%/58%	87%/68%	Μέτρια / Μέτρια
Ed5	99%/83%	19% /+36%	80%/ Αμελητέα	70%/88%	Μέτρια / Υψηλή
Ed6	99%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ +188%	Αμελητέα/ 70%	97%/86%	Υψηλή / Υψηλή
Ed7	99%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	75%/ Αμελητέα	95%/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed8	99%/ Αμελητέα	75% / Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	90%/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed9	99%/ Αμελητέα	65%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	95%/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed10	99%/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	96%/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή

Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – υλικό C/C M6

μέγεθος	Συνολική μεταβολή ch1/ch2	Μεταβολή 1 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 2 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Μεταβολή 3 ^{ου} κύκλου ch1/ch2	Διακύμανση ch1/ch2
συνάφεια	96%/98%	Αμελητέα/ 10%	Αμελητέα/ 17%	71%/87%	Μικρή / Μικρή
Rpn	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ροπή g1	850%/1900%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Αμελητέα/ Αμελητέα	300%/ Αμελητέα	Μέτρια / Υψηλή
Ea	44%/90%	55%/40%	86%/45%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed1	99%/99%	+150%/44%	35%/99%	99%/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed2	98%/98%	+133%/38%	77%/80%	75%/75%	Υψηλή / Υψηλή
Ed3	89%/84%	Αμελητέα/ Αμελητέα	88%/67%	Αμελητέα/ 62%	Μέτρια / Μέτρια
Ed4	80%/91%	Αμελητέα/ Αμελητέα	75%/86%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Μικρή / Μικρή
Ed5	98%/85%	+30%/18%	92%/81%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Μέτρια / Μέτρια
Ed6	96%/91%	Αμελητέα/ Αμελητέα	76%/63%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed7	90%/96%	68%/83%	Αμελητέα/ 70%	50%/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed8	91%/89%	62%/47%	67%/66%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed9	93%/90%	65%/33%	61%/51%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή
Ed10	85%/89%	43%/50%	78%/63%	Αμελητέα/ Αμελητέα	Υψηλή / Υψηλή

Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – υλικό C/C M8

5.13 Συμπεράσματα

Στόχος του 5^{ου} κεφαλαίου της διατριβής ήταν να προτείνει νέες καινοτόμες τεχνικές ανάλυσης των σημάτων ΑΥ και να εξαγάγει παραμέτρους ικανές να παρακολουθήσουν τη συσσώρευση της βλάβης στα υπό εξέταση υλικά. Στο υλικό M5 διεξάγονται πέντε πλήρεις κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης – επαναφόρτισης πριν το τελευταίο στάδιο φόρτισης μέχρι τη θραύση. Στις παραμέτρους που θεωρήθηκαν περισσότερο ικανές να παρακολουθήσουν τη βλάβη (συνάφεια, Ed_2 , Ed_3 , Ed_4 βλ. πίνακα 5.2) παρατηρείται εντυπωσιακή τοπική πτώση αρκετά νωρίς στο 2^ο και 3^ο κύκλο φόρτισης. Στον 3^ο κύκλο θεωρείται ότι ολοκληρώνεται η ρηγμάτωση της μήτρας με την εμφάνιση του χαρακτηριστικού ‘γόνατου’, την αλλαγή δηλαδή της κλίσης της ευθείας φόρτισης στο διάγραμμα φόρτισης – μετατόπισης.

Αντιστοίχως, στα υλικά M6 και M8 διεξάγονται τρεις πλήρεις κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης – επαναφόρτισης. Ικανοποιητικότερες παράμετροι αξιολογήθηκαν οι συνάφεια, ροπή g_1 , Ed_2 , Ed_4 , Ed_5 (βλ. πίνακα 5.3) για το υλικό M6 και οι συνάφεια, ροπή g_1 , Ed_2 , Ed_3 , Ed_4 , Ed_5 (βλ. πίνακα 5.4) για το υλικό M8. Σημαντική πτώση των ανωτέρω παραμέτρων παρατηρείται ήδη από το 2^ο κύκλο.

Η ολοκλήρωση λοιπόν της ρηγμάτωσης της μήτρας αποτελεί ορόσημο στην εξέλιξη της βλάβης στο υλικό C/C -ανεξαρτήτως ποιότητας της διεπιφάνειας- καθώς προκαλεί σοβαρές αλλαγές στις συνθήκες και το μέσο διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων ΑΥ.

Από την άποψη λοιπόν του μη καταστροφικού ελέγχου της δομικής ακεραιότητας του υλικού, είναι πολύ σημαντικός ο εντοπισμός του σημείου ολοκλήρωσης της διαδικασίας ρηγμάτωσης της μήτρας. Εφεξής το υλικό δεν κινδυνεύει απολύτως άμεσα, εισέρχεται όμως στο τελικό στάδιο συσσώρευσης της βλάβης όπου κυριαρχεί (όπως είδαμε και στο

κεφάλαιο 4) ο μηχανισμός αστοχίας των ινών κατά πρώτον και δευτερευόντως ο μηχανισμός των διεπιφανειακών αστοχιών στα όρια ίνας – μήτρας. Συνεπώς η τεχνική του ΑΥ με τις προτεινόμενες παραμέτρους μπορεί να παρακολουθήσει τη συσσώρευση της βλάβης εξαιτίας κυρίως της αστοχίας της μήτρας, προσφέροντας έτσι σημαντική γνώση για τη διαδικασία εξέλιξης της βλάβης στα υλικά αυτά.

Επιχειρώντας να σχολιάσουμε τις διαφοροποιήσεις των διεπιφανειών στα τρία υλικά C/C μπορούμε να παρατηρήσουμε την παρόμοια συμπεριφορά των υλικών M6 και M8 σε σχέση με το υλικό M5 συμπέρασμα που επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση του κεφαλαίου 4. Αξιοσημείωτη είναι η σαφώς μεγαλύτερη πτώση της συνάφειας και της ροπής g_1 στα υλικά M6 και M8 πάντα σε σχέση με το M5.

5.14 Βιβλιογραφία

1. **Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi**, Wavelet toolbox user's guide, Matlab 6
2. **Daubechies, I.**, "Ten lectures on wavelets", SIAM, 1992.
3. **Chui, C.K.**, "Wavelets: a tutorial in theory and applications", Academic Press, 1992.
4. **Chui, C.K.**, "An introduction to wavelets", Academic Press, 1992.
5. **Cohen, A., I. Daubechies, J.C. Feauveau**, "Biorthogonal basis of compactly supported wavelets", Comm. Pure Appl. Math. , vol. 45, pp 485-560, 1992.
6. **Cohen, A., I. Daubechies , B. Jawerth, P. Vial**, "Multiresolution analysis, wavelets and fast wavelet transform on an interval", CRAS Paris, Ser. A, t. 316, p. 417-421, 1993.
7. **Coifman, R.R., Y. Meyer, M.V. Wickerhauser**, "Wavelet analysis and signal processing", in *Wavelets and their applications*, M.B. Ruskai et al. (Eds.), pp. 153-178, Jones and Bartlett, 1992.
8. **Coifman, R.R., M.V Wickerhauser**, "Entropy-based algorithms for best basis selection", IEEE Trans. on Inf. Theory, vol. 38, 2, pp. 713-718, 1992.

- 9. Kahane, J.P., P.G. Lemarié,** "Fourier series and wavelets", Gordon and Breach Publishers, Studies in the Development of Modern Mathematics, vol 3, 1995.
- 10. Kaiser, G.,** "A friendly guide to wavelets", Birkhauser, 1994.
- 11. Mallat, S.,** "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", IEEE Pattern Anal. and Machine Intell., vol. 11, no. 7, pp 674-693, 1989.
- 12. Mallat, S.,** A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 1998.
- 13. Meyer, Y.,** "Ondelettes et opérateurs", Tome 1, Hermann Ed. (English translation: Wavelets and operators, Cambridge Univ. Press. 1993.)
- 14. Meyer, Y.,** "Les ondelettes. Algorithmes et applications", Colin Ed., Paris, 2nd edition, 1993 (English translation: "Wavelets: algorithms and applications", SIAM).
- 15. Meyer, Y., S. Roques,** "Progress in wavelet analysis and applications", Frontières Ed., 1993.
- 16. Strang, G., T. Nguyen,** "Wavelets and filter banks", Wellesley-Cambridge Press, 1996.

- 17. DeVore, R.A., B. Jawerth, B.J. Lucier,** "Image compression through wavelet transform coding", *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 38, 2, pp. 719-746, 1992.
- 18. Donoho, D.L.,** "Progress in wavelet analysis and WVD: a ten minute tour", in *Progress in wavelet analysis and applications*, Y. Meyer, S. Roques, pp. 109-128. Frontières Ed., 1993.
- 19. Donoho, D.L.,** "De-Noising by soft-thresholding", *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 41, 3, pp. 613-627, 1995.
- 20. Donoho, D.L., I.M. Johnstone,** "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage", *Biometrika*, vol 81, pp. 425-455, 1994.
- 21. Donoho, D.L., I.M. Johnstone,** "Ideal de-noising in an orthonormal basis chosen from a library of bases", *CRAS Paris*, t. 319, Ser I, pp. 1317-1322, 1994.
- 22. Donoho, D.L., I.M. Johnstone, G. Kerkycharian, D. Picard,** "Wavelet shrinkage: asymptopia", *Jour. Roy. Stat. Soc., series B*, vol. 57 no. 2, pp. 301-369, 1995.
- 23. Wickerhauser, M.V.,** "INRIA lectures on wavelet packet algorithms", *Proceedings ondelettes et paquets d'ondes*, 17-21 June, Rocquencourt France, pp 31-99, 1991.
- 24. Wickerhauser, M.V.,** "Adapted wavelet analysis from theory to software algorithms", A.K. Peters, 1994.

- 25. Antoniadis, A., G. Oppenheim,** "Wavelets and statistics", Lecture Notes in Statistics 103, Springer Verlag, Eds.1995.
- 26. Newland D.E.,** Random vibrations, spectral and wavelet analysis. Longman Scientific & Technical, Essex, England, 1993.
- 27. Suzuki H, Tetsuo K., Hayashi Y., Takemoto M. and Ono K.,** Wavelet transform of acoustic emission signals, J. of Acoustic Emission, Vol. 14, pp. 69-84, 1996.
- 28. Qi G.,** Wavelet-based AE characterization of composite materials, NDT&E International, Vol. 33, pp. 133-144, 2000.
- 29. Ni Q., Iwamoto M.,** Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 69, pp. 717-728, 2002.
- 30. Qi G., Barhorst A., Hashemi J. and Kamala G.,** Discrete wavelet decomposition of acoustic emission signals from carbon-fibre-reinforced composites, Composites Science and Technology, Vol. 57, pp. 389-403, 1997.
- 31. Loutas T.H., V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimenez and M. Pharaoh,** Damage evolution in center-holed Glass/Polyester composites under quasistatic loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms, Composites Science and Technology, Volume 66, Issue 10, August 2006, Pages 1366-1375
- 32. Chen C., Kovacevic R. and Jandgric D.,** Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of

6061 aluminum, J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 1383-1390, 2003.

33. R. R. Coifman, "Adapted multiresolution analysis, computation, signal processing and operator theory", in Proc. Int. Cong. Math., Kyoto, Japan, 1990, pp879-887

34. E. P. Serrano, M. A. Fabio, "Application of the wavelet transform to Acoustic Emission Signals Processing", IEEE Trans. On Signal Processing, vol.44, no.5, 1996, pp 1270-1275

35. C. E. Heil, D. F. Walnut, "Continuous and discrete wavelet transforms" SIAM Rev., vol.31, no.4, 1989, pp 628-666

36. H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, K. Ono, "Wavelet transform of acoustic emission signals", J. of Acoustic Emission, vol.14, no.2, 1996, pp 69-84

37. T. Kinjo, H. Suzuki, N. Saito, M. Takemoto, K. Ono, "Fracture-mode classification using wavelet transformed AE signals from a composite", J. of Acoustic Emission, vol.15, no.1-4, 1997, pp 19-32

38. Δ. Αγγέλης, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005

39. Z. YanPing, H. ShuHong, H. JingHong, S. Tao, L. Wei, "Continuous wavelet grey moment approach for vibration analysis of rotating machinery", Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 1202-1220

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συνολικά συμπεράσματα διατριβής

Τα σύνθετα υλικά C/C αποτελούν μια ερευνητική περιοχή υψηλού ενδιαφέροντος τις τελευταίες δεκαετίες. Η συσσώρευση και εξέλιξη της βλάβης κατά τη φόρτισή τους είναι σαφώς κρίσιμη για την εν γένει μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

Στην παρούσα εργασία δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι υλικών C/C με διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη διεπιφάνεια ίνας - μήτρας. Για να παρακολουθηθεί η εξέλιξη της βλάβης κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές του ακουστο-υπέρηχου (AY) και της ακουστικής εκπομπής (AE), δύο μέθοδοι γνωστοί στην ερευνητική κοινότητα ιδιαίτερος αυτή της ακουστικής εκπομπής.

Εξ' αρχής ο στόχος που τέθηκε ήταν η μέγιστη αξιοποίηση των δεδομένων που προσφέρουν οι δύο τεχνικές με ιδιαίτερη βαρύτητα στις τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων AE και AY και στην εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων.

Ξεκινώντας από την συμβατική επεξεργασία των κυματομορφών της AE, στο κεφάλαιο 3, παρατηρήθηκε ενεργειακή κυριαρχία των αρχικών κύκλων φόρτισης για το υλικό M5, αντίθετα απ' ότι συμβαίνει στα υλικά M6 και M8 όπου οι τελευταίοι δύο κύκλοι κυριαρχούν. Το γεγονός αυτό συνδέθηκε με την κυριαρχία φαινομένων ρηγμάτωσης της μήτρας στο υλικό M5 σε αντίθεση με την κυριαρχία φαινομένων αστοχίας των ινών στα υλικά M6 και M8.

Στο κεφάλαιο 4 προτάθηκε και εφαρμόστηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία αναγνώρισης προτύπων χωρίς επίβλεψη στα πειραματικά δεδομένα ΑΕ. Τα διανύσματα προτύπων με χαρακτηριστικά μεγέθη των κυματομορφών ΑΕ που δημιουργήθηκαν διαχωρίστηκαν επιτυχώς σε κλάσεις οι οποίες αντιστοιχήθηκαν στους βασικούς μηχανισμούς αστοχίας των υλικών. Οι μηχανισμοί αστοχίας και η χρονική εξέλιξη τους κατά τη διάρκεια των δοκιμών, προσφέρουν πολύ χρήσιμη εποπτεία για τη διαδικασία ανάπτυξης και εξέλιξης της βλάβης και για το πως αυτή διαφοροποιείται στον καθένα εκ των τριών τύπων υλικών C/C που δοκιμάστηκαν. Εντοπίζονται τα χρονικά σημεία που ενεργοποιείται ο κάθε μηχανισμού αστοχίας καθώς επίσης και σε ποια χρονικά διαστήματα δραστηριοποιείται περισσότερο ή λιγότερο έντονα. Καθίσταται δυνατή η σύγκριση των διαφορετικών μηχανισμών όσον αφορά την εντονότερη ή ασθενέστερη δραστηριότητά τους, την εξέλιξη τους κατά τη φόρτιση, τις περιοχές που κυριαρχούν, τα κρίσιμα σημεία καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος που εντείνεται σημαντικά η δραστηριότητά τους. Εντυπωσιακή είναι επίσης η διαφοροποίηση στην ενεργοποίηση και εξέλιξή τους ανάλογα με τον τύπο του υλικού.

Στο κεφάλαιο 5 προτείνονται καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας των κυματομορφών ΑΥ βασισμένες στο συνεχή και διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων, αλλά και συμβατικές όπως η συνάφεια και ο λόγος θετικών προς αρνητικά εμβαδά των κυματομορφών. Αναπτύσσονται μεγέθη ικανά να ακολουθούν τις μεταβολές του υλικού εξαιτίας της εσωτερικά αναπτυσσόμενης βλάβης στη δομή του. Αποδεικνύεται ότι μερικά από τα προτεινόμενα μεγέθη όπως ορισμένα ενεργειακά επίπεδα του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων, η ροπή g_1 , και η συνάφεια είναι ιδιαιτέρως αποτελεσματικά στην παρακολούθηση της βλάβης καθώς σημειώνουν σημαντικές μεταβολές σε κρίσιμους κύκλους φόρτισης των δοκιμίων και δη όταν ολοκληρώνεται η ρηγμάτωση της

μήτρας. Είναι ικανά συνεπώς να μας πληροφορήσουν για τη δομική ακεραιότητα των υπό εξέταση δοκιμών on-line, παράλληλα με τη δοκιμή. Καθίσταται συνεπώς δυνατός ο εντοπισμός κρίσιμων σταδίων όπως ο κορεσμός της ρηγμάτωσης της μήτρας που χαρακτηρίζει την εξέλιξη και συσσώρευση της βλάβης στα σύνθετα προηγμένα υλικά. Επιτυγχάνεται λοιπόν ένας εξ' αρχής σημαντικός στόχος αυτός της εύρεσης ποσοτικών δεικτών ικανών να παρακολουθούν την εξέλιξη της βλάβης στα υλικά αυτά.

Εν τέλει θα σταθούμε ιδιαίτερα στο γεγονός ότι αν και από την άποψη των μηχανικών ιδιοτήτων τους (τάση θραύσεως, παραμόρφωση θραύσεως) τα δοκίμια δεν έχουν ιδιαίτερες διαφορές (πρόκειται άλλωστε για το ίδιο υλικό κατά βάση), εντούτοις οι δύο μέθοδοι μη καταστροφικής παρακολούθησης που υιοθετήθηκαν και εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία, σε συνδυασμό με τις τεχνικές επεξεργασίας των κυματομορφών ΑΕ και ΑΥ που προτάθηκαν, προσφέρουν μια πολύ χρήσιμη σκοπιά παρατήρησης των εσωτερικών διεργασιών και των διαφορών στη διαδικασία συσσώρευσης της βλάβης των τριών τύπων C/C υλικών. Τόσο στα αποτελέσματα του 4^{ου} κεφαλαίου όσο και σε αυτά του 5^{ου}, είναι εντυπωσιακές οι διαφορές τόσο στην ενεργοποίηση και εξέλιξη των μηχανισμών αστοχίας, όσο και στην εξέλιξη και μεταβολή των διαφόρων ποσοτικών δεικτών παρακολούθησης της βλάβης. Υπερτονίζεται δηλαδή όχι μόνο η δυνατότητα των μεθόδων και των διαδικασιών ανάλυσης που προτάθηκαν στην παρακολούθηση και εξέλιξη της βλάβης, αλλά και η χρήση τους για τη σύγκριση και αξιολόγηση πανομοιότυπων υλικών και εν προκειμένω η αξιολόγηση τριών συνθέτων υλικών C/C με διαφορετικούς τύπους διεπιφάνειας (αγνώστων περαιτέρω πληροφοριών λόγω βιομηχανικού απορρήτου). Ανακεφαλαιώνοντας, η εφαρμογή των μεθόδων της ΑΕ και του ΑΥ σε συνδυασμό με τις τεχνικές επεξεργασίας που προτάθηκαν, μπορούν να

προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για την εξέλιξη των μηχανισμών αστοχίας στο υπό εξέταση υλικό, τη διαδικασία συσσώρευσης της βλάβης και γενικότερα για τη δομική του ακεραιότητα.

6.2 Επίλογος - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο ευρύτατο πεδίο του ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των συνθέτων υλικών με μη καταστροφικές μεθόδους και παράλληλη χρήση εξελιγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, ως απόλυτο ζητούμενο θεωρείται η έννοια της πρόβλεψης - πρόγνωσης. Η αντίστοιχη με τη θεωρία των Πάντων στην φυσική, το 'άγιο δισκοπότηρο' για τους ερευνητές που ασχολούνται με τα προηγμένα σύνθετα υλικά, είναι η μοντελοποίηση της διαδικασίας εξέλιξης της βλάβης υπό στοχαστική φόρτιση και η πρόγνωση της επερχόμενης αστοχίας. Φυσικά κάτι τέτοιο μπορεί να μην είναι καν εφικτό όπως αντιστοίχως εικάζεται και για τη θεωρία των Πάντων στην φυσική.

Για τους μηχανικούς όμως συχνά οι πειραματικές παρατηρήσεις έχουν περισσότερα αξία από τα μοντέλα. Σα συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να θεωρηθεί η επέκταση των δοκιμών σε κοπωτικές φορτίσεις, κάτι που παρεπιπτόντως ήδη σχεδιάζεται στο εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής. Φυσικά θα πρέπει να μελετηθεί μια γκάμα από διαφορετικά επίπεδα και ρυθμοί φόρτισης. Θα έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των μηχανισμών αστοχίας του υλικού αλλά και των δεικτών του 5^{ου} κεφαλαίου σε μια τέτοια δοκιμή. Να εξεταστεί για παράδειγμα αν μπορεί τόσο ξεκάθαρα όσο στην παρούσα εργασία να οριοθετηθεί το κρίσιμο για τη δομική ακεραιότητα του υλικού τέλος της ρηγμάτωσης της μήτρας.

Επιπλέον στο πεδίο της επεξεργασίας σήματος νέες τεχνικές και νέοι δείκτες υποψήφιοι για την παρακολούθηση της βλάβης μπορούν να

προταθούν είτε βασιζόμενοι στη θεωρία του μετασχηματισμού κυματιδίων είτε όχι. Μια ενδιαφέρουσα συνέχιση της παρούσας εργασίας μπορεί να κινηθεί στην κατεύθυνση του συνδυασμού δεδομένων-αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών μέσω μηχανισμού διάχυσης δεδομένων. Το βέβαιο είναι ότι το πεδίο είναι διαρκώς εξελισσόμενο γεμάτο προκλήσεις, τόσο σε επίπεδο τεχνικών μη καταστροφικών ελέγχων όσο και σε επίπεδο μεθοδολογιών επεξεργασίας σημάτων.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο Θεόδωρος Χ. Λούτας γεννήθηκε στις 7 Αυγούστου του 1979 στην Πάτρα. Το 1997 εισήχθη στη σχολή Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Αποφοίτησε τον Ιούλιο του 2002 με άριστα (βαθμός πτυχίου 9.16) δεύτερος σε σειρά στην Πολυτεχνική σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών. Κατά τη διάρκεια των σπουδών του βραβεύθηκε πολλές φορές τόσο από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών όσο και από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.

Τον Οκτώβριο του 2002 εισήχθη στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών με στόχο την απόκτηση διδακτορικού διπλώματος.

Στους χώρους του εργαστηρίου Τεχνικής Μηχανικής υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Βασίλη Κωστόπουλου εκπόνησε τη διδακτορική του διατριβή. Παράλληλα επί τρία συναπτά έτη (2003-2006) διεξήγαγε τις φροντιστηριακές ασκήσεις των μαθημάτων Μηχανική-Στατική και Μηχανική-Δυναμική στο τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών. Το ίδιο διάστημα (2003-2006) δραστηριοποιήθηκε διδακτικά και στο τμήμα Μηχανολογίας του ΑΤΕΙ Πατρών διεξάγοντας εργαστηριακές ασκήσεις στα μαθήματα Μηχανική Ρευστών I, II, Υδροδυναμικές Μηχανές και Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως.

Συμμετείχε στη συγγραφή και εκτέλεση 3 Ευρωπαϊκών και 3 Εθνικών ερευνητικών προγραμμάτων. Στα ερευνητικά του ενδιαφέροντα εντάσσονται η μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών, η εφαρμογή μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου για την αξιολόγηση της βλάβης σε προηγμένα σύνθετα υλικά αλλά και σε περιστρεφόμενα συστήματα (πχ κιβώτια ταχυτήτων) για διαγνωστικούς σκοπούς και η εξελιγμένη ανάλυση ψηφιακών σημάτων.

Έχει συμμετάσχει σε 12 συνέδρια παρουσιάζοντας 10 εργασίες και είναι συγγραφέας 9 επιστημονικών εργασιών σε έγκριτα διεθνή περιοδικά.